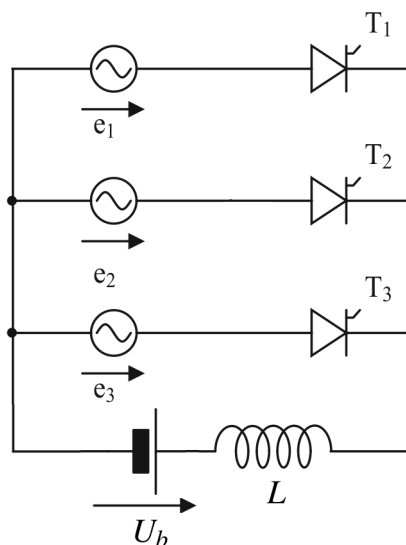


1. zadatak Trofazni jednostrani ispravljač priključen je na trofazni napon efektivne vrednosti 100 V, frekvencije 50 Hz. Ugao paljenja tiristora jednak je $\pi/3$, srednja vrednost izlazne struje iznosi $I_d = 30$ A, induktivnost prigušnice je $L = 10$ mH. Da li ispravljač radi u prekidnom ili neprekidnom režimu? Napisati izraze za izlazni napon $u_d(t)$ i izlaznu struju $i_d(t)$, i skicirati njihove talasne oblike.



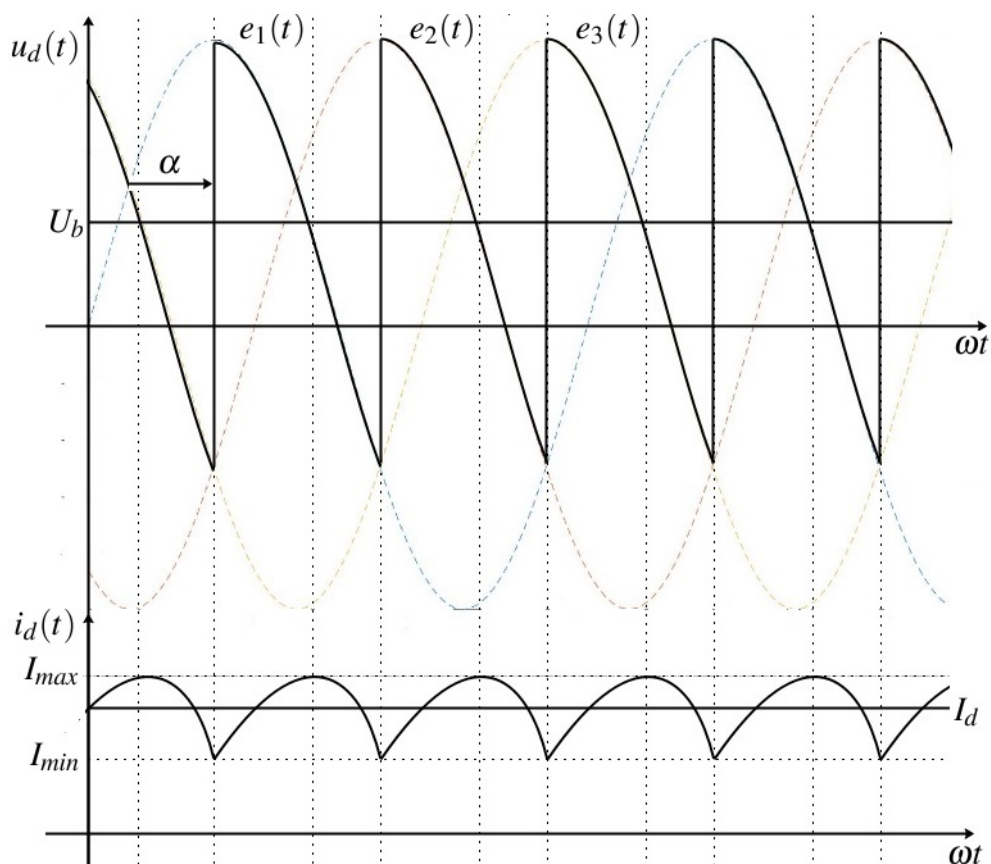
Slika 1.

Rešenje 1. zadatka Za početak, pretpostavimo da ispravljač radi u neprekidnom režimu. Talasni oblici izlaznog napona $u_d(t)$ i izlazne struje $i_d(t)$ prikazani su na Slici 1.1. Napon $u_d(t)$ jednak je:

$$u_d(t) = \begin{cases} e_1(t) & , \frac{\pi}{6} + \alpha \leq \omega t \leq \frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{2\pi}{3} \\ e_2(t) & , \frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{4\pi}{3} \\ e_3(t) & , \frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{4\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{6} + \alpha + 2\pi \end{cases} \quad (1.1)$$

U ustaljenom stanju, srednja vrednost napona na prigušnici jednaka je nuli, pa je napon baterije jednak srednjoj vrednosti napona $u_d(t)$:

$$U_b = \frac{1}{T} \int_T u_d(t) dt = \frac{3}{T} \int_{T/3} u_d(t) dt = \frac{3E\sqrt{6}}{2\pi} \cos\alpha = 58.477 \text{ V} \quad (1.2)$$



Slika 1.1

Napon na prigušnici jednak je razlici napona u_d i napona baterije:

$$u_L(t) = u_d(t) - U_b, \quad (1.3)$$

odnosno:

$$L \frac{di_d(t)}{dt} = u_d(t) - U_b. \quad (1.4)$$

Pomoću izraza (1.4) može se izračunati izlazna struja pretvarača:

$$di_d(t) = \frac{u_d(t) - U_b}{L} dt. \quad (1.5)$$

Kada se uvede smena $\chi = \omega t$, prethodni izraz postaje:

$$di_d(\chi) = \frac{u_d(\chi) - U_b}{\omega L} d\chi. \quad (1.6)$$

Integraljenjem izraza (1.6), dobija se izraz (1.7).

$$\int_{i_d(\chi=\frac{\pi}{6}+\alpha)}^{i_d(\chi=x)} di_d(\chi) = \frac{u_d(\chi) - U_b}{\omega L} d\chi. \quad (1.7)$$

Rešavanjem određenog integrala, dobija se:

$$i_d(x) - i_d\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) = \frac{1}{\omega L} \left(\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^x E\sqrt{2}\sin\chi d\chi - \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^x U_b d\chi \right) \quad (1.8)$$

$$i_d(x) - I_{min} = \frac{1}{\omega L} \{E\sqrt{2}[\cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) - \cos(x) - U_b(x - \frac{\pi}{6} - \alpha)]\} \quad (1.9)$$

U prethodni izraz, radi uprošćenja, ubacuje se $\alpha = \frac{\pi}{3}$, odakle sledi:

$$i_d(x) - I_{min} = \frac{1}{\omega L} \{E\sqrt{2}[-\cos(x)] - U_b(x - \frac{\pi}{2})\}, \quad (1.10)$$

odakle se dobija izraz za struju $i_d(t)$:

$$i_d(x) = I_{min} - \frac{1}{\omega L} [E\sqrt{2}\cos(x) + U_b(x - \frac{\pi}{2})], \quad (1.11)$$

Srednja vrednost struje $i_d(t)$ jednaka je:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} i_d(x) dx = \frac{3}{2\pi} \int_{2\pi/3} i_d(x) dx = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha+\frac{2\pi}{3}} i_d(x) dx \quad (1.12)$$

$$I_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha+\frac{2\pi}{3}} \{I_{min} - \frac{1}{\omega L} [E\sqrt{2}\cos(x) + U_b(x - \frac{\pi}{2})]\} dx \quad (1.13)$$

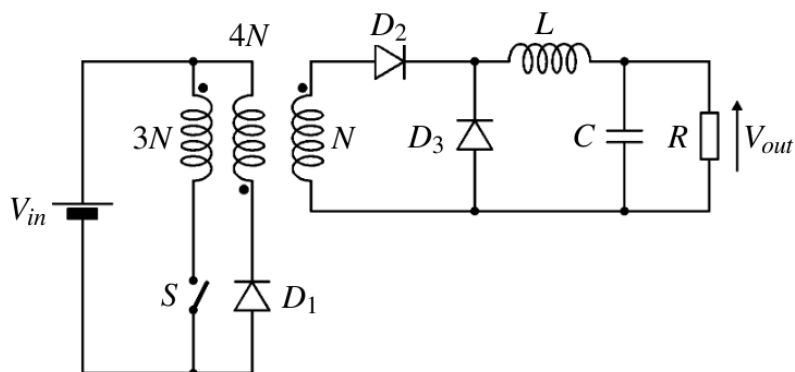
$$I_d = I_{min} + \frac{3}{2\pi} \left[\frac{3E\sqrt{2}}{2\omega L} - \frac{2U_b}{9\omega L} \pi^2 \right] \quad (1.14)$$

Minimalna vrednost izlazne struje jednaka je:

$$I_{min} = I_d - \frac{3}{2\pi} \left[\frac{3E\sqrt{2}}{2\omega L} - \frac{2U_b}{9\omega L} \pi^2 \right] = 17.323 \text{ A} \quad (1.15)$$

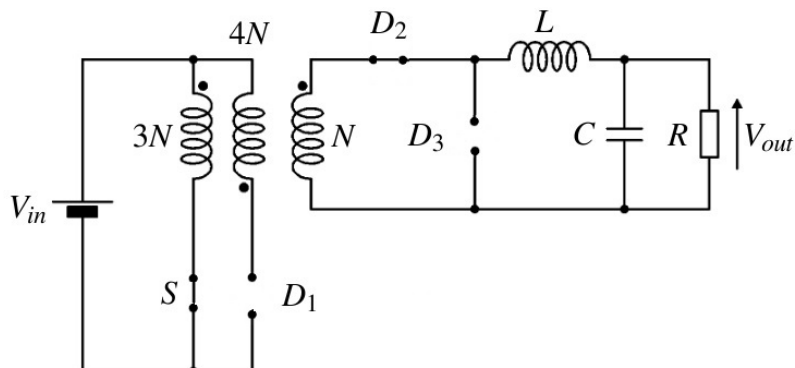
Potreban i dovoljan uslov neprekidnog režima rada ispravljača jeste da minimalna izlazna struja bude veća od nule. Kako je uslov ispunjen, zaključuje se da je početna pretpostavka ispravna, tj. ispravljač zaista radi u neprekidnom režimu.

2. zadatak Za čoper prikazan na Slici 2, odrediti vrednosti napona koje blokiraju prekidač S i diode D_1 , D_2 i D_3 , kao i srednju vrednost napona na opterećenju, u ustaljenom stanju. *Duty cycle* iznosi 0.4. Kapacitivnost kondenzatora je dovoljno velika da se može zanemariti naizmenična komponenta napona na opterećenju. Ostali podaci su: $f = 10 \text{ kHz}$, $R = 20 \Omega$, $L = 400 \mu\text{H}$, $V_{in} = 150 \text{ V}$.



Slika 2.

Rešenje 2. zadatka



Slika 2.1

Na Slici 2.1 prikazana je topologija pretvarača kada je uključen prekidač S . Za vreme dok je prekidač S uključen, u magnetnom kolu transformatora, fluks raste od nule do maksimalne vrednosti. Napon na namotaju primara jednak je V_{in} , pa će napon na tercijaru biti jednak:

$$V_3^{(1)} = V_{in} \frac{N}{3N} = 50 \text{ V}. \quad (2.1)$$

Prisustvo pozitivnog napona na tercijarnom namotaju usloviće diodu D_2 da provede. Napon

na sekundaru jednak je:

$$V_2^{(1)} = V_{in} \frac{4N}{3N} = 200 \text{ V.} \quad (2.2)$$

Napon koji blokira dioda D_1 jednak je:

$$V_{D1}^{(1)} = V_2^{(1)} + V_{in} = 350 \text{ V.} \quad (2.3)$$

Dioda D_3 je inverzno polarisana naponom:

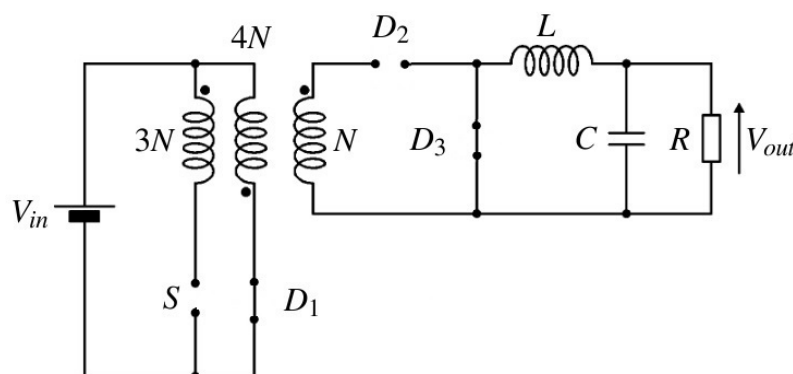
$$V_{D3}^{(1)} = V_3^{(1)} = 50 \text{ V.} \quad (2.4)$$

Promena magnetskog fluksa u jezgru transformatora za vreme dok je uključen prekidač S jednaka je:

$$\Delta\Phi = \frac{V_{in}}{3N}DT. \quad (2.5)$$

Za vreme intervala vremena tokom kog je isključen prekidač S , topologija pretvarača odgovara topologiji sa Slike 2.2. Nakon što se isključio prekidač S , provešće dioda D_1 . Magnetska energija nagomilana u jezgru transformatora sada se vraća u izvor V_{in} . Napon na primarnom namotaju jednak je:

$$V_1^{(2)} = -V_{in} \frac{3N}{4N} = -112.5 \text{ V.} \quad (2.6)$$



Slika 2.2

Prekidač S blokiraće napon:

$$V_S^{(2)} = V_{in} - V_1^{(2)} = 262.5 \text{ V.} \quad (2.7)$$

Napon na tercijarnom namotaju je negativan, i iznosi:

$$V_3^{(2)} = -V_{in} \frac{N}{4N} = -37.5 \text{ V.} \quad (2.8)$$

Napon između katode i anode diode D_2 jednak je:

$$V_{D2}^{(2)} = -V_3^{(2)} = 37.5 \text{ V.} \quad (2.9)$$

Promena magnetskog fluksa u jezgru transformatora za vreme dok je isključen prekidač S jednaka je:

$$\Delta\Phi = \frac{V_{in}}{4N} t_x, \quad (2.10)$$

gde je t_x vreme koje je potrebno transformatoru da se razmagnet, i taj interval vremena mora biti manji od $(1 - D)T$, da bi se transformator razmagnetio pre početka sledećeg perioda, tj. da transformator ne uđe u zasićenje. Promena fluksa u transformatoru za vreme dok je isključen prekidač S jednaka je promeni fluksa tokom intervala vremena dok je prekidač bio uključen, pa važi:

$$t_x = \frac{4N}{3N} DT = 0.533DT \leq (1 - D)T. \quad (2.11)$$

Pretpostavimo sada da je struja prigušnice L neprekidna, tj. da čoper radi u neprekidnom režimu. Srednja vrednost napona prigušnice u ustaljenom stanju jednaka je nuli, pa važi:

$$(V_3^{(1)} - V_{out})DT = V_{out}(1 - D)T. \quad (2.12)$$

Iz prethodne jednačine dobija se izraz za izlazni napon:

$$V_{out} = V_3^{(1)} D = 20 \text{ V.} \quad (2.13)$$

Izlazna struja jednaka je:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R} = 1 \text{ A.} \quad (2.14)$$

Kod ovog čopera, srednja vrednost struje prigušnice u ustaljenom stanju jednaka je izlaznoj struji. Rippl struje prigušnice jednak je:

$$\Delta I_L = \frac{V_3^{(1)} - V_{out}}{L} DT = 3 \text{ A.} \quad (2.15)$$

Uslov neprekidnosti rada čopera je:

$$I_L^{sr} = I_{out} \geq \frac{\Delta I_L}{2}. \quad (2.16)$$

Kako ovaj uslov nije ispunjen, može se zaključiti da je struja prigušnice L prekidna. Rippl struje prigušnice može se izraziti i na sledeći način:

$$\Delta I_L = \frac{V_{out}}{L} t_y, \quad (2.17)$$

gde je t_y interval vremena tokom kog struja prigušnice padne sa maksimalne vrednosti na nulu. Srednja vrednost struje prigušnice u prekidnom režimu rada jednaka je:

$$I_L^{sr} = \frac{\Delta I_L (DT + t_y)}{2T}. \quad (2.18)$$

Kao što je već napomenuto, u ustaljenom stanju srednja vrednost struje prigušnice jednaka je izlaznoj struji, pa važi:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R} = \frac{\Delta I_L (DT + t_y)}{2T}. \quad (2.19)$$

Kada primenimo izraz (2.17) na izraz (2.19), dobija se:

$$\frac{V_{out}}{R} = \frac{V_{out} t_y (DT + t_y)}{2TL}. \quad (2.20)$$

Iz prethodnog izraza može se izvesti sledeća kvadratna jednačina:

$$t_y^2 + DT t_y - \frac{2TL}{R} = 0. \quad (2.21)$$

Jedno rešenje ove kvadratne jednačine je negativno, a drugo pozitivno, koje se i usvaja.

$$t_y = 0.4633T. \quad (2.22)$$

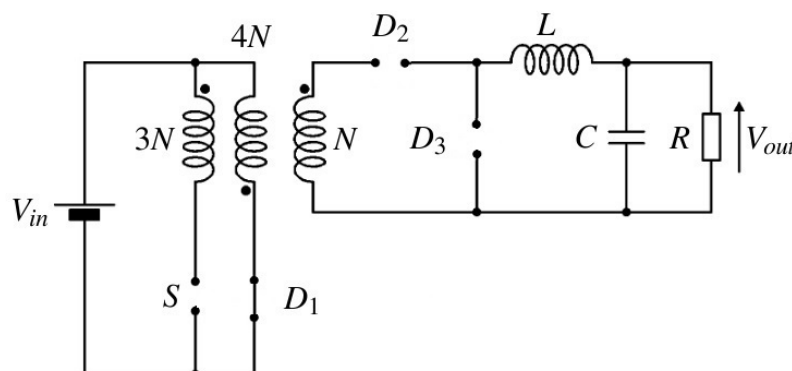
Srednja vrednost napona na prigušnici u ustaljenom stanju jednaka nuli:

$$(V_3^{(1)} - V_{out})DT = V_{out}t_y. \quad (2.23)$$

Iz prethodnog izraza dobija se vrednost izlaznog napona:

$$V_{out} = \frac{DT}{DT + t_y} V_{in} = 23.167 \text{ V}. \quad (2.24)$$

Važi da je $t_x \geq t_y$, pa se može zaključiti da će struja prigušnice pasti na nuli pre nego što se transformator razmagnet. Za režim rada kada je struja prigušnice pala na nulu, a transformator se i dalje razmagnećuje, čoperu odgovara topologija sa Slike 2.3.



Slika 2.3

Razlika u odnosu na prethodnu topologiju (Slika 2.2) je to što dioda D_3 više ne provodi, jer je inverzno polarisana naponom:

$$V_{D3}^{(3)} = V_{out} = 23.167 \text{ V}. \quad (2.25)$$

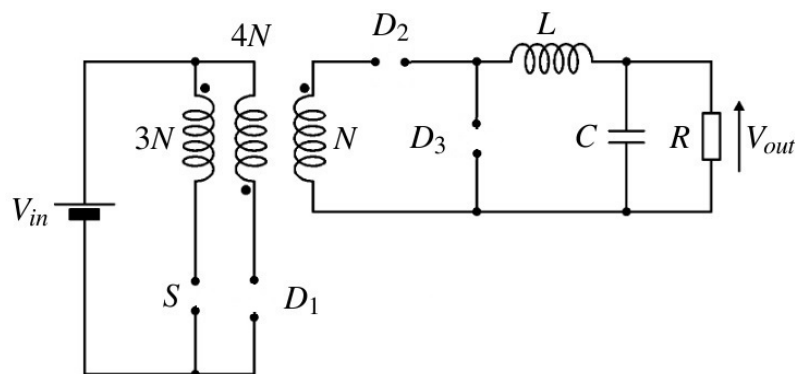
Napon koji blokira dioda D_2 tokom ovog režima jednak je:

$$V_{D2}^{(3)} = V_{out} - V_3^{(2)} = 60.667 \text{ V}. \quad (2.26)$$

U ovom režimu, dioda D_1 provodi, dok je napon na prekidaču S i dalje jednak:

$$V_S^{(2)} = V_{in} - V_1^{(2)} = 262.5 \text{ V}. \quad (2.27)$$

Kada se transformator razmagnet, pretvaraču odgovara topologija sa Slike 2.4., i u ovom režimu rada ne provodi ni jedan prekidački element.



Slika 2.4

U ovom režimu rada, prekidač S i dioda D_1 blokiraju napon $V_S^{(4)} = V_{D1}^{(4)} = V_{in} = 150$ V, dok diode D_2 i D_3 blokiraju napon $V_{D2}^{(4)} = V_{D3}^{(4)} = V_{out} = 23.167$ V. Konačno, za napone koje blokiraju prekidač i diode D_1 , D_2 i D_3 važi:

$$V_S(t) = \begin{cases} 0 \text{ V} & , 0 \leq t \leq DT \\ 262.5 \text{ V} & , DT \leq t \leq DT + t_y \\ 262.5 \text{ V} & , DT + t_y \leq t \leq DT + t_x \\ 150 \text{ V} & , DT + t_x \leq t \leq T \end{cases}, \quad (2.28)$$

$$V_{D1}(t) = \begin{cases} 350 \text{ V} & , 0 \leq t \leq DT \\ 0 \text{ V} & , DT \leq t \leq DT + t_y \\ 0 \text{ V} & , DT + t_y \leq t \leq DT + t_x \\ 150 \text{ V} & , DT + t_x \leq t \leq T \end{cases}, \quad (2.29)$$

$$V_{D2}(t) = \begin{cases} 0 \text{ V} & , 0 \leq t \leq DT \\ 37.5 \text{ V} & , DT \leq t \leq DT + t_y \\ 60.667 \text{ V} & , DT + t_y \leq t \leq DT + t_x \\ 23.167 \text{ V} & , DT + t_x \leq t \leq T \end{cases}, \quad (2.30)$$

$$V_{D3}(t) = \begin{cases} 50 \text{ V} & , 0 \leq t \leq DT \\ 0 \text{ V} & , DT \leq t \leq DT + t_y \\ 23.167 \text{ V} & , DT + t_y \leq t \leq DT + t_x \\ 23.167 \text{ V} & , DT + t_x \leq t \leq T \end{cases} \quad (2.31)$$