

Upravljanje elektromotornim pogonima

Uvod

Njutnova jednačina kretanja

Pojam inercije

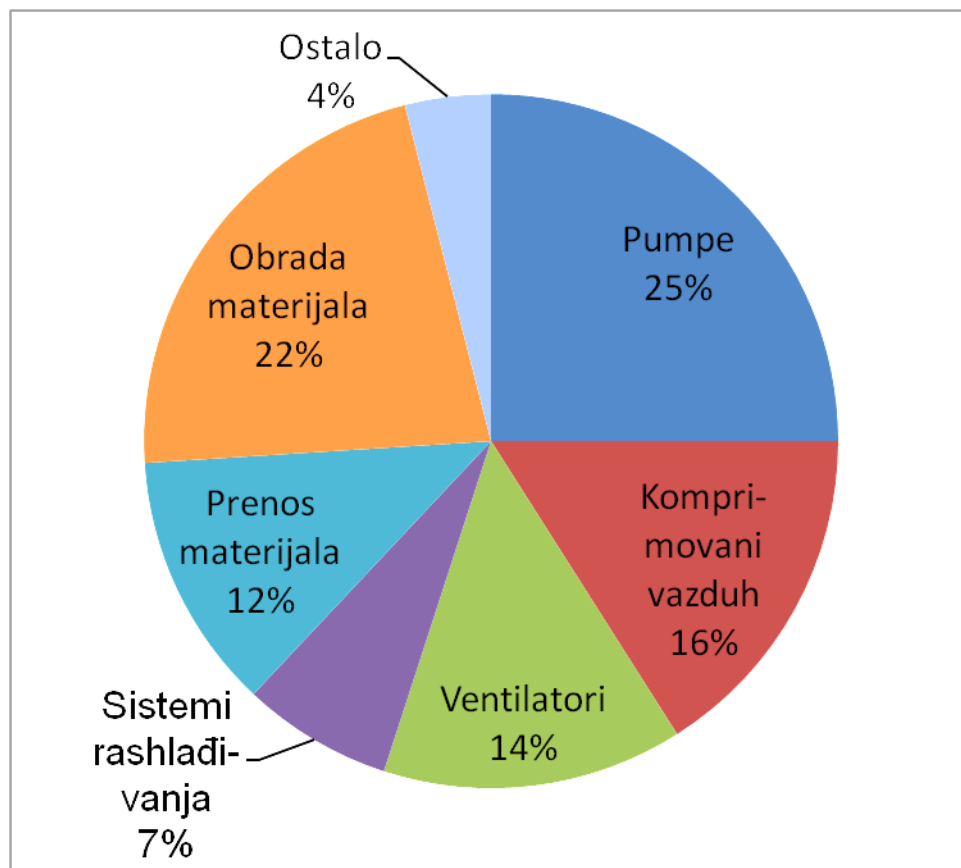
Karakteristike opterećenja

Definicija radne tačke

ZNAČAJ ELEKTROMOTORNIH POGONA

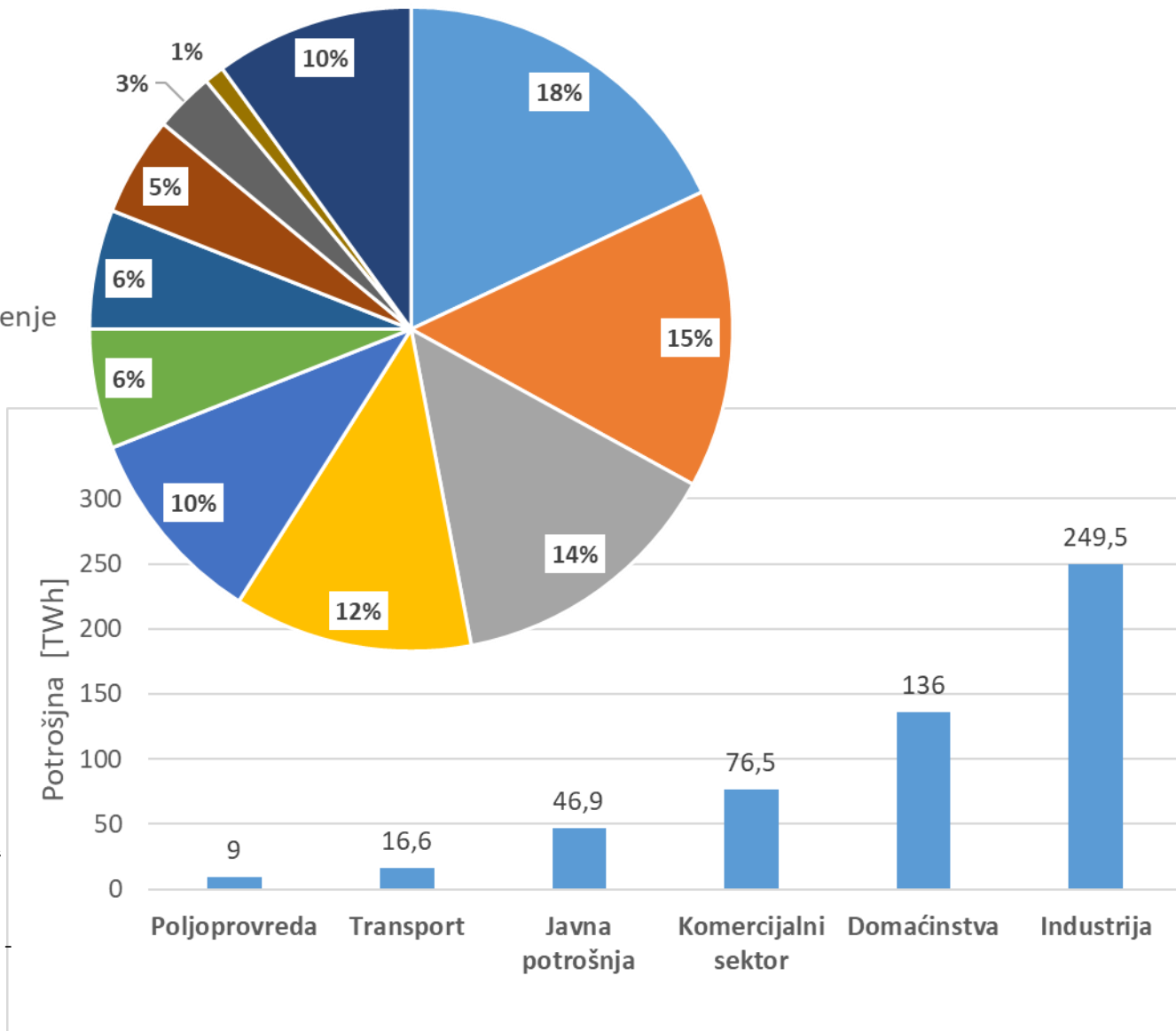
- **60-70%** električne energije potrošene u industrijskom sektoru pretvara se u mehaničku (Izvor: International Energy Agency, 2007.)

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



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

- Kompresori
- Pumpe
- Klimatizacija
- Alatne mašine
- Hlađenje procesa
- Brušenje, drobljenje, mlevenje
- Valjanje i presovanje
- Prenos rasutog materijala
- Mešanje
- Robotika
- Ostale aplikacije



„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

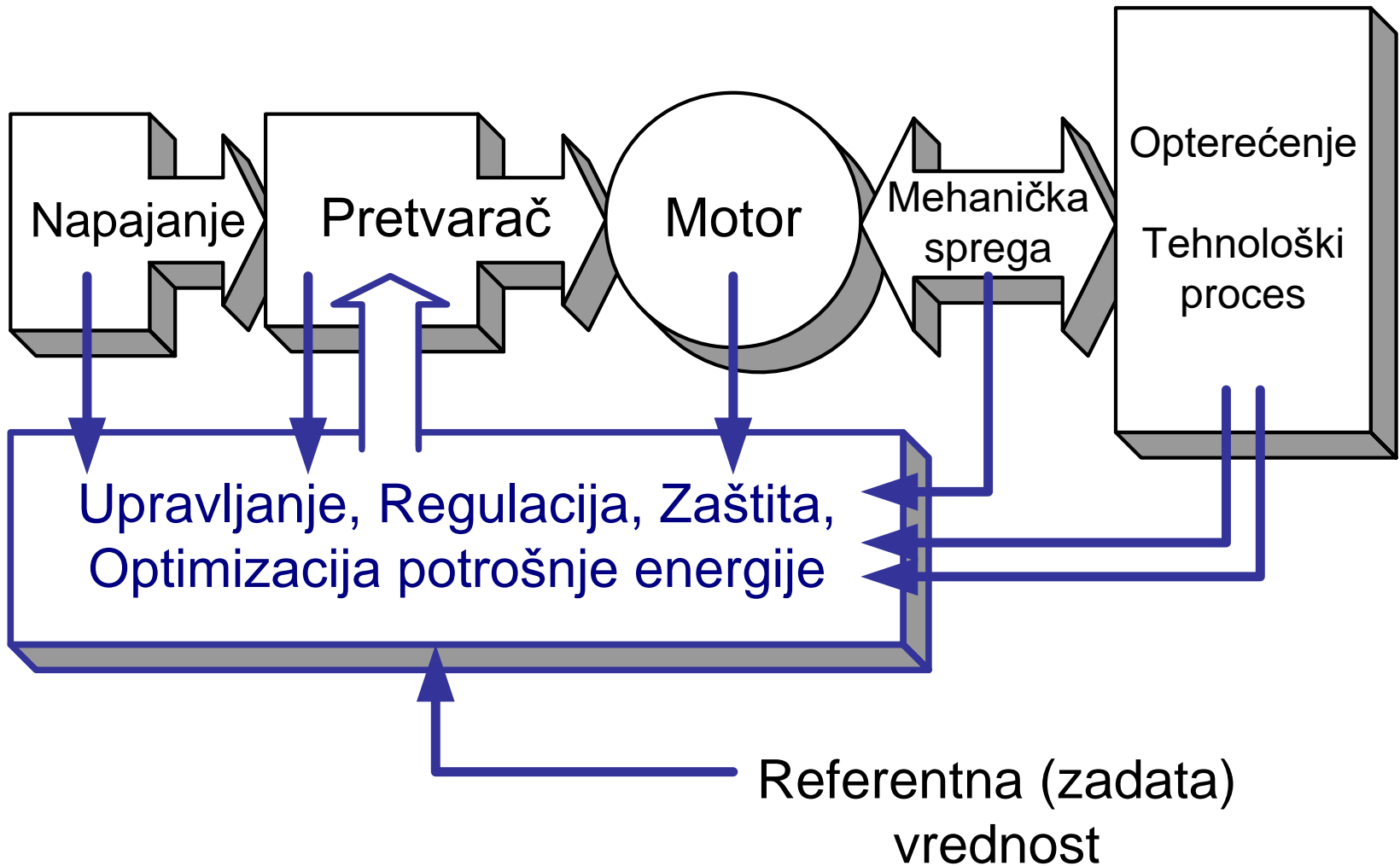
Prednosti

- 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 hladjeni, 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 (energetska efikasnost)
- 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
(olovna akumulatorska
baterija je 50 puta teža
od goriva)
- MALI ODNOS
SNAGA/TEŽINA
(zbog upotrebe
feromagnetskih
materijala)

GLAVNI DELOVI POGONA



Opterećenje



Opterećenje



Opterećenje



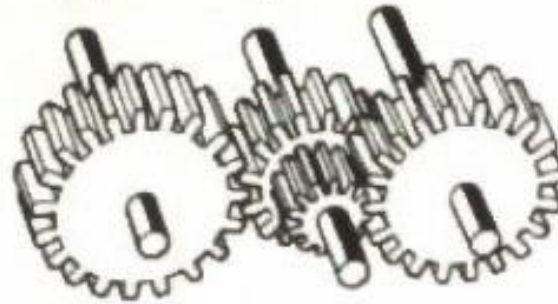
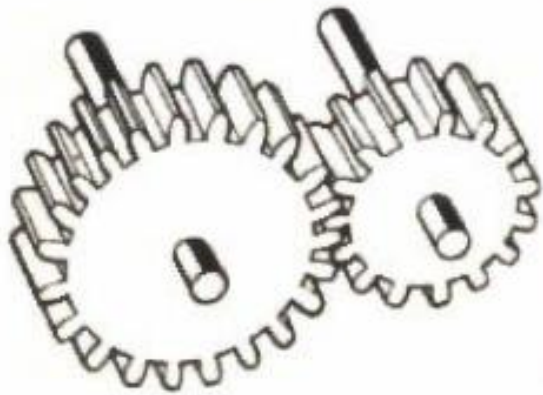
Ventilator

Centrifugalna pumpa

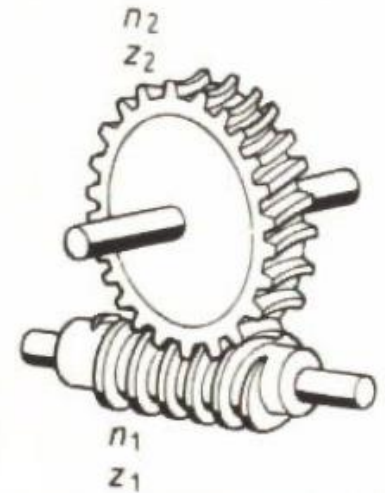


Mehanička sprega - prenosnici

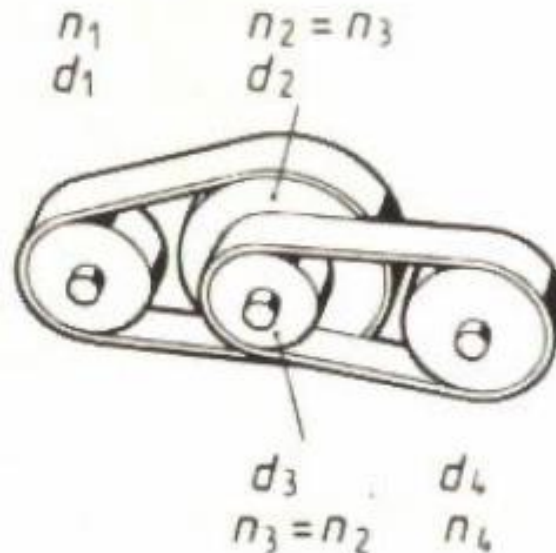
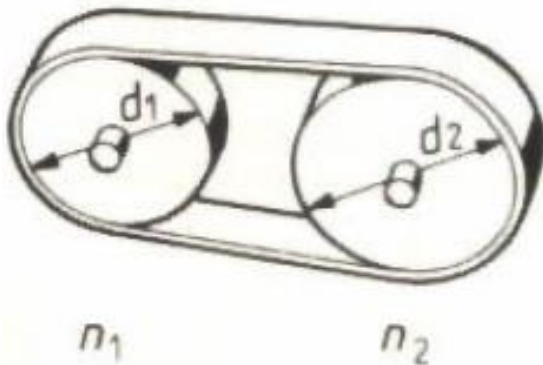
Zupčasti prenosnici



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

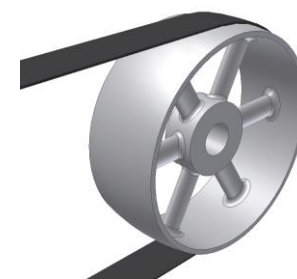
- **Klinasti kaiš (engl. v-belt)**

- Efikasnost od 90% - 96%
- Prednost: Trpi nagla opterećenja, zaglavlivanja motora
- Mana: Efikasnost pada ispod 90% ako se ne održavaju



- **Pljosnati kaiš (engl. flat belt)**

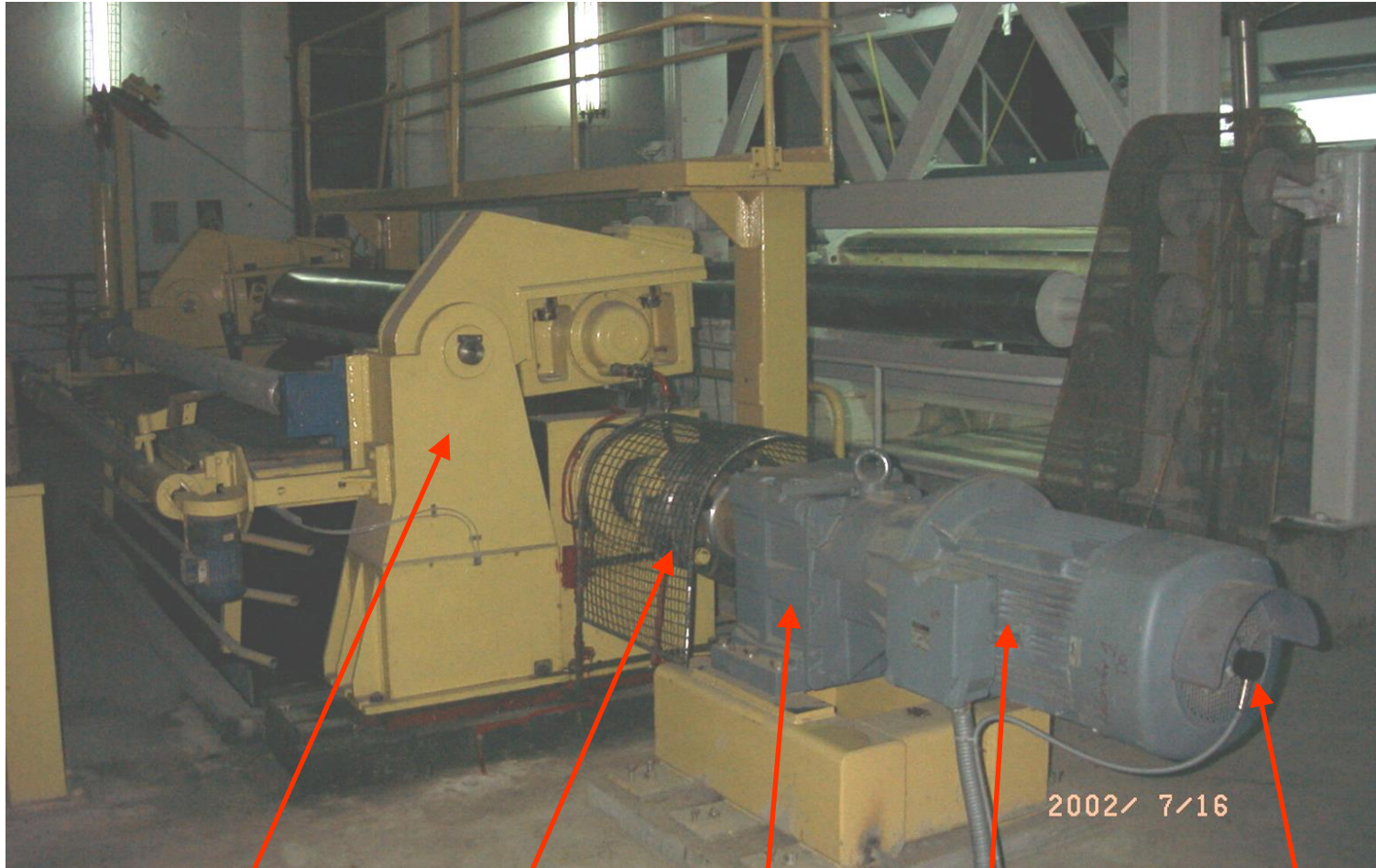
- Efikasnost 96% - 99%
- Prednost: Visoka efikasnost za velike brzine
- Mane: Visoka cena



- **Lanac i lančanik**

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

Mehanički deo pogona



Opterećenje

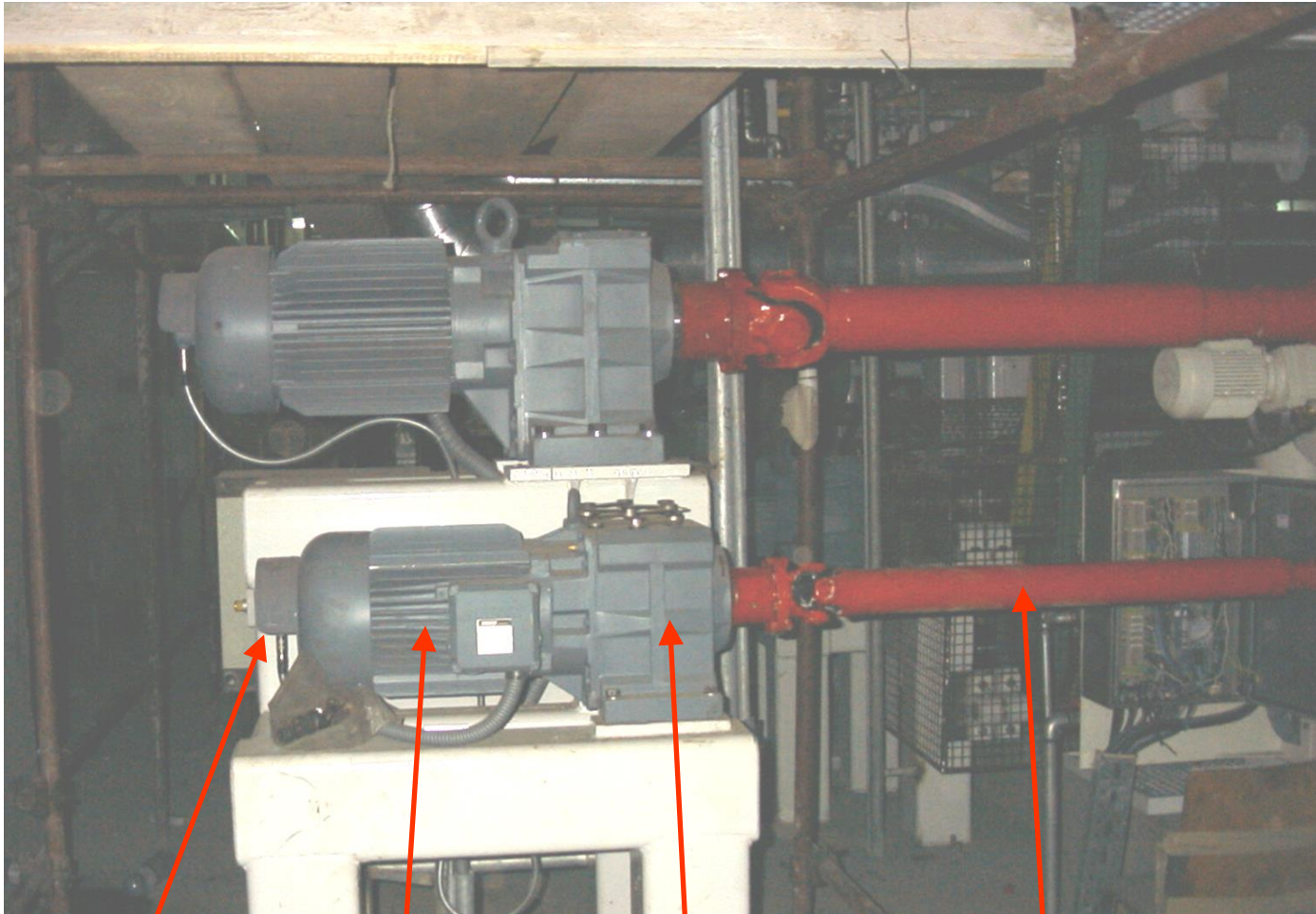
Spojnica

Reduktor

Motor

Enkoder

Mehanički deo pogona



Enkoder

Motor

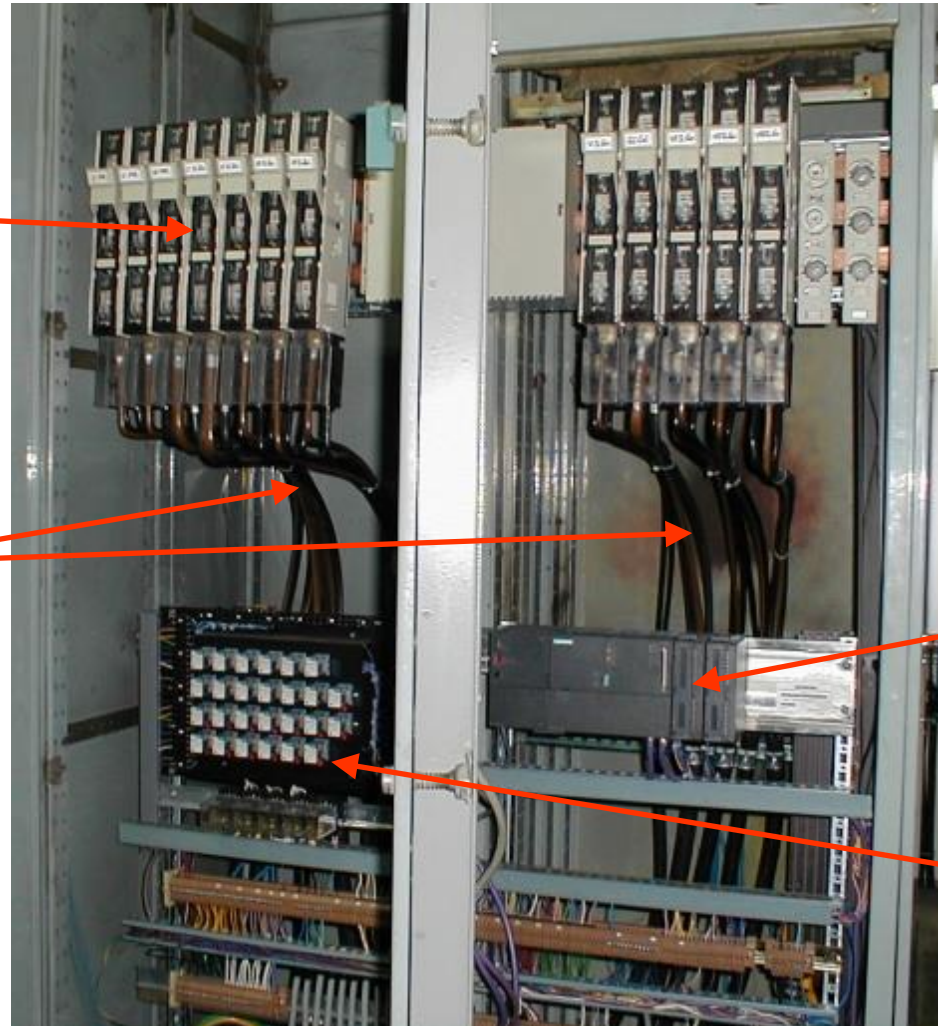
Reduktor

Kardansko
vratilo

Napajanje, razvod i upravljanje

Rastavljači sa osiguračima

Kablovi za napajanje pogona (en.pretvarača)



PLC

Relejni deo upravljačkog sistema

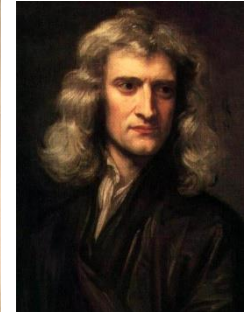
Energetski pretvarači



NJUTNOVA JEDNAČINA

Drugi Njutnov zakon (1687. godine):

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



Sir Isaac
Newton
1643-1727.

Kod pravolinijskog kretanja:

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

0

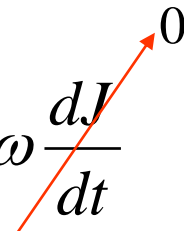
gde je: f_e – pokretačka, motorna sila;

f_m – otporna sila koja se suprotstavlja kretanju;

M – masa;

v – brzina kretanja.

Kod obrtnog kretanja, značajnog u pogonima:

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


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;

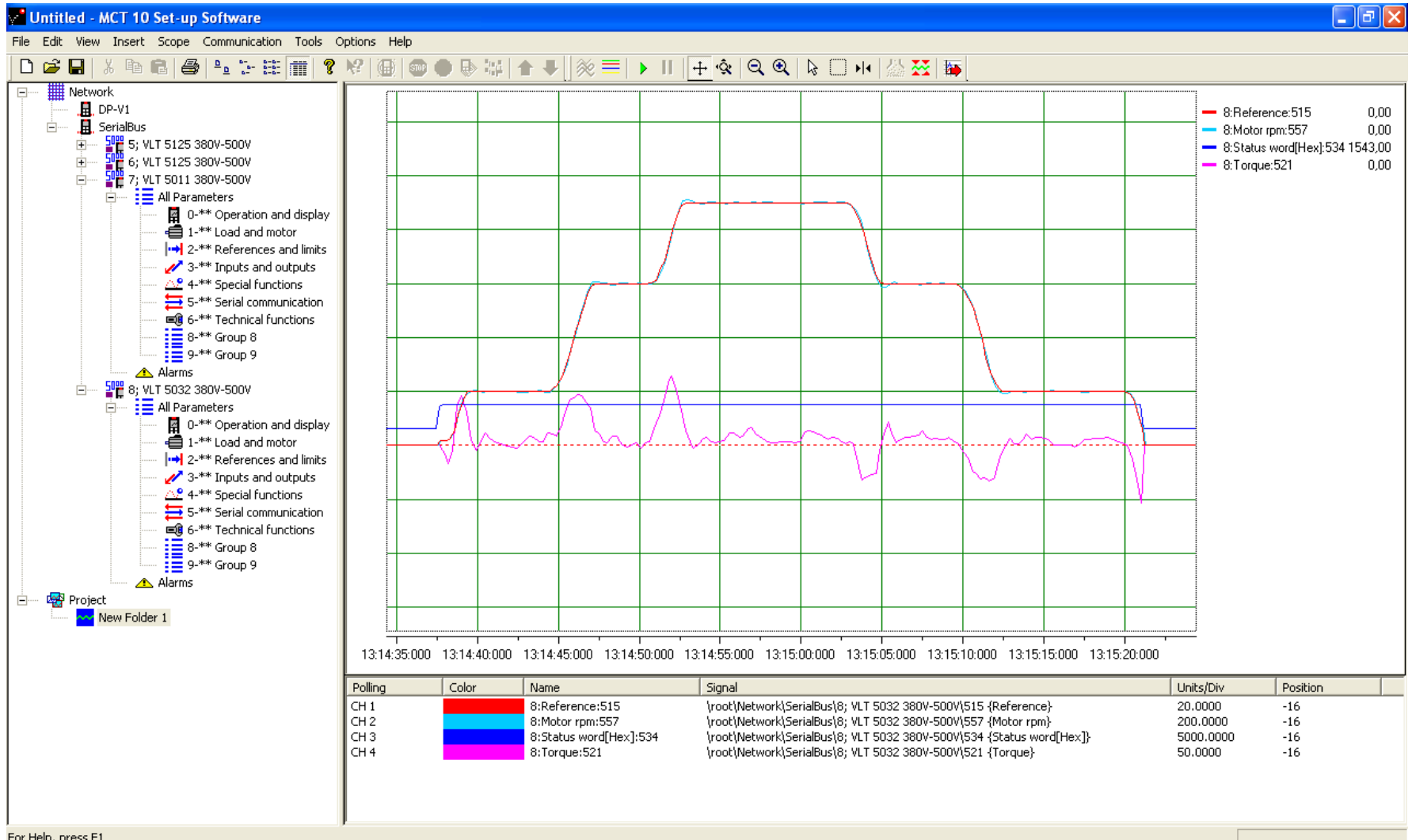
θ - trenutni ugao vratila, položaj.

j - trzaj

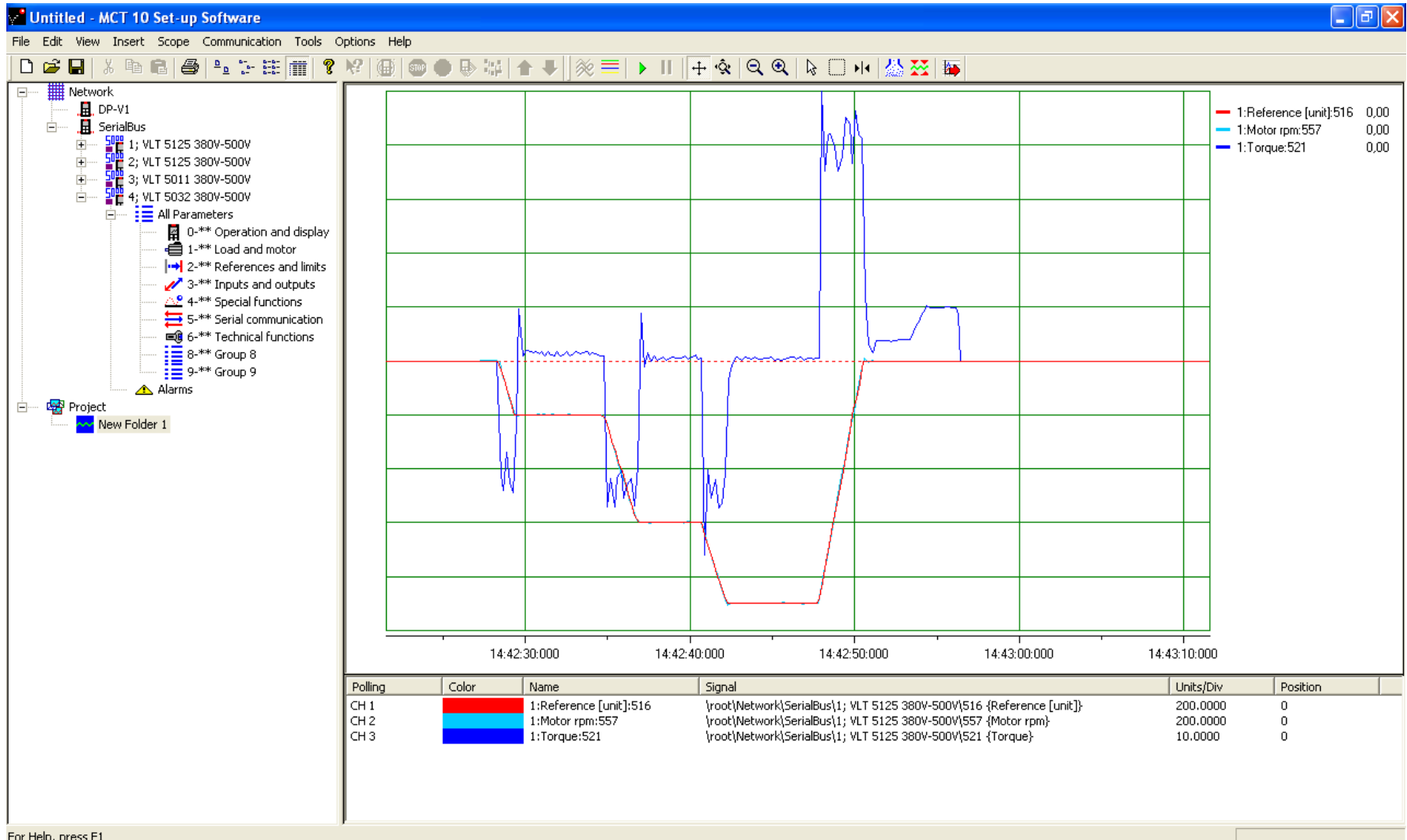
$$\omega = \frac{d\theta}{dt}; \quad \alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

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

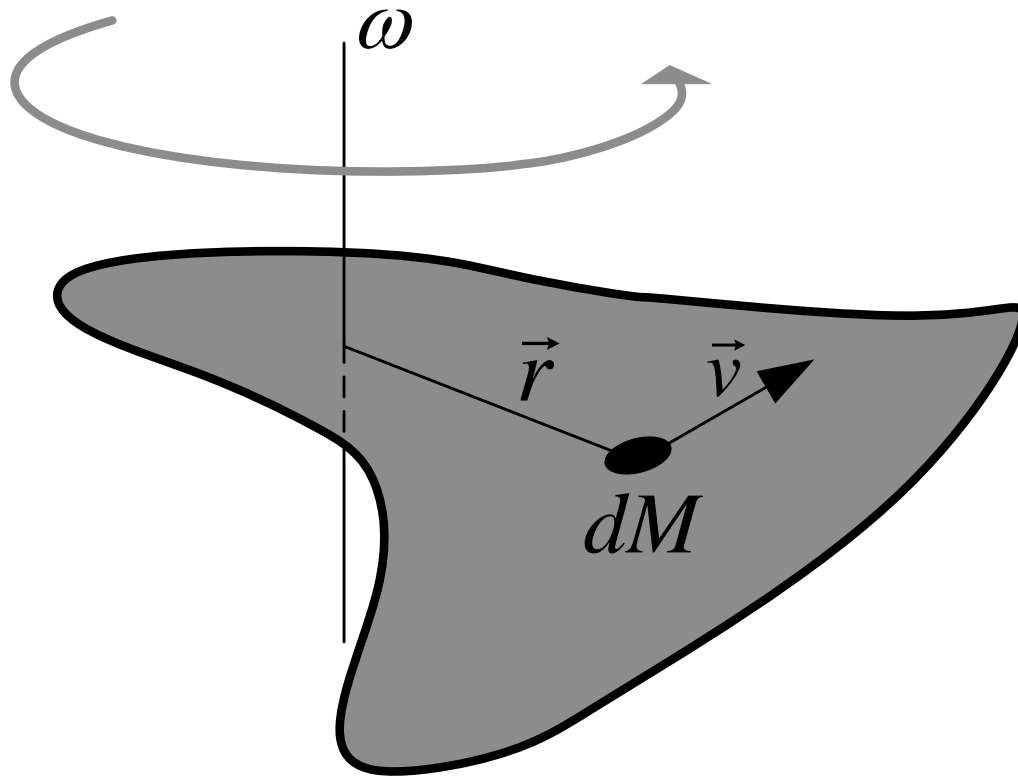
Postepeno povečanje i smanjenje brzine pogona



Postepeno povečanje i smanjenje brzine pogona (negativna brzina)



MOMENT INERCIE (*definicija*)

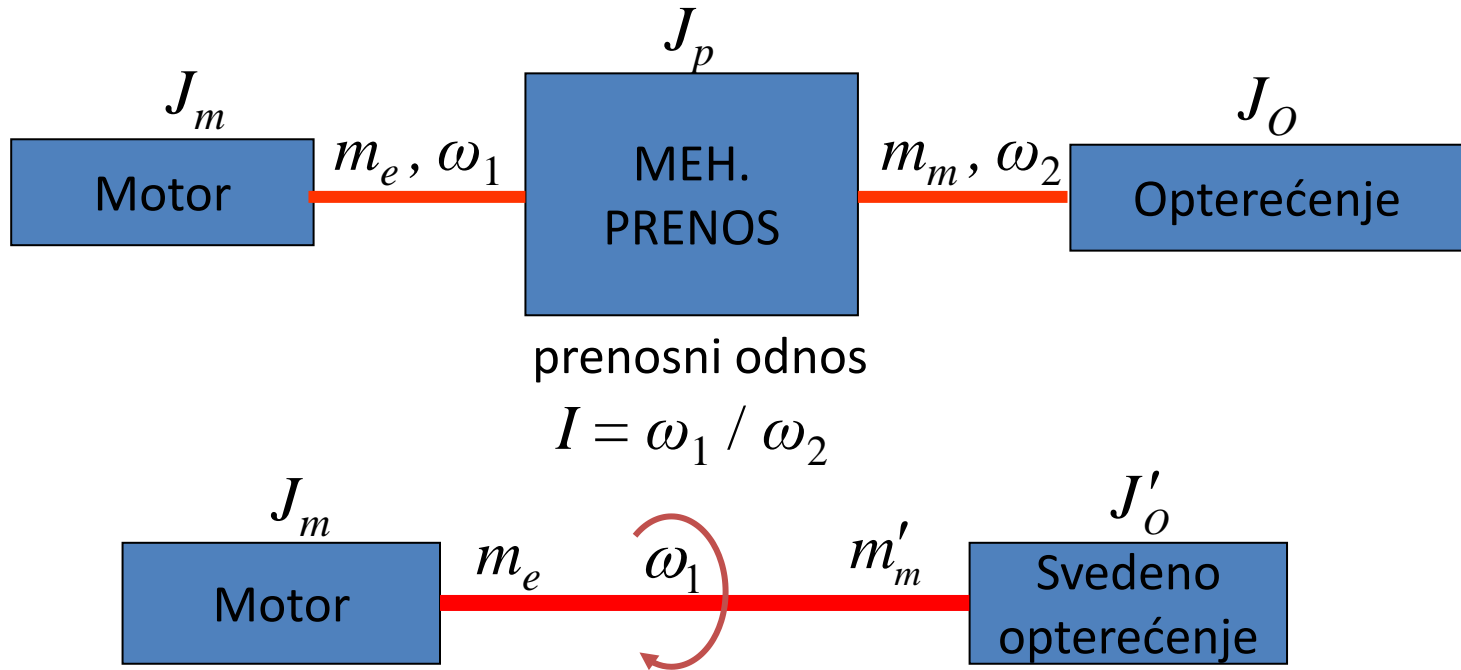


Podsetite se
Fizike sa prve
godine studija.

Definicija momenta inercije:

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

SVOĐENJE MEHANIČKIH PRENOSNIKA



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:

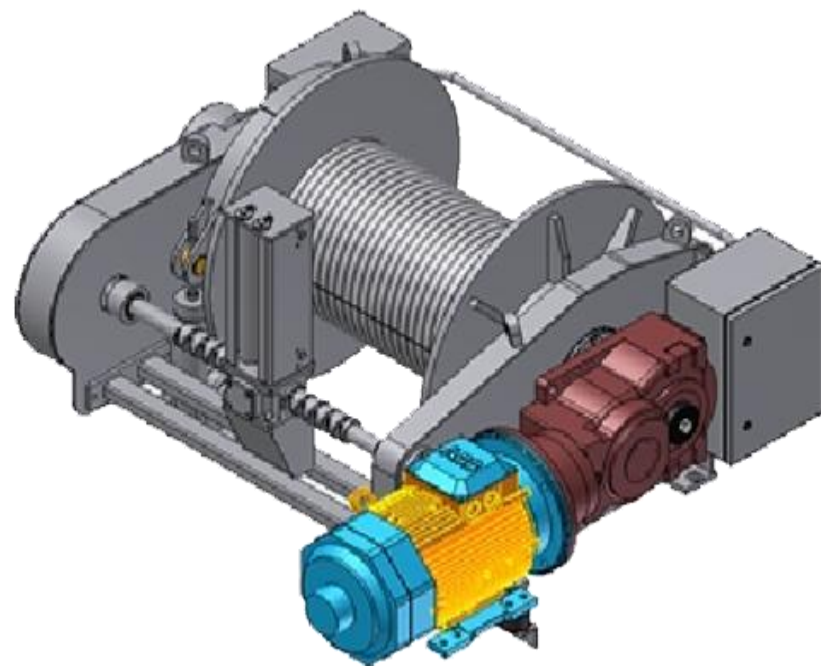
$$\frac{J'_o \cdot \omega_1^2}{2} = \frac{J_o \cdot \omega_2^2}{2} \Rightarrow J'_o = \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \cdot J_o = \frac{J_o}{I^2}$$

Njutnova jednačina koja važi za sistem sa slike je:

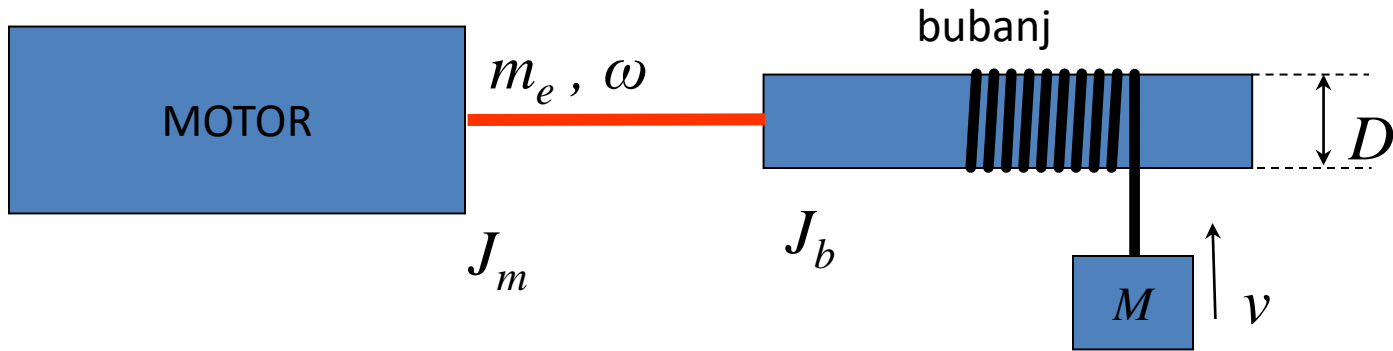
$$m_e - m'_m = \left(J_m + J_p + J'_o \right) \cdot \frac{d\omega_1}{dt}$$

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:

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

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

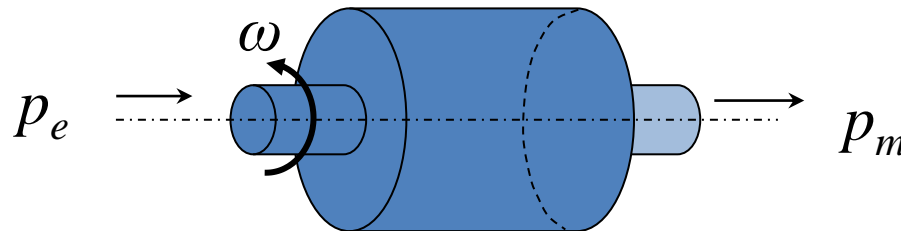
Jednačina “snage”

$$p_e = m_e \cdot \omega \quad \text{pogonska (pokretačka) snaga;}$$

$$p_m = m_m \cdot \omega \quad \text{snaga opterećenja;}$$

$$J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

promena kinetičke energije.



Tok snage u pogonu

Integracijom jednačine "snage" dobija se:

$$\begin{aligned} W_e(t) &= \int_0^t p_e d\tau = \int_0^t p_m d\tau + \int_0^t J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{d\tau} d\tau = \\ &= W_m(t) + J \cdot \int_0^\omega \Omega d\Omega = W_m(t) + \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 \end{aligned}$$

$W_e(t)$ - uložena mehanička energija;

$W_m(t)$ - preneti 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.

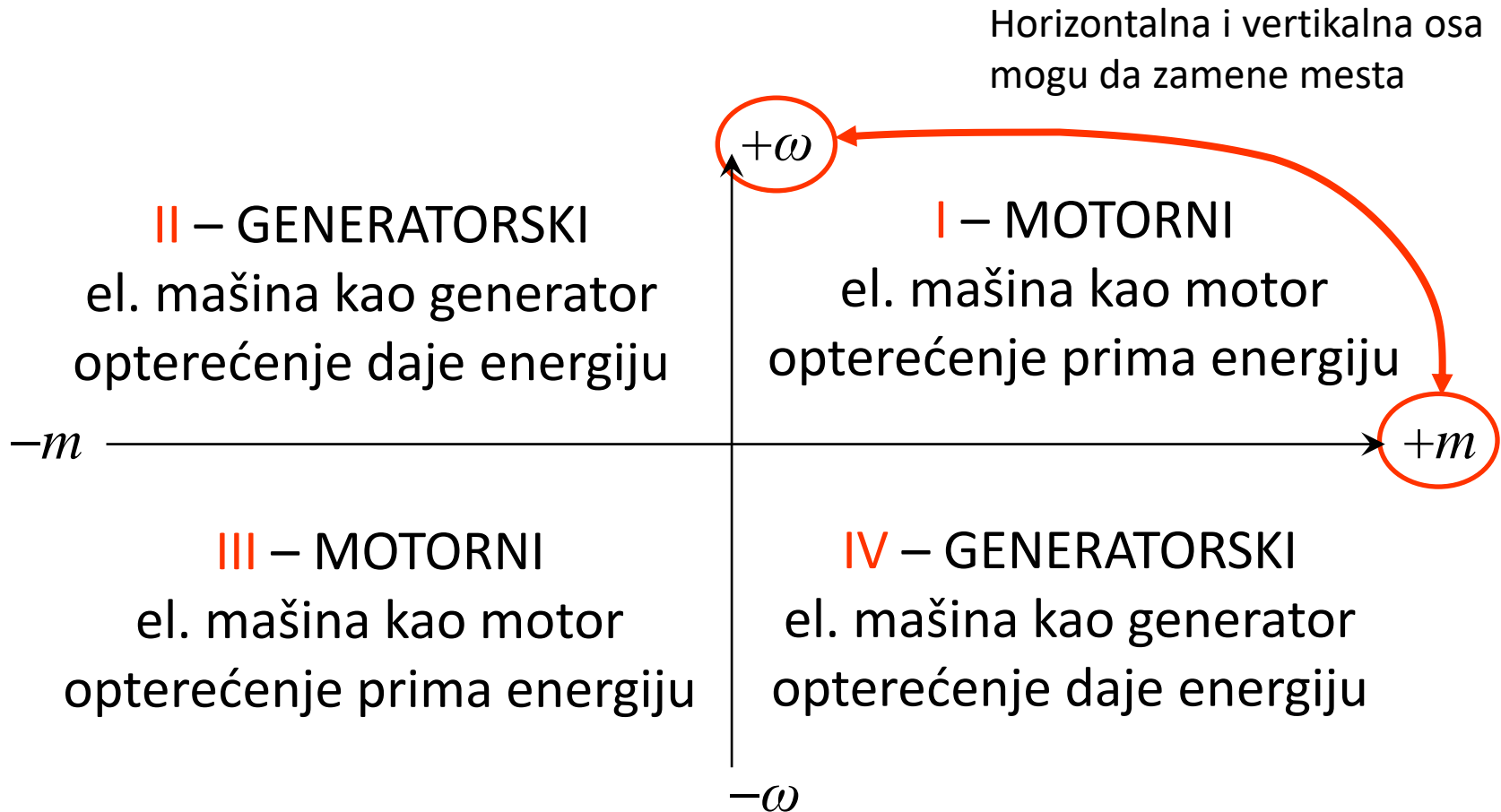
U stacionarnom stanju važi:

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

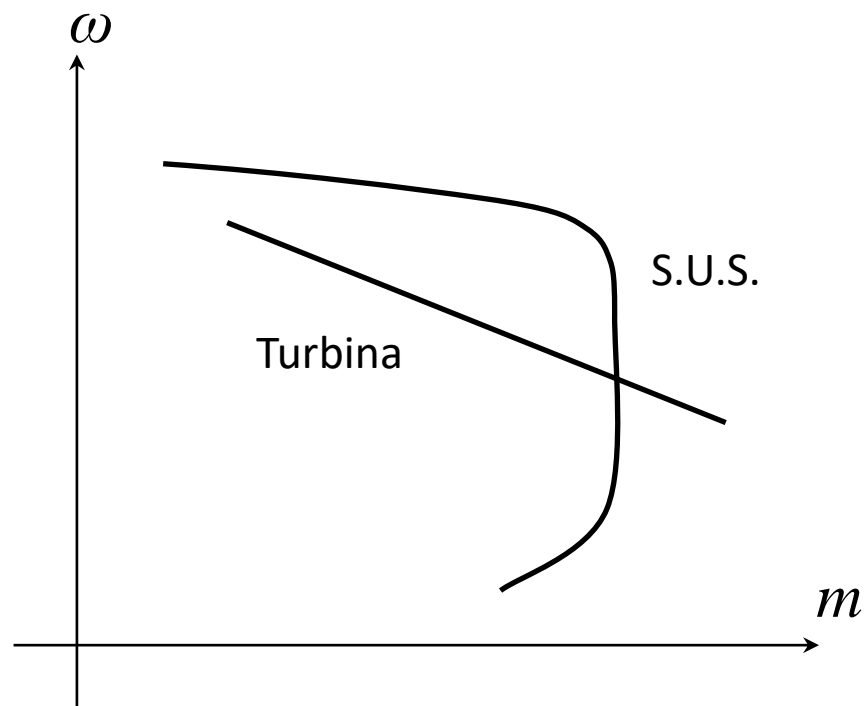
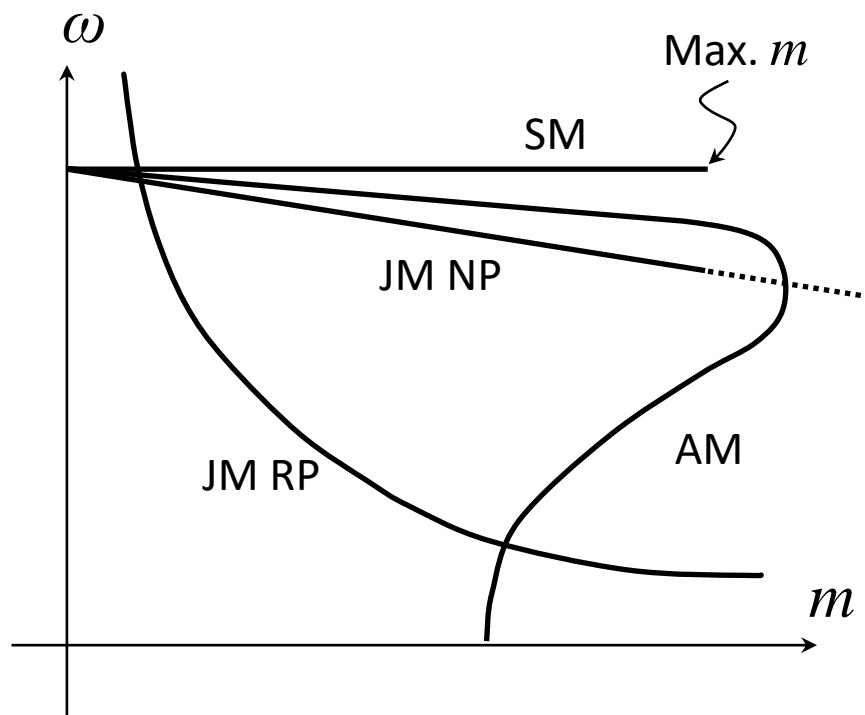
Mehaničke karakteristike **najčešće** se grafički prikazuju u koordinatnom sistemu, kod kojeg su:

- horizontalna osa - moment;
- vertikalna osa - brzina.

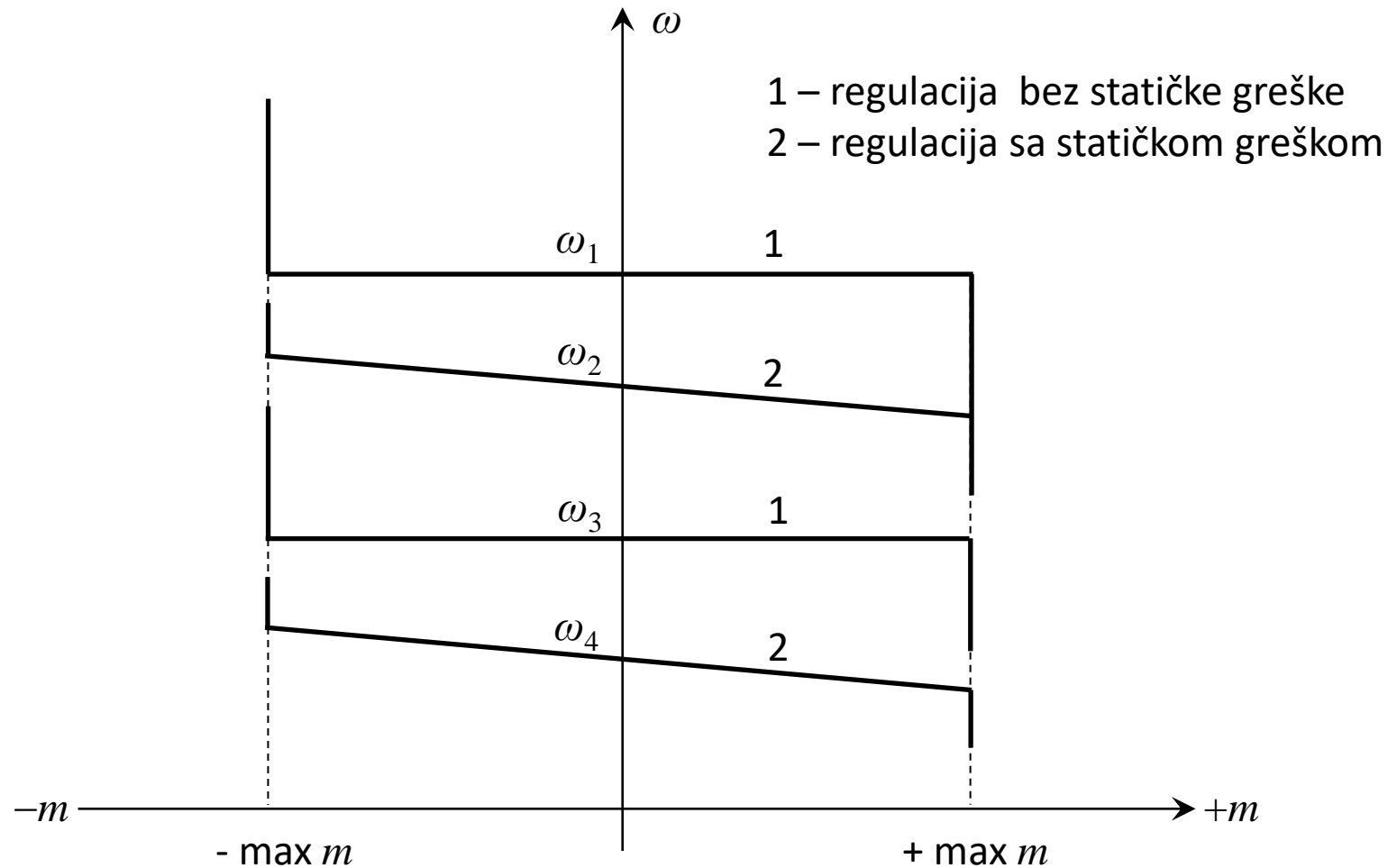
U skladu sa usvojenim konvencijama, definišu se **KVADRANTI**



*Mehaničke karakteristike (statičke)
najčešće korišćenih motora:*



Tipična mehanička karakteristika regulisanog elektromotornog pogona



MEHANIČKE KARAKTERISTIKE OPTEREĆENJA

Najveći broj ovih karakteristika može se prikazati izrazom:

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

gde je:

m_0 - moment praznog hoda, sopstveno trenje;

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

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

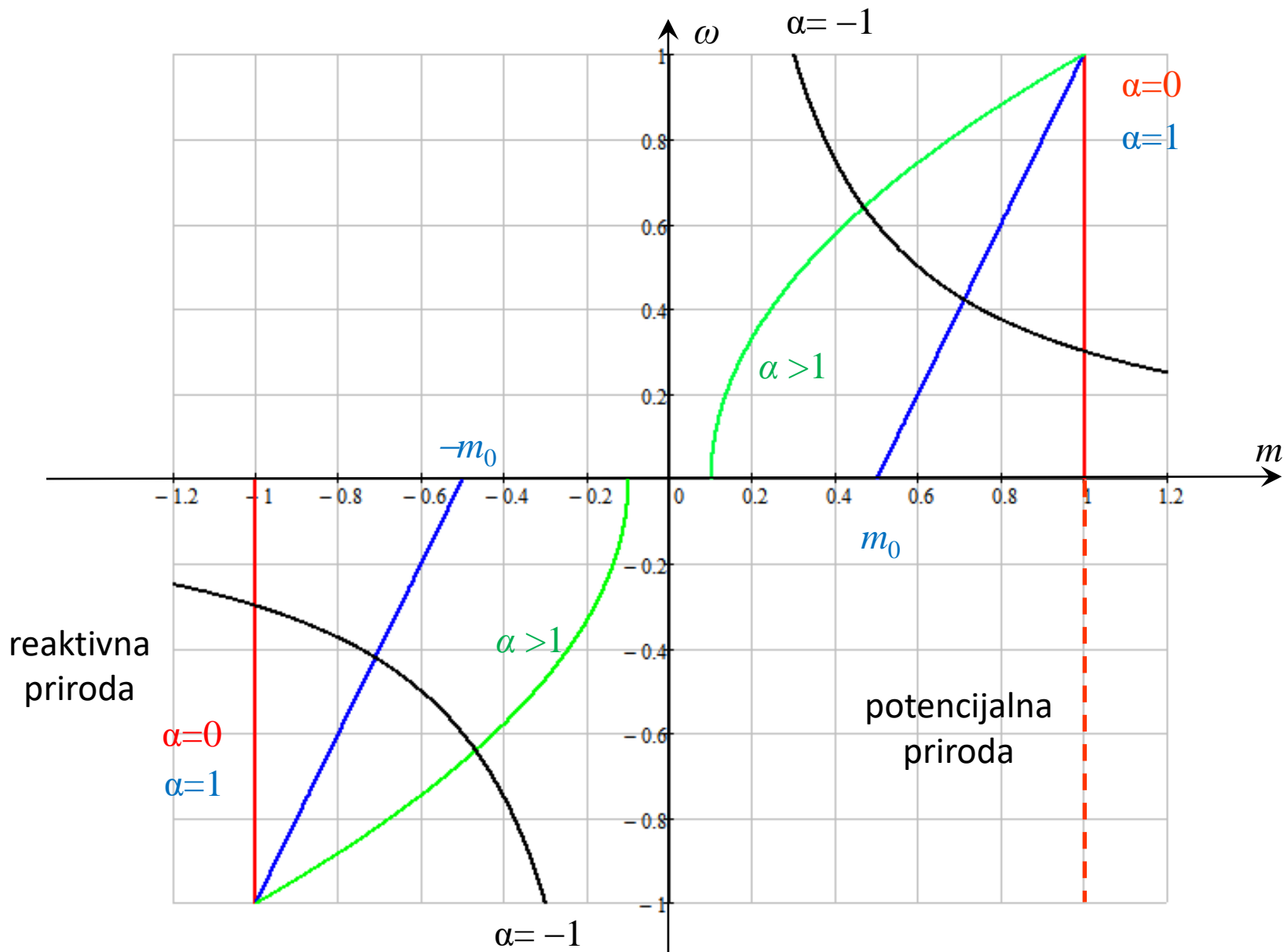
$\alpha = 0$ *moment ne zavisi od brzine
(npr. potencijalna komponenta otpornog momenta dizalice);*

$\alpha = 1$ *“kalanderska” karakteristika;*

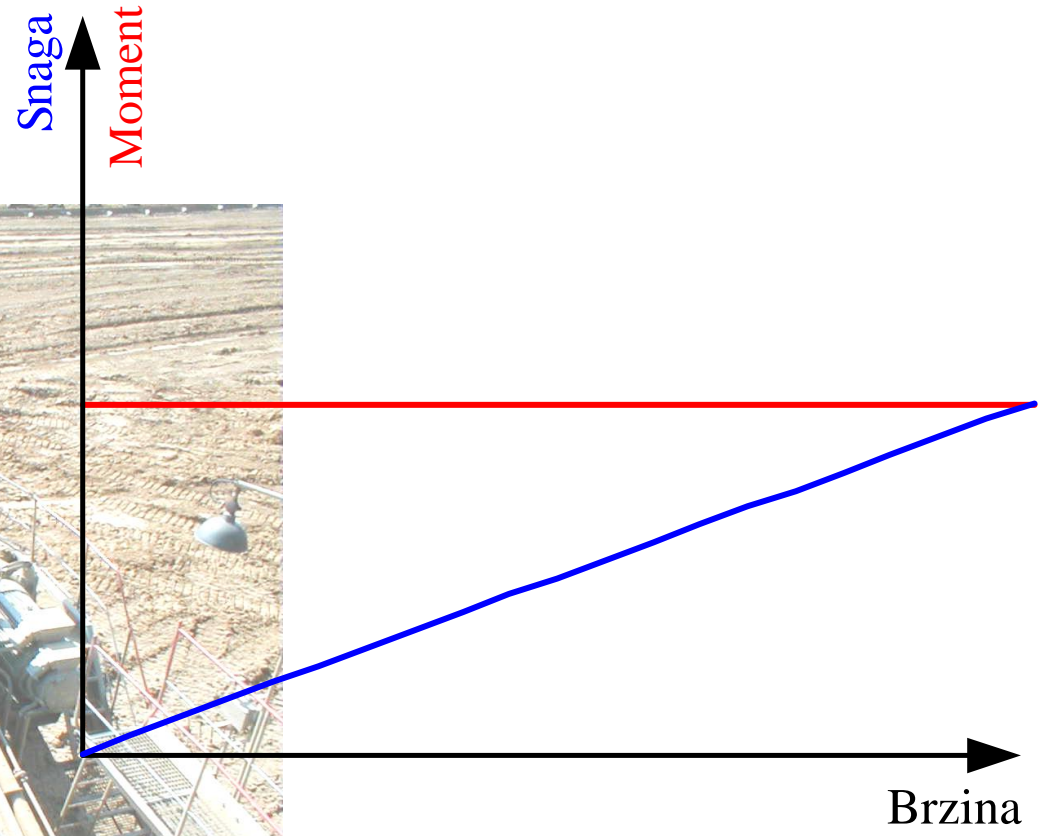
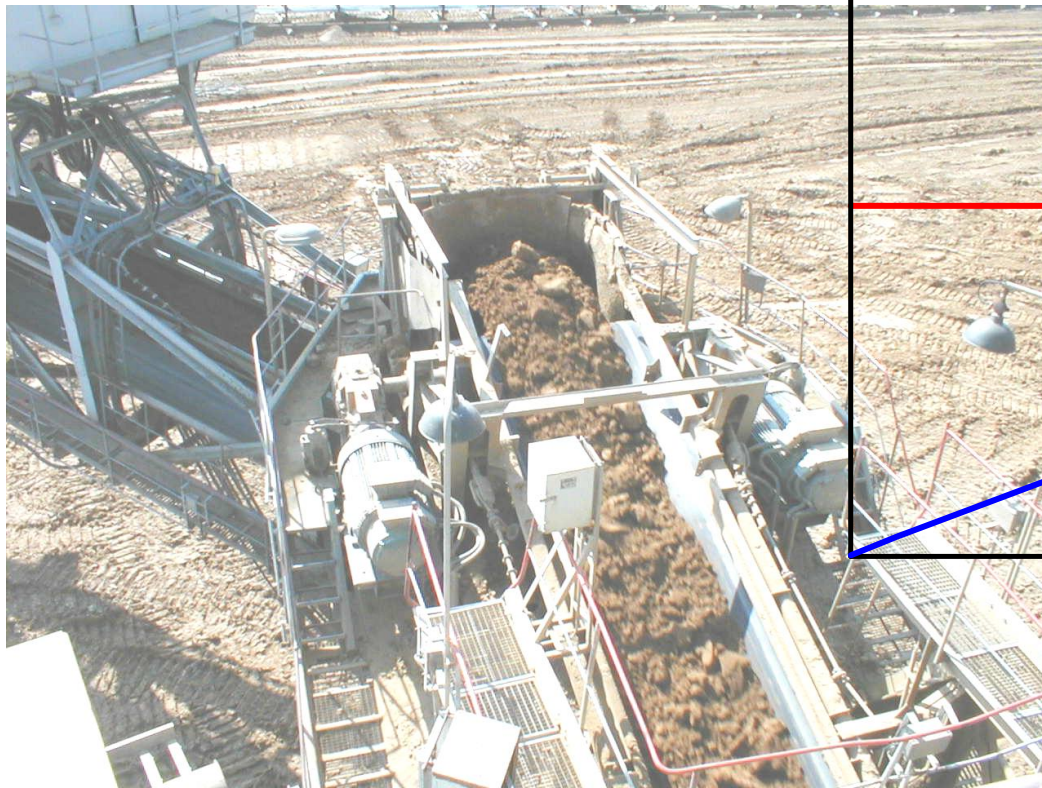
$\alpha > 1$ *“ventilatorska” karakteristika
(npr. ventilatori, pumpe, centrifuge);*

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

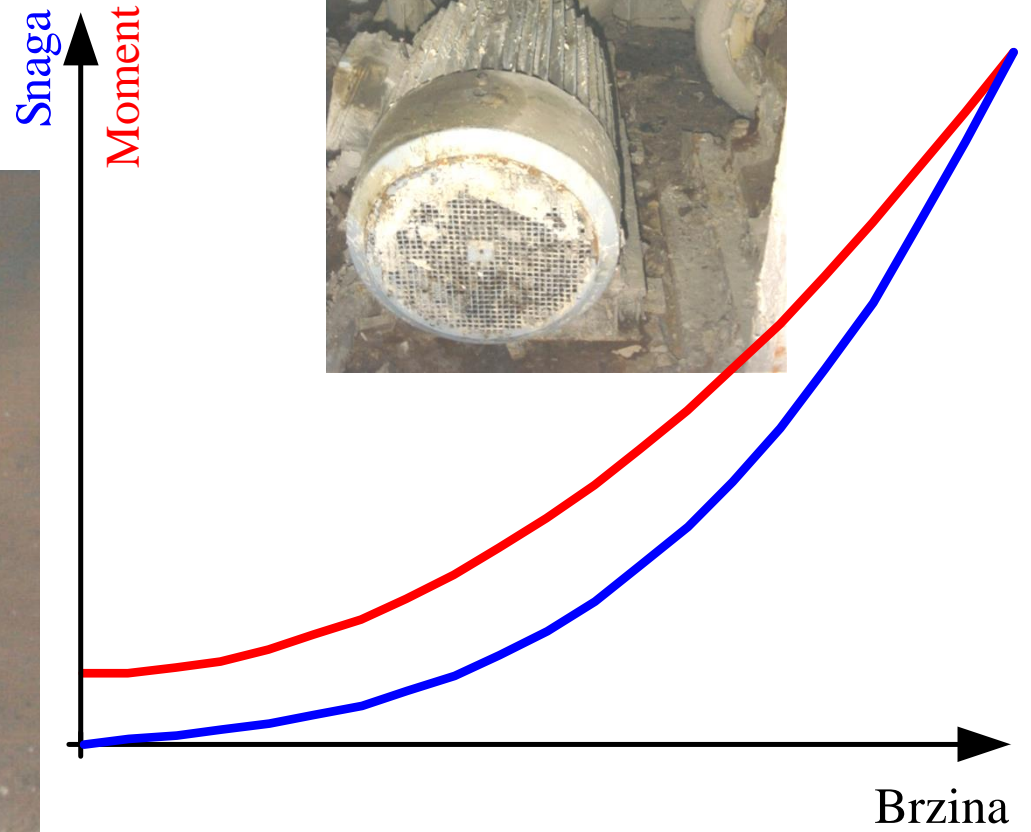
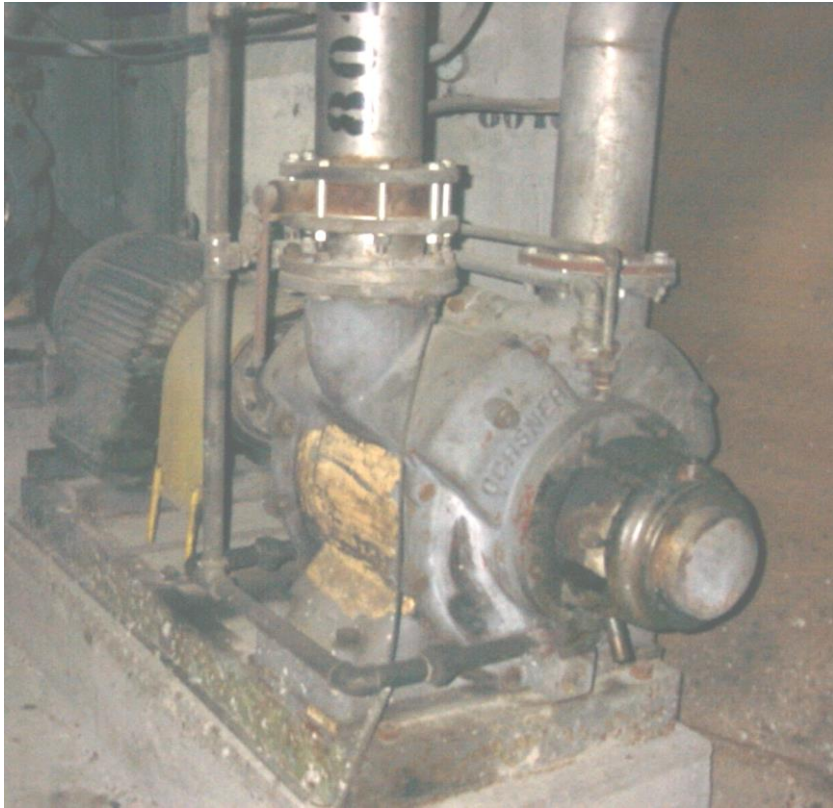
Grafički prikaz karakteristika opterećenja



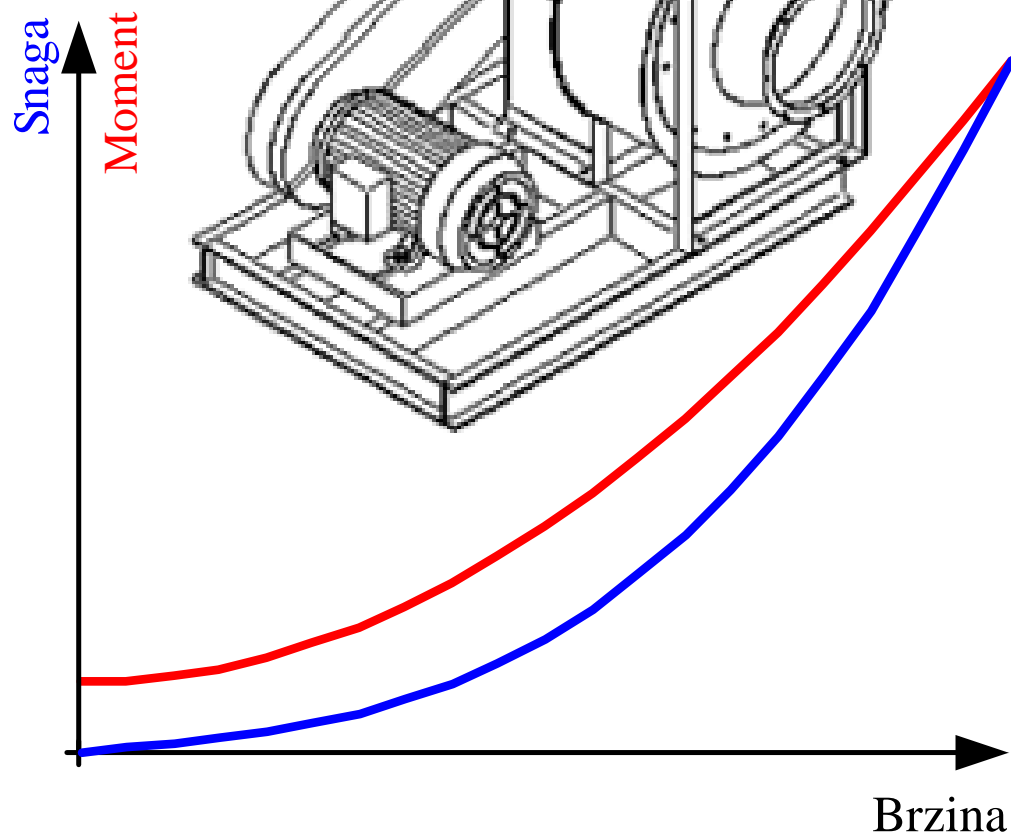
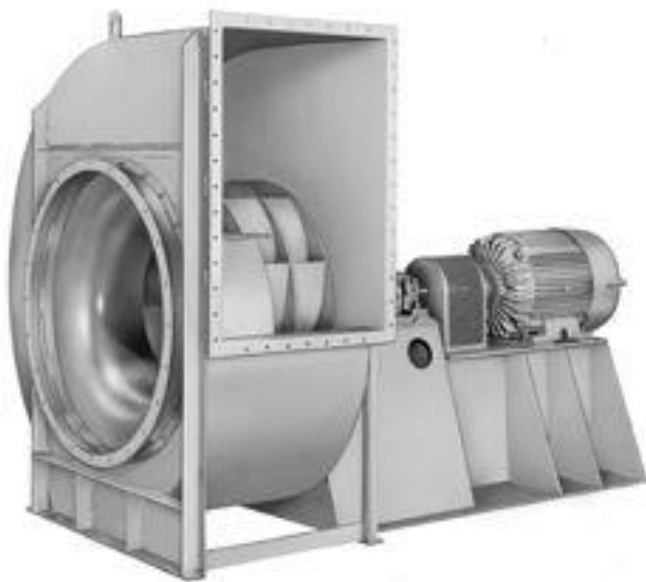
Tračni transporter



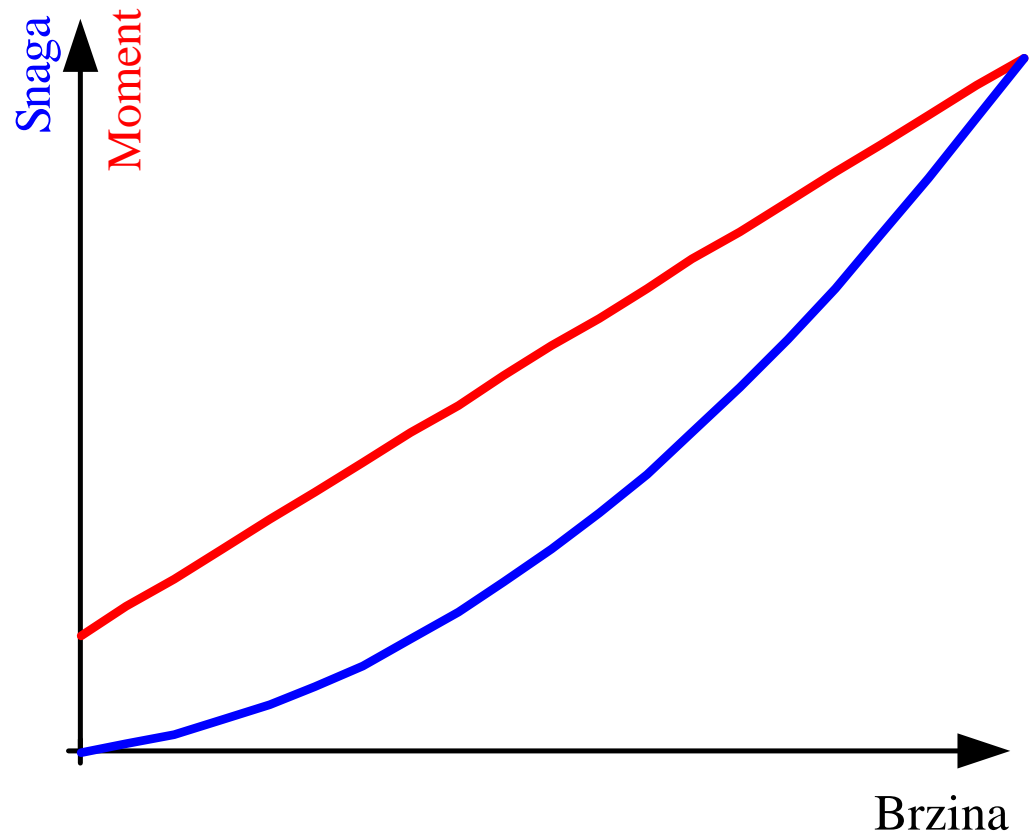
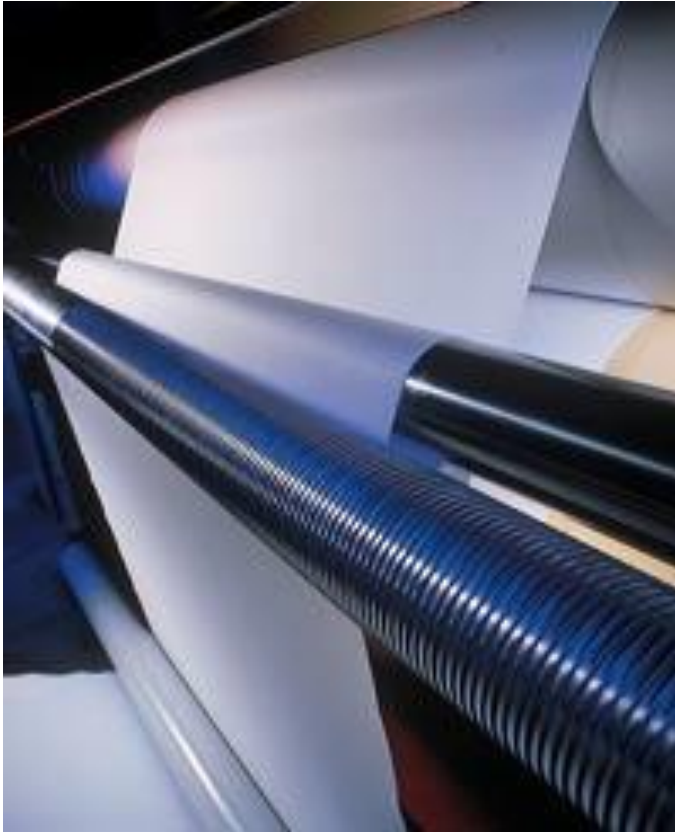
Pumpe



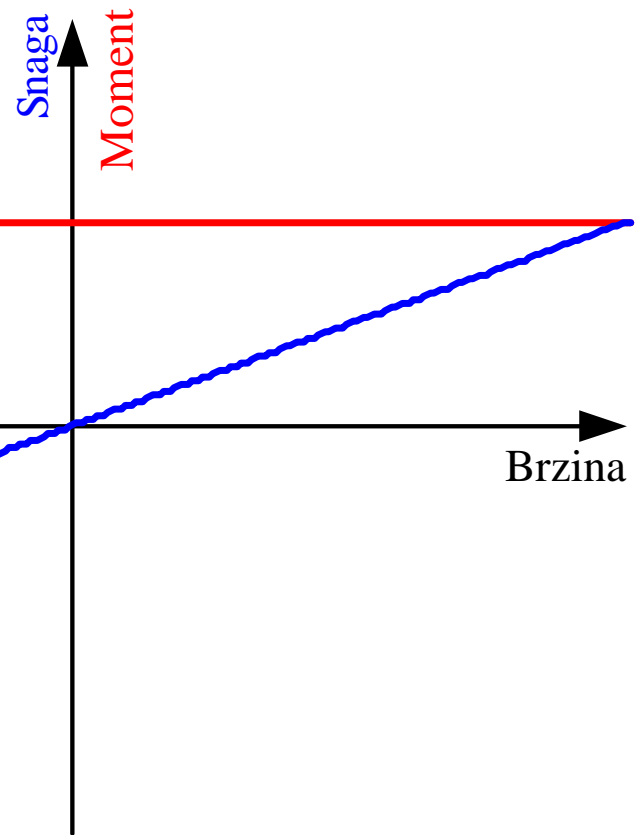
Ventilatori



Kalanderska karakteristika opterećenja

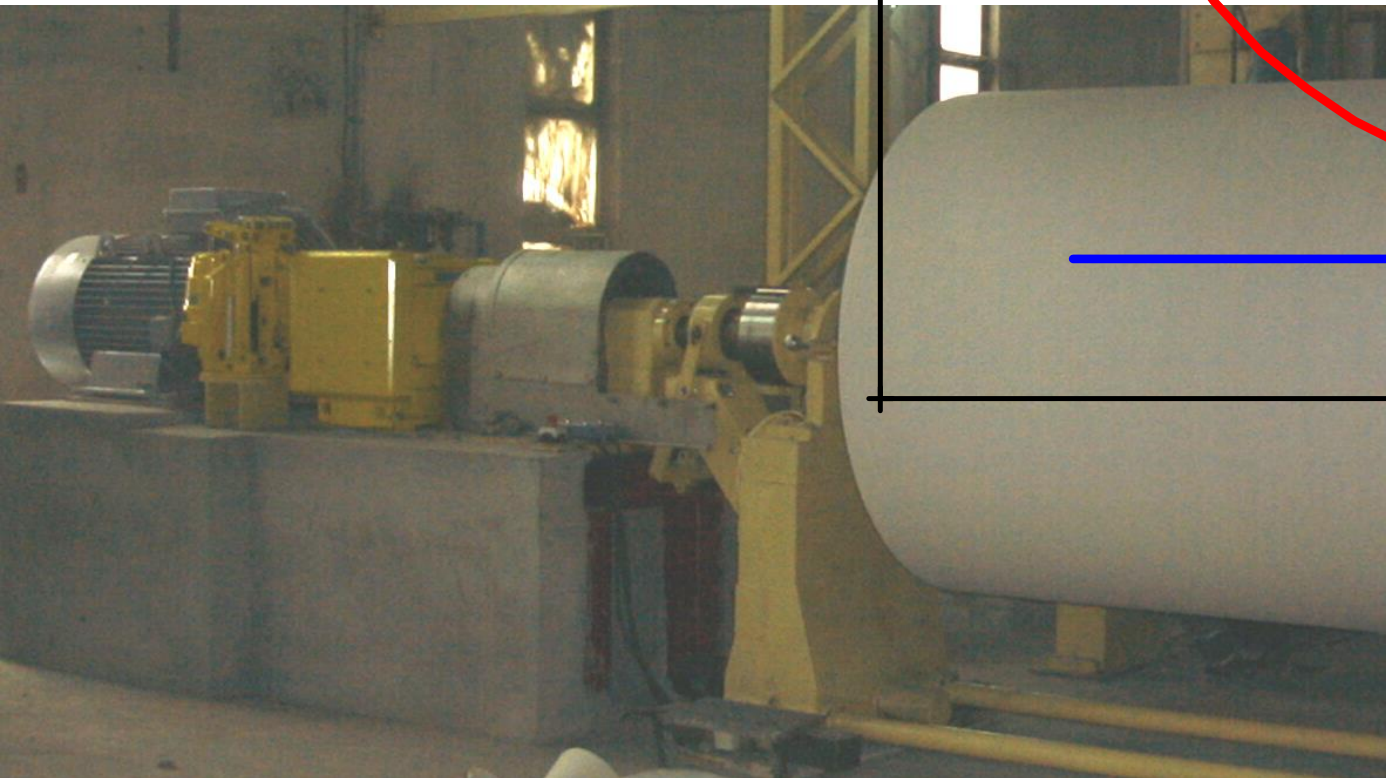
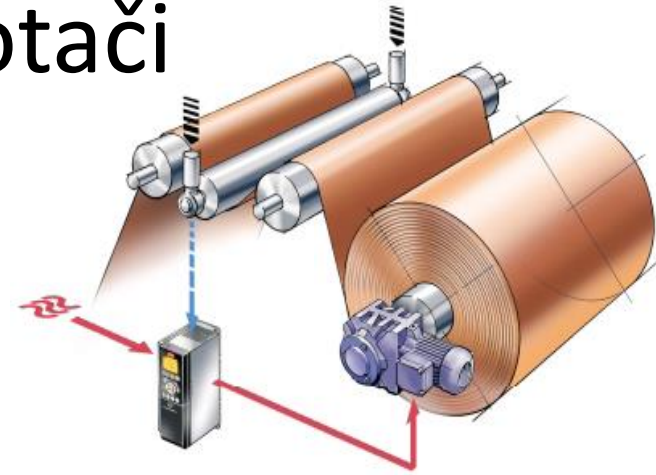


Dizalice

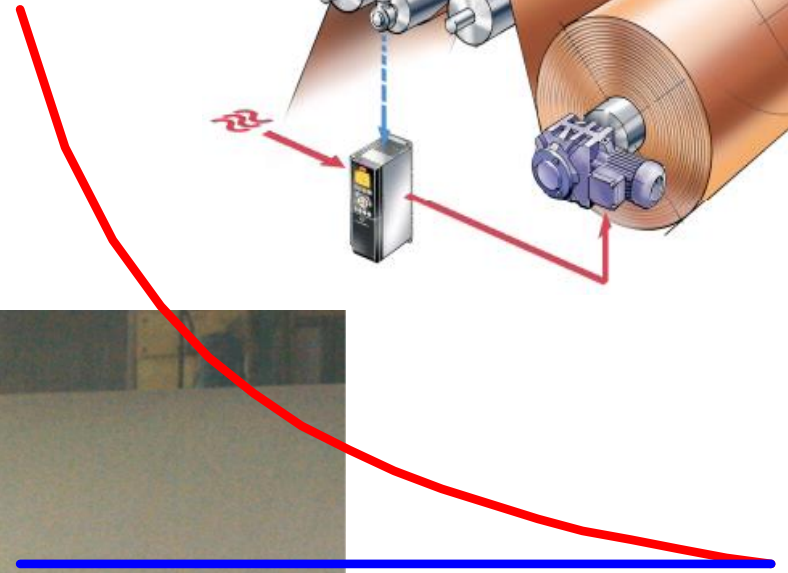


Odmotači, premotači

Snaga
Moment



Brzina



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.

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

Definicija radne tačke

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

$$m_e(\omega) > m_m(\omega) \Rightarrow J \cdot \frac{d\omega}{dt} > 0 \quad \omega \nearrow \quad \begin{array}{l} \text{Brzina raste} \\ \text{(povećava se vrednost)} \end{array}$$

$$m_e(\omega) < m_m(\omega) \Rightarrow J \cdot \frac{d\omega}{dt} < 0 \quad \omega \searrow \quad \begin{array}{l} \text{Brzina opada} \\ \text{(smanjuje se vrednost)} \end{array}$$

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 Njutnovoju 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)