

## KOMUTACIJSKI KRUGOVI KOD NEZAVISNO KOMUTIRANOG IZMJENJIVAČA U MOSNOM SPOJU

### COMMUTATION CIRCUITS FOR McMURRAY IMPULSE COMMUTATED INVERTER

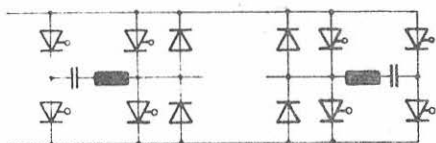
**SAŽETAK:** U članku je provedena analiza, optimiranje i usporedba tri moguća komutacijska kruga za nezavisno komutirani izmjenjivač u mosnom spoju. Kao osnovni parametri za usporedbu odabrani su: gubici zbog komutacije i ukupno trajanje komutacije. Na bazi dobivenih rezultata izabran je optimalan komutacijski krug za izmjenjivač koji radi na povišenoj radnoj frekvenciji.

**ABSTRACT:** Three possible commutation circuits for impulse commutated inverter are analysed, optimized and compared. Power losses due to commutation and the total commutation interval duration were chosen as the basis for comparison. The optimum commutation circuit was selected for the inverter operating at a higher frequency.

#### 1. UVOD

Za izmjenjivače kod kojih je frekvencija rada veća od frekvencije izlaznog napona najčešće se koristi McMurray-ev nezavisno komutirani izmjenjivač u mosnom spoju, (1).

Slika 1 prikazuje shemu jednofaznog izmjenjivača ovog tipa.



Sl.1.

Kada izmjenjivač radi na povišenoj frekvenciji bitno je:

- da su gubici u komutacijskom krugu što manji,
- da proces komutacije završi u što kraćem vremenu.

Osnovna značajka ovog tipa komutacijskog kruga

je da napon na komutacijskom kondenzatoru zavisi o struji tereta i faktoru gušenja  $\alpha$ , i uvijek je veći od napona izvora. Obzirom na tu karakteristiku postoje dva osnovna načina upotrebe ovakvog komutacijskog kruga:

- uzima se u obzir nadvišenje napona na komutacijskom kondenzatoru i iskorištava se,
- pomoću dodatnih dioda i otpornika poništava se višak energije u komutacijskom kondenzatoru (napon na kondenzatoru jednak je naponu izvora).

Postoji i treći način upotrebe kod kojeg se napon na komutacijskom kondenzatoru odgovarajućim upravljanjem tiristorima održava konstantnim, nezavisno od struje tereta i napona izvora. Bez detaljne analize sve tri slučaja nemoguće je odlučiti koji način je povoljniji.

Za sva tri načina rada biti će provedena analiza naponsko-strujnih odnosa po intervalima, te će biti izvršeno optimiranje kruga. Nakon toga biti će moguće odlučiti se za najpovoljnije rješenje.

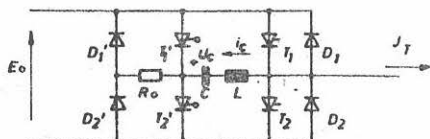
Analizirati će se samo intervali komutacije uz struju tereta induktivnog karaktera. Za struju koja je omskog ili kapacitivnog karaktera analiza nije potrebna. Tada se oba-

vezno mora okidati drugi glavni tiristor kako ne bi došlo do gubitka napona na komutacijskom kondenzatoru, a jednadžbe po intervalima su identične ili gotovo identične onima za induktivnu struju.

## 2. POPIS UPOTREBLJENIH OZNAKA

- $E_0$  - napon izvora  
 $I_T$  - struja tereta u trenutku komutacije  
 $X = \sqrt{\frac{L}{C}}$  - valni otpor komutacijskog kruga  
 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  - vlastita kružna frekvencija komutacijskog kruga  
 $R$  - nadomjesni otpor komutacijskog kruga  
 $\xi = \frac{R}{2L}$  - faktor gušenja komutacijskog kruga  
 $\omega^2 = \omega_0^2 - \xi^2$  - kružna frekvencija komutacijskog kruga  
 $\alpha = e^{-\xi \frac{\pi}{\omega}}$  - koeficijent prigušenja  
 $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$  - perioda vlastite frekvencije komutacijskog kruga  
 $I_M = \frac{U_c}{X}$  - vršna vrijednost komutacijske struje  
 $\alpha = \frac{I_M}{I_T}$  - odnos vršne vrijednosti struje u komutaciji i struje tereta  
 $t_{00}$  - vrijeme odmaranja tiristora  
 $K = \frac{U_c}{E_0}$  - odnos napona na komutacijskom kondenzatoru i napona izvora  
 $P_{GR}$  - gubici komutacijskog kruga  
 $W_c$  - energija u komutacijskom kondenzatoru  
 $t_u$  - ukupno vrijeme trajanja komutacije  
 $\xi_1 = \frac{R_0}{2L}$  - faktor gušenja kruga za disipaciju  
 $\beta = \frac{R_0}{2X}$  - odnos otpora za disipaciju i valnog otpora komutacijskog kruga  
 $W_{E_0}$  - energija vraćena u izvor  
 $P_{GR_0}$  - gubici na otporniku za disipaciju

## 3. KOMUTACIJSKI KRUG S DISIPACIJOM VIŠKA ENERGIJE



Sl. 2.

Slika 2 prikazuje jednu granu mosta sa slike 1 sa dodatnim diodama ( $D'_1$  i  $D'_2$ ) te otpornikom ( $R_0$ ) za disipaciju viška energije. Izvor je idealni naponski ( $E_0$ ), a struja tereta ( $I_T$ ) je induktivnog karaktera. Na slici 3 prikazani su valni oblici struja i napona na komponentama komutacijskog kruga.

Komutacija ima pet različitih intervala i to su:

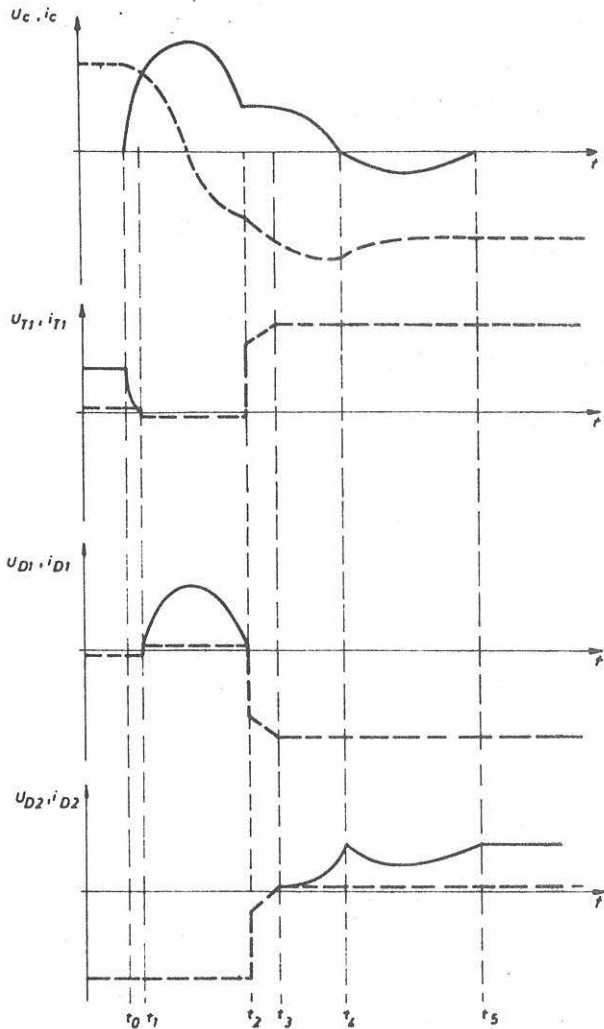
- I - interval ( $t_1 - t_0$ ) - komutacija struje tereta sa glavnog tiristora  $T_1$  na pomoćni tiristor  $T'_1$   
 II - interval ( $t_2 - t_1$ ) - vrijeme odmaranja tiristora  $T_1$ ; struja tereta ide iz izvora

preko L-C a L-C titra preko  $D_1$

III interval ( $t_3-t_2$ ) - punjenje komutacijskog kondenzatora C strujom tereta

IV interval ( $t_4-t_3$ ) - prenapijanje komutacijskog kondenzatora; komutacija struje tereta sa  $T_1'$  na  $D_2$

V interval ( $t_5-t_4$ ) - izbijanje komutacijskog kondenzatora preko  $R_0$  u izvor



Sl. 3.

intervala i relativno male vrijednosti struje.

U V intervalu kondenzator C se isprazni sa napona  $E_0(1+\alpha)$  na napon  $E_0$ . Kod toga se dio energije disipira na otporu  $R_0$  a dio se vrati u izvor. Uz pretpostavku

$$0,5 < \frac{R_0}{2X} < 1 \quad (31)$$

energija vraćena u izvor iznosi

$$W_{E_0} = \frac{E_0 I_T}{\omega_0} \quad (32)$$

U tabeli 1 dane su jednadžbe za struju i napon komutacijskog kondenzatora po intervalima, te vrijednosti za struju i napon komutacijskog kondenzatora na kraju svakog intervala i trajanje svakog intervala.

Trajanje intervala ( $t_2-t_1$ ) jednako je vremenu odmaranja glavnog tiristora  $T_1$ . Znači:

$$\omega_0 t_{00} = \omega_0 t_2 - \omega_0 t_1 = \pi - \arcsin \frac{1}{\alpha} - \arcsin \frac{1}{\alpha X} \quad (27)$$

Postoji beskonačan niz parova vrijednosti L i C koji zadovoljavaju jednadžbu (27). Optimalan par vrijednosti je onaj (1) kod kojeg su gubici u komutacijskom krugu minimalni, odnosno kod kojeg je energija u komutacijskom kondenzatoru minimalna. Gubici u intervalu I i II su:

$$P_{GR} = \left(\frac{I_T}{\sqrt{2}}\right)^2 R \frac{T}{2} = I_T E_0 t_{00} \frac{\alpha (-\ln \alpha)}{\pi - \arcsin \frac{1}{\alpha} - \arcsin \frac{1}{\alpha X}} \quad (28)$$

$$\text{Odnosno: } P_{GR} = 2\omega_0 C (-\ln \alpha) \quad (29)$$

Gdje je:  $W_C = \frac{1}{2} C U_C^2 =$

$$= I_T E_0 t_{00} \frac{\alpha}{2(\pi - \arcsin \frac{1}{\alpha} - \arcsin \frac{1}{\alpha X})} \quad (30)$$

Kod toga je uzeto da sinusni poluval struje iz I i II intervala traje cijelu poluperiodu. Gubici u III i IV intervalu se zanemaruju, što ne bi trebalo uni-  
jeti veliku grešku zbog kratkoće tih

INTERVAL	JEDNAĐBE STRUJE I NAPONA	PRETPOSTAVKE	KRAJ INTERVALA	PRETPOSTAVKE
I	$i_c(t) = -I_T e^{-\beta t} \sin \omega_0 t$ (1) $u_c(t) = -E_0 e^{-\beta t} \cos \omega_0 t$ (2)	$\omega_0 \approx \omega$	$i_c(t_1) = -I_T$ (3) $u_c(t_1) = -E_0 \sqrt{1 - \left(\frac{1}{\alpha}\right)^2}$ (4) $\omega_0 t_1 = \arcsin \frac{1}{\alpha}$ (5)	$\frac{\xi}{\omega_0} \approx 0$ $e^{-\beta t_1} \approx 1$ $\alpha > 1$
II	$i_c(t) = -I_T e^{-\beta t} \sin \omega_0 t$ (6) $u_c(t) = -E_0 e^{-\beta t} \cos \omega_0 t$ (7)	$\omega_0 \approx \omega$	$i_c(t_2) = -I_T$ (8) $u_c(t_2) = E_0 \sqrt{1 - \left(\frac{1}{\alpha}\right)^2}$ (9) $\omega_0 t_2 = \pi - \arcsin \frac{1}{\alpha}$ (10)	$e^{-\beta t_2} = e^{-\beta t_1} = \alpha$ $\alpha > 1$
III	$i_c(t) = -I_T$ (11) $u_c(t) = u_c(t_2) + \frac{I_T}{C} t$ (12)		$i_c(t_3) = -I_T$ (13) $u_c(t_3) = E_0$ (14) $\omega_0 t_3 = \omega_0 t_2 + [x - \sqrt{(x\alpha)^2 - 1}]$ (15)	
IV	$i_c(t) = -I_T \cos \omega_0 t$ (16) $u_c(t) = E_0 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \sin \omega_0 t\right)$ (17)	$\beta = 0$	$i_c(t_4) = 0$ (18) $u_c(t_4) = E_0 \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$ (19) $\omega_0 t_4 = \omega_0 t_3 + \frac{\pi}{2}$ (20)	
V	$i_c(t) = \frac{I_T}{\sqrt{1 - \left(\frac{K_0}{2\alpha}\right)^2}} e^{-\beta t} \sin \omega_1 t$ (21) $u_c(t) = E_0 \left[1 + \frac{1}{x \sqrt{1 - \left(\frac{K_0}{2\alpha}\right)^2}} e^{-\beta t} \sin(\omega_1 t + \varphi)\right]$ (22) $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\left(\frac{2\alpha^2}{K_0}\right) - 1}$ (23)	$\frac{K_0}{2\alpha} < 1$	$i_c(t_5) = 0$ (24) $u_c(t_5) = E_0 \left[1 + \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{K_0}{2\alpha}\right)^2}} e^{-\beta t_5} \sin(\omega_1 t_5 + \varphi)\right]$ (25) $\omega_0 t_5 = \omega_0 t_4 + \frac{\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{K_0}{2\alpha}\right)^2}}$ (26)	$\frac{K_0}{2\alpha} < 1$

Tabela 1

a energija disipirana na otporniku iznosi:

$$P_{GR0} = \frac{L \cdot I_T^2}{2} = \frac{I_T E_0 t_{00}}{2(\pi - \arcsin \frac{1}{\alpha} - \arcsin \frac{1}{\alpha\alpha})} \quad (33)$$

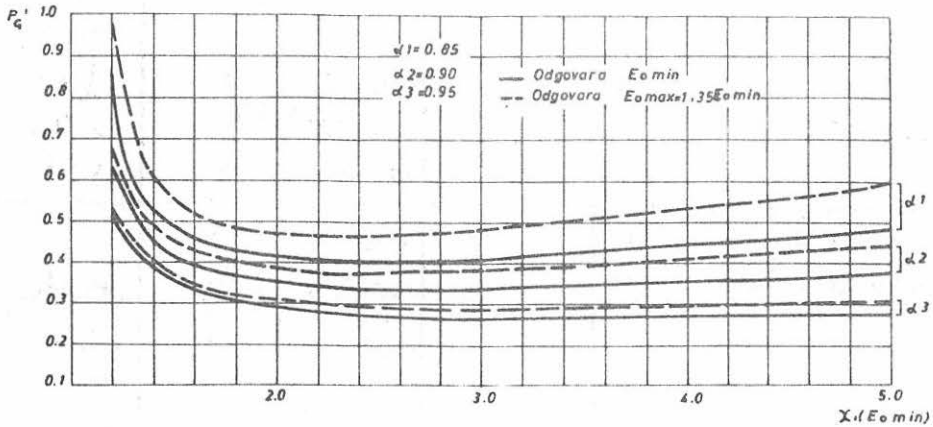
Sada ukupni gubici u krugu normirani na  $I_T E_0 t_{00}$  iznose:

$$P_G' = \frac{P}{E_0 I_T t_{00}} = P_{GR}' + P_{GR0}' = \frac{x(-\ln \alpha) + 0,15}{\pi - \arcsin \frac{1}{\alpha} - \arcsin \frac{1}{\alpha\alpha}} \quad (34)$$

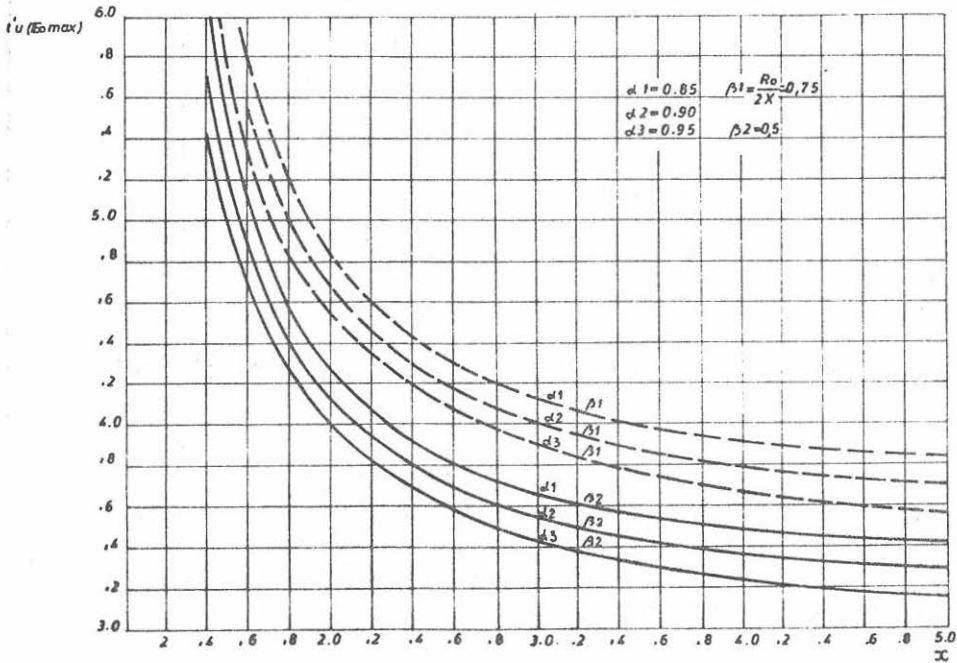
Slika 4 prikazuje ovisnost ukupnih gubitaka u komutaciji  $P_G'$  (prema jednađbi (34))

o faktoru  $\alpha$ , za tri razne vrijednosti  $\alpha$  te za minimalni i maksimalni ulazni napon ( $U_{ul} = U_{ulN} \pm 15\%$ ). Vidi se da  $P_G'$  ima slabo izraženi minimum za vrijednosti  $\alpha$  između 2 i 3.

Slika 5 prikazuje ovisnost ukupnog trajanja komutacije  $t_u$  ( $t_u = t_u/t_{00} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$ ) o faktoru  $\alpha$ , za tri razne vrijednosti  $\alpha$  te za dvije vrijednosti  $\beta$ . Ukupno tra-



Sl. 4.

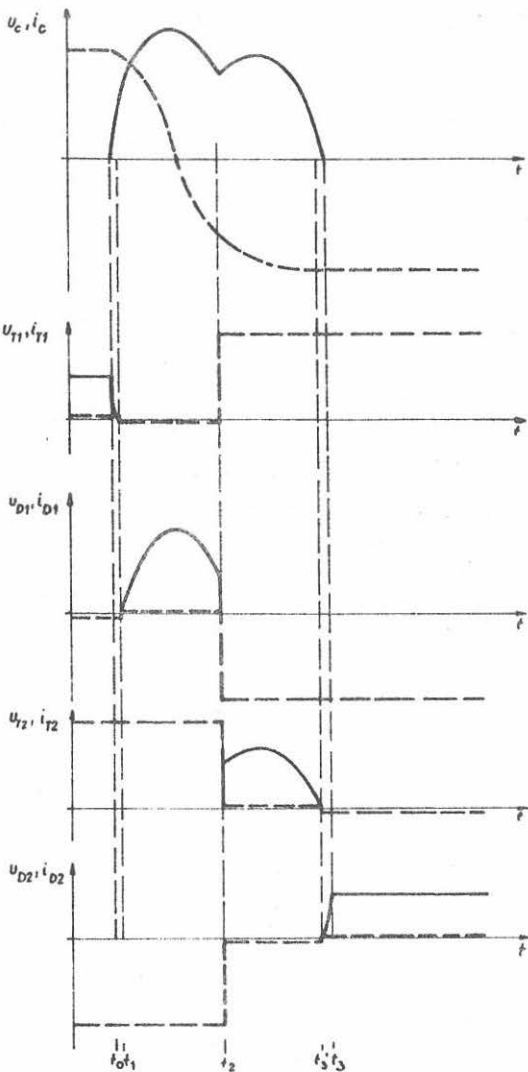


Sl. 5.

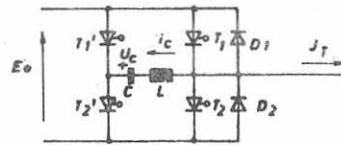
janje komutacije pada sa smanjivanjem ulaznog napona te je na slici 5 prikazano samo za  $E_{o \max}$  (maksimalno trajanje komutacije).

#### 4. KOMUTACIJSKI KRUG S REGULIRANIM NAPONOM KOMUTACIJSKOG KONDENZATORA

Slika 6 prikazuje jednu granu mosta sa slike 1. Pretpostavke za proračun su iste kao pod 3. Na slici 7 prikazani su valni oblici struja i napona na komponentama komutacijskog kruga. Prema slikama 6 i 7 do trenutka  $t_0$  struju tereta vodio je tiristor  $T_1$ . U tom trenutku okida se tiristor  $T_1^f$  i počinje komutacija koja ima četiri intervala (slika 7), no jednadžbe su pisane tako da su treći i četvrti interval uzeti zajedno (tabela 2),



Sl. 7.



Sl. 6.

pošto vrijednosti struja i napona na kraju trećeg intervala ne predstavljaju interes.

Intervali u komutaciji su:

I interval ( $t_1 - t_0$ ) - komutacija struje tereta sa glavnog tiristora  $T_1$  na pomoćni tiristor  $T_1'$

II interval ( $t_2 - t_1$ ) - vrijeme odmaranja tiristora  $T_1$ ; struja tereta ide iz izvora preko L-C a L-C istovremeno titra preko  $D_1$

III interval ( $t_3' - t_2$ ) - u trenutku  $t_2$  okida se tiristor  $T_2$ ; struja tereta i dalje teče iz izvora preko L-C. i počinje dodatno nabijanje C iz izvora preko tiristora  $T_2$

( $t_3 - t_3'$ ) - komutacija struje tereta s pomoćnog tiristora  $T_1'$  na diodu  $D_2$

INTERVAL	JEDNAŽBES STRUJE I NAPONA	PRETPOSTAVKE	KRAJ INTERVALA	PRETPOSTAVKE
I	$i_c(t) = -k I_{T1} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega_0 t \quad (35)$ $u_c(t) = -k E_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega_0 t \quad (36)$	$\omega_0 \approx \omega$	$i_c(t_1) = -I_T \quad (37)$ $u_c(t_1) = -k E_0 \sqrt{1 - \left(\frac{I_T}{k I_{T1}}\right)^2} \quad (38)$ $\omega_0 t_1 = \arcsin \frac{1}{\alpha} \quad (39)$	$\frac{E}{\omega_0} \approx 0$ $e^{-\frac{t_1}{\tau}} \approx 1$ $\alpha > 1$
II	$i_c(t) = -k I_{T1} \alpha e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega_0 t \quad (40)$ $u_c(t) = -k E_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega_0 t \quad (41)$	$\omega_0 \approx \omega$	$i_c(t_2) = -k I_{T1} \alpha \sin \omega_0 t_2 \quad (42)$ $u_c(t_2) = -k E_0 \alpha \cos \omega_0 t_2 \quad (43)$	$e^{-\frac{t_2}{\tau}} \approx e^{-\frac{t_1}{\tau}} = \alpha$ $\frac{\pi}{2} < \omega_0 t_2 < \pi$
III	$i_c(t) = \frac{E - u_c(t)}{X} e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega_0 t - i_c(t_2) e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega_0 t \quad (44)$ $u_c(t) = E_0 [E_0 - u_c(t)] e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}) - i_c(t_2) X e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega_0 t \quad (45)$	$\omega_0 \approx \omega$	$i_c(t_3) = 0 \quad (46)$ $u_c(t_3) = k E_0 \quad (47)$ $\omega_0 t_3 = \arctg \frac{i_c(t_2) X}{E_0 - u_c(t_2)} \quad (48)$	$e^{-\frac{t_3}{\tau}} \approx 1$

Tabela 2

U tabeli 2 dane su jednadžbe za struju i napon komutacijskog kondenzatora po intervalima, te vrijednosti za struju i napon komutacijskog kondenzatora na kraju svakog intervala i trajanje svakog intervala.

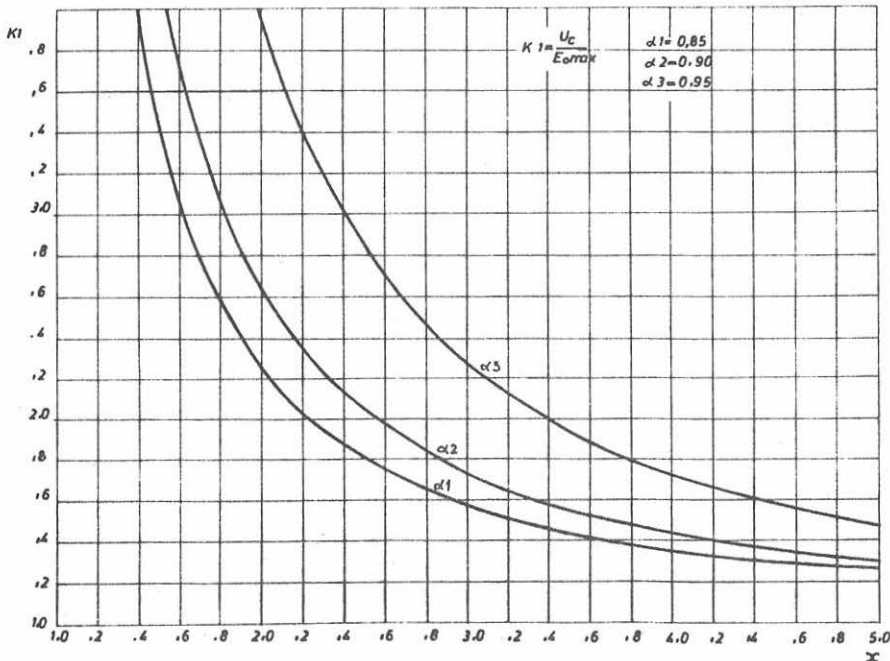
Kada vrijednosti jednadžbi (42), (43) i (48) uvrstimo u jednadžbu (45) i izjednačimo je s jednadžbom (47) dobijemo izraz za K:

$$K = \frac{2(1 + \alpha \cos \omega_0 t_2)}{1 - \alpha^2} \quad (49)$$

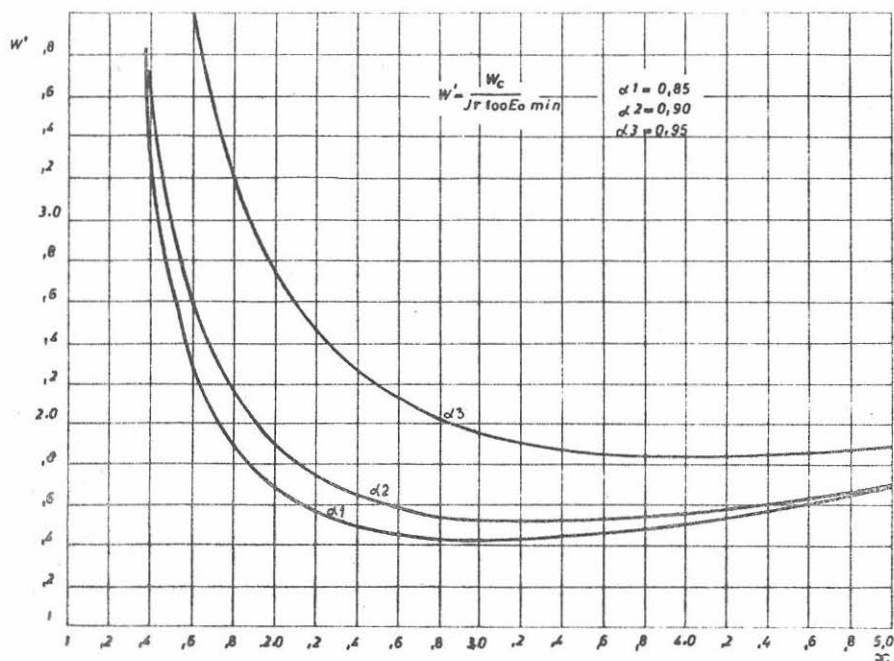
Iz jednadžbe (49) vidi se da se promjenom trenutka okidanja tiristora  $T_2$  (trenutak  $t_2$ ) može mijenjati faktor K, a to znači da se odgovarajućom regulacijom trenutka okidanja tiristora  $T_2$  napon na komutacijskom kondenzatoru može održavati konstantnim, neovisno o ulaznom naponu napajanja.

Kako bi se ova varijanta komutacijskog kruga mogla usporediti sa ostalima, potrebno je odabrati način upravljanja. Pretpostavljam da se okidanje tiristora  $T_2$  (trenutak  $t_2$ ) kod  $E_{\text{omax}}$  odigrava upravo u trenutku kad struja kroz komutacijski krug postane jednaka struji tereta. Kada ulazni napon pada ta točka se pomiće prema  $t_1$  upravo tako da napon na komutacijskom kondenzatoru ostane konstantan. Kako je trajanje intervala  $t_2 - t_1$  jednako vremenu odmaranja tiristora, vidimo da je to vrijeme minimalno kod  $E_{\text{omin}}$ .

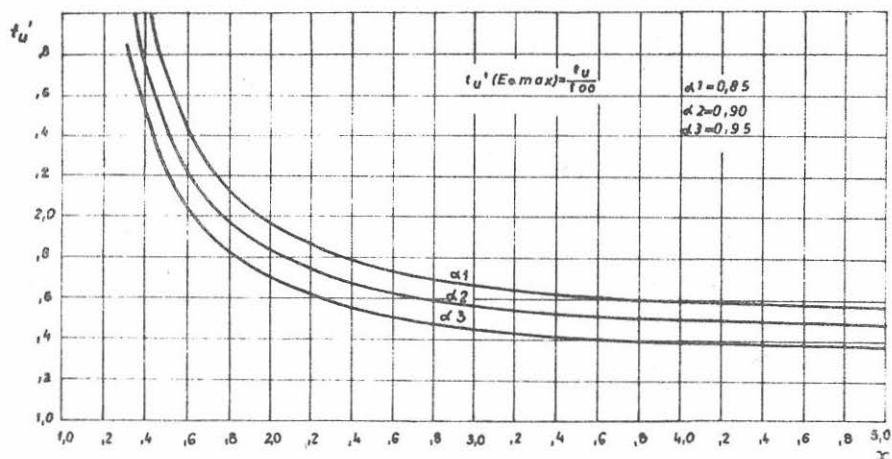
Uz tako pretpostavljeni način upravljanja trenutkom okidanja tiristora  $T_2$  nacrtani su dijagrami na slikama 8-10. Na slici 8 prikazana je ovisnost  $K = f(\alpha)$  za tri vrijednosti  $\alpha$ , te za  $E_{\text{omax}}$ . Slika 9 prikazuje ovisnost energije u kondenzatoru o odabranom faktoru  $\alpha$ , te se vidi da ove krivulje imaju minimum, zavisno od  $\alpha$ , negdje između  $\alpha = 2.5 - 3.5$ . Slika 10 prikazuje ovisnost ukupnog trajanja komutacije ( $t_u = t_3 - t_0$ ) o



Sl. 8.



Sl. 9.

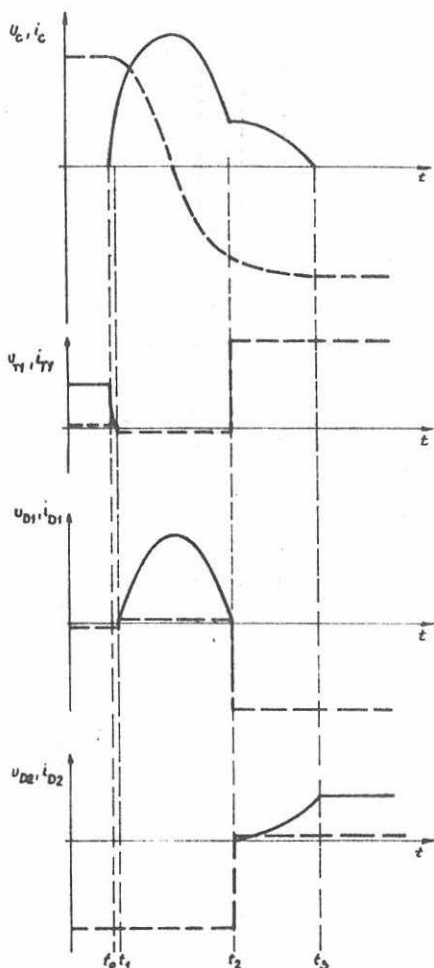


Sl.10.

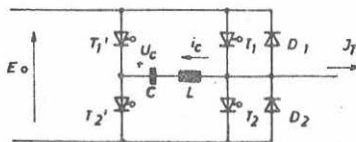
faktoru  $x$ , pri  $E_{o \max}$ . Kod nižeg ulaznog napona to vrijeme je kraće.

#### 5. KOMUTACIJSKI KRUG BEZ DISIPACIJE I REGULACIJE

Slika 11 prikazuje jednu granu mosta sa slike 1. Pretpostavke za proračun iste su kao pod 3. Na slici 12 prikazani su valni oblici struja i napona na komponentama komutacijskog kruga. Prema slikama 11 i 12 do trenutka  $t_0$  struju tereta vodio je tiristor  $T_1$ . U tom trenutku okida se tiristor  $T_1$  i počinje komutacija koja ima tri intervala (slika 12), a to su:



Sl. 12.



Sl. 11.

I interval ( $t_1 - t_0$ ) - komutacija struje tereta sa glavnog tiristora  $T_1$  na pomoćni tiristor  $T_1'$

II interval ( $t_2 - t_1$ ) - vrijeme odmaranja tiristora  $T_1$ ; struja tereta ide iz izvora preko L-C a L-C istovremeno titra preko  $D_1$

III interval ( $t_3 - t_2$ ) - nakon što je u trenutku  $t_2$  struja kroz L-C pala na struju tereta počinje komutacija struje tereta sa tiristora  $T_1$  na diodu  $D_2$

U tabeli 3 dane su vrijednosti za struju i napon komutacijskog kondenzatora po intervalima, te vrijednosti za struju i napon komutacijskog kondenzatora na kraju svakog intervala i trajanje svakog intervala. Kada vrijednost jednadžbe (64) uvrstimo u jednadžbu (61), i izjednačimo ju sa jednadžbom (63) dobijemo vrijednost za K:

$$K = \frac{2(\alpha \sqrt{1 - (\frac{1}{3\alpha})^2} - 1)}{\alpha^2 - 1} \quad (65)$$

Vidi se da je napon na komutacijskom kondenzatoru

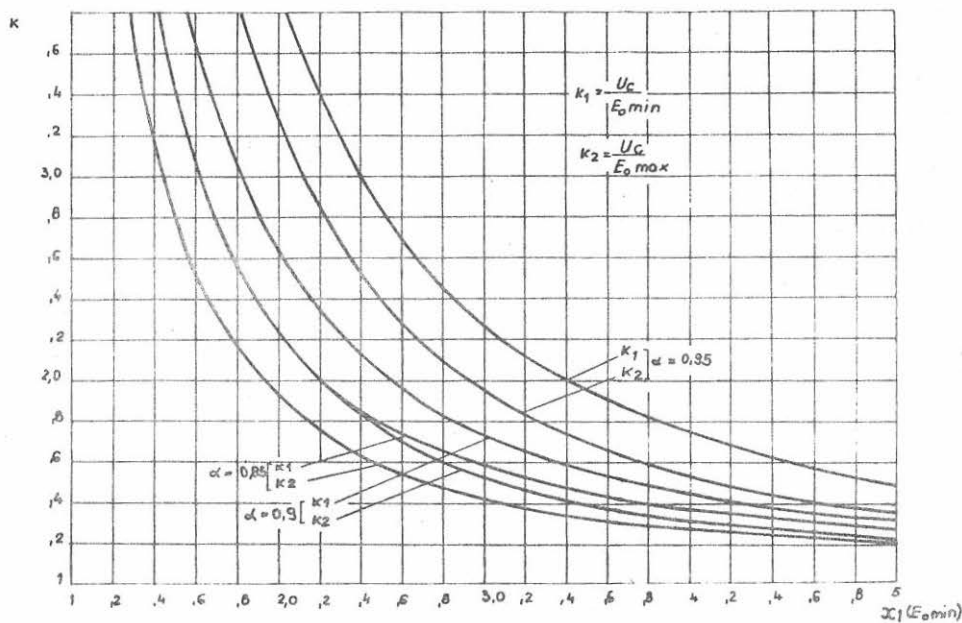
INTERVAL	JEDNAŽBE STRUJE I NAPONA	PRETPOSTAVKE	KRAJ INTERVALA	PRETPOSTAVKE
I	$i_c(t) = -k I_{T1} e^{-\beta t} \sin \omega_0 t$ (50) $u_c(t) = -k E_0 e^{-\beta t} \cos \omega_0 t$ (51)	$\omega_0 \approx \omega$	$i_c(t_1) = -I_T$ (52) $u_c(t_1) = k E_0 \sqrt{1 - (\frac{1}{3\alpha})^2}$ (53) $\omega_0 t_1 = \arcsin \frac{1}{3\alpha}$ (54)	$\frac{\beta}{\omega_0} \approx 0$ $e^{-\beta t_1} \approx 1$ $\alpha > 1$
II	$i_c(t) = -k I_{T1} e^{-\beta t} \sin \omega_0 t$ (55) $u_c(t) = -k E_0 e^{-\beta t} \cos \omega_0 t$ (56)	$\omega_0 \approx \omega$	$i_c(t_2) = -I_T$ (57) $u_c(t_2) = k E_0 \alpha \sqrt{1 - (\frac{1}{3\alpha})^2}$ (58) $\omega_0 t_2 = \pi - \arcsin \frac{1}{3\alpha}$ (59)	$e^{-\beta t_2} \approx e^{-\beta t_1} = \alpha$
III	$i_c(t) = I_T e^{-\beta t} [\alpha - K \sqrt{(\alpha^2 - 1)} \sin \omega_0 t + \cos \omega_0 t]$ (60) $u_c(t) = E_0 [1 - (1 - K \sqrt{(\alpha^2 - 1)}) e^{-\beta t} \sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}) + \frac{1}{\alpha} e^{-\beta t} \sin \omega_0 t]$ (61)	$\omega_0 \approx \omega$	$i_c(t_3) = 0$ (62) $u_c(t_3) = k E_0$ (63) $\omega_0 t_3 = \arctan \frac{1}{K \sqrt{(\alpha^2 - 1)} - \alpha}$ (64)	$e^{-\beta t_3} \approx 1$

Tabela 3

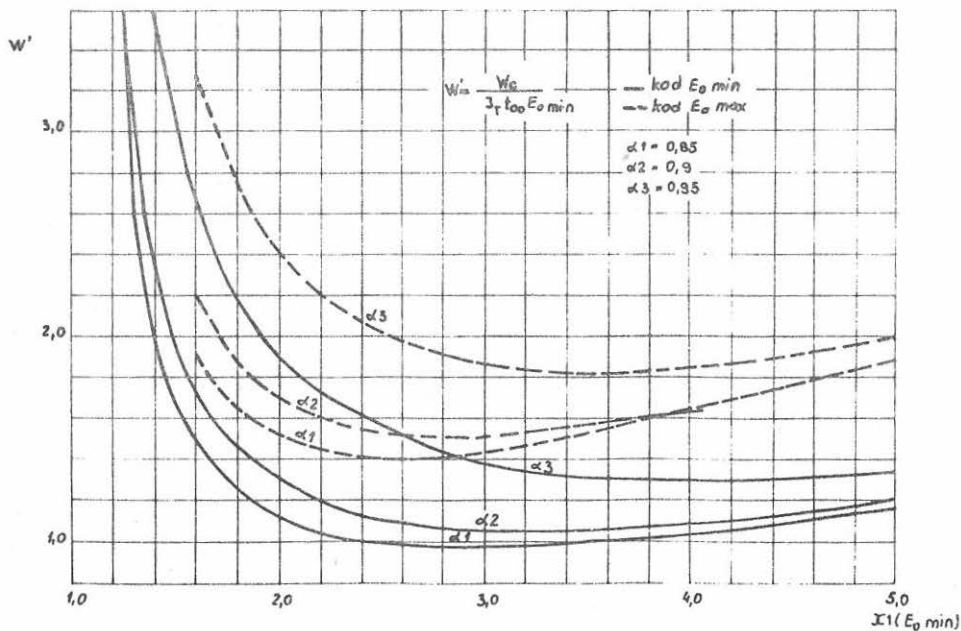
zavisan o naponu izvora i struji tereta u trenutku  $t_2$ .

Slika 13 prikazuje ovisnost  $K = f(\mathcal{X})$  za tri razne vrijednosti  $\alpha$  te za dvije krajnje vrijednosti napona napajanja:  $E_{0min}$  i  $E_{0max} = 1,35 E_{0min}$ . Vrijednosti za  $\mathcal{X}_1$  odnose se na minimalni ulazni napon. Kod maksimalnog ulaznog napona  $\mathcal{X}$  se računa prema:

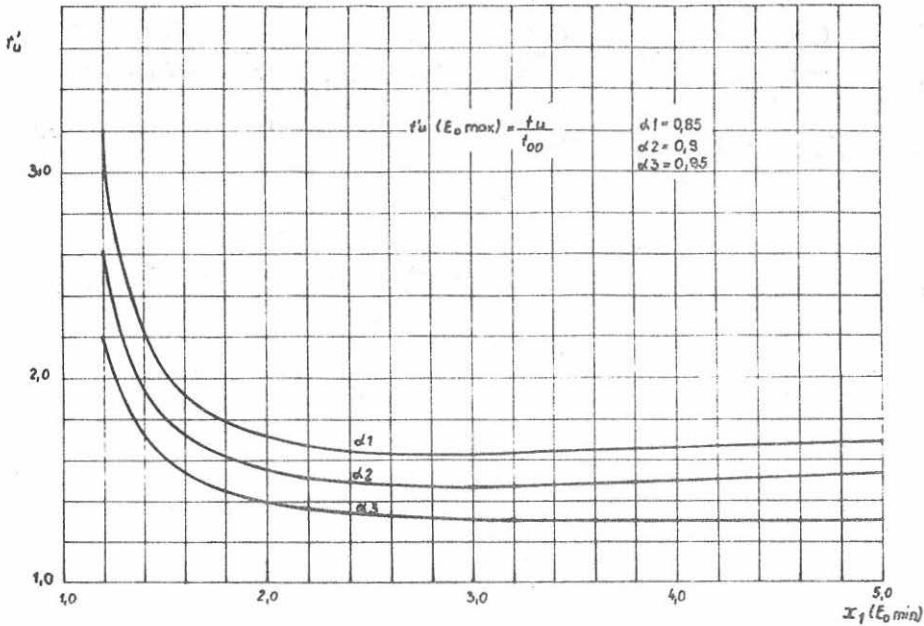
$$\mathcal{X}_2(E_{0max}) = \mathcal{X}_1(E_{0min}) \cdot \frac{K_0 \cdot 1,35}{K_1} \quad (66)$$



S1.13.



S1.14.



Sl. 15.

Slika 14 prikazuje ovisnost energije u kondenzatoru o odabranom faktoru  $\alpha_1$  za tri razne vrijednosti  $\alpha$ , te za dvije krajnje vrijednosti ulaznog napona. Vidi se da sve tri krivulje imaju jasno izražen minimum te se nalazi između  $\alpha_1 = 2.4-3.4$  zavisno o  $\alpha$  i ulaznom naponu.

Slika 15 prikazuje ovisnost ukupnog trajanja komutacije ( $t_u = t_3 - t_0$ ) o faktoru  $\alpha$  pri  $E_{0max}$ . Kod nižeg ulaznog napona to vrijeme je kratko.

6. ZAKLJUČAK

U poglavljima 3, 4 i 5 provedena je analiza i optimiranje sva tri razmatrana kruga. Kako bi se olakšala i učinila preglednija međusobna usporedba ovih krugova napravljena je tabela 4. U tabeli su za tri vrijednosti faktora gušenja  $\alpha$  izvedeni slijedeći

parametri za svaki komutacijski krug:

$\alpha$  - odnos vršne vrijednosti titrajne struje u komutacijskom krugu i struje tereta u trenutku komutacije. Iz dijagrama  $W' = f(\alpha)$  izabran je za svaki krug optimalni  $\alpha$  (minimalni  $W'$ ). Zatim je izračunat  $\alpha$  kod maksimalnog ulaznog napona  $E_{0max} = 1,35 E_{0min}$

$P_G$  - gubici komutacijskog kruga normirani na  $I_T E_{0min} t_{00}$  koji se iz  $W'$  dobiju kao:

	$\alpha$	$\alpha$		$P_G'$		$t_u' (E_{0max})$		$u_c \max / E_{0min}$
		$E_0 \min$	$E_0 \max$	$E_0 \min$	$E_0 \max$	$\beta_1$	$\beta_2$	
S DEKONJACIJOM	0,85	2,4	3,24	0,41	0,47	4,44	3,92	1,35
	0,9	2,6	3,51	0,34	0,38	4,18	3,7	1,35
	0,95	3,0	4,05	0,27	0,29	3,9	3,44	1,35
S UPRAVLJANJEM	0,85	3,0		0,47		1,67		2,11
	0,9	3,2		0,32		1,55		2,21
	0,95	3,8		0,19		1,39		2,42
BEZ DEKONJACIJE I UPRAVLJANJA	0,85	2,8	3,36	0,32	0,46	1,64		1,98
	0,9	3,0	3,55	0,23	0,32	1,48		2,05
	0,95	3,6	4,23	0,14	0,19	1,30		2,21

Tabela 4

$$P_G' = 2W'(-\ln \alpha) \tag{67}$$

Izvađeni su gubici kod minimalnog i maksimalnog ulaznog napona kod optimalnog  $\zeta$  za svaki pojedini slučaj.

$t_u$  - Ukupno trajanje svih intervala komutacije normirano na vrijeme odmaranja tiristora ( $t_{00}$ ). Ovaj podatak prikazan je za maksimalni ulazni napon, pošto je onda to vrijeme najveće.

$U_{Cmax}/E_{omin}$  - odnos maksimalnog napona na komutacijskom kondenzatoru prema minimalnom ulaznom naponu.

Već u uvodu je rečeno da su dva osnovna kriterija za usporedbu gubici u komutaciji i ukupno trajanje komutacije. Uzevši u obzir ta dva kriterija na prvi pogled se vidi da krug s disipacijom viška energije (poglavljje 3) otpada iz razmatranja. Gubici su mu veći od ostala dva kruga, a naročito loš podatak je za ukupno trajanje komutacije.

Uspoređujući ostala dva kruga vidi se da je treća varijanta (bez disipacije i bez upravljanja; poglavljje 5) koja je ujedno i najjednostavnija, optimalna. Kod maksimalnog ulaznog napona ima iste gubitke kao varijanta s upravljanjem, no spadanjem ulaznog napona ti gubici padaju dok varijanta sa upravljanjem ima konstantne gubitke. Što se tiče ukupnog vremena trajanja komutacije to su ove dvije varijante približno iste.

## 7. POPIS LITERATURE

(1) - B. D. Bedford, R. G. Hoft: "Principles of Inverter Circuits".