ELEKTROMOTORNI POGONI

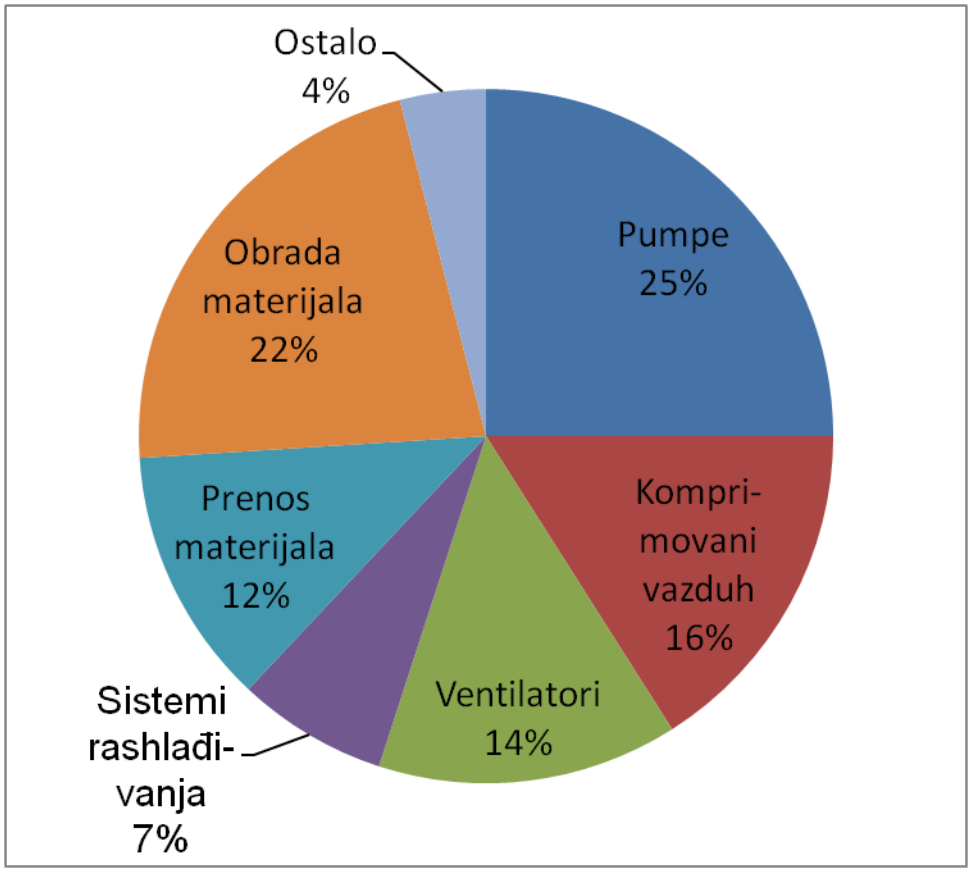
(ELEKTRIČNI POGONI)
(ELEKTROPOGONI)

Electrical Drives
Elektrische Antriebe
Электроприводы

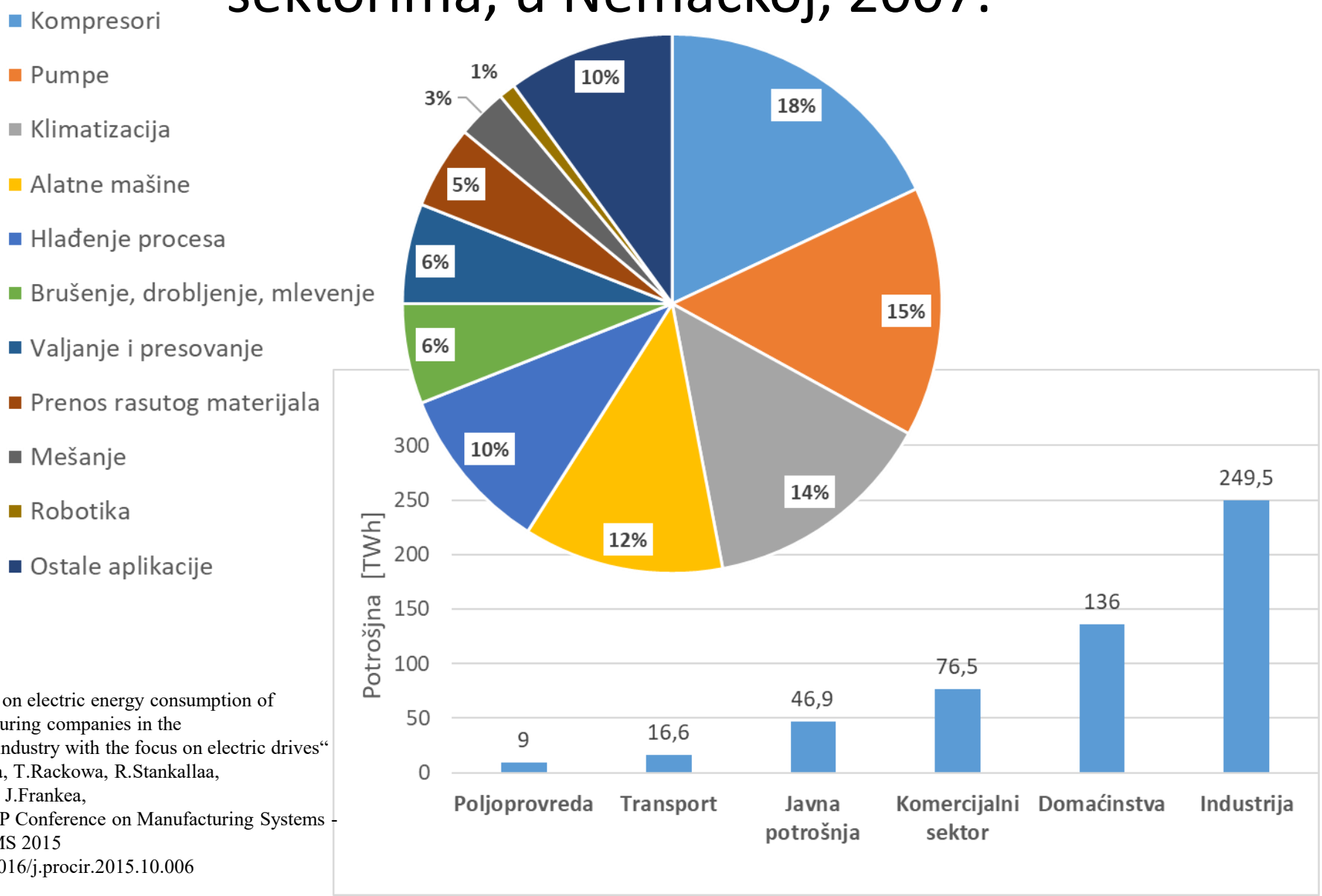
ZNAČAJ ELEKTROMOTORNIH POGONA

- **60-70%** električne energije potrošene u industrijskom sektoru pretvara se u mehaničku (Izvor: International Energy Agency, 2007.)

Potrošnja el.energije u pogonima po sektorima, u SAD, 2007.



Potrošnja električne energije u pogonima po sektorima, u Nemačkoj, 2007.



„A study on electric energy consumption of manufacturing companies in the German industry with the focus on electric drives“
T.Javieda, T.Rackowa, R.Stankallaa, C.Sterka, J.Frankea,
48th CIRP Conference on Manufacturing Systems - CIRP CMS 2015
doi: 10.1016/j.procir.2015.10.006

Prednosti

- ŠIROK DIJAPAZON SNAGA
  <1 W za satove, >100 MW za RHE
- ŠIROK DIJAPAZON MOMENATA I BRZINA
  > milion Nm za valjaonice,
  > 100 000 o/min za centrifuge
- SKORO SVI RADNI USLOVI
  prinudno hlađeni, zatvoreni, potopljeni,
  za eksplozivnu atmosferu
- EKOLOŠKI POZITIVNI
  nema goriva, gasova, vibracija, mala buka
- SPREMNOST ZA RAD ODMAH NA PUN TERET
- SKROMNO ODRŽAVANJE
- MALI GUBICI PRAZNOG HODA
- VISOK STEPEN KORISNOSTI
- ZNATNA PREOPTERETLJIVOST
- LAKO UPRAVLJANJE (brzinom ili momentom)
- SVA 4 KVADRANTA (jednostavan revers)
- KOČENJE SA REKUPERACIJOM ENERGIJE
- DUG PERIOD EKSPLOATACIJE (životni vek)
- MOGUĆI RAZLIČITI OBLICI KONSTRUKCIJE

Mane (samo dve)

- ZAVISNOST OD NAPAJANJA

Gustina energije (gravimetrijska):

Olovna akumulatorska baterija: 25Wh/kg

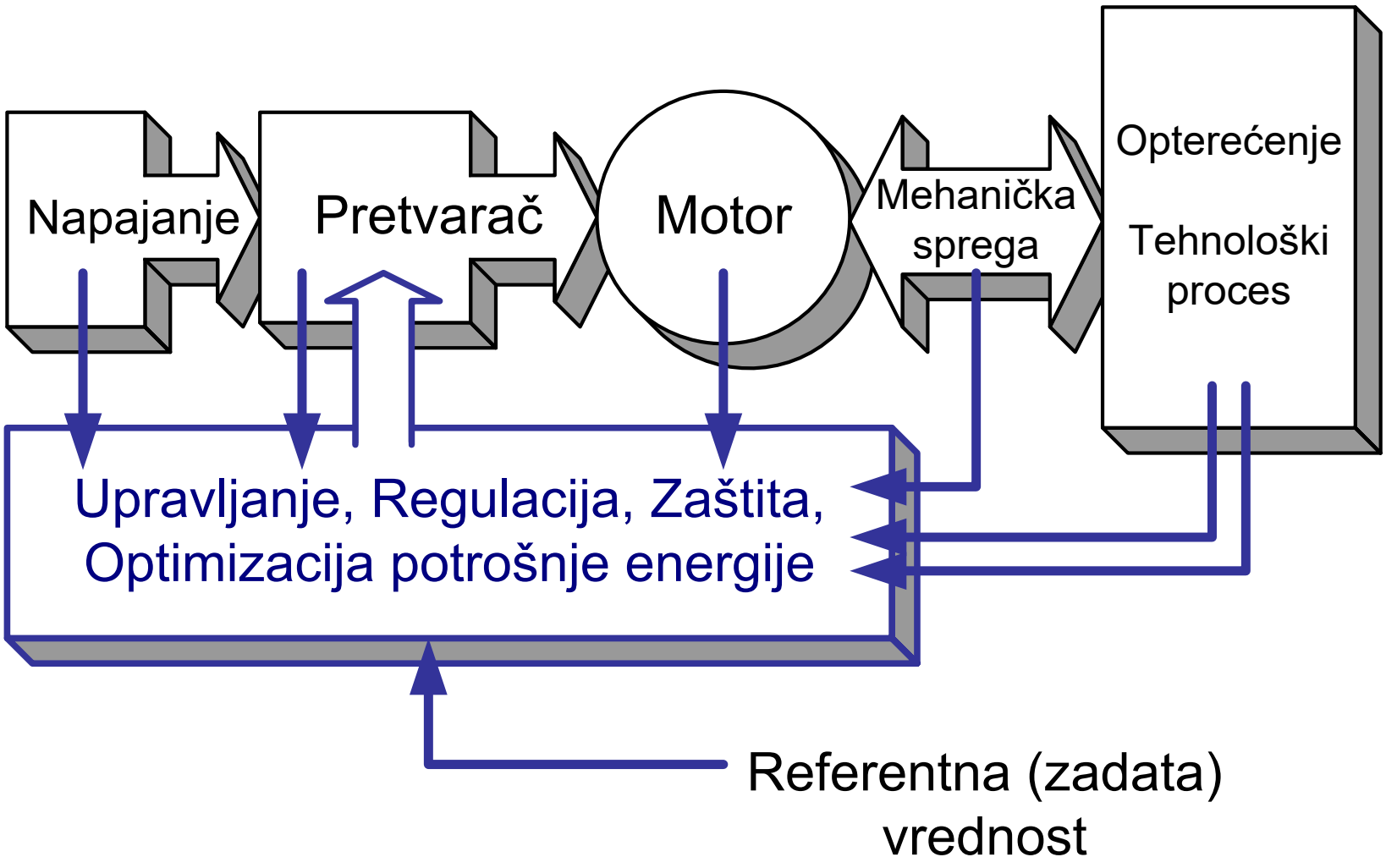
Li-Ion akumulatorska baterija: 150Wh/kg (max. do 500Wh/kg)

Benzin: 12,2 kWh/kg

Tečni vodonik: 39kWh/kg

- MALI ODNOS SNAGA/TEŽINA (zbog upotrebe feromagnetskih materijala)

GLAVNI DELOVI POGONA



Opterećenje



Opterećenje



Opterećenje



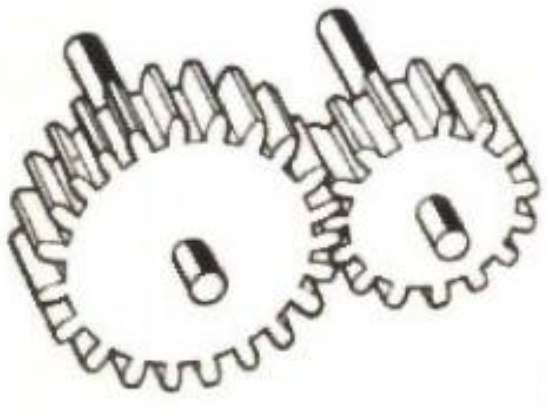
Ventilator

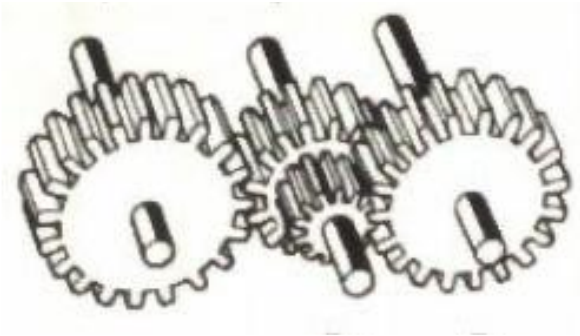
Centrifugalna pumpa



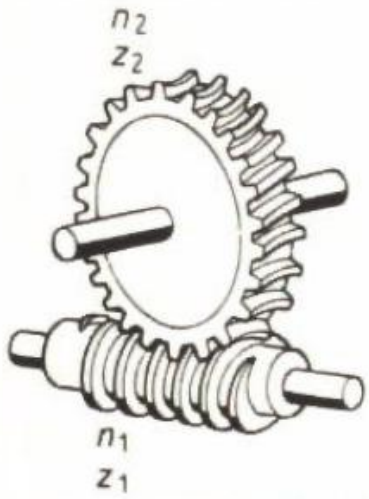
Mehanička sprega - prenosnici

Zupčasti prenosnici

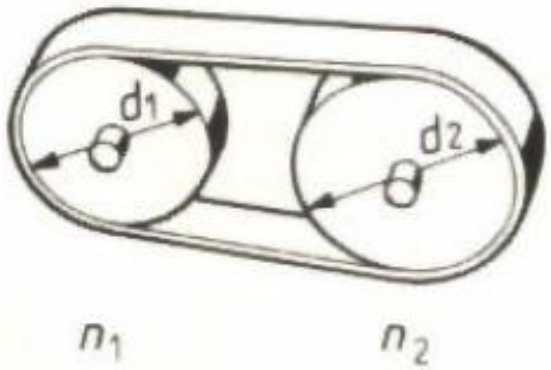


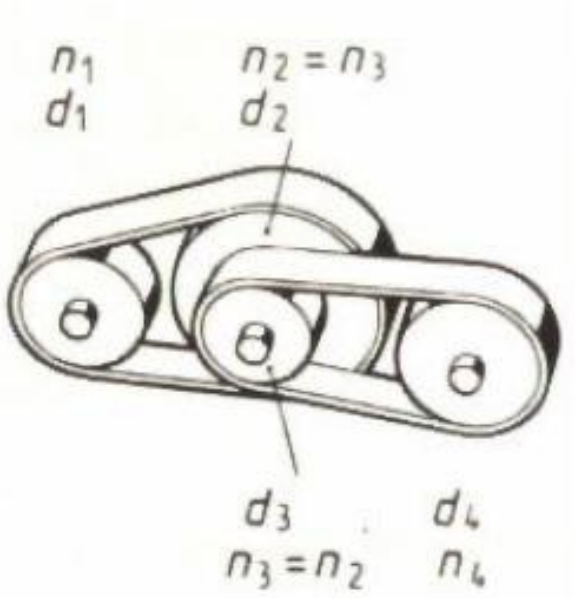


Pužni prenos



Kaišni prenosnici





Lančani prenosnik



Prenosnici - zupčasti

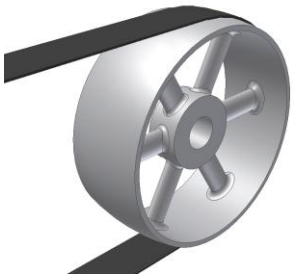
- Direktan prenos
  - Efikasnost od 99% - 100%
  - Prednost: Visoka efikasnost
  - Mana: Može doći do oštećenja ako vratila nisu centrirana.
- Zupčasti prenos (paralelni, pod uglom, višestepeni)
  - Efikasnost 90% - 98%
  - Prednost: Širok opseg prenosnih odnosa, konstrukcija
  - Mane: Veća efikasnost za veće snage i manje prenosne odnose
- Pužni prenos
  - Efikasnost od 55% do 94%
  - Prednost: Jako veliki prenosni odnos
  - Mane: Mala efikasnost, prenos energije samo u jednom smeru.

Prenosnici sa kaiševima i lancima

- Klinasti kaiš (engl. v-belt)
  - Efikasnost od 90% - 96%
  - Prednost: Trpi nagla opterećenja, zaglavljivanja motora
  - Mana: Efikasnost pada ispod 90% ako se ne održava



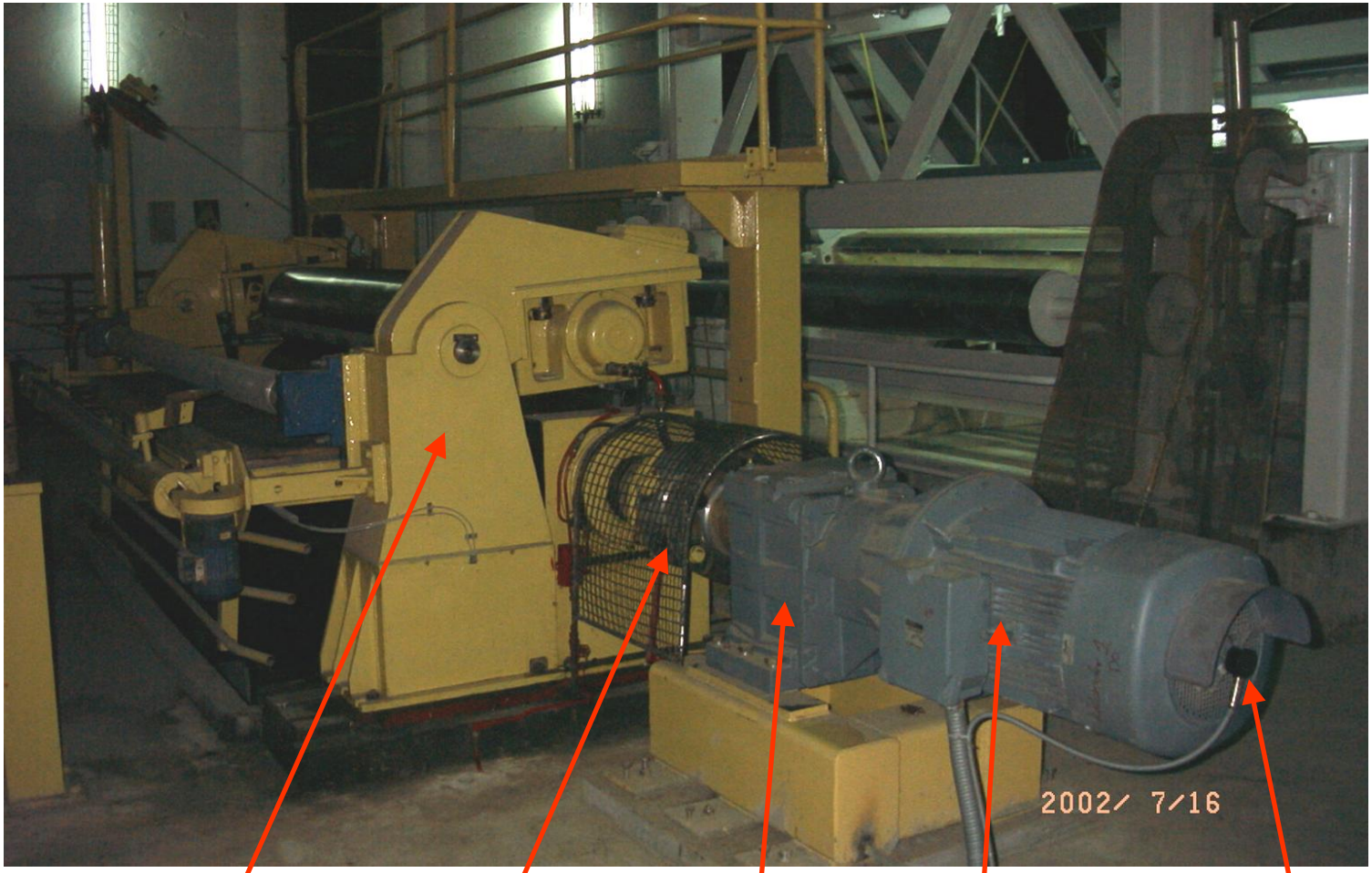
- Pljosnati kaiš (engl. flat belt)
  - Efikasnost 96% - 99%
  - Prednost: Visoka efikasnost za velike brzine
  - Mane: Visoka cena



- Lanac i lančanik
  - Efikasnost oko 98%
  - Prednost: Podnosi nagla opterećenja, visoke temperature
  - Mane: Zahteva održavanje, buka.



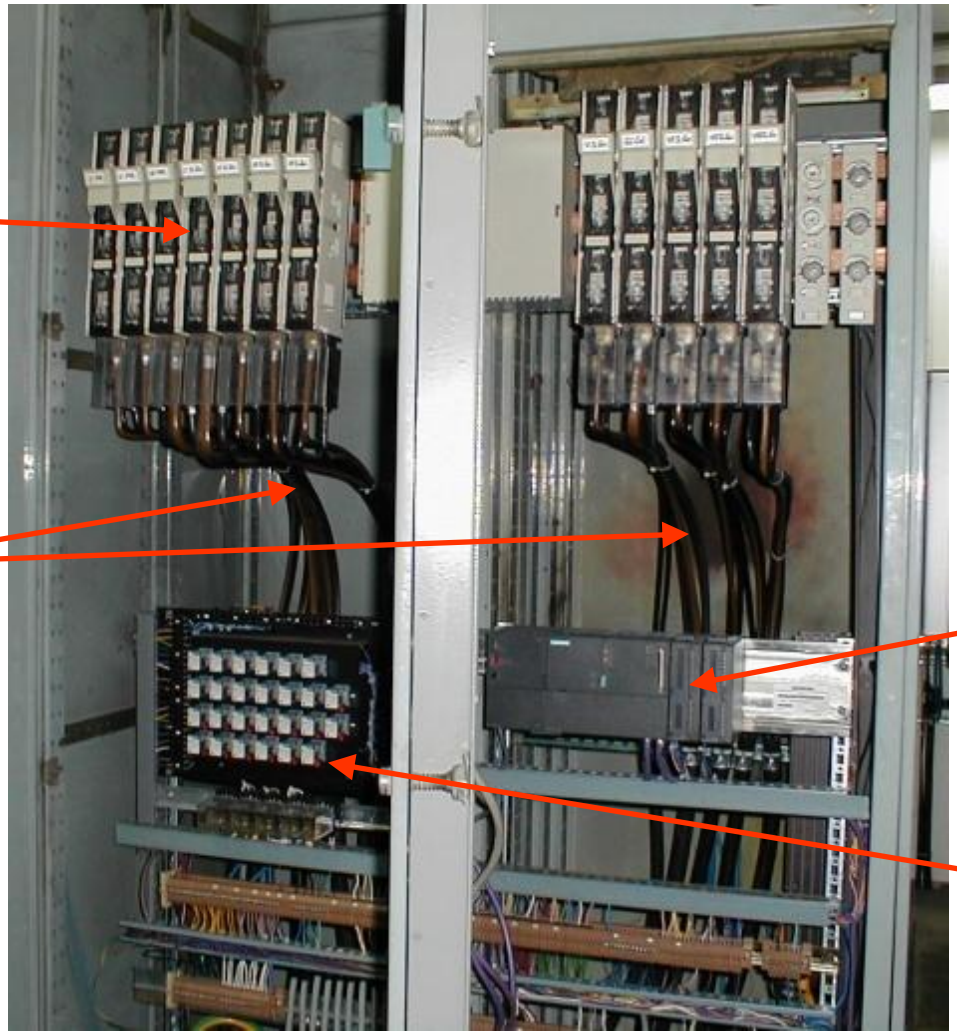
Mehanički deo pogona



Energetski pretvarači



Napajanje, razvod i upravljanje



Rastavljači sa osiguračima

Kablovi za napajanje pogona (en.pretvarača)

PLC

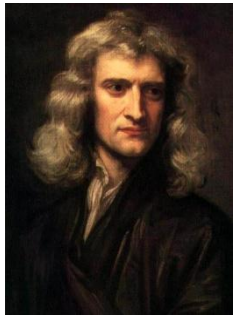
Relejni deo upravljačkog sistema

POTREBNA PREDZNANJA:

- Mehanika, fizika;
- Električne mašine;
- Energetski pretvarači;
- Električne instalacije i mreže;
- Sistemi automatskog upravljanja, sistemi sa povratnim vezama;
- Elektronika, analogna i digitalna;
- Relejna i digitalna tehnika zaštite;
- Matematika.

NJUTNOVA JEDNAČINA





Sir Isaac Newton 1643-1727.

Drugi Njutnov zakon (1687. godine):

$$\frac{d}{dt}\left(M \cdot \vec{v}\right) = \sum \vec{f}$$

Kod pravolinijskog kretanja:

$$f_e - f_m = \frac{d}{dt}\left(M \cdot v\right) = M\frac{dv}{dt} + v\frac{dM}{dt}$$

0

gde je: f_e – pokretačka, motorna sila;

f_m - otporna sila koja se suprotstavlja kretanju;

M - masa;

v - brzina kretanja.

Kod obrtnog (rotacionog) kretanja, značajnog u pogonima:

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

0

gde je: m_e - elektromagnetni moment motora;

m_m - ukupan otporni moment pogona, moment opterećenja;

J - ukupan moment 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;

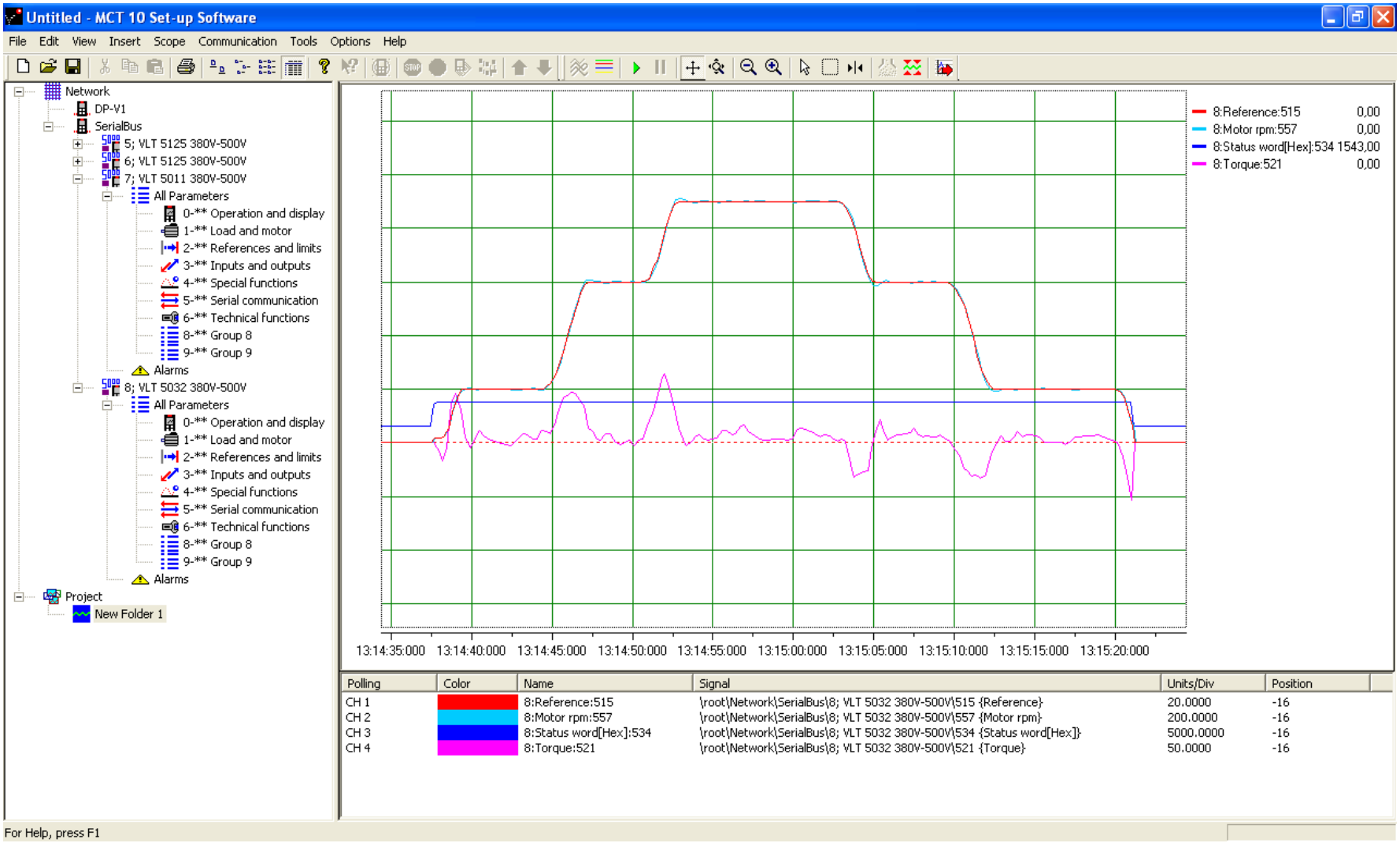
θ - trenutni ugao vratila, položaj.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt};\quad \alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

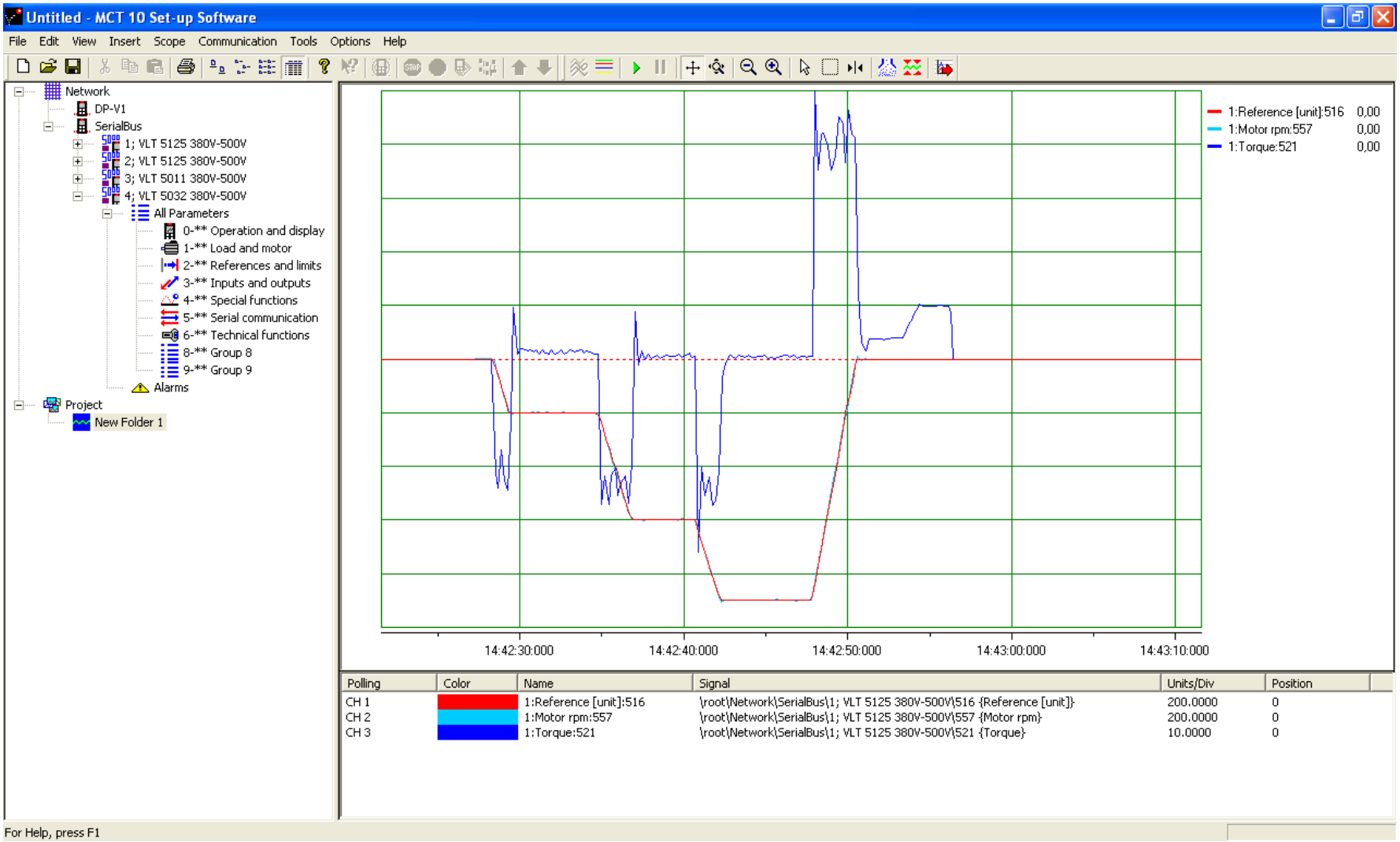
j - trzaj

$$j = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d^2\omega}{dt^2} = \frac{d^3\theta}{dt^3}$$

Postepeno povećanje i smanjenje brzine pogona

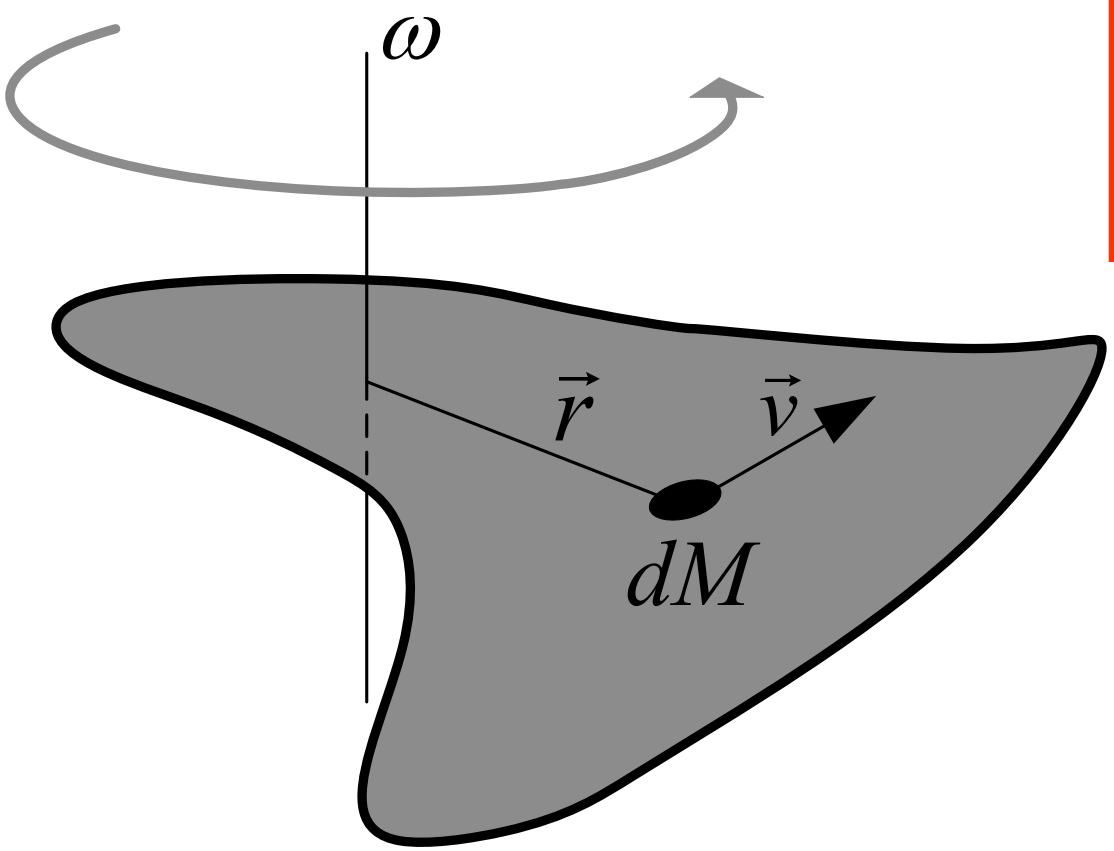


Postepeno povećanje i smanjenje brzine pogona (negativna brzina)



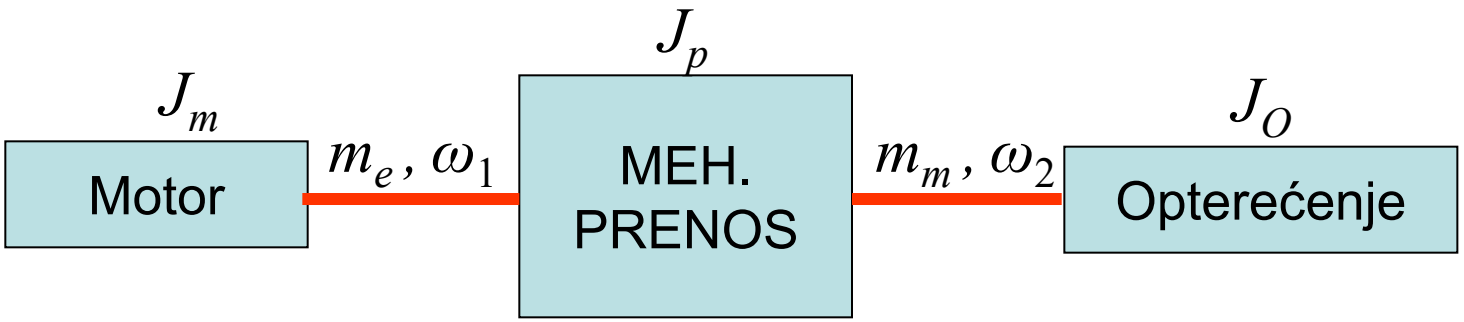
MOMENT INERCIJE

(*definicija*)



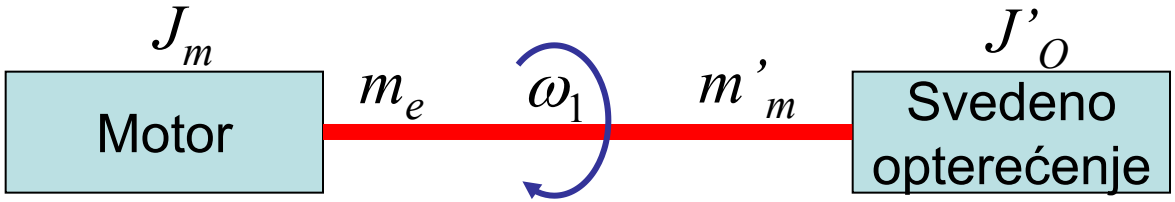
$$J = \int_0^M r^2 \, dM$$

SVOĐENJE MEHANIČKIH PRENOSNIKA



prenosni odnos

$$I = \omega_1 / \omega_2$$



Otporni momenat opterećenja sveden na vratilo motora, ulazno vratilo mehaničkog prenosnika, (m_m') dobija se na osnovu jednakosti snaga:

$$\omega_1 \cdot m'_m = \omega_2 \cdot m_m \quad \Rightarrow \quad m'_m = \frac{\omega_2}{\omega_1} m_m = \frac{m_m}{I}$$

Moment inercije sveden na vratilo motora J'_O dobija se na osnovu jednakosti kinetičkih energija:

$$\frac{J'_O \cdot \omega_1^2}{2} = \frac{J_O \cdot \omega_2^2}{2} \quad \Rightarrow \quad J'_O = \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \cdot J_O = \frac{J_O}{I^2}$$

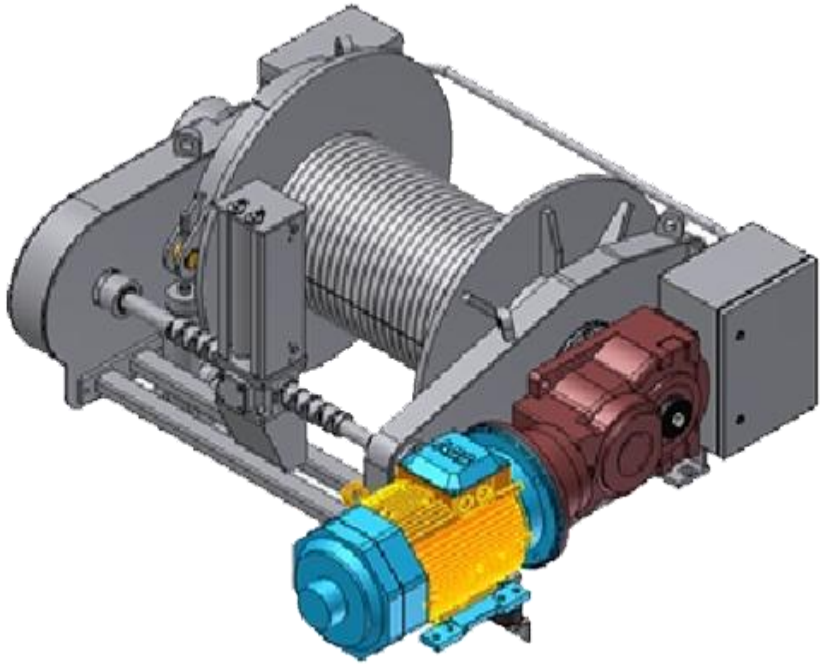
Njutnova jednačina koja važi za sistem sa slike je:

$$m_e - m'_m = \left(J_m + J_p + J'_O \right) \cdot \frac{d\omega_1}{dt}$$

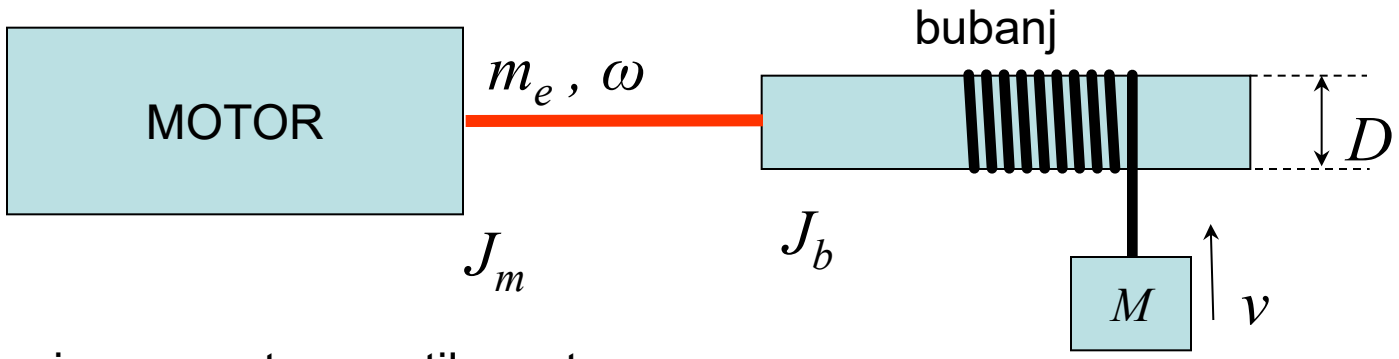
Moment inercije za prenosnik se daje sveden na ulazno vratilo.

Pogon sa obrtnim i pravolinijskim kretanjem, dizalica





Pogon sa obrtnim i pravolinijskim kretanjem, dizalica.



Otporni momenat na vratilu motora:

$$m_m = g \cdot M \cdot \frac{D}{2}$$

Svedeni moment inercije tereta dobija se na osnovu jednakosti kinetičkih energija:

$$\frac{1}{2} \cdot J_M \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left(\omega \cdot \frac{D}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \omega^2 \Rightarrow J_M = \frac{D^2 M}{4}$$

Njutnova jednačina za posmatrani mehanički sistem je:

$$m_e - \frac{g \cdot M \cdot D}{2} = \left(J_m + J_b + \frac{D^2 M}{4} \right) \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

MEHANIČKA SNAGA I ENERGIJA

Ako se pođe od Njutnove jednačine:

$$m_e = m_m + J\frac{d\omega}{dt} \quad \Big/ \cdot\omega$$

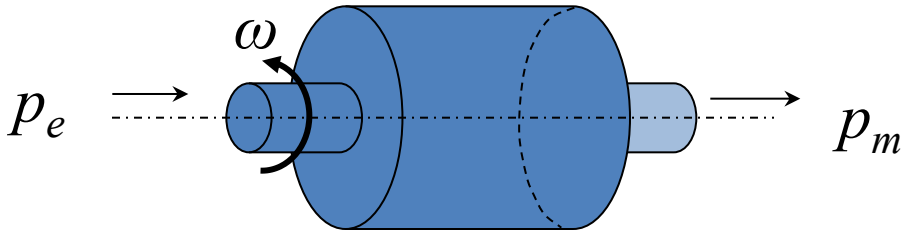
$$m_e \cdot \omega = m_m \cdot \omega + J \cdot \omega \frac{d\omega}{dt}$$

Jednačina "snage"

$p_e = m_e \cdot \omega$ pogonska (pokretačka) snaga;

$p_m = m_m \cdot \omega$ snaga opterećenja;

$J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt}$ promena kinetičke energije.



Tok snage u pogonu

Integracijom jednačine "snage" dobija se:

$$W_e(t) = \int_0^t p_e d\tau = \int_0^t p_m d\tau + \int_0^t J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{d\tau} d\tau =$$

$$= W_m(t) + J \cdot \int_0^\omega \omega \cdot d\omega = W_m(t) + \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$$

$W_e(t)$ - uložena mehanička energija;

$W_m(t)$ - preneta mehanička energija;

$\frac{1}{2} J \cdot \omega^2$ - kinetička (akumulisana) energija.

POZITIVAN SMER TOKA SNAGE U POGONU JE OD MOTORA KA OPTEREĆENJU

Ovo je **konvencija** koja važi u elektromotornim pogonima.

ZNAK BRZINE:

POZITIVAN:	"normalan" smer obrtanja; napred kod horizontalnog transporta; kod dizalica smer koji odgovara dizanju.
NEGATIVAN:	"alternativan" smer obrtanja; nazad kod horizontalnog transporta; smer koji odgovara spuštanju kod dizalice.

MEHANIČKE KARAKTERISTIKE

Spadaju u kategoriju STATIČKIH karakteristika pogona.

Ograničićemo se na najčešće slučajeve u praksi, gde moment **nije** funkcija položaja (ugla) vratila.

U stacionarnom stanju važi:

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad m_e - m_m = 0 \quad \Rightarrow \quad m_e = m_m$$

Terminologija koju ćemo koristiti:

Prirodne karakteristike - mašina radi sa nominalnim vrednostima veličina na upravljačkim ulazima i sa nominalnim vrednostima parametara (npr.: motor pod nominalnim naponom i učestanošću, bez dodatnih elemenata u kolu). Postoji samo jedna prirodna karakteristika. Prirodne karakteristike zovu se i *ekonomske*, jer je po pravilu rad na njima najekonomičniji.

Veštačke karakteristika - dobijaju se promenom vrednosti upravljačkih veličina ili parametara, dodavanjem elemenata u kolo. Njih može biti neograničen broj.

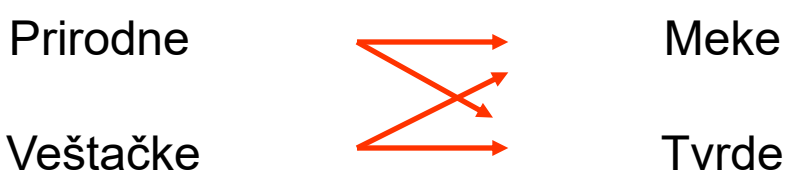
Tvrde mehaničke karakteristike $\partial\omega/\partial m_e \approx 0 \quad \partial\omega/\partial m_m \approx 0$

Brzina se ne menja značajno pri značajnoj promeni momenta.

Meke mehaničke karakteristike $\partial\omega/\partial m_e \neq 0 \quad \partial\omega/\partial m_m \neq 0$

Brzina se značajno menja prilikom promene momenta.

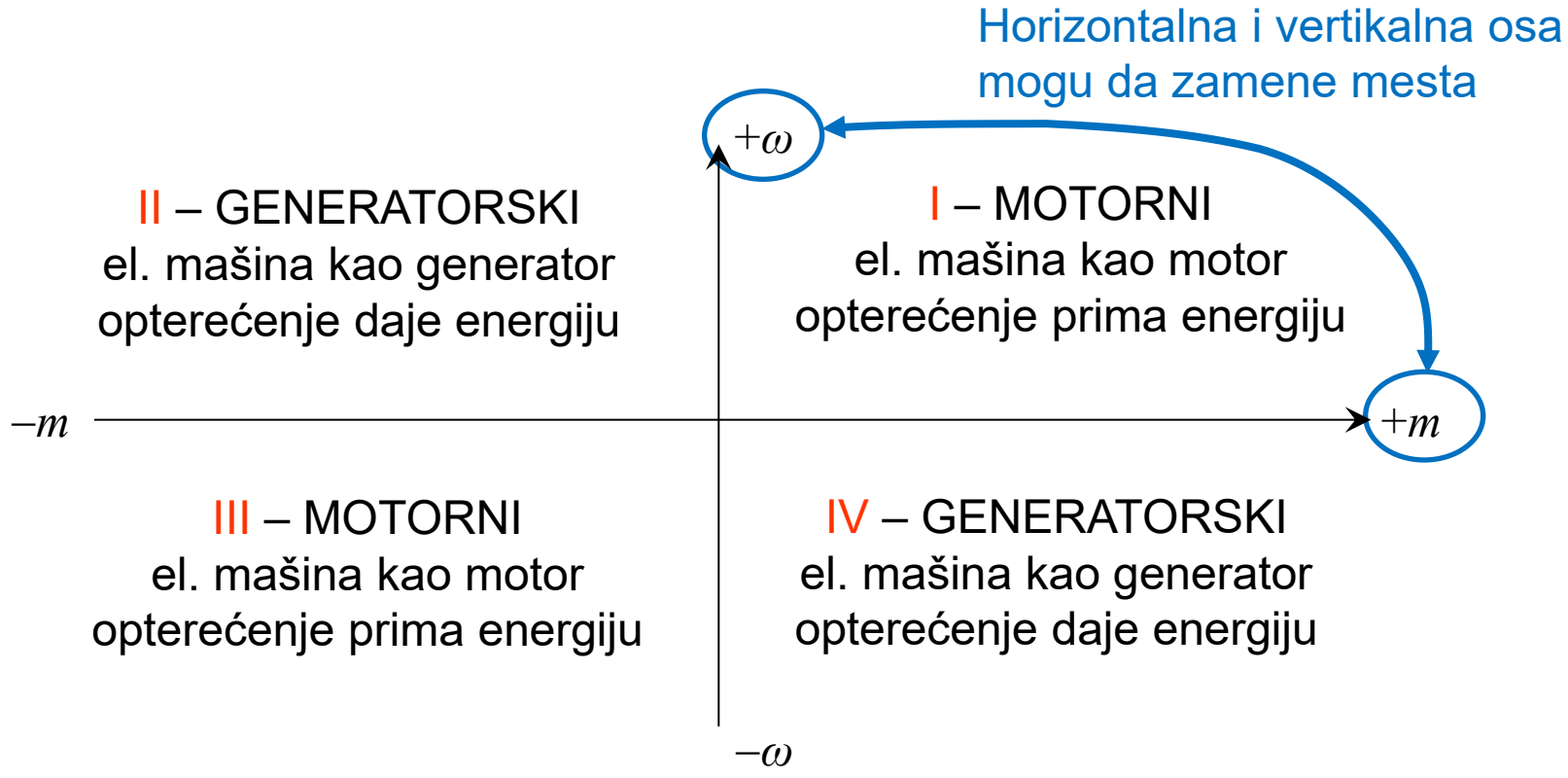
Moguće su sve kombinacije:



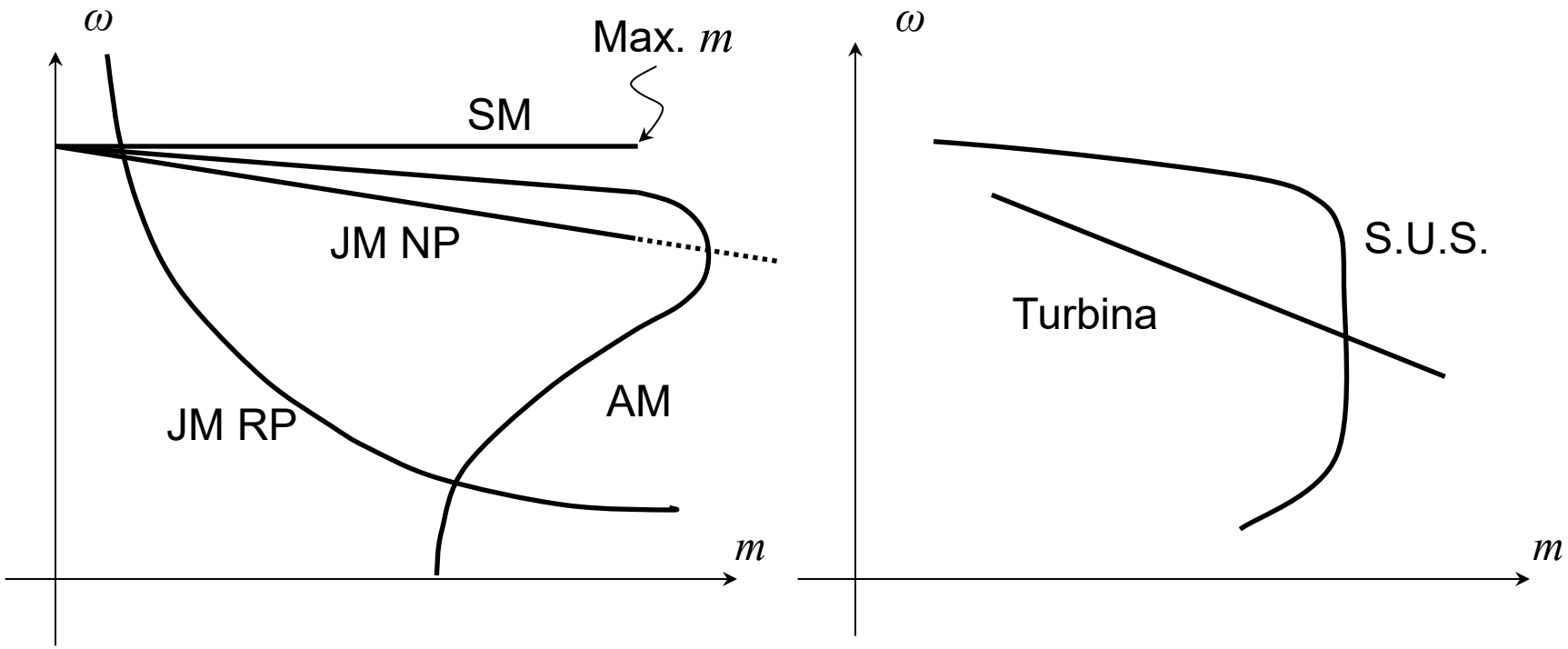
Mehaničke karakteristike **najčešće** se grafički prikazuju u koordinatnom sistemu, kod kojeg su:

- horizontalna osa - moment; (može biti brzina)
- vertikalna osa - brzina (može biti moment)

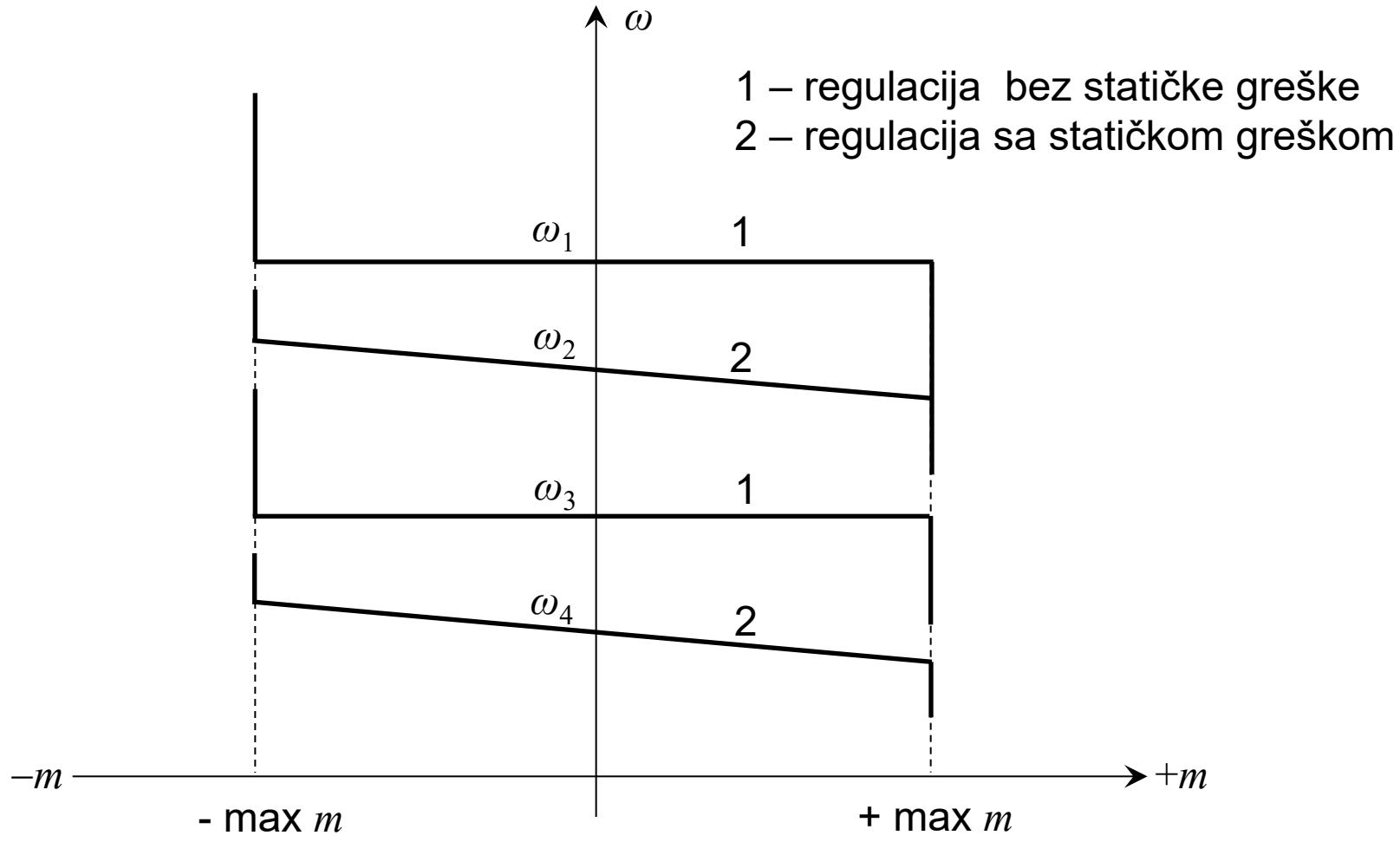
U skladu sa usvojenim konvencijama, definišu se **KVADRANTI**:



Karakteristike najčešće korišćenih motora:



Tipična mehanička karakteristika regulisanog elektromotornog pogona



MEHANIČKE KARAKTERISTIKE OPTEREĆENJA

Najveći broj ovih karakteristika može se prikazati izrazom:

$$m_m = m_0 + \left(k \cdot m_{nom} - m_0\right) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{nom}}\right)^{\alpha}$$

gde je:

m_0 - moment pri brzini $\omega = 0$;

m_{nom} - nominalan moment opterećenja (nominalan teret i nominalna brzina);

k - koeficijent opterećenja (k_{nom}=1);

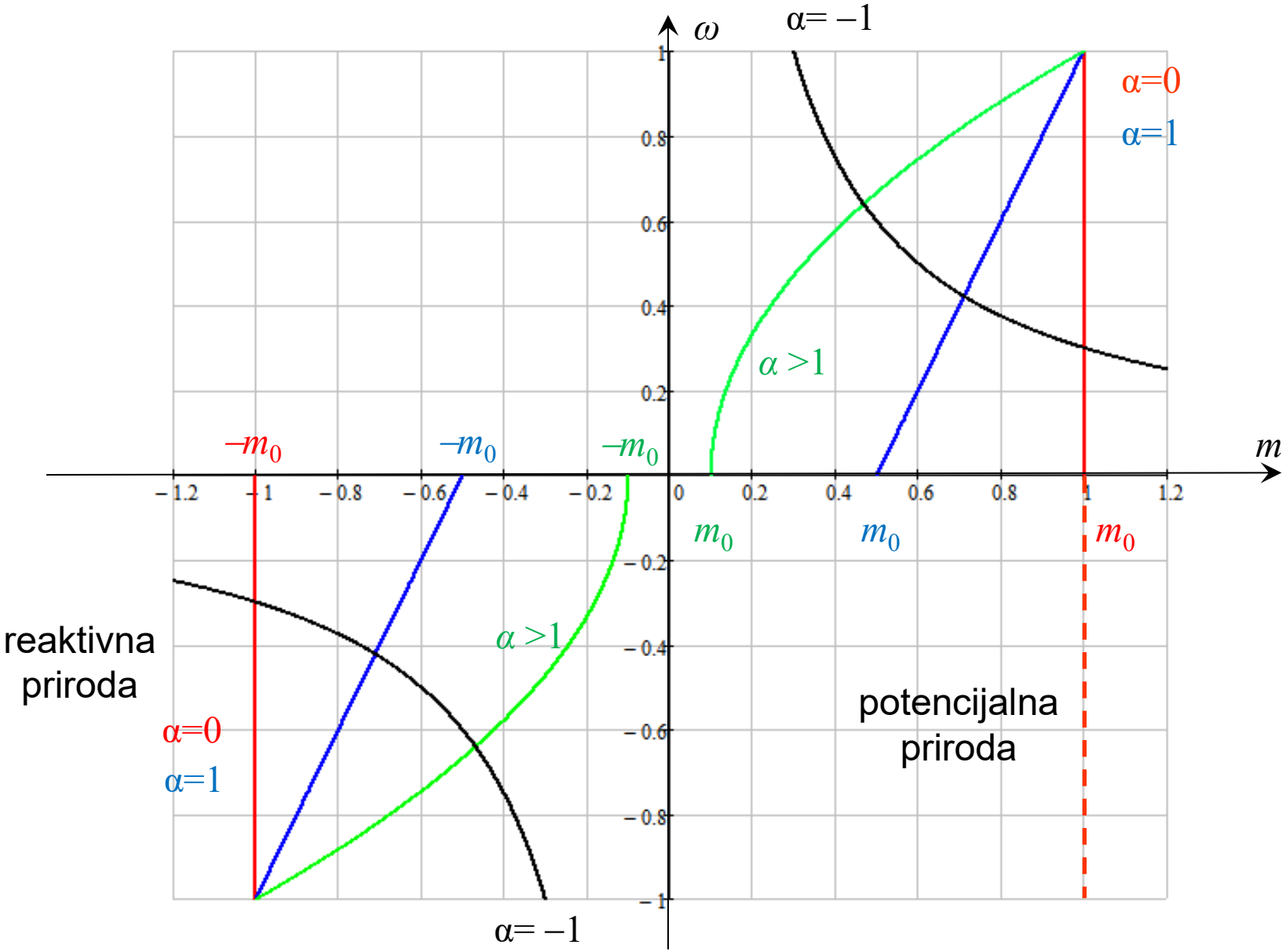
$\alpha = 0$ *moment ne zavisi od brzine (npr. potencijalna komponenta otpornog momenta dizalice);*

$\alpha = 1$ *linearna ili "kalanderska" karakteristika;*

$\alpha > 1$ "*ventilatorska" karakteristika (npr. ventilatori, pumpe, centrifuge);*

$\alpha = -1$ *karakteristika "stalne snage" (npr. alatne mašine).*

Grafički prikaz karakteristika opterećenja



Pregled mehaničkih karakteristika opterećenja

- Tračni transporteri (prenos materijala) i Ekstruderi (transformacija materijala)
  - Moment opterećenja ne zavisi od brzine (α =0)
- Ventilatori i pumpe
  - Kvadratna zavisnost momenta opterećenja od brzine (α =2)
- Kalander
  - Moment opterećenja linearno zavisi od brzine (α =1)
- Dizalice, kranovi, liftovi, transporteri sa nagibom
  - Moment opterećenja ne zavisi od brzine (α =0) (ima potencijalnu prirodu)
- Odmotači, namotači
  - Moment opterećenja inverzno zavisi od brzine (α =-1) (konstantna snaga)

Definicija radne tačke

- Radna tačka opterećenja je tačka na mehaničkoj karakteristici opterećenja koja odgovara trenutnoj brzini radne mašine (opterećenja).
- Radna tačka motora je tačka na mehaničkoj karakteristici motora koja odgovara trenutnoj brzini motora.
- Brzina motora i brzina opterećenja su praktično uvek jednake, ali njihovi momenti ne moraju biti.
- **Ustaljeno stanje** se dobija u preseku mehaničkih karakteristika opterećenja i motora, odnosno na brzini na kojoj se poklapaju radna tačka motora sa radnom tačkom opterećenja.
- Ova tačka se naziva **radna tačka ustaljenog stanja**, ili se kaže da imamo ustaljeno stanje.

Definicija radne tačke

Na osnovu Njutnove jednačine kretanja

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

Ukoliko je moment motora jednak momentu opterećenja, imaćemo ustaljeno stanje, odnosno rad sa konstantnom brzinom. Ova brzina se naziva brzina ustaljenog stanja.

$$m_e(\omega) = m_m(\omega) \Leftrightarrow J \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0 \;\; ili \;\; \omega = const.$$

Definicija radne tačke

Ukoliko moment motora **nije** jednak momentu opterećenja,
brzina će se menjati, u skladu sa Njutnovom jednačinom.

$$m_e(\omega) > m_m(\omega) \Rightarrow J \cdot \frac{d\omega}{dt} > 0 \quad \omega \nearrow$$

Brzina raste
(povećava se vrednost)

$$m_e(\omega) < m_m(\omega) \Rightarrow J \cdot \frac{d\omega}{dt} < 0 \quad \omega \searrow$$

Brzina opada
(smanjuje se vrednost)

Algebarski znak momenta motora i znak momenta opterećenja
u ovim jednačinama se mora uvažavati, kao i znak brzine.

Jednačine važe prema usvojenim algebarskim znakovima u Njutnovoj jednačini.
Primeri:

- pozitivna brzina raste – pogon ubrzava
- pozitivna brzina opada – pogon usporava
- negativna brzina raste – pogon usporava (ali ide u negativnu stranu)
- negativna brzina opada – pogon ubrzava (sve “negativnija” brzina)

STATIČKA STABILNOST

RADNA TAČKA USTALJENOG STANJA je tačka u kojoj sve promenljive posmatranog sistema imaju stalne vrednosti,

odnosno:

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

Za sisteme koji se posle kratkotrajnog poremećaja vraćaju u prvobitnu radnu tačku kaže se da su *STABILNI.*

Ako je ova osobina svojstvena samo nekim radnim tačkama onda se za njih kaže da su *STABILNE RADNE TAČKE*.

Na osnovu gornjih definicija izvešćemo kriterijum statičke stabilnosti za pogon u kome važe sledeće pretpostavke:

- momenti motora i opterećenja ne zavise od položaja vratila (ugla);
- vreme trajanja elektromagnetnih prelaznih procesa je zanemarljivo.

Jednačina koja opisuje ovakav sistem – pogon, je:

$$J\frac{d\omega}{dt} = m_e\left(\omega,t\right) - m_m\left(\omega,t\right)$$

U posmatranoj radnoj tački – stacionarnom stanju, pri brzini ω_1, važi:

$$m_e\left(\omega_1\right) = m_m\left(\omega_1\right)$$

Linearizacijom gornje diferencijalne jednačine u okolini posmatrane radne tačke

$$\omega = \omega_1 + \Delta\omega$$

dobija se izraz: $$J\frac{d\left(\Delta\omega\right)}{dt} = \left(\frac{\partial m_e}{\partial\omega}\Big|_{\omega_1}\right)\cdot\Delta\omega - \left(\frac{\partial m_m}{\partial\omega}\Big|_{\omega_1}\right)\cdot\Delta\omega$$

Uvođenjem smene:

$$k = \frac{\partial}{\partial \omega}\left(m_m - m_e\right)\Big|_{\omega_1}$$

Obratiti pažnju na znak.

Dobija se linearna diferencijalna jednačina:

$$\frac{J}{k}\frac{d\left(\Delta\omega\right)}{dt} + \Delta\omega = 0$$

Rešenje ove jednačine je:

$$\Delta\omega(t) = \Delta\omega(0)\, e^{-\frac{k \cdot t}{J}}$$

gde je: $\Delta\omega(0)$ vrednost promene brzine u $t = 0$.

Na osnovu date definicije stabilnosti *potreban uslov statičke stabilnosti u radnoj tački je:*

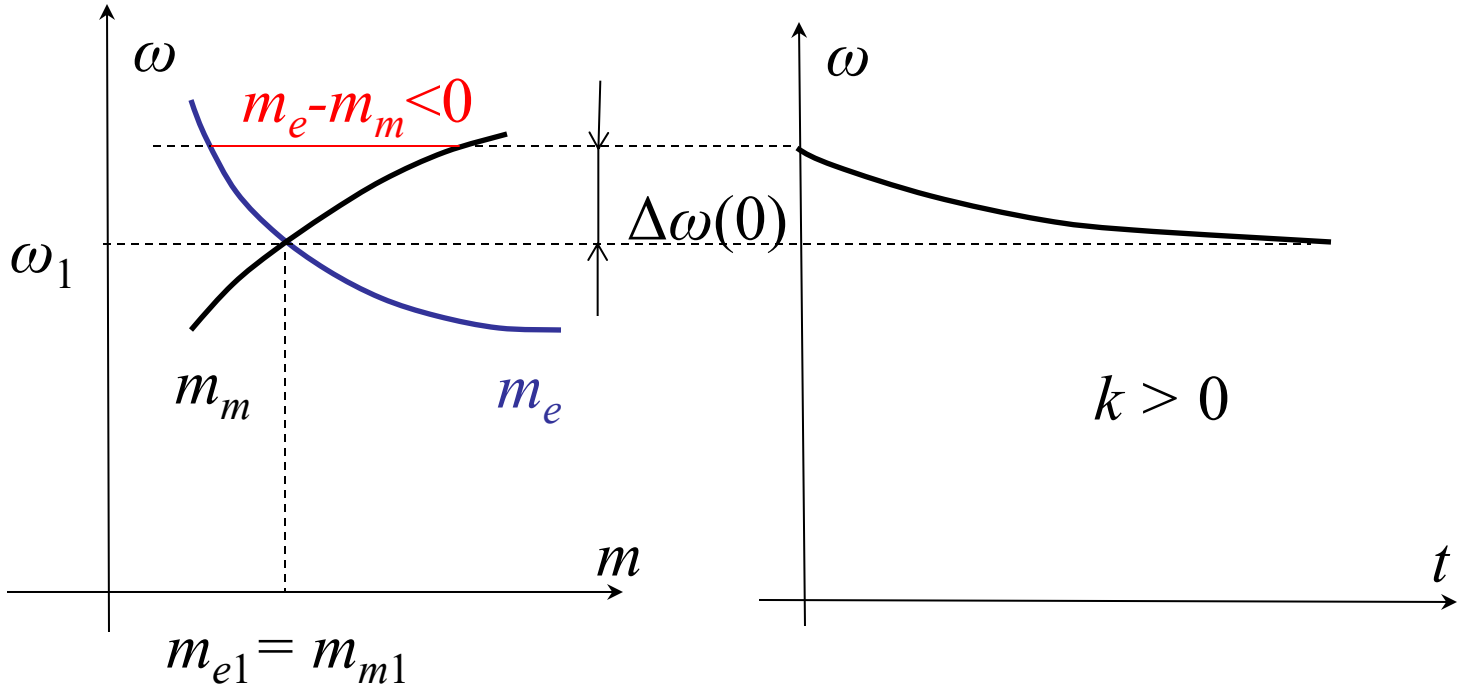
$$k > 0$$

odnosno:

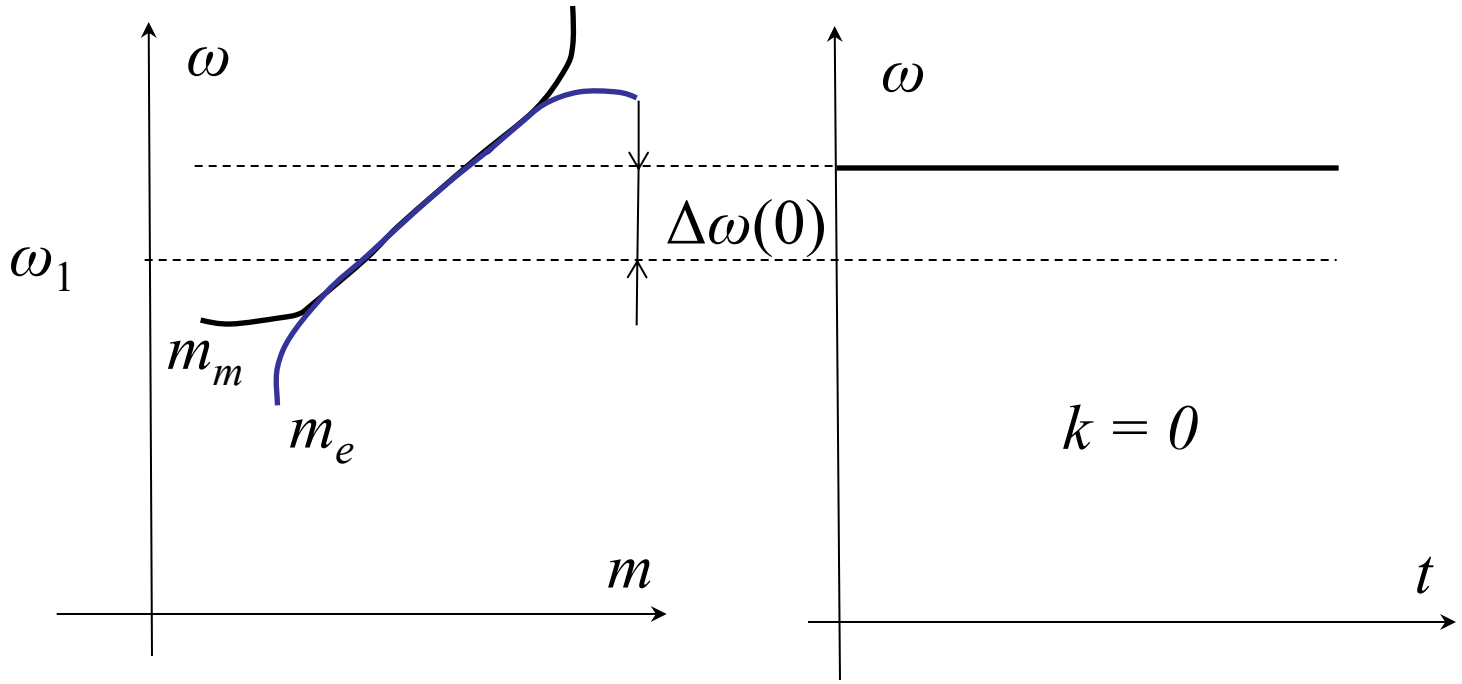
$$\left.\frac{\partial m_m}{\partial \omega}\right|_{\omega_1} > \left.\frac{\partial m_e}{\partial \omega}\right|_{\omega_1}$$

U slučaju: $k = 0$ sistem je indiferentan;

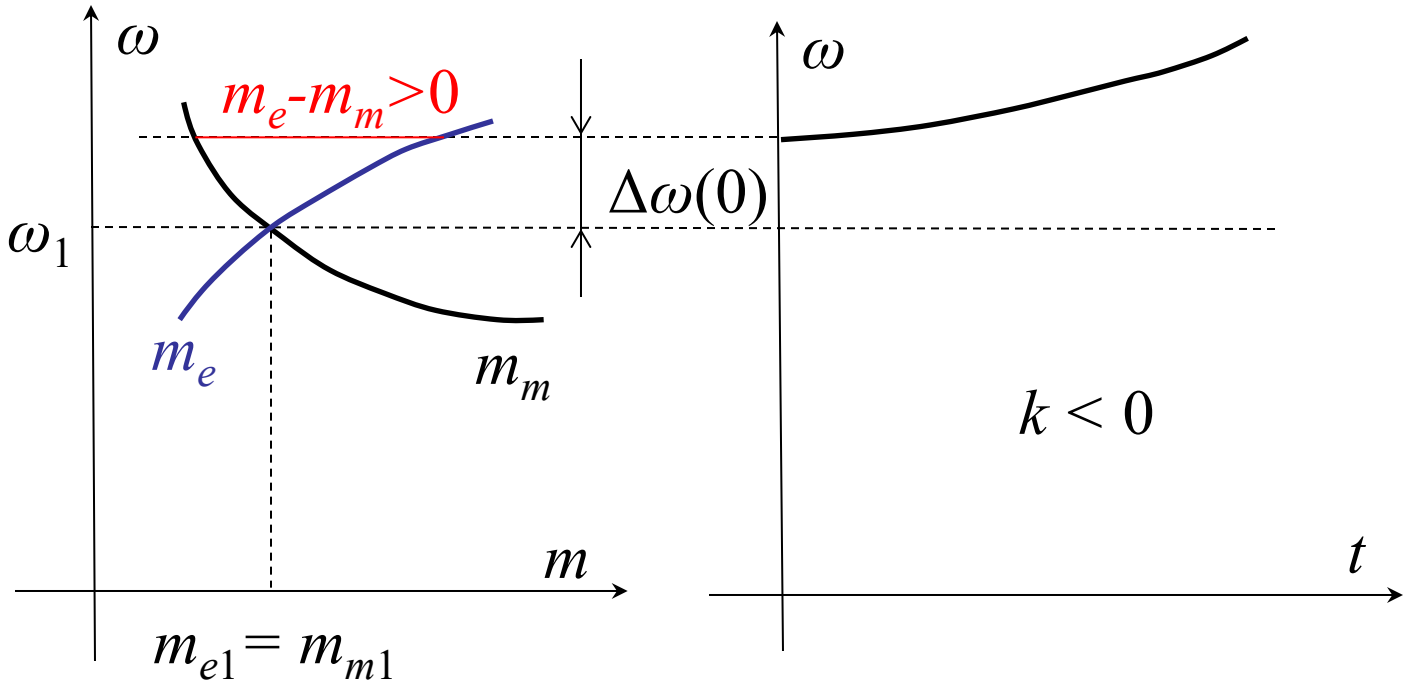
$k < 0$ sistem je nestabilan u posmatranoj radnoj tački.



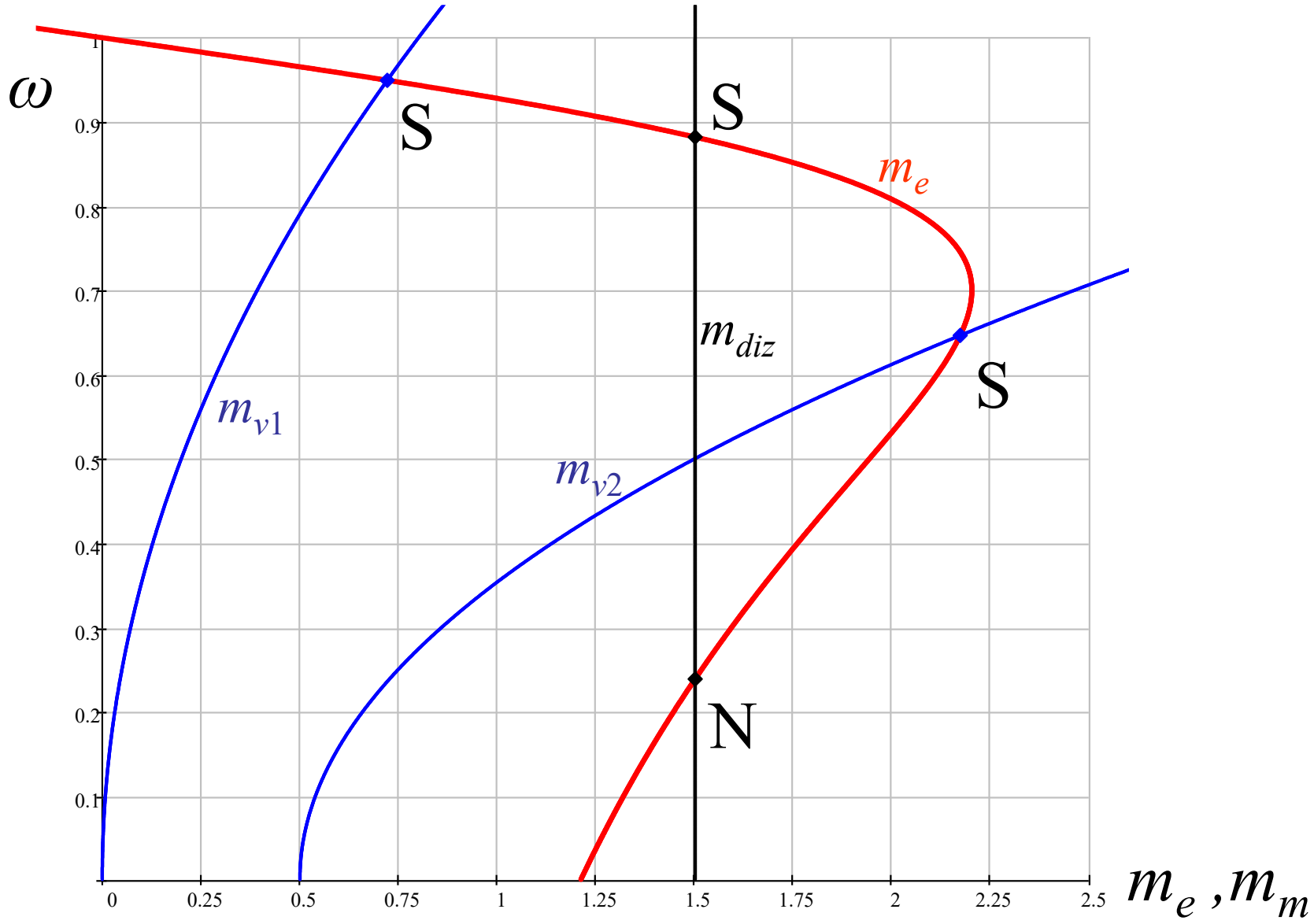
Stabilno stanje



Indiferentan slučaj



Nestabilno stanje



Realni slučajevi