

Princip rada pogona

Regulisani elektromotorni pogoni (REMP)

– Mehatronika

predavanje 2, 3

(Feb 2022)

Sadržaj: Princip rada REMP

- 1 Na kom principu REMP rade - jednačina kretanja ?**
- 2 Momentne karakteristike motora i opterećenja**
- 3 Šta regulišemo u pogonima ?**

1. Na kom principu rade elektromotorni pogoni ?

Mehaničke jednačine kretanja

Drugi Njutnov zakon (1687. godine)

$$F = M \cdot a \qquad \frac{d}{dt}(M \cdot \vec{v}) = \sum \vec{f}$$



II Njutnov zakon za pravolinijsko kretanje:

$$f_e - f_m = \frac{d}{dt}(M \cdot v) = M \frac{dv}{dt} + v \frac{dM}{dt} \longrightarrow F = M \cdot a$$

gde je:

Ako nema promene mase

f_e - pokretačka-motorna sila ,

f_m - otporna, sila koja se suprotstavlja kretanju,

M – masa,

v - brzina kretanja

Ubrzanje koje pri kretanju dobija jedno telo srazmerno je jačini sile koja na njega deluje, a obrnuto srazmerno masi tog tela

Mehaničke jednačine kretanja

II Njutnov zakon za rotaciono kretanje:

$$m_e - m_m = \frac{d}{dt}(\omega \cdot J) = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \cancel{\frac{dJ}{dt}}$$

gde je: **m_e** – elektromagnetni momenat motora;
 m_m – momenat opterećenja, otporni moment pogona,
 J – ukupan momenat inercije pogona;
 ω – ugaona brzina,

$$m_e - m_m = \frac{d}{dt}(\omega \cdot J) = J \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \alpha = J \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

α – ugaono ubrzanje;
 θ – trenutni ugao vratila, položaj

Ugaono ubrzanje koje pri kretanju dobija jedno telo srazmerno je jačini momenta koji na njega deluje, a obrnuto srazmerno inerciji tog tela

Mehaničke jednačine kretanja

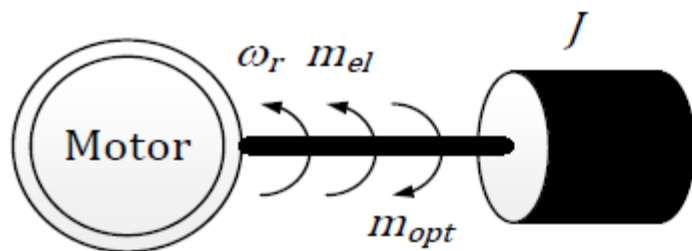
II Njutnov zakon za rotaciono kretanje:

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

Znak promene
brzine zavisi od
odnosa m_e i m_m

Moment koji razvija motor

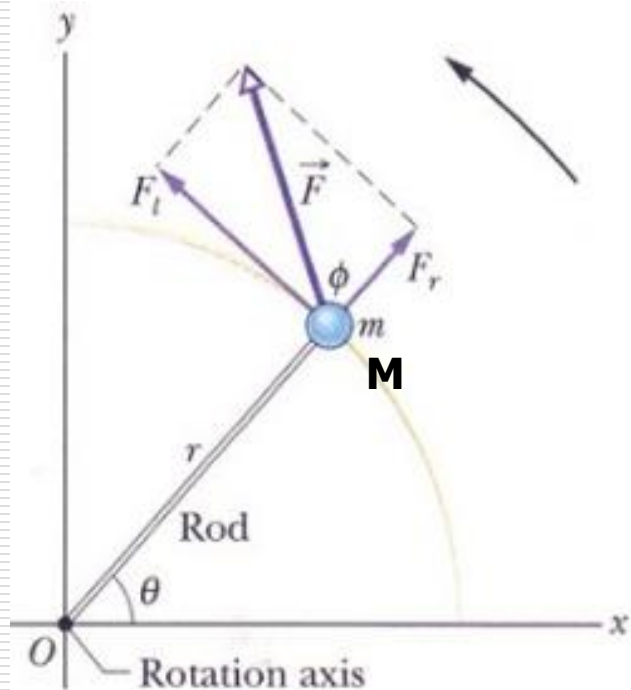
Momenat opterećenja !!!



$$\begin{aligned} m_{el} > m_{opt} &\longrightarrow \omega_r \uparrow \\ m_{el} = m_{opt} &\longrightarrow \omega_r = const \\ m_{el} < m_{opt} &\longrightarrow \omega_r \downarrow \end{aligned}$$

Sl. 1.4. Pojednostavljena šema rada EMP-a

Kako se od sile F dobija moment sile m ?



Veze **tangencijalne** i **ugaone brzine/ubrzanja**

$$v_T = \omega \cdot r \quad a_T = \frac{dv_T}{dt} = \frac{d\omega}{dt} \cdot r \rightarrow$$

Tangencijalna sila F_T dovodi do **tangencijalnog ubrzanja a_T** tela mase **M**

$$\vec{F}_T = M \cdot \frac{d\vec{v}_T}{dt} = M \cdot \vec{a}_T$$

Moment sile koji se razvija iznosi

$$\vec{m} = \vec{F}_T \times \vec{r} \rightarrow m = F_T \cdot r$$

$$\rightarrow m = M \cdot a_T \cdot r$$

$$m = M \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot r \cdot r$$

Konačno se dobija

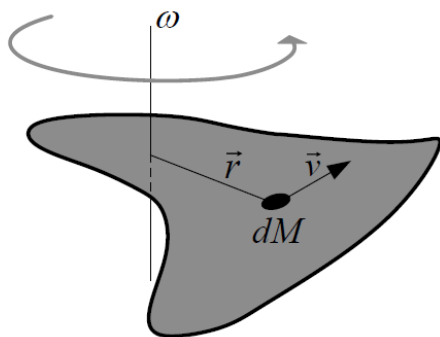
$$m = M \cdot r^2 \frac{d\omega}{dx} = J \frac{d\omega}{dx}$$

Moment inercije tela

Moment inercije (J) je mera inernosti tela pri rotacionom kretanju. Analogan je masi pri pravolinijskom kretanju

Ako je masa = sila/ubrzanje , onda je moment inercije = moment/(ugaono ubrzanje)

$$F = M \cdot \frac{dv}{dt} \quad \xrightarrow{\text{takođe važi}} \quad m = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$



Element momenta ubrzanja **dm** (dinamička komponenta) koji deluje na element mase **dM** (krutog tela ukupne mase M), prouzrokuje pri rotacionom kretanju ugaono ubrzanje **$d\omega/dt$**

$$dm_d = r \cdot df_d = r \cdot dM \cdot \frac{dv}{dt} = r^2 dM \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

gde je: r - poluprečnik rotacije; df_d - element tangentne sile koja deluje na element mase; v - tangentna brzina.

Ukupan moment ubrzanja je

$$m_d = \int_0^{m_d} dm_d = \frac{d\omega}{dt} \cdot \int_0^M r^2 dM = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Što dovodi do definicije inercije tela

$$J = \int_0^M r^2 dM$$

Važi i
$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$$

2. Momentne karakteristike u EMP

- **Momenat opterećenja**
- **Prirodna momentna karakteristika motora**
- **Radna oblast i stacionarna radna tačka EMP**

Momente karakteristike

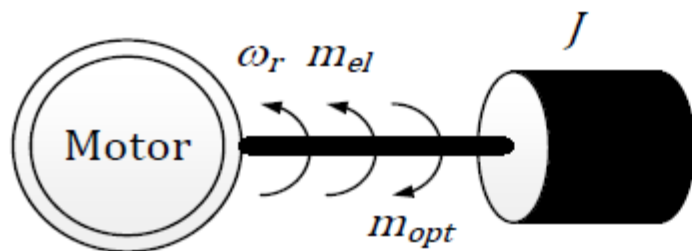
Momentna karakteristika opterećenja se opisuje mehaničkom karakteristikom u $M-\omega$ ravni. Ta karakteristika opisuje zavisnost momenta opterećenja od brzine.

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

Znak promene
brzine zavisi od
odnosa m_e i m_m

Moment koji razvija motor

Momenat opterećenja !!!

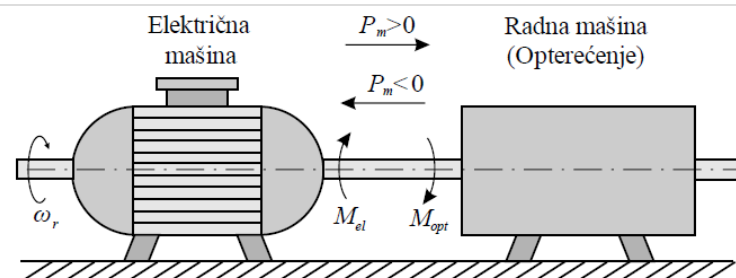


$$\begin{aligned} m_{el} > m_{opt} &\longrightarrow \omega_r \uparrow \\ m_{el} = m_{opt} &\longrightarrow \omega_r = const \\ m_{el} < m_{opt} &\longrightarrow \omega_r \downarrow \end{aligned}$$

Sl. 1.4. Pojednostavljena šema rada EMP-a

Momente karakteristike

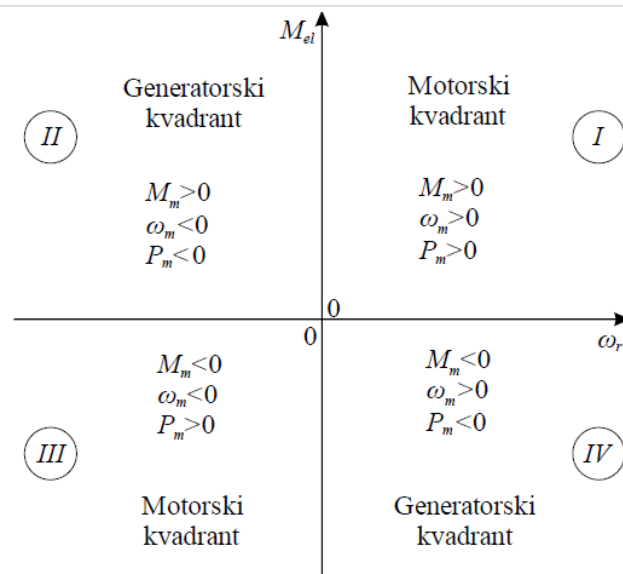
U EMP električna mašina generiše moment kojem se na vratilu suprotstavlja moment opterećenja



Mehanička snaga koju mašina predaje opterećenju je pozitivna ako su brzina vratila i moment mašine istog, a negativna ako su različitog znaka. Mehaničke karakteristike prikazuju se u $M-\omega$ (ili $\omega-M$) ravni, Sl. 1.7, gde u prvom i trećem kvadrantu mašina predaje mehaničku snagu opterećenju i pogon se nalazi u motorskom režimu rada, a u drugom i četvrtom kvadrantu mašina oduzima mehaničku snagu opterećenju i pogon se nalazi u generatorskom režimu rada.

Mehanička snaga

$$P_m = M_m \cdot \omega_m$$



Momente karakteristike motora

Mehanička karakteristika elektromotora predstavlja zavisnost momenta koji motor razvija od brzine i daje se u analitičkom ili grafičkom obliku. Mehanička karakteristika se u analitičkom obliku daje kao funkcija $M_{el} = M_{el}(\omega)$, a u grafičkom obliku se tada prikazuje u $\omega - M$ ravni ili, alternativno, kao analitička funkcija $\omega = \omega(M_{el})$, i grafički tada prikazuje u $M - \omega$ ravni. Prvi način prikaza ($\omega - M$ ravan) se tipično koristi kod mašina naizmenične struje, a drugi ($M - \omega$) kod mašina jednosmerne struje.

Prirodna mehanička karakteristika motora je ona koju motor razvija u neregulisanom pogonu pri nominalnom napajanju.

Primer za motor jednosmerne struje (MJS) pri konstantnom naponu napajanja

Ovu karakteristiku ćemo izvesti kasnije. Ali, šta nam ona govori? Ako se zanemari pad na otpornosti namotaja brzina je const, nezavisna od momenta opterećenja

$$u_a = - \frac{d\psi_a}{dt} \approx \omega_r \psi_{PM} \rightarrow \omega_0 = U_o / \psi_{PM}$$

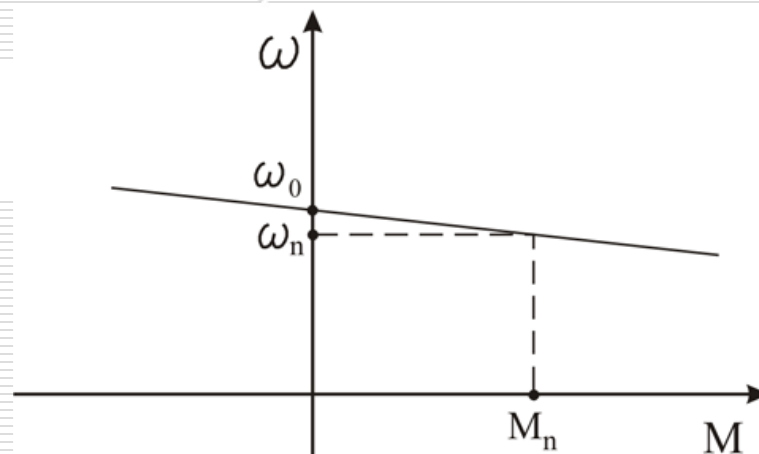
Ali, usled $R_a \neq 0$, za isti napon,

brzina pada sa opterećenjem, tj uvećanjem momenta opterećenja.

Analitički izraz za MJS

$$\omega_r = \frac{U_a}{\psi_p} - \frac{R_a}{\psi_p^2} \cdot M_{el} = \omega_0 - \Delta\omega$$

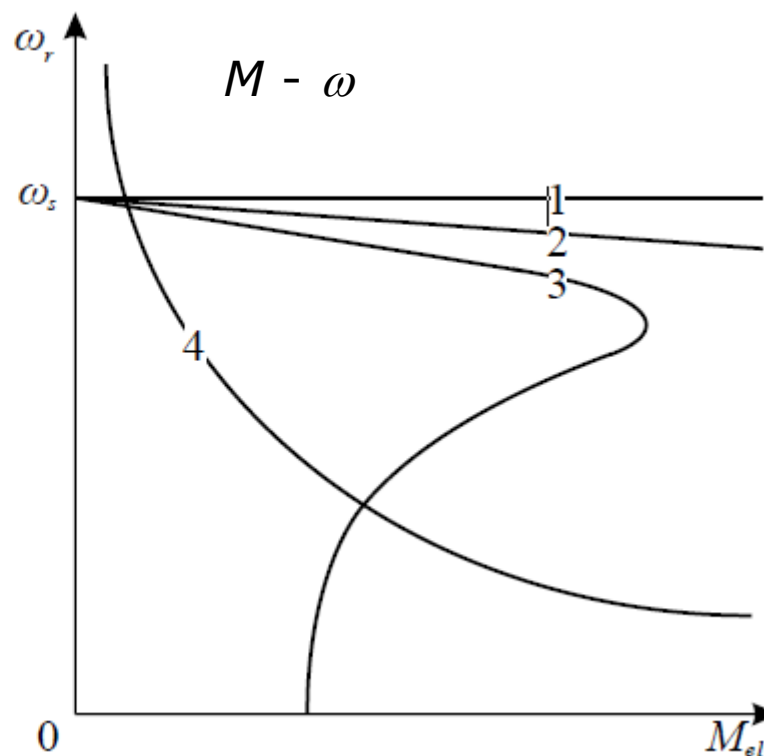
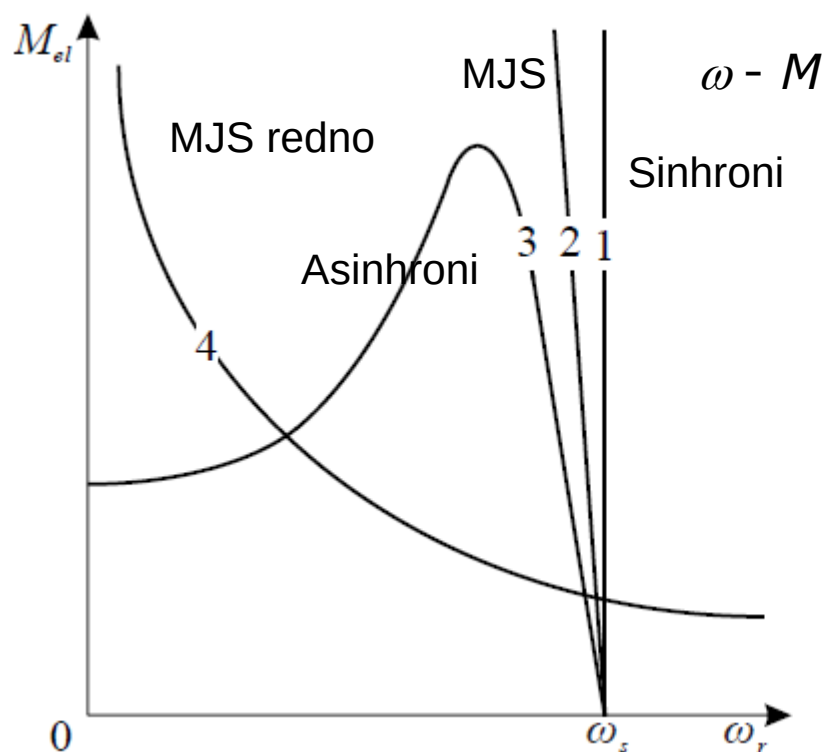
Grafički prikaz za MJS



Momente karakteristike motora

Četiri tipične mehaničke karakteristike elektromotora: sinhrona (1), MJS sa nezavisnom pobudom (2), asinhrona (3) i MJS sa rednom pobudom (4) karakteristika. Mehanička karakteristika SM se odlikuje potpunom nezavisnošću brzine od momenta motora, dok mehanička karakteristika otočnog motora neznatno opada sa porastom opterećenja. Slično važi i za karakt AM, dok se u slučaju rednog MJS brzina značajno menja

Mehaničke karakteristike elektromotora možemo podeliti prema stepenu tvrdoće na: apsolutno tvrde (1), tvrde (2) i meke (4) karakteristike



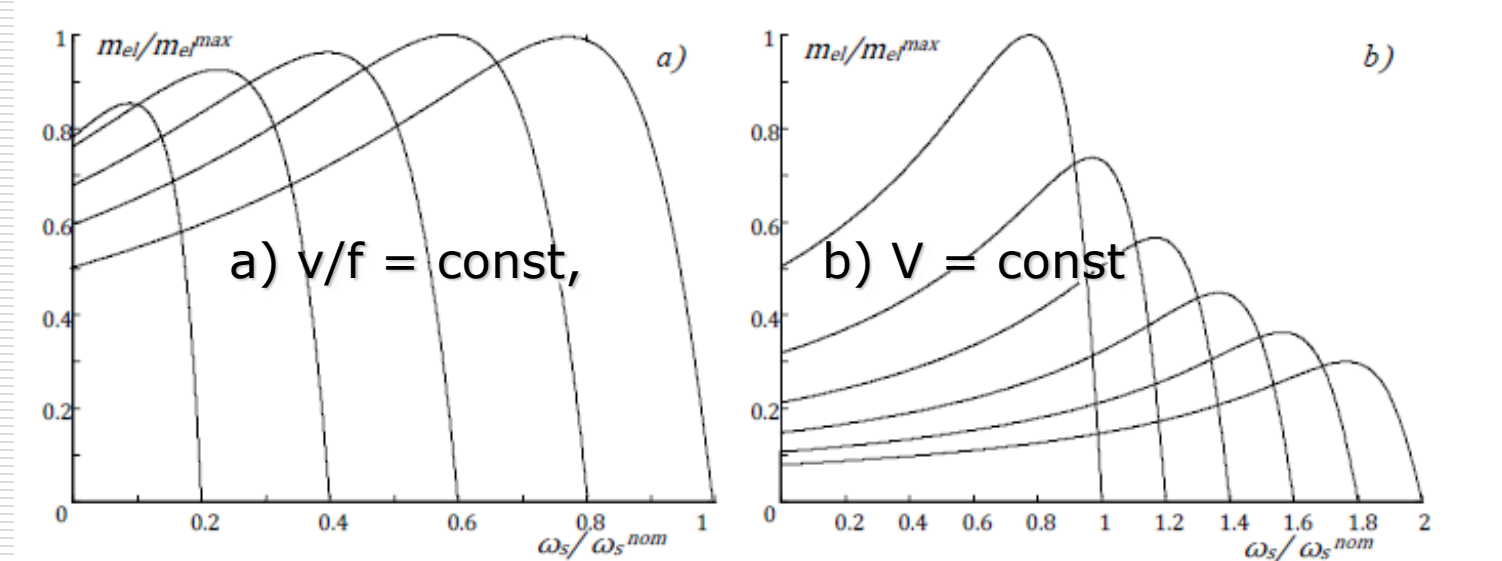
Veštačke momentne karakteristike

Veštačke mehaničke karakteristike motora nastaju promenom parametara napajanja motora. Ovo može da se ostvari samo u REMP sa pretvaračem energetske elektronike koji menja napon na motoru.

U REMP pretvarač na osnovu komandi regulatora menja parametre napona na motoru i time mu po potrebi menja mehaničku karakteristiku pa ona postaje veštačka.

Primer pomeranja veštačkih momentnih karakteristika za asinhroni motor pri promeni frekvencije. Pri tome, napon ili raste sa frekvencijom (levo), ili je napon konstantan (desno)

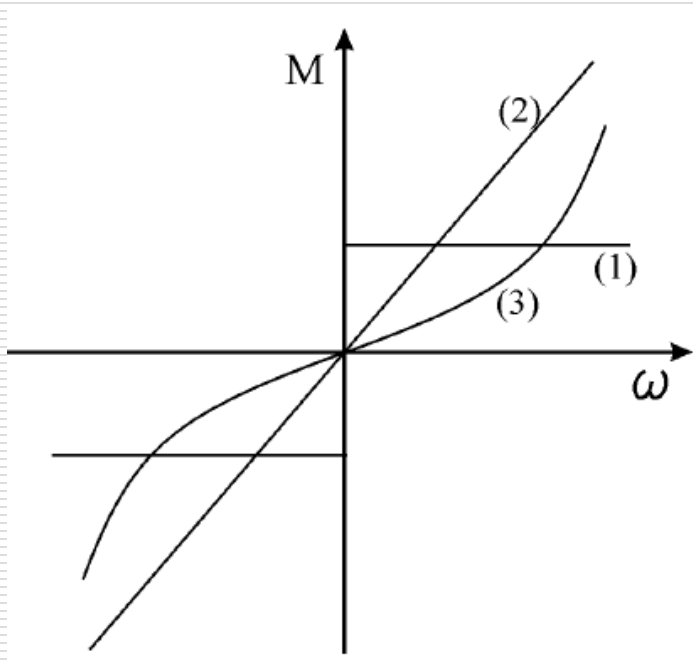
Suština svega ovoga je promena brzine motora – regulisan pogon !



Momente karakteristike opterećenja

Momentna karakteristika opterećenja se opisuje mehaničkom karakteristikom u $M-\omega$ ravni. Ta karakteristika opisuje zavisnost momenta opterećenja od brzine.

$$M(\omega) = M_0 + (kM_n - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^\alpha$$



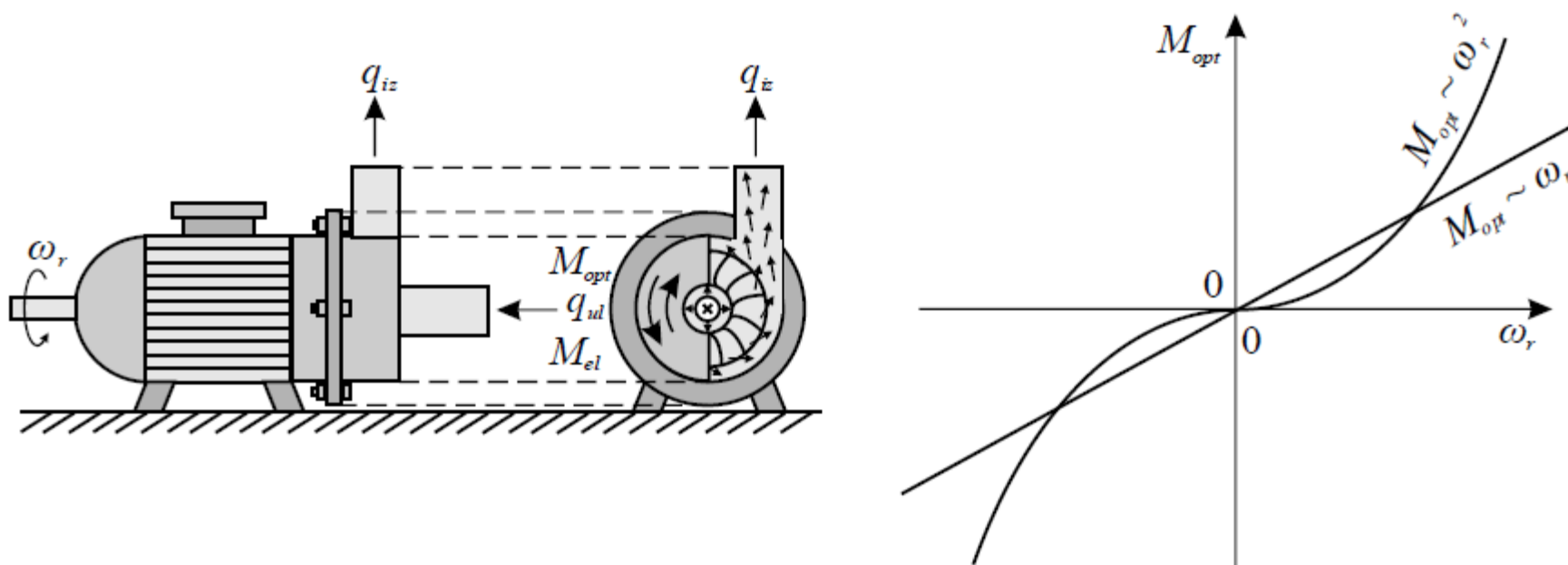
Tipične momente karakteristike opterećenja:

- 1) Kranska (gravitaciona) $M = \text{const}$
- 2) Trenje (linearna) $M = k \omega$
- 3) Ventilatorska (kvadratna) $M = k \omega^2$

Momente karakteristike opterećenja

Momentne karakteristike reaktivnih opterećenja

Kod reaktivnih opterećenja radna mašina uvek prima mehaničku snagu od električnog motora i ne može da je vraća ka motoru (osim kod usporavanja, kada oslobađa akumulisanu energiju obrtnih masa). Ovo je najčešća vrsta električnih opterećenja, a jedan primer je pumpa ili ventilator, čija se momentna karakteristika, zavisno od smera obrtanja, nalazi u prvom i trećem kvadrantu,

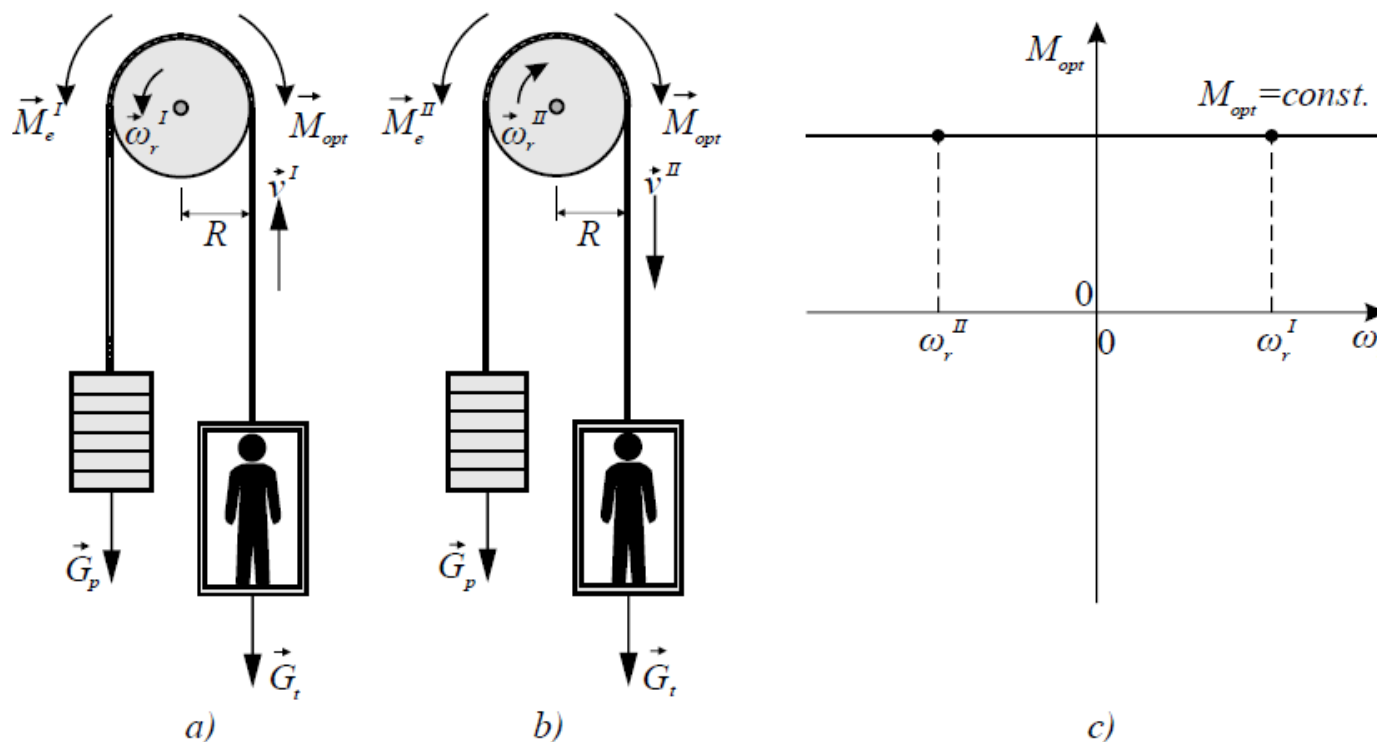


Sl. 1.11. Elektromotorni pogon pumpe kao primer reaktivnog opterećenja i mehaničke karakteristike za dva tipa pumpe [5]

Momente karakteristike opterećenja

Momentne karakteristike potencijalnih opterećenja

Kada radna mašina (opterećenje) može da vraća mehaničku energiju električnoj mašini (da je prevede iz motorskog u generatorski režim rada ne samo pri usporavanju), tada je ta karakteristika potencijalna. Potencijalna karakteristika opterećenja tipično se javlja kroz dva oblika, u zavisnosti od toga u kojim kvadrantima se nalazi ,

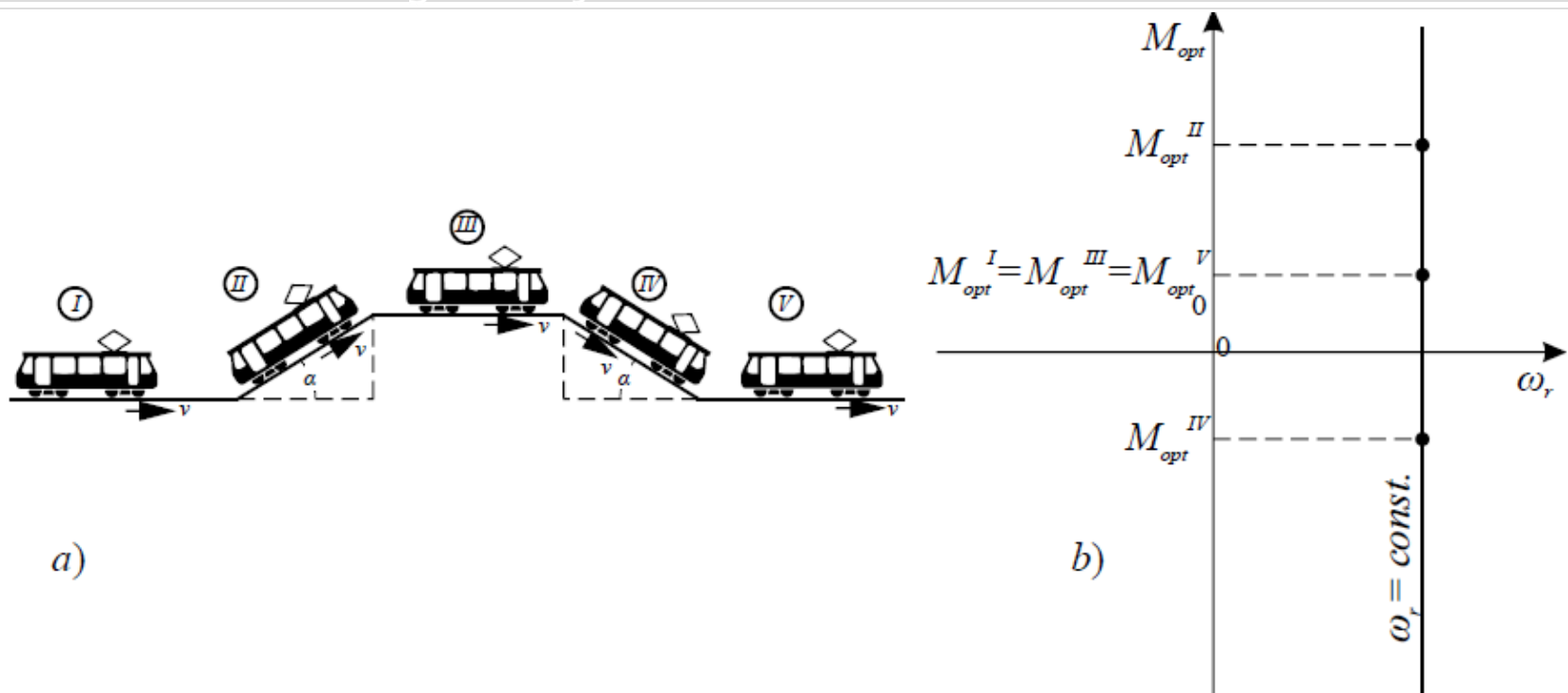


Sl. 1.12. Elektromotorni pogon lifta: a) podizanje, b) spuštanje, c) mehanička karakteristika

Momente karakteristike opterećenja

Momentne karakteristike potencijalnih opterećenja

Kada radna mašina (opterećenje) može da vraća mehaničku energiju električnoj mašini (da je prevede iz motorskog u generatorski režim rada ne samo pri usporavanju), tada je ta karakteristika potencijalna. Potencijalna karakteristika opterećenja tipično se javlja kroz dva oblika, u zavisnosti od toga u kojim kvadrantima se nalazi.



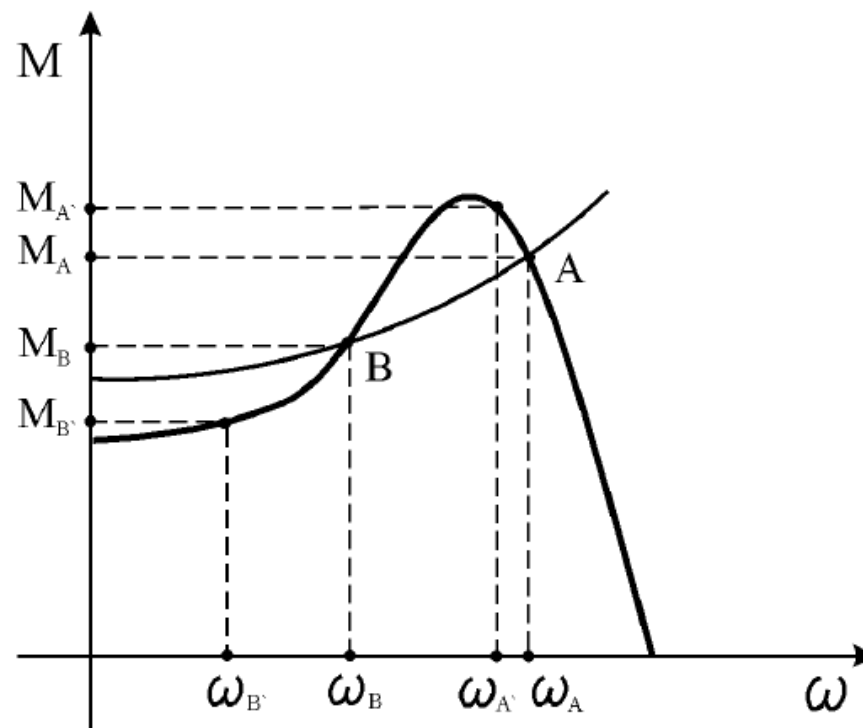
Sl. 1.13. Elektromotorni pogon električnog vozila kao primer potencijalnog opterećenja [5]

Radna tačka i stabilnost EMP

Radna tačka EMP se nalazi u preseku karakteristike motora i karakteristike opterećenja. Tačka može biti stabilna (A) i nestabilna (B)

Da bi radna tačka bila stabilna, potrebno je da je promena momenta opterećenja sa porastom brzine veća od primene momenta motora

$$\left. \frac{\partial m_{opt}(\omega, t)}{\partial \omega} \right|_{\omega_1} > \left. \frac{\partial m_e(\omega, t)}{\partial \omega} \right|_{\omega_1}$$



Sigurna oblast rada EMP

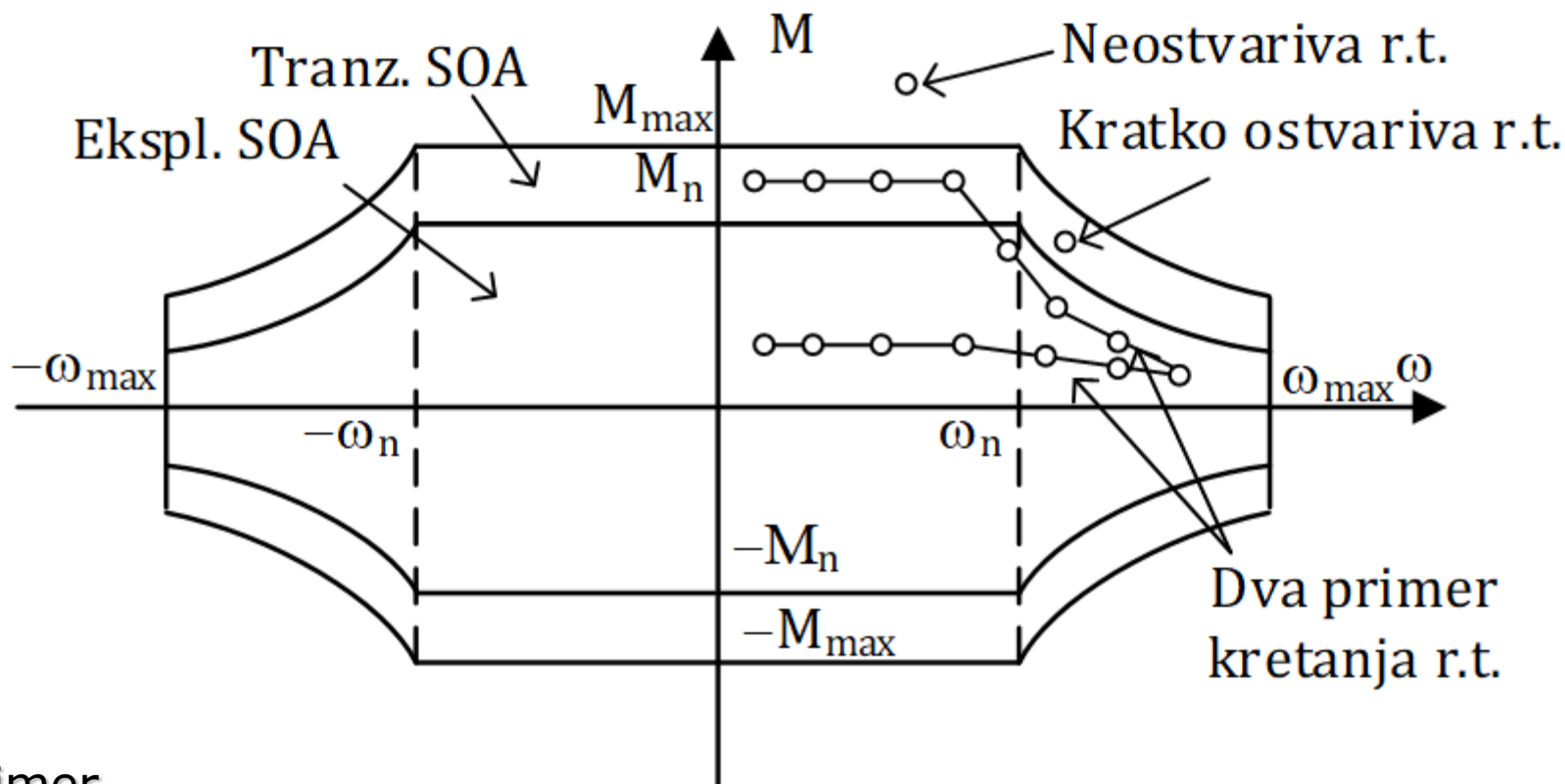
- **Oblast rada pogona** se opisuje u $M-\omega$ ravni .
- **Sigurna oblast rada (SOA- Safe Operation Area)** predstavlja oblast u $M-\omega$ ravni koja nastaje kombinacijom maks. momenta i snage
- SOA može biti eksploataciona ili tranzijenta

Eksploataciona karakteristika obuhvata sve dozvoljene radne tačke u kojima motor u trajnom radu nije ugrožen ni na koji način (S1). **U prvoj zoni ograničena je nominalnim momentom**, a **u drugoj zoni se zbog nominalne snage** ali i opadanja fluksa sužava sa rastom brzine sve do maksimalne brzine.

Tranzijentna karakteristika je šira od eksploatacione karakteristike i obuhvata sve radne tačke u kojima se pogon uopšte može naći. Ona je **u prvoj zoni definisana maksimalnom (kratkotrajnom) strujom** motora ili pretvarača pomoću koje se **kratkotrajno dozvoljava maskimalni moment** (veći od nominalnog). **U drugoj zoni ona je ograničena sa maksimalnom snagom** koja je takođe veća od nominalne snage (S2)

Sigurna oblast rada EMP

- Tranzijenta SOA je šira od trajno eksploatacione SOA
- Radna tačka može da se kreće trajno po eksploatacionoј SOA, a priveremeno može da se kreće i po tranzijetnoj SOA



Primer

- Kada eV ubrzava, razvija ogroman moment i motor se brzo greje. On tada može preći i u tranzijentu SOA
- Kada eV dostigne brzinu, moment pada i motor može trajno da radi, tj. vraća se u eksploatacionu SOA

3. Šta regulišemo u pogonima ?

Kako se reguliše momenat, kako brzina a kako položaj?

3. Regulacione petlje u pogonu

5.1 Pogon regulisan po momentu

- U neregulisanom pogonu se motor napaja bez regulacije, i moment koji EMP razvija nije regulisan,
- U regulisanom EMP želimo da promenimo radnu tačku pogona a to je jedino moguće uticajem na jednačinu kretanja:

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

Ostaje nam da menjamo moment koji razvija motor

Momenat opterećenja ne možemo da menjamo !!!

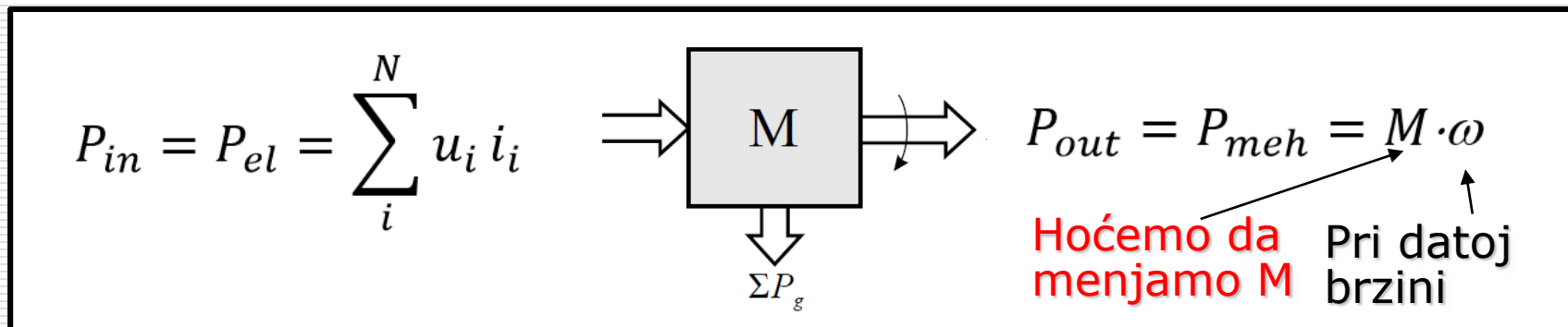
Znak promene brzine zavisi od odnosa m_e i m_m

Za REMP je idealno da motor ostvari potrebni moment tj da postane linearni konvertor momenta !!!

Da bi se to ostvarilo neophodni su adekvatni pretvarač i upravljanje za dati motor

3. Kako upravljati momentom motora ?

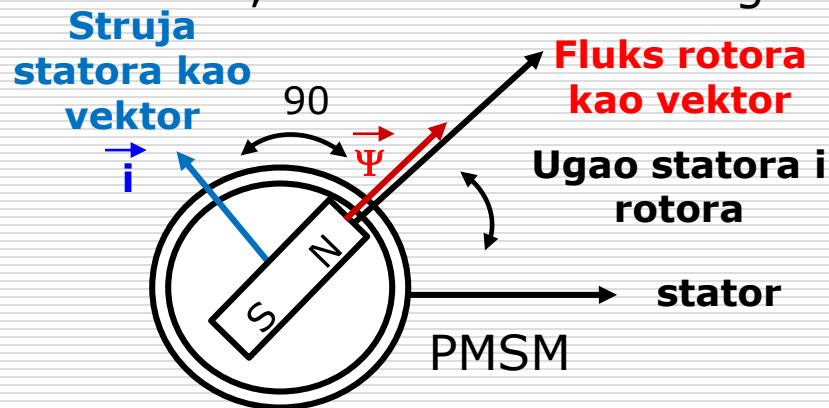
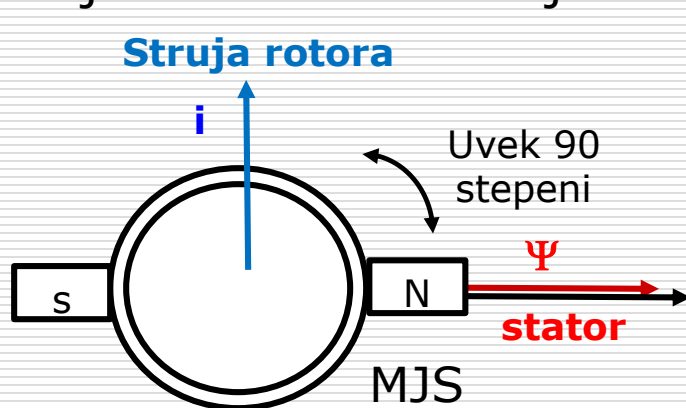
Motor konvertuje električnu snagu na ulazu u mehaničku snagu na izlazu



Pravilnim upravljanjem je moguće kontrolisati moment koji motor razvija. **Princip se razlikuje od motora do motora** ali uglavnom se svodi na kontrolu struje

$$\vec{M} = \vec{\Psi} \times \vec{i}$$

Rešenje: kontrolisati struju u odnosu na fluks, za svaki motor drugačije



3. MJS kao generator momenta

Princip nastanka momenta kod MJS je prost

- Magnet na statoru pravi polje normalno na provodnike rotora.
- Napon se dovede na provodnike rotora i uspostavi se struja u provodnicima rotora
- Na provodnik sa strujom u magnetnom kolu deluje Lorencova sila

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \rightarrow F = BIl$$

Sila na provodnik generiše momenat sile

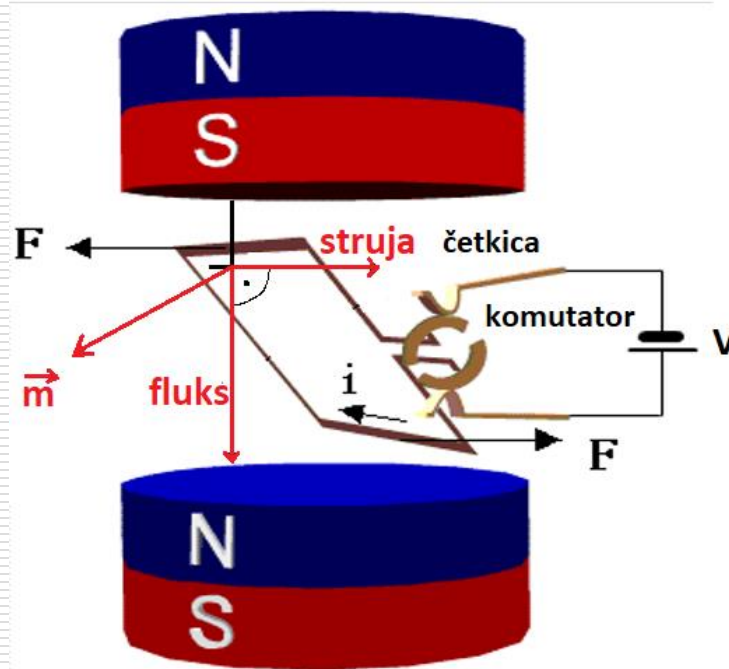
$$\vec{M} = \vec{R} \times \vec{F}$$

Momenat sile je vektorski proizvod vektora fluksa i vektora struje

$$\vec{M} = \vec{\Psi} \times \vec{i}$$

Pošto su flux (sa statora) i struja (kroz rotor) uvek normalni važi:

$$M = \Psi \cdot i \sim i$$

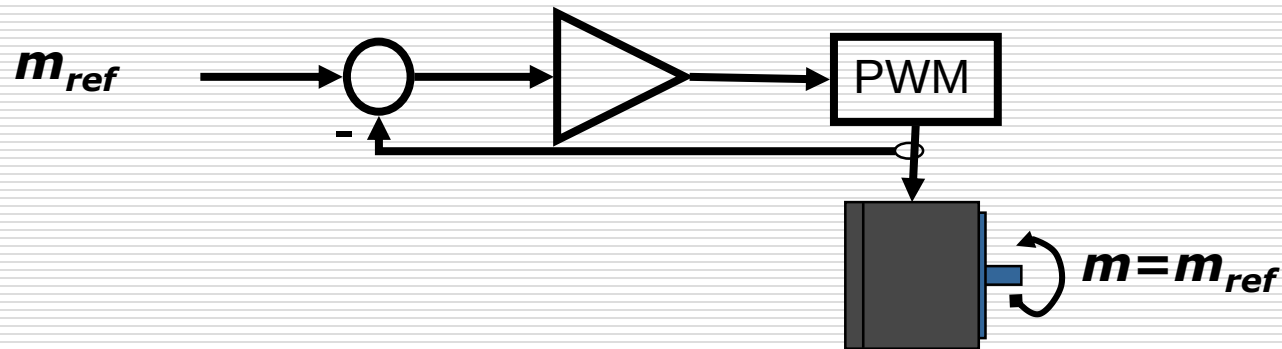


- **Fluks** već postoji (magnet) i normalan je na provodnike rotora
- **Moment**: za konst. fluks će biti proporcionalan struji rotora
- **Znači strujom pravimo moment ! A kako uspostaviti struju rotora:**
 - Nametnuti rotoru napon i čekati da se uspostavi struja
 - Nametnuti rotoru struju

3. Regulacione petlje u pogonu

5.1 Pogon regulisan po momentu

- Da bi se ostvarilo upravljanje momentom neophodni su adekvatni pretvarač i upravljanje za dati motor
- Najprostije je upravljati momentom MJS jer je moment proporcionalan struji ! $m = k i_{ref}$



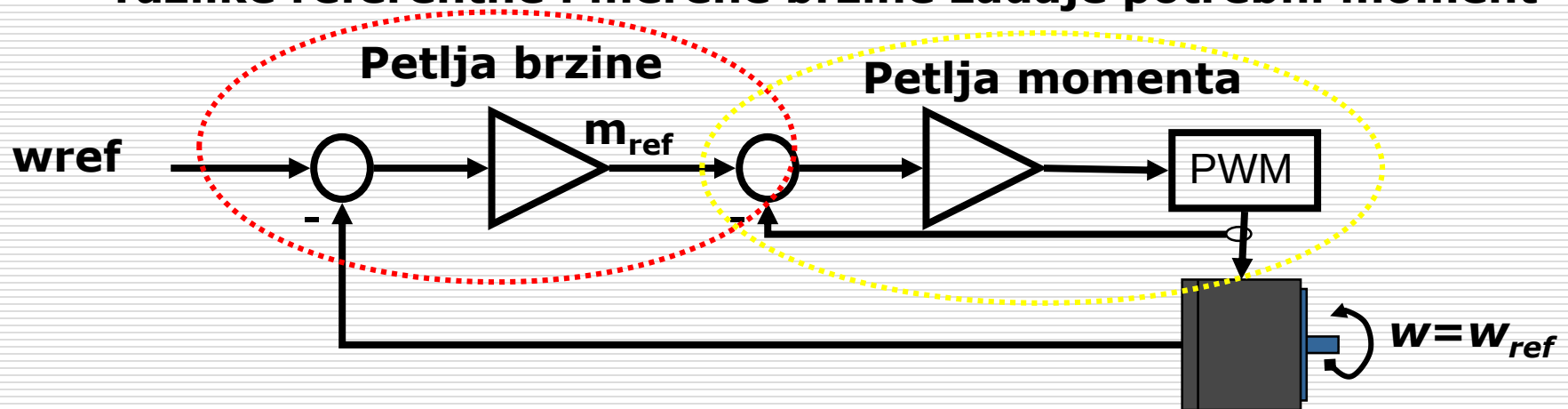
Regulaciona struktura momenta se koristi

- Kao glavna u pogonima regulisanim po momentu
- Kao podređena u pogonima regulisanim po brzini i položaju

3. Regulacione petlje u pogonu

5.2 Pogon regulisan po brzini

- Pogon regulisan po brzini ima zadatak da ostvari zadati referentu brzinu
- Da bi to ostvari dodaje se regulator brzine koji na osnovu razlike referentne i merene brzine zadaje potrebnii moment



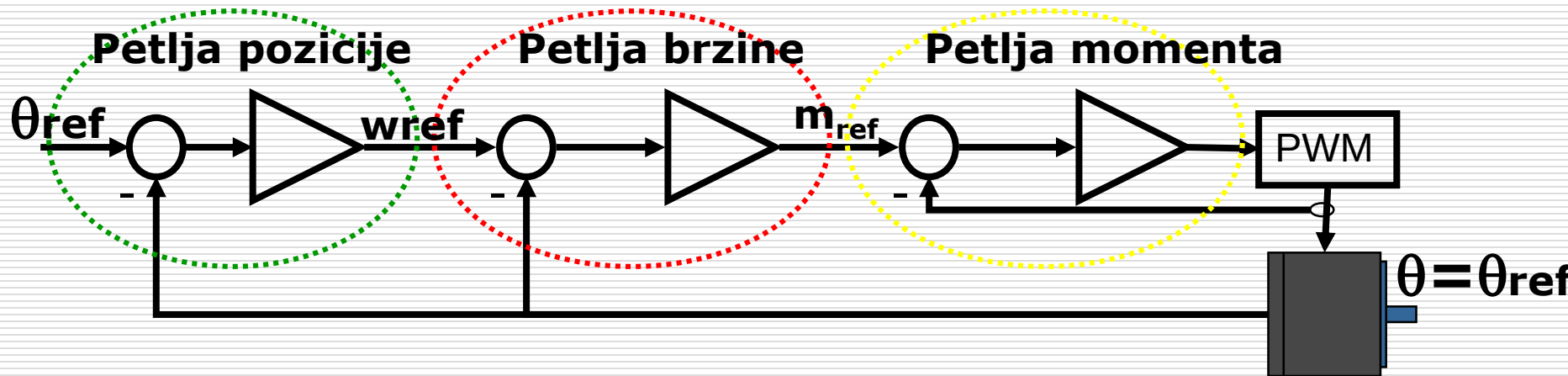
- Na osnovu Newton-ove jednačine kretanja je jasno da se samo upravljanjem momentom može izregulisati brzina

$$m - m_{opt} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

3. Regulacione petlje u pogonu

5.3 Pogon regulisan po položaju

- Pogon regulisan po položaju ima zadatak da rotor dovede u željeni (referentni) položaj
- Da bi to ostvario dodaje se regulator položaja koji na osnovu razlike referentne i merene brzine zadaje potrebnu brzinu,

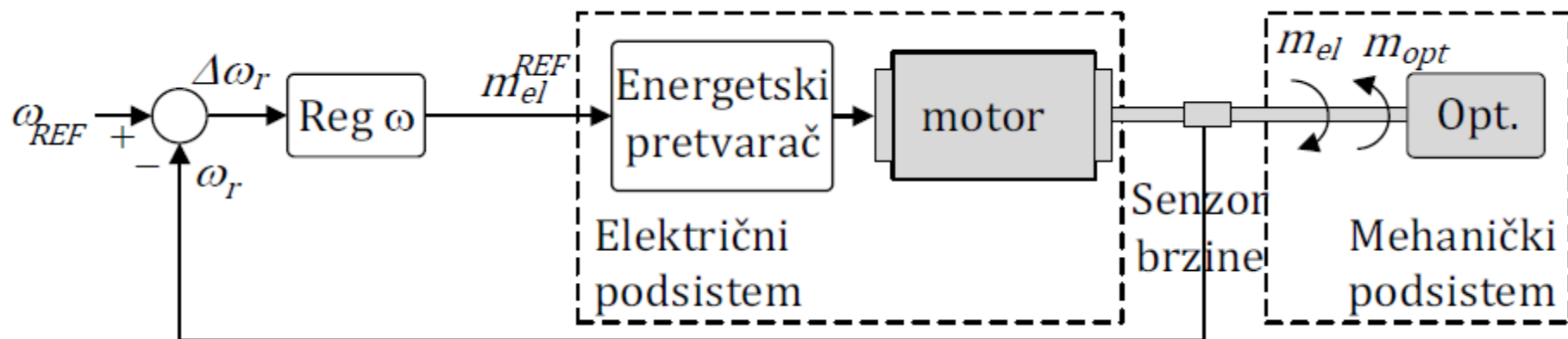


Pošto je položaj integral brzine jasno je da se u novi položaj može doći upravljanjem brzinom motora $\theta = \int \omega dt$

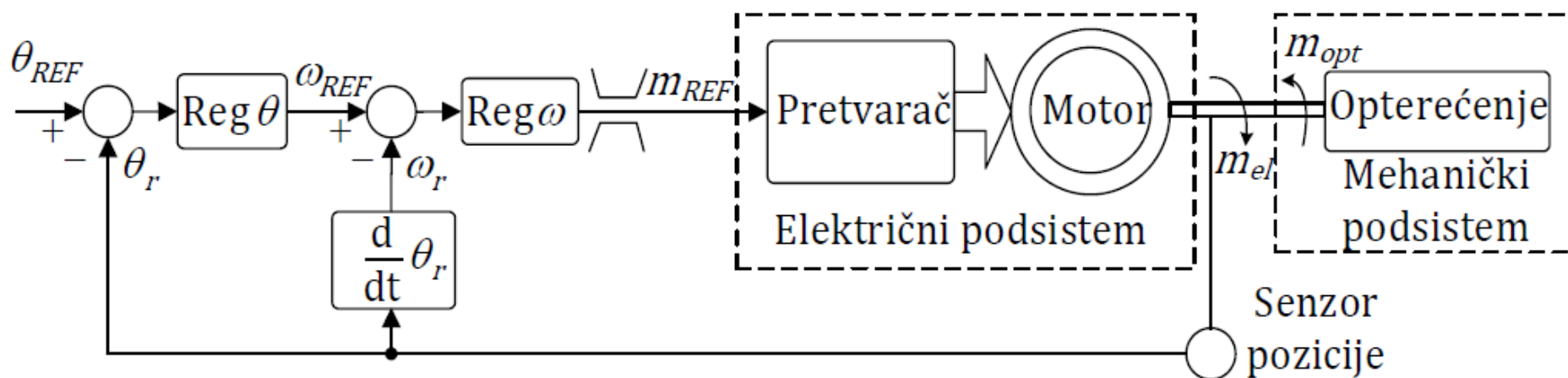
U ovom pogonu sve reg. petlje moraju da rade. Poziciona menja ref. Brzinu, ona se ostvaruje akcijom reg. brzine koji menja ref. moment. Taj moment se mora ostvari.

3. Regulacione petlje u pogonu

Blok šema pogona regulisanog po brzini



Blok šema pogona regulisanog po položaju



3. Kaskadna regulacija u REMP

Regulaciona struktura kaskadnog tipa je pogodna za primenu u REMP. Ona se zasniva na kaskadnom nizu regulacionih petlji u kojima se regulišu sve dostupne (merljive) promenljive stanja motora. Kaskadna struktura REMP-a tipično koristi tri regulacione petlje: petlju položaja (upravlja brzinom), petlju brzine (upravlja momentom) i petlju momenta/struje koja upravlja naponom na motoru.

U bilo kojoj varijanti, na kraju moramo da menjamo napon na motoru.

