

OPĆI PROGRAM ZA SIMULACIJU SKLOPOVA ENERGETSKE  
ELEKTRONIKE

Branko Kovač  
"RADE KONČAR" - OOUR ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT  
ZAGREB

SAŽETAK

Opisan je program kojim se mogu simulirati sklopovi energetske elektronike sastavljeni od ventila (dioda i tiristora), otpornika, prigušnica, kondenzatora, transformatora, te naponskih i strujnih izvora. U programu se sklop koji se sastoji od linearnih i nelinearnih komponenata, linearizira po intervalima i riješava kao linearna mreža metodom konturnih struja. Za integraciju sistema diferencijalnih jednadžbi koristi se metoda Runge-Kutta.

A GENERAL DIGITAL COMPUTER SIMULATION PROGRAMME  
FOR POWER ELECTRONICS CIRCUITS

A program for simulation of power electronics circuits is described in this paper. The program includes networks consisting of diodes, thyristors, resistors, inductances, capacitors voltage and current sources. During a certain period of time (intervals) nonlinear circuit components become automatically linearized, and then circuits are being solved like a linear networks by means of the mesh current method. The Runge-Kutta method is used for integration of linear differential equations system.

UVOD

Valne oblike napona i struja u sklopovima energetske elektronike možemo naći analitički ili numerički. U jednom i drugom slučaju nalaženje valnih oblika odvija se u dvije nezavisne etape:

1. matematičko opisivanje sklopa odnosno postavljanje jednadžbi koje opisuju sklop,
2. rješavanje jednadžbi.

Pri analitičkom rješavanju intervali vodjenja odnosno nevodjenja pojedinih ventila moraju biti unaprijed poznati. Da bi se dobile što jednostavnije jednadžbe ventili se nadomještaju idealnim sklopkama koje su uklopljene ako je ventil u stanju vodjenja odnosno isklopljene ako je ventil u stanju nevodjenja. Za svaki interval postavlja se sistem jednadžbi čijim rješavanjem dobijemo valne oblike struja i napona. Sukcesivnim rješavanjem, interval po interval, dolazimo

do jednadžbi koje opisuju rad sklopa.

Pri numeričkom rješavanju jednadžbe koje opisuju sklop u svakom pojedinom intervalu se automatski postavljaju po zadanom algoritmu. Zbog toga nije potrebno te intervale unaprijed poznavati. Pošto se intervali vodjenja unaprijed ne poznaju, potrebno je diferencijalne jednadžbe integrirati korak po korak i nakon svakog koraka integracije ispitati stanje vodjenja svakog ventila. Ukoliko dodje do promjene stanja vodjenja nekog ventila, treba utvrditi trenutak u kojem je došlo do promjene, odrediti početne uvjete na mjestu promjene i zatim izvršiti promjene u sistemu jednadžbi tako da one odgovaraju novonastalom stanju.

Koja od metoda će biti primijenjena ovisi o konkretnom slučaju. U koliko je sklop jednostavniji i poznaju se intervali vodjenja te je moguće naći analitička rješenja primjenjivat će se analitička metoda rješavanja. Ako je sklop složen i ima previše jednadžbi koje bi trebalo simultano rješavati ili se ne poznaju intervali vodjenja u sklopu, tada se primjenjuje numerička metoda.

#### MATEMATIČKI OPIS SKLOPOVA

Jednadžbe kojima opisujemo ponašanje sklopa postavljamo korištenjem metode konturnih struja. Sistem diferencijalnih jednadžbi kojim se računa vremenski oblik napona i struja može se postaviti ako poznamo strukturu mreže i vrijednosti komponenti. Napon i struja svake grane povezani su izrazom

$$U_g = -e_g + R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + S \cdot \int i \cdot dt \quad (1)$$

gdje su

$U_g$  - vektor napona grana

$e_g$  - vektor naponskih izvora u granama

$R$  - matrica otpora grana

$L$  - matrica induktiviteta grana

$S$  - matrica recipročnih vrijednosti kapaciteta grana

$i$  - vektor struje grana

Matrice  $R$  i  $S$  su dijagonalne matrice, a matrica  $L$  može sadržavati elemente različite od nule i izvan dijagonale. Tim se elementima opisuje medjuinduktivna (transformatorska) veza medju granama.

Sistem diferencijalnih jednadžbi (1) je sistem drugog reda i može se prevesti u sistem prvog reda uvodjenjem vektora naboja grana  $q = \int i \cdot dt$ .

$$U_g = -e_g + R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + S \cdot q \quad (2)$$

$$\frac{dq}{dt} = i \quad (3)$$

Da bi se dobio sistem jednađbi koje su linearno nezavisne sistem jednađbi (2) se množi s lijeva sa spojnom matricom  $A$ . Koristeći  $A \cdot U_g = 0$  (2 Kirchoffov zakon),  $i = A^T i_m$  i  $q = A^T q_m$  sistem se transformira u oblik

$$0 = -A \cdot e_g + A \cdot R \cdot A^T \cdot i_m + A \cdot L \cdot A^T \frac{di_m}{dt} + A \cdot S \cdot A^T \cdot q_m \quad (4)$$

$$\frac{dq_m}{dt} = i_m \quad (5)$$

Poslije uvođenja matrica petlji

$$R_m = A \cdot R \cdot A^T \quad S_m = A \cdot S \cdot A^T$$

$$L_m = A \cdot L \cdot A^T$$

i prevodjenja sistema jednađbi (4) u normalnu ili Košijevu formu dobijaju se jednađbe:

$$\frac{di_m}{dt} = -L_m^{-1} (R_m \cdot i_m + S_m \cdot q_m - A \cdot e_g) \quad (6)$$

$$\frac{dq_m}{dt} = i_m$$

Primjenjujući zakon distribucije i asocijacije za matrice sistem prelazi u oblik kod kojeg su razdvojeni konstantni članovi od članova koji su funkcija vremena

$$\frac{di_m}{dt} = -(L_m^{-1} \cdot R_m) \cdot i_m(t) - (L_m^{-1} \cdot S_m) \cdot q_m(t) + (L_m^{-1} \cdot A) \cdot e_g(t) \quad (7)$$

$$\frac{dq_m}{dt} = i_m(t)$$

Uvođenjem matrica

$$ALR = L_m^{-1} \cdot R_m \quad AP = L_m^{-1} \cdot A$$

$$ALC = L_m^{-1} \cdot S_m$$

dobiva se oblik pogodan za numeričku integraciju

$$\frac{di_m}{dt} = -ALR \cdot i_m(t) - ALC \cdot q_m(t) + AP \cdot e_g(t) \quad (8)$$

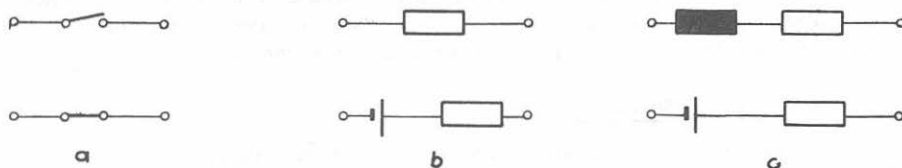
$$\frac{dq_m}{dt} = i_m(t)$$

Integracija ovog sistema jednađbi vrši se Runge-Kutta metodom.

### MODEL TIRISTORA I DIODA

Za potrebe simulacije sklopova energetske elektronike tiristore i diode dovoljno je opisati sa dva karakteristična stanja: stanje vodjenja i stanje nevodjenja. Pojave koje se javljaju prilikom prelaska iz stanja vodjenja u stanje nevodjenja i obratno nisu od interesa ako se promatra rad sklopa. Njih se uzima u obzir prilikom odabiranja zaštitnih krugova.

U simulacijskim programima za nadomještanje tiristora i dioda koriste se tri nadomjesne sheme:



Sl. 1.

U nadomjesnoj shemi 1.a. ventili se nadomještaju idealnim sklopkama koje su otvorene ako je ventil u stanju nevodjenja i zatvorene ako je ventil u stanju vodjenja. Nedostaci ovog nadomještanja su:

1. problemi koji nastaju u programiranju zbog stalne promjene grafa mreže (ubacivanje i izbacivanje iz razmatranja grana ovisno o stanju vodjenja ventila),
2. neke mreže se raspadaju u nepovezane dijelove ako izbacujemo grane koje sadrže ventile u stanju nevodjenja.

Ako primijenimo nadomjesnu shemu prikazanu na slici 1.b. tada prevazilazimo ove nedostatke jer graf mreže ostaje nepromijenjen bez obzira na stanje vodjenja ventila. Problem na koji bi naišli primjenom ovakove nadomjesne sheme je veliko povećanje vremena računanja. Korak integracije kod Runge-Kutta metode treba biti za red veličine manji od najmanje vremenske konstante u krugu. Najmanje vremenske konstante  $L/R$  javljale bi se u onim petljama koje sadrže velike otpore kojima nadomještamo ventile u stanju nevodjenja. Da bi to izbjegli u seriju sa velikim otporom dodajemo veliki induktivitet i time dobivamo nadomjesnu shemu 1.c. Dodavanjem induktiviteta nismo poremetili strujno-naponske odnose u sklopu pošto su struje koje teku kroz veliki otpor male.

Stanje vodjenja ventila određuje logička varijabla  $S$  po izrazu

$$S = U \cdot Q + I \cdot BS$$

gdje je

- |                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| $U$ - napon na ventilu | 0 - napon je negativan |
|                        | 1 - napon je pozitivan |
| $Q$ - impulsi na geitu | 0 - impulsi ne postoje |
|                        | 1 - impulsi postoje    |

- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| I - struja kroz ventil         | 1 - struja u propusnom smjeru               |
|                                | o - struja u nepropusnom smjeru             |
| BS - prijašnje stanje vodjenja | 1 - ventil je prije bio u stanju vodjenja   |
|                                | o - ventil je prije bio u stanje nevodjenja |
| S - stanje vodjenja ventila    | 1 - ventil u stanju vodjenja                |
|                                | o - ventil u stanju nevodjenja              |

Logički uvjeti se tako određuju da ventil prelazi iz stanja nevodjenja u stanje vodjenja kad napon na njemu postane pozitivan i postoji impuls na geitu, a iz stanja vodjenja prelazi u stanje nevodjenja kad struja padne na nulu. Trenutak prolaska struje kroz nulu određuje se Njutnovom metodom iteracije pošto Runge-Kutta metodom dobivamo struje grane i njihove derivacije.

### GLAVNI PROGRAM

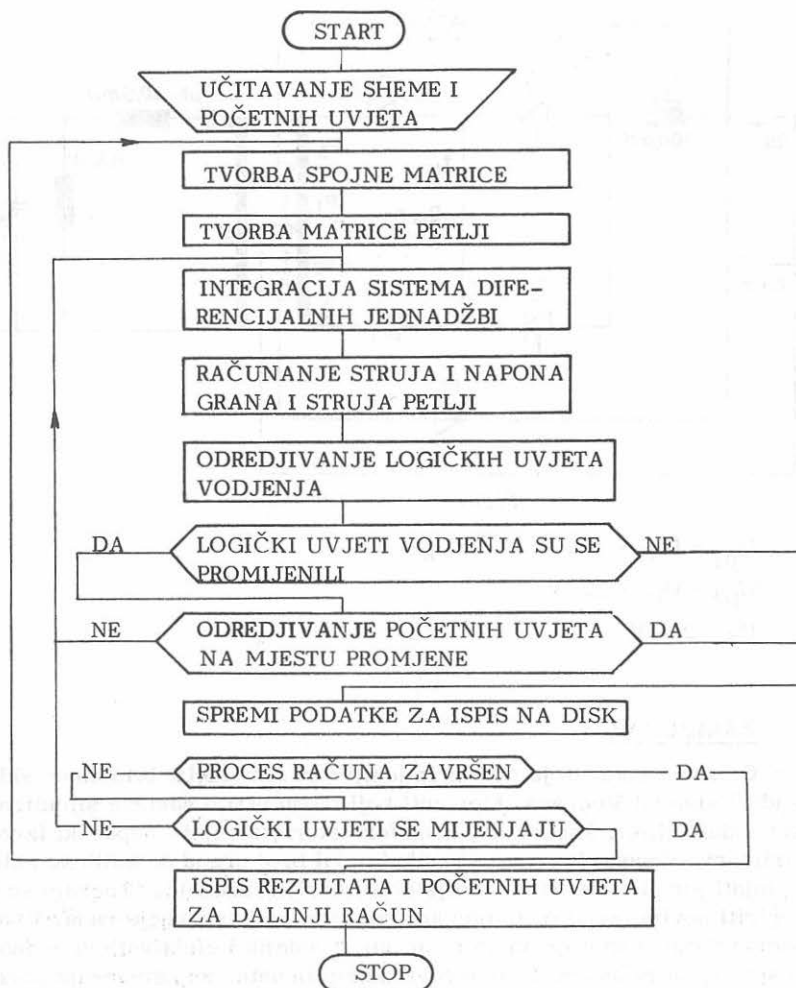
Dijagram toka glavnog programa dan je na slici 2.

Na početku glavnog programa pozivaju se potprogrami za učitavanje. Podaci se učitavaju sa kartica. Može se analizirati bilo koji sklop u čijem se sastavu nalaze otpori, induktiviteti, kapaciteti, strujni i naponski izvori, transformatori, diode i tiristori. Sklop koji se analizira može imati maksimalno 50 grana. Osim podataka mreže za analizu je potrebno učitati i početne uvjete, a to su struje i naboji grana. Ako simuliramo start uređaja tada sve struje i svi naboji grana mogu biti jednaki nuli.

Nakon učitavanja podataka o sastavu grana i početnih uvjeta tvori se spojna matrica. Prilikom tvorbe spojne matrice petlje se biraju tako da grane kroz koje teku jako male struje budu nezavisne grane, a struje tih grana struje petlji. To je potrebno zbog toga da se male struje (zaporne struje kroz ventile) ne računaju kao suma i razlika velikih struja (struje tereta) jer bi pogreška zaokruženja bila približno jednaka tim malim strujama. Do pogreške zaokruženja dolazi jer računalo radi sa konačnim brojem točnih znamenki. Petlje se biraju tako da se pri izboru grana stabla u sastav stabla prvo biraju grane sa manjim otporom, a zatim one sa većim. Na taj način grane kroz koje teku velike struje imaju prioritet pri ulasku u sastav stabla pred granama kroz koje teku male struje.

Sa određenom spojnom matricom računaju se matrice petlji ALR i ALC kako je to opisano u matematičkom opisu. Spojna matrica i matrice petlji računaju se svaki put kad se promjeni stanje vodjenja nekog ventila.

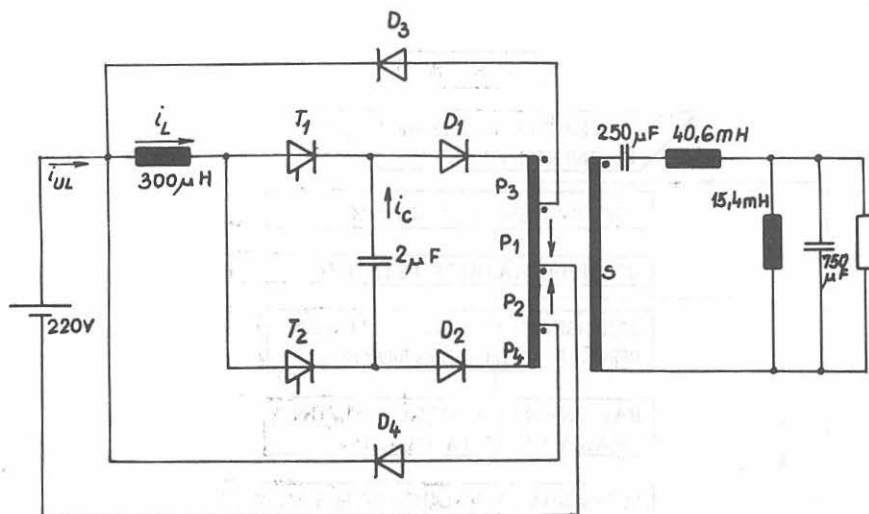
Pošto su određene matrice petlji može se prići integraciji sistema diferencijalnih jednadžbi. Rezultat integracije su struje petlji i derivacije struje petlji iz kojih se računaju struje i naponi grana, a zatim se određuju logički uvjeti vodjenja. Ako se logički uvjeti ne mijenjaju rezultati se spremaju za ispis i ide se u daljnju integraciju. Ako se logički uvjeti vodjenja mijenjaju odredi se trenutak u kojem se dešava promjena, zatim se odrede početni uvjeti u trenutku promjene koji se spremaju za ispis i ide se na tvorbu nove spojne matrice i matrica petlji. Kad se proračuna željeni interval ispisuju se rezultati i početni uvjeti za nastavak računa.



SI. 2.

NUMERIČKI PRIMJER

Slijedećim primjerom ilustrira se upotreba programa za simulaciju sklopova energetske elektronike. Slikom 3. dana je shema jednofaznog izmjenjivača sa srednjom točkom koji ima povratne diode spojene na odcjepe transformatora. Regulacija napona vrši se čoperom u istosmjernom krugu. Pošto nas zanimaju samo strujno-naponski odnosi u izmjenjivaču čoper nije potrebno simulirati. Na slici 4 prikazane su struje u komutaciji.



sl.3.

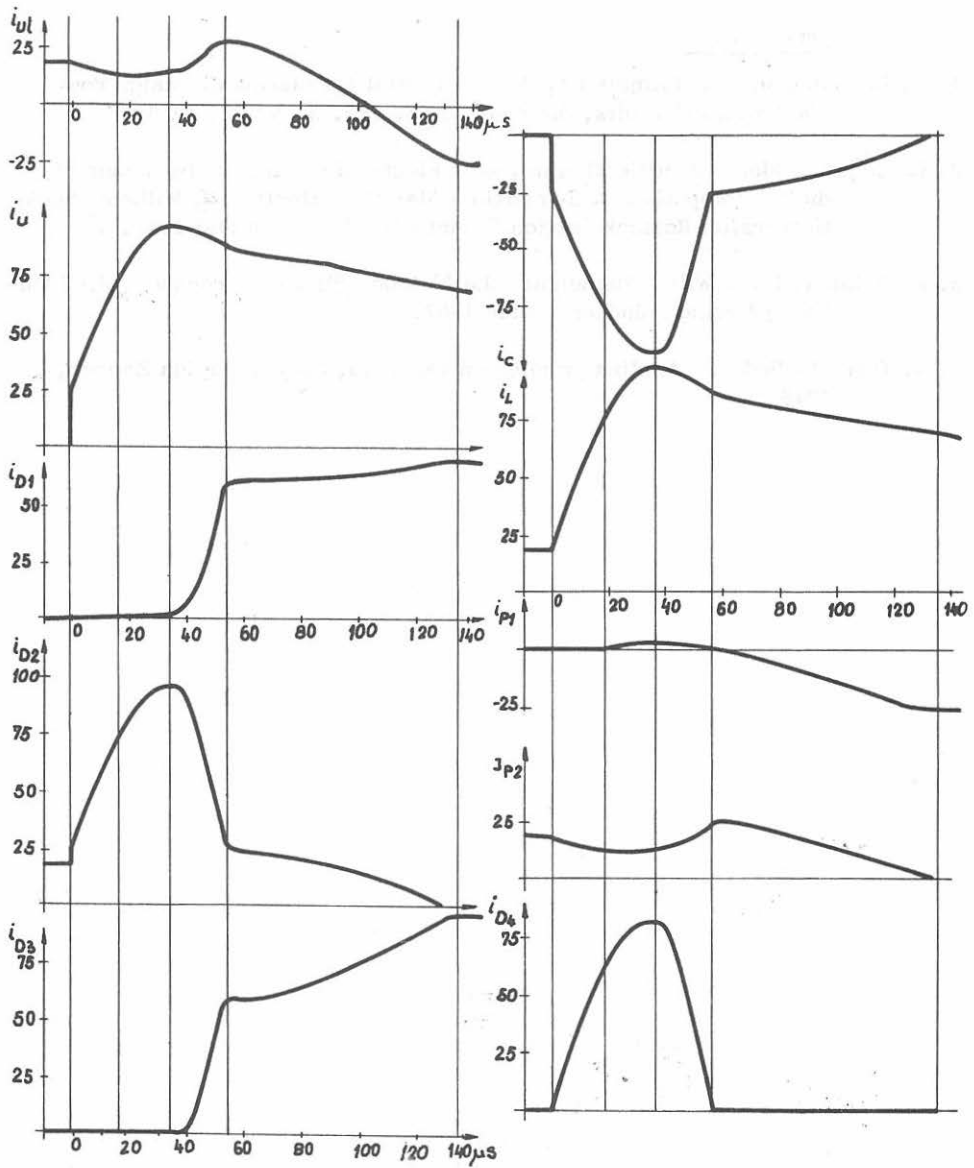
$$U_{p1} = U_{p2} = 198 \text{ V} \quad U_k = 2 \%$$

$$U_{p3} = U_{p4} = 22 \text{ V}$$

$$U_s = 256 \text{ V}$$

### ZAKLJUČAK

Opisani program je lako primjenljiv za simulaciju bilo kojeg sklopa koji ne sadrži više od 50 grana. Elementi koji mogu biti u sastavu simuliranog sklopa su: induktiviteti, kapaciteti, transformatori, strujni i naponski izvori, diode i tiristori. Moguće je povećati maksimalni broj grana od kojih se sklop smije sastojati jer nije iskorištena cijela memorija računala. Program se lako može proširiti novim potprogramima koji mu proširuju područje rada. Tako npr. možemo dodati potprogram za računanje srednjih i efektivnih vrijednosti struja i napona, za računanje Fourierovih koeficijenata, za zatvaranje povratne veze, za simulaciju sklopki.



LITERATURA

1. H. Eisenack and H. Hofmeister, Use of Digital Simulation in Design Power Electronics Circuits, Siemens F. uE., Bd. 3, Nr. 5, 1974.
2. I. Flegar, Mode Identification in Power Electronics Circuits by means of digital computer, 2. Symposium Maritime Electronic, Wilhem-Pieck-Universität Rostock Sektion Technische Elektronik Mai 1977.
3. A. Ralston, M.S. Wilf, Mathematische Methode für Digitalrechner, R.Oldenbourg Verlag München - Wien 1967.
4. S. Turk, L. Budin, Analiza primjenom računala, Školska knjiga Zagreb, 1978.