

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 fetah.kolonic@fer.hr	poslije predavanja
Prof.dr.sc. Nedjeljko Perić	C09-07, ZARI, 612 98 55 nedjeljko.peric@fer.hr	poslije predavanja

Asistenti i tajnice

Asistenti	Ured, e-mail	Konzultacije
Dr.sc. Damir Sumina	C04-13, ZESA alen.poljugan@fer.hr	Utorkom 13-14
Martina Kutija, dipl.ing.	C05-10, ZESA martina.kutija@fer.hr	Utorkom 13-14
Vlaho Petrović, dipl.ing.	C09-05, ZARI vlaho.petrovic@fer.hr	Utorkom 13-14

Administrativne tajnice	Ured, telefon, e-mail	Konzultacije
Gđa. Spomenka Perkušić	C04-07A, ZESA spomenka.perkusic@fer.hr	Po,Sr,Pe 10-10:15
Gđa Blanka Gott	C09-05, ZARI blanka.gott@fer.hr	Po,Sr,Pe 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 ispiti
- 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 i na adresu damir.sumina@fer.hr
- Završni ispit se organizira kao pismeni i nosi maksimalno **42 boda**

CILJ: Što bi trebali naučiti u ovom kolegiju – pregled sadržaja 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 s 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

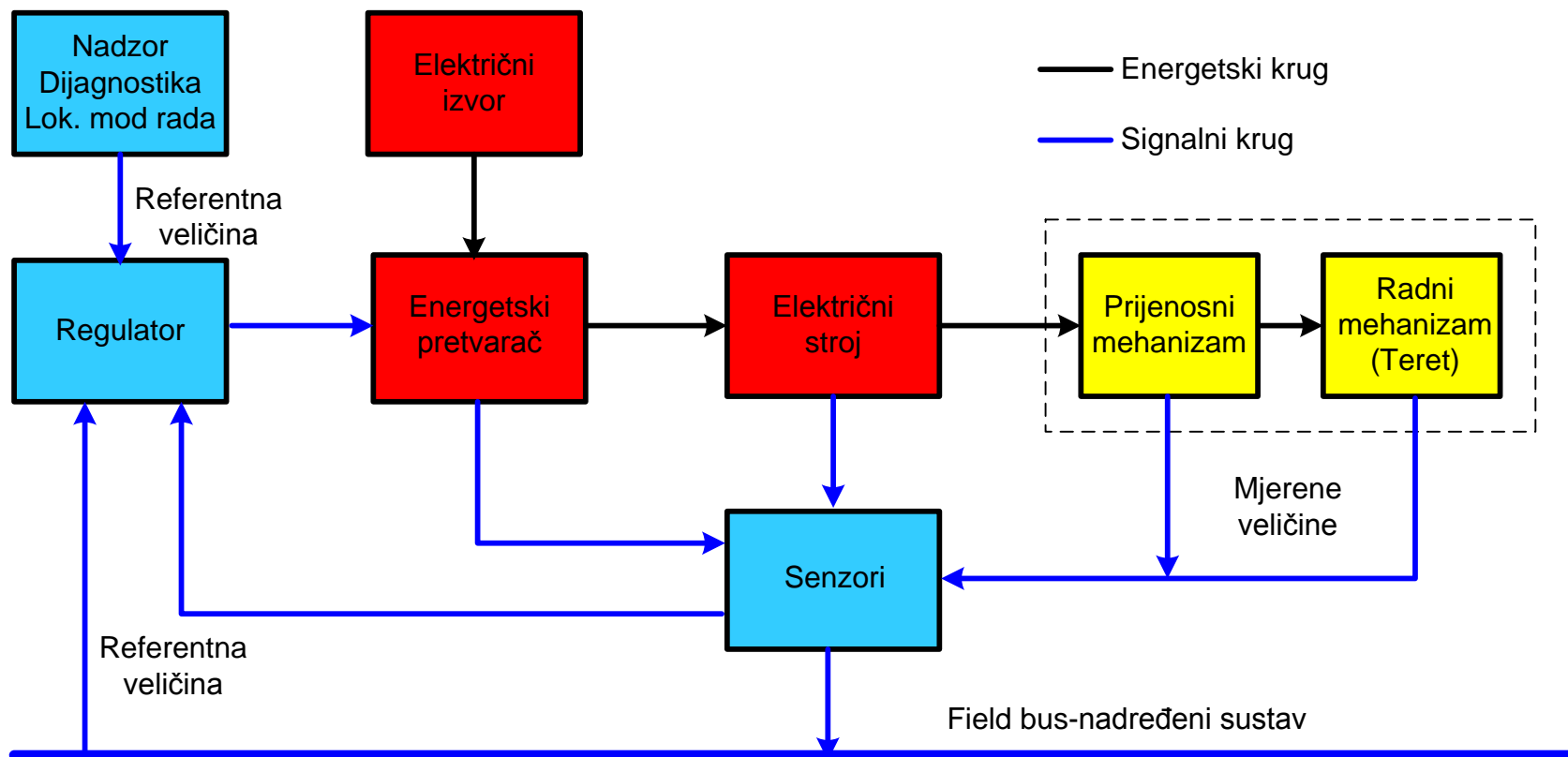
SVRHA: Što se postiže stečenim znanjima na ovom kolegiju?

- Važnost poznavanja elektromotornih pogona je očita. Zastupljeni su u maksimalnoj mjeri u industriji (transport ljudi i materijala, proizvodni procesi). **Stečena znanja na ovom području osiguravaju širok raspon područja budućeg rada nakon završetka studija**
- **Razvoj emp-a ujedno podstiče i razvoj drugih područja** (primjer učinske elektronike i njenog utjecaja na razvoj reguliranih emp-a), 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,...)**

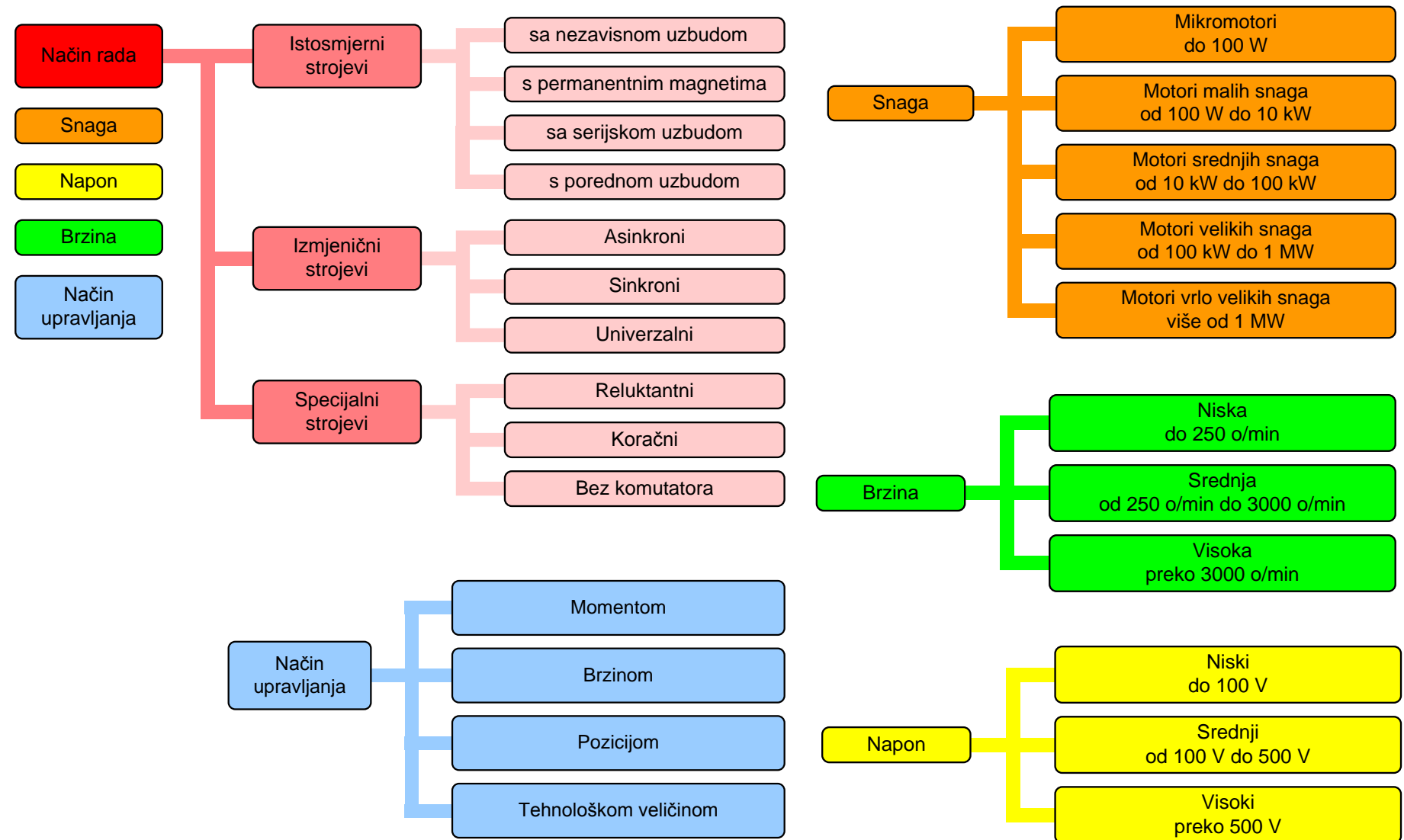
Što je elektromotorni pogon (**EMP**)

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

UEMP- blokovska struktura



UEMP (klasifikacija električnih strojeva)

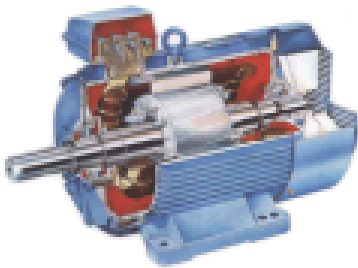


UEP (multidisciplinarnost)

Koja znanja su potrebna za područje UEP-a (pogledati blokovsku strukturu):

- 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

UEP - multidisciplinarnost



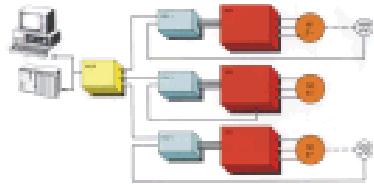
Električni strojevi



Učinski pretvarači



Senzori



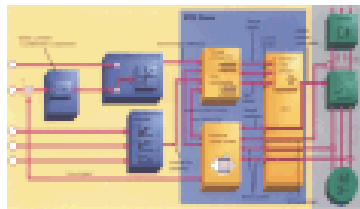
Simulacija



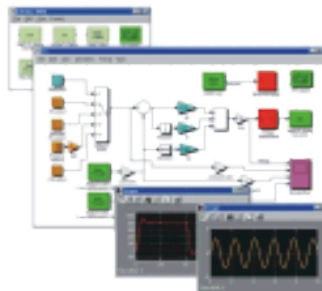
Mjerna tehnika



Električni krugovi



Teorija regulacije
(reg. algoritmi)



Modeliranje



Tehnološki
proces

UEP

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

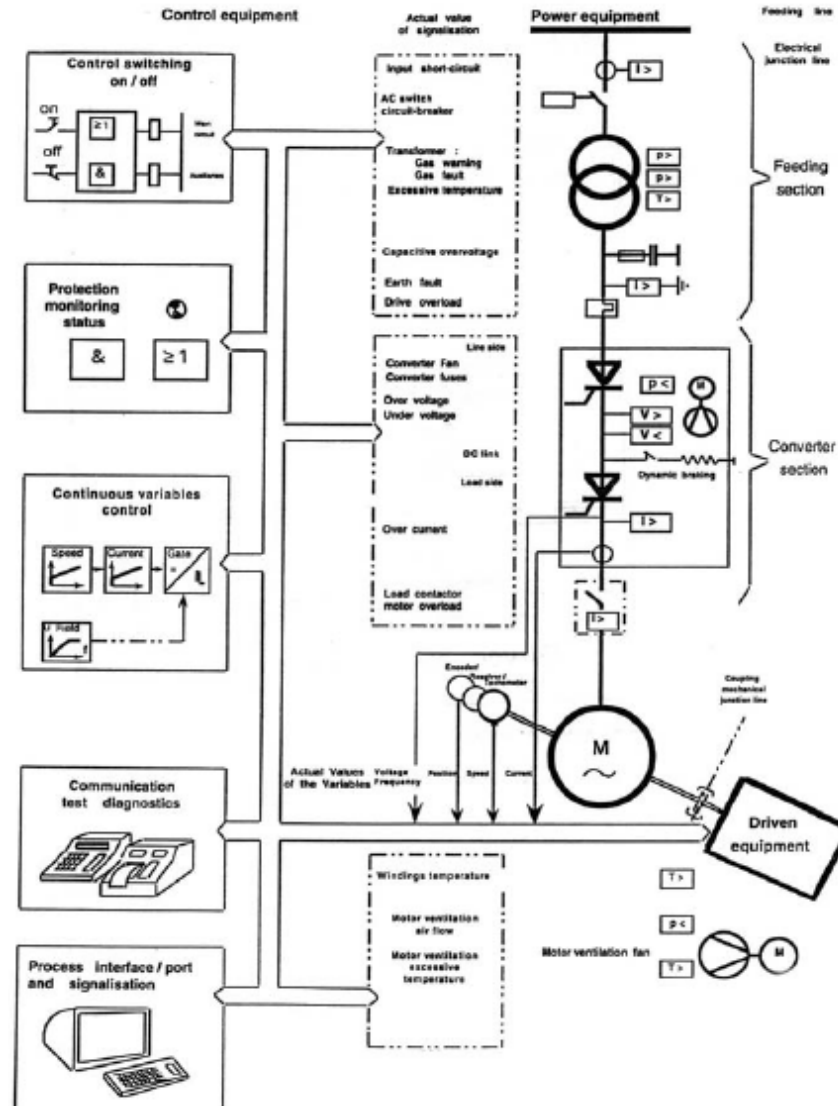
UEMP

- **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 strojevima*. 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 (problem robusnosti!)

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.“

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

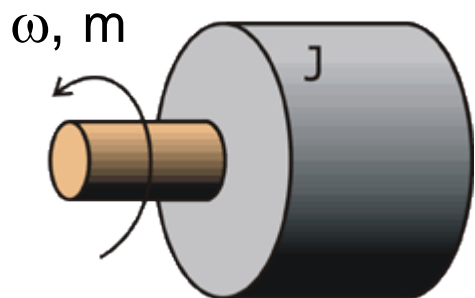
Ekvivalentan izraz vrijedi za rotacijsko gibanje, pri čemu je J moment tromosti a m_u je moment ubrzanja

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

Mehanički dio emp-a

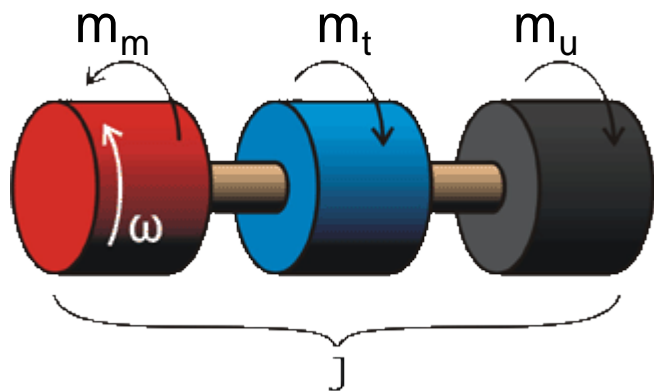
Kinematika rotacijskog i translacijskog gibanja

- **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 (**moment tromosti, J**) opire promjeni brzine gibanja



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

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

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

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

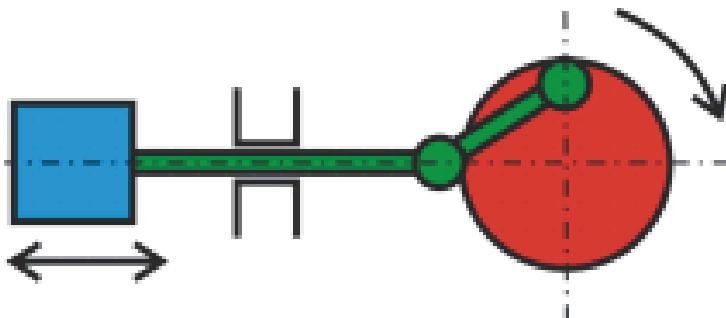
$$m_u = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

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

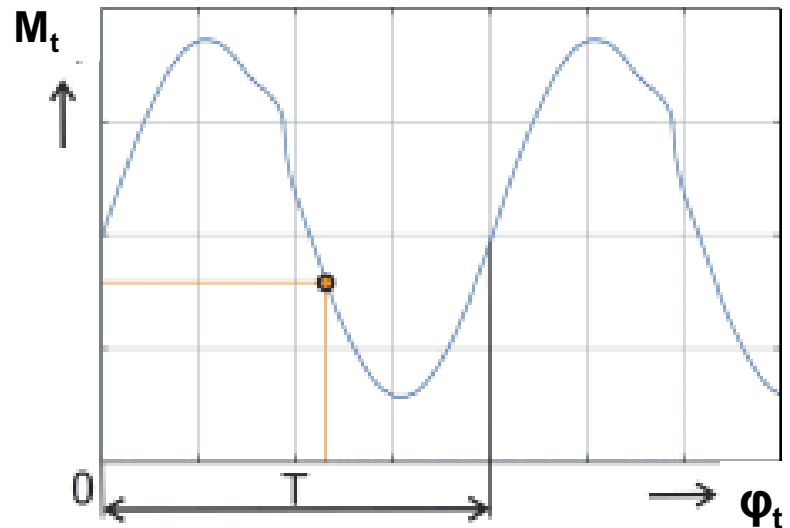
Mehanički dio emp-a

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,...

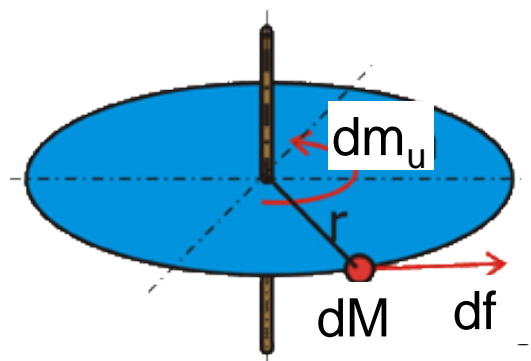


Moment tromosti (inercije)

- Iz prethodne analize slijedi

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

- Definicija: *Moment tromosti je mjera otpora tijela promjeni kutne brzine*
- Moment inercije I (J) ovisi o raspodijeljenosti (distribuciji) masa u rotirajućem sustavu. *Što su raspodijeljene mase dalje od centra rotacije, moment tromosti je veći* (vidi izvod dolje!!!).
- 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:



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

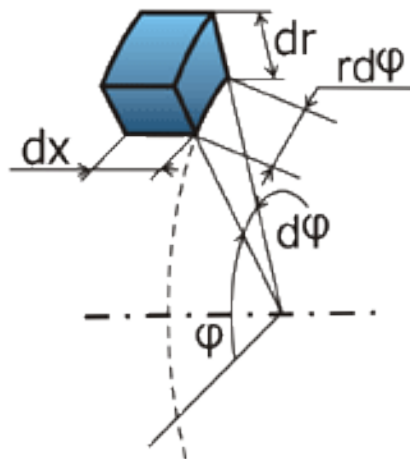
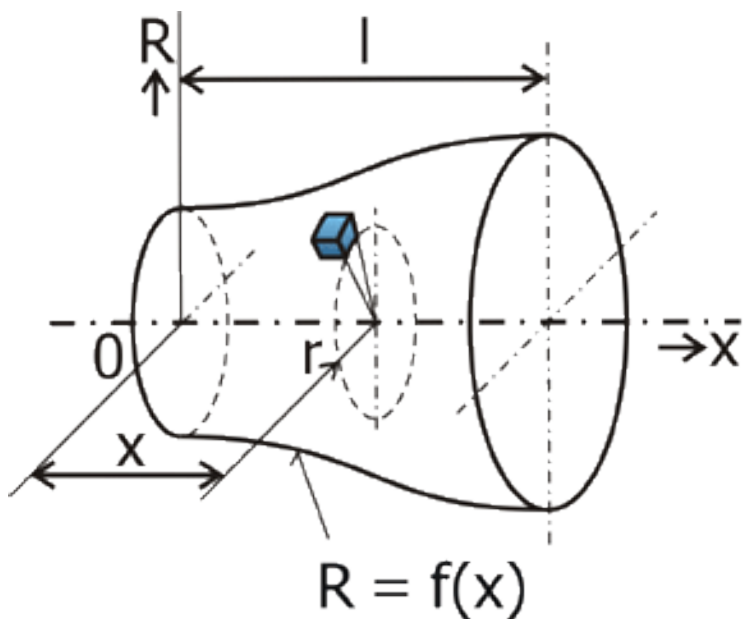
$$m_u = \int dm = \int_0^M r^2 \frac{d\omega}{dt} dM$$

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

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

Mehanički dio emp-a

Moment inercije 3D tijela (izračun)



$$dM = \rho dV$$



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

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

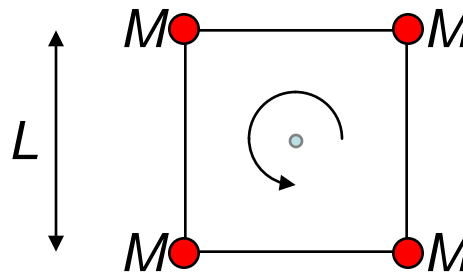
$$J = \rho \int_0^l dx \int_0^{f(x)} dr \int_0^{2\pi} r d\varphi$$

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)

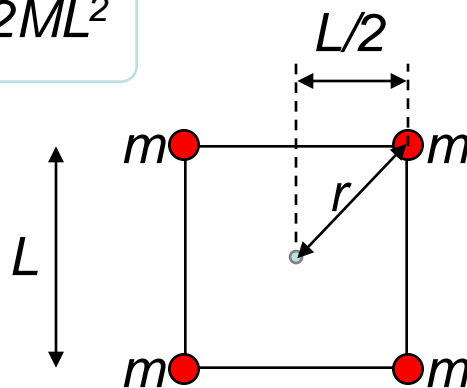
- Računanje razmaka masa od središte rotacije

$$r^2 = 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 = \frac{L^2}{2} \quad \text{Korištenjem Pytagorinog teorema slijedi}$$

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



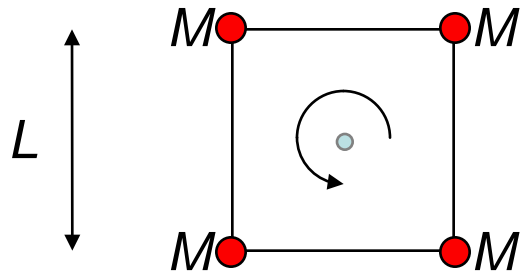
$$J = 2ML^2$$



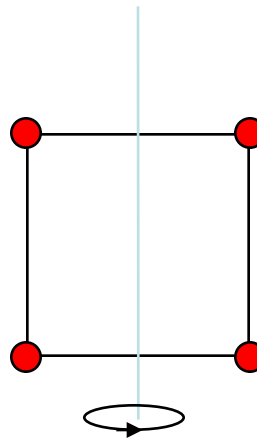
Izračun momenta tromosti (zaključak)

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

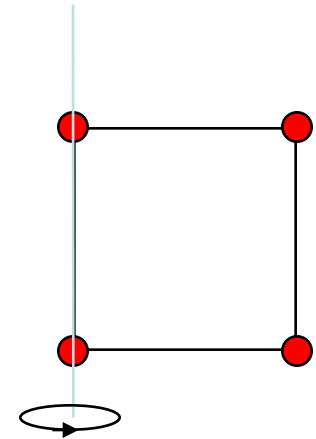
$$J = 2ML^2$$



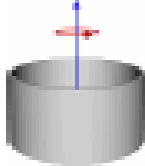
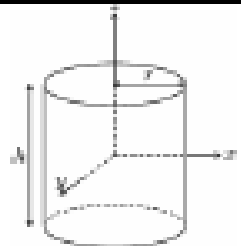
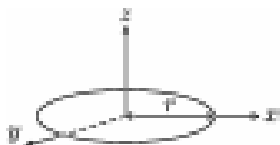
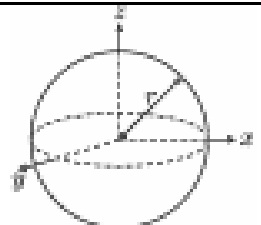
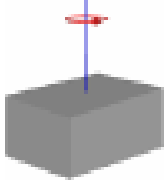
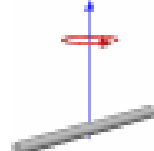
$$J = ML^2$$



$$J = 2ML^2$$



Momenti inercije

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

NAPOMENA:

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

Teorem o paralelnim osima rotacije (Steinerov poučak)

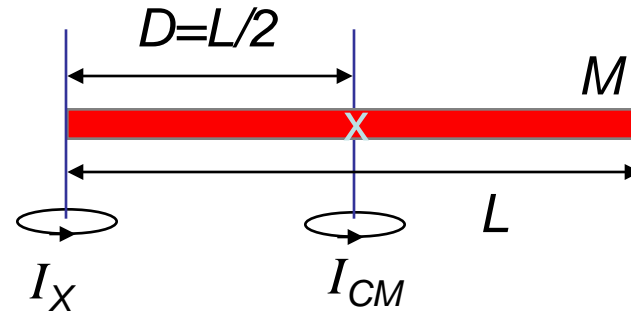
- Pretpostavimo da je moment tromosti krutog tijela mase M oko osi rotacije koja prolazi kroz centar mase, J_{CM} , POZNAT.
- U tom se slučaju moment tromosti tog istog tijela **oko osi rotacije koja je paralelna s osi kroz centar mase J_x** i udaljena od njega za iznos D može izračunati pomoću formule:

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

- 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

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

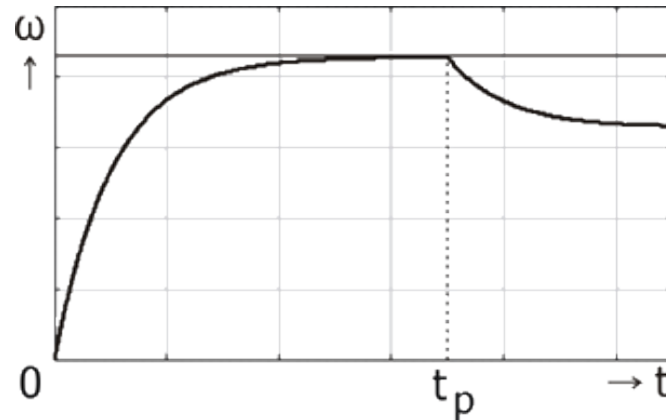
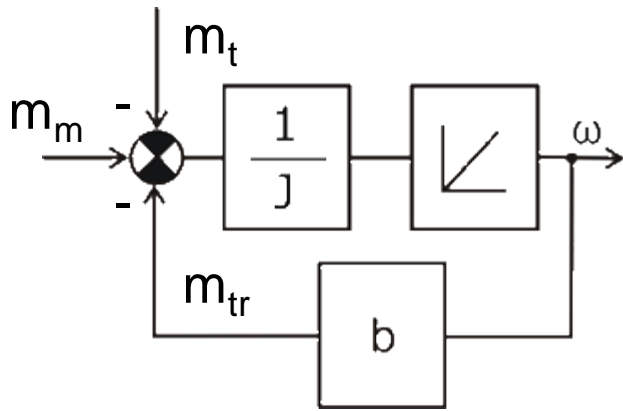
- Slijedi

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

Dinamička jednađžba emp-a

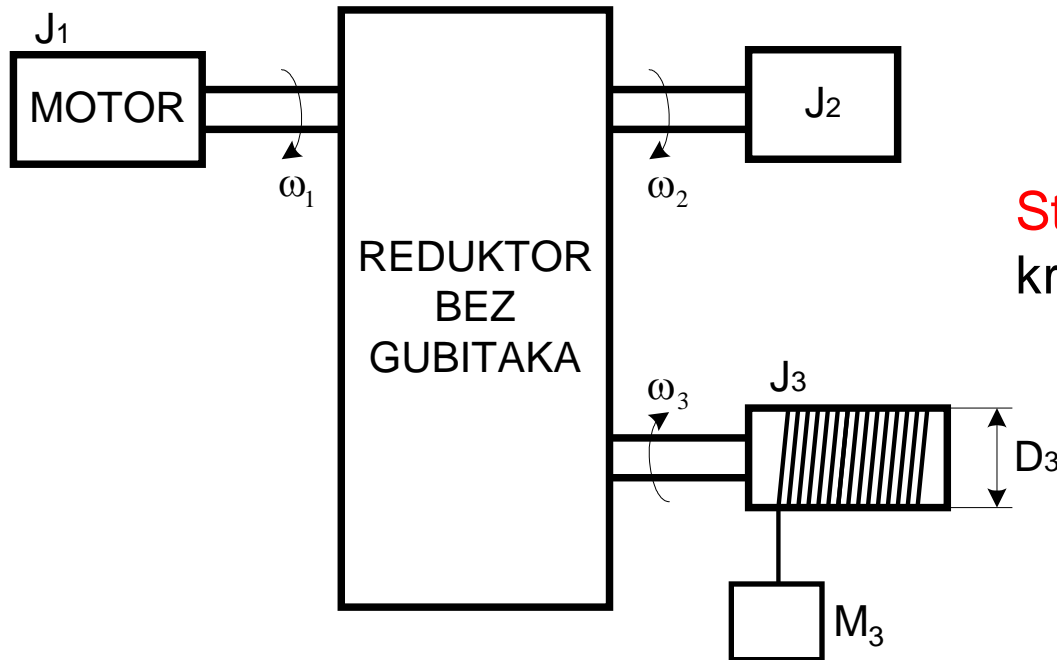
Neka je pogonski stroj momenta tromosti J_m mehanički kruto povezan s radnim mehanizmom (teretom $m_t = \text{konst} = M_t$), momenta tromosti J_t . Neka je ukupno trenje u ležajima m_{tr} viskoznog karaktera. Treba opisati dinamičko ponašanje takvog emp-a.

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



Odziv brzine vrtnje (vanjska petlja) na ref.vr. brzine i skokovito opterećenje m_t i trenutku t_p

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 (gdje nastaju gubici?)

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 η_{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

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

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

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

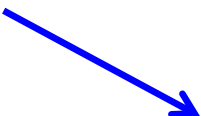
$$J'_3 = J_3 \cdot \left(\frac{\omega_3}{\omega_1} \right)^2$$

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

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

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

Ukupna zamašna masa
reducirana na osovinu
motora iznosi:



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

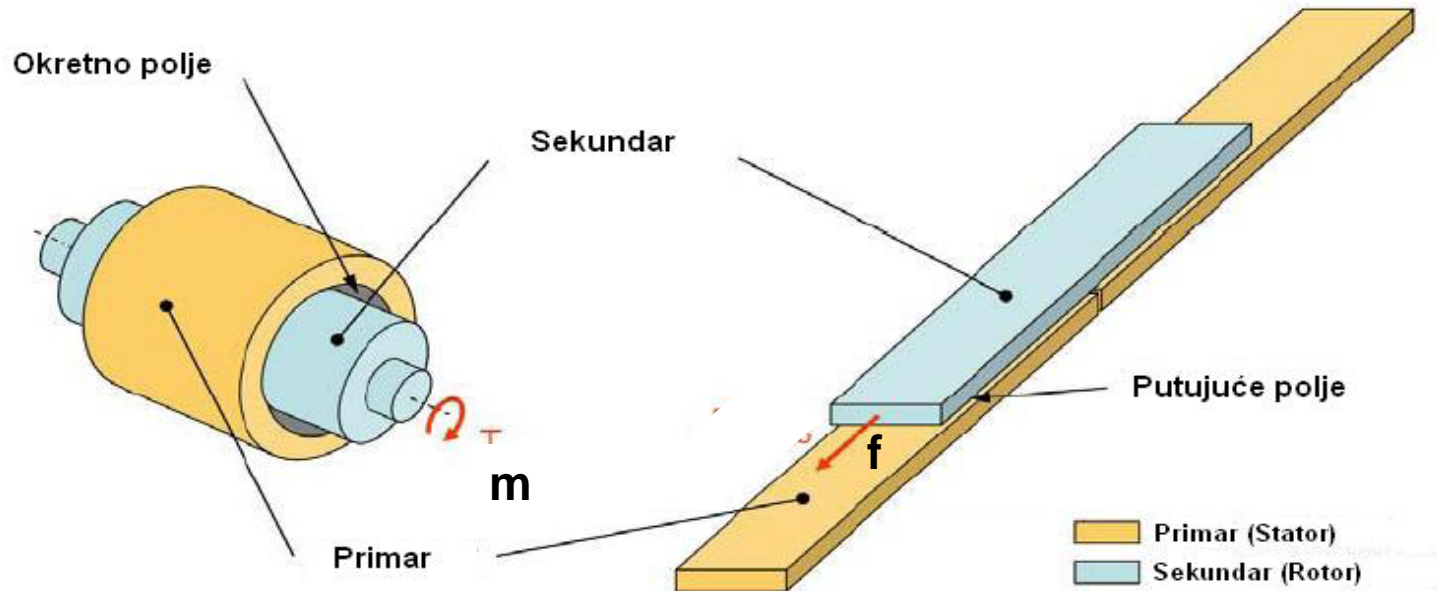
Ukupni dinamički moment motora je u ovom slučaju definiran kao

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

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



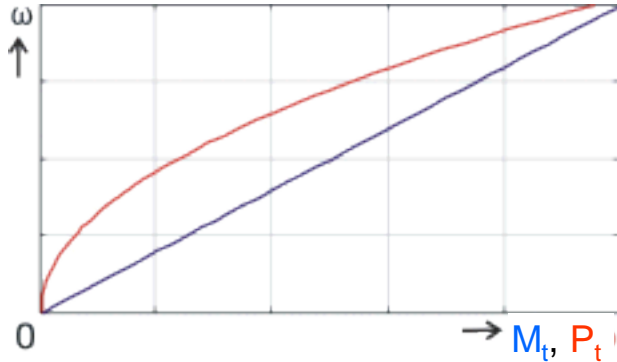
- Sve važnije **formule za translacijsko i rotacijsko gibanje** dane su u tablici koja slijedi

Translacijsko (linearno) gibanje / Rotacijsko gibanje

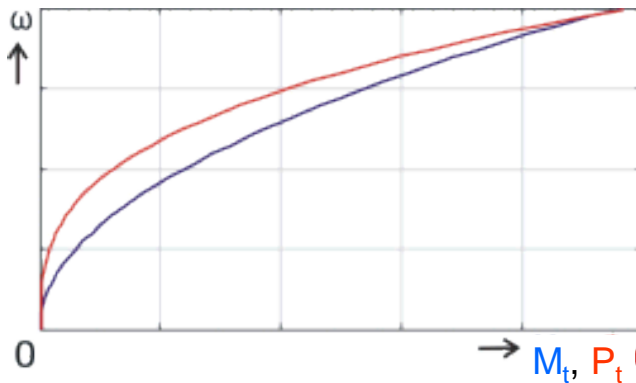
Translacijsko gibanje			Rotacijsko gibanje		
put	s	m	kut	φ	rad
brzina	v	m/s	kutna brzina	ω	rad/s
ubrzanje	a	m/s ²	kut. ubrzanje	α	rad/s ²
masa	M	kg	mom.tromosti	$J (I)$	kg·m ²
sila	$f = M \cdot a$	N	moment sile	$M = J \cdot \alpha$	N·m
kol. gibanja	$M \cdot v$	kg·(m/s)	zamah	$J \cdot \omega$	kg·(m ² /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, viskozno trenje, $M_t \approx \omega$; $P_t \approx \omega^2$

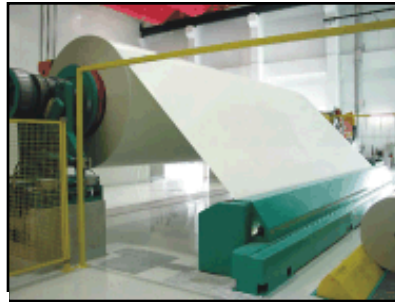
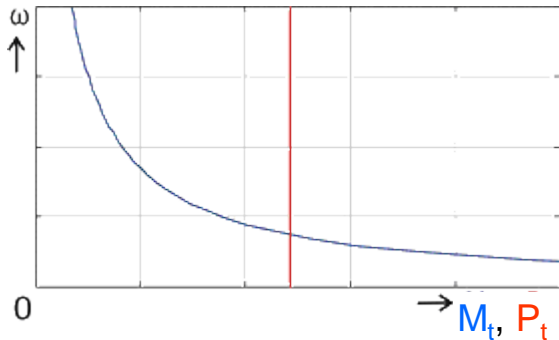


Tračni pogoni (bez zanemarenja trenja, ventilatori, $M_t \approx \omega^2$; $P_t \approx \omega^3$

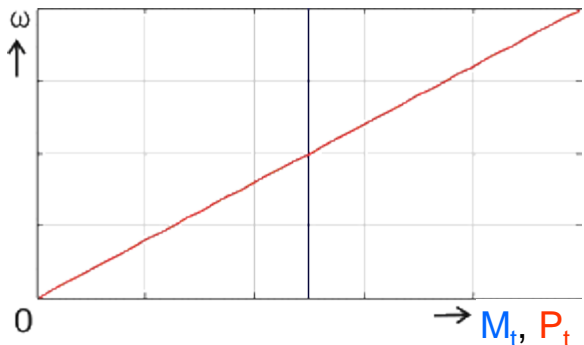
Mehanički dio emp-a

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.



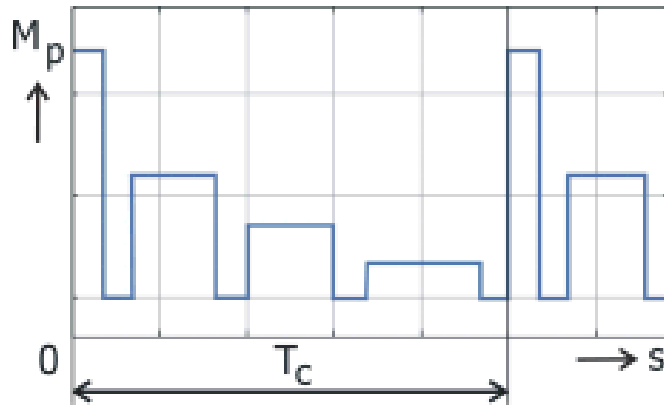
Namatači (papirna industrija, aluminijske folije,.. $M_t \approx 1/\omega$; $P_t = \text{konst}$



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

Mehanički dio emp-a

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



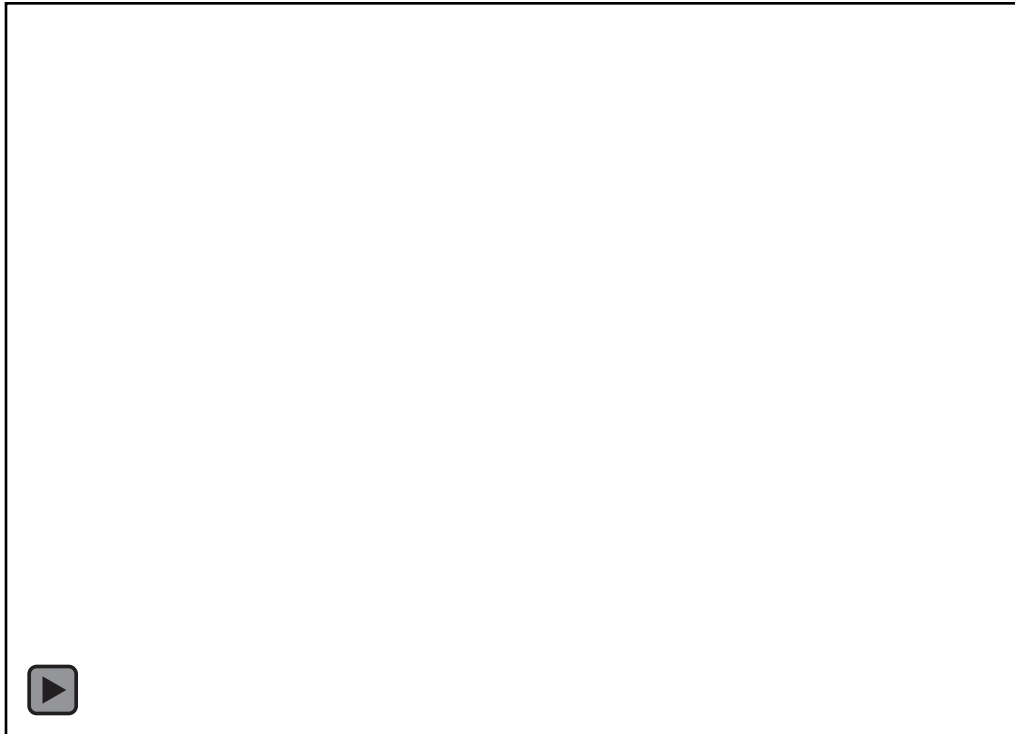
Tzv. *blooming* pogoni (valjaonice), prese, škare kranovi, liftovi, **radi se o (vremenski) periodičkim opterećenjima**

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

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

- Statička stabilnost je u stvari **dinamički problem**. Hoće li se u pogonskoj radnoj točki pogon održati, ovisi o dinamičkoj analizi koja se sastoji u razmatranju ponašanja emp-a nakon djelovanja smetnje.
- Do statičke stabilnosti se dolazi razmatranjem **odnosa između mehaničkih karakteristika stroja i radnog mehanizma**
- Šira definicija stabilnosti bi se mogla izraziti na ovaj način: **Kada stabilni emp nakon djelovanja smetnje promijeni svoju radnu brzinu, onda će se on nakon prestanka djelovanja smetnje vratiti na vrijednost brzine koju je imao prije djelovanja te smetnje.**
- Smetnje mogu biti različite: mogu dolaziti s mrežne strane (**promjena napona, frekvencije, impedancije**), od strane radnog mehanizma (**kratkotrajna opterećenja, udarci tereta**) ili pak mogu dolazi iz radne okoline (**udarci vjetra, njihanje broda..**).

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

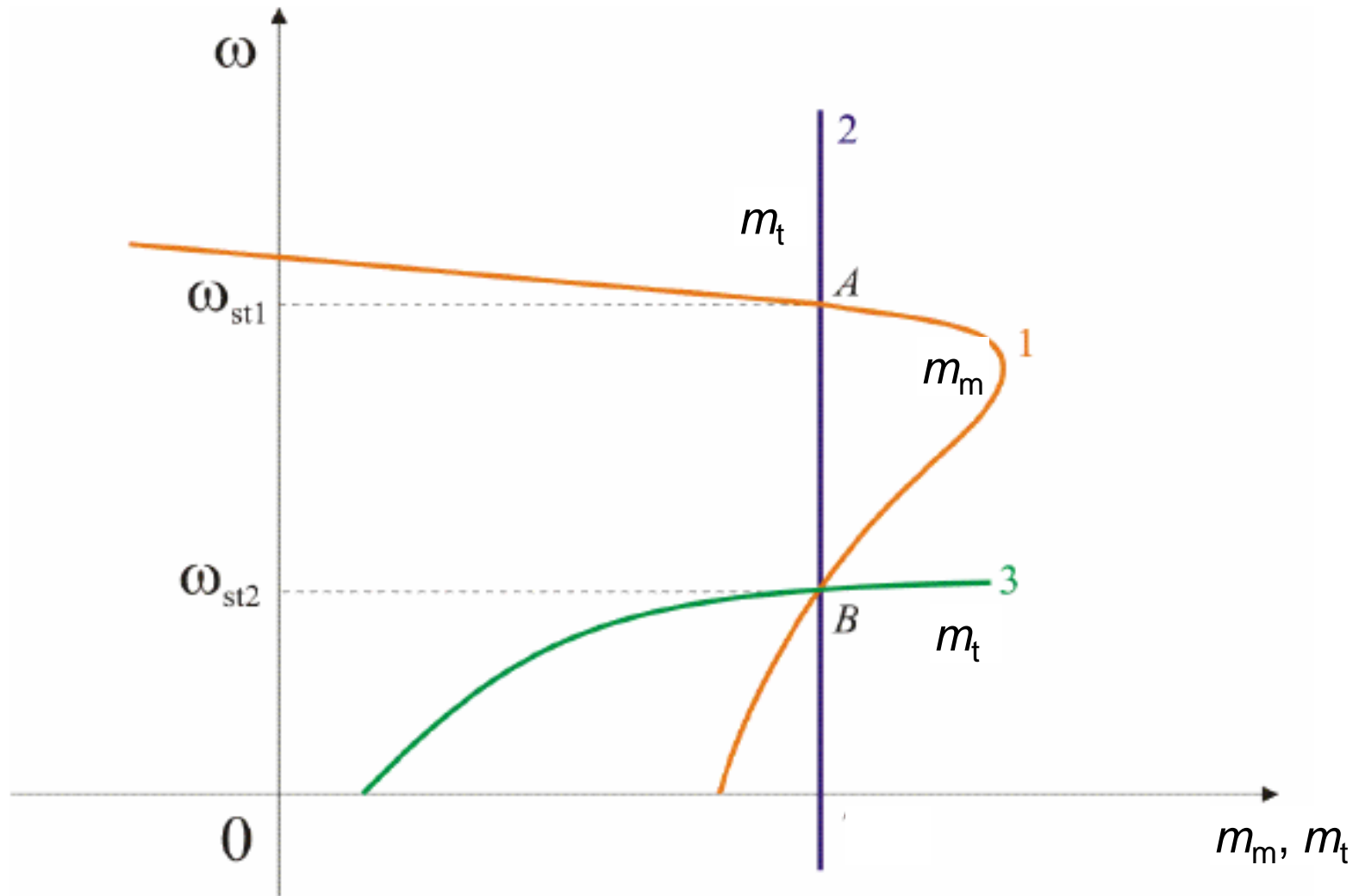
$$\frac{m_d}{\Delta\omega} < 0$$

- Drugim riječima, promjena brzine vrtnje od te radne točke i dinamički moment koji pri tome nastane, moraju imati suprotne predznake !!
- Stabilnost radne točke može se definirati **preko nagiba tangenti povučenih u presjecištu (radnoj točki) između karakteristike momenta stroja i momenta radnog mehanizma** (pogledati [2], str. 156-158)
- Pri tome se mora jednoznačno odrediti **smisao kutova što ih zatvaraju tangente s pozitivnim smislom ordinate** (kutne brzine)

Stabilnost radne točke

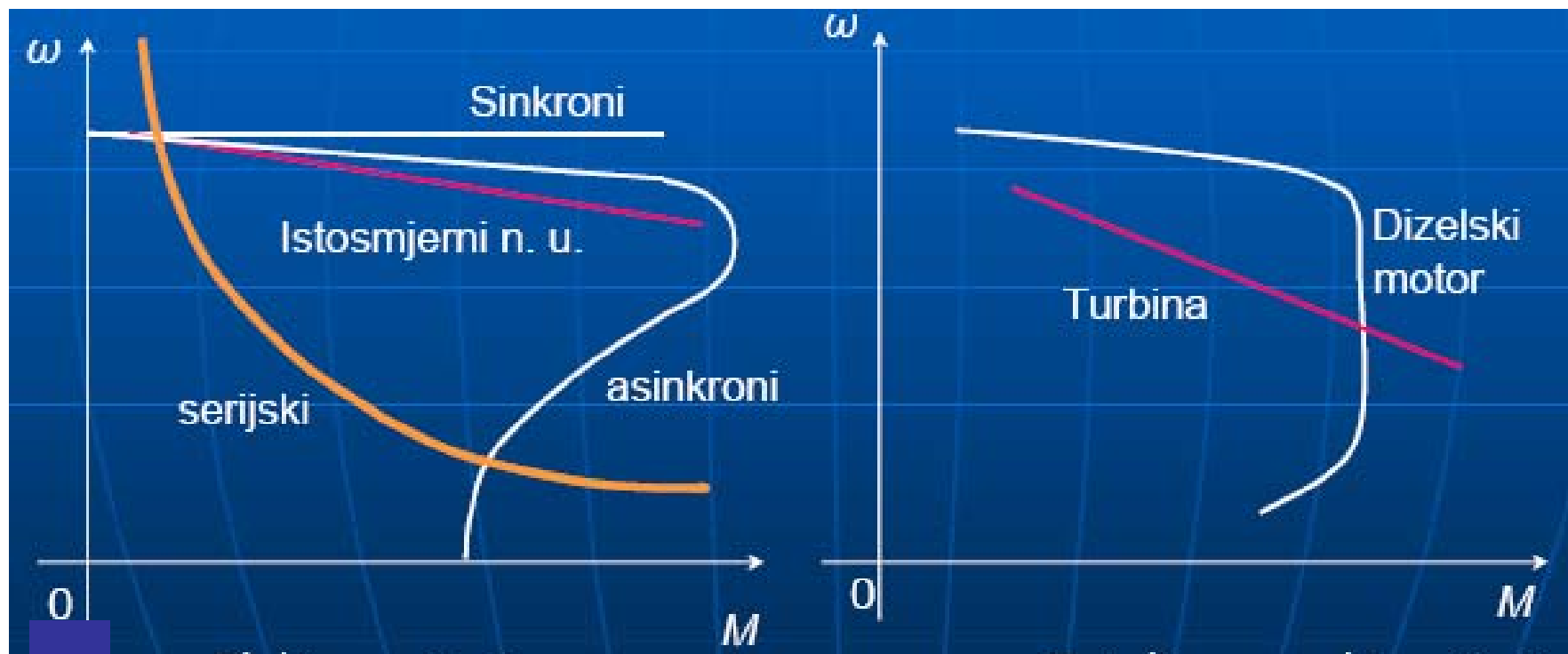
- Radna točka **A** na slici je **stabilna**, jer ako poremećaj izaziva efektivno povećanje opterećenja (karakteristika 2), dolazi do smanjenja brzine vrtnje.
- Radna točka **B** je **nestabilna** ako radni mehanizam ima karakteristiku oblika **2**, a postaje **stabilna** ako radni mehanizam ima karakteristiku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

Mehaničke karakteristike radnih mehanizama



Karakteristike nekih STROJEVA

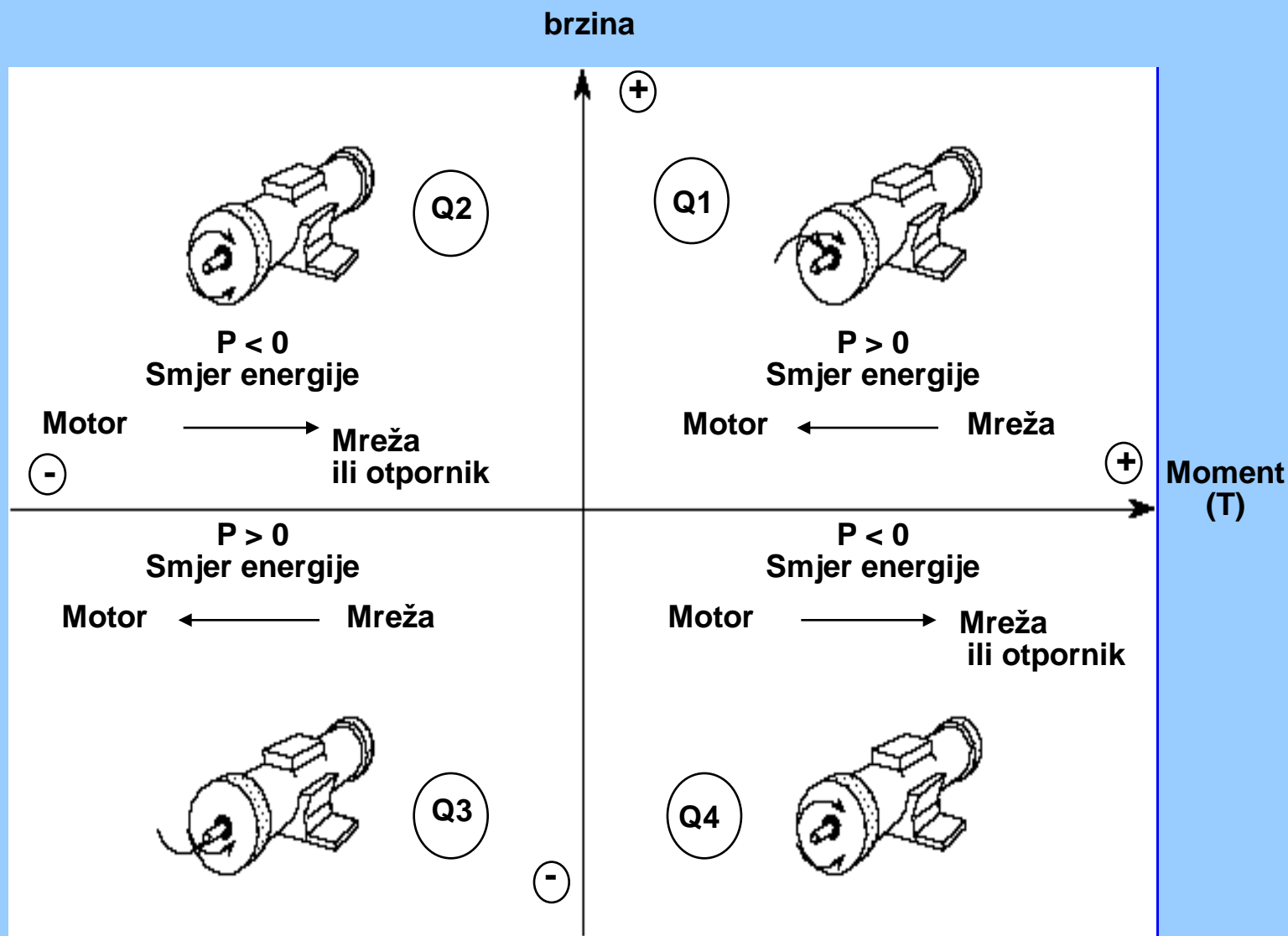
$$M_m = f(\omega)$$



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**

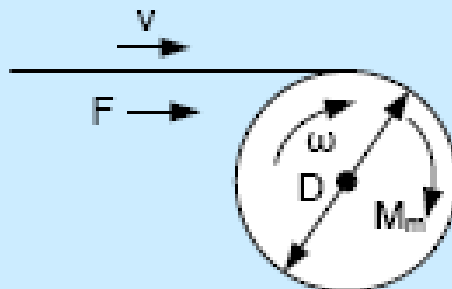


Mehanički dio emp-a

Primjer namatača aluminijske trake

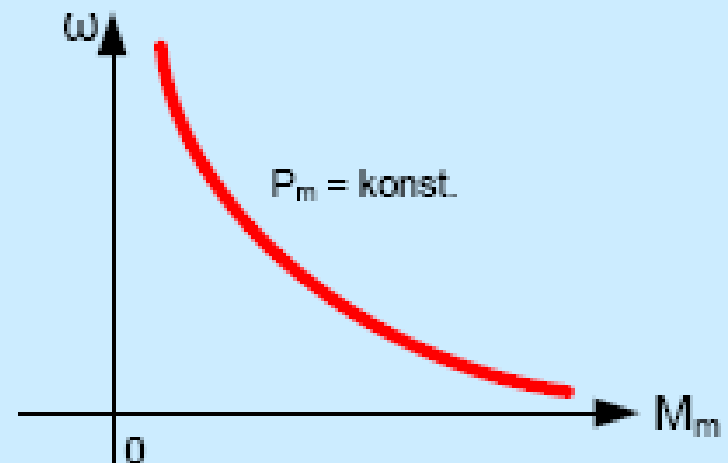
Pogonski stroj mora osigurati konstantnu brzinu v i silu F namatanja trake. S povećanjem promjera bubnja pada kutna brzina ω ($v=\omega R=\text{konst}$) a moment stroja se mora povećati da bi se kompenziralo povećano opterećenje bubnja ($m_t=FR$). Radna točka pogona je na crvenoj krivulji)

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 se može osigurati ova tehnološka zadaća!

OSNOVNI POJMOVI PRIJENOSA SNAGE I GIBANJA (1)

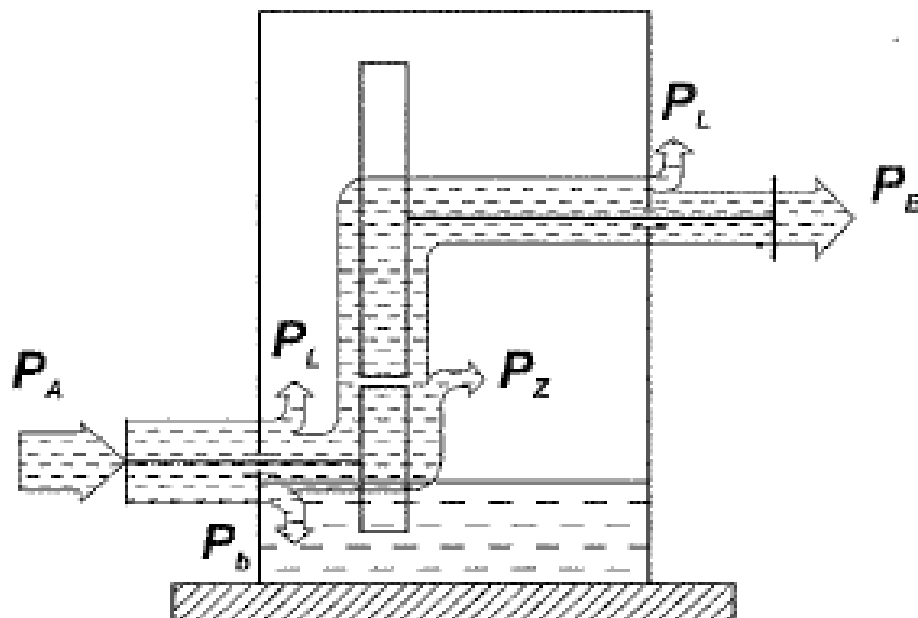
- Vidjeli smo u strukturnom blokovskom dijagramu emp-a da se **električna snaga u emp-u** prenosi **s električnog stroja na radni mehanizam** (teret)
- Pri tome emp može sadržavati **razne tipove opteretnih mehanizama** kao što su **pumpe, kompresori, ventilatori, škare, sjekači, vučna vozila,...**
- Zbog **prilagodbe parametara mehaničke snage (brzine i momenta)** i tipa gibanja (translacijskog, rotacijskog) koju zahtijeva radni mehanizam, koriste se različiti tipovi prijenosnih mehanizama (**zupčasti prijenos, remenski prijenos, tarni prijenos,...**), spojke (hidrauličke, elektromagnetske)
- U nekim su primjenama emp-a potrebne **niže radne brzine vrtnje i veliki radni momenti** (električna vuča, manipulatori), a u nekim **više radne brzine vrtnje** (alatni strojevi, centrifugalne pumpe) s **nižim radnim momentima**.
- 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 radnom brzinom je uvijek jeftinije rješenje. Sporohodni motor s visokim radnim momentom i manjim radnim 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 gibanja 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 radnih (nazivnih) brzina uz korištenje multiplikatora.
- Uvođenjem prijenosnika snage i gibanja, mora se računati na gubitke u prijenosu energije s pogonskog stroja na radni mehanizam i taj gubitak se iskazuje uglavnom preko koeficijenta korisnosti (iskorištenja) prijenosa energije, η

OSNOVNI POJMOVI PRIJENOSA SNAGE I GIBANJA (3)

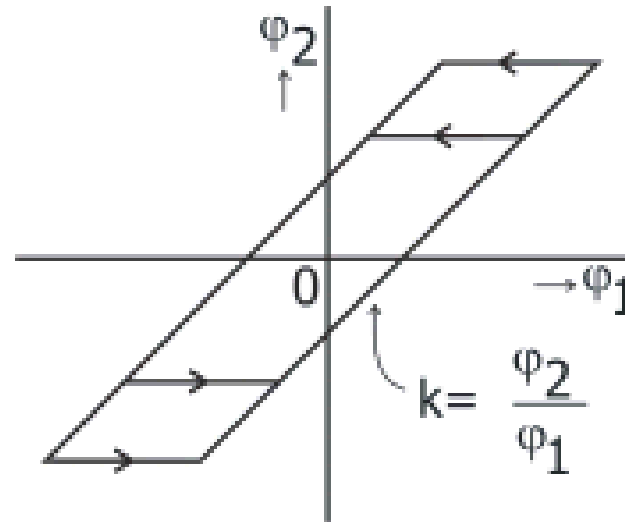
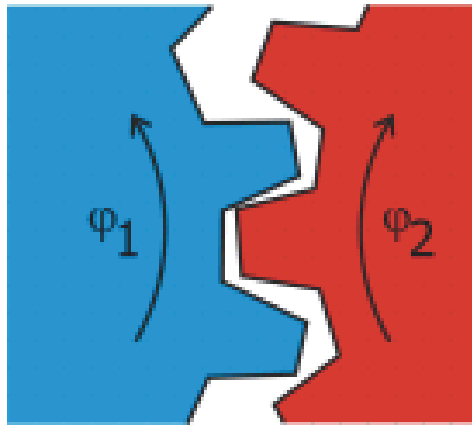
- Npr. za zupčasti prijenosnik su to **gubici ozubljenja P_z** , za remenice su to gubici proklizavanja. Tim gubicima se pridodaju i gubici zbog **tekućinskog trenja u uljima (bućkanje, P_u)**, **trenja u brtvama P_b** i **trenja u ležajevima P_L**
- Ukoliko se radi o *višestupnjevanom prijenosniku*, *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*



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

η_{xy} je stupanj korisnosti pojedinog prijenosničkog para, η_L mjera gubitaka u ležajevima a η_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, [3])

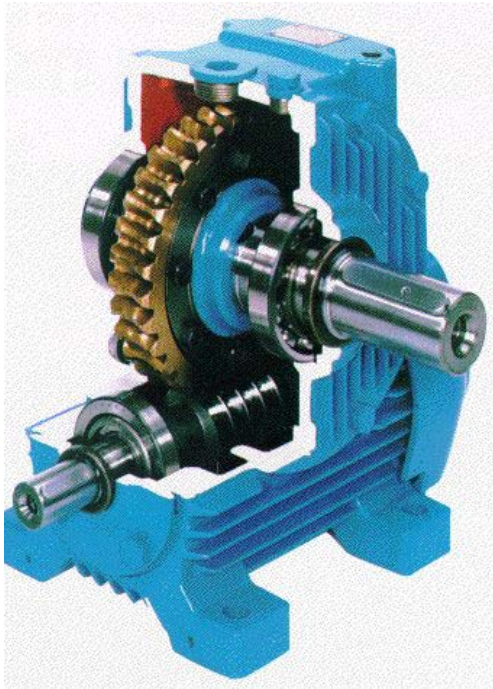
- *Stupanj pretvorbe momenta* je omjer momenata izlazne i ulazne strane prijenosnika. Iz bilance snage prijenosnika $P_2 = \eta P_1$, za jednostupanjski prijenos se dobije

- $M_2 n_2 = -\eta M_1 n_1$ ^{*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 $i = 5...70$

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

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

$z_1 \mapsto$ 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 ?



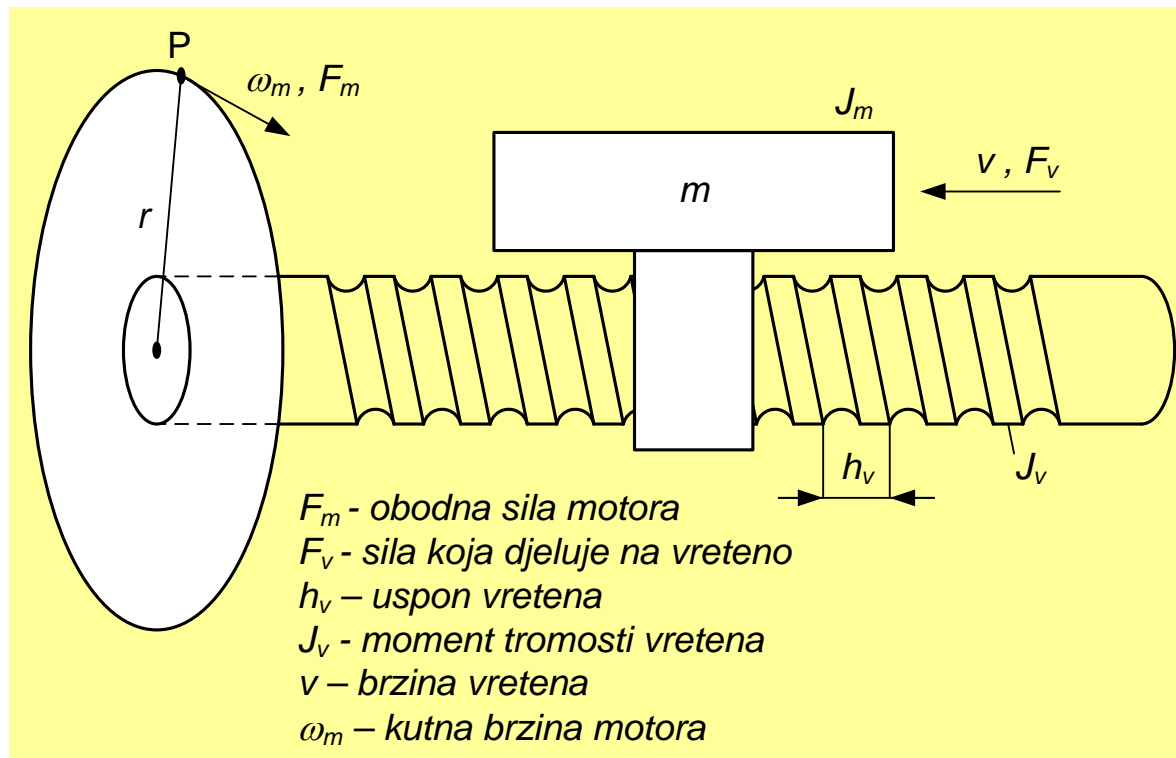
Zupčasti prijenosnici snage s *rotacijsko-translacijskom pretvorbom gibanja* - **Posmični pogon (prigon)** s navojnim vretenom (1). engl. *Lead and Ball screw mechanism*

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)



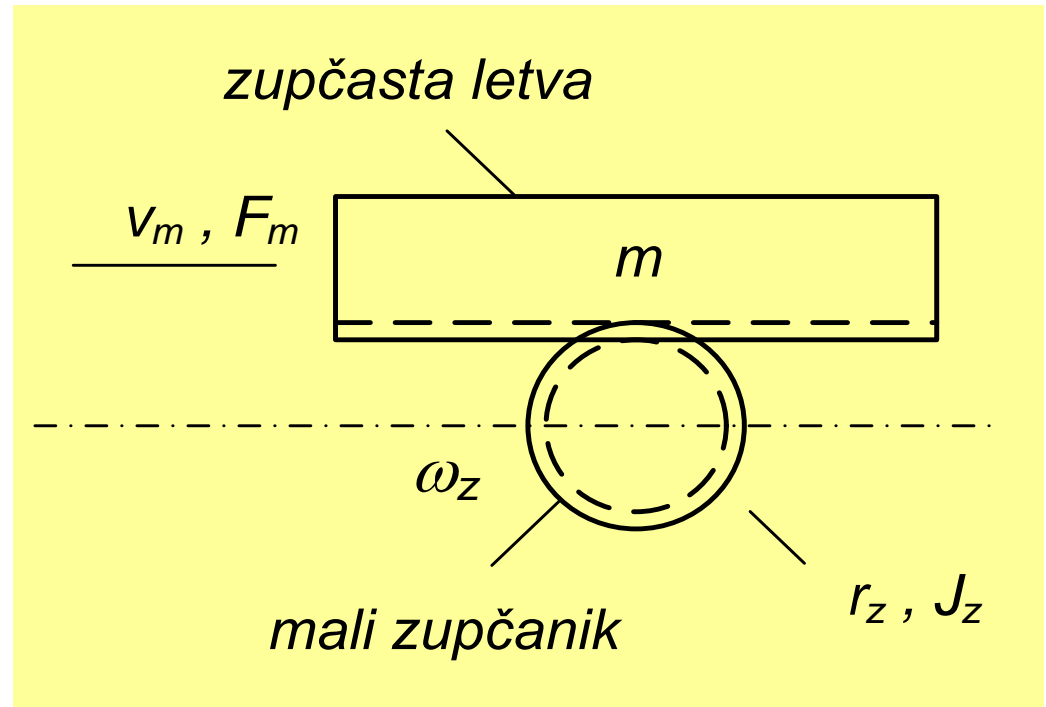
Zupčasti prijenosnici snage s *rotacijsko-translacijskom pretvorbom gibanja* – **Zupčanik sa zupčastom letvom** (1),
engl. *rack and pinion*

Zahtjevi:

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

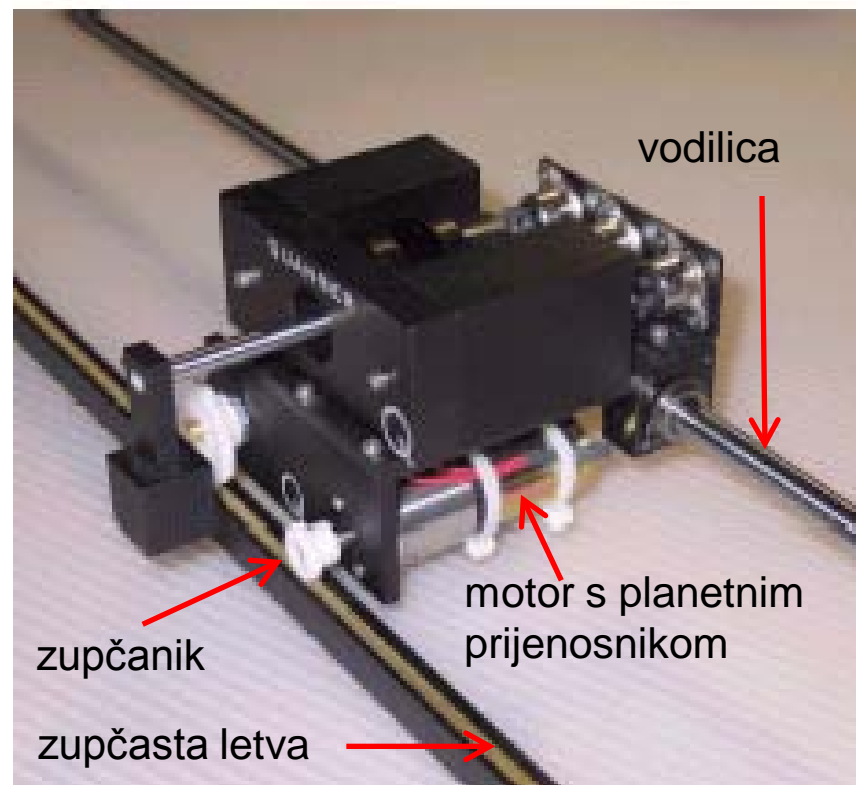
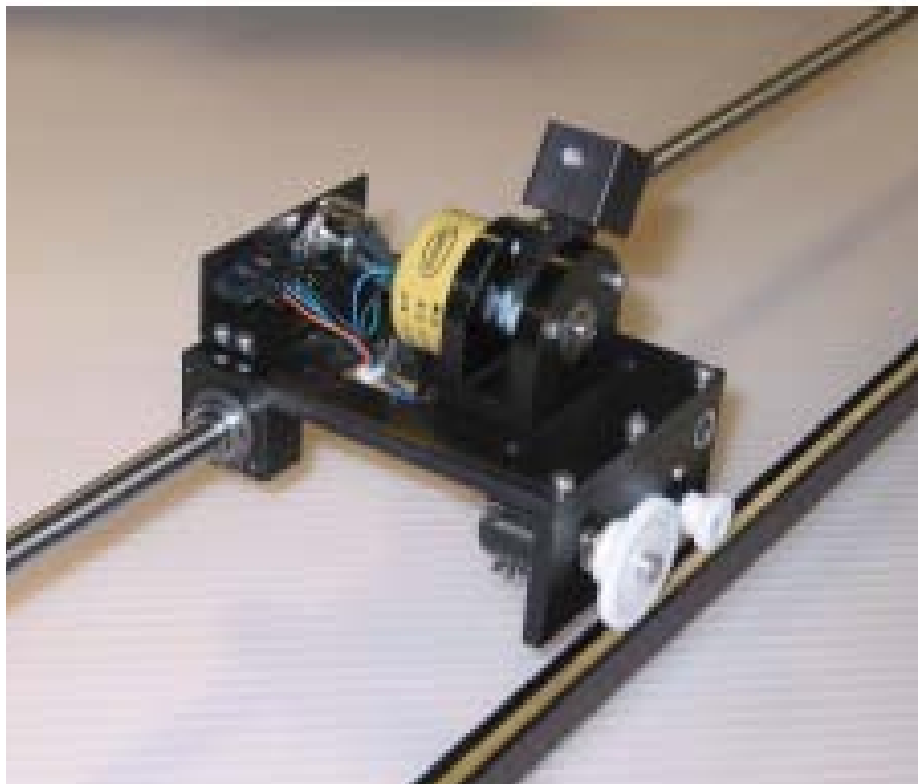
Primjena:

- 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.

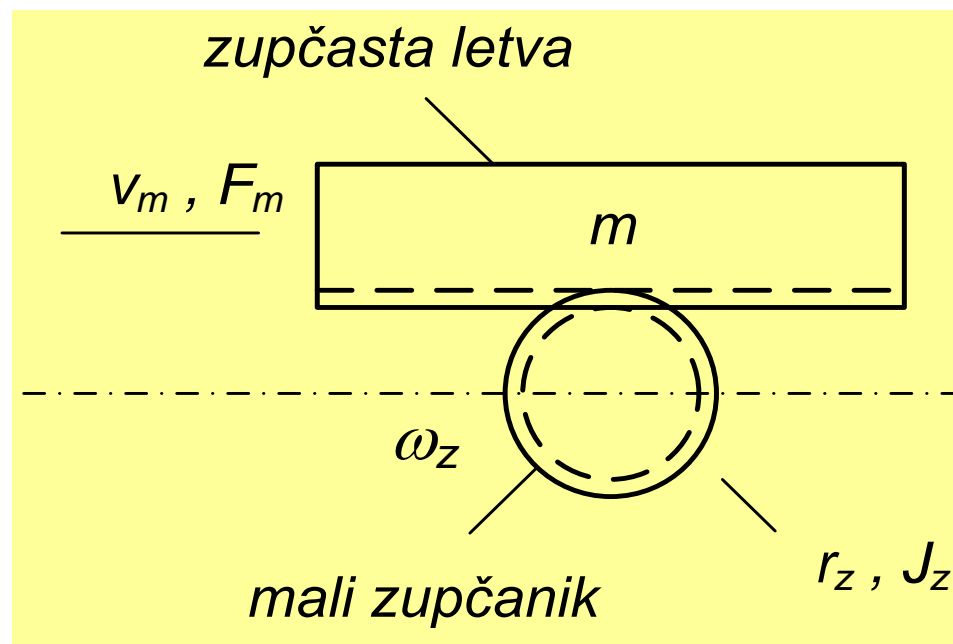
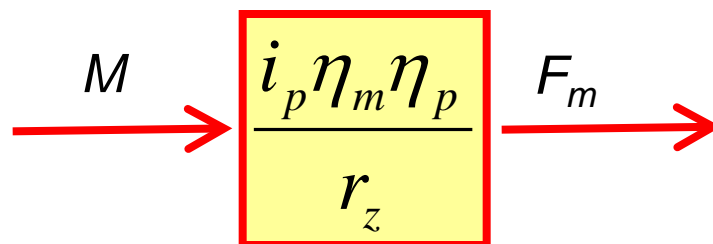
Zupčasti prijenosnici snage s *rotacijsko-translacijskom pretvorbom gibanja* –Zupčanik sa zupčastom letvom (3), engl. *rack and pinion*

Neka je zupčanik pogonjen motorom korisnosti η_m preko planetnog prijenosnika prijenosnog odnosa i_p korisnosti η_p . Moment M koji motor mora osigurati dobije se iz izraza

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

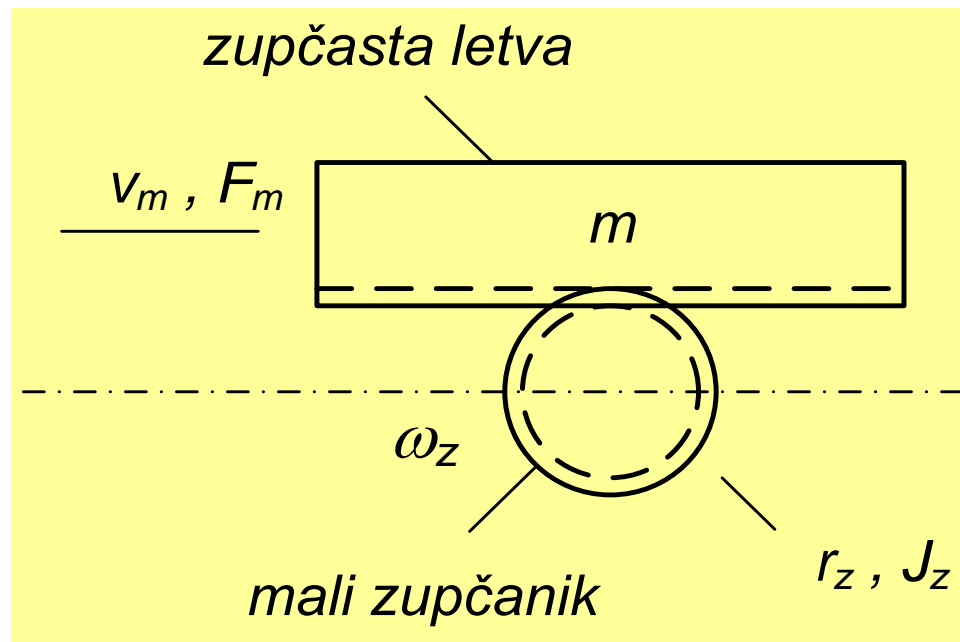
gdje je $v_m = \omega_z \cdot r_z$.

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 ω_z .



LITERATURA

1. W. Leonhard, *Control of electrical drives*, Springer, 1996.
2. B. Jurković, *Elektromotorni pogoni*, Školska knjiga, Zagreb, 1984.
3. F.Kolonić, *Prijenosnici snage i gibanja*, Predavanja iz kolegija Osnove Mehatronike, 2008/2008, web stranice

KRAJ