

Direktni pretvorniki

Pretvorniki **brez galvanske** ločitve med vhomom in izhodom:

- direktni enosmerni pretvorniki za eno in ve kvadrantno obratovanje
- lastno vodeni usmerniki in razsmerniki

Prednosti:

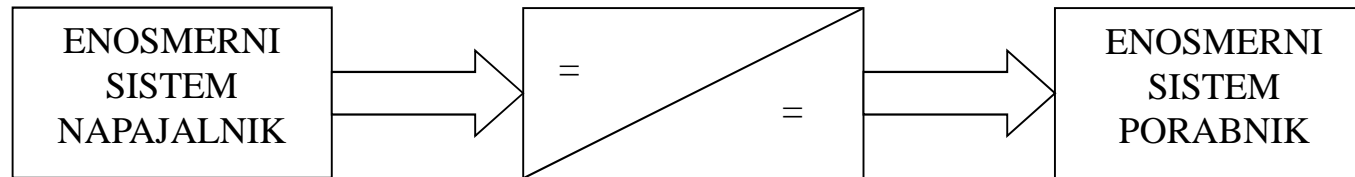
- majhna teža, volumen
- dobro razmerje med instalirano preklopno mojo in maksimalno preneseno mojo

$$P_p = \sum_{v=1}^n U_{pv} \cdot I_{pv}$$

Pri tem je:

n	število stikalnih ventilov
U_p	teoretično maksimalna napetost na ventilu
I_p	teoretično maksimalen tok ventila

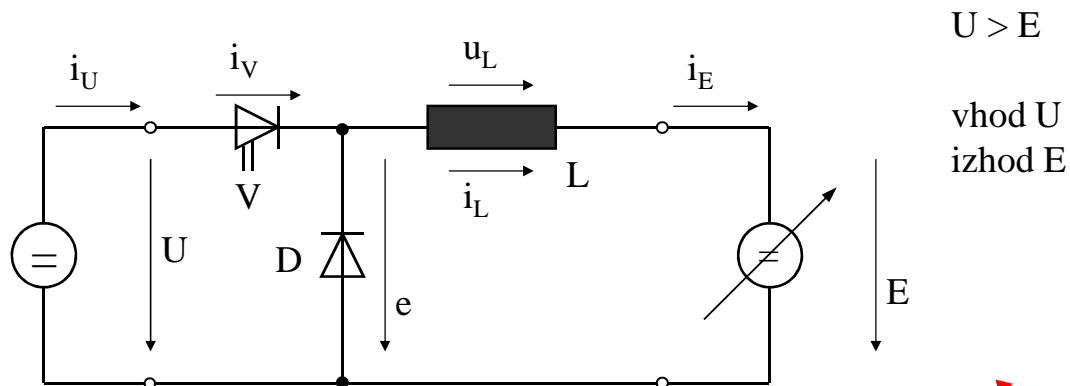
Direktni enosmerni presmernik (DC-DC pretvorniki)



Slika 11.1: Enosmerni nastavljalnik

Vezja za enokvadrantno delovanje

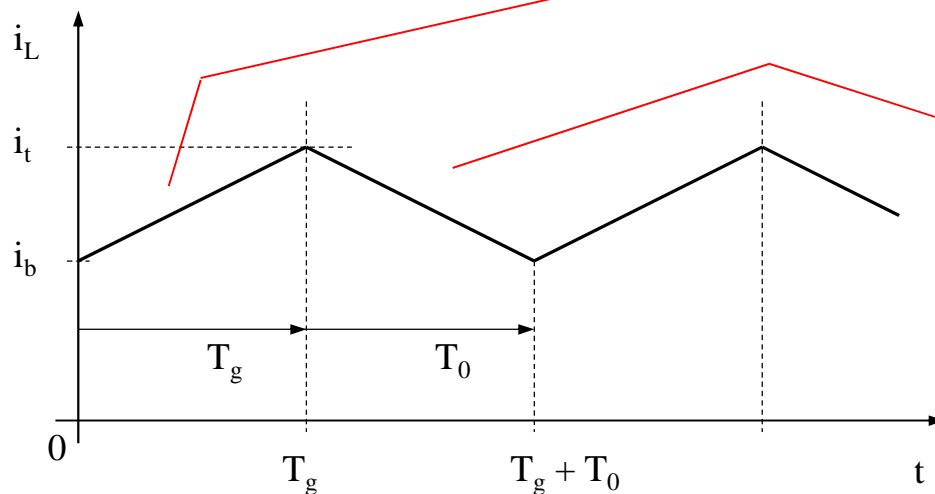
- pretvornik navzdol (nem. Tiefsetzsteller, angl. Buck converter)
- pretvornik navzgor (nem. Hochsetzsteller, angl. Boost converter)
- zaporni pretvornik ali pretvornik dol-gor (nem. Sperrsteller ali Hoch und Tiefsetzsteller, angl. Flyback ali Buck-Boost-Converter)



Slika 11.2: Shema pretvornika navzdol

$$i_L = i_b + \frac{1}{L} \cdot \int_{t=0}^t (U - E) dt$$

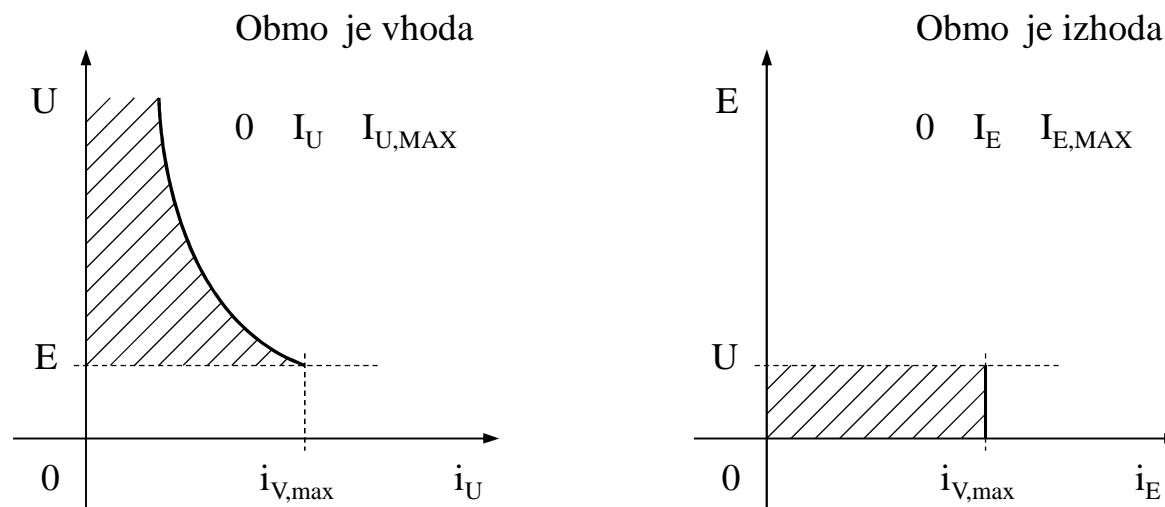
$$e = e_{\max} = U$$



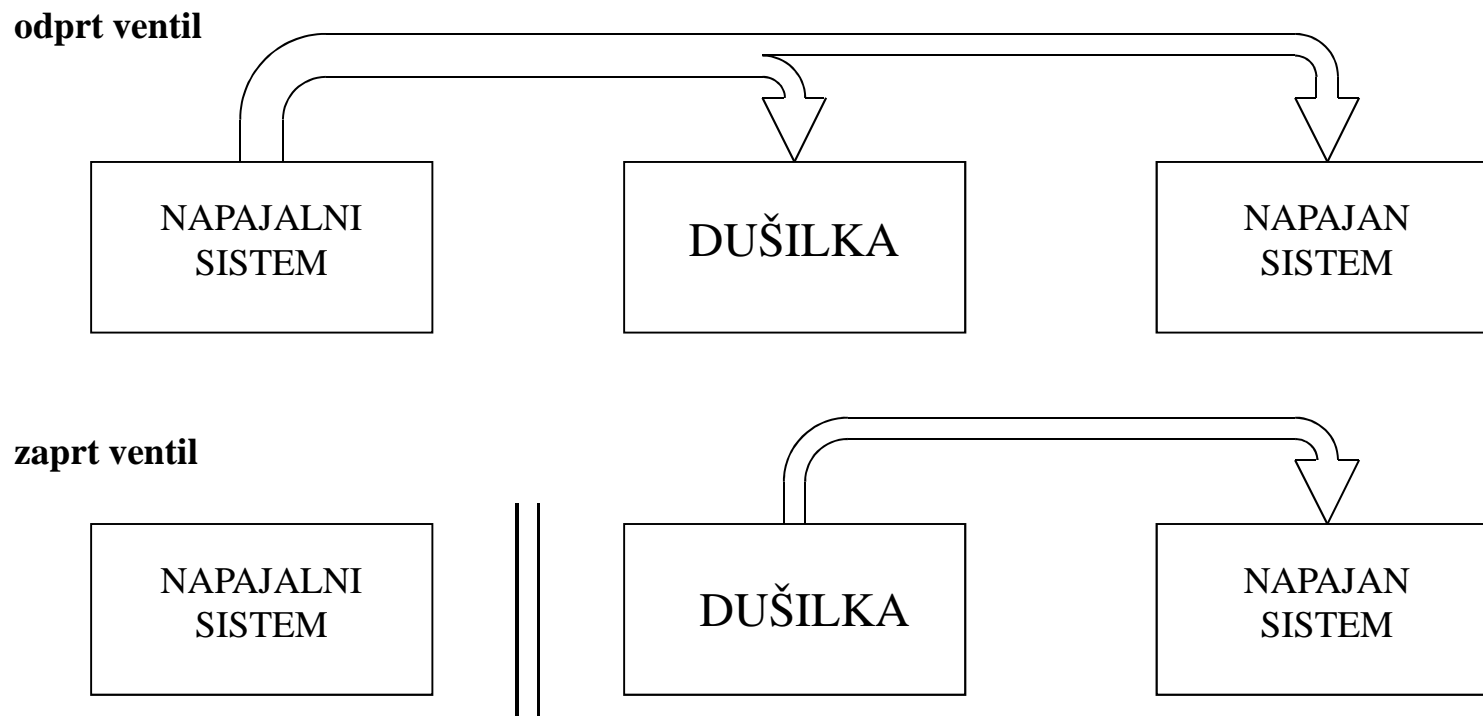
$$i_L = i_t + \frac{1}{L} \cdot \int_{t=T_g}^t (-E) dt$$

$$e = e_{\min} = 0$$

Slika 11.3: asovni potek toka

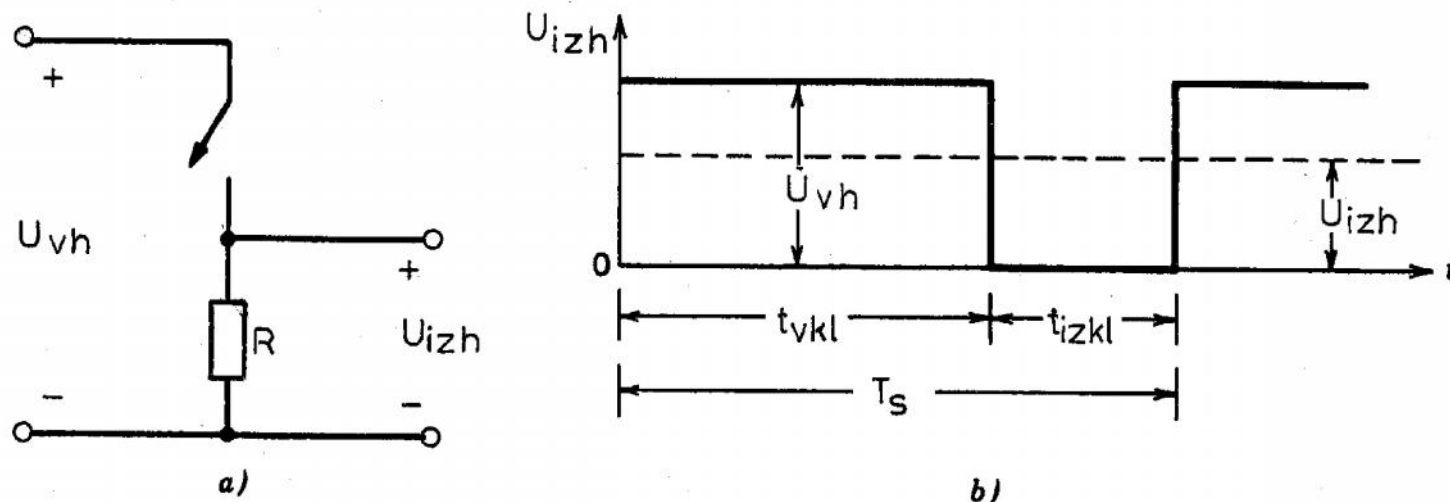


Slika 11.4: Nastavitveno obmo je (za $i_L \approx I_L$ in $\hat{i}_V \leq \hat{i}_{V,max}$)



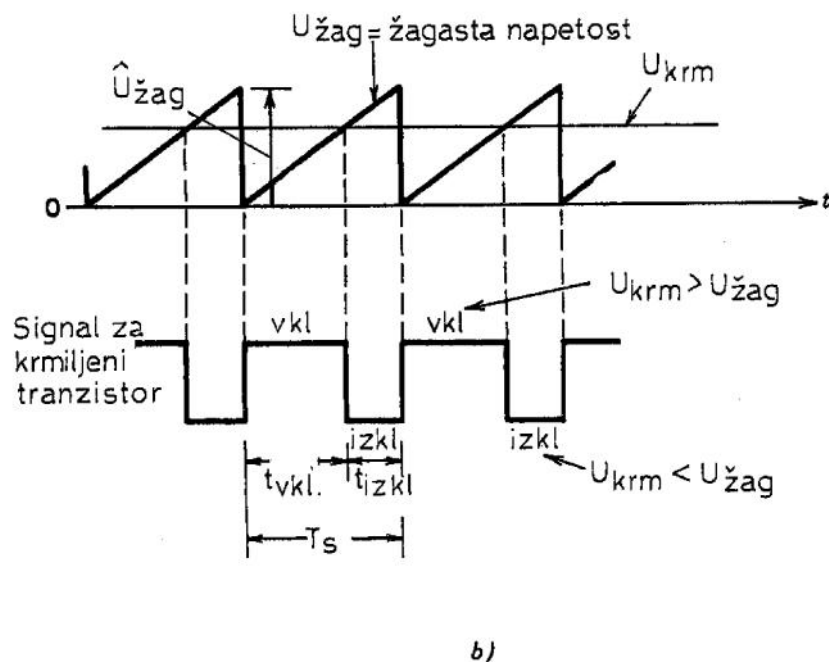
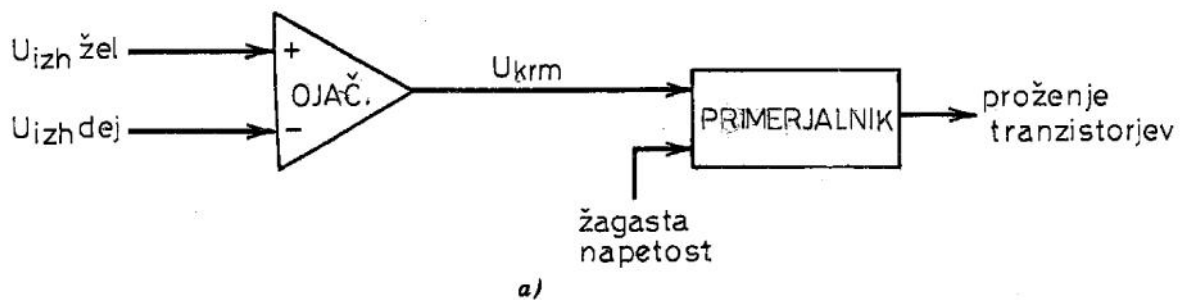
Slika 11.5: Pretok energije v odprtem in zaprtem stanju ventila

Krmiljenje enosmernega presmernika



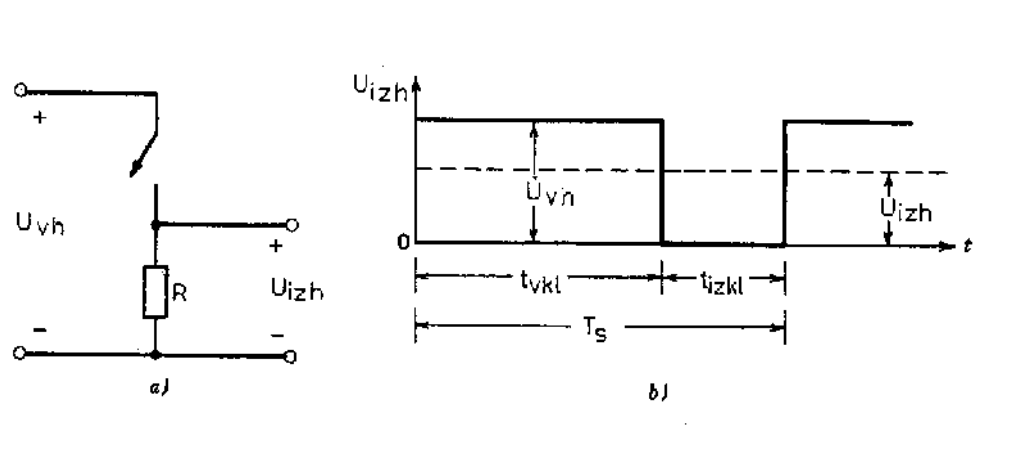
Pri pulzno-širinskem na inu proženja stikal (ang. PWM - Pulse-Width Modulation) je stikalna frekvenca f_s konstantna. To pomeni, da je perioda enaka $T_s = t_{vkl} + t_{izkl}$.

Delovno razmerje določimo kot:
$$u = \frac{t_{vkl}}{T_s}$$



$$u = \frac{t_{vkl}}{T_s} = \frac{u_{krm}}{\hat{U}_{\text{žag}}}$$

Princip pulzno-širinskega proženja stikal

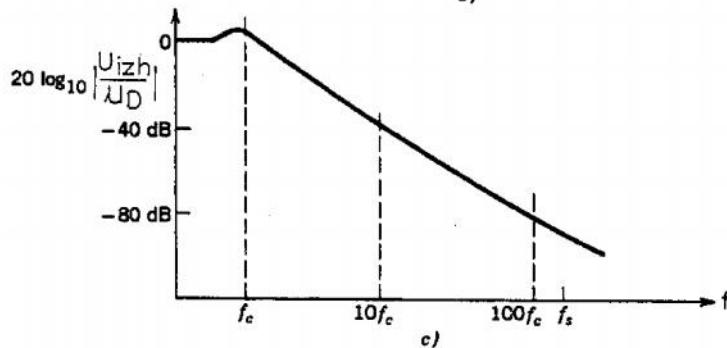
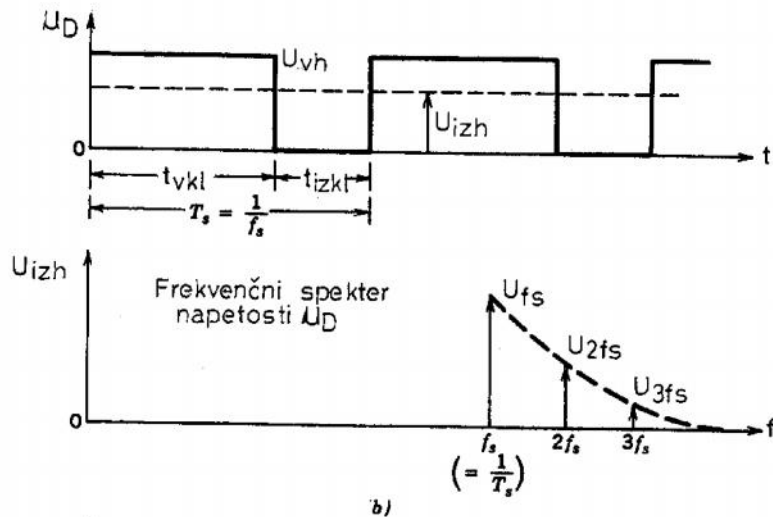
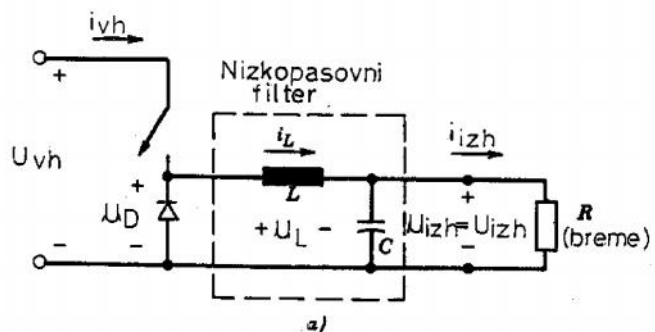


$$U_{izh} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_{izh}(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{t_{vkl}} U_{vh} dt + \int_{t_{vkl}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{vkl}}{T_s} \cdot U_{vh} = u \cdot U_{vh}$$

$$U_{izh} = \frac{U_{vh}}{\hat{U}_{zag}} \cdot u_{krm} = K \cdot u_{krm}; \quad K = \frac{U_{vh}}{\hat{U}_{zag}}$$

V praksi se izkaže, da ima predstavljeno vezje dve pomembni pomanjkljivosti:

- Breme je največkrat induktivnega značaja. To pomeni, da se na stikalu sprošča induktivna energija, kar bi povzročilo uničenje.
- Izhodna napetost zavzema dva nivoja (0 V in U_{vh}), kar povzroča visoko vsebnost višjih harmonskih komponent v napetosti na bremenu.



Vsak pol: -6 dB/oktavo

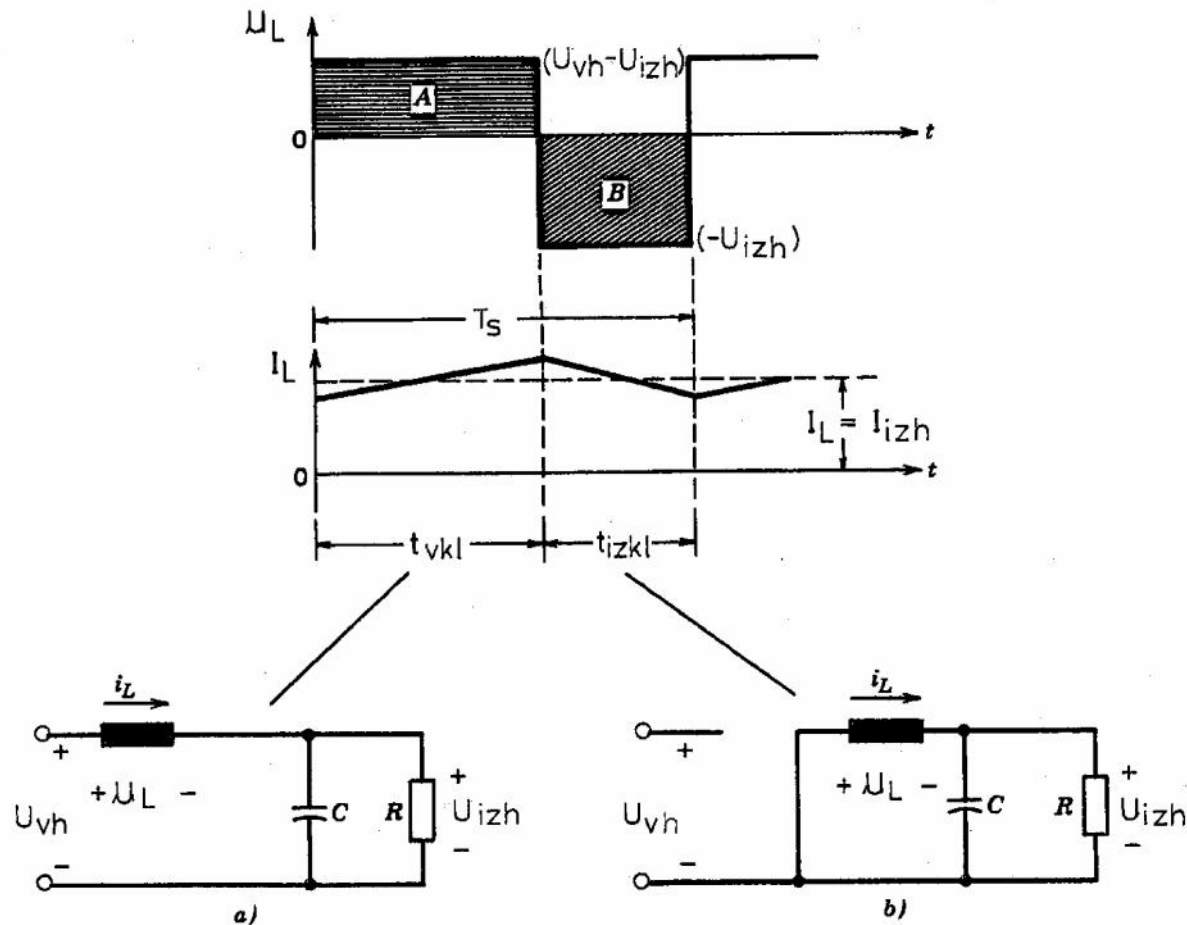
-20 dB/dekado

Vsaka ni la: +6 dB/oktavo

+20 dB/dekado

Delovanje pretvornika pri zveznem toku skozi dušilko

$$u_L = U_{vh} - U_{izh}$$



Ko stikalo izklopimo, te e tok zaradi inducirane napetosti še naprej v isti smeri in velja:

$$u_L = -U_{izh}$$

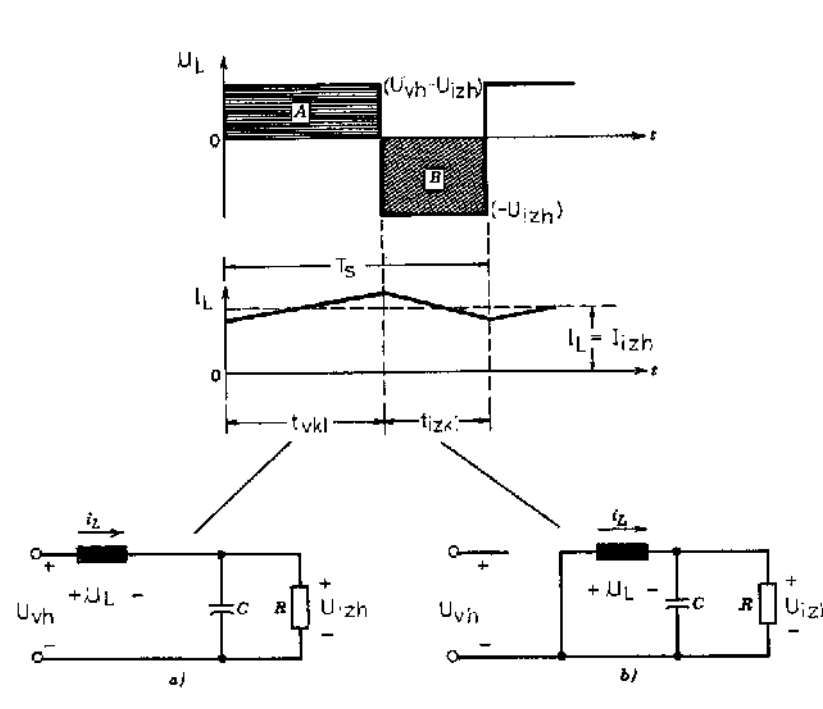
V ustaljenem stanju je srednja vrednost napetosti na dušilki enaka ni :

$$\int_0^{T_s} u_L dt = \int_0^{t_{vkl}} u_L dt + \int_{t_{vkl}}^{T_s} u_L dt = 0$$

To pomeni, da sta površini A in B enaki:

$$(U_{vh} - U_{izh}) \cdot t_{vkl} = U_{izh} \cdot (T_s - t_{vkl})$$

$$\frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{t_{vkl}}{T_s} = u$$



V tem na inu delovanja je izhodna napetost premosorazmerna delovnemu razmerju u pri konstantni vhodni napetosti U_{vh} . Ostale veli ine torej ne vplivajo na izhodno napetost, zato lahko zapišemo:

$$U_{izh} = \frac{U_{vh} \cdot t_{vkl} + 0 \cdot t_{izkl}}{T_S}$$

$$\frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{t_{vkl}}{T_S} = u$$

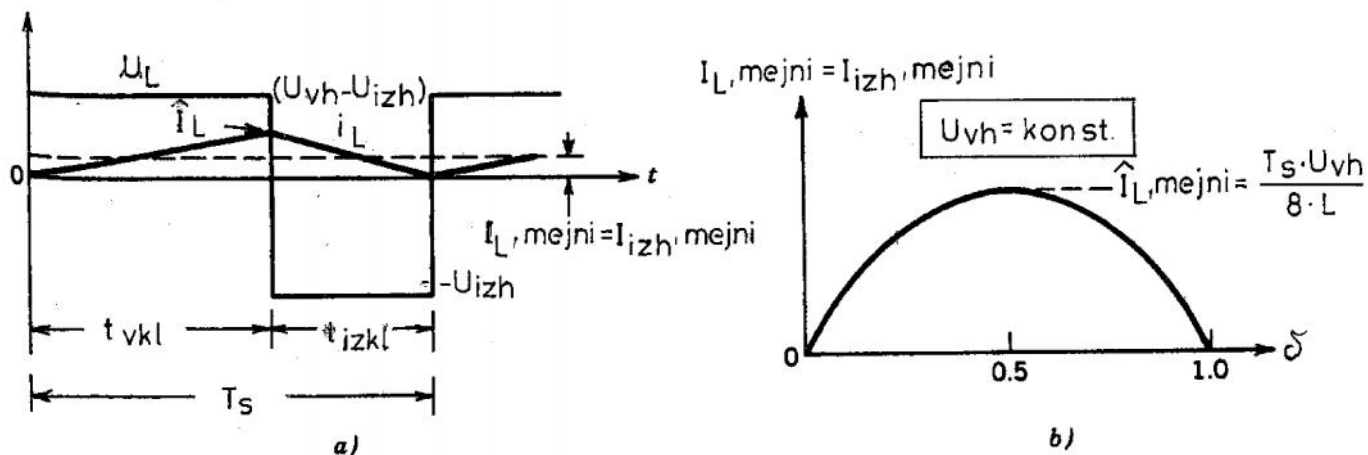
e zanemarimo izgube v elementih vezja, je vhodna mo vezja enaka izhodni:

$$P_{vh} = P_{izh}$$

$$U_{vh} \cdot I_{vh} = U_{izh} \cdot I_{izh}$$

$$\frac{I_{izh}}{I_{vh}} = \frac{U_{vh}}{U_{izh}} = \frac{1}{u}$$

Razmere v vezju na meji med zveznim in nezveznim delovanjem



V tem primeru je srednja vrednost toka skozi dušilko enaka:

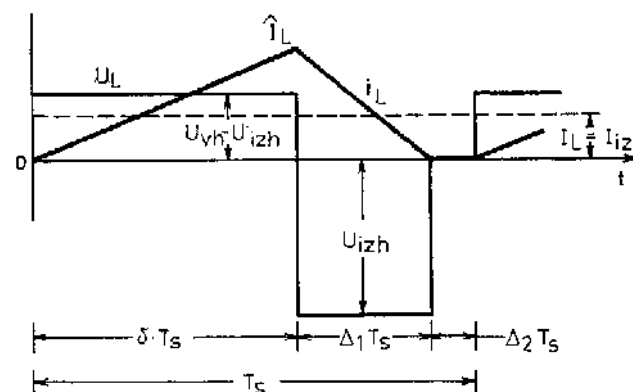
$$I_{L,mejni} = \frac{1}{2} \hat{I}_L = \frac{t_{vkl}}{2 \cdot L} (U_{vh} - U_{izh}) = \frac{U \cdot T_s}{2 \cdot L} (U_{vh} - U_{izh}) = I_{izh,mejni}$$

Delovanje vezja v podro ju trganega toka

V mnogih tehniških rešitvah je vhodna napetost konstantna, izhodno pa spreminjamo z delovnim razmerjem u .

Na meji med zveznim in nezveznim delovanjem je srednja vrednost toka skozi dušilko:

$$I_{L,mejni} = \frac{T_S \cdot U_{vh}}{2 \cdot L} \cdot u \cdot (1 - u)$$



Izhodni tok, ki ga moramo zagotoviti za zvezen na in delovanja pretvornika je najve ji pri $u = 0,5$:

$$\hat{I}_{L,mejni} = \frac{T_S \cdot U_{vh}}{8 \cdot L}$$

$$I_{L,mejni} = 4 \cdot \hat{I}_{L,mejni} \cdot u \cdot (1 - u)$$

Tudi v tem primeru je integral napetosti na dušilki preko ene periode enak ni :

$$(U_{vh} - U_{izh}) \cdot u \cdot T_S + (-U_{izh}) \Delta_1 \cdot T_S = 0$$

$$\frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{u}{u + \Delta_1}$$

pri čemer velja: $u + \Delta_1 < 1,0$

$$\hat{I}_L = \frac{U_{izh}}{L} \cdot \Delta_1 \cdot T_S$$

$$\begin{aligned} I_{izh} &= \hat{I}_L \frac{(u + \Delta_1) T_S}{2} = \frac{U_{izh} \cdot T_S}{2 \cdot L} (u + \Delta_1) \Delta_1 \\ &= \frac{U_{vh} \cdot T_S}{2 \cdot L} \cdot u \cdot \Delta_1 \\ &= 4 \cdot \hat{I}_{L,mejni} \cdot u \cdot \Delta_1 \end{aligned}$$

e iz zgornje ena be izrazimo Δ_1 :

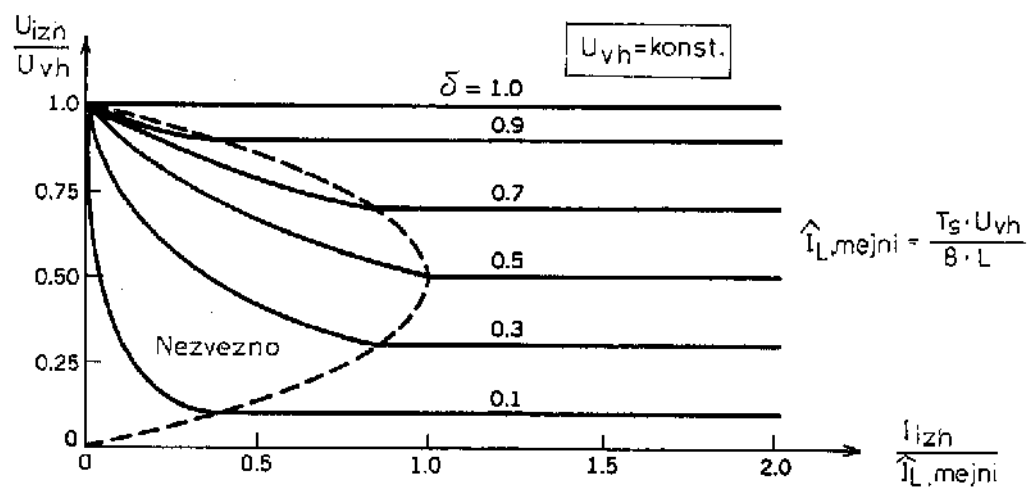
$$\Delta_1 = \frac{I_{izh}}{4 \cdot \hat{I}_L \cdot u}$$

e zgornjo ena bo vstavimo v ena bo $\frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{u}{u + \Delta_1}$

$$\frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{u^2}{u^2 + \frac{I_{izh}}{4 \cdot \hat{I}_{L,mejni}}}$$

Na spodnji sliki vidimo krivulje odvisnosti U_{izh}/U_{vh} od $I_{izh}/\hat{I}_{L-maks.,mejni}$, ki so posnete pri konstantni vhodni napetosti U_{vh} in za različne vrednosti delovnega razmerja u .

Meja med zveznim in nezveznim delovanjem pretvornika je prikazana s rtkano rto.



Delovanje pretvornika pri trganem toku s konstantno izhodno napetostjo

Pri delovanju pretvornika, kjer se vhodna napetost spreminja, dosežemo konstantno izhodno napetost z nastavitvijo ustreznega delovnega razmerja u .

Ker velja ena ba $U_{vh} = U_{izh}/u$, je srednja vrednost toka skozi dušilko pri delovanju pretvornika na meji med zveznim in nezveznim delovanjem določena z ena bo:

$$I_{L,mejni} = \frac{T_S \cdot U_{izh}}{2 \cdot L} (1 - u)$$

Iz ena be je razvidno, da pri konstantni vrednosti izhodne napetosti U_{izh} , dosežemo maksimalno vrednost $\hat{I}_{L,mejni}$ pri $u = 0$:

$$\hat{I}_{L,mejni} = \frac{T_S \cdot U_{izh}}{2 \cdot L}$$

V praksi je delovanje pri $u = 0$ nemogoče, saj bi potrebovali neskončno visoko vhodno napetost U_{vh}

Iz zadnjih dveh enačb lahko dobimo:

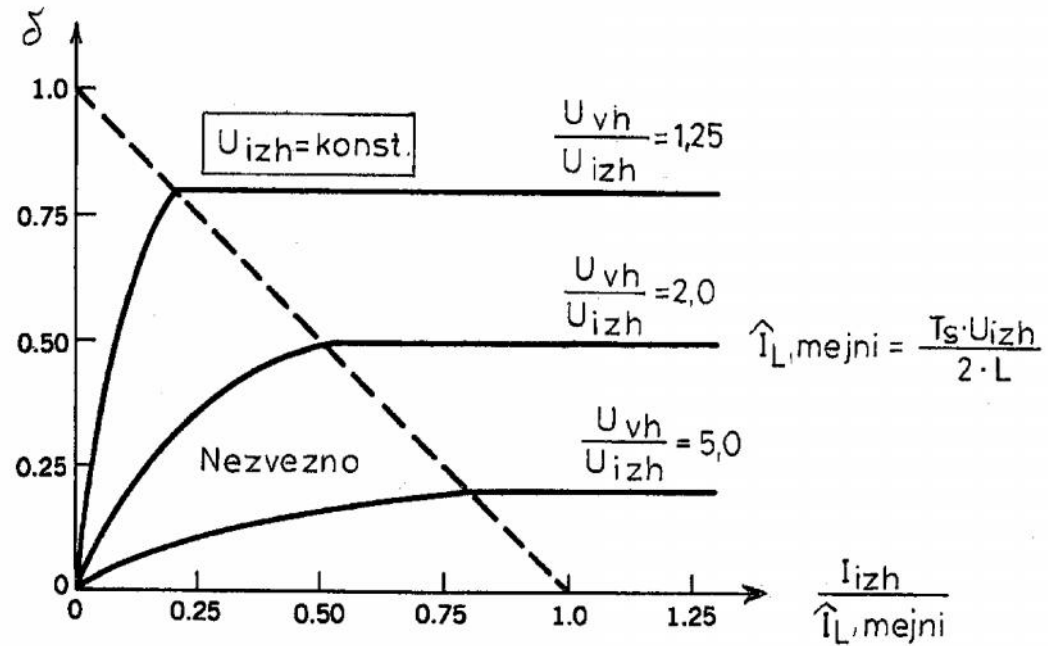
$$I_{L,mejni} = \hat{I}_{L,mejni} \cdot (1 - u)$$

Za delovanje pretvornika, kjer je U_{izh} konstantna, je dobro poznati odvisnost delovnega razmerja u od $I_{izh} / \hat{I}_{L,mejni}$

e uporabimo enačbi $\frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{u}{u + \Delta_1}$ in $I_{izh} = 4 \cdot \hat{I}_{L,mejni} \cdot u \cdot \Delta_1$, ki veljata za nezvezno

delovanje ne glede na to katera napetost je konstantna (U_{vh} ali U_{izh}), potem lahko izra unamo:

$$u = \frac{U_{izh}}{U_{vh}} \sqrt{\frac{\frac{I_{izh}}{\hat{I}_{L,mejni}}}{1 - \frac{U_{izh}}{U_{vh}}}}$$



Karakteristike pretvornika navzdol pri konstantni izhodni napetosti U_{izh} .

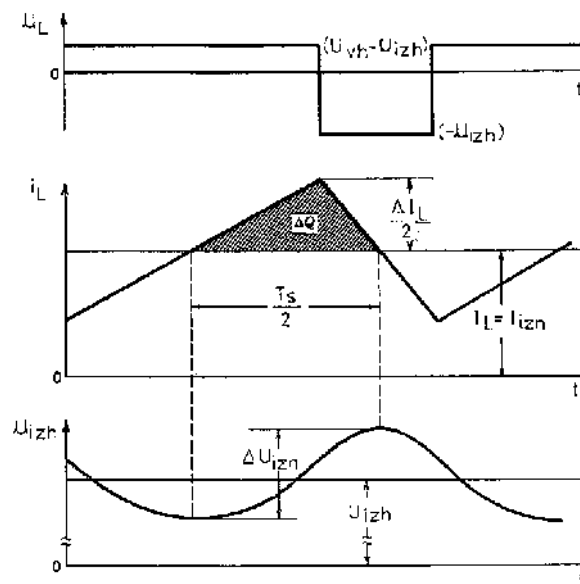
Valovitost izhodne napetosti

Valovitost napetosti na kondenzatorju oziroma na izhodu pretvornika ($U_{\text{maks}} - U_{\text{min}}$) lahko izrazimo s pomočjo enačbe:

$$\Delta U_{\text{izh}} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{T_S}{2}$$

Za čas t_{izkl} zapišemo:

$$\Delta I_L = \frac{U_{\text{izh}}}{L} (1 - u) \cdot T_S$$



e vstavimo ΔI_L iz druge enačbe v prvo enačbo, dobimo:

$$\Delta U_{\text{izh}} = \frac{T_S}{8C} \cdot \frac{U_{\text{izh}}}{L} (1 - u) \cdot T_S$$

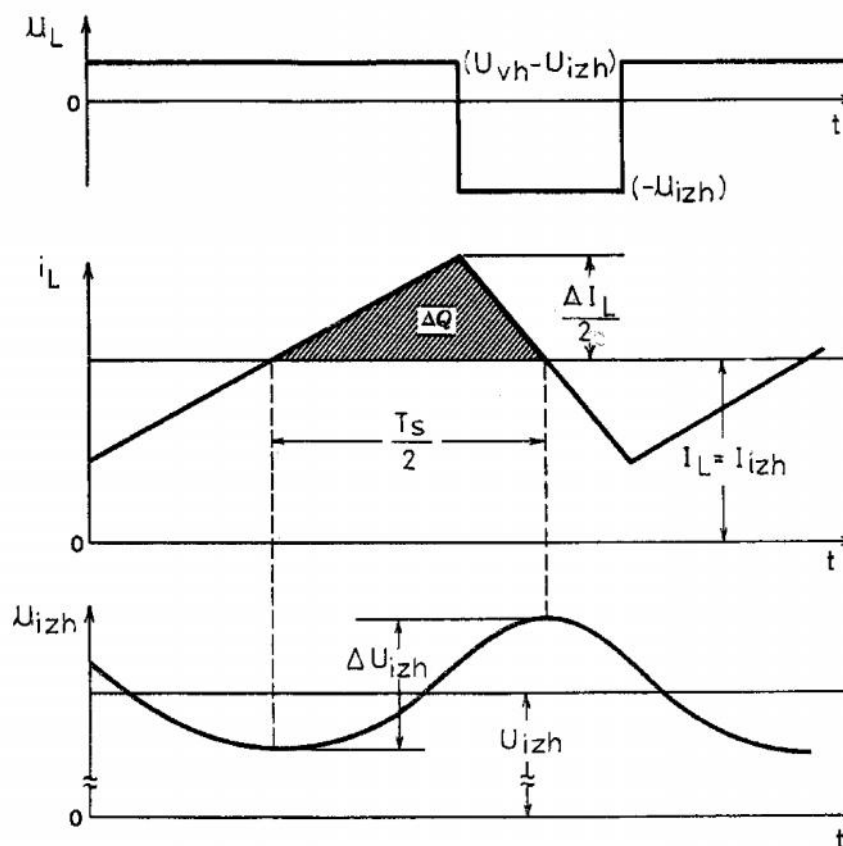
$$\frac{\Delta U_{izh}}{U_{izh}} = \frac{1}{8} \cdot \frac{T_S^2 (1-u)}{LC} = \frac{f^2}{2} (1-u) \left(\frac{f_C}{f_S} \right)^2$$

kjer f_S stikalna frekvenca, f_C pa je:

$$f_C = \frac{1}{2f \sqrt{LC}}$$

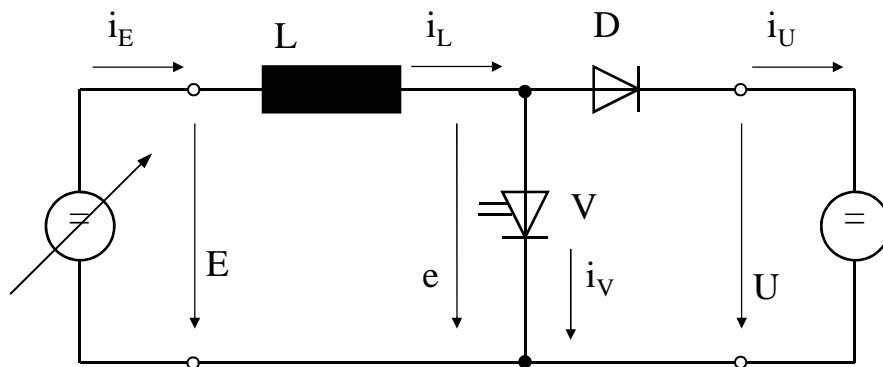
Iz zgornje ena be je razvidno, da lahko valovitost izhodne napetosti zelo zmanjšamo, e izberemo lastno frekvenco nizkopasovnega filtra tako, da je

$$f_C \ll f_S$$



Valovitost napetosti na izhodu pretvornika navzdol

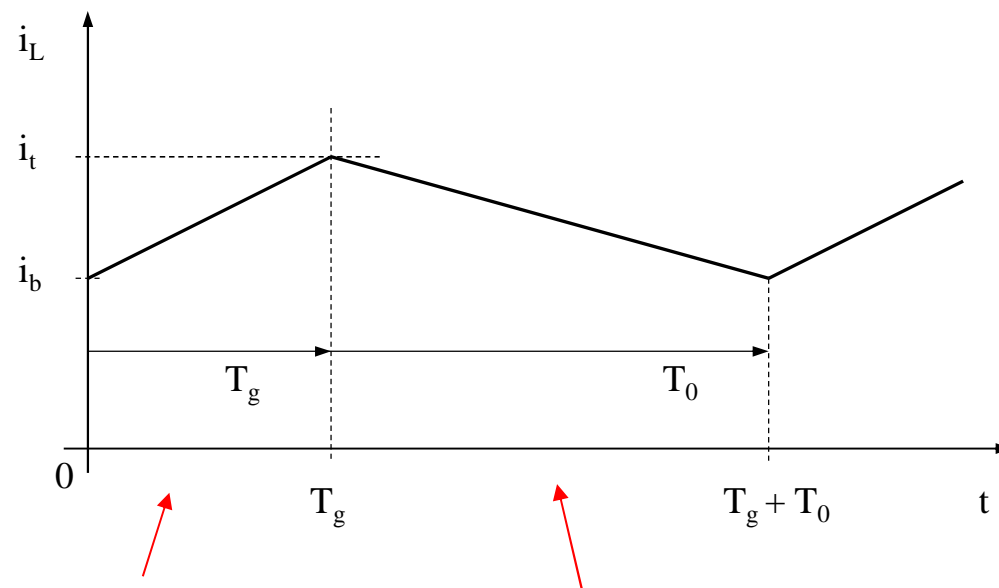
Pretvornik navzgor



$$U > E$$

vhod E
izhod U

Slika 11.6: Shema pretvornika navzgor

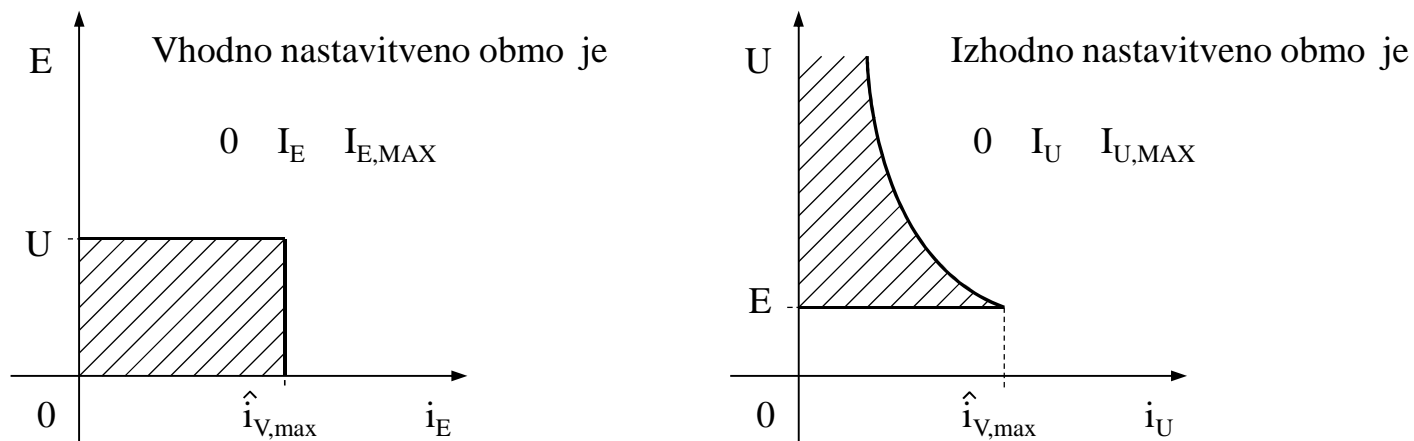


$$i_L = \frac{1}{L} \cdot \int_{t=0}^t E dt$$

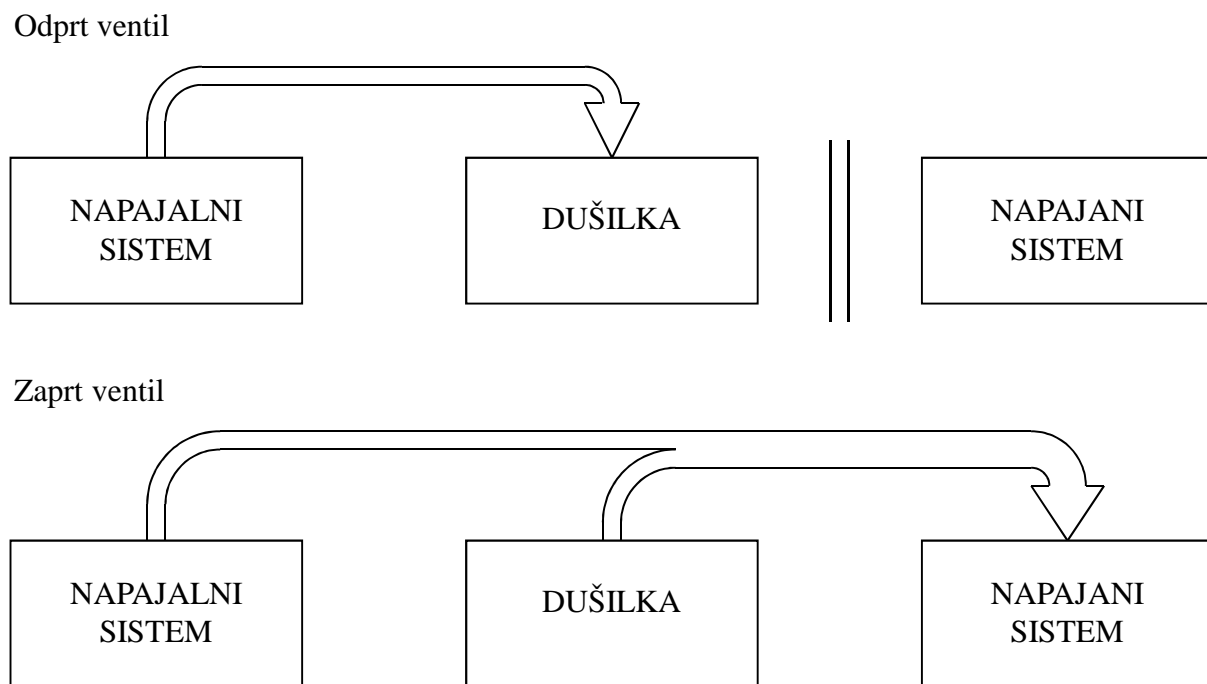
$$i_L = i_t + \frac{1}{L} \cdot \int_{t=T_g}^t (E - U) dt$$

$$i_L = i_b + \frac{1}{L} \cdot \int_{t=0}^t E dt$$

Slika 11.7: asovni potek toka

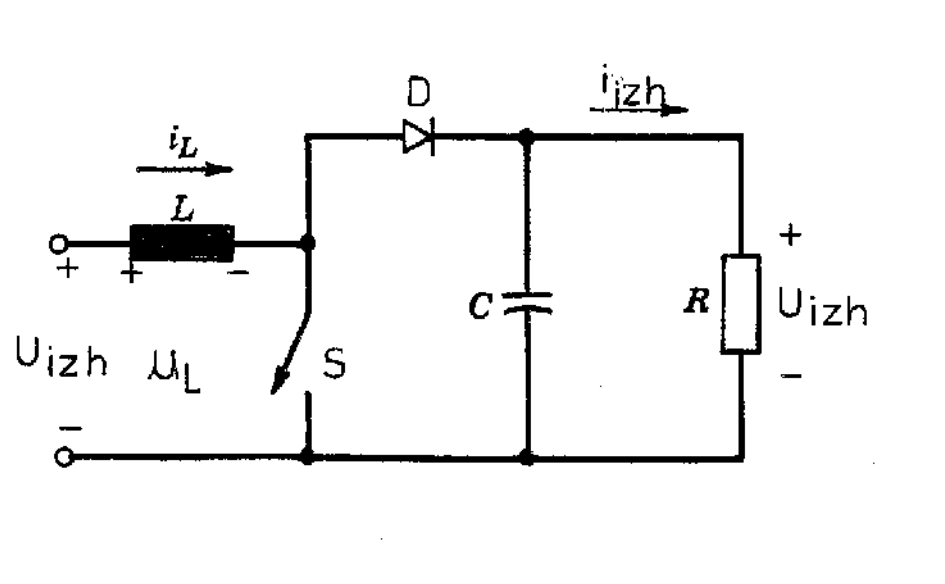


Slika 11.8: Nastavitveno obmoje (za $i_L \approx I_L$ in $\hat{i}_V \leq \hat{i}_{V,max}$)



Slika 11.9: Pretok energije v odprtem in zaprtem stanju ventila

Pretvornik navzgor



Principialna shema pretvornika navzgor

Pretvornik navzgor v zveznem na inu delovanja

Srednja vrednost napetosti na dušilki preko ene periode je enaka ni .

$$U_{vh} \cdot t_{vkl} + (U_{vh} - U_{izh}) \cdot t_{izkl} = 0$$

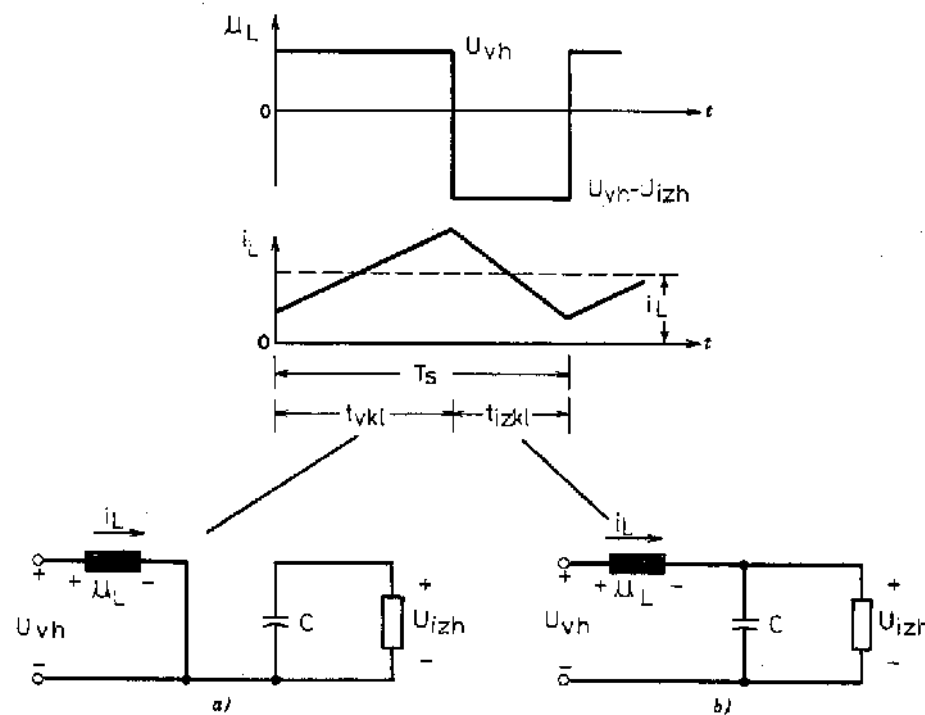
e zgornjo ena bo preuredimo:

$$\frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{T_S}{t_{izkl}} = \frac{1}{1-u}$$

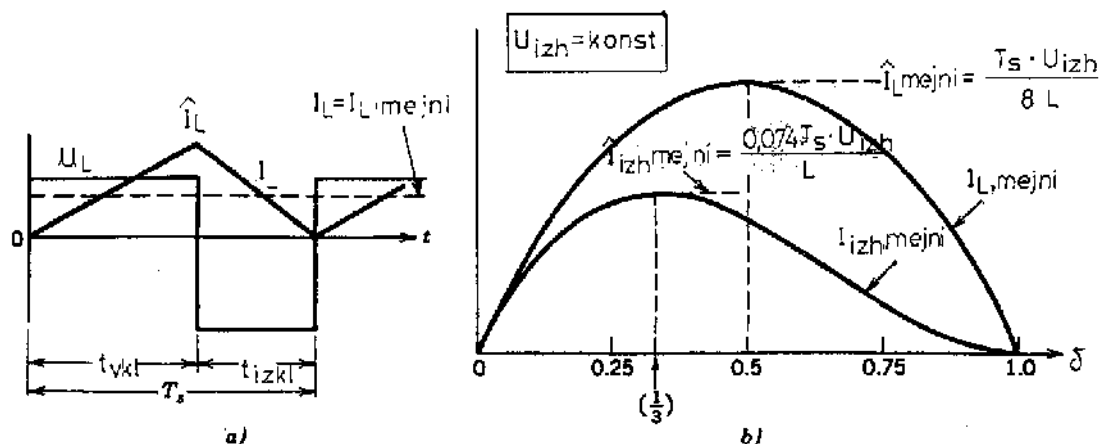
e je vezje brez izgub, velja:

$$U_{vh} \cdot I_{vh} = U_{izh} \cdot I_{izh}$$

oziroma
$$\frac{I_{izh}}{I_{vh}} = 1-u$$



Meja med zveznim in nezveznim na inom delovanja



Tok i_L je na koncu stikalne periode T_s enak ni . Srednja vrednost toka skozi dušilko je enaka:

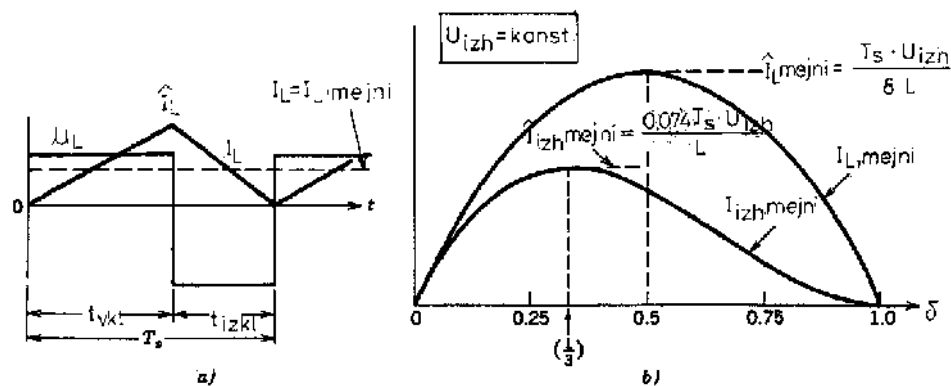
$$I_{L,mejni} = \frac{1}{2} \cdot \hat{I}_L = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{vh}}{L} = \frac{T_s \cdot U_{izh}}{2 \cdot L} \cdot u \cdot (1-u)$$

Pri tem pretvorniku vidimo, da je $i_L = i_{vh}$. Srednja vrednost toka na izhodu je:

$$I_{izh,mejni} = \frac{T_S \cdot U_{izh}}{2 \cdot L} \cdot u(1-u)^2$$

Tok skozi dušilko $I_{L,mejni}$ doseže maksimalno vrednost pri $u = 0,5$:

$$\hat{I}_{L,mejni} = \frac{T_S \cdot U_{izh}}{8 \cdot L}$$



Maksimalno vrednost izhodnega mejnega toka $I_{izh,mejni}$ dobimo pri $u = 0,33$:

$$\hat{I}_{izh,mejni} = \frac{2}{27} \cdot \frac{T_S \cdot U_{izh}}{L} = 0,074 \cdot \frac{T_S \cdot U_0}{L}$$

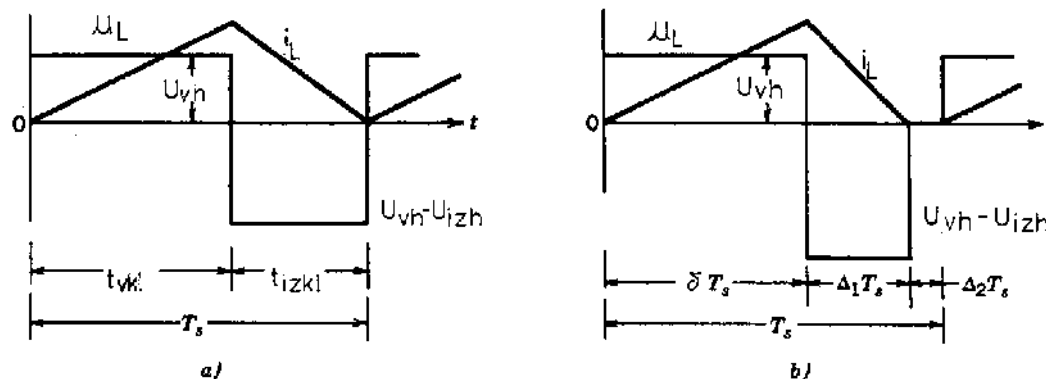
Odvisnost mejne srednje vrednosti toka skozi dušilko in mejne srednje vrednosti izhodnega toka od njunih maksimalnih vrednosti je enaka:

$$I_{L,mejni} = 4 \cdot u (1 - u) \cdot \hat{I}_{L,mejni}$$

in

$$I_{izh,mejni} = \frac{27}{4} \cdot u (1 - u)^2 \cdot \hat{I}_{izh,mejni}$$

Pretvornik navzgor v nezveznem na inu delovanja



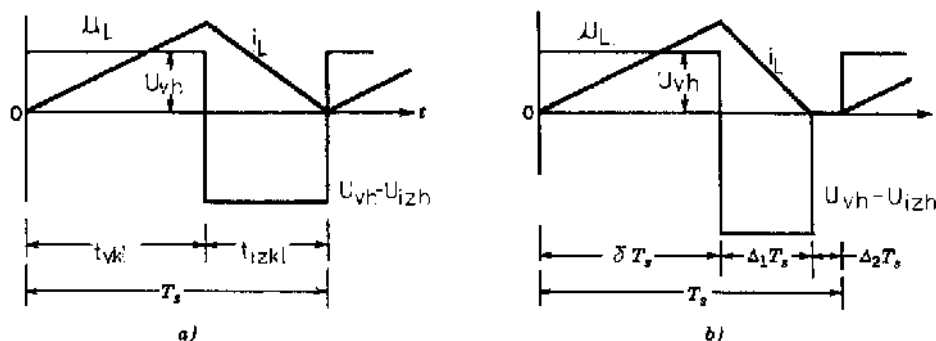
Ponovno izra unajmo integral napetosti na dušilki preko ene periode:

$$U_{vh} \cdot u T_S + (U_{vh} - U_{izh}) \cdot \Delta_1 \cdot T_S = 0$$

$$\frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{\Delta_1 + u}{\Delta_1}$$

oziroma:

$$\frac{I_{izh}}{I_{vh}} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + u} \quad \text{ker je } P_{vh} = P_{izh}$$

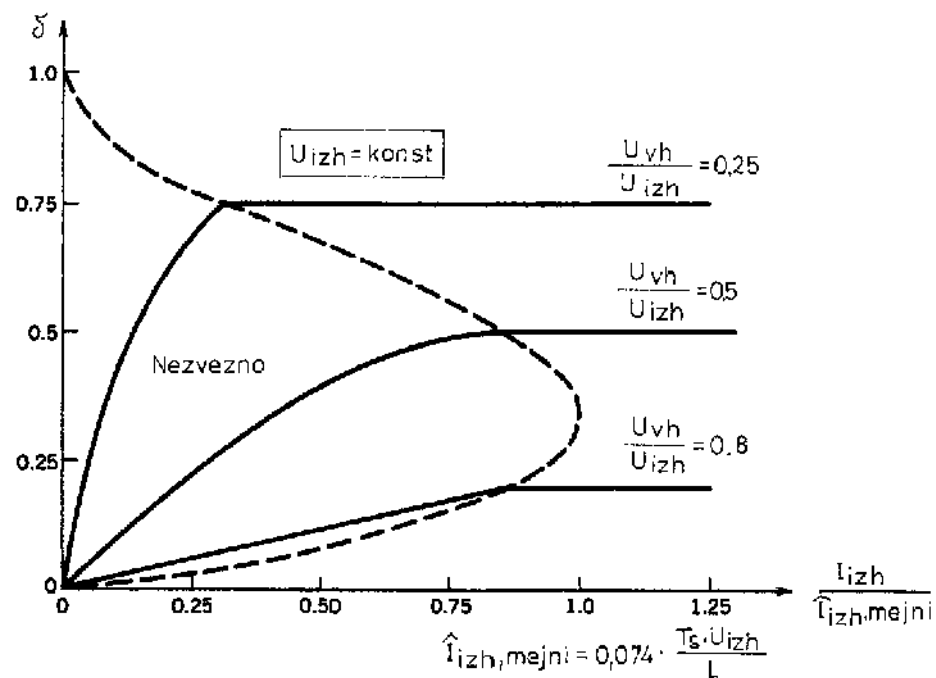


Pri trganem toku skozi dušilko je njegova srednja vrednost enaka srednji vrednosti vhodnega toka:

$$I_L = I_{vh} = \frac{U_{vh}}{2 \cdot L} \cdot u \cdot T_s (u + \Delta_1)$$

$$I_{izh} = \left(\frac{T_s \cdot U_{vh}}{2 \cdot L} \right) \cdot u \cdot \Delta_1$$

$$u = \sqrt{\left[\frac{4}{27} \cdot \frac{U_{izh}}{U_{vh}} \left(\frac{U_{izh}}{U_{vh}} - 1 \right) \cdot \frac{I_{izh}}{\hat{I}_{izh,mejni}} \right]}$$

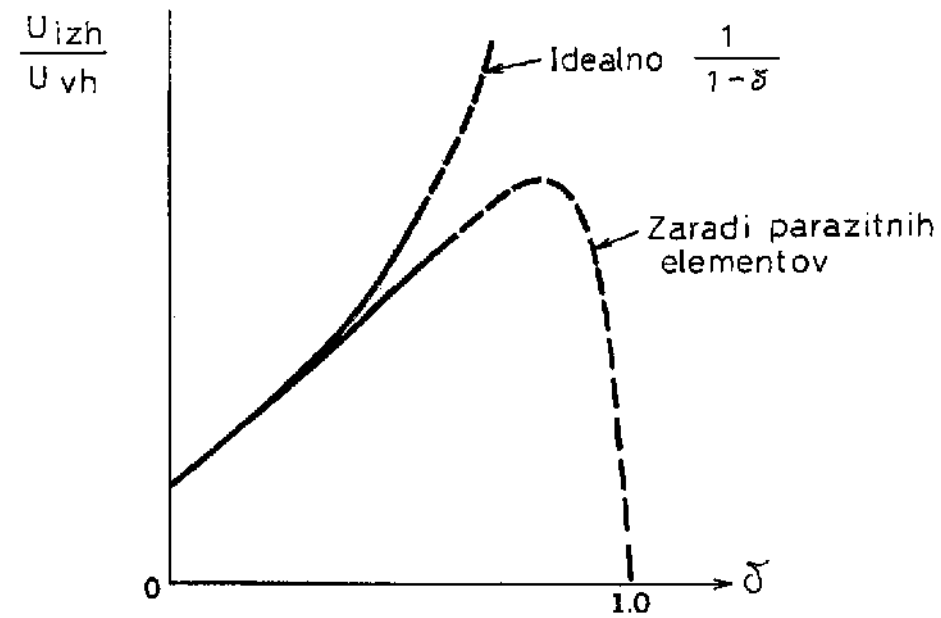


Karakteristike pretvornika navzgor pri konstantni izhodni napetosti U_{izh} .

Energija, ki se v eni periodi prenese iz vhoda v izhodni kondenzator in breme je enaka:

$$\frac{L}{2} \cdot \hat{I}_L^2 = \frac{(U_{vh} \cdot u \cdot T_s)^2}{2 \cdot L}$$

Vpliv parazitnih elementov na delovanje vezja



Valovitost izhodne napetosti (pri zveznem toku)

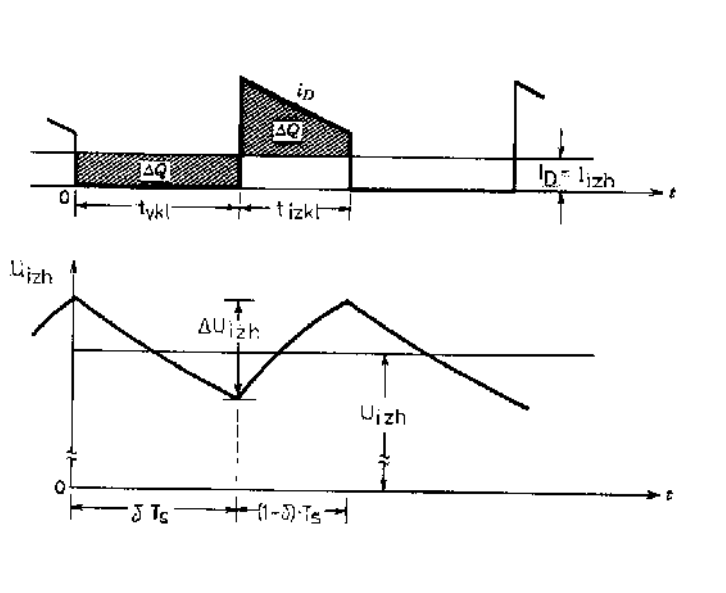
e predpostavimo, da te e srednja vrednost toka skozi breme, izmeni ni del pa te e skozi izhodni kondenzator, potem je sprememba napetosti na kondenzatorju:

$$\Delta U_{izh} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_{izh} \cdot u \cdot T_S}{C} = \frac{U_{izh}}{R} \cdot \frac{u \cdot T_S}{C}$$

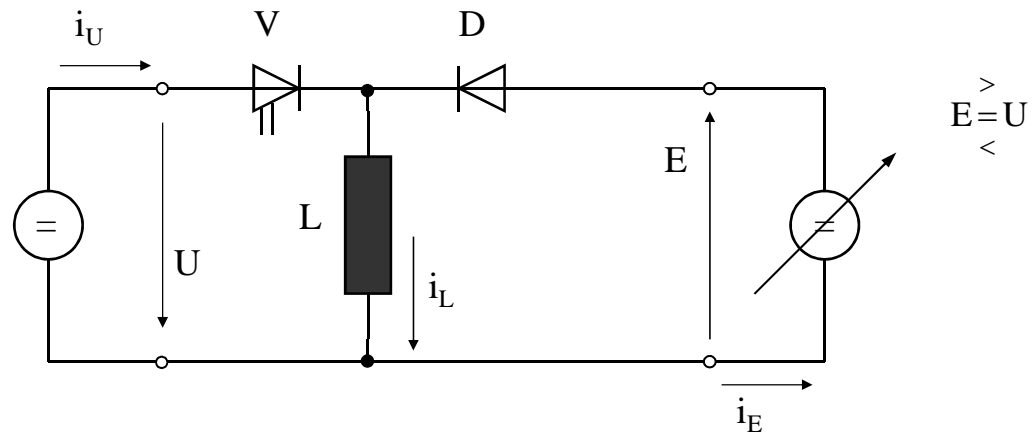
$$\frac{\Delta U_{izh}}{U_{izh}} = \frac{u \cdot T_S}{RC} = \frac{u \cdot T_S}{\ddagger}$$

kjer je $\ddagger = RC$

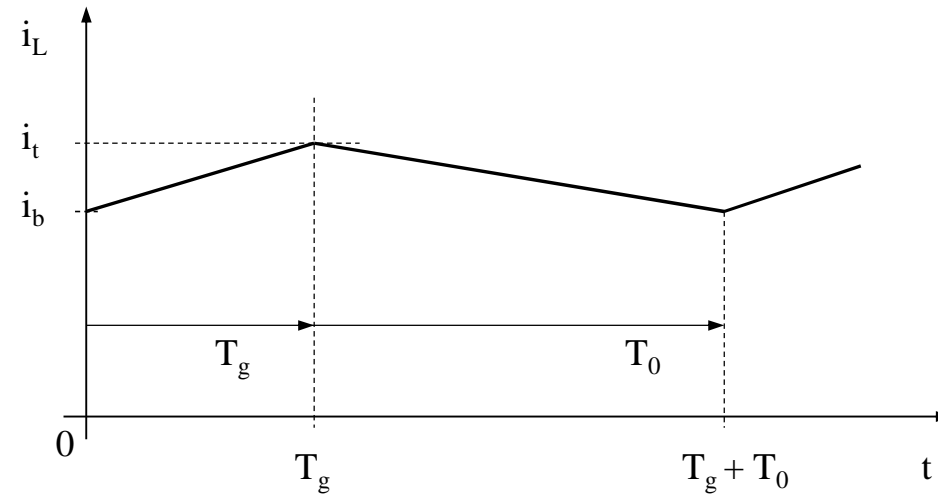
Valovitost izhodne napetosti pretvornika navzgor



Zaporni pretvornik



Slika 11.10: Shema zapornega pretvornika

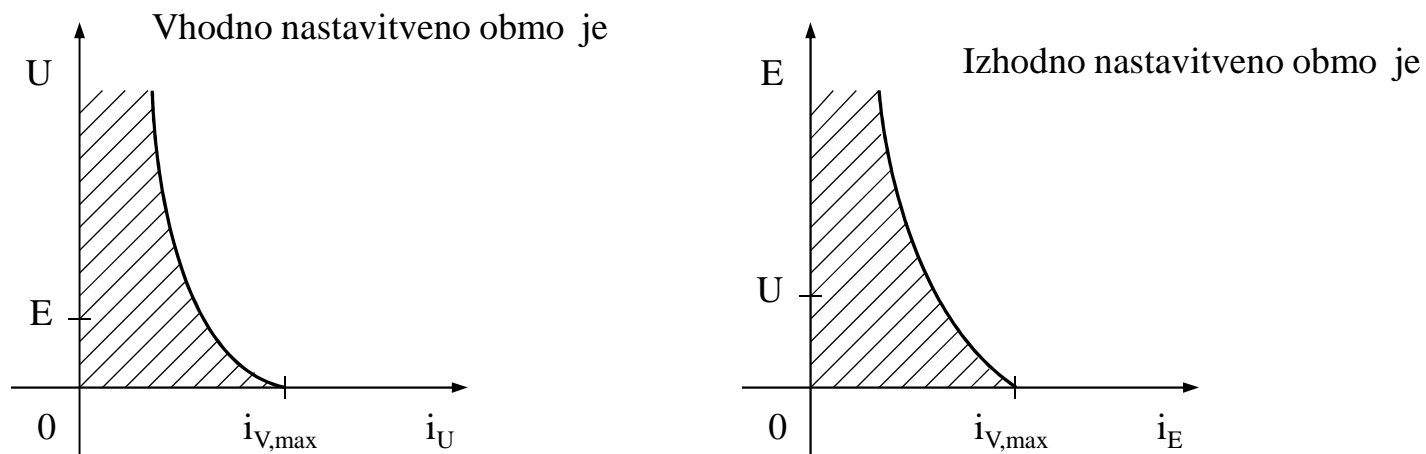


$$i = \frac{1}{L} \cdot \int_{t=0}^t U dt$$

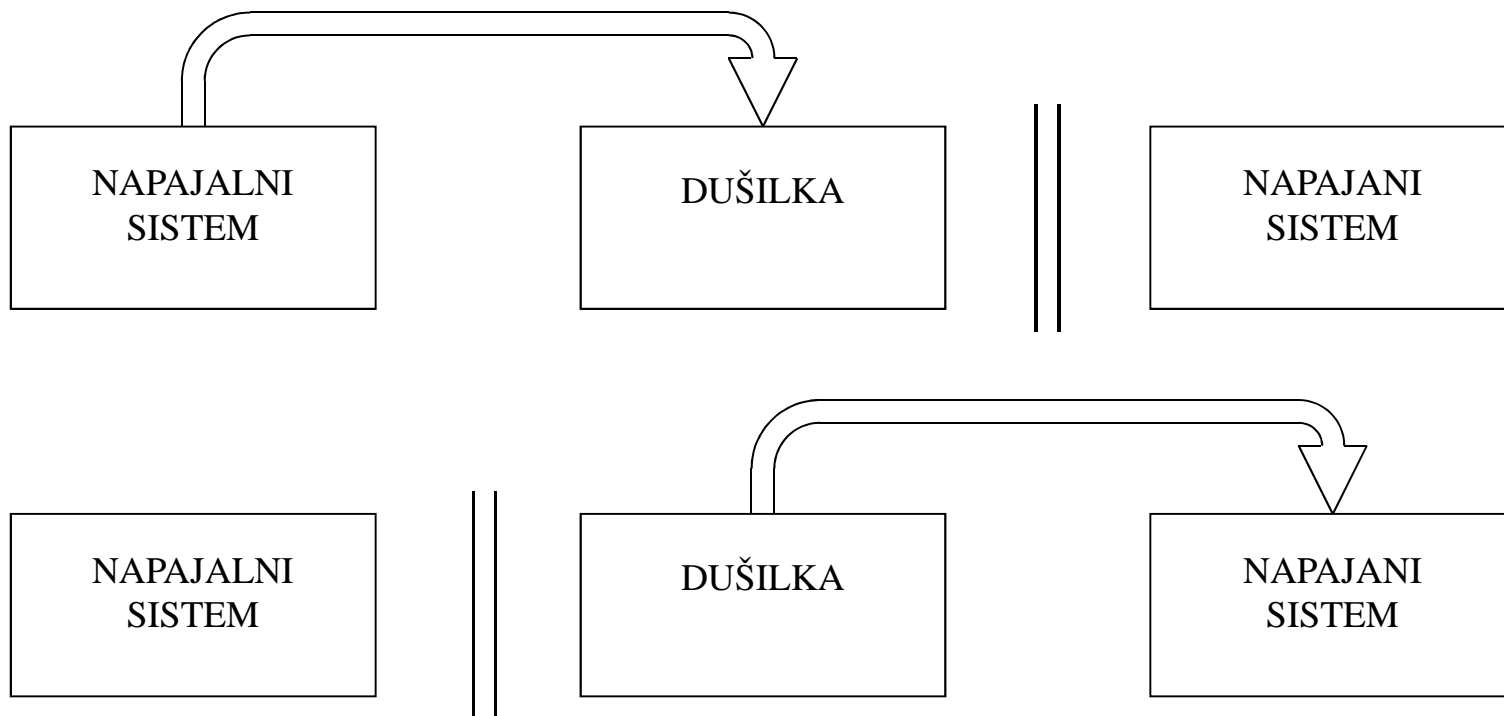
$$i_L = i_t + \frac{1}{L} \int_{t=T_g}^t (-E) dt$$

$$i_L = i_b + \frac{1}{L} \cdot \int_{t=0}^t U dt$$

Slika 11.11: asovni potek toka

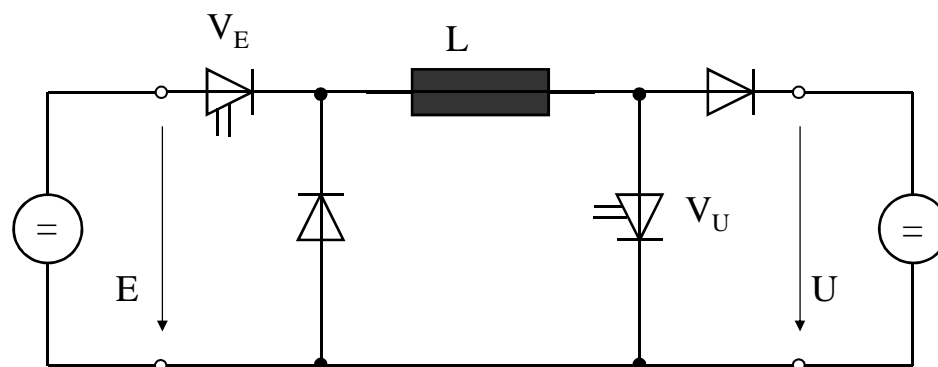


Slika 11.12: Nastavitveno obmo je (za $i_L \approx I_L$ in $\hat{v}_V = \hat{v}_{V,max}$)



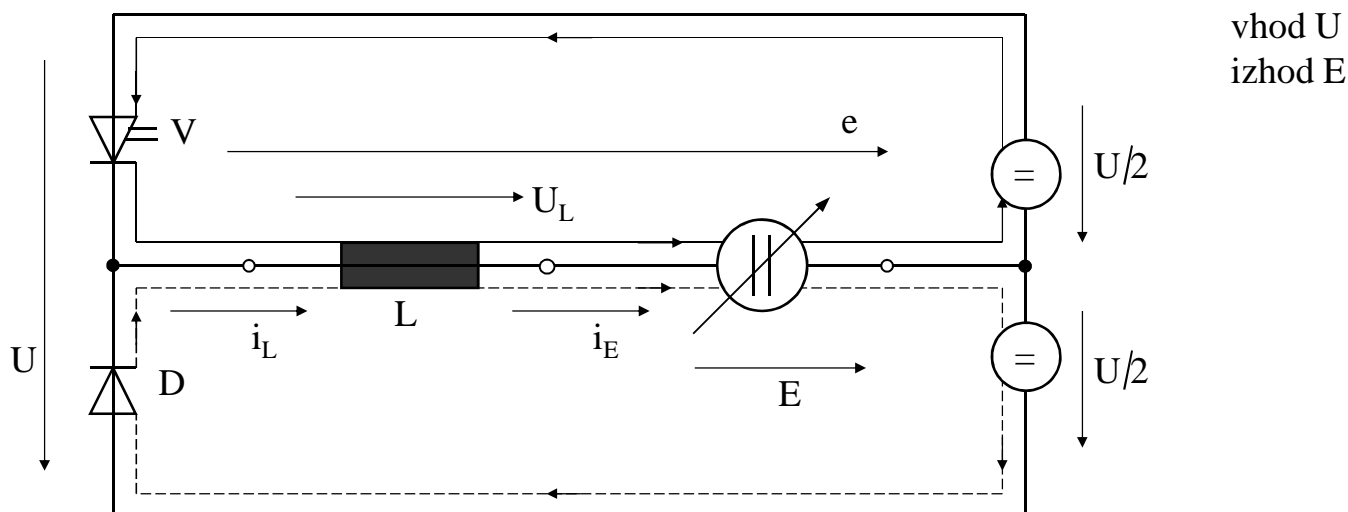
Slika 11.13: Pretok energije v odprtem in zaprtem stanju ventila

Kaskadna vezava (Buck-Boost)



Slika 11.14: Kaskada pretvornika navzgor in pretvornika navzdol

Pretvornik navzdol s spremembo smeri napetosti

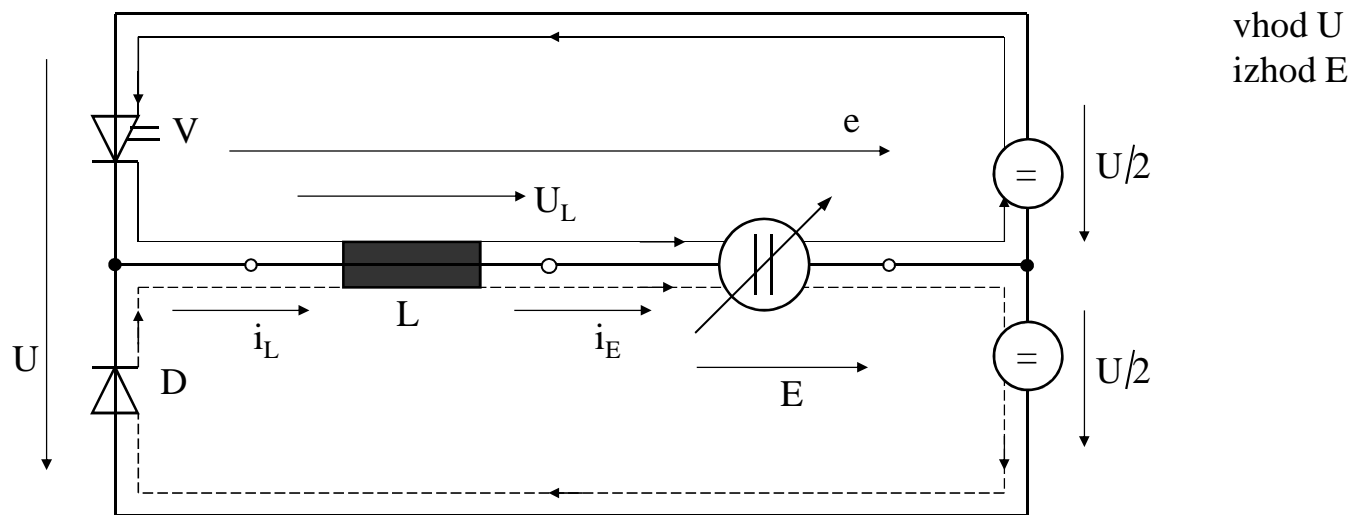


V prevaja (T_g): Tokovna veja : $e = e_{\max} = +\frac{U}{2}$

V zaprt (T_o): Tokovna veja: $e = e_{\min} = -\frac{U}{2}$

Slika 11.15: Shema pretvornika navzdol s spremembo smeri napetosti

Pretvornik navzdol s spremembo smeri napetosti



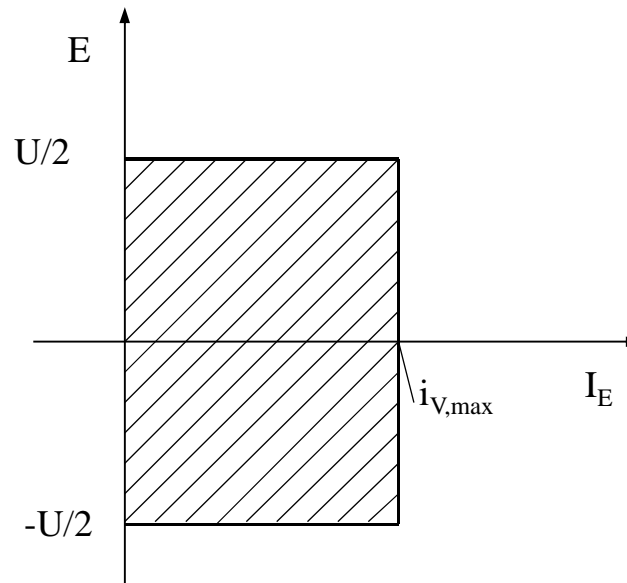
$$g = 1: \quad \bar{e} = \bar{e}_{\max} = +\frac{U}{2}$$

$$E = e - u_L$$

$$g = 0: \quad \bar{e} = \bar{e}_{\min} = -\frac{U}{2}$$

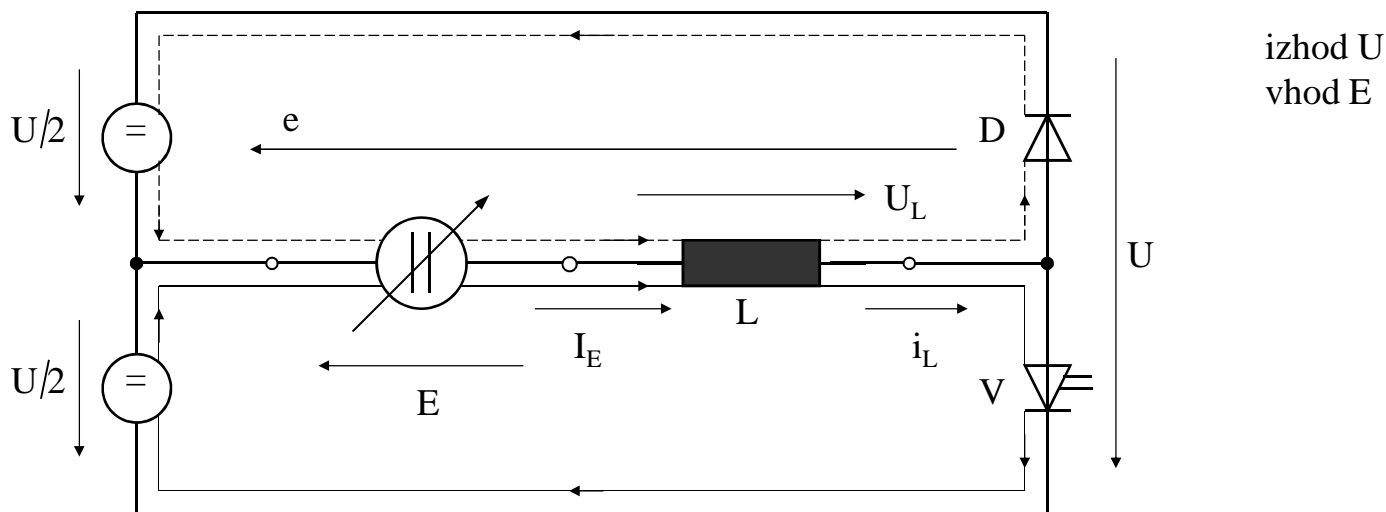
$$\text{V ustaljenem stanju je } U_L=0 \rightarrow -\frac{U}{2} \leq E \leq +\frac{U}{2}$$

Slika 11.15: Shema pretvornika navzdol s spremembo smeri napetosti



Slika 11.16: Izhodno nastavitveno stanje sistema

Pretvornik navzgor s spremembo smeri napetosti

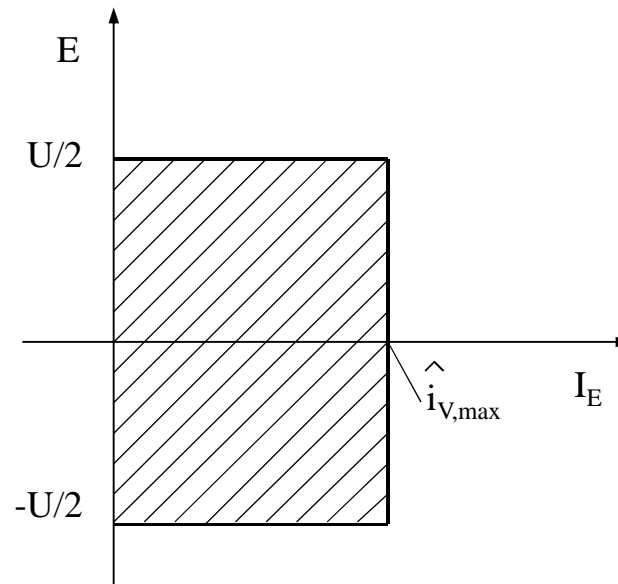


tokovna veja mora biti vzpostavljena

V prevaja (T_g): Tokovna veja $e = e_{\min} = -\frac{U}{2}$

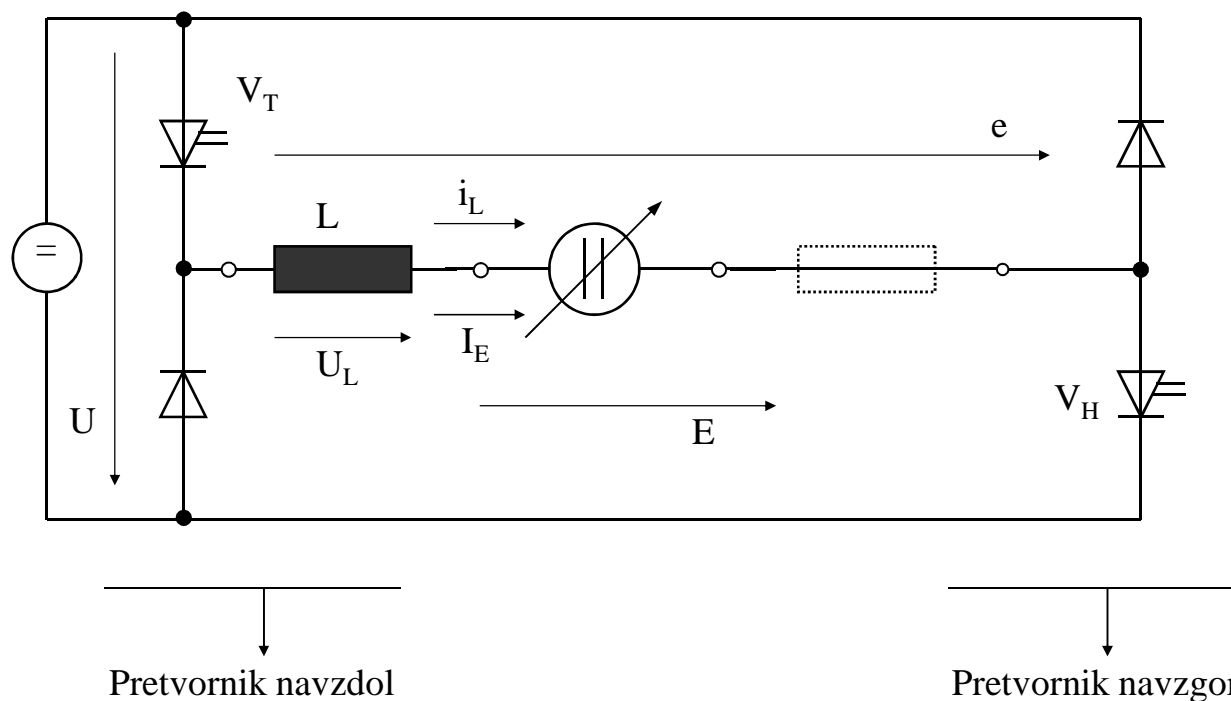
V zaprt (T_o): Tokovna veja; $e = e_{\max} = \frac{U}{2}$

Slika 11.17: Shema pretvornika navzgor



Slika 11.18: Vhodno nastavitveno območje

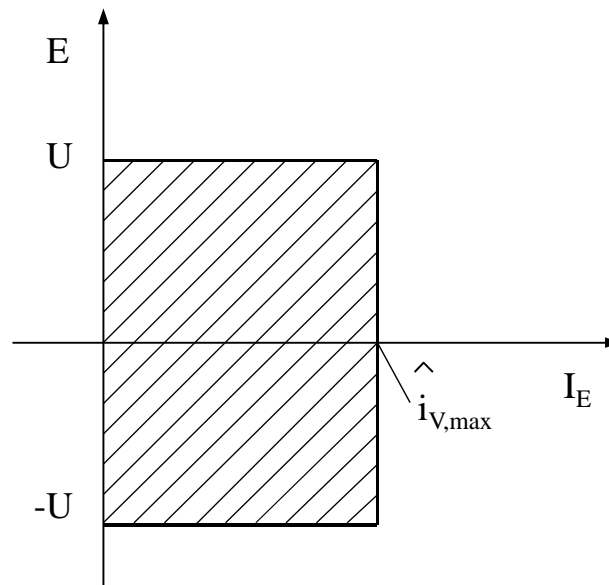
Enosmerni nastavljalnik v obliki asimetri nega polnosti a



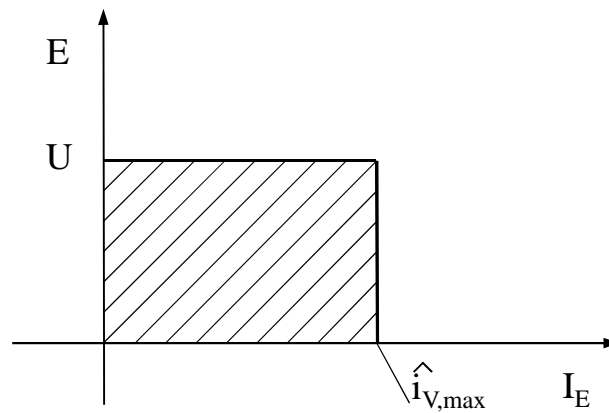
Možnosti delovanja:

- Brez uporabe prostote nih tokokrogov
- Lo eno pokrivanje prvega in etrtega kvadranta

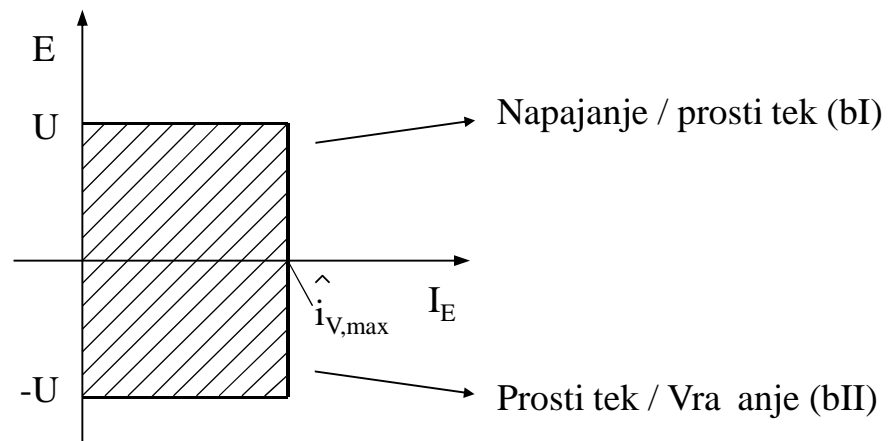
Slika 11.19: Shema nastavljalnika



Slika 11.20: Nastavitveno obmo je

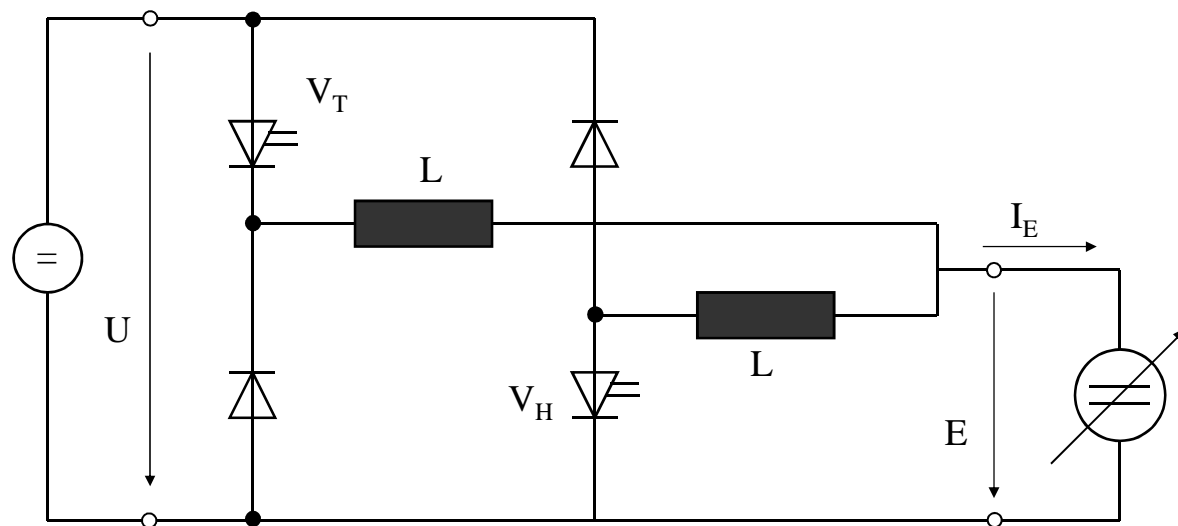


Slika 11.21: Shema pokrivanja

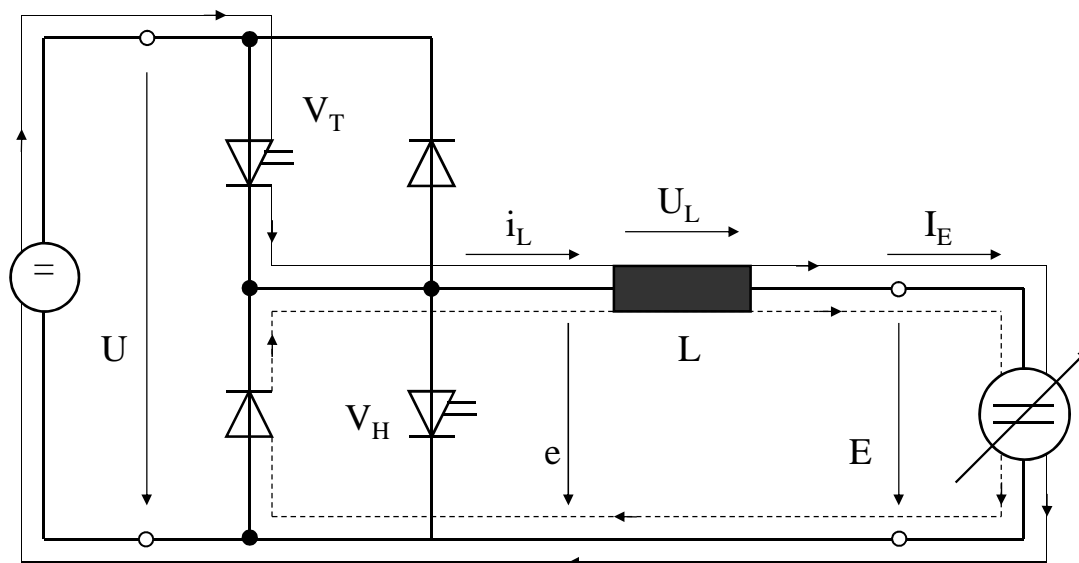


Slika 11.22: Celotno nastavitveno območje

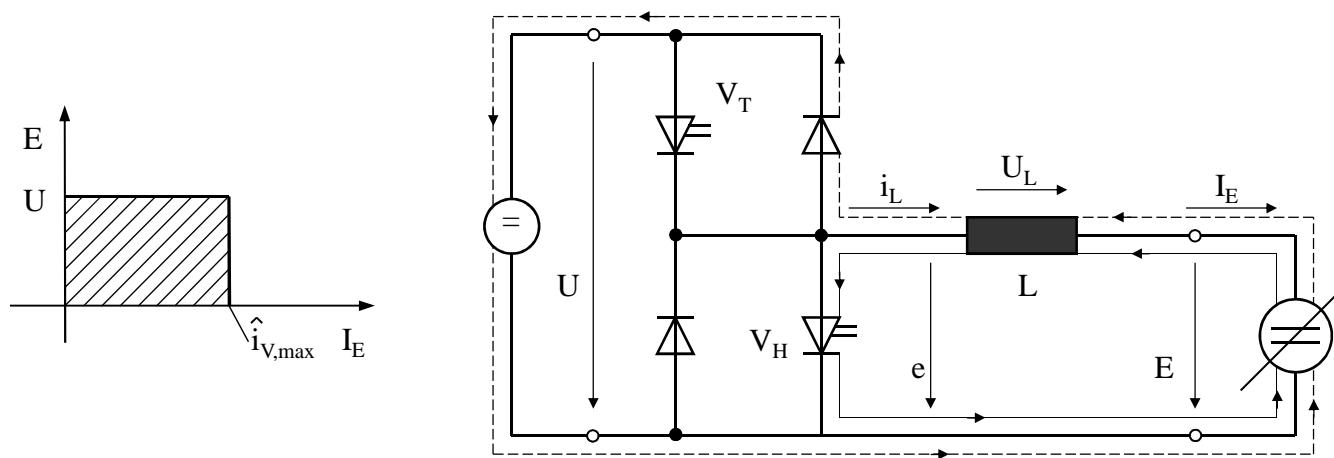
Dvokvadrantni nastavljalik z obratnim smeri toka



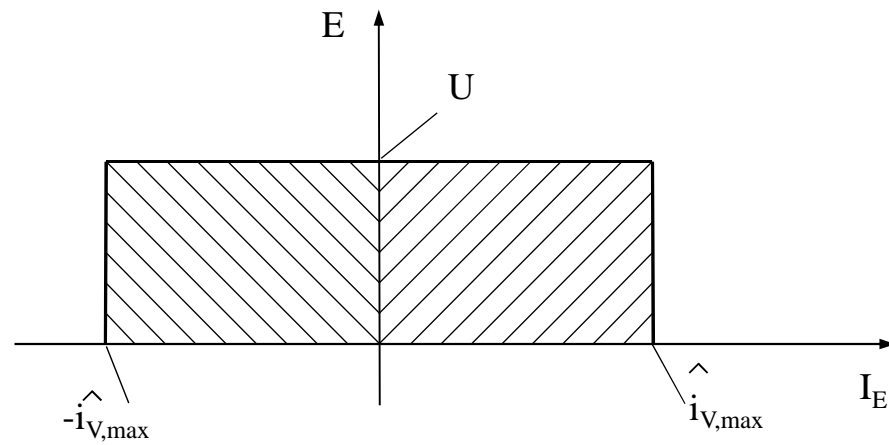
Slika 11.23: Shema nastavljalnika



Slika 11.24: 1. Kvadrant

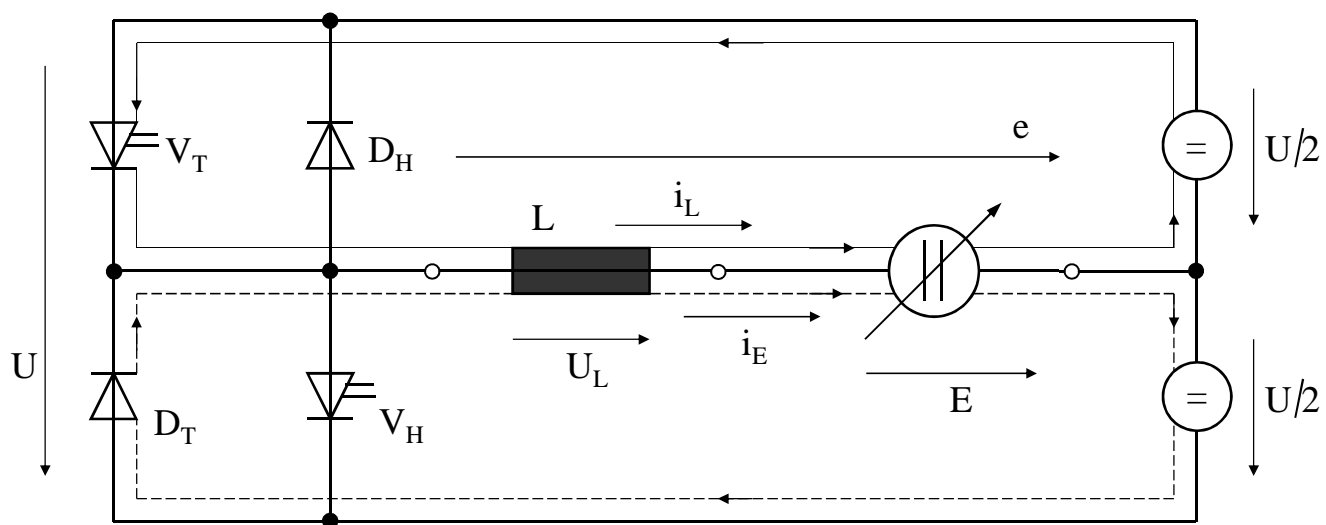


Slika 11.25: 2. Kvadrant



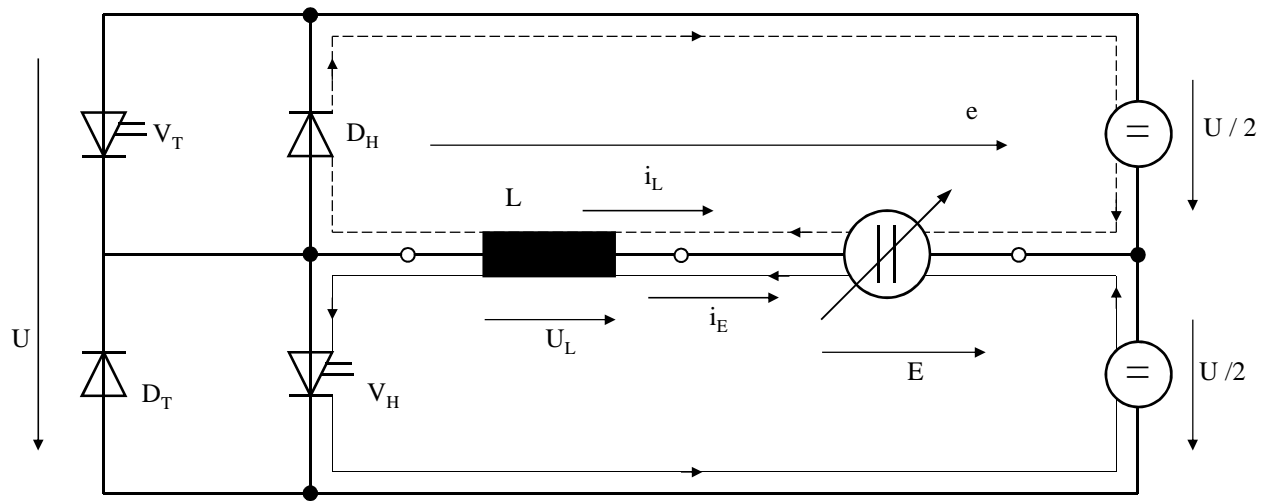
Slika 11.26: Krmilno obmoje

Štirikvadrantni nastavljalnik s spremembo smeri napetosti s srednjim odcepom

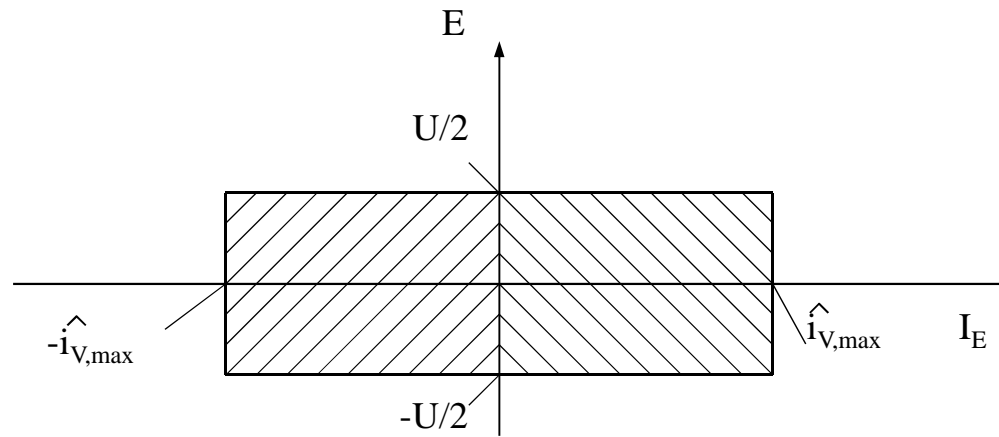


Slika 11.27: Shema nastavljalnika, delovanje v 1. in 4. kvadrantu

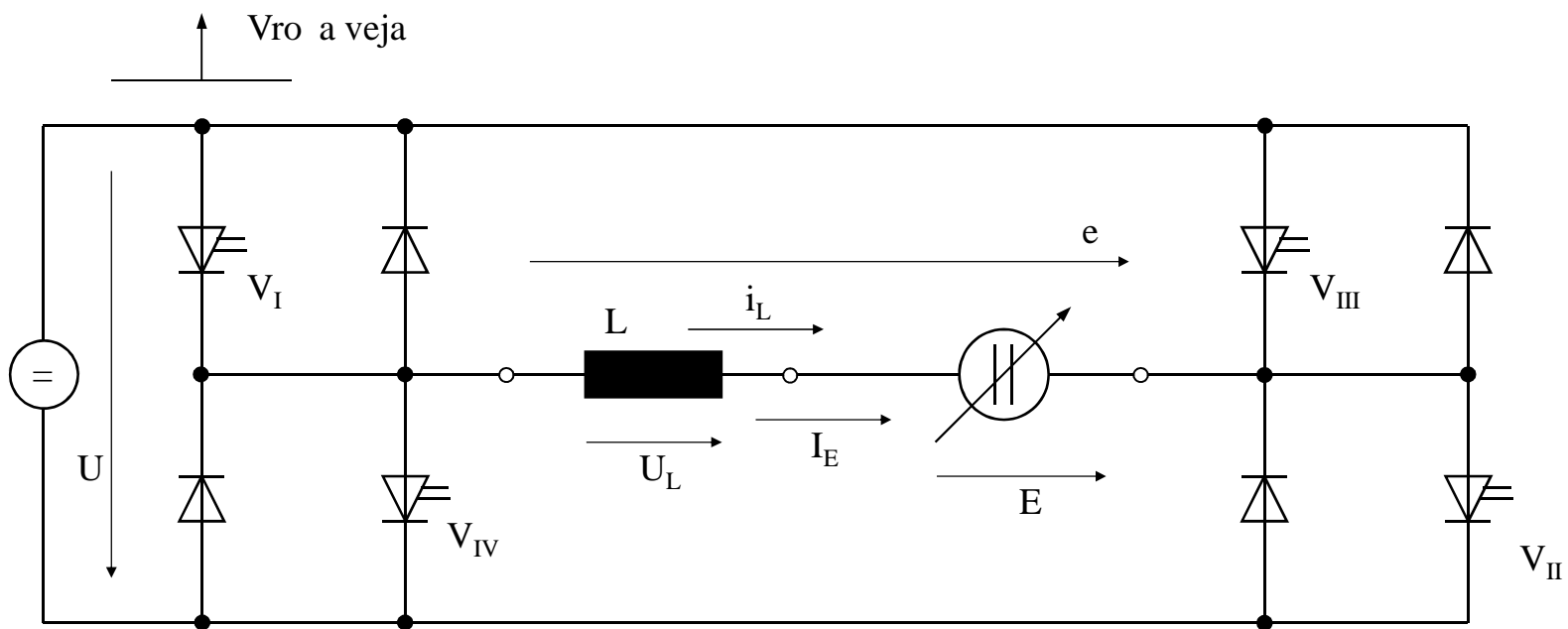
1. $I_L > 0$ Pripadajo e nastavitveno obmo je za E: 1. in 4. kvadrant
2. $I_L < 0$ Pripadajo e nastavitveno obmo je za E: 2. in 3. kvadrant



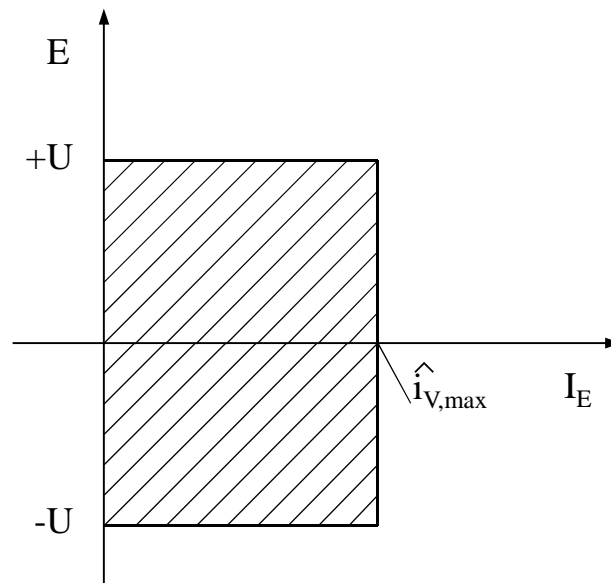
Slika 11.28: Delovanje v 2. in 3. kvadrantu



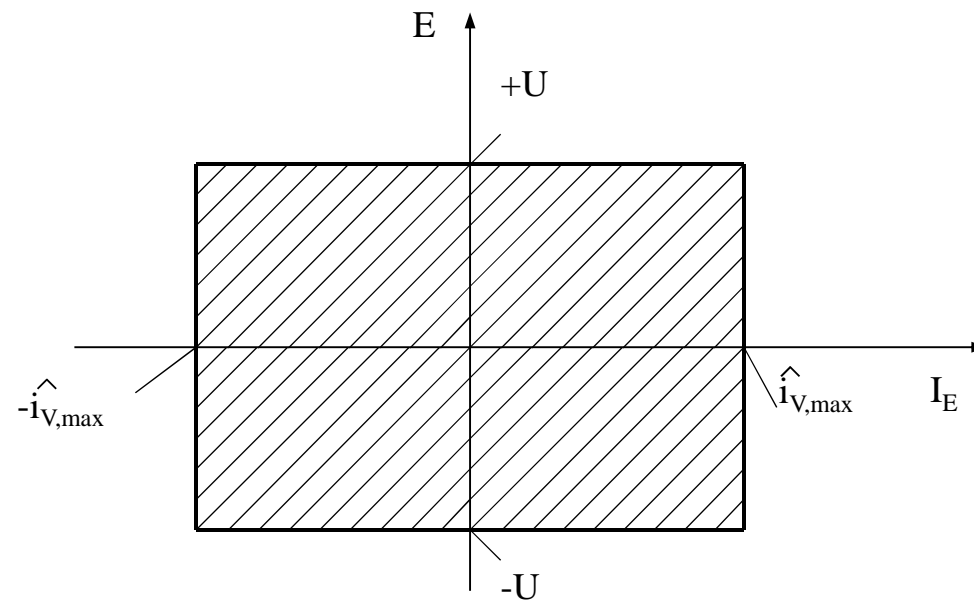
Slika 11.29: Skupno nastavitveno obmo je



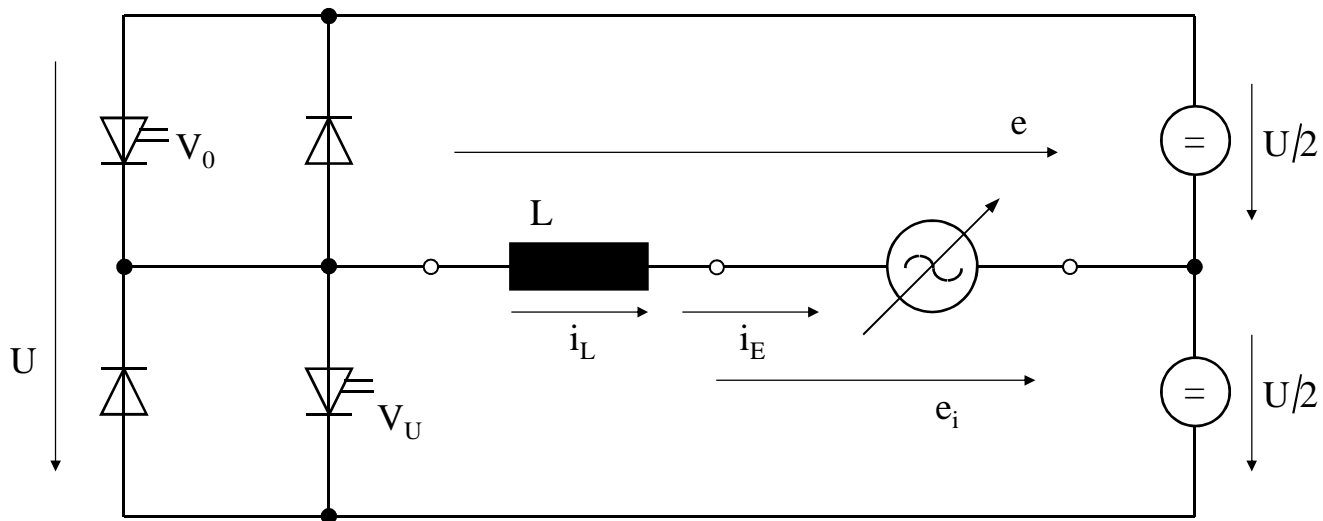
Slika 11.30: Shema vezja (tokovne veje niso vrisane)



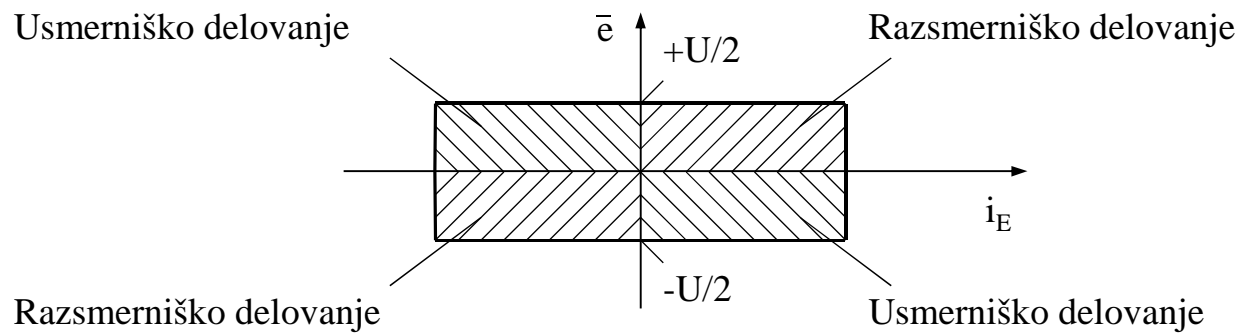
Slika 11.31: Nastavitveno območje za E



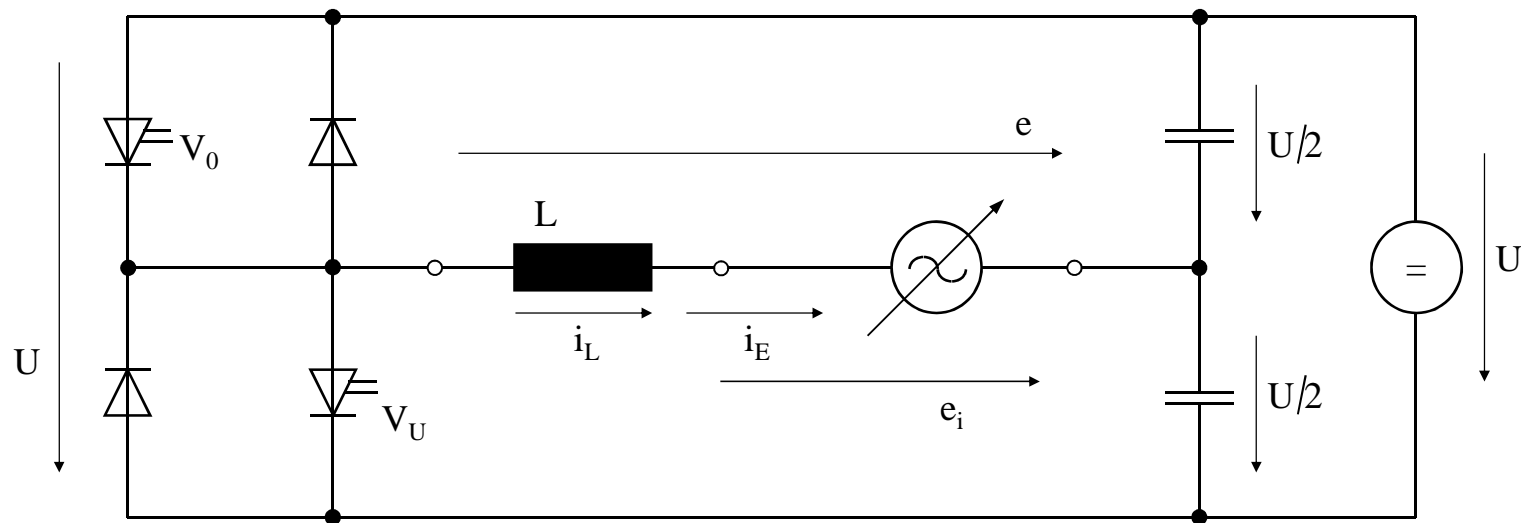
Slika 11.32: Nastavitveno območje



Slika 11.33: Shema vezja

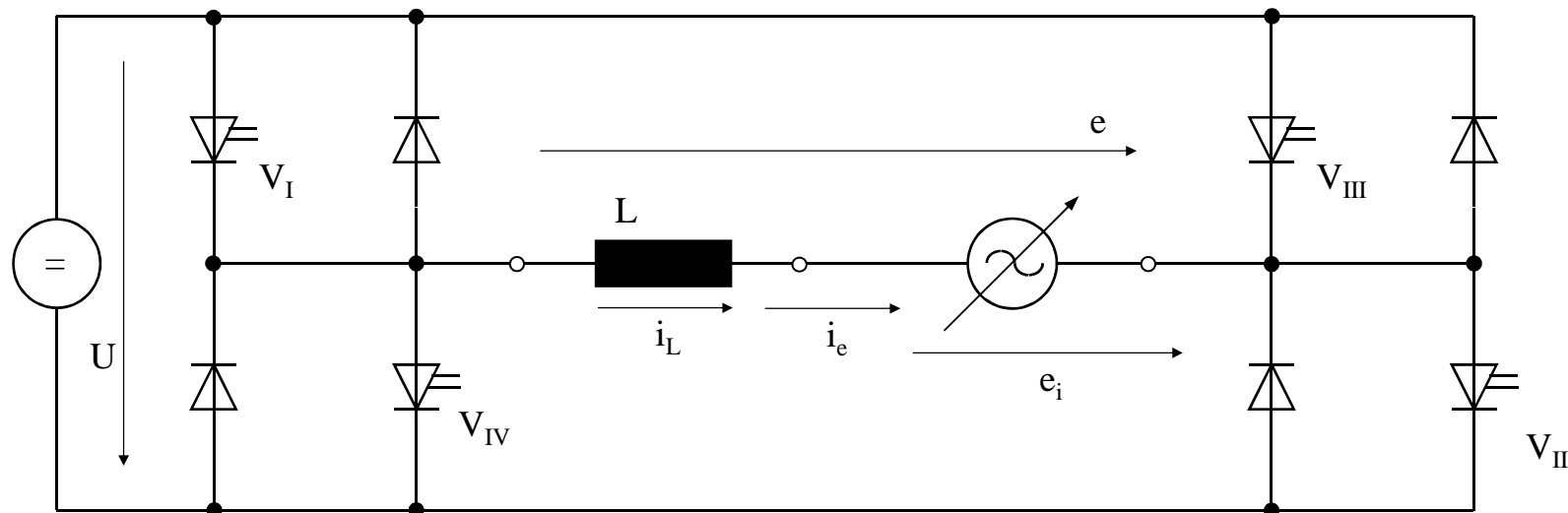


Slika 11.34: Nastavitveno (delovno) področje

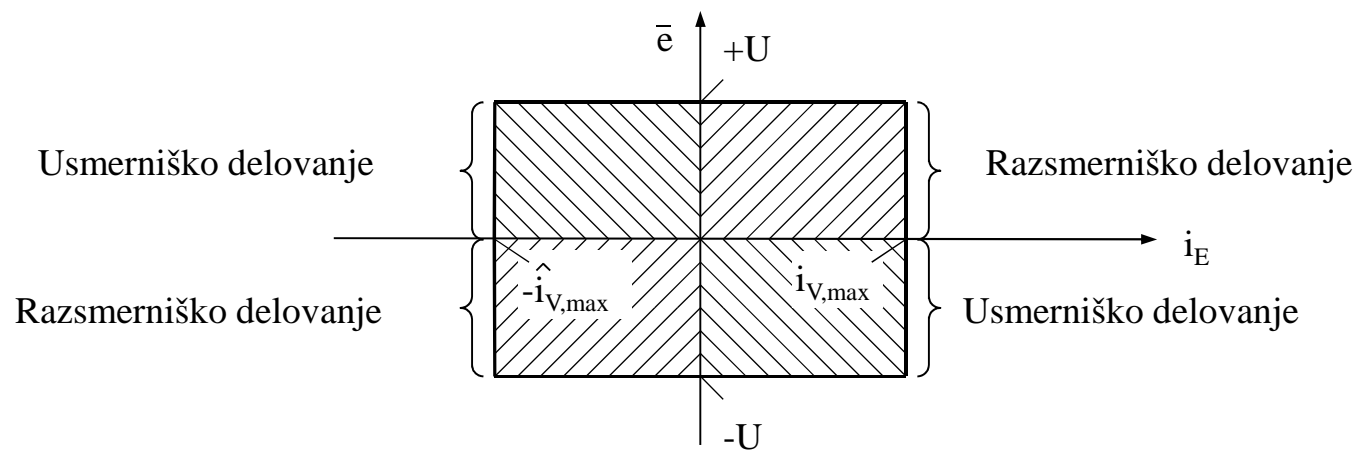


Slika 11.35: Izvedba s kapacitivnim srednjim odcepom

Enofazni usmernik (razsmernik) v mosti ni vezavi

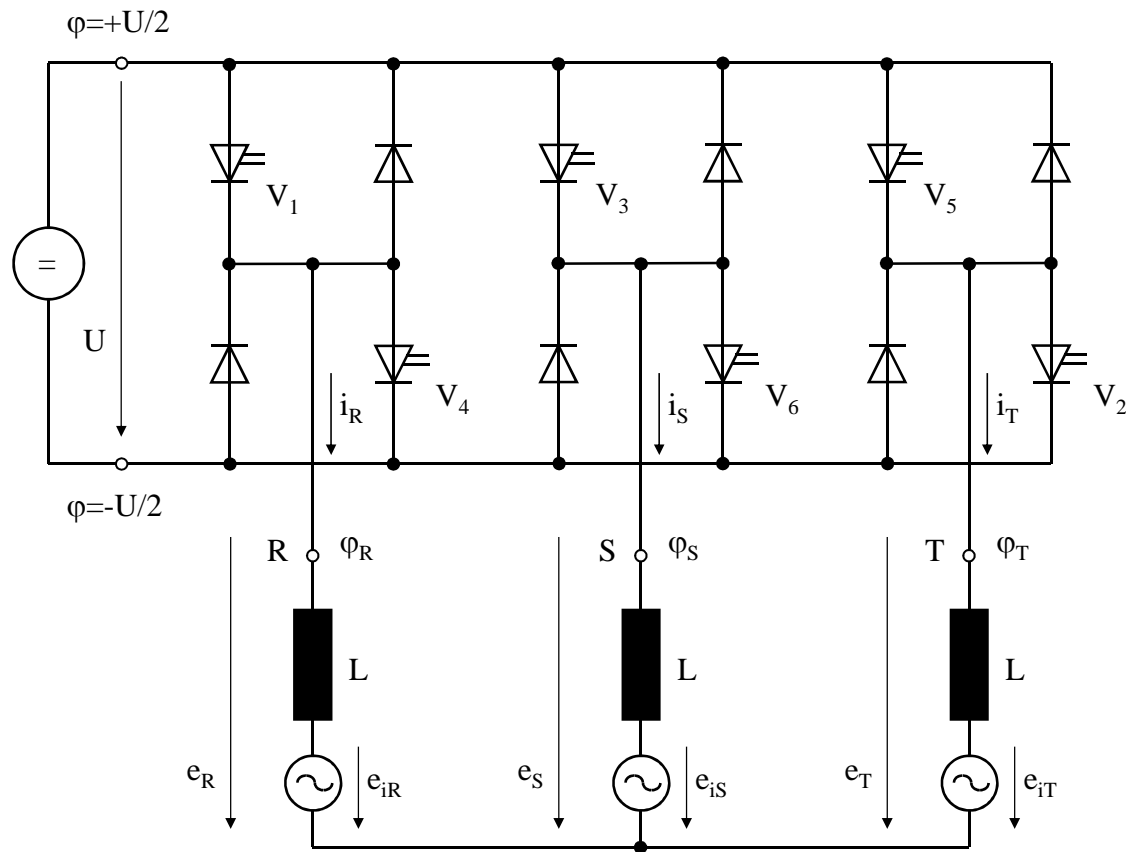


Slika 11.36: Shema vezja



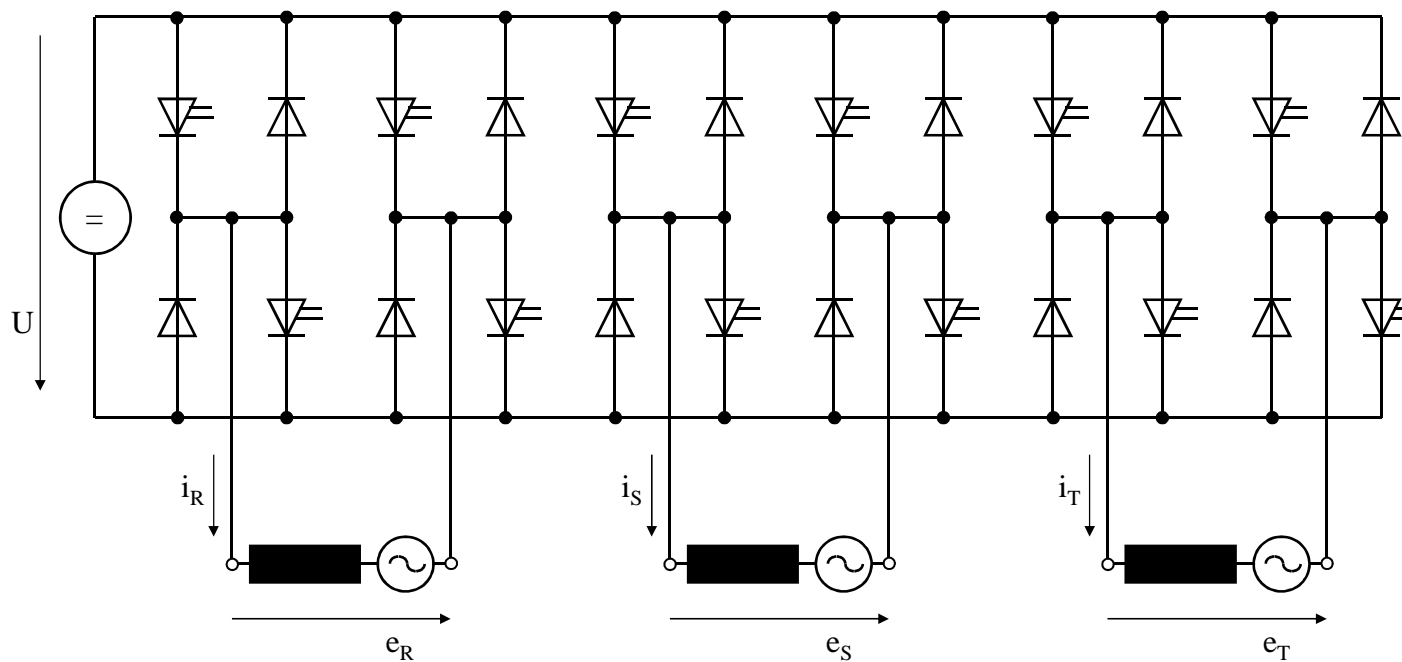
Slika 11.37: Oznaka v kvadrantih za kvazistacionarno delovanje

Trifazni usmernik (razsmernik) v mosti ni vezavi



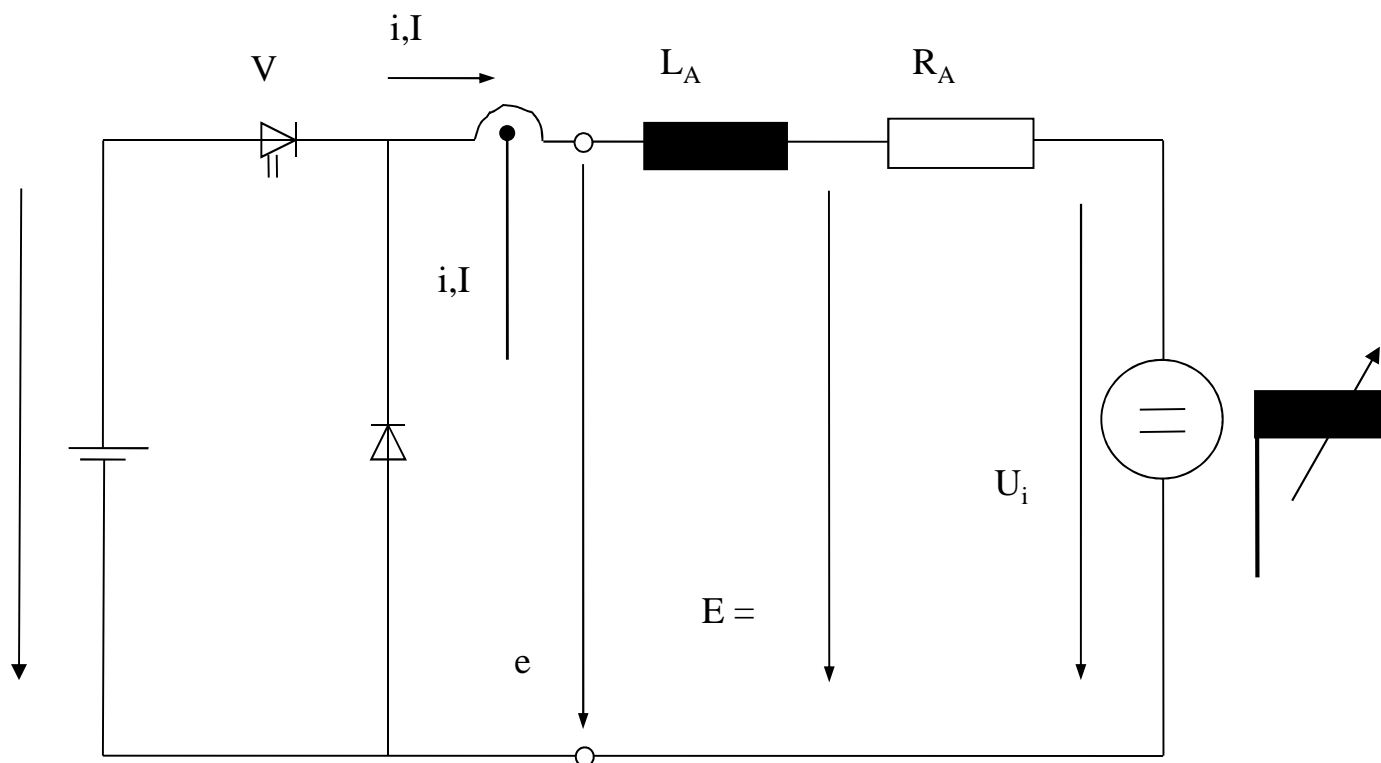
Slika 11.38: Shema vezja

Trojni enofazni usmernik (razsmernik) v mosti ni vezavi

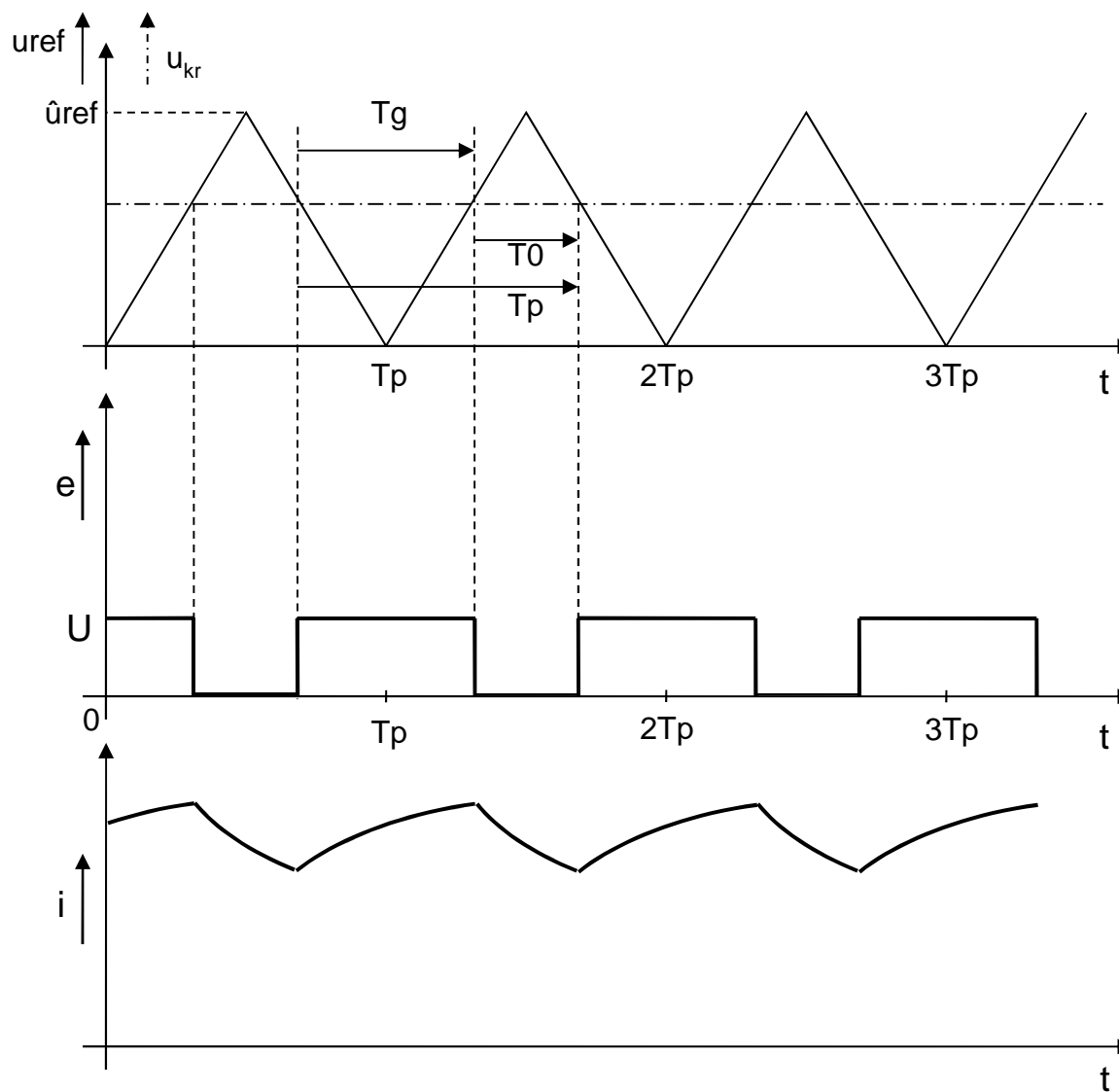


Slika 11.39: Shema vezja

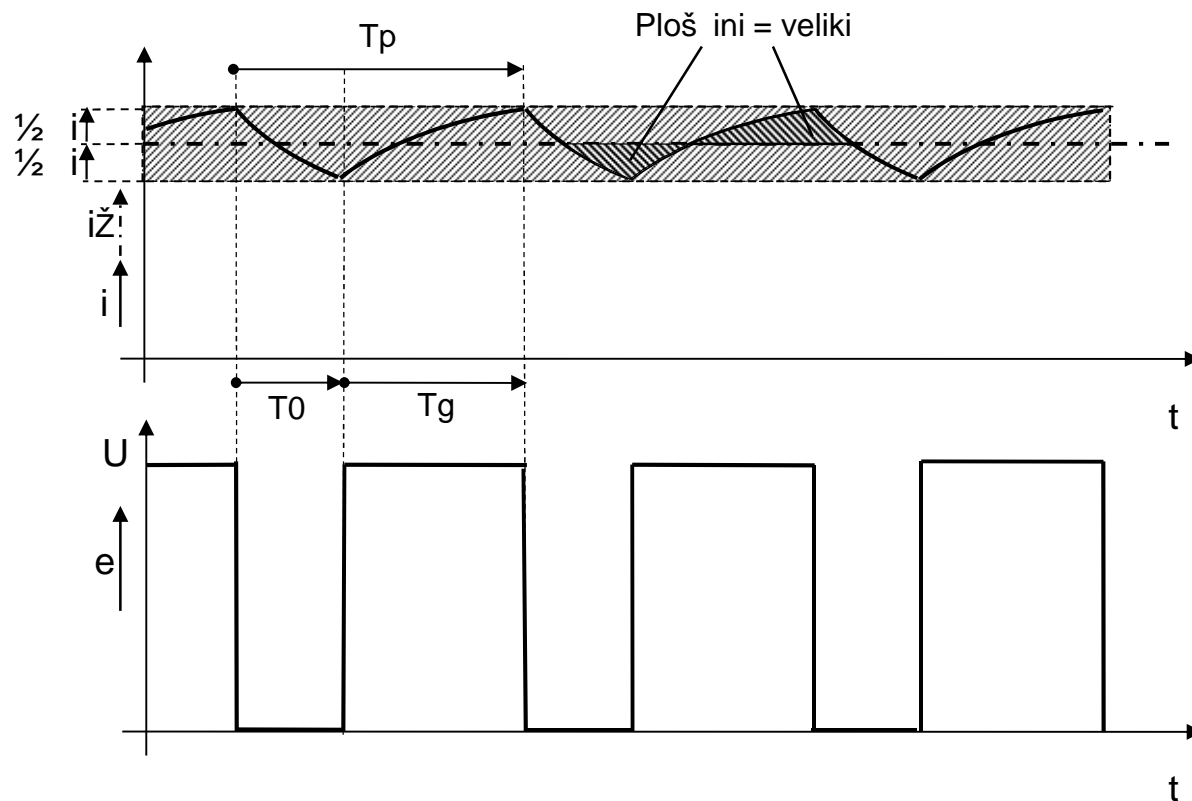
Osnovni modulacijski principi - PŠM



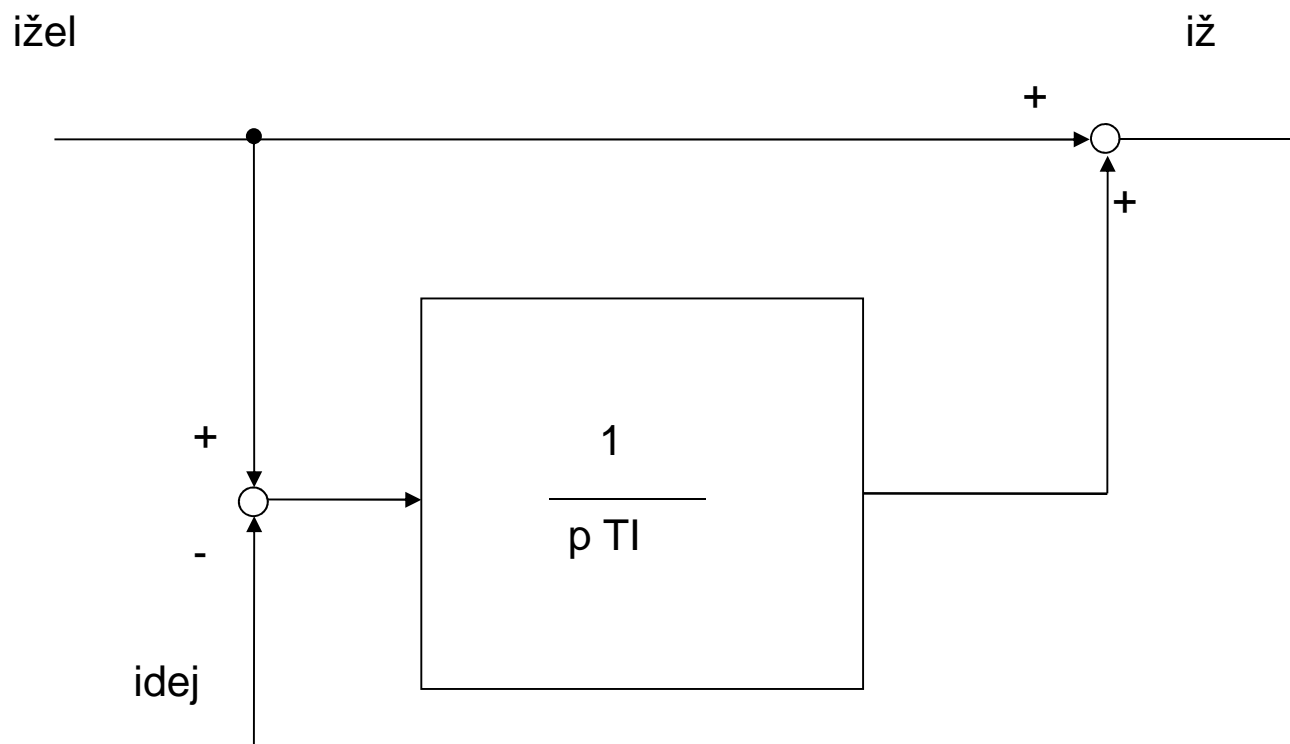
Slika 12.1



Slika 12.2

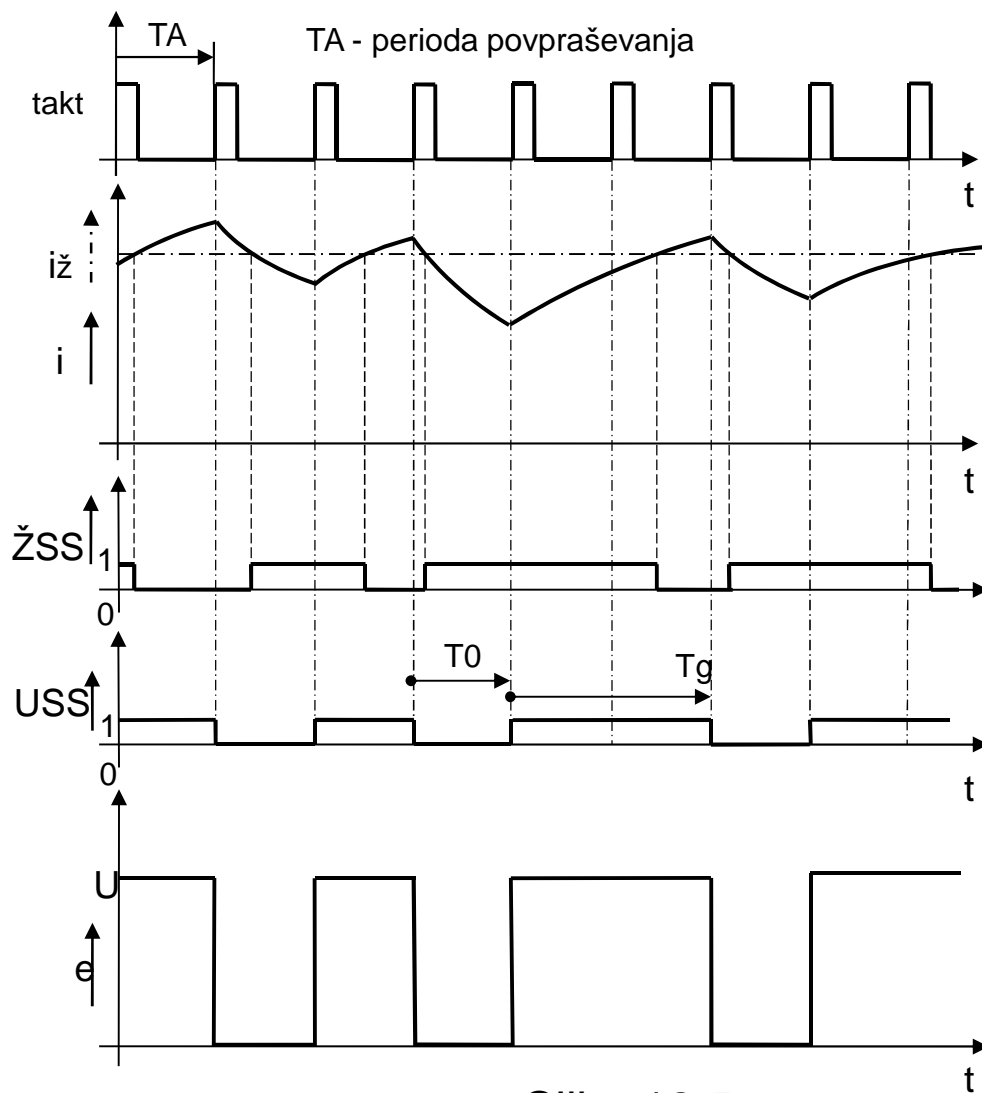


Slika 12.3



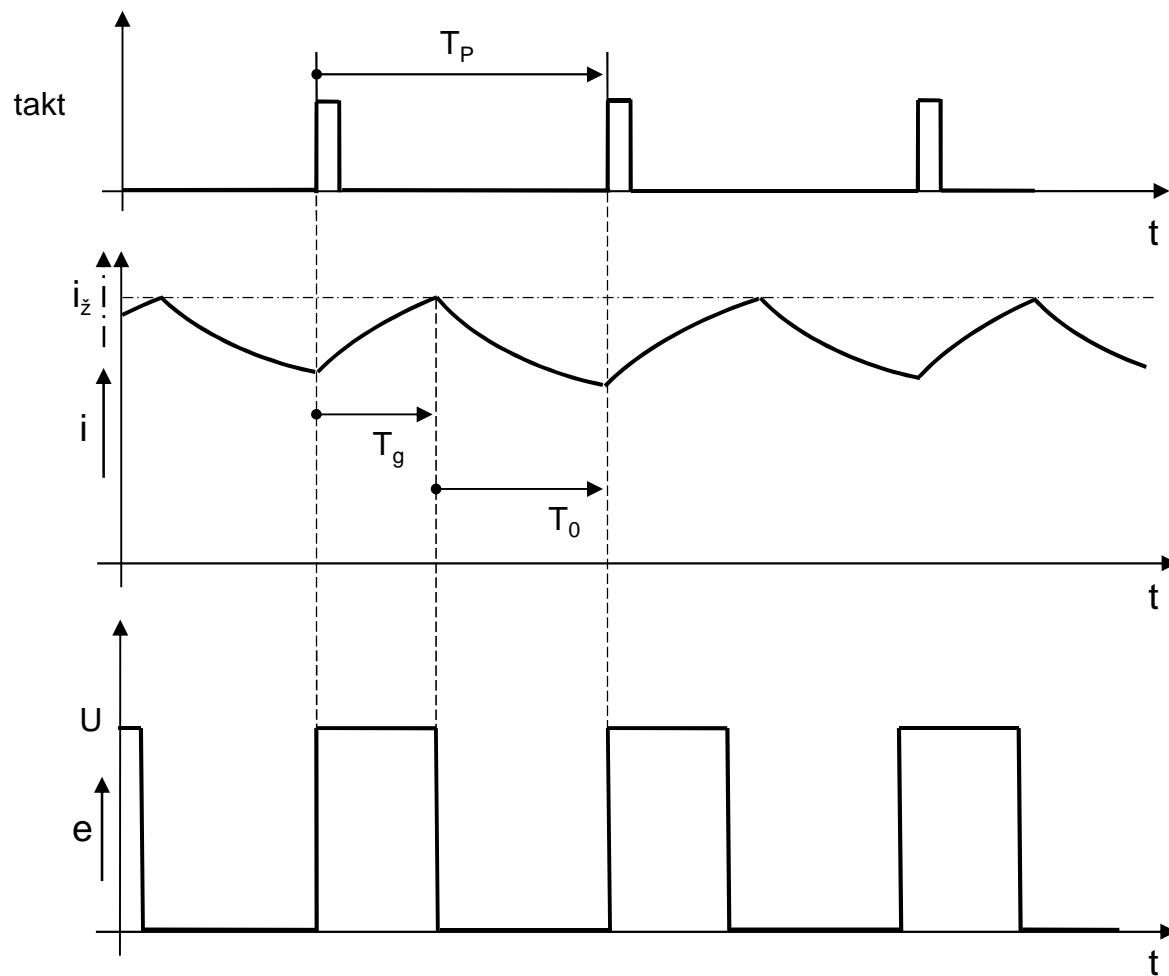
Slika 12.4

asovno-diskretni na in spreminjanja stikalnih stanj

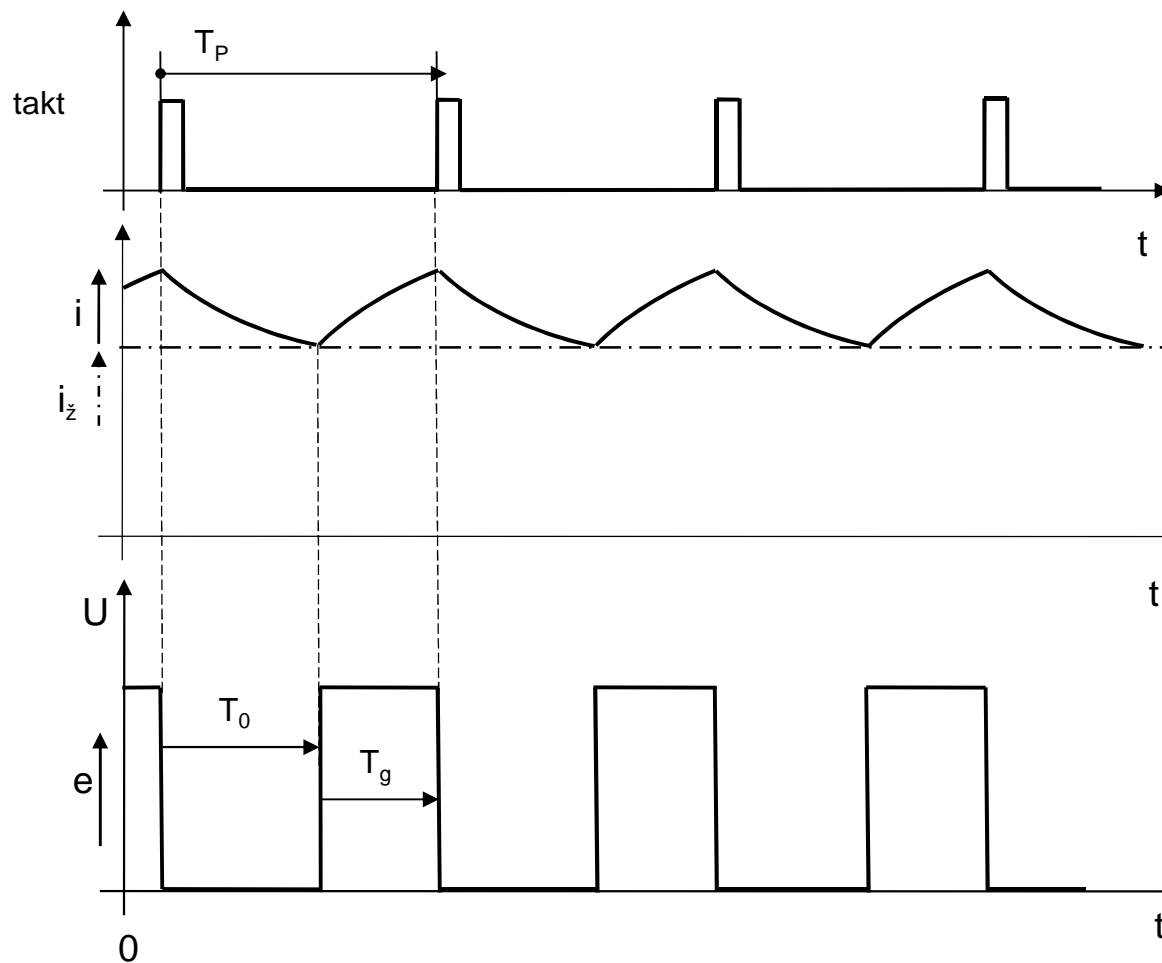


Slika 12.5

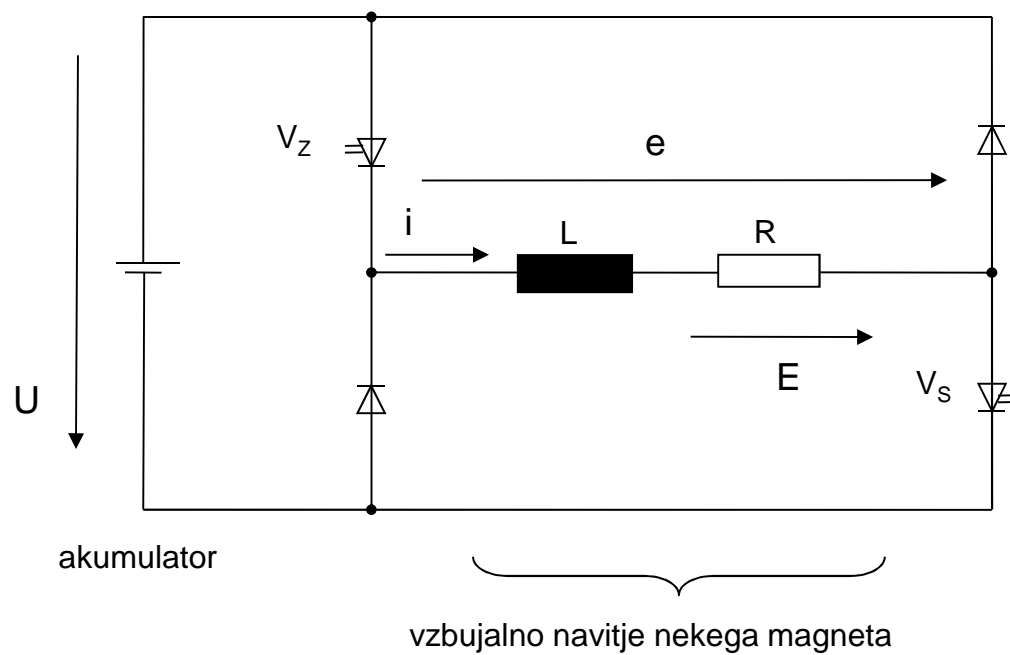
“Current mode”



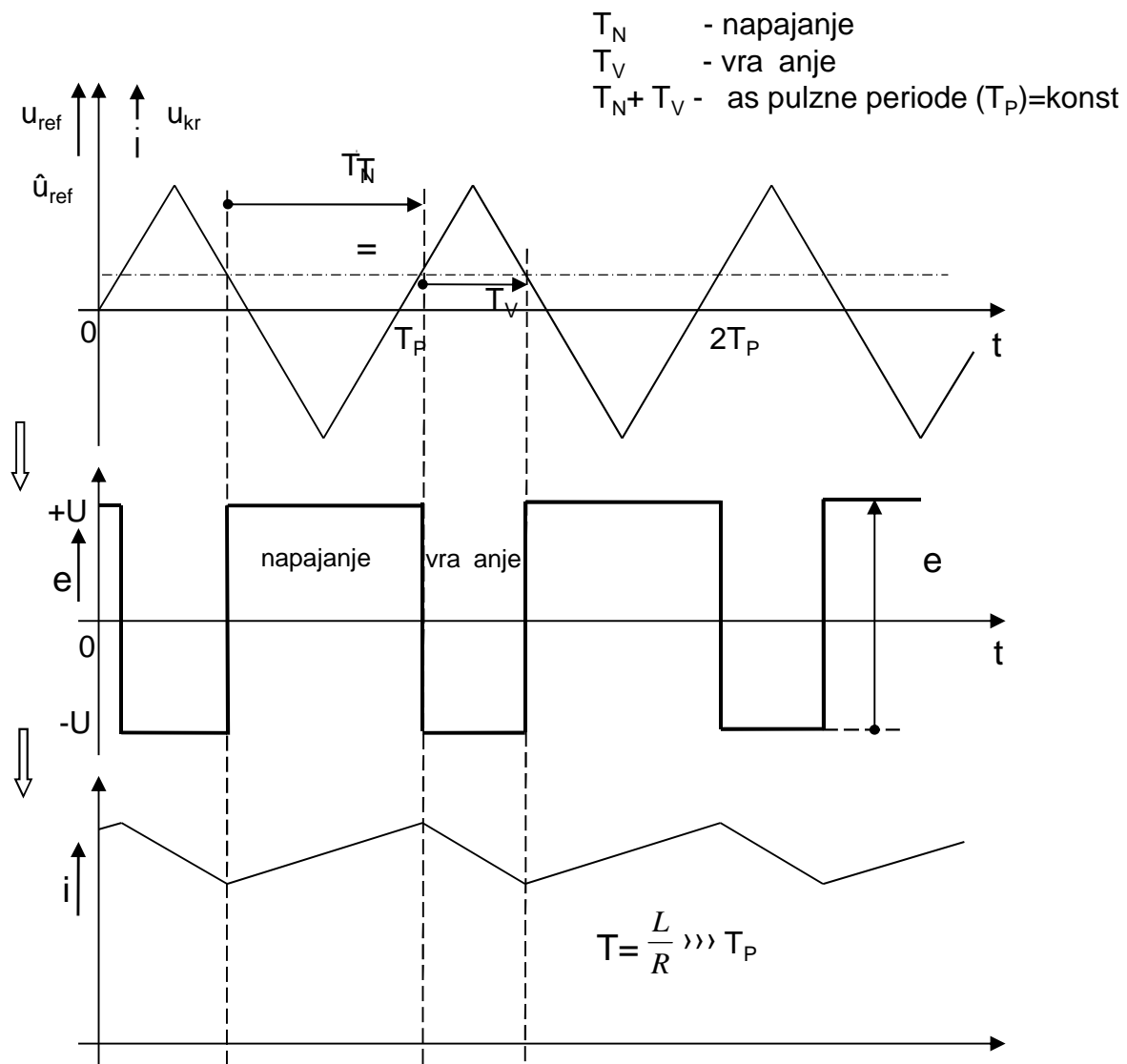
Slika 12.6



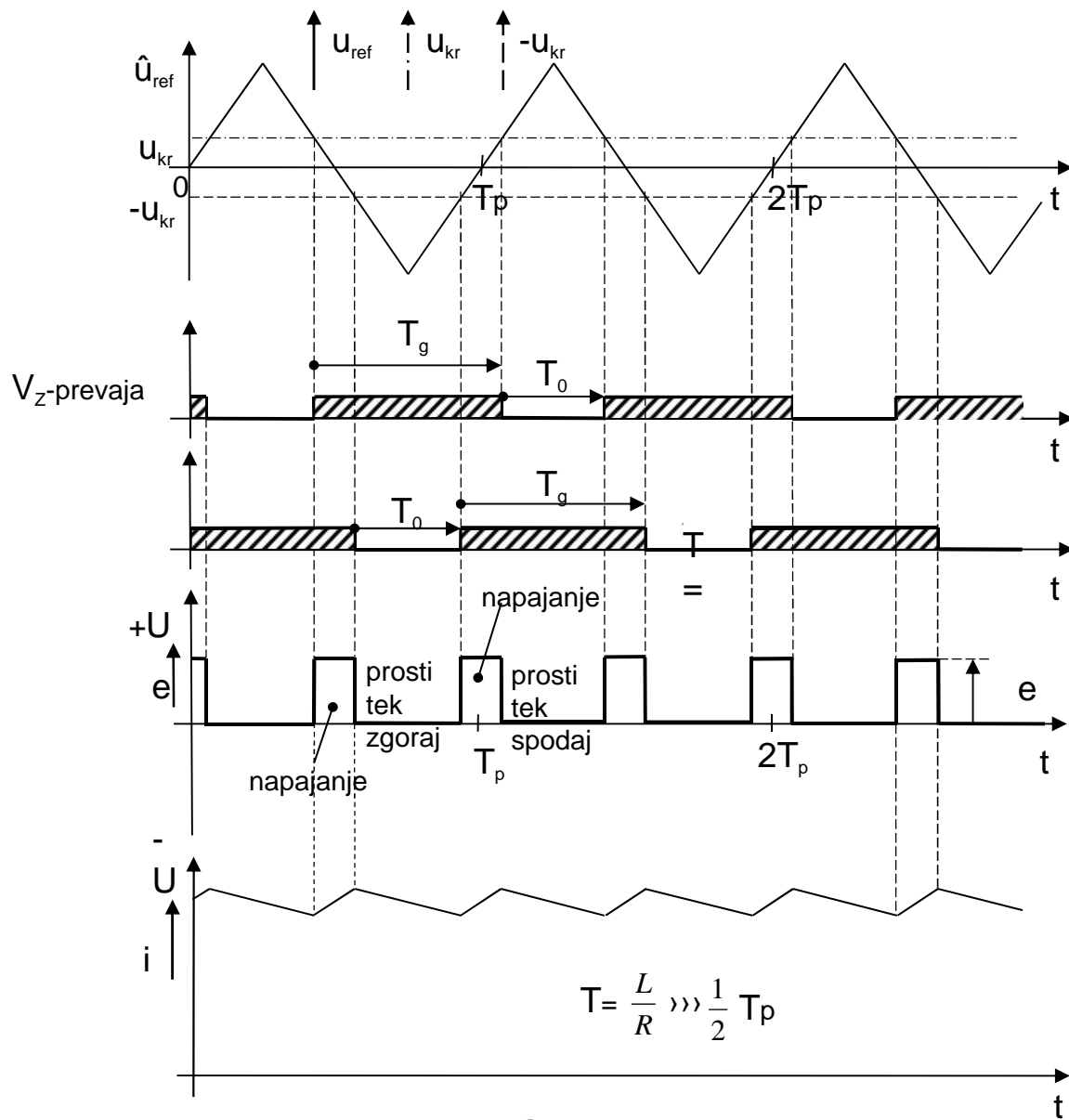
Slika 12.7



Slika 12.8



Slika 12.9



Slika 12.10