

RAČUNALNIŠKO PODPRTO NAČRTOVANJE PULZNIH USMERNIKOV

Bojan Alatič, Karel Jezernik
TEHNIŠKA FAKULTETA MARIBOR

UDK: 681.3.06

Povzetek - V referatu je opisan program PASEP za analizo in sintezo pulznih presmernikov. Podane so osnove modeliranja presmernikov v prostoru stanj in razvite prenosne funkcije. Na primeru tranzistorskega mostičnega usmernika je prikazan postopek simulacije. Ta je bila izvajana na mikroračunalniku VAX 11 s pomočjo simulacijskega programa PADSIM.

COMPUTER - AIDED DESIGN OF SWITCH MODE POWER SUPPLIES

Summary- In the paper is described software packet PASEP for analysis and synthesis of switch mode converters. Given are methods for evaluation of models and transfer functions of converters. On the example of bridge type switch mode power supply is shown proceeding of simulation. The simulation was executed with simulation program PADSIM on minicomputer VAX 11.

1. UVOD

Na vseh področjih elektronike je v zadnjih letih prišlo do naglega razvoja komponent. Z razvojem polprevodnikov, še posebej hitrih visokonapetostnih diod in tranzistorjev, se je na področju močnostne elektronike odprlo zelo široko aplikacijsko področje - enosmerni presmerniki in pulzni napajalniki.

Načrtovanje pulznih napajalnikov je lahko zelo zamudno delo. Izračune elementov pretvornikov večkrat ponavljamo, vrednosti elementov pa preverjamo ob delovanju pretvornika. Taka pot je dostikrat neuspešna in ne vodi do optimalnih rezultatov. Računalniško podprta analiza, sinteza in simulacija je zato edina smiselna rešitev tega problema. Obsega načrtovanje enosmernih presmernikov, vhodnega (mrežnega) usmernika s filtrom, izhodnega usmernika s filtrom in načrtovanje PŠM s prožilnimi stopnjami za tranzistorje.

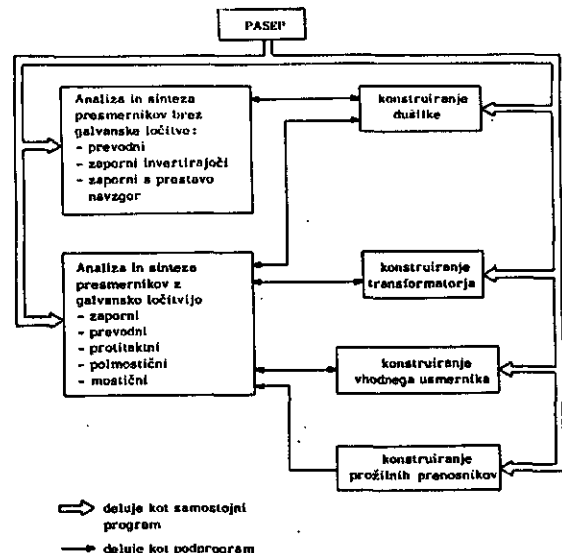
Analizo in sintezo v stacionarnih pogojih izvajamo s programom PASEP. Analizo dinamičnih pojavov v napajalnikih izvajamo na podlagi znanih modelov s prirejenimi simulacijskimi programi.

2. PROGRAM PASEP

Program PASEP je namenjen za analizo in sintezo enosmernih presmernikov. Izračunavanje elementov presmernikov je zamudno in nepregledno, večkrat ga je potrebno ponoviti, zato je na dlani, da za takšno delo uporabimo računalnik. Ker razvojni inženir največkrat nima na razpolago velikega računalnika, osebni in hišni računalniki pa postajajo vedno bolj razširjeni in dostopni, smo razvili program PASEP v programskem jeziku BASIC, ki je na µR najbolj razširjen.

Program PASEP je razdeljen na 12 podprogramov, ki sami zase predstavljajo celoto, lahko pa se med seboj dopolnjujejo. Zgradbo programa kaže sl. 1.

Kot je s slike razvidno, lahko izvajamo sintezo in analizo



Sl. 1: Zgradba programa PASEP

pretvornikov brez in z galvanjsko ločitvijo, opravimo konstruiranje dušilk in transformatorjev, vhodnih in izhodnih usmernikov in filtrov ter prožilnih stopenj za tranzistorje. Delo z računalnikom je interaktivno. V glavnem meniju izberemo želeni podprogram, ga izvršimo, sam podprogram pa nas vodi v druge podprograme ali pa nazaj v glavni meni.

Vnos podatkov poteka preko tipkovnice, izpis rezultatov pa je na zaslonu ali na tiskalniku.

Podprogrami so razdeljeni na sintezo in analizo. Sinteza

na podlagi zahtevanih vhodno-izhodnih parametrov presmernika izračuna vrednosti elementov L in C, opravi konstruiranje dušilke in transformatorja, izračuna maksimalne in efektivne vrednosti tokov, stikalne čase in poda potrebne parametre polprevodnikov. Analiza na podlagi znanih vrednosti pasivnih elementov opravi izračun napetosti in tokov presmernika, stikalnih časov ter valovitosti napetosti in tokov. V izračunih so lahko upoštewane parazitne napetosti polprevodnikov, ki jih podamo pred pričetkom izvajanja programov [1, 2, 3, 4].

Podprograma za konstruiranje dušilk in transformatorjev na podlagi zahtevanih induktivnosti, tokov in magnetnih gostot feritnih materialov izračunata potrebni ploščinski produkt magnetnega jedra za dušilko ali transformator. Na osnovi potrebnega ploščinskega produkta (velikosti) jedra se opravi izbor iz tabele petih družin feritnih jader (lončki FL, U jedra FU, RM jedra, EE in EC jedra). Upošteva se magnetne in ostale parametre izbranega jedra se opravi izračun števila ovojev, potrebnih presekov žic, zračne reže, izračunajo pa se tudi izgube.

Primer izpisa poteka konstruiranja dušilke je prikazan na sliki 2.

PODPROGRAM ZA KONSTRUIRANJE DUŠILKE

B - magnetna gostota 0.3 T
J - tokovna gostota = 5 A/mm²
k - izkoristek navpičnega preseka = 0.5

Potrebni ploščinski produkt jedra $A_p (= A_w/k)$ = 0.15418333 cm²

TABELA FERITNIH LONČKOV

| TIP | A_p (cm ²) | A_w (cm ²) | A_w (cm ²) | l _{sr} (cm) |
|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| FL0905 | .0928 | 0.1 | .028 | 1.85 |
| FL1107 | .0967 | 0.16 | .042 | 2.2 |
| FL1408 | .016 | 0.19 | .084 | 2.0 |
| FL1811 | .056 | 0.35 | 0.16 | 3.56 |
| FL2213 | 0.117 | 0.5 | 0.234 | 4.4 |
| FL2616 | 0.2368 | 0.74 | 0.32 | 5.2 |
| FL3819 | 0.5376 | 1.12 | 0.49 | 6 |
| FL3822 | 1.0899 | 1.73 | 0.63 | 7.3 |
| FL4229 | 3.81 | 2.65 | 1.438 | 8.38 |
| FL4328 | 3.386 | 2.3 | 1.438 | 8 |
| FL4728 | 3.588 | 3.12 | 1.15 | 9.3 |

IZBRANO JEDRO - FL2616

$A_p = 0.74$ cm²
 $A_w = 0.32$ cm²
l_{sr} = 5.2 cm

Karakteristični parametri
dušilke so:

število ovojev $N=5$
Presek žice $S_z=0.29$ (mm²)
izgube v bakru $P_{cu}=0.295$ (W)

Sl. 2: Računalniški izpis poteka konstruiranja dušilke

3. MODELIRANJE PULZNIH NAPAVALNIKOV S POVPREČENJEM V PROSTORU STANJ

Pri modeliranju pulznih napajalnikov smo do sedaj poznali dve poti - analizo v prostoru stanj in modeliranje nadomestnih vezij [1]. Dobre lastnosti obeh je združila metoda povprečenja v prostoru stanj, saj na podlagi opisa nadomestnih vezav za različna stikalna stanja omogoča razvoj modela v prostoru stanj ali pa razvoj modela s povprečenjem nadomestnih vezij. S tem se opisi pretvornikov poenotijo in veljajo enaki modeli za različne tipe pretvornikov, spremeniti je potrebno le koeficiente posameznih elementov modela [1, 2, 5].

Osnova pretvorbe enosmerne energije je v preklapljanju linearnih vezij, ki so sestavljena iz induktivnih in kapacitivnih elementov. To preklapljanje je izvedeno s stikalnimi elementi - tranzistorji in diodami. Stanje vezja pri različnih položajih (stanjih) stikalnih elementov lahko

opišemo z enačbami stanja. Pri izboru spremenljivk stanja ni posebnih predpisov, običajno pa vzamemo kot spremenljivki stanja tok dušilke in napetost kondenzatorja. Katerikoli presmernik, ki deluje s kontinuiranim prevajanjem, lahko predstavimo z enačbami spremenljivk stanja oblike

$$\begin{aligned} \text{za interval tvk} & & \text{za interval tiz} \\ \dot{\underline{x}} &= \underline{A}_1 \cdot \underline{x} + \underline{b}_1 \cdot u_1 & \dot{\underline{x}} &= \underline{A}_2 \cdot \underline{x} + \underline{b}_2 \cdot u_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$y_1 = \underline{c}_1^T \cdot \underline{x} \quad y_2 = \underline{c}_2^T \cdot \underline{x}$$

pri čemer velja $T = \text{tvk} + \text{tiz}$

Da dobimo povprečni model, moramo izraza za $\dot{\underline{x}}$ v enačbi (1) množiti z vklopnim razmerjem in ju sešteti. Dobimo enačbi

$$\dot{\underline{x}} = D(\underline{A}_1 \underline{x} + \underline{b}_1 \cdot u_1) + D'(\underline{A}_2 \underline{x} + \underline{b}_2 \cdot u_1) \quad (2)$$

$$y = D \cdot y_1 + D' \cdot y_2 = (D\underline{c}_1^T + D'\underline{c}_2^T) \cdot \underline{x}$$

ki ju lahko pišemo v običajnejši obliki

$$\dot{\underline{x}} = (D\underline{A}_1 + D' \cdot \underline{A}_2) \cdot \underline{x} + (D\underline{b}_1 + D' \underline{b}_2) u_1 \quad (3)$$

$$y = (D\underline{c}_1^T + D' \underline{c}_2^T) \cdot \underline{x}$$

$$\text{pri čemer velja } D = \frac{\text{tvk}}{T} \text{ in } D' = \frac{\text{tizk}}{T} = 1 - D \quad (4)$$

Enačba (3) predstavlja osnovni povprečni model pretvornika v prostoru stanj. Vklonno razmerje D in vzbujalna napetost u_1 sta v izrazu (3) konstanti.

Vpliv motenj na sistem je vpliv spremembe vklopnega razmerja D in napajalne napetosti u_1 na stanje sistema. Motnje povzročijo spremembo vektorja stanja in izhodne veličine:

$$\begin{aligned} u_1 &= U_1 + \hat{u}_1 & \underline{x} &= \underline{X} + \hat{\underline{x}} \\ d &= D + \hat{d} & y &= Y + \hat{y} \end{aligned} \quad (5)$$

Velike črke pomenijo stacionarne vrednosti, male črke s strešico pa spremembe okrog stacionarnega stanja.

Izraz (3) lahko pišemo v splošni obliki

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A} \cdot \underline{x} + \underline{b} \cdot u_1 \quad (6)$$

$$y = \underline{c}^T \cdot \underline{x}$$

pri čemer velja

$$\underline{A} = D \cdot \underline{A}_1 + D' \underline{A}_2 \quad (7)$$

$$\underline{b} = D\underline{b}_1 + D' \underline{b}_2$$

$$\underline{c}^T = D\underline{c}_1^T + D' \underline{c}_2^T$$

Če sedaj izraze (5) vstavimo v (6), dobimo osnovni model v obliki

$$\dot{\underline{x}} = \underbrace{\underline{A} \cdot \underline{x} + \underline{b} \cdot U_i}_{\underline{a}} + \underbrace{\underline{c}_1 \cdot \dot{\underline{x}} + \underline{c}_2 \cdot \underline{x}}_{\underline{b}} + \underbrace{[(\underline{A}_1 - \underline{A}_2) \cdot \underline{x} + (\underline{b}_1 - \underline{b}_2) U_i]}_{\underline{c}} \hat{d} + \underbrace{[(\underline{A}_1 - \underline{A}_2) \dot{\underline{x}} + (\underline{b}_1 - \underline{b}_2) \hat{d}]}_{\underline{d}} \hat{d} \quad (8)$$

- a - stacionarni (DC) izraz
b - variacija vhodne napetosti
c - variacija prevajalnega razmerja
d - nelinearni člen 2. reda

Izhodna veličina ima obliko:

$$\underline{y} = \underline{Y} + \underline{\hat{y}} = \underline{c}^T \cdot \underline{X} + \underline{c}_1^T \cdot \dot{\underline{x}} + (\underline{c}_1^T - \underline{c}_2^T) \underline{x} + (\underline{c}_1^T - \underline{c}_2^T) \underline{\hat{d}} + \underline{c}_2^T \underline{\hat{d}} \quad (9)$$

Z linearizacijo enačb (8) in (9) dobimo končni povprečni model v prostoru stanj:

stacionarni model

$$\underline{X} = -\underline{A}^{-1} \cdot \underline{b} \cdot U_i \quad (10)$$

$$\underline{Y} = \underline{c}^T \cdot \underline{X} = -\underline{c}^T \cdot \underline{A}^{-1} \cdot \underline{b} \cdot U_i$$

dinamični model

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A} \cdot \underline{x} + \underline{b} \cdot \hat{u}_i + (\underline{A}_1 - \underline{A}_2) \cdot \underline{x} + (\underline{b}_1 - \underline{b}_2) U_i \hat{d} \quad (11)$$

$$\hat{y} = \underline{c}^T \cdot \underline{x} + (\underline{c}_1^T - \underline{c}_2^T) \underline{x} \hat{d}$$

4. PRENOSNE FUNKCIJE SISTEMA

Pulzni napajalnik običajno deluje kot sistem z zaprto regulacijsko zanko za regulacijo izhodne napetosti (ali toka). Ker je pretvornik s pulzno-širinskim modulatorjem nelinearni podsistem s dvema vhodoma in enim izhodom, je za analizo v zveznem prostoru potrebno razviti zvezne prenosne funkcije. Najpomembnejši sta prenosni funkciji izhodna napetost - vhodna napetost pretvornika in krmilna prenosna funkcija izhodna napetost - krmilna napetost PŠM.

S transformacijo dinamičnega povprečenega modela v slikovni prostor dobimo izraz

$$\hat{\underline{x}}(p) = (p\underline{I} - \underline{A})^{-1} \cdot \underline{k} \cdot \hat{d}(p) + (p\underline{I} - \underline{A})^{-1} \cdot \underline{b} \cdot \hat{u}_i(p) \quad (12)$$

Od tod dobimo zelene prenosne funkcije

$$\frac{\hat{\underline{y}}}{\hat{d}}(p) = \underline{c}^T (p\underline{I} - \underline{A})^{-1} \cdot \underline{k} + (\underline{c}_1^T - \underline{c}_2^T) \cdot \underline{X} \quad (13)$$

$$\frac{\hat{\underline{y}}}{\hat{u}_i}(p) = \underline{c}^T (p\underline{I} - \underline{A})^{-1} \cdot \underline{b} \quad (14)$$

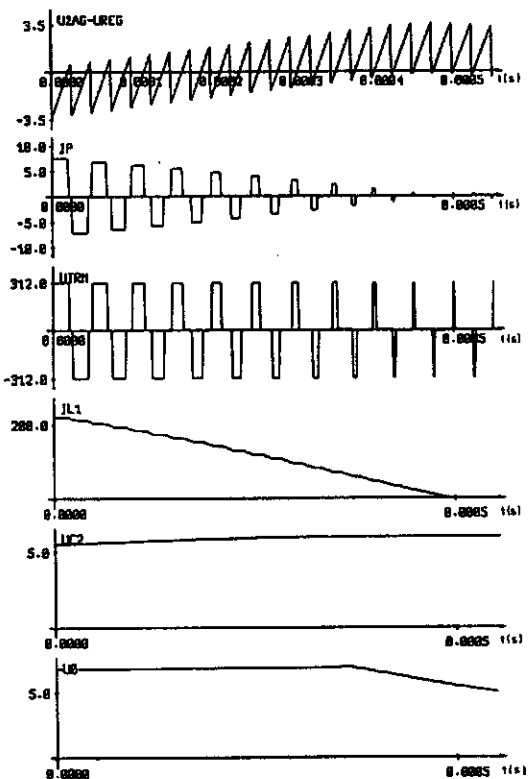
pri čemer velja za \underline{A} , \underline{b} in \underline{c}^T enačba (7), za \underline{k} pa izraz

$$\underline{k} = (\underline{A}_1 - \underline{A}_2) \underline{X} + (\underline{b}_1 - \underline{b}_2) U_i \quad (15)$$

Sintezo regulatorja opravimo na podlagi znanih relacij linearne regulacijske tehnike [1, 2].

5. SIMULACIJA PULZNEGA USMERNIKA

Za ilustracijo poteka simulacije so prikazani časovni odzivi mostičnega tranzistorskega pulznega usmernika - slika 3. Za simulacijo smo uporabili programski paket PADSIM [6]. Sistem predstavimo z analogno blokovno shemo, ki jo v simbolični obliki vnesemo v program. Verzija programa PADSIM na računalniku VAX 11 nudi možnost sprotnega risanja časovnih potekov na ekranu terminala, časovne poteke pa si lahko narišemo tudi na koordinatnem risalniku. Takojšnja analiza rezultatov simulacije omogoča vrnitev v fazo podatkov, kjer lahko spremenimo konfiguracijo sistema (spremenimo vrednosti elementov) ali druge podatke (integracijski interval, celoten čas...). S spremenjenimi parametri simulacijo ponovimo. Postopek ponavljamo, dokler ne pridemo do želenih odzivov sistema oziroma optimalnih parametrov vezja.



Sl. 3: Časovni odzivi mostičnega napajalnika pri razbremenitvi ($U_i = 312V$, $I_o = 200A \rightarrow 20A$, $U_o = 5,5V$)

5. LITERATURA

- [1] R. D. Middlebrook, S. Čuk: *Advances in switched mode power conversion*, Vol. 1 + 2, Teslaco, Pasadena, California 1981
- [2] B. Alatič - Magistrska naloga, VTŠ Maribor, 1984
- [3] J. Wüsthube: *Schaltentzetteile*, Expert Verlag, Grafenau, 1979
- [4] R. Adair: *Ease switcher - transformer design using computer graphics*, EDN, 13.10.1982, str. 147 - 149
- [5] F. C. Y. Lee, Y. Yu: *Computer - aided analysis and simulation of Switched DC - DC converters*, IEEE Vol. IA - 15, No. 5, 1979, str. 511 - 520
- [6] R. Svečko: *Diplomska naloga*, VTŠ Maribor, 1981