

## ANALIZA GUBITAKA ULAZNOG LC FILTERA ĆOPERA

\*

Mr. Senid Gerin dipl.el.ing.

## LOSSES ANALYSIS OF INPUT LC FILTER CHOPER

## Rezime:

U radu su date smjernice za projektovanje LC filtera istosmjernog Ćoperskog pogona da bi postigli što manju valovitost i minimalne gubitke pri prenosu energije od izvora do opterećenja. Analiza gubitaka je radena za idealni Ćoperski pogon i verifikovana za konkretan primjer. Poređeni su rezultati prenosa energije od izvora do opterećenja u oba sluĉaja; pogona bez filtera i pogona sa dograđenim LC filterom. Rezultati su obradeni pomoću računara i prikazani grafiĉki. Tako imamo grafiĉki prikaz ovisnost gubitaka snage i energije od vremena trajanja strujnog impulsa i ovisnost gubitaka snage od prigušnog otpora i širine impulsa. Na osnovu provedene analize i obradenog primjera zaključujemo da se upotrebom LC filtera kod istosmjernog Ćoperskog pogona smanjila valovitost struje izvora što se odrazilo na smanjenje gubitaka snage, smanjenje gubitaka energije i povećanje efikasnosti izvora

## SUMMARY:

These papers submit directions for LC filters of DC choper drive designing in order to obtain as low pulses as possible as well as the minimal losses on the occasion of energy transfer from the source to the load. The losses analysis has been made for the perfect choper drive and it has been verified for the specific example. The results of the energy transfer have been shown for both cases: the drive without filter and the drive with LC filter. There is a computer processed diagram of the results. So we have a diagram showing how the power and energy losses are dependent on current impulse time duration as well as the dependence between power losses and damped resistance and the width of the impulse. On the basis of the carried out analysis and the processed example, we draw a conclusion that utilization of LC filter at DC choper drive reduces the pulses of the current source and it does effects on reducing of power losses, reducing of energy losses and increasing of source efficiency.

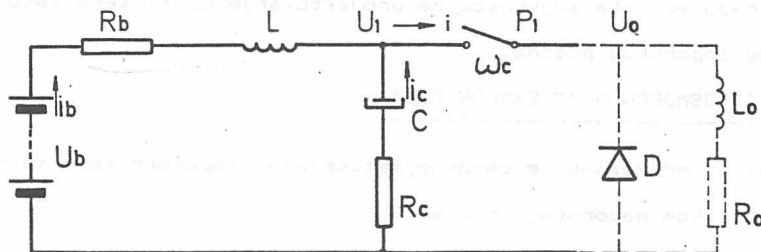
UNIS RO SINTEVIT

72250 V I T E Z

### 1. U V O D

Postavljanje zahtjeva za ekonomičan i efikasni prenos energije od izvora do opterećenja, pod svim uslovima eksploatacije u cilju postizanja povoljnih karakteristika, najniže težine i cijene čoperskog istosmjernog pogona, javila se potreba za izmjenom klasične šeme čoperskog pogona. Čoperski pogon s kojim bi se proširio koncept pogona, poboljšale karakteristike a i tačnost u trenutnoj transformaciji struje bez bitnih razlika u cijeni i volumenu, može se ostvariti na dva načina:

- pomoću filtera za akumuliranje energije između baterije i čopera,
- pomoću sekvencijalno prekidnog više-faznog čopera koji sadrži posebne zavojnice i diode za zatvaranje strujnog kola u praznom hodu.

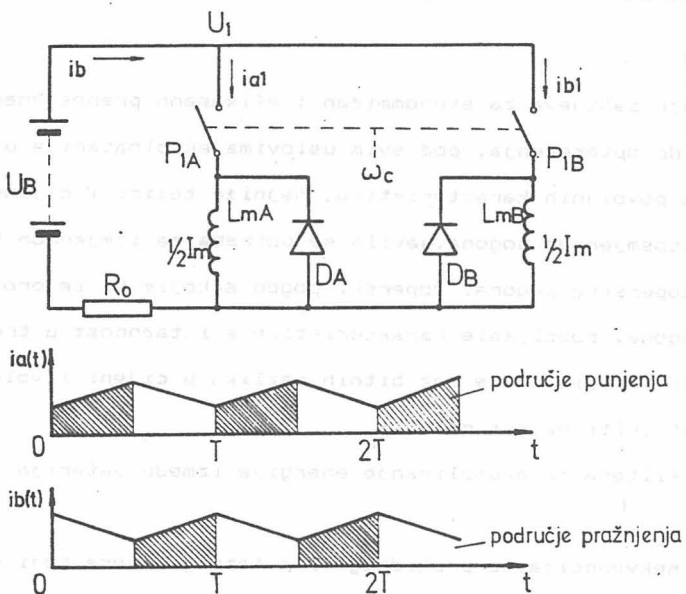


Sl.1. Izravnavanje baterijske struje podešavajućim LC filterom

Na slici 1. prikazani su istosmjerni čoperski pogoni sa LC filterom. Kod primjene ovakvog pogona projektovanje se bazira na izboru takvog filtera da bi postigli što manju valovitost i minimalne gubitke pri prenosu energije od izvora do opterećenja.

Na slici 2. je prikazan dvofazni sekvencijalno prekidni čoper gdje sekvencijalno prekidni kontroleri poboljšavaju korištenje baterije. Svaki prekidač je naizmjenično uključen i isključen dajući polovinu prvobitno zahtjevanu amplitudu struje  $I$ .

Najvjerovatnije kombinacija ova dva metoda dala bi optimalno rješenje u smislu efikasnosti sistema, težine i cijene.

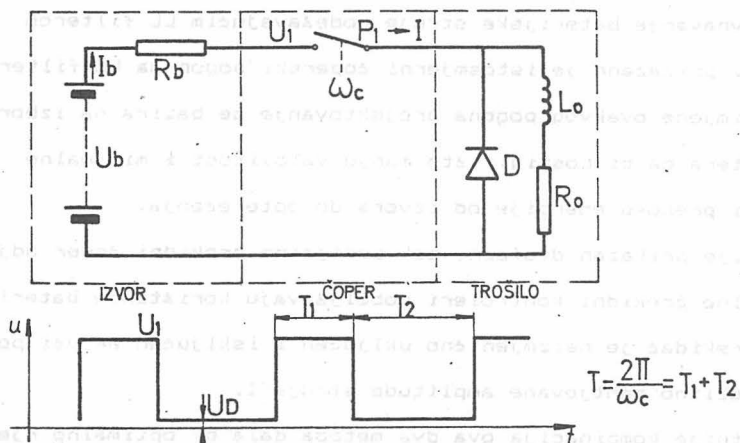


Sl.2. šema dvofazno sekvencijalno prekidnog čopera i talasni oblik  
 U ovom radu su date smjernice za projektovanje LC filtera isto-  
 smjernog čoperskog pogona.

2. RAD ISTOSMJERNOG ČOPERSKOG KOLA

Na slici 3. prikazano je osnovno istosmjerno čopersko kolo sa ta-  
 lasnim oblikom naponskog impulsa.

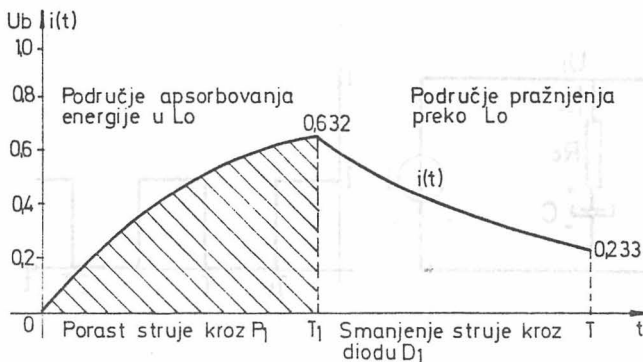
U trenutku zatvaranja prekidača  $P_1$  cijeli napon napajanja  $U_b$  se



Sl.3. Osnovno istosmjerno čopersko kolo i talasni oblik

prenosi na zavojnicu  $L_0$ . Struja raste eksponencijalno sa vremenskom konstantom  $T_0 = L_0 / (R_0 + R_D)$  do konačne vrijednosti  $I_D = U_D / (R_0 + R_D)$  gdje je  $R_0 + R_D$  cjelokupni omski otpor kola. Prema tome prirast struje  $di/dt$  može se izraziti kao pad napona na  $R_0$  i  $R_D$  i raste eksponencijalno dok ne dostigne napon  $U_D$ . Napon na zavojnici  $L_0$  se smanjuje sa njegove inicijalne vrijednosti  $U_D$ , poslije vremena  $T_1 = L_0 / (R_0 + R_D) = T_0$ , na vrijednost  $U_D \cdot e^{-T_1/T_0} = 0,368 \cdot U_D$  što znači da se u induktivitetu  $L_0$  apsorbirala određena energija, a struja je porasla na:  $(1 - e^{-T_1/T_0}) \cdot U_D / (R_0 + R_D) = 0,632 \cdot U_D / (R_0 + R_D)$ . Jednom uspostavljena vrijednost struje ne može biti restaurirana na njenu inicijalnu vrijednost bez eksponencijalne potrošnje energije u otporniku. Poslije prekidanja toka struje prekidačem  $P_1$ , na induktivitetu se indukuje napon suprotnog polariteta koji podržava izlaz akumulirane struje u isto smjeru ali smanjujući veličinu "praznog hoda" kroz  $R$  i diodu  $D$ . Na kraju perioda  $T$  struja se smanjila na:  $i = U_D / (R_0 + R_D) \cdot (1 - e^{-T_1/T_0}) \cdot e^{-T_2/T_0}$

U uslovima 50% ciklusa rada čopera tj.  $T_1 = T_2 = T/2$  struja se smanji na  $0,233 \cdot U_D / (R_0 + R_D)$ .



Sl.4. Osnovni talasni oblik struje

Na slici 4. dat je prikaz osnovnog talasnog oblika sa energetske bilansom ostvarenim u prvom periodu rada kola. Slijedeći ciklusi uzrokuju porast struje sve do stacionarnog režima, koji se uspo-

stavlja poslije 8.T, u kojem je količina apsorbirane energije u prvoj polovini periode jednaka odatoj energiji u drugoj polovini periode. Zahtjev za strujom opterećenja mora biti zadovoljen pomoću baterije nakon zatvaranja prekidača  $F_1$ .

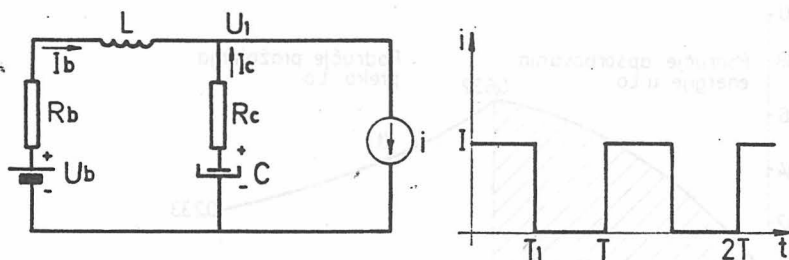
Rezultujući pad napona na bateriji uzrokuje odgovarajuće gubitke snage  $I_b^2 \cdot R_b$  unutar izvora, gdje je rezultujuća efikasnost baterije data sa:

$$\epsilon_{\text{efb}} = \frac{U_b - I_b \cdot R_b}{U_b} = \frac{U_1}{U_b} \quad (1)$$

Smanjenje gubitaka snage i povećanje efikasnosti baterije možemo postići smanjenjem amplitude impulsnog udara struje, pri čemu treba voditi računa da se energetski bilans održava između izvora i opterećenja pogona. Ovo možemo postići primjenom jedne od dvije ranije spomenute metode.

### 3. PRORAČUN GUBITAKA U ULAZNOM LC FILTERU ČOPERA

Nadomjesna šema za kolo prikazano na slici 1. data je na slici 5. gdje je čoper nadomješten strujnim izvorom i opterećuje filter pravokutnim impulsima struje amplitude  $I$  trajanja  $T_1$  i perioda  $T$ .



S1.5. Nadomjesna šema i talasni oblik struje čopera

Analiza gubitaka je rađena uz slijedeće pretpostavke: strujni impuls čopera je idealan kao na slici 5. kao i elementi filtera  $L$  i  $C$ , gubitci su skoncentrisani u otpornicima  $R_b$  i  $R_c$ .

## 6

Za konkretan primjer poznate su slijedeće vrijednosti: napon napajanja  $U_b$ , unutrašnji otpor izvora  $R_b$ , elementi filtera  $L$  i  $C$ , amplituda struje čopera  $I$ , period  $T$ .

Ukupni gubitci koji se stvore pri prenosu snage jednaki su gubitcima stvorenim u otporu  $R_b$  i gubitcima stvorenim u prigušnom otporu filtera  $R_c$  tj.

$$P = P_{R_b} + P_{R_c} \quad \text{gdje je } P_{R_b} = i_b^2 \cdot R_b, \text{ a } P_{R_c} = i_c^2 \cdot R_c \quad (2)$$

Proračunom kola sa sl.5. odredit ćemo sve vrijednosti struja u intervalu  $0 < t < T$  s tim da početne uslove određujemo iz uslova stacionarnosti tj. da je vrijednost na početku novog perioda  $t=0$  jednaka na kraju tog perioda  $t=T$ .

Na startu svakog perioda provođenja čopera, kondenzator je potpuno napunjen i ukupni zahtjev za strujom ostvaruje se iz kondenzatora dok je struja kroz induktivitet vrlo mala. U vremenu  $T_1 < t < T$  sva akumulirana energija u induktivitetu  $L$  troši se na ponovno nabijanje kondenzatora  $C$ . Povećanjem frekvencije čopera podržava se neprekidna struja kroz induktivitet  $L$  čija se vršna amplituda približava srednjoj vrijednosti struje koju zahtjeva čoper. Frekvencija čopera se određuje u zavisnosti od parametara pogona i njegove vremenske konstante.

Vrijednost parametara filtera  $L$  i  $C$  određujemo tako da je:

- vlastita frekvencija filtera niža od frekvencije čopera,
- da je struja što manje valovita,
- da se akumulirana energija troši u induktivitetu  $L$  u vremenu  $0 < t < T_1$ , a na nabijanje kondenzatora u vremenu  $T_1 < t < T$  tj.

$$E_L = \frac{1}{2} L (i_{L01}^2 - i_{L0}^2) \quad \text{i} \quad E_C = \frac{1}{2} C (U_{C0}^2 - U_{C01}^2) \quad \text{odnosno } E_L = E_C$$

s tim da računamo na aperiodičnost sistema.

Na osnovu svih izračunatih struja možemo odrediti ukupne gubitke u jednom periodu. Posmatrat ćemo odvojeno gubitke u intervalu

$0 < t < T_1$  i gubitke u intervalu  $T_1 < t < T$ . Za  $0 < t < T_1$  dobijemo:

$$P_1(t) = i_B^2(t) \cdot R_B + i_C^2(t) \cdot R_C \quad (3)$$

ili računski preko efektivne vrijednosti struje gdje je:

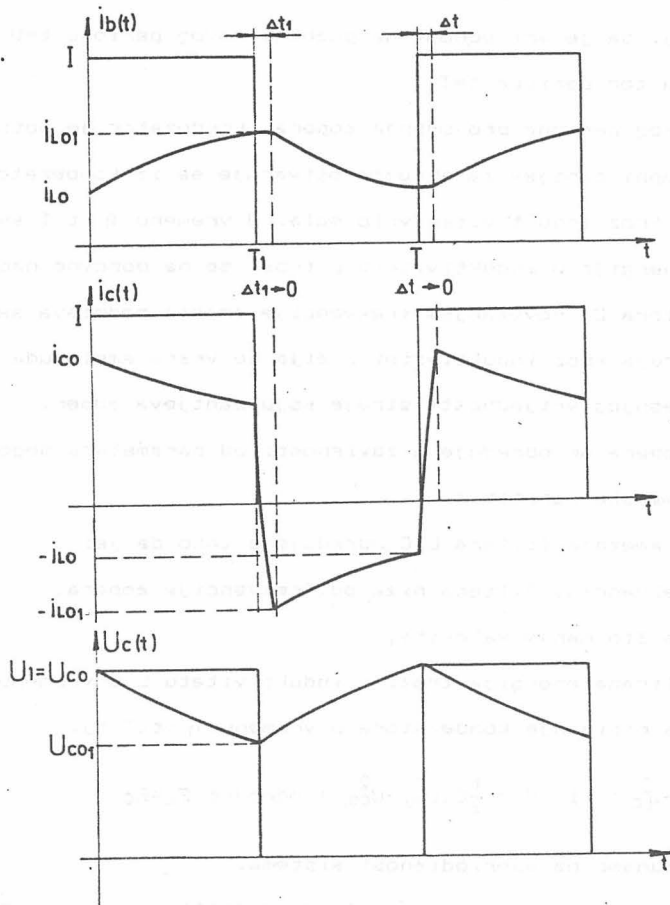
$$I_{\text{bef}} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_B^2(t) \cdot dt}$$

dobijemo:  $P_1 = I_{\text{bef}}^2 \cdot R_B + I_{\text{cef}}^2 \cdot R_C \quad (4)$

Analogno i za  $T_1 < t < T$  dobijemo:  $P_2 = I_{\text{bef}}^2 \cdot (R_B + R_C) \quad (5)$

U ovom intervalu imamo nabijanje kondenzatora, zato je

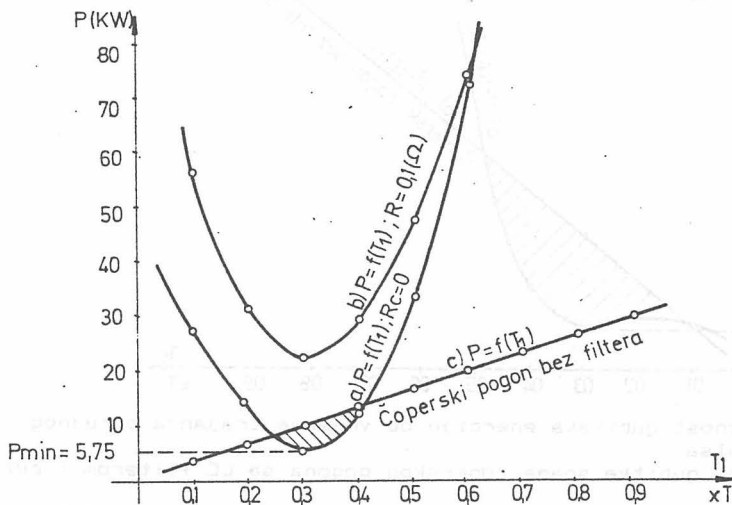
$i_B(t) = -i_C(t)$ . Ukupni gubitci su jednaki:  $P = P_1 + P_2 \quad (6)$



Sl.6 Talasni oblici struje i napona

#### 4. PRIMJER

Za jedan konkretan primjer istosmjernog čoperskog pogona bez LC filtera, načinjena je analiza gubitaka koji se ostvaruju pri prenosu energije od izvora do opterećenja u oba slučaja tj. pogona kakav jest i pogona sa dograđenim LC filterom, a rezultati su obrađeni pomoću računara. Za analizirani čoperski pogon imali smo slijedeće vrijednosti elemenata:  $U_b=142(V)$ ,  $R_b=0.135(\Omega)$ ,  $T=2.5(ms)$ ,  $I=500(A)$ , a izračunati elementi filtera su  $L=76(\mu H)$ ,  $C=16.7(mF)$ . Analiza je sprovedena tako da smo tražili minimalne gubitke u odnosu na promjenljive vrijednosti prigušnog otpora  $R$  i vremena vođenja čopera  $T_1$ .

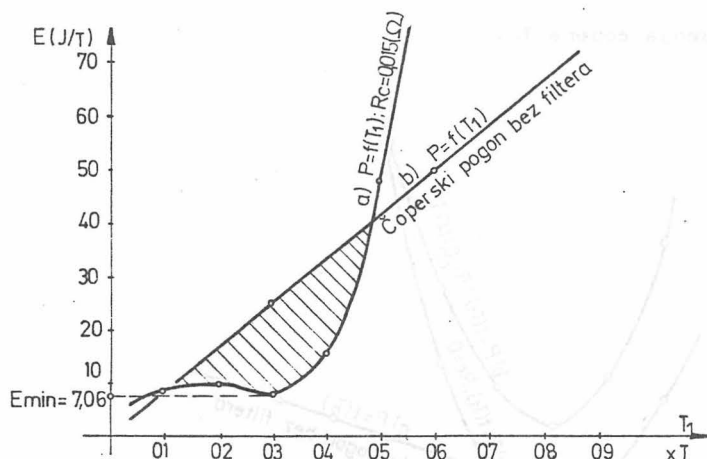


Sl.7. Ovisnost gubitaka snage od vremena trajanja strujnog impulsa. Na slici 7 prikazani su gubitci snage za čoperski pogon sa LC filterom, krive a i b i bez LC filtera kriva c.

Kriva a predstavlja gubitke za vrijednost prigušnog otpora  $R_C=0$ , a kriva b za vrijednost prigušnog otpora  $R=0.1(\Omega)$ . Za sve vrijednosti prigušnog otpora  $0 < R_C < 0.1(\Omega)$  ima li bi vrijednost gubitaka snage između krivih a i b.

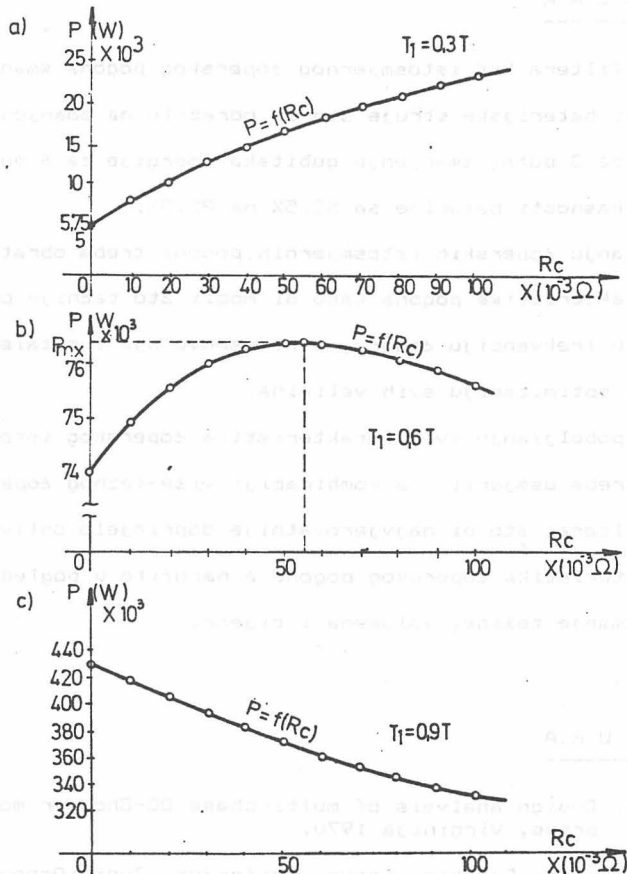
U praksi vrijednost prigušnog otpora se kreće od  $0.01(\Omega)$  do

0.04( $\Omega$ ) i treba težiti što manjim vrijednostima prigušnog otpora. Regulaciju izlaznih veličina čoperskog pogona postizemo upravljачkom frekvencijom  $\omega_c$  i širinom upravljачkog impulsa  $T_1$ . Valovitost struje je u direktnoj vezi od  $\omega_c$  i  $T_1$ . Ispitivanja su pokazala za čoperski pogon bez filtera (L.1) da se optimalni prenos snage, od izvora do opterećenja, ostvaruje za vrijednost  $T_1 = 0.5T$ , a smanjenje valovitosti vršimo povećanjem upravljачke frekvencije čopera. Optimalne vrijednosti kod našeg primjera, sa dograđenim LC filterom, dobili smo za vrijednost upravljачke širine impulsa  $T_1 = 0.3T$  (sl.7.).



Sl.8. Ovisnost gubitaka energije od vremena trajanja strujnog impulsa  
Upoređujući gubitke snage čoperskog pogona sa LC filterom i bez LC filtera dobijemo da smo smanjili gubitke snage sa 16.917(KW), kod čoperskog pogona bez filtera, na 5.751(KW), kod čoperskog pogona sa filterom tj. za 2.94 puta.

Na slici 8 prikazani su energetske gubitci izraženi u Jaul/period. Kriva a predstavlja energetske gubitke za čoperski pogon sa LC filterom i vrijednošću prigušnog otpora  $R_c=0.015(\Omega)$ . Upoređujući energetske gubitke, dobijemo smanjenje gubitaka sa 42.19(J/T) za čoperski pogon bez LC filtera na 7.06(J/T) za čoperski pogon sa LC filterom ili 5.98 puta.



Sl.9. Ovisnost gubitaka od prigušnog otpora i širine impulsa

šrafirane oblasti na sl.7. i sl.8. predstavljaju područje za koje se preporučuje primjena LC filtera čoperskog pogona. Ubacivanjem LC filtera kod čoperskog pogona, povećali smo efikasnost baterije (računato prema obrazcu 1.0.) sa niskih 52.5% na prihvatljivih 82.5%. Ovisnost gubitaka od prigušnog otpora  $R_c$  i širine impulsa  $T_1$  prikazana je na sl.9. Funkcionalne ovisnosti  $P=f(R_c)$  za sve vrijednosti  $T_1 < 0.6T$  imaju slične karakteristike kao kriva prikazana na sl.10.a, a za  $T_1 > 0.6T$  kao na sl.10.c.

## 5. ZAKLJUČAK

Upotrebom LC filtera kod istosmjernog čoperskog pogona smanjili smo valovitost baterijske struje što se odrazilo na smanjenje gubitaka snage za 3 puta, smanjenje gubitaka energije za 6 puta i povećanje efikasnosti baterije sa 52.5% na 82.5%.

Pri projektovanju čoperskih istosmjernih pogona treba obratiti pažnju na karakteristike pogona kako bi mogli što tačnije odrediti upravljačku frekvenciju čopera, a na osnovu nje i ostale elemente kola uz optimizaciju svih veličina.

Dalji rad na poboljšanju svih karakteristika čoperskog istosmjernog pogona treba usmjeriti na kombinaciji više-faznog čopera i ulaznog LC filtera, što bi najvjerojatnije doprinjelo optimizaciji svih karakteristika čoperskog pogona a naročito u pogledu gubitaka, najmanje težine, volumena i cijene.

## LITERATURA

1. E. Reimers, Design analysis of multi-phase DC-Chopper motor drive, Virginija 1970.
2. Isakov, Platonov, Rudenko, Senko, Trifonjuk, Judin: Osnovi promišljenoj elektroniki, Tehnika, Kijev 1979.
3. M. Chilikin, Elektric drive, Moscow 1983.