

ANALIZA I REALIZACIJA TRANZISTORSKOG PREKIDAČA ZA 250 V, 40 A

Laslo NADJ, Milan NIKOLIĆ, Nandor BURANJ *

ANALYSIS OF A BJT POWER SWITCH FOR 250 V, 40 A

Rezime U ovom radu detaljno je analiziran i ispitan tranzistorski prekidač predviđen za rad u čoperu sa pretežno omskim potrošačem. Može da uključuje i isključuje struju od 40 A pri naponu napajanja 250 V. Prekidač je realizovan Darlingtonovom spregom tranzistora sa kolom za uobličavanje radne karakteristike. Kao pobudno kolo korišćen je jednostavan impulsni pojačavač po literaturi firme Thomson-CSF, koji je detaljno analiziran, ispitan i prilagodan konkretnim zahtevima.

Izvršena je računarska analiza prekidača uz pomoć programa SPICE koji koristi Gummel-Poon-ov model tranzistora. Prethodno je izvršena estimacija parametara.

Dobijeni rezultati su upoređeni sa merenim vrednostima. Dobilo se dobro slagane rezultata.

Synopsis A BJT power switch for chopper application with mostly resistive load is analysed in this paper. It is suitable to turn on and off current pulses up to 40 A with supply voltage up to 250 V. There is a BJT Darlington configuration with switching-aid circuit used. A simple pulse amplifier known from Thomson-CSF application note is used as driver circuit. It is analysed and investigated in details.

Program SPICE is used in analysis. It uses Gummel-Poon model of BJT-s. Model parameters are estimated first.

Calculated results are in good agreement with measured values.

* Fakultet Tehničkih Nauka Novi Sad
Institut za energetiku i elektroniku
Fruškogorska 11, 21000 NOVI SAD

1. UVOD

U kolima energetske elektronike često je potrebno realizovati snažne prekidače. Za tu svrhu još uvek se dosta koriste bipolarni tranzistori. Realizovan je snažan prekidač sa Darlingtonovom spregom tranzistora. Prekidač je galvanski izolovan od kola upravljačke elektronike. Impulsni pojačavač po [1], prilagođen za konkretne zahteve, ima sledeće interesantne mogućnosti i osobine:

- jednostavan je;
- lako može da se pobuduje preko optokoplera;
- obezbeđuje rad izlaznih tranzistora izvan duboke saturacije;
- merenjem napona na kolektoru izlaznih tranzistora isključuje ih u slučaju porasta napona iznad predviđenog limita (na primer zbog strujnog preopterećenja);
- prilikom uključivanja prekidača ako se izlazni tranzistori ne uključe u predviđenom vremenu automatski se prelazi na režim isključenja, bez obzira na ulazni, komandni signal.

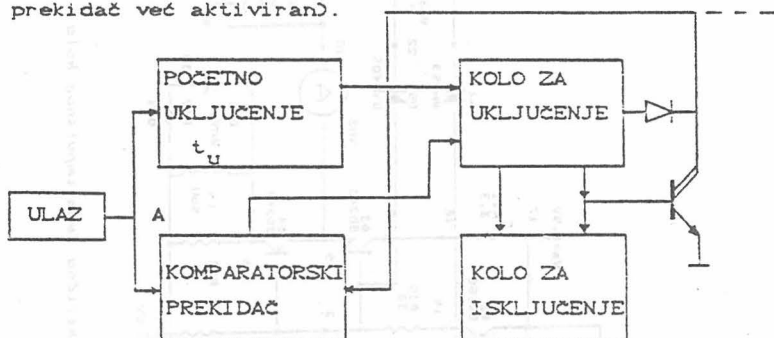
Ovakvo koncipirano impulsno kolo obezbeđuje maksimalnu zaštitu izlaznih tranzistora čak i bez lokalne strujne zaštite. Povoljno je za primene gde takva strujna zaštita nije jednostavno izvodljiva, na primer u slučaju korišćenja dvostrukih "vertikalnih" tranzistorских modula, gde je emiter jednog tranzistora direktno vezan za kolektor drugog. Kolo je ispitano simulacijom na računaru programom SPICE i optimizirano za korišćenu Darlingtonovu vezu tranzistora. Eksperimentalno su proverene postignute performanse.

2. IMPULSNO KOLO

Na slici 1. data je blok šema impulsnog kola (pobudnog kola za snažan Darlington).

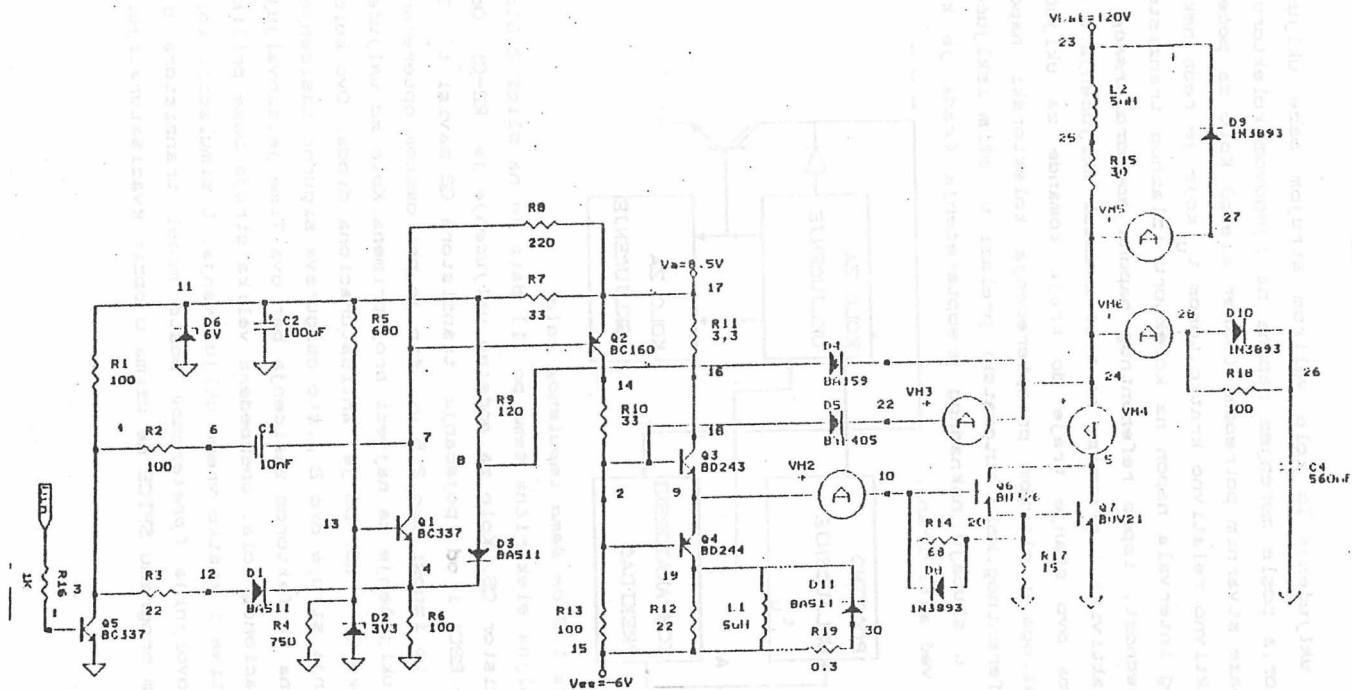
Ulaz impulsnog kola prilagođava ulazni komandni signal za uključivanje i isključenje Darlington tranzistora potrebama samog impulsnog kola. To je jedan prekidač koji u slučaju uključivanja kratko spaja tačku A na masu. Ako nema potrebe za galvanskim odvajanjem, to može biti tranzistorски prekidač za struju reda 0.1 A dok u slučaju galvanskog odvajanja tranzistoru prethodi optokopler. Po nailasku komande za uključivanje reaguje kolo za početno uključivanje koje aktivira snažno

kolo za uključenje. To kolo velikom strujom baze uključuje izlazni tranzistor, a posle merenjem napona na njegovom kolektoru prilagodava struju baze stvarnim potrebama (Baker klemp). Kolo za početno uključenje je aktivno relativno kratko, tokom t_u koje je reda nekoliko μs . Ako tokom tog intervala napon na kolektoru izlaznog tranzistora padne na nisku vrednost, ispod referentnog napona komparatorskog prekidača, to kolo se aktivira i preuzima na sebe zadatak uključjenja. U normalnim okolnostima ovo stanje traje do kraja komande za uključjenje. Ako iz nekih razloga, u glavnom preopterećenja kolektorski napon ne padne ispod referentnog, kolo automatski prelazi u režim isključenja. Isto se dešava i u slučaju naknadnog preopterećenja (kada je komparatorski prekidač već aktiviran).



Slika 1. Blok šema impulsnog kola

Detaljna električna šema po [1] data je na slici 2. Ulaz predstavlja tranzistor Q5. Kolo za početno uključjenje je R2-C1. Od vremenske konstante R2C1 i od pojačanja tranzistora Q2 zavisi t_u . Za odabrane vrednosti to iznosi oko 2.5 μs , što je pri omskom opterećenju dovoljno vreme za uključjenje za najveći broj primena. Kolo za uključjenje čine elementi oko Q2 i Q3. D5 je antisaturaciona dioda. Ovo kolo ima mogućnost davanja struje oko 2 A, što osigurava sigurno zasićenje i najgoreg Darlingtona sa faktorom zasićenja bar dva. Time je, zahvaljujući uticaju antisaturacionog kola, obezbedena velika struja baze prilikom uključivanja, pa time i kratko vreme uključivanja. U simulaciji kola situacija je još povoljnija (preterano) pošto model tranzistora u korišćenom korišćenom programu SPICE ne uzima u obzir kvazisaturaciju. Kolo za is-



Slika 2. Detaljna električna šema impulsnog kola

ključenje je tranzistor Q4 i elementi oko njega. Otpornik R12 određuje početnu vrednost negativne struje baze Darlingtona, a induktivnost L1 strminu daljeg rasta te struje tokom isključivanja tranzistora.

Komparatorski prekidač sastavljen je od strujnog prekidača Q1 i diodnog kola D3-D4-R9. Referentna dioda D2 određuje prag reagovanja ovog kola. Ako napon na kolektoru izlaznih tranzistora nije dovoljno nizak, D3 je provodna i struja otpornika R9 održava napon emitera Q1 na visokoj vrednosti. Taj tranzistor može da provede samo ako su i D1 i D3 zakočeni. Prvi zahtev je zadovoljen samo u slučaju prisutne komande za uključenje. Drugi zahtev je zadovoljen ako je izlazni tranzistor provodan blizu saturacije. Simulacijom je određena potrebna vrednost probojnog napona D2 i otpornosti R6.

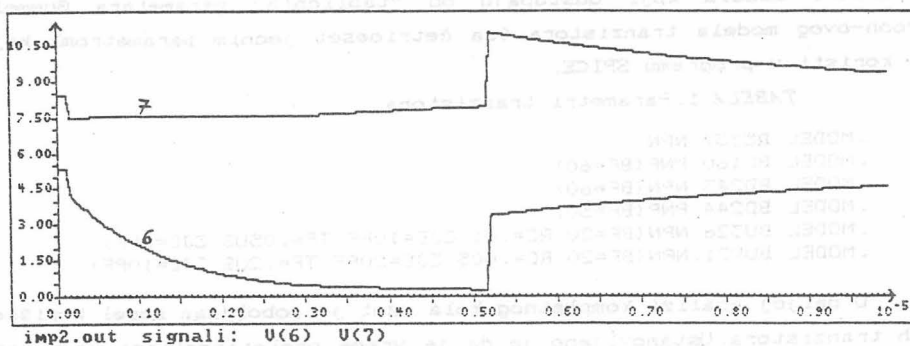
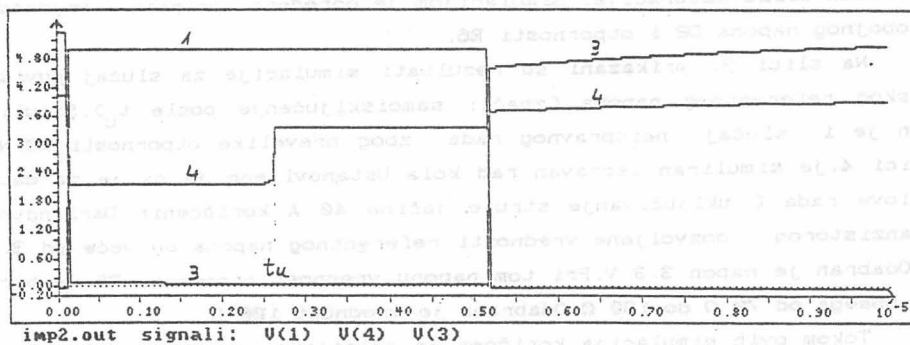
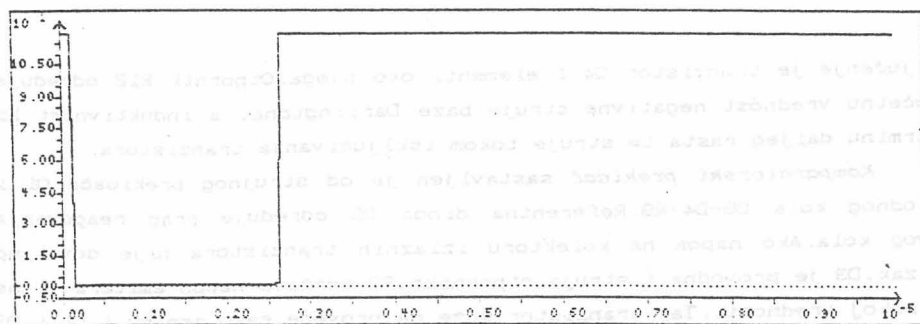
Na slici 3. prikazani su rezultati simulacije za slučaj suviše niskog referentnog napona (znači: samoisklučenje posle t_U). Simuliran je i slučaj neispravnog rada zbog prevelike otpornosti R6. Na slici 4. je simuliran ispravan rad kola. Ustanovljeno je da je za date uslove rada (uključivanje struje jačine 40 A korišćenim Darlington tranzistorom) dozvoljene vrednosti referentnog napona su veće od 3.1 V. Odabran je napon 3.3 V. Pri tom naponu vrednost otpornika R6 se bira iz opsega od 70 Ω do 130 Ω . Odabrana je vrednost 100 Ω .

Tokom ovih simulacija korišćen je relativno skroman model izlaznih tranzistora, radi provere samog impulsnog kola. U tabeli 1. dati su parametri modela koji odstupaju od "tabličnih" parametara Gummel-Poon-ovog modela tranzistora (sa četrdeset jednim parametrom) koji se koristi u programu SPICE.

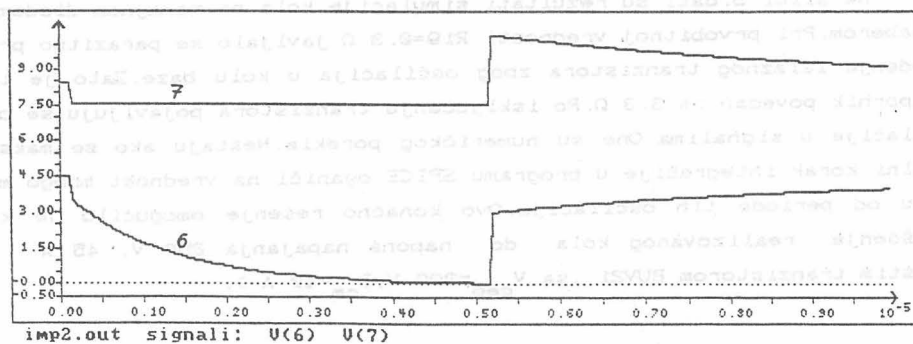
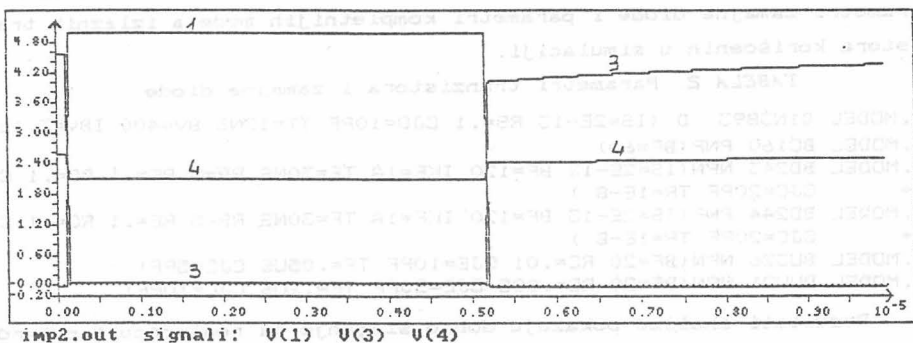
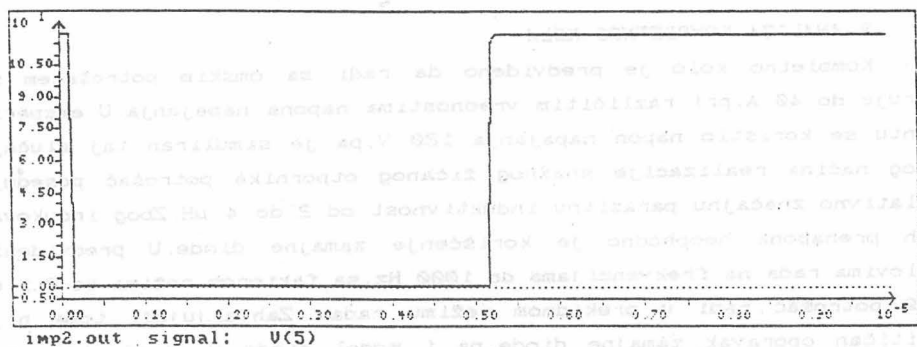
TABELA 1. Parametri tranzistora

```
.MODEL BC337 NPN
.MODEL BC160 PNP(BF=60)
.MODEL BD243 NPN(BF=60)
.MODEL BD244 PNP(BF=50)
.MODEL BU326 NPN(BF=20 RC=.01 CJE=10PF TF=.05US CJC=5PF)
.MODEL BUV21 NPN(BF=20 RC=.005 CJE=20PF TF=.2US CJC=10PF)
```

U daljoj analizi kompletnog kola uzet je poboljšani model korišćenih tranzistora. Ustanovljeno je da je vreme preletanosilaca kroz bazu TF za tranzistor BUV21 bar deset puta kraće nego u prethodnoj tabeli, a relativna sporost Darlingtona potiče od pobudnog tranzistora.



Slika 3. Slučaj samoisključivanja zbog previše niskog referentnog napona



Slika 4. Slučaj ispravnog rada ($V_R=3.3\text{ V}$, $R_6=100\ \Omega$)

3. ANALIZA KOMPLETNOG KOLA

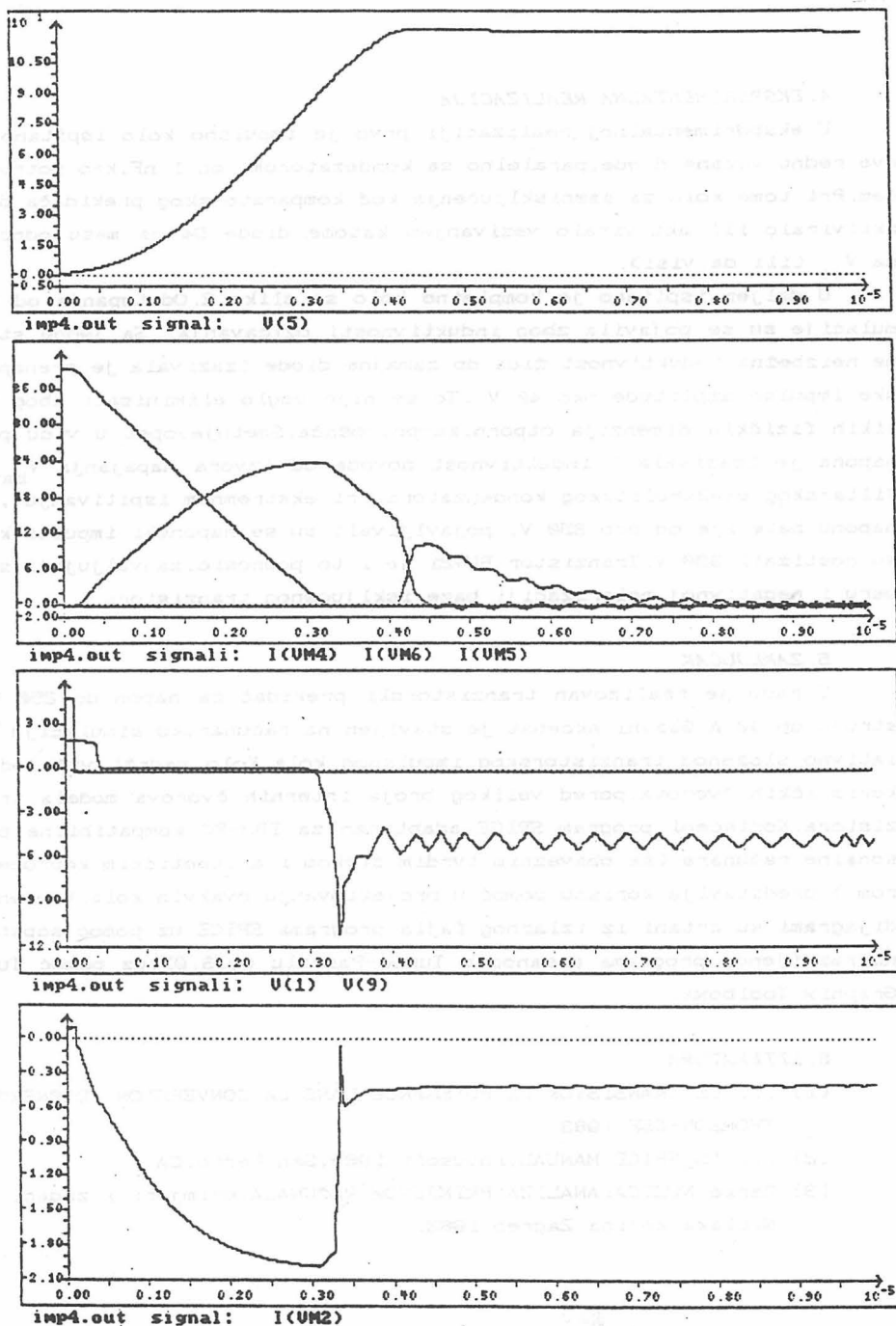
Kompletno kolo je predviđeno da radi sa omskim potrošačem za struje do 40 A, pri različitim vrednostima napona napajanja. U eksperimentu se koristio napon napajanja 120 V, pa je simuliran taj slučaj. Zbog načina realizacije snažnog žičanog otpornika potrošač poseduje relativno značajnu parazitnu induktivnost od 2 do 4 μH . Zbog indukovanih prenapona neophodno je korišćenje zamajne diode. U predviđenim uslovima rada na frekvencijama do 1000 Hz, sa faktorom režima od 0.1 do 0.9 potrošač, radi u prekidnom režimu rada. Zahvaljujući tome nije kritičan oporavak zamajne diode, pa i model diode u simulaciji nije kritičan. U stvarnosti korišćena je brza dioda za relativno manju struju, koja u impulsima lako podnosi struju i do 100 A. U tabeli 2. dati su parametri zamajne diode i parametri kompletnijih modela izlaznih tranzistora korišćenih u simulaciji.

TABELA 2. Parametri tranzistora i zamajne diode

```
.MODEL D1N3893 D (IS=2E-13 RS=.1 CJD=10PF TT=12NS BV=400 IBV=3.1E-13)
.MODEL BC160 PNP (BF=60)
.MODEL BD243 NPN (IS=2E-13 BF=120 IKF=1A TF=30NS RB=5 RE=.1 RC=.1 CJE=30PF
+ CJC=20PF TR=1E-8 )
.MODEL BD244 PNP (IS=2E-13 BF=120 IKF=1A TF=30NS RB=5 RE=.1 RC=.1 CJE=30PF
+ CJC=20PF TR=1E-8 )
.MODEL BU326 NPN (BF=20 RC=.01 CJE=10PF TF=.05US CJC=5PF)
.MODEL BUV21 NPN (BF=20 RC=.005 CJE=20PF TF=.2US CJC=10PF)
```

Rezultati analize pokazuju dobro slaganje sa realnošću i potvrđuju opravdanost ovakve analize u projektovanju impulsnih kola predviđenih za rad u kolima energetske elektronike.

Na slici 5. dati su rezultati simulacije kola sa zamajnom diodom i snaberom. Pri prvobitnoj vrednosti $R_{19} = 0.3 \Omega$ javljalo se parazitno provodenje izlaznog tranzistora zbog oscilacija u kolu baze. Zato je taj otpornik povećan na 3.3Ω . Po isključenju tranzistora pojavljuju se oscilacije u signalima. One su numeričkog porekla. Nestaju ako se maksimalni korak integracije u programu SPICE ograniči na vrednost mnogo manju od periode tih oscilacija. Ovo konačno rešenje omogućilo je korišćenje realizovanog kola do napona napajanja 250 V, 45 A (Cistim tranzistorom BUV21, sa $V_{ce0} = 200 \text{ V}$, $I_{cm} = 40 \text{ A}$).



Slika 5. Oblici napona i struja u konačnom rešenju kola

4. EKSPERIMENTALNA REALIZACIJA

U eksperimentalnoj realizaciji prvo je impulsno kolo ispitano sa dve redno vezane diode, paralelno sa kondenzatorom od 1 nF, kao potrošačem. Pri tome kolo za samoisključenje kod komparatorskog prekidača deaktiviralo ili aktiviralo vezivanjem katode diode D4 na masu odnosno na V_{cc} (ili da visi).

U daljem ispitano je kompletno kolo sa slike 2. Odstupanja od simulacije su se pojavila zbog induktivnosti ožičavanja. Sa jedne strane neizbežna induktivnost žica do zamajne diode izazivala je prenaponske impulse amplitude oko 40 V. To se nije moglo eliminisati zbog velikih fizičkih dimenzija otpornika-potrošača. Smetnje, opet u vidu prenapona je izazivala i induktivnost dovoda od izvora napajanja V_{bat} i filtarskog elektrolitskog kondenzatora. Pri ekstremnom ispitivanju, pri naponu baterije od oko 250 V, pojavljivali su se naponski impulsi koji su dostizali 300 V. Tranzistor BUV21 je i to podnosio, zahvaljujući snaberu i negativnoj polarizaciji baze isključenog tranzistora.

5. ZAKLJUČAK

U radu je realizovan tranzistorski prekidač za napon do 250 V i struju do 40 A. Glavni akcenat je stavljen na računarsku simulaciju relativno složenog tranzistorskog impulsnog kola. Kolo sadrži više od 20 korisničkih čvorova, pored velikog broja internih čvorova modela tranzistora. Korišćeni program SPICE adaptiran za IBM-PC kompatibilne personalne računare (sa obaveznim tvrdim diskom i aritmetičkim koprocesorom) predstavlja korisnu pomoć u projektovanju ovakvih kola. Vremenski dijagrami su crtani iz izlaznog fajla programa SPICE uz pomoć sopstveno razvijenog programa pisanog u Turbo-Pascalu (v. 3.0), uz pomoć Turbo Graphics Toolboxa.

6. LITERATURA

- [1] ...: LE TRANSISTOR DE PUISSANCE DANS LA CONVERSION D'ÉNERGIE, THOMSON-CSF 1983
- [2] ...: IS_SPICE MANUAL, intusoft 1985, San Pedro, CA
- [3] Zarko NOZICA: ANALIZA PRIMJENOM RAČUNALA, primjeri i zadaci Školska knjiga Zagreb 1982.

TRANZISTORSKI ČOPER ZA TEREĆENJE DINAMO-VAGE KONSTANTNIM MOMENTOM (STRUJNI PONOR)

Nikola BJELIĆ, dipl. inž.*

THE TRANSISTOR CHOPPER FOR THE LOADING OF DC GENERATOR WITH CONSTANT TORQUE

Sažetak

U članku je opisan princip rada tranzistorskog čopera za terećenje dinamo-vage konstantnim momentom i dat opis realiziranog uređaja. Napon armature dinamo-vage mijenja se od 0 - 200 V, a opseg podešavanja struje armature je 50 - 100 A.

Synopsis

The operating principle of the transistor chopper for loading of DC generator with constant torque is described. The description of realised device is given. The armature voltage of DC generator varies between 50 and 200 V. The armature current may be set between 50 and 100 A.

UVOD

Pri snimanju karakteristika opterećenja ispitivani motor tereti se dinamo-vagom. Moment kojim se tereti ispitivani motor najčešće se podešava promjenjivim otpornikom spojenim na armaturu dinamo-vage. Za vrijeme mjerenja opterećenje mora biti konstantno. Za konstantni moment opterećenja ispitivanog motora treba održavati konstantnu struju armature dinamo-vage, uz konstantne ostale parametre sistema.

Bolje rješenje predstavlja čoper kod kojeg se upravljanjem strujom armature dinamo-vage regulira moment s kojim se tereti ispitivani motor.

1. IDEJNO RJEŠENJE UREĐAJA ZA TEREĆENJE DINAMO-VAGE KONSTANTNIM MOMENTOM

Zahtijevani opseg promjene napona armature je 50 - 200 V, a struje 50 - 100 A.

Principna shema uređaja za terećenje dinamo-vage konstantnim momentom prikazana je na slici 1.

Ispitivani motor terećen je istosmjernim generatorom (dinamo-vaga). Snaga koju razvija generator predaje se trošilu R_T . Zakretni moment na spojci strojeva, uz konstantnu uzbudu, proporcionalan je struji armature generatora. Za konstantan moment tereta, kakav se traži kod snimanja karakteristika opterećenja stroja, treba održavati konstantnu vrijednost struje armature. Ovu zadaću ispunjava tranzistorski čoper. Upravljanje tranzistorskom sklopkom treba biti takvo da se struja armature održava konstantnom u širokom području promjene brzine vrtnje ispitivanog stroja uz konstantan otpor trošila.

* SOUR "RADE KONČAR" - ZAGREB
OUR ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT
41000 ZAGREB, Baštinanova bb