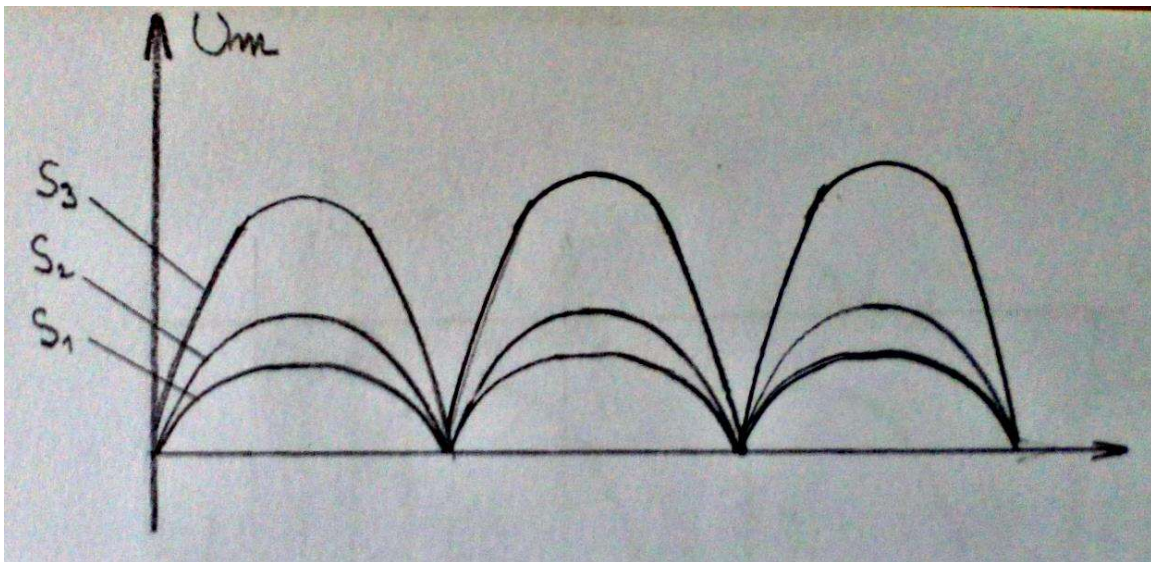


Tiristorske lokomotive

Lokomotive sa diodnim mostovima imaju sledeće nedostatke koje je otklonila tehnološka inovacija upotrebom tiristora.

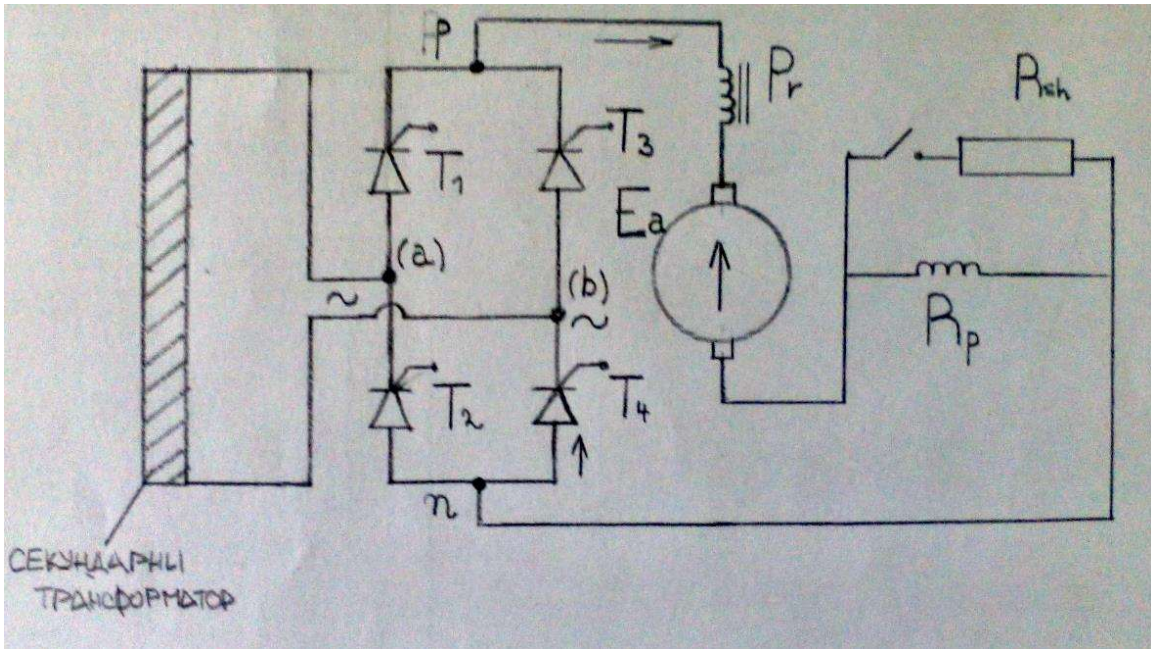
Specifično građen transformator sa izvodima i gradulatorom napona (stepenastim biračem napona) predstavlja značajno slabo mesto u eksploataciji diodnih lokomotiva. Zamena dioda tiristorima omogućila je poboljšanje regulacije napona na vučnim motorima zamenjujući diskontinualnu amplitudu napona kontinualnom faznom regulacijom.



Regulacija napona kod diodnih lokomotiva

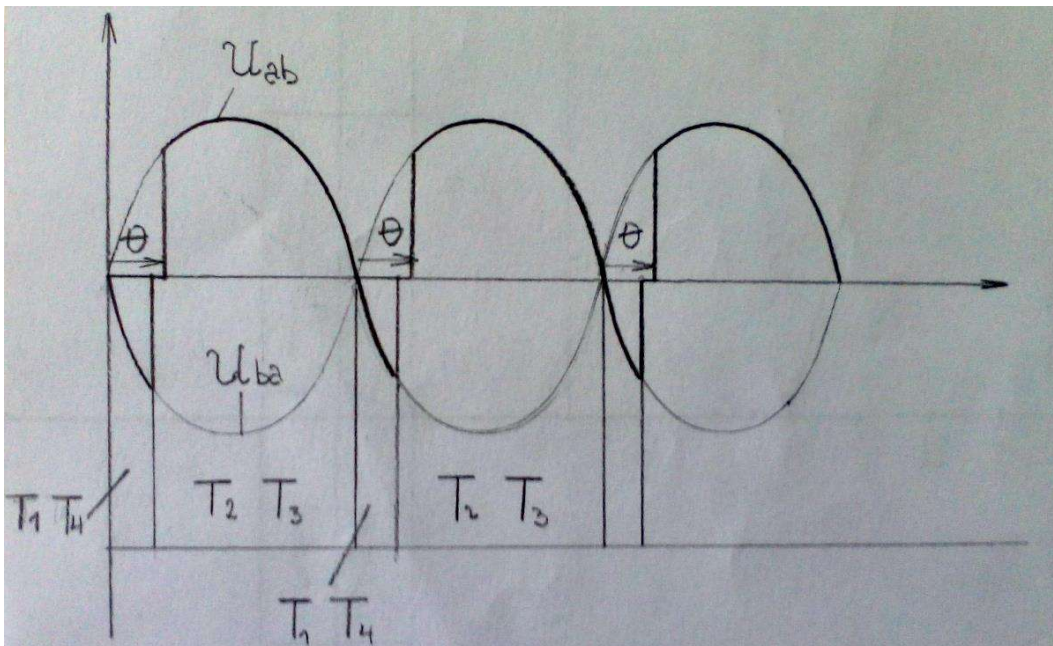
S1, S2 i S3 su stepeni birača napona čime se postiže amplitudna regulacija

Kontinualna regulacija napona ima za posledicu bolje korišćenje athezije na spoju točak šina što ima poseban značaj s obzirom na težinu lokomotive. U slučaju diodne lokomotive moguća je jedino reastatka (otpornička kočnica. Ne uzimajući u obzir izgublenu energiju kočenja problem i teškoće postoje i u procesu evakuacije toplote i hlađenja kočnog otpornika. Primena tiristora otvorila je mogućnost rekuperativnog kočenja. Tiristorska lokomotiva pruža mogućnost ušteda u procesu održavanja. Međutim postoje i nedostaci i teškoće u primeni ovih lokomotiva koje se ogledaju u vučnoj reaktivnoj snazi koja se uzima iz mreže u odnosu na diodnu lokomotivu, perturbaciona dejstva na primarnu mrežu i signalno-sigurnosne uređaje i telekomunikacione vodove duž pruge, što zahteva određena ulaganja da bi se ova dejstva kompenzovala. Dve osnovne sprege sa tiristorima su simetrični (puno upravljivi) most i asimetrični (polu upravljivi) most.



Simetrična punoupravljiva sprega sa četiri tiristora

U slučaju simetrične sprega tiristora, strujno kolo se na kraju svake poluperiode zatvara kroz tiristore koji su "prestali" da provode i sekundar transformatora, nikakav drugi put nije moguć jer drugi par tiristora nije deblokiran, a oni koji su provodili ne mogu se blokirati jer je struja kroz njih i dalje u smeru (A→K). Usmereni napon sledi napon transformatora i on ima jedan negativni vrh koji se produžava sve do deblokiranja drugog para tiristora.



$$U_{ab} = U_{\max} \sin \omega t$$

$$U_{ba} = -U_{ab}$$

$$U_{sr} = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\theta_1} U_{ba} d\omega t + \int_{\theta_1}^{\pi} U_{ab} d\omega t \right] =$$

$$U_{sr} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\theta_1}^{\pi} U_{\max} \sin \omega t d\omega t - \int_0^{\theta_1} U_{\max} \sin \omega t d\omega t \right] =$$

$$U_{sr} = \frac{U_{\max}}{\pi} \left[-\cos \omega t \Big|_{\theta_1}^{\pi} - (-\cos \omega t \Big|_0^{\theta_1}) \right] =$$

$$U_{sr} = \frac{U_{\max}}{\pi} [1 + \cos \theta - (-\cos \theta + 1)] = 2 \frac{U_{\max}}{\pi} \cdot \cos \theta$$

Promenom faznog ugla θ od $\frac{\pi}{2} \rightarrow 0$ menja se srednja vrednost napona od

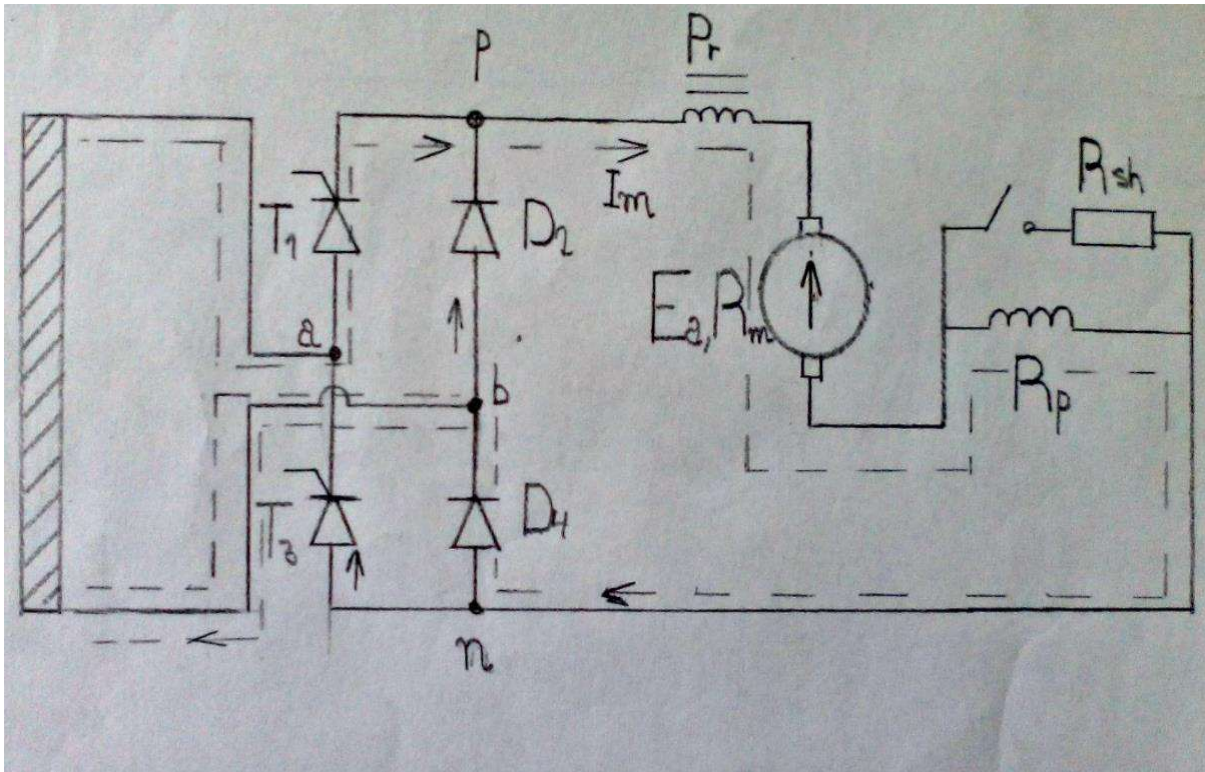
$$0 \rightarrow \frac{2U_{\max}}{\pi}$$

Električno rekuperativno kočenje se ostvaruje pri promeni napona od

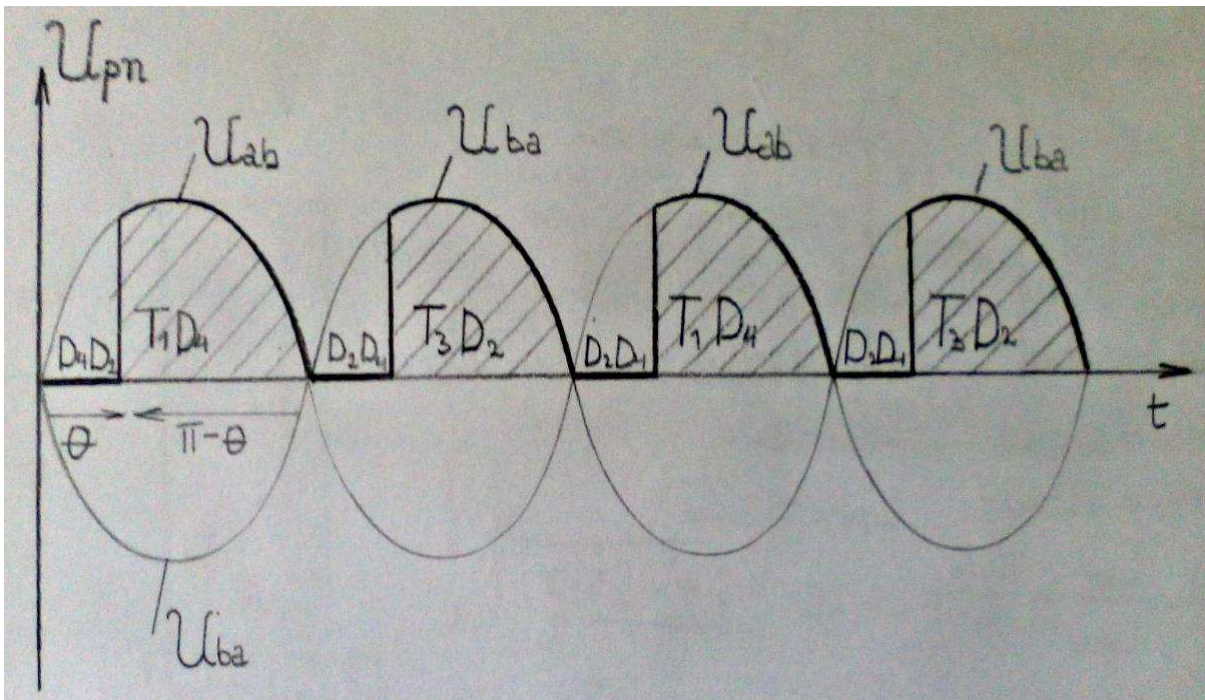
$\frac{\pi}{2} \rightarrow \pi$. Tad je srednji napon na vučnom motoru negativan što pri ne

promenjenom smeru struje kroz vučni motor generiše negativnu snagu to jest snagu rekuperacije koja se vraća u primarnu mrežu.

Druga tiristorska sprega je asimetrična tiristorska sprega čije grane sadrže dva tiristora i dve diode kao što je prikazano na slici.



Na kraju svake poluperiode strujno kolo se zatvara kroz diode D2 i D4 bez proticanja struje kroz sekundar transformatora. Dijagram usmerenog napona kroz asimetričnu spregu je prikazan na slici



U delu $0-\theta$ strujno kolo se zatvara po putanji n-D4 \rightarrow D2-p \rightarrow Pr \rightarrow VM-n struja je I_m , napon između p i n je jednak nuli jer je napon na diodama u stanju vođenja nula. Deblokiranjem tiristora T1 napon $U_{pn} = U_{ab} > 0$ (θ, π) na polovini periode U_{ab} napon U_{pn} negativni tiristor T1 se gasi, a dioda D2 ulazi u vođenje sve do trenutka deblokade tiristora T3, kad je $U_{pn} = U_{ba} > 0$ Srednja vrednost napona je

$$U_{pn} = \frac{1}{\pi} \int_{\theta}^{\pi} U_{ab} \omega t d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_{\theta}^{\pi} U_{\max} \sin \omega t d\omega t =$$

$$\frac{U_{\max}}{\pi} (-\cos \omega t \Big|_{\omega=\theta}^{\omega=\pi}) = \frac{U_{\max}}{\pi} (1 + \cos \theta)$$

Promenom faznog ugla deblokiranja tiristora u granicama $\theta=\pi$ do $\theta=0$ menja se srednja vrednost napona na vučnom motoru od $U_{pn} = 0$ ($\theta=\pi$) do

$$U_{pn} = \frac{2U_{\max}}{\pi} (\theta=0)$$

Na ovaj način se ostvaruje kontinualna promena napona i odgovarajuća regulacija brzine vučnog motora.

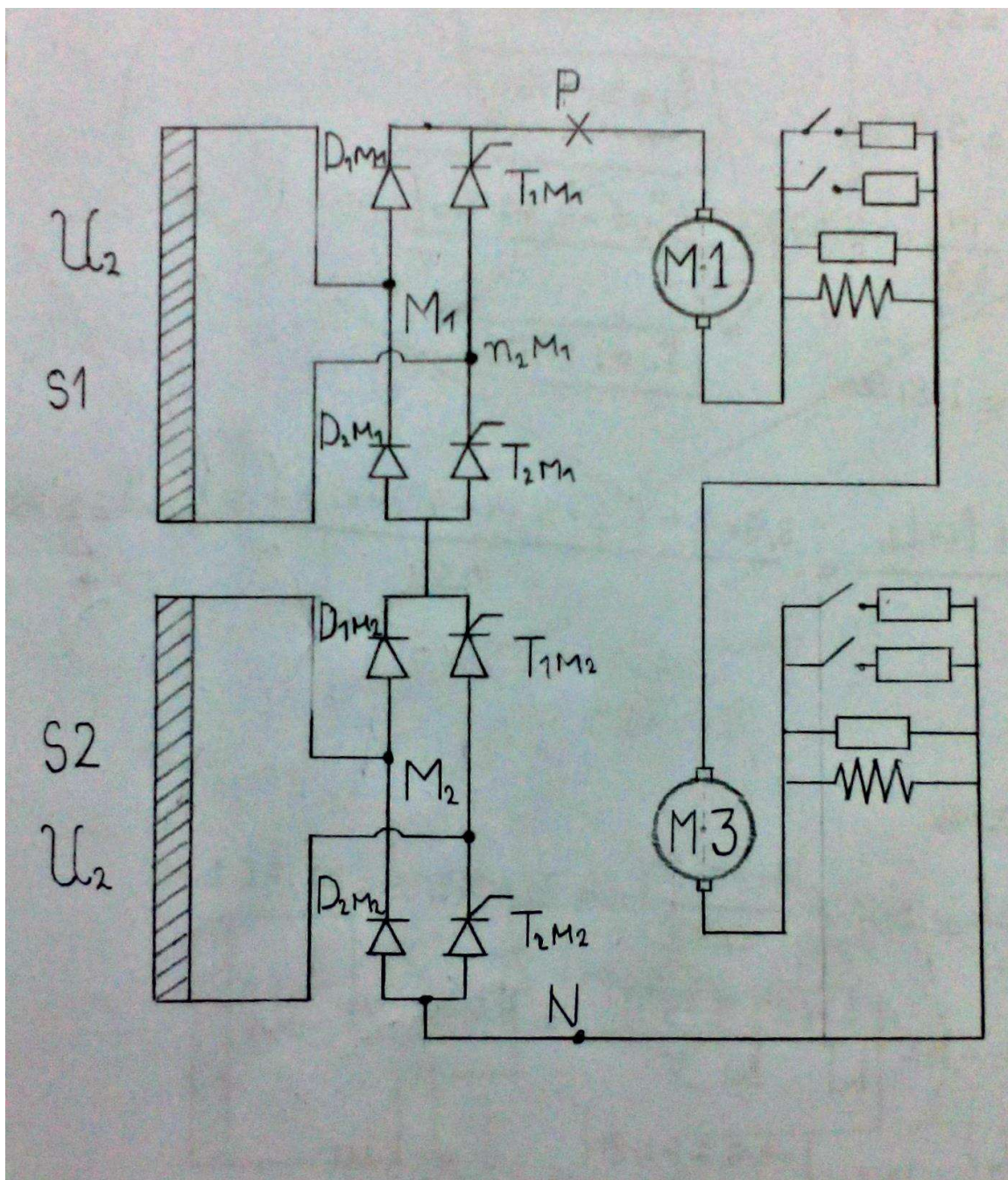
Regulisanje brzine

Kod tiristorskih lokomotiva regulisanje brzine se obavlja na dva načina:

- promenom napona napajanja, utičući na ugao deblokiranja tiristora, kontinualna regulacija
- slabljenjem polja vučnog motora

U konstrukciji vozila se koriste kaskade mostova sa ciljem da se smanje negativne karakteristike tiristorskih lokomotiva vezane za potrošnju reaktivne energije i smetnje uslovljene višim harmonicima.

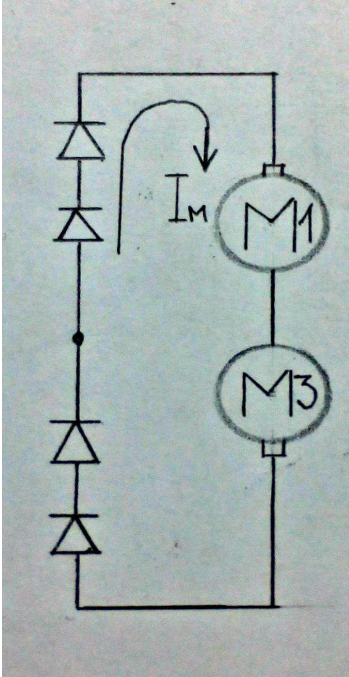
Kaskadna veza tiristorskih mostova- primer električna lokomotiva 444



Kaskadnom regulacijom se stvara mogućnost da se kombinuju amplitudno i fazno upravljanje naponom na vučnim motorima. U prvom delu aktivan je most M1 i faznim upravljanjem ovim mostom se podiže napon na vučnim

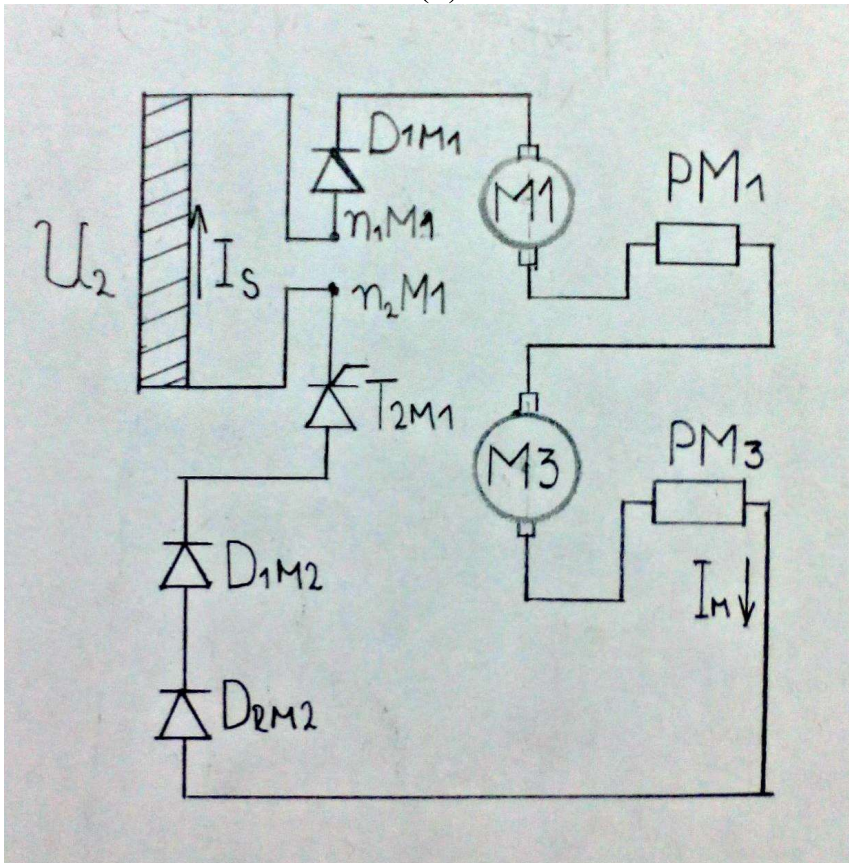
motorima od $U_M = 0$ preko $U_M = (1 + \cos\theta) \cdot \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi}$ do $U_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_2$

U delu R1 strujno kolo se zatvara, a svi tiristori su blokirani.



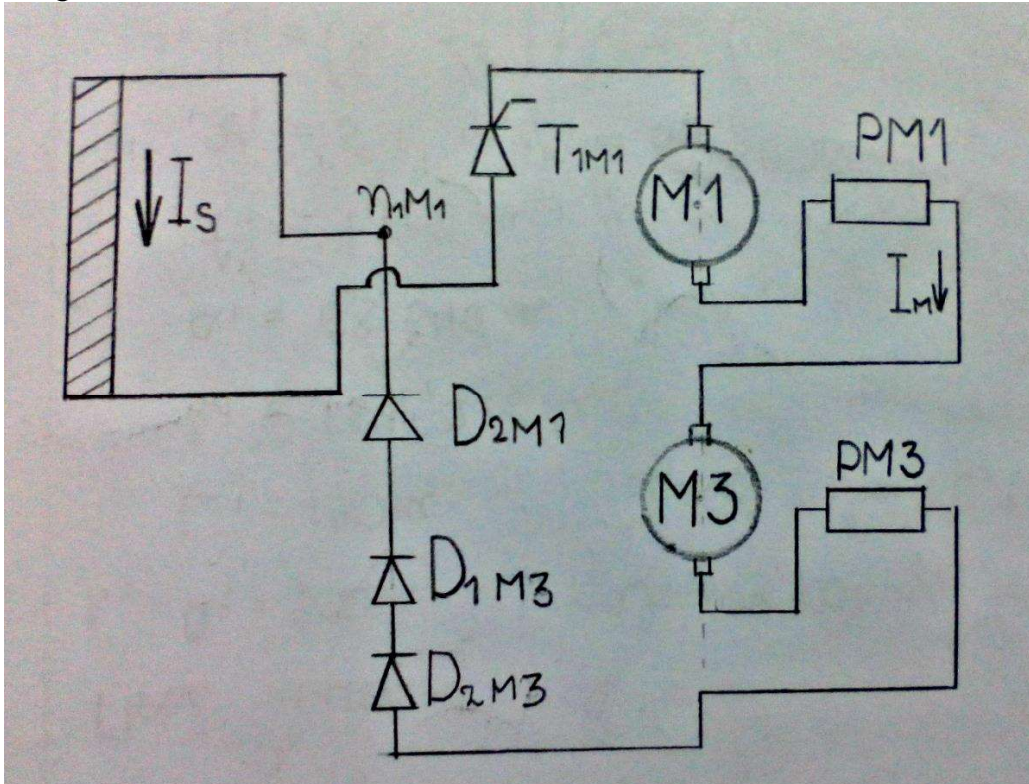
slika br. 1

Kad je $V_{n1M1} > V_{n2M1}$ i pri deblokiranju T2M1 pri faznom uglu θ strujno kolo se zatvara kao na slici (2)



slika br.2

Kada je $V_{n1M1} < V_{n2M1}$ tada se tiristor T2M1 blokira, ali se vođenje struje prenosi sa T2M1 na D2M1 i važi slika (1) za strujno kolo vučnim motorima M1 i M3. Pri $V_{n2M1} > V_{n1M1}$ i pri uglu θ deblokira se tiristor T1M1 pa je strujni krug sada kao na slici 3.



slika br. 3

PM1- pobuda motora 1

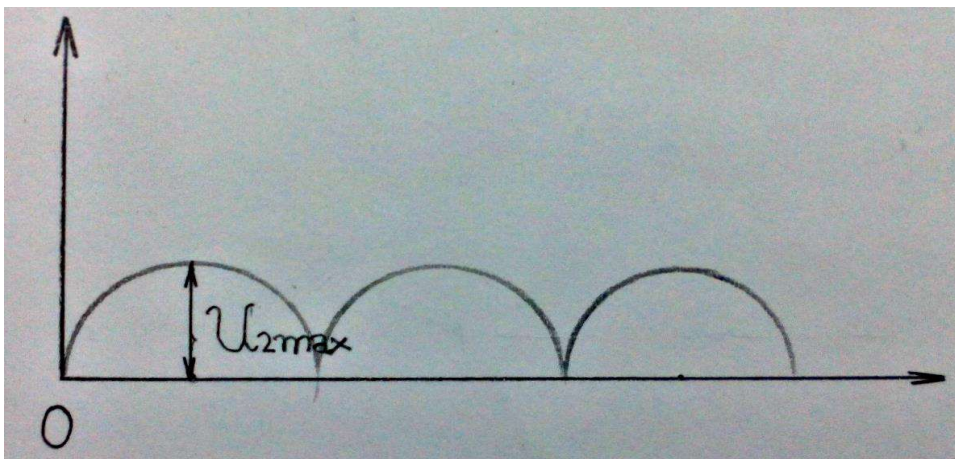
PM3- pobuda motora 3

Uočimo da I_m ne menja smer pri bilo kom od tri strujna kola, dok je u R1 slika (1) struja $I_s=0$, a smer struje kroz sekundar transformatora je naizmeničnog znaka u slučajevima prikazanim na slici (2) i (3).

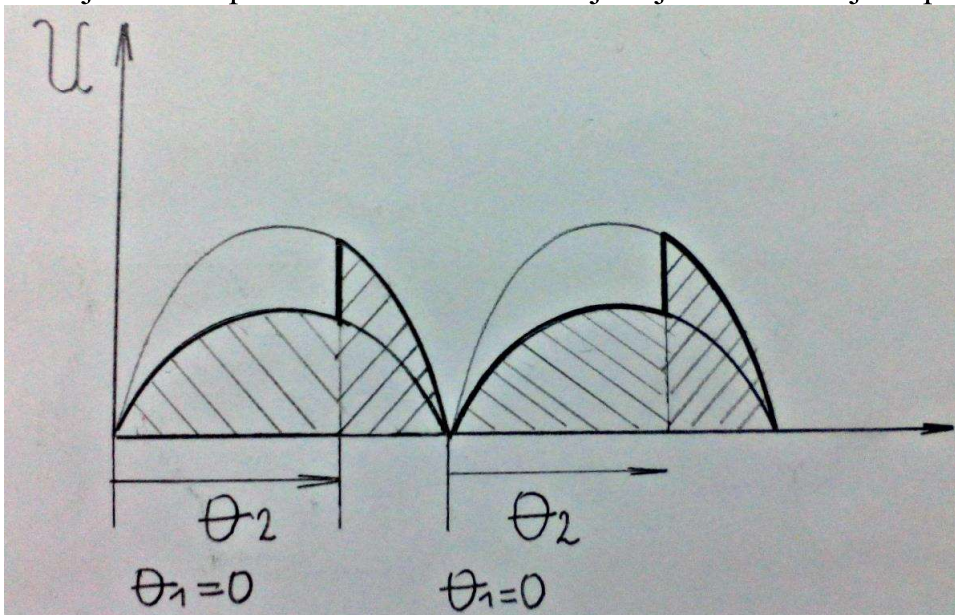
Primetimo da su T1M2 i T2M2 u ovom delu regulacije potpuno blokirani tako da S2 sekundar nema uticaja na napon vučnih motora U_m . Kada ugao upravljanja tiristora prvog mosta dostigne nultu vrednost ($\theta=0$) tada je ovaj most potpuno deblokiran i S1 participira u naponu na vučnim motorima sa

$$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9 \cdot U_2 \text{ radeći u suštini kao diodni most čija je amplituda}$$

ispravljenog napona U_{2max} , a napon U_{pn} na krajevima grupe vučnih motora M1-M3 ima oblik



Sada se postepeno deblokiraju i tiristori T1M2 i T2M2 drugog mosta M2. Na taj način napon sekundara S2 se uključuje u formiranje napona U_{pn} .



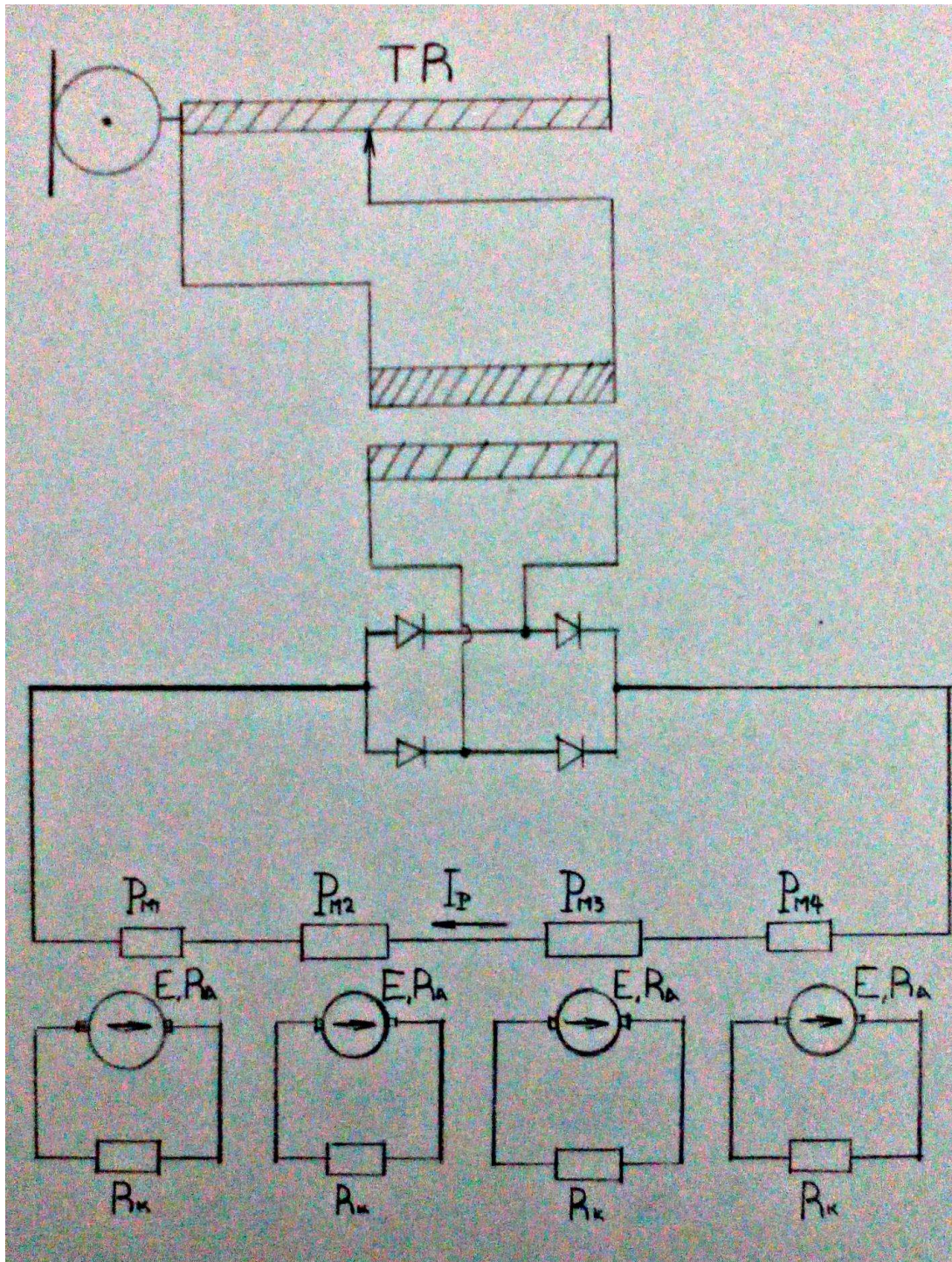
$$U_{pn} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \text{ do } U_{pn} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 1,8 \cdot U_2$$

Kako se ugao upravljanja θ_2 smanjuje od $\theta_2 = \pi$ do $\theta_2 = 0$ napon na vučnim motorima će se povećavati od $U_{pn} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2$ do

$$U_{pn} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 1,8 \cdot U_2$$

Karakteristike kočenja

U kočenju motori rade kao generatori pri tome su sprege motora u procesu kočenja promenjene. Umesto redne pobude sada imamo nezavisnu pobudu. Principijalna šema električnog kočenja kod diodnih lokomotiva je prikazana na slici



$$E = K\phi\omega = KK_v\phi V = (R_A + R_K) \cdot I_K$$

$$I_K = \frac{KK_v\phi V}{R_A + R_K}$$

Sa druge strane je kočna sila

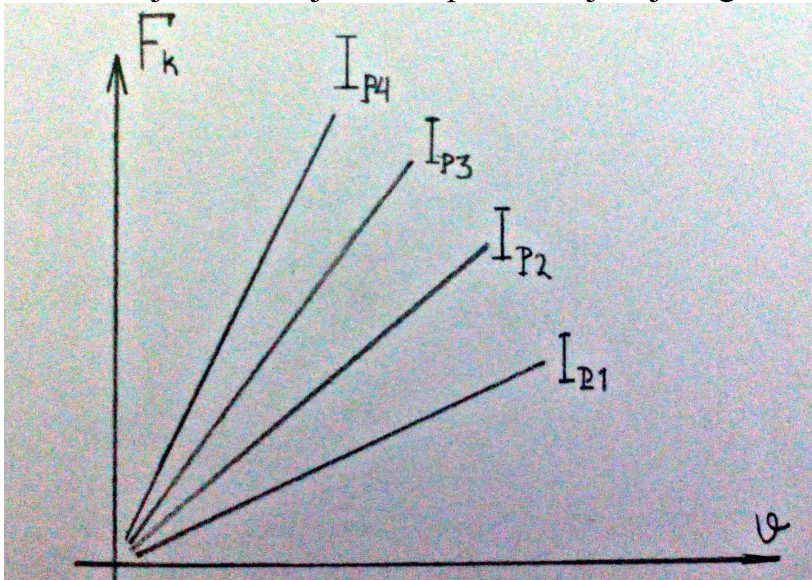
$$F_K = M_K \frac{2}{D} = K\phi I_K = \frac{DK}{2} \phi I_K = k_F \phi I_K$$

Ako ovoj jednačini zamenimo umesto I_K izraz

$$I_K = \frac{KK_v\phi V}{R + R_K} = \frac{K_1\phi V}{R + R_k} \quad (K_1 = K \cdot K_v)$$

$$F_K = \frac{K_F K_1 \phi^2 V}{R + R_K}$$

Ako je $R_k = const.$ i ako je $I_p = const. \Rightarrow \phi = const.$ pa možemo reći da je sila kočenja u funkciji brzine prava linija čiji nagib zavisi od fluksa.



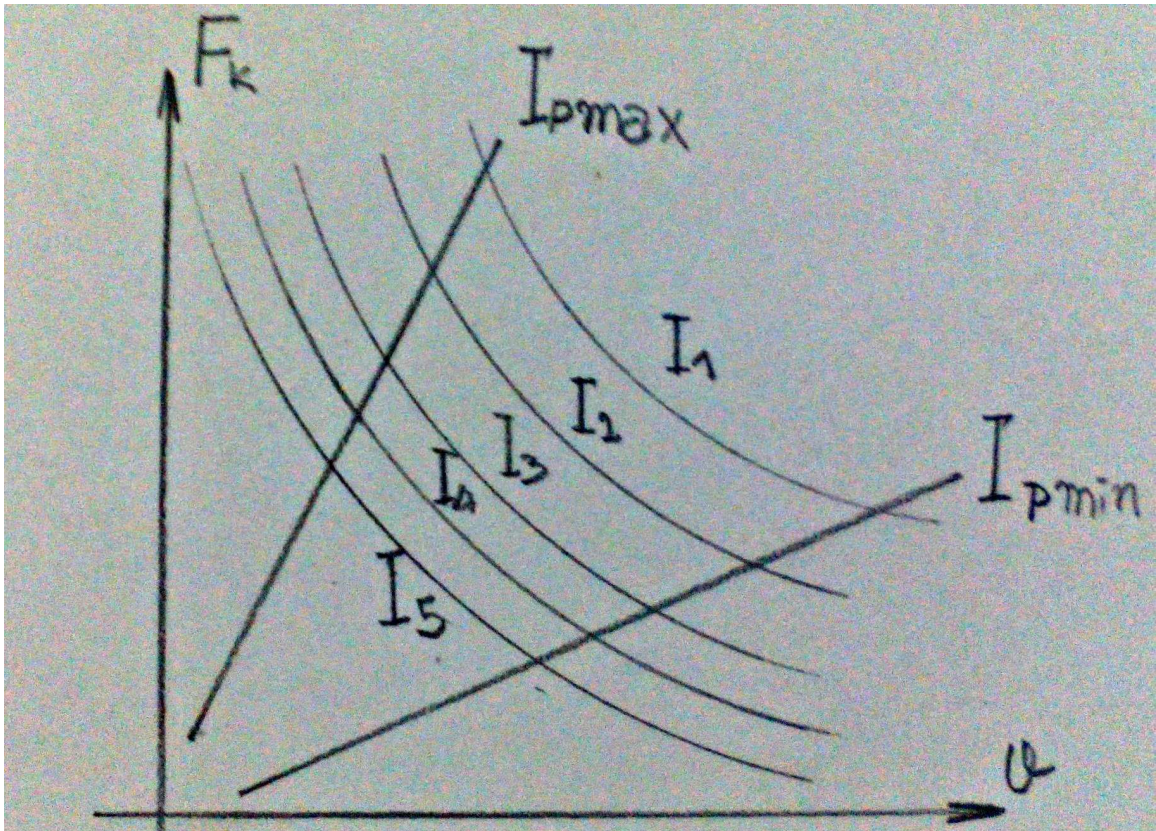
Sa druge strane sila kočenja je ograničena ograničena strujom rotora

odnosno strujom I_k . Pri konstantnoj struji $I_K \Rightarrow \phi = \frac{(R_a + R_k)I_K}{KK_v V}$ odakle

sledi:

$$F_K = \frac{k_F}{KK_v} \cdot \frac{(R_a + R_K)I_K^2}{V} = k' \frac{(R_a + R_K)}{V} \cdot I_K^2$$

$$I_{p \min} \geq \frac{I}{3}$$



Snaga kočenja $P_K = r_K I_K^2 \Rightarrow I_K = \sqrt{\frac{P_K}{r_K}}$

$$P_k = r_K I_K^2 = \eta F_K V_v$$