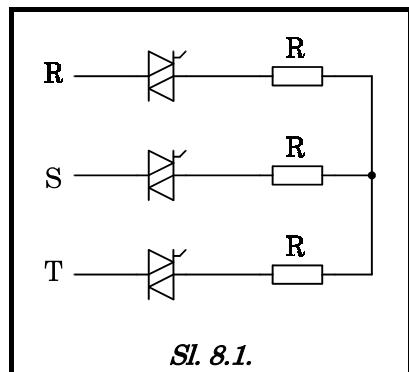


8

Otporna peć sačinjena od tri grejača otpornosti $R=2\Omega$ vezana u zvezdu, napaja se sa mreže $3 \times 380 \text{ V}; 50 \text{ Hz}$ preko tri fazna regulatora sa trijacima (slika 8.1.). Ugao paljenja je $\alpha = 90^\circ$, a impulsi za paljenje tiristora su kontinualni i traju od $\omega t = \alpha$ do $\omega t = \alpha + \pi/2$. Nacrtati talasni oblik napona na jednom grejaču, izračunati njegovu efektivnu vrednost i snagu peći.



Sl. 8.1.

NAPOMENA: Ugao paljenja α se računa u odnosu na prolazak faznog napona kroz nulu.

Prema dijagramu talasnog oblika napona na jednom grejaču (slika 8.2.) ima se:

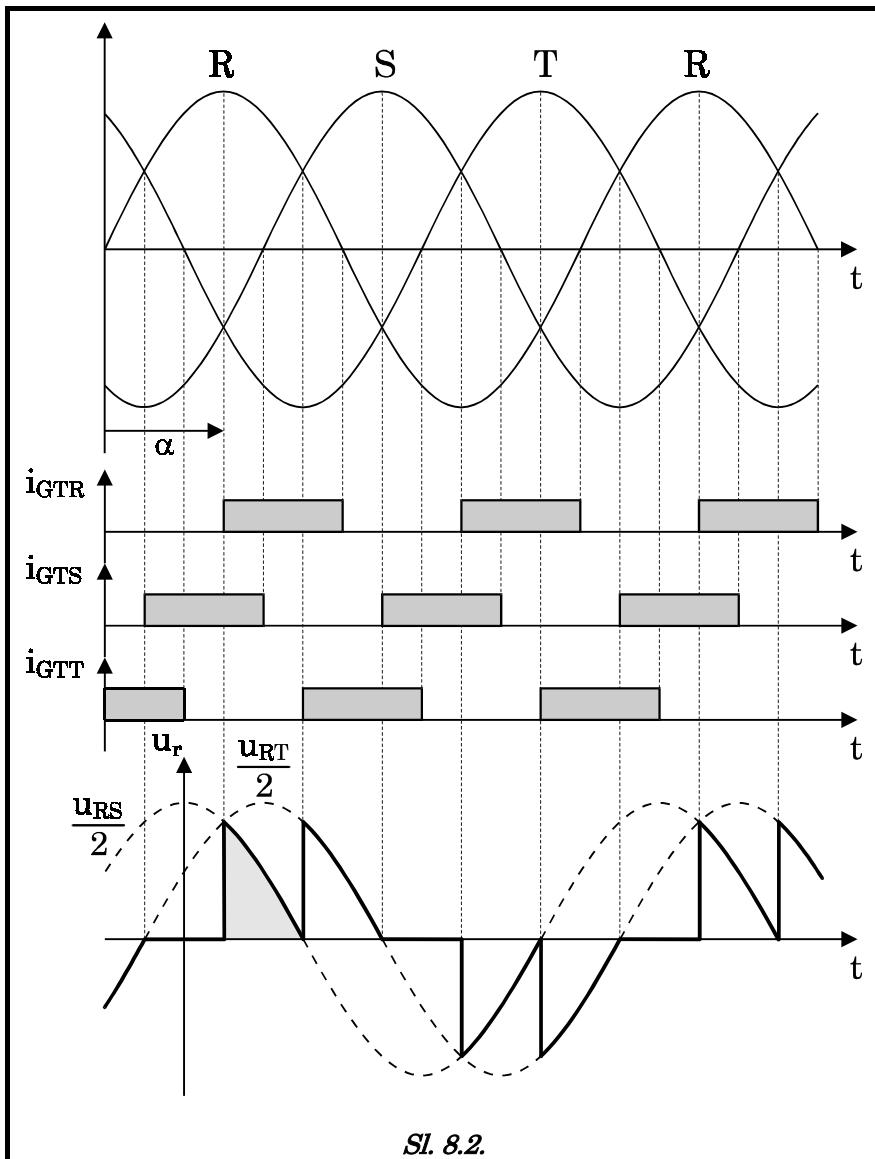
$$U_r = \sqrt{\frac{2}{T} \cdot 2 \cdot \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} \left(\frac{\sqrt{2} U}{2} \right)^2 \cos^2(\omega t) dt}$$

$$U_r = \sqrt{2} U \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{T}{4}} \frac{1 + \cos(2\omega t)}{2} dt}$$

$$U_r = \sqrt{2} U \sqrt{\left(\frac{1}{12} - \frac{\sqrt{3}}{16 \cdot \pi} \right)} = 118.8 \text{ V}.$$

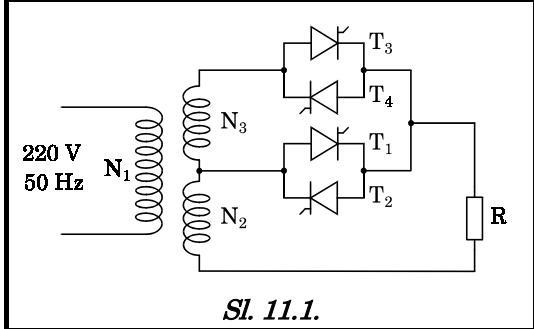
Snaga peći je:

$$P = 3 \cdot \frac{U_r^2}{R} = 3 \cdot \frac{118.8^2}{2} = 21.17 \text{ kW}.$$



11

Izračunati efektivnu vrednost napona na otpornom opterećenju koji se podešava faznim regulatorom prikazanim na slici 11.1. Ugao upravljanja tiristorima T_1 i T_2 je $\alpha_1 = 30^\circ$, a ugao upravljanja tiristorima T_3 i T_4 je $\alpha_2 = 120^\circ$. Prenosni odnos transformatora je takav da je: $N_2 = 2N_1/3$ i $N_3 = N_1/3$.



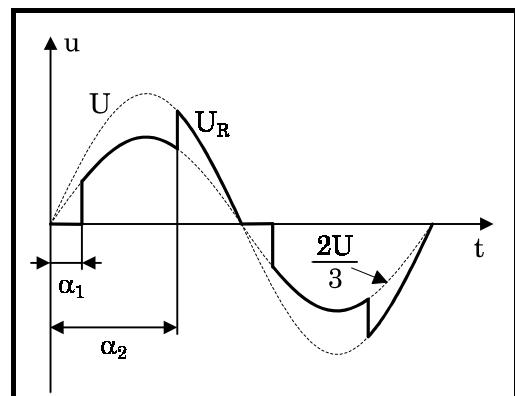
Sl. 11.1.

Prema talasnom obliku napona na opterećenju prikazanom na slici 11.2., efektivna vrednost napona na opterećenju je:

$$U_R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{2\pi}{3}} \left[\frac{2}{3} \sqrt{2} U \sin(x) \right]^2 dx + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} \left[\sqrt{2} U \sin(x) \right]^2 dx}$$

$$U_R = \sqrt{2} U \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{4}{9} \cdot \frac{1-\cos(2x)}{2} dx + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1-\cos(2x)}{2} dx}$$

$$U_R = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot \pi}{18} - \frac{\sqrt{3}}{72}} = 161.702 \text{ V.}$$

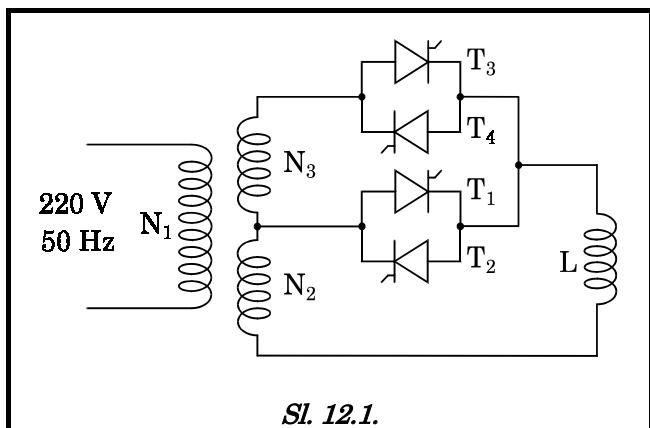


Sl. 11.2.

12

Izračunati efektivnu vrednost napona na induktivnom opterećenju koji se podešava faznim regulatorom prikazanim na slici 12.1. Ugao upravljanja tiristorima T_1 i T_2 je $\alpha_1 = 90^\circ$, a ugao upravljanja tiristorima T_3 i T_4 je $\alpha_2 = 120^\circ$. Prenosni odnos transformatora je takav da je:

$$N_1 : N_2 : N_3 = 2 : 1 : 1.$$



Sl. 12.1.

Napon na prigušnici je:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt},$$

odakle sledi da je promena struje kroz prigušnicu srazmerna površini napona na prigušnici:

$$\Delta I_L = \frac{1}{L} \int u_L dt.$$

Napon i struja opterećenja su prikazani na slici 12.2. Ukupna promena struje kroz prigušnicu u periodu od "0" do " β " jednaka je nuli, pa je i površina napona na prigušnici jednaka nuli ($S_+ = S_-$):

$$\int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{\sqrt{2} U}{2} \cos(x) dx + \int_{\frac{\pi}{6}}^{\beta} \sqrt{2} U \cos(x) dx = 0.$$

Rešavanjem ove jednačine dobija se:

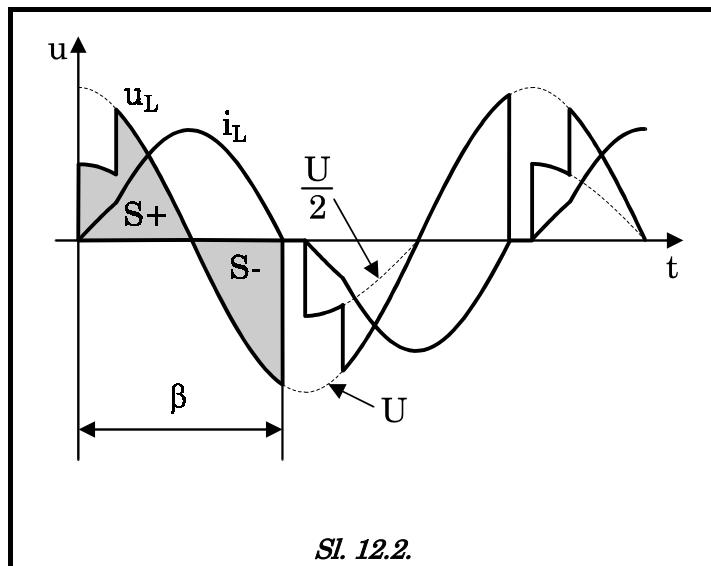
$$\sin(\beta) = \frac{1}{4} \quad \left(\beta > \frac{\pi}{2} \right) \Rightarrow \beta = 165.5^0.$$

Efektivna vrednost napona na opterećenju je:

$$U_L = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{6}} \left[\frac{\sqrt{2} U}{2} \cos(x) \right]^2 dx + \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \left[\sqrt{2} U \cos(x) \right]^2 dx \right]}.$$

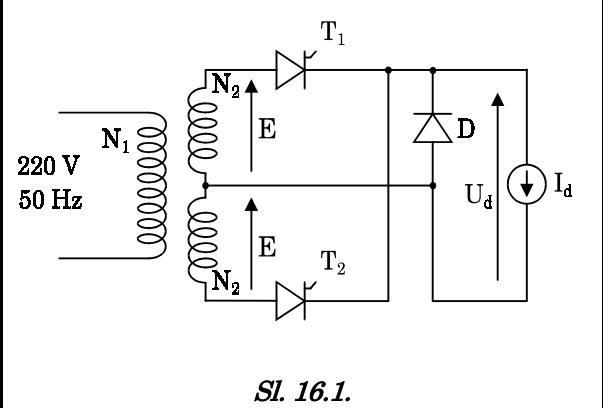
Rešavanjem integrala i zamenom brojnih vrednosti dobija se:

$$U_L = 172.408 V.$$



16

Monofazni ispravljač sa transformatorom sa srednjom tačkom i zamajnom diodom priključen je na mrežu 220 V; 50 Hz, a opterećenje se može predstaviti strujnim ponorom $I_d = 200 \text{ A}$ (slika 16.1.). Induktivnost rasipanja transformatora je $L_k = 1 \text{ mH}$. Odrediti:

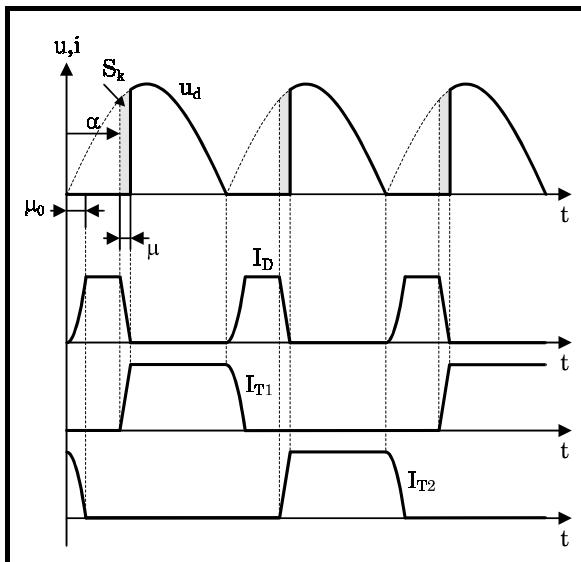


Sl. 16.1.

a) odnos transformacije transformatora tako da jednosmerni napon pri minimalnom opterećenju ($I_d \approx 0$), i pri $\alpha = 0^\circ$ bude $U_{d0} = 110 \text{ V}$;

b) ugao paljenja (α) i ugao komutacije (μ) ako je napon na opterećenju $U_d = 80 \text{ V}$.

Zbog postojanja zamajne diode, trenutna vrednost napona na opterećenju ne može biti negativna, pa je prema slici 16.2.:



Sl. 16.2.

$$U_d = \frac{\omega}{\pi} \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} \sqrt{2} E \sin(\omega t) dt - \frac{X_k I_d}{\pi} = \frac{\sqrt{2} E}{\pi} [1 + \cos(\alpha)] - \frac{X_k I_d}{\pi}.$$

a) Za $\alpha = 0^0$ i $I_d \approx 0$ potrebna vrednost napona na jednom sekundaru transformatora je:

$$E = \frac{\pi U_d}{2\sqrt{2}} = 1222 V,$$

tako da transformator treba da ima prenosni odnos:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U}{E} = \frac{220 V}{122.2 V} = 1.8.$$

b) Da bi se napon na opterećenju podesio na vrednost $U_d = 80 V$ potrebno je postaviti ugao paljenja tiristora na vrednost:

$$\alpha = \arccos \left[\frac{\pi U_d + X_k I_d}{\sqrt{2} E} - 1 \right] = 35.1^0,$$

tada je ugao komutacije:

$$\mu = \arccos \left[\cos(\alpha) - \frac{X_k I_d}{\sqrt{2} E} \right] - \alpha = 27.9^0.$$

18

Baterija čiji se napon menja u granicama $U_B = 40 \text{ V} \dots 60 \text{ V}$ puni se preko monofaznog mosnog poluupravljivog ispravljača (slika 18.1.). Ispravljač je preko transformatora vezan na mrežu $220 \text{ V} \pm 10\% ; 50 \text{ Hz}$. Struja punjenja baterije je $I_d = 100 \text{ A}$, a induktivnost rasipanja transformatora je $L_K = 1 \text{ mH}$.

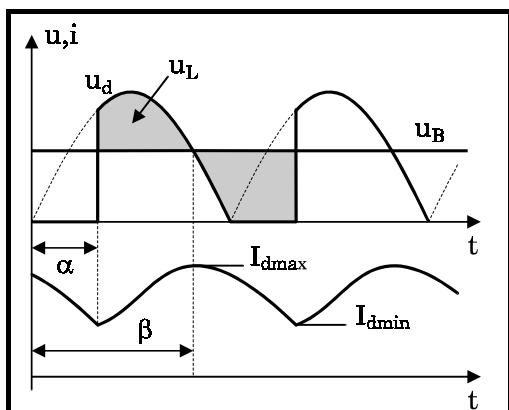
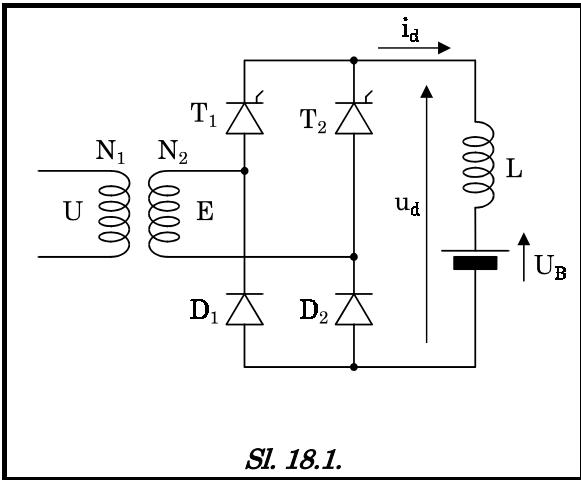
Odrediti:

- odnos transformacije transformatora i potreban opseg promene ugla paljenja, smatrajući da jednosmerna struja nema naizmeničnu komponentu;
- induktivnost prigušnice vezane na red sa baterijom tako da pri maksimalnom naponu mreže i maksimalnom naponu baterije razlika između maksimalne i minimalne trenutne vrednosti struje punjenja baterije ne bude veća od 50 A . Uticaj komutacije se zanemaruje.

- Za monofazni poluupravljivi mosni ispravljač srednja vrednost napona na opterećenju je:

$$U_d = \frac{\sqrt{2} E}{\pi} [1 + \cos(\alpha)] - \frac{X_k I_d}{\pi} .$$

Napon i struja opterećenja su prikazani na slici 18.2. Prenosni odnos transformatora treba odrediti tako da se punjenje baterije može vršiti u svim uslovima. Kako se povećanjem ugla paljenja napon na opterećenju smanjuje, prenosni odnos transfor-



Sl. 18.2.

matora se bira prema minimalnom uglu paljenja ($\alpha = 0^0$), minimalnom mrežnom naponu ($U = 0.9 \cdot 220 \text{ V}$) i maksimalnom naponu baterije:

$$U_d = 60 \text{ V} = \frac{2\sqrt{2} E_{\min}}{\pi} - \frac{\omega L_k I_d}{\pi},$$

odnosno:

$$E_{\min} = 77.75 \text{ V},$$

pa je prenosni odnos transformatora:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{\min}}{E_{\min}} = \frac{0.9 \cdot 220 \text{ V}}{77.75 \text{ V}} = 2.55.$$

Maksimalni ugao paljenja će biti potreban kada je mrežni napon maksimalan, a napon baterije minimalan. Napon sekundara transformatora je tada:

$$E_{\max} = \frac{1.1 \cdot 220 \text{ V}}{2.55} = 95 \text{ V},$$

pa je maksimalni ugao paljenja:

$$\alpha_{\max} = \arccos \left[\frac{\pi U_{B\min} + X_k I_d}{\sqrt{2} E} - 1 \right] = 80.3^0.$$

b) Pri maksimalnom naponu mreže ($E = E_{\max}$) i maksimalnom naponu baterije ($U_B = U_{B\max}$) ugao paljenja je:

$$\alpha = \arccos \left[\frac{\pi U_{B\max} + X_k I_d}{\sqrt{2} E} - 1 \right] = 50.5^0.$$

Trenutna vrednost napona na prigušnici u jednosmernom kolu ($u_L = u_d - u_B$) biće jednaka nuli u trenutku $\omega t = \beta$:

$$U_B = \sqrt{2} E \sin(\beta) \quad \Rightarrow \quad \beta = \arcsin \left[\frac{U_B}{\sqrt{2} E} \right] = 153.5^0.$$

Napon na prigušnici (L) je pozitivan u periodu od "α" do "β" i tada će jednosmerna struja da raste od minimalne do maksimalne vrednosti:

$$L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} E \sin(\omega t) - U_B \quad \Rightarrow \quad \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} L di = L \Delta I = \int_{\alpha}^{\beta} \left[\sqrt{2} E \sin(\omega t) - U_B \right] dt$$
$$L \Delta I = \frac{\sqrt{2} E}{\omega} [\cos(\alpha) - \cos(\beta)] - \frac{\beta - \alpha}{\omega} U_B = 312 \text{ mVs.}$$

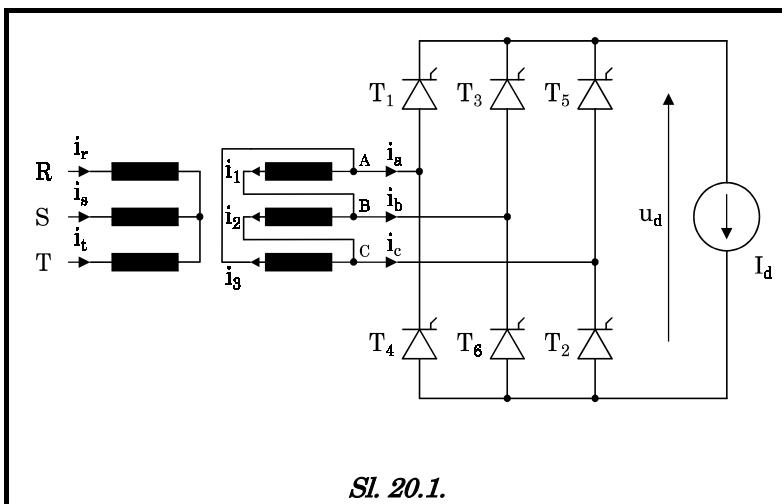
Potrebna vrednost induktivnosti prigušnice (L) je:

$$L \geq \frac{312 \text{ mVs}}{50 \text{ A}} = 6.24 \text{ mH.}$$

20

Trofazni punoupravljeni mosni ispravljac snabdeva opterećenje koje se može predstaviti strujnim ponorom $I_d = 100 \text{ A}$, pri naponu $U_d = 100 \text{ V}$ (slika 20.1.). Ispravljac je na mrežu $3 \times 380 \text{ V}; 50 \text{ Hz}$ vezan preko transformatora u spredi YD. Odnos brojeva navojaka primara i sekundara transformatora je $1 : 1$. Uticaj komutacije se zanemaruje.

- Izračunati ugao paljenja tiristora.
- Nacrtati talasne oblike struja kroz namotaje transformatora i izračunati njihove efektivne vrednosti.



- Za trofazni punoupravljeni mosni ispravljac srednja vrednost jednosmernog napona (zanemarujući uticaj komutacije) je:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}E}{\pi} \cos(\alpha).$$

Kako je fazni napon na sekundaru transformatora $E = 220/\sqrt{3} \text{ V}$, onda je:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\pi U_d}{3\sqrt{6}E}\right) = 70.33^0.$$

- S obzirom da su poznate struje i_a, i_b, i_c potrebno je naći izraze za struje i_1, i_2, i_3 kroz namotaje sekundara transformatora:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

Zbir struja u trouglu je jednak nuli

$$i_1 - i_3 = i_a$$

Zbir struja u čvoru "A" je jednak nuli

$$i_2 - i_1 = i_b$$

Zbir struja u čvoru "B" je jednak nuli.

Determinanta ovog sistema jednačina je:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 3.$$

Determinanta za struju i_1 je:

$$\Delta i_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ i_a & 0 & -1 \\ i_b & 1 & 0 \end{vmatrix} = i_a - i_b \quad \Rightarrow \quad i_1 = \frac{1}{3}(i_a - i_b).$$

Determinanta za struju i_2 je:

$$\Delta i_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & i_a & -1 \\ -1 & i_b & 0 \end{vmatrix} = 2i_b + i_a.$$

Imajući u vidu da je $i_a + i_b + i_c = 0$ odnosno $i_a = -i_b - i_c$, onda je:

$$\Delta i_2 = i_b - i_c \quad \Rightarrow \quad i_2 = \frac{1}{3}(i_b - i_c).$$

Determinanta za struju i_3 je:

$$\Delta i_3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & i_a \\ -1 & 1 & i_b \end{vmatrix} = -2i_a - i_b.$$

Imajući u vidu da je $i_a + i_b + i_c = 0$ odnosno $i_b = -i_a - i_c$, onda je:

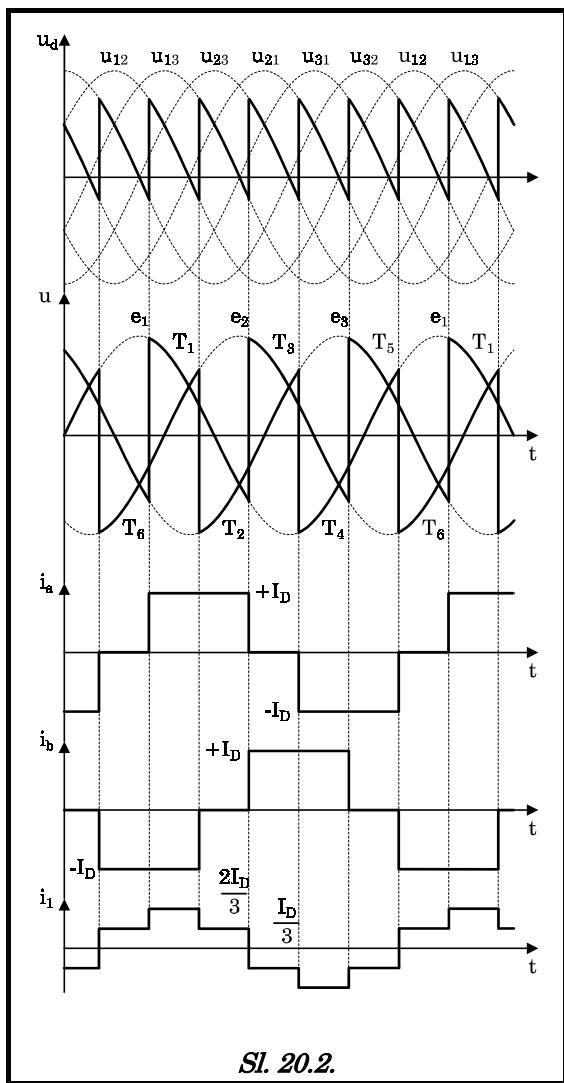
$$\Delta i_3 = i_c - i_a \quad \Rightarrow \quad i_3 = \frac{1}{3}(i_c - i_a).$$

Na osnovu ovih rešenja može se nacrtati dijagram struja prikazan na slici 20.2. Sa tog dijagrama sledi da je efektivna vrednost struje kroz sekundarne namotaje transformatora:

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T i_1^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \left[\int_0^{\frac{T}{6}} \left(\frac{1}{3} I_d \right)^2 dt + \int_{\frac{T}{6}}^{\frac{3}{2} T} \left(\frac{2}{3} I_d \right)^2 dt + \int_{\frac{3}{2} T}^T \left(\frac{1}{3} I_d \right)^2 dt \right]} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot 100 A = 47.14 A.$$

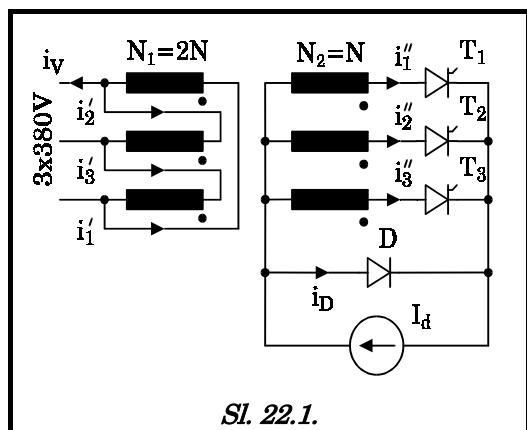
S obzirom da je talasni oblik struje kroz primarne i sekundarne namotaje isti jer struja kroz sekundarne namotaje transformatora nema jednosmernu komponentu, a prenosni odnos transformatora 1:1, onda je $I_1 = I_r$.



22

Za ispravljač prikazan na slici odrediti:

- srednju vrednost struje jednog tiristora;
- srednju vrednost struje zamajne diode;
- efektivnu vrednost struje sekundara transformatora;
- efektivnu vrednost struje primara transformatora;
- efektivnu vrednost struje u priključnom vodu.



Sl. 22.1.

Zanemariti uticaj struje magnećenja transformatora i impedanse rasipanja transformatora. Ugao upravljanja je $\alpha = 90^\circ$.

Zbir magnetopobudnih sila po zatvorenom magnetnom putu jednak je nuli:

$$-N_1i'_1 + N_2i''_1 - N_2i''_2 + N_1i'_2 = 0$$

$$-N_1i'_1 + N_2i''_1 - N_2i''_3 + N_1i'_3 = 0 .$$

Zbir struja u trouglu jednak je nuli:

$$i'_1 + i'_2 + i'_3 = 0 .$$

Rešavanjem ove tri jednačine dobijaju se izrazi za struje primara transformatora:

$$i'_1 = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{3} (2i''_1 - i''_2 - i''_3)$$

$$i'_2 = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{3} (2i''_2 - i''_3 - i''_1)$$

$$i'_3 = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{3} (2i''_3 - i''_1 - i''_2)$$

gde je $m = N_1/N_2 = 2N/N = 2$.

Na osnovu ovih izraza mogu se nacrtati dijagrami struja prikazani na slici 22.2. Sa slike se vidi da je:

$$I_{TAVG} = \frac{I_d \cdot \frac{T}{6}}{T} = \frac{I_d}{6}$$

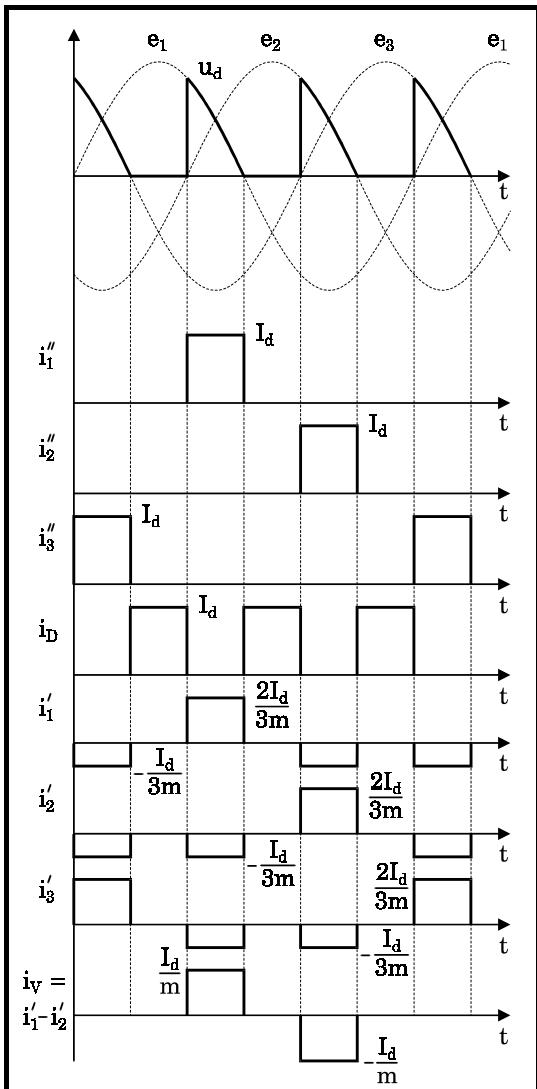
$$I_{DAVG} = \frac{3 \cdot I_d \cdot \frac{T}{6}}{T} = \frac{I_d}{2}$$

$$I'' = \sqrt{\frac{T}{T} \int_0^T I_d^2 dt} = \frac{I_d}{\sqrt{6}}$$

$$I' = \sqrt{2 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \frac{I_d^2}{9 \cdot m^2} dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{4 \cdot I_d^2}{9 \cdot m^2} dt}$$

$$I' = \frac{I_d}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{27} + \frac{2}{27}} = \frac{I_d}{6}$$

$$I_V = \sqrt{2 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \frac{I_d^2}{m^2} dt} = \frac{I_d}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{I_d}{2\sqrt{3}}$$



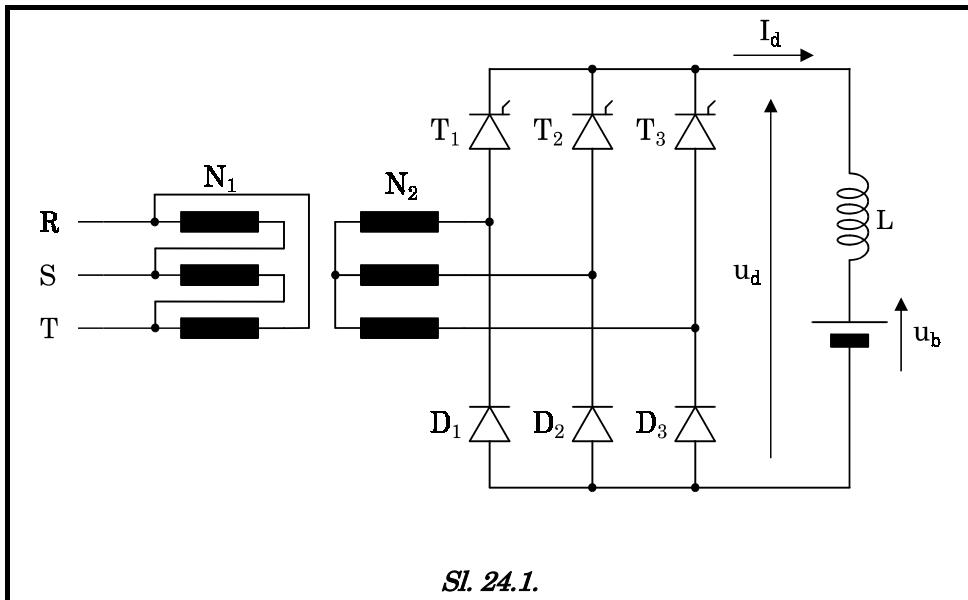
Sl. 22.2.

24

Akumulatorska baterija, čiji se napon menja u granicama $U_b = 180 \text{ V} \dots 240 \text{ V}$, puni se preko trofaznog mosnog poluupravljivog ispravljača (slika 24.1.). Struja punjenja se podešava u granicama $I_d = 0 \dots 200 \text{ A}$, a na red sa baterijom je vezana prigušnica dovoljno velike induktivnosti da se može zanemariti naizmenična komponenta jednosmerne struje. Ispravljač je vezan na mrežu $3 \times 380 \text{ V} \pm 15\% ; 50 \text{ Hz}$ preko transformatora u spredi DY. Induktivnost rasipanja transformatora je $L_K = 2 \text{ mH}$.

Odrediti:

- prenosni odnos transformatora;
- opseg promene ugla paljenja "α".



Sl. 24.1.

- U ustaljenom stanju srednja vrednost napona na prigušnici jednak je nuli pa je srednja vrednost napona na izlazu ispravljača jednak naponu baterije:

$$U_d = U_b = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} [1 + \cos(\alpha)] - \frac{3X_K I_d}{\pi}.$$

Najveći sekundarni napon transformatora je potreban kada je napon baterije $U_b = 240 \text{ V}$ i struja punjenja $I_d = 200 \text{ A}$, a ugao paljenja će tada biti minimalan.

Za minimalni ugao paljenja se usvaja $\alpha = 0^0$ (može i neka druga vrednost, čime će se promeniti prenosni odnos transformatora i α_{\max}). Potreban sekundarni napon transformatora je:

$$E = \frac{\pi U_b + 3X_K I_d}{3\sqrt{6}} = \frac{\pi \cdot 240 V + 3 \cdot 100 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^{-3} H \cdot 200 A}{3\sqrt{6}} = 153.9 V.$$

Ovaj sekundarni napon treba ostvariti i kada je mrežni napon minimalan, tako da je potrebno da prenosni odnos transformatora bude:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{\min}}{E} = \frac{0.85 \cdot 380 V}{154 V} = 2.1.$$

b) Najveći ugao paljenja će biti potreban kada je $U_b = U_{b\min} = 180 V$, $I_d \approx 0$ i kada mrežni napon ima maksimalnu vrednost. Pri ovom mrežnom naponu sekundarni napon transformatora iznosi:

$$E = \frac{U_{\max}}{m} = \frac{1.15 \cdot 380 V}{2.1} = 208 V.$$

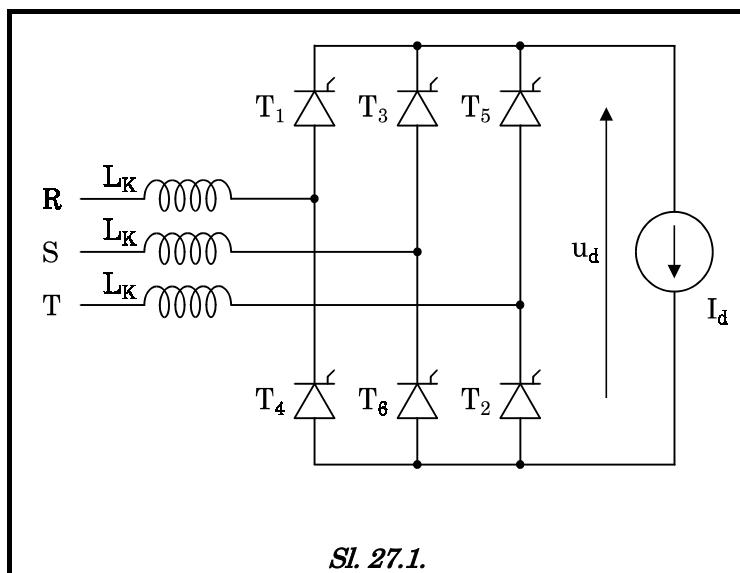
Tada je ugao paljenja:

$$\alpha_{\max} = \arccos \left(\frac{2\pi U_b}{3\sqrt{6} E} - 1 \right) = 105^0.$$

27

Trofazni punoupravljeni mosni ispravljač, opterećen strujnim ponorom $I_d = 100 \text{ A}$, priključen je na mrežu $3 \times 380 \text{ V}$; 50 Hz preko tri komutacione prigušnice čija je induktivnost $L_K = 0.5 \text{ mH}$. Izračunati:

- srednju vrednost napona na opterećenju za uglove paljenja $\alpha = 30^\circ$ i $\alpha = 90^\circ$;
- vreme komutacije za ove uglove paljenja;
- nacrtati talasne oblike napona na opterećenju i vremenski raspored impulsa za paljenje tiristora kada se ugao paljenja naglo promeni sa $\alpha = 30^\circ$ na $\alpha = 90^\circ$.



- Srednja vrednost napona na opterećenju trofaznog mosnog punoupravljivog ispravljača je:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}E}{\pi} \cos(\alpha) - \frac{3X_K I_d}{\pi},$$

pa je:

$$U_d(30^\circ) = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot 220 \text{ V}}{\pi} \cdot \cos(30^\circ) - \frac{3 \cdot 100 \cdot \pi \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \text{ A}}{\pi} = 430.66 \text{ V}$$

$$U_d(90^\circ) = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot 220 \text{ V}}{\pi} \cdot \cos(90^\circ) - \frac{3 \cdot 100 \cdot \pi \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \text{ A}}{\pi} = -15 \text{ V}.$$

b) U toku komutacije, kada vode dva tiristora, napon na odgovarajućim komutacionim prigušnicama jednak je polovini linijskog napona:

$$u_k = \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{3} E \sin(\omega t).$$

Komutaciona površina koja odgovara promeni fluksa je:

$$S_k = L_k I_d = \frac{\sqrt{6}E}{2} \int_{\alpha}^{\beta} \sin(\omega t) dt = \frac{\sqrt{6}E}{2\omega} [\cos(\alpha) - \cos(\beta)].$$

Odavde sledi da je:

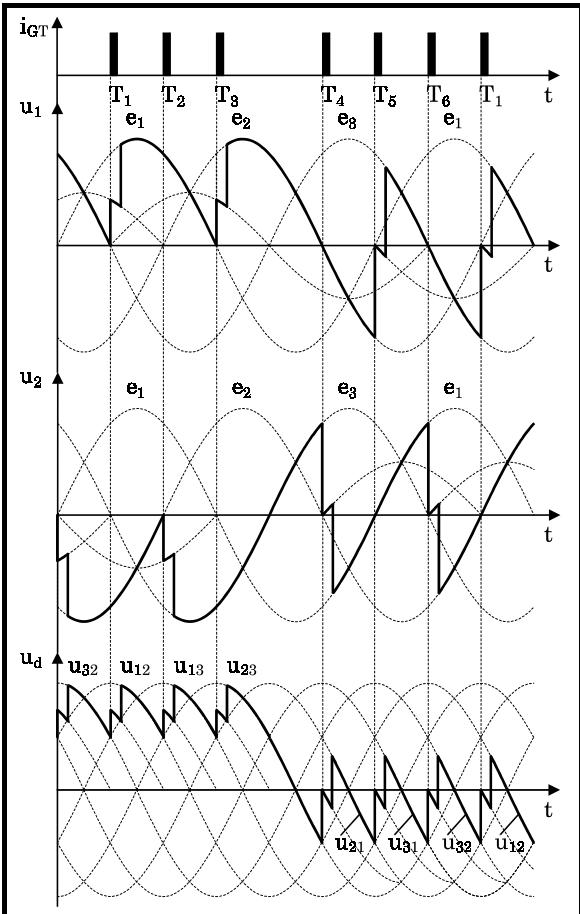
$$\cos(\beta) = \cos(\alpha) - \frac{2X_k I_d}{\sqrt{6}E}.$$

Zamenom brojnih vrednosti dobija se:

$$\alpha = 30^\circ \Rightarrow \mu = 6.12^\circ \Rightarrow t_k = 340 \mu s$$

$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow \mu = 3.34^\circ \Rightarrow t_k = 186 \mu s$$

Na slici 27.2. prikazan je talasni oblik napona na opterećenju i vremenski raspored imпуlsa za paljenje tiristora.

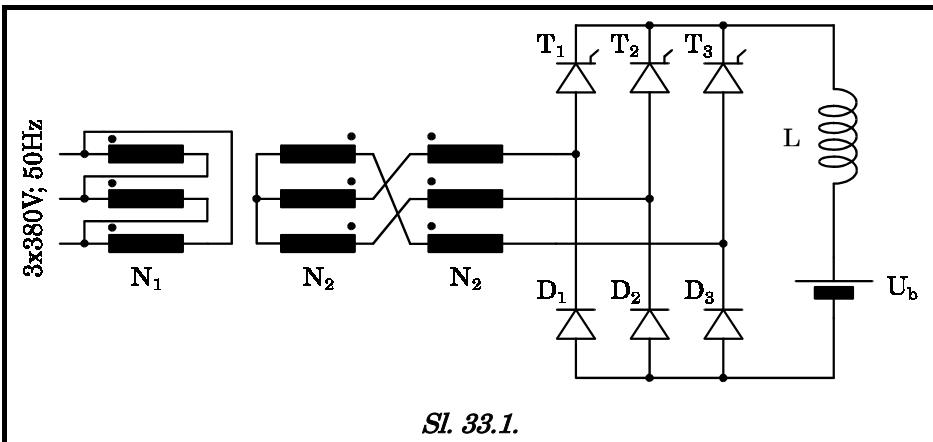


Sl. 27.2.

33

Akumulatorska baterija, čiji se napon menja u granicama $U_b = 100 \dots 140 \text{ V}$, puni se pomoću ispravljača prikazanog na slici 33.1.

Struja punjenja baterije je $I_d = 100 \text{ A}$, a induktivnost rasipanja transformatora je $L_k = 1 \text{ mH}$. Odrediti minimalno potrebnu snagu transformatora.



Sl. 33.1.

U ustaljenom stanju srednja vrednost napona na izlazu ispravljača mora biti jednaka naponu baterije:

$$U_b = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} [1 + \cos(\alpha)] - \frac{3X_k I_d}{\pi},$$

odnosno:

$$E \cdot [1 + \cos(\alpha)] = \left(U_b + \frac{3X_k I_d}{\pi} \right) \cdot \frac{2\pi}{3\sqrt{6}}.$$

Kada se maksimalnom strujom puni baterija maksimalnog napona onda ispravljač radi sa minimalnim uglom paljenja (α_{\min}). Iz prethodnog izraza se vidi da će, usvajanjem veće vrednosti za α_{\min} biti potreban veći napon na sekundaru transformatora pa samim tim i veća snaga transformatora. Minimalno potrebna snaga transformatora se dobija usvajanjem $\alpha_{\min} = 0^\circ$. U tom slučaju fazni napon sekundara transformatora treba da iznosi:

$$E = \left(U_b + \frac{3X_k I_d}{\pi} \right) \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{6}} = 72.7 \text{ V}.$$

Kao što je pokazano u zadatku 32. napon na jednoj sekciji sekundara transformatora treba da bude:

$$E_2 = \frac{E}{\sqrt{3}} = \frac{72.7 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 42 \text{ V},$$

pa je prenosni odnos transformatora:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{380 \text{ V}}{42 \text{ V}} = 9.05.$$

Efektivna vrednost struje kroz sekundarne namotaje transformatora je:

$$I'' = I_d \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 81.65 \text{ A}$$

a efektivna vrednost struje kroz primarne namotaje transformatora je:

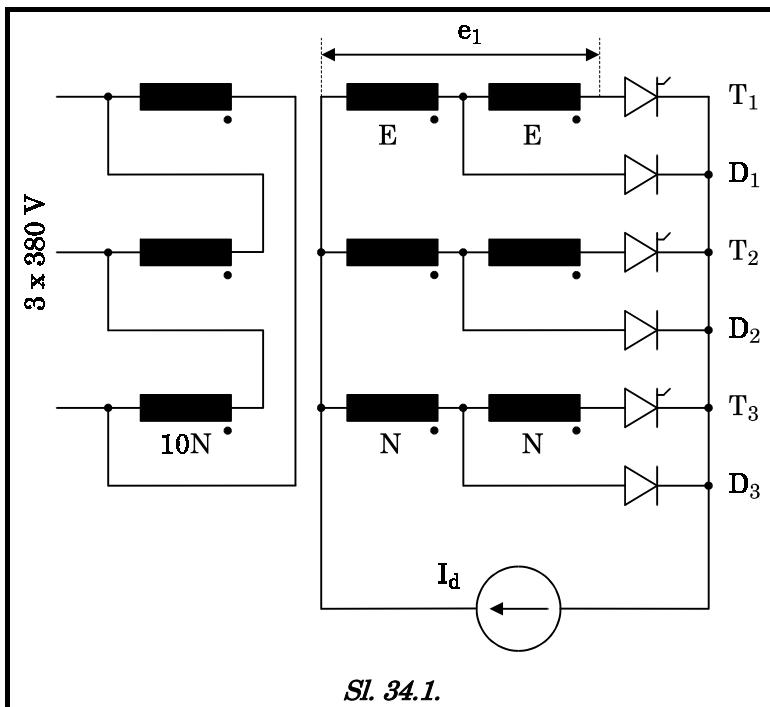
$$I' = \frac{I_d}{m} \cdot \sqrt{2} = 15.63 \text{ A}.$$

Minimalno potrebnu snagu transformatora je:

$$S = \frac{1}{2} \cdot (3 \cdot U \cdot I' + 6 \cdot E_2 \cdot I'') = \frac{3 \cdot 380 \cdot 15.63 + 6 \cdot 42 \cdot 81.65}{2} = 19.2 \text{ kVA}.$$

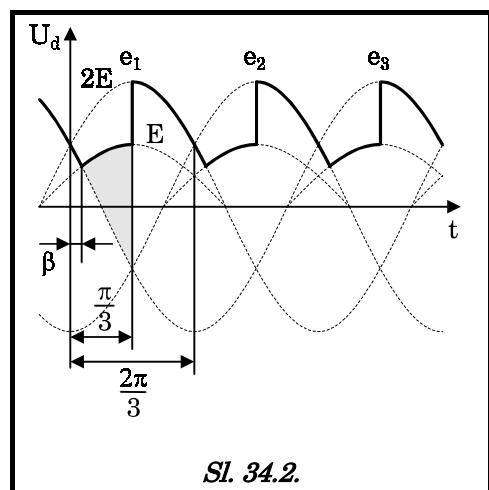
34

Za ispravljač prikazan na slici 34.1. odrediti srednju vrednost napona na opterećenju. Ugao paljenja tiristora je $\alpha=60^0$. Uticaj komutacije se zanemaruje.



Sl. 34.1.

Tiristor iz faze 3 provodi do trenutka $\omega t=\beta$. U tom trenutku napon na jednom namotaju iz faze 1 postaje veći od ukupnog napona faze 3 pa zbog toga provede dioda iz faze 1. Kada se uključi tiristor iz faze 1, dioda postaje inverzno polarisana i prestaje da provodi a dalje provodi samo tiristor sve dok napon na jednom namotaju faze 2 ne postane veći od ukupnog napona faze 1. Sa slike 34.2. se vidi da je:



Sl. 34.2.

$$2\sqrt{2}E \cos\left(\beta + \frac{\pi}{3}\right) = \sqrt{2}E \cos\left(\beta - \frac{\pi}{3}\right).$$

Rešavanjem ove jednačine dobija se:

$$\beta = 10.9^0.$$

Srednja vrednost napona na opterećenju je:

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \left[\int_0^{\beta} 2\sqrt{2}E \cos\left(x + \frac{\pi}{3}\right) dx + \int_{\beta}^{\frac{\pi}{3}} \sqrt{2}E \cos\left(x - \frac{\pi}{3}\right) dx + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} 2\sqrt{2}E \cos\left(x - \frac{\pi}{3}\right) dx \right].$$

Rešavanjem integrala dobija se:

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}E}{2\pi} \left[2\sin\left(\beta + \frac{\pi}{3}\right) - \sin\left(\beta - \frac{\pi}{3}\right) \right].$$

Isti ovaj izraz se mogao dobiti i na sledeći način: kada ne bi bilo dioda, srednja vrednost napona na opterećenju bila bi:

$$U_{d1} = \frac{3\sqrt{6} \cdot 2E}{2\pi} \cos(\alpha) = \frac{3\sqrt{6} \cdot E}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{3\sqrt{6}E}{\pi} \cdot \frac{1}{2} = \frac{3\sqrt{2}E}{2\pi} \cdot \sqrt{3}.$$

Kada se dodaju diode, napon na opterećenju se poveća za iznos koji odgovara šrafiranoj površini na slici 34.2.:

$$U_{d2} = \frac{3}{2\pi} \cdot \int_{\beta}^{\frac{\pi}{3}} \sqrt{2}E \cos\left(x - \frac{\pi}{3}\right) - 2\sqrt{2}E \cos\left(x + \frac{\pi}{3}\right) dx.$$

Rešavanjem integrala dobija se:

$$U_{d2} = \frac{3\sqrt{2}E}{2\pi} \left[2\sin\left(\beta + \frac{\pi}{3}\right) - \sin\left(\beta - \frac{\pi}{3}\right) - \sqrt{3} \right].$$

Zbir ova dva napona iznosi:

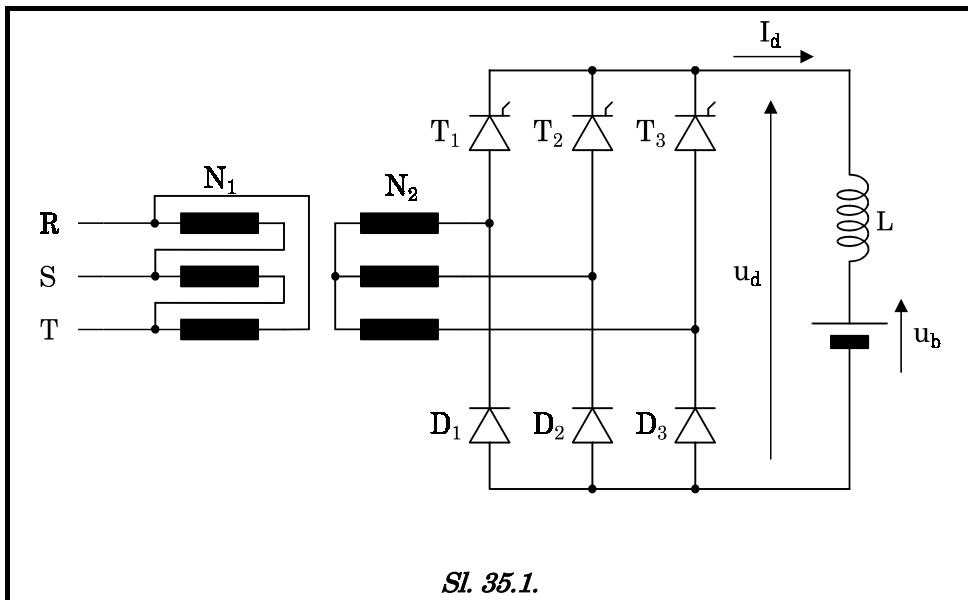
$$U_d = U_{d1} + U_{d2} = \frac{3\sqrt{2}E}{2\pi} \left[2\sin\left(\beta + \frac{\pi}{3}\right) - \sin\left(\beta - \frac{\pi}{3}\right) \right].$$

S obzirom na spregu transformatora, napon na jednom namotaju sekundara transformatora je $E = 38$ V, pa je srednja vrednost napona na opterećenju:

$$U_d = 67.9 \text{ V}.$$

35

Baterija napona $U_b = 170 \text{ V}$ puni se preko trofaznog mosnog polu-upravlјivog ispravljača (slika 35.1.) koji je vezan na mrežu $3 \times 380 \text{ V}; 50 \text{ Hz}$ preko transformatora u sprezi DY sa prenosnim odnosom $m = N_1/N_2 = 5$. Na red sa baterijom je vezana prigušnica čija je induktivnost $L = 1 \text{ mH}$, a ugao upravljanja je $\alpha = 90^\circ$. Odrediti srednju vrednost struje punjenja baterije.



Sl. 35.1.

Efektivna vrednost faznog napona na sekundaru transformatora je:

$$E = \frac{U}{m} = \frac{380 \text{ V}}{5} = 76 \text{ V}.$$

U slučaju da je jednosmerna struja neprekidna, srednja vrednost napona na opterećenju (zanemarujući komutaciju) je:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} [1 + \cos(\alpha)]$$

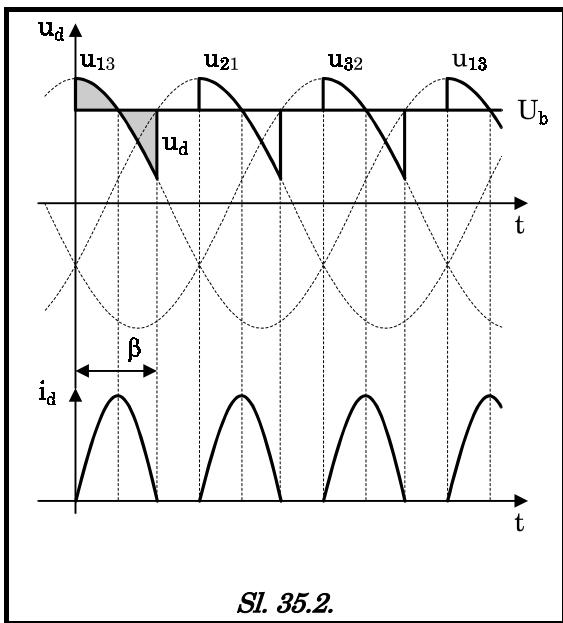
$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot 76 \text{ V}}{2 \cdot \pi} [1 + \cos(90^\circ)] = 88.9 \text{ V}.$$

Kako je $U_d < U_b$, očigledno je da ispravljač radi u prekidnom režimu. Talasni oblici napona i struja, za ovaj režim rada, su prikazani na slici 35.2. Sa slike se vidi da je napon na prigušnici u jednosmernom kolu:

$$L \frac{di}{dt} = \sqrt{6}E \cos(\omega t) - U_b ,$$

odakle je:

$$i = \frac{\sqrt{6}E}{L\omega} \sin(\omega t) - \frac{U_b}{L} t .$$



Struja je jednaka nuli u trenutku

$$\omega t = \beta :$$

$$\frac{\sqrt{6}E}{L\omega} \sin(\beta) = \frac{U_b}{L\omega} \beta \quad \Rightarrow \quad \beta = 0.731 .$$

Srednja vrednost struje punjenja baterije je:

$$I_d = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{3}{2\pi} \int_0^\beta \left(\frac{\sqrt{6}E}{L\omega} \sin(x) - \frac{U_b}{L\omega} x \right) dx$$

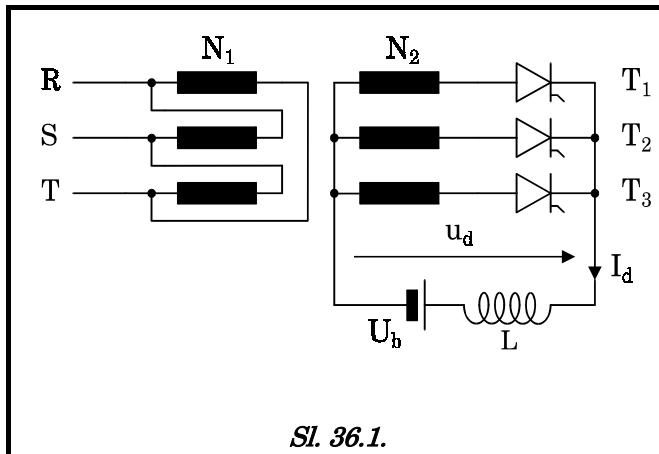
$$I_d = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi L\omega} [1 - \cos(\beta)] - \frac{3U_b}{2\pi L\omega} \cdot \frac{\beta^2}{2} .$$

Zamenom brojnih vrednosti dobija se:

$$I_d = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot 76 V}{2 \cdot \pi \cdot 0.1 \cdot \pi \Omega} [1 - \cos(0.731)] - \frac{3 \cdot 170 V}{2 \cdot \pi \cdot 0.1 \cdot \pi \Omega} \cdot \frac{0.731^2}{2} = 3.26 A .$$

36

Baterija, čiji se napon menja u granicama $U_b = 50 \text{ V} \dots 110 \text{ V}$, puni se preko polumosnog upravljivog ispravljачa (slika 36.1.) koji je vezan na mrežu $3 \times 380 \text{ V}; 50 \text{ Hz}$ preko transformatora u sprezi DY sa prenosnim odnosom $m = N_1/N_2 = 4$. Struja punjenja baterije se menja u granicama $I_d = 5 \text{ A} \dots 50 \text{ A}$. Odrediti induktivnost prigušnice vezane na red sa baterijom tako da struja punjenja baterije bude neprekidna u svim uslovima rada punjača.



Sl. 36.1.

Efektivna vrednost faznog napona na sekundaru transformatora je:

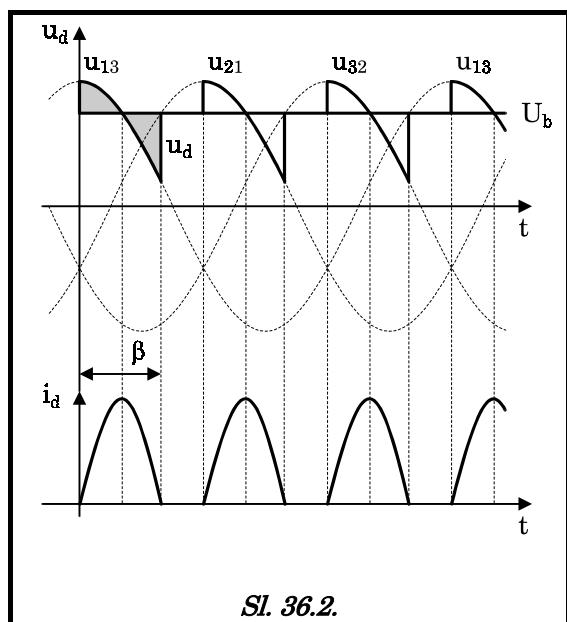
$$E = \frac{U}{m} = \frac{380 \text{ V}}{4} = 95 \text{ V}.$$

U kontinualnom režimu rada u stacionarnom stanju, zanemarujući komutaciju, srednja vrednost napona na izlazu ispravljачa je:

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} \cos(\alpha) = 111.1 \cdot \cos(\alpha),$$

odakle je:

$$\alpha_{\min} \approx 0^\circ; \alpha_{\max} = 63.25^\circ.$$



Sl. 36.2.

Na slici 36.2. prikazani su talasni oblici napona i struja ispravljača u prekidnom režimu rada. Dok provodi neki od tiristora, ravnoteža napona u jednosmernom kolu opisana je sa:

$$L \frac{di}{dt} = \sqrt{2}E \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{3} + \alpha\right) - U_b.$$

Uz početni uslov $i(0) = 0$, rešenje za struju je:

$$i = \frac{\sqrt{2}E}{L\omega} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3} + \alpha\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right) \right] - \frac{U_b}{L}t.$$

Struja će opasti na nulu u trenutku $\omega t = \beta$, kada je prema prethodnoj jednačini:

$$\sqrt{2}E \left[\sin\left(\beta - \frac{\pi}{3} + \alpha\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right) \right] = U_b\beta. \quad (36.1.)$$

Srednja vrednost jednosmerne struje je:

$$I = \frac{3}{2\pi} \left\{ \frac{\sqrt{2}E}{L\omega} \int_0^\beta \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3} + \alpha\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right) - \frac{U_b}{\sqrt{2}E}t \right] dt \right\},$$

odnosno:

$$I = \frac{3\sqrt{2}E}{2\pi L\omega} \left[\cos\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(\beta - \frac{\pi}{3} + \alpha\right) - \beta \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right) - \frac{U_b}{\sqrt{2}E} \cdot \frac{\beta^2}{2} \right].$$

Iz jednačine (36.1.) ima se:

$$\frac{U_b}{\sqrt{2}E} \cdot \frac{\beta^2}{2} = \frac{\beta}{2} \cdot \left[\sin\left(\beta - \frac{\pi}{3} + \alpha\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right) \right].$$

Zamenom ovog izraza u izraz za srednju vrednost struje dobija se:

$$I = \frac{3\sqrt{2}E}{2\pi L\omega} \left\{ \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(\beta - \frac{\pi}{3} + \alpha\right) - \frac{\beta}{2} \cdot \left[\sin\left(\beta - \frac{\pi}{3} + \alpha\right) + \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{3}\right) \right] \right\}.$$

Na granici prekidnog režima rada $\beta = 2\pi/3$, pa se, zamenom u prethodni izraz i sređivanjem, dobija:

$$I_{disc} = \frac{3\sqrt{2}E}{2\pi L\omega} \left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{3} \right) \sin(\alpha). \quad (36.2.)$$

Ako se zahteva da struja bude neprekidna i pri uglu paljenja $\alpha = 90^\circ$, kada je naizmenična komponenta jednosmernog napona najveća, onda je:

$$I_{disc90} = \frac{3\sqrt{2}E}{2\pi L\omega} \left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{3} \right).$$

Na granici prekidnog režima rada je:

$$\frac{I_{disc}}{I_{disc90}} = \sin(\alpha). \quad (36.3.)$$

Prema jednačini (36.1.), uz:

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi},$$

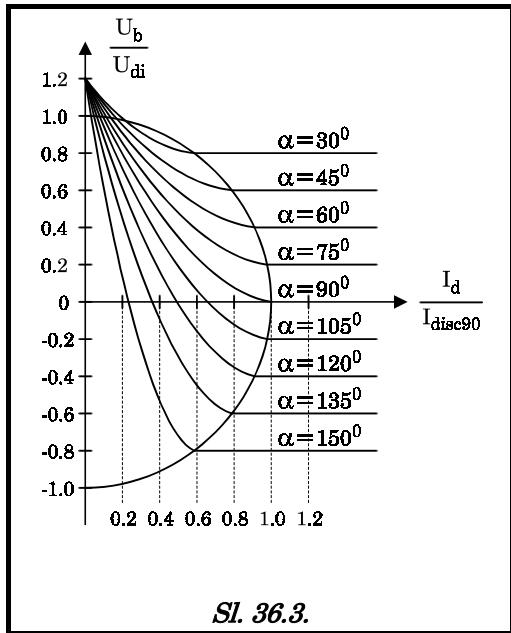
za $\beta = 2\pi/3$, ima se:

$$\frac{U_b}{U_{di}} = \cos(\alpha). \quad (36.4.)$$

Prema jednačinama (36.3.) i (36.4.) ima se:

$$\left(\frac{I_{disc}}{I_{disc90}} \right)^2 + \left(\frac{U_b}{U_{di}} \right)^2 = 1,$$

što je jednačina jediničnog kruga koji predstavlja granicu prekidnog režima rada. Na slici 36.3. je prikazana oblast prekidnog režima rada ispravljača. Struja punjenja baterije prestaje da teče kada napon baterije postane jednak maksimal-



Sl. 36.3.

noj trenutnoj vrednosti izlaznog napona ispravljača ($U_{d\max} = \sqrt{2}E$). Na osnovu ovoga sledi da se sve krive sustiću na vertikalnoj osi u tački:

$$\left. \frac{U_b}{U_{di}} \right|_{I_d=0} = \frac{\sqrt{2}E}{\frac{3\sqrt{6}E}{2\pi}} = \frac{2\pi\sqrt{2}E}{3\sqrt{6}E} = \frac{2\pi}{3\sqrt{6}} = 1.209.$$

Za ispravljač opisan u zadatku potrebno je obezbediti neprekidan režim rada za minimalnu struju i maksimalni ugao paljenja jer će tada i u svim ostalim režimima struja biti neprekidna. Za to je, prema jednačini (36.2.), potrebno obezbediti prigušnicu čija je induktivnost:

$$L \geq \frac{3\sqrt{2}E}{2\pi I_{\min}\omega} \left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{3} \right) \sin(\alpha_{\max}).$$

Zamenom brojnih vrednosti dobija se:

$$L \geq \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 95 V}{2 \cdot \pi \cdot 5 A \cdot 100 \cdot \pi} \left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{3} \right) \sin(63.25^0) = 25 mH.$$