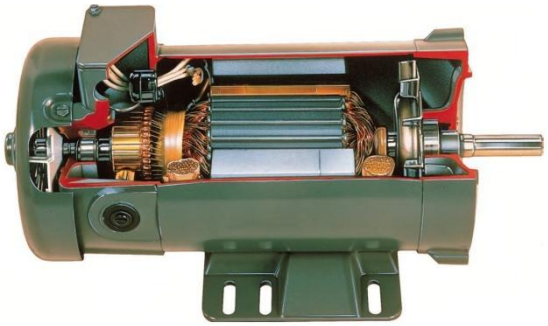
ELEKTRIMOTORNI PPOGONI SA NEZAVISNO POBUĐENIM MOTORIMA ZA JEDNOSMERNU STRUJU

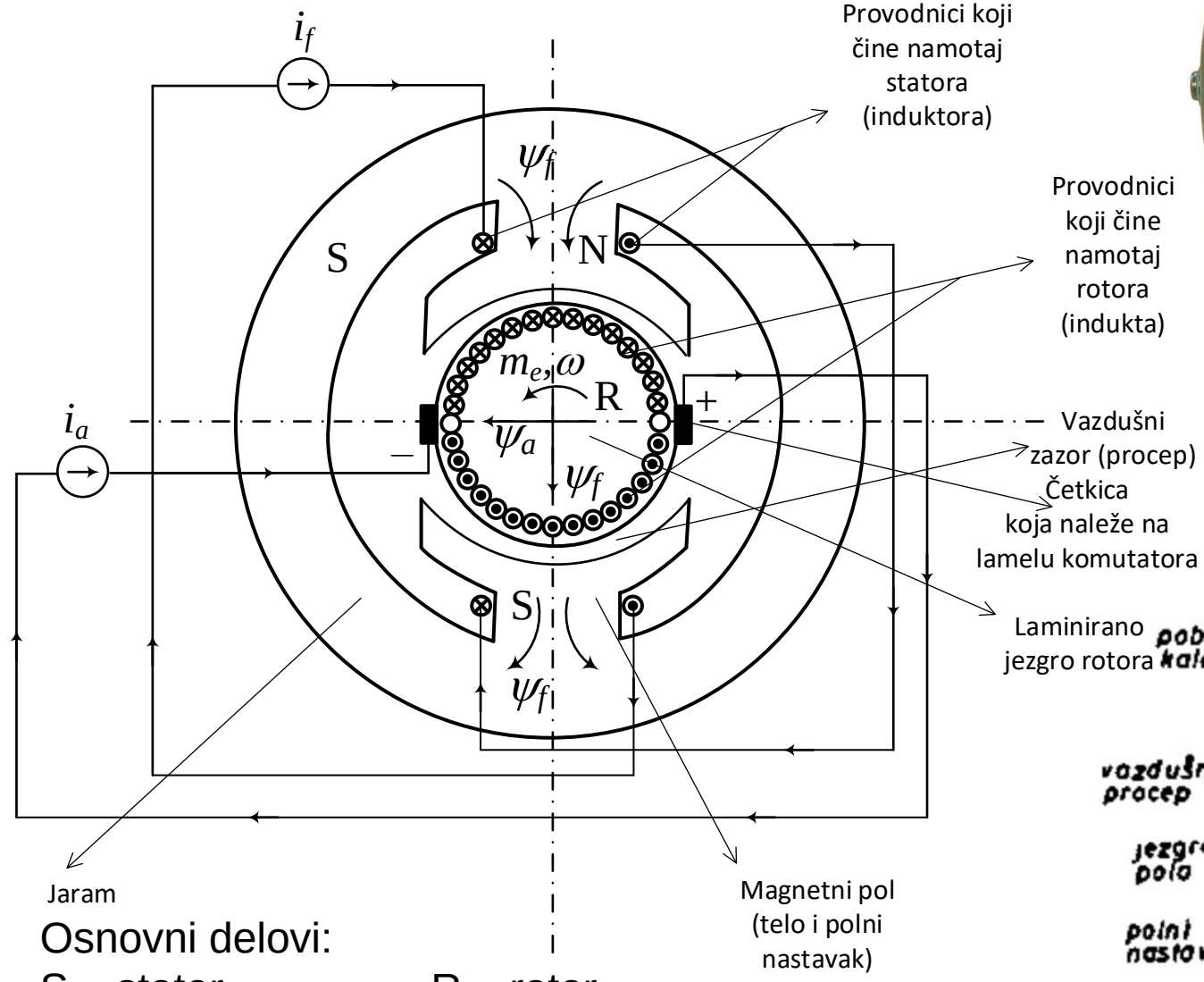
MAŠINE ZA JEDNOSMERNU STRUJU
podela

- Mašine za jednosmernu struju (MJS) mogu se, prema načinu ostvarivanja glavnog magnetnog fluksa, podeliti na **mašine sa elektromagnetnom pobudom i mašine sa permanentnim magnetima.**
- Kod mašina sa elektromagnetnom pobudom, magnetni fluks ostvaruje se provođenjem struje kroz pobudni namotaj, dok se kod mašina sa permanentnim magnetima magnetni fluks uspostavlja bez dodatnog električnog napajanja pobude.
- Prema načinu povezivanja pobudnog namotaja sa kolom indukta, mašine sa elektromagnetnom pobudom dele se na:
    - **mašine sa nezavisnom,**
    - **paralelnom (otočnom),**
    - **rednom i**
    - **složenom (kompaundnom) pobudom. Kod mašina sa složenom pobudom razlikuju se aditivna i diferencijalna pobuda,** u zavisnosti od toga da li se magnetni fluksevi rednog i paralelnog pobudnog namotaja sabiraju ili suprotstavljaju.
- Navedene vrste mašina razlikuju se po mehaničkim karakteristikama, polaznom momentu i mogućnostima regulacije brzine. Motori sa nezavisnom i paralelnom pobudom, kao i motori sa permanentnim magnetima, imaju približno konstantan pobudni fluks u odgovarajućem radnom području, zbog čega njihove mehaničke karakteristike imaju sličan oblik. Motori sa rednom pobudom odlikuju se velikim polaznim momentom, dok motori sa složenom pobudom omogućavaju kombinovanje pojedinih karakteristika redne i paralelne pobude.

MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU SA NEZAVISNOM POBUDOM

Poprečni presek motora:





Provodnici koji čine namotaj statora (induktora)

Provodnici koji čine namotaj rotora (indukta)

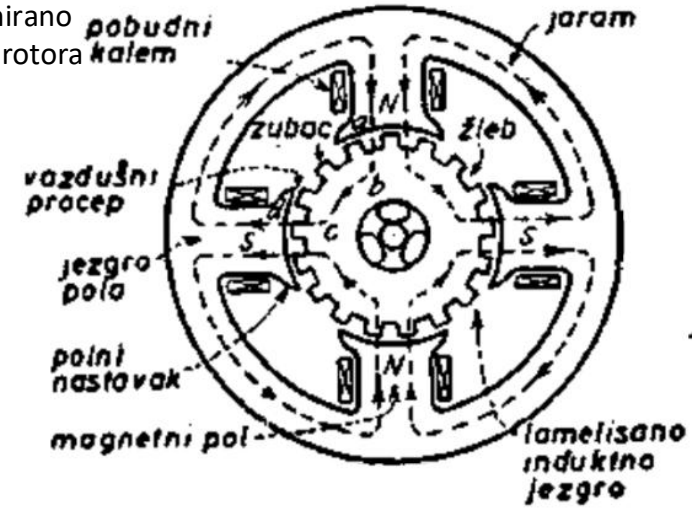
Vazdušni zazor (procep)

Četkica koja naleže na lamelu komutatora

Laminirano jezgro rotora

Jaram

Magnetni pol (telo i polni nastavak)



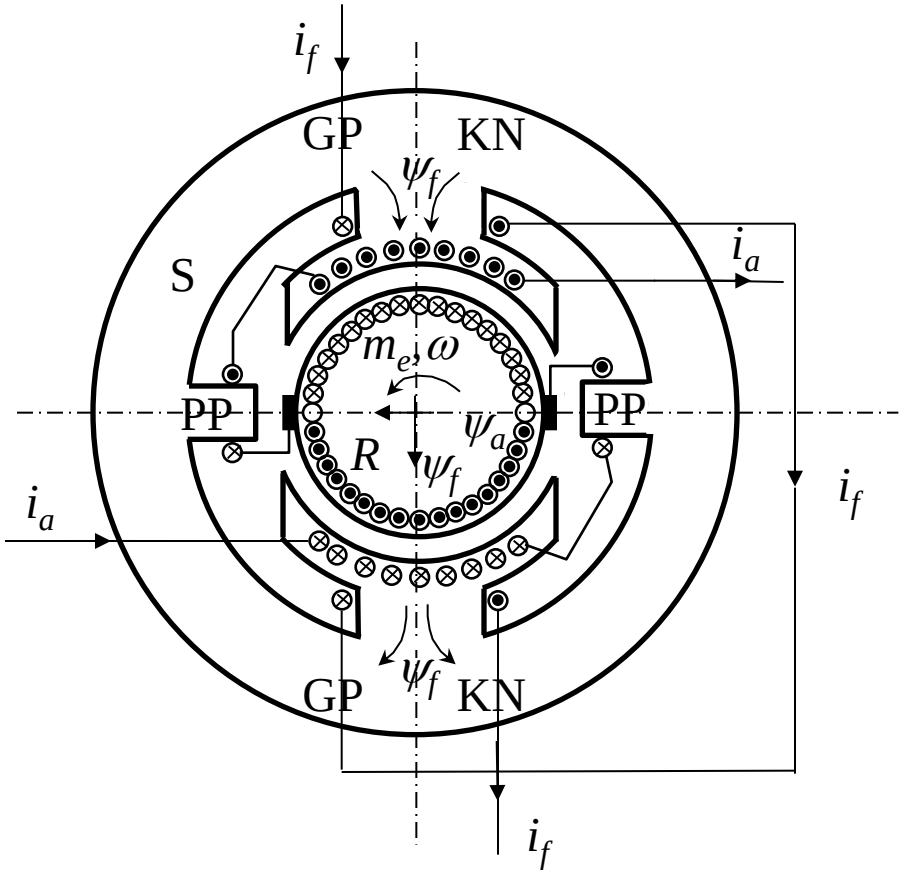
Osnovni delovi:

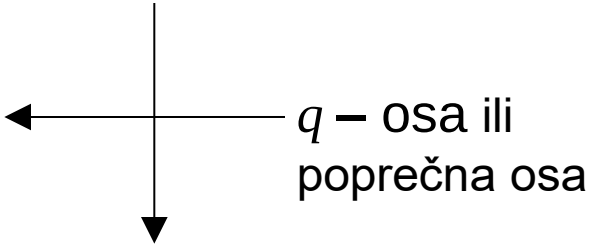
S – stator; R – rotor;

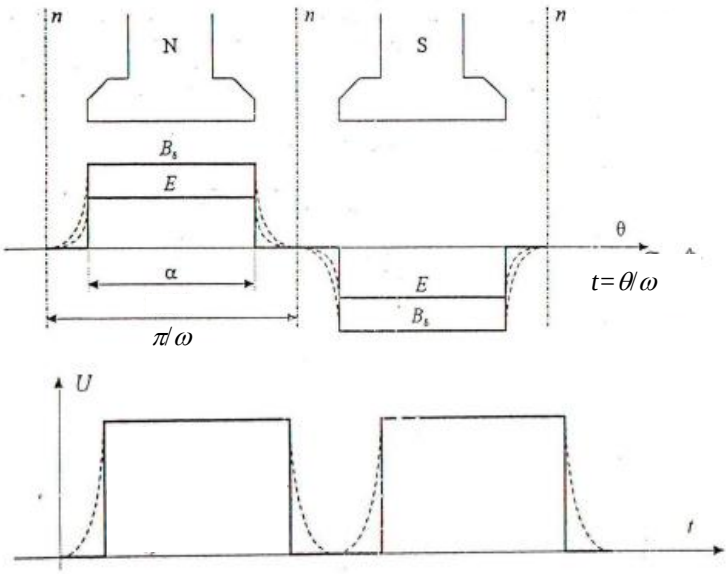
N, S – glavni polovi sever i jug;

MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU SA NEZAVISNOM POBUDOM

Poprečni presek motora za jednosmernu struju:







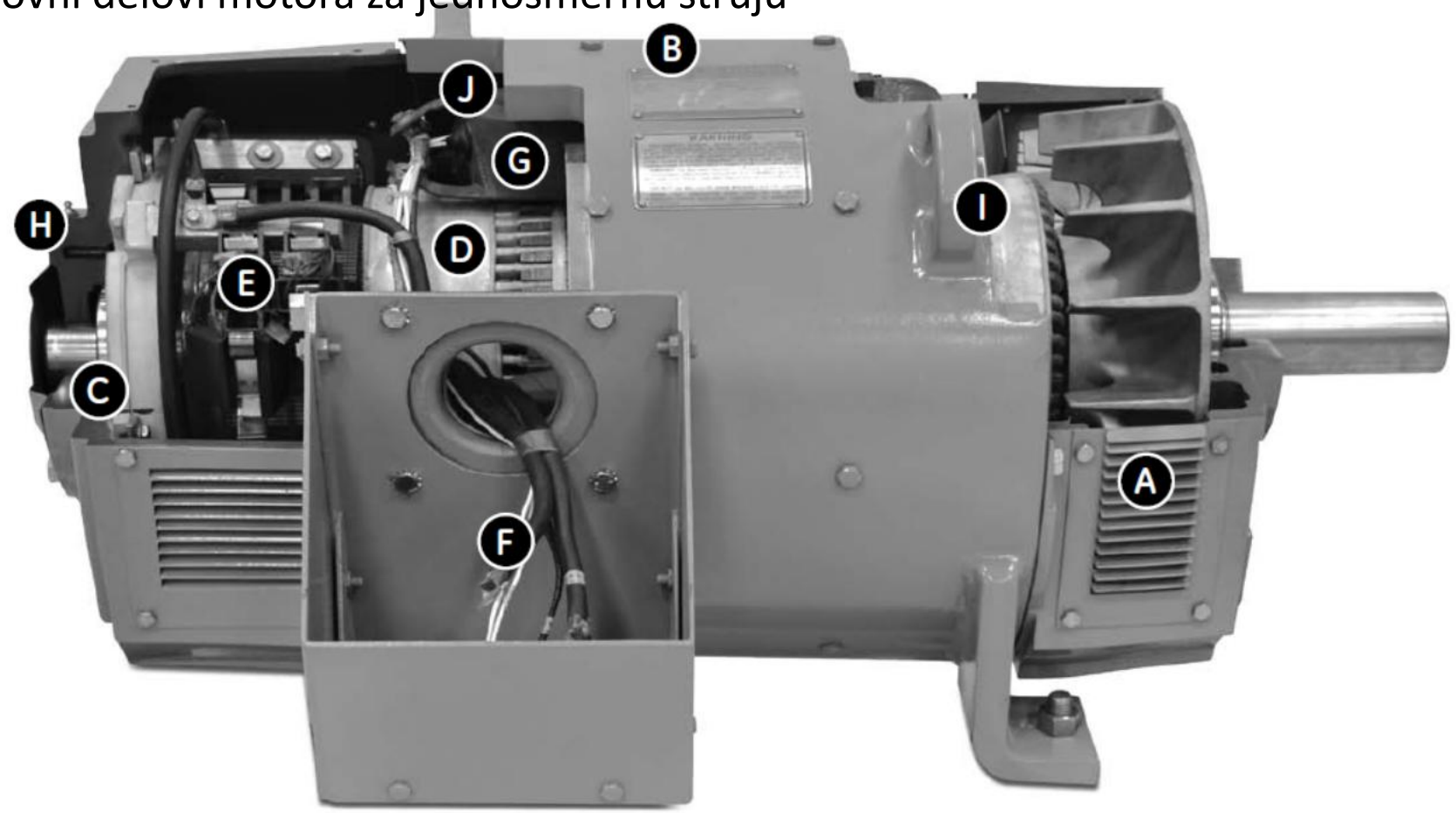
Osnovni delovi:

S – stator; R – rotor;

GP – glavni polovi; PP – pomoćni polovi;

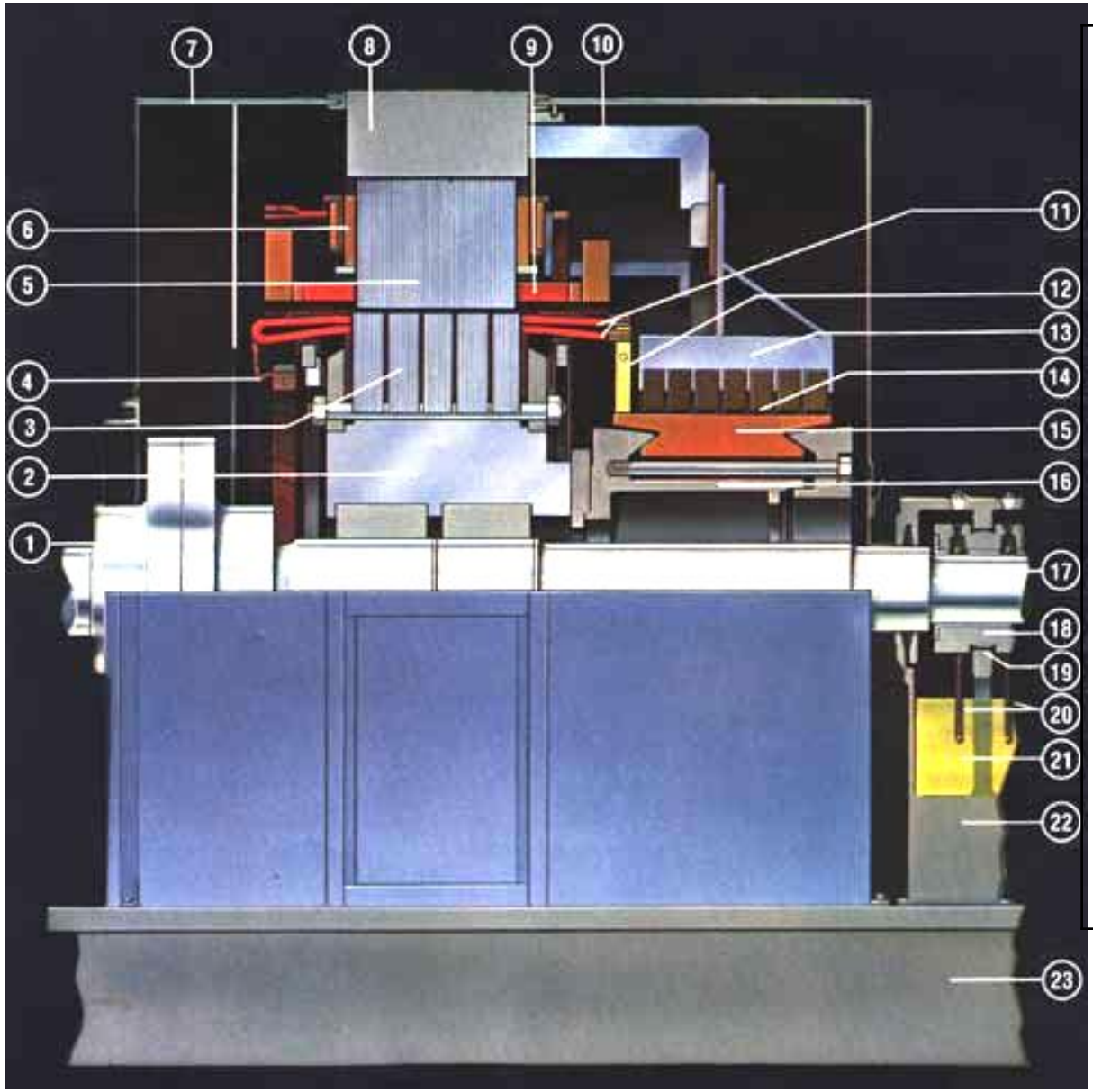
KN – kompenzacioni namotaj.

Osnovni delovi motora za jednosmernu struju



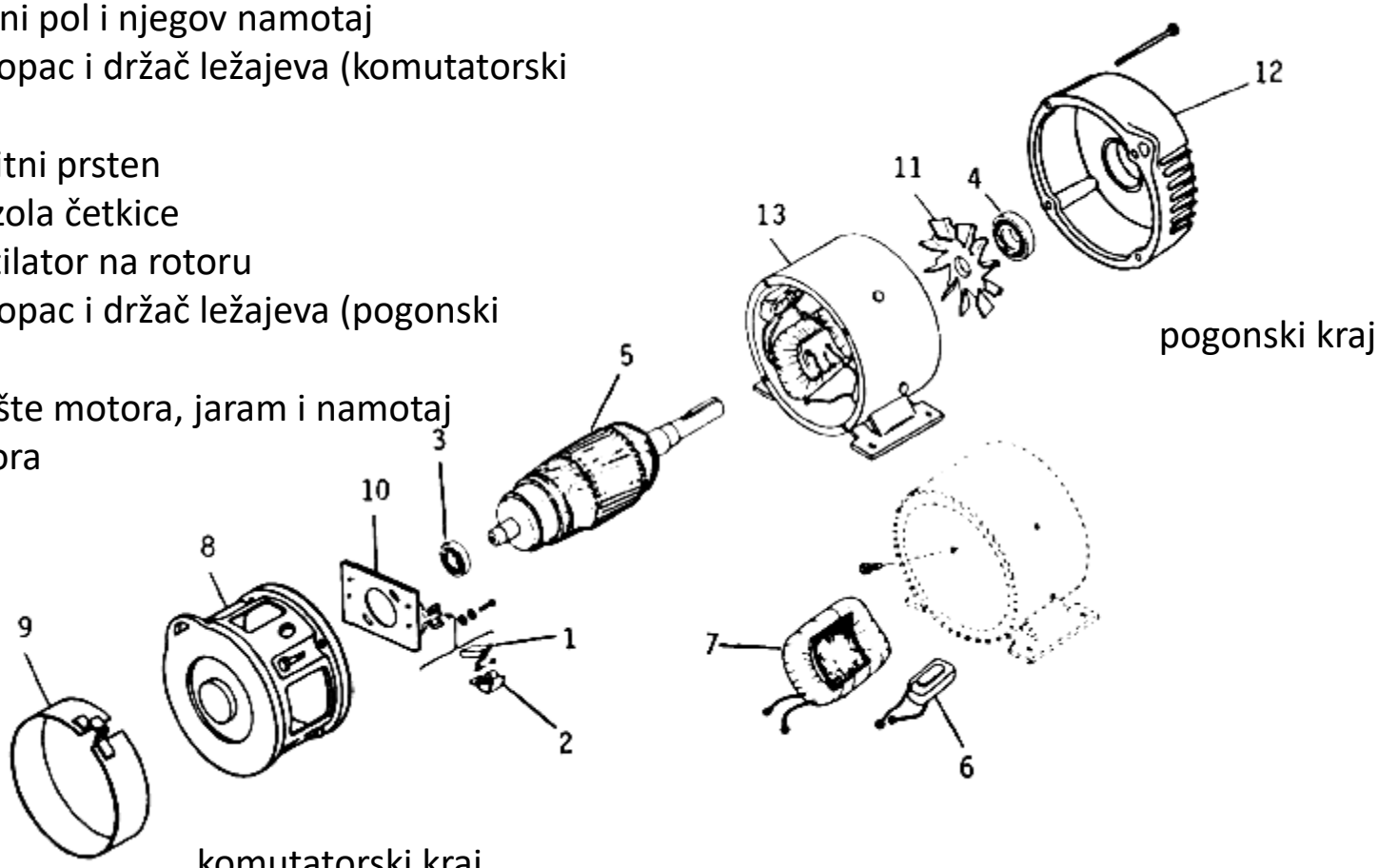
A – Poklopac
B – Kućište
C – Ležaj
D – Rotor (indukt, armatura)
E – Držač četkice
F – Priključna kutija
G – Izolacija
H – Poklopac na komutatorskom kraju
I – Oslonac za podizanje
J - Namotaj

Slike motora za jednosmernu struju



1. Mehanička spojnica
2. Rotorska zvezda
3. Limovi rotora
4. Poprečne veze rotora
5. Glavni pol
6. Namotaj glavnog pola
7. Pokretni spoljni poklopac
8. Kućište
9. Kompenzacioni namotaj
10. Držači četkica na kućištu
11. Namotaj rotora
12. Spoj namotaja rotora sa kolektorom
13. Držač četkica
14. Četkice
15. Kolektorska kriška
16. Držač kriški
17. Vratilo
18. Ležaj
19. Ležište ležaja
20. Prstenovi za podmazivanje
21. Rezervoar ulja
22. Postolje
23. Noseća ploča

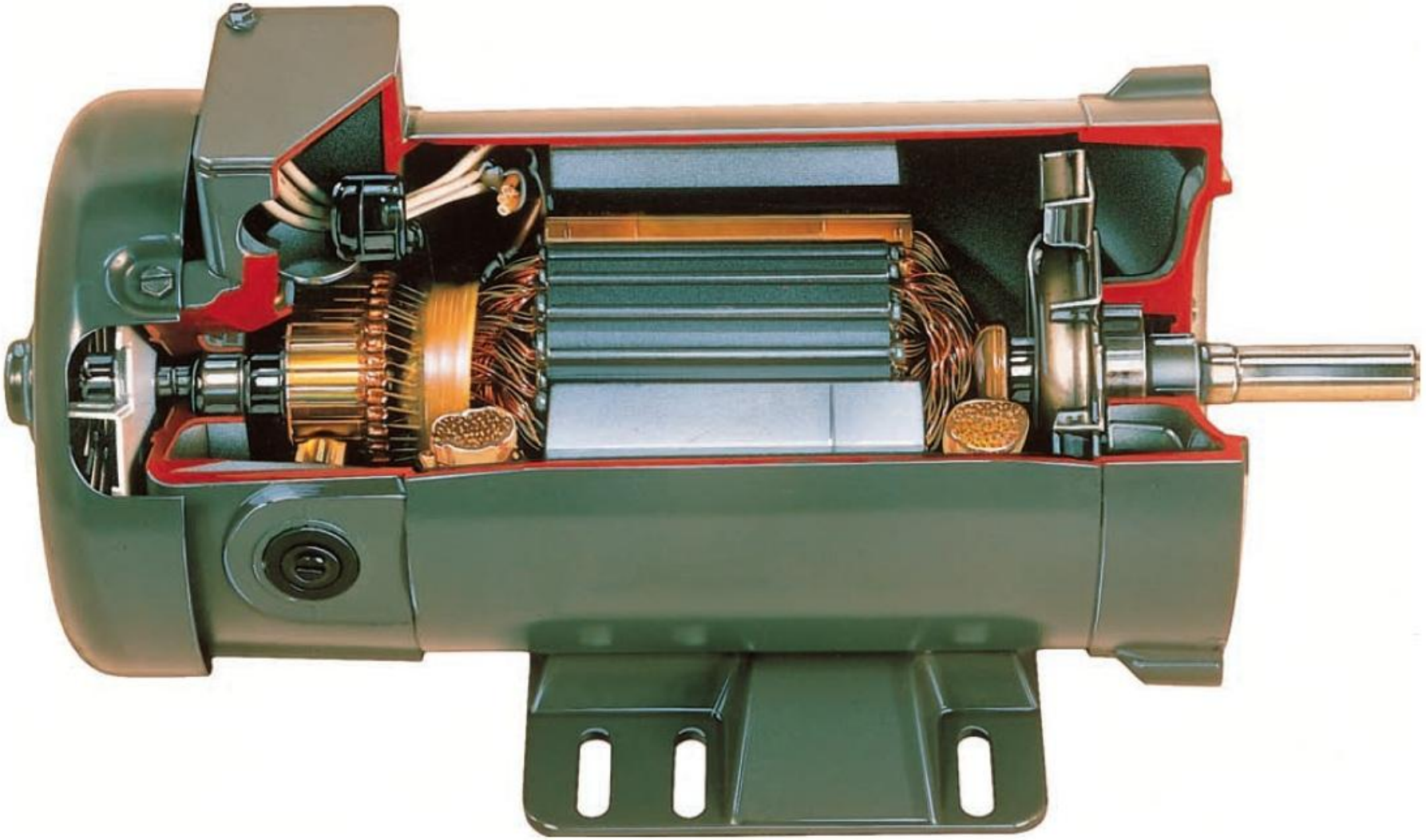
1. Četkice
2. Opruge četkica
3. Ležaj na komutatorskom kraju
4. Ležaj na pogonskom kraju
5. Rotor (indukt, armatura)
6. Pomoćni pol sa namotajem
7. Glavni pol i njegov namotaj
8. Poklopac i držač ležajeva (komutatorski kraj)
9. Zaštitni prsten
10. Konzola četkice
11. Ventilator na rotoru
12. Poklopac i držač ležajeva (pogonski kraj)
13. Kućište motora, jaram i namotaj statora



pogonski kraj

komutatorski kraj

Slike motora za jednosmernu struju





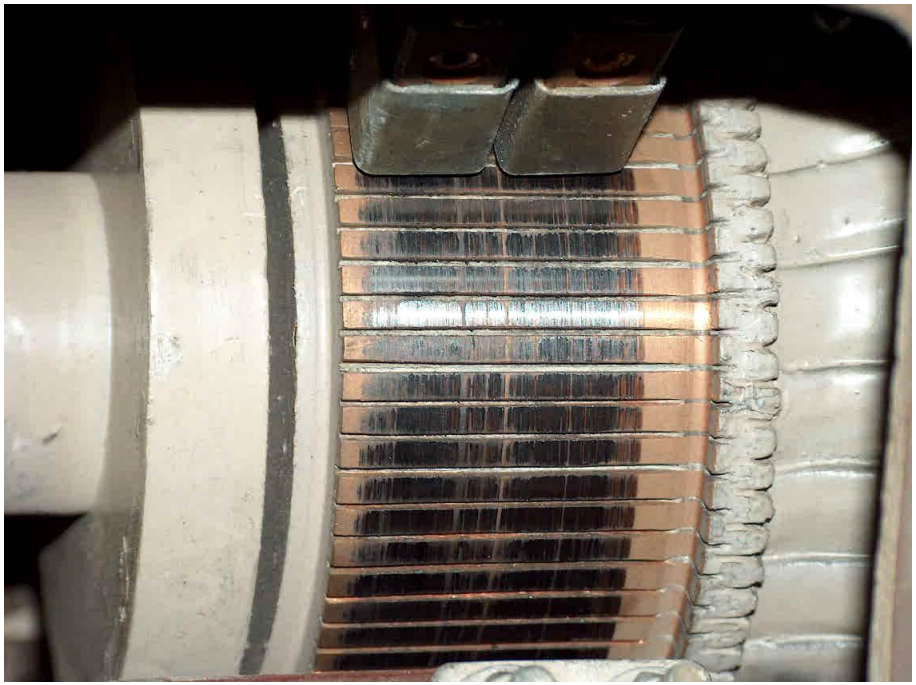

РСФСР
КУЗБАССКИЙ СОВНАРХОЗ
КВТ
А
ОБ/МИН ВЕС КГ
ГОСТ
196
СДЕЛАНО В СССР

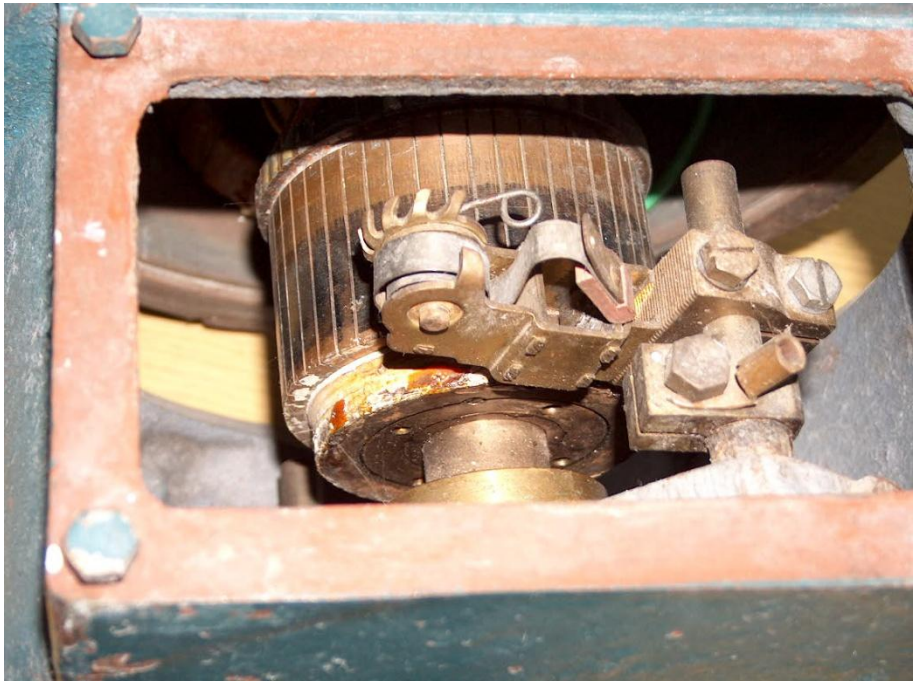












MOTOR ZA JEDNOSMERNU STRUJU

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.

- Jedna njihova bitna mana 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 naizmeničnu 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 mogli motori za NS da zamene MJS).

MOTORI ZA JEDNOSMERNU STRUJU SA STALNIM MAGNETIMA

- Pobudni namotaj statora može se zameniti stalnim magnetima, koji obezbeđuju magnetisanje 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 magneta 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 magneta je što je nepoželjno razmagnetisavanje, koje se može javiti pri startu i pri kvarovima, praktično nemoguće. Loša strana primene je visoka cena magneta, 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 omogućujavaju 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.

MOTORI ZA JEDNOSMERNU STRUJU

primena

- Široka primena MJS zasnivala se na relativno jednostavnoj regulaciji brzine i elektromagnetnog momenta, mogućnosti ostvarivanja velikog polaznog momenta i dobrim dinamičkim karakteristikama.
- Međutim, razvoj energetske elektronike i savremenih metoda upravljanja omogućio je široku primenu asinhronih i sinhronih motora u pogonima sa promenljivom brzinom. Zbog toga se u novim industrijskim postrojenjima klasični motori za jednosmernu struju danas koriste znatno ređe, ili bolje rečeno - dolazi do sve jasnije podele oblasti, gde svaki sistem ima svoja preimućstva koja su presudna za izbor u konkretnom slučaju.
- MJS su i dalje zastupljeni u određenim niskonaponskim uređajima, specijalizovanim primenama i postojećim industrijskim pogonima.

MOTORI ZA JEDNOSMERNU STRUJU

primena

Oblasti primene MJS mogu se sistematizovati na sledeći način:

a) **Niskonaponski elektromotorni pogoni malih snaga**

MJS se i dalje se koriste u brojnim pomoćnim pogonima, naročito kada su važni jednostavna konstrukcija, niski troškovi i jednostavno upravljanje brzinom ili položajem.

Tipične primene obuhvataju:

- Automobilsku industriju: pokretače motora sa unutrašnjim sagorevanjem (anlasere), mehanizme podizanja prozora, podešavanja sedišta i retrovizora, brisače vetrobranskog stakla, centralno zaključavanje vrata...
- Kućne aparate i električne alate: pojedine male pumpe, mehanizme za pomeranje i pozicioniranje, akumulatorske alate i druge uređaje sa jednostavnom regulacijom brzine.
- Male mehatroničke sisteme: igračke, edukacione uređaje

U ovim primenama motori sa četkicama sve češće se zamenjuju motorima bez četkica, naročito kada se zahtevaju veća energetska efikasnost, duži radni vek, manji zahtevi za održavanjem i niži nivo elektromagnetnih smetnji.

MOTORI ZA JEDNOSMERNU STRUJU

primena

b) **Industrijski elektromotorni pogoni srednjih i velikih snaga**

Pojedina postojeća industrijska postrojenja, naročito tamo gde bi zamena kompletnog elektromotornog pogona zahtevala značajna ulaganja ili dugotrajan prekid proizvodnje.

Najznačajnije primene obuhvataju:

1. Valjaoničke pogone u industriji čelika i aluminijuma.
2. Rudnička postrojenja za podizanje i spuštanje tereta i ljudi i dizalične pogone.
3. Pogone u teškoj industriji(pogon ekstrudera, miksera, transportnih sistema, velikih ventilatora...)

c) **Električna vuča i transportni sistemi**

MJS sa rednom pobudom imali su veoma značajnu ulogu u razvoju električne vuče, zahvaljujući velikom polaznom momentu i povoljnim vučnim karakteristikama. Koristili su se u lokomotivama, tramvajima, trolejbusima i različitim industrijskim transportnim vozilima.

U savremenim vučnim sistemima, uključujući nove železničke i drumske električne pogone, preovlađuju asinhroni motori i sinhroni motori sa permanentnim magnetima, napajani iz odgovarajućih pretvarača. Klasični vučni motori jednosmerne struje zadržani su prvenstveno u starijim vozilima koja su još u eksploataciji.

d) **Brodski i specijalni elektromotorni pogoni**

Primena MJS obuhvatala je određene pogone ledolomaca, tegljača, podmornica i pomoćnih brodskih uređaja, dok se u pogone za specijalnu namenu ubrajaju dinamički simulator letenja, mašine za proveru centriranosti rotacionih delova drugih mašina, dinamometri i sl.

Značajniji savremeni proizvođači MJS

Proizvođač	Zemlja	Opseg snage	Program / primena
TECO-Westinghouse	SAD	186 kW – 26 MW	Veliki industrijski i brodski pogoni
T-T Electric	Francuska	1 –2000 kW	Industrijski komutatorski motori
ABB / Baldor-Reliance	Švajcarska / SAD	0,09–373 kW	PMDC i motori sa paralelnom pobudom

Savremeni MJS se proizvode u u kućištima koji pružaju mogućnost zaštite od kapanja, curenja i prskanja vode, potpuno oklopljeni motori i motori za korišćenje u eksplozivnim sredinama.

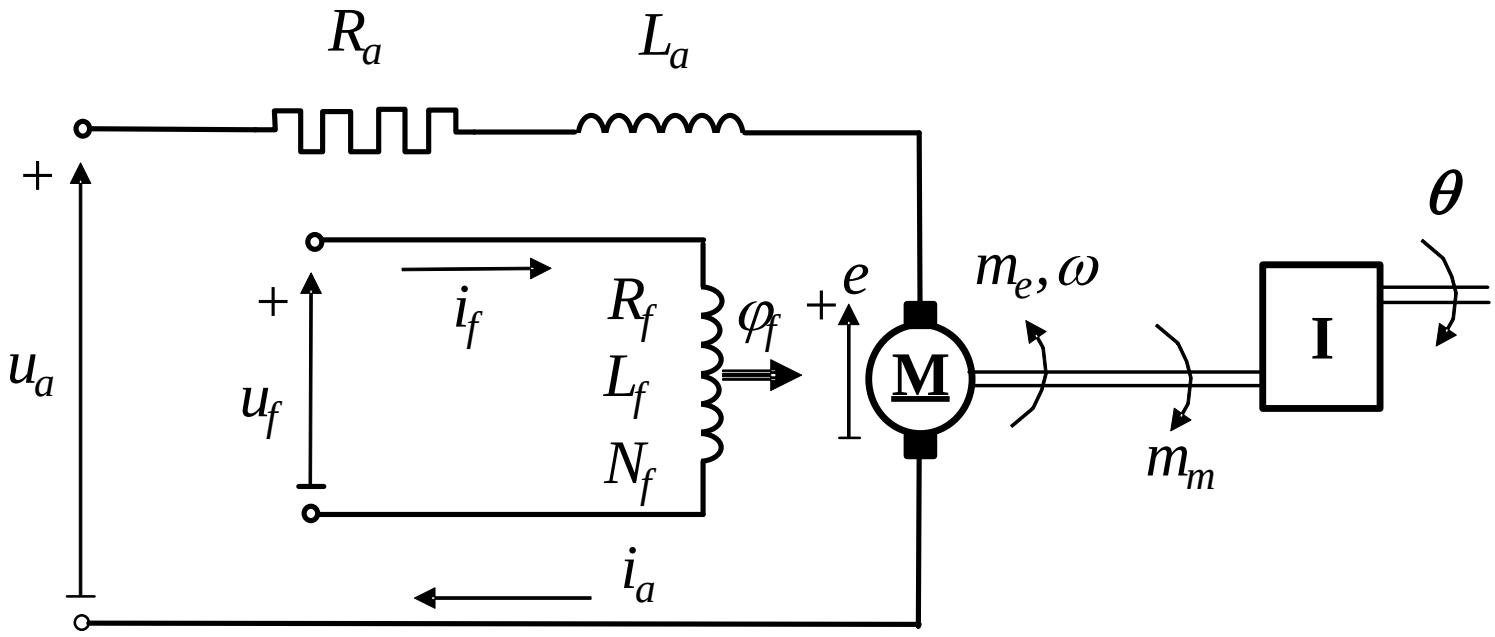
Osobine:

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

POGON SA MOTOROM ZA JEDNOSMERNU STRUJU

NEZAVISNA POBUDA

Uprošćena, principijelna šema:



Motor, reduktor, opterećenje.

opterećenje (valjak)

reduktor

motor za jednosmernu struju



Matematički model, sistem jednačina:

diferencijalne jednačine:

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

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

$$J\frac{d\omega}{dt} = m_e - m_m - k_\omega \omega - k_\theta \theta \qquad \textbf{(3)}$$

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

Matematički model, sistem jednačina:

diferencijalne jednačine:

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

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

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

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

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"**

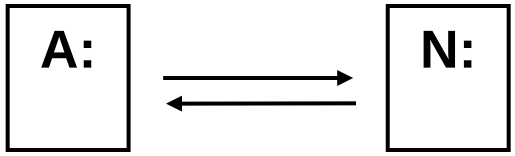
$$m_e = c \cdot \varphi_f \cdot i_a = \psi_f \cdot i_a$$

$$\psi_f = c \cdot \varphi_f = f\left(i_f\right) = L_f\left(i_f\right) \cdot i_f$$ **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):

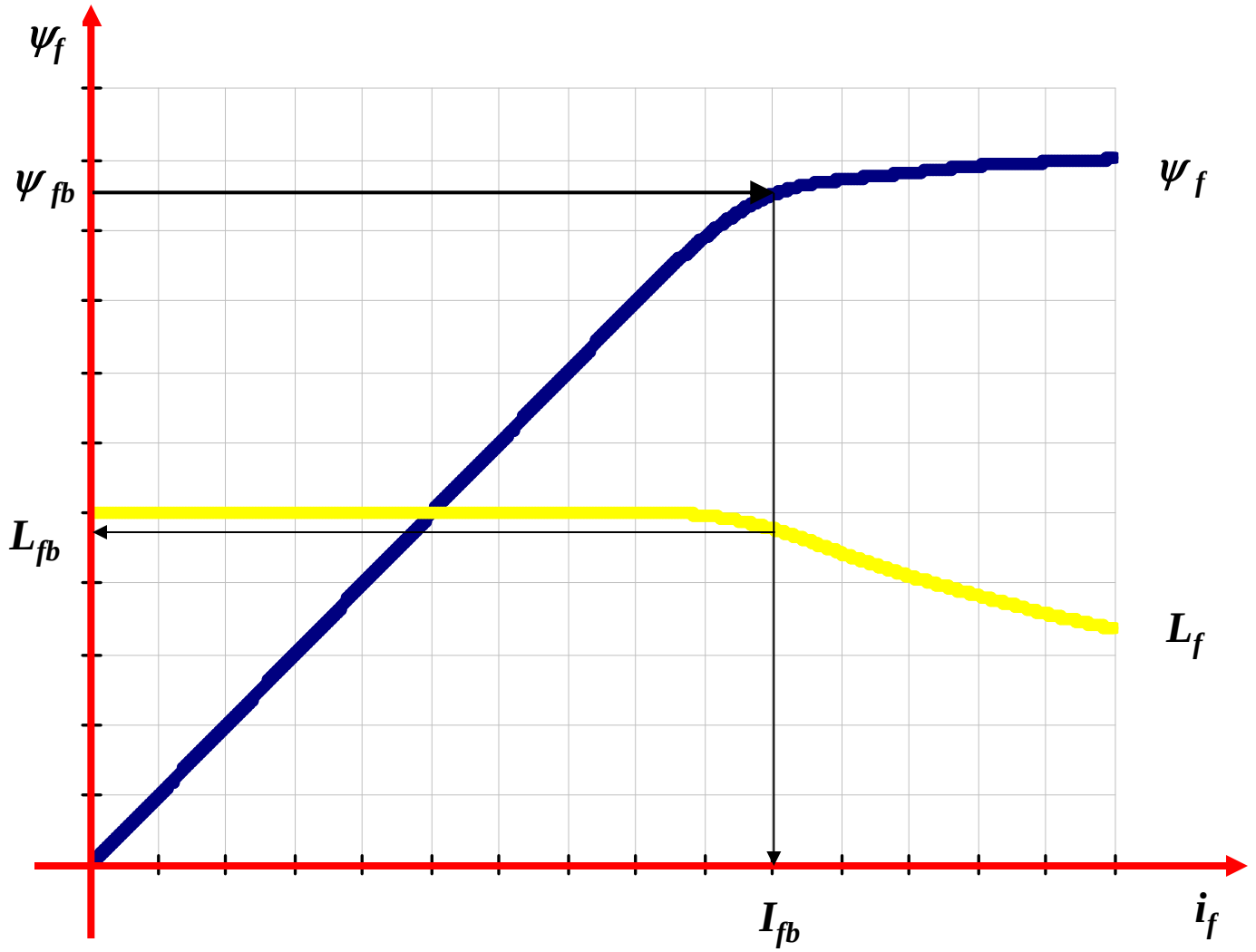
$$U_{ab} = U_{anom}; \qquad I_{ab} = I_{anom}; \qquad \omega_b = \omega_{nom};$$

izvedene:

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

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

Karakteristika magnećenja



NORMALIZACIJA MATEMATIČKOG MODELA POGONA

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

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

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

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

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

T_a **- elektromagnetna vremenska konstanta indukta.**

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

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

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

Kada je mašina nezasićena:

$$\xrightarrow{L_{f*}\left(i_{f*}\right)=1} !!!$$

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:

$$T_\theta = 1\,\mathrm{s}$$

STATIKA

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

STATIČKE KARAKTERISTIKE POGONA SA NEZAVISNO POBUĐENIM JEDNOSMERNIM MOTOROM

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

A:

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

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

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

Iz jednačine (4) u stacionarnom stanju sledi:

$\omega = 0$ **!!** **Specijalni slučaj!!!**

U normalizovanom domenu:

N:

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

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

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

U nominalnom režimu:

N:

$$U_{an} = 1; \qquad I_{an} = 1; \qquad \omega_n = 1 .$$

Iz jednačine (1) se dobija:

$1 = \psi_{fn} + R_{an} \rightarrow !!!$ R_{an} - sopstveni otpor indukta.

$$\varphi_{fn} = \psi_{fn} = 1 - R_{an} < 1 !!!$$

U praksi je:

A:

$$R_{an} << R_{ab} = U_{ab} / I_{ab} = U_{an} / I_{an}$$

$$R_{an*} \approx 0$$

Kod manjih motora je R_{an*} veće, a kod većih motora je manje.

Sada se može napisati:

N:

$$\varphi_{fn} = \psi_{fn} \approx 1 \qquad \text{ali} \quad < 1 \quad !!!$$

Također važi:

$$m_{en} = \varphi_{fn} = \psi_{fn} < 1$$

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

N:

$$\omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f} i_a = \omega_0 - \Delta\omega$$

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:

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

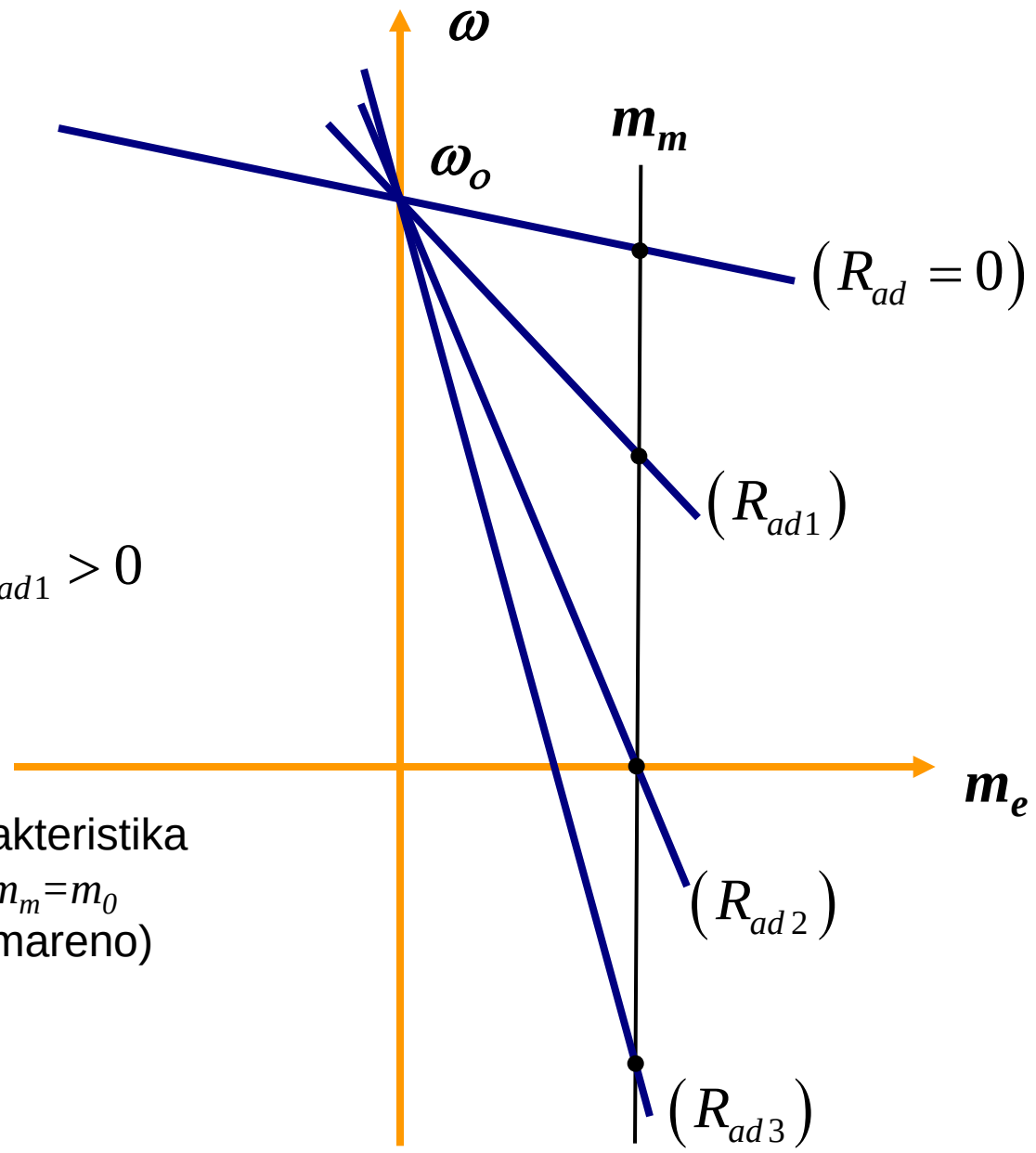
$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega'$$

Odnos promena brzine usled opterećenja:

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

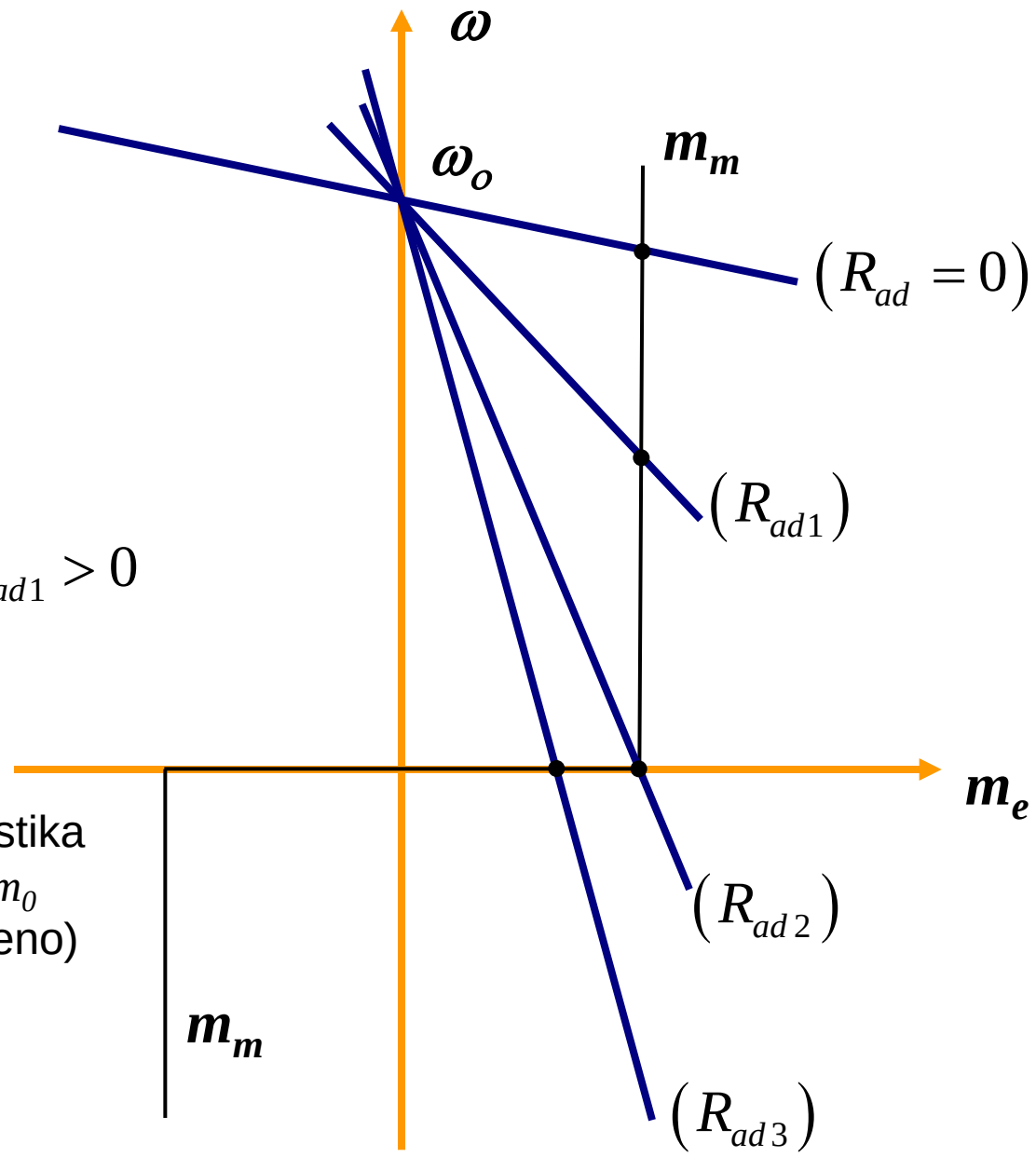
Za određeno opterećenje (m_m)
brzina motora zavisi od vrednosti dodatog otpora:

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



$$R_{ad3} > R_{ad2} > R_{ad1} > 0$$

Potencijalna karakteristika opterećenja $m_m = m_0$ (trenje je zanemareno)



$R_{ad\,3} > R_{ad\,2} > R_{ad\,1} > 0$

Reaktivna karakteristika opterećenja $m_m = m_0$ (trenje je zanemareno)

UTICAJ PROMENE NAPONA INDUKTA NA OBLIK STATIČKIH KARAKTERISTIKA

Pri konstantnoj pobudi motora (ψ_f = const) statičke karakteristike:

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

Važne napomene:

1. uobičajeno je $-1 < u_a < 1$;

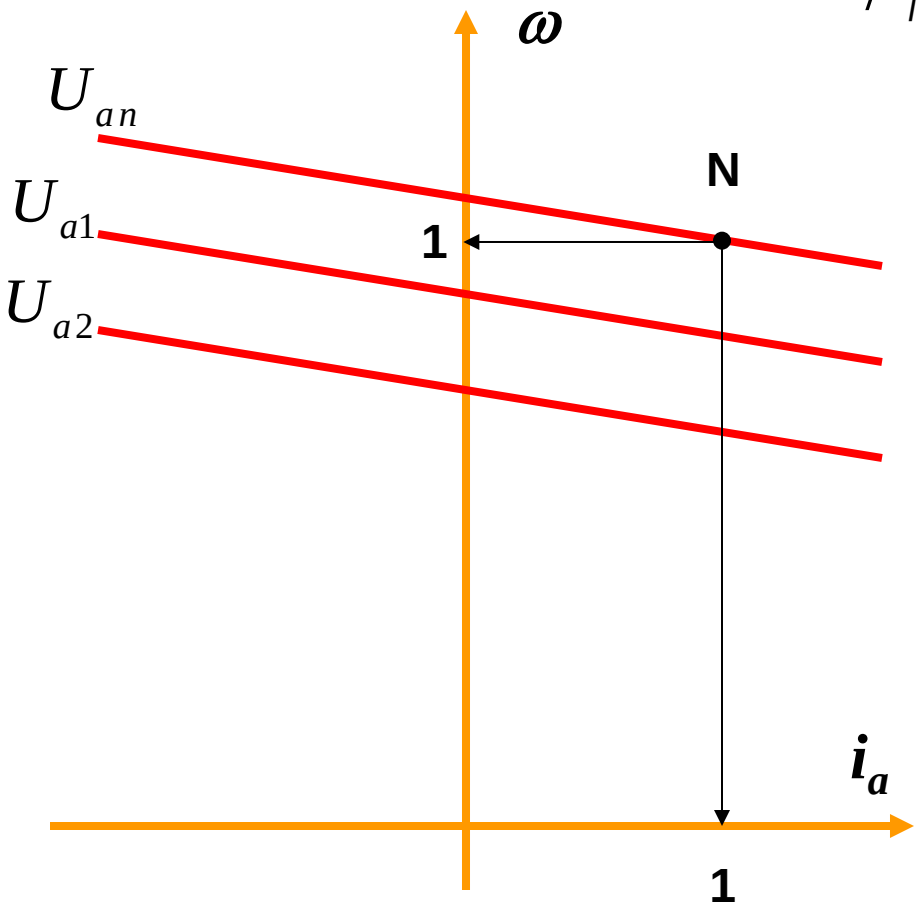
2. uobičajeno je $\psi_f = \psi_{fn}$;

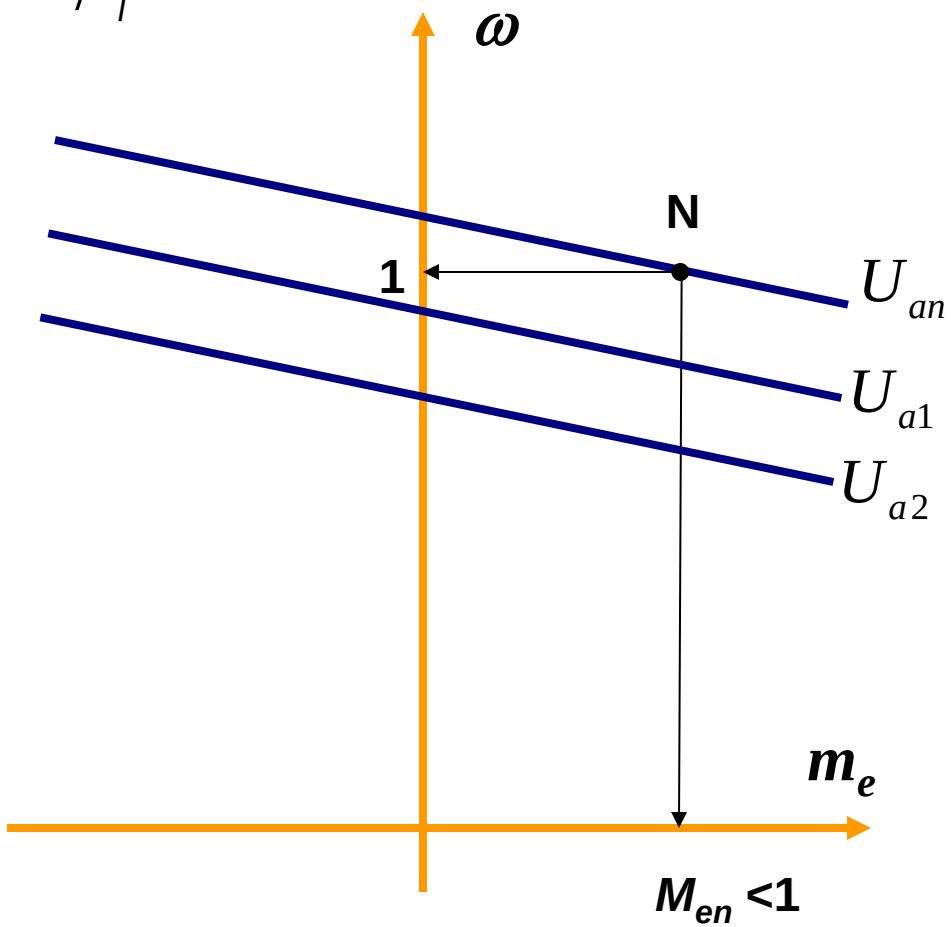
3. posmatra se opseg promene opterećenja u kome magnetna reakcija indukta ne dolazi do izražaja (do M_{mmax}). Ovaj opseg određen je maksimalno dozvoljenom strujom motora (komutacijom) koja je u praksi

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

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

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





$$U_{an} > U_{a1} > U_{a2}$$

UTICAJ PROMENE POBUDE NA OBLIK STATIČKIH KARAKTERISTIKA

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

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

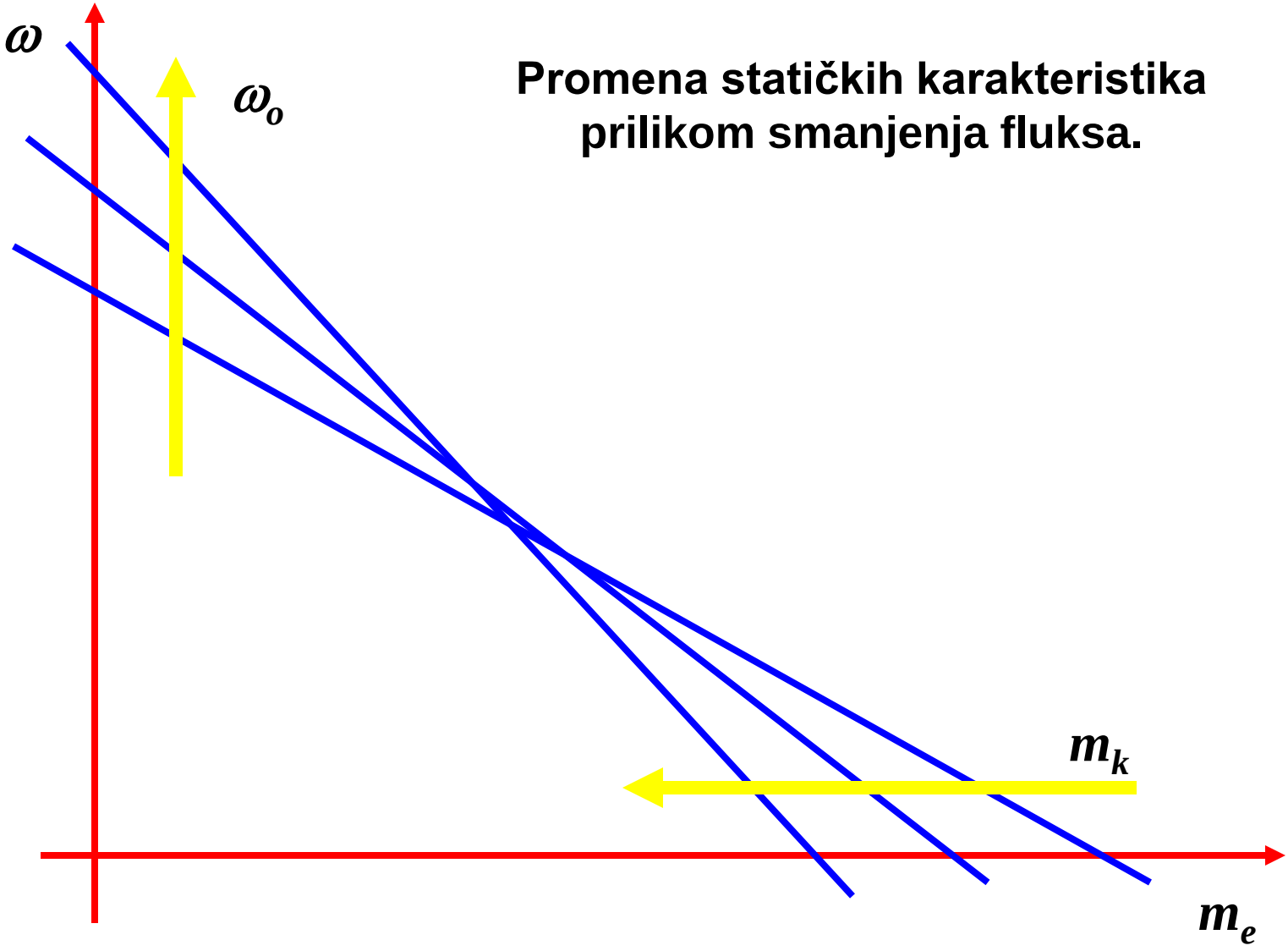
$$m_e = 0 \qquad \omega_0 = U_{an} / \psi_f = 1/\psi_f$$

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

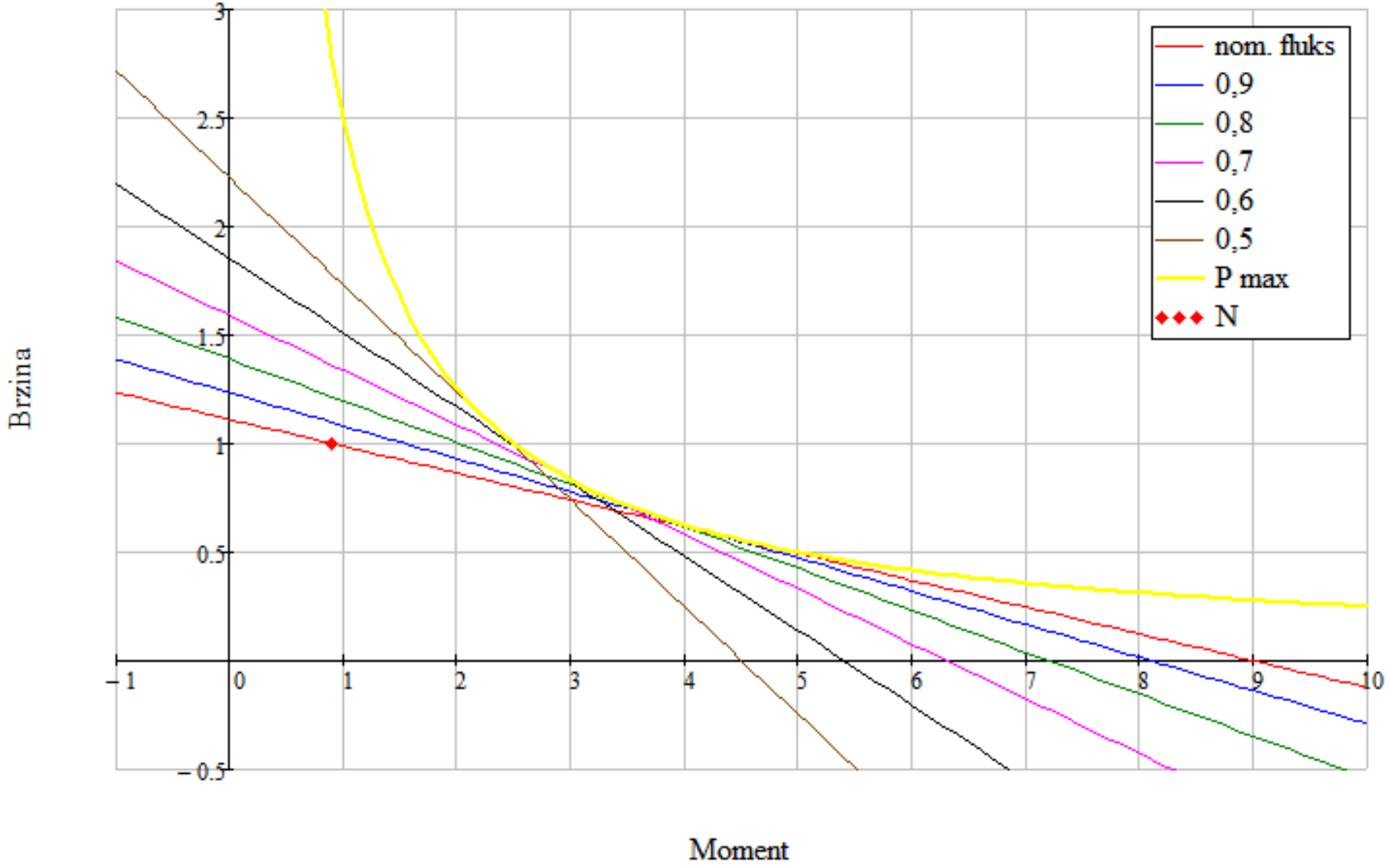
$$\omega = 0 \qquad m_k = U_{an} \cdot \psi_f / R_a = \psi_f / R_a$$

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.



Promena statičkih karakteristika prilikom smanjenja fluksa.



Kod promene pobude, maksimalni moment je funkcija fluksa:

$$M_{e\max} = \psi_f \cdot i_{a\max} = f\left(\psi_f\right)$$

smenom u $\omega_i\ (i_i)$ **dobija se:**

$$\omega_{\max}^{(s)} = \frac{\left(1 - R_a \cdot I_{a\max}\right) \cdot I_{a\max}}{M_{e\max}} \rightarrow$$

HIPERBOLA!!!!!

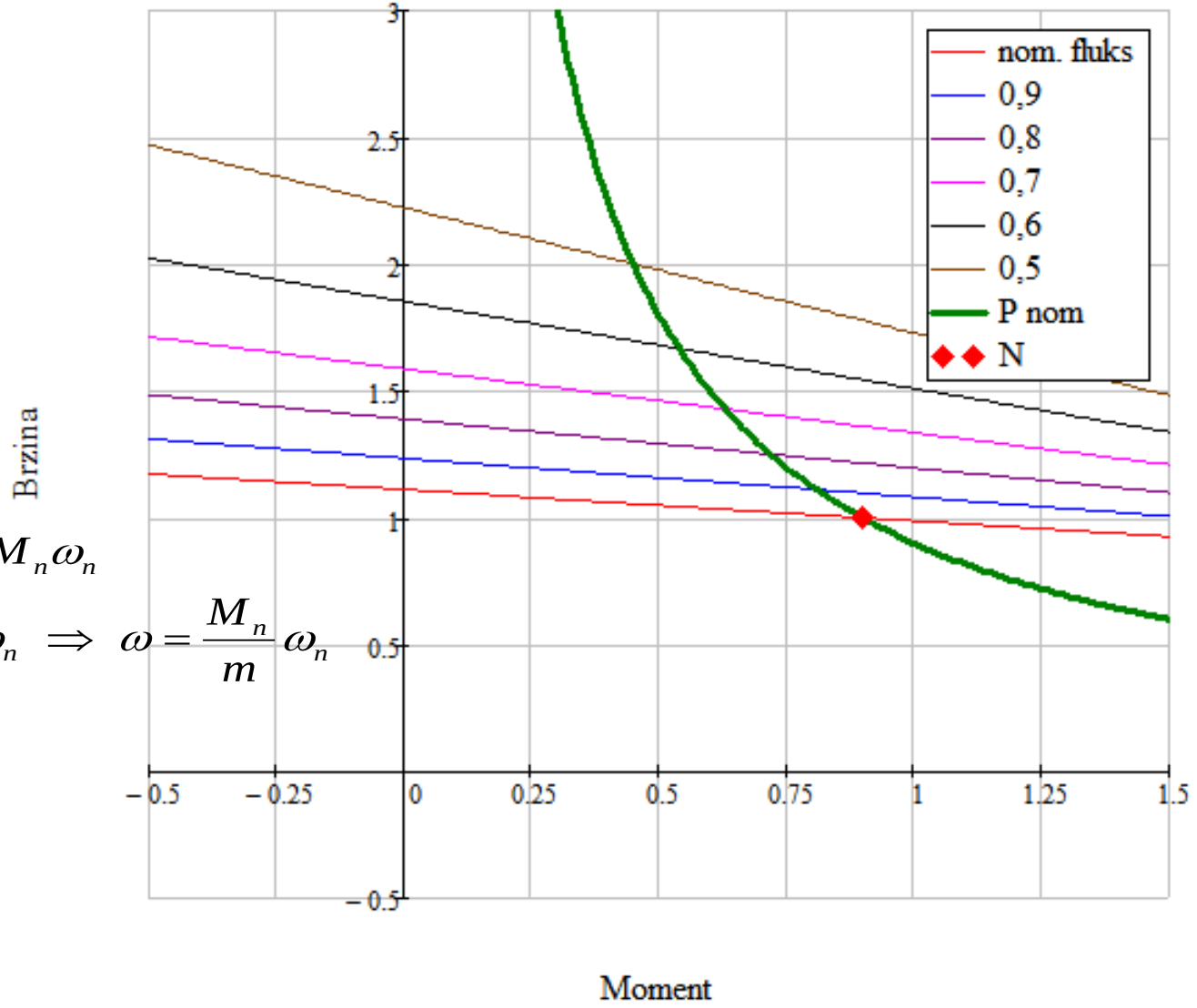
Maksimalna dozvoljena struja određuje oblast rada.

Za trajni rad u oblasti slabljenja polja, mora se voditi računa o zagrevanju mašine. U trajnom radu trebalo bi da struja indukta bude manja ili jednaka nominalnoj.

$$i_a \leq I_{an}$$

$$P_m = m_e \cdot \omega = \psi_f \cdot i_a \cdot \omega = e \cdot i_a = u_a \cdot i_a - R_a \cdot i_a^2$$

Promene statičke karakteristike prilikom smanjenja fluksa. Kriva konstantne snage.



$$P_{\max} = P_n = M_n \omega_n$$

$$m \cdot \omega = M_n \omega_n \Rightarrow \omega = \frac{M_n}{m} \omega_n$$

$$\omega = \frac{P_n}{m}$$

Polazeći od statičke karakteristike $$\omega = \frac{u_a}{\psi_f} - \frac{R_a}{\psi_f^2} m_e$$

uz uslov: $u_a = U_{an} = 1$

Promenu brzine u funkciji promene fluksa dobićemo rešavanjem jednačine:

$$\frac{d\omega}{d\psi_f} = -\frac{1}{\psi_f^2} + \frac{2R_a}{\psi_f^3} m_e = 0$$

Zamenom rešenja $$\psi_{f\,ext} = 2 \cdot R_a \cdot m_e \neq 0$$

u statičku karakteristiku, dobijamo maksimalnu brzinu pri smanjenju pobude

$$\omega_{\max} = \frac{1}{4 \cdot R_a \cdot m_e}$$

HIPERBOLA - OBVOJNICA !!!!

Mehanička snaga je tada maksimalna : $$P_{m\max} = m_e \cdot \omega_{\max} = \frac{1}{4 \cdot R_a}$$

Zbog konstruktivnih razloga brzina motora je ograničena:

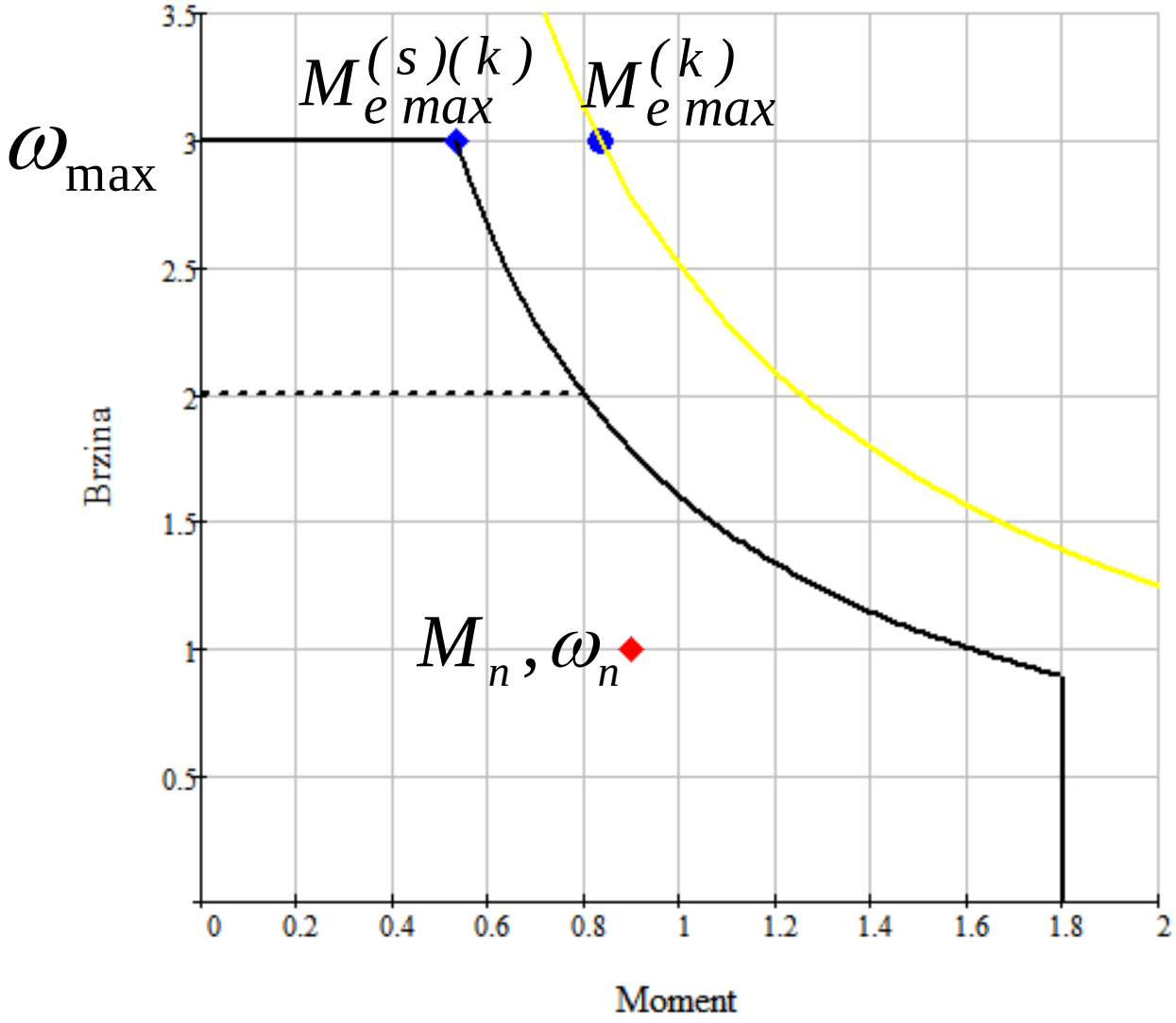
$$\omega_{\max}^{(k)} \in (2 \div 3)$$

Pa dobijamo:

$$M_{e\,max}^{(s)(k)} = \frac{\left(1 - R_a \cdot I_{a\,max}\right) \cdot I_{a\,max}}{\omega_{m\,max}^{(k)}} \qquad M_{e\,max}^{(k)} = \frac{1}{4 \cdot R_a \cdot \omega_{m\,max}^{(k)}}$$

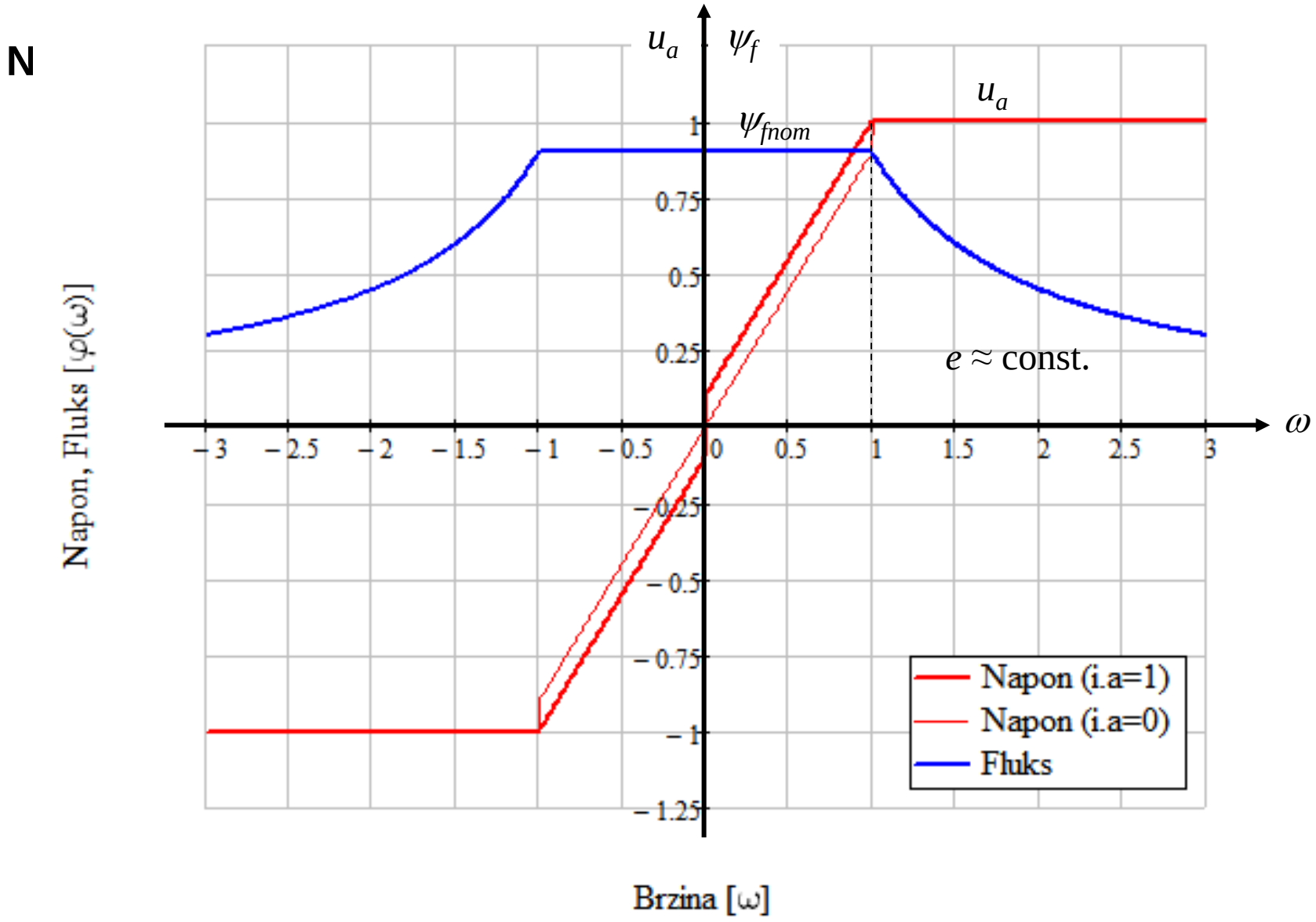
<u>Praktično ima smisla samo smanjivati fluks</u>:

$$\left.\begin{array}{c} \dfrac{E_n}{\omega_{\max}^{(k)}} = \dfrac{U_{an} - R_a \cdot I_{an}}{\omega_{\max}^{(k)}} \\ \text{ili} \\ \dfrac{E_{\min}}{\omega_{\max}^{(k)}} = \dfrac{U_{an} - R_a \cdot I_{a\max}}{\omega_{\max}^{(k)}} \end{array}\right\} = \psi_{f\,\min}, \qquad \psi_{f\,\min} \le \psi_f \le \psi_{fn}$$



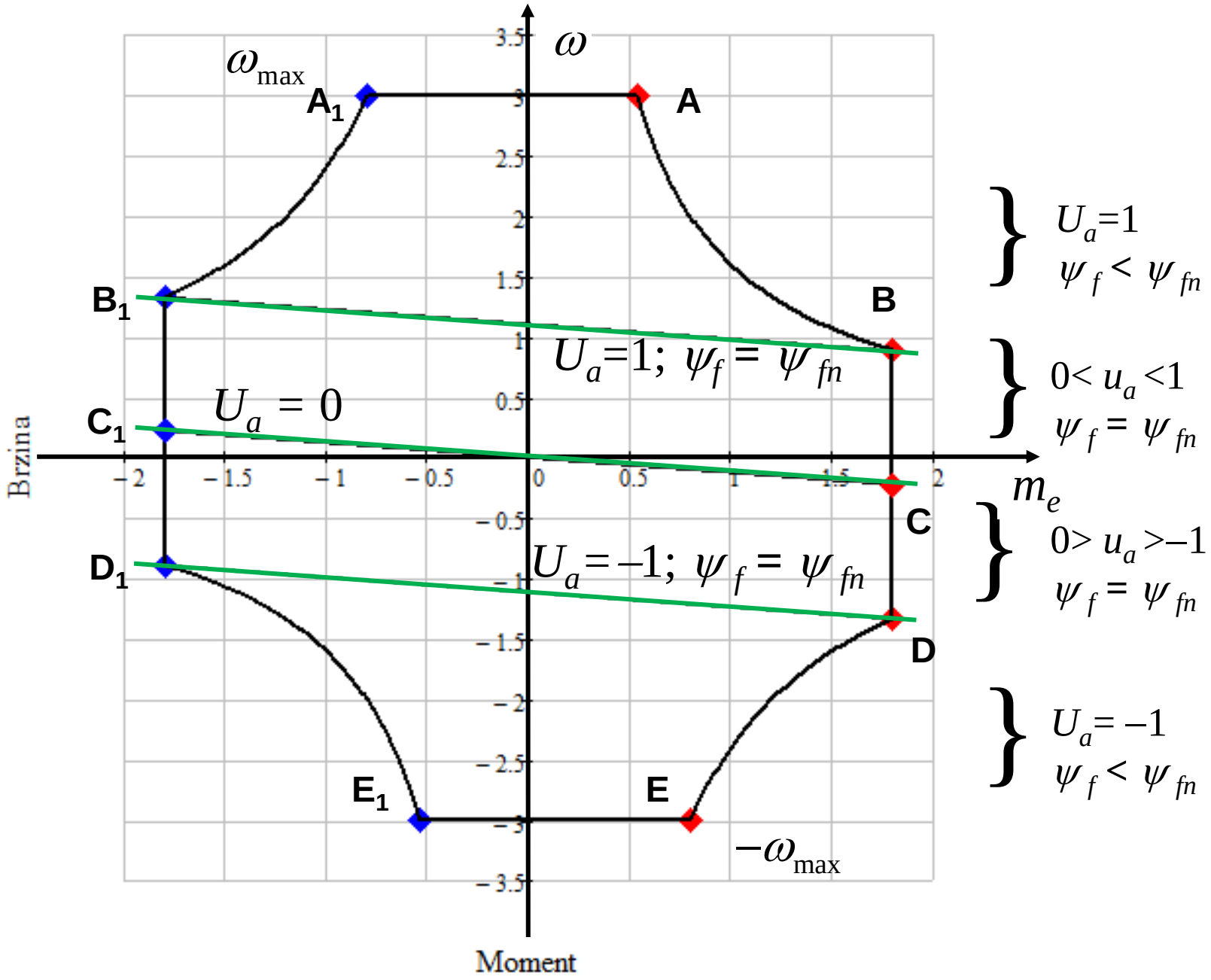
Crna linija	**Granica mogućih radnih tačaka.**
Žuta linija	**Granica teorijski mogućih radnih tačaka.**
♦●	**Momenti na maksimalnoj brzini**
♦	**Nominalna radna tačka**

KOMBINOVANO UPRAVLJANJE
(PROMENOM NAPONA INDUKTA I PREKO POBUDE)

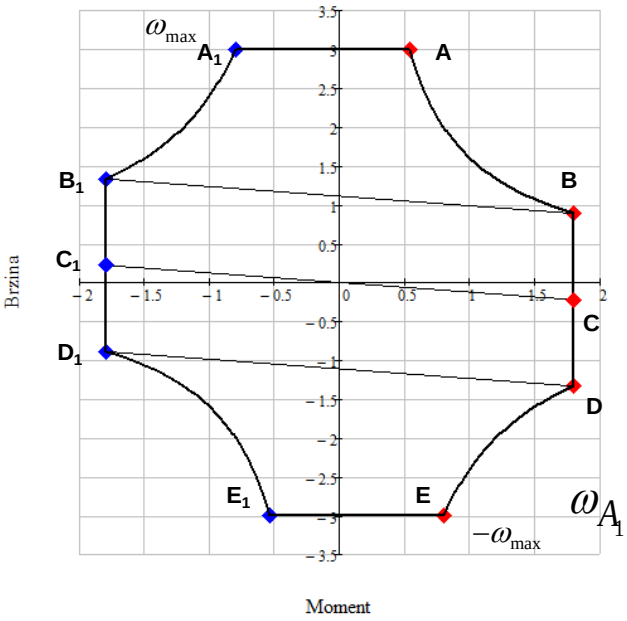


PODRUČJE MOGUĆIH RADNIH TAČAKA U $(m_e;\ \omega)$ RAVNI.

N:



KOORDINATE KARAKTERISTIČNIH TAČAKA U PODRUČJU MOGUĆIH RADNIH TAČAKA U $(m_e;\ \omega)$ RAVNI NA PRIMERU.



$$Za \quad R_a = 0.1, \quad I_{a\,max} = 2 \text{ i } \omega_{max} = 3:$$

$$U_{an} = 1, \; I_{an} = 1, \; \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9, \; M_{en} = \psi_{fn} \cdot I_{an} = 0.9$$

A:

$$\omega_A = \omega_{max}, \quad \psi_A = \frac{\left(U_{an} - R_a \cdot I_{a\,max}\right)}{\omega_{max}} = 0.267, \quad M_A = \psi_A \cdot I_{a\,max} = 0.533$$

A_1:

$$\omega_{A_1} = \omega_{max}, \quad \psi_{A_1} = \frac{\left(U_{an} - R_a \cdot \left(-I_{a\,max}\right)\right)}{\omega_{max}} = 0.4, \quad M_{A_1} = \psi_{A_1} \cdot \left(-I_{a\,max}\right) = -0.8$$

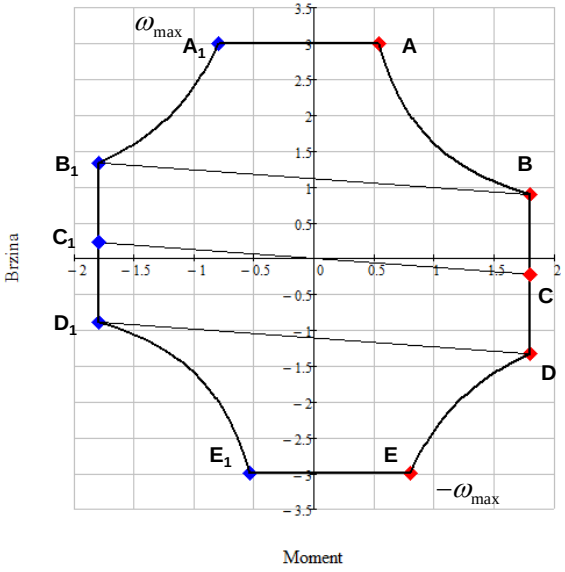
B:

$$\omega_B = \frac{U_{an} - R_a \cdot I_{a\,max}}{\psi_{fn}} = 0.899, \; \psi_B = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9, \quad M_B = \psi_{fn} \cdot I_{a\,max} = 1.8$$

B_1:

$$\omega_{B_1} = \frac{U_{an} - R_a \cdot \left(-I_{a\,max}\right)}{\psi_{fn}} = 1.33, \; \psi_{B_1} = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9, \quad M_{B_1} = \psi_{f\,nom} \cdot \left(-I_{a\,max}\right) = -1.8$$

KOORDINATE KARAKTERISTIČNIH TAČAKA U PODRUČJU MOGUĆIH RADNIH TAČAKA U $(m_e;\ \omega)$ RAVNI NA PRIMERU.



C: $\omega_C = \dfrac{0 - R_a \cdot I_{a\,max}}{\psi_{fn}} = -0.222,\ \psi_C = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9,$

$M_C = \psi_{fn} \cdot I_{a\,max} = 1.8$

C_1: $\omega_{C_1} = \dfrac{0 - R_a \cdot \left(-I_{a\,max}\right)}{\psi_{fn}} = 0.222,\ \psi_{C_1} = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9,$

$M_{C_1} = \psi_{fn} \cdot \left(-I_{a\,max}\right) = -1.8$

D: $\omega_D = \dfrac{-U_{an} - R_a \cdot I_{a\,max}}{\psi_{fn}} = -1.33,\ \psi_D = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9,\ \ M_D = \psi_{fn} \cdot I_{a\,max} = 1.8$

D_1: $\omega_{D_1} = \dfrac{-U_{an} - R_a \cdot \left(-I_{a\,max}\right)}{\psi_{fn}} = -0.899,\ \psi_D = \psi_{fn} = 1 - R_a = 0.9,\ \ M_D = \psi_{fn} \cdot \left(-I_{a\,max}\right) = -1.8$

E: $\omega_E = -\omega_{max} = -3,\ \psi_E = \dfrac{-U_{an} - R_a \cdot I_{a\,max}}{\omega_{max}} = 0.4,\ \ M_D = \psi_E \cdot I_{a\,max} = 0.8$

E_1: $\omega_{E_1} = -\omega_{max} = -3,\ \psi_{E_1} = \dfrac{-U_{an} - R_a \cdot \left(-I_{a\,max}\right)}{\omega_{max}} = 0.267,\ \ M_{E_1} = \psi_{E_1} \cdot I_{a\,max} = -0.533$