

ZADACI

ZA PRIPREMU ISPITA

**ODABRANA POGLAVLJA IZ IMPULSNE  
ELEKTRONIKE**

## Sadržaj

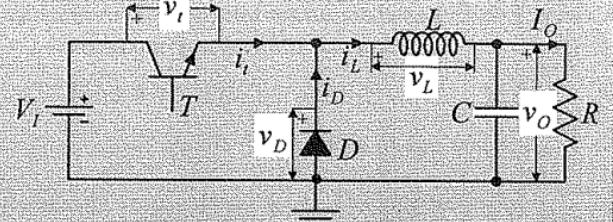
BUCK pretvarač.....	2
Zadatak 1.....	2
Zadatak 2.....	4
Zadatak 3.....	8
Zadatak 4.....	10
Zadatak 5.....	10
Zadatak 6.....	13
Zadatak 7.....	15
Zadatak 8.....	16
Zadatak 9.....	16
BOOST pretvarač .....	18
Zadatak 10.....	18
Zadatak 11.....	20
Zadatak 12.....	23
Zadatak 13.....	25
Zadatak 14.....	28
Zadatak 15.....	30
Zadatak 16.....	31
BUCK – BOOST pretvarač.....	32
Zadatak 17.....	32
Zadatak 18.....	34
Zadatak 19.....	36
Zadatak 20.....	38
FLYBACK pretvarač .....	39
Zadatak 21.....	39
Zadatak 22.....	40
Zadatak 23.....	41
Zadatak 24.....	45
FORWARD pretvarač .....	46
Zadatak 25.....	46
Zadatak 26.....	48
Zadatak 27.....	49
Zadatak 28.....	51
Zadatak 29.....	52
Zadatak 30.....	53
Literatura.....	55

## BUCK pretvarač

### Zadatak 1.

Za kolo propusnog (buck) pretvarača sa bipolarnim tranzistorom sa slike 4.5.1, čije su sve komponente idealne:

- Izvesti izraz za  $V_o/V_I$  u kontinualnom režimu rada.
- Izračunati i nacrtati talasne oblike napona i struja na tranzistoru, prigušnici i diodi u toku jedne periode prekidanja.
- Nacrtati šemu kola za pobudu tranzistora.



Slika 4.5.1. Propusni (buck) pretvarač.

a)

$$\bar{v}_L = 0 \Rightarrow (V_I - V_O)DT_s = V_O(1-D)\mathcal{T}_s \Rightarrow \frac{V_O}{V_I} = D.$$

b)

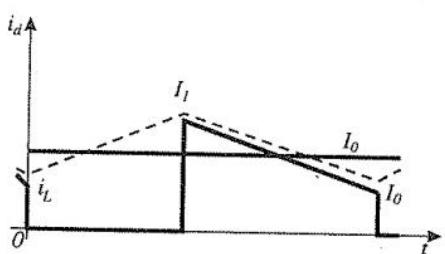
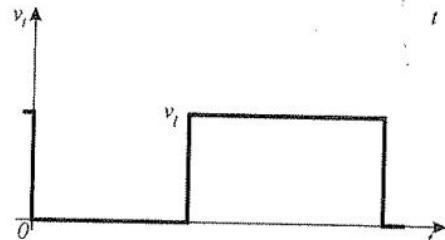
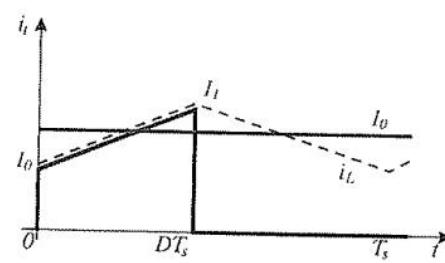
$$I_O = \bar{i}_L = \frac{I_0 + I_1}{2};$$

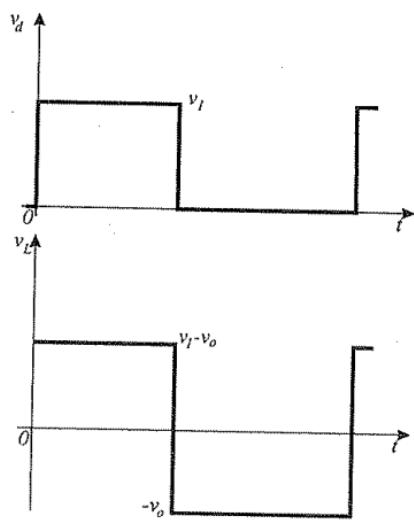
$$I_1 - I_0 = \frac{(V_I - V_O)DT_s}{L} = \frac{V_I D (1-D)\mathcal{T}_s}{L};$$

$$I_0 = I_O - \frac{V_I D (1-D)\mathcal{T}_s}{2L};$$

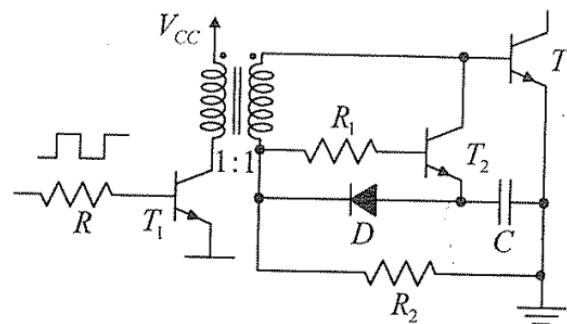
$$I_1 = I_O + \frac{V_I D (1-D)\mathcal{T}_s}{2L};$$

$$V_{t \max} = V_I, \quad V_{d \max} = V_I.$$





c) Pošto emiter tranzistora  $T$  "pliva" između nule i  $V_B$ , pobuda baze mora biti sa galvanskom izolacijom (slika 4.5.3).

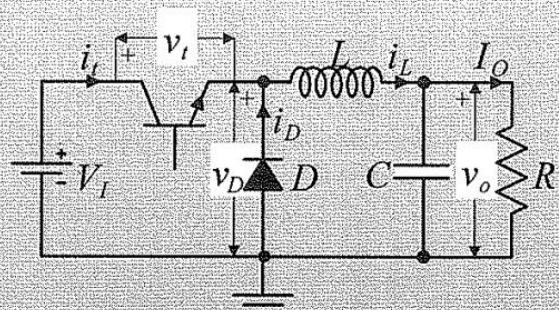


Slika 4.5.3. Kolo za pobudu baze upotrebljenog bipolarnog prekidačkog tranzistora.

## Zadatak 2.

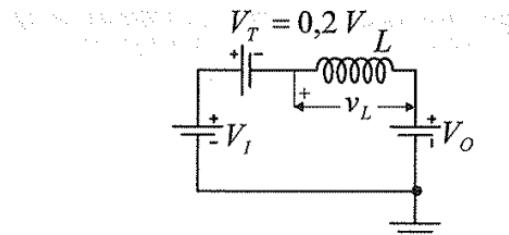
Propusni (buck) pretvarač (sl.4.7.1) jednosmernog izlaznog napona  $V_o=5V$  napaja se jednosmernim ulaznim naponom koji se menja od  $V_{Imin}=15V$  do  $V_{Imax}=25V$ . Učestanost prekidanja je  $20\text{kHz}$ , pad napona u provodnom stanju na tranzistoru je  $V_T=0,2V$ , a na diodi  $V_D=0,5V$ . Ostale komponente su idealne.

- Odrediti induktivnost prigušnice  $L$  ako je talasnost struje kroz prigušnicu u najgorem slučaju  $\Delta i_L=0,5A$  (od vrha do vrha). Za ovako određeno  $L$ , koliko je  $\Delta i_L$  u najboljem slučaju.
- Odrediti kapacitivnost kondenzatora  $C$ , ako je talasnost izlaznog napona u najgorem slučaju  $\varepsilon=\Delta V_o/V_o=1\%$  (od vrha do vrha).
- Izračunati efikasnost pretvarača, ako se uzme u obzir padovi napona na prekidačima.
- Izračunati efikasnost pretvarača ako se uzme u obzir konačno trajanje prelaznih režima. Ukupno trajanje uključivanja je  $t_u=500\text{ns}$ , a isključivanja  $t_i=500\text{ns}$ . U toku prelaznih režima može se smatrati da se naponi i struje prekidača menjaju kao linearne funkcije vremena.
- Za izlaznu struju  $I_o=5A$  nacrtati dijagrame napona i struja na tranzistoru, diodi i prigušnici u najgorem slučaju, i na dijagramima označiti brojne vrednosti.

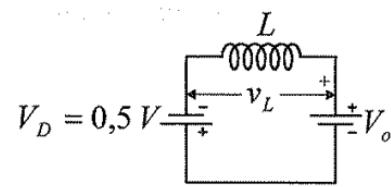


Slika 4.7.1. Šema propusnog pretvarača.

- a) U intervalu  $0 < t < DT_s$  ekvivalentno kolo pretvarača ima oblik prikazan na slici 4.7.2 a.



(a)



(b)

Slika 4.7.2. Ekvivalentno kolo buck pretvarača u intervalu: kada vodi tranzistor (a) i kada vodi dioda (b).

Napona na induktivnosti  $v_L$  je:  $v_L = V_I - V_T - V_o$ .

U intervalu  $DT_s < t < T_s$  ekvivalentno kolo kao na slici 4.7.2 b.

Napon  $v_L$  je:

$$v_L = V_O + V_D \Rightarrow (V_I - V_T - V_O)DT_S = (V_O + V_D)(1-D)T_S, V_O = V_I D - V_T D - (1-D)V_D \Rightarrow D = \frac{V_O + V_D}{V_I - V_T + V_D}.$$

Za  $V_{Imin}=15V$ , sledi da je  $D_{max}=0,36$ .

Za  $V_{Imax}=25V$ , sledi da je  $D_{min}=0,217$ .

$$\text{Za } DT_S \prec t \prec T_S : \Delta i_L = \frac{v_L \Delta t}{L} = \frac{V_O + V_D}{L}(1-D)T_S, \text{ tj. } L = \frac{V_O + V_D}{\Delta i_L}(1-D)T_S.$$

Najgori slučaj nastupa za  $D_{min}$ , vrednost induktivnosti prigušnice je  $L=430\mu H$ . Najbolji slučaj nastupa za  $D_{max}$ , tj.  $V_{Imin}$  i za  $L=430\mu H$  promena struje je  $\Delta i_L=0,41A$ .

b) Posmatraju se samo naizmenične komponente struja i napona na  $L$  i  $C$ :  $\Delta i_L=\Delta i_C$ , a to je upravo struja koja generiše  $\Delta v_C$ :

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \Rightarrow \Delta v_C = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_C dt = \frac{1}{C} \frac{\Delta i_L}{2} \frac{1}{2} \frac{T_S}{2} \Rightarrow \Delta v_C = \Delta V_O = 0,01V_O = 50mV \Rightarrow C = 62,5\mu F.$$

c) Efikasnost je po definiciji:

$$\eta = \frac{P_O}{P_I} = \frac{V_O \cdot I_O}{V_I \cdot I_I}, \text{ pri čemu je } I_I = \bar{i}_t = D \cdot I_L = D \cdot I_O.$$

Gornja veza između izlazne i ulazne struje važi uvek za ovakav tip pretvarača, bez obzira na stepen efikasnosti. Relacija između izlaznog i ulaznog napona će biti istog oblika samo ako je efikasnost pretvarača 100%. Kako su date vrednosti za  $V_T$  i  $V_D$  treba naći vezu između izlaznog napona i ova dva napona, ulaznog napona i koeficijenta  $D$ , koji definiše širinu upravljačkog impulsa.

1. Treba zanemariti talasnost napona na kondenzatoru  $C$  u pretvaraču (smatramo da su ovi naponi čisto jednosmerni).

2. Srednja vrednost napona na svakom kalemu je 0. Iz ove dve pretpostavke dobija se za ustaljeni režim:

$$(V_I - V_T - V_O) \cdot DT - (V_O + V_D)(1-D) \cdot T = 0 \\ \Rightarrow D = \frac{V_O + V_D}{V_I - V_T + V_D} \Rightarrow \eta = \frac{V_O}{V_I} \frac{I_O}{I_I} = \frac{V_O}{V_I} \frac{1}{D}.$$

d) Pretpostavka je da se ima konačno trajanje prelaznih režima, da su naponi i struje linearne promenljive u toku prelaznih režima. Kada tranzistor počne da se uključuje, struja  $i_C$  raste od 0, sve dok ne dostigne  $i_L$ . Za to vreme dioda provodi, struja kroz tranzistor linearno raste dok napon na tranzistoru za to vreme ostaje konstantan i jednak  $V_T$ . Kada struja kroz tranzistor dostigne vrednost struje diode,

dioda se isključuje. U toku vremena  $t_u$  postoji snaga gubitaka na tranzistoru, jer je proizvod napona i struje veći od 0. Energija koja se utroši u procesu uključivanja je:

$$W_U = \int_0^{t_u} V_t \cdot i_t dt = \frac{V_I \cdot i_{L\min}}{2} t_u.$$

Sve dok napon na diodi ne padne na 0, struja tranzistora ne može opadati, tj. promena napona prethodi promeni struje (sve dok napon na diodi ne poraste dovoljno da ona može prihvati struju). Energija gubitaka u procesu isključivanja je:

$$W_i = \int_0^{t_i} V_t \cdot i_t dt = \frac{1}{2} \cdot V_I \cdot i_{L\max} \cdot t_i.$$

Prema tome snaga koja se troši usled konačnog trajanja prelaznih režima je:

$$P_{gub} = (W_u + W_i) f_s, \text{ a stepen korisnog dejstva}$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{gub}}.$$

Ovi gubici su srazmerni sa  $f_s$ , pa se zato i nazivaju prekidačkim. Zato će stepen korisnog dejstva biti utoliko manji što je  $f_s$  veće (sa porastom  $f_s$  filtriranje je lakše jer se smanjuju dimenzije potrebnih elemenata za izradu filtra). Iz tog razloga mora se tražiti kompromis između dimenzija kola i veličine gubitaka u njemu. Osim toga što gubici rastu sa prelaznim efektima radna tačka prekidača u toku isključivanja i uključivanja prolazi kroz oblast vrlo velikih disipacija, tako da se celo kolo može dovesti u opasnost, o čemu se mora voditi računa pri projektovanju.

e) Struja na izlazu od  $I_O=5A$  se dobija za najgori slučaj, tj. za  $V_{Imax}$ :

$$I_{t\max} = I_O + \frac{\Delta i_L}{2}, \quad I_{t\min} = I_O - \frac{\Delta i_L}{2};$$

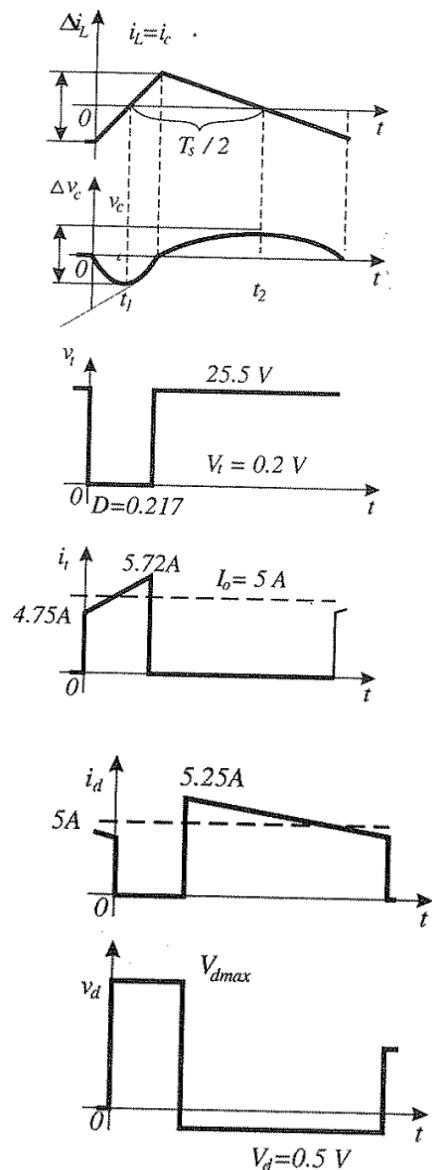
$$I_{d\max} = I_{t\max} = I_{L\max} = 5,25A;$$

$$I_{d\min} = I_{t\min} = I_{L\min} = 4,75A;$$

$$V_{t\max} = V_{Imax} + V_D = 25,5V;$$

$$V_{d\max} = V_{Imax} - V_T = 24,8V;$$

$$V_{L\max} = V_{Imax} - V_T - V_O = 19,8V.$$

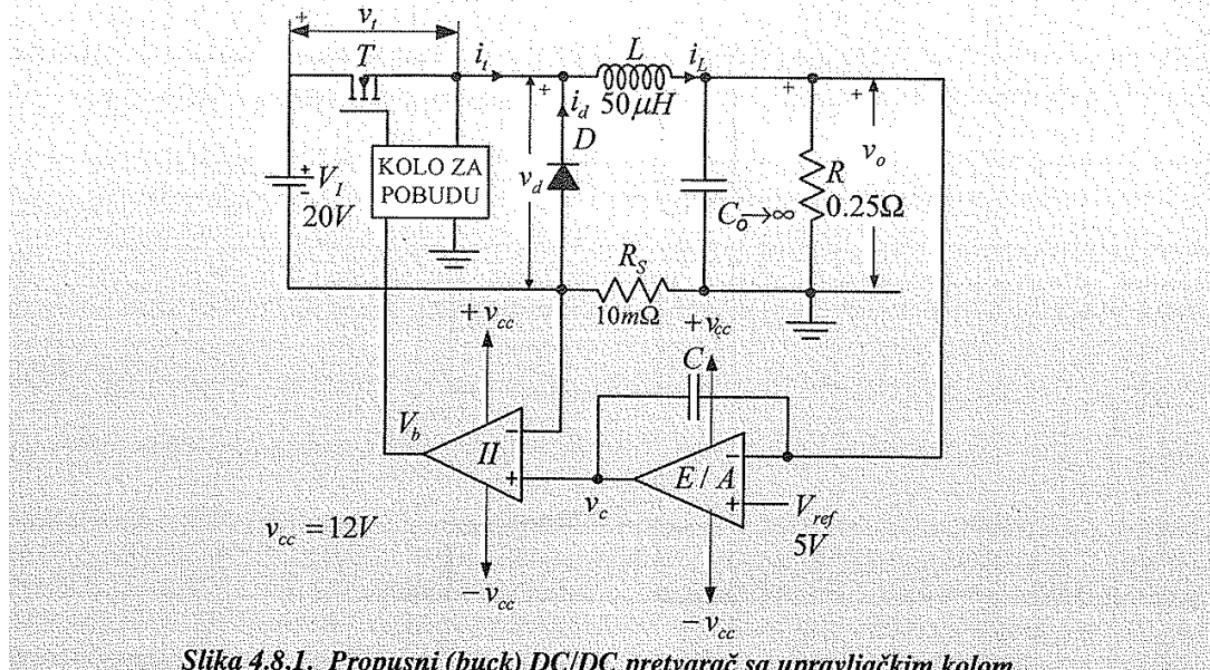


Slika 4.7.3 Vremenski dijagrami napona i struja.

### Zadatak 3.

Na slici 4.8.1 je prikazan propusni (buck) DC/DC pretvarač sa kolom kontrolne elektronike za regulaciju izlaznog napona. Smatrati da su sve komponente u kolu idealne, i da je otpornost  $R_s$  mala, tako da nema uticaja na rad pretvarača. Širina histerezisne petlje upotrebljenog komparatora je  $V_H=50mV$ .

- Nacrtati karakteristiku komparatora sa histerezisom tako da kolo ispravno radi.
- Odrediti učestanost prekidanja  $f_s$ , odnos impuls-periода  $D$ , i napone  $V_o$  i  $v_c$  u stacionarnom stanju i izračunati i nacrtati dijagrame obeleženih napona i struja u toku jedne periode prekidanja.



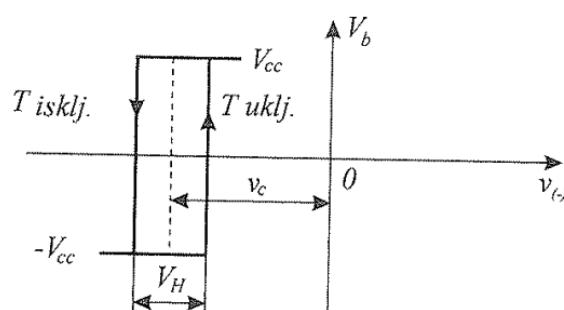
Slika 4.8.1. Propusni (buck) DC/DC pretvarač sa upravljačkim kolom.

a) Kroz otpornost  $R_s$  teče struja  $i_L$ , pa je napon na (-) ulazu komparatora negativan:  $v_{(-)}=-i_L R_s$ . Kolo regulacije sa komparatorom radi na sledeći način:

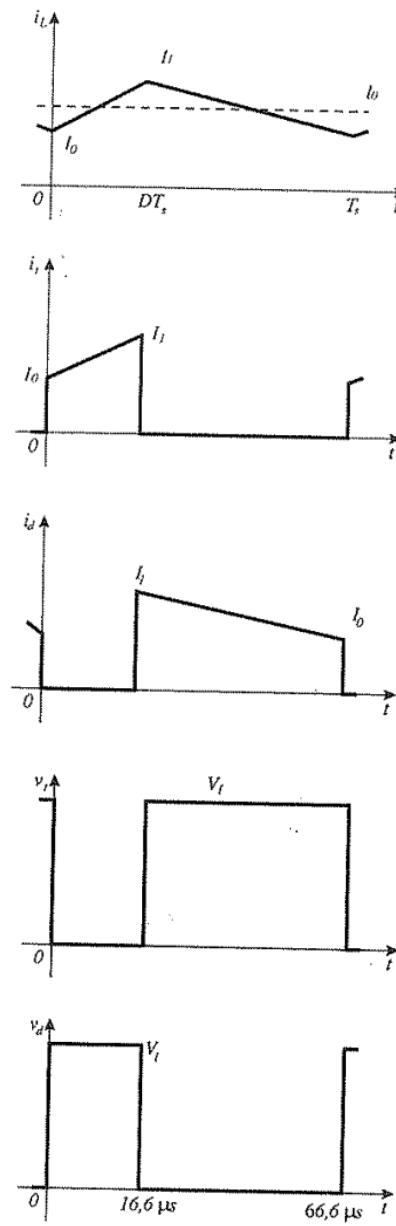
Za  $i_L < I_0$ , tranzistor  $T$  se uključuje, a za  $i_L > I_1$ , tranzistor  $T$  se isključuje (sl.4.8.3). Odavde sledi da je:

$$v_c = -i_L R_s = -I_0 R_s, V_H = \Delta I_0 R_s.$$

Prenosna karakteristika komparatora prikazana je na slici 4.8.2.



Slika 4.8.2. Karakteristika komparatora u kolu kontrolne elektronike.



Slika 4.8.3. Dijagrami obeleženih napona i struja u toku jedne periode prekidanja.

b)

$$\Delta I = \frac{V_H}{R_s} = 5A; \Delta I_L = \frac{(V_f - V_o)DT_s}{L}. Pošto je: v_o = v_{EA(-)} = v_{EA(+)} = V_{ref} = 5V, dobija se: DT_s = L\Delta I_L / (V_f - V_o) = 16,66 \mu s.$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} = 20A; I_0 = I_o - \frac{\Delta I_o}{2} = 17,5 > 0.$$

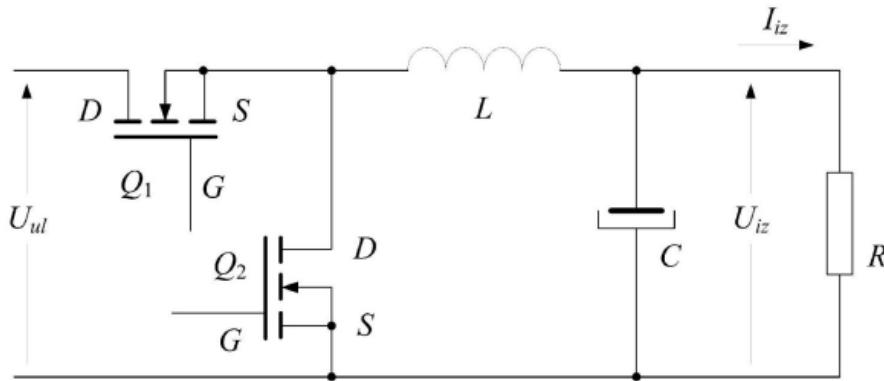
Na osnovu ovoga se zaključuje da pretvarač radi u kontinualnom režimu rada. Sledi da je  $V_o/V_f = D = 0,25$ . Shodno tome je  $T_s = 66,66 \mu s$ , tj.  $f_s = 1/T_s = 15 kHz$ .  
 $v_c = -I_o R_s = -200 mV$

$$I_0 = 17,5A;$$

$$I_1 = I_o + \frac{\Delta I_o}{2} = 22,5A.$$

#### Zadatak 4.

U prikazanom *buck* pretvaraču koristi se *MOSFET* umesto diode, *MOSFET*-ovi provode naizmenično sa faktorima ispunе  $D$  i  $(1 - D)$ . Otpornost kanala *MOSFET*-ova je  $r_{DSon} = 0,1 \text{ } [\Omega]$ , a otpornost potrošača  $R = 1 \text{ } [\Omega]$ . Izračunati srednju snagu gubitaka za pojedine *MOSFET*-ove za slučaj  $U_{ul} = 12 \text{ } [V]$ ,  $U_{iz} = 5 \text{ } [V]$ ,  $I_{iz} = 5 \text{ } [A]$ ! Drugi gubici i uticaj talasnosti struje prigušnice se zanemaruju.



#### Rešenje:

$$(U_{ul} - r_{DSon} \cdot I_{iz} - U_{iz}) \cdot D \cdot T = (U_{iz} + r_{DSon} \cdot I_{iz}) \cdot (1 - D) \cdot T \Rightarrow U_{iz} = U_{ul} \cdot D - r_{DSon} \cdot I_{iz} \Rightarrow$$

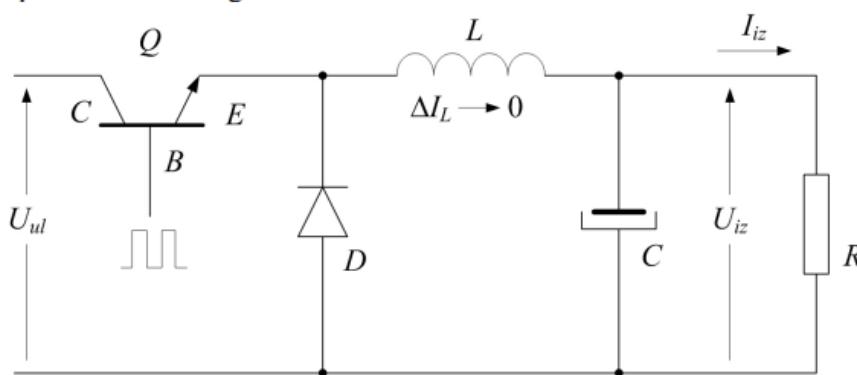
$$D = \frac{U_{iz} + r_{DSon} \cdot I_{iz}}{U_{ul}} = \frac{5 + 0,1 \cdot 5}{12} = 0,458 \quad [ ] \Rightarrow$$

$$P_{Q1} = D \cdot r_{DSon} \cdot I_{iz}^2 = 0,458 \cdot 0,1 \cdot 5^2 = 1,145 \text{ } [W] \Rightarrow$$

$$P_{Q2} = (1 - D) \cdot r_{DSon} \cdot I_{iz}^2 = (1 - 0,458) \cdot 0,1 \cdot 5^2 = 1,354 \text{ } [W]$$

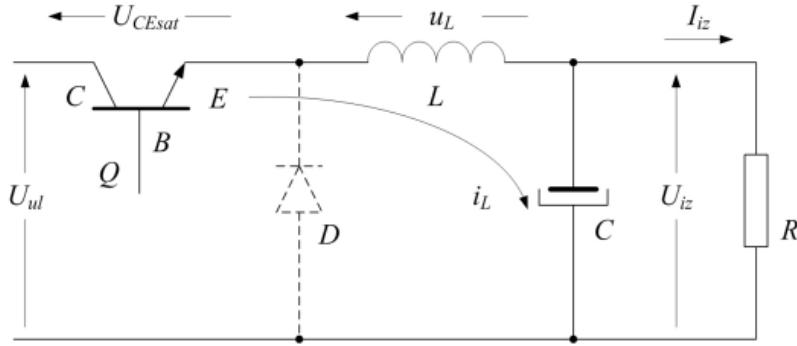
#### Zadatak 5.

*Buck* pretvarač radi sa  $U_{ul} = 20 \text{ } [V]$ ,  $U_{iz} = 5 \text{ } [V]$ ,  $I_{iz} = 10 \text{ } [A]$  i  $\Delta I_L \rightarrow 0$ . Proračunati stepen korisnog dejstva pretvarača  $\eta$  ako je poznato:  $U_{CEsat} = 2 \text{ } [V]$ ,  $U_D = 1 \text{ } [V]$ ! Prekidački gubici i gubici u pasivnim komponentama se mogu zanemariti.



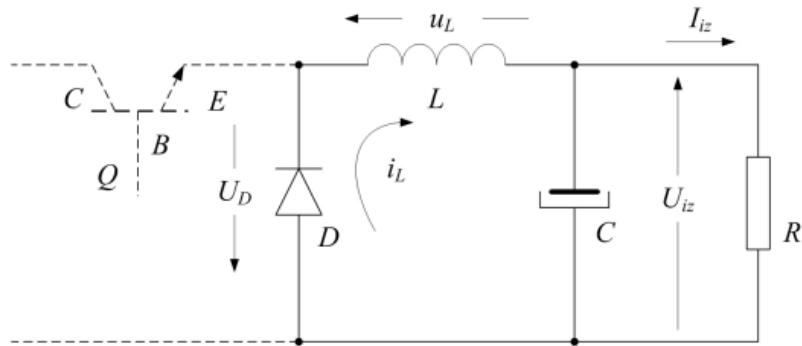
**Rešenje:**

Iz ekvivalentne šeme pretvarača za interval vođenja tranzistora nalazi se vrednost napona na prigušnici primenom drugog Kirchhoff-ovog zakona:



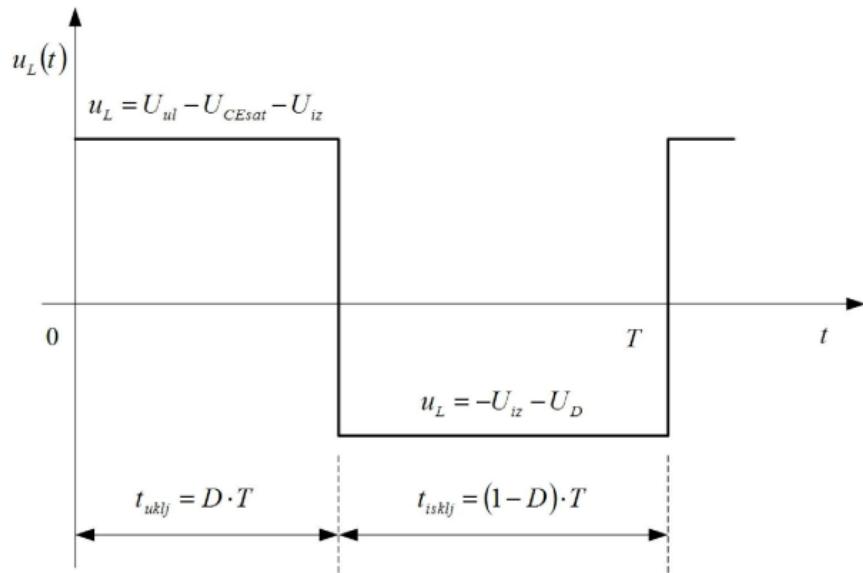
$$U_{ul} - U_{CESat} - u_L - U_{iz} = 0 \Rightarrow u_L = U_{ul} - U_{CESat} - U_{iz} \quad 0 \leq t < D \cdot T$$

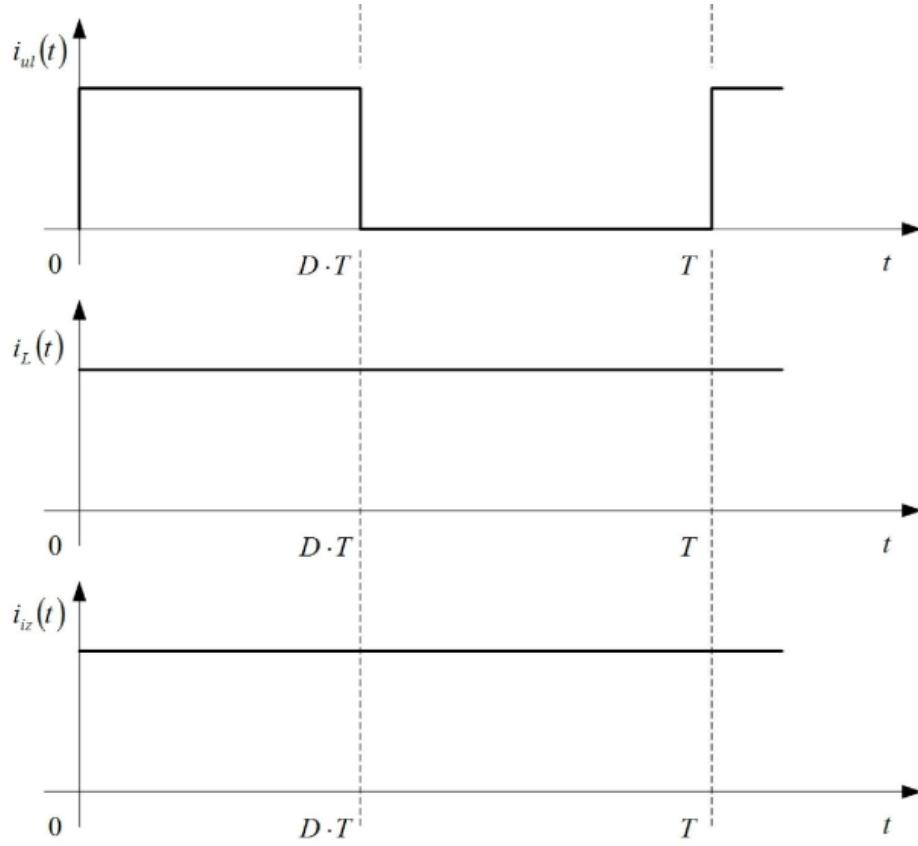
Iz ekvivalentne šeme pretvarača za interval zakočenja tranzistora, odnosno vođenja diode nalazi se vrednost napona na prigušnici primenom drugog Kirchhoff-ovog zakona:



$$u_L + U_{iz} + U_D = 0 \Rightarrow u_L = -U_{iz} - U_D \quad D \cdot T \leq t < T$$

Na osnovu prethodnih relacija, crta se dijagram promene vrednosti na prigušnici \$u\_L\$ i odgovarajućih struja tokom periode \$T\$:





Iz uslova da je srednja vrednost napona na prigušnici u ustaljenom režimu jednaka nuli izračunava se vrednost faktora ispune:

$$\int_0^T u_L(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} & (U_{ul} - U_{CESat} - U_{iz}) \cdot D \cdot T - (U_{iz} + U_D) \cdot (1-D) \cdot T = 0 \quad /:T \Rightarrow \\ & (U_{ul} - U_{CESat} - U_{iz}) \cdot D = (U_{iz} + U_D) - (U_{iz} + U_D) \cdot D \Rightarrow \\ & (U_{ul} - U_{CESat} - U_{iz} + U_{iz} + U_D) \cdot D = (U_{iz} + U_D) \Rightarrow \\ & D = \frac{U_{iz} + U_D}{U_{ul} - U_{CESat} + U_D} = \frac{5+1}{20-2+1} = \frac{6}{19} \approx 0,315 [ ] \end{aligned}$$

Iz uslova da je talasnost struje prigušnice jednaka nuli i da je srednja vrednost struje kondenzatora u ustaljenom režimu jednaka nuli, sledi jednakost vrednosti struje prigušnice i izlazne struje:

$$\begin{aligned} \Delta I_L & \rightarrow 0 \Rightarrow \\ \int_0^T i_C(t) \cdot dt & = 0 \Rightarrow \\ I_L \cdot T - I_{iz} \cdot T & = 0 \Rightarrow I_{iz} = I_L \Rightarrow \end{aligned}$$

Vrednost ulazne struje je tokom intervala vođenja jednaka struci prigušnice, te je njena srednja vrednost:

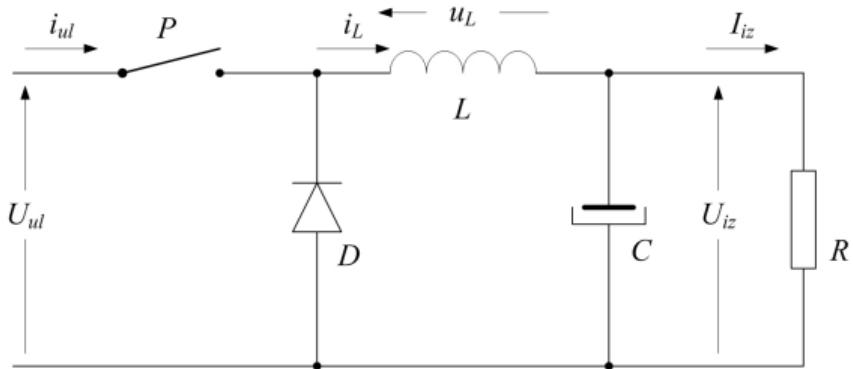
$$I_{ulsr} = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{DT} I_{iz} \cdot dt = D \cdot I_{iz} \Rightarrow$$

Iz relacija za izlaznu i ulaznu snagu dalje se nalazi izraz za stepen korisnog dejstva pretvarača:

$$\begin{aligned} P_{iz} &= U_{iz} \cdot I_{iz} \Rightarrow P_{ul} = U_{ul} \cdot I_{ulsr} = U_{ul} \cdot D \cdot I_{iz} \\ \eta &= \frac{P_{iz}}{P_{ul}} = \frac{U_{iz} \cdot I_{iz}}{U_{ul} \cdot D \cdot I_{iz}} = \frac{U_{iz}}{U_{ul} \cdot \frac{U_{iz} + U_D}{U_{ul} - U_{CEsat} + U_D}} = \frac{U_{iz} \cdot (U_{ul} - U_{CEsat} + U_D)}{U_{ul} \cdot (U_{iz} + U_D)} = \\ &= \frac{5}{20} \cdot \frac{19}{6} = \frac{19}{24} \approx 0,791 [ ] \end{aligned}$$

### Zadatak 6.

Realizuje se *buck* pretvarač za sledeći slučaj:  $U_{ul} = 40 [V]$ ,  $U_{iz} = 24 [V]$ ,  $I_{iz} = 10 [A]$  i  $f_s = 50 [kHz]$ . Odrediti induktivnost prigušnice  $L$  tako da varijacija struje kroz nju bude  $\Delta I_L = 5 [A]$ , zatim izračunati potrebna kapacitivnost izlaznog kondenzatora  $C$  tako da granična učestanost  $LC$  filtra bude  $f_g = 2 [kHz]$ !



#### Rešenje:

$$\int_0^T u_L(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow$$

$$(U_{ul} - U_{iz}) \cdot D \cdot T - U_{iz} \cdot (1 - D) \cdot T = 0 \Rightarrow (U_{ul} - U_{iz}) \cdot D - U_{iz} + D \cdot U_{iz} \Rightarrow U_{iz} = D \cdot U_{ul} \Rightarrow$$

$$D = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{24}{40} = \frac{6}{10} = 0,6 [ ] \Rightarrow$$

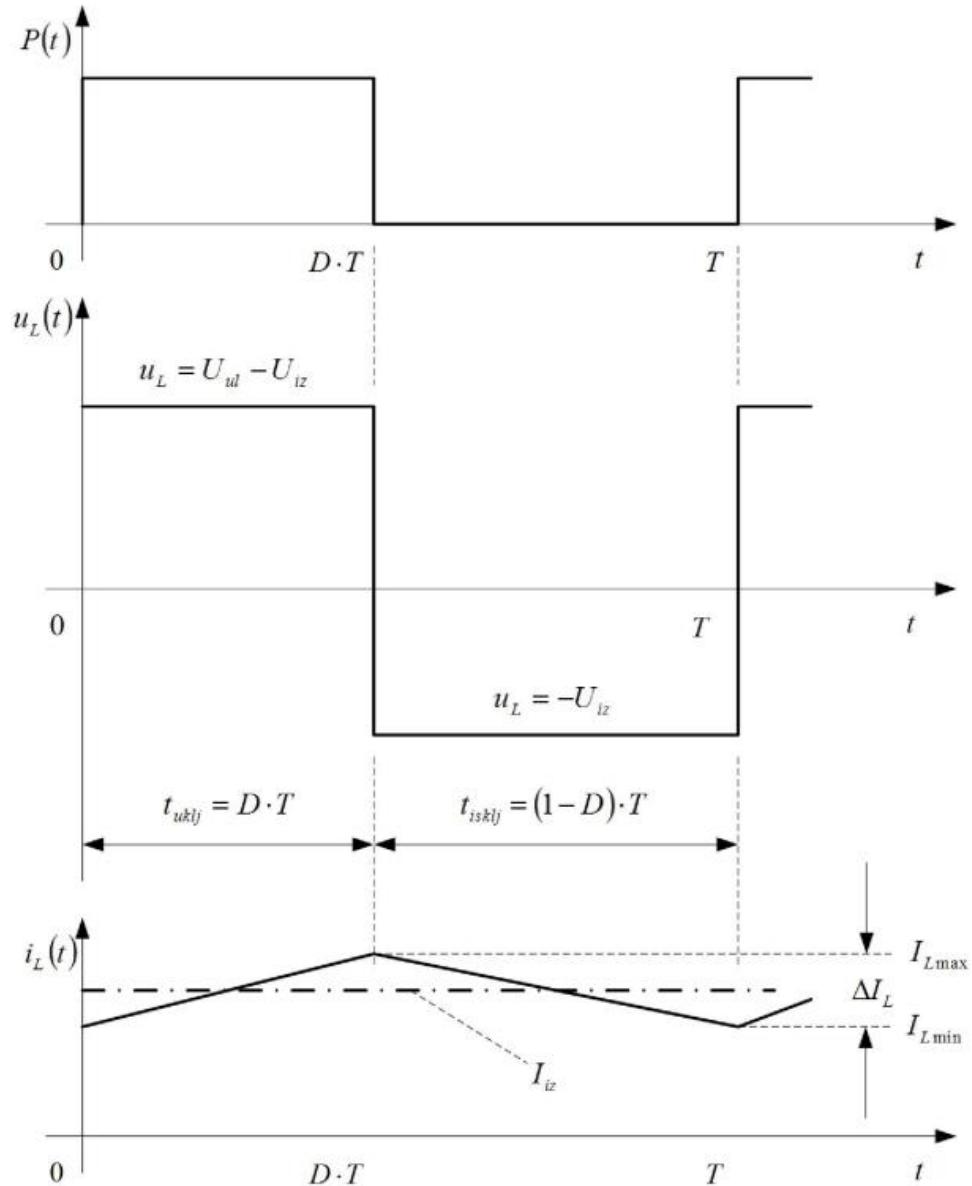
$$t_{uklj} = D \cdot T = D \cdot \frac{1}{f_s} = 0,6 \cdot \frac{1}{50 \cdot 10^3} = 12 \cdot 10^{-6} = 12 [\mu s] \Rightarrow$$

$$u_L = U_{ul} - U_{iz} = L \cdot \frac{di_L}{dt} = L \cdot \frac{\Delta I_L}{t_{uklj}} \Rightarrow$$

$$L = \frac{U_{ul} - U_{iz}}{\Delta I_L} \cdot t_{uklj} = \frac{40 - 24}{5} \cdot 12 \cdot 10^{-6} = 38,4 \cdot 10^{-6} = 38,4 [\mu H]$$

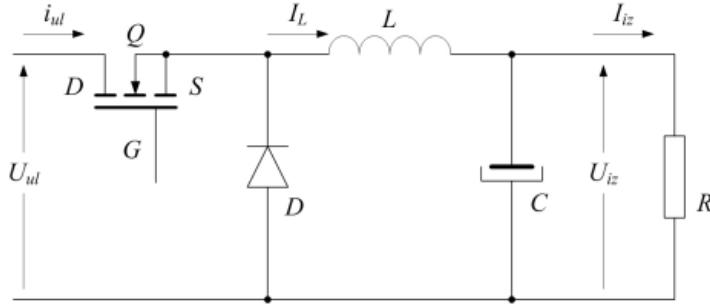
$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \Rightarrow$$

$$C = \frac{1}{L} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_g} \right)^2 = \frac{1}{38,4 \cdot 10^{-6}} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^3} \right)^2 = \frac{1}{38,4} \cdot \left( \frac{1}{4 \cdot \pi} \right)^2 = 164,9 \cdot 10^{-6} = 164,9 [\mu F]$$



### Zadatak 7.

Buck pretvarač radi u diskontinualnom režimu. Ulazni napon je  $U_{ul} = 15 [V]$ , a izlazni napon  $U_{iz} = 5 [V]$  se održava konstantnim sa promenom učestanosti prekidanja  $f_s$  za promenu opterećenja  $I_{iz}$  od 20 [ $mA$ ] do 100 [ $mA$ ]. Pretvaračem se upravlja tako što je prekidač uključen dok struja kalema  $L = 20 [\mu H]$  ne dostigne  $I_{Lmax} = 1 [A]$ , nakon čega se prekidač isključuje i ostaje isključen sve do narednog uključenja koje inicira regulator izlaznog napona. Odrediti opseg promene učestanosti za koju pretvarač radi u diskontinualnom režimu!



Rešenje:

$$t_{on} = \frac{I_{Lmax} \cdot L}{U_{ul} - U_{iz}} = \frac{1 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{15 - 5} = 2 \cdot 10^{-6} [s] = 2 [\mu s] \Rightarrow$$

$$t_{off min} = t_\delta = -\frac{I_{Lmax} \cdot L}{-U_{iz}} = -\frac{1 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{-5} = 4 \cdot 10^{-6} [s] = 4 [\mu s] \Rightarrow$$

$$T_{s min} = t_{on} + t_\delta = 2 + 4 = 6 [\mu s] \Rightarrow$$

$$I_{iz max} = \frac{1}{2} \cdot I_{Lmax} = \frac{1}{2} [A] > \frac{1}{10} [A] > \frac{1}{50} [A] \Rightarrow$$

$$\int_0^T i_C(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow$$

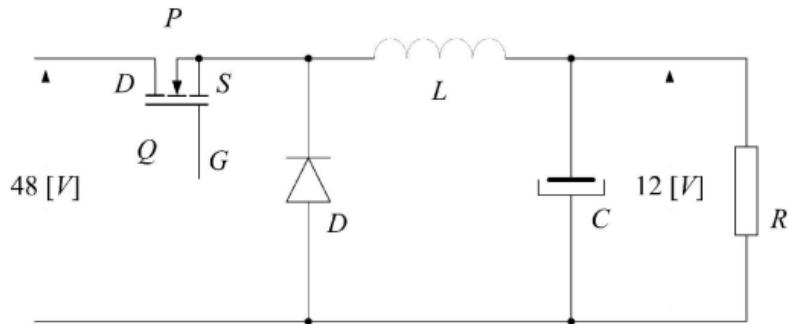
$$\frac{I_{Lmax} \cdot (t_{on} + t_\delta)}{2} - I_{iz} \cdot T_s = 0 \Rightarrow f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{2 \cdot I_{iz}}{I_{Lmax} \cdot (t_{on} + t_\delta)} = \frac{2 \cdot I_{iz}}{I_{Lmax} \cdot T_{s min}} \Rightarrow$$

$$f_{s max} = \frac{2 \cdot I_{iz max}}{I_{Lmax} \cdot T_{s min}} = \frac{2 \cdot \frac{1}{10}}{1 \cdot 6 \cdot 10^{-6}} = 33,3 \cdot 10^3 [Hz] = 33,3 [kHz]$$

$$f_{s min} = \frac{2 \cdot I_{iz min}}{I_{Lmax} \cdot T_{s min}} = \frac{2 \cdot \frac{50}{100}}{1 \cdot 6 \cdot 10^{-6}} = 6,66 \cdot 10^3 [Hz] = 6,66 [kHz]$$

### Zadatak 8.

U buck pretvaraču sa  $U_{ul} = 48 [V]$  i  $U_{iz} = 12 [V]$  proračunati induktivnost kalema  $L$  tako da pri potrošnji od  $50 [W]$  pretvarač radi na granici između kontinualnog i diskontinualnog režima ( $f_s = 50 [kHz]$ )! Proračunati kapacitivnost kondenzatora  $C$  tako da pod istim uslovima talasnost izlaznog napona (mereno od vrha do vrha) bude 0,2% od srednje vrednosti napona!



#### Rešenje:

$$D = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{12}{48} = 0,25 \Rightarrow$$

$$I_{iz} = \frac{P_{iz}}{U_{iz}} = \frac{50}{12} = 4,157 [A] \Rightarrow$$

$$I_{iz} = \frac{P_{iz}}{U_{iz}} = \frac{50}{12} = 4,157 [A] \Rightarrow$$

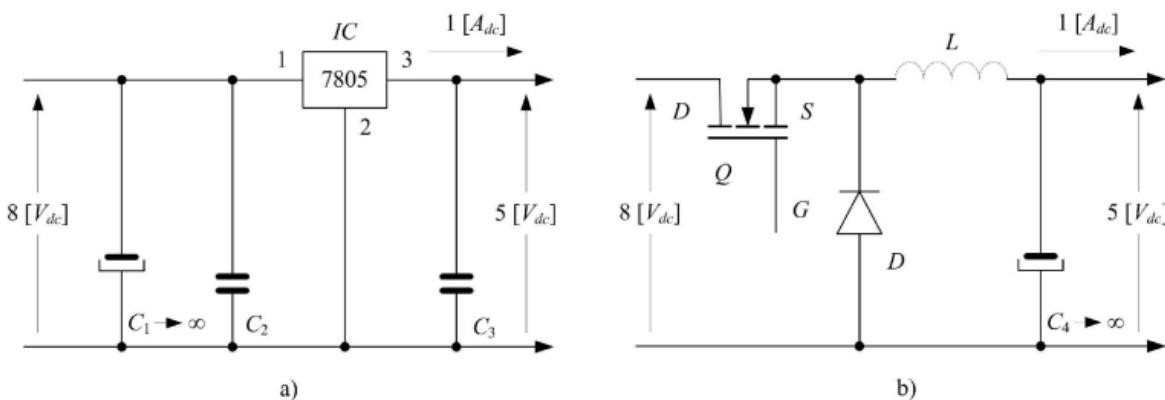
$$\Delta I_L = 2 \cdot I_{iz} = 2 \cdot 4,157 = 8,333 [A] \Rightarrow$$

$$L = \frac{U_{ul} - U_{iz}}{\Delta I_L} \cdot t_{on} = \frac{U_{ul} - U_{iz}}{\Delta I_L} \cdot \frac{D}{f_s} = \frac{48 - 12}{8,333} \cdot \frac{0,25}{50 \cdot 10^3} = 2,16 \cdot 10^{-5} [H] = 21,6 [\mu H]$$

$$C = \frac{I_{iz}}{4 \cdot \Delta U \% \cdot U_{iz}} \cdot T = \frac{I_{iz}}{4 \cdot \Delta U \% \cdot U_{iz} \cdot f_s} = \frac{8,333}{4 \cdot 0,002 \cdot 12 \cdot 50 \cdot 10^3} = 8,681 \cdot 10^{-4} [F] = 868,1 [\mu F]$$

### Zadatak 9.

Proračunati i uporediti stepene korisnog dejstva linearnog regulatora na slici a) i buck pretvarača na slici b)! Prepostaviti da su vrednosti  $r_{DSon} = 0,1 [\Omega]$  i  $U_D = 1 [V]$ ! Drugi gubici i uticaj talasnosti struje prigušnice se zanemaruju.



**Rešenje:**

a)  $P_{iz} = (1 - D) \cdot U_{iz} \cdot I_{iz} = 5 \cdot 1 = 5[W] \Rightarrow$

$$P_{ula} = U_{ul} \cdot I_{ul} = U_{ul} \cdot I_{iz} = 8 \cdot 1 = 8[W] \Rightarrow$$

$$\eta_a = \frac{P_{iz}}{P_{ula}} = \frac{5}{8} = 0,625[ ]$$

b)  $(U_{ul} - r_{DSon} \cdot I_{iz} - U_{iz}) \cdot D \cdot T = (U_{iz} + U_D) \cdot (1 - D) \cdot T \Rightarrow$

$$D = \frac{U_{iz} + U_D}{U_{ul} - r_{DSon} \cdot I_{iz} + U_D} = \frac{5+1}{8 - 0,5 \cdot 1 + 1} = \frac{6}{8,5} = 0,705[ ] \Rightarrow$$

$$P_Q = D \cdot r_{DSon} \cdot I_{iz}^2 = 0,705 \cdot 0,5 \cdot 1^2 = 0,352[W] \Rightarrow$$

$$P_D = (1 - D) \cdot U_D \cdot I_{iz} = (1 - 0,705) \cdot 1 \cdot 1 = 0,295[W] \Rightarrow$$

$$P_{gb} = P_Q + P_D = 0,352 + 0,295 = 0,647[W] \Rightarrow$$

$$P_{ulb} = P_{ul} + P_{gb} = 5 + 0,647 = 5,647[W] \Rightarrow$$

$$\eta_b = \frac{P_{iz}}{P_{ulb}} = \frac{5}{5,647} = 0,885[ ] > \eta_a = 0,625[ ]$$

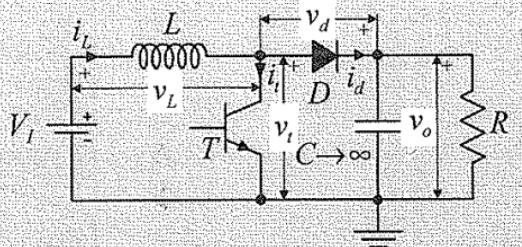
## BOOST pretvarač

### Zadatak 10.

*Podizač napona (boost) pretvarač s bipolarnim prekidačkim tranzistorima sa slike 4.1.1 ima idealne komponente.*

- a) Izvesti izraz za  $V_o/V_i$  u kontinualnom režimu rada.
- b) Izračunati i nacrtati talasne oblike napona i struja na tranzistorima, prigušnici i diodi, u toku jedne periode prekidanja.

Slika 4.1.1. Šema podizača napona (boost).



a)

$$\bar{v}_L = 0 \Rightarrow V_i DT_s = (V_o - V_i)(1 - D)T_s \Rightarrow \\ \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D}.$$

b)

$$I_i = \bar{i}_d = \frac{I_{d1} + I_{d0}}{2}(1 - D) = \frac{I_{L1} + I_{L0}}{2}(1 - D) \Rightarrow$$

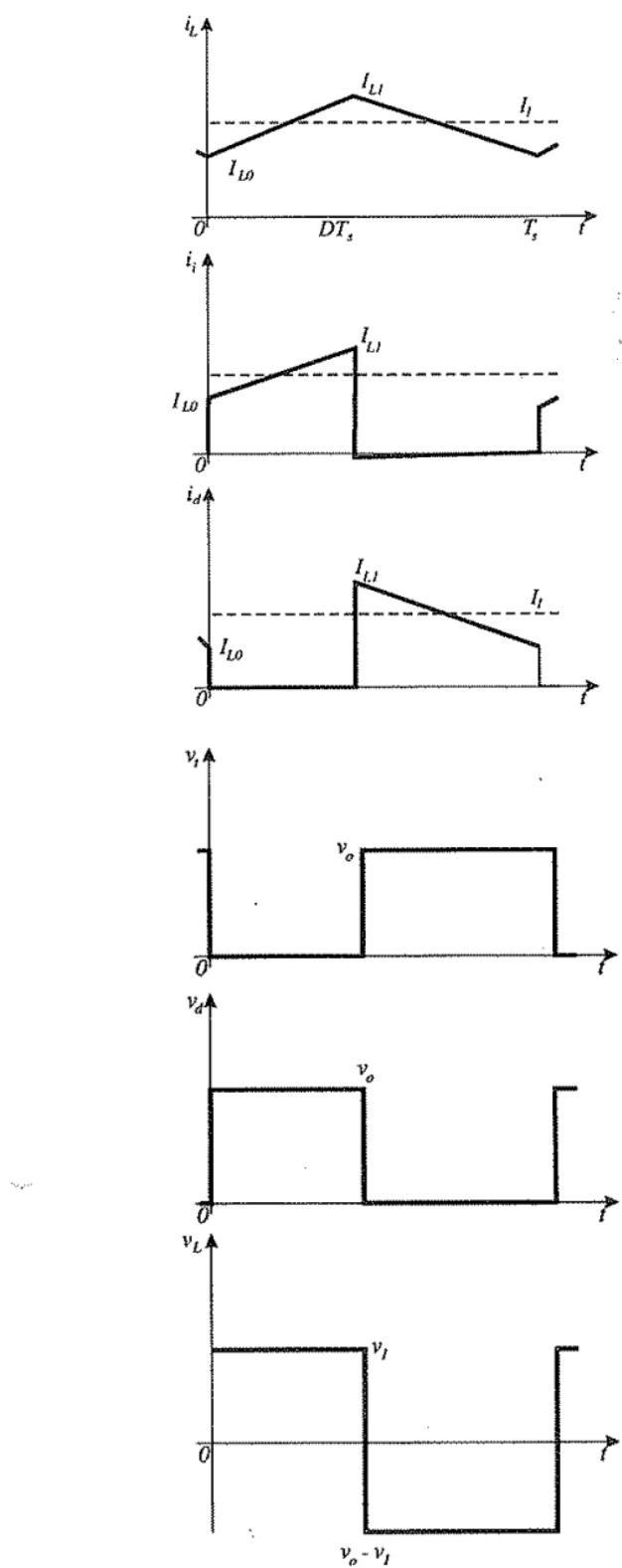
$$I_{L1} + I_{L0} = \frac{2I_i}{1 - D} \wedge I_{L1} - I_{L0} = \frac{V_u DT_s}{L} \Rightarrow$$

$$I_{L1} = \frac{I_i}{1 - D} + \frac{V_u DT_s}{2L},$$

$$I_{L0} = \frac{I_i}{1 - D} - \frac{V_u DT_s}{2L},$$

$$v_{t\max} = V_i \quad (\text{kada je } T \text{ uklj.}) \text{ i}$$

$$v_{d\max} = V_i \quad (\text{kada je } T \text{ isklj.}).$$

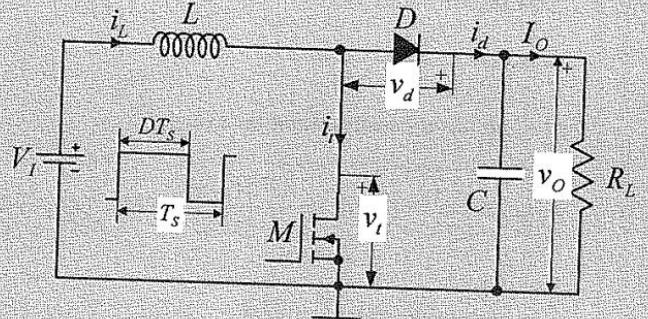


Slika 4.1.2. Talasni oblici napona i struja obeležnih veličina podizača napona.

### Zadatak 11.

Podizač (boost) pretvarač jednosmernog izlaznog napona  $V_o=300V$  napaja se jednosmernim ulaznim naponom koji se menja od  $V_{l\min}=40V$  do  $V_{l\max}=72V$ . Učestanost prekidanja je  $f_s=50kHz$ , maksimalna izlazna struja iznosi  $I_o=0,5A$ , a sve upotrebljene komponente su idealne.

- Odrediti maksimalni i minimalni odnos impuls-perioda  $D_{\max}$  i  $D_{\min}$ .
- Odrediti kapacitivnost kondenzatora  $C$  ako je talasnost izlaznog napona u najgorem slučaju  $\zeta=\Delta V_o/V_o=0,1\%$  (od vrha do vrha).
- Odrediti induktivnost prigušnice  $L$  ako talasnost njene struje za  $D_{\max}$  iznosi:
  - 25% (od vrha do vrha) od njene vršne vrednosti;
  - 100% (pretvarač radi u diskontinualnom režimu).
- Za maksimalnu izlaznu struju u oba prethodna slučaja, nacrtati dijagrame obeleženih napona i struja, a za  $D_{\max}$  i izračunati brojne vrednosti.
- Za realizaciju prigušnice  $L$  na raspolaganju je jezgro EC35,  $k=0,7$ ,  $J=4A/mm^2$ ,  $B_{\max}=0,25T$ , presek jezgra  $S_j=84mm^2$ , presek namotaja  $S_n=97mm^2$ . Odrediti koji od slučaja pod c) može da se smesti u dato jezgro, i izračunati broj navojaka, presek (prečnik) žice i vazdušni zazor.



Slika 4.4.1. Podizač (boost) pretvarač.

a)

$$V_l DT_s = (V_o - V_l)(1 - D)T_s \Rightarrow \frac{V_o}{V_l} = \frac{1}{1 - D} \Leftrightarrow D = \frac{V_o - V_l}{V_o};$$

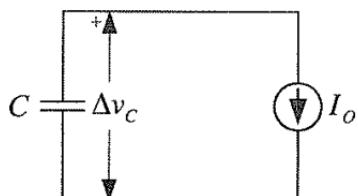
$$V_l = 40V \Rightarrow D_{\max} = 0,8666,$$

$$V_l = 72V \Rightarrow D_{\min} = 0,76.$$

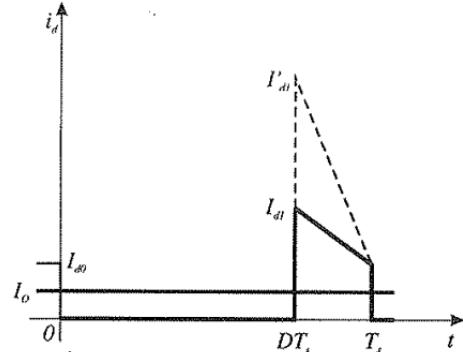
b) Pošto se napon na kondenzatoru  $C$  malo menja, to je  $V_o \approx const.$  i  $I_o \approx const.$  pa kondenzator obezbeđuje  $I_o$  dok tranzistor provodi (slika 4.4.2):

$$i_L = C \frac{dv_C}{dt} = I_o = const. \Rightarrow \Delta V_C = \frac{1}{C} I_o \Delta t = \frac{I_o D T_s}{C} \Rightarrow \\ C = \frac{I_o D T_s}{\Delta V_C} = 28,9 \mu F.$$

Dobijena vrednost za  $C$  važi u najgorem slučaju kada je  $D=D_{max}$ .



Slika 4.4.2. Ekvivalentno kolo na osnovu koga se odreduje varijacija izlazog napona.



Slika 4.4.3. Talasni oblik struje na izlazu.

c)

1) Puna liniju na dijagramu na slici 4.4.3

$$I_o = \frac{I_{d1} + I_{d0}}{2} (1 - D) = \frac{1,75 I_{d1}}{2} (1 - D), \text{ jer je } I_{d0} = 0,75 I_{d1};$$

$$I_{d1} - I_{d0} = \frac{(V_o - V_i)(1 - D)T_s}{L} = 0,25 I_{d1} \Rightarrow$$

$$L = \frac{1,75(V_o - V_i)(1 - D)^2 T_s}{0,5 I_o} = 647 \mu H \quad (\text{za } D_{max})$$

2) Isprekidana linija na dijagramu na slici 4.4.3

$$I_o = \frac{I_{d1}}{2} (1 - D), \quad I_{d1} = \frac{(V_o - V_i)(1 - D)T_s}{L} \Rightarrow$$

$$L = \frac{(V_o - V_i)(1 - D)^2 T_s}{2 I_o} = 92,4 \mu H \quad (\text{za } D_{max})$$

Pretvarač sigurno radi u diskontinualnom režimu za svako  $D$ .

d) U oba slučaja važi:

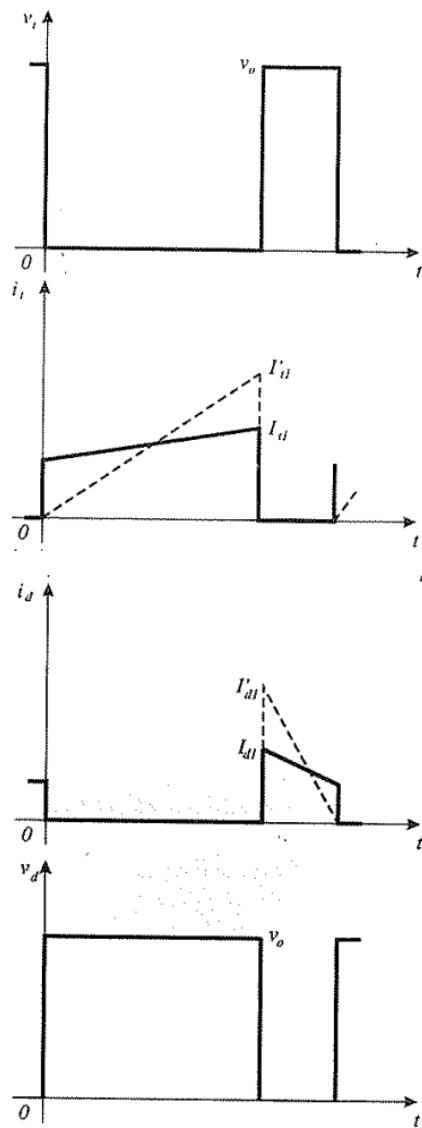
$$i_L = i_t + i_d.$$

$$\text{Slučaj 1.: } I_{d1} = I_{t1} = \frac{2I_o}{1,75(1-D)} = 4,29A;$$

$$I_{d0} = I_{t0} = 0,75I_{d1} = 3,21A.$$

Slučaj 2.:

$$I_{d1} = I_{t1} = \frac{2I_o}{(1-D)} = 7,5A.$$



Slika 4.4.4. Vremenski dijagrami obeleženih napona i struja podizaca jednosmernog napona.

e) Kako je  $S_p S_N = L I^2 / (B k J)$ ; jezgro EC35 ima  $S_p S_N = 8148 \text{ mm}^4$  ( $I$  je vršna vrednost struje prigušnice), a potrebno je u slučajevima:

Slučaj 1.:  $S_p S_N = 17011 \text{ mm}^4$  (ne odgovara);

Slučaj 2.:  $S_p S_N = 7425 \text{ mm}^4$  (odgovara).

Dakle, za slučaj 2) se može pisati:

$$N = \frac{LI}{BS_J} = 33, \quad S_z = \frac{I_{\text{eff}}}{J}, \quad \text{gde je } I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_L^2 dt};$$

$$i_L = \frac{I_{t1}}{DT_s} t, \quad \text{za } t \in (0 \div DT_s)$$

$$i_L = I_{t1} \left( 1 - \frac{t - DT_s}{(1-D)T_s} \right) \quad \text{za } t \in (DT_s \div T_s) \Rightarrow$$

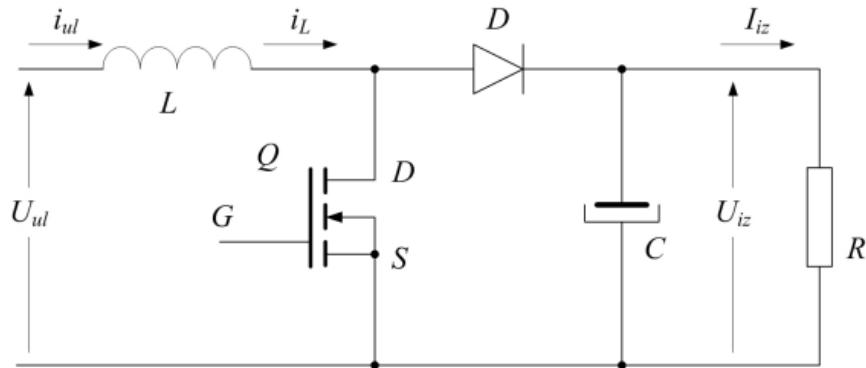
$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{I_{t1}^2}{3}} = 4,33A, \quad S_z = \frac{4,33A}{4A/mm^2} = 1,083 \text{ mm}^2, \quad d_z = \sqrt{\frac{4S_z}{\pi}} = 1,17 \text{ mm}.$$

Provera:  $S_N = I/k(NS_z) = 51,1 \text{ mm}^2$  potrebno, a EC35 ima  $S_N = 97 \text{ mm}^2$ , može da stane namotaj:

$$A_L = L/N^2 = 84,8nH/nav^2; \quad l_0 \approx \mu_0 S_z / A_L \approx 1,24 \text{ mm}.$$

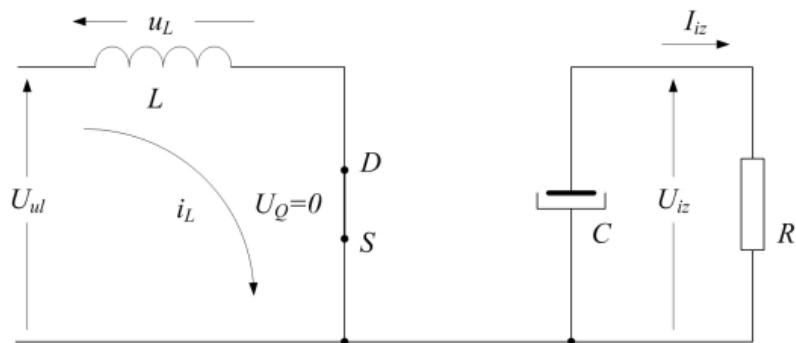
### Zadatak 12.

Projektuje se *boost* pretvarač za sledeće uslove:  $U_{ul} = 200 \dots 300 [V]$ ,  $U_{iz} = 400 [V]$ ,  $I_{iz} = 2 [A]$  i  $\Delta I_L = 1 [A]$ . Proračunati stepen iskorišćenja prekidača  $\kappa$ !



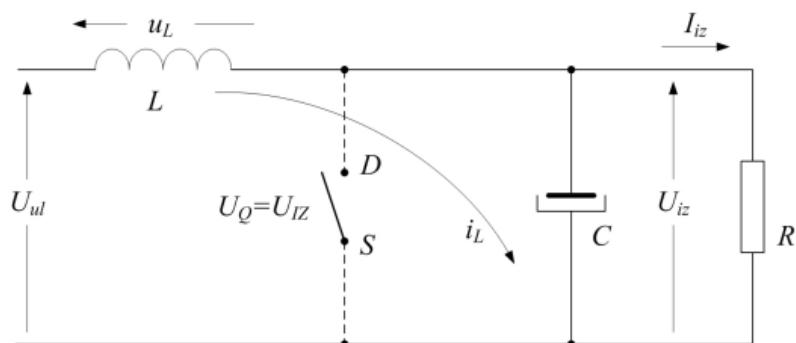
#### Rešenje:

Iz ekvivalentne šeme pretvarača za interval vođenja tranzistora nalazi se vrednost napona na prigušnici primenom drugog *Kirchhoff*-ovog zakona:



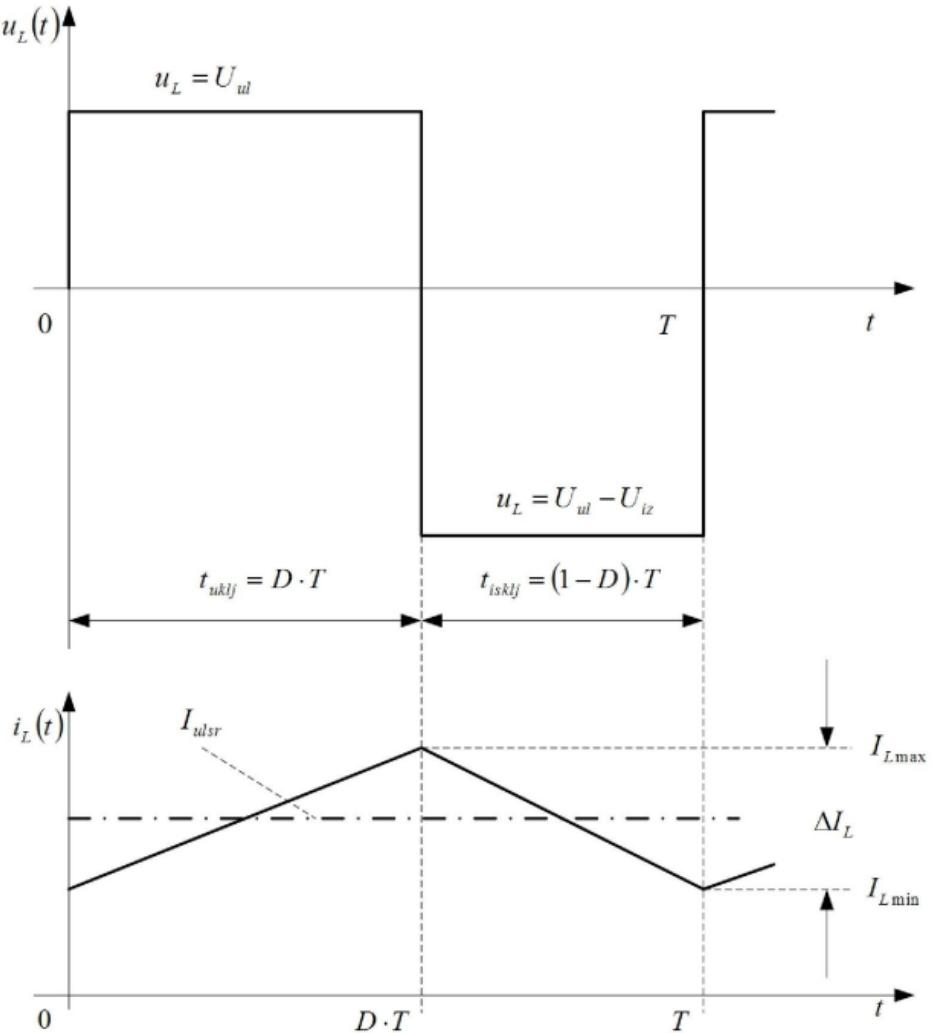
$$U_{ul} - u_L = 0 \Rightarrow u_L = U_{ul} \quad 0 \leq t < D \cdot T$$

Iz ekvivalentne šeme pretvarača za interval zakočenja tranzistora, odnosno vođenja diode nalazi se vrednost napona na prigušnici primenom drugog *Kirchhoff*-ovog zakona:



$$U_{ul} - u_L - U_{iz} = 0 \Rightarrow u_L = U_{ul} - U_{iz} \quad D \cdot T \leq t < T$$

Na osnovu prethodnih relacija, crta se dijagram promene vrednosti napona  $u_L$  i struje  $i_L$  prigušnice tokom periode  $T$ :



Iz uslova da je srednja vrednost napona na prigušnici u ustaljenom režimu jednaka nuli, izračunava se vrednost faktora ispune:

$$\begin{aligned}
 \int_0^T u_L(t) \cdot dt &= 0 \Rightarrow \\
 U_{ul} \cdot D \cdot T + (U_{ul} - U_{iz}) \cdot (1-D) \cdot T &= 0 \quad /:T \Rightarrow \\
 U_{ul} - U_{iz} \cdot (1-D) &\Rightarrow U_{iz} = \frac{U_{ul}}{1-D} \Rightarrow D = \frac{U_{iz} - U_{ul}}{U_{iz}} \\
 P_{ul} = P_{iz} &\Rightarrow U_{ul} \cdot I_{ulsr} = U_{iz} \cdot I_{iz} \Rightarrow I_{ulsr} = \frac{U_{iz} \cdot I_{iz}}{U_{ul}} \Rightarrow \\
 I_{ulsr \max} &= \frac{U_{iz} \cdot I_{iz}}{U_{ul \min}} = \frac{400 \cdot 2}{200} = 4[A] \Rightarrow \\
 I_{L \max} &= I_{ulsr \max} + \frac{\Delta I_L}{2} = 4 + \frac{1}{2} = 4,5[A] \Rightarrow
 \end{aligned}$$

Sledi:

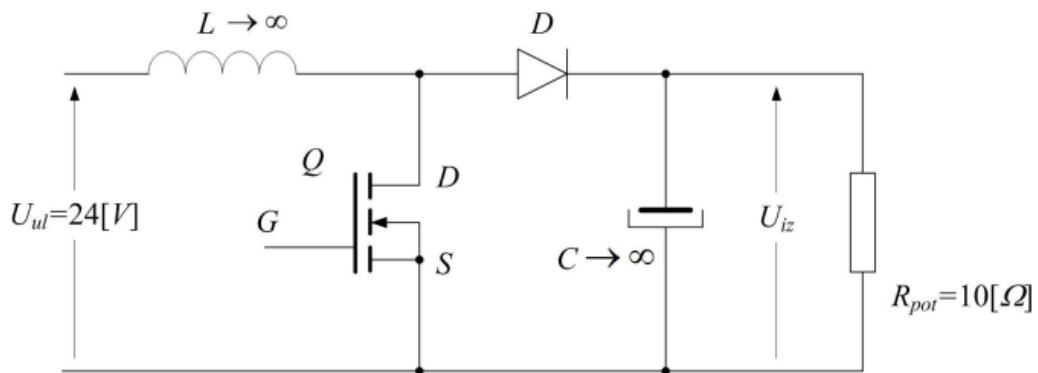
$$U_Q > U_{iz} = 400[V] \quad I_Q > I_{L\max} = 4,5[A]$$

pa je stepen iskorišćenja prekidača:

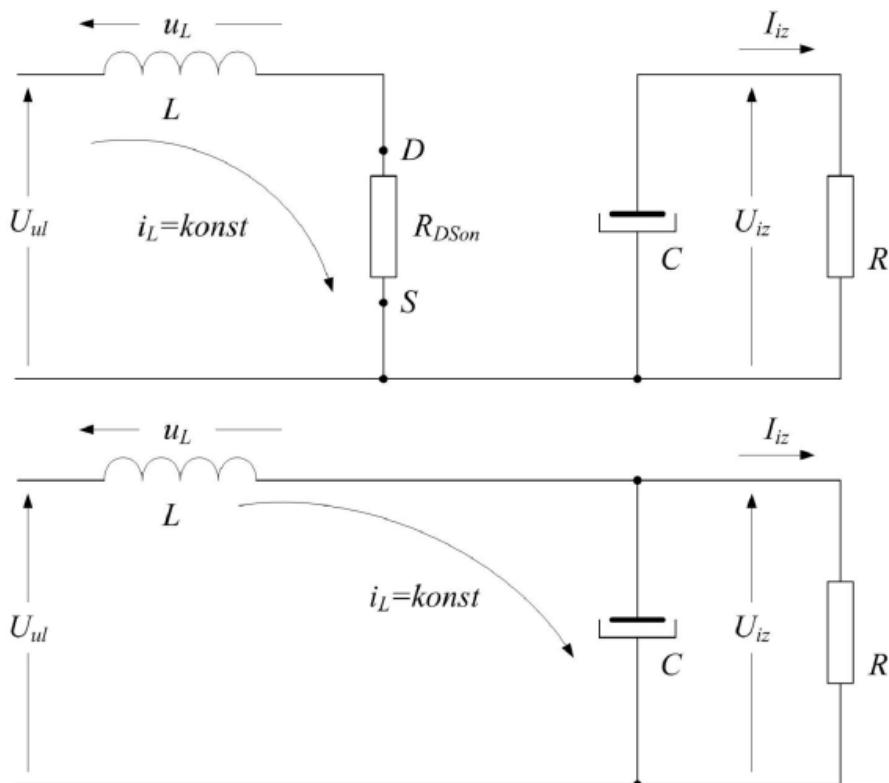
$$\kappa = \frac{P_{iz}}{P_Q} = \frac{U_{iz} \cdot I_{iz}}{U_Q \cdot I_Q} = \frac{400 \cdot 2}{400 \cdot 4,5} = \frac{2}{4,5} = 0,444 \cdot [ ]$$

### Zadatak 13.

Kao prekidač u *boost* pretvaraču koristi se *MOSFET* sa  $R_{DSon} = 200[m\Omega]$ . Gubici u ostalim elementima se mogu zanemariti. Izvesti izraz za odnos vrednosti izlaznog i ulaznog napona u funkciji vrednosti faktora ispunе  $U_{iz} / U_{ul} = f(D)$ , uzimajući u obzir gubitke u *MOSFET*-u. Pri kojoj vrednosti faktora ispunе  $D$  se dobija maksimalna vrednost izlaznog napona?

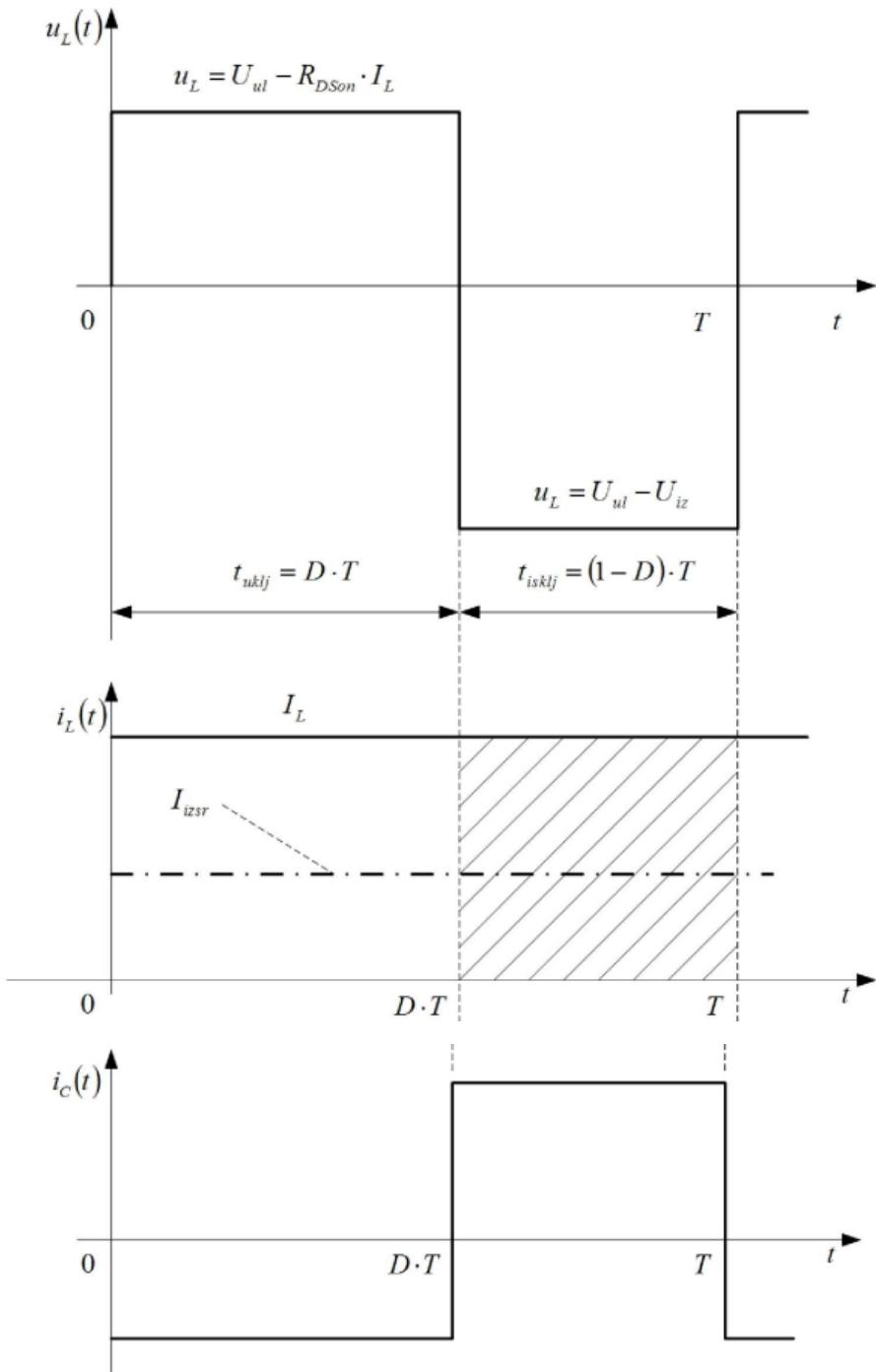


Rešenje:



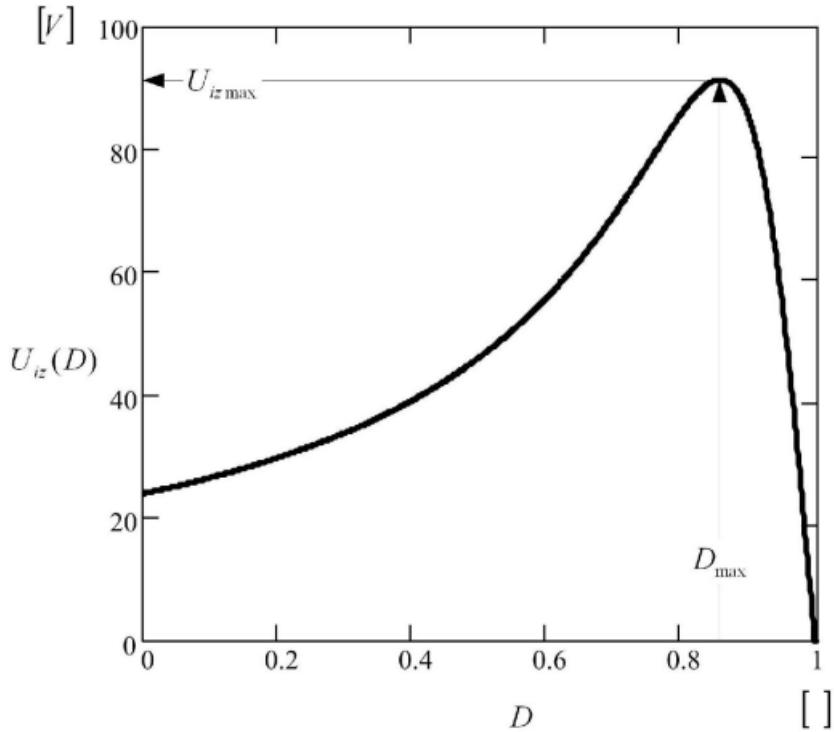
$$i_L = \text{const} = I_L \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} U_{ul} - u_L - R_{DSon} \cdot I_L &= 0 \Rightarrow u_L = U_{ul} - R_{DSon} \cdot I_L \quad 0 \leq t < D \cdot T \\ U_{ul} - u_L - U_{iz} &= 0 \Rightarrow u_L = U_{ul} - U_{iz} \quad D \cdot T \leq t < T \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \int_0^T u_L(t) \cdot dt &= 0 \Rightarrow \\ (U_{ul} - R_{DSon} \cdot I_L) \cdot D \cdot T + (U_{ul} - U_{iz}) \cdot (1 - D) \cdot T &= 0 \quad / : T \Rightarrow \\ I_{iz} &= \frac{U_{iz}}{R_{pot}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\int_0^T i_C(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow \\
I_L \cdot (1-D) \cdot T - I_{iz} \cdot T = 0 \Rightarrow I_L = \frac{I_{iz}}{1-D} = \frac{U_{iz}}{R_{pot}} \cdot \frac{1}{1-D} \Rightarrow \\
\left( U_{ul} - R_{DSon} \cdot \frac{U_{iz}}{R_{pot}} \cdot \frac{1}{1-D} \right) \cdot D + (U_{ul} - U_{iz}) \cdot (1-D) = 0 \Rightarrow \\
-U_{iz} \cdot \left( 1 - D + \frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \cdot \frac{D}{1-D} \right) + U_{ul} = 0 \Rightarrow \\
U_{ul} = U_{iz} \cdot \left( 1 - D + \frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \cdot \frac{D}{1-D} \right) \Rightarrow \\
\frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{1}{1 - D + \frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \cdot \frac{D}{1-D}} = \frac{1}{1 - D \cdot \left( 1 - \frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \cdot \frac{1}{1-D} \right)}
\end{aligned}$$



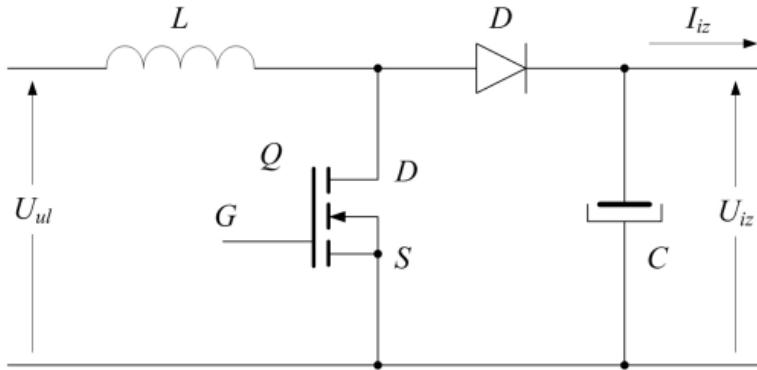
Ekstrem se dobija za:

$$\begin{aligned}
\frac{d \left( \frac{U_{ul}}{U_{iz}} \right)}{dD} &= \frac{d \left( 1 - D + \frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{D} - 1} \right)}{dD} = -1 + \frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \left( -\frac{1}{D^2} \right) = \\
&= -1 + \frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \cdot \frac{1}{(1-D)^2} = 0 \Rightarrow
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(1-D)^2 = \frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \Rightarrow 1-D = \sqrt{\frac{R_{DSon}}{R_{pot}}} \Rightarrow \\
D_{\max} = 1 - \sqrt{\frac{R_{DSon}}{R_{pot}}} = 1 - \sqrt{\frac{0,2}{10}} = 1 - \sqrt{0,02} = 1 - 0,141421 \approx 0,85857[ ] \\
U_{iz\ max} = \frac{U_{ul}}{1-D_{\max} + \frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \cdot \frac{D_{\max}}{1-D_{\max}}} = \frac{U_{ul}}{1-1+\sqrt{\frac{R_{DSon}}{R_{pot}}} + \frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \cdot \frac{1-\sqrt{\frac{R_{DSon}}{R_{pot}}}}{1-1+\sqrt{\frac{R_{DSon}}{R_{pot}}}}} = \\
= \frac{U_{ul}}{\sqrt{\frac{R_{DSon}}{R_{pot}} \cdot \left(2 - \sqrt{\frac{R_{DSon}}{R_{pot}}}\right)}} = \frac{24}{\sqrt{0,2} \cdot \left(2 - \sqrt{\frac{0,2}{10}}\right)} = 91,309[V]
\end{aligned}$$

#### Zadatak 14.

Boost pretvarač na slici služi za stabilizaciju napona  $90 [V] < U_{ul} < 120 [V]$  na vrednost  $U_{iz} = 150 [V]$ . Proračunati induktivnost prigušnice  $L$  tako da pretvarač radi na granici kontinualnog režima pri  $I_{iz} = 1 [A]$  i kritičnoj vrednosti ulaznog napona! Poznato je  $f_s = 100 [kHz]$ .



Rešenje:

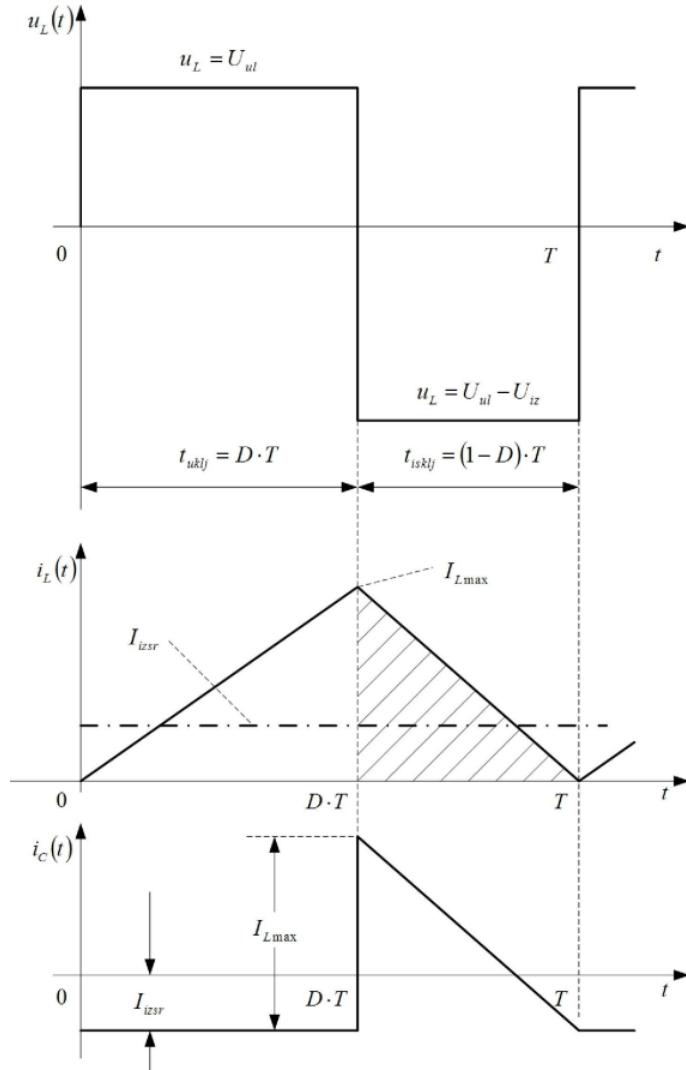
$$\begin{aligned}
\int_0^T u_L(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow \\
U_{ul} \cdot D \cdot T + (U_{ul} - U_{iz}) \cdot (1-D) \cdot T = 0 \quad /: T \Rightarrow \\
U_{ul} \cdot D + U_{ul} \cdot (1-D) - U_{iz} \cdot (1-D) = 0 \Rightarrow \\
U_{ul} = U_{iz} \cdot (1-D) \Rightarrow D = 1 - \frac{U_{ul}}{U_{iz}}
\end{aligned}$$

Granice:

$$\begin{aligned}
D_{\max} &= 1 - \frac{U_{ul\ min}}{U_{iz}} = 1 - \frac{90}{150} = 1 - \frac{3}{5} = \frac{2}{5} = 0,4[ ] \\
D_{\min} &= 1 - \frac{U_{ul\ max}}{U_{iz}} = 1 - \frac{120}{150} = 1 - \frac{4}{5} = \frac{1}{5} = 0,2[ ] \\
I_{L\ max} &= \frac{U_{ul} \cdot D \cdot T}{L} \Rightarrow I_{izsr} = \frac{I_{L\ max} \cdot (1-D)}{2} \Rightarrow
\end{aligned}$$

$$I_{L_{\max}} = \frac{2 \cdot I_{izsr} \cdot D \cdot T}{(1-D) \cdot T} = \frac{U_{ul} \cdot D \cdot T}{L} = \frac{U_{iz} \cdot (1-D) \cdot D \cdot T}{L} \Rightarrow I_{izsr} = \frac{U_{iz} \cdot D \cdot (1-D)^2 \cdot T}{2 \cdot L} \Rightarrow$$

$$L = \frac{U_{iz} \cdot D \cdot (1-D)^2 \cdot T}{2 \cdot I_{izsr} \cdot f_s} = \frac{U_{iz} \cdot D \cdot (1-D)^2}{2 \cdot I_{izsr} \cdot f_s}$$



Za  $D_{\min}$  važí:

$$L_{kr1} = \frac{U_{iz} \cdot D_{\min} \cdot (1-D_{\min})^2}{2 \cdot I_{izsr} \cdot f_s} = \frac{150 \cdot 0,2 \cdot (1-0,2)^2}{2 \cdot 1 \cdot 100 \cdot 10^3} = 96 \cdot 10^{-6} = 96[\mu H]$$

Za  $D_{\max}$  važí:

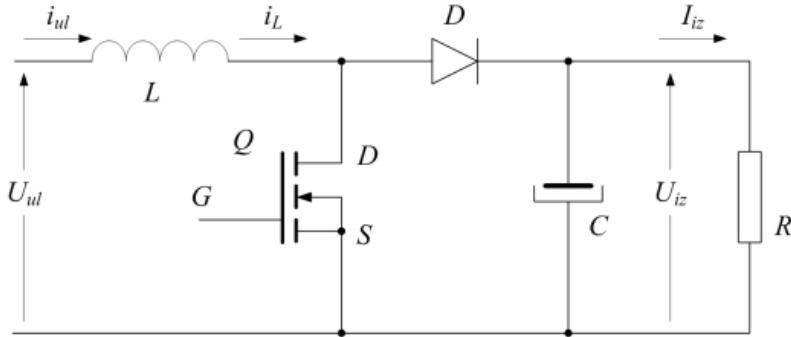
$$L_{kr2} = \frac{U_{iz} \cdot D_{\max} \cdot (1-D_{\max})^2}{2 \cdot I_{izsr} \cdot f_s} = \frac{150 \cdot 0,4 \cdot (1-0,4)^2}{2 \cdot 1 \cdot 100 \cdot 10^3} = 108 \cdot 10^{-6} = 108[\mu H]$$

Pa sledi:

$$L \geq L_{kr2} = 108[\mu H] > L_{kr1} = 96[\mu H]$$

### Zadatak 15.

Boost pretvarač sa  $U_{ul} = 12 \text{ [V]}$ ,  $U_{iz} = 24 \text{ [V]}$ ,  $I_{iz} = 5 \text{ [A]}$  radi uz malu talasnost struje prigušnice. Otpornost kanala MOSFET-a je  $R_{DSon} = 100 \text{ [m}\Omega\text{]}$ , pad napona na diodi u provodnom stanju je  $U_D = 1 \text{ [V]}$ . Proračunati potreban faktor ispune i srednje snage gubitaka na MOSFET-u i na diodi! Ostale gubitke treba zanemariti.



Rešenje:

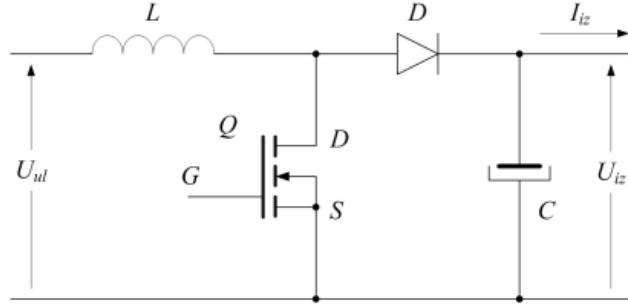
$$\begin{aligned}
 & (U_{ul} - U_{DS}) \cdot D \cdot T + (U_{ul} - U_{iz} - U_D) \cdot (1 - D) \cdot T = 0 \wedge U_{DS} = R_{DS} \cdot I_L \wedge I_L \cdot (1 - D) \cdot T = I_{iz} \cdot T \Rightarrow \\
 & \left( U_{ul} - R_{DS} \cdot \frac{I_{iz}}{1 - D} \right) \cdot D + (U_{ul} - U_{iz} - U_D) \cdot (1 - D) = 0 \Rightarrow \\
 & -R_{DS} \cdot \frac{I_{iz}}{1 - D} \cdot D + (U_{ul} - U_{iz} - U_D) + (U_{iz} + U_D) \cdot D = 0 \Rightarrow \\
 & -0,1 \cdot \frac{5}{1 - D} \cdot D + (12 - 24 - 1) + (24 + 1) \cdot D = 0 \Rightarrow D^2 - 1,5 \cdot D + 0,52 = 0 \Rightarrow \\
 & D_{1/2} = \frac{1,5 \pm \sqrt{1,5^2 - 4 \cdot 0,52}}{2} = 0,95615 \quad \wedge \quad 0,54384
 \end{aligned}$$

$$P_{gQ} = D \cdot R_{DS} \cdot I_L^2 = D \cdot R_{DS} \cdot \left( \frac{I_{iz}}{1 - D} \right)^2 = 0,54384 \cdot 0,1 \cdot \left( \frac{5}{1 - 0,54384} \right)^2 = 6,5339 \text{ [W]}$$

$$P_{gD} = (1 - D) \cdot U_D \cdot I_L = (1 - D) \cdot U_D \cdot \left( \frac{I_{iz}}{1 - D} \right) = U_D \cdot I_{iz} = 1 \cdot 5 = 5 \text{ [W]}$$

### Zadatak 16.

Boost pretvarač radi u diskontinualnom režimu. Ulazni napon je  $U_{ul} = 5 [V]$ , a izlazni napon  $U_{iz} = 15 [V]$  se održava konstantnim na promenom učestanosti prekidanja  $f_s$  za promenu opterećenja  $I_{iz}$  od  $20 [mA]$  do  $100 [mA]$ . Pretvaračem se upravlja tako što je prekidač uključen dok struja kalema  $L = 20 [\mu H]$  ne dostigne  $I_{Lmax} = 1 [A]$ , nakon čega se prekidač isključuje i ostaje isključen sve do narednog uključenja koje inicira regulator izlaznog napona. Odrediti opseg promene učestanosti za koju pretvarač radi u diskontinualnom režimu!



Rešenje:

$$t_{on} = \frac{I_{Lmax} \cdot L}{U_{ul}} = \frac{1 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{5} = 4 \cdot 10^{-6} [s] = 4 [\mu s] \Rightarrow$$

$$t_{off min} = t_\delta = -\frac{I_{Lmax} \cdot L}{U_{ul} - U_{iz}} = -\frac{1 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{5 - 15} = 2 \cdot 10^{-6} [s] = 2 [\mu s] \Rightarrow$$

$$T_{s min} = t_{on} + t_\delta = 4 + 2 = 6 [\mu s] \Rightarrow$$

$$I_{iz max} = \frac{1}{2} \cdot I_{Lmax} \cdot \frac{t_\delta}{T_{s min}} = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \frac{2}{6} = \frac{1}{6} [A] > \frac{1}{10} [A] > \frac{1}{50} [A] \Rightarrow$$

$$\int_0^T i_C(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{I_{Lmax} \cdot t_\delta}{2} - I_{iz} \cdot T_s = 0 \Rightarrow f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{2 \cdot I_{iz}}{I_{Lmax} \cdot t_\delta} \Rightarrow$$

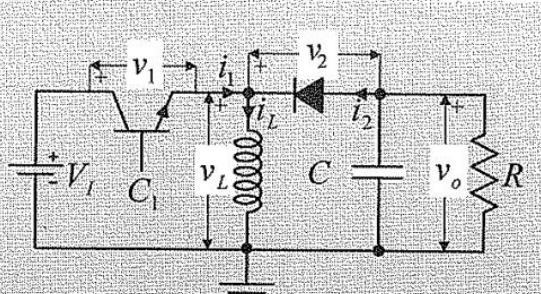
$$f_{s max} = \frac{2 \cdot I_{iz max}}{I_{Lmax} \cdot t_\delta} = \frac{2 \cdot \frac{1}{6}}{1 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 100 \cdot 10^3 [Hz] = 100 [kHz]$$

$$f_{s min} = \frac{2 \cdot I_{iz min}}{I_{Lmax} \cdot t_\delta} = \frac{2 \cdot \frac{1}{50}}{1 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 20 \cdot 10^3 [Hz] = 20 [kHz]$$

## BUCK – BOOST pretvarač

### Zadatak 17.

- Za indirektni (buck-boost) pretvarač sa slike 4.9.1:
- Izvesti izraz za  $V_o/V_I$  u funkciji odnosa impuls-periода  $D$  u kontinualnom režimu rada.
  - Nacrtati vremenske dijagrame napona i struja na tranzistoru, prigušnici i diodi.
  - Izvesti izraz za  $V_o/V_I$  u diskontinualnom režimu rada.
  - Ponoviti tačku b) za diskontinualni režim.



Slika 4.9.1. Šema indirektnog DC/DC pretvarača.

a) U slučaju da je  $D < 1/2$ , sledi da je  $V_o < V_I$ , dok se u slučaju kada je  $D > 1/2$ , dobija da je  $V_o > V_I$ . U kontinualnom režimu rada dijagrami obeleženih napona i struja su prikazani na slici 4.9.2.

Za interval vremena između  $0 < t < DT_s$ , kada tranzistor T vodi, dobija se:

$i_1 = i_L$ ,  $v_1 = 0$ ,  $i_2 = 0$ ,  $v_2 = V_I + V_o$ ,  $v_L = V_I$ . U ovom intervalu vremena ulazni naponski izvor predaje energiju kalemu.

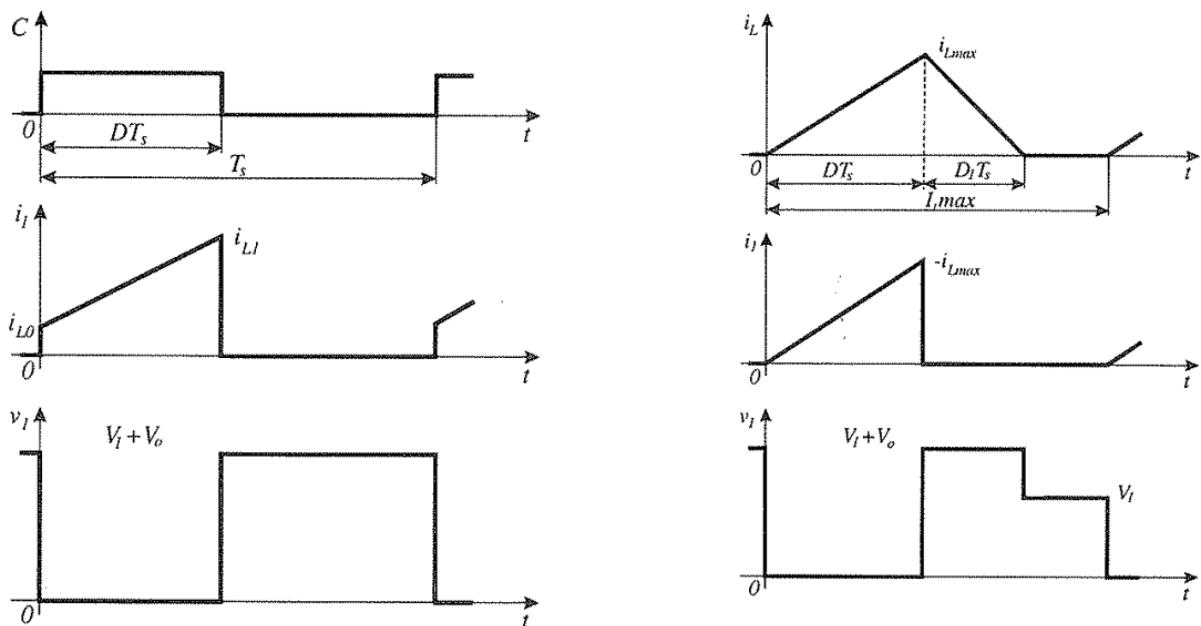
U intervalu  $DT_s < t < T_s$ , vodi dioda D, kalem predaje energiju opterećenju, pa sledi da je:

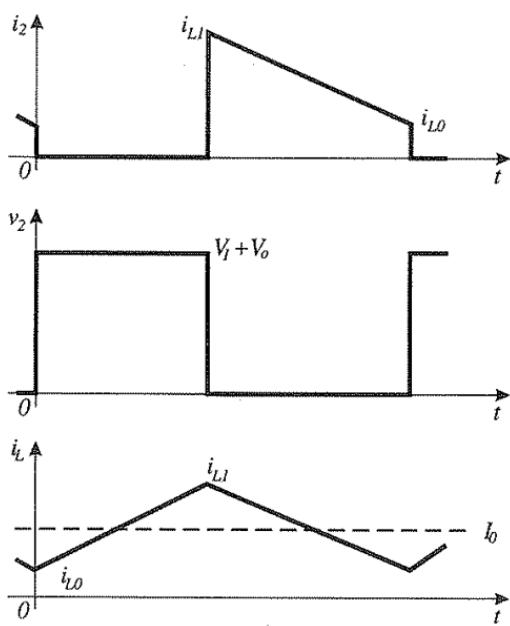
$$i_1 = 0, \quad v_1 = V_I + V_o, \quad i_2 = i_L, \quad v_2 = 0, \quad v_L = -V_o.$$

Na osnovu uslova da je srednja vrednost napona na kalemu jednaka nuli, sledi da je:

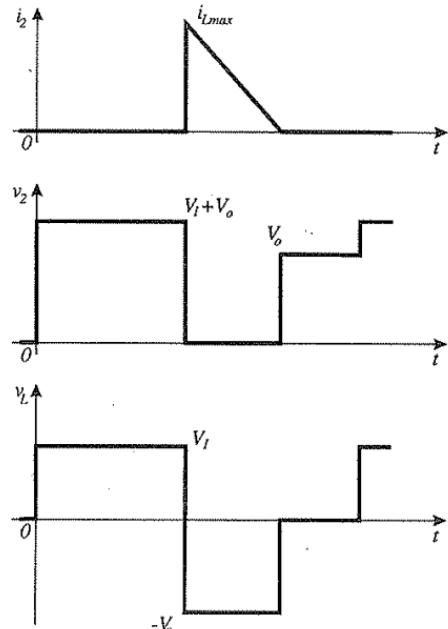
$$\bar{v}_L = 0 \Rightarrow V_I DT_s - V_o (1-D)T_s = 0 \Rightarrow \frac{V_o}{V_I} = \frac{D}{1-D}, \quad \frac{I_o}{I_I} = \frac{1-D}{D} \quad (P_o = P_I)$$

b) Vremenski dijagrami napona i struja na tranzistoru, diodi i prigušnici dati su na slici 4.9.2 (a).





(a)



(b)

Slika 4.9.2. Talasni oblici obeleženih napona i struja buck-boost pretvarača za kontinualni (a) i diskontinualni režim rada (b).

c) Za diskontinualni režim rada se može pisati:

$$\begin{aligned}
 & (D + D_1)T_s < t < T_s, \quad i_L = 0, \quad i_2 = 0, \\
 & i_1 = 0, \quad v_L = 0, \quad v_2 = V_o, \quad v_1 = V_I, \\
 & v_L = 0 \Rightarrow V_I DT_s - V_o D_1 T_s = 0 \Rightarrow \\
 & \frac{V_o}{V_I} = \frac{D}{D_1} \Rightarrow D_1 = D \frac{V_I}{V_o}; \\
 & \bar{i}_1 = I_I, \quad \bar{i}_2 = I_O, \\
 & I_O = \bar{i}_2 = \frac{1}{2} i_{L\max} D_1 \Rightarrow i_{L\max} = \frac{V_o}{L} D_1 T_s \Rightarrow \\
 & I_O = \frac{V_o T_s}{2L} D_1^2 = \frac{V_o T_s}{2L} D^2 \frac{V_I^2}{V_o^2} = \frac{V_o}{R} \Rightarrow \\
 & \left( \frac{V_o}{V_I} \right)^2 = \frac{RT_s}{2L} D^2 = \frac{D^2}{k}, \quad k = \frac{2L}{RT_s}, \\
 & \frac{V_o}{V_I} = \frac{D}{\sqrt{k}}.
 \end{aligned}$$

Uslov rada u kontinualnom režimu se dobija iz granične vrednosti za parametar  $D_1$ , koja iznosi  $D_1=1-D$ , što se svodi na uslov:

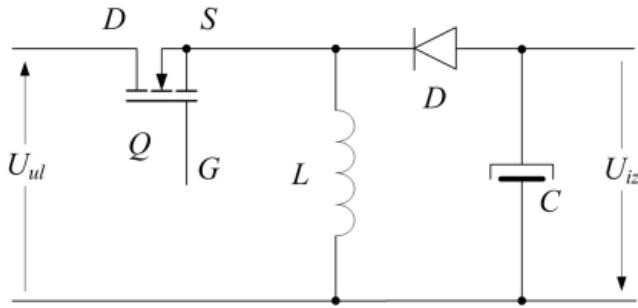
$$k = D^2 \left( \frac{V_I}{V_o} \right)^2 \Rightarrow k_B = D^2 \frac{(1-D)^2}{D^2}, \text{ gde je } k_B = (1-D)^2.$$

Za  $k > k_B$  pretvarač se nalazi u kontinualnom režimu rada i  $D_1 > 1-D$ . Za  $k < k_B$  pretvarač je u diskontinualnom režimu rada i  $D_1 < 1-D$ .

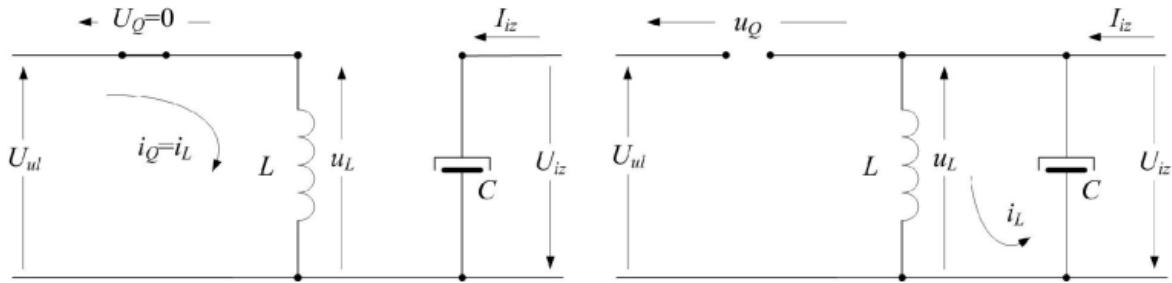
d) Vremenski dijagrami napona i struja na tranzistoru, diodi i prigušnici za diskontinualni režim dati su na slici 4.9.2 (b).

### Zadatak 18.

*Buck-boost* pretvarač radi na granici prekidnog i neprekidnog režima uz faktor ispune  $D = 0,6$ , ulazni napon od  $U_{ul} = 300 [V]$  i izlaznu snagu od  $P_{iz} = 200 [W]$ . Nacrtati vremenski dijagram napona i struje prekidača i izračunati stepen iskorišćenja prekidača  $\kappa$ !



Rešenje:

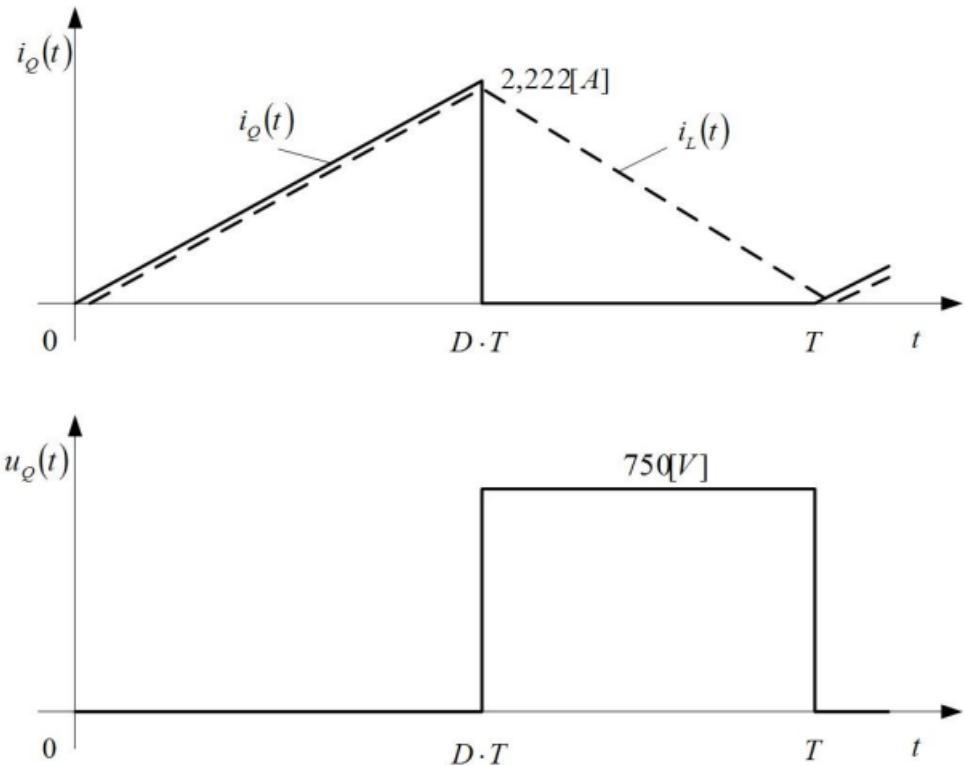


$$\begin{aligned} \int_0^T u_L(t) dt &= 0 \Rightarrow \\ U_{ul} \cdot D \cdot T - U_{iz} \cdot (1-D) \cdot T &= 0 \quad /:T \Rightarrow \\ U_{ul} \cdot D - U_{iz} \cdot (1-D) &= 0 \Rightarrow \\ U_{iz} &= \frac{D \cdot U_{ul}}{1-D} = \frac{0,6 \cdot 300}{1-0,6} = \frac{0,6 \cdot 300}{0,4} = 450[V] \\ I_{iz} &= \frac{P_{iz}}{U_{iz}} = \frac{200}{450} = \frac{4}{9} = 0,444[A] \end{aligned}$$

Na granici prekidnog i neprekidnog režima važi:

$$\begin{aligned} I_{ulsr} &= D \cdot \frac{I_{L_{\max}}}{2} \Rightarrow \\ P_{ul} &= P_{iz} \Rightarrow P_{iz} = U_{ul} \cdot I_{ulsr} = U_{ul} \cdot D \cdot \frac{I_{L_{\max}}}{2} \Rightarrow \\ I_{L_{\max}} &= \frac{2 \cdot P_{iz}}{U_{ul} \cdot D} = \frac{2 \cdot 200}{300 \cdot 0,6} = \frac{2}{0,9} = 2,222[A] \end{aligned}$$

pa iz izračunatih vrednosti slede vremenski dijagrami promene vrednosti struje i napona prekidača tokom periode  $T$ :



$$I_Q \geq I_{L_{\max}} = 2,222[A]$$

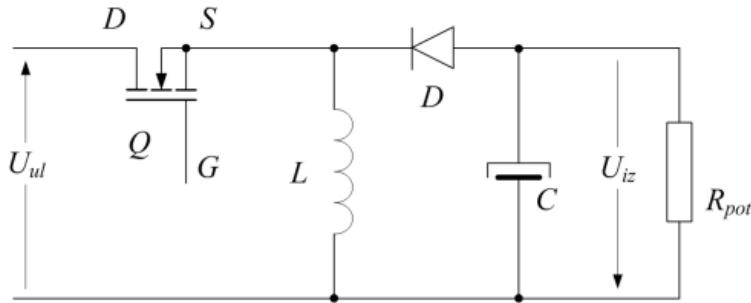
$$U_Q \geq U_{ul} + U_{iz} = 300 + 450 = 750[V]$$

Stepen iskorišćenja prekidača je prema tome:

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{P_{iz}}{I_Q \cdot U_Q} = \frac{P_{iz}}{\frac{2 \cdot P_{iz}}{U_{ul} \cdot D} \cdot (U_{ul} + U_{iz})} = \frac{U_{ul} \cdot D}{2 \cdot (U_{ul} + U_{iz})} = \frac{U_{ul} \cdot D}{2 \cdot \left( U_{ul} + \frac{D \cdot U_{ul}}{1-D} \right)} = \frac{D \cdot (1-D)}{2} = \\ &= \frac{0,6 \cdot (1-0,6)}{2} = 0,12[ ] \end{aligned}$$

### Zadatak 19.

*Buck-boost* pretvarač radi u diskontinualnom režimu. Ulazni napon je  $U_{ul} = 10 [V]$ , a izlazni napon  $U_{iz} = 10 [V]$  se održava konstantnim promenom učestanosti prekidanja  $f_s$  za promenu opterećenja  $I_{iz}$  od 20 [mA] do 100 [mA]. Pretvaračem se upravlja tako što je prekidač uključen dok struja kalema  $L = 20 [\mu H]$  ne dostigne  $I_{Lmax} = 1 [A]$ , nakon čega se prekidač isključuje i ostaje isključen sve do narednog uključenja koje inicira regulator izlaznog napona. Odrediti opseg promene učestanosti za koju pretvarač radi u diskontinualnom režimu!



#### Rešenje:

Vreme uključenja u diskontinualnom režimu je jednako vremenu uspona struje kalema od nulte do maksimalne vrednosti, te je:

$$t_{on} = \frac{I_{Lmax} \cdot L}{U_{ul}} = \frac{1 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{10} = 2 \cdot 10^{-6} [s] = 2 [\mu s]$$

Granica diskontinualnog režima se postiže sa vremenom isključenja jednakim vremenu pada struje kalema od maksimalne do nulte vrednosti, te važi:

$$t_{off min} = t_\delta = -\frac{I_{Lmax} \cdot L}{-U_{iz}} = -\frac{1 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{-10} = 2 \cdot 10^{-6} [s] = 2 [\mu s]$$

Minimalno vreme trajanja periode je prema tome:

$$T_{s min} = t_{on} + t_{off min} = t_{on} + t_\delta = 2 + 2 = 4 [\mu s]$$

Maksimalna učestanost rada na granici prekidnog i neprekidnog režima je:

$$f_{s max prek} = \frac{1}{T_{s min}} = \frac{1}{4 \cdot 10^{-6}} = 250 \cdot 10^3 [Hz] = 250 [kHz]$$

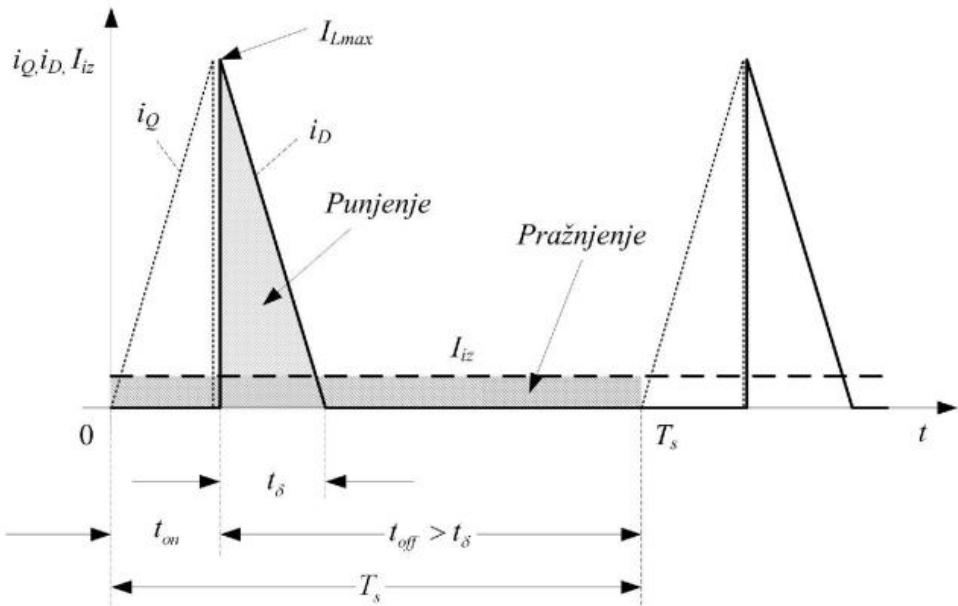
Maksimalna moguća vrednost izlazne jednosmerne struje pri minimalnom vremenu trajanja isključenja na granici prekidnog i neprekidnog režima iznosi:

$$I_{iz max prek} = \frac{1}{2} \cdot I_{Lmax} \cdot \frac{t_\delta}{T_{s min}} = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \frac{2}{4} = \frac{1}{4} [A]$$

Maksimalna moguća vrednost izlazne struje je veća od graničnih vrednosti struja opterećenja:

$$I_{iz max prek} = \frac{1}{4} [A] > \frac{1}{10} [A] > \frac{1}{50} [A]$$

što znači da se traženi opseg promene učestanosti za koju pretvarač radi u diskontinualnom režimu pri zadatoj promeni opterećenja, može odrediti na osnovu uslova da u ustaljenom stanju važi:



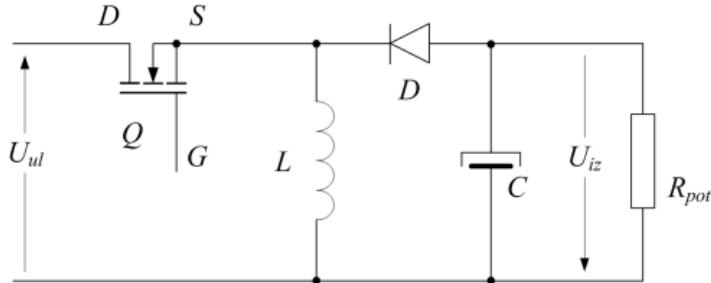
$$\begin{aligned} \int_0^{T_s} i_C(t) \cdot dt &= 0 \Rightarrow \\ \frac{I_{L\max} \cdot t_\delta}{2} - I_{Lz} \cdot T_s &= 0 \Rightarrow \\ T_s &= \frac{1}{f_s} = \frac{I_{L\max} \cdot t_\delta}{2 \cdot I_{Lz}} \end{aligned}$$

Odnosno:

$$\begin{aligned} f_{s\max} &= \frac{1}{T_{s\min}} = \frac{2 \cdot I_{Lz\max}}{I_{L\max} \cdot t_\delta} = \frac{2 \cdot \frac{1}{10}}{1 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 100 \cdot 10^3 [Hz] = 100 [kHz] \\ f_{s\min} &= \frac{1}{T_{s\max}} = \frac{2 \cdot I_{Lz\min}}{I_{L\max} \cdot t_\delta} = \frac{2 \cdot \frac{50}{50}}{1 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 20 \cdot 10^3 [Hz] = 20 [kHz] \end{aligned}$$

### Zadatak 20.

Za buck-boost pretvarač je poznato:  $U_{ul} = 12 [V]$ ,  $D = 0,6$ ,  $R_{pot} = 5 [\Omega]$ ,  $f_s = 20 [kHz]$ . Gubici se mogu zanemariti. Smatrati da je kapacitivnost kondenzatora velika. Proračunati induktivnost kalemu tako da pretvarač radi na granici između kontinualnog i diskontinualnog režima!



Rešenje:

$$\int_0^T u_L(t) dt = 0 \Rightarrow \\ U_{ul} \cdot D \cdot T - U_{iz} \cdot (1-D) \cdot T = 0 \quad /: T \Rightarrow$$

$$U_{ul} \cdot D - U_{iz} \cdot (1-D) = 0 \Rightarrow \\ U_{iz} = U_{ul} \cdot \frac{D}{1-D} = 12 \cdot \frac{0,6}{1-0,6} = 12 \cdot \frac{0,6}{0,4} = 18[V] \Rightarrow$$

$$I_{iz} = \frac{U_{iz}}{R_{pot}} = \frac{18}{5} = 3,6[\Omega]$$

$$\int_0^T i_C(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{1}{2} \cdot I_{L\max} \cdot (1-D) \cdot T - I_{iz} \cdot T = 0 \Rightarrow$$

$$I_{L\max} = \frac{2 \cdot I_{iz}}{1-D} = \frac{2 \cdot 3,6}{1-0,6} = \frac{2 \cdot 3,6}{0,4} = 18[A] \Rightarrow$$

$$U_{ul} = u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} = L \cdot \frac{I_{L\max}}{D \cdot T} \Rightarrow$$

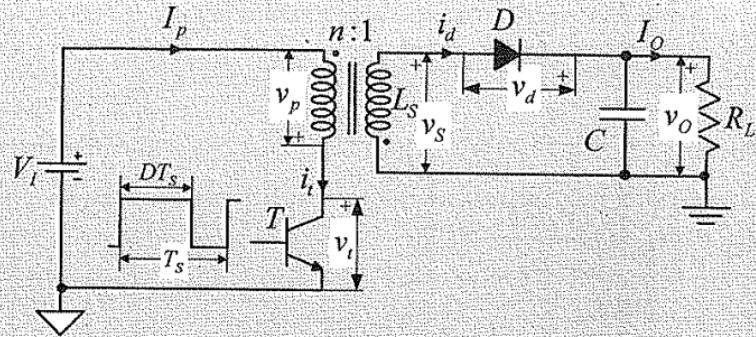
$$L = \frac{D \cdot T \cdot U_{ul}}{I_{L\max}} = \frac{D \cdot U_{ul}}{f_s \cdot I_{L\max}} = \frac{0,6 \cdot 12}{20 \cdot 10^3 \cdot 18} = 20 \cdot 10^{-6} [H] = 20[\mu H]$$

## FLYBACK pretvarač

### Zadatak 21.

Za indirektni (flyback) pretvarač sa galvanskom izolacijom sa slike 4.22.1 i odnosom transformacije primar sekundar  $n:1$  (transformator je savršen i sve komponente su idealne):

- Izvesti izraz za  $V_o/V_i$  u funkciji odnosa impuls-periода  $D$ , u kontinualnom režimu rada.
- Izračunati napone i struje na tranzistoru i diodi.
- Izvesti izraz za  $V_o/V_i$  u diskontinualnom režimu rada.
- Nacrtati vremenske dijagrame napona i struja na tranzistoru i diodi.



Slika 4.22.1. Indirektni (flyback) pretvarač sa galvanskom izolacijom.

a) Magnetizacija transformatora se vrši sa primarne, a demagnetizacija sa sekundarne strane. Vazdušni zazor u jezgru transformatora je obavezan. Važi:  $v_s = v_p/n$  (uvek),  $i_d = ni$ , (samo u trenucima prekidanja). Takođe je:

$$V_i DT_s = nV_o (1-D)T_s \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{n(1-D)}.$$

b)

$$I_i = \bar{i}_d = \frac{I_{d1} + I_{d0}}{2} (1-D) = \frac{V_o}{R_L}, \quad I_{d1} + I_{d0} = \frac{2V_o}{R_L(1-D)};$$

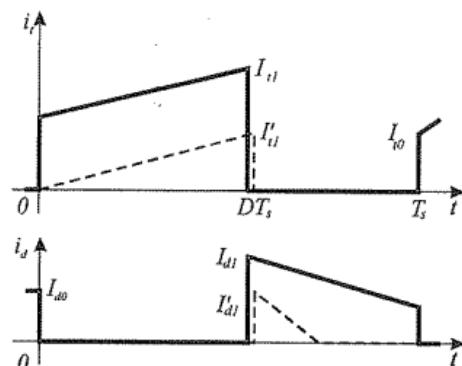
$$I_{d1} - I_{d0} = \frac{V_o (1-D) T_s}{L_s} = \frac{V_o (1-D) T_s n^2}{L_p} \Rightarrow$$

$$I_{d1} = \frac{V_o}{R_L(1-D)} + \frac{n^2 V_o (1-D) T_s}{2 L_p},$$

$$I_{d0} = \frac{V_o}{R_L(1-D)} - \frac{n^2 V_o (1-D) T_s}{2 L_p};$$

$$(analogni): \quad I_{i1} = \frac{V_o}{n R_L (1-D)} + \frac{V_i DT_s}{L_p},$$

$$I_{i0} = \frac{V_o}{n R_L (1-D)} - \frac{V_i DT_s}{L_p}.$$



Pri ovome važi da je:  $I_d = I_{d1}/n$ ;  $I_o = I_{o1}/n$ .  
 c), d)

$$V_I DT_S = n V_o D_1 T_S \Rightarrow \frac{V_o}{V_I} = \frac{D}{n D_1};$$

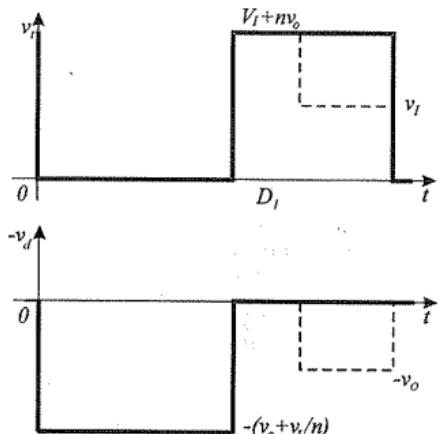
$$I_o = \frac{V_o}{R_L} = \frac{I_{d1} D_1}{2}, \quad D_1 = \frac{2 V_o}{R_L I_{d1}},$$

$$I_{d1} = n I_{d1} = n \frac{V_I DT_S}{L_p} \Rightarrow$$

$$D_1 = \frac{2 V_o L_p}{n R_L V_I D T_S}, \quad L_p = n^2 L_s \Rightarrow$$

$$\frac{V_o^2}{V_I^2} = \frac{D^2 R_L T_S}{2 n^2 L_s};$$

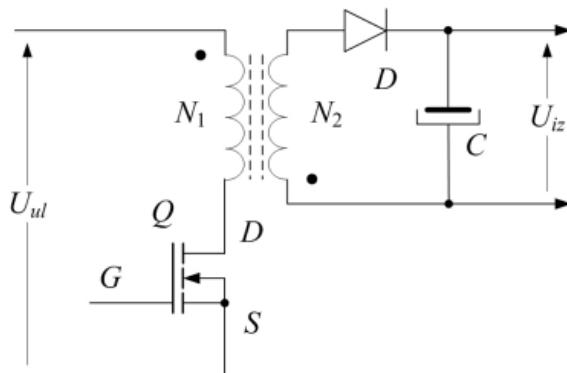
$$k = \frac{2 L_s}{R_L T_S} \Rightarrow \frac{V_o}{V_I} = \frac{D}{n \sqrt{k}}.$$



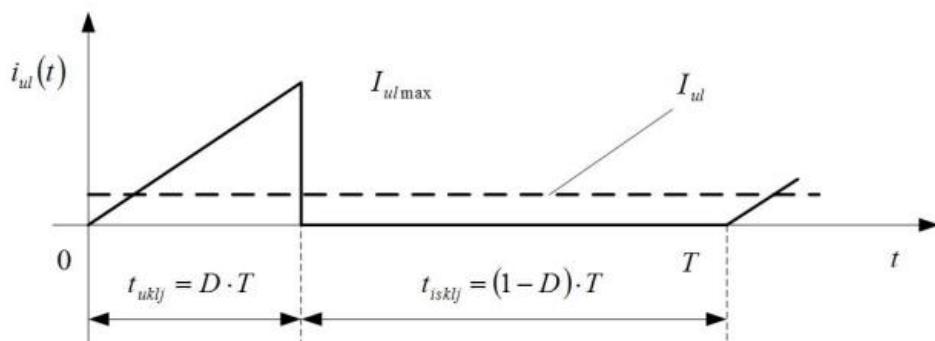
Slika 4.22.2. Vremenski dijagrami napona i struja na tranzistoru i sekundarnoj ispravljačkoj diodi:  
 — kontinualni režim, - - - diskontinualni režim

### Zadatak 22.

Flyback pretvarač radi na granici prekidnog i neprekidnog režima pri ulaznom naponu od  $U_{ul} = 250$  [V] uz faktor ispune  $D = 0,3$  i pri tome iz izvora preuzima snagu od  $P_{ul} = 100$  [W]. Proračunati srednju snagu statičkih gubitaka na prekidačkom MOSFET-u  $P_Q$ , ako je otpornost kanala  $R_{DSon} = 3$  [ $\Omega$ ]!



Rešenje:



Maksimalna vrednost ulazne struje  $I_{ul\max}$  za granicu prekidnog i neprekidnog režima određuje se iz izraza za preuzetu snagu iz izvora za napajanje:

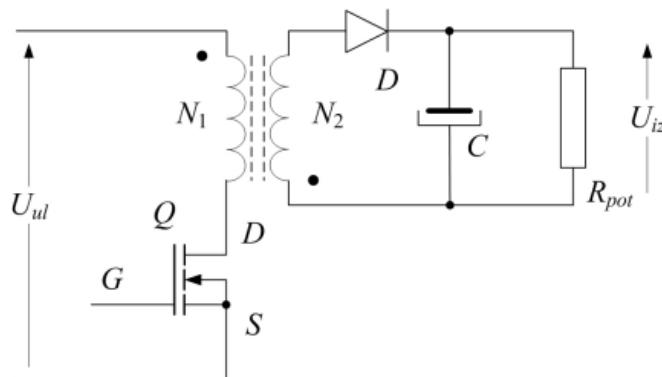
$$\begin{aligned}
 P_{ul} &= \overline{p_{ul}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_{ul} \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{DT} U_{ul} \cdot i_{ul}(t) \cdot dt = \frac{U_{ul}}{T} \cdot \int_0^{DT} \frac{I_{ul\max}}{D \cdot T} \cdot t \cdot dt = \\
 &= \frac{U_{ul}}{T} \cdot \frac{I_{ul\max}}{D \cdot T} \cdot \frac{t^2}{2} \Big|_0^{DT} = \frac{U_{ul}}{T} \cdot \frac{I_{ul\max}}{D \cdot T} \cdot \frac{1}{2} \cdot [(D \cdot T)^2 - 0^2] = \frac{1}{2} \cdot D \cdot U_{ul} \cdot I_{ul\max} \Rightarrow \\
 I_{ul\max} &= \frac{2 \cdot P_{ul}}{D \cdot U_{ul}} = \frac{2 \cdot 100}{0,3 \cdot 250} = 2,666 \cdot [A]
 \end{aligned}$$

Srednja snaga statičkih gubitaka na prekidačkom MOSFET-u  $P_Q$  nalazi se dalje iz izraza:

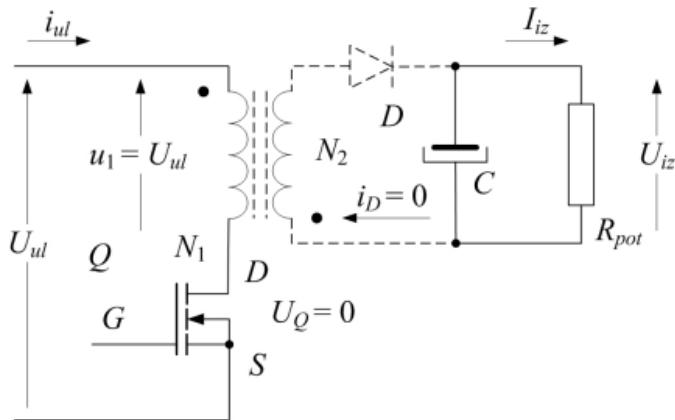
$$\begin{aligned}
 P_Q &= \overline{p_Q} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_Q \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T R_{DSon} \cdot [i_{ul}(t)]^2 \cdot dt = \frac{R_{DSon}}{T} \cdot \int_0^{DT} \left[ \frac{I_{ul\max}}{D \cdot T} \cdot t \right]^2 \cdot dt = \\
 &= \frac{R_{DSon}}{T} \cdot \left[ \frac{I_{ul\max}}{D \cdot T} \right]^2 \cdot \frac{t^3}{3} \Big|_0^{DT} = \frac{R_{DSon}}{T} \cdot \left[ \frac{I_{ul\max}}{D \cdot T} \right]^2 \cdot \frac{1}{3} \cdot [(D \cdot T)^3 - 0^3] = \frac{1}{3} \cdot D \cdot R_{DSon} \cdot I_{ul\max}^2 = \\
 &= \frac{1}{3} \cdot 0,3 \cdot 3 \cdot 2,666^2 = 2,133 \cdot [W]
 \end{aligned}$$

### Zadatak 23.

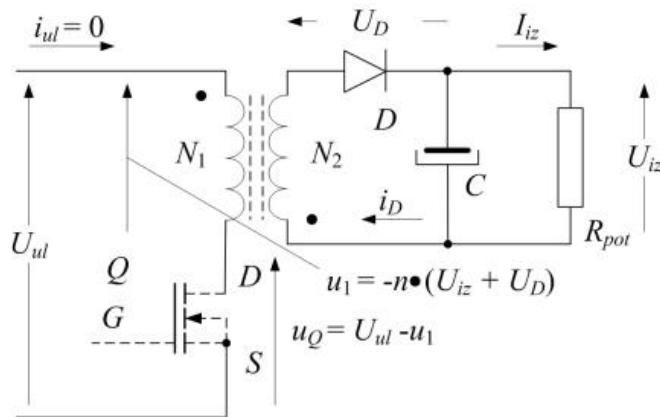
*Flyback* pretvarač na slici radi u neprekidnom režimu. Ulazni napon se menja u opsegu od od  $U_{ul\min} = 20 \text{ [V]}$  do  $U_{ul\max} = 30 \text{ [V]}$ . Proračunati prenosni odnos transformatora  $N_1 / N_2$  sa kojim se može ostvariti vrednost izlaznog napona od  $U_{iz} = 5 \text{ [V]}$ ! Pri proračunu uzeti u obzir da je pad napona na diodi u propusnom smeru  $U_D = 1 \text{ [V]}$ . Proračunati u kom opsegu se menja stepen iskorišćenja prekidača  $\kappa$ ! Usvojiti  $D_{max} = 0,5$ !



**Rešenje:**

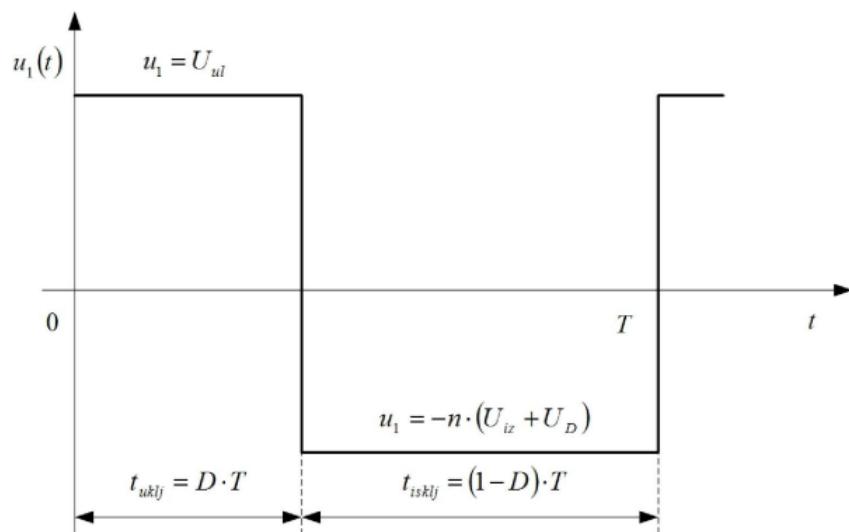


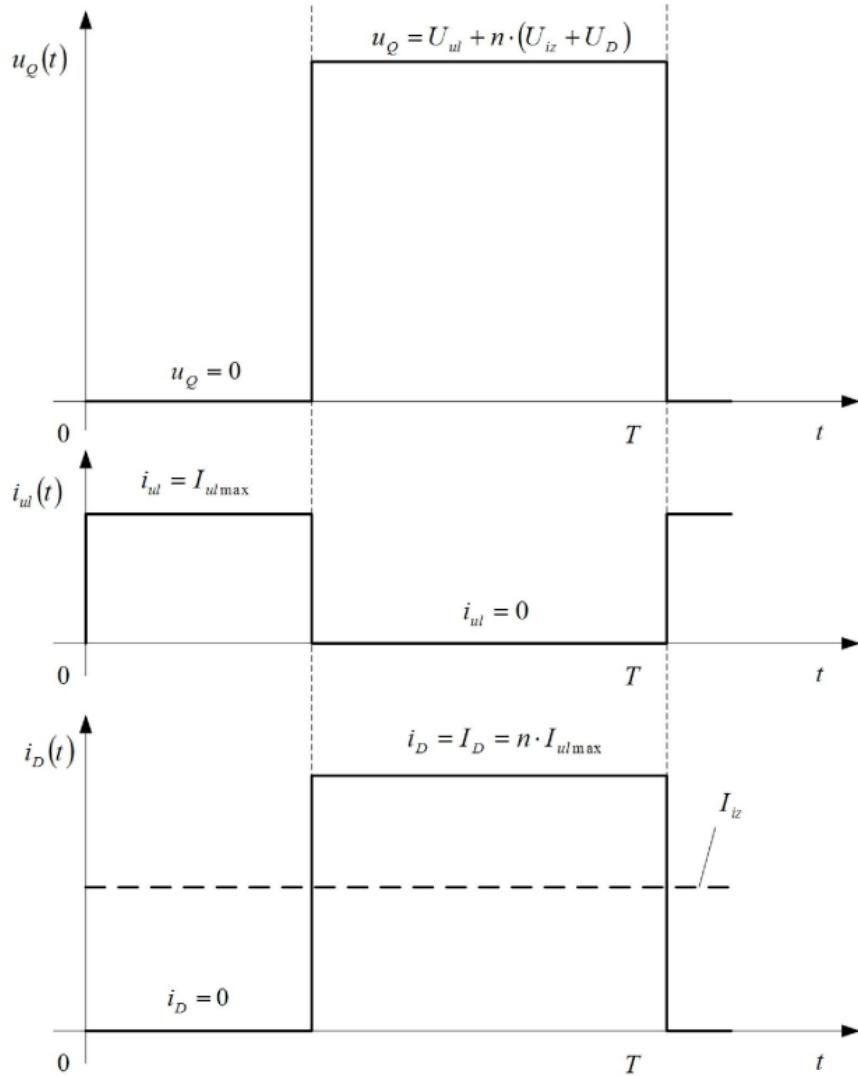
$$u_1 = U_{ul} \quad 0 \leq t < D \cdot T$$



$$\begin{aligned} u_1 &= -n \cdot u_2 = -n \cdot (U_{iz} + U_D) = -\frac{N_1}{N_2} \cdot (U_{iz} + U_D) \\ u_Q &= U_{ul} - u_1 = U_{ul} + \frac{N_1}{N_2} \cdot (U_{iz} + U_D) \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} D \cdot T \leq t < T$$

Iz ekvivalentnih šema pretvarača za intervale vođenja i zakočenja tranzistora, sledi dijagram promene vrednosti napona  $u_1$  tokom periode  $T$ :





Srednja vrednost napona  $u_1$  u stacionarnom stanju je jednaka nuli, te slede relacije:

$$\int_0^T u_1(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow \\ U_{ul} \cdot D \cdot T = n \cdot (U_{iz} + U_D) \cdot (1 - D) \cdot T \Rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{ul} \cdot D}{(U_{iz} + U_D) \cdot (1 - D)} \Rightarrow$$

Maksimalna vrednost faktora ispune  $D_{max}$  nastaje pri minimalnoj vrednosti ulaznog napona  $U_{ulmin}$  te se traženi prenosni odnos transformatora  $N_1 / N_2$  nalazi iz relacije:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{ulmin} \cdot D_{max}}{(U_{iz} + U_D) \cdot (1 - D_{max})} = \frac{20 \cdot 0,5}{(5+1) \cdot (1 - 0,5)} = \frac{10}{3} = 3,333 \cdot [ ]$$

Pri maksimalnoj vrednosti ulaznog napona  $U_{ulmax}$  nastaje minimalna vrednost faktora ispune  $D_{min}$ :

$$D = \frac{\frac{N_1}{N_2} \cdot (U_{iz} + U_D)}{U_{ul} + \frac{N_1}{N_2} \cdot (U_{iz} + U_D)} = \frac{1}{1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{U_{ul}}{(U_{iz} + U_D)}} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
D_{\min} &= \frac{1}{1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{U_{ul\max}}{(U_{iz} + U_D)}} = \frac{1}{1 + \frac{(U_{iz} + U_D) \cdot (1 - D_{\max})}{U_{ul\min} \cdot D_{\max}} \cdot \frac{U_{ul\max}}{(U_{iz} + U_D)}} = \\
&= \frac{1}{1 + \frac{(1 - 0,5)}{0,5} \cdot \frac{30}{20}} = \frac{2}{2+3} = \frac{2}{5} = 0,4 [ ]
\end{aligned}$$

Probojni napon tranzistora  $U_{Qmax}$  mora biti veći od maksimalnog napona na njemu koji nastaje u fazi njegovog zakočenja:

$$U_{Qmax} \geq U_{ul\max} + \frac{N_1}{N_2} \cdot (U_{iz} + U_D) = 30 + \frac{10}{3} \cdot (5+1) = 50 [V]$$

Maksimalna vrednost struje tranzistora  $I_{Qmax}$  nalazi se iz sledećih relacija:

$$\begin{aligned}
P_{ul} &= P_{iz} + P_D \Rightarrow D \cdot U_{ul} \cdot I_{ul\max} = U_{iz} \cdot I_{iz} + (1 - D) \cdot U_D \cdot I_D \Rightarrow \\
\int_0^T i_C(t) dt &= 0 \Rightarrow I_D \cdot (1 - D) \cdot T - I_{iz} \cdot T = 0 \Rightarrow I_{iz} = I_D \cdot (1 - D) \Rightarrow \\
D \cdot U_{ul} \cdot I_{ul\max} &= (U_{iz} + I_D) \cdot I_{iz} \Rightarrow \\
I_{ul\max} &= \frac{(U_{iz} + I_D) \cdot I_{iz}}{D \cdot U_{ul}}
\end{aligned}$$

Struja  $I_{ulmax}$  za faktor ispune  $D_{max}$  iznosi:

$$I_{ul\max} = \frac{(U_{iz} + I_D) \cdot I_{iz}}{D_{\max} \cdot U_{ul\min}} = \frac{5+1}{0,5 \cdot 20} \cdot I_{iz} = \frac{6}{10} \cdot I_{iz} = 0,6 \cdot I_{iz}$$

a za faktor ispune  $D_{min}$  iznosi:

$$I_{ul\max} = \frac{(U_{iz} + I_D) \cdot I_{iz}}{D_{\min} \cdot U_{ul\max}} = \frac{5+1}{0,4 \cdot 30} \cdot I_{iz} = \frac{6}{12} \cdot I_{iz} = 0,5 \cdot I_{iz}$$

te sledi da maksimalna vrednost struje tranzistora  $I_{Qmax}$  mora da zadovolji uslov:

$$I_{Qmax} \geq 0,6 \cdot I_{iz}$$

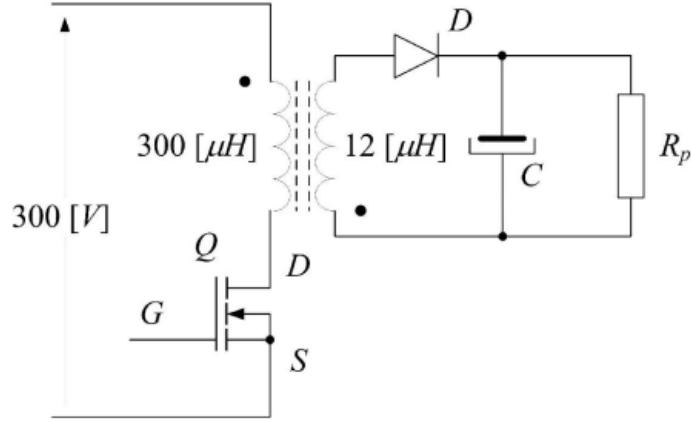
Traženi stepen iskorišćenja prekidača  $\kappa$  je prema tome:

$$\kappa = \frac{P_{iz}}{P_Q} = \frac{U_{iz} \cdot I_{iz}}{U_{Qmax} \cdot I_{Qmax}} = \frac{5 \cdot I_{iz}}{50 \cdot 0,6 \cdot I_{iz}} = \frac{1}{6} = 0,1666 [ ]$$

Primetimo da stepen iskorišćenja ne zavisi od varijacije vrednosti ulaznog napona, obzirom da se tranzistor mora odabrati tako da zadovolji i najgori mogući slučaj, odnosno najveće moguće naponsko i strujno opterećenje.

### Zadatak 24.

Flyback pretvarač na slici radi na  $f_s = 100 [kHz]$ . Induktivnosti namotaja su navedeni na slici, koeficijent sprege je jedinični. Vreme provođenja tranzistora se ne može smanjiti ispod  $t_{ONmin} = 0,2 [\mu s]$ . Koliki će biti izlazni napon pri datom minimalnom vremenu provođenja ako se na izlaz priključi potrošač od  $R_p = 100 [\Omega]$ ?



Rešenje:

$$\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \sqrt{\frac{300}{12}} = 5 [ ] \Rightarrow$$

$$I_{1\max} = \frac{U_{ul}}{L_1} \cdot t_{ONmin} = \frac{300}{300 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} = 0,2 [A] \Rightarrow$$

$$I_{2\max} = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_{1\max} = 5 \cdot 0,2 = 1 [A] \Rightarrow$$

$$\frac{1}{2} \cdot I_{2\max} \cdot t_{DON} = I_{iz} \cdot T \Rightarrow t_{DON} = I_{2\max} \cdot \frac{L_2}{U_{iz}} \Rightarrow I_{iz} = \frac{U_{iz}}{R_p} \Rightarrow T = \frac{1}{f_s} \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot I_{2\max}^2 \cdot \frac{L_2}{U_{iz}} = \frac{U_{iz}}{R_p} \cdot \frac{1}{f_s} \Rightarrow$$

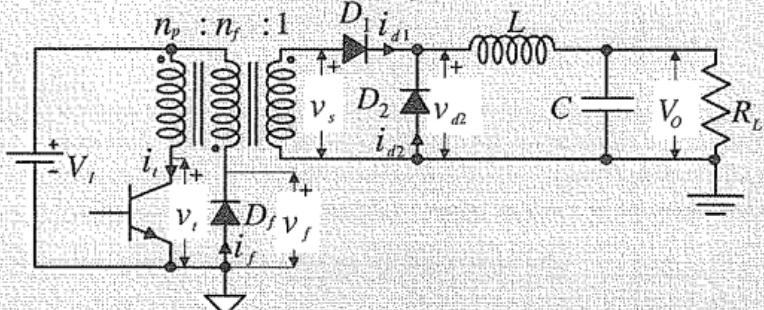
$$U_{iz} = I_{2\max} \cdot \sqrt{\frac{R_p \cdot L_2 \cdot f_s}{2}} = 1 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{2}} = 7,746 [V]$$

## FORWARD pretvarač

### Zadatak 25.

Transformator propusnog (forward) pretvarača sa galvanskom izolacijom (sl.4.18.1) je savršen, a sve upotrebljene komponente su idealne.

- Objasnići zavisnost maksimalnog odnosa impuls-perioda  $D$  od broja navojaka primara  $n_p$  i flyback namotaja  $n_f$ . Koliki je  $D_{max}$  ako je  $n_p=n_f$ ?
- Izvesti izraz za  $V_o/V_I$  u kontinualnom režimu rada.
- Nacrtati talasne oblike napona i struja na tranzistoru i svim diodama, u toku jedne periode prekidanja u stacionarnom stanju.
- Izvesti izraz za srednju struju tranzistora  $I_o$  u zavisnosti od poznatih parametara: ulaznog napona  $V_I$ , srednje izlazne struje  $I_o$ , odnosa impuls-perioda  $D$ , magnetizacione induktivnosti primara  $L_m$ , prenosnog odnosa primara i sekundara  $n_p$ , i prekidačke periode  $T_s$ .



Slika 4.18.1. Propusni (forward) pretvarač sa galvanskom izolacijom.

- Transformator se mora demagnetisati u svakoj prekidačkoj periodi. Magnetizacija se vrši kroz primar, a demagnetizacija kroz flyback namotaj. Za primar transformatora može se pisati:

$$V_I D_{max} T_s = V_I \frac{n_p}{n_f} (1 - D_{max}) T_s \Rightarrow D_{max} = \frac{n_p}{n_p + n_f}. \text{ Ako je } n_p = n_f, D_{max} = 0,5.$$

- Za prigušnicu  $L$  važi sledeća jednakost:

$(v_s - V_o)DT_s = V_o(1 - D)T_s$ . Dok tranzistor provodi, tj. za interval između 0 i  $DT_s$ :  $v_s = V_I/n_p$ , odnosno:

$$\left( \frac{V_I}{n_p} - V_o \right) DT_s = V_o (1 - D) T_s \Rightarrow \frac{V_o}{V_I} = \frac{D}{n_p}. \text{ Ovakav izraz je i trebalo očekivati s obzirom da je forward pretvarač izveden iz buck pretvarača, uz dodatak transformatora sa prenosnim odnosom } n_p : 1.$$

forward pretvarač izveden iz buck pretvarača, uz dodatak transformatora sa prenosnim odnosom  $n_p : 1$ .

- Talasni oblici traženih napona i struja dati su dijagramima na slici 4.18.2.

d) Srednja struja tranzistora je data izrazom:

$$I_t = \frac{I_{t1} + I_{t0}}{2} D.$$

$$I_{t1} = I_{t1} + I_m = \frac{I_{L1}}{n_p} + \frac{V_I DT_S}{L_m}, I_{t0} = \frac{I_{L0}}{n_p};$$

$$I_{L1} = I_o + \frac{\Delta I_o}{2} = I_o + \frac{V_o(1-D)T_s}{2L},$$

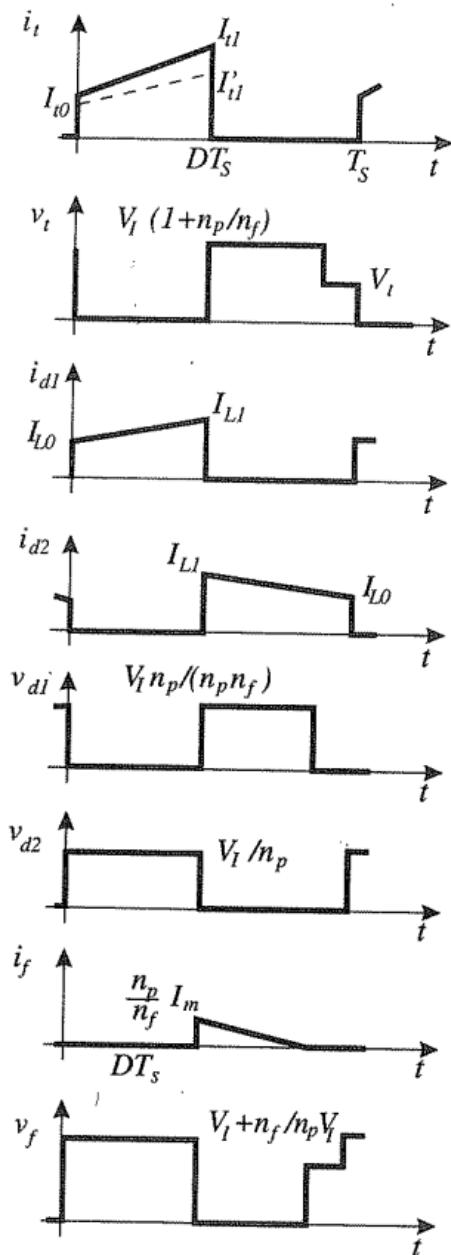
$$I_{L0} = I_o - \frac{\Delta I_o}{2} = I_o - \frac{V_o(1-D)T_s}{2L} \Rightarrow$$

$$I_t = \left[ \frac{V_I DT_S}{L_m} + \frac{1}{n_p} (I_{L1} + I_{L0}) \right] \frac{D}{2} =$$

$$\left[ \frac{V_I DT_S}{L_m} + \frac{2I_o}{n_p} \right] \frac{D}{2} = D \left( \frac{V_I DT_S}{2L_m} + \frac{I_o}{n_p} \right);$$

$$I_{t1} = \frac{1}{n_p} \left( I_o + \frac{V_o(1-D)T_s}{2L} \right) + \frac{V_I DT_S}{L_m}.$$

Srednja ulazna struja je:  $I_t = \frac{V_o I_o}{V_I}$ .

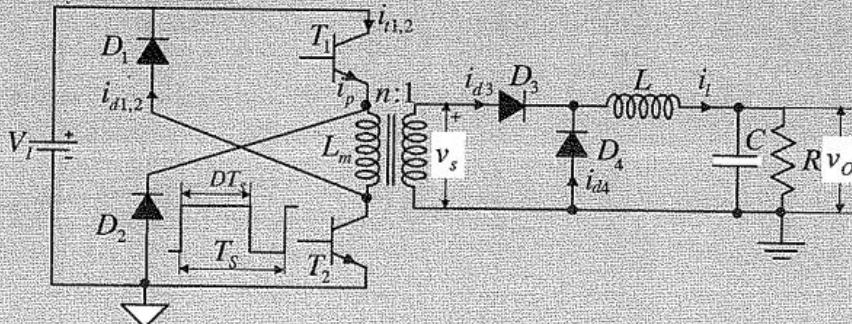


Slika 4.18.2. Talačni oblici obeleženih napona i struja na diodama i tranzistoru.

## Zadatak 26.

Na slici 4.20.1 je prikazan propusni (forward) pretvarač sa galvanskom izolacijom sa dva tranzistora koji se istovremeno zajedno uključuju i isključuju istim signalom. Poznato je:  $L_m = 1mH$ ,  $L = 15\mu H$ ,  $V_{Imin} = 260V$ ,  $T_s = 20\mu s$ ,  $R = 0,1\Omega$ . Pad napona u provodnom stanju na tranzistorima i diodama na primarnoj strani se može zanemariti, a na sekundarnim diodama iznosi  $V_{D3} = V_{D4} = 0,5V$ . Transformator je savršen, a pretvarač radi u kontinualnom režimu.

- Odrediti maksimalni odnos impuls-periода  $D$  i objasniti izvođenje.
- Za ovako određeno  $D$ , izračunati i nacrtati vremenske dijagrame obeleženih napona i struja, ako je jednosmerni napon na izlazu  $V_o = 5V$ .
- Ako je ulazni napon  $V_{Imax} = 340V$ , odrediti  $D$  za iste ostale uslove.
- Odrediti ukupne staticke gubitke i maksimalni inverzni napon na sekundarnim diodama  $D_3$  i  $D_4$ .



Slika 4.20.1. Propusni (forward) pretvarač sa galvanskom izolacijom sa dva tranzistora.

a) Transformator se magnetizuje za vreme  $DT_s$  iz izvora  $V_I$ , a demagnetizuje za  $(1-D)T_s$  ponovo u izvor  $V_I$ , kroz diode  $D_1$  i  $D_2$ .

$$\bar{v}_{Lm} = 0 \Rightarrow V_I DT_s = V_I (1-D)T_s \Rightarrow D_{max} = 0,5.$$

b)

$$\bar{v}_L = 0 \Rightarrow \left( \frac{V_I}{n} - V_o - V_{D3} \right) DT_s = (V_o + V_{D4})(1-D)T_s, \quad I_o = 50A$$

$$V_o = \frac{DV_I}{n} - V_{D3} \Rightarrow$$

$$n = \frac{DV_I}{V_o + V_{D3}} = 23,6363.$$

Zaokruživanje ne sme da se vrši na veću vrednost! U ovom konkretnom slučaju koristiće se tačna vrednost.

$$V_s = \frac{V_I}{n} = 11V, \quad I_o = \frac{V_o}{R} = 50A,$$

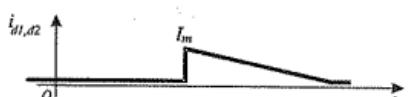
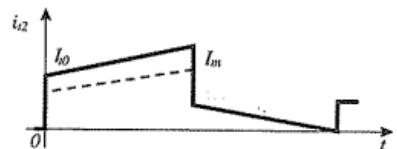
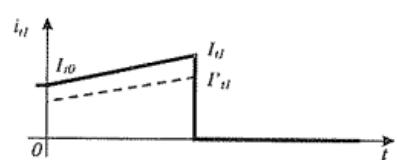
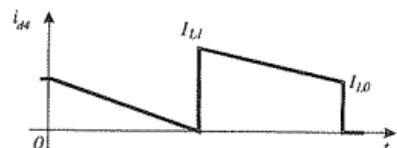
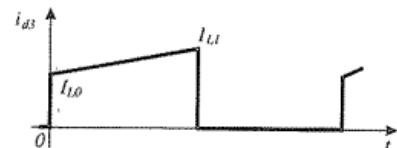
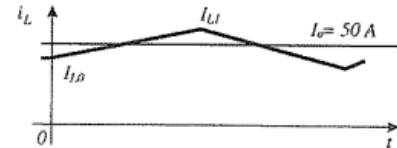
$$\Delta I_L = \frac{\left( \frac{V_I}{n} - V_o - V_{D3} \right) DT_s}{L} = 3,666A,$$

$$I_{L1} = I_o + \frac{\Delta I_L}{2} = 51,8333A,$$

$$I_{L0} = I_o - \frac{\Delta I_L}{2} = 48,1666A.$$

Preslikana struja sekundara na primar je:

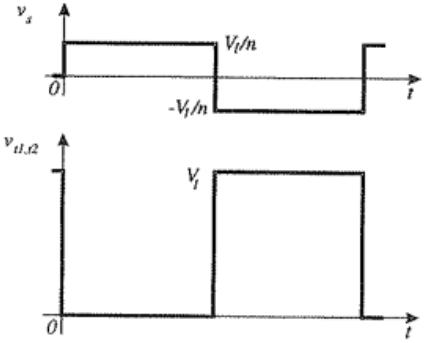
$$I_{t1} = \frac{I_{L1}}{n} = 2,19A, \quad I_{t0} = \frac{I_{L0}}{n} = 2,04A.$$



Struja magnetizacije je:

$$I_m = \frac{V_I DT_s}{L_m} = 2,6 A \Rightarrow I_{t1} = I_{t1} + I_m = 4,79 A;$$

$$v_{t\max} = V_I = 260 V.$$



Slika 4.20.2. Vremenski dijagrami napona i struja za kolo sa slike 4.20.1.

c)

$$V_o = \frac{DV_I}{n} - V_{D3} \Rightarrow D = \frac{n(V_o + V_{D3})}{V_I} = 0,382.$$

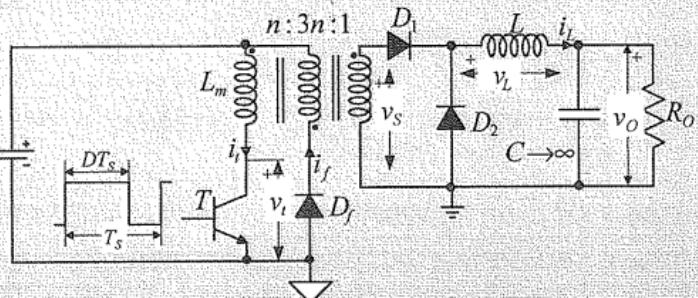
d)

$$P_{D3} + P_{D4} = \bar{i}_{D3}V_{D3} + \bar{i}_{D4}V_{D4} = V_D I_O = 25 W.$$

### Zadatak 27.

Na slici 4.19.1 prikazan je propusni (forward) pretvarač sa galvanskom izolacijom. Poznato je:  $L_m = 1 mH$ ,  $L = 15 \mu H$ ,  $n_f = 3n$ ,  $V_{Imax} = 260 V$ ,  $T_s = 20 \mu s$ ,  $R = 0,1 \Omega$ . Pad napona u provodnom stanju na tranzistoru  $T$  i diodi  $D_f$  se može zanemariti, a na sekundarnim diodama iznosi  $V_{D1} = V_{D2} = 0,5 V$ . Transformator je savršen.

- a) Odrediti maksimalni odnos faktora popune  $D$  i objasniti izvođenje.
- b) Za ovako određen  $D$ , nacrtati i izračunati vremenske dijagrame obeleženih napona i struja, ako je jednosmerni napon na izlazu  $V_o = 5 V$ .
- c) Ako je ulazni napon  $V_{Imax} = 340 V$ , odrediti  $D$  za iste ostale uslove.
- d) Pokazati šta treba dodati kolu na slici da bi se pored napona  $V_o$  u odnosu na istu izlaznu masu dobio dodatni jednosmerni napon  $V_o' = 12 V$ .



Slika 4.19.1. Propusni pretvarač sa galvanskom izolacijom.

- a) Forward transformator se za vreme  $DT_s$  magnetizuje iz  $V_I$  kroz  $L_m$  do struje  $I_m$ , a demagnetizuje za vreme  $(1-D)T_s$  u napon  $V_I$  kroz induktivnost flyback-namotaja  $L_f$  početnom strujom  $I_f = nI_m/n_f$ . Na osnovu volt-sekund balansa važi sledeće:

$$V_I DT_s = L_m I_m, \quad V_I (1-D)T_s = L_f I_f = \frac{n_f^2}{n^2} L_m \frac{n}{n_f} I_m = \frac{n_f L_m I_m}{n} \Rightarrow$$

$$\frac{n_f V_I DT_s}{n} = V_I (1-D)T_s \Rightarrow D_{\max} = \frac{1}{\frac{n_f}{n} + 1}.$$

U konkretnom slučaju je  $n_f = 3n$ , pa sledi da je  $D_{\max} = 0,25$ . Ako je  $D > D_{\max}$  transformator se neće demagnetizovati već će otici u zasićenje.

b)

$$0 < t < DT_s : \quad v_s = \frac{V_I}{n}, \quad v_L = v_s - V_o - V_{D1};$$

$$DT_s < t < T_s : \quad v_L = V_o + V_{D2} \Rightarrow$$

$$\left( \frac{V_I}{n} - V_O - V_{D1} \right) DT_s = (V_O + V_{D2})(1-D)T_s \Rightarrow$$

$$V_O = D \frac{V_I}{n} - V_{D2} \Rightarrow$$

$$n = \frac{DV_I}{V_O + V_{D2}} = 11,8181\dots$$

$$v_s = \frac{V_I}{n} = 22V, \quad I = \frac{V_O}{R} = 50A,$$

$$\Delta I_L = \frac{(v_s - V_O - V_{D1})DT_s}{L} = 5,5A,$$

$$I_{L\max} = 52,75A, \quad I_{L\min} = 47,25A.$$

Preslikana struja sa sekundara na primar je:

$$I_{P\max} = \frac{I_{L\max}}{n} = 4,46A, \quad I_{P\min} = \frac{I_{L\min}}{n} = 4A.$$

Struja magnetizacije je:  $I_m = \frac{V_I DT_s}{L_m} = 1,3A$ , pa je

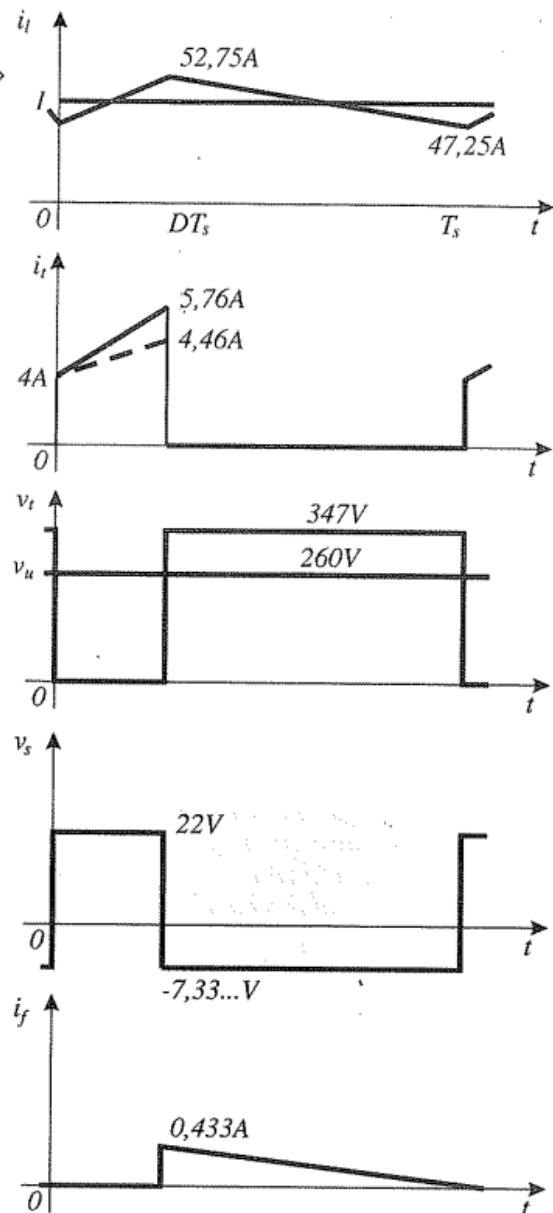
maksimalna struja primara:

$$I_{P\max} = I_{P\max} + I_m = 5,76A;$$

$$v_{t\max} = V_I + \frac{V_I n}{n_f} = \frac{4}{3} V_I = 347V;$$

$$DT_s \prec t \prec T_s : \quad v_s = \frac{-V_I \cdot 1}{3n} = -7,33V;$$

$$I_f = \frac{I_m n}{n_f} = 0,4333A.$$

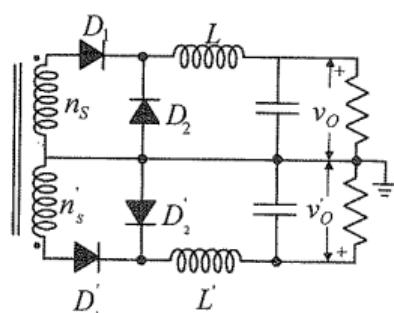


Slika 4.19.2. Talasni oblici obelezenih napona i struja.

c)  $V_O = D \frac{V_I}{n} - V_{D2} \Rightarrow D = \frac{n(V_O + V_{D2})}{V_I} = 0,1911764.$

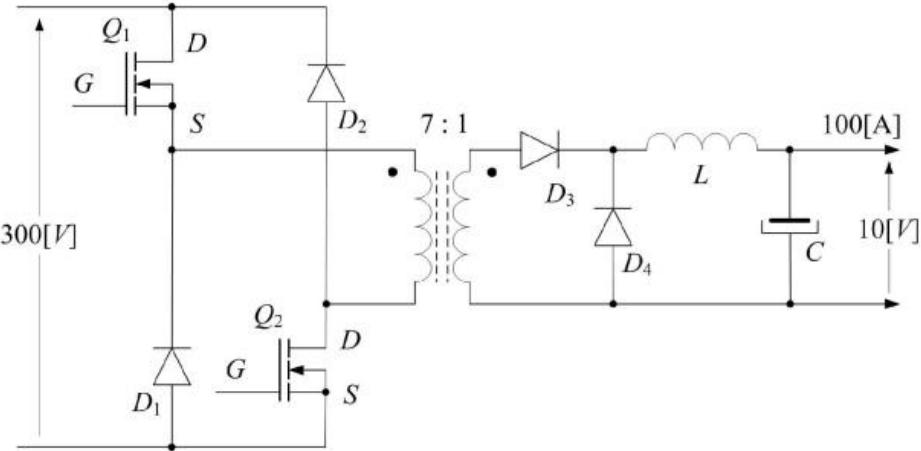
d) Treba dodati još jedan namotaj za koji će biti:  $V_O' = DV_I/n' - V_{D2}'$ . Uz pretpostavku da je  $V_{D2}' = V_{D2} = 0,5V$ , dobija se da je:  $n' = n/n_s' = 5,2$ , pa je  $n_s'/n_s = 2,2727\dots$

Slika 4.19.3. Kolo kojim se na izlazu dobija dodatni jednosmerni napon u odnosu na istu masu.



### Zadatak 28.

Izvor za galvanizaciju 10 [V] / 100 [A] realizuje se sa *forward* pretvaračem prikazanim na slici. U ispravljaču se koriste *Schottky*-jeve diode sa  $U_D = 0,5$  [V]. Proračunati srednje vrednosti gubitaka  $P_{D3}$  i  $P_{D4}$  ponaosob na diodama  $D_3$  i  $D_4$ !



**Rešenje:**

$$u_2 = u_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow$$

$$\int_0^T u_L(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow (u_2 - U_{iz} - U_D) \cdot D \cdot T - (U_{iz} + U_D) \cdot (1-D) \cdot T = 0 \quad /:T \Rightarrow$$

$$(u_2 - U_{iz} - U_D) \cdot D - (U_{iz} + U_D) \cdot (1-D) = 0 \Rightarrow$$

$$u_2 \cdot D - U_{iz} \cdot D - U_D \cdot D - U_{iz} - U_D + U_{iz} \cdot D + U_D \cdot D = 0 \Rightarrow$$

$$u_2 \cdot D - U_{iz} - U_D = 0 \Rightarrow$$

$$D = \frac{U_{iz} + U_D}{u_2} = \frac{U_{iz} + U_D}{u_1} \cdot \frac{N_1}{N_2} = \frac{10 + 0,5}{300} \cdot \frac{1}{7} = 0,245 \quad ] \Rightarrow$$

$$\Delta I_L \rightarrow 0 \Rightarrow I_L = I_{iz} = 100[A] \Rightarrow$$

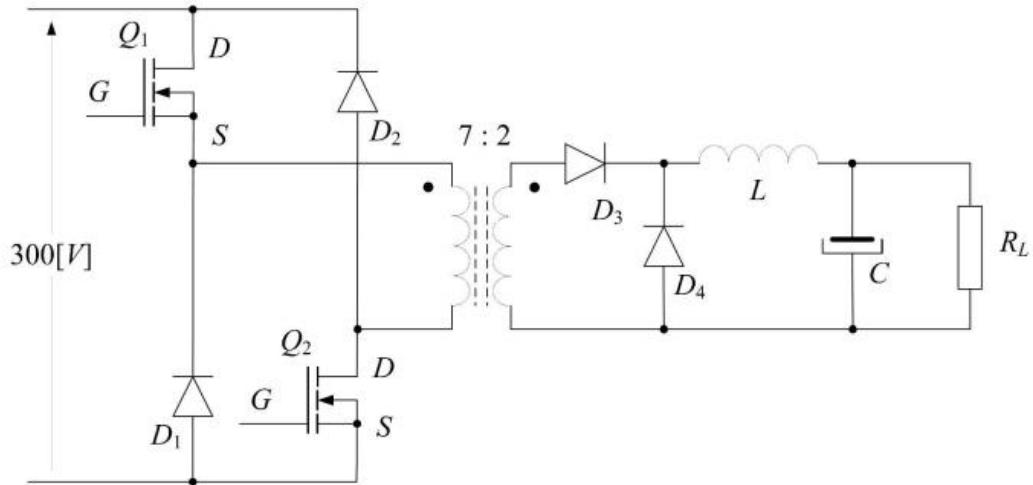
$$P_{D3} = D \cdot U_D \cdot I_L = 0,245 \cdot 0,5 \cdot 100 = 12,25[W] \Rightarrow$$

$$P_{D4} = (1-D) \cdot U_D \cdot I_L = (1-0,245) \cdot 0,5 \cdot 100 = 37,75[W] \Rightarrow$$

$$P_{Du} = P_{D3} + P_{D4} = D \cdot U_D \cdot I_L + (1-D) \cdot U_D \cdot I_L = U_D \cdot I_L = 0,5 \cdot 100 = 50[W]$$

### Zadatak 29.

Forward pretvarač sa dva prekidača na slici radi na  $f_s = 70 \text{ [kHz]}$ . Zbog konstrukcionih razloga ne može da se smanji vreme provođenja MOSFET-ova ispod  $0,5 \text{ [\mu s]}$  i ne može da se poveća iznad  $6 \text{ [\mu s]}$ . U kom opsegu će varirati izlazni napon, struja i snaga pretvarača ako je povezan potrošač fiksne otpornosti  $R_L = 1 \text{ [\Omega]}$ !



Rešenje:

$$U'' = U_{dc} \cdot \frac{N''}{N'} = 300 \cdot \frac{2}{7} = 85,714[V] \Rightarrow$$

$$T = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{70 \cdot 10^3} = 14,285 \cdot 10^{-6}[s] = 14,285[\mu s] \Rightarrow$$

$$U_{izl} = U'' \cdot D \Rightarrow$$

$$D_{\min} = \frac{t_{\min}}{T} = \frac{0,5}{14,285} = 0,035 \Rightarrow$$

$$U_{izl\min} = U'' \cdot D_{\min} = 85,714 \cdot 0,035 = 3,000[V] \Rightarrow$$

$$I_{izl\min} = \frac{U_{izl\min}}{R_L} = \frac{3}{1} = 3[A] \Rightarrow$$

$$P_{izl\min} = U_{izl\min} \cdot I_{izl\min} = 3 \cdot 3 = 9[W]$$

$$D_{\max} = \frac{t_{\max}}{T} = \frac{6}{14,285} = 0,420 \Rightarrow$$

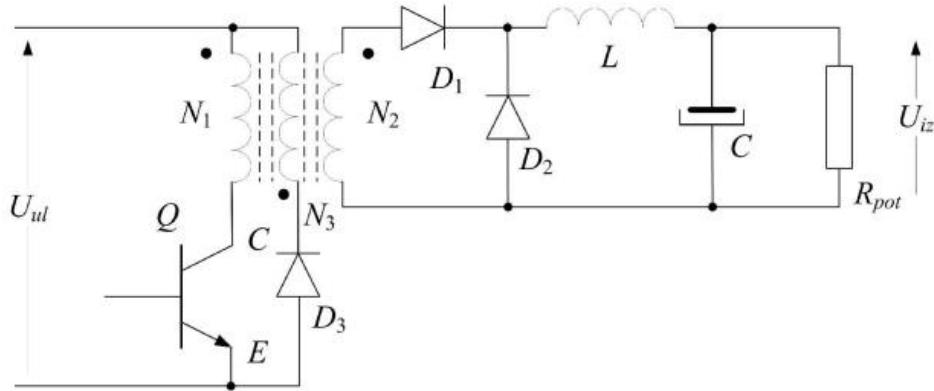
$$U_{izl\max} = U'' \cdot D_{\max} = 85,714 \cdot 0,420 = 36,001[V] \Rightarrow$$

$$I_{izl\max} = \frac{U_{izl\max}}{R_L} = \frac{36,001}{1} = 36,001[A] \Rightarrow$$

$$P_{izl\max} = U_{izl\max} \cdot I_{izl\max} = 36,001 \cdot 36,001 = 1296,127[W]$$

### Zadatak 30.

Forward pretvarač se konstruiše sa sa transformatorom prenosnog odnosa  $N_1 / N_2 = 1 / 2$ . Faktor ispunje je  $D = 0,4$ . Radna frekvencija je  $f_s = 100 [kHz]$ . Na ulazu je napon  $U_{ul} = 48 [V]$ . Pad napona na prekidačkom tranzistoru je  $U_{CEsat} = 2 [V]$  a na sekundarnim diodama je  $U_D = 1 [V]$ . Odrediti otpornost potrošača na izlazu  $R_{pot}$  i potrebnu induktivnost prigušnice  $L$  tako da pri snazi od  $P_{pot} = 500 [W]$  pretvarač radi između kontinualnog i diskontinualnog režima! Kapacitet filtrarskog kondenzatora  $C$  je veliki.



#### Rešenje:

$$u_1 = U_{ul} - U_{CEsat} = 48 - 2 = 46[V] \Rightarrow$$

$$u_2 = u_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} = 46 \cdot \frac{2}{1} = 92[V] \Rightarrow$$

$$\int_0^T u_L(t) \cdot dt = 0 \Rightarrow$$

$$(u_2 - U_{iz} - U_D) \cdot D \cdot T - (U_{iz} + U_D) \cdot (1-D) \cdot T = 0 \quad /:T \Rightarrow$$

$$(u_2 - U_{iz} - U_D) \cdot D - (U_{iz} + U_D) \cdot (1-D) = 0 \Rightarrow$$

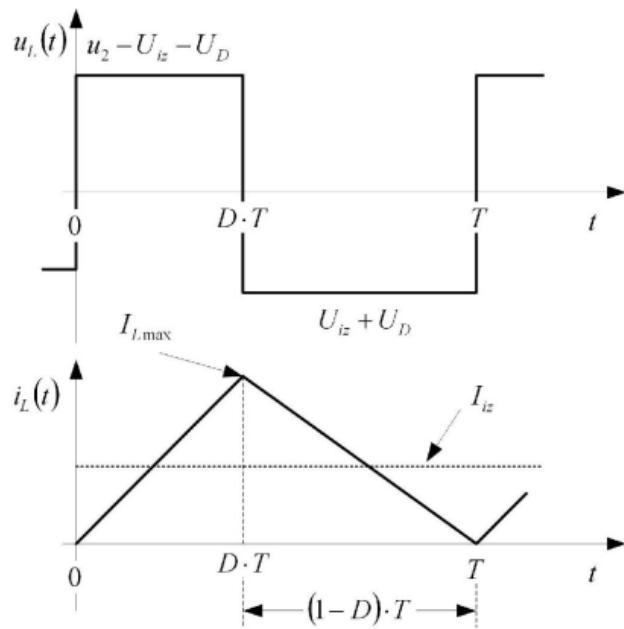
$$u_2 \cdot D - U_{iz} \cdot D - U_D \cdot D - U_{iz} - U_D + U_{iz} \cdot D + U_D \cdot D = 0 \Rightarrow$$

$$U_{iz} = u_2 \cdot D - U_D = 92 \cdot 0,4 - 1 = 35,8[V] \Rightarrow$$

$$P_{pot} = \frac{U_{iz}^2}{R_{pot}} \Rightarrow$$

$$R_{pot} = \frac{U_{iz}^2}{P_{pot}} = \frac{35,8^2}{500} = 2,563[\Omega]$$

$$I_{iz} = \frac{P_{pot}}{U_{iz}} = \frac{500}{35,8} = 13,966[A] \Rightarrow$$



$$I_{L\max} = 2 \cdot I_{iz} = 2 \cdot 13,966 = 27,932 [A] \Rightarrow$$

$$u_L = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{u_L \cdot \Delta t}{\Delta I} = \frac{-(U_{iz} + U_D)}{-I_{L\max}} \cdot (1-D) \cdot T = \frac{(U_{iz} + U_D) \cdot (1-D)}{2 \cdot I_{iz} \cdot f} = \frac{(35,8+1) \cdot (1-0,4)}{2 \cdot 13,966 \cdot 100 \cdot 10^3} = \\ &= \frac{(35,8+1) \cdot (1-0,4)}{2 \cdot 13,966 \cdot 100 \cdot 10^3} = 7,904 \cdot 10^{-6} [H] \approx 7,9 [\mu H] \end{aligned}$$

## Literatura

[1] – Branko Dokić, *Energetska elektronika: zbirka rešenih zadataka*, Banja Luka, Elektrotehnički fakultet, 2006. ISBN: 99938-793-3-9

[2] – Milan Adžić, *Energetska elektronika: zbirka zadataka*, Subotica, 2016.