



VIII SIMPOZIJUM  
ENERGETSKA elektronika - Ee'95  
Novi Sad, 27.-29. IX 1995.

JEDAN PRISTUP SINTEZI SISTEMA UPRAVLJANJA DC /AC PRETVARAČA  
SYNTHESIS OF SYSTEM CONTROL OF DC /AC CONVERTERS

Mr. Dragan Filipović \*

**Kratak sadržaj:** U članku se razmatra jedan od mogućih načina za pretvaranje istosmernog napona u naizmjenični sinusoidalni napon. Pretvarač je realizovan kombinacijom DC /DC pretvarača tipa BOOST i DC /AC pretvarača na bazi tranzistora kao prekidačkih elemenata. U pretvaraču se vrši regulacija trenutne vrednosti sinusoidalnog izlaznog napona. Algoritam regulacije bazira na primeni teorije kliznih režima u nelinearnim dinamičkim sistemima sa promenljivom strukturom.

**Ključne reči:** BOOST pretvarač, DC /AC pretvarač, tranzistorski prekidači, regulacija trenutne vrednosti sinusoidalnog napona, klizni režim.

**Abstract:** The paper deals with one of the possible means of DC to AC voltage conversion. Converter is a combination of BOOST DC converter and AC converter with fast switching transistors. Converter provides control of instantaneous value of sinusoidal output voltage. Algorithm for control is based on the theory of sliding modes in nonlinear dynamic systems with variable structure.

**Essential words:** DC /AC converter, BOOST converter, transistor switches, control of instantaneous value of sinusoidal output voltage, sliding mode.

#### UVOD

Statički pretvarači su nezaobilazan deo sistema u Energetskoj elektronici. Osnovna uloga pretvarača je prilagođavanje raspoloživog oblika i nivoa električne snage izvora, zahtevima potrošača. Da bi se postiglo efikasno upravljanje toka energije neophodno je obezbediti visok koeficijent korisnog dejstva statičkog pretvarača ( u daljem tekstu KKD ). Zahtev za visokim KKD koji se može ostvariti u procesima transformacije električne energije, uslovljava da osnovni element strukture statičkih pretvarača bude prekidač, a ne kontinualno promenljiv element.

Nelinearna priroda pretvarača kao sistema sa promenljivom strukturom nameće potrebu da se problem upravljanja rešava u klasi nelinearnih dinamičkih sistema sa prekidačkim dejstvima.

#### 1. NEKE OSNOVNE STRUKTURE STATIČKIH PRETVARAČA

Iz definisane funkcije pretvarača proizlazi da su tri električne veličine napon ( $U$ ), struja ( $I$ ) i frekvencija ( $f$ ) predmet upravljanja i transformacije pomoću pretvarača.

Povezivanjem sistema naizmjeničnog i istosmernog napona (struje) moguća su sledeća četiri tipa transformacije:

- ispravljanje
- pretvaranje naizmjeničnog napona (struje)
- pretvaranje istosmernog napona (struje)
- invertovanje

Polazeći od navedenih tipova transformacije pretvarače delimo na:

- ISPRAVLJAČE (AC/DC CONVERTERS)
- PRETVARAČE ISTOSMERNOG NAPONA (STRUJE) (DC/DC CONVERTERS)
- INVERTORE (INVERTERS)
- PRETVARAČE FREKVENCIJE (AC/AC CONVERTERS)

Funkcionalna razlika između pojedinih tipova pretvarača sadržana je u valnim oblicima koji su određeni algoritmom preključivanja prekidača u čvorovima matrice i vrstom korištenih prekidača.

##### 1.1 Matematički model prekidačkih matrica

Prekidač opisujemo prekidnom funkcijom  $u(t)$  koja je ravna jedinici kada je prekidač zatvoren, a ravna nuli kada je prekidač otvoren. Označimo sa  $y(t)$  izlazni signal a sa  $x(t)$  ulazni signal. Preključivanje prekidača može se tada opisati sa:

\* Mr. Dragan Filipović dipl.el.ing., AMB GRAFIKA D.D., Futoški put 67, Novi Sad

$$\dot{y}(t) = x(t)u(t) \quad (1-1)$$

ili

$$y(t) = \begin{cases} x(t), u(t) = 1 \\ 0, u(t) = 0 \end{cases}$$

Funkcija  $u(t)$  koja se u literaturi naziva *modulaciona funkcija* predstavlja upravljački signal koji definiše ponašanje prekidača. Funkcionisanje prekidačke matrice sa  $n$  naponskih ulaza definisanih vektorom  $V_i^T(t) = [V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}]$  i  $m$  izlaznih struja definisanih vektorom  $I_0^T(t) = [i_{01}, i_{02}, \dots, i_{0m}]$  može se opisati jednačinama:

$$\begin{aligned} V_0(t) &= Q(t)I_0(t) \\ I_1(t) &= Q^T(t)I_0(t) \end{aligned} \quad (1-2)$$

Vektor  $Q^T(t)$  je transponovana matrica  $Q(t)$  čiji su elementi prekidne funkcije  $u_{ij}(t)$  koje određuju stanje prekidača u prekidačkoj matrici. Iz do sada rečenog može se zaključiti da ako su definisani:

- nezavisne ulazne promenljive
- nezavisne izlazne promenljive
- funkcije preključivanja prekidača  $u_{ij}(t)$

izlazni naponi (ili struje) i ulazne struje (ili naponi) mogu se izračunati kao zavisne veličine. Logika preključivanja prekidača u matrici ne može biti proizvoljno odabrana iz razloga što se naponski izvor ne može dovesti u stanje kratkog spoja, a stujni izvor u stanje otvorenog kola. Ova ograničenja definišu broj nezavisnih upravljanja koji je manji od broja prekidača.

## 2. KLIZNI REŽIM

### 2.1 Klizni režim u ravni

Neka je dat dinamički sistem opisan diferencijalnom jednačinom:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) + \tau(t) + B(x, t)u \quad (2-1)$$

gde su:

$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$   $n$ -dimenzionalni vektor stanja sistema

$f = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$   $n$ -dimenzionalna vektor funkcija koja zavisi od parametara stanja sistema i vremena

$\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_r]^T$   $r$ -dimenzionalni vektor smetnji

$B(x, t) = B_{n \times r}$  upravljačka matrica

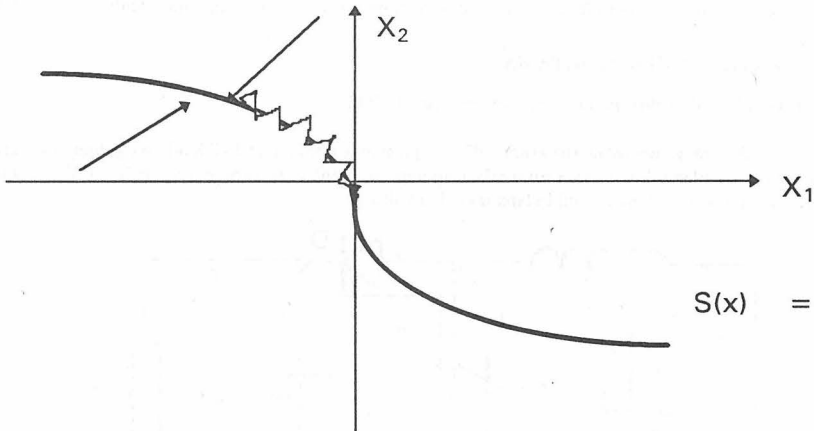
$u = [u_1, u_2, \dots, u_r]^T$   $r$ -dimenzionalni vektor upravljanja

Pretpostavimo da komponente upravljanja  $u_i$ ,  $i=1, 2, \dots, r$  imaju prekide na nekim površinama  $S_i(x, t) = 0$   $i=1, 2, \dots, r$  u prostoru stanja sistema  $X$  tj.

$$u_i(x, t) = \begin{cases} u_i^+(x, t) \\ u_i^-(x, t) \end{cases} \quad (2-2)$$

gde su  $u_i^+$ ,  $u_i^-$ ,  $S_i$  -neprekidne funkcije od  $x$  i  $t$ .

Obzirom na prekidnu desnu stranu jednačine (2-2) nisu zadovoljeni uslovi klasične teoreme o egzistenciji i jedinstvenosti rešenja. U slučaju skalarnog upravljanja  $u=1$  u prostoru stanja sistema postoji samo jedna površina preključivanja  $S(x, t)=0$ . Obzirom da vektor brzine  $dx/dt$  ima prekide, za posebno odabranu ravan  $S(x, t)=0$  i upravljanje  $u$ , trajektorije kretanja u okolini ravni  $S(x, t)=0$  mogu biti usmerene jedna ka drugoj. Na slici 1 data je grafička interpretacija za slučaj dvodimenzionalnog prostora stanja u kome je  $S(x, t)=S(x)$ .



Sl.1 Trajektorije sistema u blizini linije prekida desne strane

Kada fazna tačka krećući se u faznoj ravni padne na površinu preključivanja ( $t = t_1$ ) dalje kretanje sistema ( $t > t_1$ ) može se odvijati samo duž trajektorija koje leže na površini preključivanja. Ovakvo kretanje u teoriji je poznato pod nazivom KLIZNI REŽIM, a uslovi njegove egzistencije su dati u formi:

$$\lim_{S \rightarrow 0^-} \frac{d}{dt} S(x, t) > 0 \quad \lim_{S \rightarrow 0^+} \frac{d}{dt} S(x, t) < 0 \quad (2-3)$$

Iz uslova (2-3) se vidi da odstupanje od površine preključivanja i brzina promene imaju u okolini površine preključivanja suprotne predznake. Kod jednokonturnih sistema površinu treba odabrati u prostoru izlazne koordinate i njenih izvoda po vremenu.

## 2.2 Klizni režim u prostoru

Kada je upravljanje vektorska veličina problem sinteze sistema upravljanja je veoma složen. Tada je u faznom prostoru moguće naći više površina preključivanja  $S_i(x, t) = 0$   $i=1, 2, \dots, r$  na kojima je moguće organizovati klizni režim, a čak je moguće da klizni režim postoji na preseku površina koje nisu istovremeno i površine preključivanja struktura u SPS. Rešenje ovog problema svodi se na obezbeđenje stabilnog kretanja sistema na preseku površina  $S_i(x, t) = 0$ ,  $i=1, 2, \dots, r$ .

Za nalaženje jednačina kretanja u kliznom režimu najčešće se koristi metod *ekvivalentnog upravljanja*. I ovde treba definisati uslove za uspostavljanje kliznog režima na  $S(x, t) = 0$ ,  $S(x, t) = [S_1(x, t), S_2(x, t), \dots, S_r(x, t)]^T$ . Rešenje ovog problema svodi se na obezbeđenje stabilnog kretanja sistema na preseku površina  $S_i(x, t) = 0$   $i=1, 2, \dots, r$ . Procedura je sledeća. Polazeći od jednačine:

$$\frac{dS}{dt} = Gf + G\tau + GBu = 0 \quad (2-4)$$

istu rešavamo po upravljanju  $u$  i ovo rešenje se zove *ekvivalentno upravljanje*  $u$ .

$$u_{eq} = -(GB)^{-1} Gf - (GB)^{-1} G\tau \quad (2-5)$$

ovo upravljanje se vrati u jednačinu sistema (2-1)

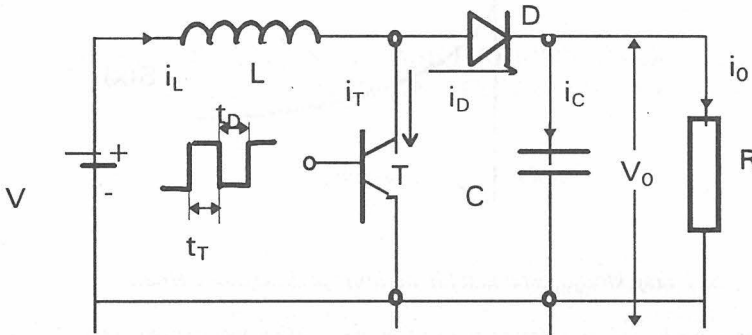
$$\frac{dx}{dt} = f + \tau - B(GB)^{-1} Gf - B(GB)^{-1} G\tau \quad (2-6)$$

Dobivena jednačina ima sada neprekidnu desnu stranu i predstavlja jednačinu idealnog kliznog režima.

### 3. SINTEZA UPRAVLJAČKIH ALGORITAMA

#### 3.1 Sinteza upravljačkog algoritma za DC/DC pretvarač tipa BOOST

Na slici 2 data je osnovna struktura DC/DC pretvarača tipa BOOST. Kod ovog tipa pretvarača vreme vođenja diode zavisi od ulaznog napona, a nivo izlaznog napona reguliše se promenom DUTY CYCLE upravljačkih impulsa u bazi tranzistora T. Volt-sekundni balans izgleda ovako:



Sl.2 Praktična realizacija osnovne strukture DC/DC pretvarača tipa BOOST

$$\int_0^{DT} V_L * dt = - \int_0^T V_L * dt \quad (3-1)$$

Prema zakonu o održanju energije, a na osnovu valnih oblika napona i struje na zavojnici L dobivamo prenosni odnos napona:

$$\frac{V_o}{V_G} = \frac{1}{1-D}, 0 < D < 1, V_o > V_G \quad (3-2)$$

DC/DC pretvarač tipa BOOST je jednokonturni sistem sa jednim izlazom i jednim upravljačkim dejstvom. Izlazna veličina je napon na kondenzatoru  $V_o$ , a upravljanje je skalar i ono određuje stanje glavnog prekidača T.

Organizovanje kretanja u kliznom režimu ima za cilj održavanje izlaznog napona  $V_o$  na unapred zadanoj konstantnoj vrednosti  $V_o^* = const$ . Pri sintezi upravljanja polazi se od matematičkog modela čije koordinate predstavljaju greške upravljanja:  $X_1 = i_L - i_L^*$  i  $X_2 = V_o - V_o^*$  gde su  $i_L^*$ ,  $V_o^*$  zadane vrednosti struje kroz zavojnicu i napona na izlaznom kondenzatoru C.

$$\hat{X} = A \hat{X} + B u + T$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_L}{dt} \\ \frac{d\hat{V}_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{V}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_o}{L} \\ \frac{L}{C} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$l_1, l_2$  - smetnje koje deluju na sistem.

Klizna ravan se definiše kao :

$$S = G \hat{X} = 0, \hat{X} = X - X^* \quad (3-4)$$

gde je  $\hat{X}$  greška upravljanja u prostoru stanja koja definiše odstupanje upravljane koordinate od njene zadane vrednosti  $X^*$ .

Funkciju preključivanja  $\sigma$  biramo kao :

$$\sigma = G \hat{X} = R s i l + \hat{V} o \quad (3-5)$$

$R_s$  - shunt za merenje struje.

Uslovi egzistencije kliznog režima u BOOST pretvaraču dati su sa :

$$S = G \hat{X} = 0 \quad (3-6)$$

Upravljanje  $u$  biramo tako da je u svakom trenutku zadovoljeno:

$$\lim_{S \rightarrow 0^+} S < 0 \quad \lim_{S \rightarrow 0^-} S > 0 \quad (3-7)$$

Da bismo desnu stranu sistema (3-3) učinili neprekidnom uvodimo ekvivalentno upravljanje  $u_{eq}$  koristeći metod ekvivalentnog upravljanja iz drugog dela članka.

$$U_{eq} = -(GB)^{-1} \left[ GA \hat{X} + GT \right] \quad (3-8)$$

a usrednjeno kretanje sistema (3-3) opisuje se sada sa:

$$\hat{X} = \left[ I - B(GB)^{-1}G \right] (A \hat{X} + T) \quad (3-9)$$

Kod praktične realizacije algoritma upravljanja mora se voditi računa o sledećim problemima:

- izbor funkcije preključivanja i problem dobivanja neophodnih informacija o objektu upravljanja
- projektovanje realnog kliznog režima
- ograničenje struje kroz prekidač T.

### 3.2 Sinteza upravljačkog algoritma za DC/AC pretvarač u izvedbi monofaznog tranzistorskog invertora

Na slici 3 prikazana je topologija DC/AC pretvarača. Objekt upravljanja sa slike 3 je dinamički sistem drugog reda sa promenljivom strukturom. Upravljanje ovakvog objekta je prekidna funkcija stanja objekta. Kretanje sistema odvija se tada duž trajektorija koje su smeštene u faznoj ravni koju formiraju napon i struja kondenzatora kao promenljive stanja. U našem slučaju imamo dve nezavisne podstrukture. Pri sintezi sistema upravljanja izbor faznih trajektorija ne sme zavisiti od podstrukture sistema.

Organizovanje kliznog režima ima za cilj da obezbedi da izlazni naizmenični sinusoidalni napon prati referentnu sinusoidu koju izražavamo preko zadane vrednosti:

$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (3-10)$$

Da bi rešili osnovni zadatak upravljanja matematski model zapisujemo u koordinatama koje su greške upravljanja i njen prvi izvod:

$$X_1 = V_C - V_Z \quad \dot{X}_1 = \dot{V}_C - \dot{V}_Z \quad (3-11)$$

Matematički model sistema sada dobija ovu formu:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_C - \dot{V}_Z \\ \ddot{V}_C - \ddot{V}_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_C - V_Z \\ \dot{V}_C - \dot{V}_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V_{Gu} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} V_Z$$

Funkcija preključivanja formirana je u obliku:

$$\sigma = K(V_C - V_Z) + (\dot{V}_C - \dot{V}_Z) \quad (3-13)$$

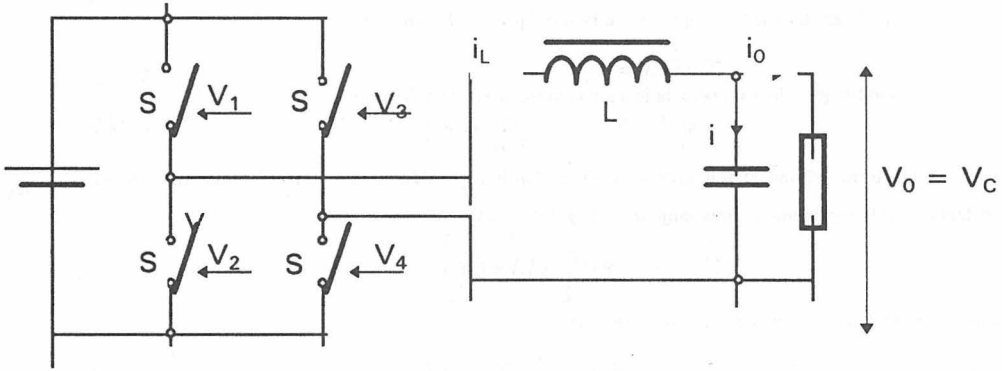
$$\sigma = KX_1 + X_2, X_2 = \dot{X}_1$$

Ako odaberemo upravljanje  $u$  tako da klizni režim postoji duž linije  $\sigma=0$  problem upravljanja će biti rešen. Kretanje u ovakvom sistemu možemo tada opisati diferencijalnom jednačinom prvog reda:

$$KX_1 + \dot{X}_1 = 0 \quad (3-14)$$

čije je rešenje:

$$X_1(t) = X_1(t_0) e^{-K(t-t_0)} \quad (3-15)$$



Sl.3 Principijelna šema DC/AC pretvarača sa LC filtrom i omskim potrošačem

Prema tome greška upravljanja će po eksponencijalnom zakonu težiti ka nuli sa vremenskom konstantom

$\tau=1/K$  Ako klizni režim egzistira na liniji  $\sigma=0$  tada su zadovoljeni uslovi za egzistenciju kliznog režima:  $\sigma \cdot \dot{\sigma} < 0$ . Ili u aktuelnom prostoru stanja ovaj uslov možemo pisati kao :

$$\left[ K(V_C - V_Z) + (\dot{V}_C - \dot{V}_Z) \right] \left( K - \frac{1}{RC} \right) (\dot{V}_C - \dot{V}_Z) - \frac{V_C}{LC} + \frac{V_{INV}}{LC} < 0$$

Na osnovu izraza za izlazni napon  $V_{INV}$  u stacionarnom stanju te koristeći izraze (3-11) i (3-12) možemo konstatovati sledeće. Ako je :

$$V_{INV} = V_G(-\text{sgn } \sigma) \quad (3-17)$$

$$|V_{INV}| > \left| (KLC - L/R)(\dot{V}_C - \dot{V}_Z) - V_C \right| \quad (3-18)$$

tada će biti zadovoljen uslov (3-16).

Upoređujući izraz  $V_{INV} = V_G u$  i izraz (3-17) jasno je da upravljanje  $u$  treba odabrati u formi:

$$u = -\text{sgn } \sigma = \begin{cases} -1, \sigma > 0 \\ +1, \sigma < 0 \end{cases} \quad (3-19)$$

Fizikalno gledano u sistemu sa slike 3 izvor ulaznog istosmernog napona mora biti sposoban da isporučiti dovoljno energije potrebne za održavanje kretanja u kliznom režimu onda kada je fazna tačka počela da se kreće duž linije  $\sigma=0$ .

U realnom sistemu znak funkcije preključivanja detektuje se pomoću relejnog elementa sa histerezom. Od širine histereze zavisi frekvencija preključivanja i tačnost praćenja zadanog valnog oblika. Ograničenje na

maksimalno moguću frekvenciju preključivanja jeste minimalan vremenski interval neophodan za pouzdanu komutaciju prekidača u pretvaraču. Drugi ograničavajući faktor su prekidački gubici u procesu komutacije.

Tipični prelazni proces u sistemu upravljanja DC/AC pretvarača odlikuje se drastičnim odstupanjem stvarnih vrednosti upravljanih veličina od njihovih zadanih vrednosti. Maksimalna brzina kojom će sistem upravljanja anulirati nastalu grešku zavisi pre svega od maksimalno dopuštene struje kroz prekidače u pretvaraču. U cilju zaštite prekidača formira se sklop za ograničenje struje koji mora biti kompatibilan sa strukturom preko koje se realizuje upravljanje pri kretanju po kliznoj ravni.

#### 4. STATIČKI PRETVARAČ ISTOSMERNOG U NAIZMENIČNI SINUSOIDALNI NAPON IZLAZNE SNAGE 300 VA

Sva dosadašnja razmatranja dobila su svoju praktičnu potvrdu u konkretnom statičkom pretvaraču izlazne snage 300 VA. Pretvarač je realizovan kao redna kombinacija DC/DC pretvarača tipa BOOST i direktnog DC/AC pretvarača sa tranzistorima kao prekidačima.

Ovaj stički pretvarač pretvara ulazni istosmerni napon od 28V u naizmenični sinusoidalni napon 115V, 400Hz. Nominalna izlazna snaga je 300VA.

Obavljena su opsežna funkcionalna ispitivanja ovog uređaja. Eksperimentalni rezultati pokazuju kvalitativno ponašanje uređaja u različitim radnim režimima u kojima se on može naći u toku eksploatacije, a pri čemu se neće oštetiti.

Ispitivanja su obuhvatila niz eksperimenata u kojima su menjane razne vrste opterećenja, menjani razni nivoi ulaznog napona, simulirane skokovite promene opterećenja, simulirane step promene na ulaznom naponu.

Zbog ograničenog prostora za izlaganje ovde će biti prikazana samo dva dijagrama. Na prvom dijagramu su prikazani izlazni napon i struja pri R-L opterećenju ( $\cos\varphi=0.8$  induktivno) i nominalnom ulaznom naponu. Na drugom dijagramu su prikazani izlazni napon i struja te ulazni napon statičkog pretvarača kod promene omskog opterećenja od 0% do 100%.

Funkcionalna ispitivanja su pokazala da:

- a) efektivna vrednost izlaznog napona i struje neznatno se menja sa promenom vrste opterećenja.
- b) promene u valnom obliku izlaznog napona je neznatna pri prelasku iz praznog hoda u stanje sa nominalnim omskim opterećenjem. Trajanje devijacije je manje od 20 ms.
- c) amplituda NF ripple na ulaznom DC naponu je zanemariva i iznosi 0,7% od nominalne vrednosti ulaznog napona.

U prilogu na sledećoj strani su data dva dijagrama koji predstavljaju rezultate provere.

#### ZAKLJUČAK

Koncepcija uređaja i založeni algoritmi upravljanja osnovnih pretvarača obezbeđuju:

1. robusnost uređaja na promenu opterećenja
2. neovisnost rada od promena parametara objekta upravljanja
3. zadovoljavajuću dinamiku odziva obzirom na konkretnu namenu uređaja

#### LITERATURA

- [1] R. E. Tarter : *Principles of solid-state power conversion* H. Sans, C. INC. 1985.
- [2] V.I. Utkin : *Klizni režimi i njihova primena u SPS* Moskva 1974.
- [3] A. Šabanović : *Klizni režimi u upravljanju električnih mašina* Sarajevo 1990
- [4] S.V. Ernelanov : *Teorija sistema sa promenljivom strukturom.*
- [5] N. Šabanović : *Varijable structure system application to switching converts control*, PCIM 1990.
- [6] A. Šabanović : *Sliding mode control of DC/AC converters*, PESC 1986.

11491 DIGITIZING OSCILLOSCOPE  
Date: 1 11 11 Time: 14

11491 DIGITIZING OSCILLOSCOPE  
Date: 1 11 11 Time: 14

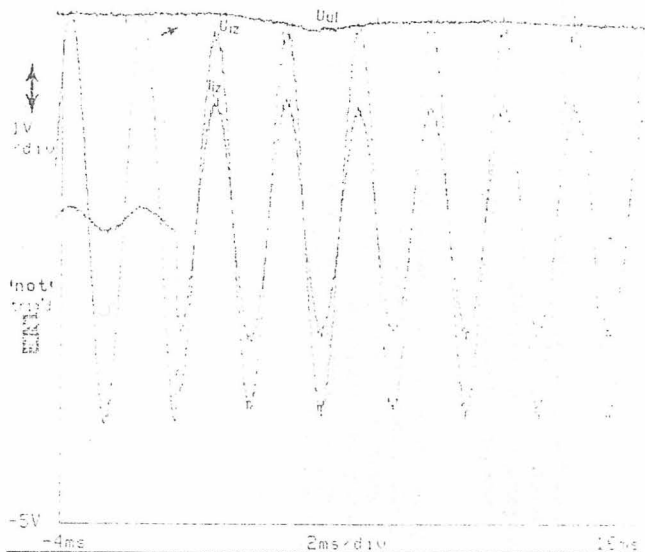
Tek

Cursors

Hardout

Def Rem

U<sub>1</sub>: 50V/div.  
I<sub>1</sub>: 2A/div.  
U<sub>2</sub>: 10V/div.



|          |          |          |          |                 |
|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| Store    | Recall   | Clear    | Delete   | Trig Level: M   |
| Waveform | Waveform | Waveform | Waveform | 3.1V            |
|          |          |          |          | Time Holdoff: M |
|          |          |          |          | 490ns           |
| Store    | Recall   | Sequence | Delete   | Remove          |
| Setting  | Setting  | Settings | Setting  | Wfm 3           |
|          |          | Off      |          | L3              |
|          |          |          |          | Main            |

SI 5-8 Izlazni napon i struja te ulazni napon statičkog pretvarača kod promjene opterećenja od 0% do 100%.

11491 DIGITIZING OSCILLOSCOPE  
Date: 1 11 11 Time: 14

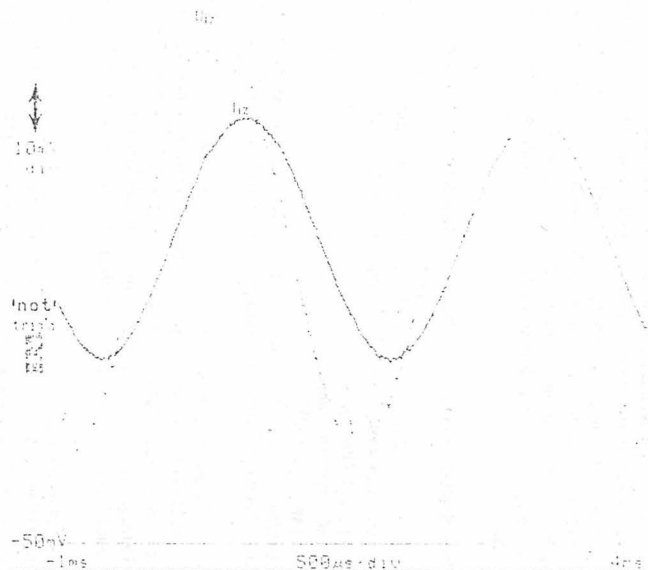
11491 DIGITIZING OSCILLOSCOPE  
Date: 1 11 11 Time: 14

Tek

Cursors

Def Rem

U<sub>1</sub>: 50V/div.  
I<sub>1</sub>: 2A/div.



|          |          |          |          |                 |
|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| Store    | Recall   | Clear    | Delete   | Trig Level: M   |
| Waveform | Waveform | Waveform | Waveform | 55mV            |
|          |          |          |          | Time Holdoff: M |
|          |          |          |          | 490ns           |
| Store    | Recall   | Sequence | Delete   | Remove          |
| Setting  | Setting  | Settings | Setting  | Wfm 2           |
|          |          | Off      |          | L3              |
|          |          |          |          | Main            |

SI 5-4 Izlazni napon i struja pri R-L opterećenju (cosφ = 0.14) i nominalnom ulaznom naponu.