

Digitalna realizacija kola za višefazno upravljanje pretvaračima energetske elektronike

Đordije Ristanović

Student prvog ciklusa studija
Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Elektrotehnički fakultet
Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina
rdjordjije.1991@gmail.com

Sažetak— U radu je prikazana jedna od mogućnosti realizovanja kola za višefazno upravljanje pretvaračima energetske elektronike, konkretno realizacija 128-bitnog pomjeračkog registra, koji ulazni prekidački signal prosljeđuje na 8 izlaza. Svi izlazni signali su pomjereni za određeni ugao koji zavisi od broja željenih faza. Takođe je predstavljena primjena tog kola na primjeru višefaznog spuštača napona u cilju smanjenja ripla izlazne struje. Simulacije rada datog kola i njegove primjene na konkretnom primjeru su urađene u MATLAB/Simulink okruženju.

Ključne riječi— višefazno upravljanje; pomjerački registar; spuštač napona; ripl izlazne struje.

I. UVOD

Pretvarač energetske elektronike je pojedinačni stepen za pretvaranje električne energije, čiji je zadatak da potrošaču obezbjedi najbolje moguće napajanje. Projektovanje i izrada pretvarača mogu biti veoma složeni, jer zahtijevaju primjenu znanja iz više oblasti, kao što su: energetika, elektronika, teorija automatskog upravljanja, teorija električnih kola, elektromagnetika, procesiranje signala i sl. [1].

Kvalitet pretvarača ocjenjuje se na osnovu tehničkih karakteristika koje posjeduju. Tehničke karakteristike mogu biti: električne, mehaničke, akustične, ulazne, izlazne, statičke, dinamičke, itd. Bez obzira na tehničke karakteristike, najvažnije osobine koje mora da ima svaki pretvarač su: pouzdanost, efikasnost i niska cijena. Osim osnovnih zahtjeva da uređaji za napajanje budu veoma pouzdani i jeftini, u posljednje vrijeme postavljaju se sve strožiji zahtjevi u pogledu: malih dimenzija, velike izlazne struje, malih odstupanja izlaznog napona (velika statička tačnost) i brz odziv na poremećaje (dobre dinamičke osobine) [1].

Najčešći primjeri ovako oštih zahtjeva su napajanje modernih mikroprocesora (naponi ≈ 1 V, struje > 200 A). Jedna od upravljačkih tehnika koja obezbjeđuje ispunjenje postavljenih zahtjeva i koja se sve više koristi je tzv. višefazno upravljanje pretvaračima energetske elektronike [1], [2].

II. VIŠEFAZNO UPRAVLJANJE

Kod višefaznog načina upravljanja se N jednakih pretvarača (najčešće spuštač ili podizač) vežu paralelno, a na svaki prekidač se dovode upravljački signali iste frekvencije i istog faktora ispunje, ali međusobno pomjereni za $360^\circ/N$, pri čemu dolazi do povećanja prekidačke frekvencije bez povećanja prekidačkih gubitaka [1].

Pored postizanja dobrih rezultata u pogledu zahtjeva navedenih u uvodu, još jedna vrlo bitna prednost višefaznog upravljanja jeste smanjenje talasnosti (ripla) izlazne struje i izlaznog napona. Stvarni talasni oblici izlaznog napona i struje DC-DC pretvarača se sastoje iz DC (srednja vrijednost) i AC komponente (talasnost). Kod dobro projektovanog pretvarača amplituda ripla izlaznog napona je mnogo manja od njegove srednje vrijednosti, pa se ripl izlaznog napona prilikom analize može zanemariti, dok ripl izlazne struje nije zanemarljiv. Ripl izlazne struje za jednofazni spuštač napona se računa pomoću relacije:

$$\Delta i_{L,pp} = \frac{V_m - V_o}{L} DT_s = \frac{V_o}{L} (1 - D) T_s, \quad (1)$$

gdje su V_{in} i V_o ulazni i izlazni napon, respektivno, D faktor ispunje upravljačkog signala i T_s prekidački period.

Za računanje ripla struje potrošača, u slučaju N spuštača sa višefaznim upravljanjem koristi se relacija:

$$\Delta i_{L,pp} = \frac{V_{PS,max}}{L} T_s N (D_1 - \frac{m}{N}) (\frac{m+1}{N} - D_1), \quad (2)$$

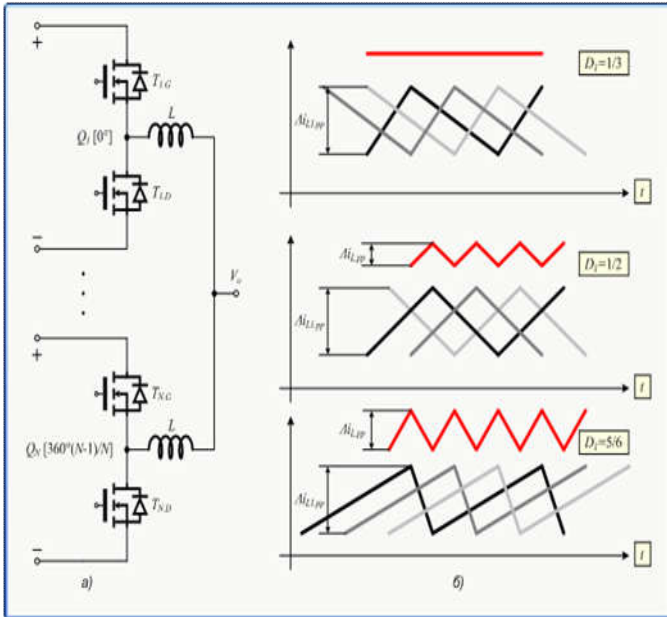
$$\Delta i_{L,pp} = \Delta i_{L,MAX} (ND_1 - m) (\frac{m+1}{N} - D_1), \quad (3)$$

$$\Delta i_{L,MAX} = \frac{V_{PS,max}}{L} T_s, \quad (4)$$

$$m = \text{floor}(ND_1), \quad (5)$$

gdje je D_1 faktor ispunje jednog spuštača napona, a funkcija $\text{floor}()$ zaokružuje argument na najbliži manji cijeli broj.

Primjer višefaznog upravljanja sa N spuštača povezanih paralelno prikazan je na Sl. 1a. Odnosi amplituda ripla izlazne struje potrošača i struje kroz jednu granu (prigušnicu) spuštača prikazani su na Sl. 1b, za slučaj $N=3$.



Slika 1. Princip višefaznog upravljanja: a) šema, b) talasni oblici struja za $N=3$ [1]

Ripl izlazne struje (u funkciji faktora ispunje D) je periodična funkcija, sa periodom N puta manjim od perioda ripla struje jednog spuštača. U trenucima kada se maksimumi i minimumi struja pojedinačnih pretvarača (struja prigušnica) podudaraju, ripl izlazne struje jednak je nuli. Maksimumi su smješteni na sredini intervala čijim krajevima odgovaraju prolasci ripla izlazne struje kroz nulu. Za promjenu faktora ispunje jednog spuštača:

$$D_1 \in (0,1), \quad (6)$$

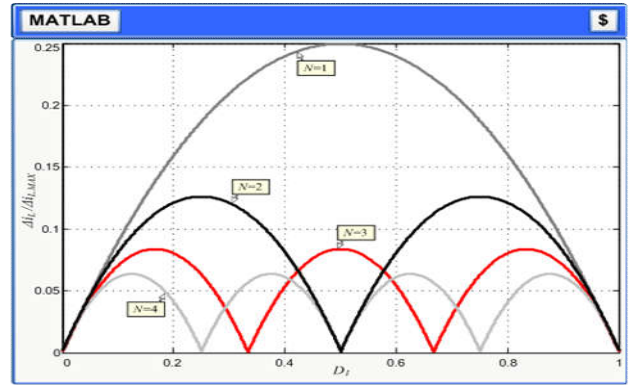
trenutni ripl izlazne struje je $N+1$ puta jednak nuli i ima N maksimuma.

$$\Delta i_{L,pp} = 0, \text{ za } D_{1,k} = k \frac{1}{N}, \quad k = 0,1,2 \dots N. \quad (7)$$

$$\Delta i_{L,pp} = \Delta i_{L,pp,max} = \Delta i_{L,MAX} \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{N}, \text{ za } D_{1,m} = \frac{2m+1}{2N}. \quad (8)$$

Sa Sl. 2, na kojoj je prikazana amplituda ripla struje višefazno upravljanih spuštača napona za različit broj faza N , i na osnovu prethodnih relacija, može se zaključiti da izlazna struja N spuštača sa višefaznim upravljanjem, pri čemu su upravljački impulsi međusobno pomjereni za $360^\circ/N$, ima N puta veću frekvenciju od prekidačke frekvencije jednog spuštača, a maksimalni ripl N puta manji [1]-[6].

Danas na tržištu postoji veliki broj kola pomoću kojih je moguće realizovati višefazno upravljanje pretvaračima, kao na primjer: TPS40090 [7], NCP4208 [8], itd.



Slika 2. Ripl struje višefazno upravljanih spuštača za razne N [1]

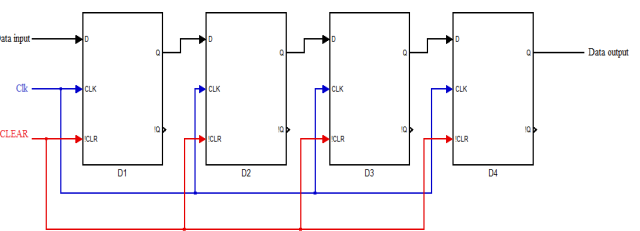
Kao jedna od mogućih realizacija jeste i korištenje pomjeračkih registara. U ovom radu je objašnjeno kako je uz pomoć 128-bitnog pomjeračkog registra moguće ostvariti višefazno upravljanje.

III. 128-BITINI POMJERAČKI REGISTAR

Da bi se uopšte mogla razumjeti realizacija 128-bitnog pomjeračkog registra, konkretno kola MC14517B [9], potrebno je prvo definisati šta je to register i koja je njegova funkcija.

Najjednostavnija komponenta za memorisanje, koju čine skup od n flip-flova ($n \geq 1$) naziva se register. Svi flip-flovi u stanju su da pamte jednobitnu informaciju, pa za n -bitni register kažemo da memoriše n -bitnu binarnu informaciju. Najjednostavniji register sadrži samo flip-flovove bez spoljnih logičkih kola [10].

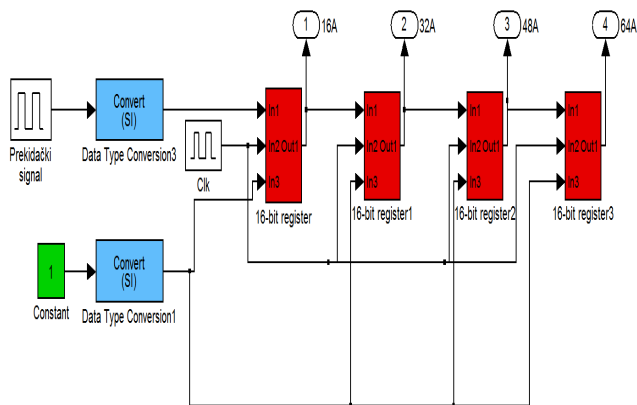
Pomjerački register (*shift register*) je register koji je u stanju da lateralno pomjera memorisane bitove u oba smjera. Pomjerački register se realizuje kao lanac kaskadno povezanih flip-flova, pri čemu je izlaz jednog povezan kao ulaz narednog flip-flopa. Svi flip-flovi primaju zajednički takt (*Clk*) koji aktivira pomjeranje sa jednog stepena prema narednom [10]. Na Sl. 3 je prikazan 4-bitni pomjerački register sa serijskim ulazom i serijskim izlazom.



Slika 3. 4-bitni pomjerački register sa serijskim ulazom i serijskim izlazom

Izlaz Q flip-flopa sa lijeve strane povezan je na D ulaz flip-flopa sa desne strane. Takti signal Clk je zajednički za sve flip-flovove. Serijski ulaz (*Data input*) je ulaz prvog flip-flopa, a serijski izlaz (*Data output*) se uzima kao izlaz posljednjeg flip-flopa. Pomjerački register prikazan na Sl. 3 može da pomjera informaciju samo slijeva nadesno [10].

U nastavku rada je objašnjeno kako je pomoću kola MC14517B moguće ostvariti višefazno upravljanje pretvaračima. Kolo MC14517B se sastoji od dva 64-bitna registra (*A* i *B*), pri čemu se svaki od njih sastoji od po četiri 16-bitna pomjeračka registra sa serijskim ulazom i serijskim izlazom. Na Sl. 4 data je strukturna šema jednog (*A*) 64-bitnog pomjeračkog registra realizovanog u MATLAB/Simulink okruženju.



Slika 4. 64-bitni pomjerački registar *A*

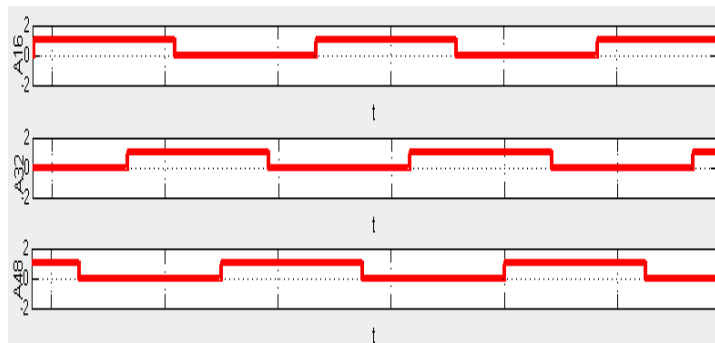
Na isti način se realizuje i *B* registar. Izlazni signali *A* registra su označeni sa *A*16, *A*32, *A*48 i *A*64, a izlazni signali *B* registra sa *B*16, *B*32, *B*48 i *B*64. Svaki od četiri 16-bitna registra prikazanih na Sl. 4 se sastoji od šesnaest *D* flip-flova koji se okidaju na pozitivnu ivicu *Clk* signala, pomjerajući tako ulaznu informaciju slijeva nadesno. Ukoliko se izlaz 64-bitnog registra *A* poveže na ulaz 64-bitnog registra *B*, moguće je dobiti najviše 8 izlaznih signala koji su pomjereni za određeni ugao, koji zavisi od perioda *Clk* signala.

Kada se na ulaz *A* registra dovede upravljački signal željene prekidačke frekvencije (f_s), pomoću *Clk* signala, čiji se period T_{clk} računa po opštoj formuli:

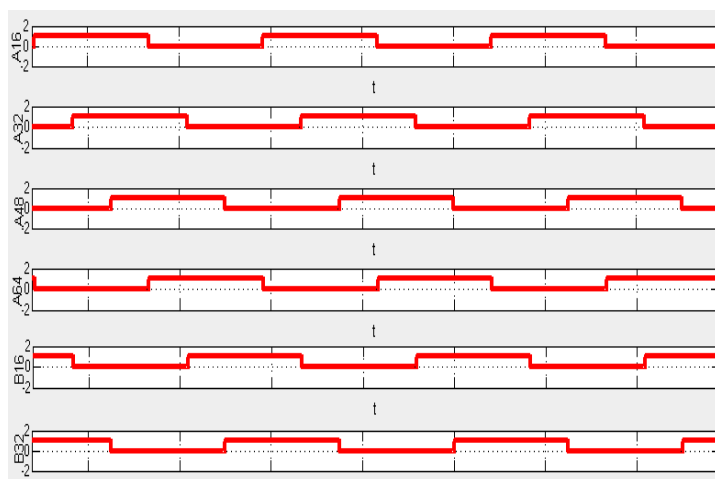
$$T_{clk} = 1 / (f_s \cdot N \cdot 16), \quad (9)$$

gdje *N* predstavlja broj željenih faza, taj upravljački signal se prosljeđuje na 8 izlaza pomjerenih za $360^\circ/N$ ugao. Na taj način je moguće dobiti signale za višefazno upravljanje pretvaračima.

Na Sl. 5 i Sl. 6 su predstavljeni upravljački signali (*A*16, *A*32 i *A*48) u slučaju 3-faznog ($N=3$) i (*A*16, *A*32, *A*48, *A*64, *B*16, *B*32 i *B*48) u slučaju 6-faznog ($N=6$) upravljanja, respektivno, dobijenih pomoću razvijenog modela 128-bitnog pomjeračkog registra MC14517B. Faktor ispune prekidačkog signala dovedenog na ulaz je 50%, a prekidačka frekvencija $f_s=20$ kHz. Sa navedenih slika se vidi da u slučaju trofaznog upravljanja svaki sljedeći signal je pomjeren za trećinu perioda (120°) u odnosu na prethodni, dok u slučaju šestofaznog upravljanja svaki sljedeći je pomjeren za šestinu prekidačkog perioda (60°) u odnosu na prethodni signal.



Slika 5. Upravljački signali u slučaju trofaznog upravljanja ($N=3$)



Slika 6. Upravljački signali u slučaju šestofaznog upravljanja ($N=6$)

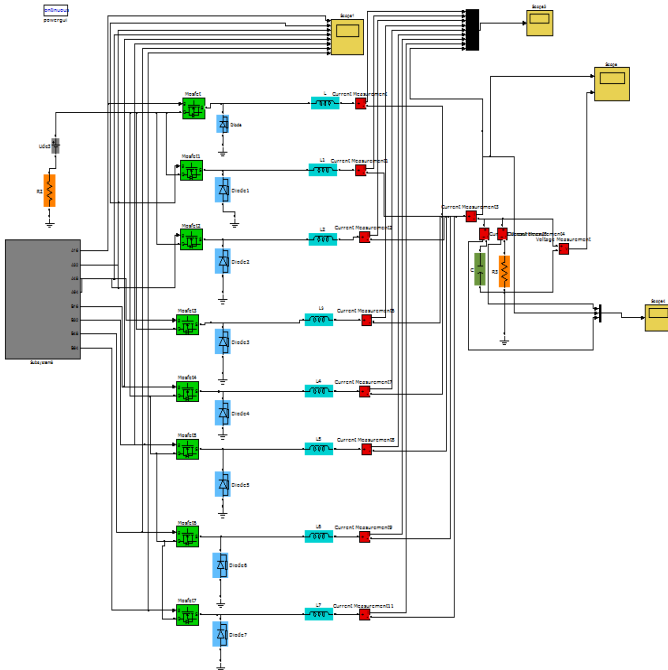
U tabeli I date su vrijednosti perioda T_{clk} za različite vrijednosti broja faza *N*, izračunate pomoću relacije (9). Prekidačka frekvencija je 20 kHz.

TABELA I. VRIJEDNOSTI PERIODA T_{CLK} ZA RAZLIČITE FAZE

<i>N</i>	T_{clk} [μ s]
1	3,125
2	1,5625
3	1,041
4	0,7812
5	0,625
6	0,5208
7	0,4642
8	0,3906

IV. SIMULACIJA VIŠEFAZNOG UPRAVLJANJA SPUŠTAČEM NAPONA

Model osmofaznog spuštača napona urađenog u MATLAB/Simulink-u prikazan je na Sl. 7. Parametri simulacije dati su u Tabeli II.



Slika 7. Model osmofaznog spuštača napona u MATLAB/Simulink-u

TABELA II. PARAMETRI SIMULACIJE

L [μH]	200
C [μF]	200
R [Ω]	2
V_{in} [V]	20
f_s [kHz]	20
N	1-8
D [%]	0-100
T_{clk}	$1/(f_s \cdot N \cdot 16)$

Kao što se vidi iz relacije (2), ripl izlazne struje kod višefaznog spuštača napona zavisi od: veličine izlaznog napona, faktora ispunje D , prekidačke frekvencije f_s , veličine prigušnice L i broja faza N . U nastavku rada izvršen je proračun ripla izlazne struje spuštača napona za različit broj faza i različite vrijednosti faktora ispunje. Takođe, upoređeni su rezultati dobijeni analitičkim putem, korištenjem relacije (2), sa dobijenim simulacionim rezultatima.

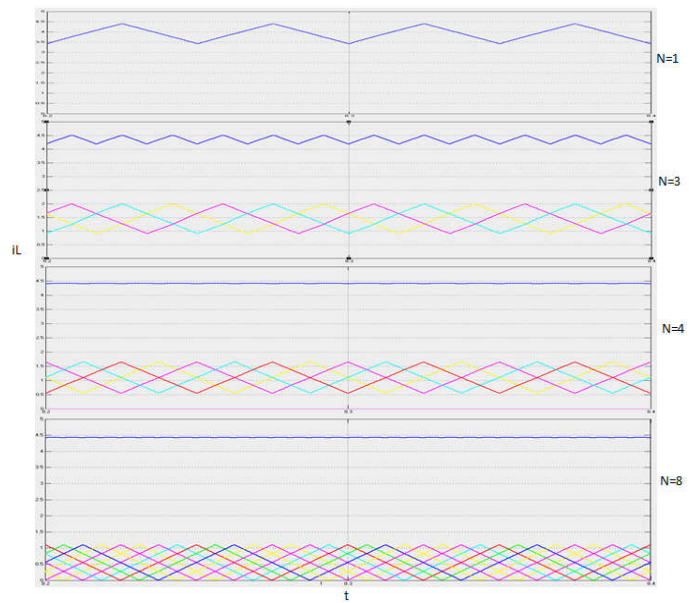
Razvijeni model osmofaznog spuštača napona prikazan na Sl. 7 se sastoji od: ulaznog jednosmjernog naponskog generatora V_{in} , po osam tranzistora (MOSFET-a), dioda i prigušnica L , zatim kondenzatora izlaznog filtra C i otporničkog opterećenja R . Za upravljanje tranzistorima koristili smo upravljačke signale dobijene pomoću razvijenog modela 128-bitnog pomjeračkog registra, objašnjenog u poglavlju III.

U Tabeli III prikazane su vrijednosti ripla izlazne struje izračunate pomoću relacije (2), za posmatrane vrijednosti faktora ispunje i broja faza.

TABELA III. IZRAČUNATE VRIJEDNOSTI RIPLA IZLAZNE STRUJE ZA RAZLIČITE VRIJEDNOSTI N I D .

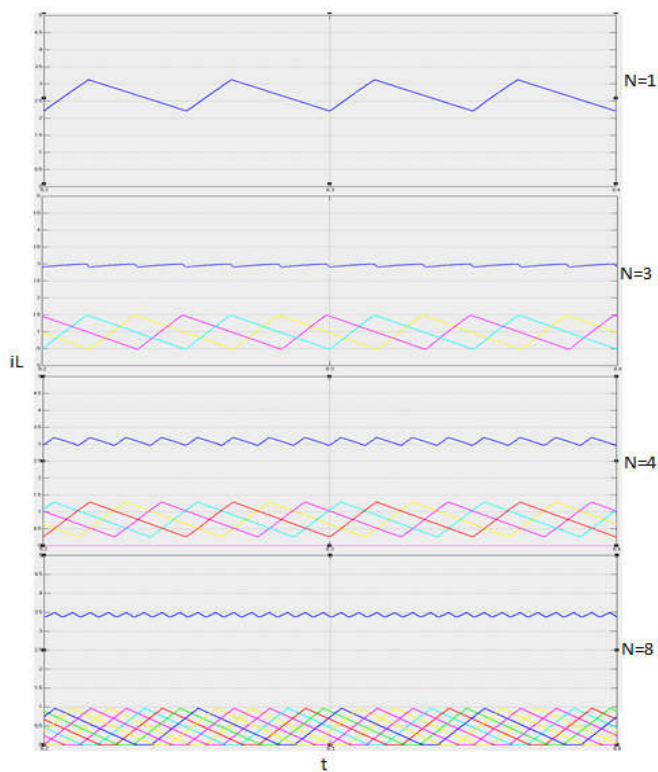
D	N	$\Delta i_{L,pp}$ [A]
$\frac{1}{2}$	1	$\approx 0,625$
	3	$\approx 0,208$
	4	0
$\frac{1}{3}$	1	$\approx 0,370$
	3	0
	4	$\approx 0,092$
$\frac{3}{4}$	1	$\approx 0,046$
	3	$\approx 0,703$
	4	$\approx 0,234$
$\frac{3}{4}$	1	$\approx 0,703$
	3	$\approx 0,234$
	4	0

Na Sl. 8, 9 i 10 prikazani su signali dobijeni simulacijama za faktore ispunje 50%, 33% i 75%, respektivno, pri čemu su posmatrani slučajevi kada je broj faza N jednak 1, 3, 4 i 8.

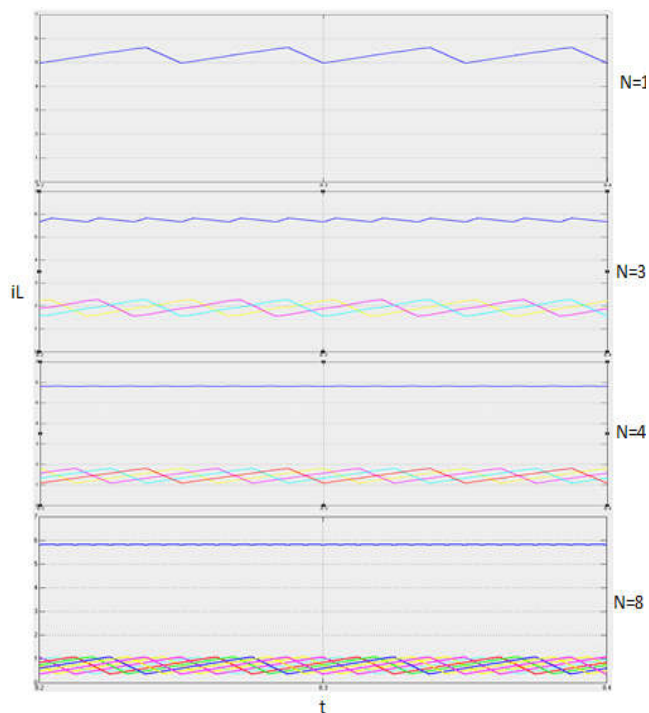


Slika 8. Izlazna struja i struja pojedinih faza za faktor ispunje 50%

Sa Sl. 8, Sl. 9, i Sl.10 i na osnovu Tabele III zaključujemo da se N paralelnih spuštača sa višefaznim upravljanjem i upravljačkim impulsima, međusobno fazno pomjerenim za $360^\circ/N$, ponašaju kao ekvivalentni spuštač sa prekidačkom frekvencijom N puta većom od prekidačke frekvencije jednog spuštača, a maksimalnim riplom izlazne struje (signal plave boje) N puta manjim na intervalima između susjednih prolazaka ripla struje kroz nulu. Dobijeni simulacioni rezultati su konzistentni sa teorijskim proračunima iz Tabele III.



Slika 9. Izlazna struja i struja pojedinih faza za faktor ispune 33%



Slika 10. Izlazna struja i struja pojedinih faza za faktor ispune 75%

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljena je jedna od mogućih digitalnih realizacija kola za višefazno upravljanje pretvaračima energetske elektronike. Razvijen je simulacioni model kola, koje može da obezbijedi upravljanje od jedne do osam faza.

Verifikacija rada modela izvršena je na primjeru višefaznog upravljanja spuštačem napona. Dobijenim simulacionim rezultatima su potvrđene teorijske analize i pokazano je da se razvijenim kolom može uspješno ostvariti višefazno upravljanje, sa svim prednostima koje ovakvo upravljanje nudi. U budućem radu planirana je eksperimentalna verifikacija razvijenog kola.

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se prof. dr Milomiru Šoji i Srđanu Laletu, mr, na sugestijama i savjetima prilikom izrade rada, koji je nastao kao dio seminarskog rada u okviru predmeta *Upravljanje pretvaračima energetske elektronike 2* na I ciklusu studija.

LITERATURA

- [1] M. Šoja, "Novi prilozu u primjeni strujnog upravljanja u DC/DC i DC/AC pretvaračima," Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Istočno Sarajevo, 2008.
- [2] T. Hegarty, "Benefits of multiphasing buck converters," Power management DesignLine, 2007.
- [3] K. Wong, D. Evans, "Merits of multiphase buck DC/DC converters in small form factor applicatins," Texas Instruments, mart 2005.
- [4] D. Baba, "Benefits of a multiphase buck converter," Texas Instruments, 2012.
- [5] H. Nguyen, "Design, analysis and implementation of multiphase synchronous buck DC-DC converter for Transportable Processor," Virginia Polytechnic Institute and State University, master rad, april 2004.
- [6] J. Gordillo, C. Aguilar, "A simple sensorless current sharing technique multiphase DC-DC buck converters," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 32, No. 5, maj 2017.
- [7] Texas Instruments, "TPS40090, High-frequency, multiphase controller," Datasheet, 2006, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps40090.pdf>.
- [8] ON Semiconductor, "NCP4208, Digital programmable 8-phase synchronous buck converter with I²C Interface," Datasheet, 2013, http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP4208-D.PDF.
- [9] ON Semiconductor, "MC14517B, Dual 64-bit static shift register," Datasheet, 2000, http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC14517B-D.PDF.
- [10] B. Dokić, "Digitalna elektronika," Akademska misao Beograd, jul 2012.

ABSTRACT

This paper presents one of the possibilities for building circuits for multiphase control of power electronics converters, specifically the realization of a 128-bit shift register, which takes the input switching signal and forwards it to 8 outputs. All output signals are shifted for a certain angle, which depends on the number of desired phases. This paper also presents the application of this circuit in the case of multiphase buck converter, with the goal of reducing the ripple of the output current. Simulations of the given circuit and its application to the specific example are performed in MATLAB/Simulink environment.

DIGITAL REALIZATION OF CIRCUIT FOR MULTIPHASE CONTROL OF POWER ELECTRONICS CONVERTERS

Dordije Ristanović

