

# Upravljanje elektromotornim pogonima 2008/2009

## UEMP

Nastavnici: Prof.dr.sc. Fetah Kolonić; fetah.kolonic@fer.hr  
Prof.dr.sc. Nedjeljko Perić; nedjeljko.peric@fer.hr

Zavod za elektrostrojarstvo i automatizaciju

Zavod za automatiku i računalno inženjerstvo

Fakultet elektrotehnike i računarstva

Predavanje 01 - Uvodno predavanje

## Podatci o kolegiju

- Sve obavijesti o predmetu na URL predmeta:

<http://www.fer.hr/predmet/uep>

- ECTS bodova: 5.0
- Predavanja 3 školska sata tjedno tijekom 13 tjedana

## Predavači

| Predavači                   | Ured, telefon, e-mail                             | Konzultacije          |
|-----------------------------|---|-----------------------|
| Prof.dr.sc. Fetah Kolonić   | C04-04, ZESA, 612 98 24<br>fetah.kolonic@fer.hr   | poslije<br>predavanja |
| Prof.dr.sc. Nedjeljko Perić | C09-07, ZARI, 612 98 55<br>nedjeljko.peric@fer.hr | poslije<br>predavanja |

## Asistenti i tajnice

| Asistenti                 | Ured, e-mail                          | Konzultacije     |
|---------------------------|---------------------------------------|------------------|
| mr.sc. Alen Poljugan      | C04-13, ZESA<br>alen.poljugan@fer.hr  | Utorkom<br>13-14 |
| Sven Zelić, dipl.ing.     | C04-10, ZESA<br>sven.zelic@fer.hr     | Utorkom<br>13-14 |
| Vlaho Petrović, dipl.ing. | C09-05, ZARI<br>vlaho.petrovic@fer.hr | Utorkom<br>13-14 |

| Administrativne tajnice | Ured, telefon, e-mail                     | Konzultacije         |
|-------------------------|---|----------------------|
| Gđa. Spomenka Perkušić  | C04-07A, ZESA<br>spomenka.perkusic@fer.hr | Po,Sr,Pe<br>10-10:15 |
| Gđa Blanka Gott         | C09-05, ZARI<br>blanka.gott@fer.hr        | Po,Sr,Pe<br>10-10:15 |

## Polaganje kolegija

|                                 | maksimalni broj bodova |
|---------------------------------|------------------------|
| Aktivno sudjelovanje u nastavi* | 8                      |
| 1. međuispit                    | 25                     |
| 2. međuispit                    | 25                     |
| Završni ispit                   | 42                     |

Za prolaz na ispitu potrebno je postići najmanje 50 bodova, od kojih minimalno 45 mora biti postignuto na međuispitima i završnom ispitu

\* Bodovi za aktivno sudjelovanje u nastavi stječu se diskrecijskom odlukom nastavnika (do maksimalno 4 bodova) i dvijema nenajavljenim provjerama znanja (svaka nosi maksimalno 2 boda)

## Međuispiti i završni ispit

- Međuispiti se organiziraju kao pismeni ispit
- Na prvom i na drugom međuispitu se maksimalno može postići po 25 bodova za svaki
- Za studente koji iz medicinski opravdanih razloga nisu mogli pristupiti međuispitu može se organizirati dodatni ispit (odlukom nositelja predmeta), koji će biti u usmenom obliku
- Dokumentacija za zamolbu nadoknade predaje se administrativnoj tajnici u roku od 2 tjedna od izostanka, te se obavijest o tome šalje na adresu [sven.zelic@fer.hr](mailto:sven.zelic@fer.hr)
- Završni ispit se organizira kao pismeni i nosi maksimalno 42 boda

## CILJ: Što bi trebali naučiti u ovom kolegiju – grubi sadržaj tema koje će se obrađivati u kolegiju

- Komponente elektromotornog pogona, naglasak na električne strojeve i pripadne učinske pretvarače (klasični istosmjerni i bezkolektorski strojevi (sa sinusnim i pravokutnim strujama), asinkroni strojevi)
- Uvodno upoznavanje s podsjetnikom na osnovne karakteristike električnih strojeva, karakteristike često korištenih radnih mehanizama, prijenosnika snage i gibanja, transformacija gibanja, reduciranje varijabli i parametara emp-a (zamašne mase, momenti tereta)
- Načini upravljanja emp-a, upravljačke karakteristike (interakcija stroj-pretvarač)
- Najčešće korištene, karakteristične, regulacijske strukture emp-a izvedene sa navedenim tipovima strojeva
- Elektromotorni pogoni s raspodijeljenim masama (višemaseni sustavi, sustavi s elastičnim vezama u mehaničkom podsustavu) emp-i s nelinearnostima tipa zračnosti i trenja
- Estimacija varijabli emp-a, sustavi bez mehaničkog mjernog člana

## SVRHA: Što sa stečenim znanjima na ovom kolegiju

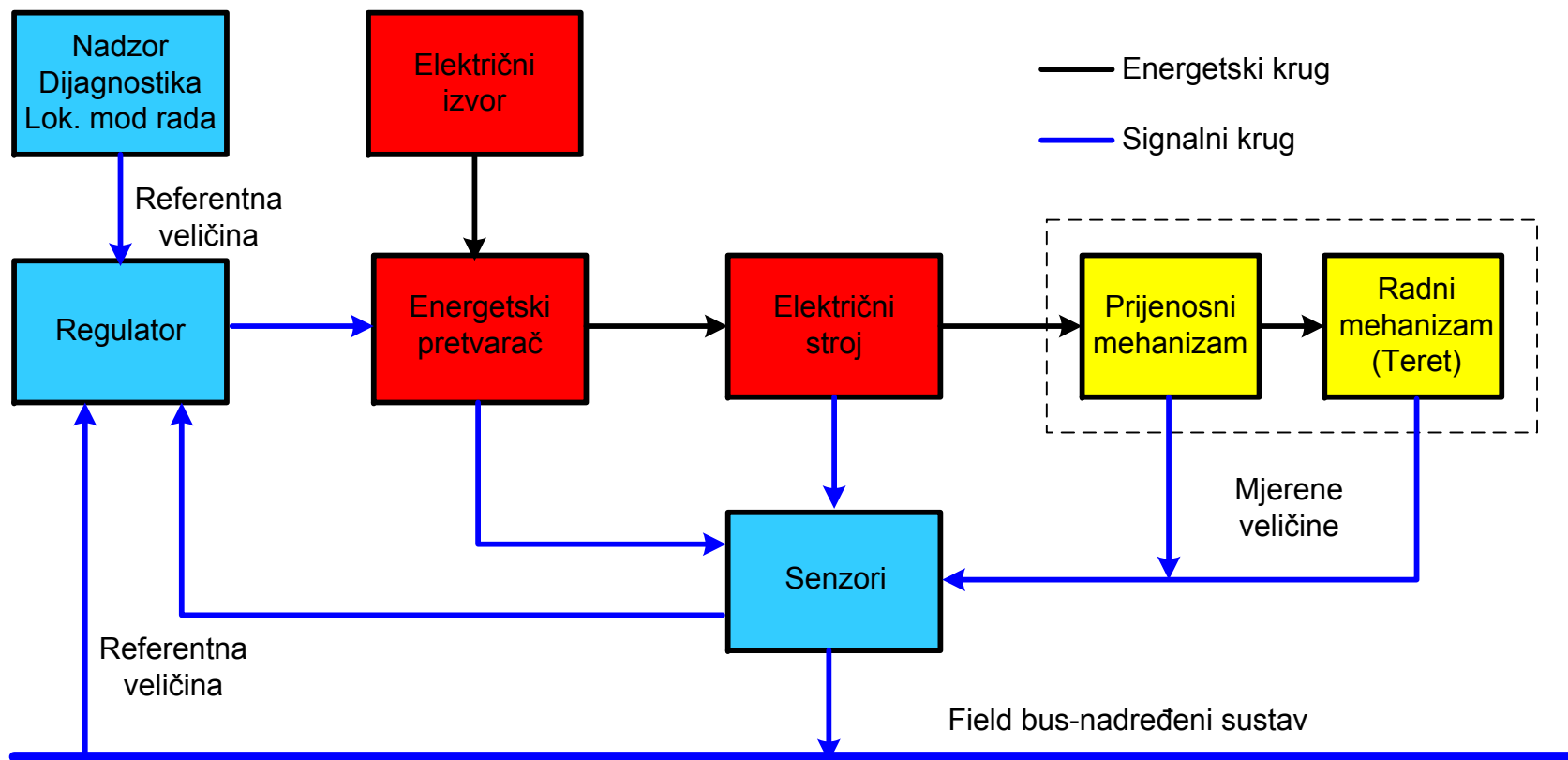
- Važnost poznavanja elektromotornih pogona je očita. Zastupljeni su u maksimalnoj mjeri u industriji (transport ljudi i materijala, proizvodni procesi). Stečena znanja na ovom području znači širok odabir mogućnosti rada nakon završetka studija
- Razvoj emp-a ujedno podstiče i razvoj drugih područja (primjer učinske elektronike, što znači doprinos općem i osobnom dobru.
- Radi se o multidisciplinarnom području, znanja iz drugih područja se ugrađuju u ovo područje, a s druge strane emp-i su nezaobilazni u drugim područjima (robotika, automatizacija,...)



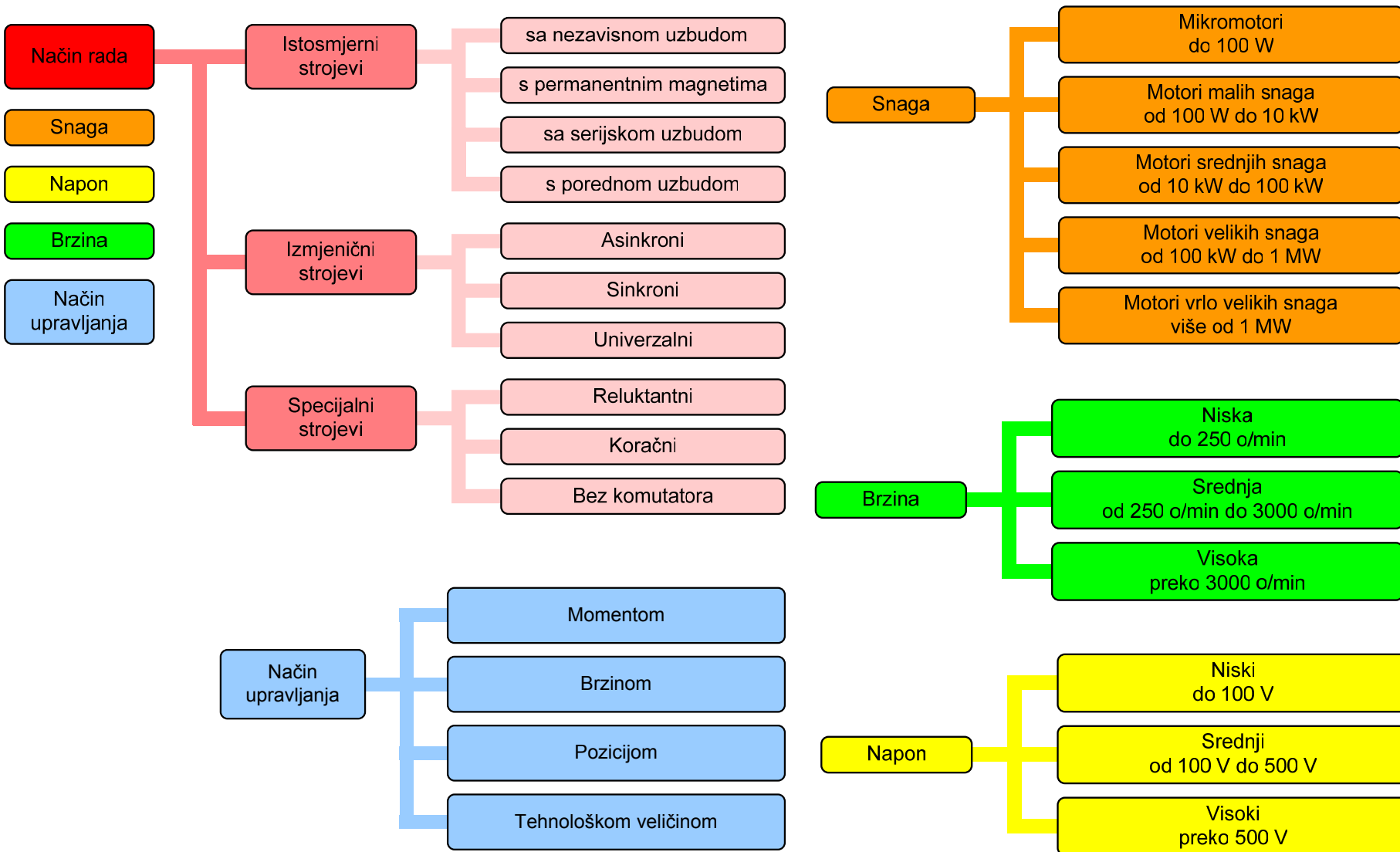
# Što je elektromotorni pogon (EMP)

- Elektromotorni pogon (eng. *Electrical drive*) je elektromehanički sustav namijenjen za uspostavljanje i održavanje gibanja radnih mehanizama i te za upravljanje njihovim mehaničkim gibanjem
- Emp-i su dostupni u širokom rasponu snaga, od  $1\mu\text{W}$  (u elektroničkim satovima) do  $100\text{MW}$  (pumpe u hidroelektranama)
- Pokrivaju područje brzina  $100.000\text{rpm}$  (centrifugalni pogoni, bušilice za vodljive rupe na štampanim pločicama), i momenata,  $10.000\text{ kNm}$  (pogoni za mljevenje)
- Radi praktički u svim radnim uvjetima, ne zagađuje okoliš (jako važno)
- Visok stupanj energetske iskoristivosti
- Jednostavno se upravlja, mogu raditi u sva 4 kvadranta bez potrebe dodatne mehaničke intervencije
- Energija pri kočenju se može u velikom broju slučajeva vratiti u napojnu mrežu.

# UEMP



# UEMP (klasifikacija električnih strojeva)



# **UEMP (multidisciplinarnost)**

Emp je multidisciplinaran sustav. Koja znanja su potrebna za ovo područje:

- Poznavanje električnih strojeva
- Poznavanje senzora i senzorskih pretvornika, mjerna tehnika
- Teorija regulacije, upravljački krugovi, sinteza i analiza
- Učinska elektronika, učinski pretvarači
- Električni krugovi
- Tehnička mehanika
- Modeliranje komponenata sustava
- Tehnologija upravljanog procesa

# UEMP - multidisciplinarnost



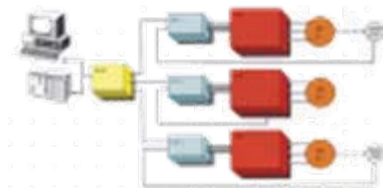
Električni strojevi



Učinski pretvarači



Senzori



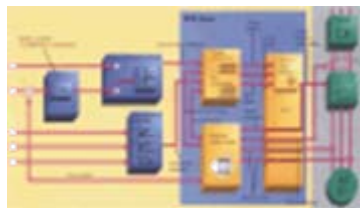
Simulacija



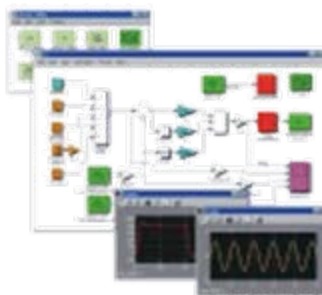
Mjerna tehnika



Električni krugovi



Teorija regulacije  
(reg. algoritmi)



Modeliranje



Tehnološki  
proces

# UEMP

## Osnovne komponente elektromotornog pogona

- **Električno pojačalo** (pretvorba električne energije s jednim parametrima u električnu energiju s drugim parametrima (napon, struja, frekvencija), prilagođava se električnom stroju
- **Električni stroj** (aktuator), obavlja elektromehaničku pretvorbu
- **Prijenosni mehanizam** (mehaničko sučelje između motora i radnog mehanizma )
- **Radni stroj** (obavlja određenu tehnološku zadaću, npr. leteće škare, namatač valjane žice u čeličanama, namatači u papirnoj industriji
- **Regulator**; na osnovi zadanih referentnih veličina (koje se zadaju ili iz nadređenog sustava upravljanja preko komunikacijskog linka ili od strane operatora u lokalnom modu rada) i na osnovi mjerenih veličina (dobivenih ih sustava senzora) upravlja elektromotornim pogonom
- **Senzori**; sustav mjerenja varijabli emp-a, mjerene veličine se procesiraju i šalju u regulator ali i u nadređeni sustav upravljanja preko kom. linka

# UEMP

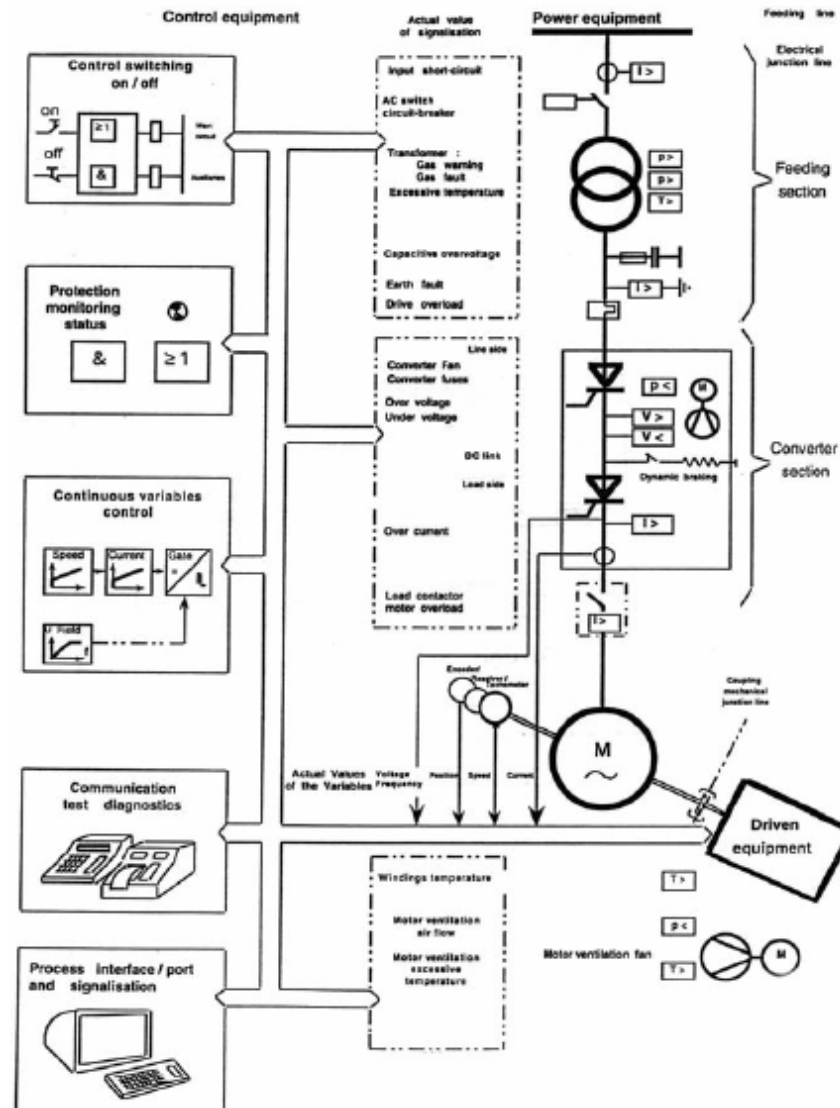
- **Elektromotorni pogon** predstavlja skup elektromehaničkih komponenata namijenjenih za elektromehaničku pretvorbu upravljanu od strane operatera ili pak iz nadređenog sustava složenijeg automatiziranog procesa.
- **Mjerene veličine** nam kao **povratne informacije** ukazuju na stanje tih elektromehaničkih komponenata.
- Prikazana struktura emp-a može biti struktura emp-a najniže hijerarhijske razine u okviru automatiziranog sustava, ali i emp-a na bilo kojoj drugoj razini. U tom slučaju je samo složenija od one na nižoj razini (Napomena: U okviru automatiziranog pogona postoje veze emp-a kako po vertikali tako i po horizontali)
- Emp može raditi u otvorenom i zatvorenom krugu. Mi se ograničavamo na zatvoreni (zahtjevniji) krug a specifične slučajeve rada emp-a u otvorenoj petlji ćemo posebno naglasiti

Koji se zahtjevi postavljaju na EMP neovisno o tipu korištenog električnog stroja?

- Jedan dio analize tih zahtjeva je spomenut u kolegiju *Elektromehanički sustavi* i *Praktikum upravljanja električnim strojeva*. Ponovimo ih:
  - ✓ Elektromehanička pretvorba energije se mora obaviti s **visokim stupnjem iskorištenja energije**. Ovo je posebno važno u današnje vrijeme gdje se traži maksimalna štednja energije u svim područjima gdje se ona koristi
  - ✓ Emp **ne smije svojim radom izazvati prekide na mreži** s koje se napaja niti na bilo koji način smije izazvati prekide u opskrbi drugih potrošača
  - ✓ Mora osigurati **kontinuirano upravljanje mehaničkih veličina** (brzina, moment) u cijelom radnom području
  - ✓ Mora biti **imun na vanjske utjecaje** (smetnje, interferencija) i **kompatibilan s ostalim komponentama** u sklopu automatiziranog sustava upravljanja



# IEC 61800-2 (1988): Upravljivi elektromotorni pogoni (engl. *Adjustable speed electrical power drive systems*)



# Mehanički dio emp-a

## Kinematika rotacijskog i translacijskog gibanja

**II Newtonov zakon.** Opisuje ponašanje tijela kada na njega djeluje vanjska sila  $f$ .

*“Ubrzanje tijela mase  $M$  razmjerno je sili  $f$  i ima smjer djelovanja sile , tj. sila je jednaka promjeni količine gibanja.”*

$$f = \frac{d}{dt}(Mv) = M \frac{dv}{dt} + v \frac{dM}{dt} = Ma + v \frac{dM}{dt} \quad \text{Translacijsko gibanje}$$

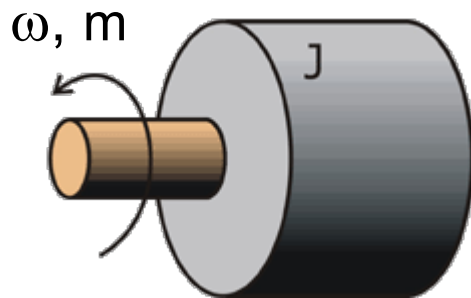
Ekvivalentan izraz vrijedi za rotacijsko gibanje, pri čemu je  $J$  moment tromosti a  $m_u$  je moment ubrzanja

$$m_u = \frac{d}{dt}(J\omega) = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} = J\alpha + \omega \frac{dJ}{dt} \quad \text{Rotacijsko gibanje}$$

# Mehanički dio emp-a

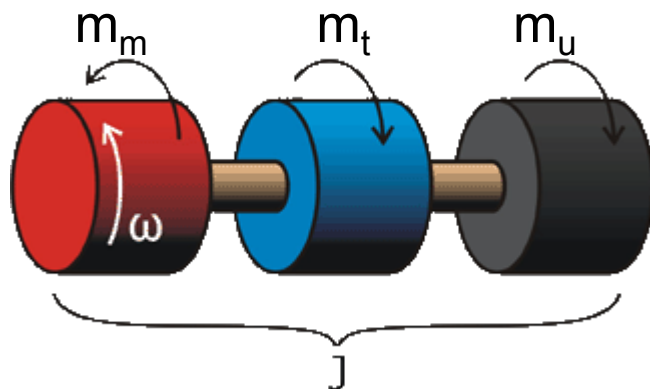
## Kinematika rotacijskog i translacijskog gibanja

- **Rotacijsko gibanje.** Češće korišteni emp-i, radi se gibanju tijela pri čemu se dio mase tijela giba po kružnoj putanji oko osi rotacije. Pri tome se masa tijela u gibanju opire promjeni brzine gibanja (**moment tromosti,  $J$** )



Osnovne varijable emp-a su **brzina vrtnje** i **moment stroja**

Dinamičko stanje emp-a se može opisati dinamičkom ravnotežom momenta



$$m_m - m_t - m_u = 0$$

Moment ubrzanja je simboliziran “virtualnom” masom na slici, a moment tromosti  **$J$**  se odnosi na **koncentriranu** masu motora i tereta u vrtnji ( **$J = J_m + J_t$** )

# Mehanički dio emp-a

## Kinematika rotacijskog i translacijskog gibanja

- Za **rotacijski** emp vrijedi da moment ubrzanja  $m_u$  rezultira promjenu kinetičke energije sustava, pa vrijedi

$$m_u \cdot \omega = \frac{dE_k}{dt} = \frac{d}{dt} J \frac{\omega^2}{2} = J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt}$$

- Izvod je napravljen uzimajući u obzir da se kinetička energija može promijeniti tako da se mijenja **moment tromosti J** ili **brzina vrtnja  $\omega$** . Dijeljenjem lijeve i desne strane jednadžbe s  $\omega$  dobije se za  $M_u$  izraz

$$m_u = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{2} \omega^2 \frac{dJ}{d\varphi}$$

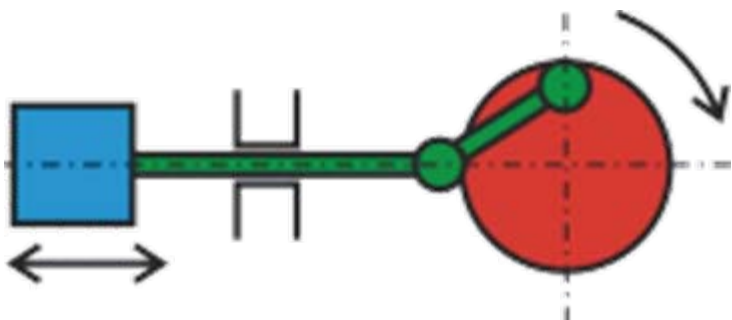
$$m_u = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

- Ukoliko se promjena kinetičke energije mijenja samo s promjenom brzine, **ostaje sam prvi član izraza**, kojeg smo upoznali još od ranije

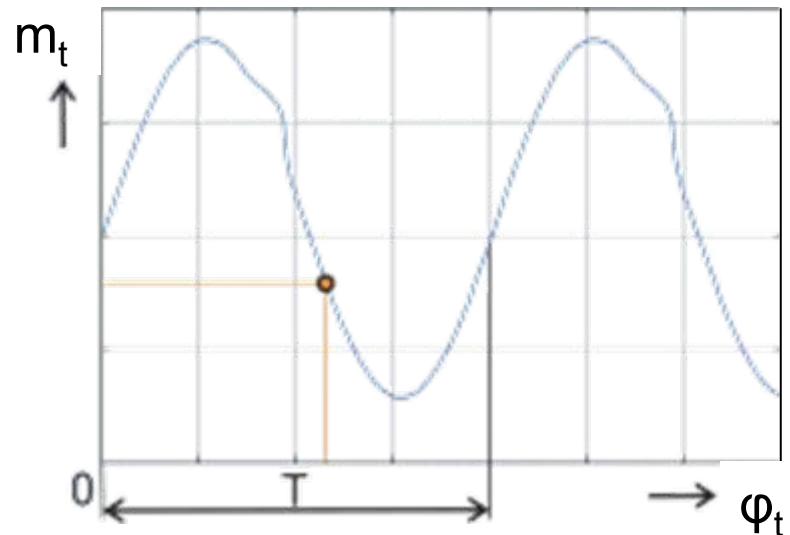
# Mehanički dio emp-a

## Kinematika rotacijskog i translacijskog gibanja

- Primjer radnog mehanizma (tereta) s promjenljivim momentom tromosti je svaki mehanizam kod kojeg se kod gibanja **mijenja geometrija** (raspored mase tijela koje rotira) u odnosu na centar mase.
- To mogu biti centrifuge ili neki drugi radni mehanizmi gdje geometrija tereta (moment tromosti) ovisi o kutu, brzini, vremenu ili pak nekoj drugoj veličini
- Uglavnom se pretpostavlja da je moment tromosti konstantan



Kompresori, klip i radilica,...



# Moment tromosti (inercije)

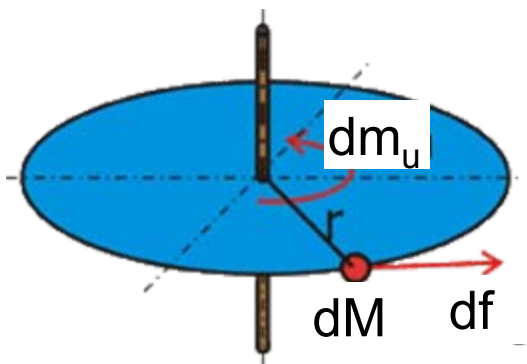
- Iz prethodne analize slijedi

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2$$

uz

$$J = \sum_i M_i r_i^2$$

- Definicija: *Moment tromosti je mjera otpora tijela promjeni kutne brzine*
- Moment inercije  $J$  ( $J$ ) ovisi o raspodijeljenosti (distribuciji) masa u rotirajućem sustavu. Što su raspodijeljene mase dalje od centra rotacije, moment tromosti je veći (raste s kvadratom udaljenosti !!!).
- Moment tromosti se računa tako da se računaju momenti tromosti oko definirane osi za svaki *elementarni dio mase*  $dM$  ukupne mase  $M$ , koji se zatim zbroje:



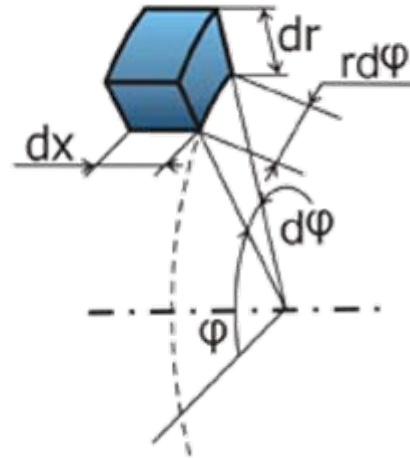
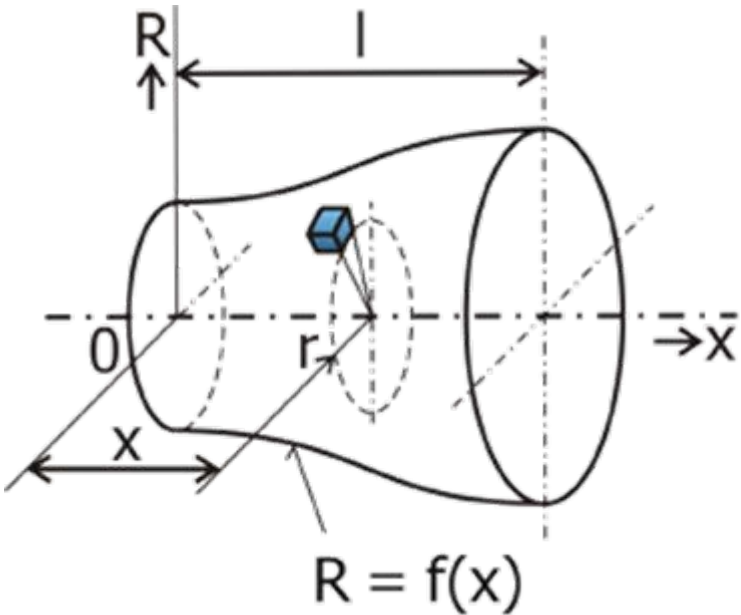
$$dm = r df = r dM \frac{dv}{dt} = r^2 dM \frac{d\omega}{dt}$$

$$m_u = \int dm = \int_0^M r^2 \frac{d\omega}{dt} dM$$

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

# Mehanički dio emp-a

## Moment inercije 3D tijela (izračun)



$$dM = \rho dV$$



$$J = \int_M r^2 dM = \int_V r^2 \rho dV$$

$$dV = dx \cdot r d\varphi \cdot dr \quad 0 \leq x \leq l; 0 \leq r \leq f(x); 0 \leq \varphi \leq 2\pi$$

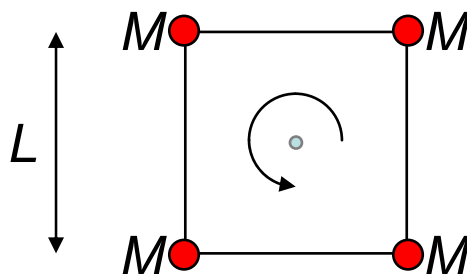
$$J = \rho \int_0^l dx \int_0^{f(x)} dr \int_0^{2\pi} r d\varphi$$

## Primjer: izračun momenta tromosti (1)

- Za  $N$  diskretnih elementarnih masa raspodijeljenih oko osi rotacije, moment inercije iznosi:

$$J = \sum_{i=1}^N M_i r_i^2 \quad \text{gdje je } r_i \text{ razmak elementarne mase } M_i \text{ od centra rotacije.}$$

Primjer: Izračunajte moment tromosti “točkastih” masa ( $M$ ) razmještenih na vrhovima kvadrata stranice  $L$ , oko okomite osi kroz središte kvadrata





## Izračun momenta tromosti (2)

- Računanje razmaka masa od središte rotacije

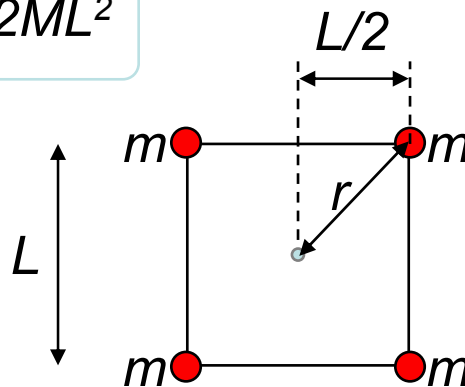
$$r^2 = 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 = \frac{L^2}{2}$$

Korištenjem Pytagorinog teorema slijedi

$$J = \sum_{i=1}^N M_i r_i^2 = M \frac{L^2}{2} + M \frac{L^2}{2} + M \frac{L^2}{2} + M \frac{L^2}{2} = 4M \frac{L^2}{2}$$



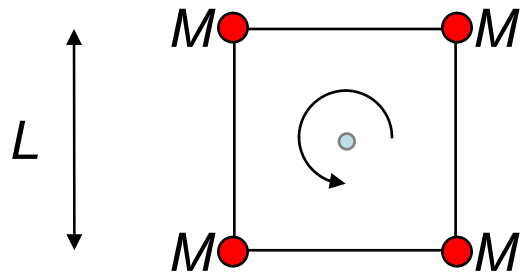
$$J = 2ML^2$$



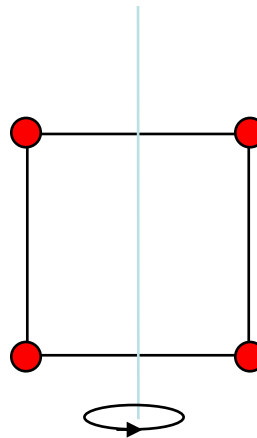
## Izračun momenta tromosti (zaključak)

- Pogledajmo kako za ISTO tijelo moment tromosti ovisi o osi rotacije!!

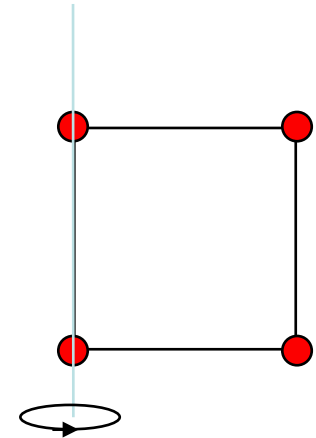
$$J = 2ML^2$$



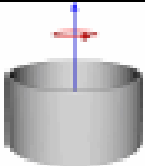
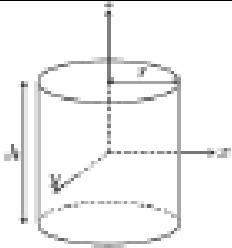
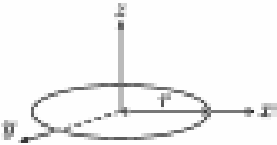
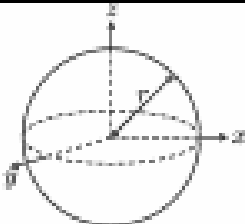
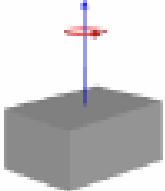
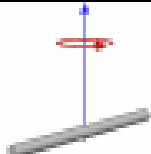
$$J = ML^2$$



$$J = 2ML^2$$



# Momenti inercije

|   |  |
|---|--|
|    | $I = mr^2$   |
|    | $I_z = \frac{1}{2}mr^2$<br>$I_x = I_y = \frac{1}{12}m(3r^2 + h^2)$   |
|    | $I_z = \frac{1}{2}mr^2$<br>$I_x = I_y = \frac{1}{4}mr^2$             |
|   | $I = \frac{2}{5}mr^2$  |
|  | $I_h = \frac{1}{12}m(w^2 + d^2)$<br>$I_w = \frac{1}{12}m(h^2 + d^2)$ |
|  | $I_{center} = \frac{1}{12}mL^2$                                      |

## NAPOMENA:

Ovdje su mase **iznimno** označene s malim slovom “m” !!!

## Teorem o paralelnim osima rotacije (Steinerov poučak)

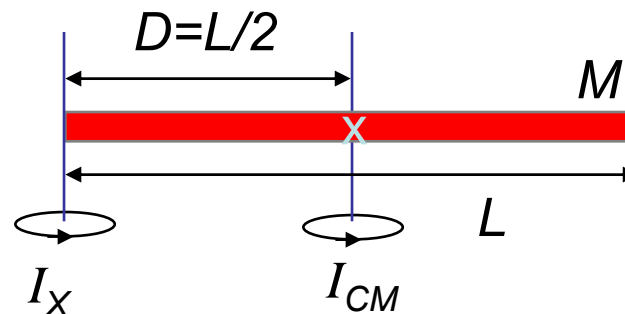
- Pretpostavimo da je moment tromosti krutog tijela mase  $M$  oko osi rotacije koja prolazi kroz centar mase,  $J_{CM}$ , POZNAT.
- U tom se slučaju moment tromosti tog istog tijela oko osi rotacije koja je paralelna s osi kroz centar mase  $J_x$  i udaljena od njega za iznos  $D$  može izračunati pomoću formule:

$$J_x = J_{CM} + MD^2$$

- Dakle, ako se zna  $J_{CM}$ , može se jednostavno izračunati moment tromosti oko osi paralelne s osi kroz centar mase. Slijedi primjer.

## Teorem o paralelnim osima rotacije (primjer Steinerovog poučka)

- Prikazan je kruti štap mase  $M$  i dužine  $D$ . Izračunaj moment inercije (tromosti) tog štapa oko njegovog kraja (osi  $x$ ).



$$J_x = J_{CM} + MD^2$$

- Znamo moment inercije oko centra mase

$$J_{CM} = \frac{1}{12} ML^2$$

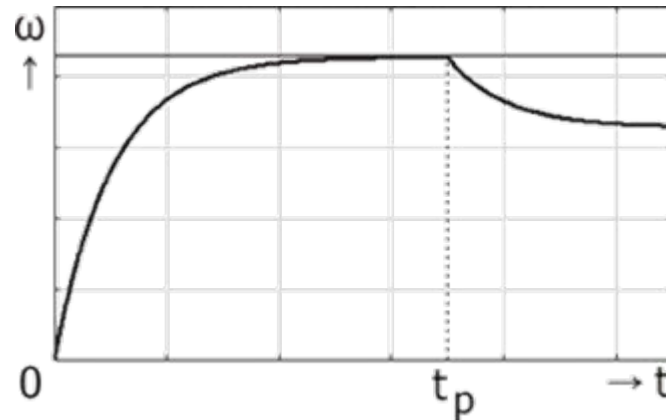
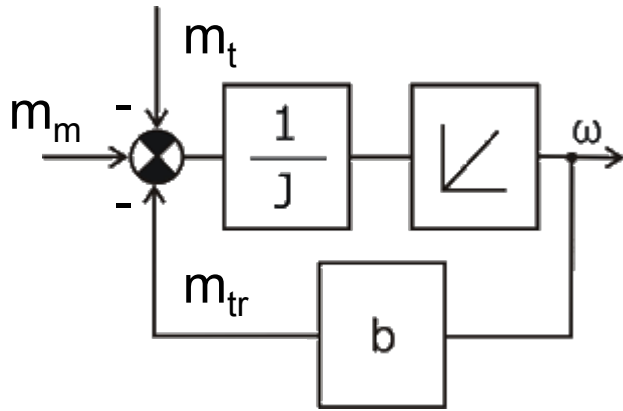
- Slijedi

$$J_x = \frac{1}{12} ML^2 + M \left( \frac{L}{2} \right)^2 = \frac{1}{3} ML^2$$

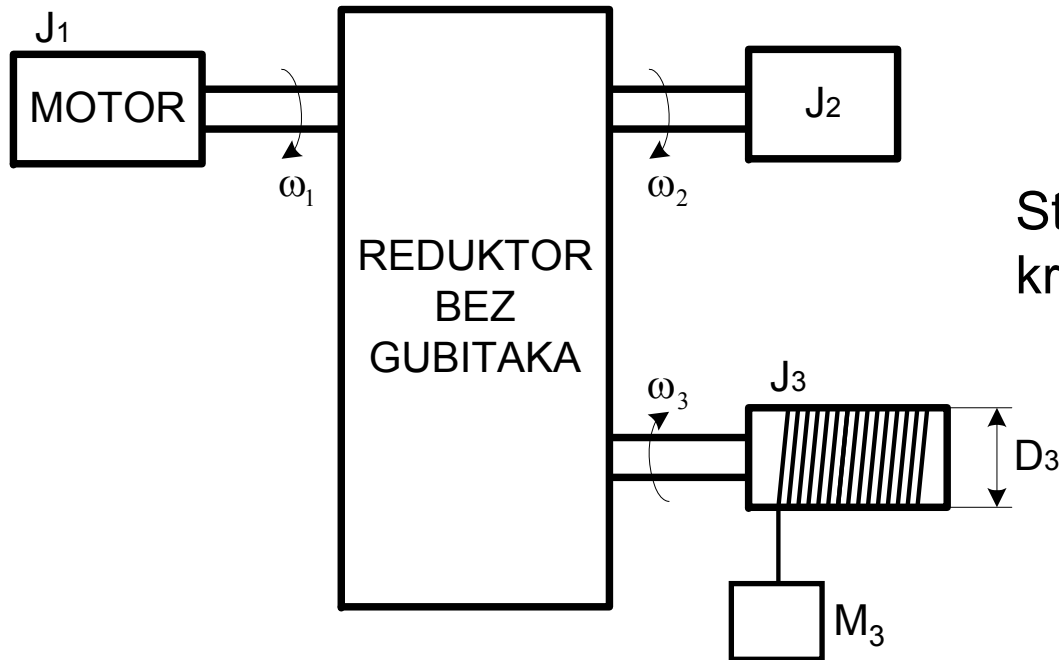
## Dinamička jednađžba emp-a

Neka je pogonski stroj momenta tromosti  $J_m$  mehanički kruto povezan s radnim mehanizmom (teretom  $m_t = \text{konst} = M_t$ ), momenta tromosti  $J_t$ . Neka je ukupno trenje u ležajima  $m_{tr}$  viskoznog karaktera. Treba opisati dinamičko ponašanje takvog emp-a.

$$m_m = m_u + m_t + m_{tr} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_t + b \cdot \omega \quad J = J_m + J_t$$



# Ekvivalentne vrijednosti parametara EMP-a (preračunavanje na osovину motora)



Stupanj korisnosti reduktora se kreće između 0.95-0.97

Snaga na osovini motora mora biti jednaka sumi snaga svih opterećenja uvećanih za iznos gubitaka

Ako se promatra opterećenje na osovini, snaga motora iznosi

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_2} + \frac{P_3}{\eta_3} + \frac{M_3 \cdot g \cdot v_3}{\eta_{M_3}}$$

gdje je  $\eta_{M_3}$  koeficijent korisnosti bubnja s užetom

Ako se uzmu u obzir koeficijenti korisnosti jednostavno se odredi ekvivalentni moment  $m_1$  koji “osjeća” motor (iz prethodne formule)

$$m_1 = \frac{m_2 \omega_2}{\eta_2 \omega_1} + \frac{m_3 \omega_3}{\eta_3 \omega_1} + \frac{F_3 \cdot D_3 / 2 \cdot \omega_3}{\eta_{M_3} \omega_1}$$

$$m_1 = \frac{m_2}{\eta_2 i_{12}} + \frac{m_3}{\eta_3 i_{13}} + \frac{F_3 \cdot D_3 / 2}{\eta_{M_3} i_{13}}$$

Ekvivalentni moment tromosti koji “vidi” motor se računa na osnovi zakona održanja kinetičke energije.

Za momente tromosti  $J_2$ ,  $J_3$  i masu  $M_3$  vrijede jednakosti



$$\frac{J_2 \cdot \omega_2^2}{2} = \frac{J'_2 \cdot \omega_1^2}{2}$$

$$J'_2 = J_2 \cdot \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2$$

$$\frac{J_3 \cdot \omega_3^2}{2} = \frac{J'_3 \cdot \omega_1^2}{2}$$

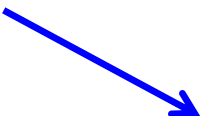
$$J'_3 = J_3 \cdot \left( \frac{\omega_3}{\omega_1} \right)^2$$

$$E_k = \frac{M_3 \cdot v_3^2}{2} = \frac{M_3}{2} \cdot \left( \frac{D_3}{3} \right)^2 \cdot \omega_3^2$$

$$\frac{J'_{M3} \cdot \omega_1^2}{2} = \frac{M_3}{2} \cdot \left( \frac{D_3}{3} \right)^2 \cdot \omega_3^2$$

$$J'_{m3} = \frac{M_3}{2} \cdot \left( \frac{D_3}{3} \right)^2 \cdot \left( \frac{\omega_3}{\omega_1} \right)^2$$

Ukupna zamašna masa  
reducirana na osovinu  
motora iznosi:



$$J = J_1 + J'_2 + J'_3 + J'_{M3} = J_1 + J_2 \cdot \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + \left[ J_3 + M_3 \cdot \left( \frac{D_3}{2} \right)^2 \right] \cdot \left( \frac{\omega_3}{\omega_1} \right)^2$$

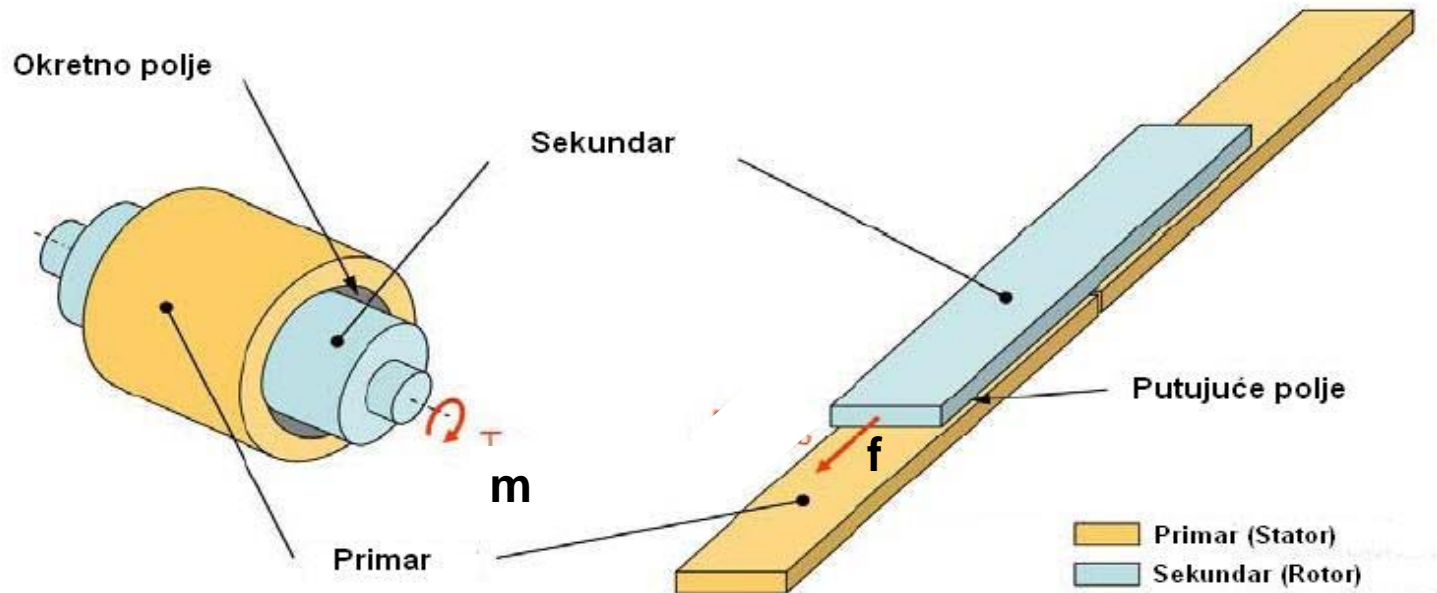
Ukupni dinamički moment motora je u ovom slučaju definiran kao

$$m_u = J \frac{d\omega_1}{dt} = \left\{ J_1 + J_2 \cdot \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + \left[ J_3 + M_3 \cdot \left( \frac{D_3}{2} \right)^2 \right] \cdot \left( \frac{\omega_3}{\omega_1} \right)^2 \right\} \frac{d\omega_1}{dt}$$

# Mehanički dio emp-a

## Translacijsko gibanje

- Kod **translacijskog (linearnog) gibanja** (čvrsta tijela, objekti) gibaju se translacijski (primjer vozila na ravnoj podlozi, linearni motor (suvremeni željeznički transport), dizalični sustavi



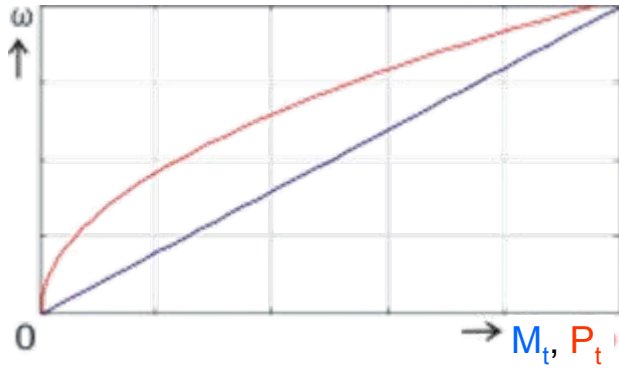
- Sve važnije **formule za translacijsko i rotacijsko gibanje** dane su u tablici koja slijedi

# Translacijsko (linearno) gibanje / Rotacijsko gibanje

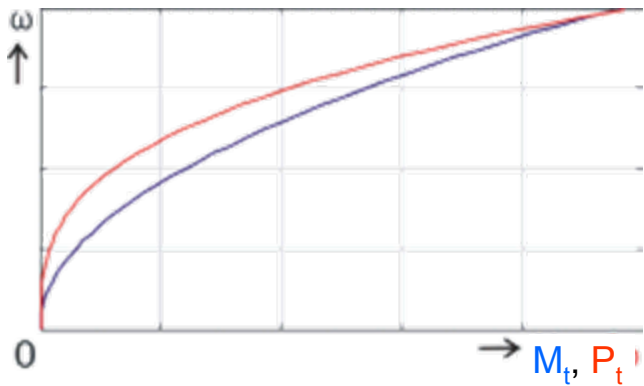
| Translacijsko gibanje |                     |                  | Rotacijsko gibanje |                          |                        |
|-----------------------|---------------------|------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|
| put                   | $s$                 | m                | kut                | $\varphi$                | rad                    |
| brzina                | $v$                 | m/s              | kutna brzina       | $\omega$                 | rad/s                  |
| ubrzanje              | $a$                 | m/s <sup>2</sup> | kut. ubrzanje      | $\alpha$                 | rad/s <sup>2</sup>     |
| masa                  | $M$                 | kg               | mom.tromosti       | $J (I)$                  | kg·m <sup>2</sup>      |
| sila                  | $f = M \cdot a$     | N                | moment sile        | $M = J \cdot \alpha$     | N·m                    |
| kol. gibanja          | $M \cdot v$         | kg·(m/s)         | zamah              | $J \cdot \omega$         | kg·(m <sup>2</sup> /s) |
| rad                   | $f \cdot s$         | J                | rad                | $M \cdot \varphi$        | J                      |
| kinetička energija    | $(M \cdot v^2) / 2$ | J                | kinetička energija | $(J \cdot \omega^2) / 2$ | J                      |
| snaga                 | $f \cdot v$         | W                | snaga              | $M \cdot \omega$         | W                      |

# Mehanički dio emp-a

## Karakteristike (statičke) tereta $M_t = f(\omega)$



Kalenderi (glačalice)  
(papirna industrija, rjeđe  
se sreću, ..  $M_t \approx \omega$ ;  $P_t \approx \omega^2$

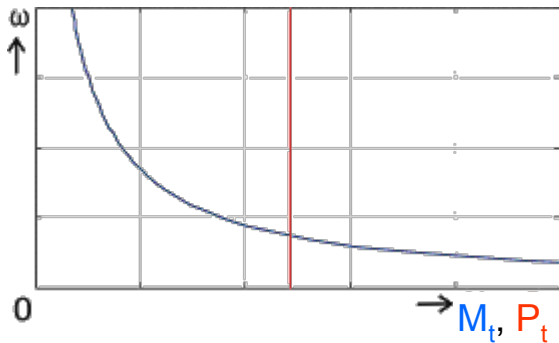


Tračni pogoni (bez  
zanemarenja trenja,  
ventilatori, ..  $M_t \approx \omega^2$ ;  $P_t \approx \omega^3$

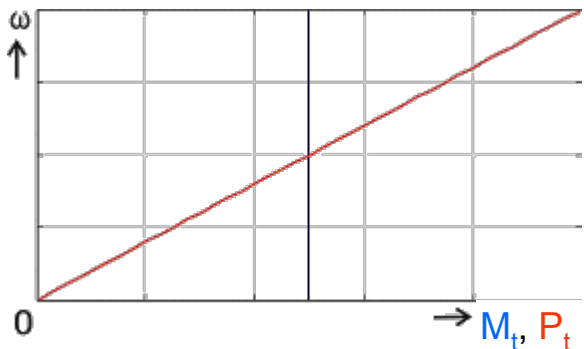
# Mehanički dio emp-a

## Karakteristike (statičke) tereta, $M_t=f(\omega)$

- Za projektiranje emp-a potrebno je imati znanja o radnom mehanizmu (teretu) kao što je ovisnost momenta tereta o brzini, položaju, vremenu itd.
- Ovdje će biti navedene karakteristične nekih radnih mehanizama.



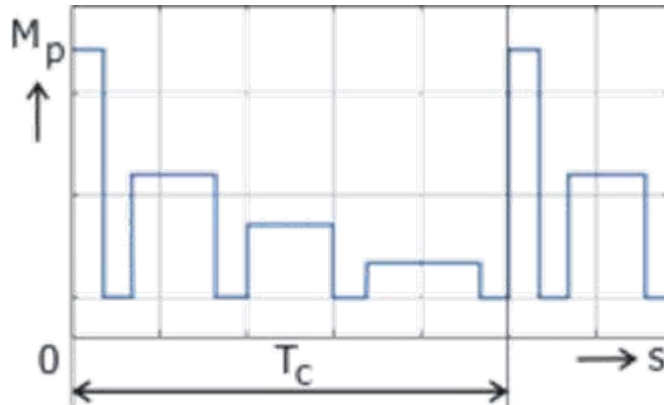
Namatači (papirna industrija, aluminijske folije,.. $M_t \approx 1/\omega$ ;  $P_t = \text{konst}$



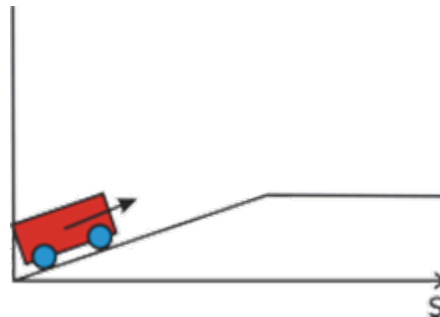
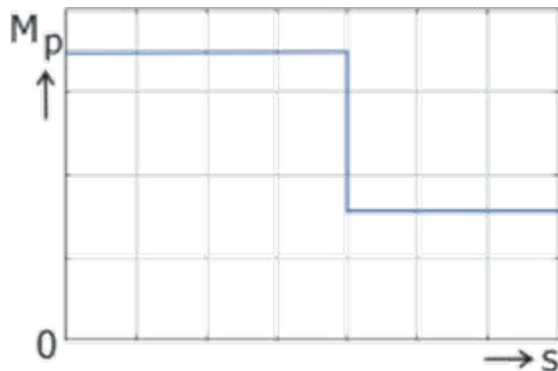
Dizanje tereta (liftovi, dizalice, rezači, viskozno trenje.. $M_t = \text{konst}$ ;  $P_t \approx \omega$

# Mehanički dio emp-a

## Karakteristike tereta, $M_t=f(t)$ i $M_t=f(s)$



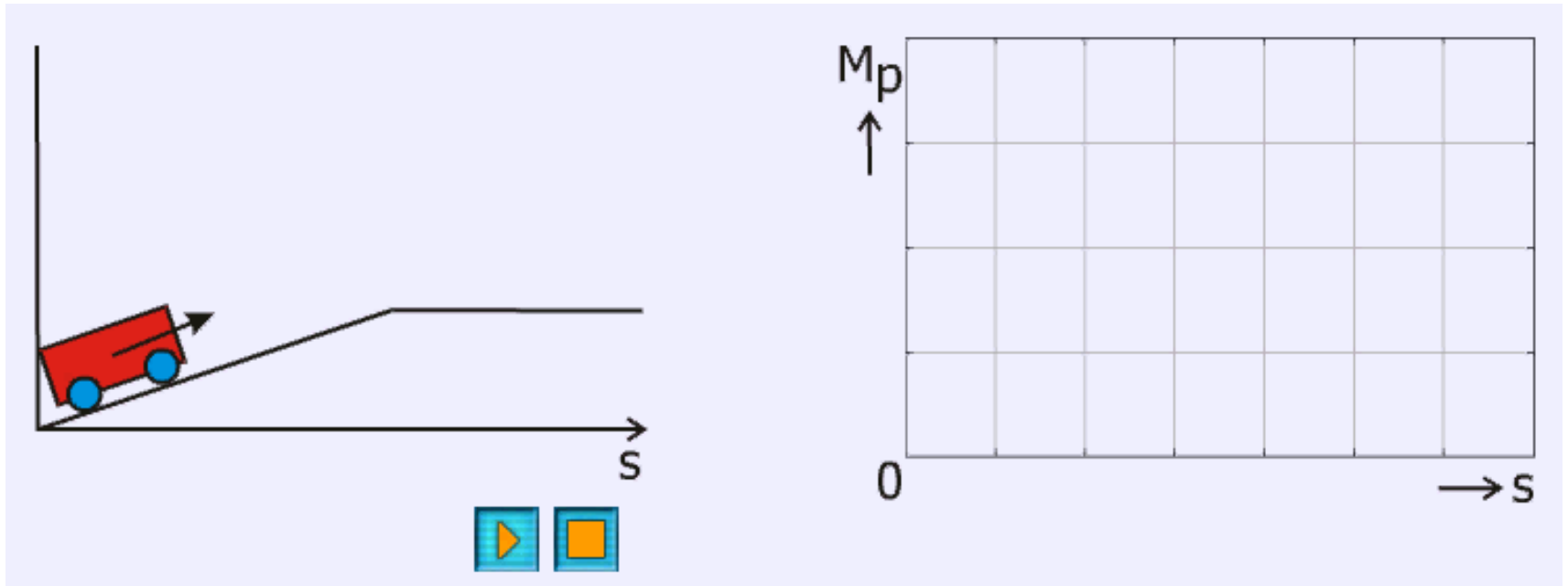
Tzv. *blooming* pogoni (valjaonice), prese, škare kranovi, liftovi, **radi se o (vremenski) periodičkim opterećenjima**



Teret **ovisan o trajektoriji gibanja**, karakterističan za vučna vozila (primjer - vozilo mora savladati tangencijalnu komponentu sile težine)

# Mehanički dio emp-a

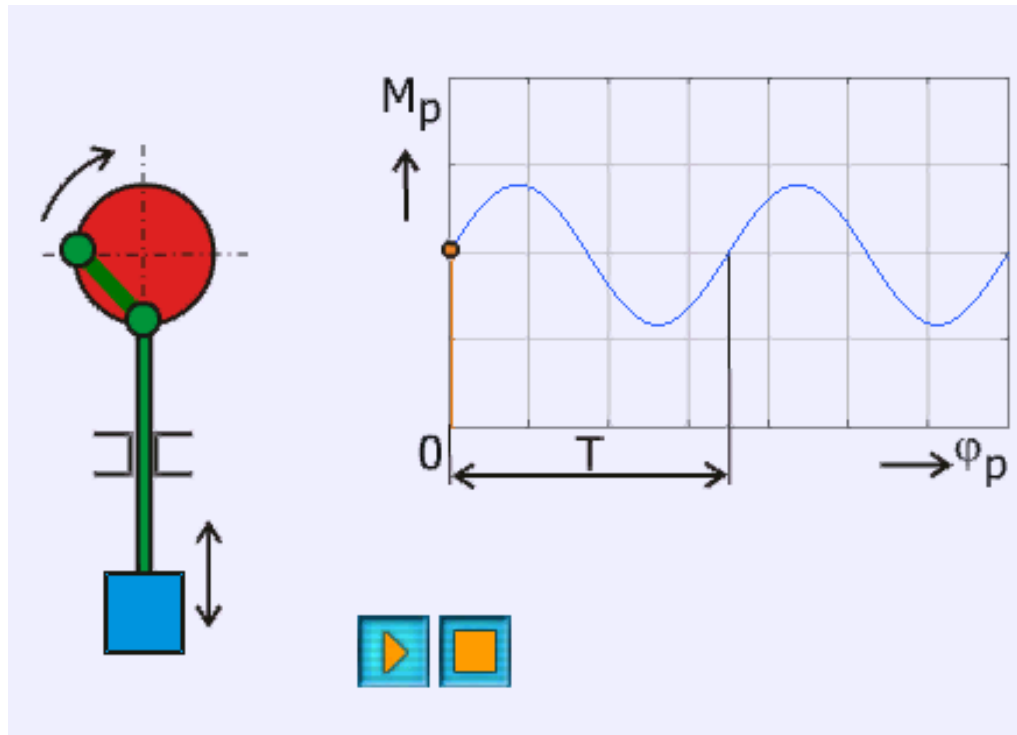
## Karakteristike (statičke) tereta $M_t=f(s)$



Moment tereta je u ovom slučaju ovisan o trajektoriji gibanja. Zbog čega je na kosini  $M_t$  veći nego na ravnoj podlozi? Zbog čega se javlja  $M_t$  na ravnoj podlozi

# Mehanički dio emp-a

## Karakteristike (statičke) tereta $M_t = f(\varphi)$



Moment tereta je minimalan kada je glava poluge u najnižem položaju, a najveći je kada je u najvišem položaju



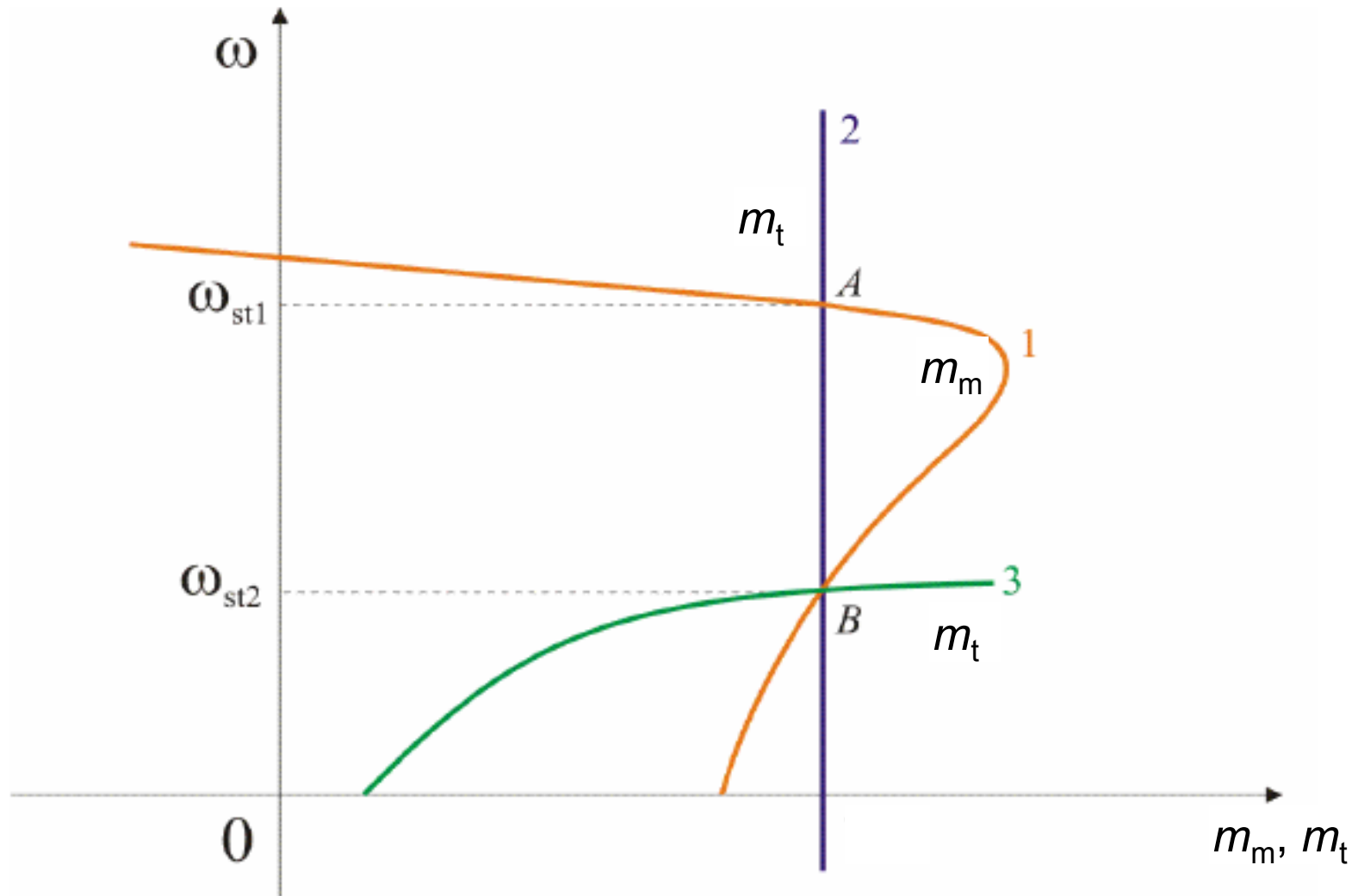
# Stabilnost radne točke

- **Radna točka je stabilna**, ako uslijed poremećaja izazvanog momentom tereta  $m_t$  i smanjenjem brzine u odnosu na radnu točku ( $\Delta\omega < 0$ ), nastane dinamički moment  $m_m - m_t = m_d > 0$ , pri čemu je omjer prirasta momenta  $m_d$  i postignutog prirasta brzine u toj točki  $\Delta\omega$  negativan. Vrijedi

$$\frac{m_d}{\Delta\omega} < 0$$

- Stabilnost radne točke određena je karakteristikama motora i radnog mehanizma.
- **Radna točka je stabilna ako se pogon nakon prestanka opterećenja vrati u prvotnu radnu točku. Drugim riječima, promjena brzine vrtnje od te radne točke i dinamički moment koji pri tome nastane, moraju imati suprotne predznake.**

# Mehaničke karakteristike radnih mehanizama

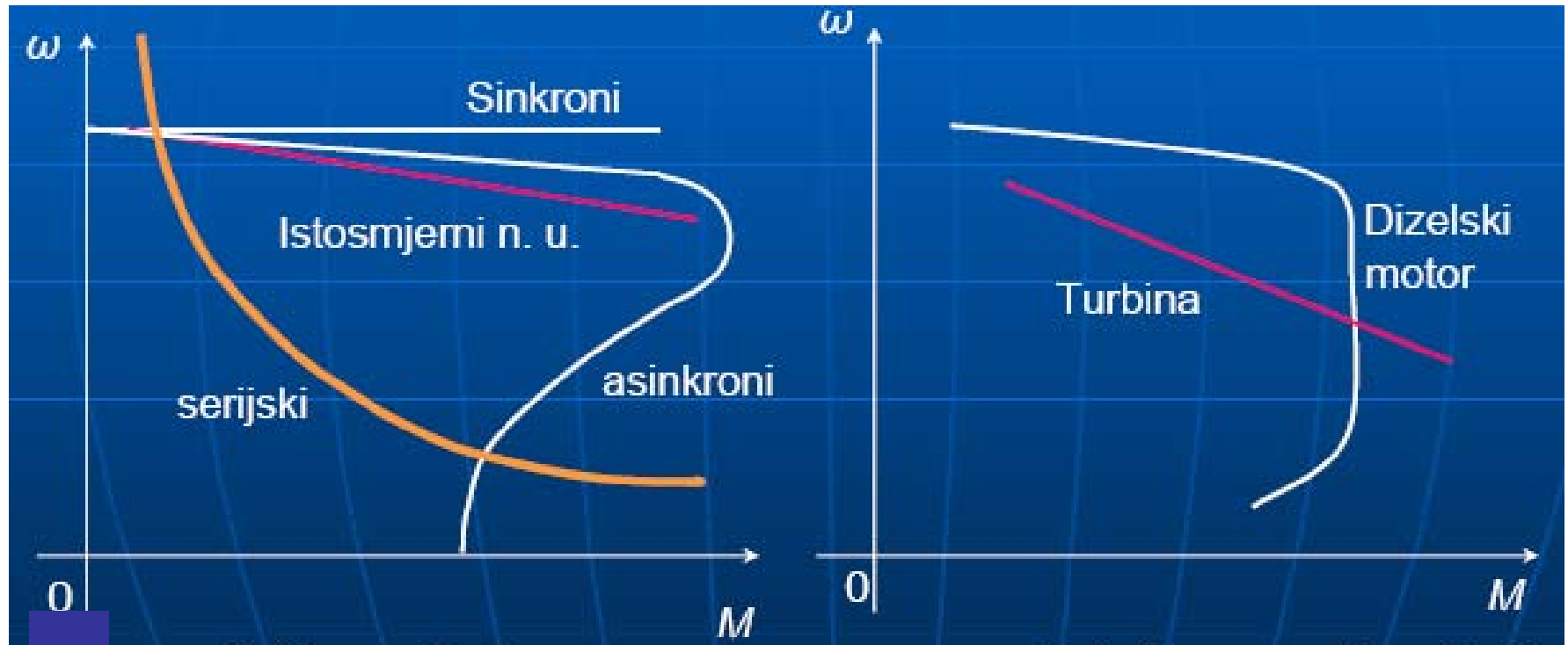


## Stabilnost radne točke

- Radna točka **A** na slici je **stabilna**, jer ako poremećaj izaziva efektivno povećanje opterećenja (karakteristika 2), dolazi do smanjenja brzine vrtnje.
- Radna točka **B** je **nestabilna** ako radni mehanizam ima karakteristiku oblika **2**, a postaje **stabilna** ako radni mehanizam ima karakteristiku oblika **3**.

# Karakteristike nekih STROJEVA

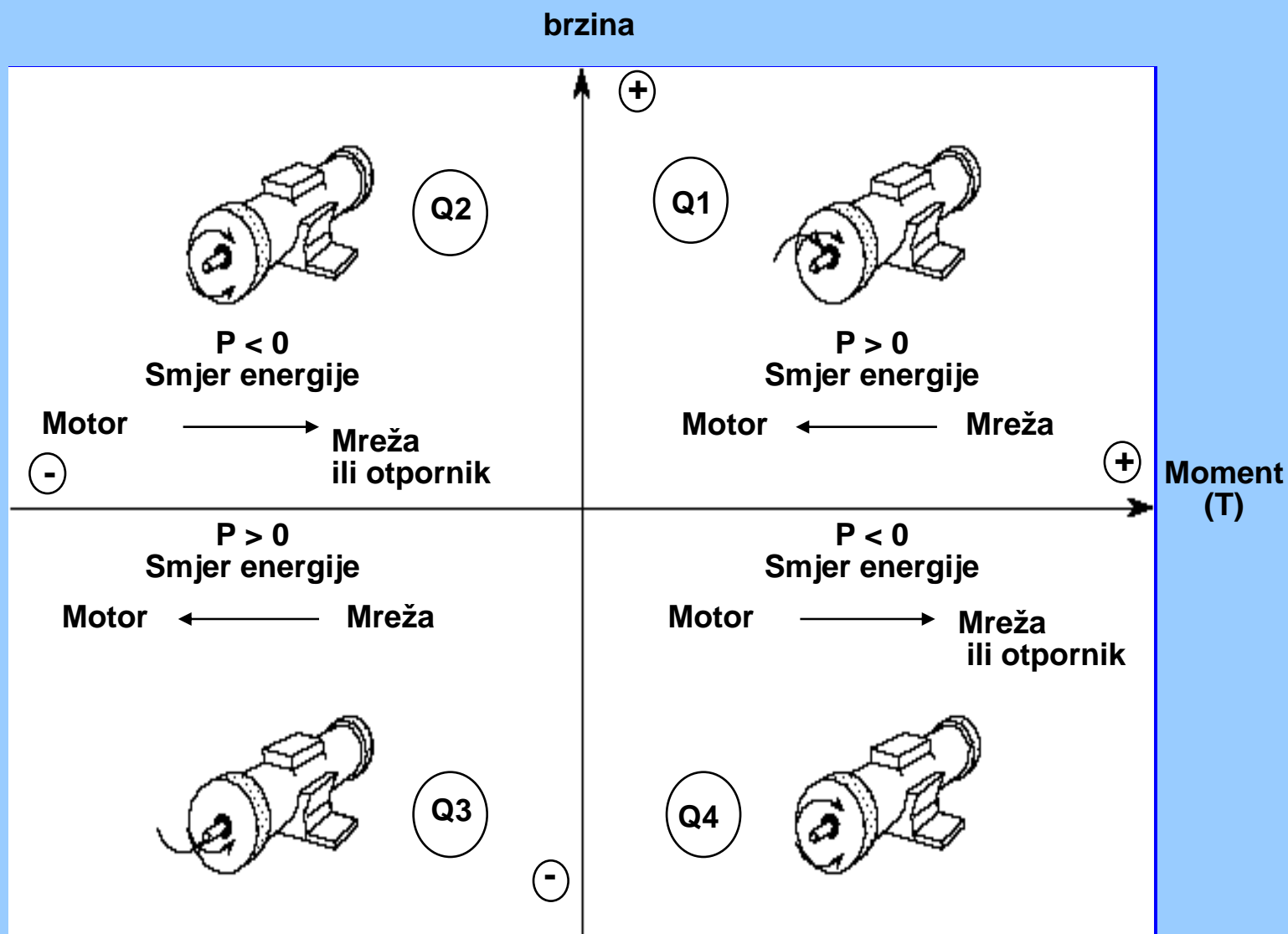
$$M_m = f(\omega)$$



Na slici lijevo su prikazane karakteristike istosmjernog stroja s nezavisnom (n.u.) i serijskom uzбудom te asinkronog i sinkronog stroja

Na slici desno su prikazane karakteristike turbine i stroja na dizel pogonsko gorivo

# Dinamička stanja, Kvadranti rada, 4Q, **općenit slučaj**

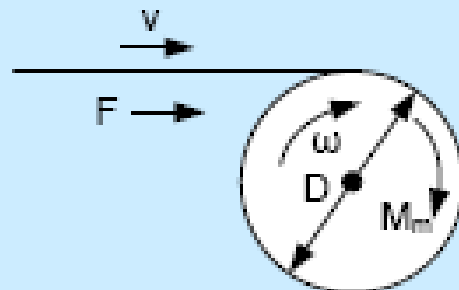


# Mehanički dio emp-a

## Primjer namatača aluminijske trake

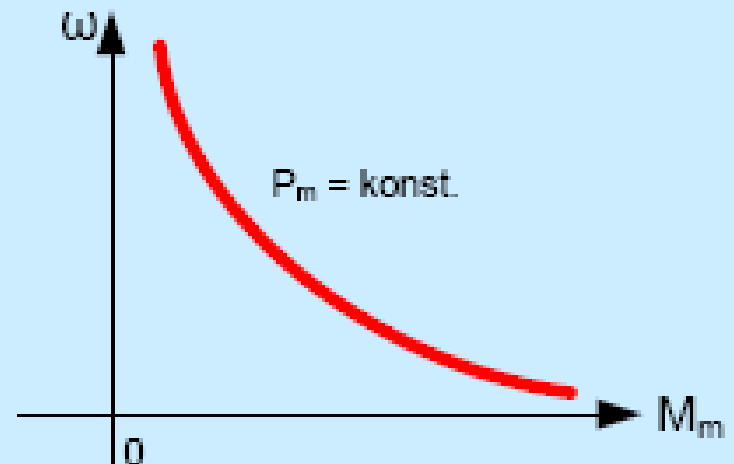
Pogonski stroj mora osigurati konstantnu brzinu  $v$  i silu  $F$  namatanja trake. S povećanjem promjera bubnja pada kutna brzina  $\omega$  ( $v = \omega R = \text{konst}$ ) a moment stroja se mora povećati da bi se kompenziralo povećano opterećenje bubnja ( $m_t = FR$ ). Radna točka pogona je na crvenoj krivulji)

Namatač:



Ako je brzina namatanja (trake)  $v$  konst., i sila zatezanja  $F = \text{konst.}$  snaga motora za namatanje će biti:

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



Prema dosadašnjim znanjima stečenim uglavnom na kolegijima *Automatskog upravljanja* i *Elektromehaničkim sustavima*, odrediti blokovsku regulacijsku strukturu kojima s može osigurati ova tehnološka zadaća!

# OSNOVNI POJMOVI PRIJENOSA SNAGE I GIBANJA (1)

- Vidjeli smo u strukturnom blokovskom dijagramu emp-a da se **električna snaga u emp-u** prenosi **s električnog stroja na radni mehanizam** (teret)
- Pri tome emp može sadržavati **razne tipove opterećenih mehanizama** kao što su **pumpe, kompresori, ventilatori, škare, sjekači, vučna vozila,...**
- Isto tako se zbog **prilagodbe parametara mehaničke snage (brzine i momenta)** i tipa gibanja (translacijskog, rotacijskog) koju zahtijeva radni mehanizam koriste različiti tipovi prijenosnih mehanizama (**zupčasti prijenos, remenski prijenos, tarni prijenos,...**), spojke (hidrauličke, elektromagnetske)
- U nekim su primjenama emp-a potrebne **male brzine vrtnje i veliki momenti** (električna vuča, manipulatori), a u nekim **velike brzine vrtnje** (alatni strojevi, centrifugalne pumpe)
- Da li upotrijebiti **direktni pogon**, ili uzeti motor s većom brzinom vrtnje?
- Pri tome se važni aspekti **prijenosa snage i gibanja (gubici)** i problem računanja **ekvivalentnog momenta tromosti** (zamašnih masa). Računanje momenta tromosti je posebno važno zbog opisa **dinamičkog ponašanja emp-a**.

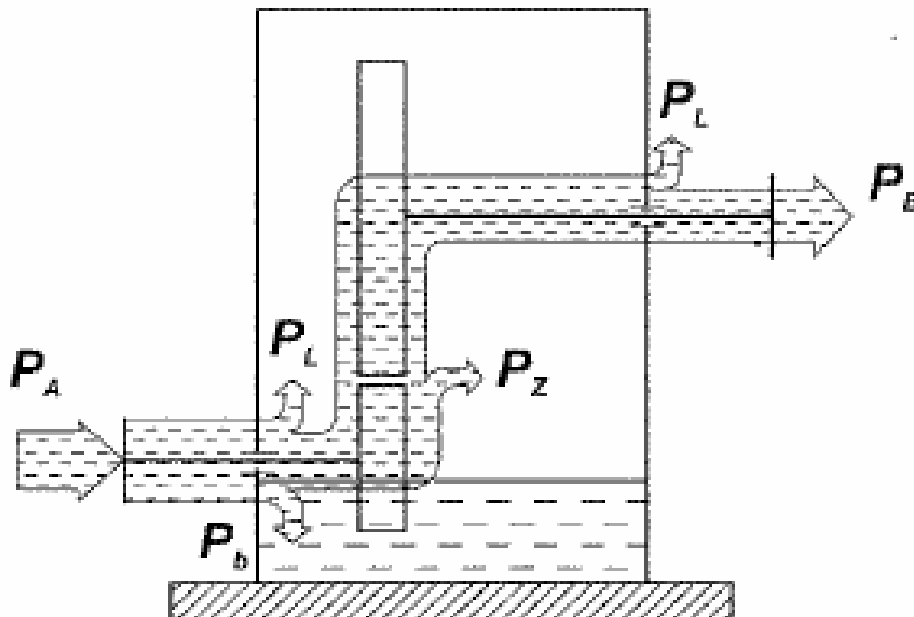
## OSNOVNI POJMOVI PRIJENOSA SNAGE I GIBANJA (2)

- Motor s većom brzinom vrtnje je uvijek jeftinije rješenje. Sporohodni motor s visokim momentom i manjim brzinama je tehnološki teže izvediv (ograničenja u zasićenju i gustoći struje potrebnim za visoke momente), pa se uglavnom u ovim slučajevima koristi reduktor kao prijenosnik snage i banja s pogonskog stroja na radni mehanizam (teret, pogonjeni stroj).
- Velike brzine vrtnje motora mogu također biti problem za izvedbu motora (ograničenje frekvencije, konstrukcijski razlozi) pa se tada ide na motor manjih brzina uz korištenje multiplikatora.
- Uvođenjem prijenosnika snage i gibanja, moramo računati na gubitke u prijenosu energije s pogonskog stroja na radni mehanizam i taj gubitak se iskazuje uglavnom preko koeficijenta korisnosti (iskorištenja) prijenosa energije,  $\eta$



# OSNOVNI POJMOVI PRIJENOSA SNAGE I GIBANJA (3)

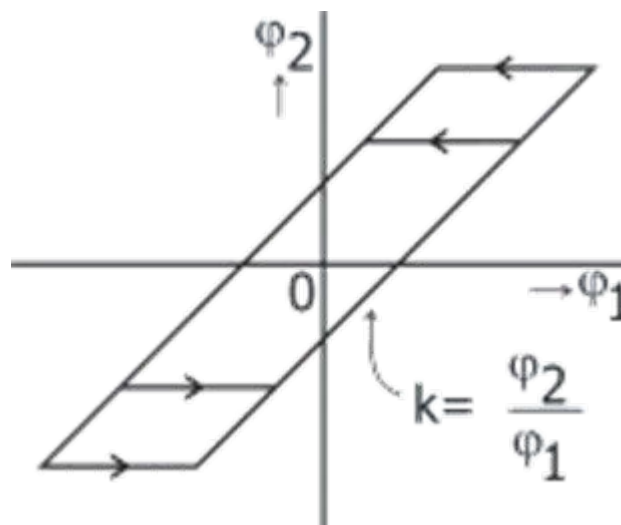
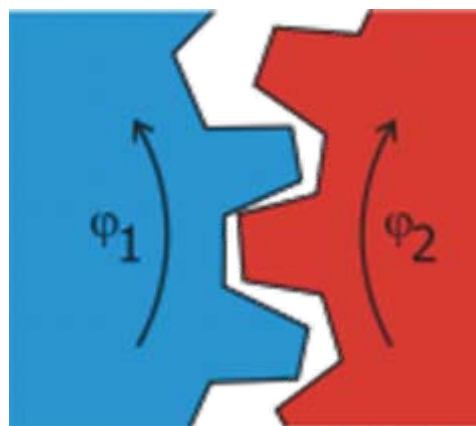
- Npr. za zupčasti prijenosnik su to **gubici ozubljenja  $P_z$** , za remenice su to gubici proklizavanja. Tim gubicima se pridodaju i gubici zbog **tekućinskog trenja u uljima (bućkanje,  $P_u$ )**, **trenja u brtvama  $P_b$**  i **trenja u ležajevima  $P_L$**
- Ukoliko se radi o *višestupnjevanom prijenosniku, ukupan stupanj korisnog djelovanja se dobiva množenjem stupnjeva korisnosti pojedinačnih prijenosnih parova, faktora korisnosti koji uključuju gubitke u ležajevima cijelog prijenosnika te gubitaka brtvljenja i ostalih gubitaka*



$$\eta = \eta_{12} \eta_{34} \dots \eta_{xy} \eta_b \eta_L \quad (2)$$

$\eta_{xy}$  je stupanj korisnosti pojedinog prijenosničkog para,  $\eta_L$  mjera gubitaka u ležajevima a  $\eta_b$  mjera gubitaka koji nastaju u brtvama uključujući tu i ostale gubitke

# OSNOVNI POJMOVI PRIJENOSA SNAGE I GIBANJA (3A)



Nelinearna karakteristika zupčaničkog prijenosnika kao posljedica “trošenja” zubaca zbog trenja (zazor, zračnost, engl. *backlash*)

Karakteristika zračnosti je posebno važna u 4q sustavima upravljanja.

**Zašto?**

# OSNOVNI POJMOVI PRIJENOSA SNAGE I GIBANJA (4)

(poznati pojmovi od prije)

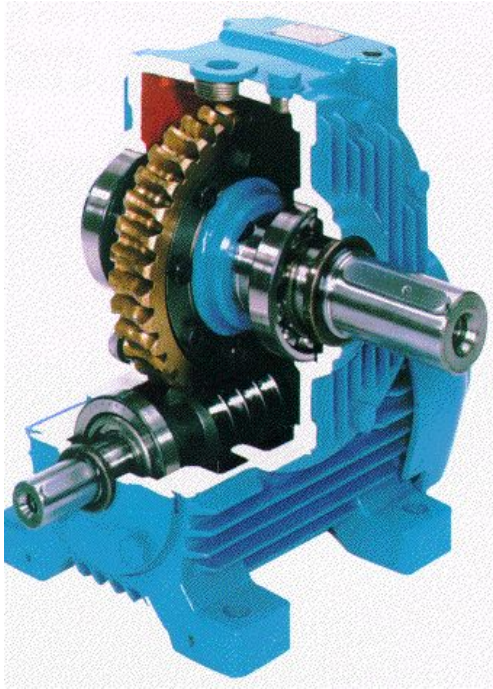
- *Stupanj pretvorbe momenta* je omjer momenata izlazne i ulazne strane prijenosnika. Iz bilance snage prijenosnika  $P_2 = \eta P_1$ , za jednostupanjski prijenos se dobije

- $M_2 n_2 = -\eta M_1 n_1$  \*1  $\mu = \frac{M_2}{M_1} = -i\eta$  (3)
- *Snaga* koja se prenosi prijenosnikom računa se kao umnožak okretnog momenta i kutne brzine. Općenito vrijedi

$$P = M\omega = \frac{n\pi}{30} M \quad (4)$$

- (\*1) Znak “-” se koristi kada su smjerovi vrtnje zupčanika suprotni. Međutim, u velikom broju slučajeva se predznak zanemaruje!

# Zupčasti prijenosnici snage i gibanja – Puž (pužnik) i pužno kolo, engl. *worm and gear* (1)



PUŽ (PUŽNIK)

PUŽNO KOLO

Prijenosni omjer se računa jednako kao i za druge zupčaničke prijenose

Prijenos momenta kada su vratila okomita i mimoilazna

Veliki prijenosni odnosi  $i = 5 \dots 70$

Stupanj iskoristivosti  $\eta = 0,3 \dots 0,96$

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

$z_1 \mapsto$  broj zuba (navoja) puža

$z_2 \mapsto$  broj zuba pužnog kola

## Zupčasti prijenosnici snage i gibanja – Puž i pužno kolo – pužnik, engl. *worm and gear*, (2)

- Kod **jednovojnog pužnika se za svaki puni okret pužnika pužno kolo zakrene za jedan zubni razmak**, kod dvovojnog za dva, trovojnog za tri itd. To treba uzeti u obzir kod **računanja prijenosnog omjera**
- Primjer dvostupanjskog prijenosnika snage i gibanja koji se sastoji od **jednog čeonog zupčastog para** i **puža s pužnikom kao drugog para**  
Što se dobije s ovakvom kombinacijom ?



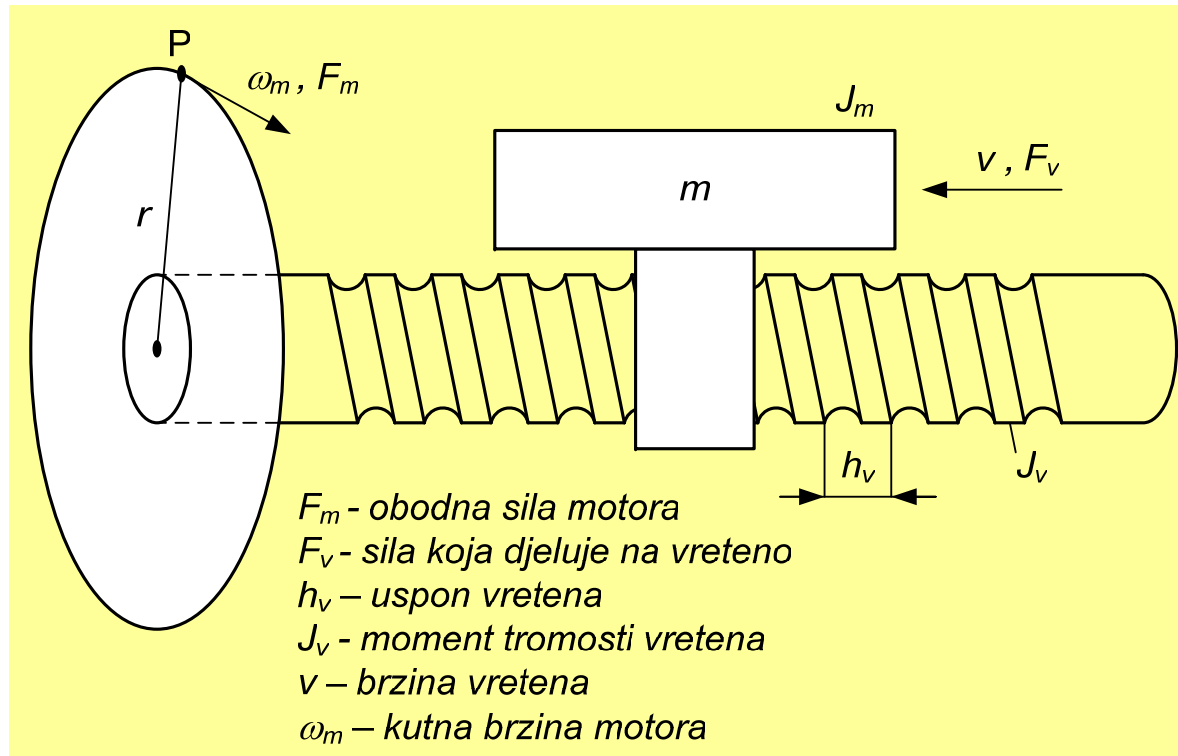
# Zupčasti prijenosnici snage s *rotacijsko-translacijskom pretvorbom gibanja* - **Posmični pogon (prigon)** s navojnim vretenom (1). engl. *Lead and Ball screw mechanism*

## Svojstva:

- Širok raspon brzina vrtnje
- Velika preopteretivost
- Minimalna vremena zaleta
- Osiguranje velikog momenta kod brzine  $n=0$

## Primjena:

- **Alatni strojevi** (za pomak obradka ili alata)



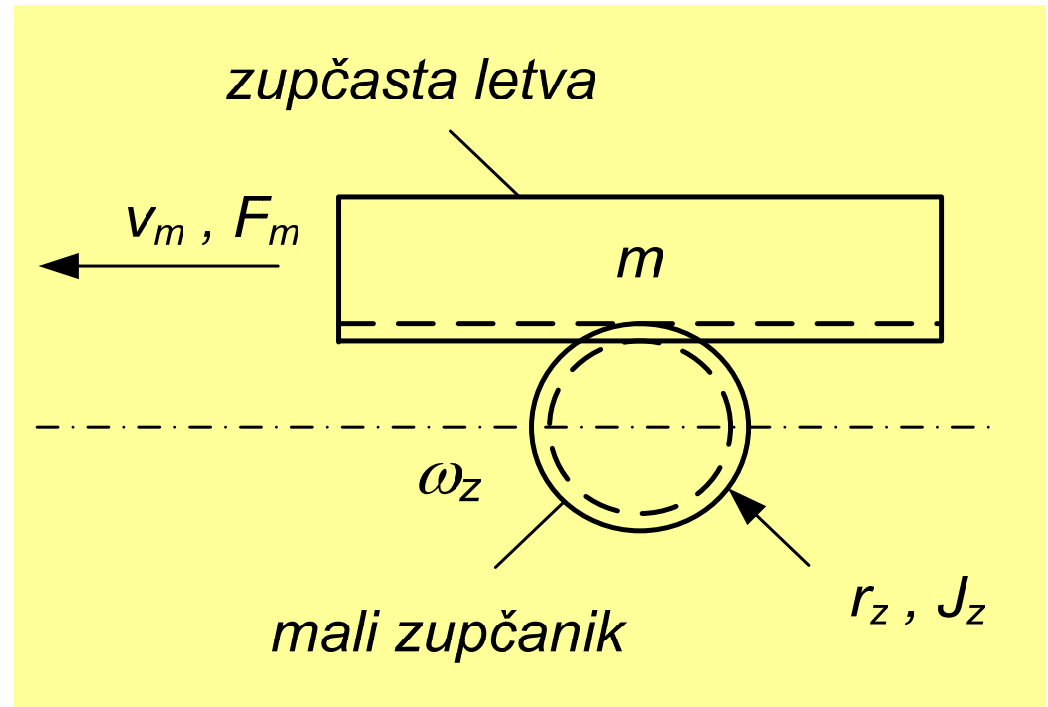
Zupčasti prijenosnici snage s *rotacijsko-translacijskom pretvorbom gibanja* – **Zupčanik sa zupčastom letvom** (1),  
engl. *rack and pinion*

Zahtjevi:

- Širok raspon brzina vrtnje
- Velika preopteretivost
- Minimalna vremena zaleta
- Osiguranje velikog momenta kod brzine  $n=0$

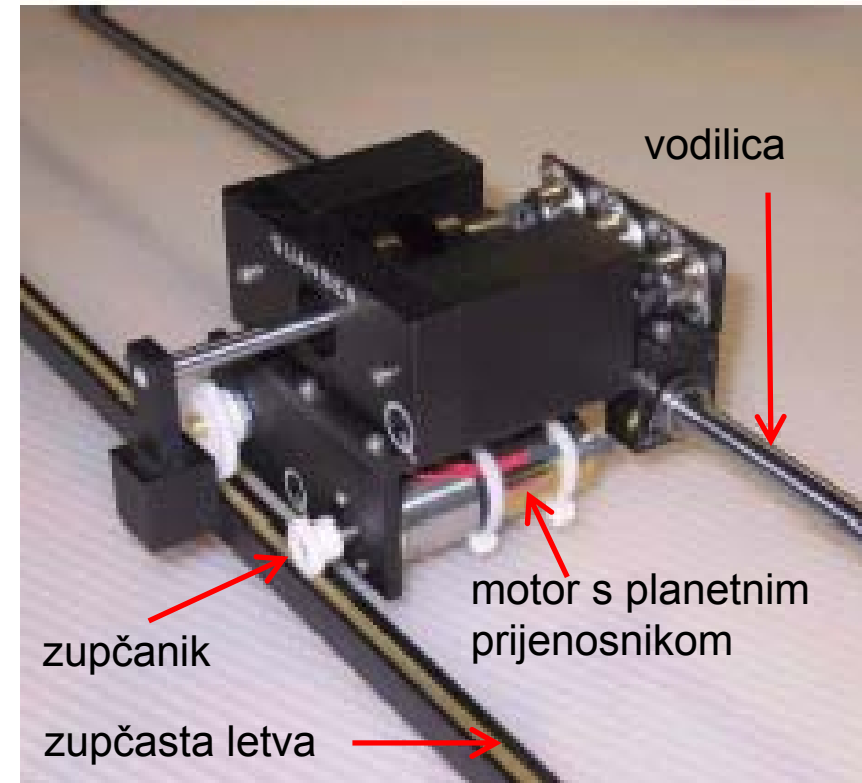
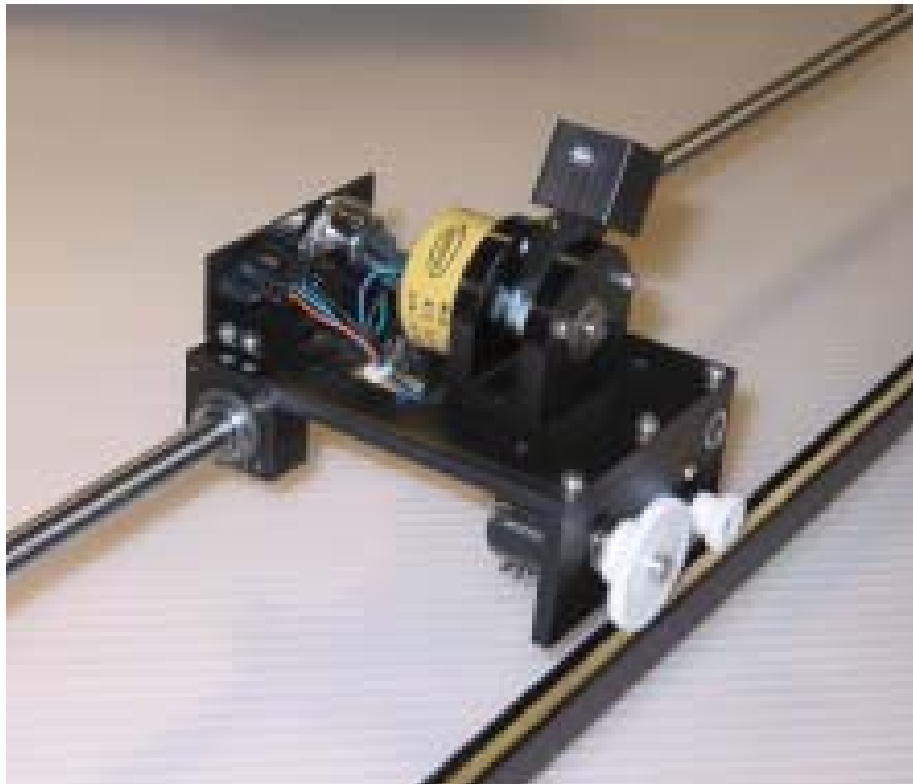
Primjena:

- Alatni strojevi (za pomak obradka ili alata)



**NAPOMENA:** Za razliku od posmičnog pogona s navojnim vretenom, broj zuba sustava zupčanika i zupčaste letve NE UTJEČE na parametre gibanja. Sa stanovišta modeliranja, sustav zupčanika sa zupčastom letvom se može promatrati tako da zupčanik ima kontakt sa zupčastom letvom SAMO U JEDNOJ točki, pri čemu ne postoji proklizavanje!!

Zupčasti prijenosnici snage s *rotacijsko-translacijskom pretvorbom gibanja* –Zupčanik sa zupčastom letvom (2),  
engl. *rack and pinion*



Primjer: Na slikama je prikazan dio elektromehaničkog sustava Kolica s Ovješanim Njihalom, KONJ (bez njihala), koji se koristi u LABoratoriju MEhatronike (MELAB) na FER-u u Zagrebu.



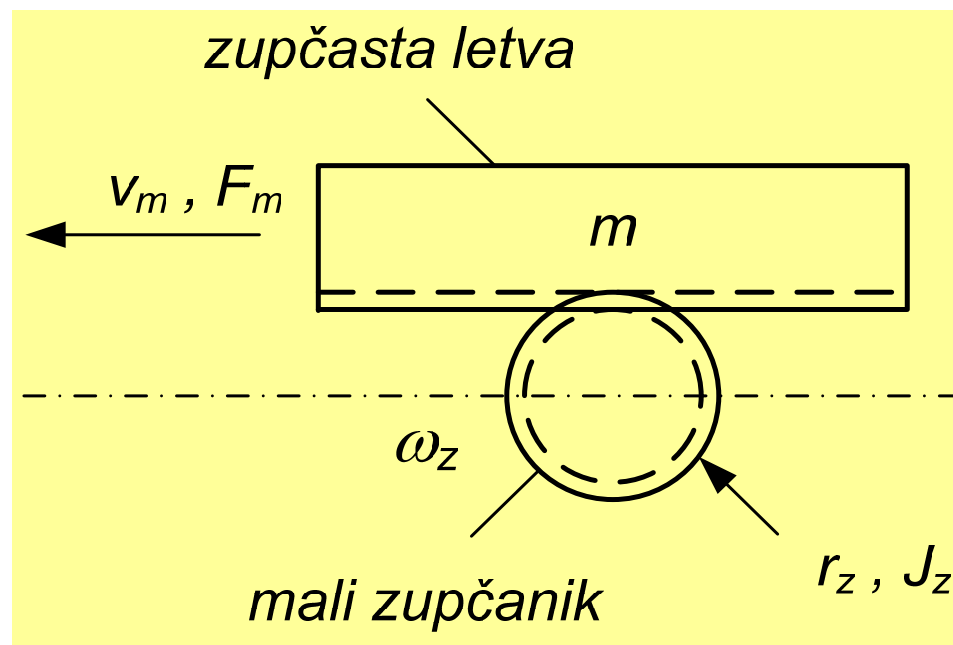
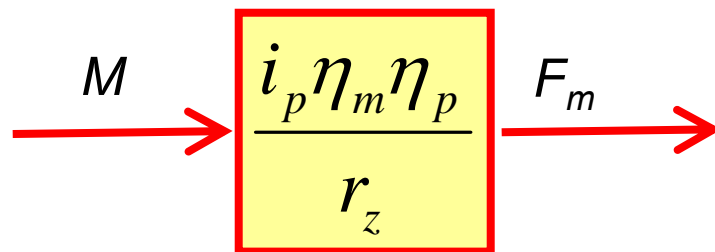
# Zupčasti prijenosnici snage s *rotacijsko-translacijskom pretvorbom gibanja* –Zupčanik sa zupčastom letvom (3), engl. *rack and pinion*

Neka je zupčanik pogonjen motorom korisnosti  $\eta_m$  preko planetnog prijenosnika prijenosnog odnosa  $i_p$  korisnosti  $\eta_p$ . Moment  $M$  koji motor mora osigurati dobije se iz izraza

$$i_p \eta_m \eta_p \omega_z M = F_m v_m$$

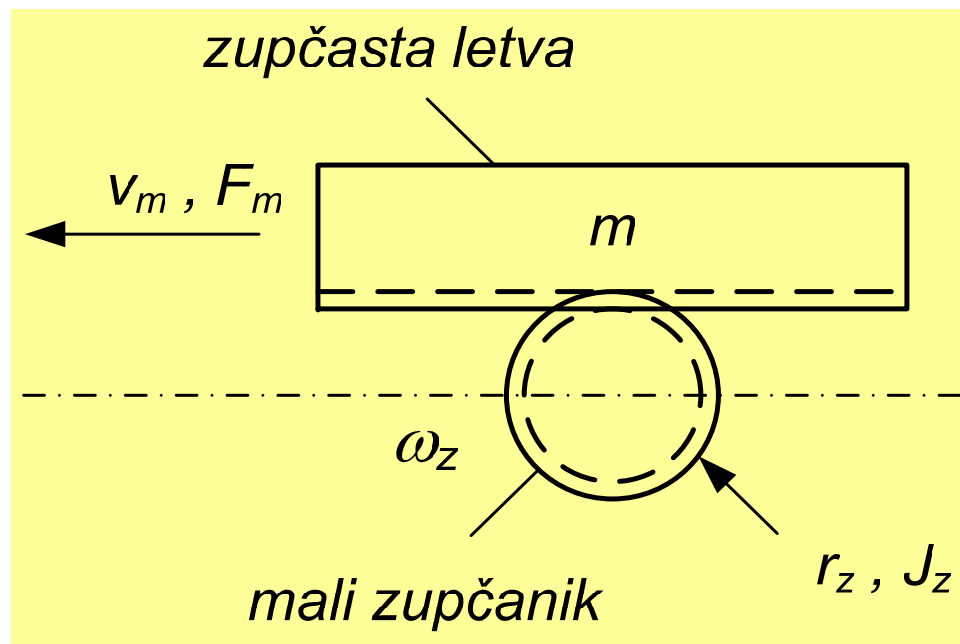
gdje je  $v_m = \omega_z \cdot r_z$ .

Matematički model sustava na slici pogonjen motorom je



Zupčasti prijenosnici snage s *rotacijsko-translacijskom pretvorbom gibanja* –Zupčanik sa zupčastom letvom (4),  
engl. *rack and pinion*

ZADATAK: Pod pretpostavkom da je moment tromosti motora  $J_m$  planetnog prijenosnika zanemariv, uz podatke koji su dani na prethodnom slide-u, izračunajte ukupan moment tromosti sustava zupčanika sa zupčastom letvom (slika dolje) reduciran na stranu motora koji se vrti brzinom  $\omega_z$ .



KRAJ