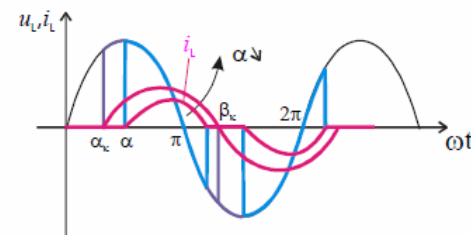
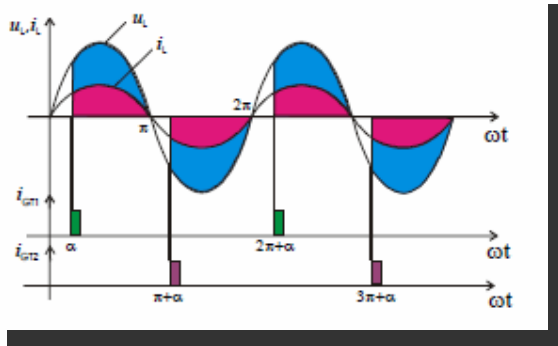


ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE
VISER- studijski program NET

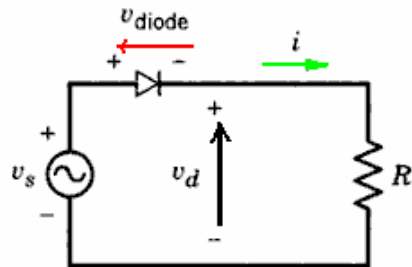


PODEŠAVAČI NAIZMENIČNOG NAPONA

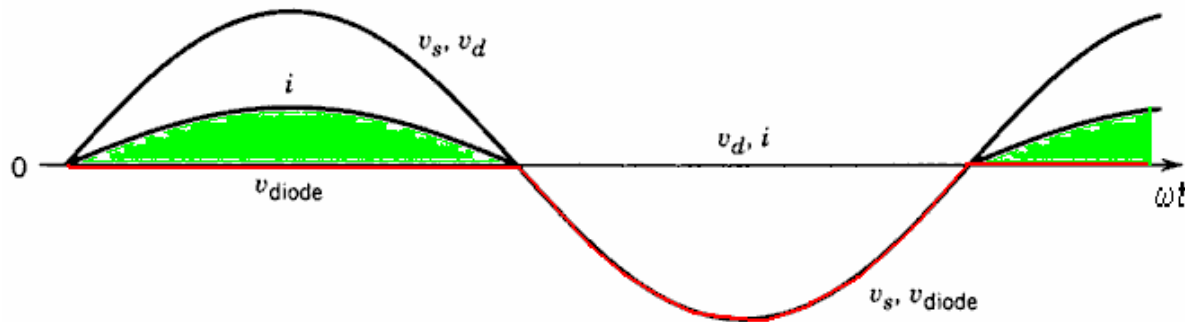


PREDAVAČ: Dr Željko Despotović

POLUTALASNI DIODNI ISPRAVLJAČ



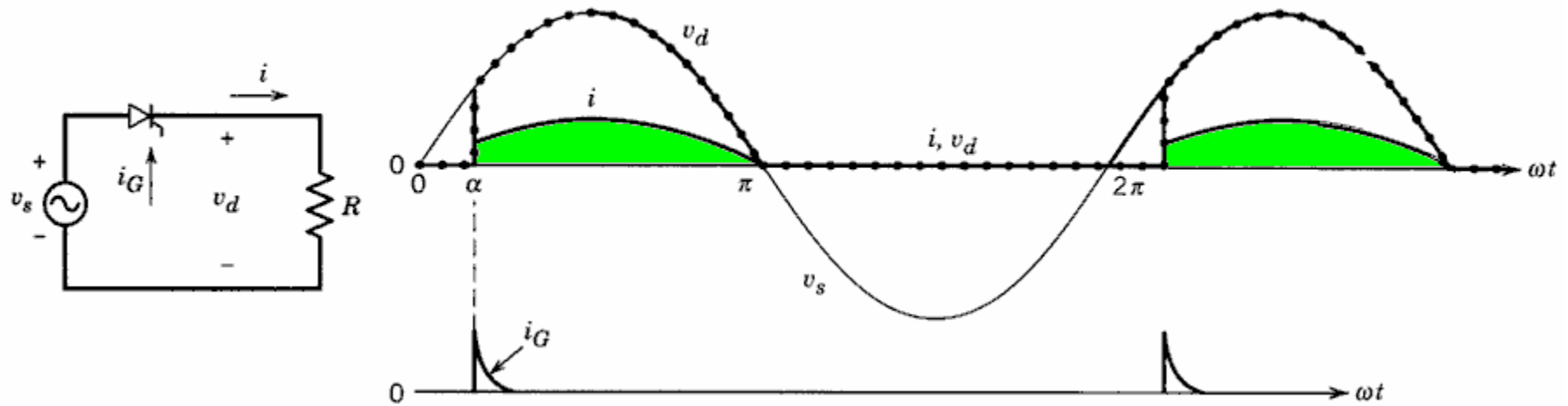
$$v_s = \sqrt{2} V \sin(\omega t)$$
$$V_m = \sqrt{2} V$$



$$V_{AVG} = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t=0}^{2\pi} v_d d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t=0}^{\pi} \sqrt{2} V \cdot \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V = 0,45V$$

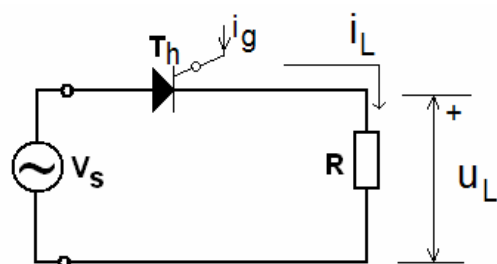
$$I_{AVG} = V_{AVG} / R$$

POLUTALASNI TIRISTORSKI ISPRAVLJAČ



$$V_{AVG}(\alpha) = \int_{\omega t=\alpha}^{\pi} \sqrt{2}V \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha) \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} V$$

$$I_{AVG} = V_{AVG} / R$$



$\omega = 2\pi f$ kružna učestanost

$T = 1/f$ perioda

α -fazni ugao (upravljačka veličina)

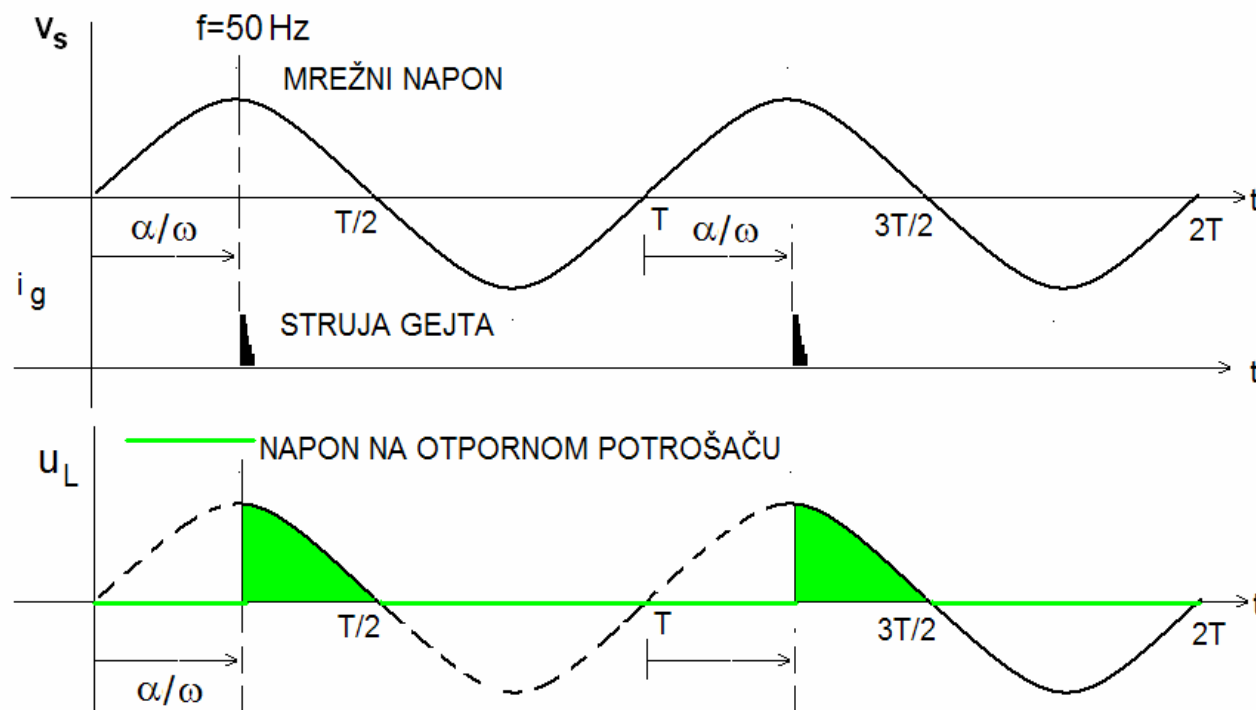
EFEKTIVNA VREDNOST
NAPONA NA POTROŠAČU

$$U_{L, RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\alpha/\omega}^{T/2} U^2 \cdot 2 \cdot \sin^2 \omega t \, dt}$$

$$U_{L, RMS} = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\alpha/\omega}^{T/2} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \, dt}$$

$$U_{L, RMS} = \frac{U}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI



EFEKTIVNA VREDNOST STRUJE POTROŠAČA

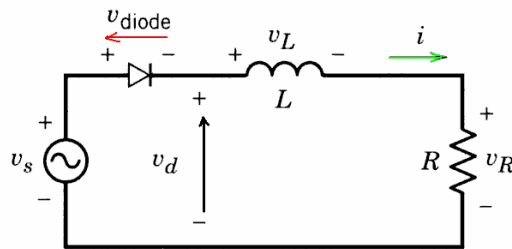
$$I_{L, RMS} = \frac{U_{L, RMS}}{R}$$

NA OVAJ NAČIN SE MOŽE REGULISATI SNAGA OTPORNOG POTROŠAČA (SIJALICE, GREJAČA I SL.).

MANE:

- KORISTI SE SAMO JEDNA POLUPERIODA MREŽNOG NAPONA
- GENERIŠE SE JEDNOSMERNNA KOMPONENTA STRUJE U IZVORU NAPAJANJA

POLUTALASNI DIODNI ISPRAVLJAČ SA INDUKTIVNIM OPTEREĆENJEM

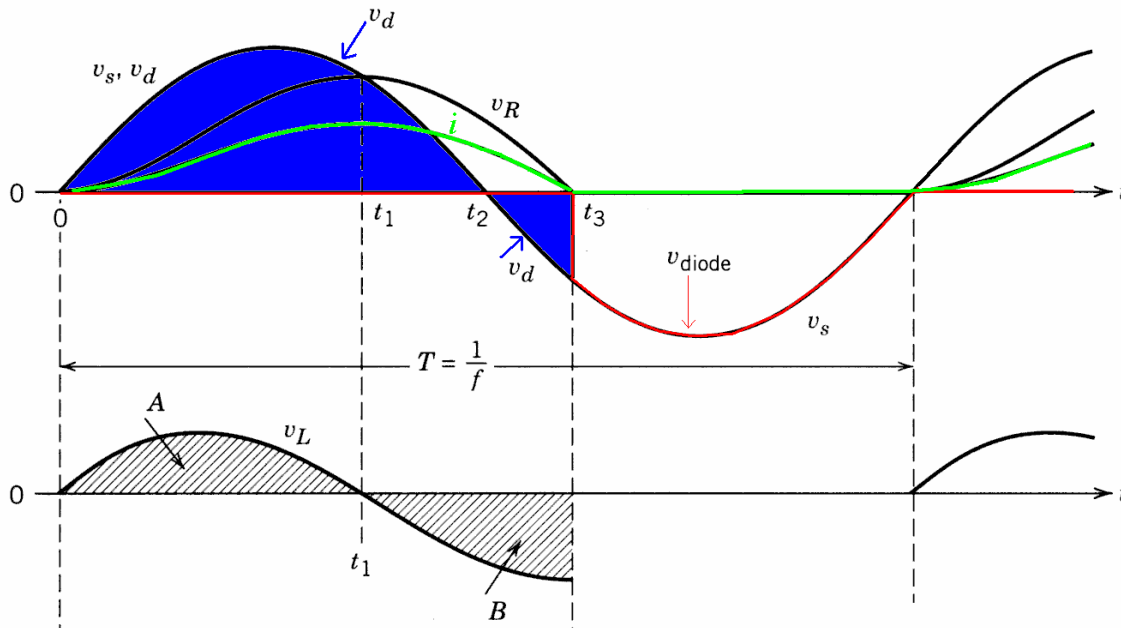


$$v_s = \sqrt{2} V \sin(\omega t)$$

$$V_m = \sqrt{2} V$$

$$v_s = Ri + L \frac{di}{dt}$$

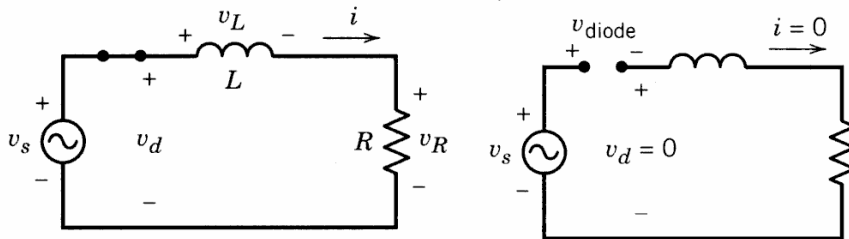
$$i_d = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t - \phi) + A e^{\frac{-Rt}{L}}$$



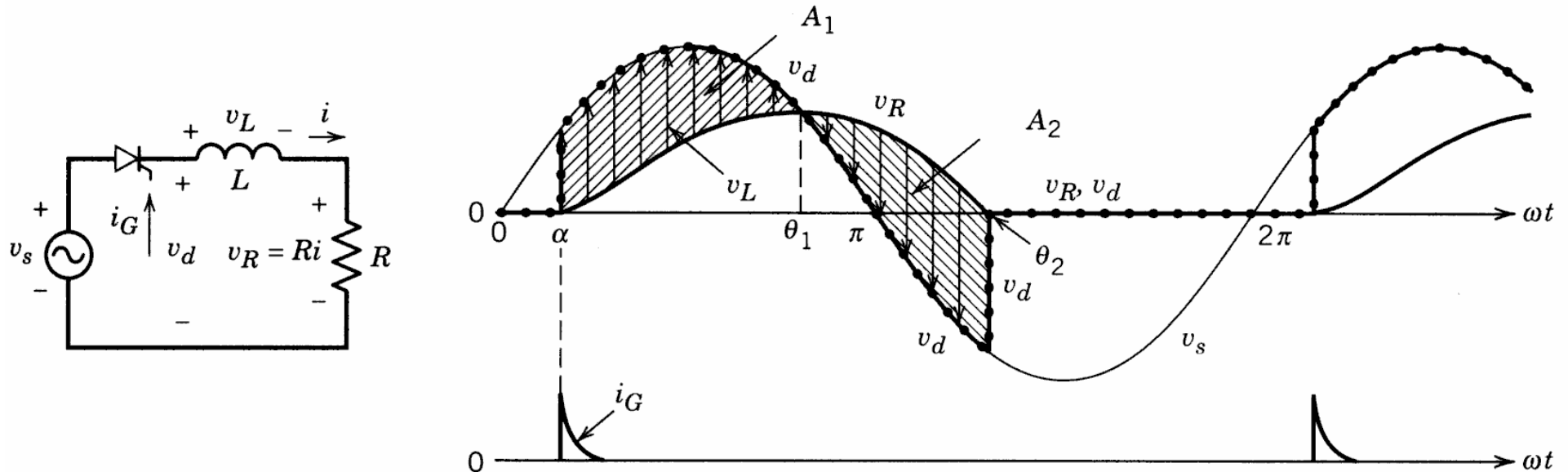
$$A = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin \phi = \frac{\sqrt{2} V \omega L}{Z^2}$$

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

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$



POLUTALASNI TIRISTORSKI ISPRAVLJAČ SA INDUKTIVNIM OPTEREĆENJEM



$$i_d = \frac{\sqrt{2}V}{Z} \sin(\omega t - \phi) - e^{\frac{-R}{\omega L}(\omega t - \alpha)} \sin(\alpha - \phi) \quad \text{za } \omega t \geq \alpha.$$

Za čisto induktivno opterećenje ($R=0$)

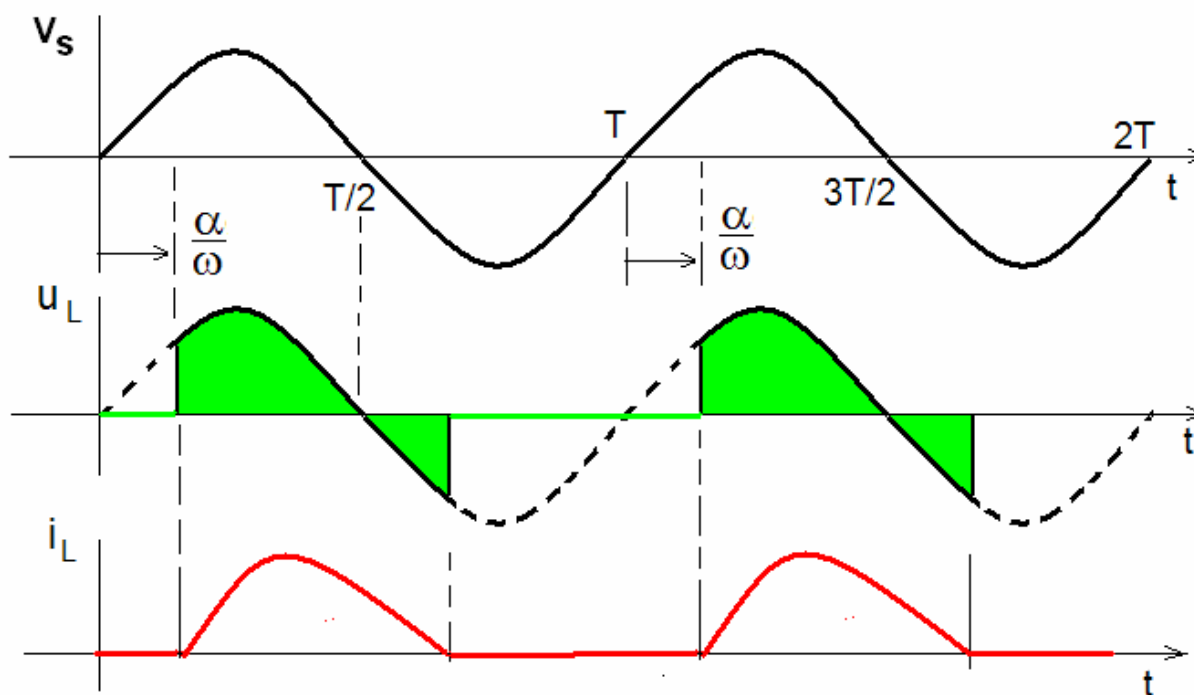
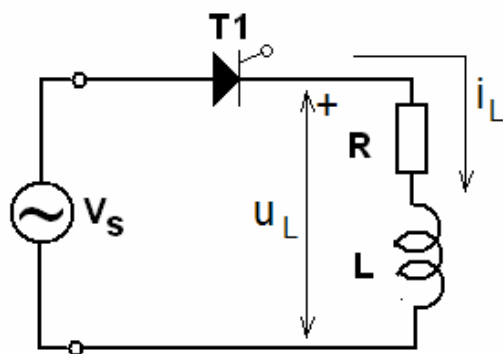
$$i_d = \frac{\sqrt{2}V}{\omega L} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

$$i_d = \frac{\sqrt{2}V}{\omega L} \left[1 - \cos(\omega t) \right] \quad \text{za } \alpha = 0$$

ŠTA SE DEŠAVA AKO SE PODEŠAVAČ NAPONA SA JEDNIM TIRISTOROM OPTERETI SA R-L POTROŠAČEM?

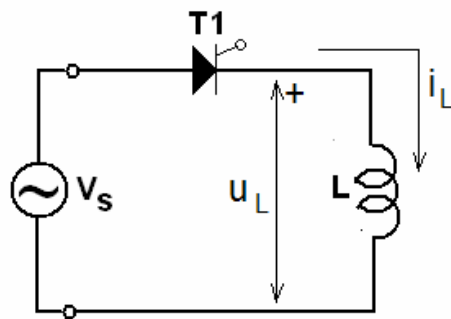
TIRISTOR POČINJE DA VODI U TRENUTKU α/ω ALI STRUJA NE PADA U NULU U TRENUTKU $t=T/2$

ZBOG POSTOJANJA INDUKTIVNOSTI U ENERGETSKOM KOLU PRODUŽAVA SE VREME VOĐENJA PREKO $T/2$ (**mora da se ukloni energija nagomilana u magnetnom polju L!!!!**)



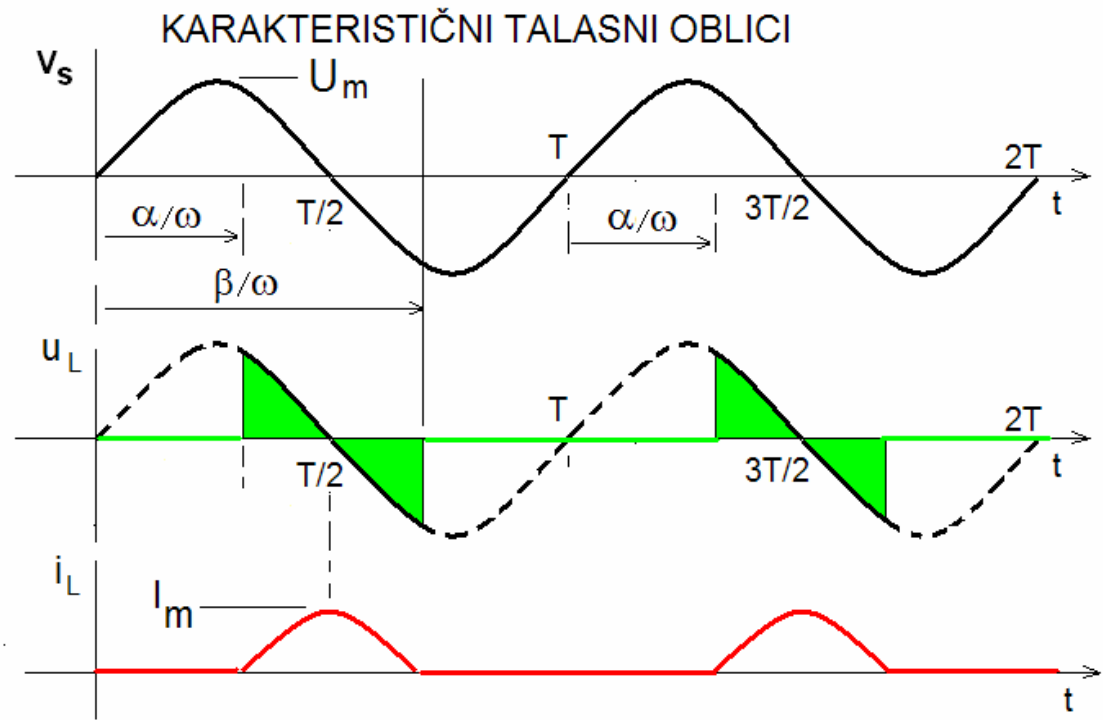
PODEŠAVAČ NAPONA SA JEDNIM TIRISTOROM I ČISTO INDUKTIVNIM OPTEREĆENJEM

- INTERVAL VOĐENJA STRUJE POČINJE KADA TIRISTOR DOBIJE IMPULS NA GEJTU I TRAJE DOK NE NESTANE STRUJA U INDUKTIVNOSTI.
- INTERVAL VOĐENJA JE SIMETRIČAN OKO TRENUTKA $t=T/2$



$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}$$

$$U_m = U\sqrt{2}$$



KADA TIRISTOR UĐE U STANJE VOĐENJA PO II KIRHOFOVOM ZAKONU MOŽE SE NAPISATI DIFERENCIJALNA JEDNAČINA:

$$U\sqrt{2} \sin \omega t = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\Rightarrow i_L = \frac{U\sqrt{2}}{L} \int \sin \omega t dt + K$$

$$i_L = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L} (-\cos \omega t) + K$$

početni uslov je $i_L = 0$ za $t = \alpha/\omega$, odnosno:

$$0 = -\frac{U\sqrt{2}}{\omega L} \cos \alpha + K$$

$$\Rightarrow i_L(t) = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

Ovo je jednačina impulsa struje koja teče kroz tiristor T1.

Kada prestaje da teče struja?

Kada je :

$$i_L(t) = 0 \Rightarrow \cos \alpha = \cos \omega t$$

Jedno rešenje je trivijalno:

$$\alpha = \omega t$$

Drugo rešenje je:

$$\alpha = 2\pi + \omega t$$

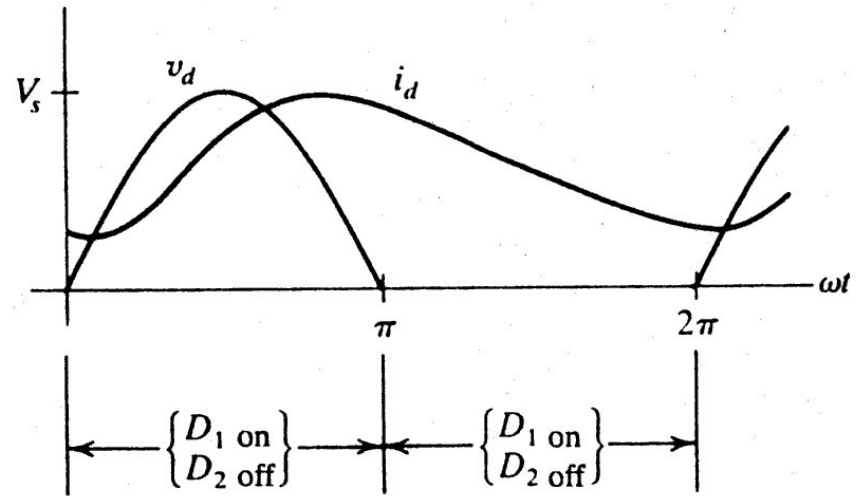
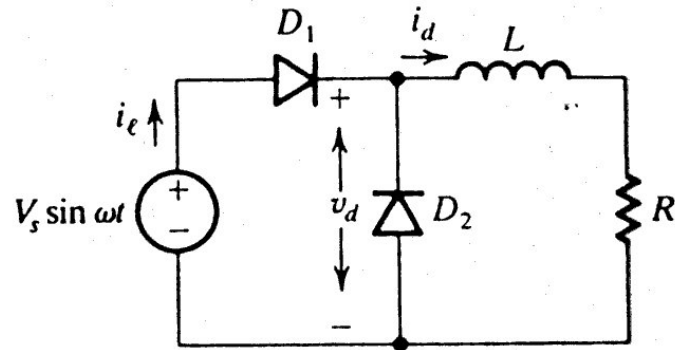
Odnosno $\Rightarrow$

$$\beta = 2\pi - \alpha$$

ODGOVARAJUĆA EFEKTIVNA VREDNOST NAPONA BIĆE $\sqrt{2}$ PUTA VEĆA OD ONE KOJA SE IMA U SLUČAJU OTPORNOG OPTEREĆENJA R (zbog talasnog oblika koji sadrži dva dela iste površine)

$$U_{L,RMS} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin \alpha}{2\pi}}$$

POLUTALSANI ISPRAVLJAČ SA POVRATNOM (ZAMAJNOM) DIODOM



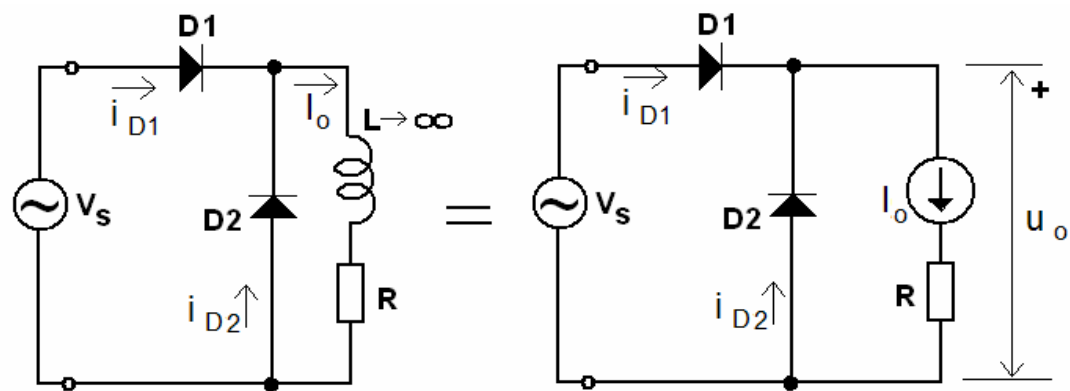
$$v_S = Ri_{dI} + L \frac{di_{dI}}{dt}$$

$$0 = Ri_{dII} + L \frac{di_{dII}}{dt}$$

$$i_{dI} = \frac{\sqrt{2} V_S}{Z} \sin(\omega t - \phi) + \left[i_{dI}(\alpha) - \frac{\sqrt{2} V_S}{Z} \sin(\alpha - \phi) \right] e^{-(\omega t - \alpha) \frac{R}{\omega L}}$$

$$i_{dII} = i_{dI}(\pi) e^{-(\pi - \alpha) \frac{R}{\omega L}}$$

KADA JE INDUKTIVNOST OPTEREĆENJA DOVOLJNO VELIKA DA SE MOŽE SMATRATI BESKONAČNOM, OPTEREĆENJE MOŽEMO PREDSTAVITI STRUJNIM PONOROM I_o .

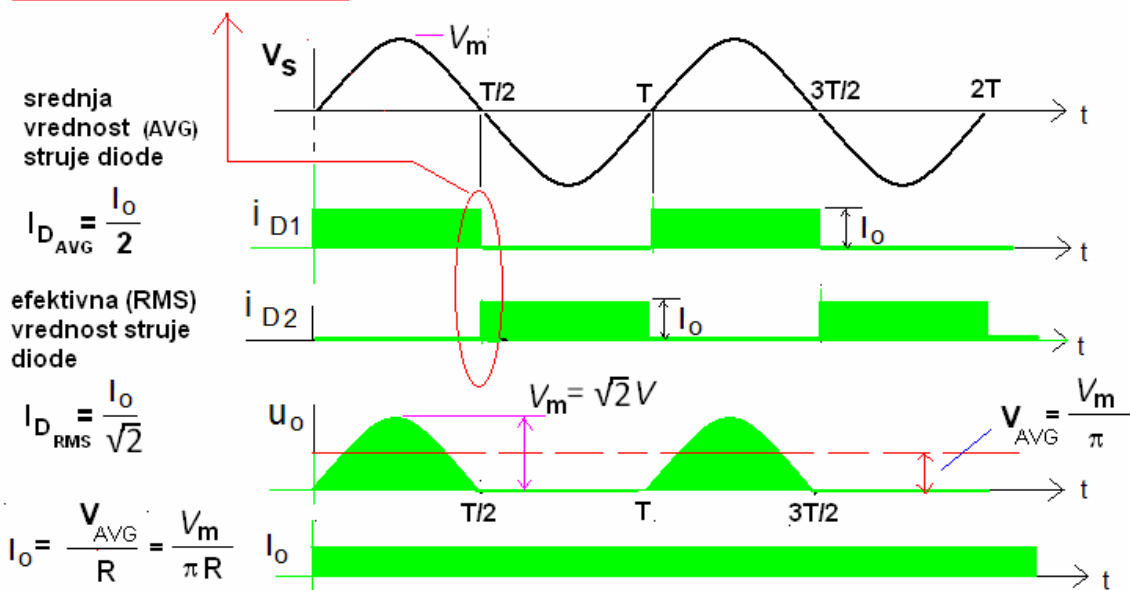


$$v_s = \sqrt{2} V \sin(\omega t)$$

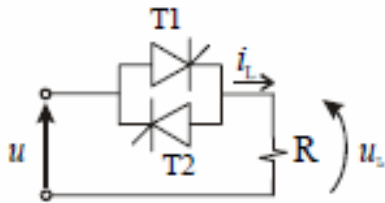
$$V_m = \sqrt{2} V$$

$$i_{D1} + i_{D2} = I_o = \text{const}$$

karakteristični talasni oblici

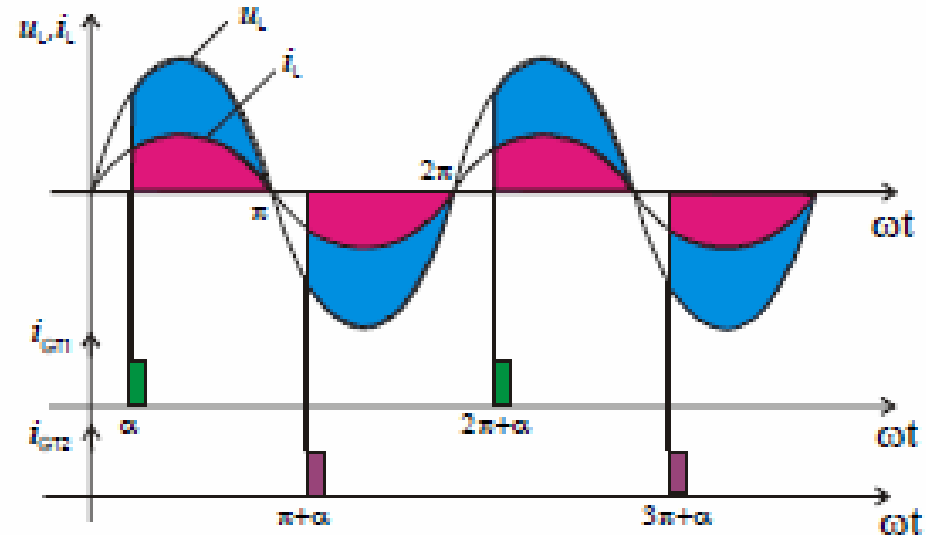


MONOFAZNI PUNOTALASNI NAIZMENIČNI PRETVARAČ (omsko opterećenje)



$$u = U\sqrt{2} * \sin \omega t$$

α - kašnjenje paljenja od trenutka kada tiristor može da provede

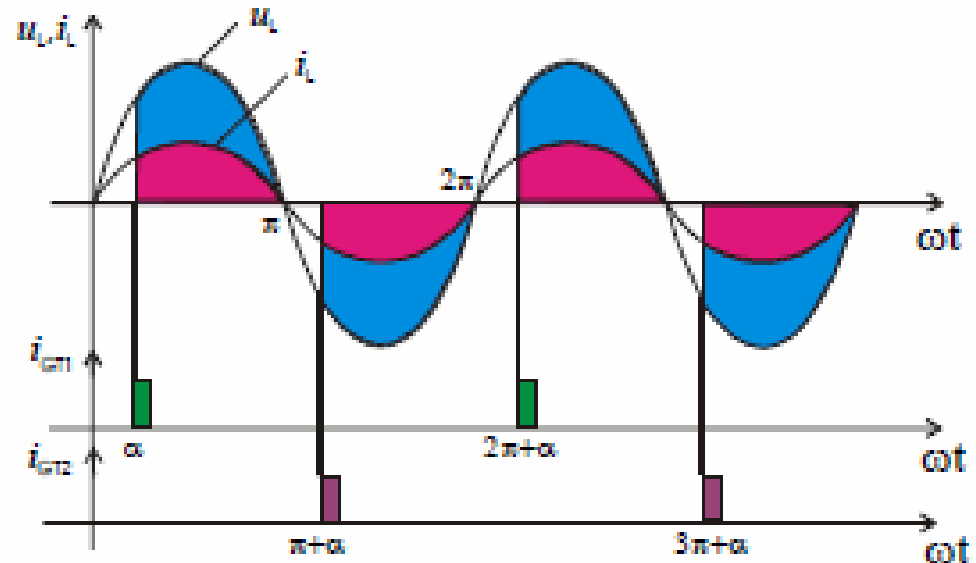


- Zbog prirode potrošača struja prati oblik napona na potrošaču.
- Pri prolasku napona izvora kroz nulu dolazi do gašenja tiristora jer struja potrošača pada na nulu.
- Za $\alpha=0$, napon izvora se u celosti prenosi na potrošač.
- Kada α raste, napon na potrošaču se smanjuje.

1) Efektivna vrednost napona potrošača

Trenutna vrednost napona na potrošaču je:

$$u_L = \begin{cases} 0, & 0 < \omega t < \alpha \\ U\sqrt{2} \sin \omega t, & \alpha < \omega t < \pi \end{cases}, \omega T = \pi$$



Efektivna vrednost napona potrošača je:

$$U_L = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_L^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} u_L^2 dt}$$

$$U_L = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} 2U^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} U^2 (1 - \cos 2\omega t) dt}$$

$$U_L = U \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \left(\frac{\pi}{\omega} - \frac{\alpha}{\omega} + \frac{1}{2\omega} \sin 2\alpha \right)} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha}$$

za $\alpha=0$, $U_L = U$ - maksimalan

za $\alpha=\pi$, $U_L = 0$ - minimalan

za $\alpha=\pi/2$, napon potrošača je: $U_L = \frac{U}{\sqrt{2}}$

2) Snaga na potrošaču je:

$$P_L = \frac{U_L^2}{R} = \frac{U^2}{R} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha \right)$$

za

$$\alpha=0, P_L = P_{Lmax} = U^2/R$$

3) Srednja vrednost struje tiristora

$$I_{TAV} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} \frac{U\sqrt{2} \sin \omega t}{R} dt = \frac{\omega}{2\pi} \frac{U\sqrt{2}}{R} \frac{1}{\omega} (-\cos \omega t) \Big|_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega}$$

$$I_{TAV} = \frac{U}{R} \frac{1}{\pi \sqrt{2}} (1 + \cos \alpha)$$

srednja struja tiristora je maksimalna za $\alpha=0$ i iznosi: $I_{TAV} = \frac{U}{R} \frac{\sqrt{2}}{\pi}$

za $\alpha=\pi$ srednja vrednost je: $I_{TAV} = 0$

4) Efektivna vrednost struje tiristora

$$I_{TRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{u}{R}\right)^2 dt} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} \frac{U^2}{R^2} 2 \sin^2 \omega t * dt}$$

$$I_{TRMS} = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \left(\frac{\pi}{\omega} - \frac{\alpha}{\omega} + \frac{1}{2\omega} \sin 2\alpha \right)}$$

$$I_{TRMS} = \frac{U}{R} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha}$$

za $\alpha=0$, efektivna vrednost struje tiristora je maksimalna i iznosi:

$$I_{TRMS} = \frac{U}{R} \frac{1}{\sqrt{2}}$$

5) Efektivna vrednost struje potrošača je:

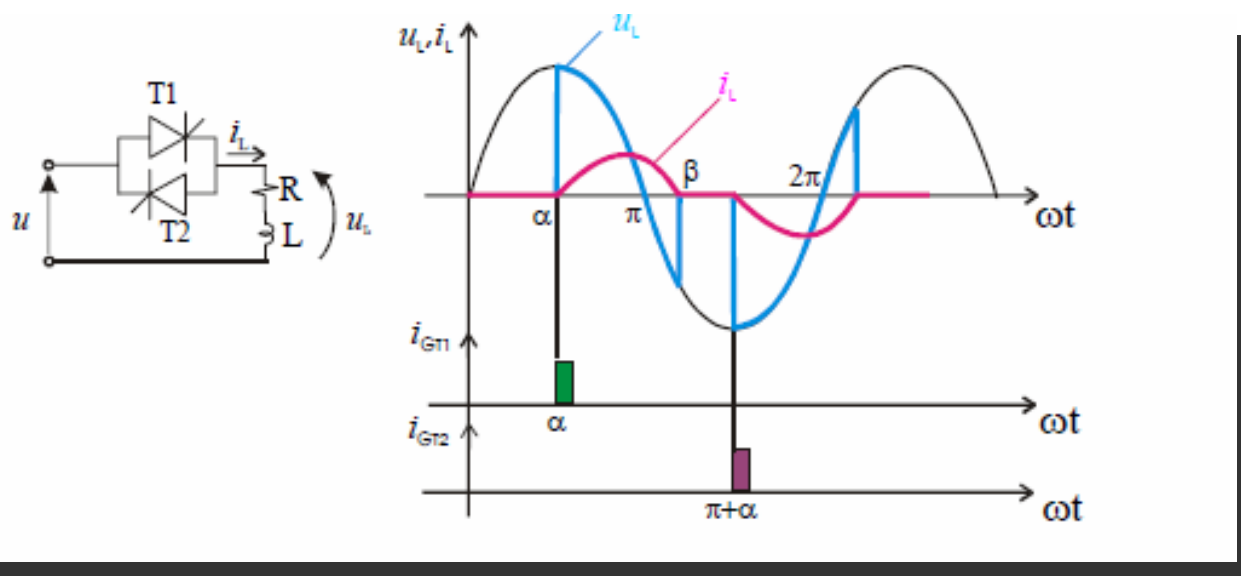
$$I_L = \frac{U_L}{R} = \frac{U}{R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha}$$
$$\Rightarrow I_{TRMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_L$$

Dakle, struja kroz svaki od tiristora je 1,41 puta manja od struje potrošača.

Za $\alpha=0$ je odnos srednje i efektivne vrednosti struje tiristora:

$$\frac{I_{TAV}}{I_{TRMS}} = \frac{\frac{U}{R} \frac{2}{\pi \sqrt{2}}}{\frac{U}{R} \frac{1}{\sqrt{2}}} = \frac{2}{\pi}$$

MONOFAZNI PUNOTALASNI NAIZMENIČNI PRETVARAČ (induktivno opterećenje)



- Zbog prisustva induktivnosti u potrošaču, kada upalimo tiristor struja ne može trenutno promeniti vrednost, već počinje da raste od nule.
- Iz istog razloga se tiristor ne gasi pri prolasku napona potrošača kroz nulu jer struja nastavlja da teče.
- Za kolo možemo postaviti sledeću jednačinu:

$$u - Ri - L \frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow L \frac{di}{dt} + Ri = U\sqrt{2} \sin \omega t$$

Rešenje ove jednačine je izraz za struju:

$$i = \frac{U\sqrt{2}}{Z} [\sin(\omega t - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \alpha)} \sin(\alpha - \phi)]$$

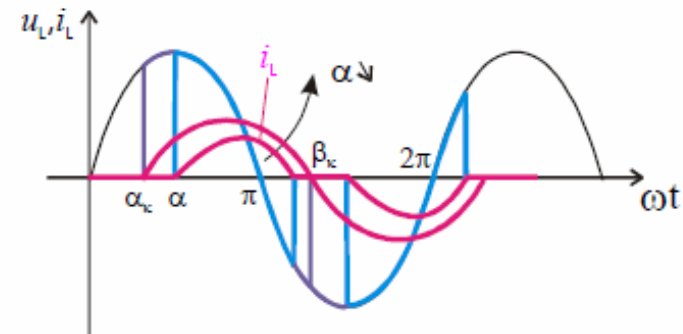
Gde je:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \phi = \arctg \frac{\omega L}{R} \quad \phi - \text{ugao impedanse}$$

Interesuje nas ugao β pri kome struja kroz potrošač prestaje da teče i tiristor se gasi.

Taj ugao se nalazi rešavanjem jednačine:

$$i = 0 \Rightarrow \sin(\beta - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\beta - \alpha)} \sin(\alpha - \phi) = 0 \Rightarrow \sin(\beta - \phi) = e^{-\frac{R}{\omega L}(\beta - \alpha)} \sin(\alpha - \phi)$$



- Ako upalimo tiristor u trenutku α , vidimo da će struja kroz potrošač teći za $\alpha < \omega t < \beta$.
 - Zatim se tiristor gasi i struja počinje ponovo da teče kad se upali drugi tiristor.
 - Postojaće neki ugao paljenja α_k za koji će struja potrošača biti neprekidna, odnosno za koji će se trenuci gašenja jednog i paljenja drugog tiristora poklapati.
- To znači da je:

$$\beta_k = \pi + \alpha_k$$

Vrednost za α_k se nalazi gornjom smenom za β_k u izrazu za struju potrošača i rešavanjem jednačine:

$$i = 0 \Rightarrow \sin(\beta_k - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\beta_k - \alpha_k)} \sin(\alpha_k - \phi) = 0 \Rightarrow \sin(\pi + \alpha_k - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\pi + \alpha_k - \alpha_k)} \sin(\alpha_k - \phi) = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \sin(\alpha_k - \phi)(1 + e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}) = 0 \Rightarrow \sin(\alpha_k - \phi) = 0 \Rightarrow \alpha_k = \phi, \phi = \arctg \frac{\omega L}{R}$$

Dakle za $\varphi < \alpha < \pi$, struja će biti prekidna.

Za $\alpha = \varphi$ struja potrošača će biti neprekidna i sinusnog oblika datog izrazom:

$$i = \frac{U\sqrt{2}}{Z} \sin(\omega t - \phi), Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \phi = \arctg \frac{\omega L}{R}$$

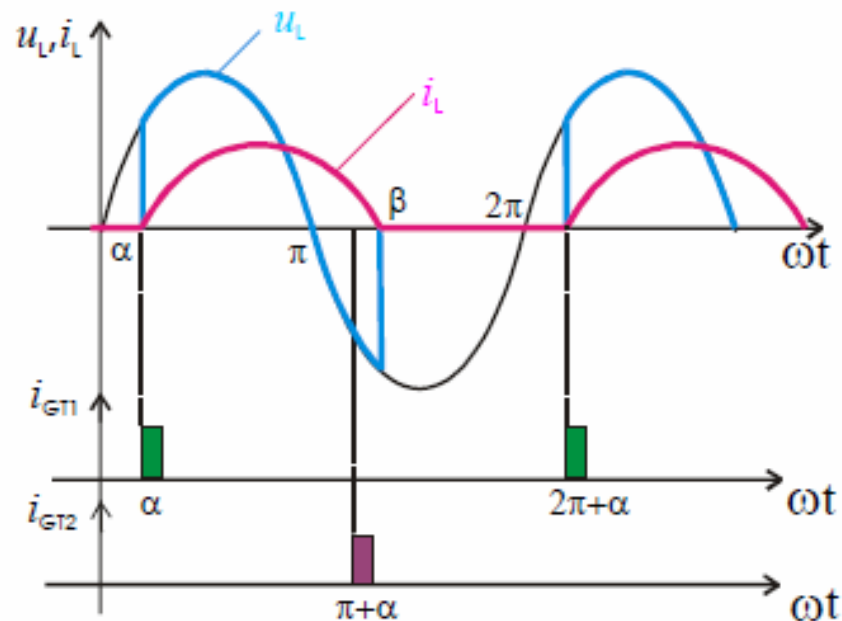
što znači da će struja potrošača kasniti za naponom izvora za ugao φ .

Šta će se desiti za $0 < \alpha < \varphi$?

Za $0 < \alpha < \varphi$ će oblik struje potrošača zavisiti od načina na koji pobuđujemo tiristore.

Ako ih kao do sad palimo impulsom u gejt, može se desiti da kad pobuđujemo gejt tiristora uslovi za njegovo provođenje ne postoje jer provodi onaj drugi, a kad se uslovi steknu impuls paljenja je prošao.

Tada se tiristor neće uopšte upaliti (kao što pokazuje slika).



Dakle, struja će teći samo u jednom smeru i imati neželjenu jednosmernu komponentu.

1) Efektivna vrednost napona na potrošaču

α - ugao paljenja tiristora, β - ugao gašenja tiristora

$$U_L = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_L^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} u_L^2 dt}$$

$$U_L = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} 2U^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} U^2 (1 - \cos 2\omega t) dt}$$

$$U_L = U\sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{2\pi} (\beta - \alpha) - \frac{1}{2} \sin 2\beta + \frac{1}{2} \sin 2\alpha}$$

Ova efektivna vrednost napona potrošača je veća nego u slučaju da je potrošač čista otpornost jer je $\beta > \pi$.

2) Efektivna vrednost struje tiristora

$$I_{TRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} \left\{ \frac{U\sqrt{2}}{Z} [\sin(\omega t - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \alpha)} \sin(\alpha - \phi)] \right\}^2 dt}$$

3) Srednja vrednost struje tiristora

$$I_{TAV} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} \frac{U\sqrt{2}}{Z} [\sin(\omega t - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \alpha)} \sin(\alpha - \phi)] dt$$

Struje tiristora su maksimalne za $\alpha = \varphi$.

4) Faktor snage

Zbog prisustva induktivnosti u potrošaču postojeće i aktivna i reaktivna snaga.

Faktor snage se definiše kao odnos aktivne i prividne (ukupne) snage. Za prostoperiodične režime, faktor snage je tesno povezan sa uglom impedanse - φ :

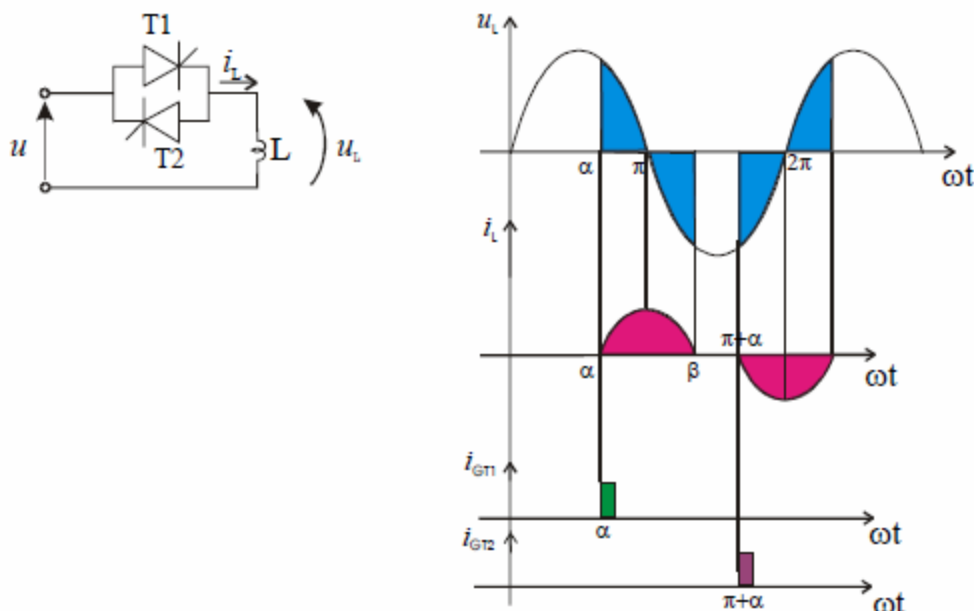
$$\lambda = \frac{P}{UI} = \frac{UI \cos \phi}{UI} = \cos \phi$$

Za složenoperiodične režime (kad su signali prekidni) ova veza više ne važi i ugao impedanse se ne sme povezivati sa reaktivnom snagom.

Tada se faktor snage mora izračunavati po definiciji:

$$\lambda = \frac{P}{U_{RMS} \cdot I_{RMS}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u i dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}}$$

MONOFAZNI PUNOTALASNI NAIZMENIČNI PRETVARAČ (potrošač je čisto induktivno opterećenje)



- Kada tiristor upalimo u uglu α , struja kroz induktivnost se ne može trenutno promeniti kao što je to bio slučaj kod čisto otpornog potrošača.
- Struja raste od nulte vrednosti sve dok napon ima pozitivnu vrednost.

$$u = L \frac{di}{dt}, i = \frac{1}{L} \int_0^t u dt$$

- Kada napon na induktivnosti promeni znak, tiristor se ne gasi jer kroz njega još teče struja.
- Znači da tiristorom ne možemo upravljati nezavisno od prirode potrošača, kao što je to slučaj sa tranzistorom.
- Kada napon na induktivnosti postane negativan, struja počinje da opada.
- Interesuje nas ugao β pri kome će vrednost struje kroz induktivnost pasti na nulu.
- Zbog simetrije u odnosu na ugao π , vidi se da je:

$$\beta = \pi + (\pi - \alpha) = 2\pi - \alpha$$

Ovu tvrdnju možemo dokazati nalaženjem izraza za struju induktivnosti u zavisnosti od ugla paljenja α :

$$i = \frac{1}{L} \int_0^t u L dt, uL = \begin{cases} u, \alpha < \omega t < \beta \\ 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow i = \frac{1}{L} \int_{\alpha/\omega}^t U\sqrt{2} \sin \omega t dt = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L} \int_{\alpha}^{\omega t} \sin \omega t d(\omega t) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L} (-\cos \omega t) \Big|_{\alpha}^{\omega t} \Rightarrow i = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t), \omega t \in [\alpha, \beta]$$

Postavljanjem uslova da je vrednost struje u uglu β jednaka nula, dobijamo:

$$i = 0 \Rightarrow \frac{U\sqrt{2}}{\omega t}(\cos\alpha - \cos\beta) = 0 \Rightarrow \cos\alpha = \cos\beta \Rightarrow \beta = 2\pi - \alpha$$

Da bi se drugi tiristor upalio mora se prvi ugaziti. Ugao gašenja prvog tiristora β mora biti manji od ugla $\pi + \alpha$, kad palimo drugi tiristor.

Znači, ako želimo simetrično paljenje tiristora ugao paljenja α možemo smanjivati samo do $\pi/2$.

1) Efektivna vrednost napona na potrošaču

$$U_L = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_L^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} u_L^2 dt}$$

$$U_L = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} 2U^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_{\alpha/\omega}^{(2\pi-\alpha)/\omega} U^2 (1 - \cos 2\omega t) dt}$$

$$U_L = U\sqrt{2} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \left(\frac{2\pi}{\omega} - \frac{2\alpha}{\omega} + \frac{1}{\omega} \sin 2\alpha \right)} = U\sqrt{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha}$$

2) Srednja vrednost struje tiristora

$$I_{TAV} = \frac{1}{T} \int_0^t i dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} \frac{U\sqrt{2}}{\omega L} (\cos\alpha - \cos\omega t) dt = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L} \frac{1}{2\pi} [(2\pi - 2\alpha)\cos\alpha + 2\sin\alpha]$$

3) Efektivna vrednost struje tiristora

$$I_{TRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} \left[\frac{U\sqrt{2}}{\omega L} (\cos\alpha - \cos\omega t) \right]^2 dt} \Rightarrow \dots$$
$$\Rightarrow I_{TRMS} = \frac{U}{\omega L} \sqrt{\frac{1}{2\pi} [(2 + \cos 2\alpha)(2\pi - 2\alpha) + 3\sin 2\alpha]}$$

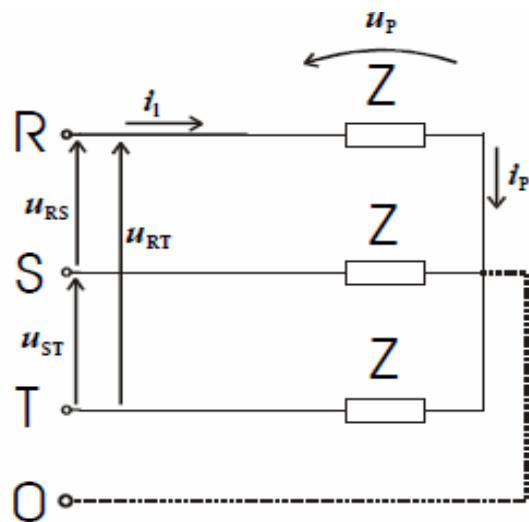
TROFAZNI PODEŠAVAČI NAIZMENIČNOG NAPONA

Trofazni sistem se zasniva na trofaznom generatoru koji generiše napone fazno pomerene za $3\pi/2$, tj. 120° .

$$u_R = U\sqrt{2} \sin \omega t, u_S = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}), u_T = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3})$$

Potrošač se može spregnuti u "zvezdu" ili "trougao".

Potrošač u sprezi "zvezda"



u_R, u_S, u_T - fazni naponi - u_f

u_{RS}, u_{ST}, u_{TR} - međufazni (linijski) naponi - u_l

$u_{RS} = u_R - u_S, u_{ST} = u_S - u_T, u_{TR} = u_T - u_R$

Kada se ovi naponi izračunaju preko fazorskog dijagrama dobija se:

$$U_l = 2U_f \cdot \cos 30^\circ = U_f \sqrt{3}$$

Interesuje nas struja i napon potrošača.

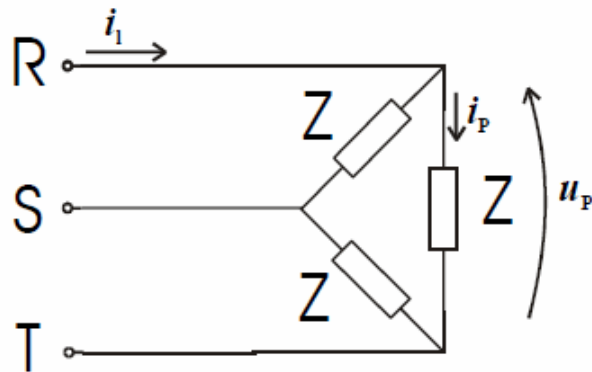
U trofaznim sistemima sve izražavamo preko linijskih napona i struja jer njih možemo da merimo. Imaćemo da je:

$$I_p = I_l, U_p = U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}}$$

Snaga potrošača je:

$$P = 3 \cdot U_p \cdot I_p \cos \phi = 3 \cdot \frac{U_l}{\sqrt{3}} \cdot I_l \cdot \cos \phi = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos \phi$$

Potrošač u sprezi trougao



Napon na svakom potrošaču je jednak linijskom naponu (međufaznom).

$$U_p = U_l$$

Struje kroz potrošače su fazno pomerene i primenom Kirhofovih pravila i fazorskog dijagrama se dobija

$$I_l = 2I_p \cos 30^\circ \Rightarrow I_l = I_p \sqrt{3} \Rightarrow I_p = \frac{I_l}{\sqrt{3}}$$

Snaga potrošača je:

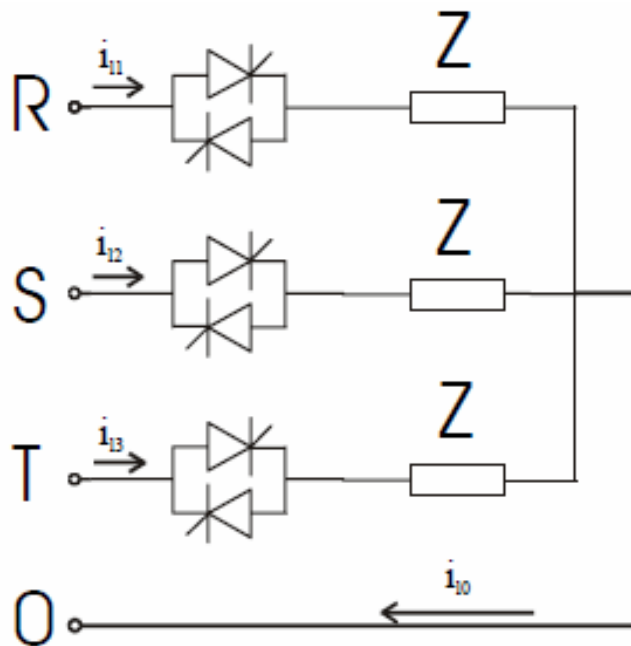
$$P = 3 \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos \phi = 3 \cdot U_l \cdot \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cdot \cos \phi = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos \phi$$

Dakle, bez obzira na spregu potrošača, zavisnost snage potrošača od linijskih struja i napona je ista.

To znači da merenjem linijskih napona i struja možemo steći utisak o snazi potrošača.

Trofazni punotalasni naizmenični pretvarač sa potrošačem u spoju "zvezda"

- sa nultim provodnikom



-Ovaj slučaj je identičan slučaju kad imamo tri posebna monofazna podešavača, pa ga tako i analiziramo.

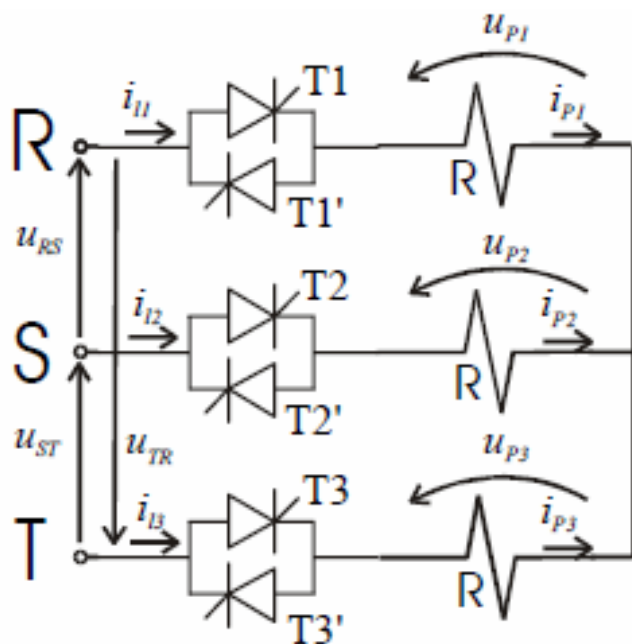
-Da bi potekla bilo koja od linijskih struja iz faza potrebno je da je uključen barem 1 od ovih 6 tiristora.

-Ovo je moguće zbog postojanja nultog provodnika kuda struja može da se zatvori.

-Kad su sve tri grane provodne struja kroz nulti provodnik je:

$$i_0 = i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

- bez nultog provodnika



Linijski naponi su:

$$u_{RS} = U_l \sqrt{2} \sin \omega t, u_{ST} = U_l \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}), u_{TR} = U_l \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3})$$

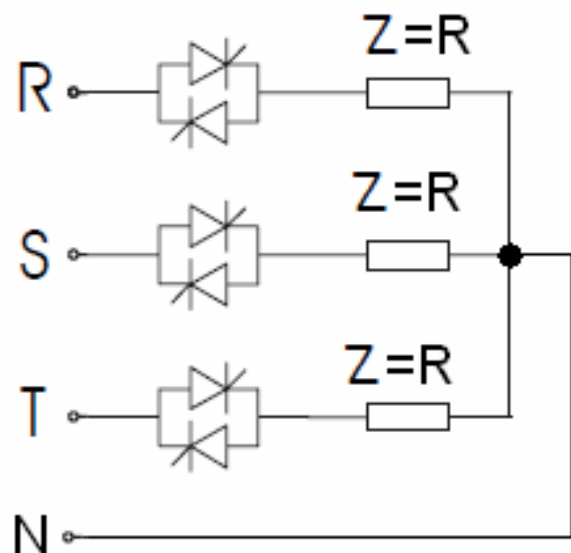
-U ovom slučaju da bi protekla bilo kakva struja kroz potrošač moraju biti provodne najmanje 2 grane.

-Ako je provodna samo jedna grana (uključen samo jedan tiristor) struja kroz potrošač neće teći jer nema kuda da se zatvori (nema nultog provodnika).

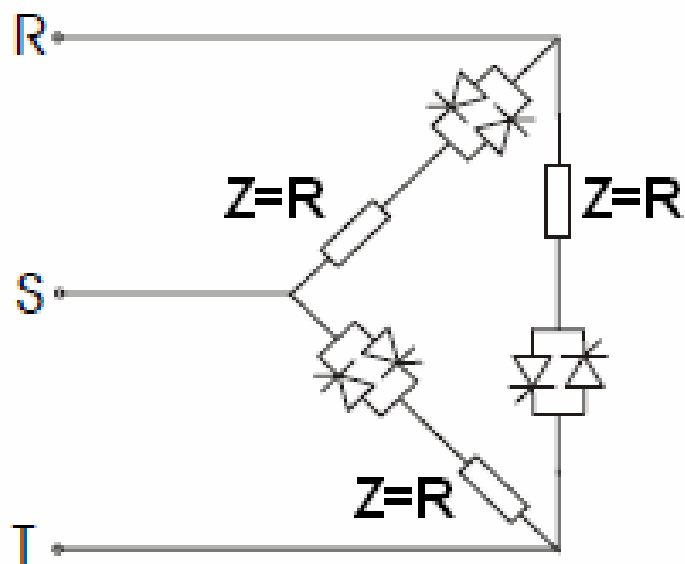
-Ako su provodne 2 grane tada će priključeni linijski (međufazni) napon napajati 2 grane potrošača, pa je na svakom potrošaču napon: $U_l/2$

Ako su sve 3 grane provodne situacija je kao da imamo nulti provodnik, jer je napon zvezdišta nula. Tada su na svakom od potrošača fazni naponi u_R , u_S , u_T koji su u odnosu na međufazne napone u^{RS} , u^{ST} , u^{TR} fazno pomereni za $\pi/6$. Struje kroz potrošače su istovremeno i linijske i u fazi su sa faznim naponima u_R , u_S , u_T

PRIMERI TROFAZNIH VEZA (REGULACIJA SNAGE ELEKTRO OTPORNIH PEĆI)



Pri vezi u “zvezdu” sa izvedenim zvezdištem trofazna sprega se svodi na tri monofazna podešavača napona sa antiparalelnim tiristorima.



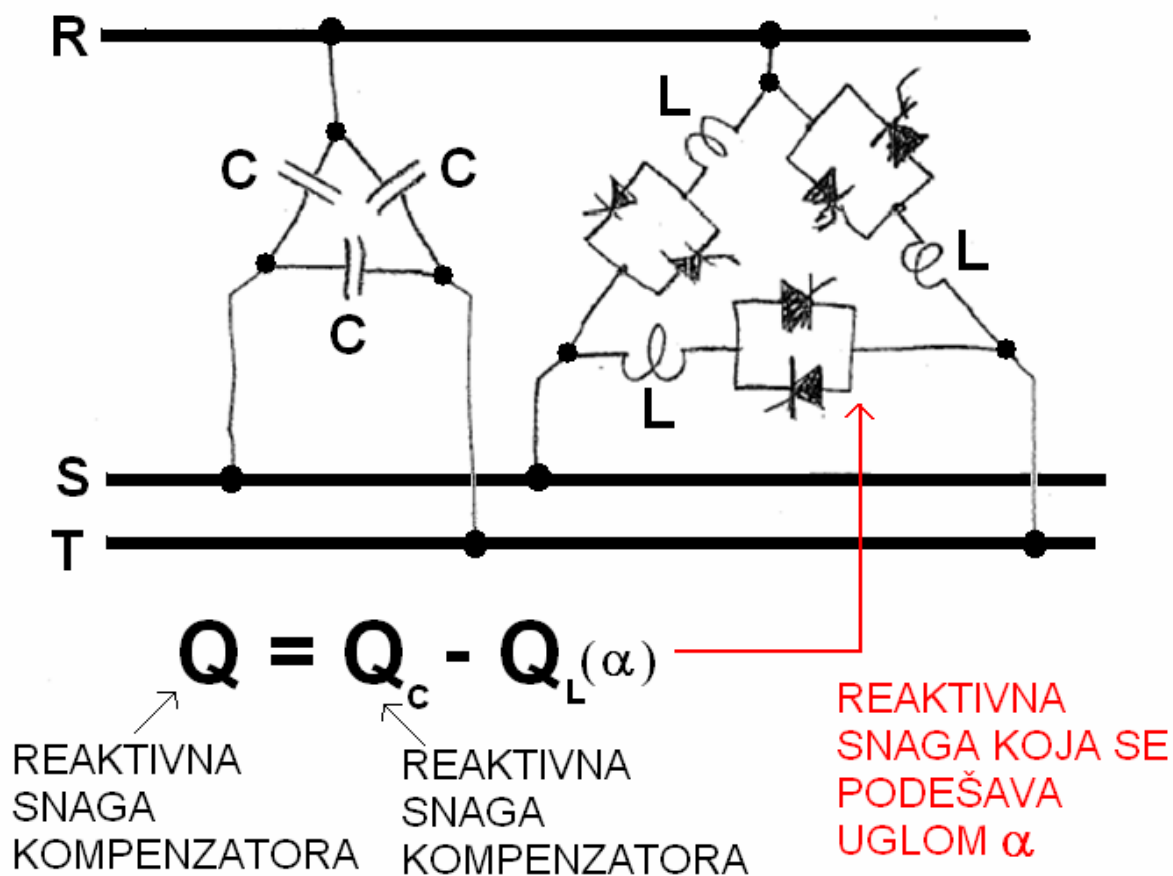
Kod većih snaga antiparalelni tiristori se vezuju u “trougao”

Pri sprezi antiparalelnih tiristora u “trouglu” manja je srednja i efektivna vrednost struje kroz jedan tiristor, u odnosu na spregu “zvezda”, i to 1.73 puta.

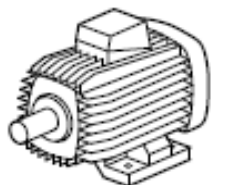
REGULACIJA REAKTIVNE SNAGE

Brza ili dinamička regulacija

IZVODI SE NA SREDNJE NAPONSKOM NIVOU (6kV, 10kV i 35kV)



UREĐAJI ZA MEKANO UPUŠTANJE ASINHRONIH (kaveznih) MOTORA –"SOFT" STARTERI

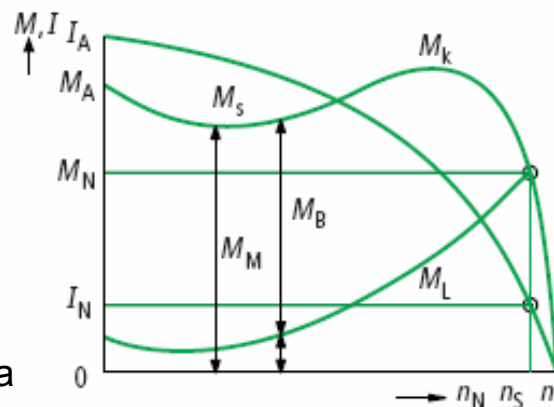


$$n_s = \frac{f \times 60}{p}$$

n_s -sinhrona brzina

f -učestanost

p -broj pari polova



Tipične karakteristike asinhronog motora u funkciji broja obrtaja n :

-momenat $M(n)$

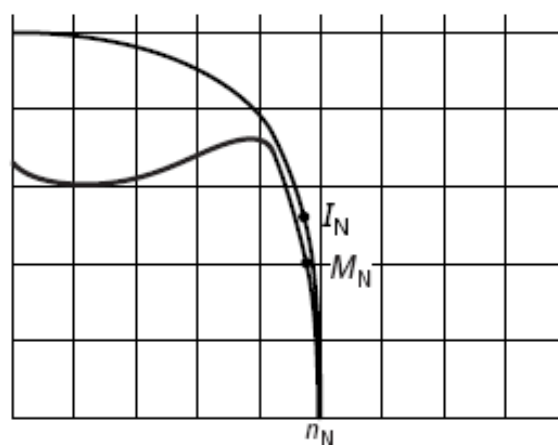
-struja $I(n)$

Karakteristika opterećenja motora (radne mašine):

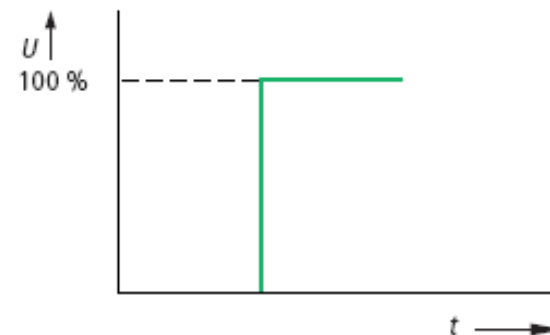
-momenat $M_L(n)$

DIREKTNI UPUŠTAČ (ELEKTRO MEHANIČKI PREKIDAČ)

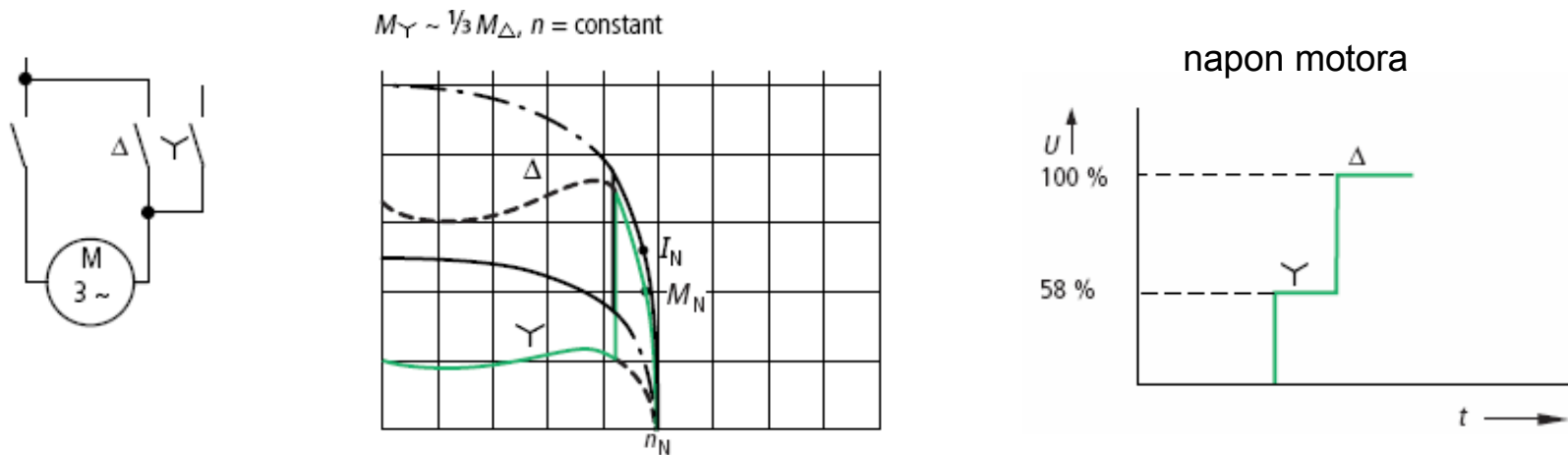
$$M \sim I, n = \text{constant}$$



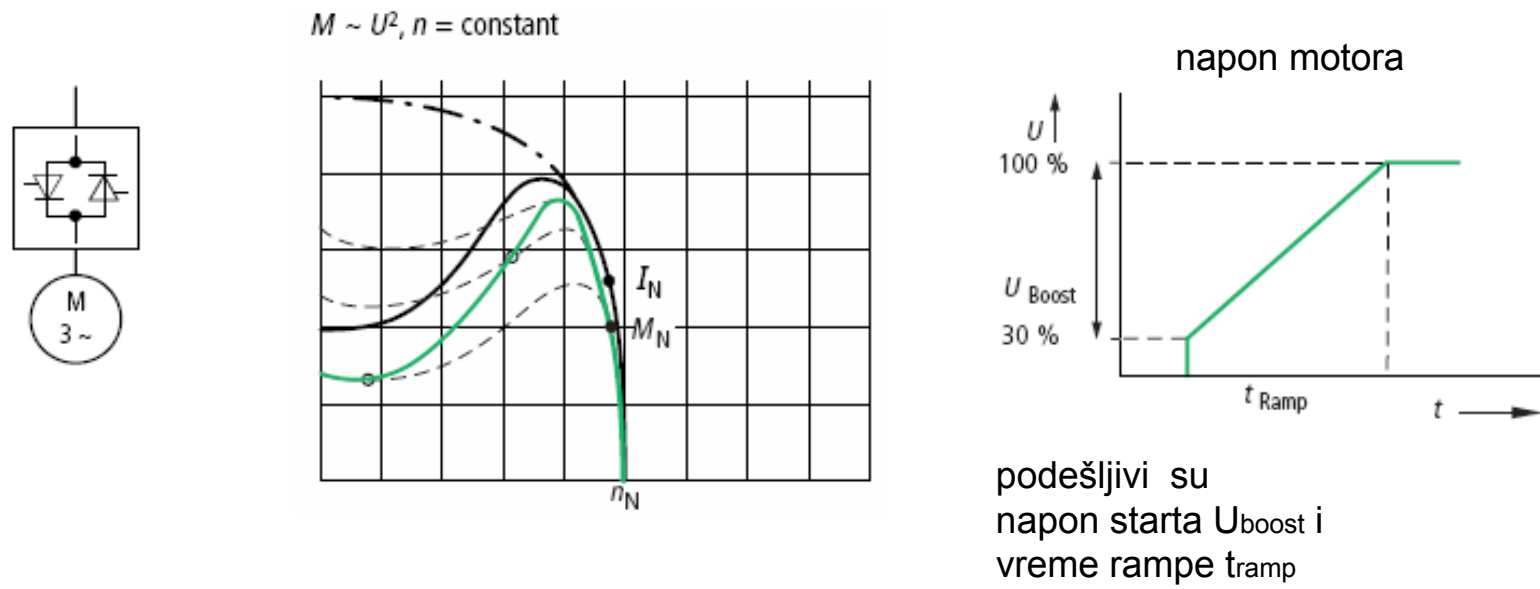
napon motora



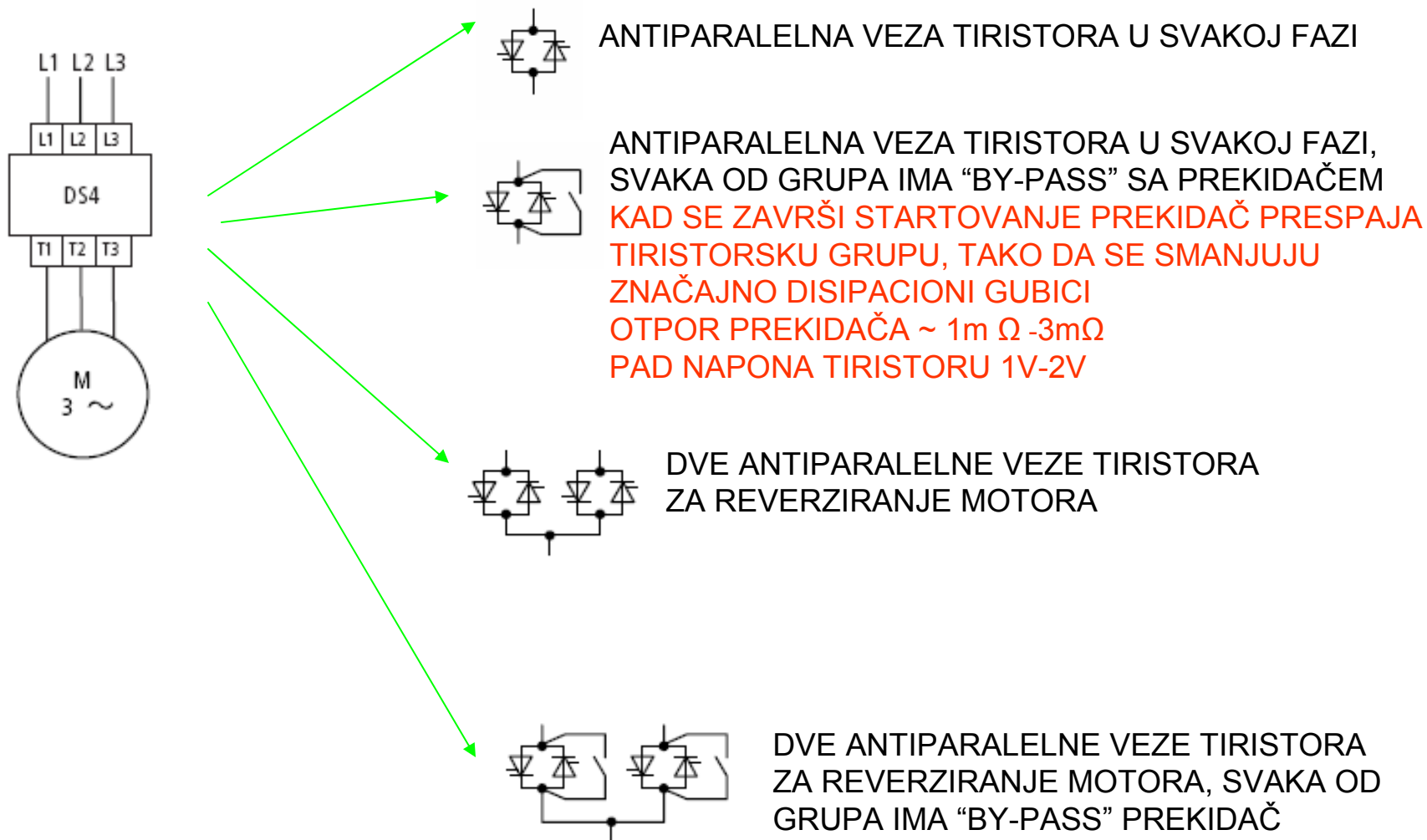
UPUŠTAČ “zvezda-trougao” (elektro mehanički)



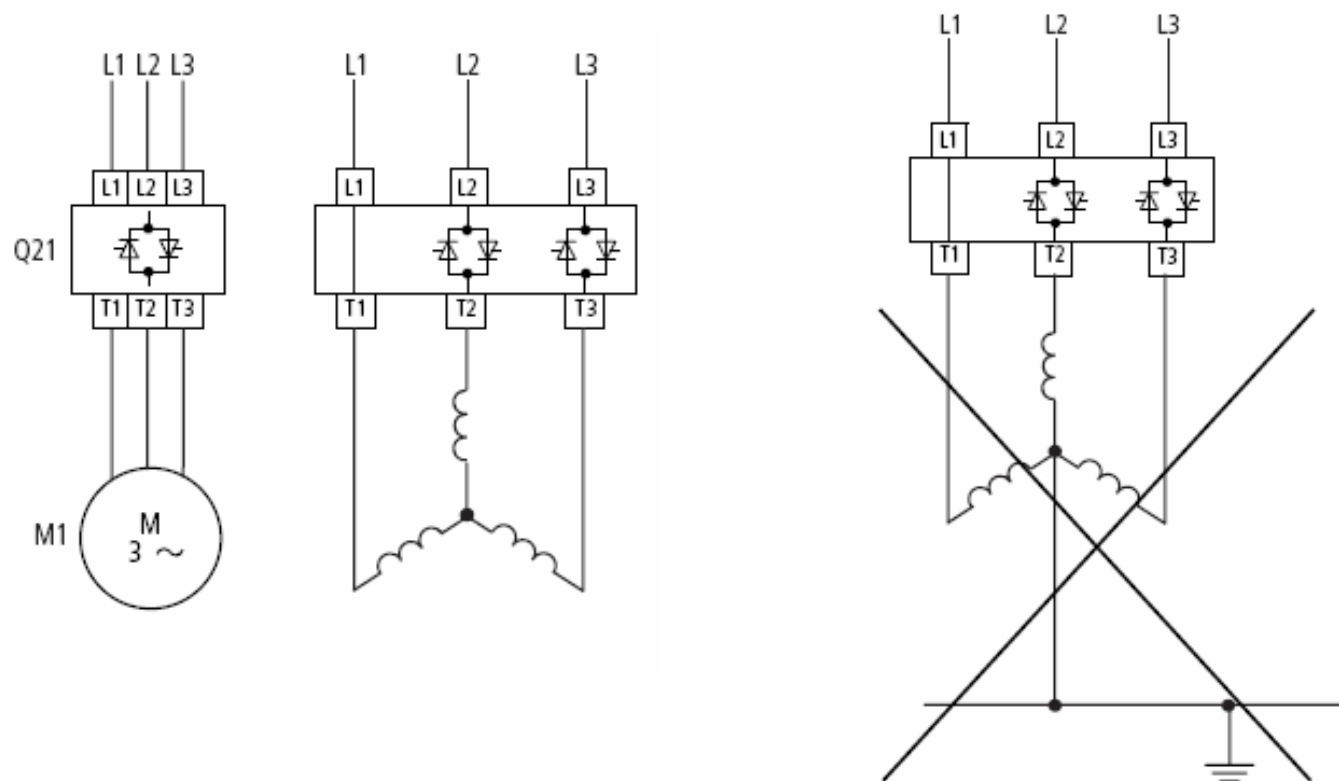
ELEKTRONSKI UPUŠTAČ (naizmenični podešavač napona-antiparalelna tiristorska grupa)



TROFAZNE VARIJANTE TIRISTORSKIH UPUŠTAČA (JEDNOPOLNA ŠEMA)



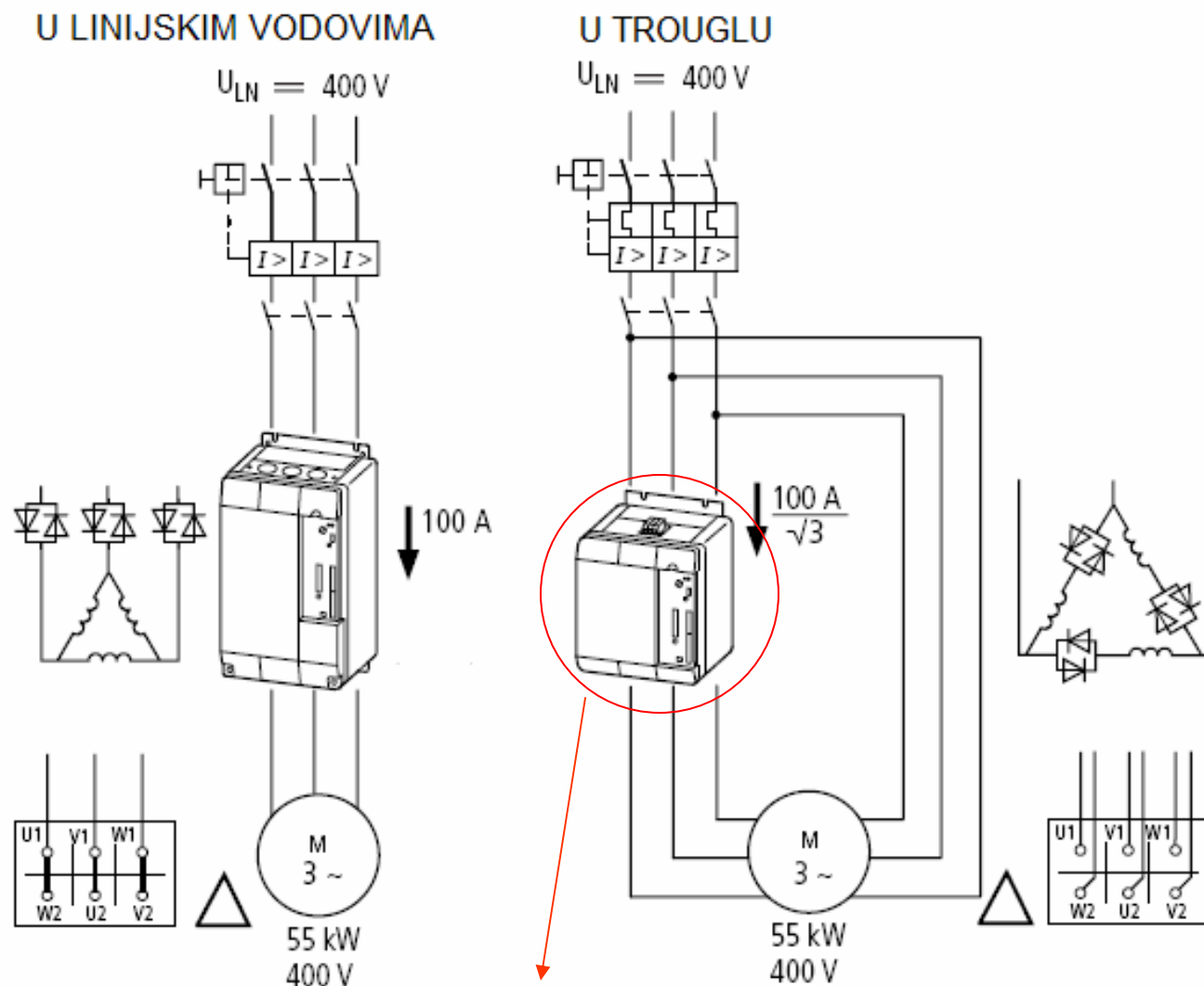
VARIJANTA TROFAZNOG UPUŠTAČA SA TIRISTORSKIM GRUPAMA U DVE FAZE



**NIJE DOZVOLJENO!!!!!!
ZAŠTO??????**

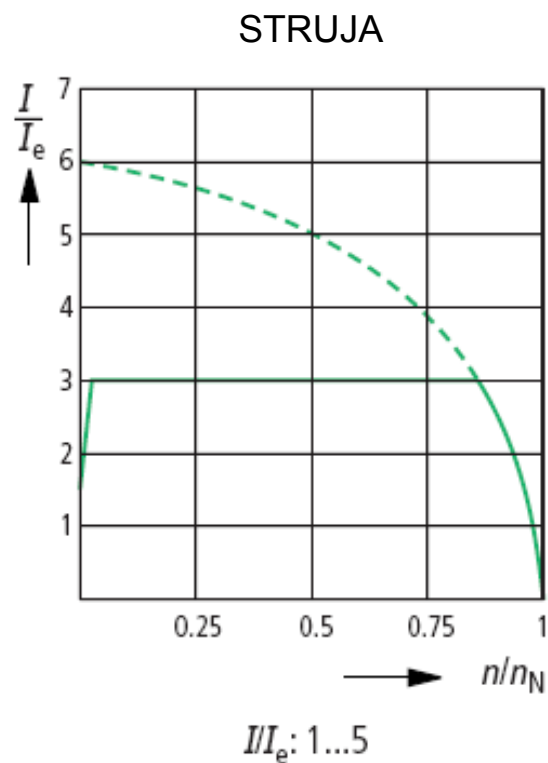
VARIJANTA TROFAZNOG UPUŠTAČA SA TIRISTORSKIM GRUPAMA U SVE TRI FAZE

ANTIPARALELNE TIRISTORSKE GRUPE

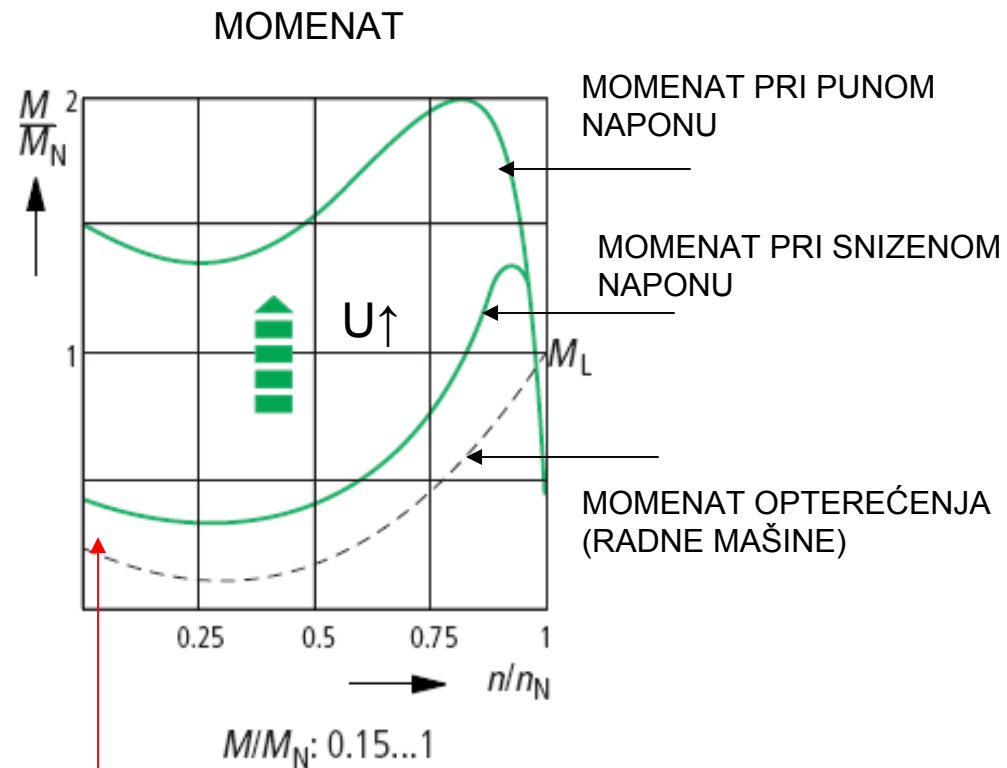


UOČITI MANJI GABARIT
UPUŠTAČA

TIPIČNE KARAKTERISTIKE ASINHRONOG MOTORA PRI STARTU SA KORIŠĆENJEM TIRISTORSKOG “SOFT” STARTERA



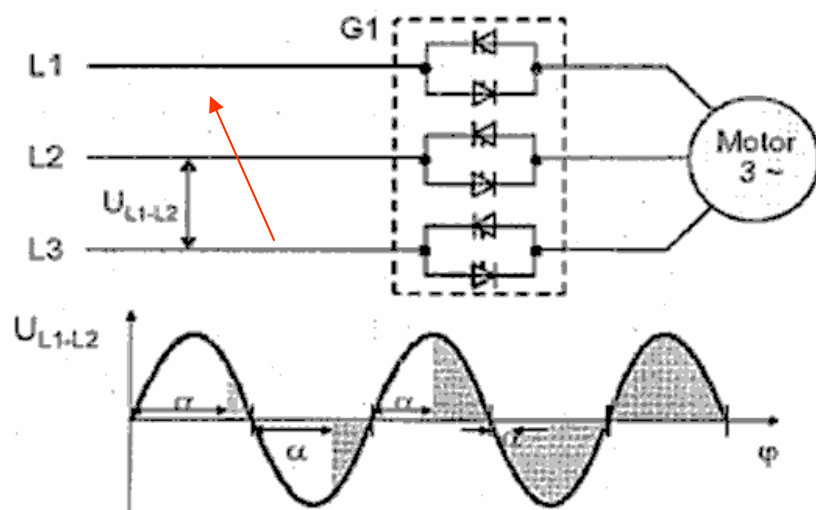
OGRANIČENJE POLAZNE STRUJE



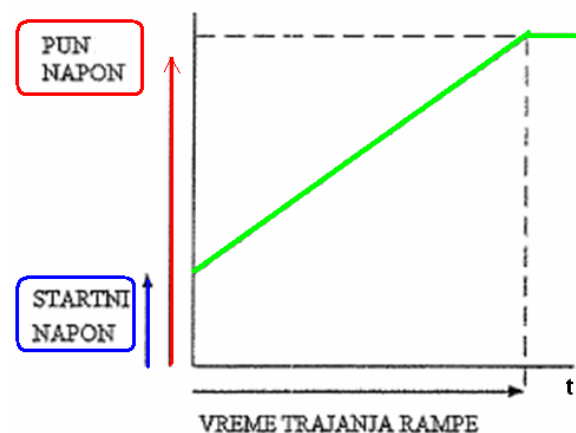
MOMENAT JE PROPORCIONALAN U^2

MANA: POLAZNI MOMENAT JE MALI

LINIJSKI NAPON I NJEGOVA ZAHTEVANA PROMENA

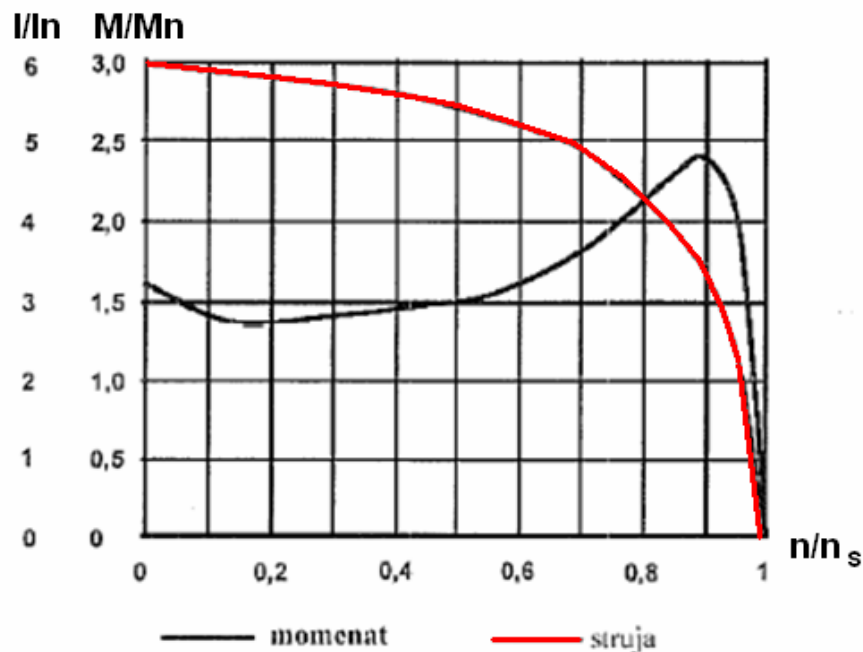


- Talasni oblik linijskog napona trofaznog asinhronog motora uz korišćenje regulacije napona.
- Promenom ugla regulacije menja se efektivna vrednost napona na priključcima motora

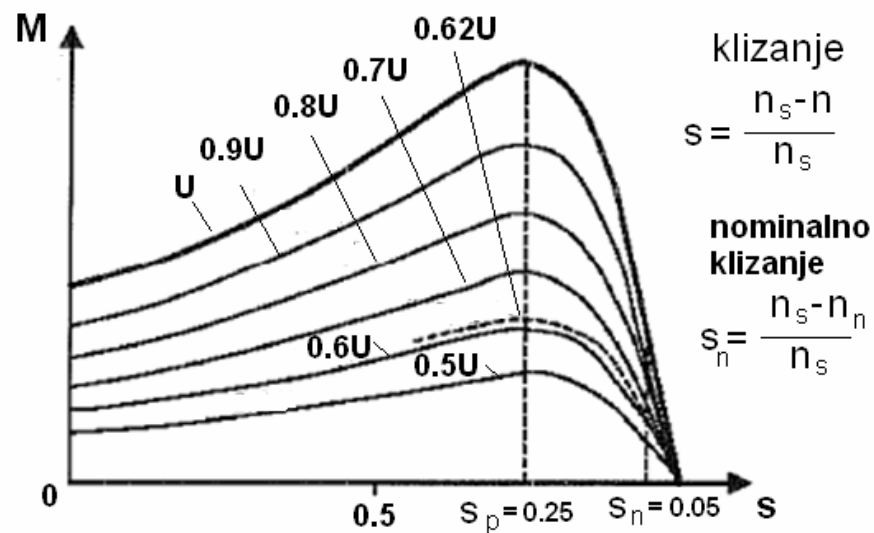


- Promena napona statora motora po unapred zadatoj vremenskoj rampi.
- Uvek postoji neki početni napon, da bi se ostvario polazni momenat.

NEKE TIPIČNE KARAKTERISTIKE POGONA “SOFT” STARTER +ASINHRONI MOTOR

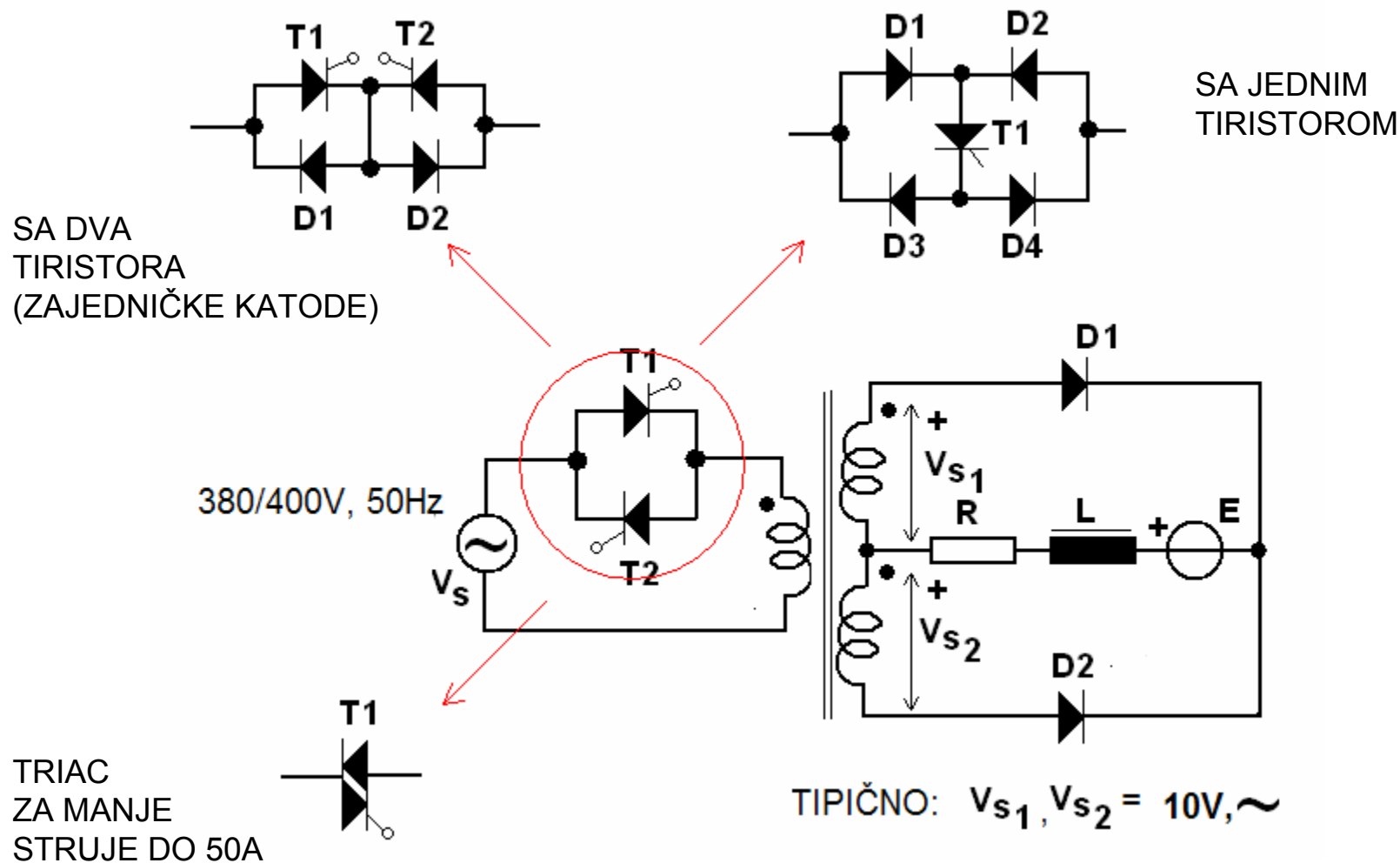


- Tipični grafik momenta i struje asinhronog motora u zavisnosti od broja obrtaja prilikom direktnog puštanja motora u praznom hodu.
- Polazna struja skoro 6 puta veća od nominalne.



- Grafik momenta motora u zavisnosti od vrednosti napona napajanja
- Uočava se uticaj promene efektivne vrednosti napona napajanja na momenat motora.
- Uticaj na struju motora, pri nekom zatom klizanju, je direktno proporcionalan.

ISPRAVLJAČI ZA GALVANIZACIJU (OPCIJE TIRISTORSKE GRUPE)



MOGU SE KORISTITI U TROFAZNIM ILI MONOFAZNIM VEZAMA

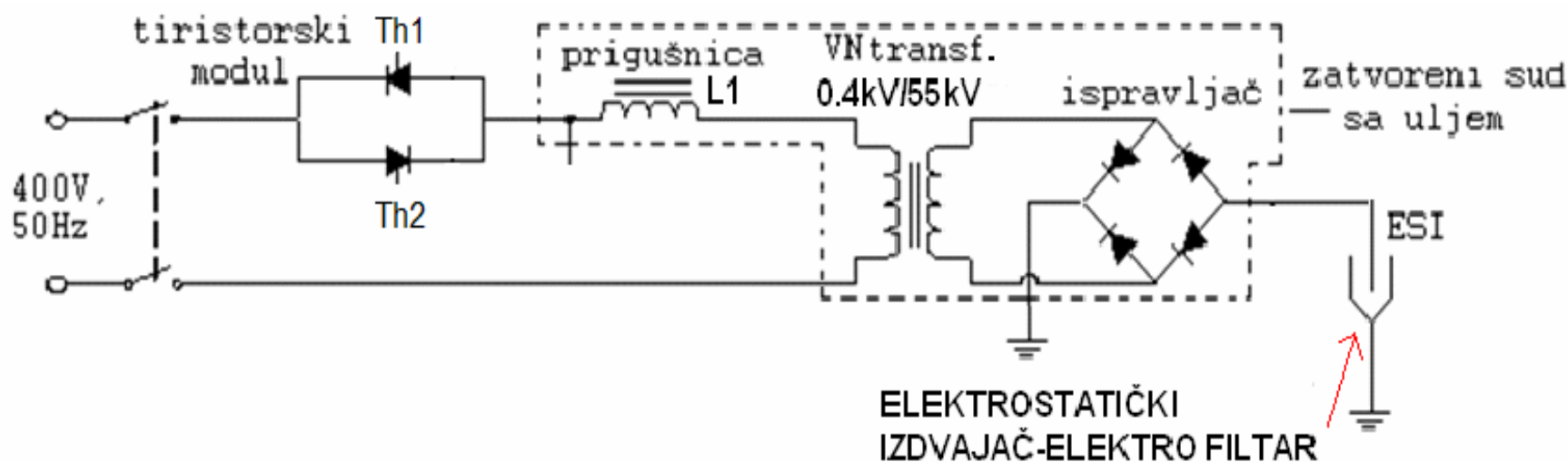
ISPRAVLJAČI ZA NAPAJANJE ELEKTROSTATIČKIH FILTERA –PREČIŠĆAVANJE DIMNIH GASOVA NA TERMoeLEKTRANAMA

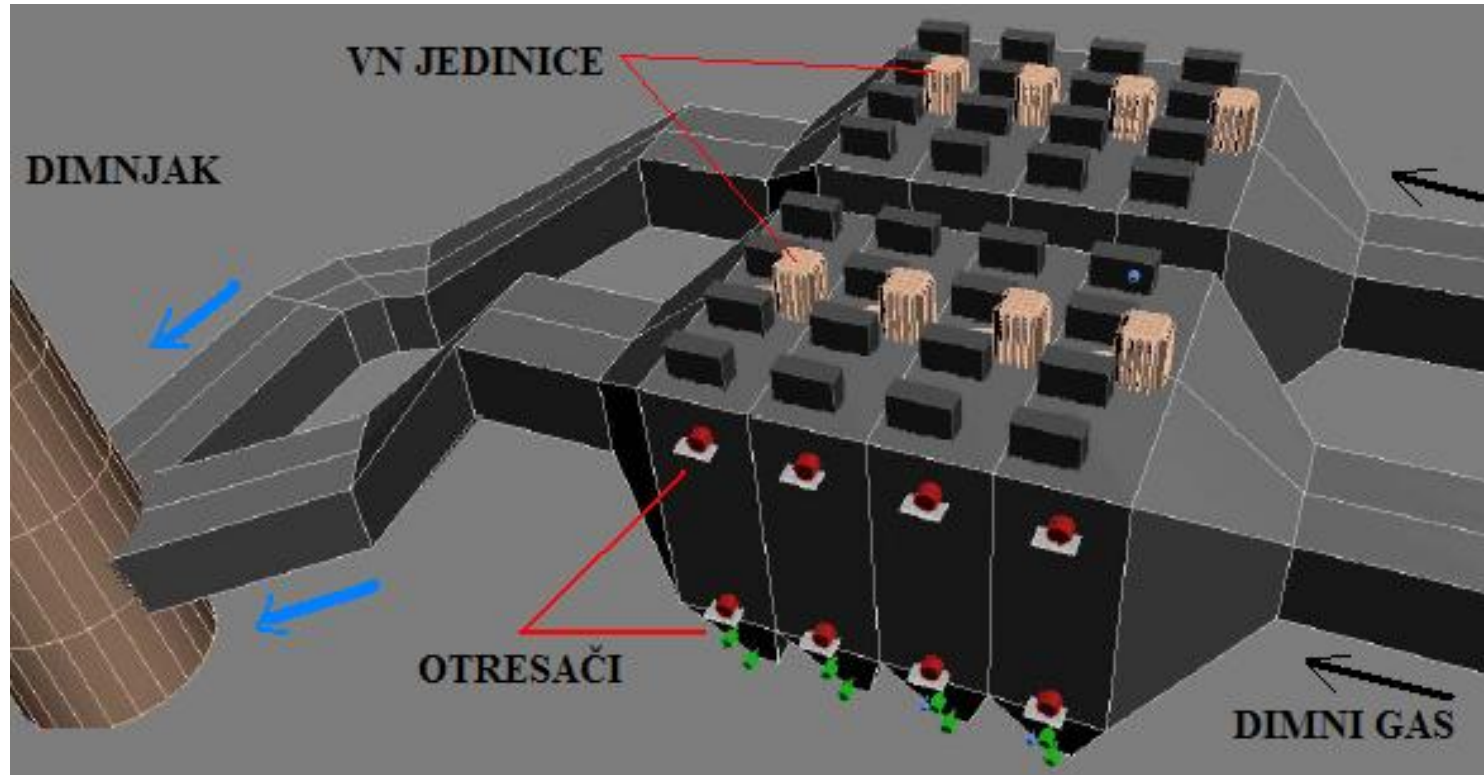
Podešavači napona se koriste i kod VN ispravljača-ELEKTROSTATIČKI IZDVAJAČI
odnosno elektrostatički filtri

Tipična vrednost napona elektrodnog sistema filtra je 40kV.....100kV

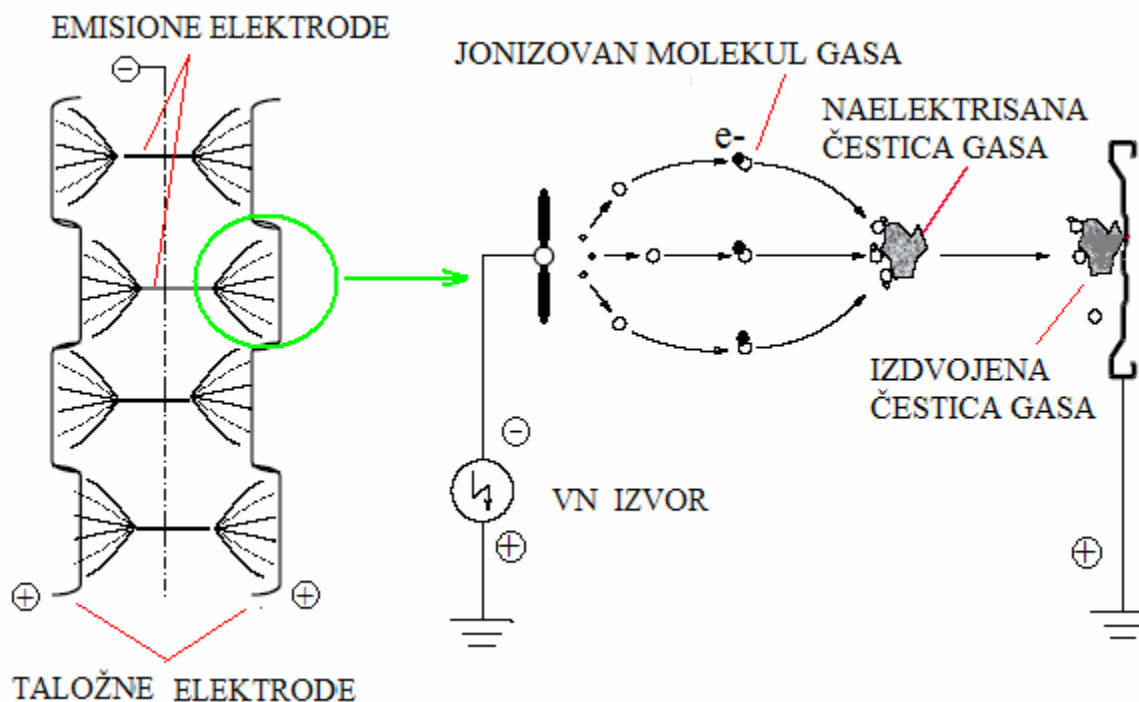
Tipična vrednost struje 1-2A

Regulacija izlaznog napona se vrši antiparalelnom vezom tiristora.





- Elektrostatički filteri su komore kroz koje prolazi dimni gas iz ložišta kotla i on je pun letećeg pepela
- Sadrže viskonaponske jedinice za izdvajanje čestica u dimnom gasu (oko 60% sastava dimnog gasa čine čestice, ostalo su oksidi sumpora, azota i sl.)
- Sadrže otresače za otresanje izdvojenog pepela sa elektroda



- Odvajanje svih pomenutih tipova čvrstih produkata se ostvaruje jakim elektrostatičkim poljem koje se formira u izdvajačkim komorama
- U izdvajačkim komorama se nalaze dve vrste elektroda: *taložne* i *emisione*, kao i uređaji za otresanje izdvojenih čestica sa taložnih elektroda



Zidovi komora i taložne elektrode (u vidu metalnih zavesa od talasastog lima) su **pozitivne elektrode**.

Negativne elektrode oko sebe generišu **koronu** koja naelektrisava čestice letećeg pepela, koje zatim idu prema taložnoj elektrodi gde se sakupljaju i uklanjaju.



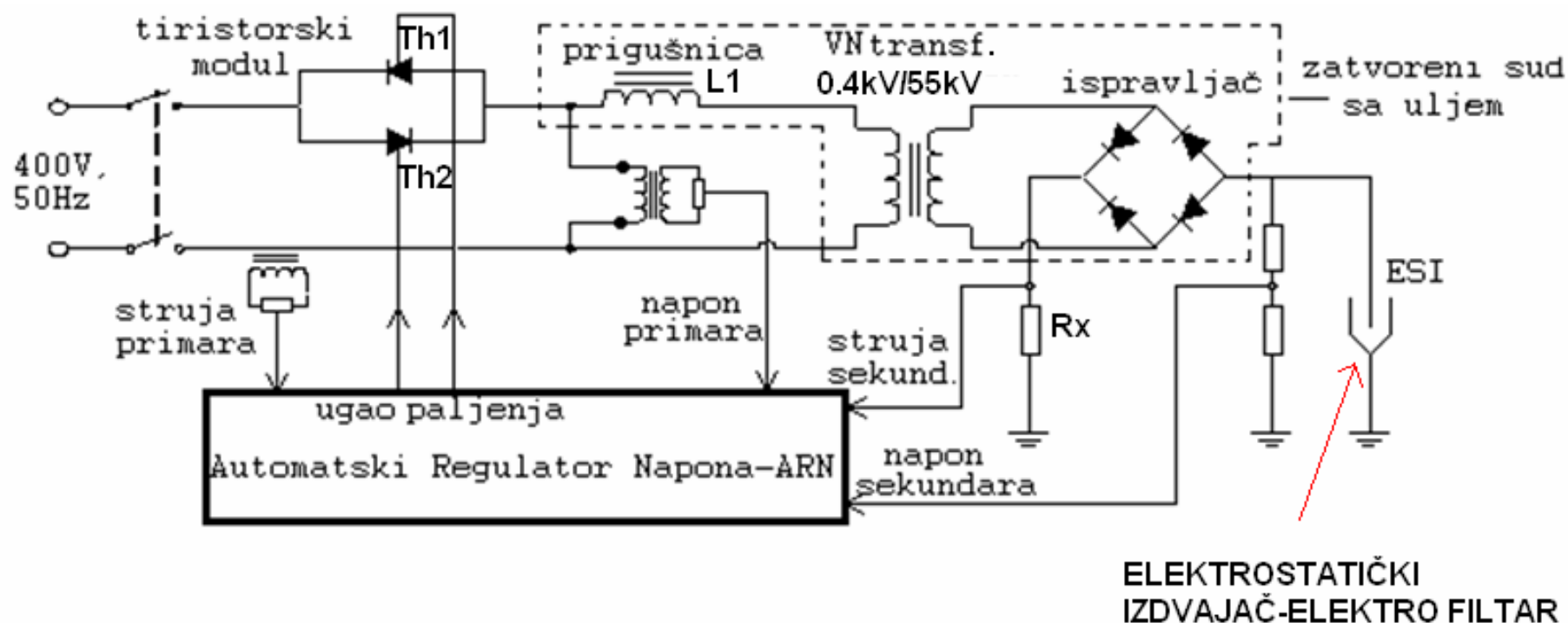
Emisione elektrode (ramovi sa žicom ili nizovi cevi sa šiljcima) su **negativne elektrode**.



Emisione elektrode

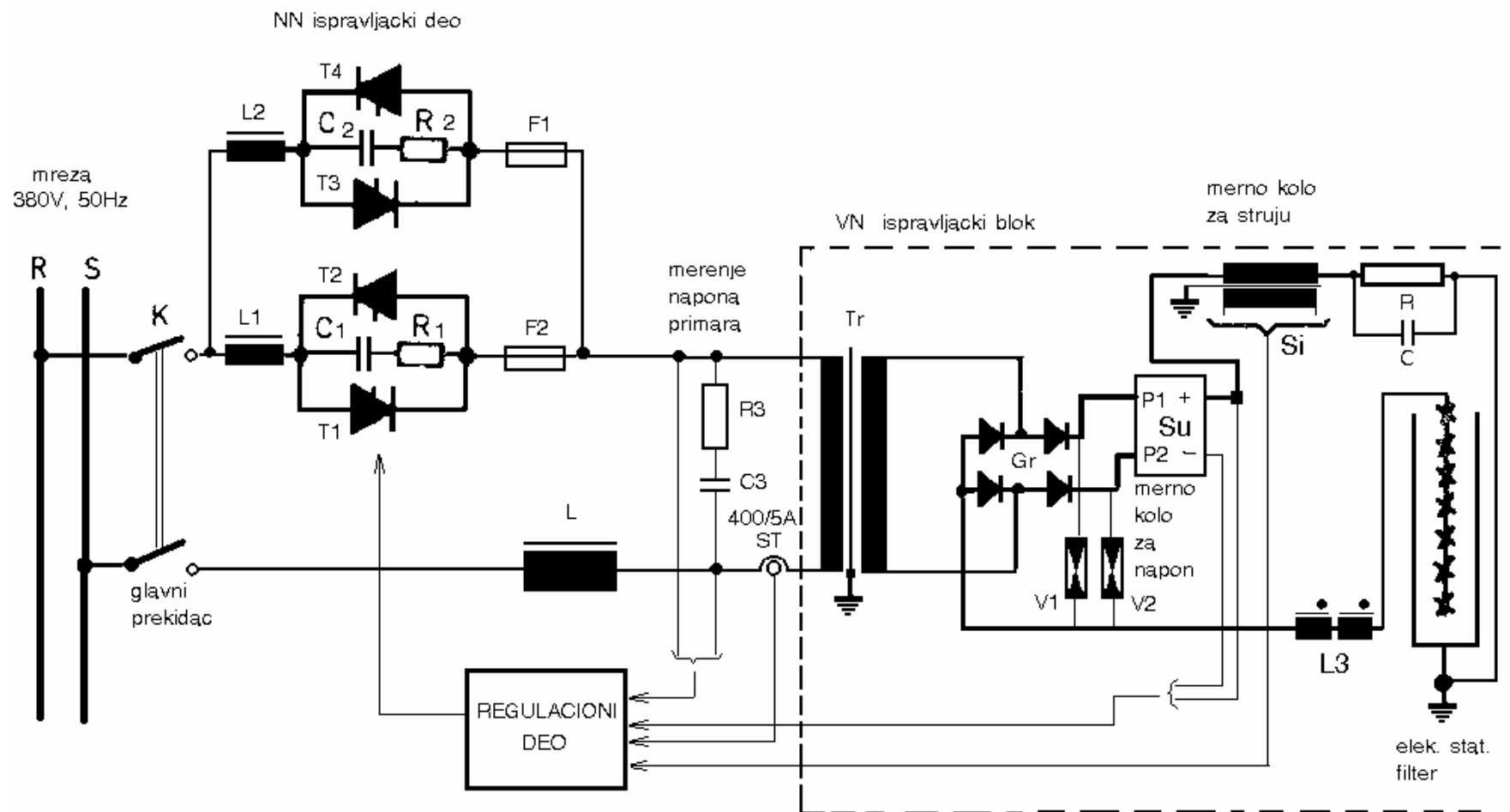
Taložne elektrode

TIRISTORSKI PRETVARAČ za regulaciju napona elektrostatičkih filtara

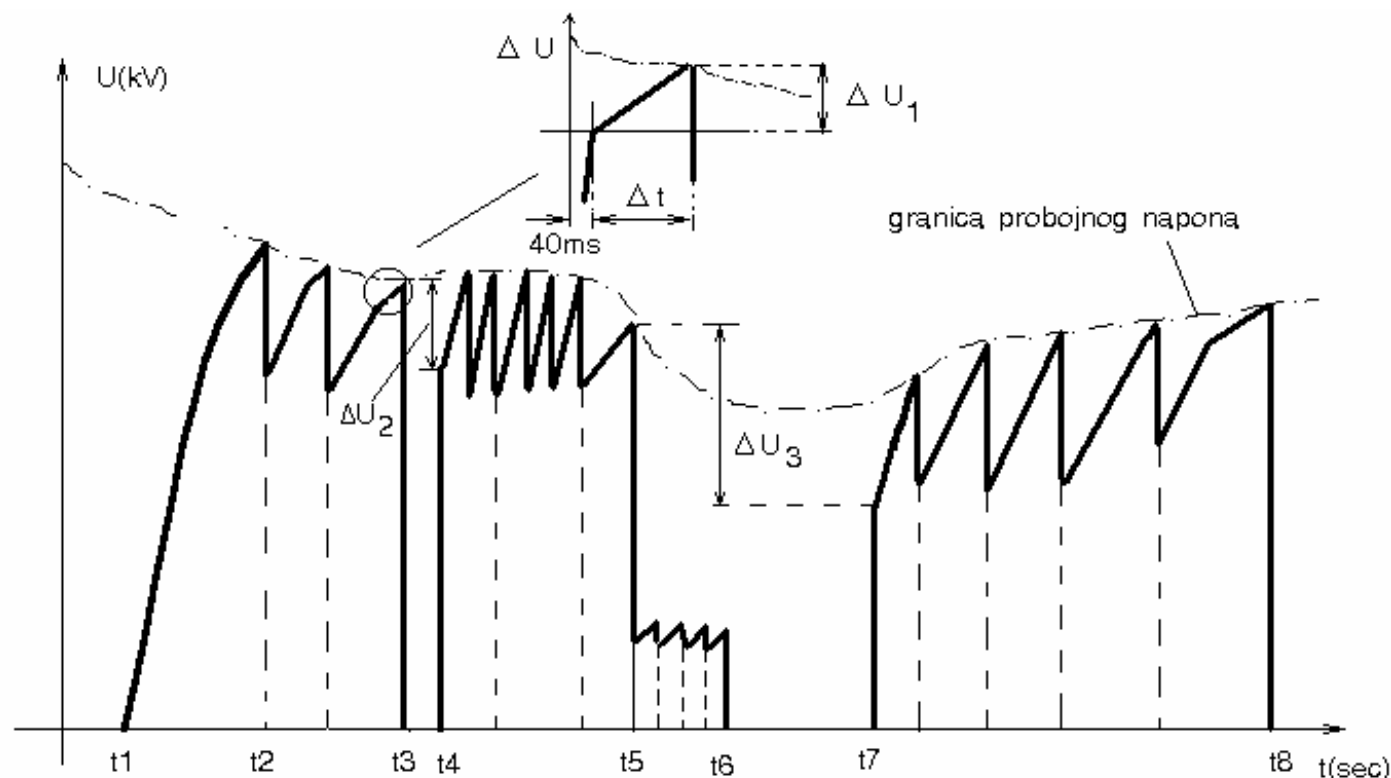


- Napon napajanja je 0.4kV; Regulacija se vrši antiparalelnom vezom tiristora Th1 i Th2.
- Podešavanjem njihovog ugla paljenja α , visoki jednosmerni napon na elektrodama filtra se drži tik ispod proboja. Prigušnica L1 i otpornik Rx ograničavaju struju kratkog spoja (kad se desi proboj ili kvar).
- Diodni ispravljač je napravljen sa četiri grupe redno vezanih dioda (zajedno sa paralelnim elementima za izjednačavanje potencijala duž lanaca dioda).
- Redno vezane diode, prigušnica L1 i VN transformator se nalaze u istom sudu sa uljem.

PRAKTIČNA REALIZACIJA UPRAVLJAČKOG DELA ELEKTROSTATIČKIH FILTERA

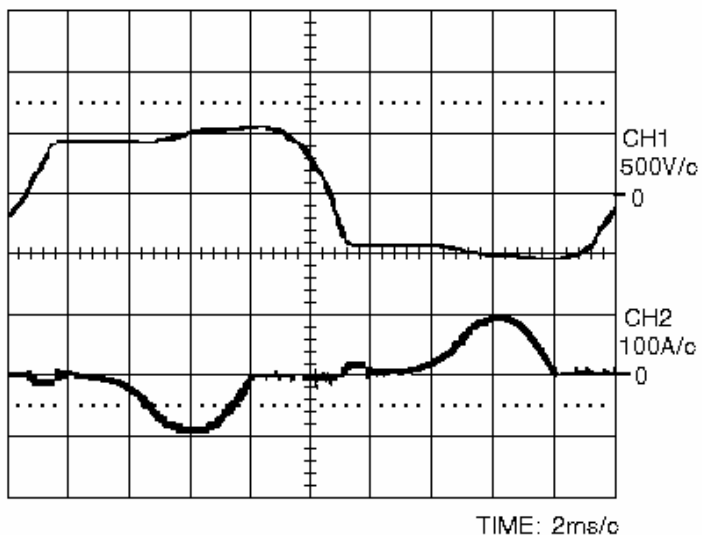


NAPONSKA REGULACIJA i DETEKCIJA KORONE

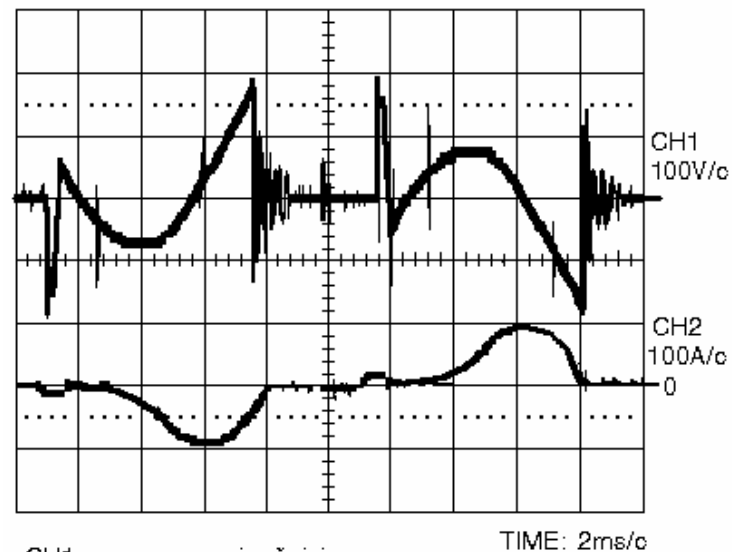


- Nakon uključenja ispravljača (*trenutak t_1*), napon vrlo brzo postiže granicu probojnog napona.
- U trenutku t_2 dolazi do preskoka, pa se izlazni napon spušta za regulisanu vrednost ($-dU/dt$).
- Vremenski interval t_2-t_1 predstavlja vreme puštanja filtra u pogon.
- Nakon toga napon ponovo raste do granice proboja regulisanom brzinom ($+dU/dt$).
- Ako se desi da se granica probojnog napona smanji, regulisanim ispravljačem se osigurava rad u blizini probojnog napona.
- U trenutku t_3 dolazi do strujnog preopterećenja filtra, što se detektuje u struji na primarnoj strani ($I > 1,2I_n$), kada dolazi do isključenja i trajanje prekida usled prekoračenja za oko 80ms (interval t_3-t_4) i redukcije napona u odnosu na to prekoračenje za ΔU_2 .
- U trenutku t_5 dolazi do formiranja električnog luka između filtarskih elektroda, koji se održava do trenutka t_6 . Ovo trajanje je reda veličine 200ms. Nakon ovog vremenskog intervala, regulator obezbeđuje spuštanje izlaznog napona na nulu i vrši se deblokiranje rada ispravljača (interval t_7-t_6).
- U ovom intervalu se obezbeđuje gašenje električnog luka procesom dejonizacije. Nakon ovog intervala se ponovo podiže napon i uspostavlja normalni režim rada. Novouspostavljena vrednost napona je određena pomenutim uslovima u filtru i ona je niža od prethodne vrednosti tako da ΔU_3 predstavlja redukciju nakon gašenja električnog luka.

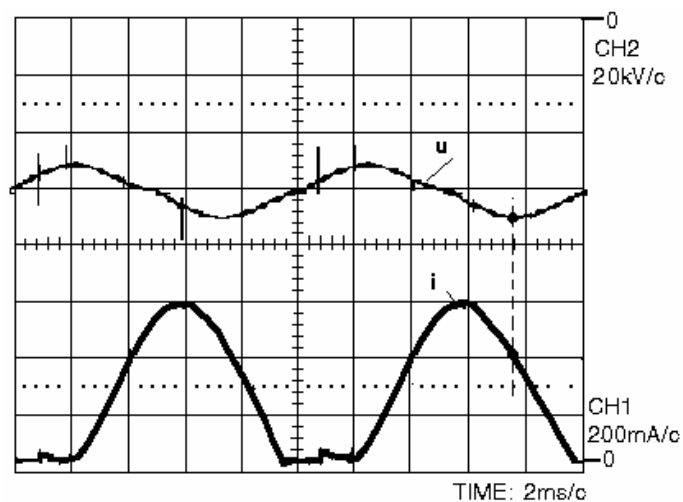
EKSPERIMENTALNI REZULTATI-Merenja u realnim eksploatacionim uslovima



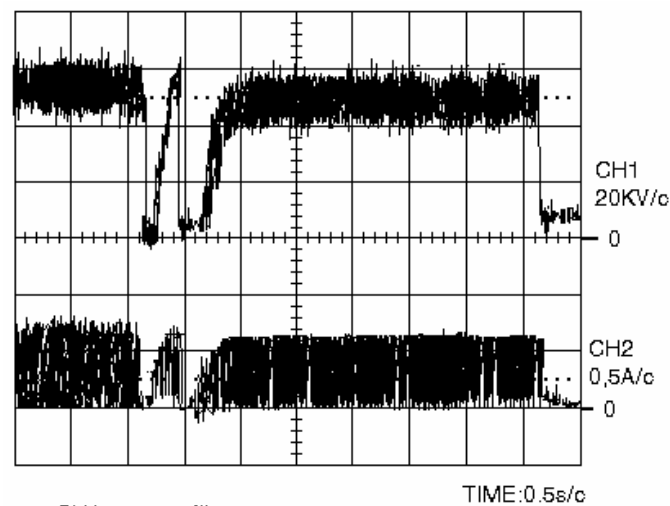
CH1: napon primara VN transformatora
CH2: struja mreže



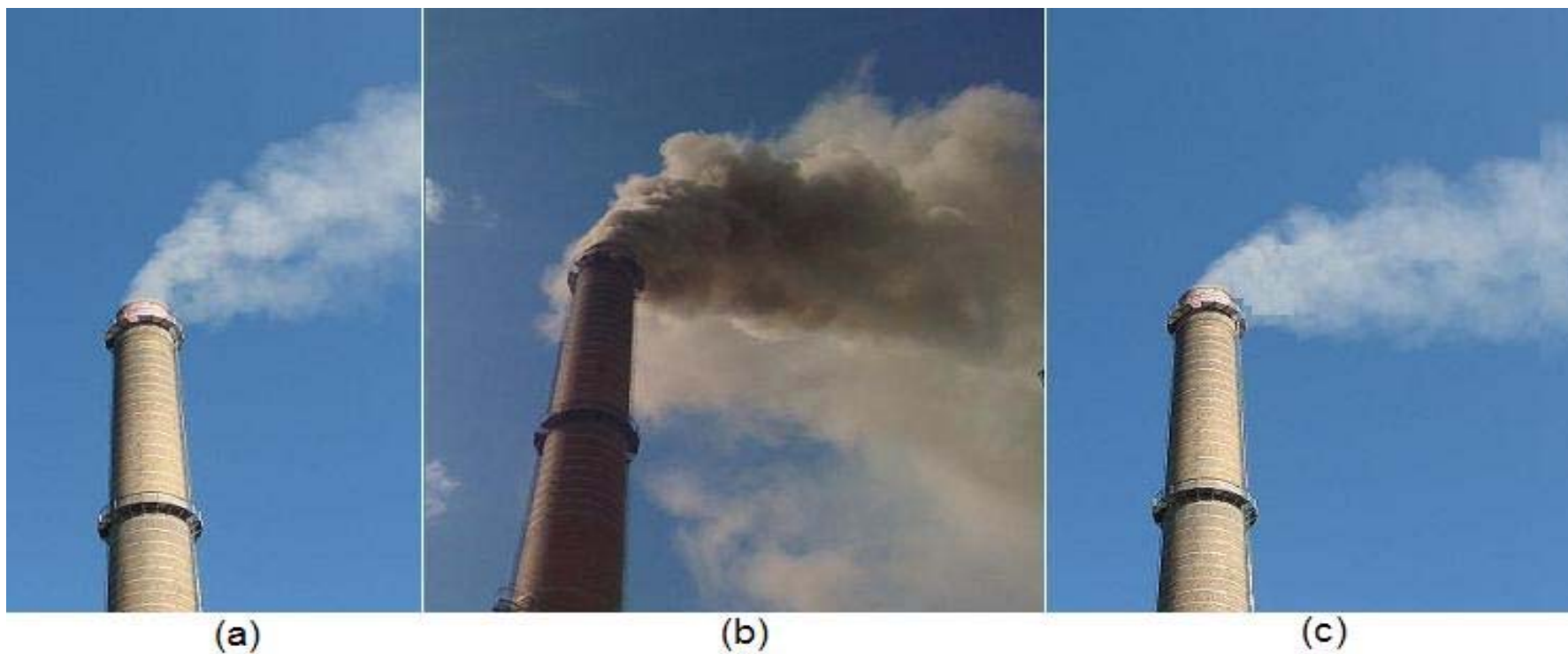
CH1: napon na prigušnici
CH2: struja mreže



CH1: struja elektrostatičkog filtra
CH2: napon na elektrostatičkom filtru

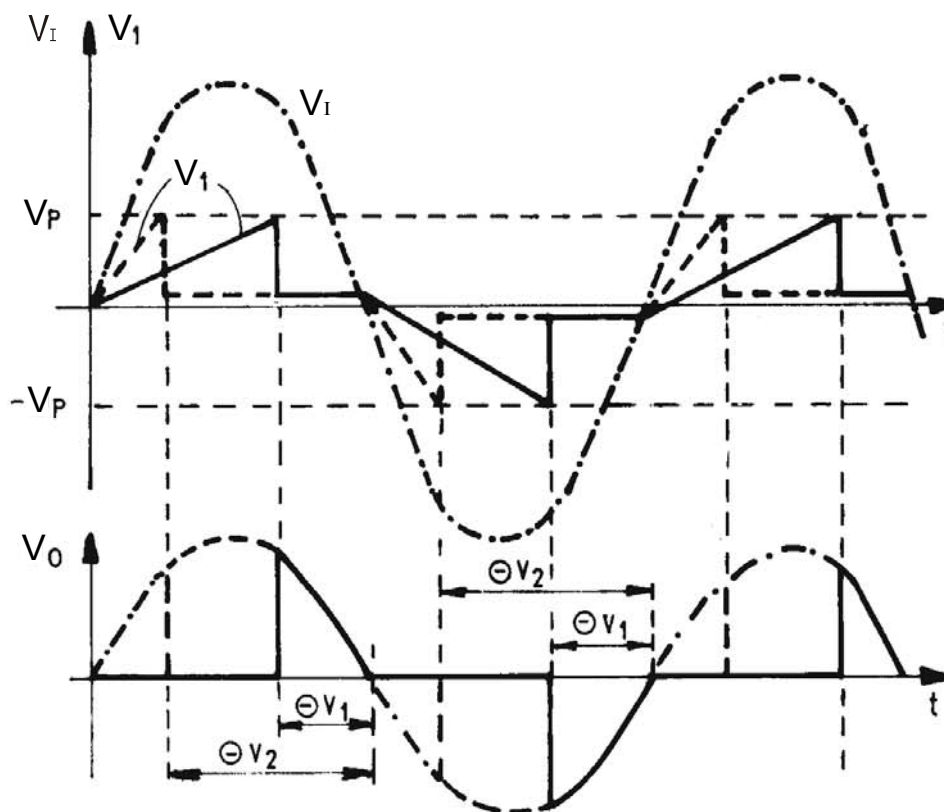
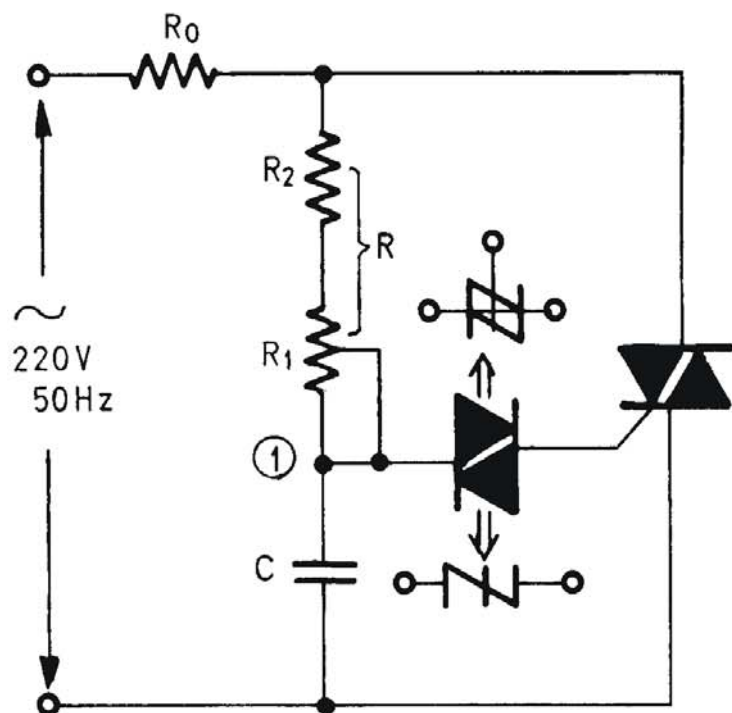


CH1: napon filtra
CH2: struja filtra



Vizuelno praćenje izlaznog dima; (a)-VF napajanje, (b)-isključeni ESI, (c)- 50Hz-no napajanje (antiparalelna veza tiristora)

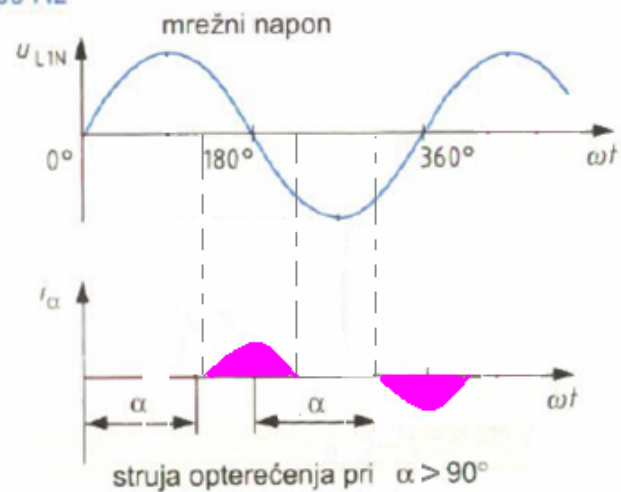
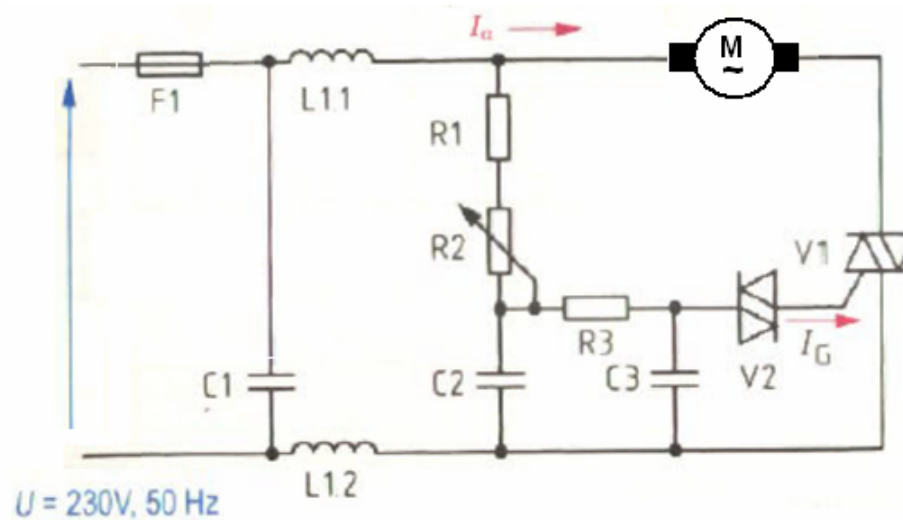
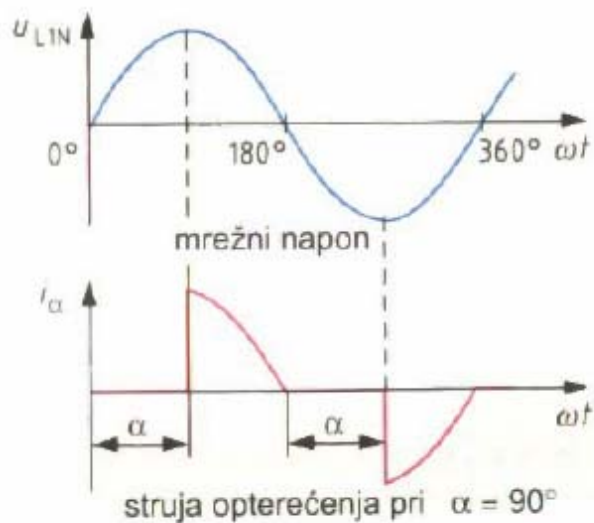
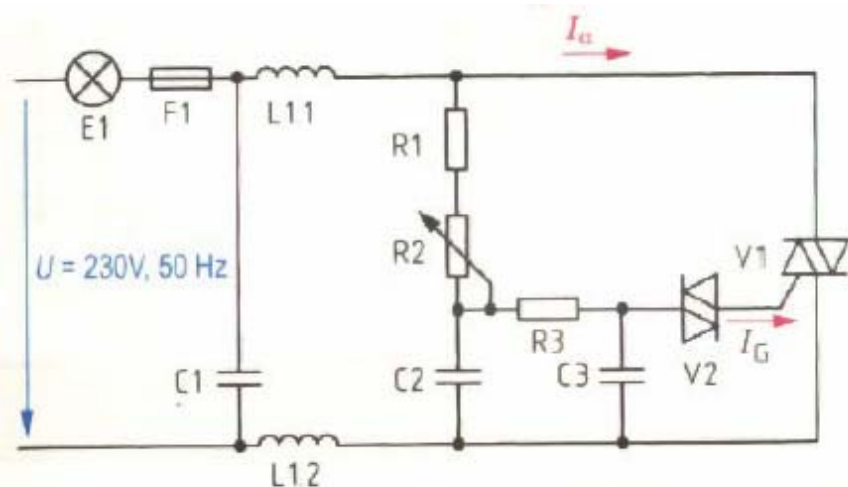
FAZNO UPRAVLJANJE SA TRIJAKOM: Okidno kolo s dvosmernim regenerativnim prekidačem



Talasni oblici napona na ulazu V_1 , opterećenju V_0 i kondenzatoru V_c .

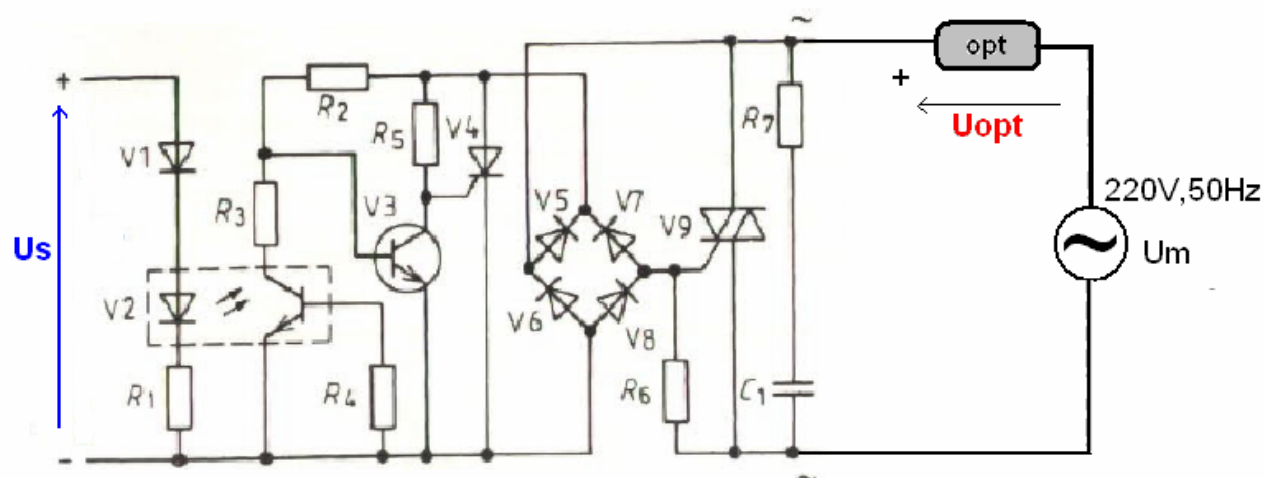
Faznim upravljanjem uključuje se napon na opterećenju pri određenim faznim uglovima. Tok snage se može podesiti između 0-100%. Potrošači iznad izvesnih graničnih snaga smeju biti u pogonu samo uz posebnu dozvolu, jer fazno upravljanje proizvodi povratna dejstva na mrežu –reaktivna snaga

FAZNO UPRAVLJANJE SA TRIJAKOM OSVETLJENJEM I KOMUTATORNIM MOTOROM



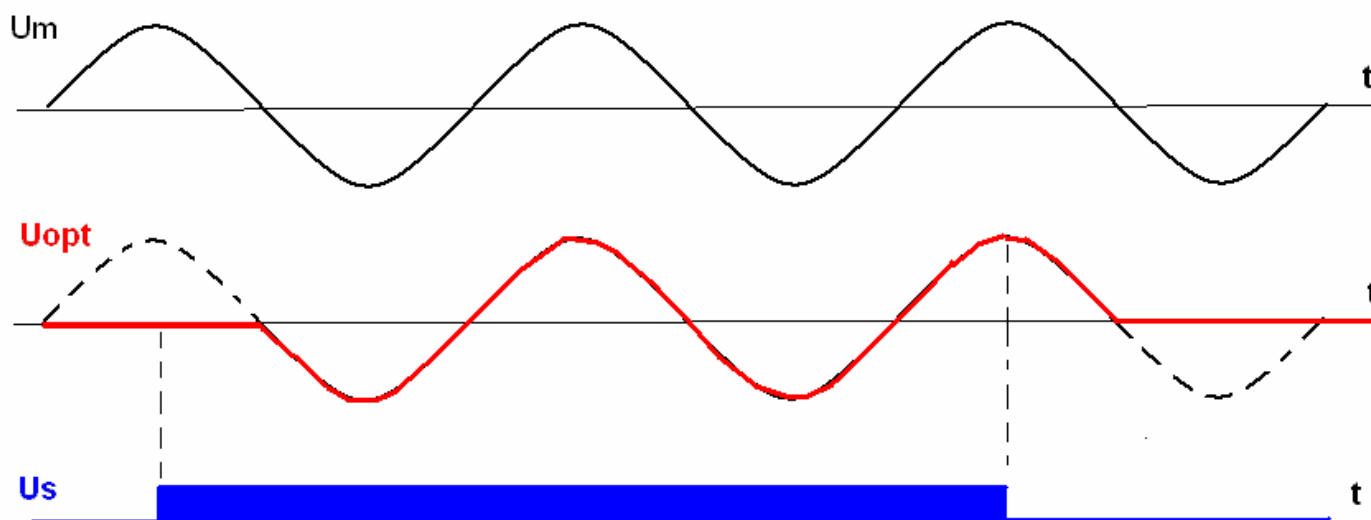
NULTA SKLOPKA

Uključuje opterećenje kod prolaska napona kroz nulu
Upravljanje optokaplerom
Elektronski poluprovodni releji



Prednosti:

- galvansko odvajanje upravljačkog kola i opterećenja
- uključivanje bez "odskakivanja"
- dug vek upotrebe
- neznatne radio smetnje
- velika brzina uključivanja

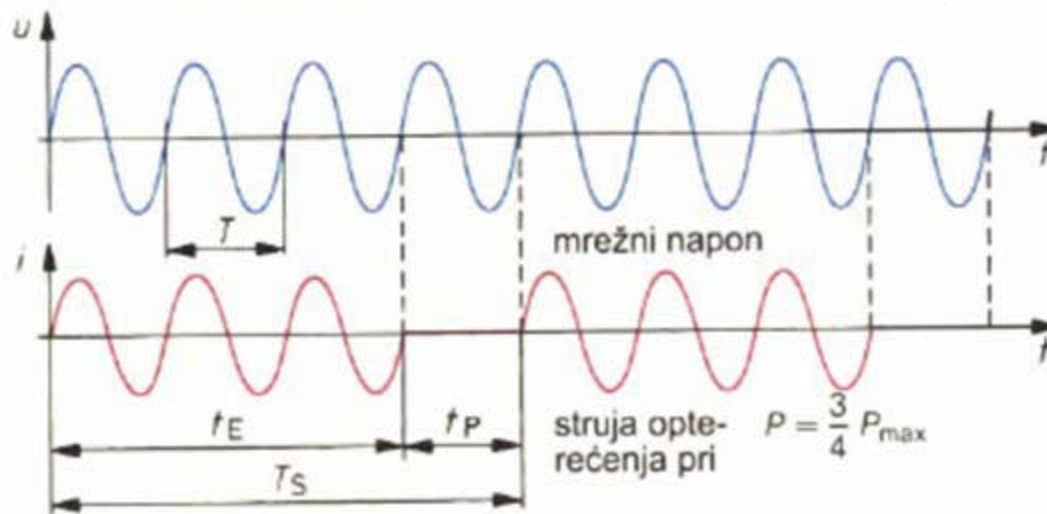


PRIMER:

Elektronski relej za
AC struje 1-40A
Upravljački napon
3-30V DC

UPRAVLJANJE PAKETOM OSCILACIJA

Nulte sklopke koje uključuju opterećenje nakon podešenog broja perioda naizmeničnog napona deluju kao da su upravljane paketom oscilacija, odnosno kao puno-talasno upravljane. Srednja primljena snaga opterećenja može iznositi 0-100%.



PREDNOSTI:

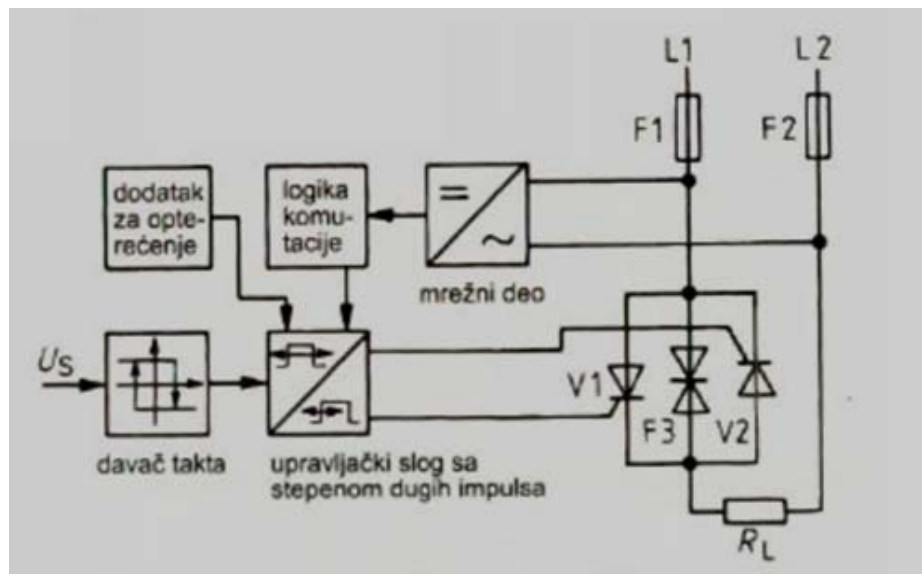
- nema oscilacija u mreži jer je struja sinusoidna
- nema upravljačke reaktivne snage jer je faktor snage jednak 1

NEDOSTACI:

- nije prikladno za rasvetu zbog treperenja
- nije prikladno za pogone zbog trzanja

PRIMENA: regulacija grejanja i temperature

(peći za topljenje, sušionice, mašine za žarenje žice i odlivaka, mašine za obradu plastike)



$$T=1/f$$

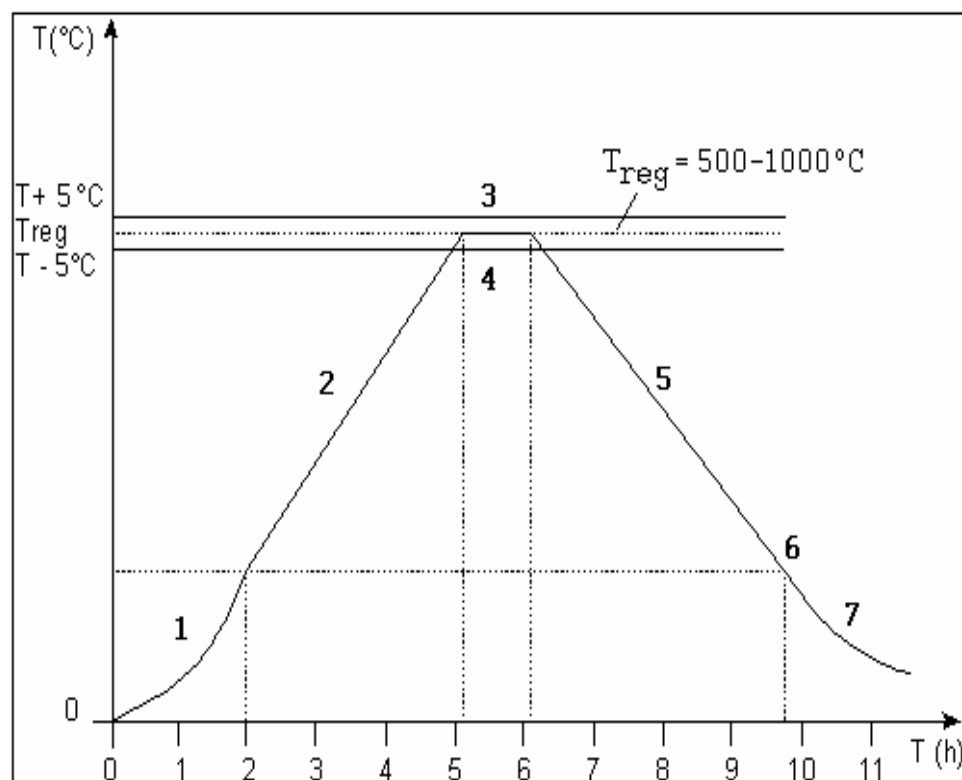
$$T_s=t_E+t_P$$

$$P=(t_E/T_s) \cdot P_{\max}$$

$$P_{\max}=U^2/R$$

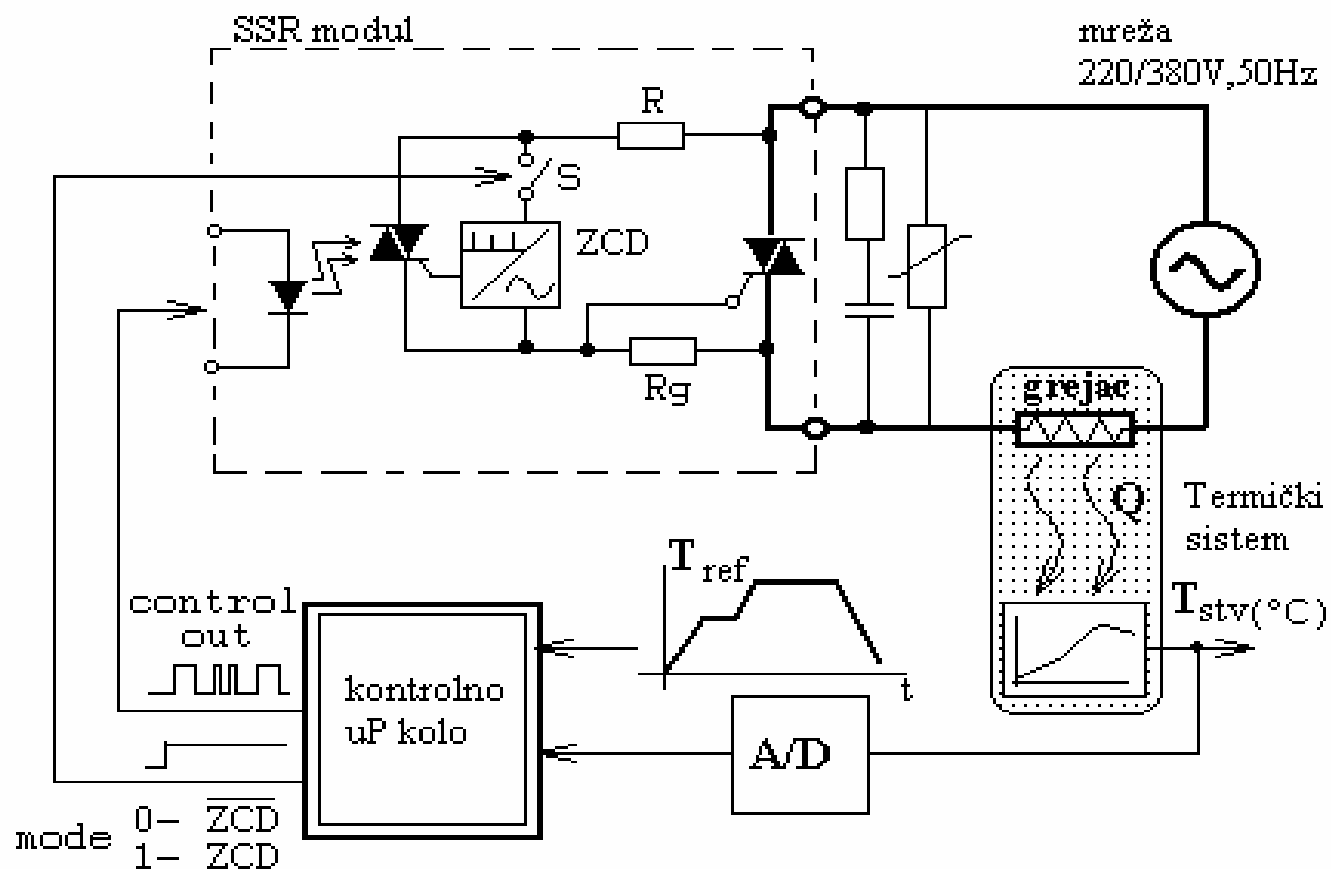
TIPIČNA KARAKTERISTIKA TERMIČKE OBRADJE ŽARENJEM METALNIH ODLIVAKA (na pr. lopatica mlinova za ugalj na termoelektranama)

temperaturno-vremenski dijagram

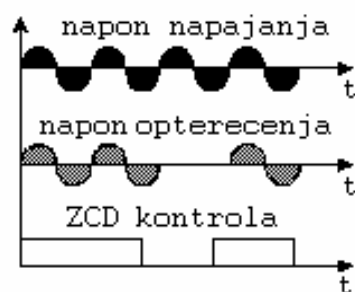


1. Maksimalna temperatura zagrevanja bez regulacije
2. Brzina kontrolisanog zagrevanja (tipično je $+100^{\circ}\text{C/h}$)
3. Maksimalna temperatura kontrolisanog zagrevanja (temperatura na kojoj se metalni deo žari zadato vreme)
4. Vreme trajanja procesa žarenja
5. Brzina kontrolisanog hlađenja (tipično je -200°C/h)
6. Minimalna temperatura kontrolisanog hlađenja
7. Slobodno hlađenje do sobne temperature

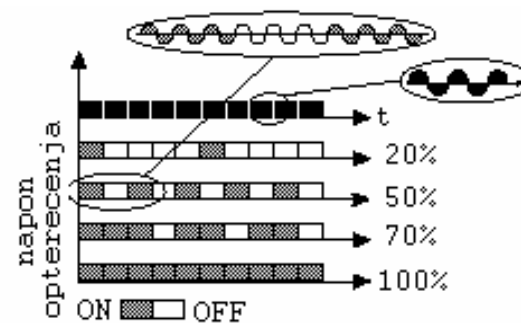
MIKROPROCESORSKA KONTROLA ELEKTRO-OTPORNOG ZAGREVANJA METALNIH DELOVA -principijelno električno kolo



MOGUĆI NAČINI KONTROLE ELEKTRO-OTPORNOG ZAGREVANJA



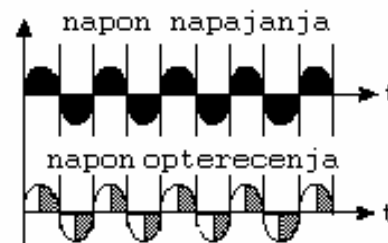
A) Nulto Prekidanje



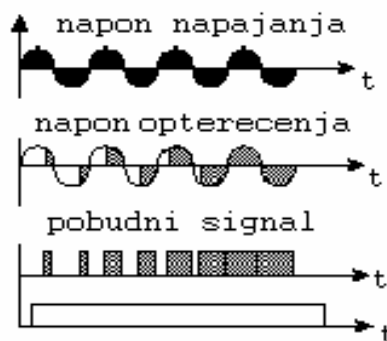
B) ON-OFF kontrola



C) Jednocilusna kontrola

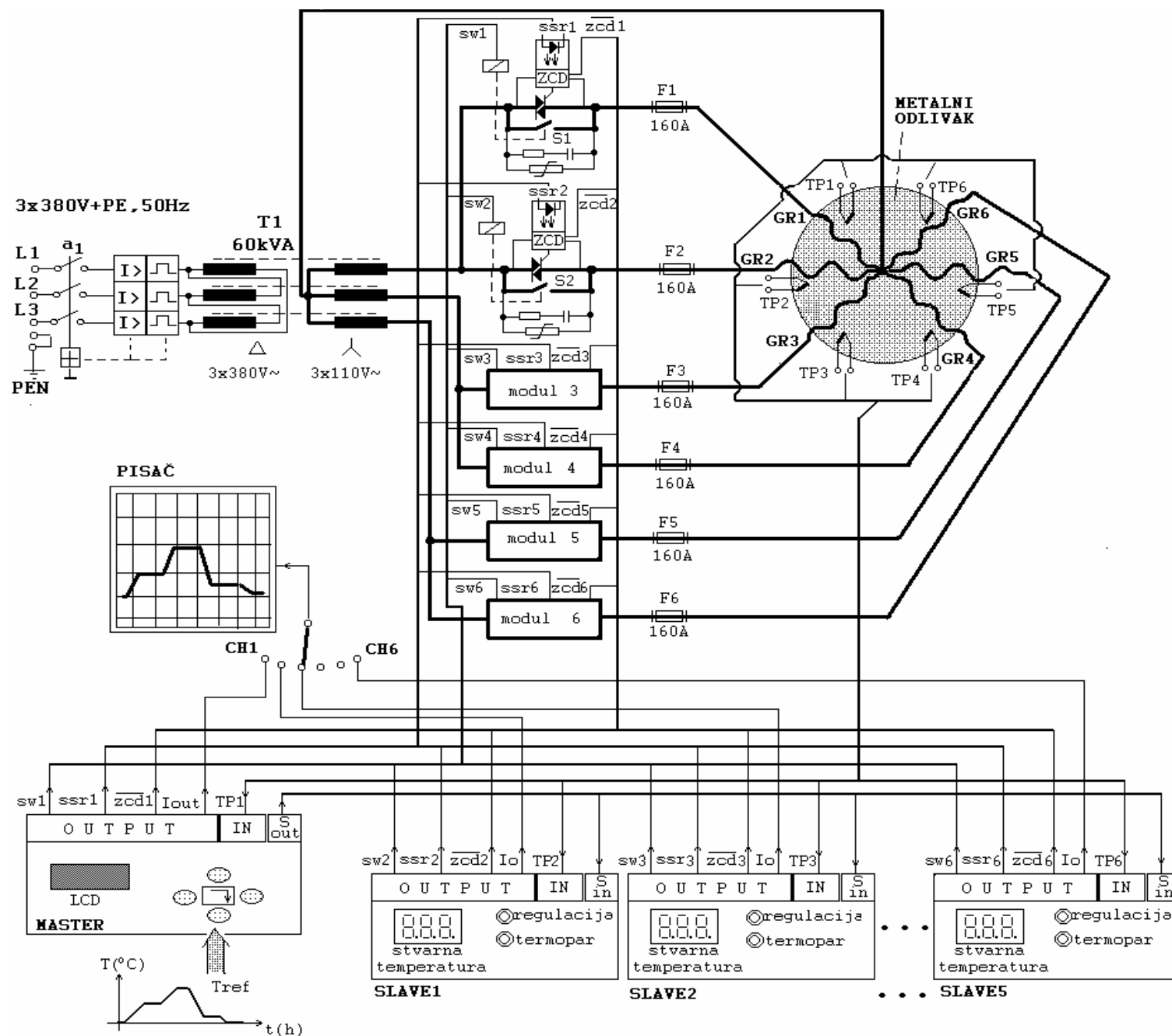


D) Fazna kontrola

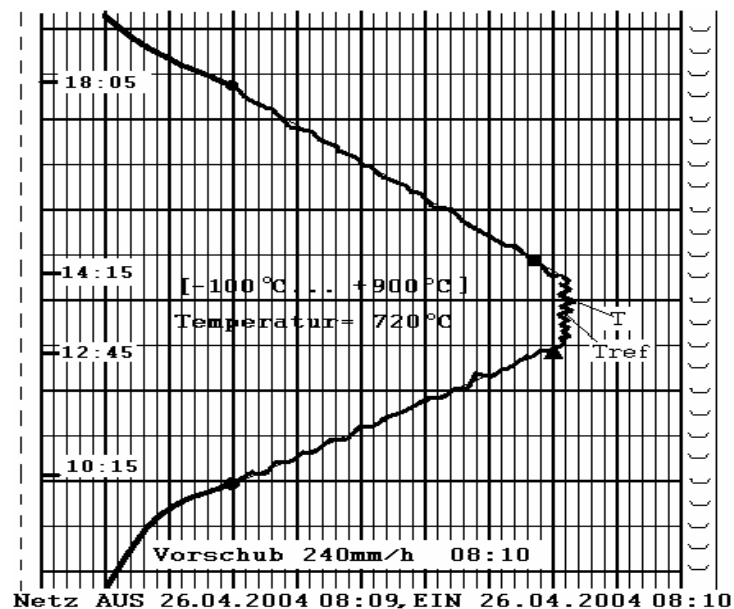


Soft Start+ ON-OFF kontrola

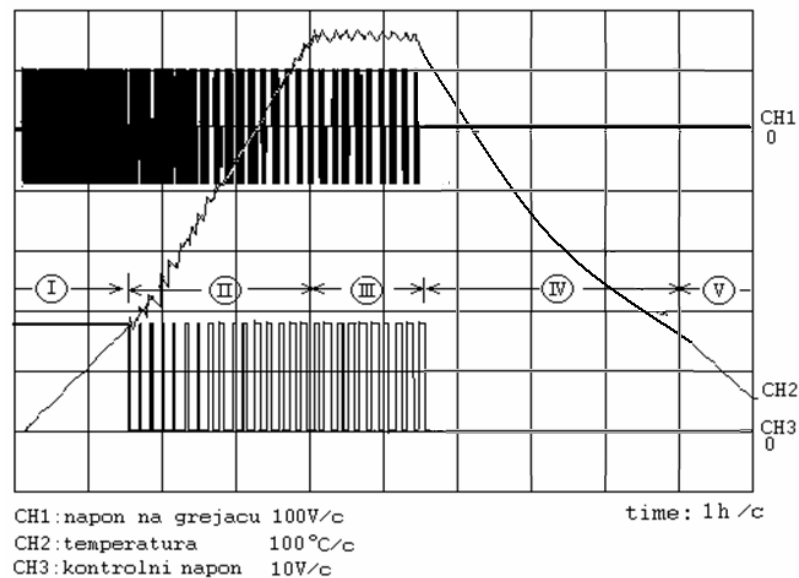
KONKRETNA REALIZACIJA



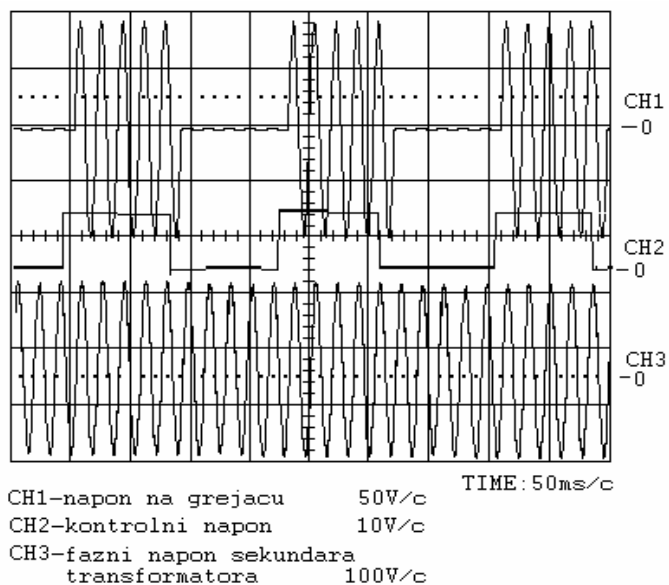
EKSPERIMENTALNI SNIMCI



Zapis temperaturnog profila zagrevanog uzorka na industrijskom pisaču



Zapis temperaturnog profila zagrevanog uzorka na X-Y pisaču



Osciloskopski snimak oblasti III