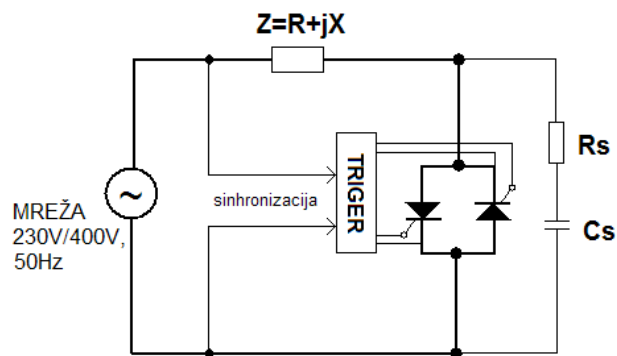


OGRANIČENJE PORASTA NAPONA "dv/dt" PRI KOMUTACIJI ANTIPARALELNE SPREGE TIRISTORA

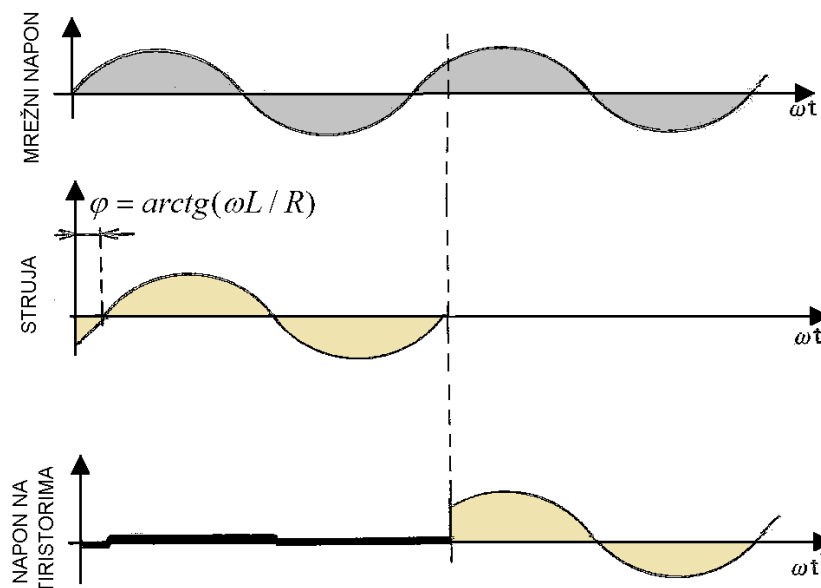
Kada se antiparalelna sprema tiristora koristi za isključenje induktivnih opterećenja, napon koji se javlja na tiristorima ima veoma veliku strminu porasta ("dv/dt") nakon isključenja. Ukoliko ovaj porast prekorači kritičnu vrednost za date tiristore, on može prouzrokovati neželjeno uključenje tiristora preko gejta ili može dovesti do destrukcije pripadajućih tiristora. Jednostavan način da se ovi neželjeni efekti spreče je korišćenje tzv. "RC snaber" kola koje se vezuje paralelno tiristorima kao što je prikazano na Slici 1.



Slika 1- Tiristorski prekidač sa pripadajućim RC kolom za ograničenjem porasta napona

Korektan izbor komponenti RC kola za ograničenje porasta napona je veoma značajan sa stanovišta projektovanja. Neadekvatan izbor može dovesti do podržavanja oscilacija u osnovnom kolu, do neželjenih efekata porasta napona i u krajnjem slučaju do uništenja tiristora.

Pretpostavićemo da tiristorski prekidač uključuje i isključuje induktivno opterećenje čija je impedansa data u opštoj formi $Z = R + j\omega L$. Na Slici 2 su prikazani karakteristični talasni oblici napona i struje u prekidačkom kolu sa Slike 1.



Slika 2- Karakteristični talasni oblici kod isključenja tiristorskog prekidača

Mrežni napon je dat sledećom jednačinom:

$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

Kada je tiristorski prekidač uključen, struja je fazno pomerena u odnosu na napon za ugao φ . Struja u kolu je data jednačinom:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

Maksimalna vrednost struje je određena maksimalnom vrednošću mrežnog napona i impedansom opterećenja:

$$I_m = \frac{U_m}{Z} \quad (3)$$

Impedansa opterećenja je data kao:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (4)$$

a fazni ugao impedanse:

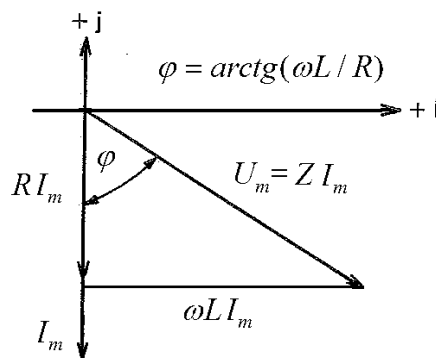
$$\varphi = \arctg(\omega L / R) \quad (5)$$

Tiristorski prekidač se isključuje u trenutku t_o , odnosno kada je $\omega t_o = \varphi$. Struja i napon su u tom trenutku jednaki:

$$U(t_o) = U_m \sin \varphi \quad (6)$$

$$i(t_o) = I_m \sin \varphi = 0 \quad (7)$$

Na Slici 3 je predstavljen fazorski dijagram struja i napona neposredno pre trenutka t_o .

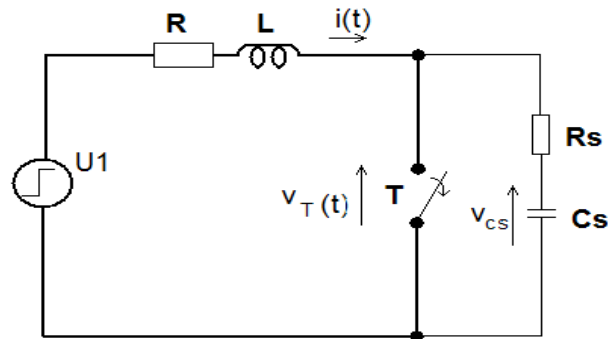


Slika 3- Fazorski dijagram struja i napona neposredno pre trenutka t_o

Kada je tiristorski prekidač isključen, obzirom na induktivno opterećenje i RC kolo, impedansa redne veze postaje jednaka :

$$Z' = R + R_s + j\omega L - \frac{j}{\omega C_s} \quad (8)$$

Električno kolo, nakon isključenja tiristorskog prekidača, koje će biti analizirano je dato na Slici 4. Usvojicemo zbog jednostavnosti da je tiristorski prekidač predstavljen prekidačem T.

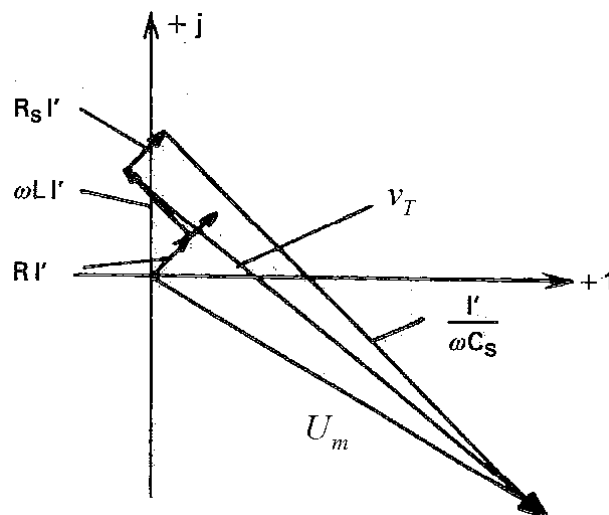


Slika 4- Kolo za analizu pri isključenju tiristorskog prekidača T

U trenutku isključenja mrežni napon ima vrednost $U_1 = U_m \sin \varphi$, pri čemu je $U_m = U_{eff} \sqrt{2}$. Sinus faznog ugla je dat jednačinom:

$$\sin \varphi = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (9)$$

Fazorski dijagram nakon isključenja tiristorskog prekidača T je dat na Slici 5.



Slika 5- Fazorski dijagram struja i napona nakon isključenja prekidača T

Napon na krajevima prekidača T (ustvari napon na RC elementu) je jednak :

$$U_s = Z_s \cdot I' \quad (10)$$

Pri čemu je impedansa RC kola jednaka:

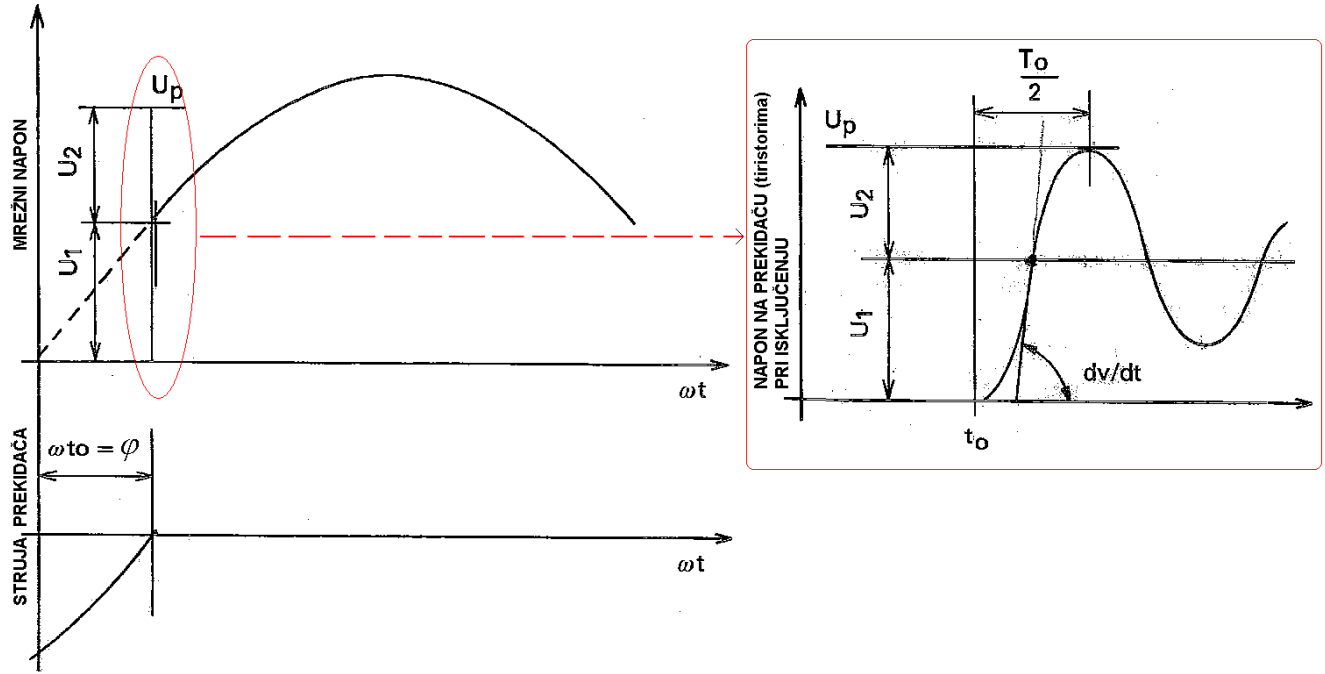
$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + \frac{1}{\omega^2 C_s^2}} \quad (11)$$

a struja $I' = U_m / Z'$. Takođe u većini praktičnih slučajeva je sasvim opravdana pretpostavka da je impedansa opterećenja mnogo manja od impedanse RC člana:

$$R + j\omega L \ll R_s - \frac{j}{\omega C_s}$$

odnosno $Z_s = Z'$.

Na Slici 6 su dati karakteristični talasni oblici struje i napona pri isključenju prekidača T:



Slika 6- Karakteristični talasni oblici pri isključenju prekidača T (anti paralelne sprege tiristora)

Diferencijalna jednačine koje opisuju oscilatorno kolo na Slici 4, sa odskočnom- Hevisajdovom pobudom U_1 su date kao:

$$U_1 = (R + R_s)i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + v_{cs}(t) \quad (12)$$

$$i(t) = C_s \cdot \frac{dv_{cs}(t)}{dt} \quad (13)$$

Na osnovu ovih jednačina moguće je dobiti diferencijalnu jednačinu po naponu $v_{cs}(t)$ u obliku:

$$U_1 = (R + R_s)C_s \cdot \frac{dv_{cs}(t)}{dt} + LC_s \frac{d^2v_{cs}(t)}{dt^2} + v_{cs}(t) \quad (14)$$

ili u kompaktnijoj formi:

$$U_1 = \frac{1}{\omega_o^2} \cdot \frac{d^2v_{cs}(t)}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_o} \frac{dv_{cs}(t)}{dt} + v_{cs}(t) \quad (15)$$

Gde su parametri ξ -prigušenje i ω_o -rezonantna učestanost dati u sledećim formulama:

$$\xi = \frac{R_s + R}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_s}{L}} \quad (16)$$

odnosno,

$$\xi = \frac{\frac{R_s + R}{2}}{\sqrt{\frac{L}{C_s}}} = \frac{R_s + R}{2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C_s}}} \quad (17)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC_s}} \quad (18)$$

Faktor dobrote datog oscilatornog kola je dat jednačinom:

$$Q = \frac{1}{2\xi} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C_s}}}{R_s + R} \quad (19)$$

Odredićemo vremensku promenu napona na prekidaču T. Za prekidač važe sledeće naponske jednačine:

$$v_T(t) = R_s \cdot i(t) + v_{cs}(t) \quad (20)$$

$$v_T(t) = R_s C_s \frac{dv_{cs}(t)}{dt} + v_{cs}(t) \quad (21)$$

Rešenje diferencijalne jednačine (21) je dato u obliku:

$$v_T(t) = U_1 - U_1(\cos \omega_p t + \xi \cdot \frac{\omega_o}{\omega_p} \cdot \sin \omega_p t) \cdot e^{-\xi \omega_o t} \quad (22)$$

Pri čemu su:

$$0 \leq \xi < 1 \quad (23)$$

$$\omega_p = \omega_o \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \quad (24)$$

Od interesa je odrediti kada se ima maksimalni porast napona odnosno $\max \left\{ \frac{dv_T}{dt} \right\} = ?$

Važe sledeće jednačine:

$$\frac{dv_T}{dt}(t) = U_1(\omega_p \sin \omega_p t - \xi \omega_o \cdot \cos \omega_p t) \cdot e^{-\xi \omega_o t} + \xi \omega_o \cdot e^{-\xi \omega_o t} \cdot U_1(\cos \omega_p t + \xi \cdot \frac{\omega_o}{\omega_p} \cdot \sin \omega_p t) \quad (25)$$

$$\frac{dv_T}{dt}(t) = U_1(\omega_p \sin \omega_p t + \frac{\xi^2 \omega_o^2}{\omega_p} \cdot \sin \omega_p t) \cdot e^{-\xi \omega_o t} \quad (26)$$

Uzimajući u obzir jednačinu (24), prethodni izraz se može predstaviti kao:

$$\frac{dv_T}{dt}(t) \approx U_1 e^{-\xi \omega_o t} \cdot \frac{\omega_o^2}{\omega_p} \cdot \sin \omega_p t \quad (27)$$

Maksimalni porast napona dobijamo iz uslova $\left\{ \frac{dv_T}{dt} \right\}' = 0$.

$$\frac{d^2 v_T}{dt^2}(t) = U_1 \cdot \frac{\omega_o^2}{\omega_p} \cdot e^{-\xi \omega_o t} (\omega_p \cos \omega_p t - \xi \omega_o \cdot \sin \omega_p t) = 0 \quad (28)$$

$$\operatorname{tg}(\omega_p t)^* = \frac{\omega_p}{\xi \omega_o} \quad (29)$$

$$(\omega_p t)^* = \operatorname{arctg} \frac{\omega_p}{\xi \omega_o} \quad (30)$$

Ako pretpostavimo (realna pretpostavka) da $\xi \rightarrow 0$ i da $(\omega_p t)^* \rightarrow \frac{\pi}{2}$, dobijamo sledeće relacije:

$$\max \left\{ \frac{dv_T}{dt} \right\} \approx U_1 \cdot \frac{\omega_o^2}{\omega_p} \quad (31)$$

$$\omega_p \approx \omega_o \cdot \sqrt{1 - 0^2} = \omega_o \quad (32)$$

$$\max \left\{ \frac{dv_T}{dt} \right\} \approx U_1 \cdot \omega_o \quad (33)$$

odnosno,

$$\max \left\{ \frac{dv_T}{dt} \right\} \approx U_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{LC_s}} \quad (34)$$

$$\left[\left(\frac{dv_T}{dt} \right)_{\max} \right]^2 \approx U_1^2 \cdot \frac{1}{LC_s} \quad (35)$$

Konačno dobijamo da vrednost kondenzatora u "RC snaberskom" kolu mora iznositi:

$$C_s = \frac{U_1^2}{\left[\frac{dv_T}{dt} \right]^2 \cdot L} \quad (36)$$

odnosno, uzimajući u obzir maksimalni dozvoljeni porast napona za date tiristore :

$$C_s \geq \frac{U_1^2}{\left[\left(\frac{dv_T}{dt} \right)_{\max} \right]^2 \cdot L} \quad (37)$$

U nastavku će dati nekoliko primera u kojima će biti objašnjeno kako se proračunava vrednost kondenzatora C_s i otpornosti R_s .

Vršna vrednost napona U_p oscilatornog kola će biti maksimum $2U_1$, ali antiparalelna sprega tiristora izdržava promenljivi inverzni napon V_{DRM} . Napon U_p ne sme nikada preći vrednost V_{DRM} . Dva slučaja će biti razmotrena:

A) $U_1 \leq 0.5V_{DRM}$

U ovom slučaju oscilacije ne moraju biti prigušene i u principu se R_s može zanemariti. Međutim struja pražnjenja kondenzatora C_s , koja će proticati kroz tiristor (za svaku poluperiodu odgovarajući) mora biti ograničena sa nekom vrednošću R_s . Stoga se može usvojiti pretpostavka da je $R_s \geq 10\Omega$.

B) $U_1 > 0.5V_{DRM}$

U ovom slučaju i shodno Slici 6, amplituda oscilacija mora da se ograniči na vrednost:

$$U_p = U_1 + U_2 \leq 0.5V_{DRM} \quad (38)$$

Dekrement prigušenja oscilacija je dat jednačinom:

$$U_1 / U_2 = e^{\frac{\theta}{2}} \quad (39)$$

Pri čemu je argument jednak:

$$\theta = \pi / Q \quad (40)$$

Možemo napisati sledeće jednačine za ugao $\theta/2$ i za recipročnu vrednost faktora dobrote:

$$\theta / 2 = \pi / 2Q = \ln \frac{U_1}{U_2} = 2.3 \log \frac{U_1}{U_2} \quad (41)$$

$$1/Q = \frac{1}{\pi} \cdot 2 \cdot 2.3 \log \frac{U_1}{U_2} = 1.465 \log \frac{U_1}{U_2} \quad (42)$$

Kombinacijom jednačina (19) i (42) dobijamo sledeće izraze:

$$1/Q = 1.465 \log \frac{U_1}{U_2} = \frac{R + R_s}{\sqrt{\frac{L}{C_s}}} \quad (43)$$

$$R_s = 1.465 \sqrt{\frac{L}{C_s}} \log \frac{U_1}{U_2} - R \quad (44)$$

Ako je opterećenje pretežno induktivno (faktor snage ispod 0.8), možemo pretpostaviti $R=0$ i $Z=\omega L$, možemo pisati da je:

$$L = \frac{U_{RMS}}{\omega I_{RMS}} \quad (45)$$

Konačno, parametri R_s - C_s snaberskog kola konačno su dati sledećim jednačinama :

$$C_s = \frac{U_1^2}{\left[\frac{dv_T}{dt} \right]^2 \cdot L} \quad (46)$$

$$R_s = 1.465 \sqrt{\frac{L}{C_s}} \log \frac{U_1}{U_2} - R \quad (47)$$

Kolo će da osciluje kada je:

$$R + R_s < 2 \sqrt{\frac{L}{C_s}} \quad (48)$$

Kolo je "kritično prigušeno" kada je :

$$R + R_s = 2 \sqrt{\frac{L}{C_s}} \quad (49)$$

Kolo je aperiodično i bez oscilacija kada je :

$$R + R_s > 2 \sqrt{\frac{L}{C_s}} \quad (50)$$

Gde su:

- naponi U_1 i U_2 dati u [V]
- otpori R i R_s dati u [Ω]
- induktivnost L data u [H]
- kapacitivnost C_s data u [F]
- porast napona dv/dt dat u [V/s]

Iz jednačine (47) se dobija da je :

$$R + R_s = 1.465 \log \frac{U_1}{U_2} \sqrt{\frac{L}{C_s}} \quad (51)$$

Iz uslova koji je dat jednakošću (49) se dobija :

$$1.465 \log \frac{U_1}{U_2} = 2 \quad (52)$$

Odnosno:

$$\frac{U_1}{U_2} = 23.15 \quad (53)$$

Pri tome imamo tri slučaja:

$$\frac{U_1}{U_2} < 23.15 \text{ (kolo osciluje)} \quad (54)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = 23.15 \text{ (ima se kritično prigušenje)} \quad (55)$$

$$\frac{U_1}{U_2} > 23.15 \text{ (nema oscilacija u kolu)} \quad (56)$$

U poslednja dva slučaja napon primenjen na antiparalelnoj vezi tiristora pri isključenju neće prekoračiti vrednost $U_1 = U_m \sin \varphi$ i $U_2 = 0$.

Kontradikcija koja se javlja u jednačinama (55) i (56) proizilazi činjenice da je u jednačini (35) prigušenje usled oscilacija zanemareno.

U praktičnim primenama ovo znači da će napon koji se priključuje paralelno sa tiristorima, pri niskoj vrednosti porasta „dv/dt“ biti manji od očekivanog.

U nastavku će biti dati primeri za proračun RC kola za dva karakteristična slučaja

PRIMER 1

Mreža: $220V \pm 10\%$, $f=50\text{Hz}$

Tiristori: $V_{\text{DRM}}=500\text{V}$, $(dV/dt)_{\text{kr}}=4\text{V}/\mu\text{s}$

Opterećenje: $Z=22\Omega$, faktor snage $\cos\varphi=0.8$

Rešenje:

$U_m=220 \cdot 1.1 \cdot 1.41=342\text{V}$, $\omega=314 \text{ rad/s}$, $\sin\varphi=0.6$

$R=Z\cos\varphi=22 \cdot 0.8=17.6\Omega$

$X=Z\sin\varphi=22 \cdot 0.6=13.2\Omega \rightarrow L=0.042\text{H}$

$$U_1 = U_m \sin \varphi = 342 \cdot 0.6 = 205 \text{ V}$$

$$C_s = \frac{U_1^2}{\left[\frac{dv_T}{dt} \right]^2 \cdot L} = 205^2 / 0.042 (4000000)^2 = 62.5 \text{ nF} \rightarrow \text{usvaja se } C_s = 68 \text{ nF}$$

Pošto je $U_1 = 205 \text{ V} < 0.5 V_{\text{DRM}}$, nije neophodno ograničavati amplitudu oscilacija te se stoga **usvaja da je $R_s = 10 \Omega$**

Dakle projektovane vrednosti za RC kolo su : $R_s = 10 \Omega$ i $C_s = 68 \text{ nF}$

PRIMER 2

Mreža: $220 \text{ V} \pm 10\%$, $f = 50 \text{ Hz}$

Tiristori: $V_{\text{DRM}} = 500 \text{ V}$, $(dV/dt)_{\text{kr}} = 4 \text{ V}/\mu\text{s}$

Opterećenje: $Z = 22 \Omega$, faktor snage $\cos \varphi = 0$ ($R = 0$)

Rešenje:

$$U_m = 220 \cdot 1.1 \cdot 1.41 = 342 \text{ V}, \omega = 314 \text{ rad/s}$$

$$L = Z / \omega = 0.07 \text{ H}$$

$$U_1 = 342 \text{ V}$$

$$C_s = \frac{U_1^2}{\left[\frac{dv_T}{dt} \right]^2 \cdot L} = 342^2 / 0.07 (4000000)^2 = 100 \text{ nF} = 0.104 \mu\text{F} \rightarrow \text{usvaja se } C_s = 0.1 \mu\text{F}$$

$$V_{\text{DRM}} = 500 \text{ V} = U_p = U_1 + U_2$$

$$U_2 = 500 - 342 = 158 \text{ V}$$

$$R_s = 1.465 \sqrt{\frac{L}{C_s}} \log \frac{U_1}{U_2} - R = 1.465 \log(342/158) \text{ SQRT}(0.07/0.0000001) = 412 \Omega \rightarrow \text{usvaja se } R_s = 470 \Omega$$

Dakle projektovane vrednosti za RC kolo su: $R_s = 470 \Omega$ i $C_s = 0.1 \mu\text{F}$