

Zoran Zindović  
Milenko Ostojić  
Institut "Mihajlo Pupin"

INTERAKTIVNO PROJEKTOVANJE PREKIDAČKIH  
IZVORA ZA NAPAJANJE

INTERACTIVE DESIGN OF SWITCH MODE POWER  
SUPPLIES

SADRŽAJ - U radu je dat opis proračuna osnovnih elemenata prekidačkog izvora za napajanje. Realizovan je program za interaktivno projektovanje. Dat je primer proračuna jednog izvora i dati su rezultati merenja izvršenih na tako projektovanom izvoru.

ABSTRACT - The paper describes the calculation of the basic components of switch mode power supply. A program for interactive design has been written. An example of the calculation of one power supply is given together with the results of measurements performed on the power supply designed by using this program.

## 1. UVOD

Izvori za napajanje čine sastavni deo svih elektronskih uređaja. Razvojem elektronike uređaji su postali kompleksni, digitalizacijom njihove dimenzije postaju sve manje pa se samim tim nameću i novi zahtevi za izvore napajanja.

Njihova pouzdanost i efikasnost treba da budu što veći a dimenzije primerene uređajima za koje su namenjeni.

Primenom mikroprocesora i drugih visoko integrisanih kola došlo se do uređaja u raznim oblastima primene (telekomunikacije, računarstvo, industrijska elektronika i sl.) koji su malih dimenzija a čija se potrošnja kreće u opsegu od 80W do 1000W pa i više. Primena linearnih izvora napajanja kod ovakvih uređaja pokazala se neprikladnom zbog njihovih dimenzija, niske efikasnosti, težine i sl.

Zbog svega toga razvio se jak interes za primenom prekidačkih izvora za napajanje koji omogućavaju visoku efikasnost, manje dimenzije, bolji raspored mase uređaja, jednostavnije rešenje hladjenja. Pored toga šira primena postupaka digitalne obrade signala smanjila je osetljivost uređaja na razne izvore zračenja i impulsne smetnje koje su prateća pojava prekidačkih izvora za napajanje.

Ovde ćemo istaći neke od osnovnih karakteristika prekidačkih napajanja komparirajući ih sa karakteristikama linearnih izvora. Na prvom mestu je znatno veća efikasnost izvora koja iznosi od 60% do 90% pa i više dok kod linearnih izvora se kreće od 10% pa do 40%. Način realizacije impulsnih izvora napajanja uslovio je njihovu veću složenost ali zato manje dimenzije, težinu i disipaciju. Uz sve ovo prekidačka napajanja pokazuju svojstva veće pouzdanosti jer omogućuju da se lako izvedu prenaponske i prekostrujne zaštite na izlazu, zaštita od kratkog spoja na izlazu, prenaponska zaštita na ulazu i kontrolisani start (soft start).

Kod prekidačkih napajanja posebna pažnja mora se posvetiti uticaju zračenja na sam uređaj i na okolinu. Učestanosti koje se najčešće koriste kao učestanost prekidanja kreću se od 20 kHz do preko 300 kHz. Pažljivim projektovanjem i dizajnom kao i korišćenjem filtara može se uticaj zračenja svesti na zadovoljavajuću meru. Imajući u vidu sve prednosti i mane prekidačkih izvora napajanja ukupna cena projektovanja izrade i održavanja ovakvih izvora je manja od klasičnih rešenja.

Složenost projektovanja i veliki uticaj izbora komponenata na karakteristike impulsnih izvora usloвила je potrebu da se ceo postupak projektovanja automatizuje. U daljem tekstu pored algoritma za jedan tip prekidačkih napajanja (FORWARD CONVERTER) biće prikazan i jedan primer sa dobijenim rezultatima i analizom tih rezultata.

## 2. ALGORITAM DIMENZIONISANJA ELEMENATA

Na slici 1 data je uprošćena električna šema prekidačkog napajanja. Radi uprošćenja slike, nije prikazana upravljačka logika i elementi za zaštitu, koji su standardne izvedbe. Ovde će biti dat algoritam dimenzionisanja elemenata i parametara za ko-  
rektno dimenzionisanje elemenata električne šeme. Takodje je dat uprošćen algoritam proračuna sa ciljem da se ne opterećuje rad.

Realizovani program na računaru opšte namene koristi neuprošćeni postupak i tačne izraze za proračun.

#### DIMENZIONISANJE IZLAZNOG KONDENZATORA

Uloga izlaznog kondenzatora je da vrši filtraciju visokofrekventnog ispravljenog napona. U tom smislu treba birati kondenzatore koji na radnim učestanostima izvora imaju dovoljno male gubitke. Sa druge strane u slučaju naglih opterećenja izvora kondenzator treba da održi napon do dopune energijom iz primara.

#### PRORAČUN FAKTORA REŽIMA

Upravljačka logika izvora za napajanje stabilizuje izlazni napon pri fluktuaciji ulaznog napona. Promenom faktora režima rada, prekidačkog tranzistora ( $Tr$ ). Fluktuacije ulaznog napona su posledica varijacije mrežnog napona i napona bruma. Odnos maksimalne vrednosti faktora režima i njegove minimalne vrednosti je dat:

$$\frac{D_{\max}}{D_{\min}} = \frac{V_{\text{imax}}}{V_{\text{imin}}} = \frac{U_{\max} \cdot 1,41}{U_{\min} \cdot 1,41 - V_{br}} \quad (4)$$

U većini sistema se usvaja maksimalna vrednost faktora režima od 0,45. Maksimalna efektivna vrednost faktora režima uključuje u sebi i gubitke u sekundarnom kolu transformatora. Izračunava se kao:

$$D_{\text{meff}} = D_{\max} \cdot \frac{V_{o1}}{V_{o1} \cdot 1,05 + V_{f1}} \quad (5)$$

Gde je  $V_{o1}$ , jednosmerni napon regulisanog izlaza.  $V_{f1}$  je pad napona na ispravljačkoj diodi u sekundarnom kolu pri maksimalnoj vrednosti struje. Faktor 1,05 uračunava približnu vrednost gubitaka na izlaznoj induktivnosti.

#### PRORAČUN IZLAZNE INDUKTIVNOSTI

Izlazna induktivnost služi da akumulira energiju tokom aktivnog perioda provodjenja tranzistora i da je emituje tokom neaktivnog perioda. Ona sa izlaznim kondenzatorom čini niskofrekventni filter, čime se nivo bruma na izlazu smanjuje. Ukoliko izvor za napajanje ima više izlaza, svi namotaji induktivnosti se motaju na jednom kalemskom telu iz razloga ekonomičnosti. Povoljnijim izborom broja navojaka moguće je dodatno poboljšati regulaciju na ostalim neregulisanim izlazima, jer dolazi do međusob-

nog uticaja flukseva. Treba reći da se kod ovog tipa izvora napon za regulaciju izvodi iz jednog izlaza, dok ostali izlazi ostaju neregulirani.

Minimalna vrednost induktivnosti prvog (regulisanog) izlaza se računa po formuli: /3/

$$L_{\text{omin1}} = \frac{(V_{\text{ol}} \cdot 1,05 \cdot V_{\text{fl}}) \cdot (1 - D_{\text{min}})}{2 \cdot I_{\text{ol}} \cdot F_0} \quad (6)$$

Gde je  $I_{\text{ol}}$  jednosmerna struja na prvom izlazu a  $F_0$  učestanost prekidanja izvora za napajanje. Obično se uzima induktivnost koja je oko 10 do 15 puta veća od minimalne:

$$L_{\text{ol}} = (10 - 15) \cdot L_{\text{omin1}} \quad (7)$$

Time se postiže manji brum na izlazu i širi opseg regulacije izlaznog napona u funkciji potrošnje. Broj navojaka prve induktivnosti je:

$$N_{\text{ol}} = \sqrt{\frac{L_{\text{ol}}}{A_1}} \quad (8)$$

Gde je  $A_1$  koeficijent induktivnosti odabranog jezgra. Brojevi zavojaka na ostalim induktivnostima se računaju /5/:

$$N_{\text{oi}} = N_{\text{ol}} \cdot \frac{V_{\text{oi}} \cdot V_{\text{fi}}}{V_{\text{ol}} + V_{\text{fl}}} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

Ovde treba reći da kroz izlaznu induktivnost protiče i jednosmerna struja, te je neophodno uvesti procep u magnetnom jezgru.

Implementiranim proračunom u računaru se vrši detaljan proračun induktivnosti i njegova optimizacija. Obzirom na malu varijaciju struje na izlazu, kao posledicu bruma, gubici u pri-gušnici se svode na gubitke u bakru. Gubitke je moguće izračunati:

$$P_{\text{cu}} = 4,3 \cdot 10^{-5} \cdot I_n \cdot (N_{\text{oi}} \cdot I_{\text{oi}})^2 / A_n \quad (10)$$

Gde je  $I_n$  srednja dužina zavojka kalema induktivnosti (mm), a  $A_n$  poprečni presek kalema (mm<sup>2</sup>). Potrebno je još proveriti nadzagrevanje kalema.

## PRORAČUN TRANSFORMATORA

Pre samog proračuna potrebno je odrediti jezgro koje može da transformiše potrebnu snagu. Pri tome treba voditi računa da kataloški podaci važe samo u idealnom slučaju. Pri tome odabira se i maksimalna indukcija za dato jezgro. Broj navojaka primarnog namotaja sa računa kao:

$$N_p = \frac{V_{imin} \cdot D_{mef}}{A_e \cdot B_m \cdot F_o} \quad (11)$$

Gde je  $A_e$  presek magnetnog jezgra ( $\text{mm}^2$ ) a  $B_m$  maksimalna indukcija pri minimalnom naponu mreže. Induktivnost primarnog namotaja je:

$$L_p = A_l \cdot N_p^2 \quad (12)$$

Efektivna vrednost struje magnetizacije je:

$$I_{mgp} = 0,001 \cdot T_p \cdot D_{mef} \cdot V_{imin}/L_p \quad (13)$$

Odnos transformacije je:

$$N = D_{mef} \cdot V_{imin}/V_{ol} \cdot 1,05 + V_{fl} \quad (14)$$

Broj zavojaka prvog izlaza je:

$$N_1 = N_p/N \quad (15)$$

Napon sekundara prvog izlaza:

$$V_{s1} = V_{ol} \cdot 1,05 = V_{fl} \quad (16)$$

Naponi sekundara ostalih izlaza:

$$V_{si} = \frac{(V_{ol} + V_{fl}) \cdot (V_{s1} - V_{fl} - V_{ol})}{(V_{ol} + V_{fl})} + V_{fi} + V_{oi} \quad (17)$$

$i = 2, 3, \dots, n$

Brojevi zavojaka ostalih namotaja su:

$$N_{si} = N_{s1} \cdot V_{si}/V_{s1} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (18)$$

Uvedenim korekcijama za brojeve zavojaka ostalih namotaja, zajedno sa korekcijom broja zavojaka induktivnosti postiže se bolja regulacija izlaznog napona na ostalim izlazima.

Gubici u jezgru transformatora se mogu naći kao proizvod koeficijenta gubitaka i težine jezgra pri maksimalnoj vrednosti indukcije. Na osnovu tog podatka nalazimo podatak za nadzagrevanje.

## ZAHTEVI ZA PREKIDAČKI TRANZISTOR I DIODU POVRATNOG NAMOTAJA

Minimalna vrednost proboja tranzistora ( $T_r$ ) mora biti veća od:

$$V_{tds} = 2,2 \cdot U_{max} \cdot 1,41 + 50 \quad (19)$$

što ujedno predstavlja i zahtev za inverzni napon diode povratnog namotaja (D). Maksimalna vrednost struje tranzistora je:

$$I_{tcm} = I_{ol} \cdot (1,1 + L_{omin}/L_{ol}) \cdot (N_{si}/N_{si}) \quad (20)$$

Električna vrednost struje diode povratnog namotaja je ravna struji magnetizacije datoj izrazom (13).

## 3. PRIMER PRORAČUNA

Kao primer proračuna koristićemo jednu realizaciju napajanja koje se koristi u sistemu za digitalnu obradu signala srednje potrošnje 100 VA. Napon mreže je nominalno 220V, +10-15%, 50 Hz. Napajanje ima tri izlaza i to 5V, 10A za napajanje digitalnog dela i +15V, 1A za napajanje analogne elektronike.

Proračunom je dobijena vrednost ulaznog kondenzatora C od 220,  $\mu$ F i maksimalne vrednosti jednosmernog napona 338V. Potrebna serijska otpornost za ograničenje struje grecovog spoja je veća od 3,4  $\Omega$  i snage veće od 0,62W.

Izlazni kondenzator za 5V treba da bude veći od 8000,  $\mu$ F i parazitne serijske otpornosti manje od 15 m $\Omega$ . Za druga dva izlaza treba koristiti kondenzatore veće od 300,  $\mu$ F i serijske otpornosti manje od 10 m $\Omega$ .

Za izlaznu induktivnost je upotrebljeno jezgro PM 50/39 sa koeficijentom induktivnosti od 250 i procepom od 2 mm. Na prvom namotaju je potrebna induktivnost od 57,  $\mu$ H što se postiže motanjem 15 zavojaka. Na druga dva izlaza proračunat broj zavojaka je 42. Snaga gubitka u kalemu induktivnosti je 0,72 W.

Transformator je realizovan na jezgru E42/20 sa materijalom N27. Ovaj materijal se preporučuje za upotrebu na učestanostima do 100 kHz. Proračunati broj zavojaka primara je 69. Broj zavojaka prvog izlaza je 4, dok je proračunata vrednost broja navojaka ostalih izlaza 11. Posle realizacije i detaljnog testiranja pokazalo se da je potrebno korigovati broj zavojaka na izlazima za +15V tako što je smanjen broj zavojaka sa 11 na 10.

Proračunati gubici u jezgru transformatora su 6,96W, dok su gubici u namotajima transformatora 0,11W.

Proračunata maksimalna vrednost napona tranzistora je 794V, a maksimalna struja drejna 0,81A. Ovo su ujedno podaci za dimenzionisanje povratne diode.

#### 4. REZULTATI MERENJA

Na realizovanom napajanju su izvedena detaljna merenja. Kao prvo izmerene su krive promene izlaznih napona u funkciji potrošnje na regulisanom izlazu. Promenom potrošnje na regulisanom izlazu od 1,6 do 10,8A izlazni napon varira za 0,33V. Na neregulisanom izlazu je promena napona veća i iznosi 1,49V. Treba napomenuti da je struja na neregulisanom izlazu bila nominalno 1A.

Merenje izlazne regulacije na neregulisanom izlazu je takođe izvršeno promenom potrošnje od 0,5 do 1A, napon na izlazu varira u opsegu 0,28V.

Varijacijom napona mreže u granicama 190 do 240V napon na regulisanom izlazu varira u granicama 10 mV, dok je na neregulisanom izlazu ona 0,49V. Pri naponima mreže manjim od 184 i većim od 244V napajanje se automatski isključuje iz rada. Stepensko iskorišćenje napajanja je veći od 80%.

Proverene su i sve zaštite od kratkog spoja, a takođe izmeren je nivo zračenja koji se generiše iz uređaja u radu. Upotrebom odgovarajućih mrežnih filtara nivo zračenja se drži u propisanim granicama. Takođe napajanje je testirano u uslovima povišene i snižene temperature, što je u potpunosti zadovoljilo.

#### 5. ZAKLJUČAK

Realizovani program za interaktivno projektovanje prekidačkih izvora za napajanje se pokazao efikasnim alatom koji omogućuje brzo i tačno projektovanje. Njime se izbegavaju neke greške koje bi se mogle desiti pri skraćenom, ili nedovoljno tačnom proračunu. Program je testiran na realnom primeru i pokazao se dovoljno dobrim. Realizovani izvor za napajanje je testiran u raznim uslovima primene i pokazao je zadovoljavajuće eksploatacione rezultate. Realizovani izvor se odlikuje visokim stepenom iskorišćenja, dobrom pouzdanošću, i dobrom regulacijom izlaznih napona, kao i realizovanim prekostrujnim i prenaponskim zaštitama.

LITERATURA

1. "THE SWITCH MODE SERIES" - MOTOROLA
2. B.Noris "MICROPROCESSORS AND MICROCOMPUTERS AND SWITCHING MODE POWER SUPPLIES" - Mc Graw hill book so
3. C. van Velthoven, W. Hettterscheid "The forward and double forward converter" - Phillips tech. inf. Ø37
4. L.P. Bracke, F.C.Geerlings "HIGH FREQUENCY FERRITE POWER TRANSFORMER AND CHOKE DESIGN" PHILIPS technical publication 205, 206.
5. SIEMENS aplication notes: B3-B3129-x-x-7600; B9-B3269; B/2332-101; B1-B2878-x-x-7600

