FAKULTET
ELEKTROTEHNIKE I
RAČUNARSTVA

www.fer.unizg.hr/predmet/oep

OSNOVE ELEKTROMOTORNIH POGONA

Ak. god. 2014/2015.

Modul: Elektroenergetika

Predavanja:	Prof. dr. sc. Ivan Gašparac Prof. dr. sc. Damir Žarko	2 sata tjedno
Auditorne vježbe:	Tanja Poljugan, dipl.ing.	
Laboratorij:	Tanja Poljugan, dipl.ing. Zlatko Hanić, dipl.ing.	1 sat tjedno

ZAVOD ZA
ELEKTROSTROJARSTVO
I AUTOMATIZACIJU

Pravila za polaganje ispita

Provjere znanja

	Kontinuirana nastava		Ispitni rok	
	prag	udio	prag	udio
Laboratorijske vježbe	60%	20%	60%	20%
Međuispit, pisani	20%	25%		
Završni ispit, pisani	20%	25%		
Završni ispit, usmeni		30%		
Ispit, pisani			40%	30%
Ispit, usmeni				50%
	Σ	100%		100%
Ocjene:	2 >=50%	3 >60%	4 >70%	5 >85%

https://www.youtube.com/watch?v=FDBP09_m8HE

Preporučena literatura:

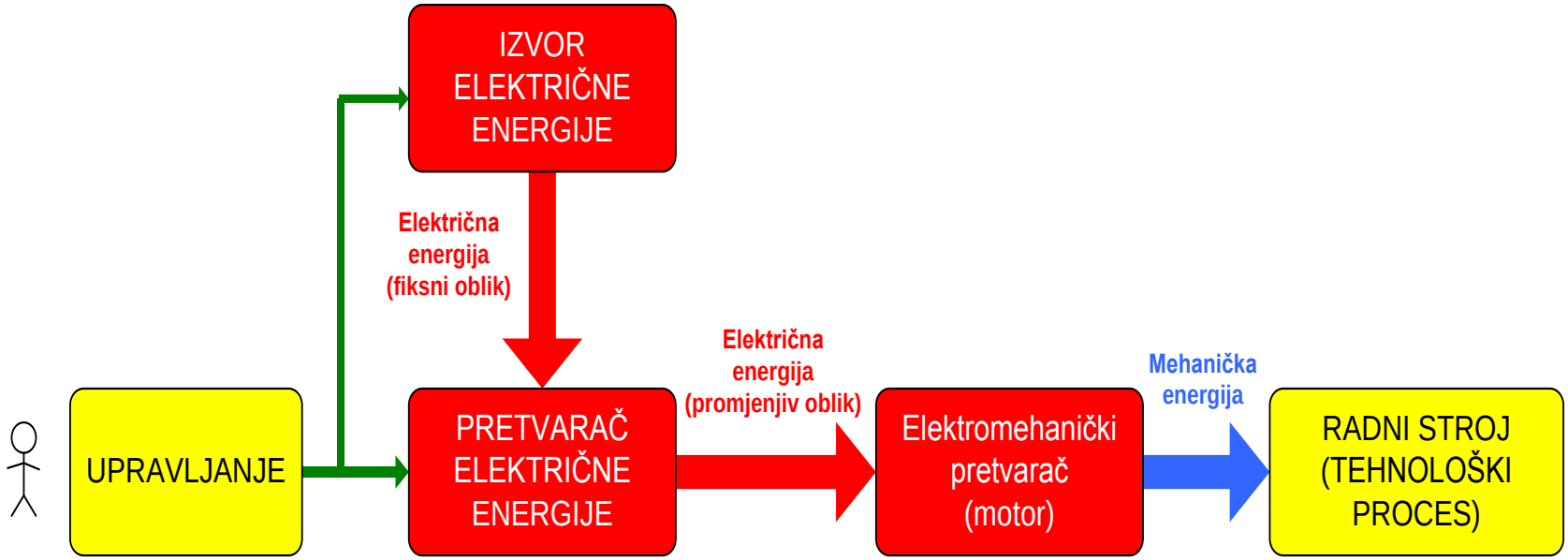
- Knjige:
  - **Jurković, B.: Elektromotorni pogoni, Školska knjiga, Zagreb, 1986.**
  - **Mohan, N.: Electric drives, an integrative approach, MNPERE, Minneapolis, USA, 2000.**
  - **Boldea, I., Nasar, S.A.: Electric Drives, Taylor &Francis, 2006.**
  - **Leonhard, W.: Control of Electrical Drives, Springer, 1996.**

- Međunarodne norme:
  - **IEC 61800-2: Adjustable speed electrical power drive systems, 1988.**
  - **IEC 60034 -1: Rotating electrical machines-Part 25 Guide for the design and perf. of cage ind. motors for converter supply, 2002.**

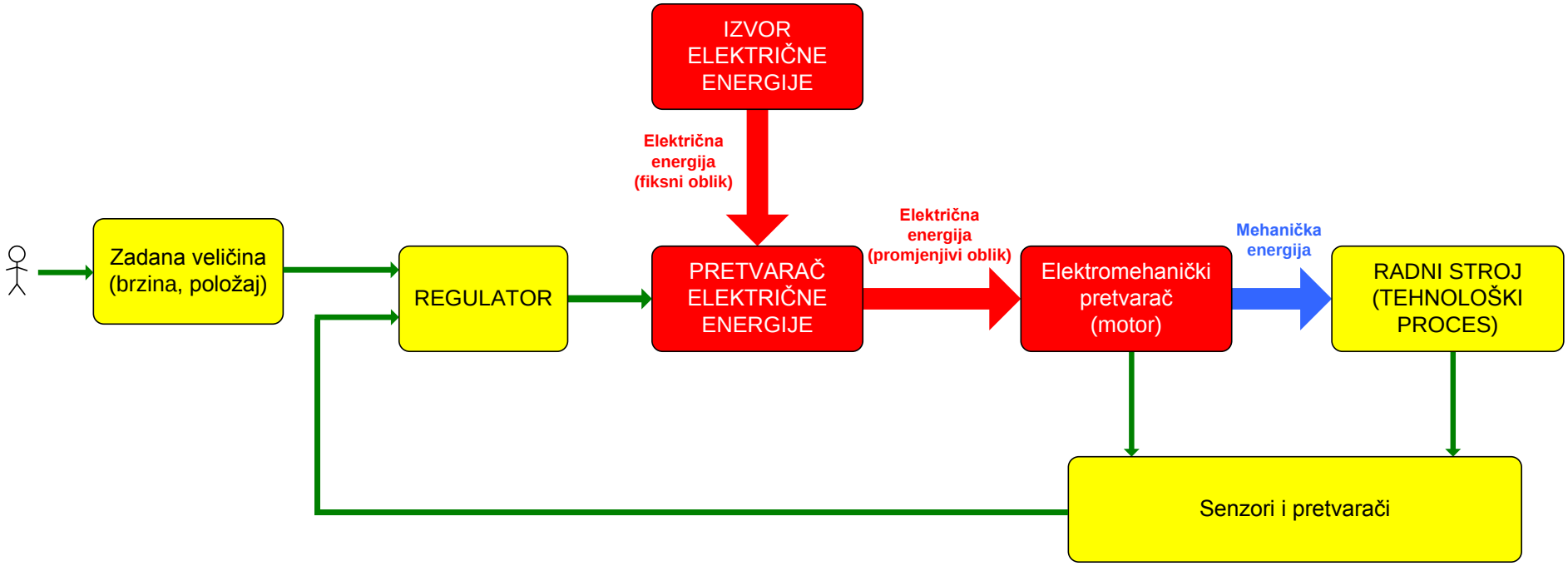
Pojam elektromotornog pogona

- Elektromotorni pogon (engl. *Electrical drive*) je elektromehanički sustav namijenjen za dovođenje i održavanje u gibanju radnih mehanizama i upravljanje njihovim mehaničkim gibanjem.
- Elektromotorni pogon se u pravilu sastoji od:
  - elektromotora,
  - radnog mehanizma,
  - prijenosnog uređaja,
  - pretvaračkog uređaja i
  - upravljačkog uređaja.
- U najjednostavnijem slučaju elektromotorni pogon sadrži elektromotor, radni mehanizam i prekidački uređaj upravljan ručno (ručni alati, kućanski aparati, ...)

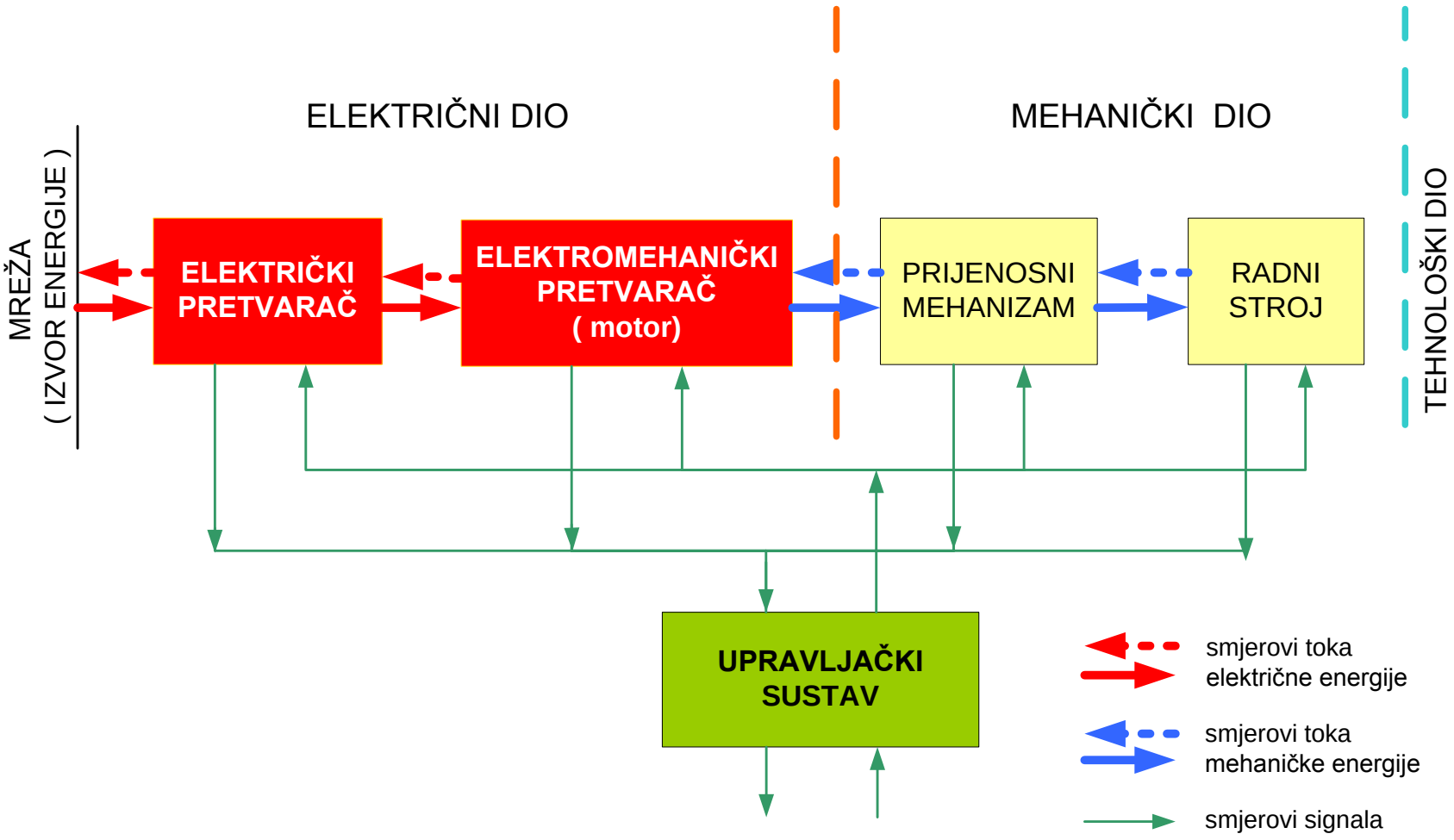
Elektromotorni pogon-sustav za pretvorbu električne u mehaničku energiju i obratno

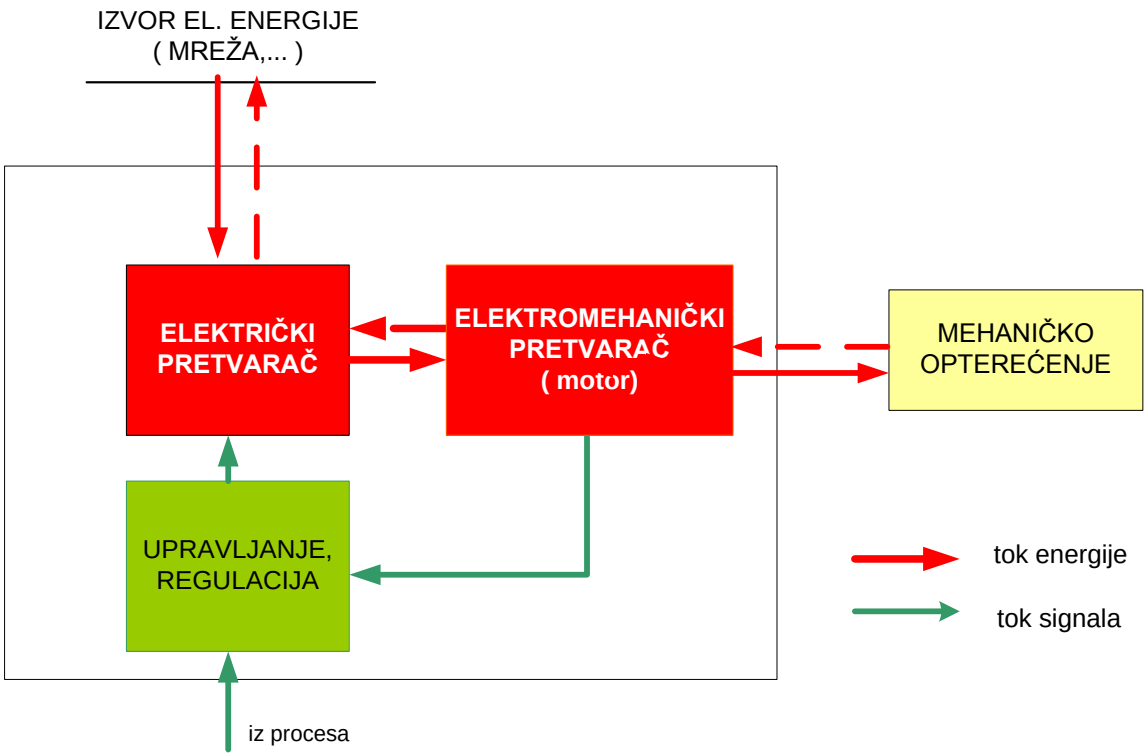


Elektromotorni pogon-sustav za pretvorbu električne u mehaničku energiju i obratno



Struktura suvremenog elektromotornog pogona





- Elektromotorni pogon obično razmatramo kao trijadu:
  - elektromehanički pretvarač (sve vrste električnih strojeva),
  - električki pretvarač (energetski elektronički pretvarač, rotirajući pretvarači) i
  - upravljanje i regulacija.

Elektromehanički pretvarači, transformatori i rotirajući električki pretvarači se detaljno obrađuju u kolegijima iz električnih strojeva.

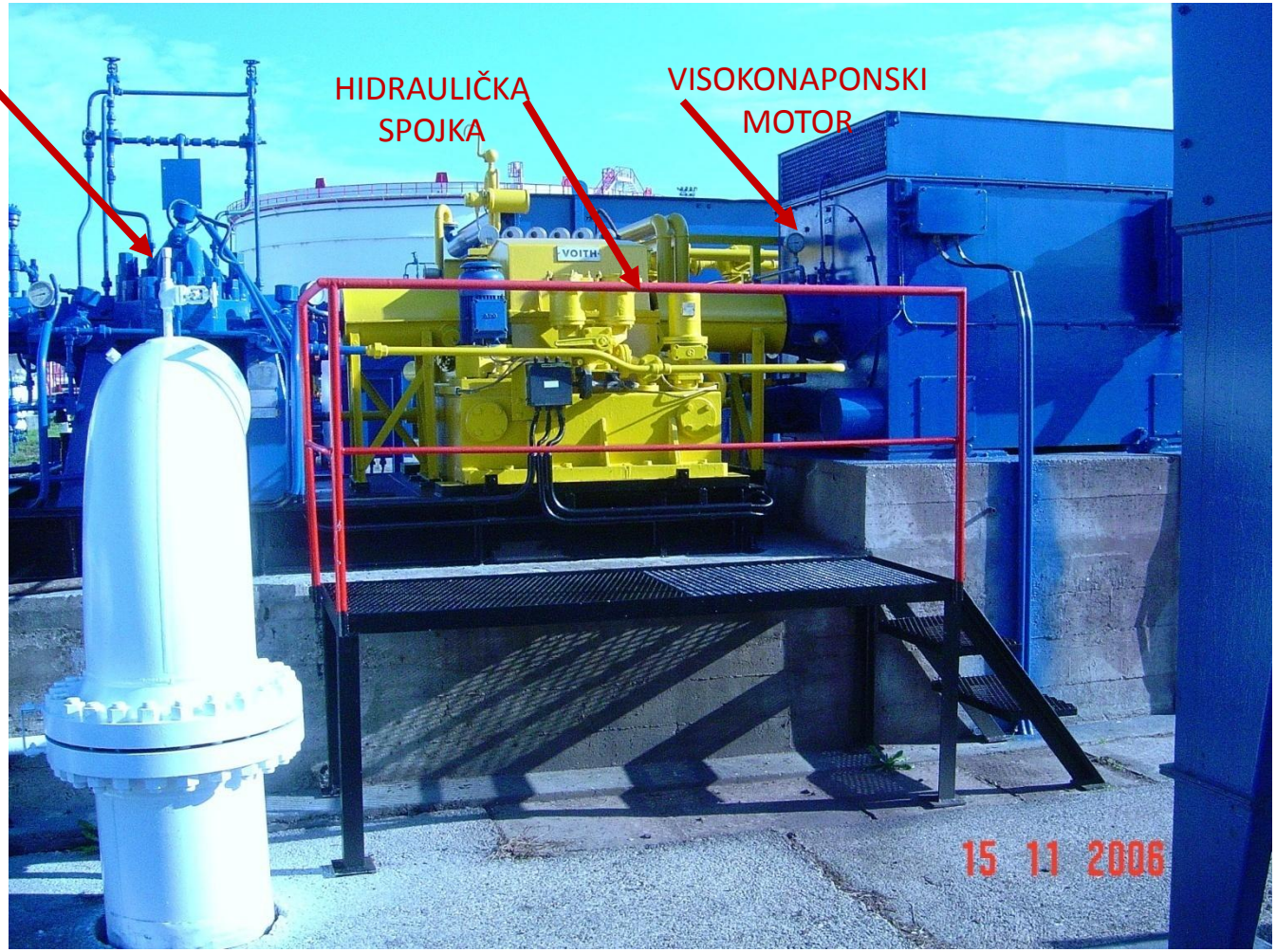
Energetski elektronički pretvarači se obrađuju u kolegijima energetske elektronike.

Upravljanje i regulacija se obrađuju u kolegijima upravljanja i regulacije.

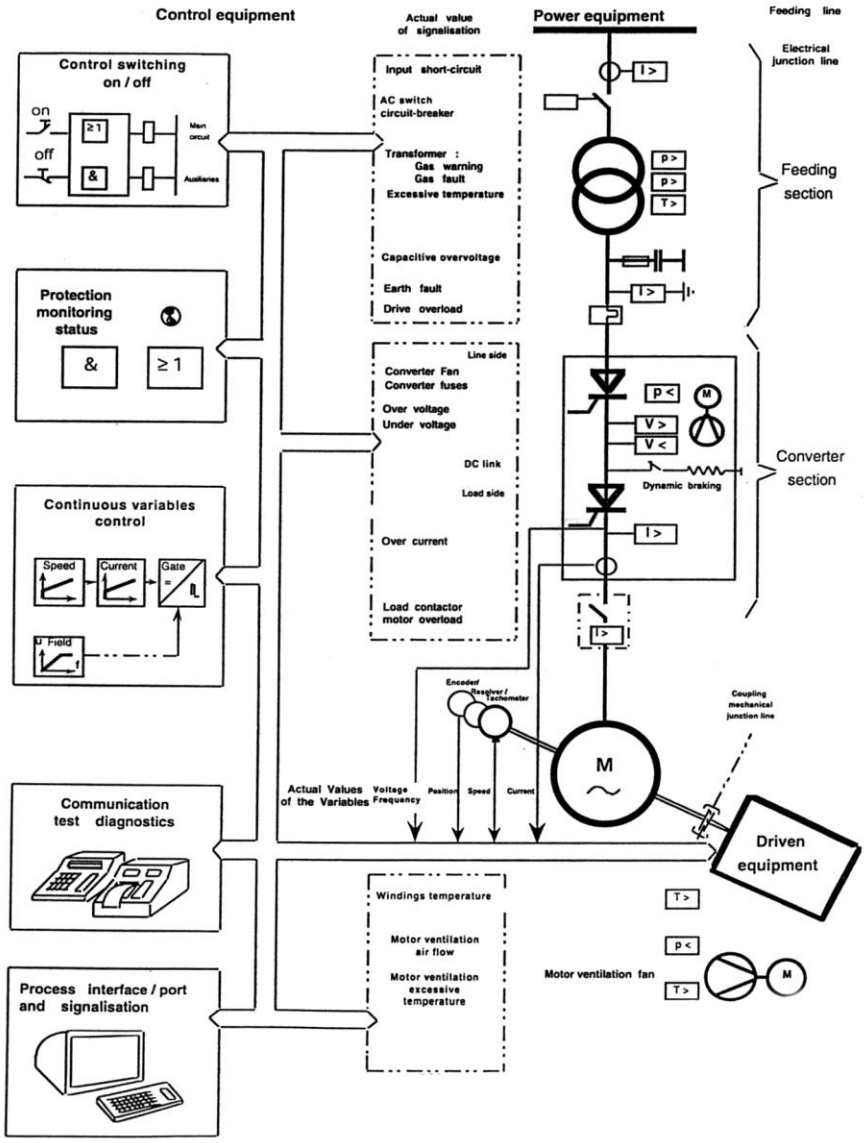
Osnovne komponente elektromotornog pogona

- Elektromotor je glavni dio (“srce”) elektromotornog pogona.
- Prijenosni uređaj sadrži mehaničke prijenosne naprave i spojne elemente neophodne za prijenos mehaničke energije između elektromotora i radnog mehanizma.
- Pretvarački uređaj prilagođava parametre električne energije potrebama motora. Upravlja tokovima električne energije u cilju reguliranja režima rada elektromotora i radnog mehanizma.
- Radni mehanizmi su mehaničke naprave koje služe za obavljanje mehaničkog rada potrebnog tehnološkom procesu. To su pumpe (crpke), ventilatori, kompresori, dizala, alatni strojevi, itd.
- Upravljački uređaj je informacijski dio sustava upravljanja elektromotornim pogonom.

Elektromotorni pogon naftovodne pumpe; 1900 kW, 2960 1/min, terminal jadranskog naftovoda Sisak



Funkcionalni dijagram izmjeničnog EMP (IEC 61800-2)



Važnost elektromotornih pogona s aspekta proizvodnje i potrošnje električne energije

- Elektromotorni pogoni pretvore oko (55 – 65)% sveukupne proizvedene električne energije u svijetu.
- U uvjetima sve manjih resursa energije vrlo je važno da korisnost pretvorbe energije (energijska efikasnost – engl. *energy efficiency*) u elektromotornim pogonima bude što veća (motori povećane korisnosti).
- Električki pretvarači energije (elektronički energetski pretvarači, transformatori, ...) imaju u odnosu na radne mehanizme (ventilatori, pumpe, kompresori, ...) relativno visoku korisnost.
- Korisnost energetskih (učinskih) elektroničkih pretvarača iznosi do 98,5 %, velikih transformatora do 99%, velikih elektromotora do 97%.
- Pumpe i ventilatori imaju korisnost do 80%.
- Reduktori i multiplikatori imaju korisnost do 99%.

Regulirani ili neregulirani elektromotorni pogon?

- Regulirati se može brzina, moment ili pozicija (položaj).
- Zašto odabrati regulirani pogon ili zamijeniti postojeći neregulirani reguliranim ?

  - Zbog zahtjeva tehnološkog procesa (automatizacija, ...),
  - zbog zaštite mreže, motora i radnih mehanizama,
  - zbog smanjenja potrošnje (ušteda) električne energije.

Regulirani ili neregulirani elektromotorni pogon?

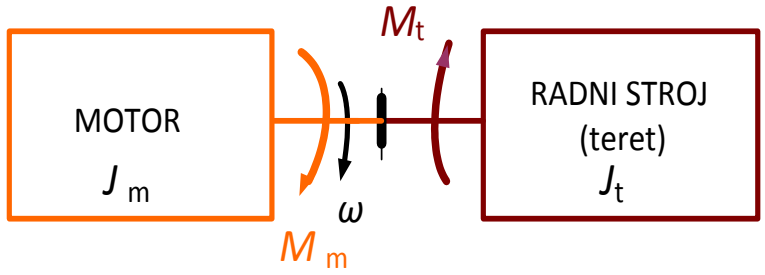
- Zbog ušteda energije u elektromotornim pogonima se u posljednjim godinama intenzivno razvijaju i primjenjuju regulirani elektromotorni pogoni u svim područjima primjene.
- Postojeći neregulirani pogoni se postepeno zamjenjuju reguliranim gdje god je to ekonomski opravdano.
- Elektromotori se projektiraju i grade prema kriterijima najmanjih gubitaka (motori visoke korisnosti).
- Procjenjuje se da je (10 - 12)% reguliranih elektromotornih pogona u cijelom svijetu.
- U odnosu na druge pogonske sustave npr. motore s unutrašnjim izgaranjem, plinske ili parne turbine, elektromotor je u velikoj prednosti jer mu je korisnost pretvorbe mnogo veća; asinkroni motor snage 4 MW ima korisnost oko 97% a plinska turbina iste snage oko 30%.

Osnovne fizikalne veličine i izrazi važni za elektromotorne pogone

Translacijsko gibanje			Rotacijsko gibanje		
Udaljenost	s	m	**Kutni pomak**	α	rad
Brzina	$v = \frac{ds}{dt}$	m/s	**Kutna brzina**	$\omega = \frac{d\alpha}{dt}$	rad/s
Ubrzanje	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$	m/s^2	**Kutno ubrzanje**	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2}$	rad/s^2
Masa	m	kg	**Moment tromosti**	J	kgm^2
Sila	$F = ma = m\frac{dv}{dt}$	N	**Zakretni moment ili moment vrtnje**	$M = J\varepsilon$	Nm
Mehanički rad	$W = \int F\,ds$	Nm	**Mehanički rad**	$W = \int M\,d\alpha$	Nm
Kinetička energija	$W_k = \frac{1}{2}mv^2$	Ws	**Kinetička energija**	$W_k = \frac{1}{2}J\omega^2$	Ws
Snaga	$P = \frac{dW}{dt} = Fv$	W	**Snaga**	$P = \frac{dW}{dt} = M\omega$	W

Model mehaničkog dijela pogona

- Motor razvija na osovini moment M_m.
- Radni stroj se opire momentom tereta M_t kojemu se pribraja i ukupni moment trenja.



- Vrtnja sustava prema slici se opisuje jednadžbom gibanja (II. Newtonov zakon):

$$\pm M_m \pm M_t = J\frac{d\omega}{dt} = M_{din}$$

$J = J_m + J_t$ ukupni moment tromosti (inercije)

$J\frac{d\omega}{dt} = M_{din}$ moment ubrzanja ili dinamički moment

M_m – moment motora, razvijen na osovini (engl. *torque*, oznaka T)

M_t – moment tereta uključujući trenja

M_{din} – moment ubrzanja (usporenja), tzv. dinamički moment

ω – kutna brzina vrtnje (1/s)

n – brzina vrtnje ili frekvencija vrtnje (1/min) ili (1/s)

- Predznak i veličina dinamičkog momenta određuju ubrzavanje (usporavanje) pogona.
- Režim pogona u kojem je: $\pm M_m \pm M_t = 0$

  tj. kada su moment motora i moment tereta jednakog iznosa i protivnog smjera ($M_{din} = 0$), je statičko ili ustaljeno stanje:

$$J\frac{d\omega}{dt} = 0 \Rightarrow \omega \text{ konst.}$$

- Ako je: $\pm M_m \pm M_t \neq 0$

$$J\frac{d\omega}{dt} \neq 0 \Rightarrow \omega \text{ promjenjiv}$$

postoji dinamički moment, pa se sustavu pogona mijenja brzina, on se ubrzava ili usporava (koči).

$J = \int_V r^2 dm$ polarni moment tromosti krutog tijela u rotaciji

r – radijus inercije

dm – diferencijal mase u rotaciji

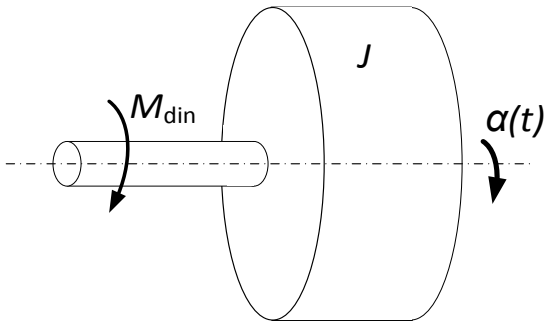
- Često se u literaturi J zamjenjuje s mD^2
- D – fiktivni (nadomjesni) promjer inercije
- mD^2 – "zamašni moment ili zamašna masa"

- Veza između momenta tromosti i zamašne mase krutog tijela u rotaciji je:

$$J = \int r^2 dm = m\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}mD^2$$

m – rotirajuća masa

D – fiktivni (nadomjesni) promjer tromosti

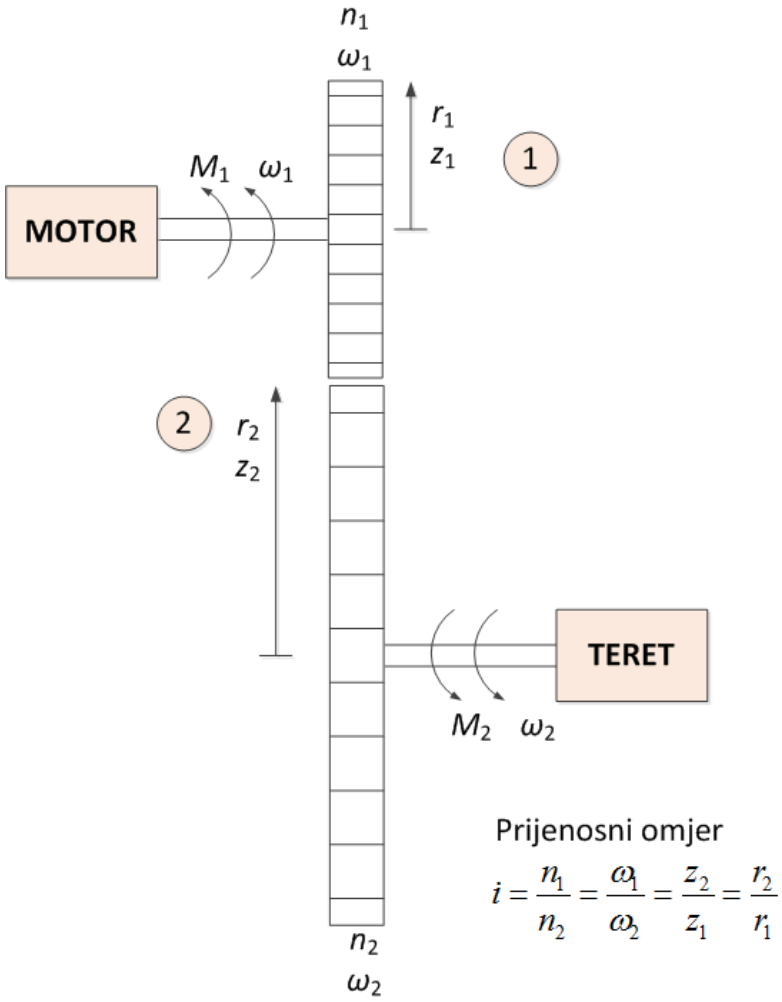


$$M_{din} = J\frac{d\omega}{dt} = J\frac{\partial^2\alpha}{\partial t^2}$$

α – kut zakreta krutog tijela oko fiksne osi

MEHANIČKI PRIJENOS – reduciranje mehaničkih veličina

- Zupčanici:



Prijenosni omjer

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

- Reduciranje brzine vrtnje tereta na osovinu motora:

$$n_1 = n_2\, i$$

- Reduciranje momenta tereta na osovinu motora (jednakost snaga):

$$P_1 = P_2$$

$$M_1\omega_1 = M_2\omega_2$$

$$M_1 = M_2\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{M_2}{i} = M_2\frac{r_1}{r_2} = M_2\frac{z_1}{z_2}$$

  - M_1 – moment tereta kojeg "vidi" motor

- Reduciranje momenta inercije (održanje kinetičke energije) :

$$E_{k1} = E_{k2}$$

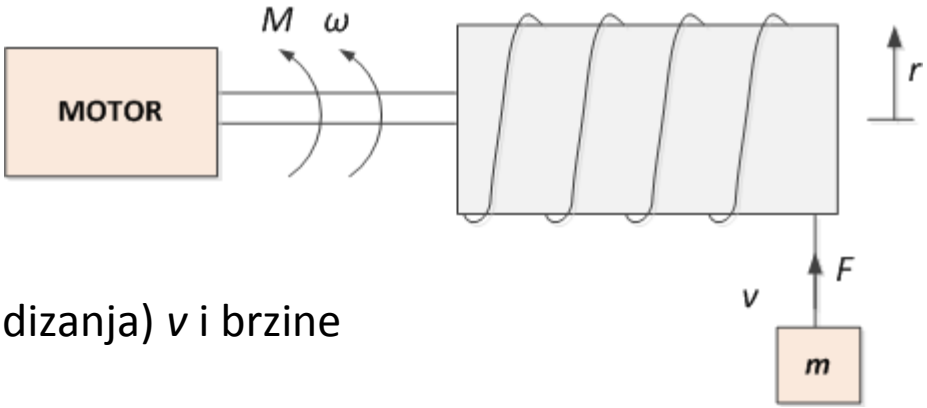
$$\frac{1}{2}J_1\omega_1^2 = \frac{1}{2}J_2\omega_2^2$$

$$J_1 = J_2\frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} = \frac{J_2}{i^2}$$

  - J_1 – moment inercije tereta kojeg "vidi" motor

MEHANIČKI PRIJENOS – reduciranje mehaničkih veličina

- Linijsko gibanje mase *m*:



  - veza brzine gibanja (dizanja) *v* i brzine vrtnje ω: $v = \omega \cdot r$

  - Ekvivalentni moment tromosti na strani motora

iz održanja snage:

$$P_1 = P_2$$

$$M \cdot \omega = F \cdot v$$

$$M = F \frac{v}{\omega}$$

$$M = F \cdot r$$

iz održanja energije:

$$E_1 = E$$

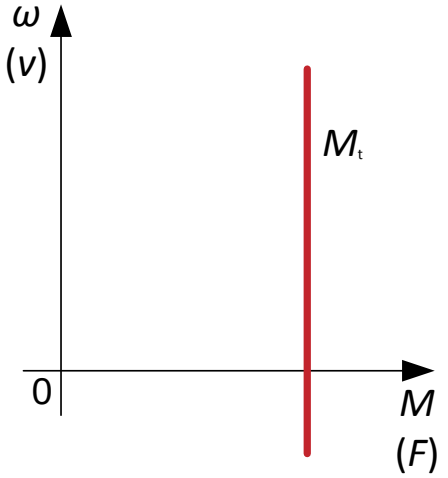
$$\frac{1}{2} J \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$J = m \cdot \frac{v^2}{\omega^2}$$

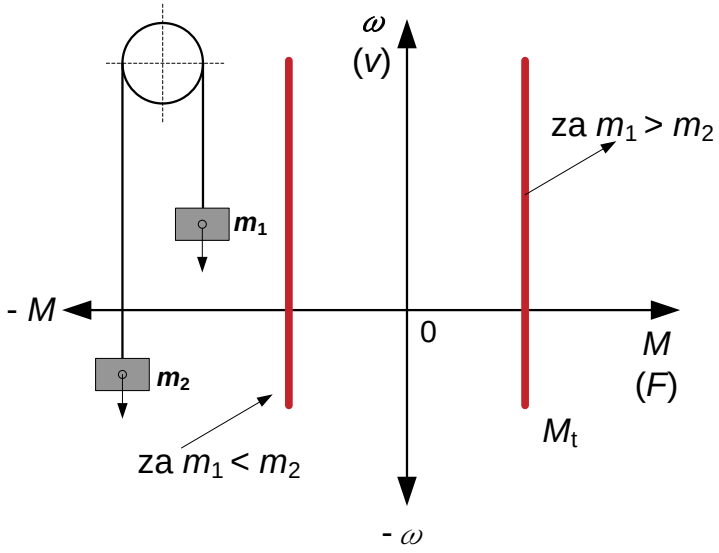
$$J = m \cdot r^2$$

Tipična statička opterećenja

- Prema karakteru djelovanja s elektromotornim pogonom sve sile i momente dijelimo na:
  - aktivne i
  - reaktivne.

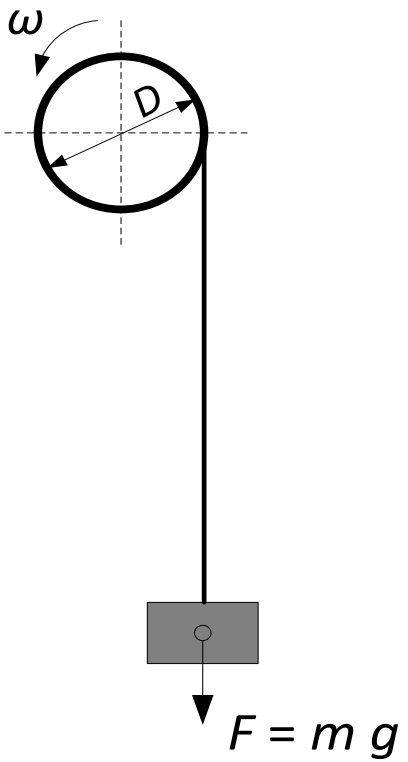


- Aktivne sile i momente stvaraju vanjski utjecaji neovisno o stanju elektromotornog pogona i smjeru gibanja pogona (elektromotora). To su npr.:
  - potencijalna energija,
  - energija vjetra,
  - sila teže (gravitacijska sila).



Aktivni momenti i sile

- Primjer aktivne sile i momenta, princip dizanja tereta:
  moment opterećenja M_t djeluje neovisno o smjeru i iznosu kutne brzine ω



$$M_t = \frac{D}{2} F = \frac{D}{2} m g$$

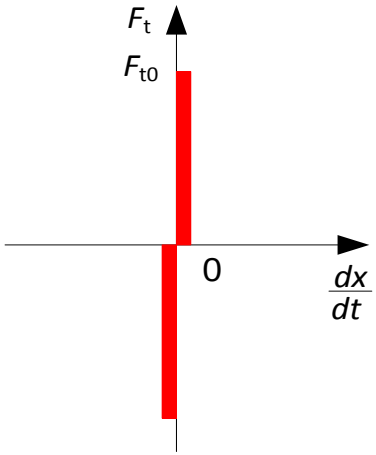
ω – brzina dizanja tereta
m – masa tereta
g – ubrzanje sile teže (gravitacija)
D – promjer bubnja (užnice)

Reaktivni momenti i sile

- Pojavljuju se uvijek kao reakcija na gibanje ili tendenciju gibanja.
- Takve sile i momenti su složeno ovisni o brzini, kvaliteti dodirnih površina, pritisku, temperaturi, ...
- Opisuju se kao sile i momenti trenja.

- Pojednostavljeni matematički i grafički prikazi su:

a) statičko trenje



$$F_t = \pm F_{t0}$$

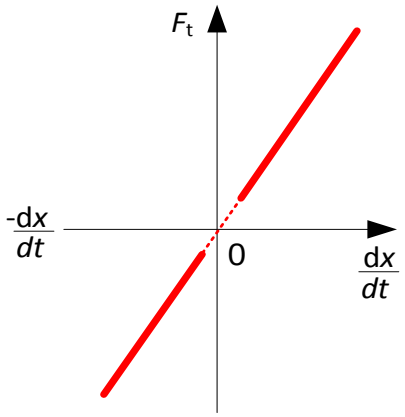
Pojavljuje se samo dok se tijelo (element) ne pokrene, tendecija gibanja

oko brzine $v = \frac{dx}{dt} \approx 0.$

Nakon što se element pokrenuo $F_t = 0$

Reaktivni momenti i sile

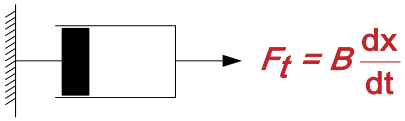
b) viskozno trenje



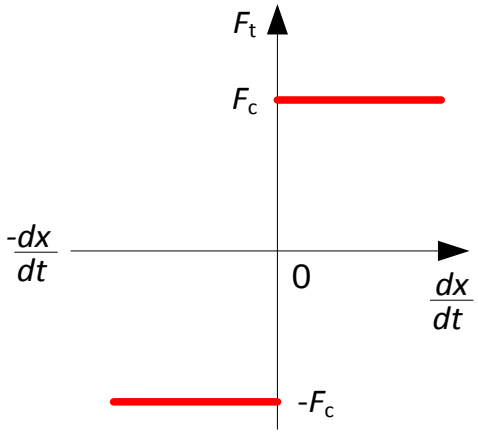
$$F_t = B\frac{dx}{dt}$$

B – nagib pravca, koeficijent trenja

Prikaz u modelima:



c) Kulonovo ili suho trenje



$$F_t = F_c\frac{\frac{dx}{dt}}{\left|\frac{dx}{dt}\right|} = F_c\,\mathrm{sign}\left(\frac{dx}{dt}\right)$$

Kulonovo trenje, nezavisno o brzini, smjer suprotan smjeru gibanja

Komponente momenta opterećenja

- Momenti trenja M_{tr} (M_{ts}, M_{tv}, M_{tc}) – postoje u različitim dijelovima radnog mehanizma i motora.
- Moment za vršenje korisnog mehaničkog rada – različite vrste radnih mehanizama imaju različite mehaničke karakteristike $M_t = f(\omega)$.

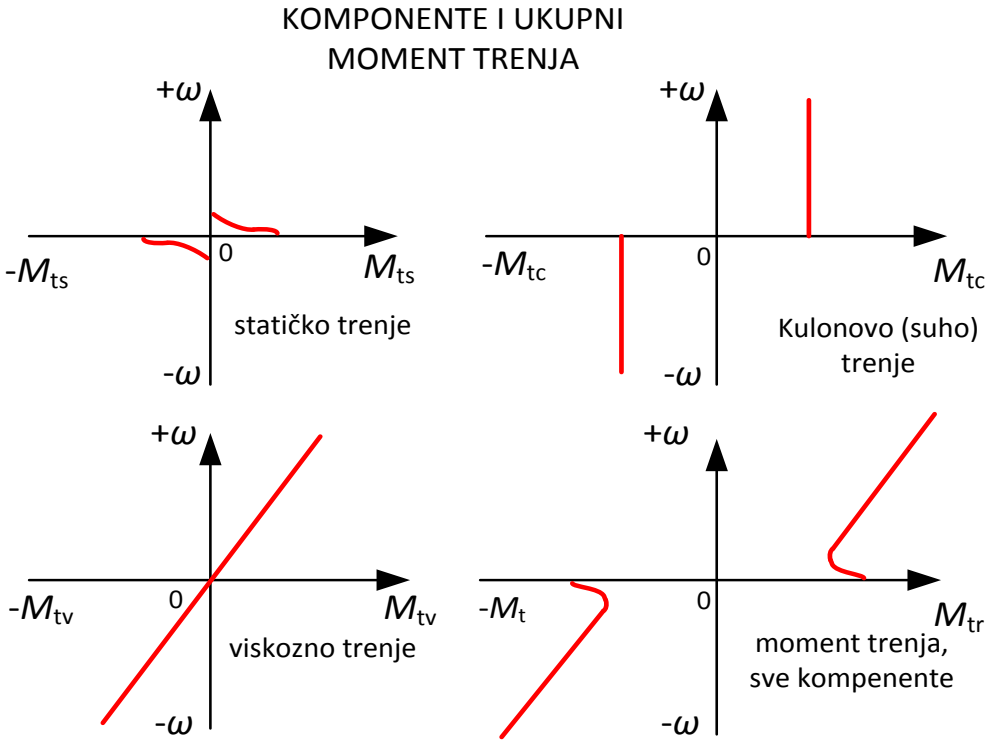
$$M_{trv} = k_v \omega$$

- k_v – koeficijent viskoznog trenja
- ω – mehanička kutna brzina

$$M_{trc} = \text{konst.}$$

- M_{trc} – Kulonovo trenje

- M_t – moment tereta



Komponente momenta opterećenja

- Ukupni moment opterećenja na osovini motora pri nekoj konačnoj brzini :

$$M_{opt} = M_{tr} + M_t$$

- Ako se zanemari utjecaj momenata trenja, računamo da je moment tereta jednak momentu opterećenja radnim mehanizmom:

$$M_{opt} = M_t$$

- Da li ćemo uzeti u obzir momente trenja, ovisi o konkretnim mehanizmima i načinu pokretanja pogona.

Statičke momentne karakteristike tipičnih opterećenja

- Naziv:

  mehanička karakteristika:

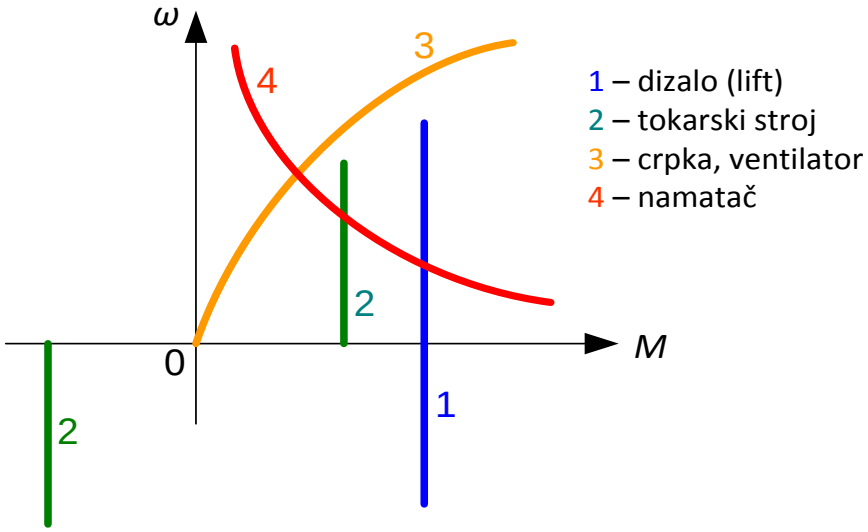
  $M = f(\omega)$ ili $M = f(n)$

  $\omega = f(M)$ ili $n = f(M)$

  elektromehanička karakteristika:

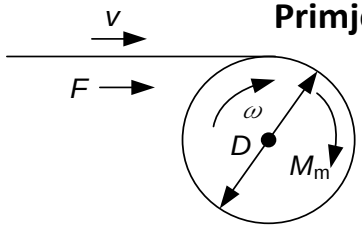
  $I = f(\omega)$ ili $I = f(n)$

  $\omega = f(I)$ ili $n = f(I)$



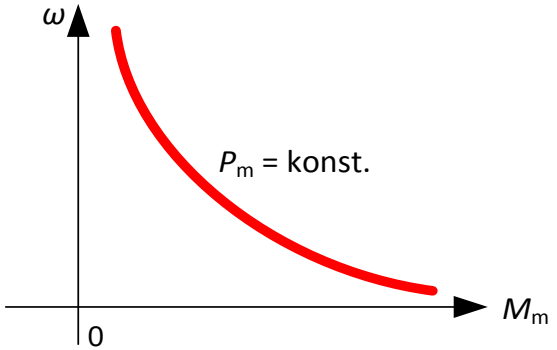
struja *I* je električka veličina, *M*, *ω* i *n* su mehaničke veličine

Primjer ω = f(M) - namatač

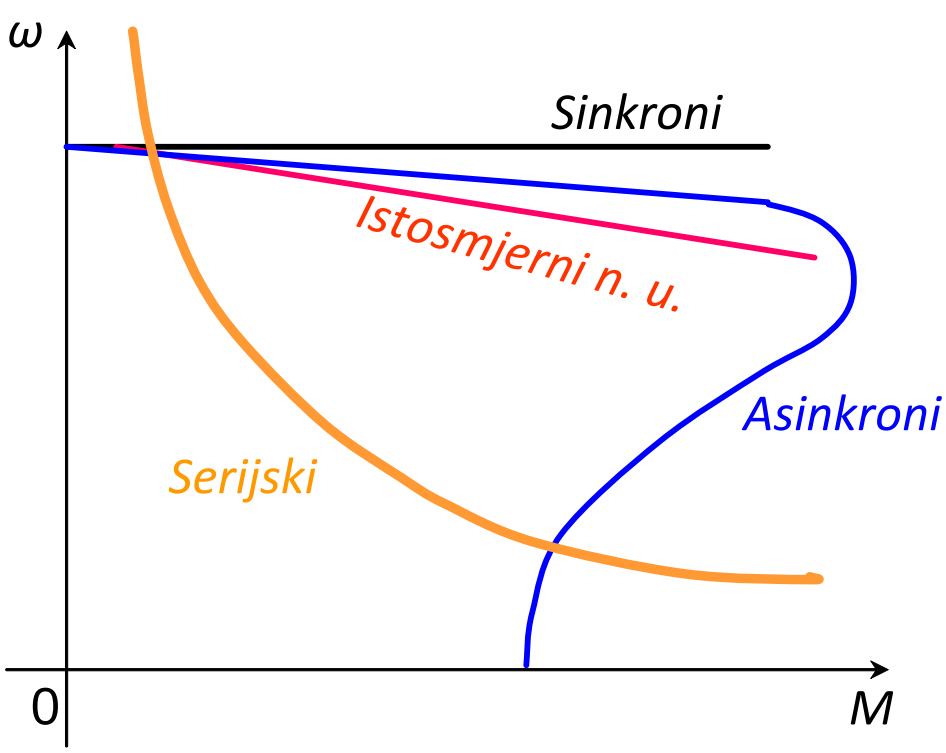


Ako je brzina namatanja (trake) *v* = konst. i sila zatezanja *F* = konst., snaga motora za namatanje će biti:

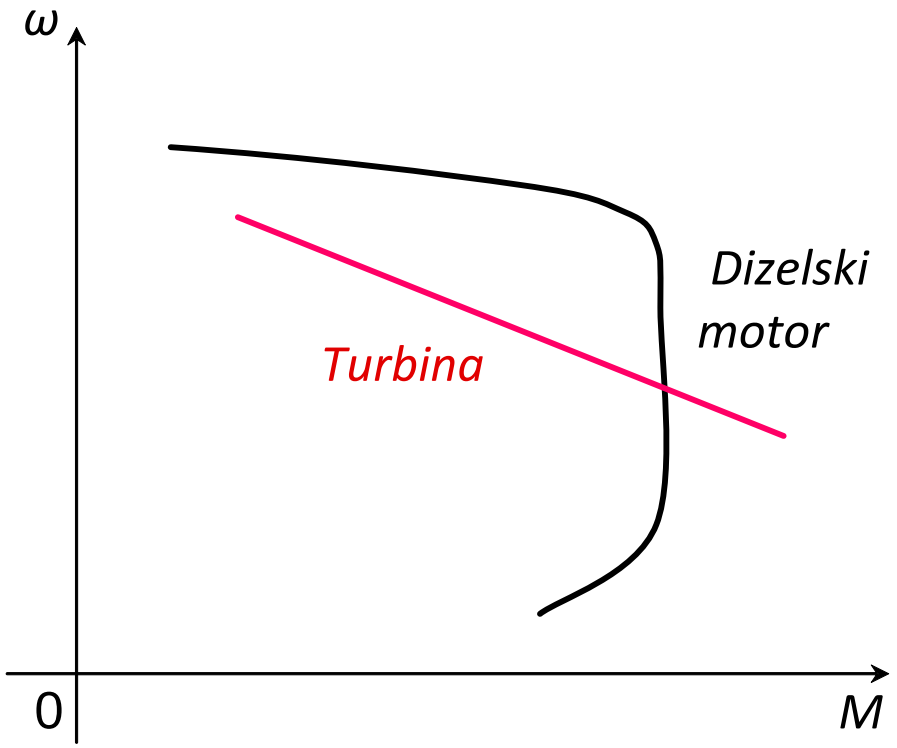
$$P_m = v\,F = M_m\,\omega = \text{konst.}$$



Statičke mehaničke karakteristike pogonskih motora



Elektromotori



Ostali pogonski motori

Četiri kvadranta za prikaz režima rada elektromotornog pogona

- Motorski rad – moment (sila) el.stroja djeluje u smjeru vrtnje (gibanja)
- Generatorski rad – moment (sila) el.stroja djeluje suprotno smjeru vrtnje

I. kvadrant – motorski rad

pozitivni moment el.stroja i pozitivna brzina vrtnje

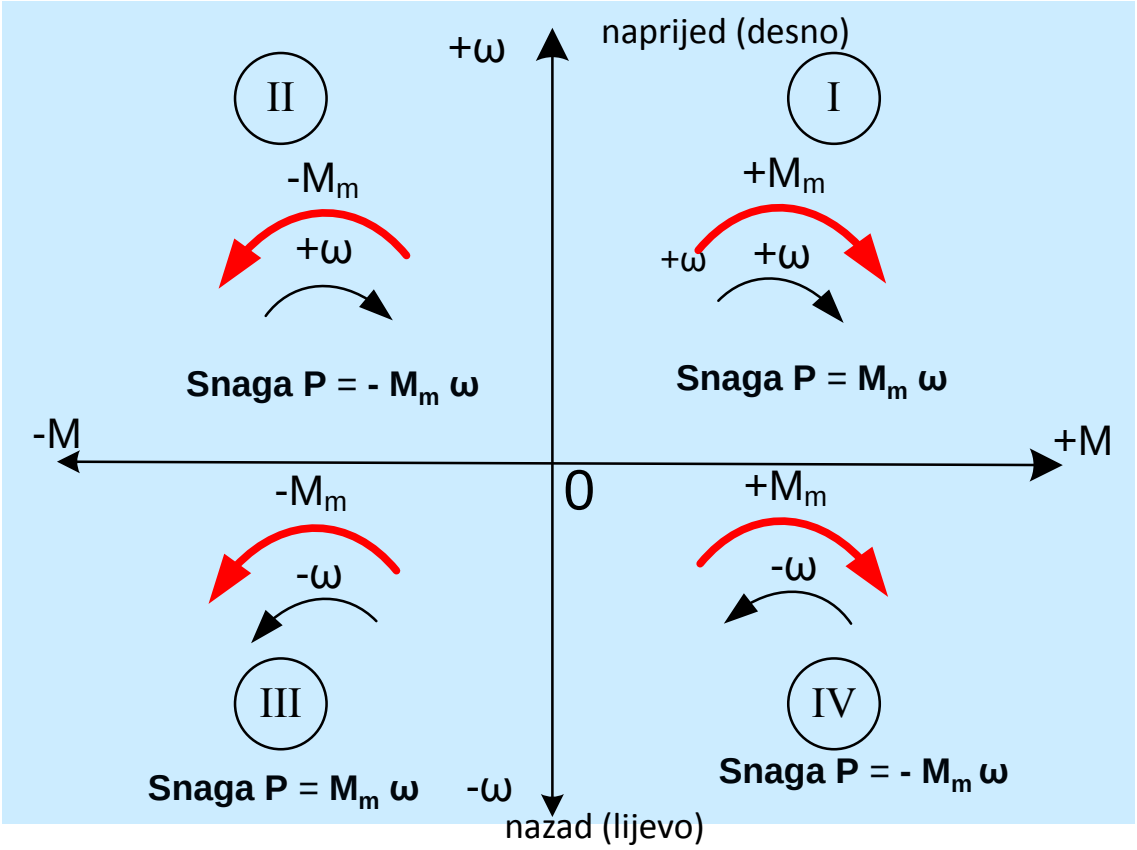
II. kvadrant – generatorski rad

smjer brzine i momenta el.stroja suprotni – kočenje

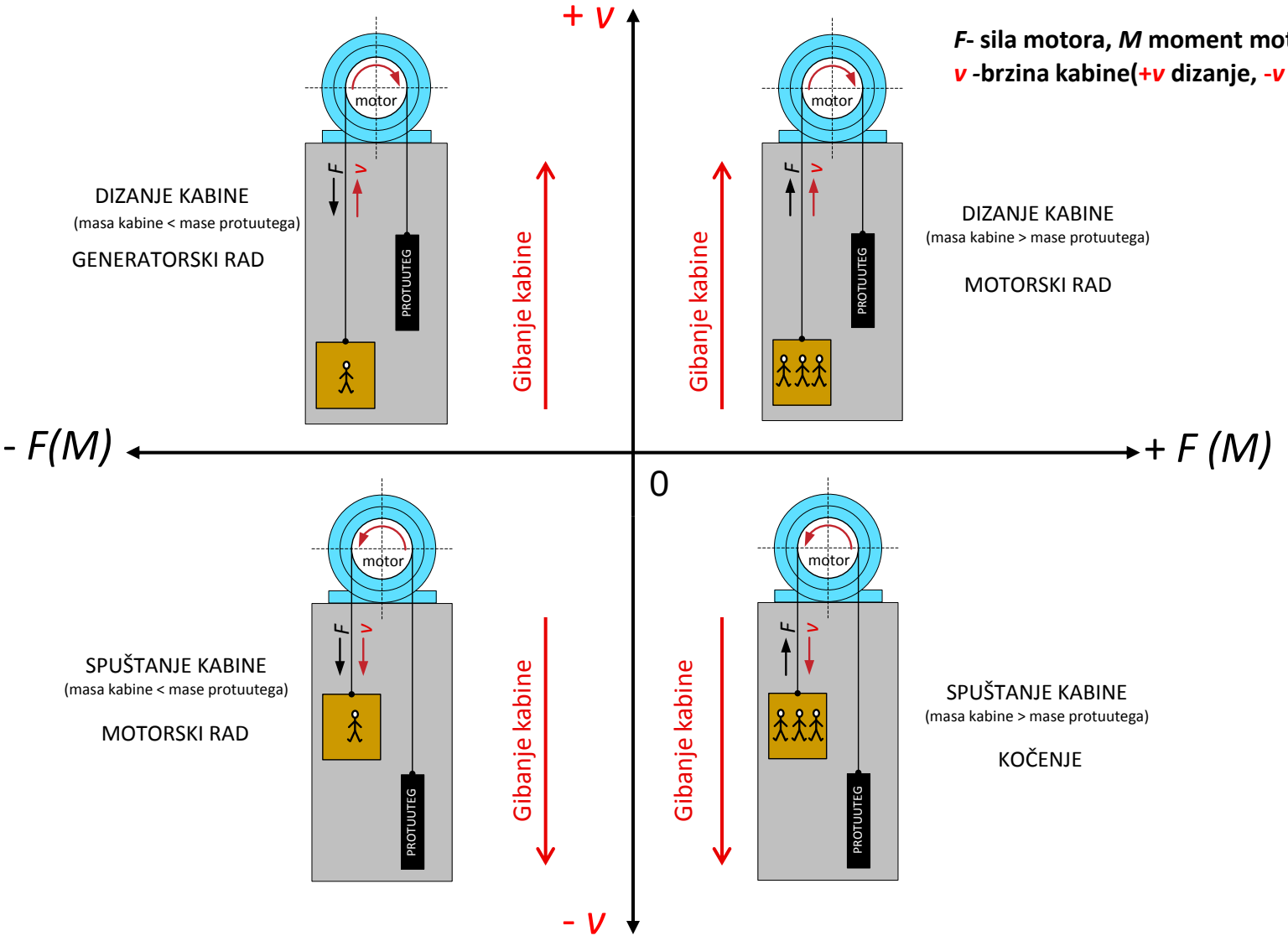
III. kvadrant – motorski rad

IV. kvadrant – generatorski

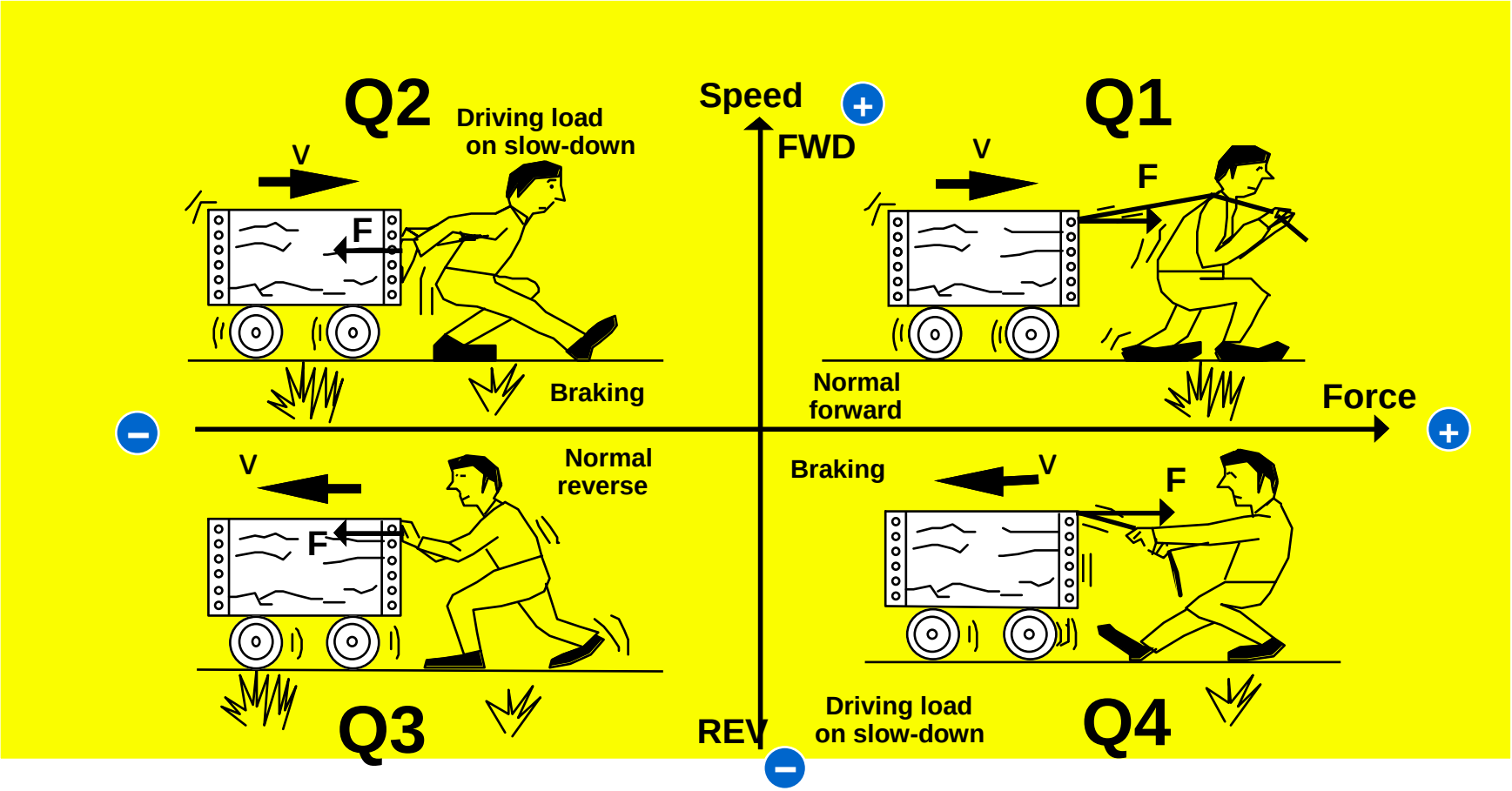
kočni režim rada



Režimi rada elektromotornog pogona dizala

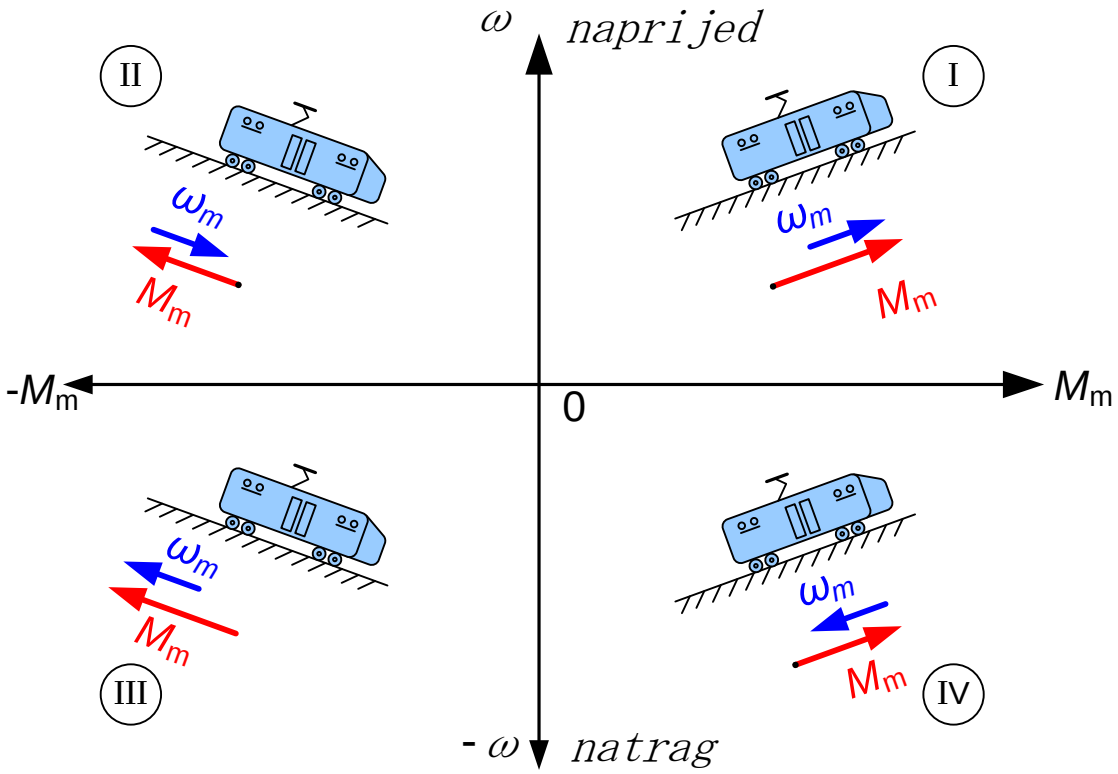


Ilustracija odnosa sila i brzina u 4 kvadranta



Prikaz momenata i brzina u 4 kvadranta – ilustracija na primjeru električnog vozila koje se giba na kosini

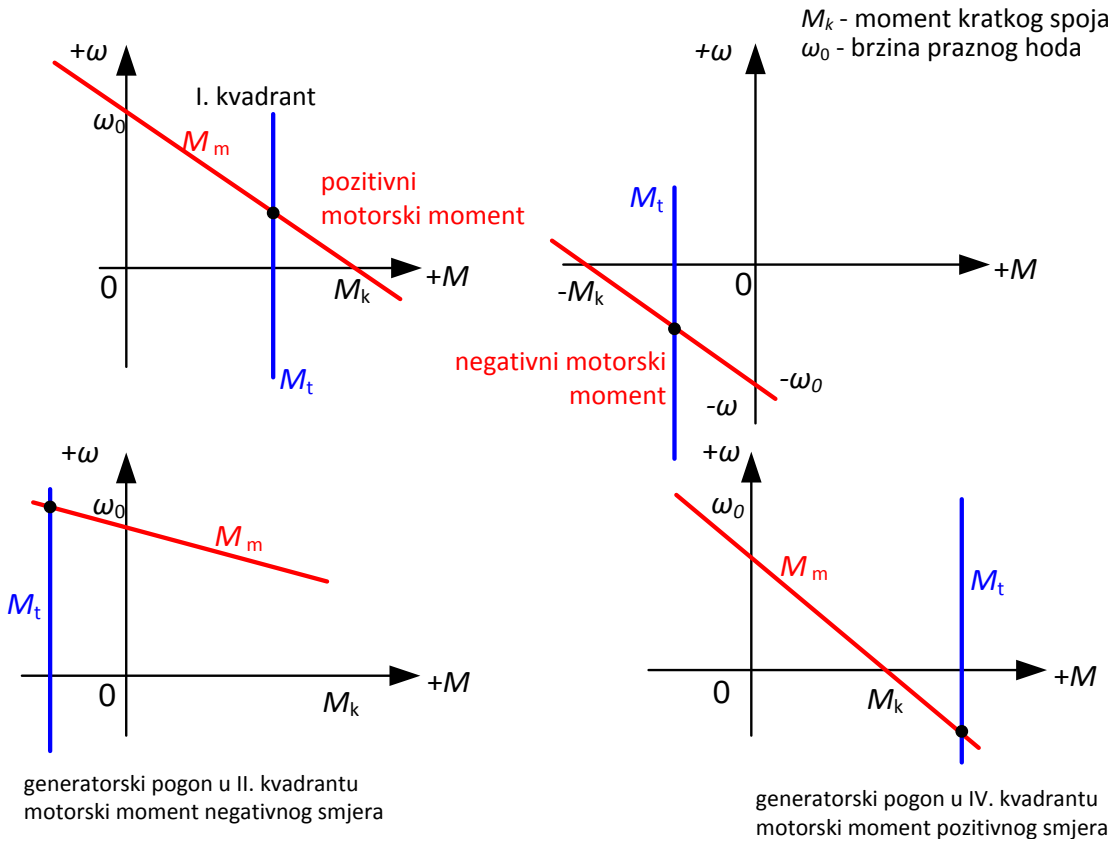
M_m moment motora
ω_m je kutna brzina



I. kvadrant – isti smjer momenta i brzine – MOTORSKI RAD, naprijed
II. Kvadrant – suprotni smjer momenta i brzine – GENERATORSKI RAD (rekuperacija energije) naprijed
III. Kvadrant – isti smjer momenta i brzine – MOTORSKI RAD, natrag
IV. kvadrant – suprotni smjer momenta i brzine –KOČENJE natrag

Konvencija o predznacima momenta i brzine

- Ako pozitivna brzina znači dizanje, negativna brzina znači spuštanje.
- Pozitivni moment motora znači onaj koji okreće mehanizam u smjeru pozitivne brzine.
- Pozitivni moment tereta je onaj koji se opire vrtnji izazvanoj pozitivnim motorskim momentom.
- Reaktivni moment tereta se uvijek protivi gibanju pa se on može pojaviti samo u I. i III. kvadrantu gdje je i moment motora pozitivan.



generatorski pogon u II. kvadrantu
motorski moment negativnog smjera

generatorski pogon u IV. kvadrantu
motorski moment pozitivnog smjera

Osnovni kriteriji za izbor motora za određenu primjenu

1. Snaga i svojstva koja traži teret u stacionarnom i dinamičkom radu

   Npr.:

   - veliki potezni moment
   - konstantna brzina vrtnje

2. Faktori okoline (određuju vrstu motora)

   Npr.:

   - zahtjevi za čisti pogon (prehrambena i farmaceutska industrija)
   - eksplozivna okolina

3. Pretvarač

   - Npr. ako se prvo napon ispravlja pa ponovno oblikuje u izmjenični, o kvaliteti te pretvorbe ovise stabilnost, korisnost i svojstva motora s takvim pretvaračem.

4. Cijena

   - Obično su asinkroni motori najjeftiniji (ali je eventualno potreban pretvarač)

Elektromotorni pogoni u primjeni

Na slajdovima u nastavku su fotografije iz nekoliko tipičnih primjena elektromotornih pogona s asinkronim motorima u energetskim postrojenjima (termoelektrana, termoelektrana–toplana) i u procesnim postrojenjima (rafinerije plina i nafte, transport nafte).

Primjena elektromotornih pogona

Strojarnica u TE-TO Osijek,
Elektromotorni pogoninapojne i cirkulacijske pumpe 6000 V

Elektromotorni pogoni u primjeni

Elektromotorni pogon cirkulacijske pumpe, TE-TO Osijek,
asinkroni motor 6000 V, 2p=2

Elektromotorni pogoni u primjeni

Elektromotorni pogon napojne pumpe kotla,
6 kV, 800 kW, 2970 1/min

Elektromotorni pogon napojne kotlovske pumpe u TE-TO Osijek, 800 kW, 2970 1/min

Regulirani pogonu procesnom postrojenju Molve

Frekvencijski regulirani elektromotorni pogon
u eksplozijski ugroženom prostoru, Ex de II AT3

Protueksplozijski zaštićeni motori naftovodnih pumpi u terminalu Omišalj, 6000 V, 50Hz

Terminal Omišalj

Kavezni motori naftovodnih pumpi, terminal Omišalj, 3500 kW, 6000 V, 1485 1/min

Terminal Omišalj

Naftovodni terminal Sisak,
Asinkroni motori 6000 V, 1900 kW, 2960 1/min

Motori u protueksplozijskoj zaštiti nadtlak, E Ex p
CPS Molve

- NA NEKOLIKO SLIJEDEĆIH SLAJDOVA SU OSNOVE ELEKTROMEHANIČKE PRETVORBE ENERGIJE U GENERATORU I MOTORU*

*Detaljno o osnovama elektromehaničke pretvorbe energije možete pročitati u knjizi Prof. Wolfa: Osnove električnih strojeva, Školska knjiga Zagreb,1991.

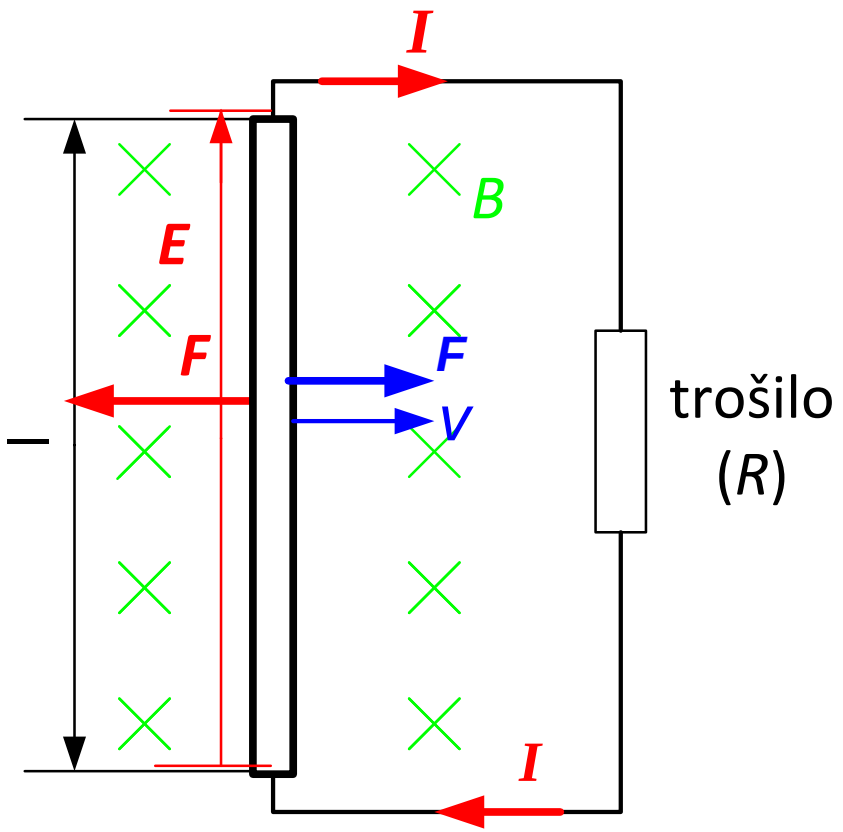
Princip pretvorbe energije u električnom generatoru

- Električnu i mehaničku snagu dobit ćemo samo onda kada se vodič giba u magnetskom polju, a kroz vodič teče struja.

- Vodič duljine l vanjskom silom ***F*** gibamo brzinom ***v*** u magnetskom polju indukcije B prema slici. Smjer brzine v je okomit na smjer indukcije B.
- U vodiču se inducira napon

  $$E = B\,l\,v$$
- Taj napon kroz trošilo potjera struju I koja prolazi vodičem u smjeru prema slici
- Na vodič djeluje elektromagnetska sila ***F***

  $$F = B\,I\,l$$



EMP 09/10, Prof. Ban

Princip pretvorbe energije u električnom generatoru-energetska bilanca

- Bilanca energije vodiča glasi:

$P_{el} = E \cdot I$

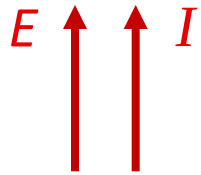
$P_{el}\,dt = E \cdot I\,dt = dW_{el} = B \cdot l \cdot v \cdot I\,dt$

$dW_{meh} = -F \cdot v\,dt$ (dovedena meh. energija vodiču)

$dW_{meh} = -B \cdot I \cdot l \cdot v\,dt$

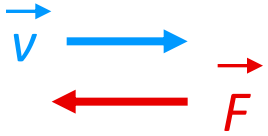
$dW_{meh} + dW_{el} = -B \cdot I \cdot l \cdot v\,dt + B \cdot l \cdot v \cdot I\,dt = 0$

Smjerovi struje i ind. napona su isti:



$P_{el} = E\,I$

Smjer elektromagnetske sile na vodič i smjer brzine vodiča suprotni:



$P_{meh} = -F\,v$ (dovedena meh. snaga)

- U generatorskom pogonu je smjer elektromagnetske sile na vodič uvijek suprotan smjeru gibanja vodiča, mehanička snaga se dovodi, predznak minus!

Princip pretvorbe energije u električnom motoru

Vodičem koji se nalazi u magnetskom polju indukcije B teče struja I, na njega djeluje elektromagnetska sila F. Ako se vodič giba inducira se napon E.

Dovedena električna energija vodiču je:

$$dW_{el} = - E \cdot I \, dt$$

Smjerovi struje i induciranog napona su protivni.

Izvršen mehanički rad vodiča:

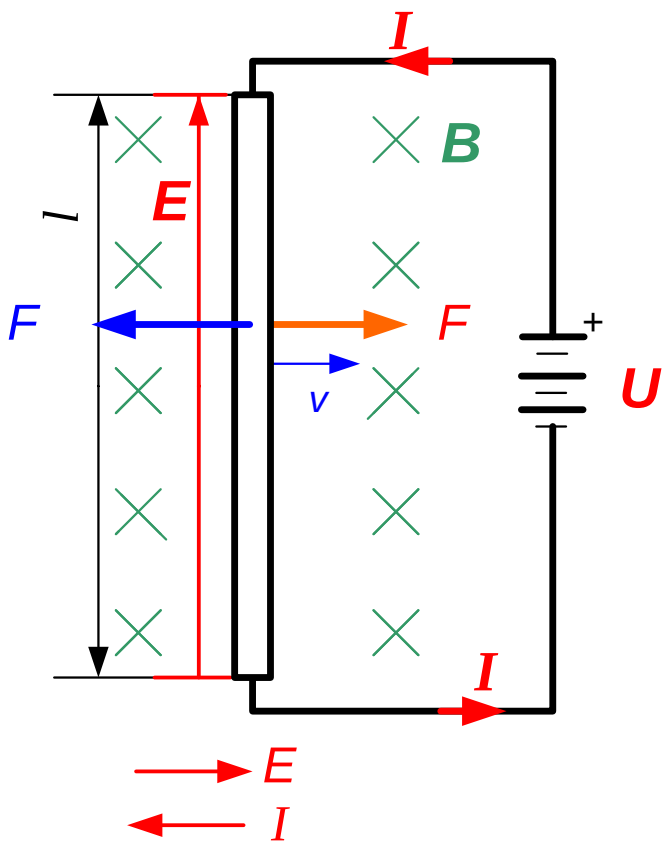
$$dW_{meh} = F \cdot v \, dt$$

Smjer sile i smjer gibanja(brzine) vodiča su isti.

$$dW_{meh} = B \cdot I \cdot l \cdot v \, dt$$

$$dW_{el} = - B \cdot l \cdot v \cdot I \, dt$$

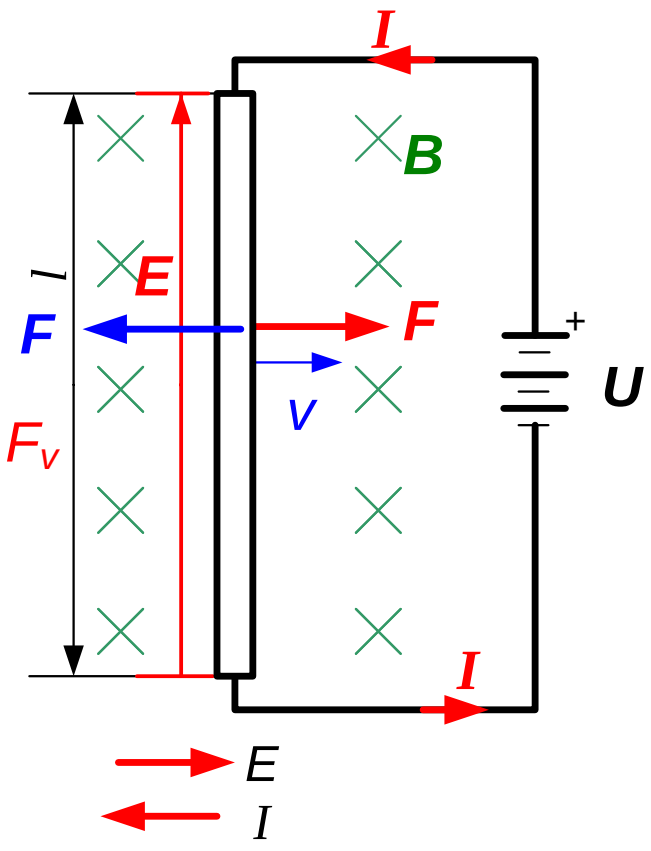
$$dW_{meh} + dW_{el} = 0$$



- Bilanca energije vodiča je zadovoljena.

Princip pretvorbe energije u električnom motoru

- Struja u krugu prema slici je:

$$I = \frac{U - E}{R}$$

- U – vanjski narinuti napon
- R – ukupni otpor strujnog kruga
- Dok je narinuti napon $U > E$, struja ima smjer označen na slici, motorski rad.
- Kada je $U = E$, struja je jednaka nuli, nema pretvorbe.
- Kada je $U < E$, struja mijenja predznak, generatorski princip.
- U motorskom pogonu je uvijek smjer elektromagnetske sile ***F (momenta M)*** na vodič jednak smjeru gibanja vodiča, snaga je pozitivna!