

ELEKTRIČNE MAŠINE

UVOD

- Električne mašine (motori i generatori) su uređaji koji pretvaraju električnu energiju u mehaničku i obrnuto.
- Prema vrsti kretanja pokretnog dela, mogu biti obrtne ili linearne.
- Rad električnih mašina zasniva se na četiri osnovna principa delovanja:

1. Elektromagnetno

2. Motorno

3. Generatorsko

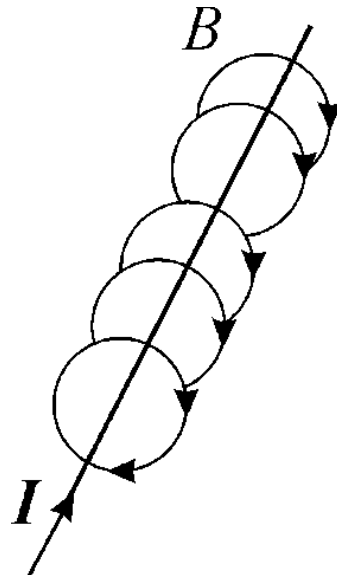
4. Transformatorsko

ELEKTRIČNE MAŠINE

UVOD

1. Elektromagnetno delovanje

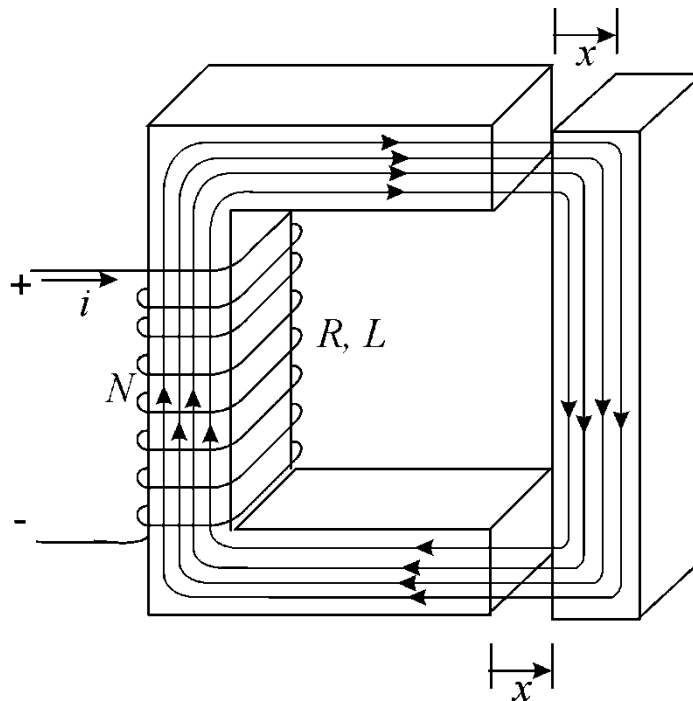
- ✓ Struja koja protiče kroz provodnik izaziva magnetno polje, koje ga okružuje – Bio-Savarov zakon.
- ✓ Uticaj polja na druge provodnike sa strujom i magnete unutar prostora njegovog delovanja - Lorencova i Amperova sila.
- ✓ Kada se promeni smer struje, menja se i smer polja.



ELEKTRIČNE MAŠINE

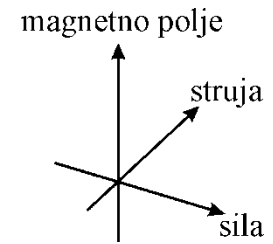
UVOD

- Polje se u električnim mašinama usmerava i njegova jačina povećava (i do nekoliko hiljada puta) prolaskom kroz feromagnetno jezgro.
- ✓ Ukoliko magnetno polje zamišljamo pomoću magnetnih linija sila koje se šire u prostoru, tada je fluks broj linija koji prolazi kroz neku zatvorenu konturu.
- ✓ Samoinduktivnost namotaja (kalema) je mera koliko se magnetnog fluksa proizvede po jedinici struje ($L = \Psi / I$).



ELEKTRIČNE MAŠINE

UVOD



2. Motorno delovanje

Na provodnik sa strujom, koji se nalazi u magnetnom polju (koje je proizvedeno drugim strujama ili stalnim magnetom), deluje mehanička sila, normalna i na pravac struje i na pravac polja.

Sila menja smer ako se promeni ili smer struje ili smer polja.

Sila je proporcionalna jačini struje, jačini polja i dužini provodnika: $F=(I \times B) \cdot l$.

U praksi, provodnici se smeštaju u žlebove da bi se sprečilo njihovo smicanje i da bi se oni čvršće fiksirali za masu rotora, na koji moment treba da se prenese. Time je postignuto:

1. Namotaji više ne mogu da se smaknu
2. Smanjen je vazdušni procep, manja magnetska otpornost, a to znači da je za isti fluks manja mps ($\Psi=F/R\mu$)
3. Fluks pretežno prolazi kroz zupce, a ne kroz žlebove, pa je smanjena magnetna indukcija i sila na provodnike koja je sa njom srazmerna.

Dakle, međusobno dejstvo dva polja od kojih jedno potiče od induktora a drugo od indukta, izaziva elektromagnetsku silu na zupce, dok je sila na provodnike zanemarljiva.

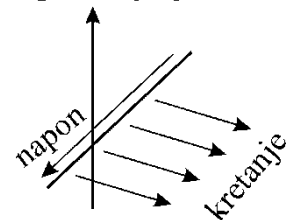
ELEKTRIČNE MAŠINE

UVOD

Nije adekvatno tumačiti stvaranje momenta mašine preko Lorencove sile, već stvaranje momenta treba posmatrati kao međusobno dejstvo dva elektromagneta, kao privlačenje raznoimenih i odbijanje istoimenih polova. Dakle, međusobno dejstvo dva polja, jednog koje potiče od induktora, a drugog od indukta izaziva elektromagnetnu silu na zupce, dok je sila na provodnike zanemarljiva.

3. Generatorsko delovanje

- ✓ U električnom provodniku koji se kreće u magnetnom polju indukuje se napon, što se izražava preko indukovane elektromotorne sile (ems).
- ✓ Efekat indukovanja je maksimalan kad su provodnik, kretanje i polje međusobno normalni: $E = (v \times B) \cdot l$.
- ✓ U svim električnim mašinama, bez obzira da li rade kao generatori ili motori, u većini radnih režima, namotaj rotora se kreće i kroz njega protiče struja. Zbog toga su generatorsko i motorno delovanje nerazdvojivi i javljaju se istovremeno.



ELEKTRIČNE MAŠINE

UVOD

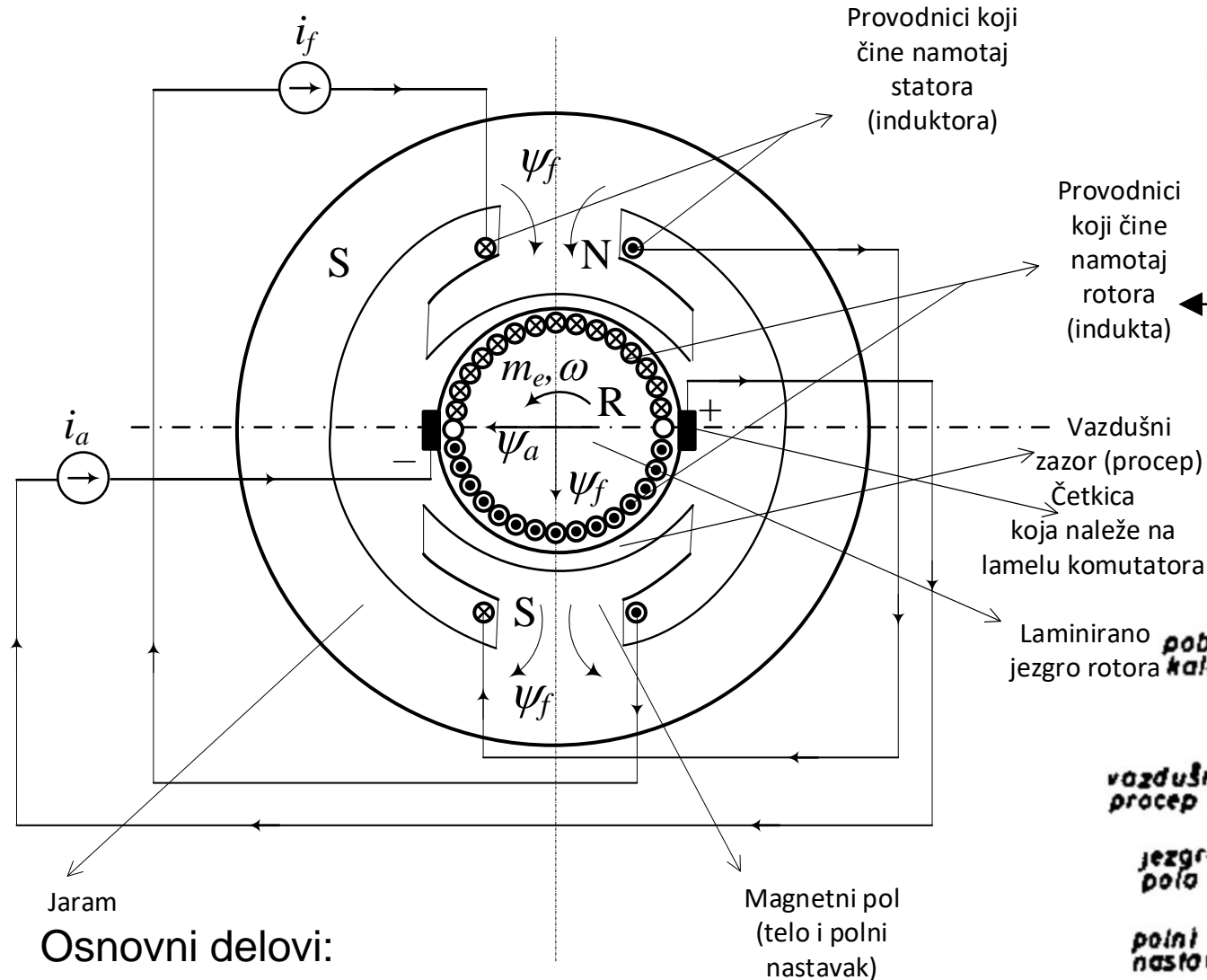
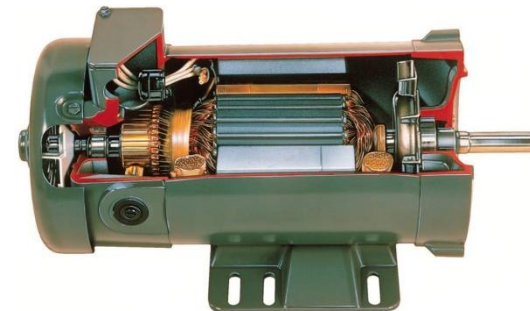
4. Transformatorsko delovanje

- ✓ Promenljiva struja (iz naizmeničnog ili impulsnog naponskog izvora) koja protiče kroz namotaj (kalem) stvara magnetno polje čiji se polaritet i amplituda menjaju u vremenu.
- ✓ Takvo magnetno polje indukuje napon (ems) u svakom namotaju koji obuhvati. Amplituda indukovane ems zavisi od međusobne induktivnosti između namotaja i brzine promene struje namotaja koji proizvodi magnetno polje.

$$V_2 = L_{12} \frac{di_1}{dt}$$

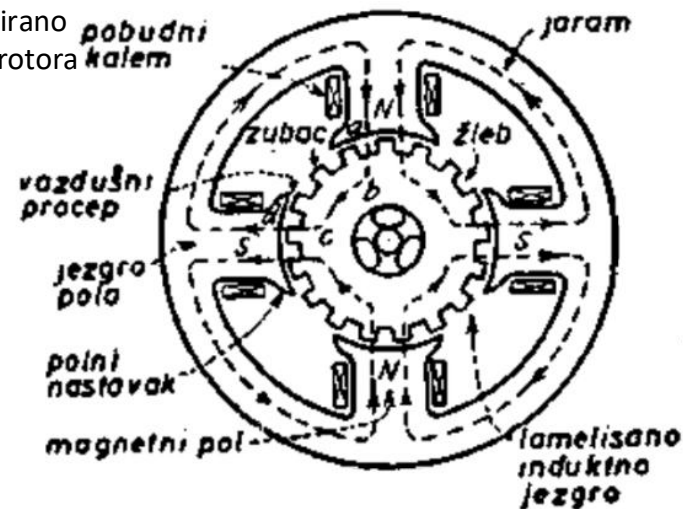
MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU

Poprečni presek motora:



q – osa ili poprečna osa

d – osa ili uzdužna osa



Osnovni delovi:

S – stator;
 N, S – glavni polovi sever i jug;
 R – rotor;

MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU

primena

- MJS su dominirali u oblasti primene pogona sa promenljivom brzinom preko jednog veka, a i danas predstavljaju vrlo čest izbor ako se zahteva rad regulisanog elektromotornog pogona u vrlo širokom opsegu brzina. To je posledica njihovih odličnih radnih karakteristika i karakteristika upravljanja.
- Prvi njihov bitan nedostatak je mehanički komutator, koji predstavlja ograničenje u pogledu snage i brzine motora, utiče na povećanje inercije i aksijalne dužine i zahteva periodično održavanje.
- Drugi ozbiljan problem, koji nastaje zbog prirode konstrukcije MJS, je hlađenje. Praktično sva električna snaga prolazi kroz namotaj rotora, te i većina gubitaka nastaje u rotoru. Motori zatvorene konstrukcije se hlade prisilnom ventilacijom spoljnog oklopa, a prenos toplotne energije sa rotora na stator se rešava unutrašnjim ventilatorom. Kako se ovim načinom toplotna energija teže odvodi iz rotora, ne može se postići povoljna snaga motora za datu veličinu motora. Ako se motor hladi direktnom prisilnom ventilacijom kroz vazdušni procep, mora biti otvorenije konstrukcije pa vlaga, prašina i razne ostale materije mogu dospeti u motor i izazvati probleme, pogotovo na četkicama i u ležajevima.
- Kod motora za naizmennu struju koji se napajaju iz energetskih pretvarača, eliminisan je komutator po cenu složenijeg upravljanja (dok se nisu dovoljno razvile i dok nije dovoljno pala cena komponenti energetske elektronike, nisu mogle motori za NS da zamene MJS).

MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU

primena

- Mašine za jednosmernu struju (MJS) su vrlo rasprostranjene. Često se koriste za elektromotorne pogone promenljive brzine, zbog vrlo jednostavne regulacije brzine. Iako su druge vrste motora u poslednjih nekoliko decenija postale ozbiljan konkurent za upotrebu u pogonima promenljive brzine, MJS se i dalje koriste u sledećim oblastima:

a) mali napon:

automobili i ostala drumska vozila (anlaser, brisači, ventilacija kabine, podizači prozora, pomeranje sedišta),

uređaji kućne elektronike i zabave (DVD i CD plejeri, računari), igračke.

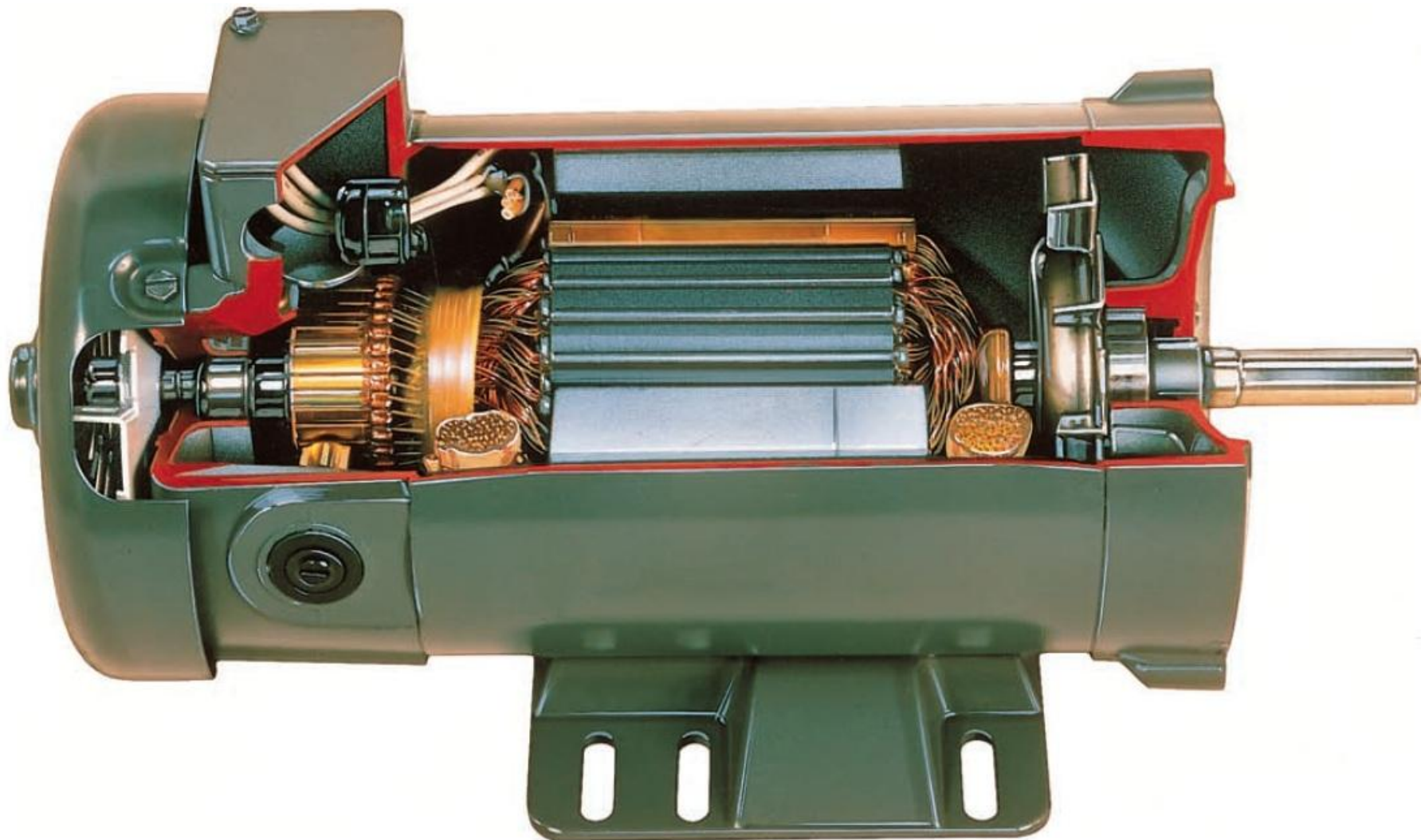
b) srednji i viši napon:

električna vuča (trolejbusi, tramvaji, vozovi, viljuškari i unutrašnji transport).

MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU SA STALNIM MAGNETOM

- Namotaj statora (induktora), ili pobudni namotaj (stvara pobudni fluks u mašini) može se zameniti stalnim magnetima, koji obezbeđuju magnetizaciju celog magnetnog kola.
- Klasični feritni i Al-Ni-Co magneti daju srednju jačinu magnetnog polja i već decenijama se koriste u manjim motorima.
- U poslednjih dve decenije, nova tehnologija magnetata od tzv. retkih zemalja (Samarijum-Cobalt i Neodimijum-Bor-Fe), omogućila je dostizanje većih jačina magnetnog polja i vrlo visoke gustine magnetne energije. Ovi magneti su stoga manji po zapremini pa je cena ugradnje prihvatljiva. Prednost ovih magnetata je što je nepoželjno razmagnetisavanje, koje se može javiti pri startu i pri kvarovima, svedeno na minimum. Loša strana primene je visoka cena magnetata, ali zbog postizanja jačeg magnetnog polja ceo motor postaje manji (za istu snagu), što ublažava porast cene.
- Stalni magneti su pogodni za motore malih snaga, gde je izrada i ugradnja malih pobudnih namotaja komplikovana i relativno skupa. Moderni magneti su idealni za servo-motore, gde su neophodne visoke dinamičke performanse:
 - otpor i induktivnost rotora su vrlo mali pa se omogućavaju vrlo brze promene struje tj. momenta.
 - smanjene dimenzije rotora, pogotovo pri specijalnim konstrukcijama rotora, omogućavaju izradu mašina sa izuzetno malim momentom inercije, što doprinosi postizanju visokih ubrzanja i usporenja.
 - mehaničke karakteristike motora sa stalnim magnetima slične su karakteristikama motora sa nezavisnom pobudom.

Slike motora za jednosmernu struju







РСФСР
ИЗЪЯСКИИ СОВНАРХОЗ
УИП
№ В ОД
кВт
А
об/мин вес кг
ГОСТ 196 Г

СДЕЛАНО В СССР



Osobine:

- **pogodne mehaničke karakteristike;**
- **jednostavno upravljanje;**
- **složena konstrukcija (komutator);**
- **potrebno periodično održavanje;**
- **mala preopteretljivost (kompenzacioni namotaj) ;**
- **ograničena maksimalna brzina.**

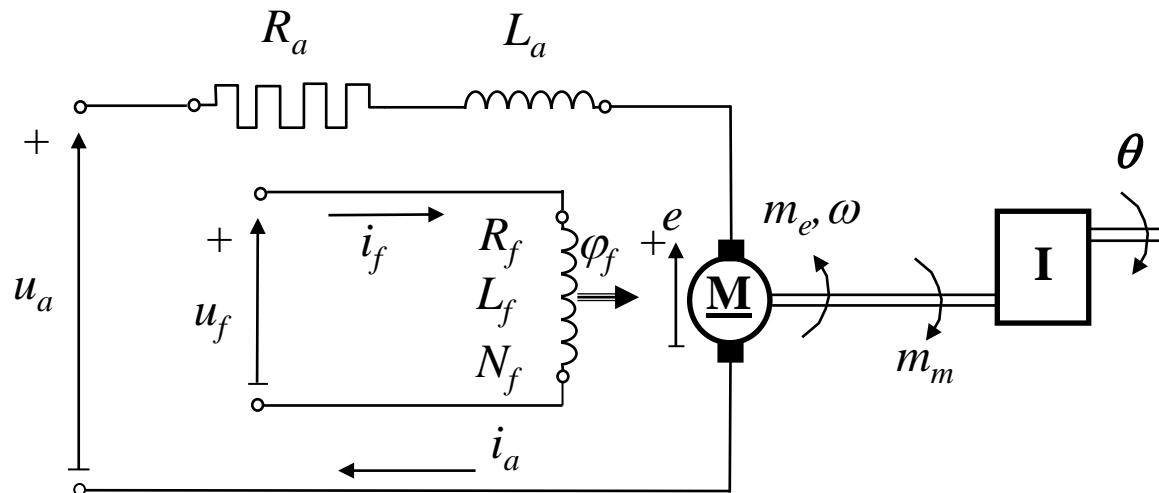
Primena:

- **regulisani pogoni;**
- **električna vuča.**

POGON SA MOTOROM ZA JEDNOSMERNU STRUJU

NEZAVISNA POBUDA

Uprošćena, principijelna šema:



Matematički model, sistem jednačina:

diferencijalne jednačine:

$$L_a \frac{di_a}{dt} = u_a - e - R_a i_a \quad (1)$$

$$\frac{d[L_f (i_f) \cdot i_f]}{dt} = c \frac{d\varphi_f}{dt} = u_f - R_f i_f \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_e - m_m \quad (3)$$

$$I \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4)$$

Možemo smatrati da se moment opterećenja sastoji od stalne vrednosti m_0 i promenljive vrednosti srazmerne trenju.

$$m_m = m_0 + k_\omega \omega$$

algebarske jednačine:

$$e = c \cdot \varphi_f \cdot \omega = \psi_f \cdot \omega$$

ψ_f - "ukupan fluks"

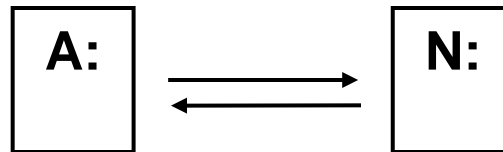
$$m_e = c \cdot \varphi_f \cdot i_a = \psi_f \cdot i_a$$

$$\psi_f = c \cdot \varphi_f = f(i_f) = L_f(i_f) \cdot i_f \quad \text{Karakteristika magnećenja}$$

$\psi_f \approx L_f \cdot i_f$ - kada je mašina nezasićena

NORMALIZACIJA

- uprošćenje jednačina;
- eliminacija dimenzija svih veličina osim vremena;
- svođenje vrednosti svih veličina na isti nivo nezavisno od snage motora.



A: - apsolutni domen;

N: - normalizovani domen.

Postupak normalizacije:

$$x_* = \frac{x}{x_b}$$

indeksi:

- * normalizovana vrednost veličine x ;
- b bazna vrednost za veličinu x .

Napomena: Indeks "*" se može izostaviti ako su sve veličine u izrazu normalizovane, ali se tada to mora naglasiti sa oznakom "N:". U mešovitim izrazima indeks "*" je obavezan.

A: *Jednačine i izrazi u apsolutnom domenu.*

N: *Jednačine i izrazi u normalizovanom domenu.*

Bazne vrednosti
osnovne (usvojene):

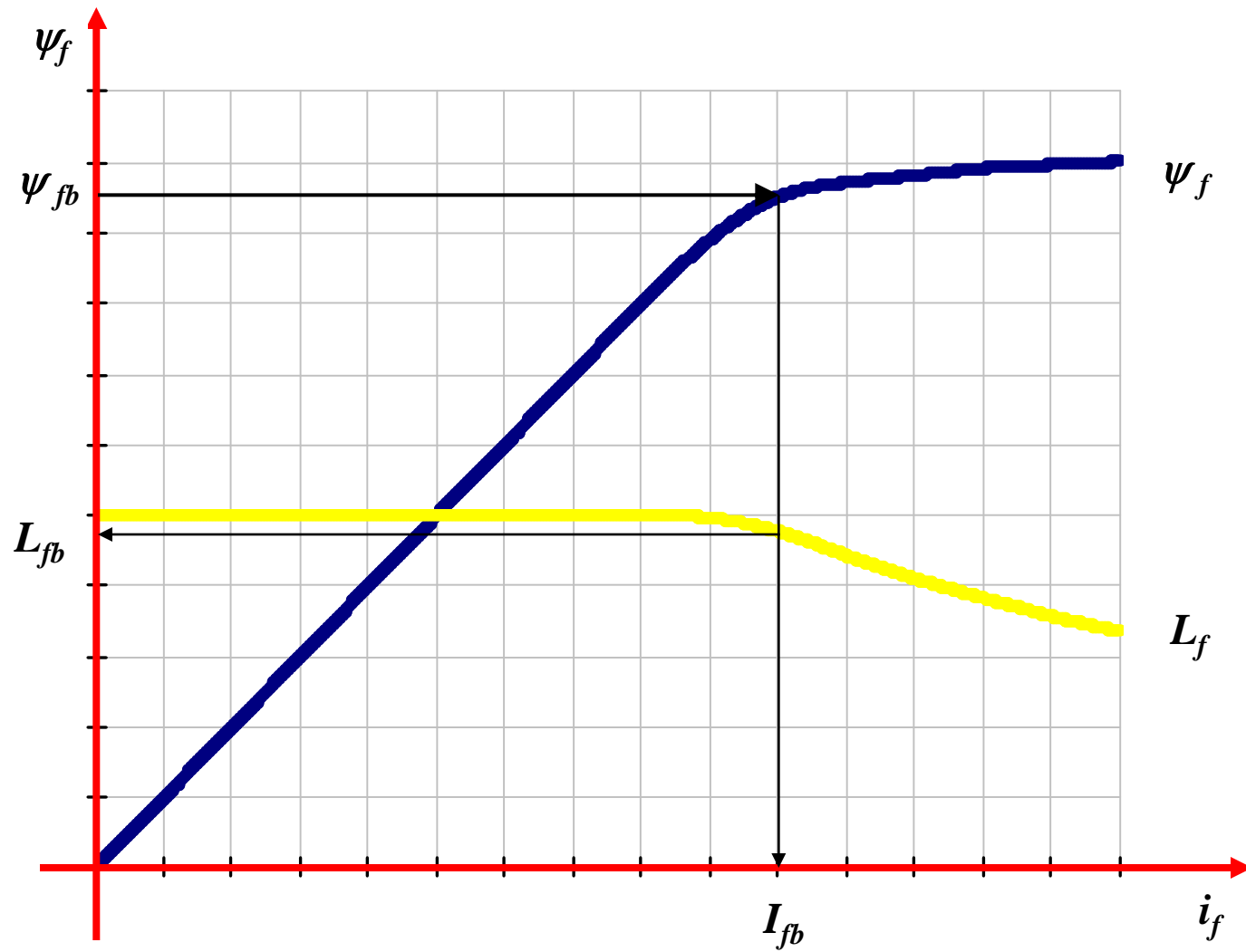
$$U_{ab} = U_{anom}; \quad I_{ab} = I_{anom}; \quad \omega_b = \omega_{nom};$$

izvedene:

$$R_{ab} = \frac{U_{ab}}{I_{ab}}; \quad \psi_b = \frac{U_{ab}}{\omega_b}; \quad \psi_b = c \cdot \varphi_b; \quad M_b = c \cdot \varphi_b \cdot I_{ab};$$

$$I_{fb} = f^{-1}(\psi_b); \quad L_{fb} = L_f(I_{fb}); \quad R_{fb} = R_f; \quad U_{fb} = R_{fb} \cdot I_{fb}$$

Karakteristika magnećenja



NORMALIZACIJA MATEMATIČKOG MODELA POGONA

$$\text{Jednačina (1) } U_{ab} = R_{ab} \cdot I_{ab} = c \cdot \varphi_b \cdot \omega_b = \psi_b \cdot \omega_b$$

$$\frac{L_a}{R_a} \frac{R_a}{R_{ab}} \frac{d}{dt} \left(\frac{i_a}{I_{ab}} \right) = \frac{u_a}{U_{ab}} - \frac{c \cdot \varphi_f \cdot \omega}{c \cdot \varphi_b \cdot \omega_b} - \frac{R_a}{R_{ab}} \frac{i_a}{I_{ab}}$$

$$T_a \cdot R_{a^*} \frac{d}{dt} (i_{a^*}) = u_{a^*} - \varphi_{f^*} \cdot \omega_* - R_{a^*} \cdot i_{a^*}$$


$$\xrightarrow{\varphi_{f^*} = \psi_{f^*}}$$

$$T_a \frac{di_{a^*}}{dt} = \frac{1}{R_{a^*}} (u_{a^*} - \psi_{f^*} \cdot \omega_*) - i_{a^*}$$

T_a - elektromagnetna vremenska konstanta indukta.

Jednačina (2) / $U_{fb} = I_{fb} \cdot R_{fb}$

$$\frac{L_{fb}}{R_f} \frac{d}{dt} \left(\frac{L_f(i_f)}{L_{fb}} \frac{i_f}{I_{fb}} \right) = \frac{c \cdot \varphi_b}{U_{fb}} \frac{d}{dt} \left(\frac{\varphi_f}{\varphi_b} \right) = \frac{u_f}{U_{fb}} - \frac{R_f \cdot i_f}{R_f \cdot I_{fb}}$$

$$T_f \frac{d \left[L_{f^*}(i_{f^*}) \cdot i_{f^*} \right]}{dt} = T_f \frac{d\psi_{f^*}}{dt} = u_{f^*} - i_{f^*}$$


Kada je mašina nezasićena:

$$\frac{L_{f^*}(i_{f^*})}{I_{f^*}} = 1 \rightarrow !!!$$

T_f – elektromagnetna vremenska konstanta pobude (induktora).

Jednačina (3) / $M_b = c \cdot \varphi_b \cdot I_{ab} = \psi_b \cdot I_{ab}$

$$\frac{J \cdot \omega_b}{M_b} \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{\omega_b} \right) = \frac{\psi_f \cdot i_a}{\psi_b \cdot I_{ab}} - \frac{m_m}{M_b}$$

$$T_m \frac{d\omega_*}{dt} = \psi_{f*} \cdot i_{a*} - m_{m*}$$

$$m_m = m_0 + k_\omega \cdot \omega; \quad \frac{m_m}{M_b} = \frac{m_0}{M_b} - \frac{k_\omega \cdot \omega_b}{M_b} \frac{\omega}{\omega_b}; \quad m_{m*} = m_{0*} - k_{\omega*} \omega_*$$

T_m – mehanička vremenska konstanta pogona.

Jednačina (4) / ω_b

$$\frac{I \cdot \theta_b}{\omega_b} \frac{d}{dt} \left(\frac{\theta}{\theta_b} \right) = \frac{\omega}{\omega_b}$$

$$T_\theta \frac{d\theta_*}{dt} = \omega_*$$

Priroda veličine θ (položaj) dozvoljava proizvoljno biranje njene bazne vrednosti.

Za izabrano:

$$\theta_b = \omega_b / I$$

dobija se:

$$T_\theta = 1 \text{ s}$$

STATIKA

$$\frac{d(\quad)}{dt} = 0$$

STATIČKE KARAKTERISTIKE POGONA SA NEZAVISNO POBUĐENIM JEDNOSMERNIM MOTOROM

Jednačine (1), (2) i (3) u stacionarnom stanju:

A:

$$u_a = \psi_f \cdot \omega + R_a \cdot i_a$$

$$u_f = R_f \cdot i_f = R_f \cdot f^{-1}(\psi_f)$$

$$m_e = \psi_f \cdot i_a = m_m$$

Iz jednačine (4) u stacionarnom stanju sledi:

$$\omega = 0 !!$$

Specijalni slučaj!!!

U normalizovanom domenu:

N:

$$u_a = \varphi_f \cdot \omega + R_a \cdot i_a = \psi_f \cdot \omega + R_a \cdot i_a$$

$$u_f = i_f = f^{-1}(\psi_f)$$

$$m_e = \psi_f \cdot i_a = m_m$$

U nominalnom režimu:

N:

$$U_{a\ nom} = 1; \quad I_{a\ nom} = 1; \quad \omega_{nom} = 1 .$$

Iz jednačine (1) se dobija:

$$1 = \psi_{fnom} + R_{anom} \rightarrow !!! \quad R_{anom} - \text{sopstveni otpor indukta.}$$

$$\varphi_{fnom} = \psi_{fnom} = 1 - R_{anom} < 1$$

U praksi je:

A:

$$R_{a\ nom} \ll R_{ab} = U_{ab} / I_{ab} = U_{a\ nom} / I_{a\ nom}$$

$$R_{a\ nom}^* \approx 0$$

Kod manjih motora je $R_{a\ nom}^*$ veće, a kod većih motora je manje.

Sada se može napisati:

N:

$$\varphi_{f nom} = \psi_{f nom} \approx 1 \quad \text{ali} < 1 \quad !!!$$

Takođe važi:

$$m_{e nom} = \varphi_{f nom} = \psi_{f nom} < 1$$

Iz jednačina koje važe u stacionarnom stanju dobijaju se analitički izrazi za statičke karakteristike motora - pogona.

$$\mathbf{N:} \quad \omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f} i_a = \omega_0 - \Delta\omega$$

ω_0 – brzina idealnog praznog hoda

$\Delta\omega$ – promena brzine usled opterećenja

$$m_e = m_m = \psi_f \cdot i_a$$

Takodje, dobija se i **MEHANIČKA KARAKTERISTIKA:**

$$\omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f^2} m_m \quad \text{ili} \quad \omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f^2} m_e$$

UTICAJ DODATOG OTPORA U KOLU INDUKTA NA STATIČKE KARAKTERISTIKE

N:

$$\omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a + R_{ad}}{\psi_f^2} m_e$$

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega'$$

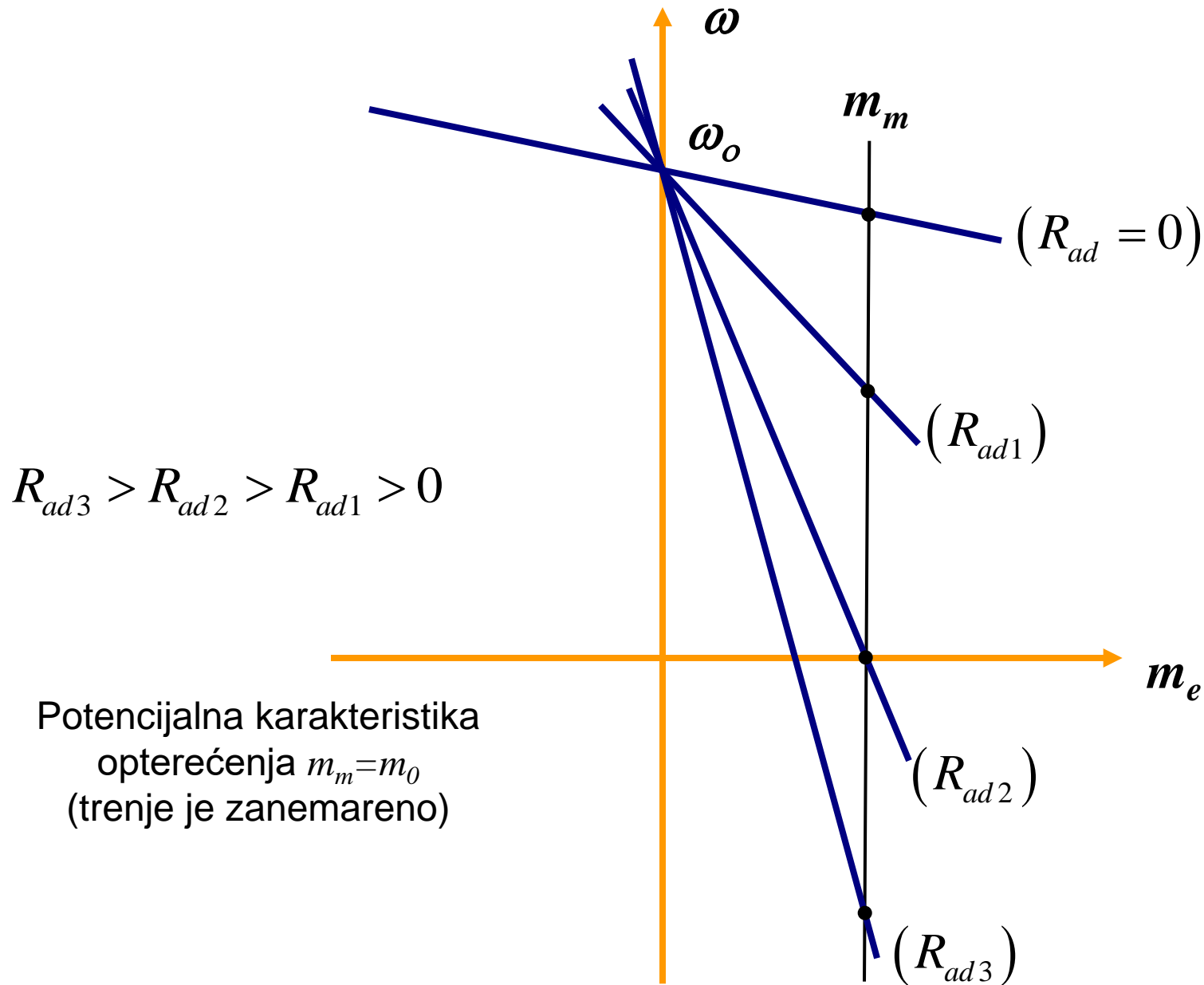
Odnos promena brzine usled opterećenja:

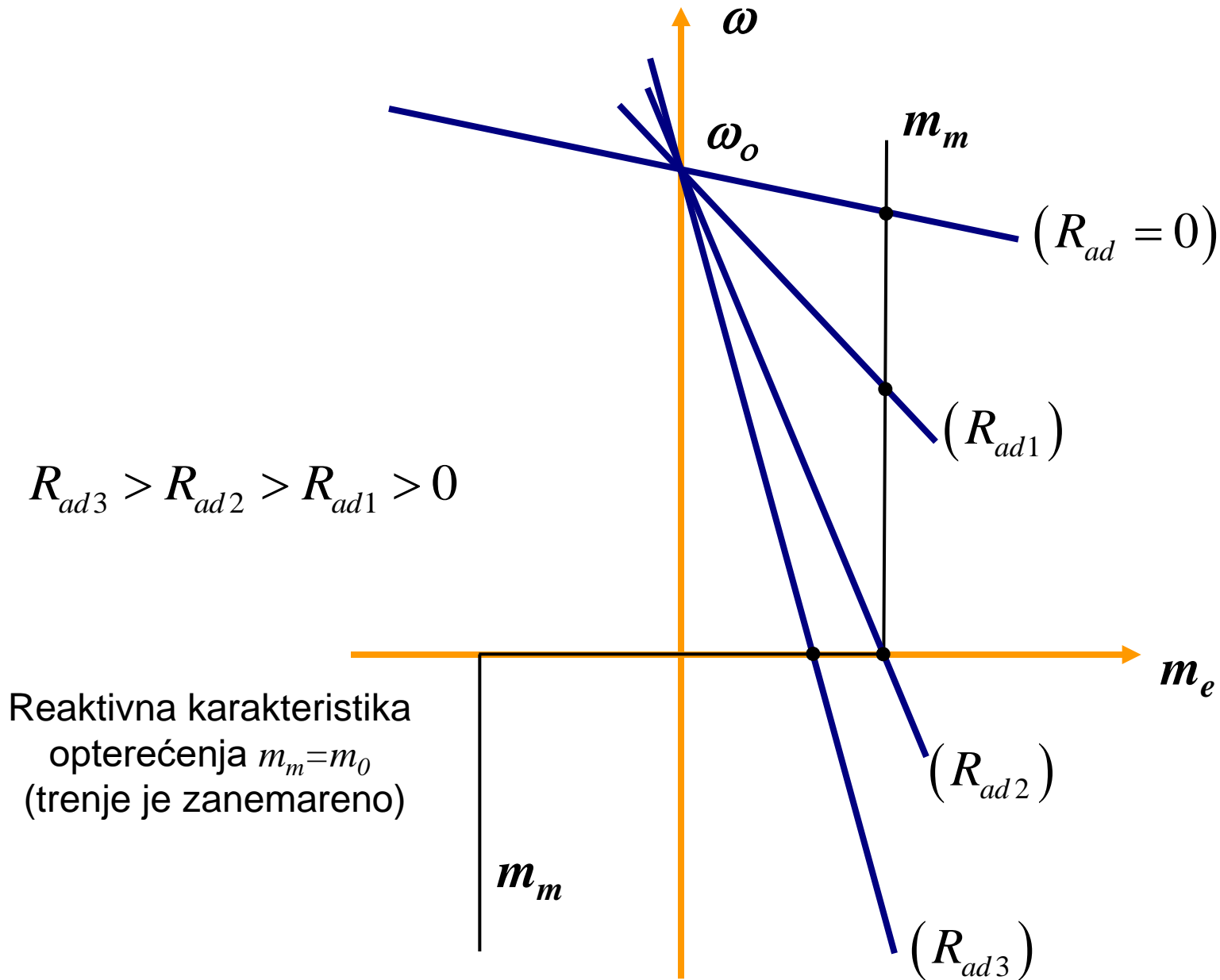
$$\frac{\Delta\omega'}{\Delta\omega_{nom}} = \frac{R_a + R_{ad}}{R_a} = 1 + \frac{R_{ad}}{R_a} > 1$$

Za određeno opterećenje (m_m)

brzina motora zavisi od vrednosti dodatog otpora:

$$\omega(m_e = m_m) = \begin{cases} > 0 & \text{za } R_{ad} < \frac{\omega_0 \psi_f^2}{m_e} - R_a & (R_{ad1}) \\ = 0 & \text{za } R_{ad} = \frac{\omega_0 \psi_f^2}{m_e} - R_a & (R_{ad2}) \\ < 0 & \text{za } R_{ad} > \frac{\omega_0 \psi_f^2}{m_e} - R_a & (R_{ad3}) \end{cases}$$





UTICAJ PROMENE NAPONA INDUKTA NA OBLIK STATIČKIH KARAKTERISTIKA

Pri konstantnoj pobudi motora ($\psi_f = \text{const}$) statičke karakteristike:

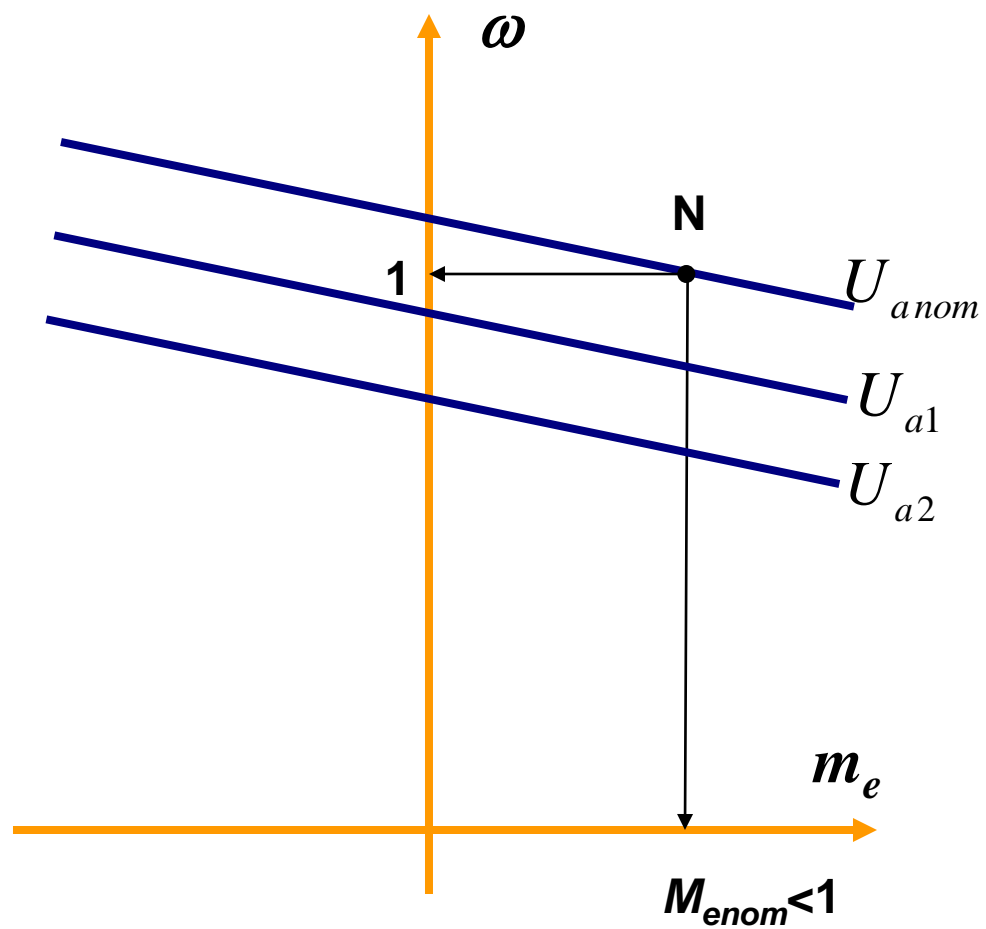
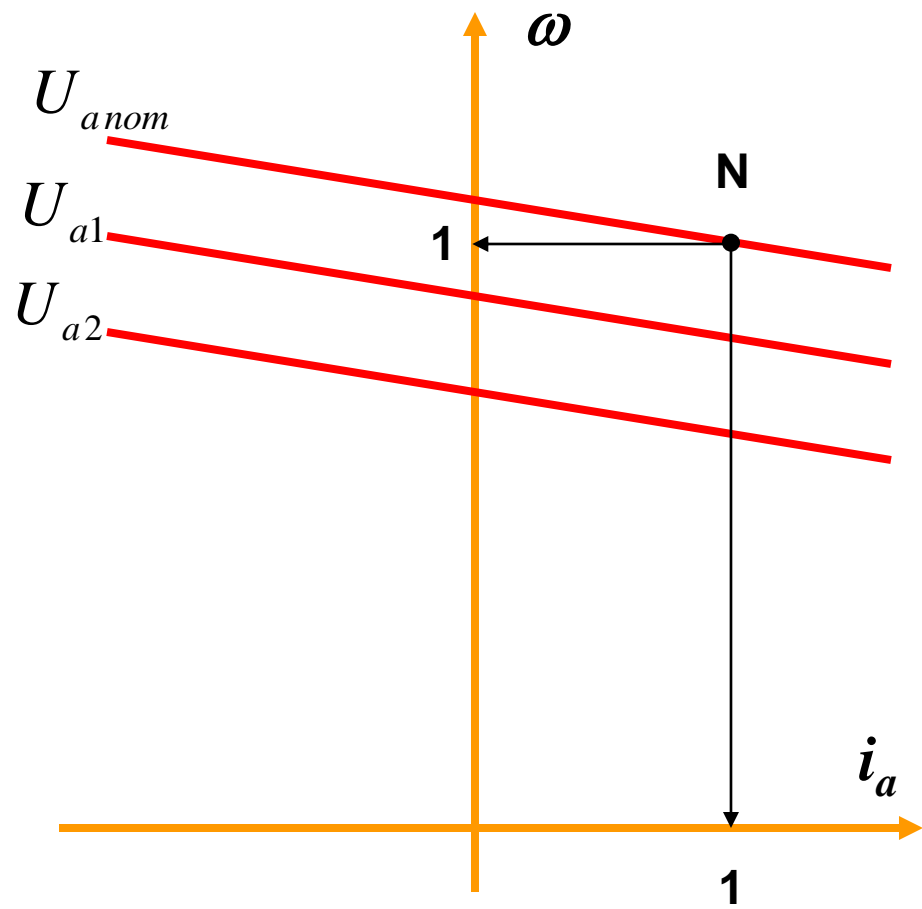
$$\omega = \omega(i_a) \quad \text{i} \quad \omega = \omega(m_e)$$

Važne napomene:

1. uobičajeno je $-1 < u_a < 1$;
2. uobičajeno je $\psi_f = \psi_{f \text{ nom}}$;
3. posmatra se opseg promene opterećenja u kome magnetna reakcija indukta ne dolazi do izražaja (do $M_{m \text{ max}}$). Ovaj opseg određen je maksimalno dozvoljenom strujom motora (komutacijom) koja je u praksi

$$I_{a \text{ max}} \in (1,5 \div 2,5).$$

Prema tome: $M_{m \text{ max}} = M_{e \text{ max}} = \psi_{f \text{ nom}} \cdot I_{a \text{ max}} = \text{const.}$



$$U_{anom} > U_{a1} > U_{a2}$$

UTICAJ PROMENE POBUDE NA OBLIK STATIČKIH KARAKTERISTIKA

Pri konstantnom naponu indukta ($u_a = U_{a\ nom} = \text{const.}$) karakteristične vrednosti na mehaničkoj karakteristici su:

N: brzina idealnog praznog hoda, $\omega (m_e = 0)$

$$m_e = 0 \qquad \omega_0 = U_{a\ nom} / \psi_f = 1 / \psi_f$$

moment kratkog spoja, $m_e (\omega = 0)$

$$\omega = 0 \qquad m_k = U_{a\ nom} \cdot \psi_f / R_a = \psi_f / R_a$$

Napomena: Ova vrednost momenta kratkog spoja je fiktivna, stvarna vrednost momenta kratkog spoja je znatno manja zbog uticaja magnetne reakcije indukta.

Promena statičkih karakteristika
prilikom smanjenja fluksa.

