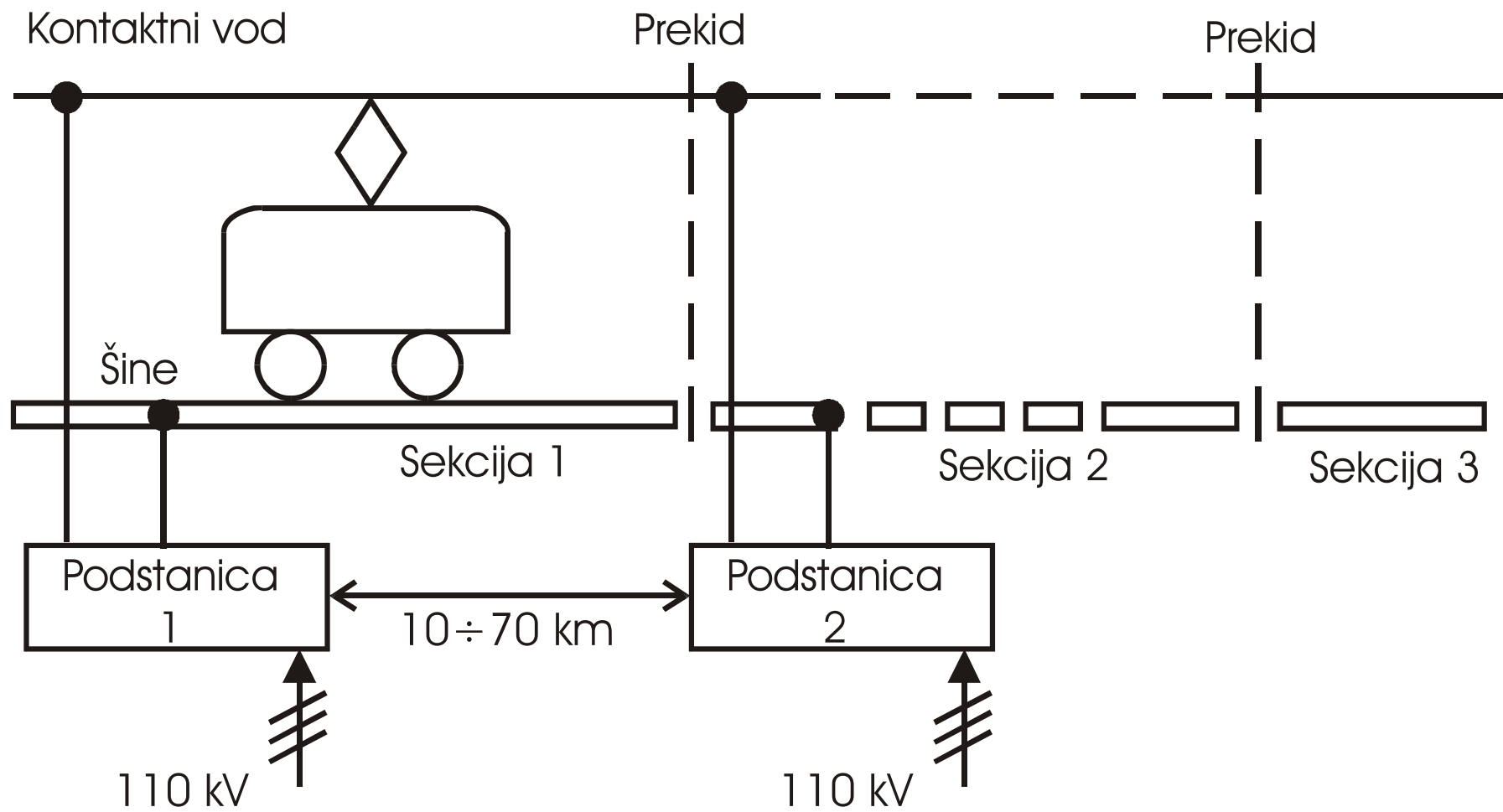


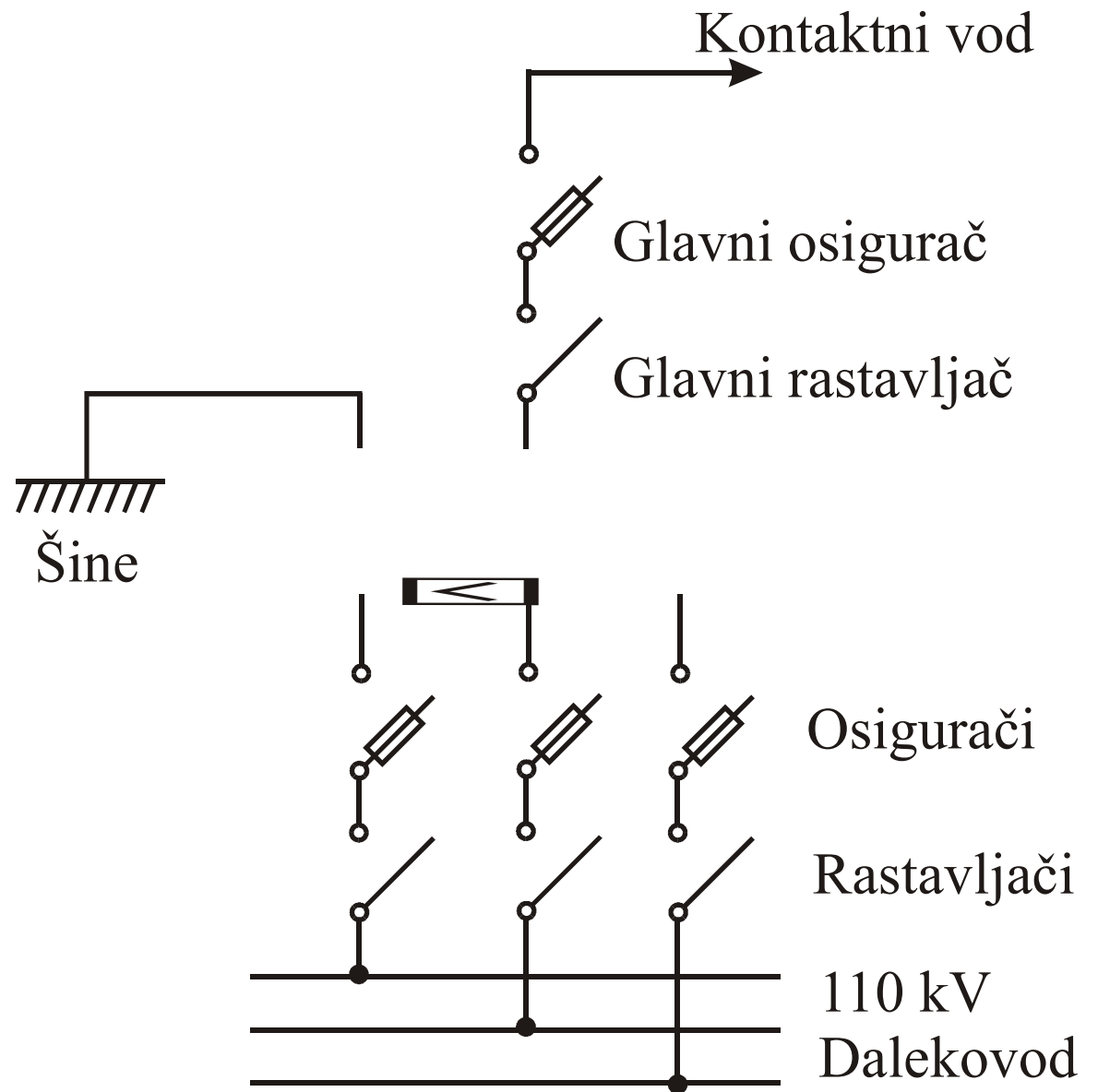
# Jednofazne lokomotive

Najrasprostranjeniji sistem napajanja lokomotiva je monofazni sistem 25 kV/50 Hz. Sistem se sastoji iz kontaktnog voda i stabilnih postrojenja tzv. podstanica.

Svaka podstanica napaja jednu sekciju. Sekcije su električno izolovane zato što se podstanice napajaju sa 110 kV, pa na ovolikim rastojanjima mogu imati različiti fazni stav.



Podstanica je jedan transformator koji na primaru ima 110 kV, a na sekundaru se vezuje kao na slici (za vod i šine). Izgled podstanice (bez relejne zaštite):

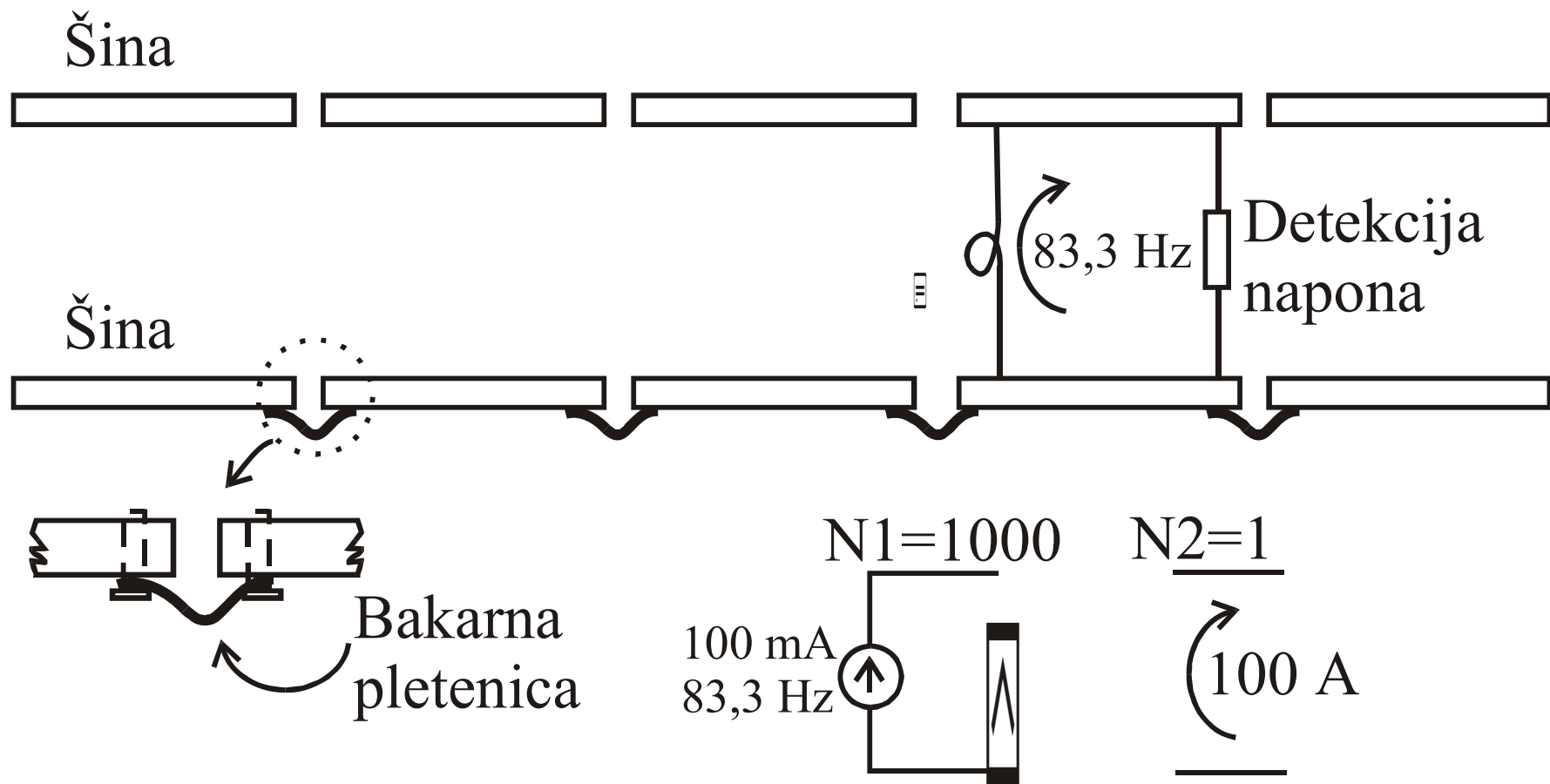


U podstanici se može imati:

a) jedan transformator 10,5 MVA

b) dva transformatora 2 x 7,5 MVA

Povezivanje za kontaktni vod se vrši preko užeta, a sa šinama preko bakarne pletenice. Za napajanje lokomotiva koristi se samo jedna šina, a druga je podeljena na delove koji su elektroizolovani zato što se javlja potreba da se detektuje lokacija voza.



Injektuje se struja 83,3 Hz, a na kraju se detektuje (postoji filter). Ako se na deonici nalazi voz kolo se zatvara kroz točkove voza.

Prividna snaga lokomotive je:

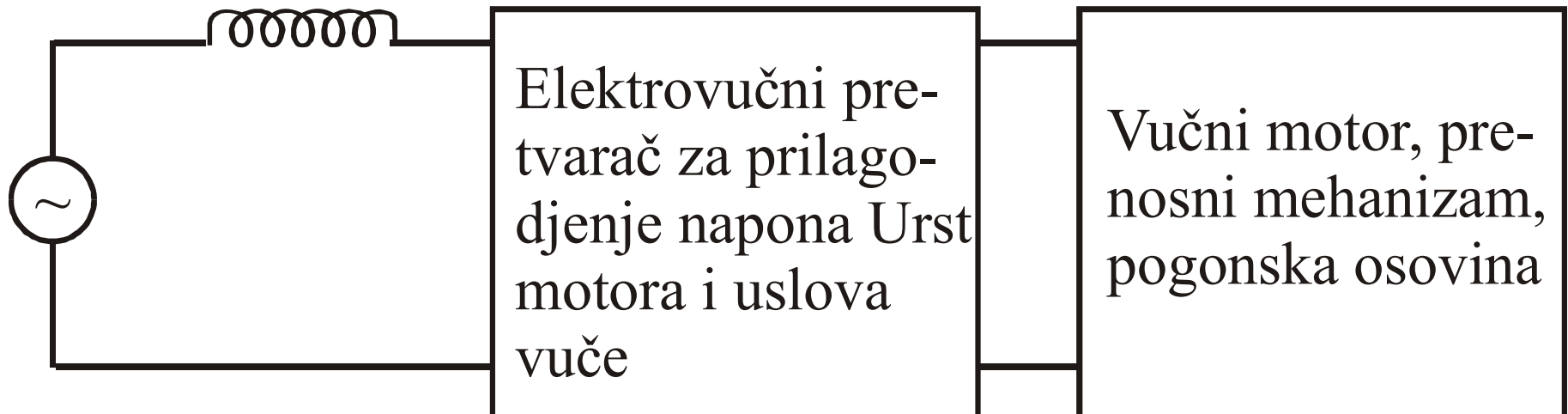
$$S_l \sim 4 \text{ MVA}$$

$$\cos \varphi \sim 0,5 \div 0,8$$

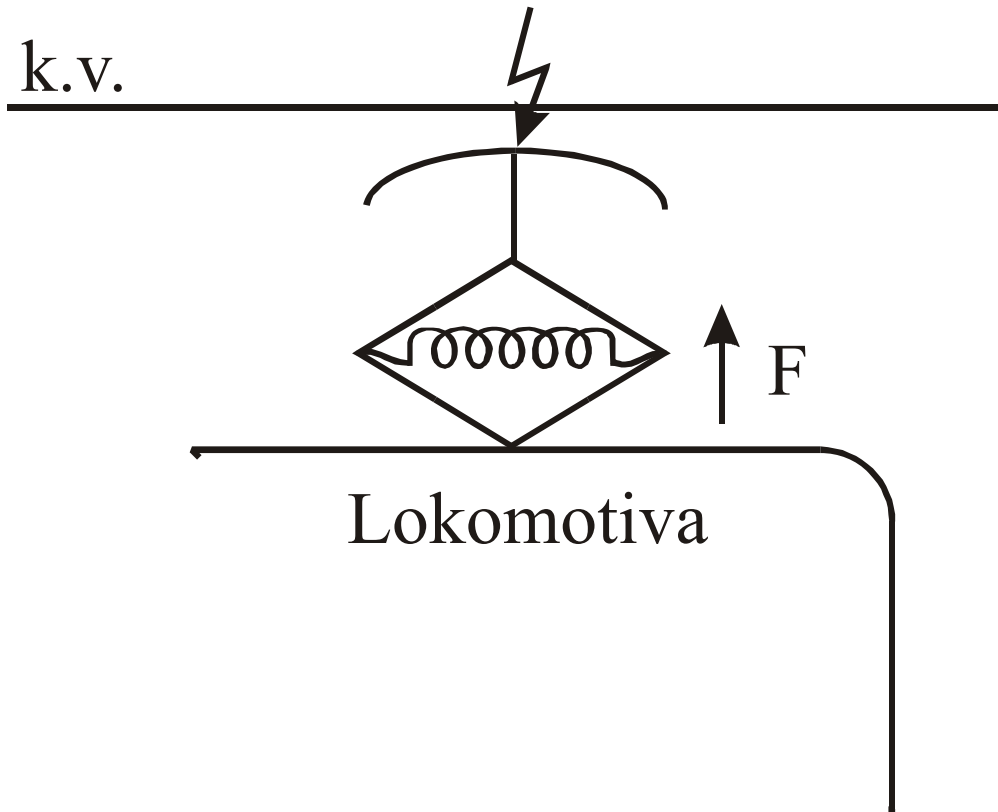
$$x_{kv} \sim 0,38 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Uzimajući u obzir gore navedene podatke, granice u kojim može da varira napon kontaktnog voda su:

$$U_{kv} [18, 30] \text{ kV}$$



Treba voditi računa o varijacijama ovog napona ( $U_{kV}$ ), i o prenaponima pri uključenju i isključenju pantografa.



Javljaju se prenaponi trajanja  $\Omega \sim 5 \div 50 \Omega\text{sec}$ .  
Mogu da dostignu napon  $U \sim 60 \text{ kV}$ .

Lokomotiva u teretnoj železnici može imati vučeni teret  $G_v = 1000$  t, može se kretati brzinom  $v = 30$  m/s. Zbir stalnih otpora kretanja:

$$\Sigma f_{ot} \text{ [kp/t]} = 2 + kv^2 (= 5 \text{ kp/t})$$

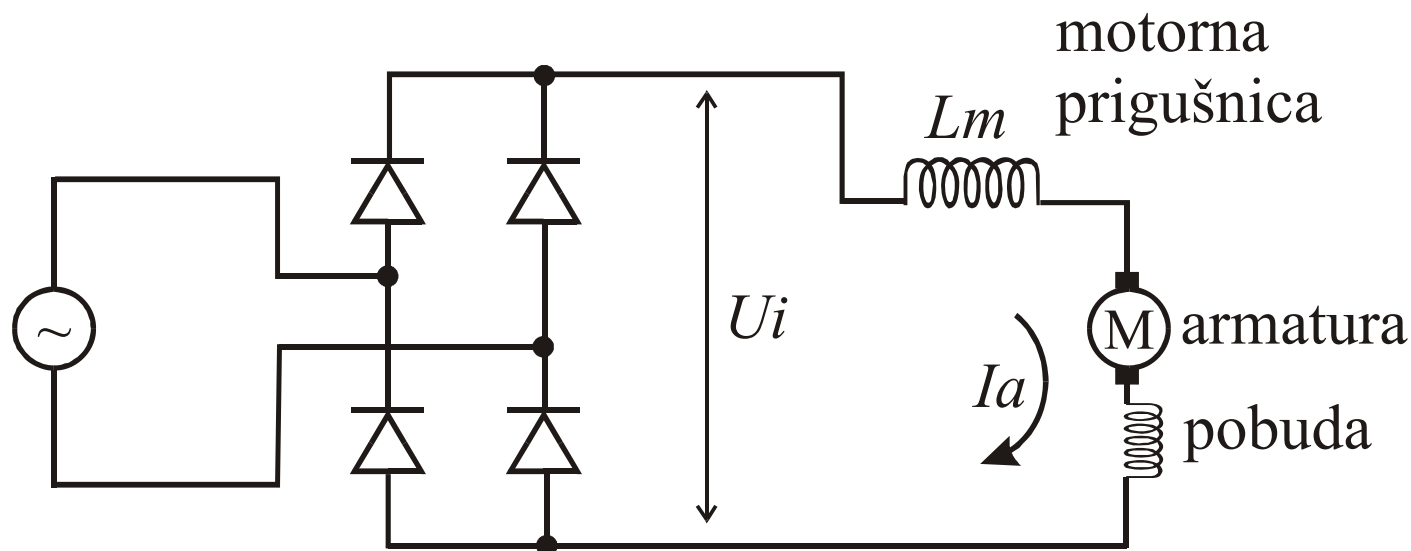
pa možemo odrediti ukupnu vučnu silu:  
(ne vidi se na kopiji)

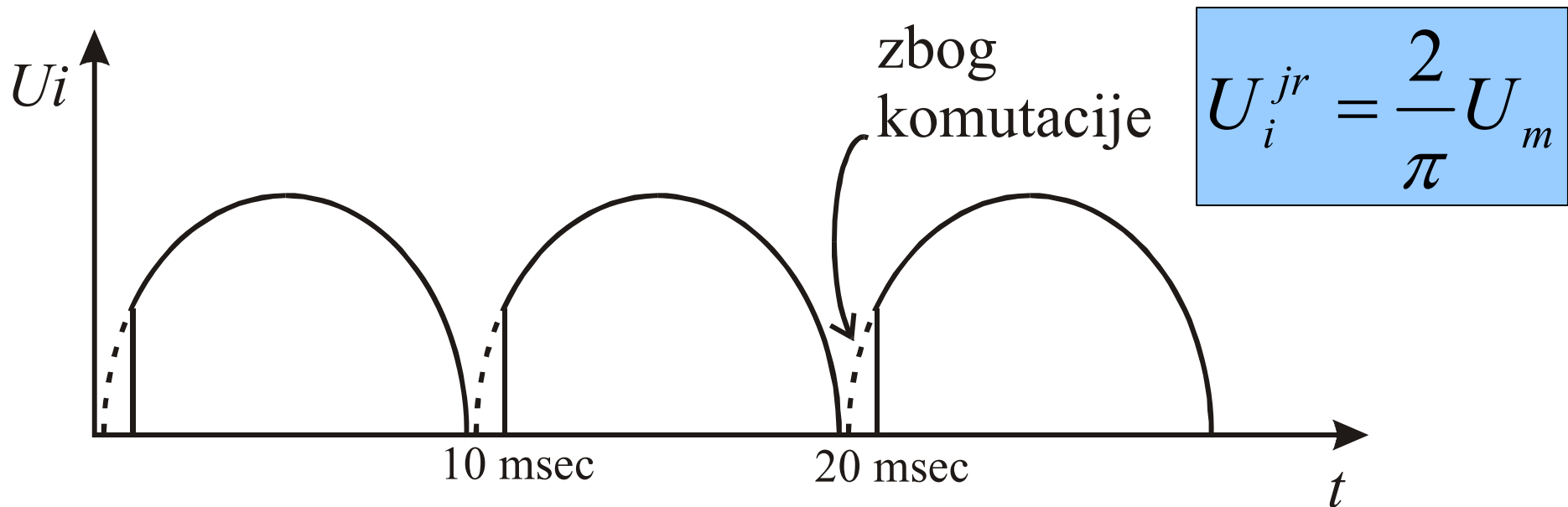
Ovo je po ravnoj pruzi. Ako se kreće po maksimalnom usponu od 30 ‰ od lokomotive bi se tražila snaga od oko 10 MW. Pošto je tipično nominalno  $P_{nom} = 4$  MW po lokomotivi, treba priključiti dve lokomotive. Između zahteva koje mora da ostvari lokomotiva i napajanja mora da postoje energetska pretvarač i vučni motor.



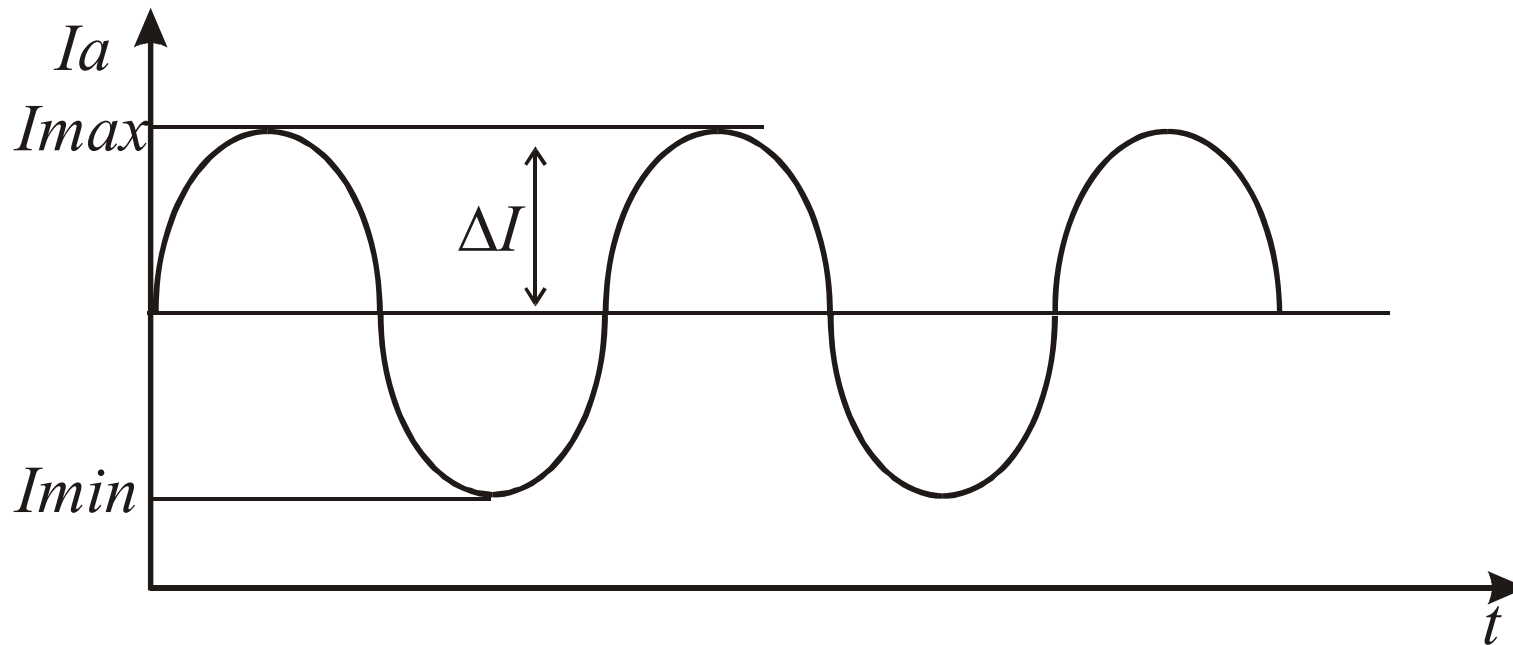
# Vučni motori koji se koriste u lokomotivi

Redni motor jednosmerne struje načinjen je za rad sa valovitom strujom. Još uvek se najčešće koristi, veoma je pouzdan, obezbeđena je proizvodnja i remont (u industriji).





Ovaj napon će imati i više harmonike. Dominantna komponenta ima učestanost od 100 Hz i proporcionalna je mrežnom naponu ( $U_{100} = kU_m$ ). Ova komponenta smeta. Dominantna naizmjenična komponenta struje je 100 Hz:



$$\Delta I = \frac{U_{100}}{Z_{100}}$$

$$Z_{100} = 2\pi \cdot 100 \cdot \Sigma L$$

talasnost:

$$\mu = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{\Delta I}{I_{srednje}}$$

(kreće se od 5 do 20%)

Kod rednog motora momenat je proporcionalan kvadratu armaturene struje (pa je koeficijent valovitosti momenta veći, ali ovo ne smeta jer je u odnosu na inercije obrtnih masa motora i mehaničkih delova ovo ima mali uticaj).

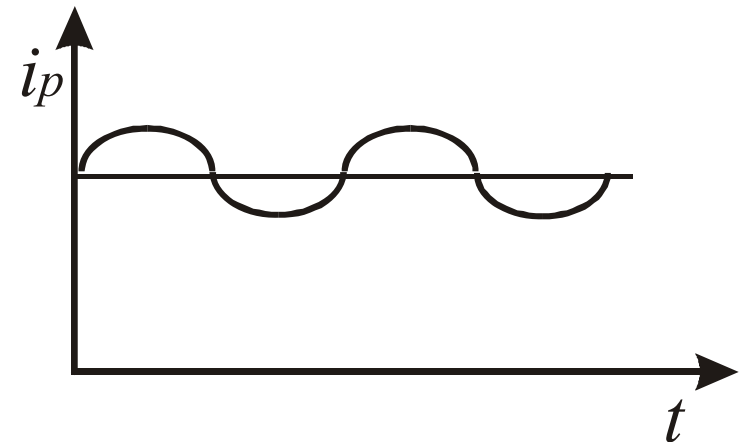
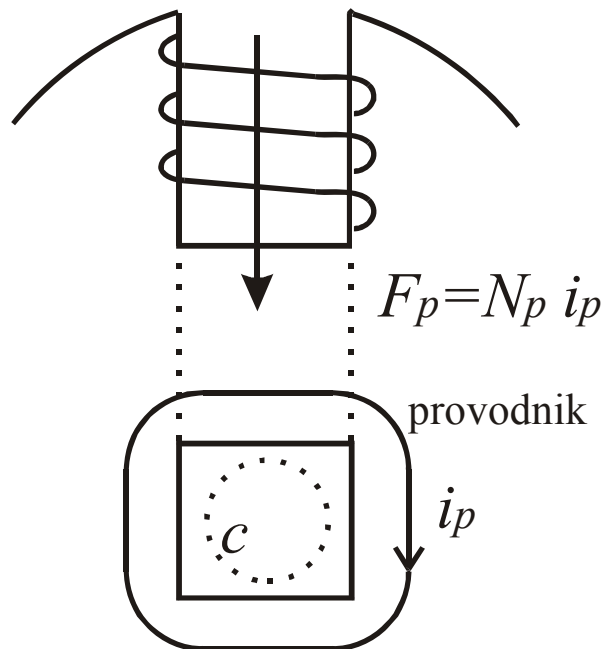
$$\omega_{\sim}^R(s) \cong \frac{1}{J_S} M_{\sim}^{em}(s)$$

Ova valovitost nam smeta zbog: zagrevanja, gubitaka u gvožđu i komutacije.

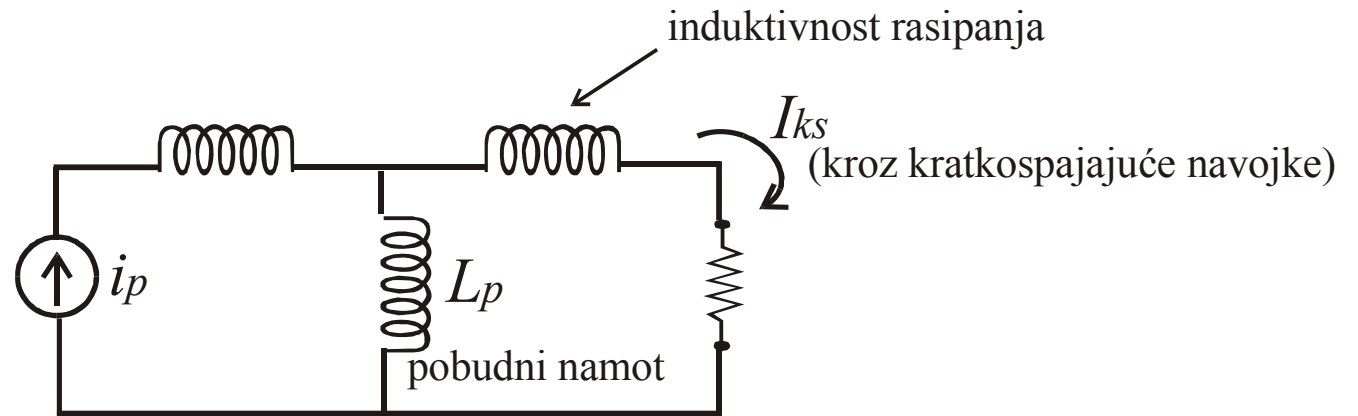
$$I_{RMS}^a = I_{jr}^a \sqrt{1 + \mu^2 / 4}$$

odavde se vidi da neće biti velikog uticaja na povećano zagrevanje.

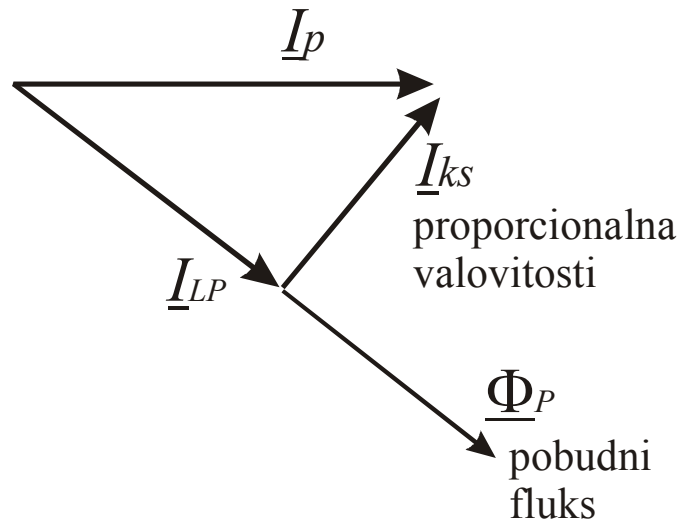
Stator rednog motora načinjen je od livenog gvožđa (nije laminiran jer protiču jednosmerne struje pa nema vihornih struja). Ovde međutim fluks poseduje naizmeničnu komponentu.



Može se uočiti kontura  $C$  gde se javljaju vihorne struje. Ovo podseća na transformator gde je primar namot pobude.

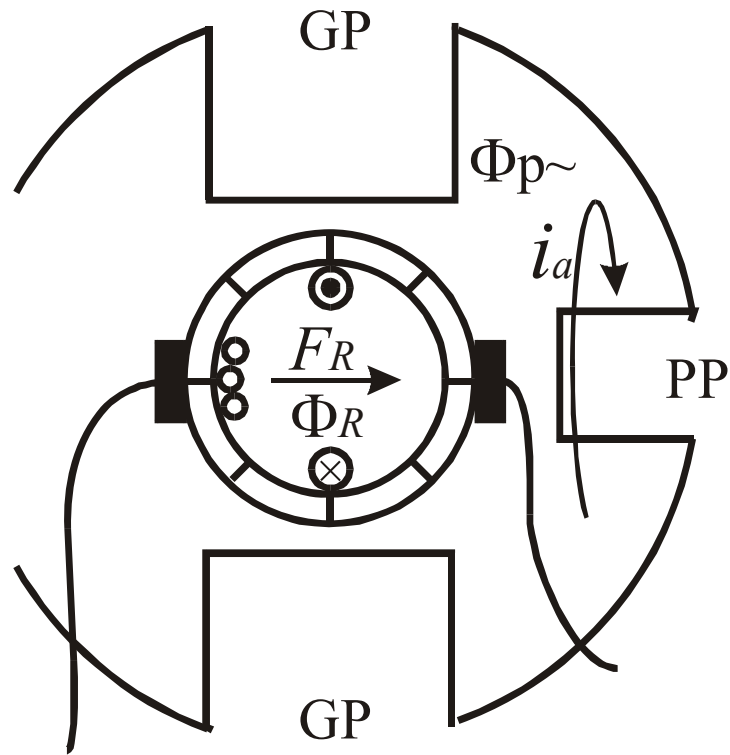


Struja  $\underline{I}_p$  ima dve komponente:

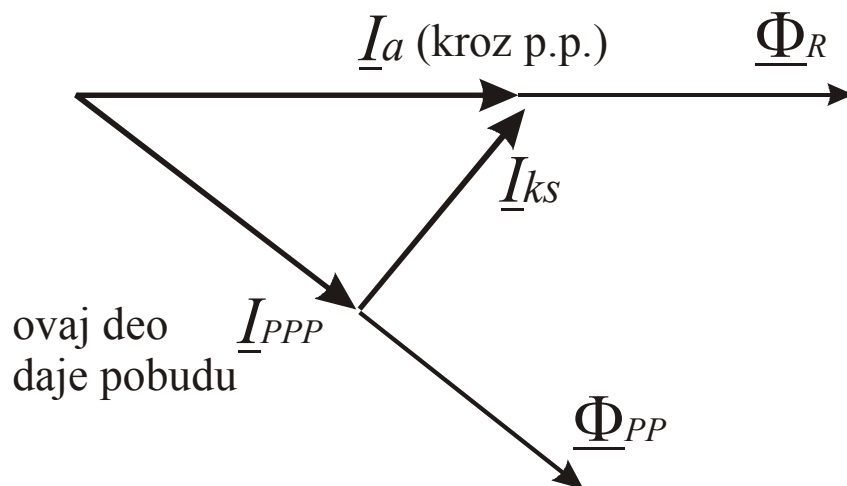


Ovde još naizmenična komponenta fluksa kasni u odnosu na naizmeničnu komponentu pobudne struje što prouzrokuje probleme kod komutacije.

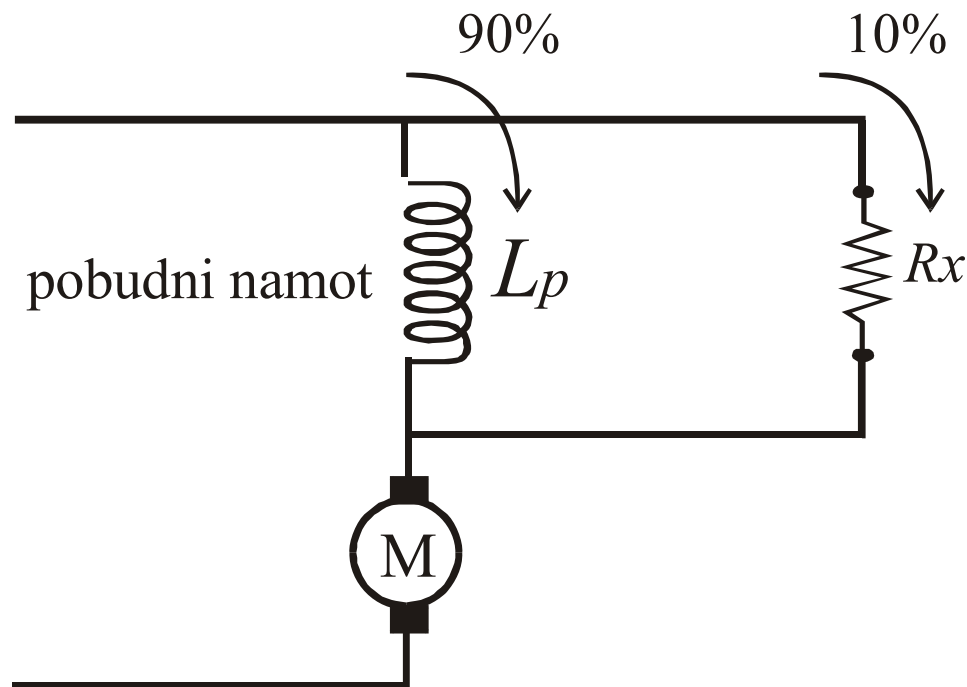
Sam pulsacioni karakter pobudnog fluksa ne prouzrokuje probleme.



Kroz pomoćne polove se propušta  $I_a$  u takvom smeru da se kompenzuje reakcija indukta. Rotor ovih mašina je laminiran.  $\underline{\Phi}_r$  i  $\underline{\Phi}_{pp}$  nisu kolinearni pa se javlja fluks u zoni komutacije, što ugrožava komutaciju.



Zato se stator pravi laminiran (ovo je jedno od rešenja) ili liveni stator +  $L_m$  – uvećana vrednost motorne prigušnice, što povećava  $Z_{100}$  a ovo smanjuje talasnost (tada valovitost mora da se smanji ispod 10%). Kod prvog rešenja često se pobuda šantira sa jednim stalno priključenim otpornikom (nije mu svrha slabljenje polja):



$$R_x \sim 10 R_p$$

$$R_x \ll 2\pi 100 L_p$$

Svrha otpornika je da na sebe preuzme naizmenčinu komponentu struje.

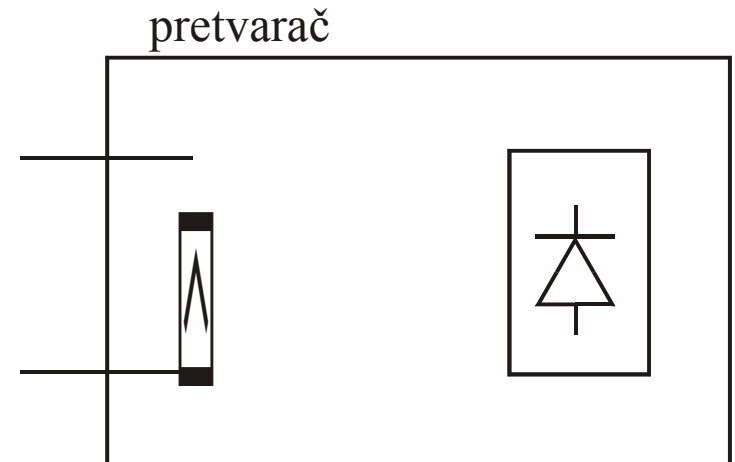


Tipične veličine za ove motore:

$$U_n \sim 1000 \div 1500 \text{ V}$$

$$I_n \sim 500 \div 1000 \text{ A}$$

$$n_n \sim 1000 \div 1500 \text{ ob/min}$$



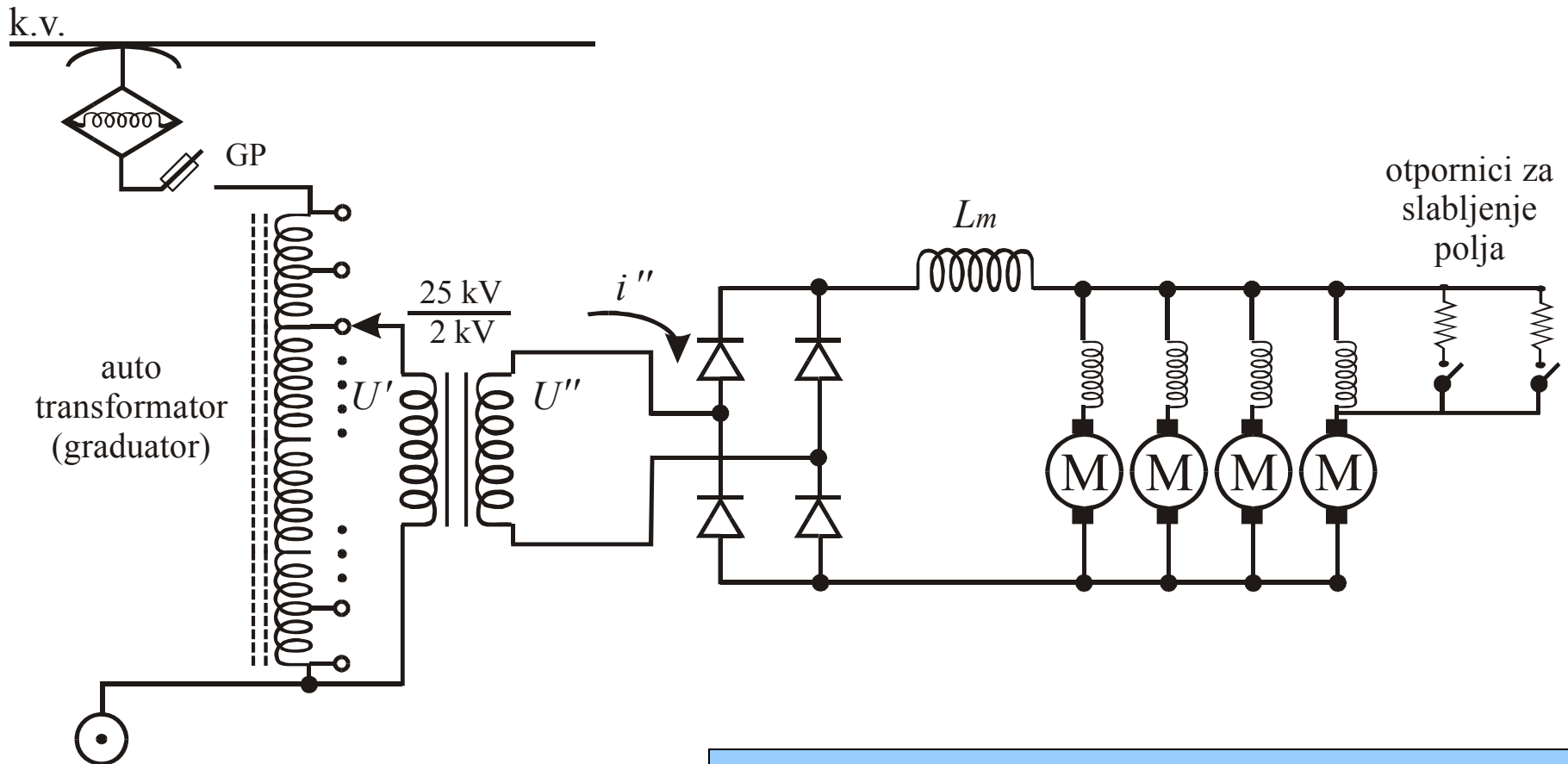
Kod mašina j.s. proizvod  $P \cdot n$  je ograničen što je mana (ograničena je maksimalna brzina). Regulacija vučne sile će biti nedisipativna, odnosno mora da postoji energetski pretvarač koji će varirati srednju vrednost napona.

Transformator može biti regulacioni (sa otcepima) pa se tako može podešavati napon.

Prema pretvaraču lokomotive delimo:

1. Diodne lokomotive (sa diodnim pretvaračem)
2. Tiristorske lokomotive (sa tiristorskim pretvaračem)

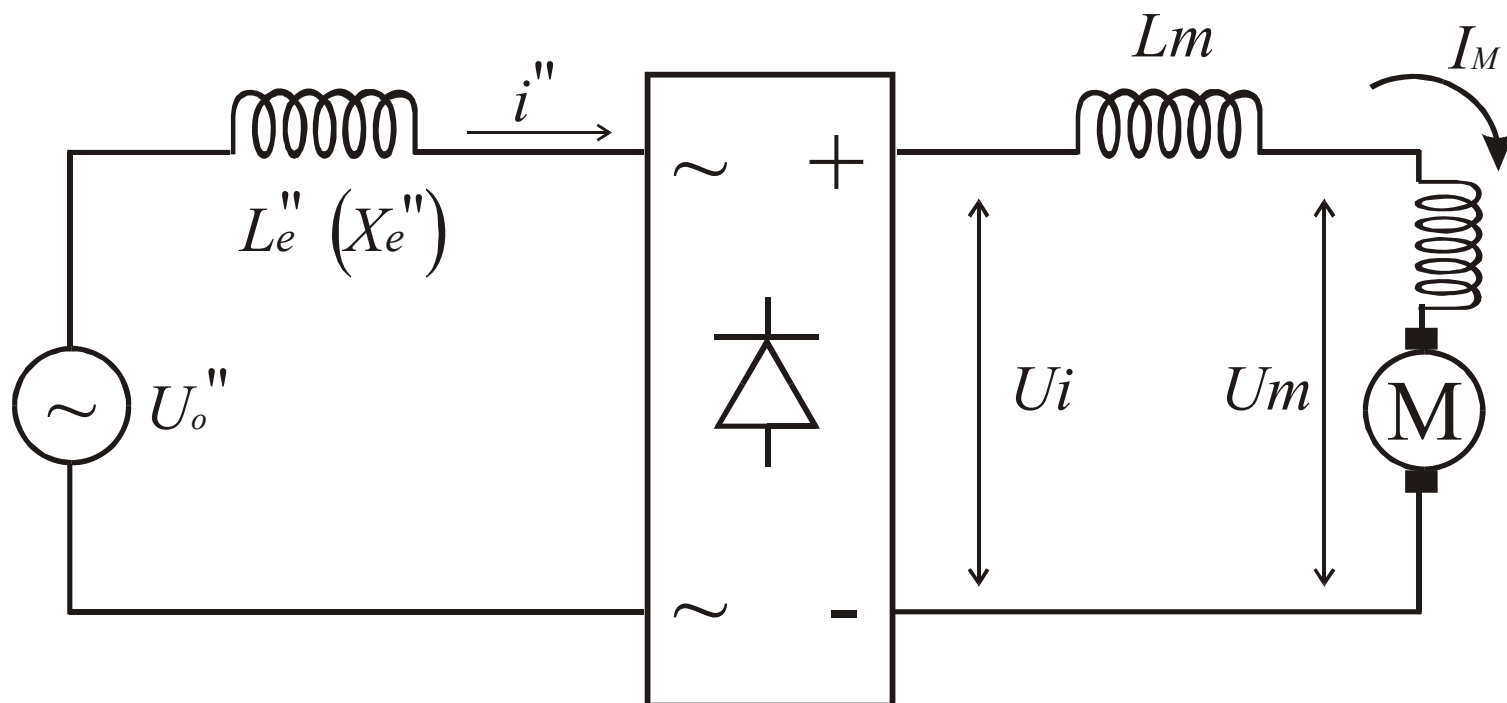
# Diodne lokomotive

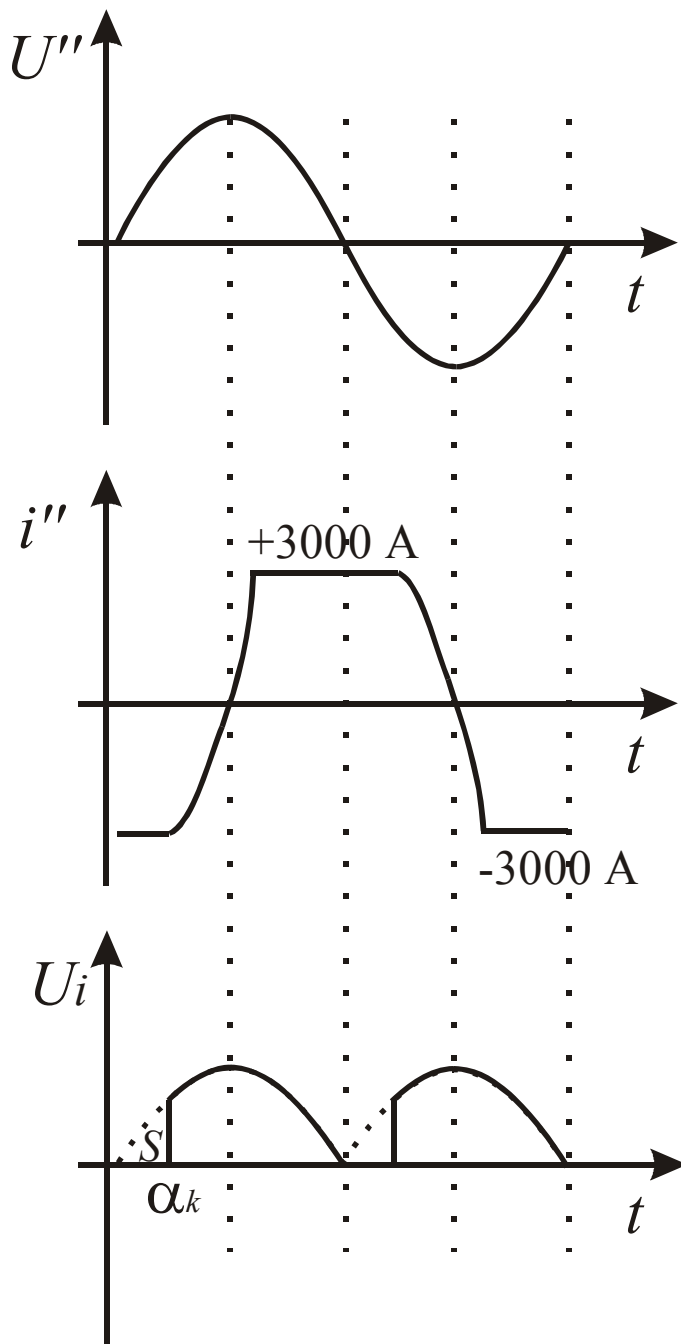


$$U' = i \cdot 1 \text{ kV} ; i \in [0, 25]$$

$$U'' = i \cdot m \cdot U_{kv} / 25$$

Nas interesuje srednja vrednost napona koji dolazi na motore. Sekundarni napon se mora ekvivalentirati izvorom i unutrašnjom otpornošću.



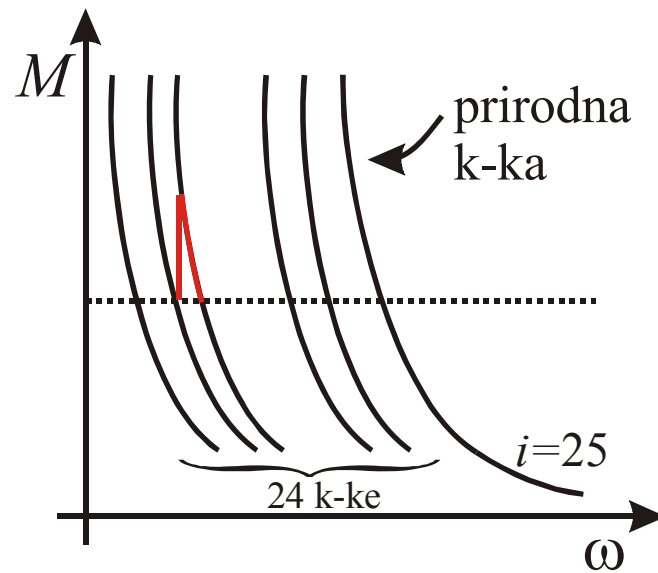


Na "per unit" bazi:  $X''_e = 0.15 \div 0.25$

$$S \approx 2 L_e'' I_M$$

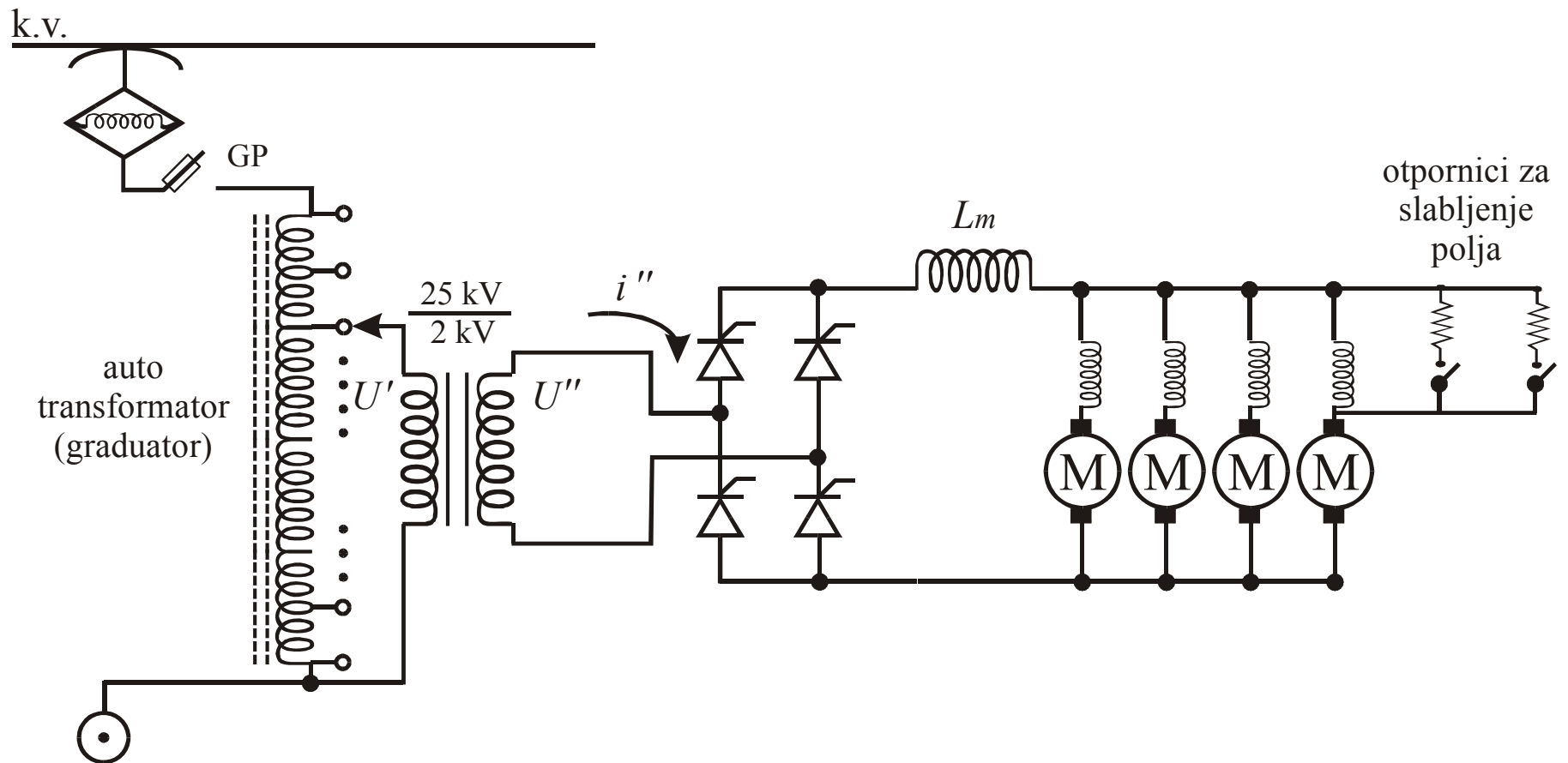
$$U_j^{sr} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{m \cdot i \cdot U_{KV}^{RMS}}{25} - \frac{2}{\pi} X_e'' I_M$$

$$\angle(U'', I'') \approx \frac{\alpha_k}{2} \approx Q$$



Napon na motoru se može podešavati samo skokovito. Zbog ovog imamo pulsacioni (skokoviti) momenat, odnosno karakter vučne sile, što je loša osobina. Loša osobina je još što ovde nema rekuperativnog kočenja (struja ne može menjati smer niti napon može da bude negativan). Zato ovde treba specijalna instalacija sa otpornikom za kočenje (tada se skroz odvaja ispravljač od motora). Zbog ovoga se diodne lokomotive primenjuju na ravnim trasama.

# Tiristorske lokomotive



Ovde postoji rekuperativno kočenje (tada se prevezuju pobudni namotaji da bi im bila nezavisna pobuda). I ovde je zadržan autotransformator zbog umanjjenja prividne i reaktivne snage na nivou kontaktnog voda.

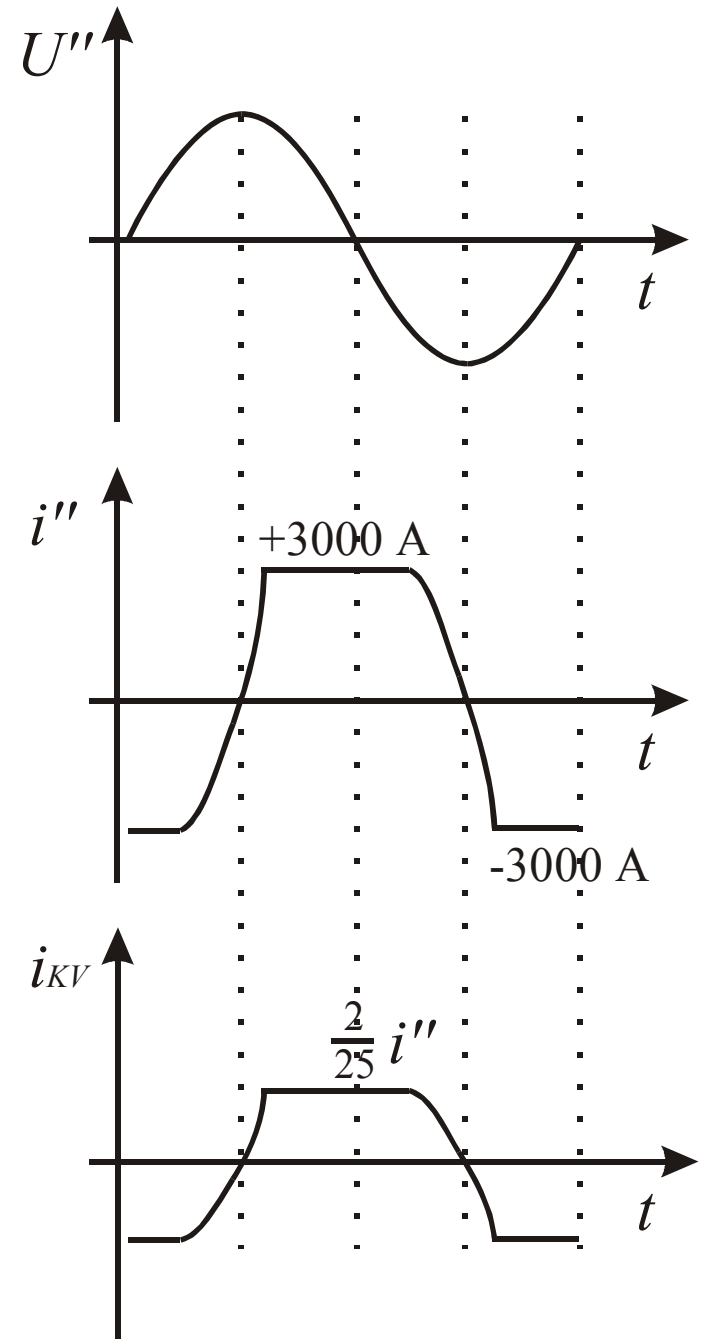
Pri polasku, napon na motoru je relativno mali ( $U_m \rightarrow 150$  V). Možemo podesiti ugao paljenja na vrednost blizu nuli ( $\alpha \rightarrow 0$ ). Zato ćemo uzeti otcep koji daje mali napon ( $i = 2$  ili  $3$ ). Tada je:

$$i_{KV} = \frac{2}{25} i' = \left( \frac{2}{25} \right)^2 i''$$

Oдавде се види да иако је при поласку  $i''$  велико (3000 A)  $i_{kv}$  остаје испод 100 A.

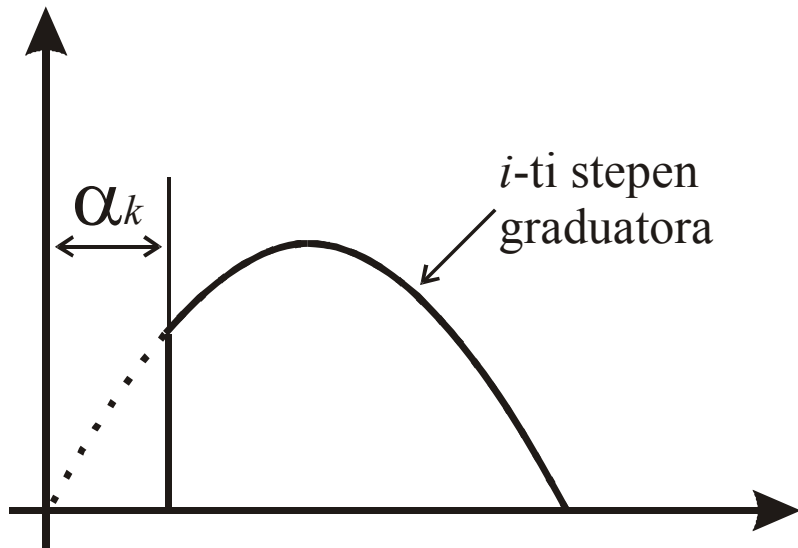
Alternativa odsustva graduatora je da ugao paljenja mora biti blizu  $\pi/2$  ( $\alpha \rightarrow \pi/2$ ). Tada su talasni oblici:

Sa grafika se vidi da je fazni pomeraj između  $u''$  i  $i''$   $\varphi \sim \pi/2$ . Reaktivna snaga pri polasku bi bila jako velika.





Reaktivna snaga zavisi od  $\sin \alpha$  pa treba težiti da se  $\alpha$  zadržava u uzanoj oblasti u blizini nule. To se postiže mešovitom regulacijom srednje vrednosti napona na motorima ( $U^{sr}_i$ ), odnosno istovremenom promenom otcepa graduatora i ugla paljenja tako da ugao ostane u blizini nule.



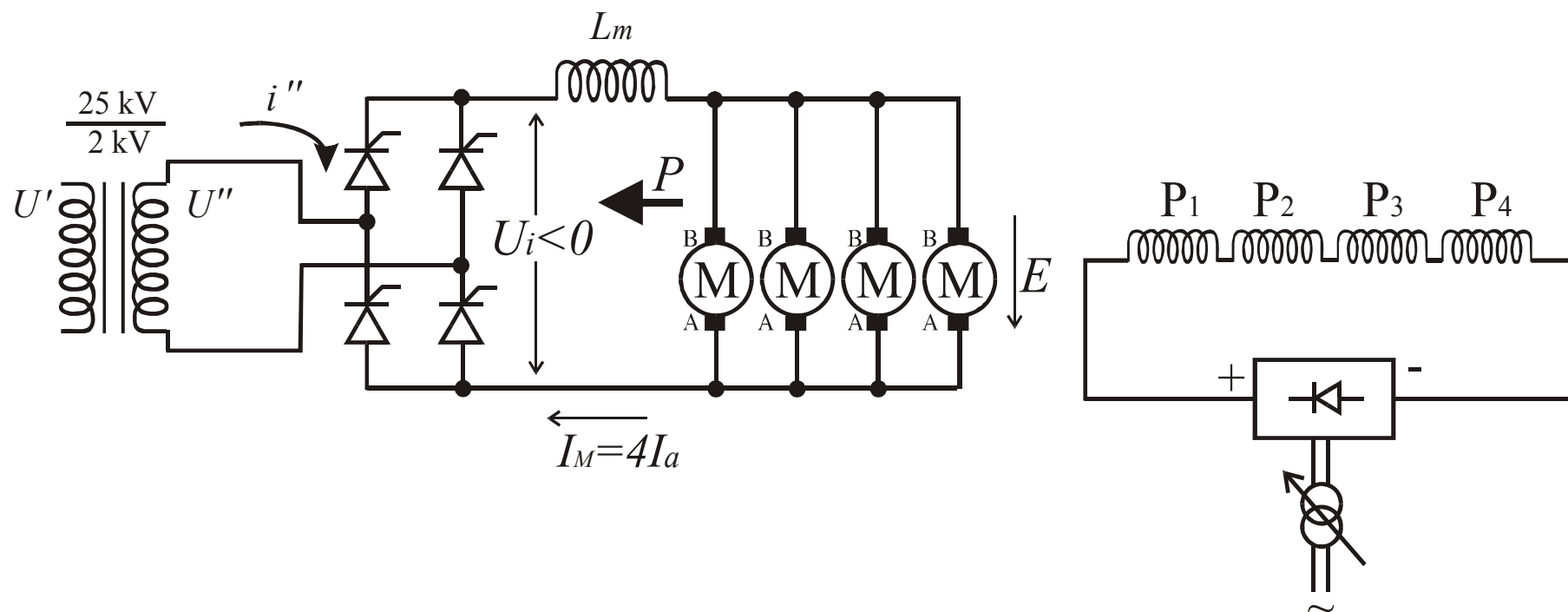
Ako zahtev za umanjenje  $U_m$  zadovoljimo povećanjem  $\alpha$  dolazi do povećanja  $Q$ . Zbog toga se  $\alpha$  povećava samo do  $\alpha^*$ , gde je:

$$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{(i-1)}{25} \frac{2}{25} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{i}{25} \frac{2}{25} (1 - \cos \alpha^*)$$

$$\alpha^* = \arccos \left[ \frac{2(i-1)}{i} - 1 \right]$$

$\alpha^*$  pri  $i$ -tom stepenu graduatora je jednako  $\alpha=0$  pri  $(i-1)$ -om stepenu graduatora (ako je potreban manji napon nego pri  $\alpha^*$  ide se sa  $i$ -tog na  $(i-1)$ -vi stepen graduatora i ugao ide na  $\alpha=0$ ).

# Rekuperativno kočenje



Struja ima isti smer, ali je napon negativan, pa je protok snage u suprotnom smeru. Za ovakav rad moraju se povezati krajevi armaturnog namotaja, a pobuda se realizuje kao nezavisna. Jednačina naponskog bilansa:

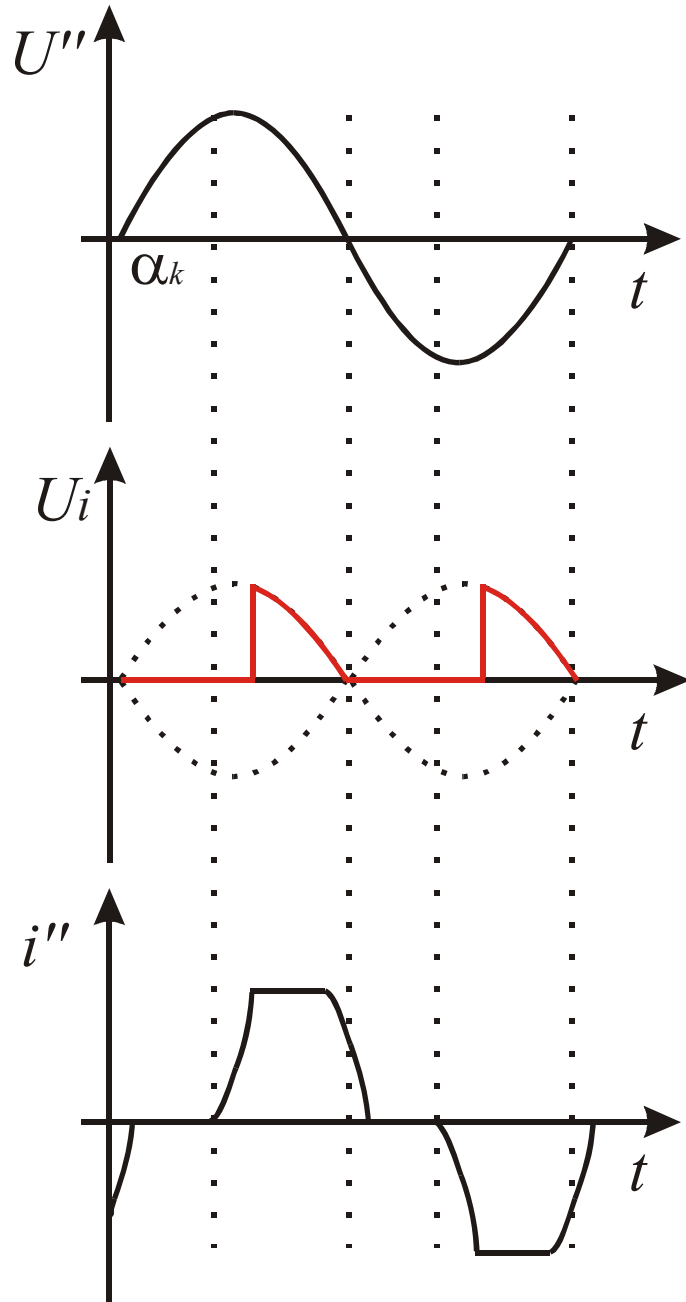
$$E - R_a \frac{I_M}{4} - R_{LM} I_M + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U''_{RMS} \cos \alpha - \frac{2X''_e}{\pi} I_M = 0$$

$$I_M = \frac{E + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U''_{RMS} \cos \alpha}{\frac{R_a}{4} - R_{LM} + -\frac{2X''_e}{\pi}}$$

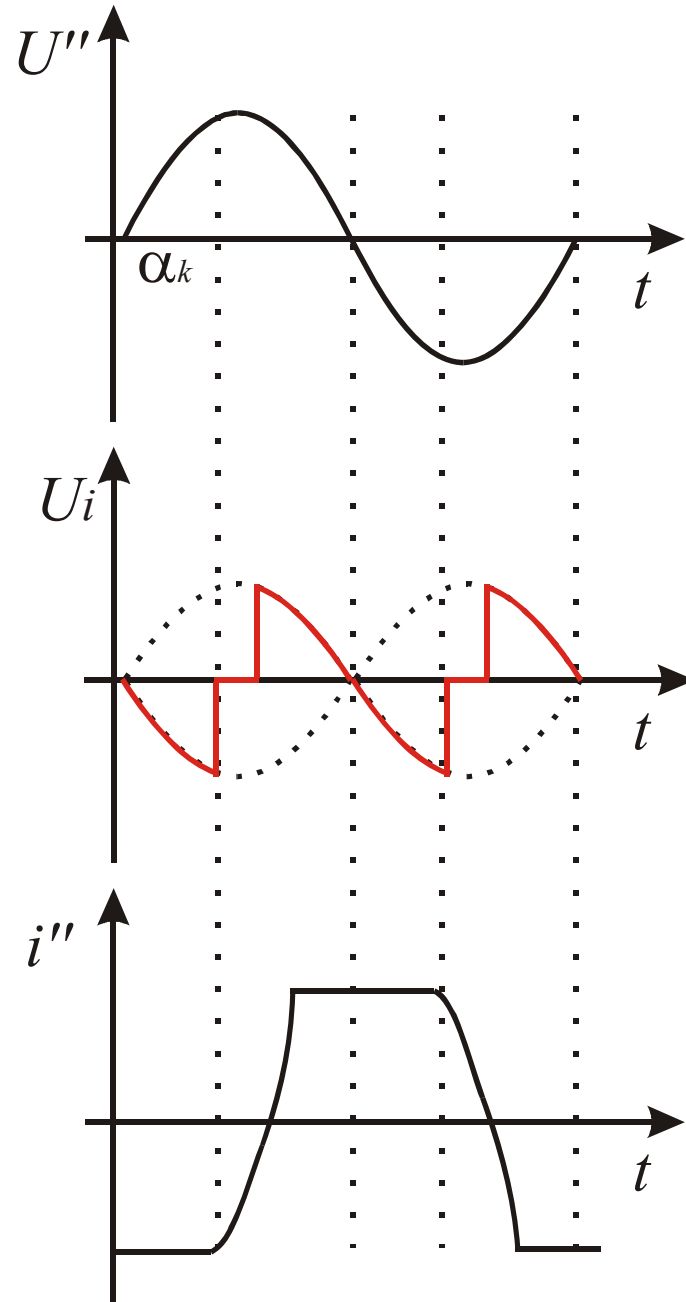
$I_m$  se može podešavati otcepom graduatora  $i$  (odnosno  $U''_{rms}$ ) i uglom paljenja  $\alpha$ . Promenom  $I_M$  se podešava kočenje.

Maksimalna brzina lokomotive pri kojoj se može rekuperativno kočiti (bez slabljenja polja) zavisi od udaljenosti od podstanice.

POLUUPRAVLJIVI TIRISTORSKI ISPRAVLJAČ



PUNOUPRAVLJIVI TIRISTORSKI ISPRAVLJAČ



$$U_i = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U''_{RMS} (1 + \cos \alpha) - \frac{X''_e}{\pi} I_M$$

$$P = U_i I_M$$

$$S = U''_{RMS} I_M \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} = U''_{RMS} I_M \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U''_{RMS} I_M \sin \alpha$$

$$U_i = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U''_{RMS} \cos \alpha - \frac{2X''_e}{\pi} I_M$$

$$P = U_i I_M$$

$$S = U''_{RMS} I_M$$

$$Q = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U''_{RMS} I_M \sin \alpha$$

Ovaj ispravljač se sastoji iz dva tiristora i dve diode. Pokazuje se kao povoljnije rešenje zbog  $Q$  (za isto  $\alpha$ ,  $Q$  je duplo manje nego kod punoupravljalivog). Ovo rešenje se primenjuje zato što nemože da radi rekuperaciju.

U praksi se koristi ovaj ispravljač sa Asimetričnim okidanjem tiristora:

- U motornom režimu rada  $\alpha(T_2) = \alpha(T_4) = 0$ , tj. tiristori  $T_2$  i  $T_4$  se ponašaju kao diode, a  $\alpha(T_1) = \alpha(T_3) = \alpha_x$ , tiristori  $T_1$  i  $T_3$  rade kao tiristori, te ovaj ispravljač radi kao poluupravljivi. Ovde postoji mogućnost rada u režimu rekuperacije.