

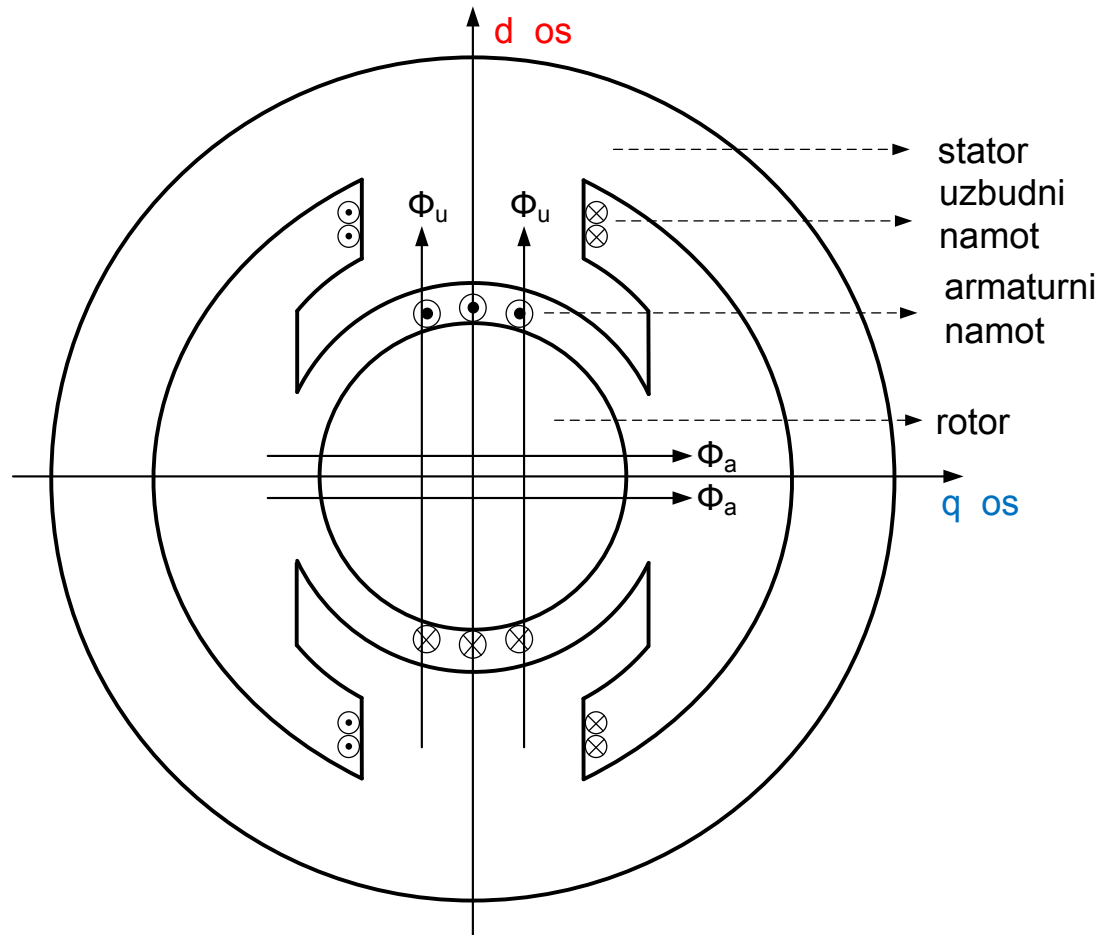
Elektromotorni pogoni s istosmjernim motorom

- Istosmjerni strojevi su u području upravljanih elektromotornih pogona obilježili značajan dio prošlog stoljeća.
- Zahvaljujući njihovoj **jednostavnosti u upravljačko-regulacijskom smislu** te **širokom opsegu upravljivosti brzine vrtnje**, još i danas zauzimaju značajno mjesto u industrijskim primjenama.
- **Gotovo idealna vanjska karakteristika motora** koja povezuje brzinu vrtnje i razvijeni moment, te mogućnost **jednostavnog dobivanja promjenljivog istosmjernog napona napajanja**, osigurala je ovom stroju vodeću ulogu sve do 1960-tih godina.
- Značajan **nedostatak istosmjernog stroja** je bio, i još uvijek je, **mehanički komutator** (izmjenjivač/ispravljač) koji ograničava snagu i brzinu motora, povećava zamašnu masu (moment inercije) te zahtijeva češće periodičko održavanje.
- U zadnjih 30-40 god. snažan **razvoj učinske elektronike** osigurao je razvoj po cijeni konkurentnih **pretvarača napona i frekvencije za vektorski upravljanje izmjenične asinkrone strojeve**, započeo je primat izmjeničnih strojeva u upravljanim elektromotornim pogonima.

Elektromotorni pogoni s istosmjernim motorom

- Neovisno o tome, istosmjerni stroj s mehaničkim komutatorom (**klasični istosmjerni stroj**) je na neki način **regulacijska paradigma** i od njega je svakako dobro početi proučavati upravljane elektromotorne pogone.
- Jednostavno načelo upravljanja zasnovano na raspregnutosti upravljanja po magnetskom toku (uzbudnoj struji) i momentu (armaturnoj struji), bila je vodilja znanstvenicima na ovom području da takvu logiku upravljanja primijene i na izmjenične asinkrone strojeve.
- Iako se pretpostavlja da su osnovna načela rada istosmjernog stroja u ustaljenom (stacionarnom) stanju poznata, bit će ponovljene osnovne činjenice.
- Istosmjerni stroj u osnovi ima dva namota. Jedan namot se nalazi na statoru i zove se **uzbudni namot**. Drugi namot nalazi se na rotoru i zove se **armaturni namot**. Os stroja u kojoj je postavljen **uzbudni namot** često se naziva **uzdužna os („d“ os)**. Os stroja u kojoj je smješten **armaturni namot** naziva se **poprečna os („q“ os)**.

Elektromotorni pogoni s istosmjernim motorom



- **Poprečna** i **uzdužna** os istosmjernog stroja su razmaknute za 90° . Veza armaturnog namota s vanjskim (mirujućim) svijetom ostvaruje se preko komutatora. Ovakva konstrukcija stroja omogućava da **kut između uzbudnog i armaturnog protjecanja u svakoj radnoj točki bude 90°** što osigurava razvijanje maksimalnog momenta.

Elektromotorni pogoni s istosmjernim motorom

- Vodič (namot armature, q os) u odnosu na vektor magnetske indukcije (uzbuda, d os) je pod kutom od 90° , sila na vodič je maksimalnog iznosa. To pokazuje i vektorski produkt koji definira silu na vodič, tj. moment stroja

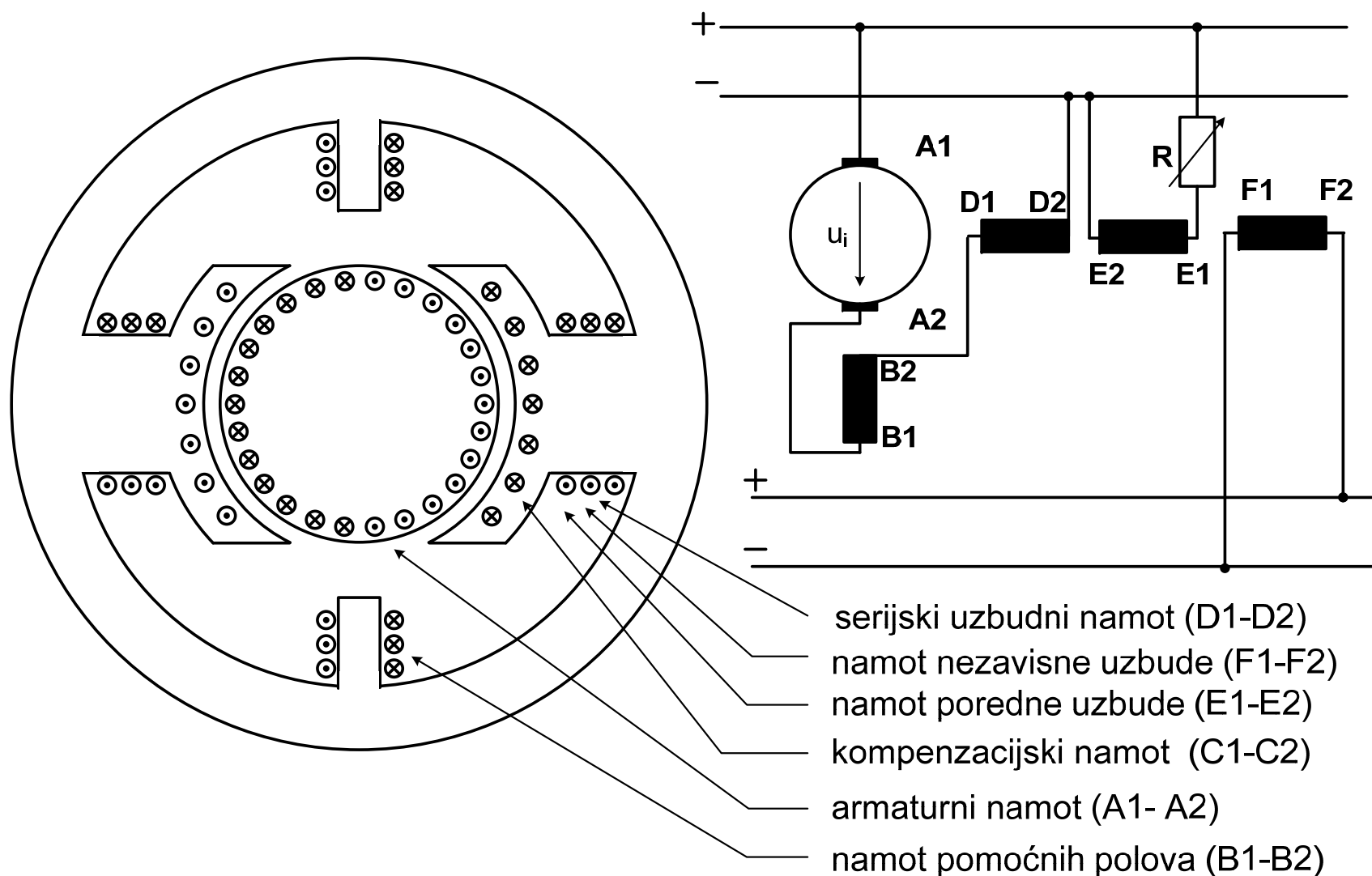
$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (1)$$

- Struja kroz armaturni namot, uz već formirano magnetsko polje uzbudnog namota, omogućuje rotaciju stroja.
- U daljnjem tekstu smatra se da je ukupan magnetski tok u zračnom rasporu stroja jednak magnetskom toku stvorenom uzбудnim namotom. Ova pretpostavka nije u potpunosti točna, s obzirom da i armaturni namot stvara magnetski tok koji se zbraja uzбудnim, ali se uzima da je njegov utjecaj zanemariv (pojam “reakcija armature”).
- Što želimo od električnog stroja? U svrhu postizanje maksimalnog momenta u svakoj radnoj točki moramo osigurati stalan (okomit) položaj uzbudnog protjecanja i protjecanja uslijed armaturne struje.

Elektromotorni pogoni s istosmjernim motorom s nezavisnom uzbuđom

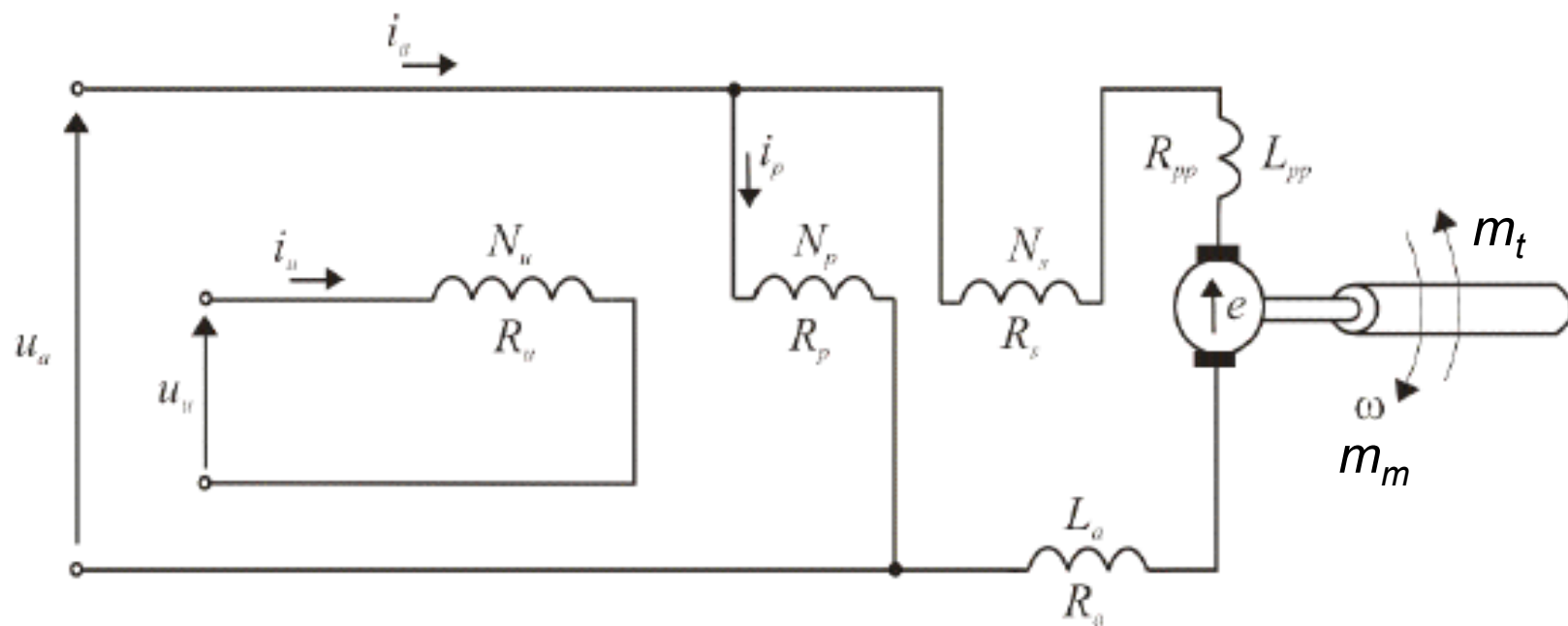
- Ovisno o **izvedbi uzbuđnog kruga** razlikuju se slijedeće vrste istosmjernih strojeva:
 - istosmjerni stroj **s nezavisnom uzbuđom** – uzbuđni i armaturni namoti električki odvojeni
 - istosmjerni stroj **sa serijskom uzbuđom** – uzbuđni i armaturni namoti spojeni u serijski spoj
 - istosmjerni stroj **s porednom uzbuđom** – uzbuđni i armaturni namot spojeni paralelno
- U daljnjem tekstu će detaljnije biti opisani **istosmjerni nezavisno uzbuđeni strojevi** obzirom da su to najčešće susretani strojevi u praksi.
- Istosmjerni **serijski uzbuđeni strojevi** se prema karakteristikama znatno razlikuju od nezavisno uzbuđenih ali se rjeđe susreću u praksi (**pogoni vuče**).

Elektromotorni pogoni s istosmjernim motorom sa složenom uzбудom



Poprečni presjek i električna shema s namotima 2-polnog istosmjernog stroja, [3]

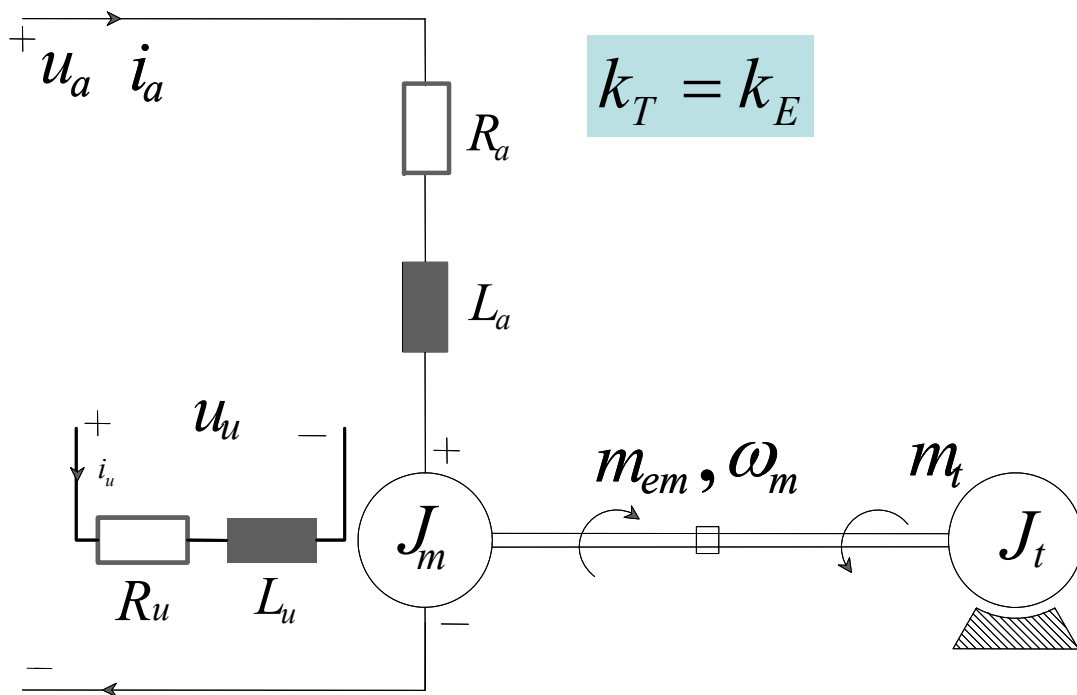
NADOMJESNA ELEKTRIČNA SHEMA ISTOSMJERNOG STROJA SA SLOŽENOM UZBUDOM



Nadomjesna električna shema istosmjernog stroja

u_a – napon armature, i_a – struja armature, e – protuelektromotorna sila, R_a – otpor armature, L_a – induktivitet armature, u_u – napon uzbude, i_u – struja uzbude, R_u – otpor uzbude, N_u – broj svitaka uzbude, ω – brzina vrtnje motora, m_m – moment motora, m_t – moment tereta, R_s – otpor serijske uzbude, N_s – broj svitaka serijske uzbude, R_p – otpor paralelne uzbude, N_p – broj svitaka paralelne uzbude.

Istosmjerni motor (nezavisna uzbuda) – matematički model



$$k_T = k_E$$

armatura (2)

$$e_a = k_E \omega_m = k \cdot \phi \cdot n$$

$$u_a = e_a + i_a \cdot R_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

uzbuda (3)

$$u_u = i_u \cdot R_u + L_u \frac{di_u}{dt}$$

$$I_a = \frac{M_{em} (= M_t)}{k_T}$$

Stacionarno stanje

$$\omega = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \Phi} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k_E} \quad (5)$$

el.mehanički dio (4)

$$m_{em} = k_T i_a$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_{eq}} (m_{em} - m_t)$$

Istosmjerni motor s nezavisnom uzbudom

- Istosmjerni stroj s nezavisnom uzbudom napaja se iz dva izvora; u_u i u_a . Kod industrijskih pogona za istosmjerne strojeve ta dva izvora su najčešće realizirana odvojenim ispravljačkim spojevima, koji se mogu napajati iz istog izmjeničnog izvora
- Iznosom napona u_u utječe se na iznos struje i_u , čime se direktno utječe na tok ϕ u izrazu (2) a samim tim i na indukciju B .

Istosmjerni motor s nezavisnom uzбудom- matematički model

Na osnovi prethodne slike mogu se postaviti diferencijalne jednačbe koje opisuju istosmjerni stroj s nezavisnom uzбудom

$$R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + e = u_a \quad (6)$$

$$e = k_e \cdot \phi \cdot n \quad (7)$$

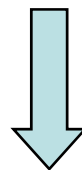
$$J \frac{d\omega}{dt} = m_m - m_t \quad (8)$$

$$m_m = k_m \cdot \phi \cdot i_a \quad (9)$$

$$u_u = R_u \cdot i_u + N_u \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (10)$$

$$\phi = f(i_u) \quad (11)$$

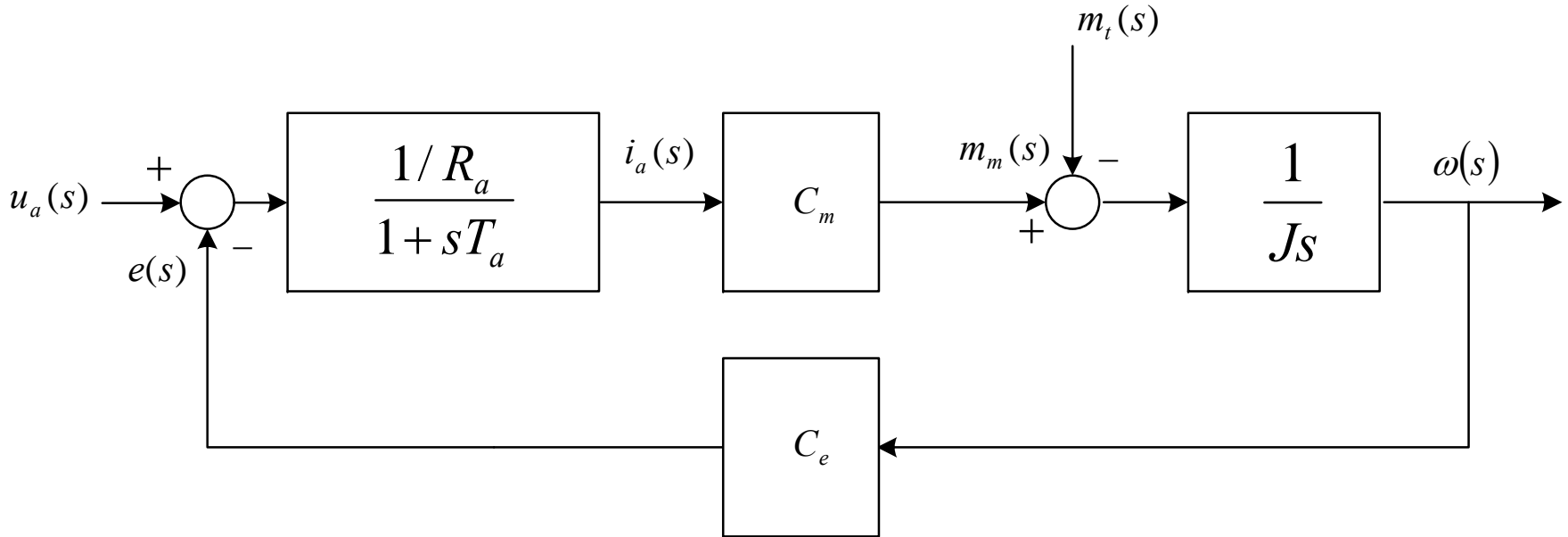
$$\dot{X} = AX + BU \quad (12)$$



$$\begin{bmatrix} di_a / dt \\ d\omega / dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & \frac{C_e}{L_a} \\ \frac{C_e}{J} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ m_t \end{bmatrix} \quad (13)$$

Istosmjerni motor s nezavisnom uzбудom

- dobije se iz jednadžbi (2)



Strukturna blokovska shema istosmjernog stroja s nezavisnom uzбудom

Istosmjerni motor s nezavisnom uzбудom- matematički model

- Kao varijable stanja odabrane su struja armature i_a i brzina vrtnje ω .
Ulazne veličine su napon armature u_a i moment tereta m_t
- Konstanta C_e je konstrukcijska konstanta stroja kao što je i konstanta k_e .
Ove konstante u sebi uključuju iste konstrukcijske detalje stroja, a u iznosu se mogu razlikovati. Odnos konstanti C_e , k_e i konstanti C_m , k_m ovisi o sustavu jedinica koji se koristi
- Ako se moment motora m_m izražava u (Nm) a brzina vrtnje ω u (rpm), tada je

$$\frac{k_e}{k_m} = \frac{C_e}{C_m} = \frac{2\pi}{60} = 0,1047 \quad (14)$$

- Ako se moment motora m_m izražava u (Nm) a brzina vrtnje ω u (s^{-1}), tada je

$$\boxed{\frac{k_e}{k_m} = \frac{C_e}{C_m} = 1} \quad (15)$$

DC motor – prijelazni proces

- Za matematički opis istosmjernog stroja u prijelaznom procesu potrebno je u obzir uzeti jednadžbe ravnoteže napona i momenata

$$u_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + C_e \omega \quad (16)$$

$$m_m = m_t + m_u = m_t + J \frac{d\omega}{dt} \quad (17)$$

- Stroj se nalazi u stacionarnom stanju kada su izjednačeni momenti stroja i tereta.
- Od trenutka kada dođe do razlike između momenata stroja i tereta nastupa prijelazni proces koji traje do ponovnog izjednačavanja navedenih momenata. Do razlike momenata može doći promjenom momenta stroja ili promjenom momenta tereta.
- Uz konstantan magnetski tok, moment stroja je proporcionalan struji armature

$$m_m = C_m \cdot i_a \quad (18)$$

DC motor – prijelazni proces

- Prijelazni proces se može opisati relacijama (16) i (17) uz neki poremećaj u okolini radne točke. Za neku promjenu u okolini radne točke vrijedi

$$i_a = i_a(t) = I_{a0} + \Delta i_a(t)$$

$$m_t = m_t(t) = M_{t0} + \Delta m_t(t)$$

$$u_a = u_a(t) = U_{a0} + \Delta u_a(t)$$

$$m_m = m_m(t) = M_{m0} + \Delta m_m(t)$$

$$\omega = \omega(t) = \Omega_0 + \Delta \omega(t)$$

- Uz ove relacije, relacije (17) i (18) se mogu pisati kao

$$U_{a0} + \Delta u_a(t) = (I_{a0} + \Delta i_a(t))R_a + L_a \frac{d}{dt}(I_{a0} + \Delta i_a(t)) + C_e(\Omega_0 + \Delta \omega(t)) \quad (19)$$

$$C_m(I_{a0} + \Delta i_a(t)) = M_{t0} + \Delta m_t(t) + J \frac{d}{dt}(\Omega_0 + \Delta \omega(t)) \quad (20)$$

DC motor – prijelazni proces

- Radna točka je definirana na slijedeći način

$$U_{a0} = I_{a0}R_a + C_e\Omega_0$$

$$M_{t0} = C_m I_{a0}$$

$$\frac{dI_{a0}}{dt} = 0$$

$$\frac{d\Omega_0}{dt} = 0$$

- Ako se ovi izrazi uvrste u (20) i (21), dobije se

$$\Delta u_a(t) = \Delta i_a(t)R_a + L_a \frac{d}{dt} \Delta i_a(t) + C_e \Delta \omega(t) \quad (21)$$

$$C_m \Delta i_a(t) = \Delta m_t(t) + J \frac{d}{dt} \Delta \omega(t) \quad (22)$$

DC motor – prijelazni proces

- Korištenjem Laplaceove transformacije, izrazi (21) i (22) postaju

$$u_a(s) = i_a(s)R_a + L_a s i_a(s) + C_e \omega(s) \quad (23)$$

$$C_m i_a(s) = m_t(s) + J s \omega(s) \quad (24)$$

- Iz izraza (23) i (24) slijedi (25)

$$\omega(s) = u_a(s) \frac{1/C_e}{s^2 T_a T_{em} + s T_{em} + 1} - m_t(s) \frac{R_a}{C_e C_m} \frac{1 + s T_a}{s^2 T_a T_{em} + s T_{em} + 1}$$

- Prijenosna funkcija (25) pokazuje ovisnost brzine vrtnje o vodećoj veličini (napon armature) i poremećajnoj veličini (moment tereta).

DC motor – prijelazni proces

- Iz izraza (25) dobiju se vremenske konstante

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}$$

armaturna vremenska konstanta

(26)

- Armaturna vremenska konstanta fizikalno predstavlja vrijeme potrebno da struja u armaturnom krugu dosegne iznos od 63% konačne vrijednosti struje za skokovit porast armaturnog napona.
- Dobije se izračunom preko dostupnih parametara L_a i R_a ili snimanjem odziva armaturne struje stroja na skokovit porast armaturnog napona pri zakočenom stroju i isključenoj uzbudi stroja.

$$T_{em} = J \frac{R_a}{C_e C_m}$$

elektromehanička vremenska konstanta

(27)

DC motor – prijelazni proces

- Elektromehanička vremenska konstanta fizikalno predstavlja vrijeme koje je potrebno da se stroj zaleti od brzine 0 do brzine praznog hoda ako je elektromagnetski moment koji stroj razvija jednak momentu kratkog spoja stroja.
- Moment kratkog spoja je moment koji stroj razvija uz zakočen rotor, uz priključen armaturni napon nazivnog iznosa te uz formiran magnetski tok uzbuđe nazivnog iznosa.
- Do tok zaključka se dolazi kada se izraz (28) proširi na slijedeći način

$$T_{em} = J \frac{R_a}{C_e C_m} \cdot \frac{I_{ak}}{I_{ak}} = J \frac{R_a \cdot I_{ak}}{C_e} \cdot \frac{1}{M_k} \quad (28)$$

- Uz uvjet $n=0$ (zakočen stroj!) slijedi

$$U_a = I_a R_a = I_{ak} R_a$$

- Pri brzini praznog hoda vrijedi

$$\omega = \omega_0 = \frac{U_a}{C_e} = \frac{I_{ak} R_a}{C_e} \quad (29)$$

DC motor – prijelazni proces

- Uz (29) Izraz (28) se sada može prikazati

$$\boxed{T_{em} = J \frac{\omega_0}{M_k}} \quad (30)$$

- Vratimo se na izraz (26) koji definira prijenosne funkcije stroja po vodećoj i poremećajnoj veličini

$$F(s) = \left. \frac{\omega(s)}{u_a(s)} \right|_{m_t(s)=0} = \frac{1/C_e}{s^2 T_a T_{em} + s T_{em} + 1} \quad (31)$$

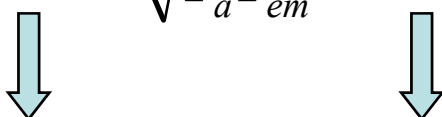
$$F(s) = \left. \frac{\omega(s)}{m_t(s)} \right|_{e_a(s)=0} = \frac{R_a}{C_e C_m} \frac{1 + s T_a}{s^2 T_a T_{em} + s T_{em} + 1} \quad (32)$$

- Radi o **sustavu drugog reda**, što fizikalno predstavlja sustav s dva spremnika energije gdje je jedan spremnik **električni stroj s akumuliranom magnetskom energijom**, a drugi je **radni mehanizam s akumuliranom kinetičkom energijom**.

DC motor – prijelazni proces

- Ako uzbuda stroja nije konstantna tada sustav postaje trećeg reda, sa spremnikom energije u uzбудnom krugu stroja
- Izrazi (31) i (32) se mogu napisati u formi općeg oblika prijenosne funkcije drugog reda. Ako se uzme samo izraz (31), dobije se

$$F(s) = \frac{\omega(s)}{u_a(s)} \Big|_{m_t(s)=0} = \frac{\frac{1}{C_e} \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (33)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{T_a T_{em}}} \quad \zeta = \sqrt{\frac{T_{em}}{4T_a}}$$


$\zeta > 1 \Rightarrow T_{em} > 4T_a$ aperiodski odziv

$\zeta = 1 \Rightarrow T_{em} = 4T_a$ granični aperiodski odziv

$\zeta < 1 \Rightarrow T_{em} < 4T_a$ oscilatoran odziv

frekvencija
neprigušenog
titranja

faktor
prigušenja

DC motor – prijelazni proces

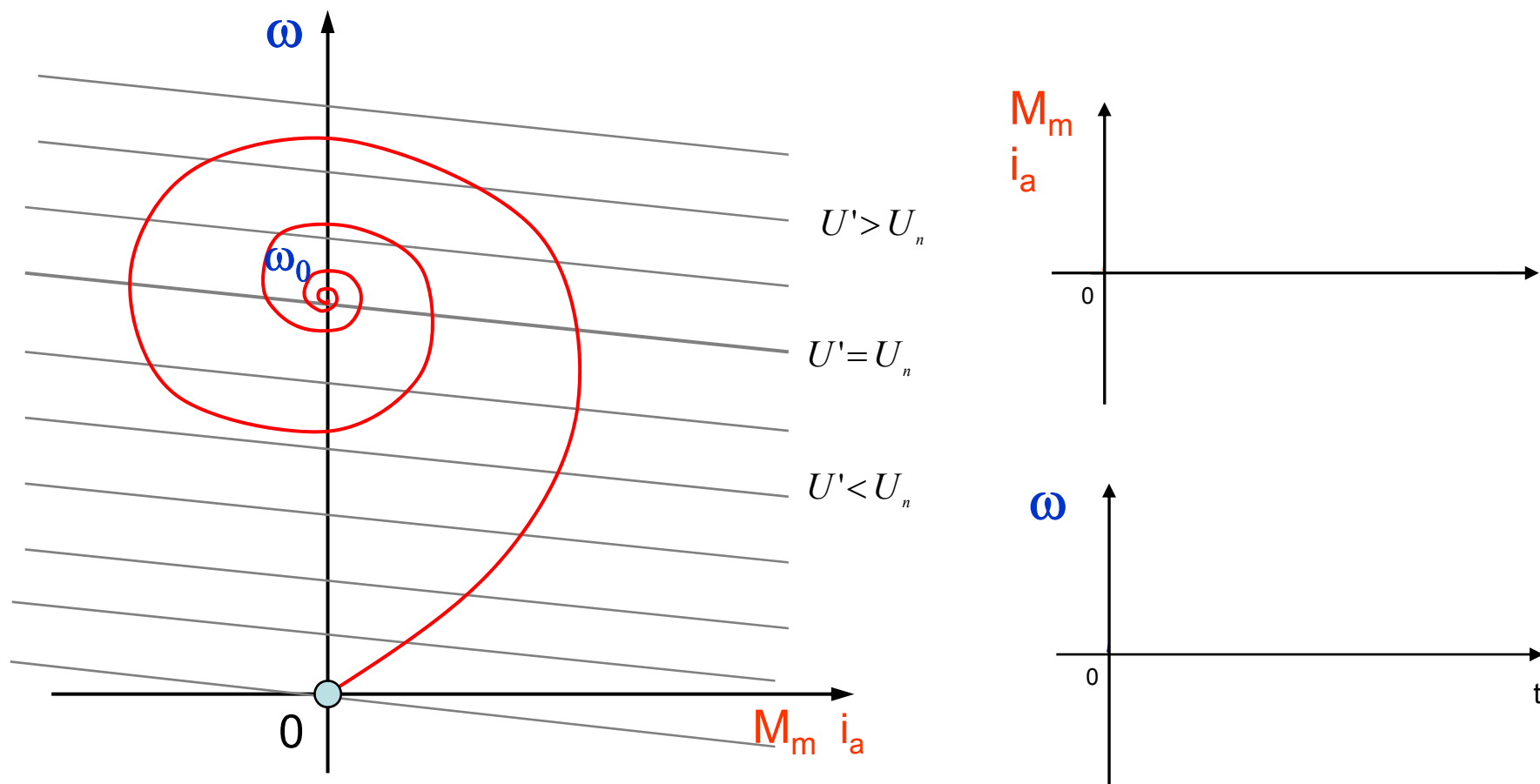
- Iz izraza (23) i (24) može se izvesti i prijenosna funkcija struje armature u odnosu na vodeću veličinu (napon armature) i poremećajnu veličinu (moment tereta)

$$i_a(s) = u_a(s) \frac{sT_{em}}{R_a(s^2T_aT_{em} + sT_m + 1)} + m_t(s) \frac{1/C_m}{s^2T_aT_{em} + sT_{em} + 1}$$

$$F(s) = \left. \frac{i_a(s)}{u_a(s)} \right|_{m_t(s)=0} = \frac{sT_{em}}{R_a(s^2T_aT_{em} + sT_{em} + 1)} \quad (34)$$

$$F(s) = \left. \frac{i_a(s)}{m_t(s)} \right|_{e_a(s)=0} = \frac{1/C_m}{R_a(s^2T_aT_{em} + sT_{em} + 1)} \quad (35)$$

- Usporedbom s izrazima (32) i (33) vidljivo je da su **nazivnici prijenosne funkcije identični**. To pokazuje da vrstu odziva sustava određuje odnos vremenskih konstanti T_a i T_{em} .
- Taj odnos vremenskih konstanti definirati će polove prijenosne funkcije u kompleksnoj ravnini.



Odzivi brzine vrtnje i momenta (struje) neopterećenog nezavisno uzbuđenog stroja u praznom hodu,

Faze dinamičkog procesa zaleta neopterećenog istosmjernog emp-a, [1]

Zatvaranja sklopke:

- rast struje, momenta i brzine te akumulirane mehaničke i magnetske energije

Prestanak rasta struje, $M_m > M_t$ ($M_t=0$) u točki 1

- energija akumulirana u mag. krugu (induktivitetu) predaje se rotoru koji se vrti, napon armature veći od napona mreže, pogon ubrzava, a $E = c \omega$ raste

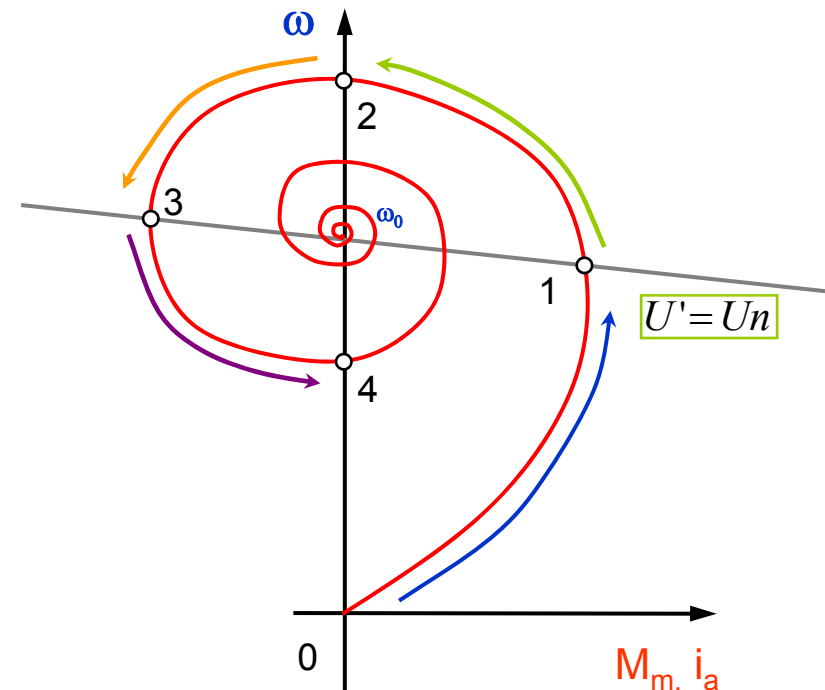
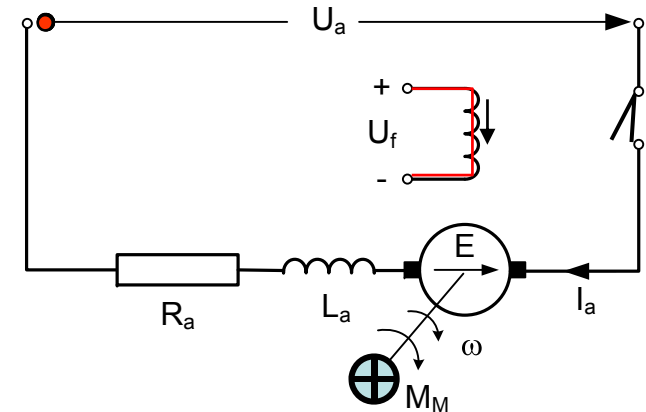
Točka 2, $M_m=0$ ($i_a=0$)

- akumulirana mag. energija je potrošena, ali zbog $\omega > \omega_0$ $E > U_a$ struja teče u mrežu, pogon generatorski koči. Kinetička energija se pretvara u magnetsku (nakuplja se u induktivitetu)

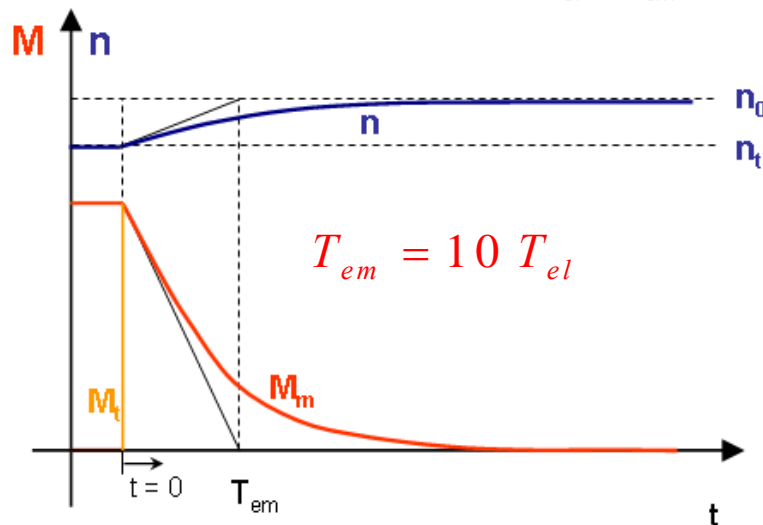
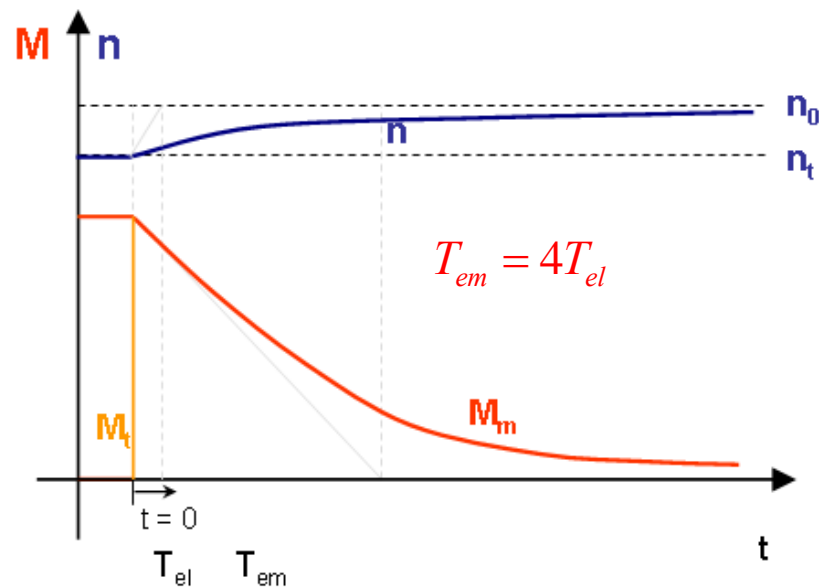
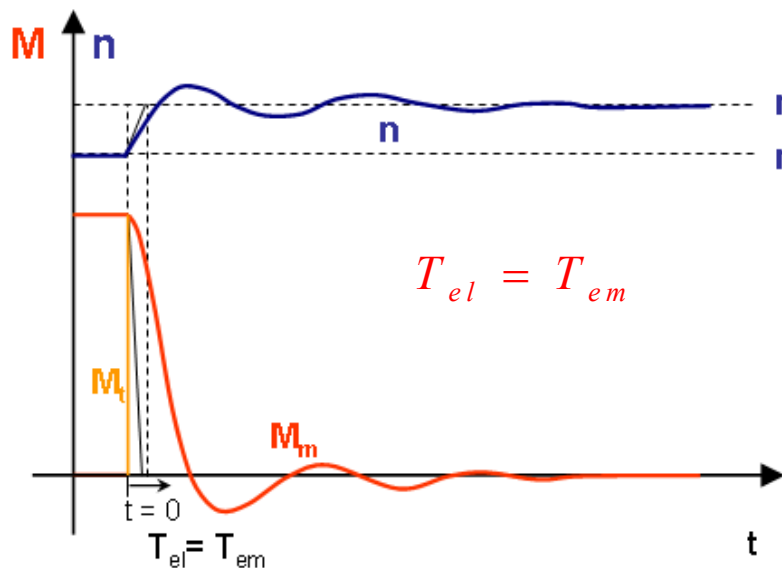
Točka 3, $di/dt=0$, $i \neq 0$, $M \neq 0$

- Pogon generatorski koči do točke 4. i nakon toga proces se ponavlja

Zbog R_a proces izmjene mehaničke i magnetske energije se odvija sa gubicima pa se nakon nekoliko titraja stabilizira



Istosmjerni motor - prijelazni proces, odzivi



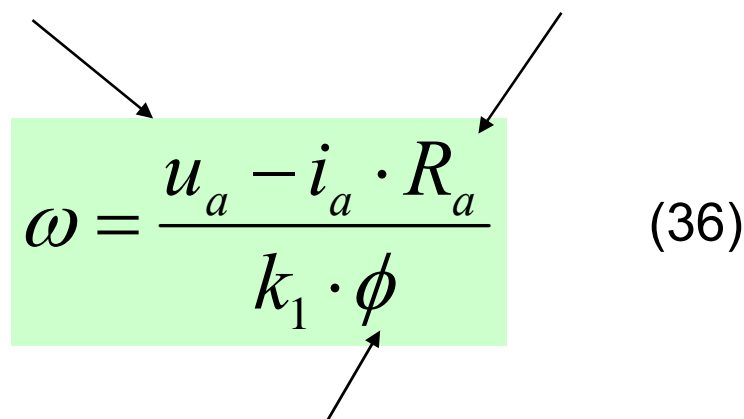
Odzivi brzine vrtnje i momenta stroja **pri rasterećenju** uz različite odnose armaturene i elektromehaničke vremenske konstante, [1].

Istosmjerni motor s nezavisnom uzbudom – načini upravljanja

Kako upravljati brzinom vrtnje istosmjernog stroja s nezavisnom uzbudom ?

(1) Promjenom napona armature

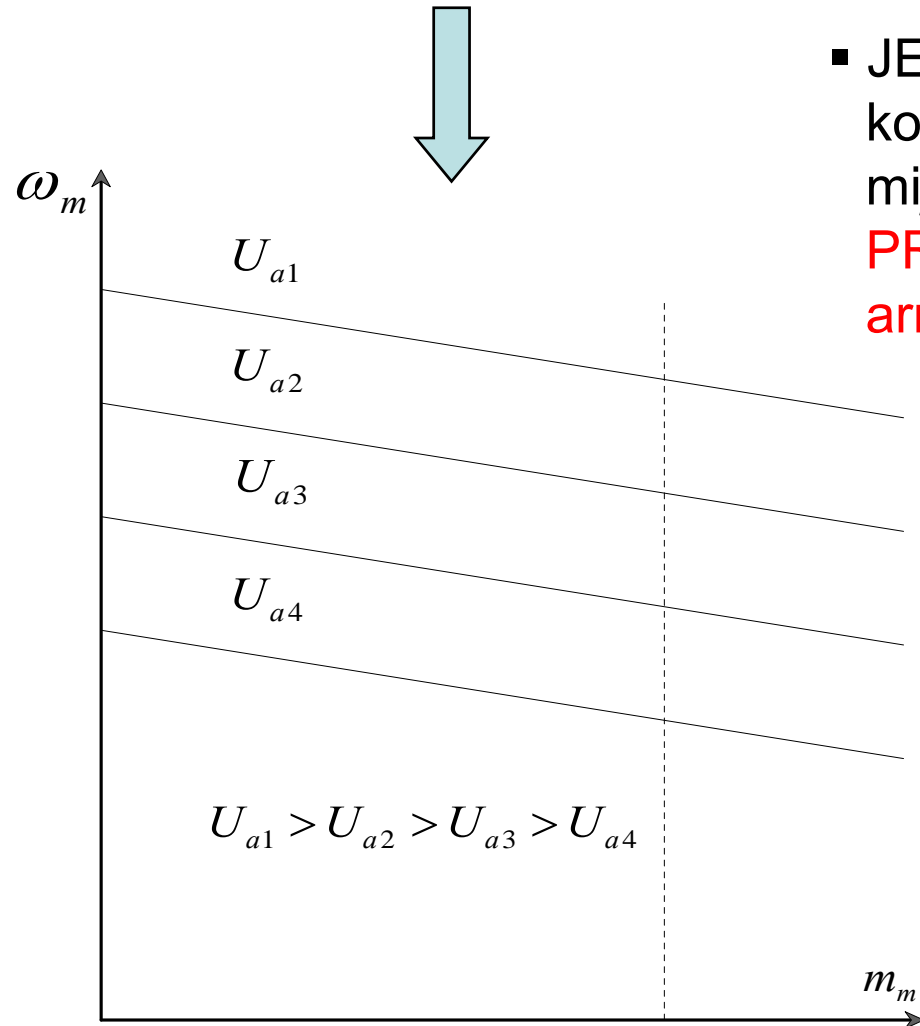
(2) Promjenom otpora armature


$$\omega = \frac{u_a - i_a \cdot R_a}{k_1 \cdot \phi} \quad (36)$$


(3) Promjenom uzbude (magnetskog toka)

U ustaljenom stanju je $M_t = M_m$. Pri nazivnom iznosu momenta tereta strojem teče nazivna struja armature. Nazivni moment tereta jednak je nazivnom momentu motora.

DC motor – mehaničke karakteristike upravljanje naponom armature (1)



- JEDNOSTAVNOST upravljanja → uz konstantno opterećenje brzina vrtnje se mijenja približno **PROPORCIONALNO s NAPONOM armature**


$$\omega_m = \frac{u_a - \cancel{i_a R_a}}{\underbrace{k_1 \phi}_{\text{konst.}}} \approx k u_a \quad (36)$$

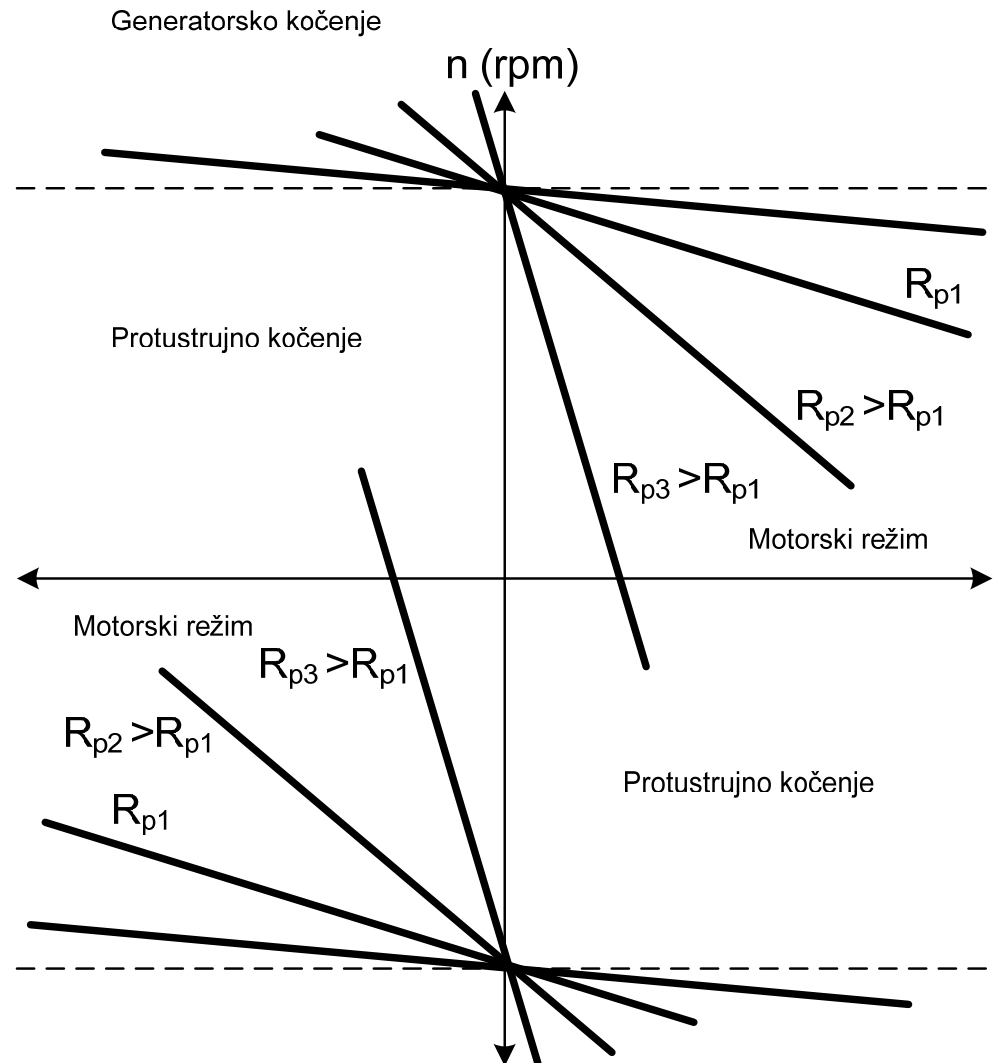
Promjena srednje vrijednosti napona se jednostavno postiže primjenom usmjerivača (AC/DC) i istosmjernih pretvarača (DC/DC)

DC motor – statičke karakteristike stroja upravljanog promjenom otpora u armaturnom krugu (2)

- Brzina vrtnje istosmjernog stroja se može mijenjati dodavanjem otpornika u krug armature.

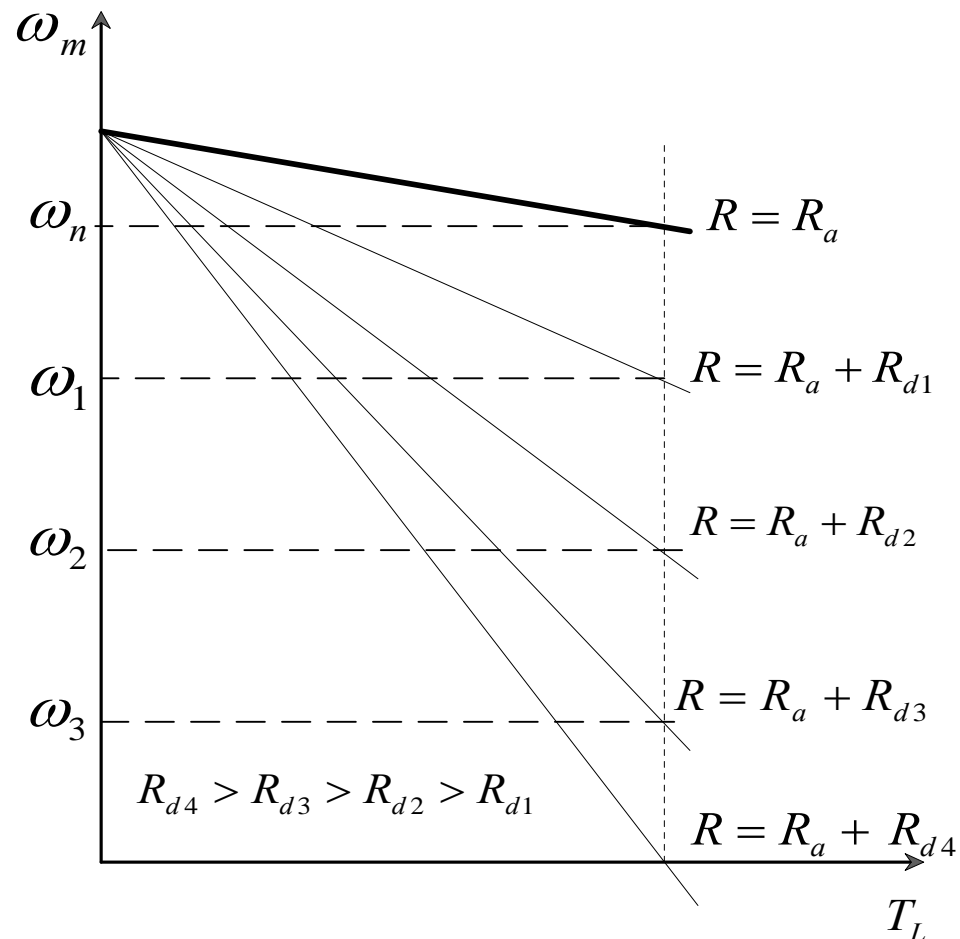
$$\Omega = \frac{U_a - I_a (R_a + R_p)}{C_e} \quad (41)$$

Dodavanje otpornika u krug armature energetski je neučinkovita metoda jer se na otporniku disipira snaga, što znatno umanjuje faktor iskoristivosti cijelog pogona



DC motor – statičke karakteristike stroja upravljano promjenom otpora u armaturnom krugu (2), primjer

- U seriju s armaturnim namotom postavlja se otpornik (otpornici)
- Promjenom iznosa tog otpornika mijenja se nagib vanjske karakteristike
- Ako se pretpostavi konstantan moment opterećenja



- Rotorski otpornik u funkciji startera (pokretača)
- Za pokretanje se polazi od najvećeg dodatnog otpornika R_{d1} (brzina=0) do kratko spojenog dodatnog otpora, $R_d=0$
- Veliki gubici u otpornicima, neekonomično

DC motor – upravljanje uzbuđnim poljem (3)

- Brzina vrtnje istosmjernog stroja može se mijenjati promjenom magnetskog toka.
- Promjena brzine vrtnje istosmjernog nezavisnog uzbuđenog stroja promjenom iznosa magnetskog toka je metoda koja se koristi u današnjim industrijskim pretvaračima za istosmjerne strojeve.
- Ova metoda se najčešće koristi prilikom povećanja brzine vrtnje iznad nazivnog iznosa, što se postiže smanjenjem iznosa magnetskog polja (slabljenje polja).
- Nije uobičajeno koristiti ovu metodu upravljanja brzinom vrtnje za brzine do nazivnog iznosa
- Povećanje iznosa magnetskog toka iznad nazivnog iznosa značilo bi zasićenje u magnetskom materijalu stroja što bi znatno povećavalo gubitke u stroju
- Iz tog razloga su gotovo svi strojevi dimenzionirani na način da rade na samom rubu zasićenja (“koljeno” karakteristike magnetiziranja)

DC motor – upravljanje uzbuđnim poljem (3)

- Za analizu upravljanja brzinom vrtnje promjenom napona uzbude potrebno je linearizirati gornju krivulju u okolišu radne točke (prethodni slajd).
- U okolišu radne točke vrijedi da je

$$\phi = k_{\phi} \cdot i_u \quad \text{uz} \quad k_{\phi} = \Delta\Phi / \Delta I_u \quad (37)$$

- Uz jednadžbe za inducirani napon i moment stroja

$$e = k_e \cdot \phi \cdot \omega = k_e \cdot k_{\phi} \cdot i_u \cdot \omega = k_{e\phi} \cdot i_u \cdot \omega$$

$$m_m = k_m \cdot \phi \cdot i_a = k_m \cdot k_{\phi} \cdot i_u \cdot i_a = k_{m\phi} \cdot i_u \cdot i_a$$

stroj se sada može opisati s tri jednadžbe:

$$u_a(t) = i_a(t) \cdot R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_{e\phi} \cdot i_u(t) \cdot \omega(t)$$

$$u_u(t) = i_u(t) \cdot R_u + L_u \frac{di_u(t)}{dt}$$

$$k_{m\phi} \cdot i_u(t) \cdot i_a(t) = m_t(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt}$$

DC motor – upravljanje uzbuđnim poljem (3)

Napravimo istu stvar kao i za izvod kod upravljanja brzinom vrtnje s naponom armature. U okolini oko neke radne točke vrijedi

$$u_a = u_a(t) = U_{an} = U_{a0}$$

$$i_a = i_a(t) = I_{a0} + \Delta i_a(t)$$

$$\omega_a = \omega_a(t) = \Omega_0 + \Delta \omega(t)$$

$$m_t = m_t(t) = M_{t0} + \Delta m_t(t)$$

$$m_m = m_m(t) = M_{m0} + \Delta m_m(t)$$

Stacionarna stanja moguće je izraziti na sljedeći način

$$E_{a0} = I_{a0}R_a + k_{e\phi}I_{u0}\Omega_0$$

$$E_{u0} = I_{u0}R_u$$

$$M_{t0} = k_{m\phi}I_{u0}I_{a0}$$

$X_0 \rightarrow$ Stacionarno stanje veličine X

Kada se primijeni Laplaceova transformacija dobije se prijenosna funkcija koja pokazuje **ovisnost brzine vrtnje stroja o naponu uzbude**

DC motor – upravljanje uzbuđnim poljem (3)

$$F(s) = \frac{\omega(s)}{e_u(s)} \bigg|_{m_t(s)=0} = \frac{\frac{I_{a0}R_a - k_{e\phi}I_{u0}\Omega_0}{R_u k_{e\phi}I_{u0}^2} + s \frac{L_a I_{a0}}{R_u k_{e\phi}I_{u0}^2}}{(1 + sT_u) \cdot (s^2 T_a T_{m0} + sT_{m0} + 1)} \quad (38)$$

$$T_u = \frac{L_u}{R_u}$$

vremenska konstanta uzbuđnog kruga

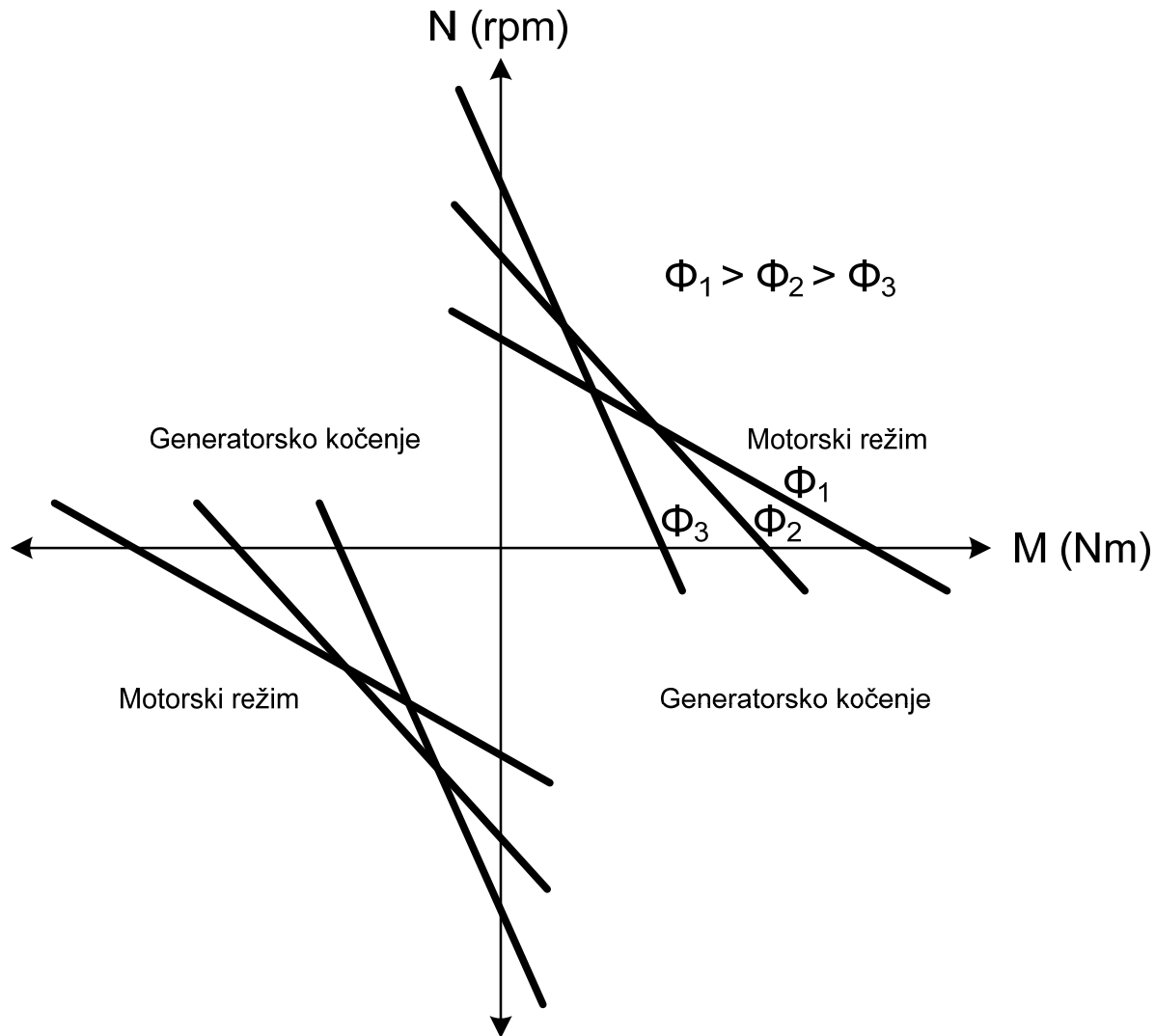
$$T_a = \frac{L_a}{R_a}$$

vremenska konstanta armaturnog kruga

$$T_{m0} = \frac{JR_a}{C_e C_m I_{u0}^2}$$

elektromehanička vremenska konstanta

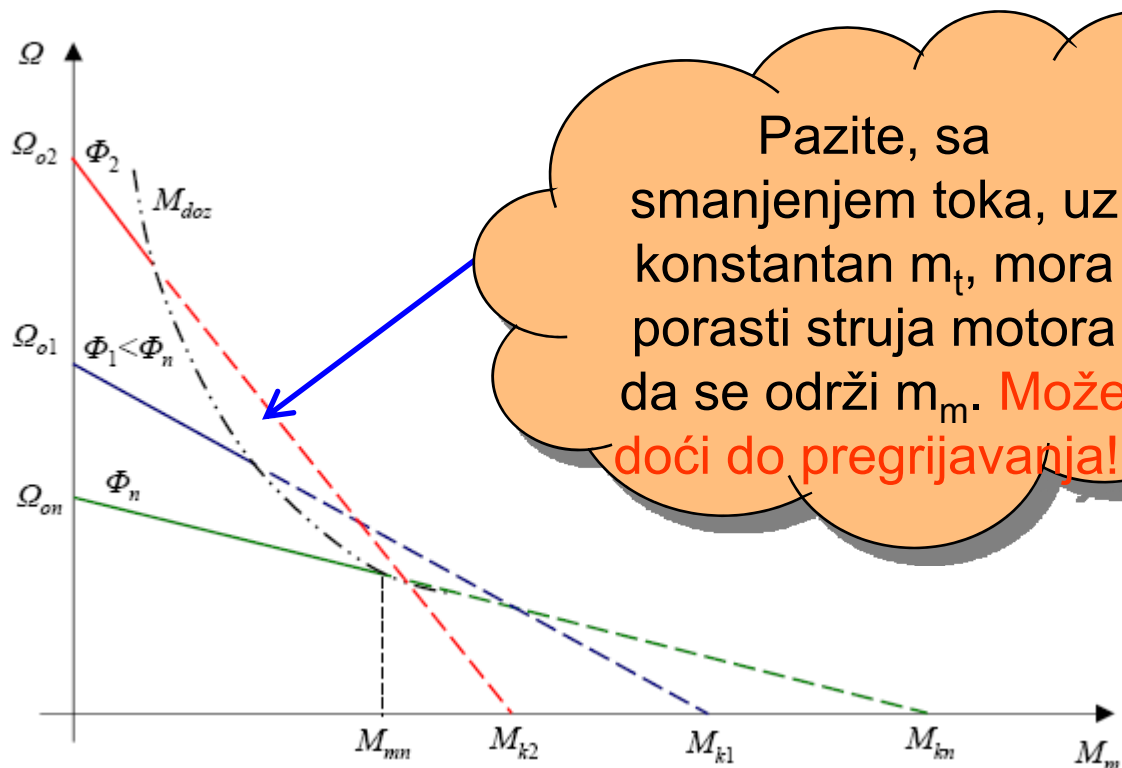
DC motor – upravljanje uzбудnim poljem (3)



Statičke karakteristike istosmjernog stroja upravljano uzbudnim poljem

DC motor – **upravljanje uzbuđnim poljem (3)**

- Promjenom magnetskog toka mijenja se **brzina praznog hoda i nagib pravca**
- Upravljanje je moguće samo u području dozvoljenog momenta M_{doz} . Naime, s povećanjem brzine vrtnje, tj smanjenjem magnetskog toka, **smanjuje se i moment stroja m_m** , pa bi uz konstantno opterećenje stroja **rasla struja armature**.
- Ako struja armature pređe nazivnu vrijednost dolazi do **dodatnog termičkog opterećenja stroja** što se mora spriječiti.



Pazite, sa smanjenjem toka, uz konstantan m_t , mora porasti struja motora da se održi m_m . **Može doći do pregrijavanja!!**



DC motor – upravljanje uzбудnim poljem (3)

- Fizikalni opis **uzbudne vremenske konstante** je ekvivalentan opisu armaturne vremenske konstante, s razlikom da se radi o drugom električnom krugu.
- Ako se uspoređuju iznosi vremenskih konstanti uzbudnog i armaturnog kruga može se konstatirati da je $T_u \gg T_a$
- Razlog tomu je što uzbudni namot ima **mnogo zavoja** (vodiči manjeg presjeka, veliki R_u) što rezultira većim induktivitetom u odnosu na armaturni namot
- Činjenica da uzbudni krug ima znatno veću vremensku konstantu od armaturnog ima za posljedicu **znatno sporije odzive sustava koji se upravlja uzbuđom u odnosu na onaj koji se upravlja armaturnim naponom.**
- Na prethodnom slajdu se vidi da se smanjenjem magnetskog toka povećava brzina vrtnje. Slijedi da bi brzina vrtnje uz tok $\Phi=0$ bila beskonačno velika. To je samo matematička interpretacija, fizikalno to znači da stroj neće krenuti ukoliko stoji, a magnetski tok nije formiran.

DC motor – upravljanje uzbuđnim poljem (3)

- Ako je stroj u vrtnji, a magnetski tok padne na nulu, brzina vrtnje počinje rasti. Brzina može narasti do granica izdržljivosti mehanike stroja. Ovaj fenomen poznat je pod nazivom „pobjeg stroja“
- Upravljanje brzinom vrtnje promjenom uzbuđnog polja primjenljivo je samo u slučajevima malih opterećenja; $M_t \ll M_n$.
- Uzrok tome je što se, uz smanjenje toka smanjuje moment motora. Pod pretpostavkom da se teret po iznosu ne mijenja, struja armature mora porasti da bi moment motora ostao nepromijenjen. **VAŽNO!!!**
- Ako struja pri tome poraste preko nazivnog iznosa, to stanje se ne smije zadržati trajno jer će doći do pregrijavanja stroja.
- Može se zaključiti da se polje mijenja u granicama $\Phi_{min} < \Phi < \Phi_n$
- Sa smanjenjem uzbuđnog toka smanjuje se i dozvoljeni moment s kojim se stroj može opteretiti i on iznosi

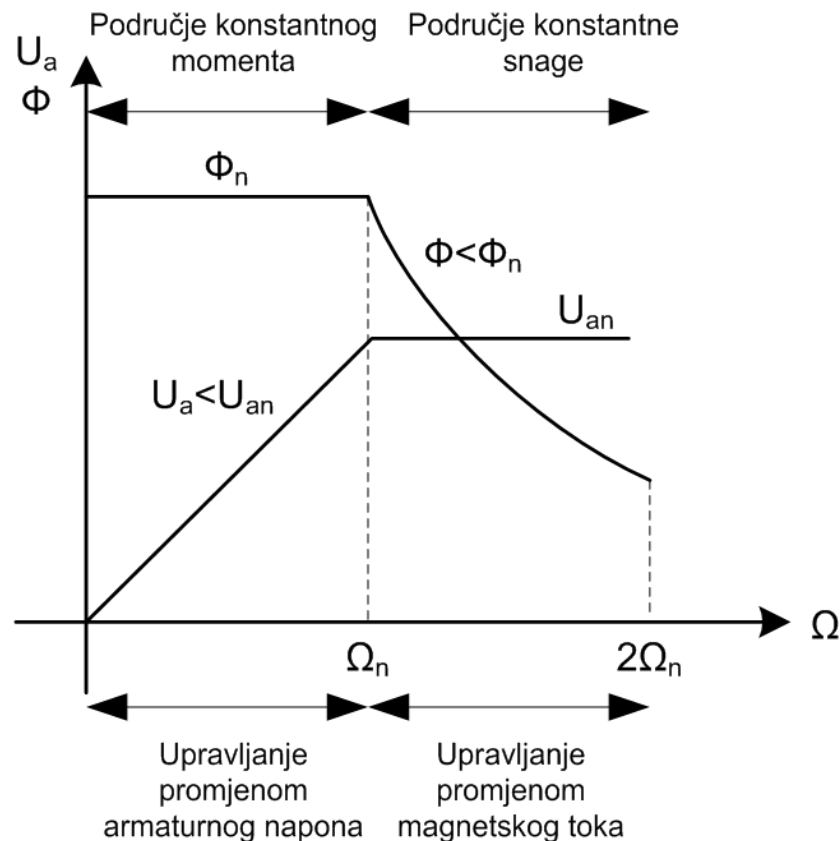
$$M_{doz} = C_m \cdot \Phi_{min} \cdot I_{an} \quad (39)$$

- Pri tome je dozvoljena snaga konstantna

$$P_{doz} = M_{doz} \cdot \Omega \quad (40)$$

DC motor – statičke karakteristike stroja upravljanog naponom armature i uzбудnim poljem (kombinirano upravljanje)

- Promjena napona armature koristi se za upravljanje brzinom vrtnje do nazivnog iznosa, a uzbuda se pri tome drži konstantnom.
- Promjena magnetskog (uzbudnog) polja koristi se za upravljanje brzinom vrtnje iznad nazivnog iznosa, a pri tome se napon armature drži konstantnim (nazivnog iznosa).



DC motor – statičke karakteristike stroja upravljanog naponom armature i uzбудnim poljem (kombinirano upravljanje)

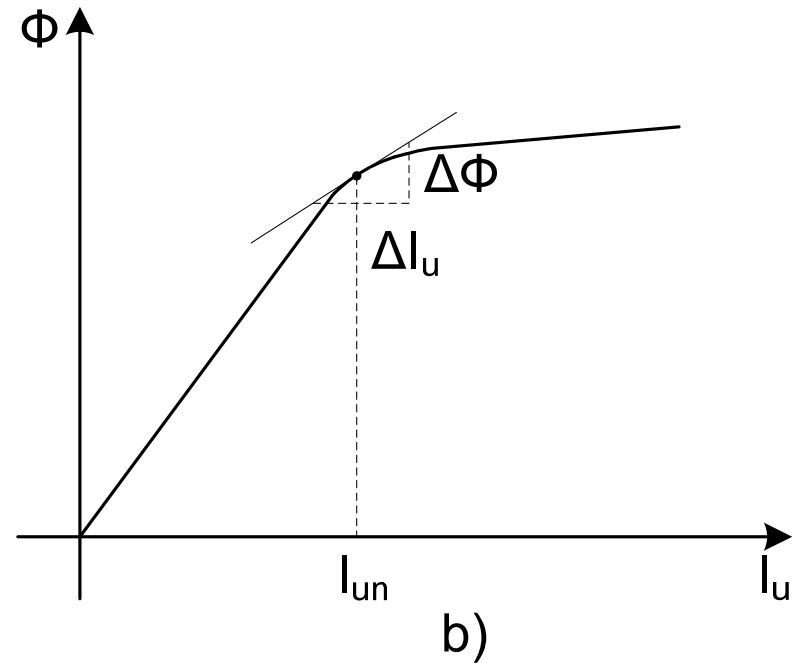
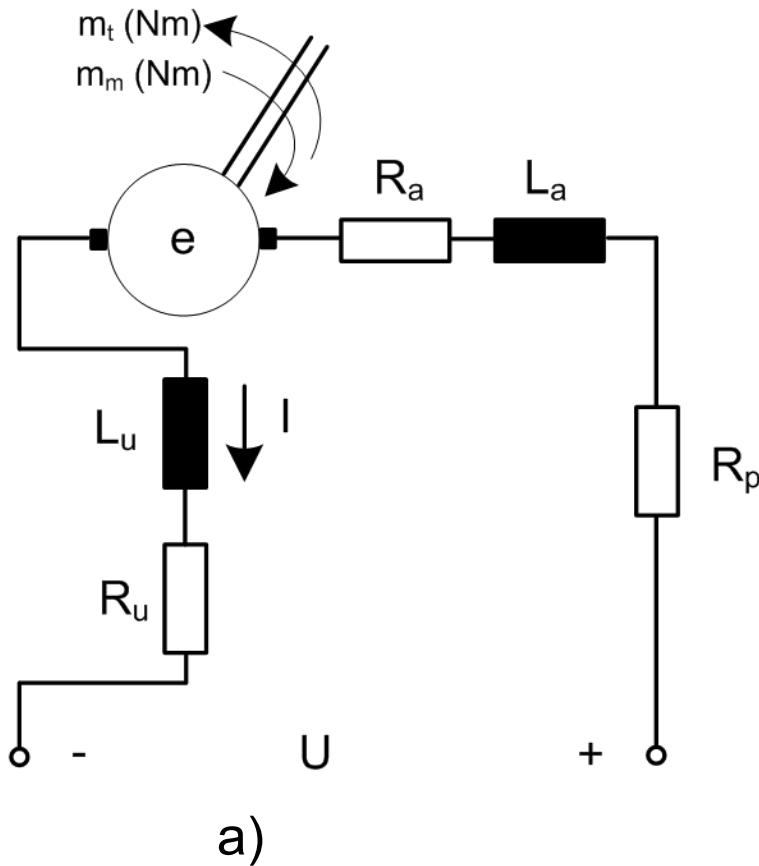
- Promjena smjera vrtnje nezavisno uzbuđenog istosmjernog stroja (u daljnjem tekstu *reverziranje*) moguća je
 - promjenom polariteta armaturnog napona uz zadržan polaritet napona uzbuđivanja
 - promjenom polariteta napona uzbuđivanja uz zadržan polaritet napona armature
- Reverziranje stroja promjenom polariteta uzbuđnog napona se u praksi rijetko koristi. Razlog tome je mnogo veća vremenska konstanta uzbuđnog kruga T_u u odnosu na vremensku konstantu armaturnog kruga T_a .
- U uzbuđnom krugu je akumulirana znatna količina magnetske energije, što ovaj proces čini relativno sporim u odnosu na promjenu armaturnog napona
- Prilikom promjene polariteta uzbuđnog napona dolazi do velikih propada momenta stroja koji mogu potrajati i do 1 s za veće strojeve, što je za neke radne mehanizme neprihvatljivo
- Zbog ovih razloga za reverziranje istosmjernih strojeva se koristi metoda promjene polariteta armaturnog napona

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzbudom (1)

- Istosmjerni strojevi sa serijskom uzbudom se razlikuju od nezavisno uzbuđenih po konstrukciji i spoju uzbudnog kruga.
- Kod ovih strojeva uzbudni namot je spojen u seriju s armaturnim namotom i kompletan krug se napaja iz jednog izvora napajanja.
- U prošlosti su ovi strojevi bili nezamjenljivi u primjeni kao motori u električnoj vuči zbog svojih prirodnih karakteristika (veliki moment na malim brzinama)
- Motori su najčešće bili reda veličine 200 kW za gradsku laku željeznicu, te 1 MW za klasične željezničke lokomotive.
- Razvojem sklopova energetske elektronike (usmjerivači) ovi strojevi gube na važnosti jer se iste vučne karakteristike mogu postići prikladnim upravljanjem nezavisno uzbuđenih strojeva.
- Strojevi sa serijskom uzbudom zadržali su se u upotrebi u pogonima male snage u širokoj potrošnji kao univerzalni motori (kolektorski motori) koji se mogu napajati iz istosmjernih ili izmjeničnih izvora.

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzbudom (2)

matematički model



Nadomjesna električna shema istosmjernog stroja sa serijskom uzbudom a) i određivanje koeficijenta pojačanja k_ϕ struje uzbude

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (3)

matematički model

Jednadžbe koje opisuju istosmjerni stroj sa serijskom uzбудom su slijedeće:

$$(R_a + R_u) \cdot i + (L_a + L_u) \cdot \frac{di_a}{dt} + e = u$$

$$(R_a + R_u) = R$$

$$e = k_e \cdot \phi \cdot n$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_m - m_t$$

$$m_m = k_m \cdot \phi \cdot i$$

$$\phi = f(i_u)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega$$

U ustaljenom stanju za brzinu vrtnje vrijedi

$$N = \frac{U - I \cdot R}{k_e \Phi} \quad (42)$$

U ustaljenom stanju za moment stroja vrijedi

$$M_m = k_m \cdot \Phi \cdot I = k_m \cdot k_\phi \cdot I^2 \quad (43)$$

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzbudom (4)

matematički model

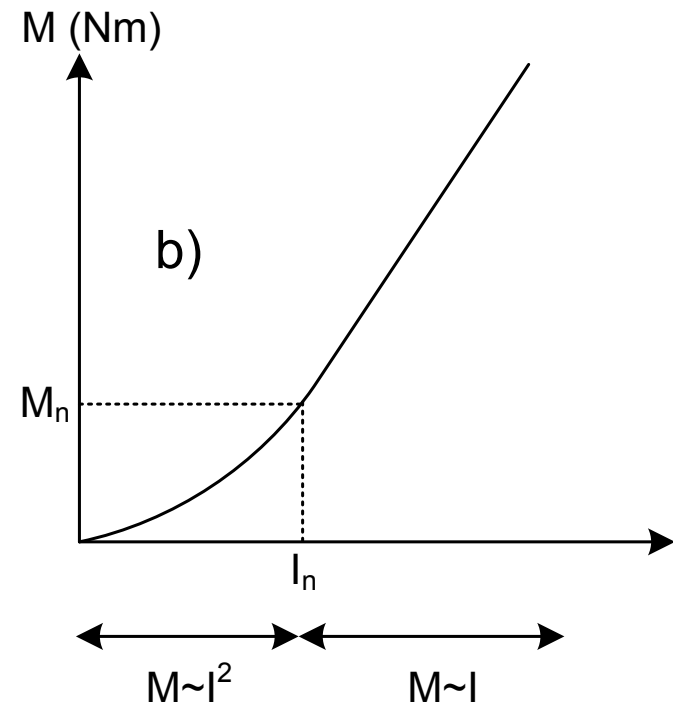
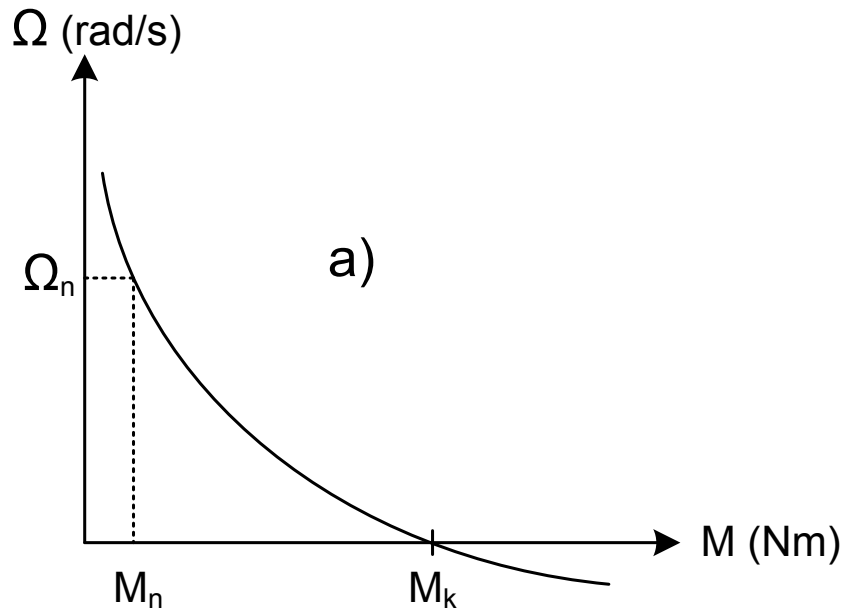
Iz izraza (42) i (43) za brzinu vrtnje u ustaljenom stanju vrijedi:

$$N = \frac{U - I \cdot R}{k_e \cdot \Phi} = \frac{U}{k_e \cdot \sqrt{\frac{k_\phi \cdot M_m}{k_m}}} - \frac{R}{k_e \cdot k_\phi} \quad (44)$$

- Na svakom dijelu karakteristike magnetiziranja koeficijent k_ϕ je drugog iznosa. S povećanjem struje magnetiziranja iznos koeficijenta se smanjuje.
- Stroj sa serijskom uzbudom može razviti **veliki moment pri malim brzinama vrtnje**, što ga čini pogodnim odabirom za primjene kao što su **vučni pogoni**.
- **U nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja moment stroja se mijenja proporcionalno kvadratu struje**, prema izrazu (43)
- **U zasićenom i visokozasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja magnetski tok se mijenja proporcionalno sa strujom**, ali sa znatno manjim k_ϕ . Tok je praktički konstantan pa se **moment mijenja proporcionalno sa strujom**

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (5)

mehaničke karakteristike



Mehanička a) i elektromehanička b) karakteristika istosmjernog stroja sa serijskom uzбудom

- Kod manjih opterećenja momentna je karakteristika hiperbola a kod većih (zasićenje) prelazi u pravac jer tok Φ_u postaje konstantan. Ta je karakteristika oblikom slična onoj kod nezavisno uzbuđenog motora.

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzbudom (6)

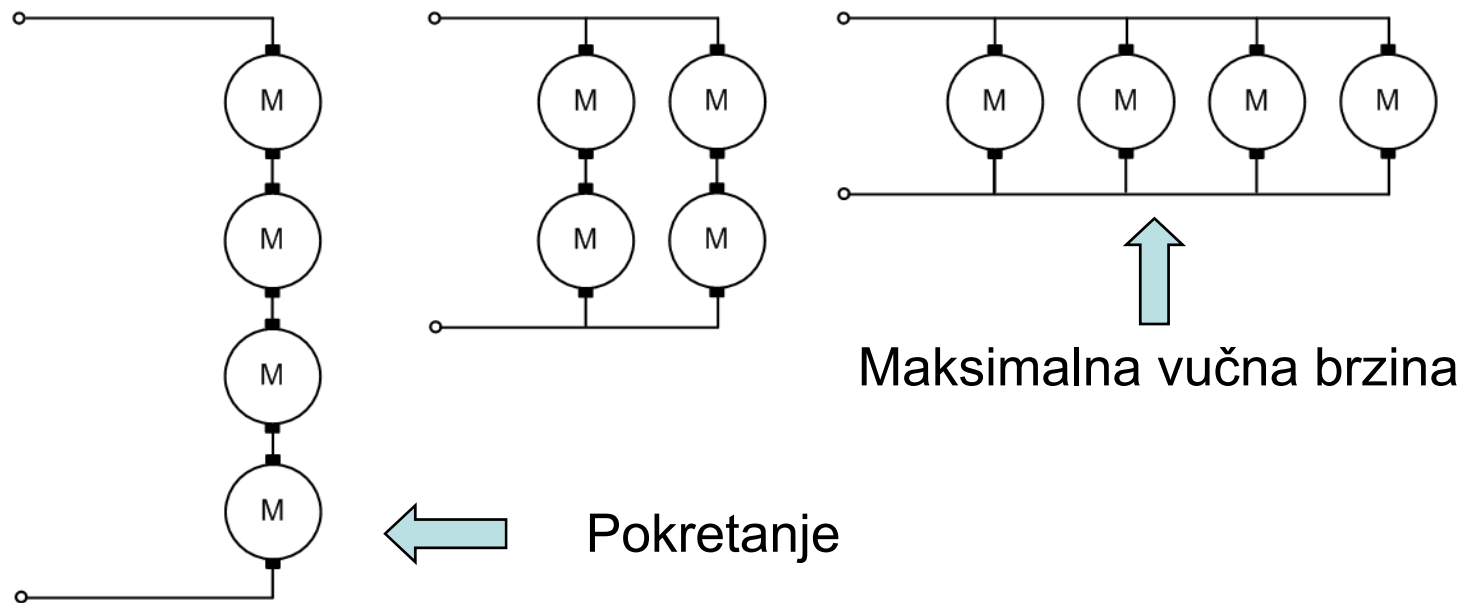
upravljanje brzinom vrtnje

- Brzina vrtnje istosmjernog serijskog stroja može se mijenjati
 - Promjenom napona izvora napajanja
 - Dodavanjem predotpora u strujni krug
 - Šentiranjem uzbudnog namota (smanjenje uzbude, slabljenje polja)
 - Šentiranjem armaturnog namota
- Napon napajanja moguće je mijenjati i primjenom električnih energetske pretvarača, što se danas uglavnom i radi

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (7)

upravljanje brzinom vrtnje

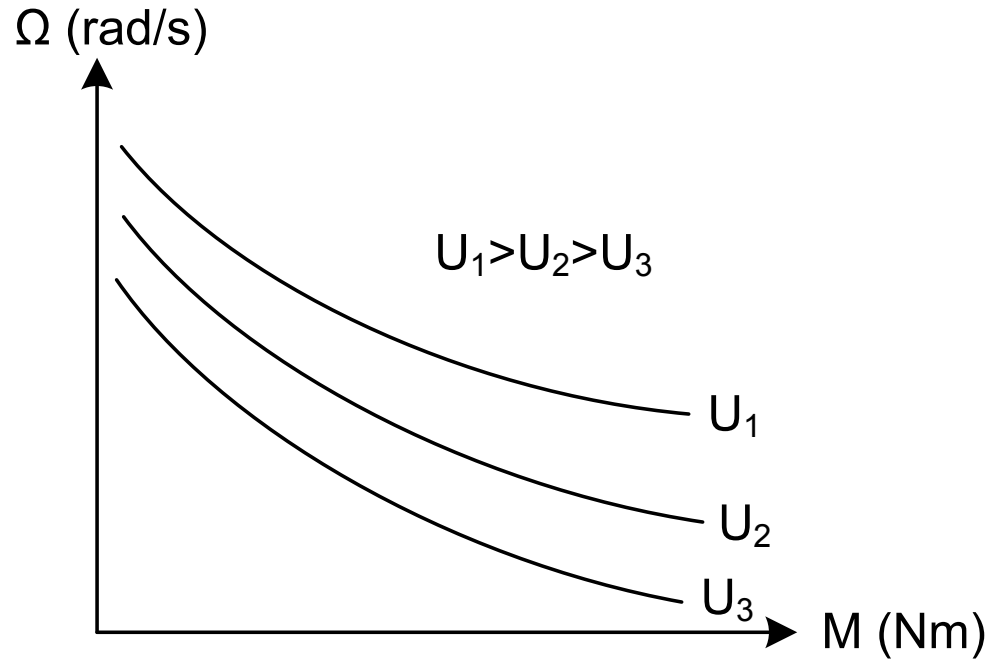
- **Promjena napona napajanja** moguća je prespajanjem više motora, što je tipičan primjer u električnoj vuči , [1]-[3]



- Kod pokretanja lokomotive svi motori se spoje u seriju, a kod većih brzina motori se prespajaju u paralelu (veći napon napajanja)
- U primjenama gdje se ne koriste višemotorni pogoni, promjena napona se mora osigurati učinkim pretvaračima

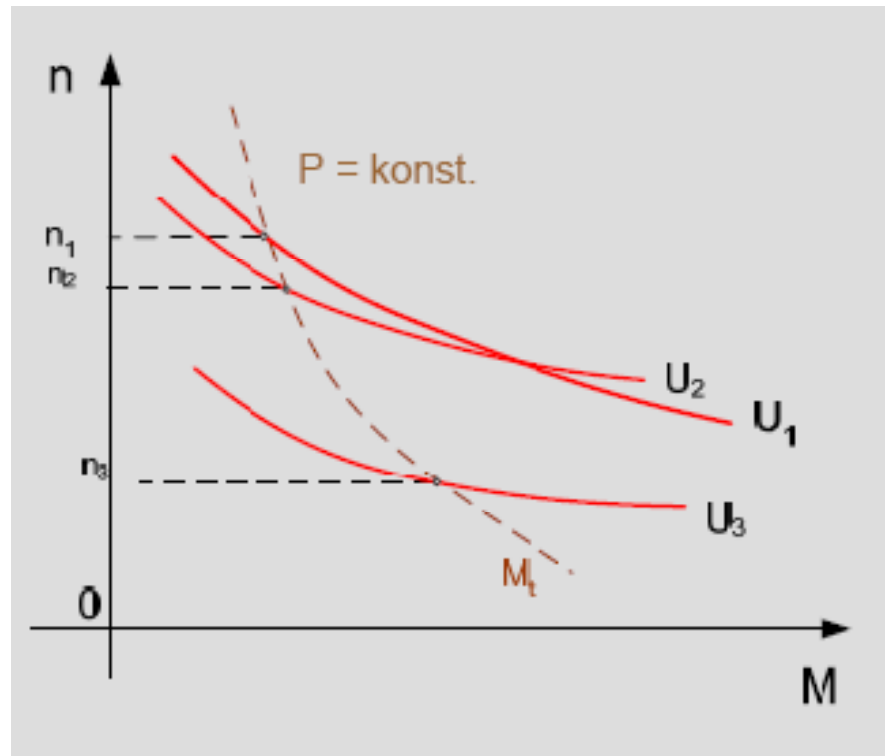
Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (8)

upravljanje brzinom vrtnje



Karakteristike stroja sa serijskom uzбудom za različite iznose napona na stezaljkama stroja

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (9) upravljanje brzinom vrtnje

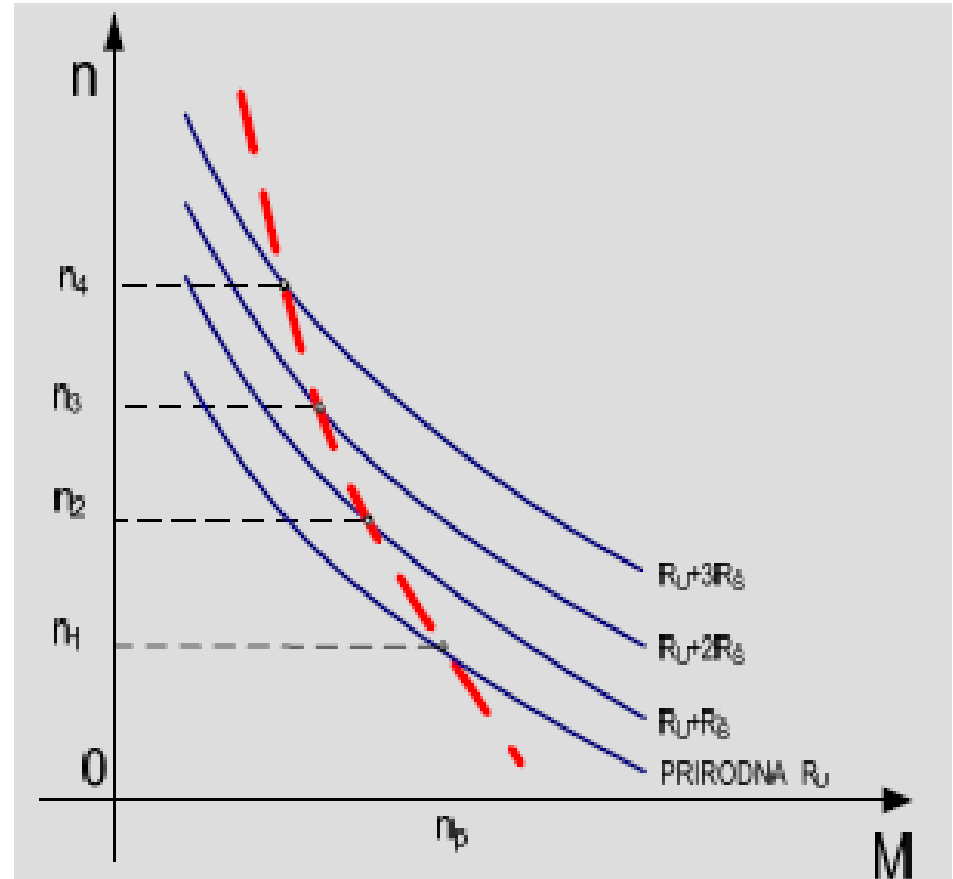
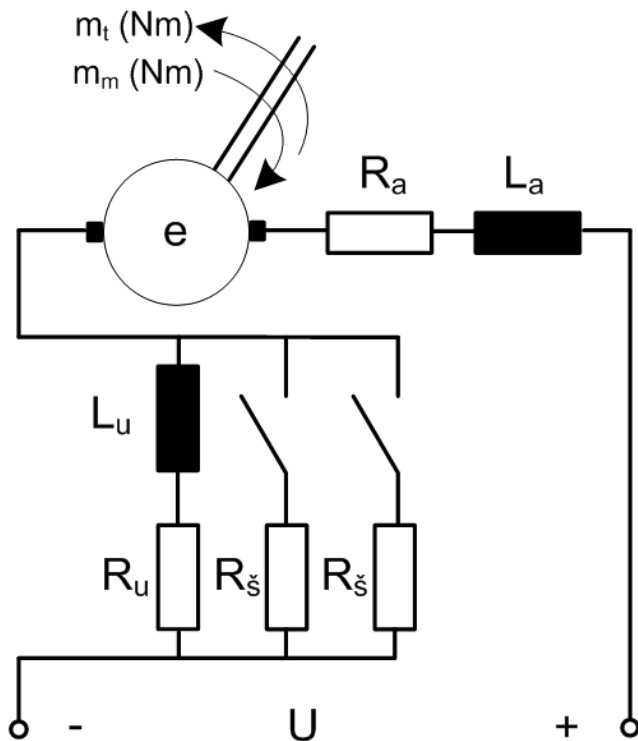


Karakteristike stroja sa serijskom uzбудom za različite iznose napona na stezaljkama stroja, opterećenog radnim mehanizmom konstantne snage, [1]

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzbudom (10)

upravljanje brzinom vrtnje

- Promjena uzbudnog toka** moguća je dodavanjem otpora paralelno uzbudnom namotu (tzv. šentiranje). **Karakteristično za područje vuče!**



Šentiranje uzbude istosmjernog stroja sa serijskom uzbudom, shema i karakteristike, [1]

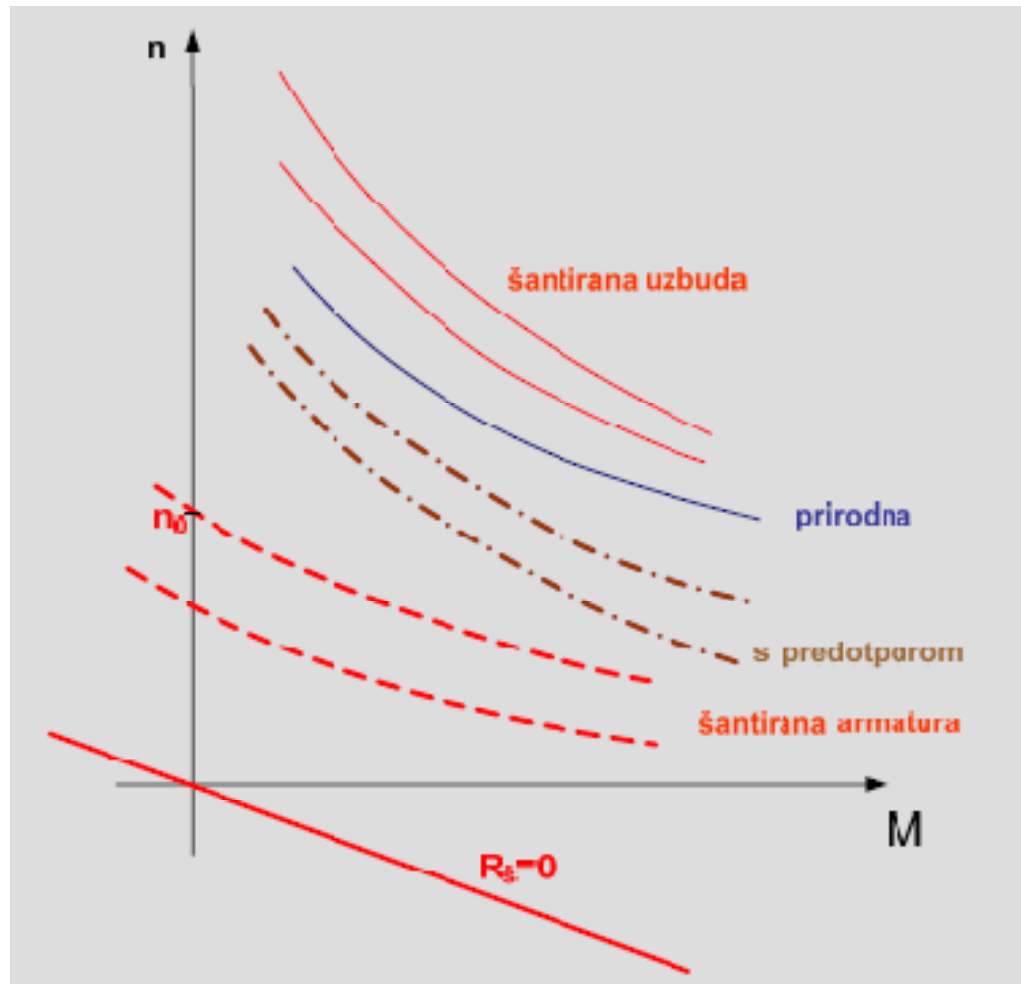
Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (11)

upravljanje brzinom vrtnje

- Dodavanjem otpora u paralelu s uzбудnim namotom smanjuje se iznos struje koja prolazi uzбудnim krugom čime se postiže efekt smanjenja magnetskog polja u stroja.
- Smanjenjem magnetskog polja povećava se brzina vrtnje stroja (za isti moment tereta), kao što je bio slučaj i kod nezavisno uzbuđenog stroja.
- Dodavanje otpora je jednostavan način upravljanja brzinom vrtnje, ali istovremeno je i energetski neučinkovit !!!

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (12)

upravljanje brzinom vrtnje



Mehaničke karakteristike istosmjernog stroja sa serijskom uzбудom, postignute dodavanjem otpornika, [1]

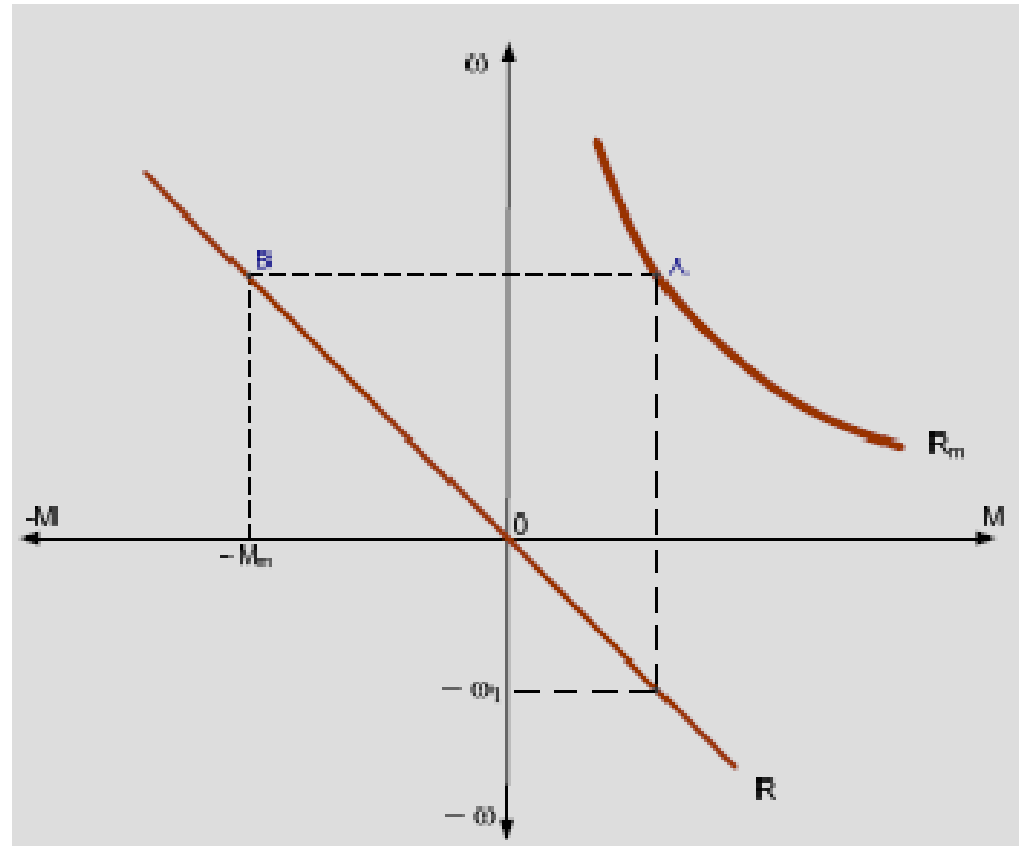
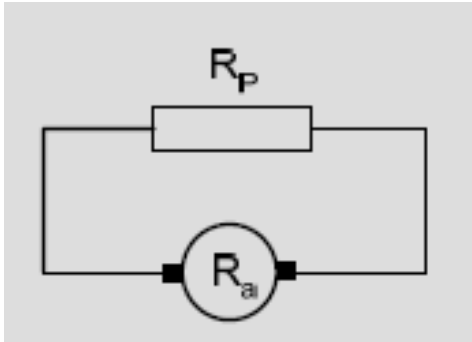
Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (13)

kočna stanja

- Kod Istosmjernog stroja sa serijskom uzбудom, nije moguće **generatorsko kočenje**, brzina ne može biti veća od brzine praznog hoda – (tzv. *pobjeg stroja*)
- Moguća vrsta kočenja su:
 - **elektrodinamičko kočenje** (na otpore), samouzbudnim kočnim spojem ili nezavisnom uzбудom)
 - **protustrujno kočenje**
- Na slici (prethodni slajd, karakteristika označena sa " R_s ") prikazuje elektrodinamičko kočenje, pri čemu

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (14)

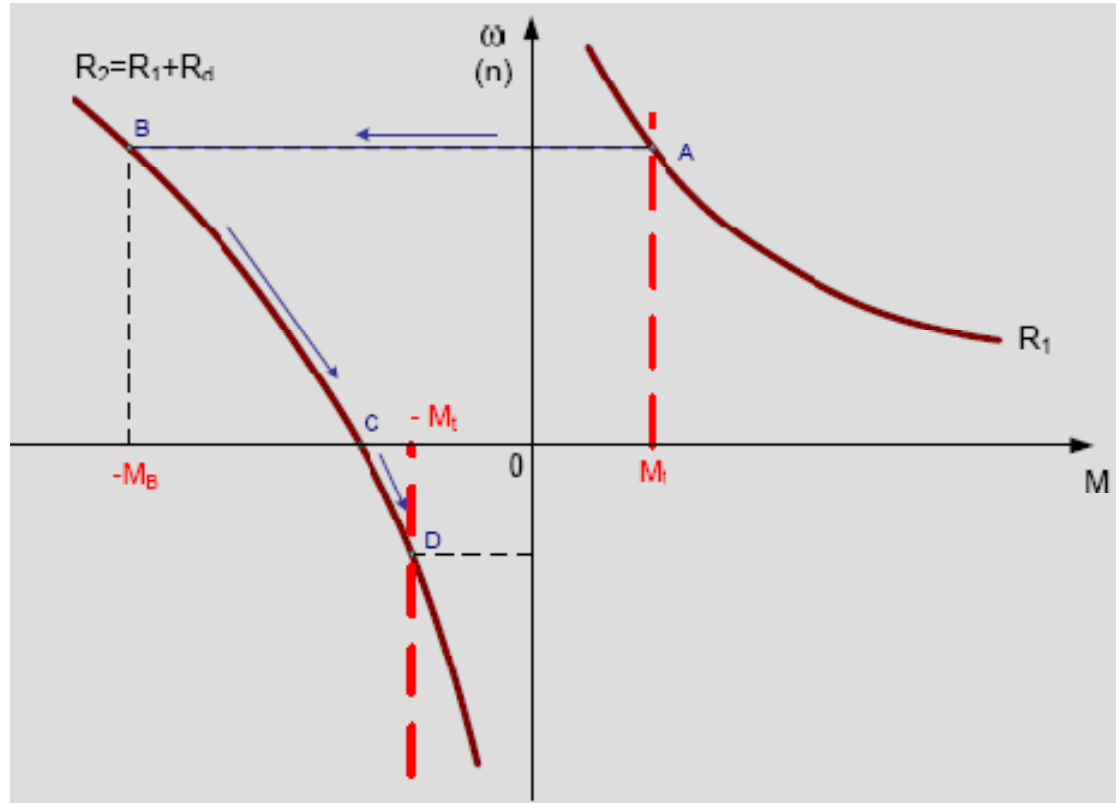
kočna stanja-elektrodinamičko kočenje



Samouzbudni kočni spoj za elektrodinamičko kočenje (lijevo) i karakteristika kočenja (desno), [1]

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (15)

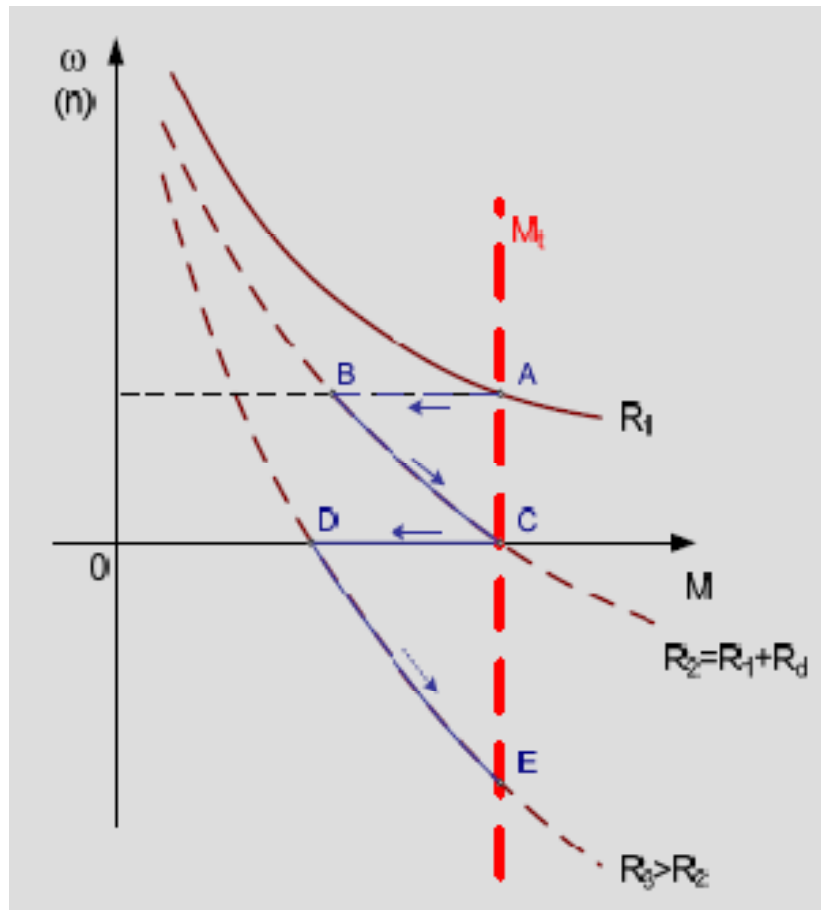
kočna stanja-protustrujno kočenje



Protustrujno kočenje stroja sa serijskom uzбудom uz reaktivni moment tereta, [1]. Objasnite kako se postiže kočenja i faze kočenja !

Istosmjerni strojevi sa serijskom uzбудom (15)

kočna stanja- kočenje uz predotpore



Kočenje stroja sa serijskom uzбудom dodavanjem predotpore (vidi slajd 38) u armaturni krug uz potencijalni moment tereta, [1]. Objasnite kako se postiže kočenja i faze kočenja !

LITERATURA

1. D.Ban, *Elektromotorni pogoni sa serijski uzbuđenim motorom*, Predavanja UMP, 2007/08, FER-ZESA, Zagreb
2. W. Leonhard, *Control of electrical drives*, Springer, 1996.
3. B. Jurković, *Elektromotorni pogoni*, Školska knjiga, Zagreb, 1984.

KRAJ