

# **ELEKTRIČNI POGONI**

Zbrano gradivo  
ELEKTROTEHNIKA / močnostna elektrotehnika

Mladen Trlep

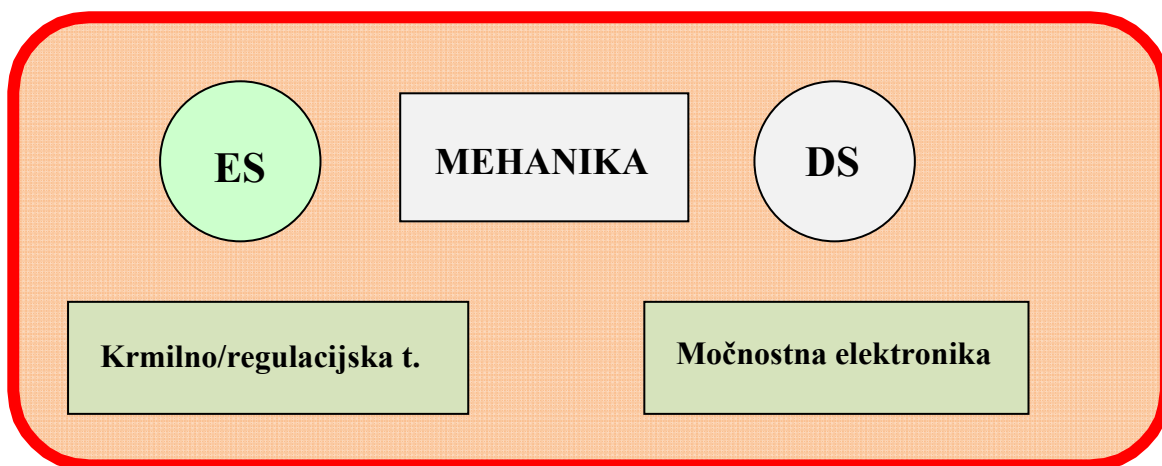
2009/2010

<b>0.</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1.</b>	<b>OSNOVNI POJMI IN DEFINICIJE .....</b>	<b>5</b>
1.1.	KOORDINATNI SISTEM IN VRSTE OBRATOVALNIH STANJ.....	5
1.2.	OSNOVNE KARAKTERISTIKE POGONSKIH STROJEV ( $M-n$ ,oz. $n-M$ ).....	6
1.3.	OSNOVNE KARAKTERISTIKE DELOVNIH STROJEV ( $M-n$ ,oz. $n-M$ ) .....	8
1.4.	OSNOVNE ENAČBE GIBANJA .....	10
1.5.	VRSTE BREMEN .....	14
1.6.	STATIČNA IN DINAMIČNA STANJA POGONA.....	15
1.7.	PODSISTEMI V EP .....	20
1.8.	STATIČNA STABILNOST POGONSKEGA STROJA.....	22
<b>2.</b>	<b>UPORABA ENOSMERNIH MOTORJEV ZA POGONSKI STROJ.....</b>	<b>24</b>
2.1.	OSNOVNE ENAČBE ZA MOTORSKO IN GENERATORSKO OBRATOVANJE .....	26
2.2.	ENOSMERNI MOTOR S TUJIM VZBUJANJEM.....	28
2.2.1	Nastavljanje vrtljajev EM s tujim vzbujanjem.....	30
2.2.1.1	Spreminjanje napetosti $U$ na sponka indukta ( $\Phi_g = \text{konst.}$ ).....	31
2.2.1.2	Spreminjanje magnetnega pretoka $\Phi_g$ zračne reže ( $U = \text{konst.}$ ).....	33
2.2.1.3	Spreminjanje upornosti v rotorskem tokokrogu ( $U = \text{konst.}$ , $\Phi_g = \text{konst.}$ ).....	35
2.2.1.4	Spreminjanje $U$ na sponka indukta in magnetnega pretoka $\Phi_g$ zračne reže .....	37
2.2.1.5	Regulacija vrtljajev z $U$ in $\Phi_g$ .....	37
2.3.	ENOSMERNI MOTOR S SERIJSKIM VZBUJANJEM .....	41
2.3.1	Nastavljanje vrtljajev EM s serijskim vzbujanjem .....	42
2.3.1.1	Spreminjanje napetosti $U$ na sponka indukta.....	43
2.3.1.2	Spreminjanje magnetnega pretoka $\Phi_g$ .....	44
2.3.1.3	Spreminjanje upornosti $R$ rotorskega tokokroga.....	45
2.4.	ZAVIRANJE ENOSMERNIH MOTORJEV .....	46
2.4.1	Zaviranje enosmernega motorja s tujim (paralelnim) vzbujanjem .....	47
2.4.2	Zaviranje enosmernega motorja s serijskim vzbujanjem.....	56
2.5.	Zagon enosmernega motorja.....	58
2.5.1	Zagon enosmernega motorja s tujim vzbujanjem .....	59

## 0. UVOD

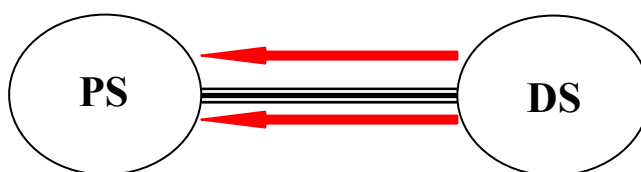
ELEKTRIČNI POGON (EP) predstavlja (industrijski) sistem, ki je namenjen pretvarjanju električne energije v mehansko (motorsko obratovanje) oz. mehanske energije v električno (generatorsko zaviranje).

EP obsegajo področje električnih strojev ES (kot pogonskih strojev), delovnih strojev DS, mehanike, krmilne in regulacijske tehnike ter močnostne elektronike. Samo poznavanje vseh teh področij oz. združitvev teh znanj, nam lahko da kvaliteten, gospodaren in optimalen pogon.



V nadaljevanju se bomo omejili predvsem na električni stroj kot člen v pogonu, na njegove karakteristike in obnašanje v stacionarnem in deloma v dinamičnem obratovanju. Zanimale nas bodo osnovne enačbe ES, s poudarkom na možnostih spreminjanja zunanjih (mehanskih) karakteristik, zaradi potrebe prilagajanja ES delovnemu stroju.

Pri projektiranju pogona **vedno izhajamo iz zahtev delovnega stroja in ne iz razpoložljivih karakteristik pogonskega stroja, zato je prilagajanja ES delovnemu stroju najpomembnejši korak k kvalitetnemu pogonu.**



Čeprav je ES le ena od možnosti za pogonski stroj, nam takšen pogon nudi veliko prednosti pred pogoni z drugimi pogonskimi stroji.

### Prednosti EP:

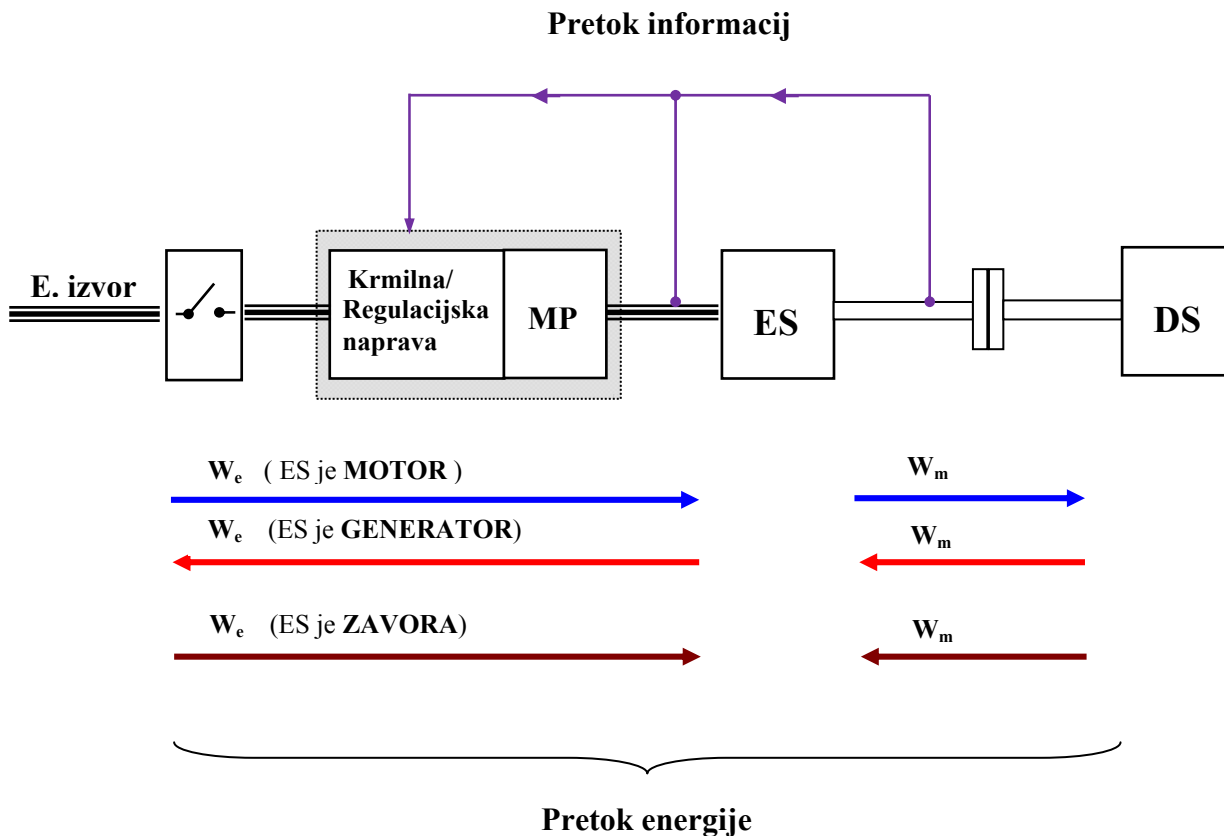
- ◆ uporabnost v širokem obsegu moči (**do**  $>10^8$  W), navora (**do**  $>10^7$  Nm) in vrtljajev (**do**  $>10^5$  min<sup>-1</sup>),
- ◆ trenutna pogonska pripravljenost,
- ◆ velika prilagodljivost delovnim pogojem,
- ◆ male izgube v prostem teku (PT) in velik izkoristek pri obratovanju,
- ◆ enostavno krmiljenje in regulacija,
- ◆ obratovanje v vseh 4 kvadrantih,
- ◆ mirni tek brez vibracij,
- ◆ enostavna prigraditev na delovni stroj.

**Slabosti EP:**

- ◆ za nekatere pogone so ES težji od drugih,
- ◆ problem napajanje z električno energijo nekaterih specifičnih pogonov.

Vsak pogon si lahko predstavimo z naslednjo sliko. Ta nam zelo poenostavljeno prikazuje glavne dele EP:

- ◇ stikalo vklop/izklop, zaščita,
- ◇ krmilno/regulacijsko napravo (+ močnostni pretvornik -MP),
- ◇ pogonski stroj (ES),
- ◇ mehanski spojni del (sklopke, različni mehanski prenosi),
- ◇ delovni stroj (DS).

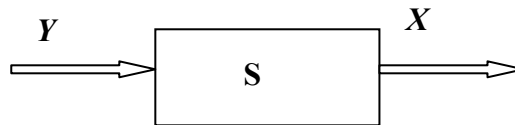


Slika 1: Funkcionalni bloki električnega pogona in pretok energije in informacij med obratovanjem pogona

**Krmilna naprava** napaja (običajno preko močnostnega pretvornika) vsa ali posamezna navitja ES, **ne glede na to, kaj se dogaja na strani delovnega stroja** (oz. na strani pogonski stroj - delovni stroj). **Govorimo o krmiljenju.**

**Krmiljenje** je proces, pri katerem z neko vhodno veličino  $Y$  vplivamo na neko izhodno veličino  $X$ . Pravimo, da z  $Y$  krmilimo  $X$ , to pa zapišemo z (.1)

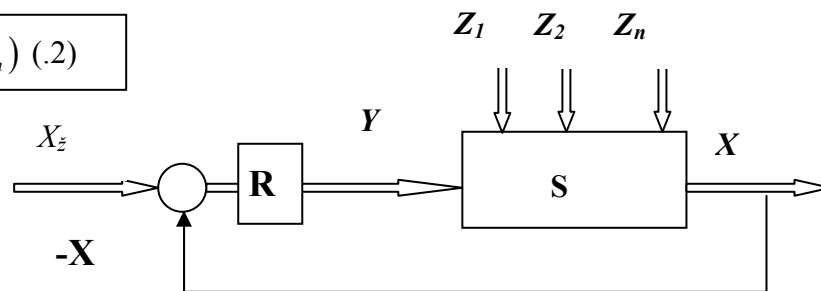
$$X = f(Y) \quad (.1)$$



**Regulacijska naprava** omogoča napajanje (običajno preko močnostnega pretvornika) vseh ali posameznih navitij ES **v odvisnosti od informacije s strani delovnega stroja** (oz. s strani pogonski stroj - delovni stroj). **Govorimo o regulaciji.**

**Regulacija** je proces, pri katerem izhodno (regulirano) veličino  $X$  z merjenjem, primerjanjem in s povratnim delovanjem stalno nastavljamo in ohranjamo na predpisani (želeni) vrednost  $X_z$ . Seveda je to potrebno le v primeru, ko zraven vhodno veličine  $Y$  nastopajo še druge veličine (motnje), ki vplivajo na  $X$ , npr.  $Z_1, Z_2, Z_n$ . Sedaj lahko (.1) zapišemo v obliki (.2), ki predstavlja splošni zapis za poljubni realni sistem.

$$X = f(Y, Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \quad (.2)$$



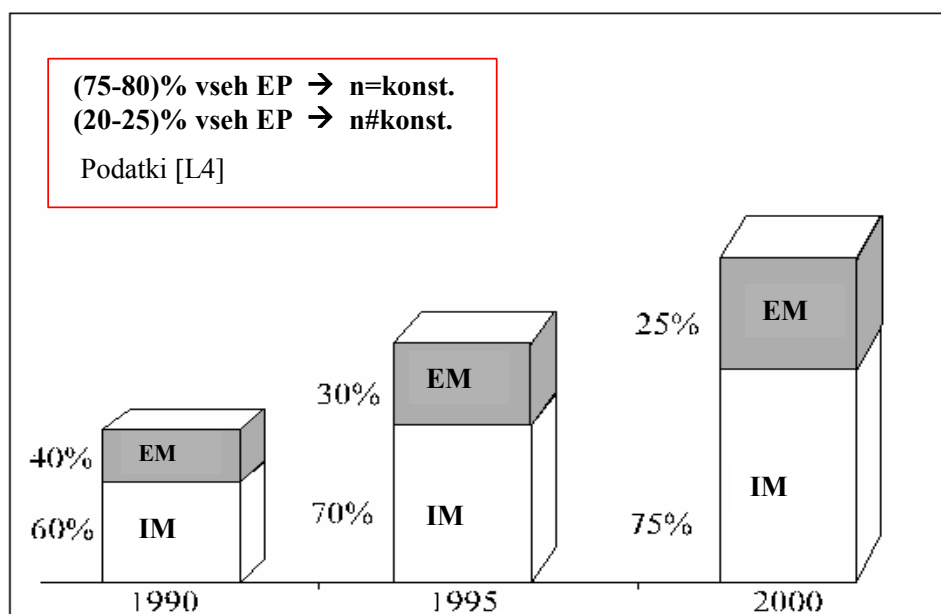
Seveda bi lahko (.1) pri krmiljenju nadomestili z (.2), le da nas pri krmiljenju veličine  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  in njihov vpliv na  $X$  ne zanimajo.

Pri projektiranju električnega pogona sta **napajanje (mreža) in delovni stroj postavljena** in projektant dejansko **izbira oz. usklajuje le med električnim strojem, električnim pretvornikom in krmilno/regulacijsko napravo.**

Pri tem so običajni kriteriji za izbiro motorja:

- A. **zahtevana moč in zahteve delovnega stroja** med počasnimi (steady-state) in hitrimi (dynamic) spremembami (npr. /1. če se zahteva zelo velik zagonski navor je boljše izbrati enosmerni motor, kot asinhronski; /2. pri pogonih s konstantnimi vrtljaji je lahko sinhronski stroj boljši kot enosmerni ali asinhronski; itd.).
- B. **Zahteve okolja** (npr. v kemični ali prehrabeni industriji in podobno, kjer mora biti okolica čista in brez možnosti električnih razelektritev -obloka, je uporaba enosmernih motorjev neprimerna (razen v zaprti izvedbi), zaradi procesov med komutacijo in iskrenja na ščetkah. Boljša je uporaba npr. asinhronskega motorja s kratkostično kletko ali ostalih strojev brez mehanske komutacije.
- C. **Cena elektromotorja:** v splošnem so enosmerni motorji in elektronsko komutirani motorji najdražji, na drugi strani pa asinhronski motorji s kratkostično kletko najcenejši.

Pogon lahko obratuje pri konstantnih vrtljajih ali pri spremenljivih vrtljajih. Cca. **(75-80)%** vseh električnih pogonov obratuje še pri konstantnih vrtljajih in le **(20-25)%** pri spremenljivih vrtljajih [L4]. Zagon in zaviranje motorja, kjer se normalno vrtljaji spreminjajo, ne vpliva na to delitev. Za EP lahko uporabljamo različne elektromotorje. Za pogone pri spremenljivih vrtljajih so se na začetku največ uporabljali enosmerni motorji (EM), predvsem zaradi enostavnejših in cenejših pretvornikov. Pri EM moramo, da dosežemo spreminjanje vrtljajev, spreminjati samo vhodno napetost, kar je ugodno, vendar je na drugi strani problematični del mehanski komutator. Po letu 1990 pa se je ta trend obrnil in v ospredje so stopili izmenični motorji (IM) predvsem zaradi znižanja cen pretvornikov, ki so zahtevnejši kot za EM. Pri IM moramo namreč spreminjati tako vhodno napetost kot vhodno frekvenco, da dosežemo spreminjanje vrtljajev.



Hkrati je razmerje navor/masa oz. moč/masa večje kot pri EM, zahtevajo pa tudi nižjo začetno ceno in stroške vzdrževanja.

$$\left(\frac{M}{m}\right)_{IM} > \left(\frac{M}{m}\right)_{EM}, \quad \left(\frac{P}{m}\right)_{IM} > \left(\frac{P}{m}\right)_{EM}$$

Cena pretvornikov za EM in IM je sedaj primerljiva, vendar še vedno večja kot cena motorja. Razmerje cene močnostnega pretvornika in cene IM v območju od kW do MW je cca. **5 do 2**. V večini aplikacij, pri spremenljivi hitrosti obratovanja  $(1-3) \cdot n_n$ , in celodnevem obratovanju ter pri prihranku energije 25%, se strošek v pretvornik vrne v cca. 5 letih pri večjih močeh pa še prej, po [L4].

$$\frac{M \cdot PRETV}{IM} = (5 \div 2)$$

### Vrste električnega pogona (zgodovinski pregled):

1. **Transmisijski pogon:** 1ES poganja **več** delovnih strojev, z **različnimi** zahtevami.
2. **Skupinski pogon:** 1ES poganja **več** delovnih strojev, z **enakimi** ali **podobnimi** zahtevami.
3. **Posamični pogon:** **vsak** ES poganja **svoj** delovni stroj.
4. **Večmotorski pogon:** **več** ES poganja **en** delovni stroj oz. posamezne dele delovnega stroja.

# 1. OSNOVNI POJMI IN DEFINICIJE

## 1.1. KOORDINATNI SISTEM IN VRSTE OBRATOVALNIH STANJ

Pri EP nas predvsem zanimajo mehanske karakteristike pogonskega stroja (elektromotorja) -  $M_m$  in delovnega stroja-  $M_b$ . Pri tem naletimo na različne odvisnosti navora (vrtilnega momenta) npr. od vrtljajev, pozicije, časa, itd. Največkrat bomo obravnavali odvisnost od vrtljajev.

$$M = M(n, \Theta, t, \dots) \Rightarrow M = M(n)$$

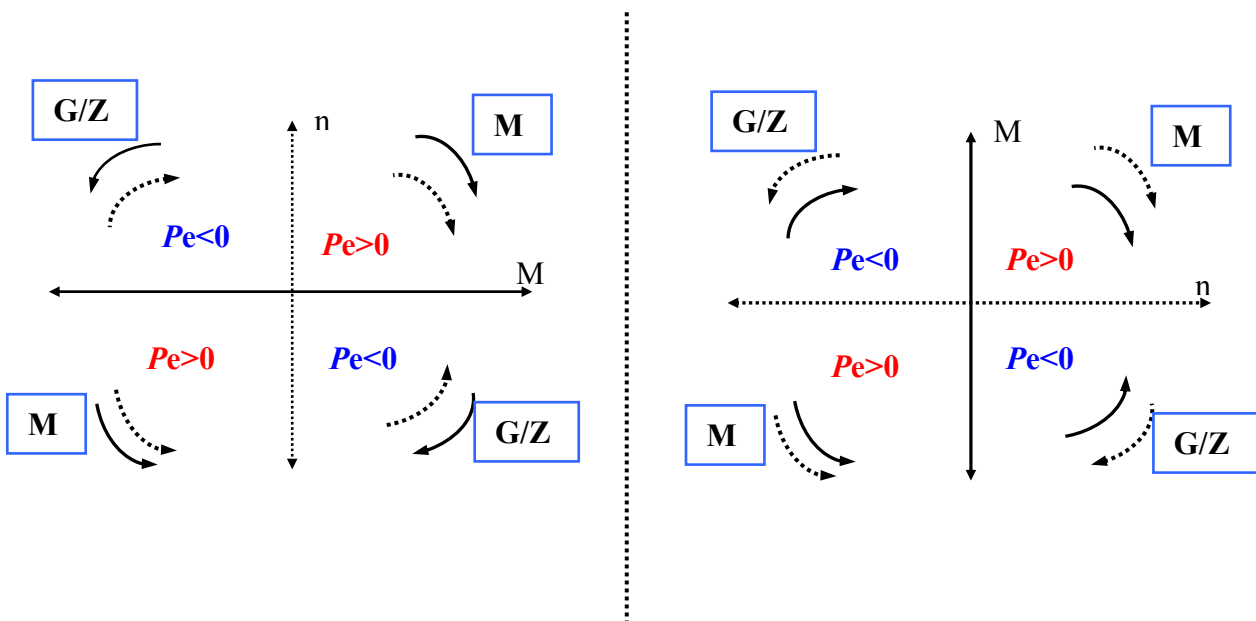
Vedno moramo obravnavati oz. prikazovati obe karakteristiki skupaj v enem koordinatnem sistemu (KS) ali v  $M-n$ , kot  $M(n)$  ali kot  $n(M)$  v  $n-M$  koordinatnem sistemu. Pri tem predstavljata:

### A. s strani električnega stroja:

- 1 in 3. kvadrant motorsko obratovanje (električna moč  $Pe > 0$ )
- 2. ter 4. kvadrant zavorno obratovanje (generatorsko-električna moč  $Pe < 0$ , elektrodinamično in protitočno zaviranje)

### B. s strani pogona:

- 1 in 3. kvadrant pogonsko obratovanje
- 2. ter 4. kvadrant zavorno obratovanje



Pri tem nastopajo med obratovanjem, tako pri motorskem kot generatorskem obratovanju naslednje tri možnosti:

- Motorski (generatorski) navor je večji kot je bremenski – motor (generator) pospešuje.
- Motorski (generatorski) navor je enak bremenskemu – motor (generator) se vrti s konstantnimi vrtljaji.
- Motorski (generatorski) navor je manjši od bremenskega – motorju (generatorju) se zmanjšujejo vrtljaji (zavira).

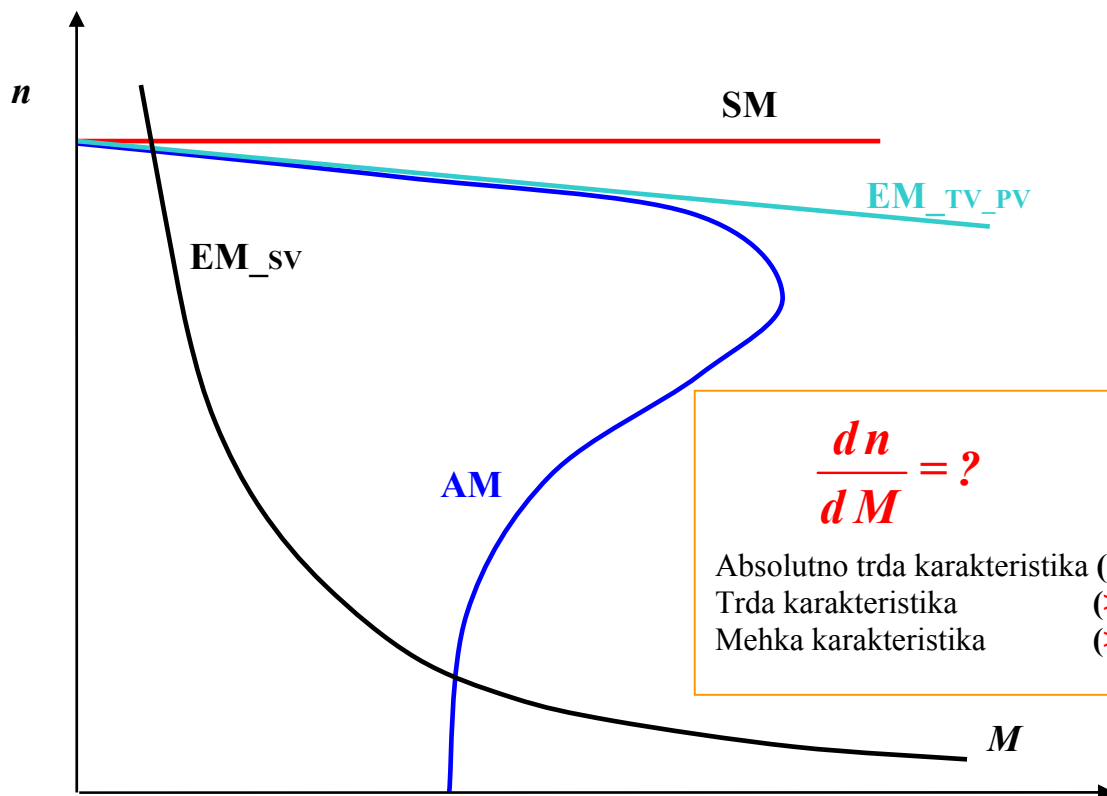
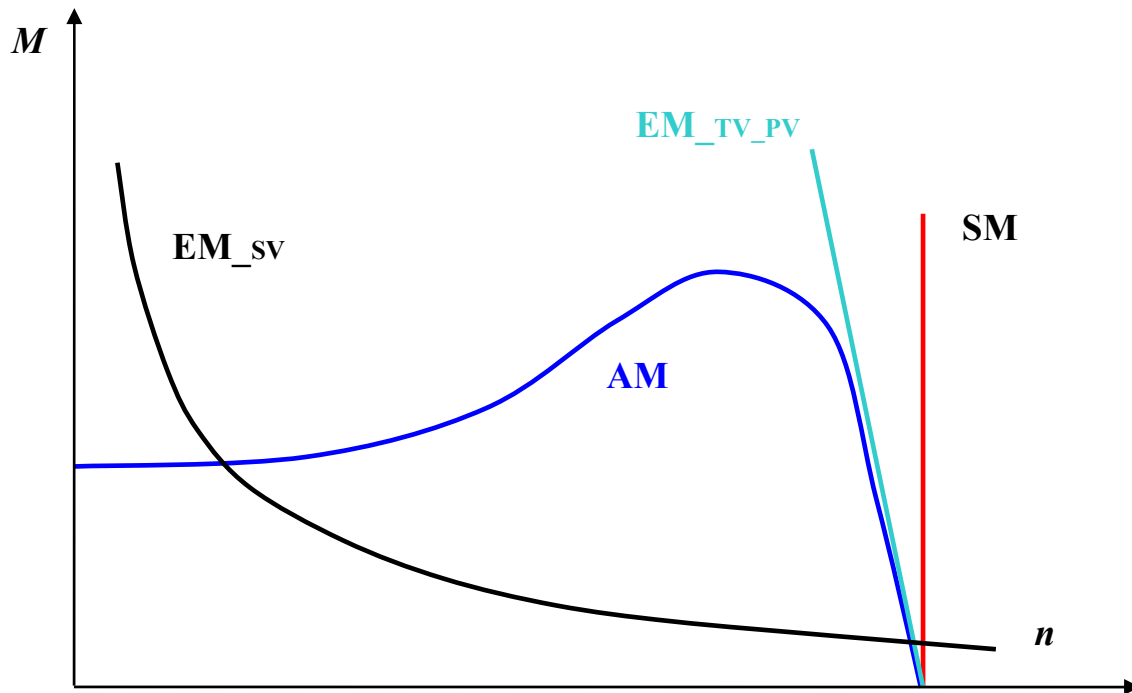
## 1.2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE POGONSKIH STROJEV ( $M$ - $n$ , oz. $n$ - $M$ )

**EM\_TV\_PV** enosmerni motor z tujim oz. vzporednim vzbujanjem

**EM\_SV** enosmerni motor s serijskim vzbujanjem

**AM** asinhronski motor

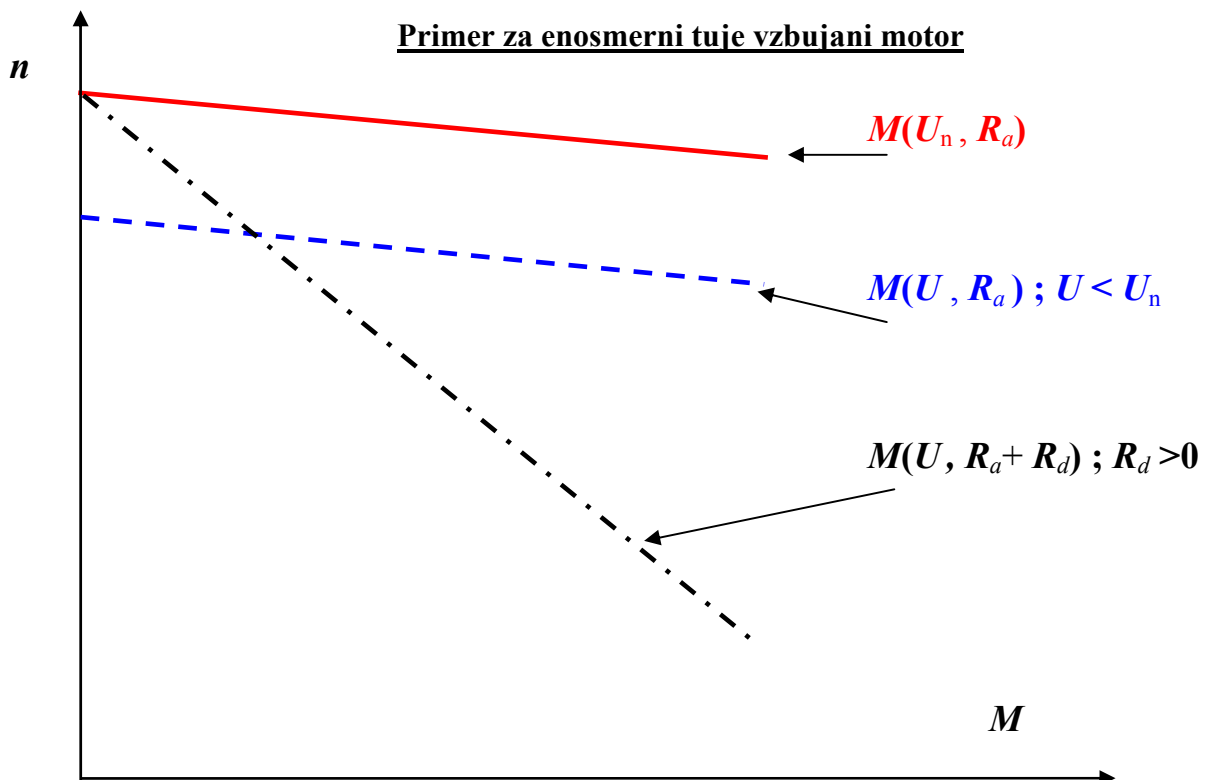
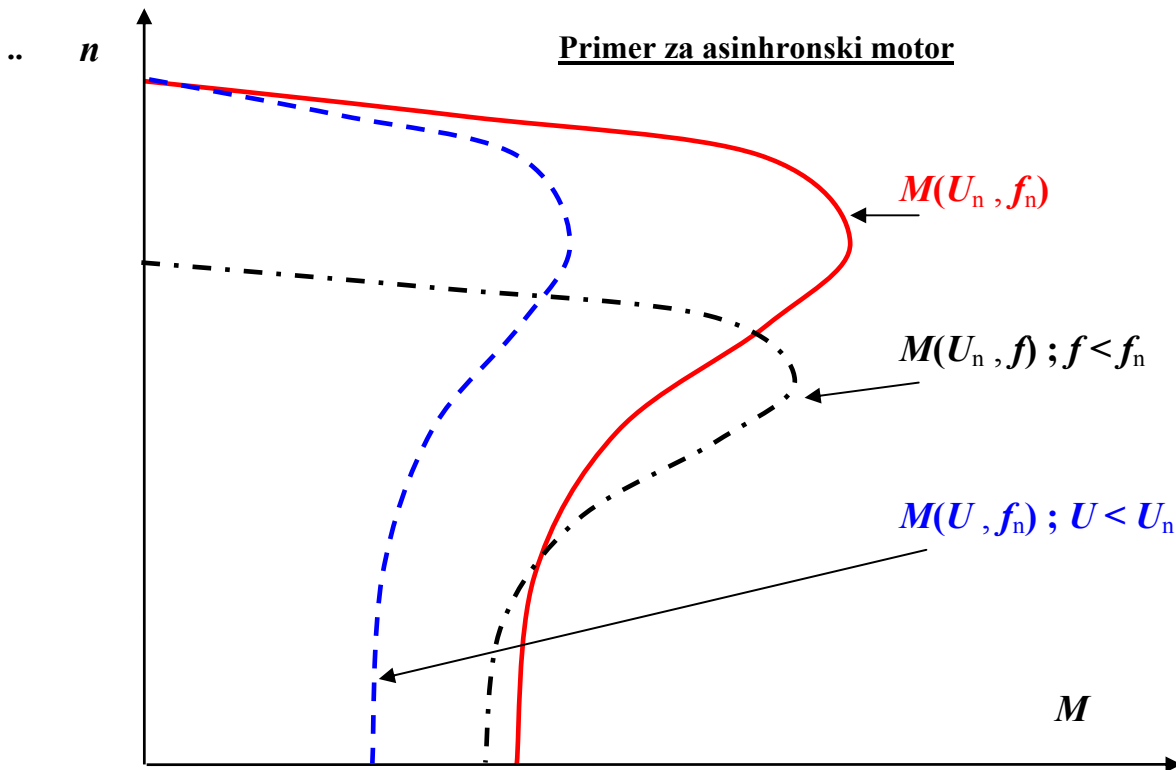
**SM** sinhronski motor





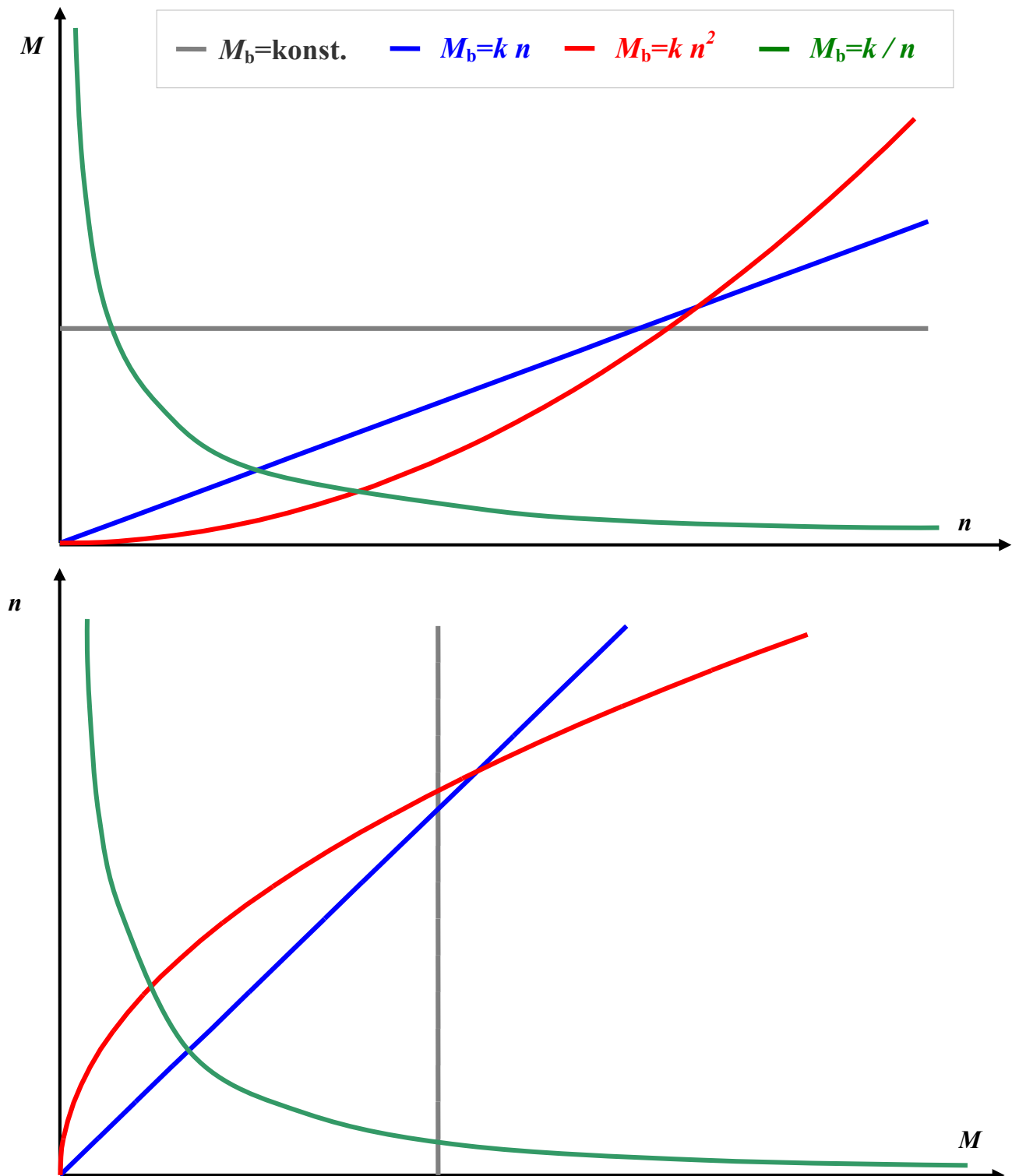
**Vrste karakteristik:**

- naravna karakteristika (ena; primer:  $M(U_n, f_n)$ ,  $M(U_n, R_a)$ )
- umetne karakteristike (več; primer:  $M(U_n, f)$ ,  $M(U, f_n)$ ,  $M(U, R_a + R_d)$ ,  $M(U, R_a)$ )
- regulacijske karakteristike (več)



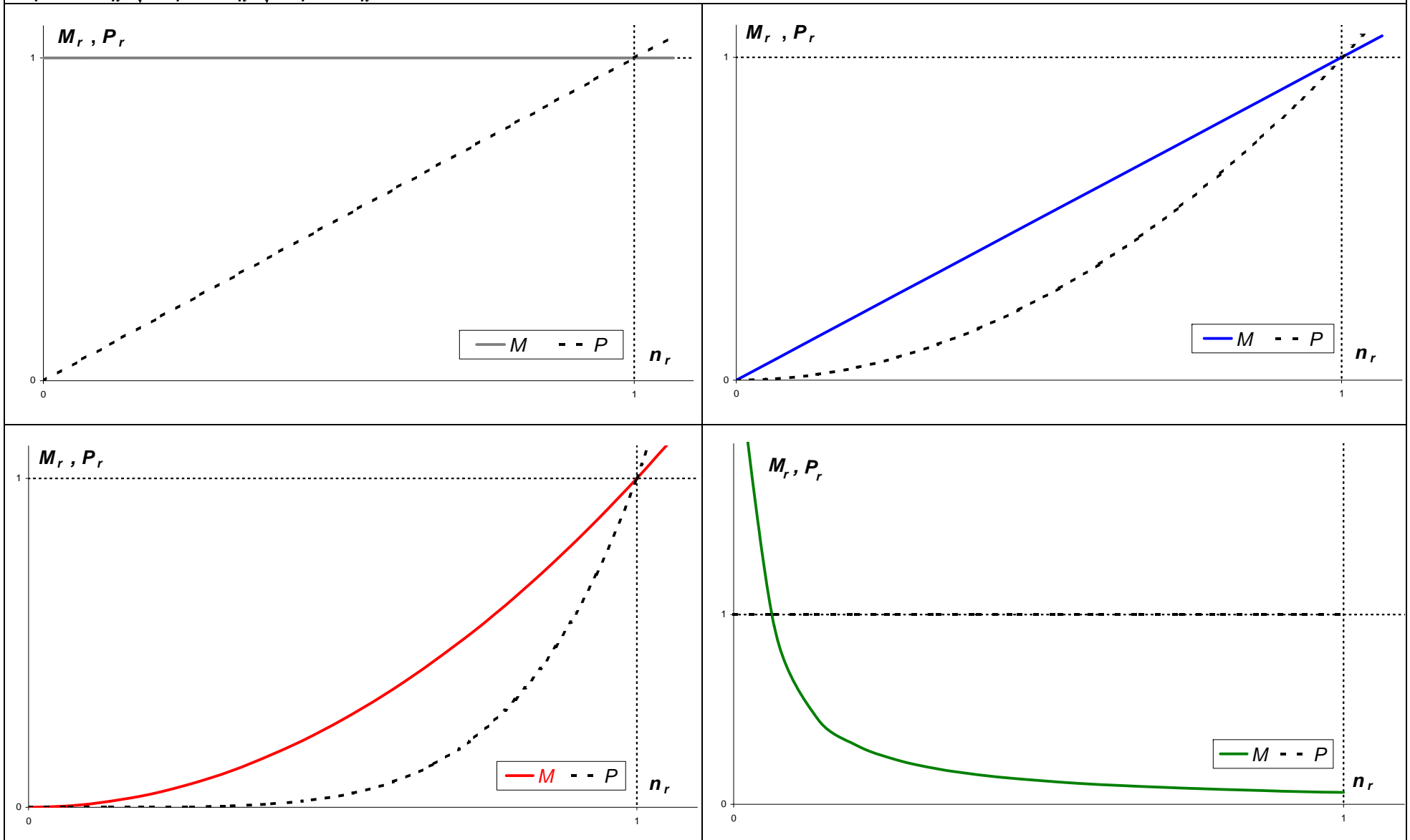
### 1.3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE DELOVNIH STROJEV ( $M$ - $n$ , oz. $n$ - $M$ )

$M_b = \text{konst}$	Dvigala, obdelovalni stroji z odvzemanjem delcev, počasni transporti
$M_b = k n$	Enosmerni generator z tujim vzbujanjem kot breme
$M_b = k n^2$	Ventilatorji, črpalke, centrifuge ; bremena, kjer prevladuje trenje, ...
$M_b = k / n$	Delovni stroji za navijanje (papirna, tekstilna industrija), ...



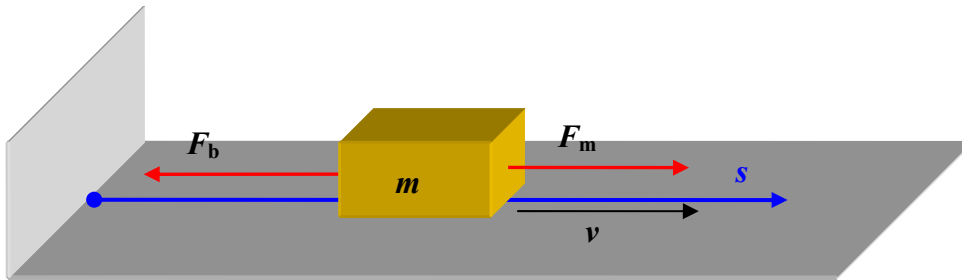
### Osnovne karakteristike delovnih strojev (navor – vrtljaji in moč - vrtljaji)

$$M_r = M/M_n, \quad P_r = P/P_n, \quad n_r = n/n_n$$



## 1.4. OSNOVNE ENAČBE GIBANJA

### Premočno gibanje



Slika: Primer premočrnega (translatornega) gibanja

Newtonov zakon:

$$\sum_i F_i = \frac{d}{dt}(mv)$$

$$\left\langle \sum_i F_i = F_m - F_b \quad ; \quad \frac{d}{dt}(mv) = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \right\rangle \Rightarrow$$

$$F_m - F_b = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} \quad \left\langle \frac{dm}{dt} = 0 \right\rangle \Rightarrow \quad F_m - F_b = m \frac{dv}{dt}$$

$$F_m - F_b = m \frac{dv}{dt}$$

$$F_m - F_b = m \frac{d^2s}{dt^2}$$

$F_m$  trenutna vlečna sila (N), ki jo prispeva **PS** (trenutni navor motorja  $\rightarrow$  pogonska sila)

$F_b$  trenutna bremenska sila (N), ki ga prispeva **DS**

$m$  skupna masa premikajočega dela (kg)

$s$  opravljena pot (m)

$v$  hitrost premikanja (m/s)

$a$  pospešek (m/s<sup>2</sup>)

$P$  mehanska moč (W) ...  $P = F_* \cdot v$

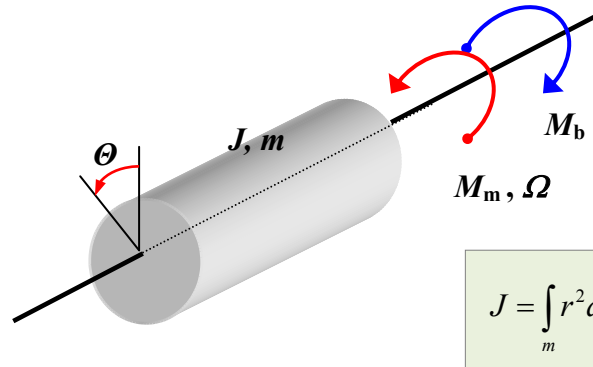
$W$  energija (Ws, J) .....  $W = \int P dt$

$$s \rightarrow v = \frac{ds}{dt} \rightarrow a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$$

## Rotacijsko gibanje

### Newtonov zakon:

$$\sum_i M_i = \frac{d}{dt}(J\Omega)$$



Slika: Primer rotacijskega gibanja

$$\left\langle \sum_i M_i = M_m - M_b \quad ; \quad \frac{d}{dt}(J\Omega) = J \frac{d\Omega}{dt} + \Omega \frac{dJ}{dt} \right\rangle \Rightarrow$$

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} + \Omega \frac{dJ}{dt} \quad \left\langle \frac{dJ}{dt} = 0 \right\rangle \Rightarrow \quad M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$$M_m - M_b = J \frac{d^2\Theta}{dt^2}$$

- $M_m$  trenutni pogonski navor (Nm), ki jo prispeva **PS**; v nadaljevanju tudi  $m_m$   
 $M_b$  trenutni bremenski navor (Nm), ki ga prispeva **DS**; v nadaljevanju tudi  $m_b$   
 $J$  vztrajnosti moment rotirajočih mas ( $\text{kg m}^2$ )  
 $m$  skupna masa rotirajočega dela (kg)  
 $\Omega$  mehanska kotna hitrost ( $\text{rad/s}$ ,  $\text{s}^{-1}$ )  
 $n$  vrtljaji ( $\text{vrt/s}$ ,  $\text{s}^{-1}$ ,  $\rightarrow$  **dovoljeno!**  $\text{vrt/min}$ ,  $\text{min}^{-1}$ )  
 $\Theta$  mehanski kot zavrtitve (rad)  
 $\alpha$  kotni pospešek ( $\text{rad/s}^2$ )  
 $v$  obodna hitrost (m/s)  
 $r, D$  radij merjen od osi vrtenja (m), premer (m)

$$\Omega = \frac{d\Theta}{dt}$$

$$\alpha = \frac{d\Omega}{dt} = \frac{d^2\Theta}{dt^2};$$

$$v = r \Omega$$

$$\Omega \text{ (rad/s, s}^{-1}\text{), } n \text{ (vrt/s, s}^{-1}\text{)} \rightarrow \Omega = 2\pi n$$

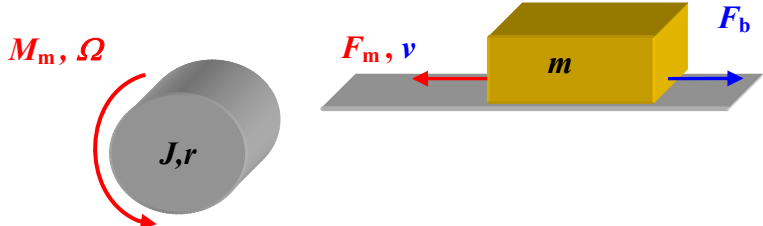
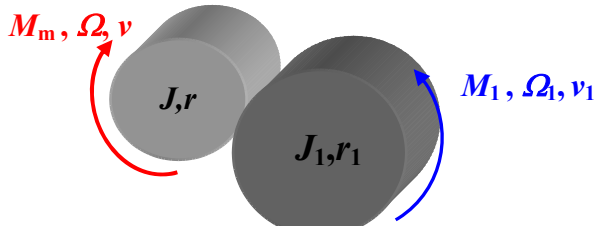
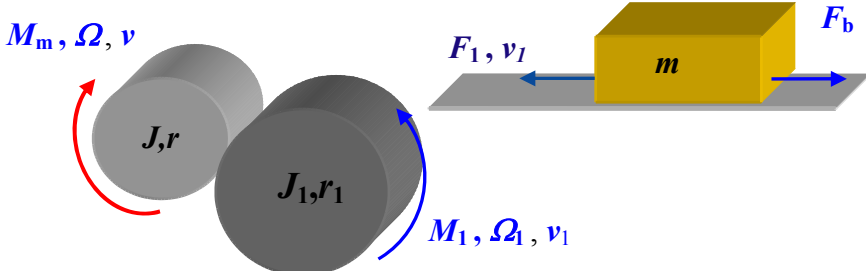
$$\Omega \text{ (rad/s, s}^{-1}\text{), } n \text{ (vrt/min, min}^{-1}\text{)} \rightarrow \Omega = 2\pi n/60$$

$P$  mehanska moč (W) ...  $P = M_* \cdot \Omega = M_* \frac{2\pi n}{60}$

$W$  energija (Ws, J) .....  $W = \int P dt$

$\frac{dJ}{dt} \neq 0$  ..centrifuge, navijalni stroji, roboti

Pretvorba rotacijskega gibanja ( $\Omega$ ) v translatorno ( $v$ ) oz. rotacijsko ( $\Omega_1$ ) in izračun skupnega (oz. ekvivalentnega) vztrajnostnega momenta celotnega sistema

<p><b>Rotacijsko → translatorno</b></p> <p><math>\Omega \rightarrow v</math></p>	
$M_m - M_b = J_e \frac{d\Omega}{dt}$	$J_e = J + mr^2 \quad \langle v = r \Omega \rangle \Rightarrow J_e = J + m \left( \frac{v}{\Omega} \right)^2$
<p><b>Rotacijsko → rotacijsko</b></p> <p><math>\Omega \rightarrow \Omega_1</math></p>	
$M_m - M_b = J_e \frac{d\Omega}{dt}$	$J_e = J + J_1 \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 = \langle v = v_1, v = r \Omega, v_1 = r_1 \Omega_1 \rangle = J + J_1 \left( \frac{\Omega_1}{\Omega} \right)^2$
<p><b>Rotacijsko → rotacijsko + translatorno</b></p> <p><math>\Omega \rightarrow \Omega_1</math></p> <p><math>\Omega_1 \rightarrow v_1</math></p>	
$M_m - M_b = J_e \frac{d\Omega}{dt}$	$J_e = J + J_1 \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 + mr_1^2 = J + J_1 \left( \frac{\Omega_1}{\Omega} \right)^2 + m \left( \frac{v_1}{\Omega} \right)^2$

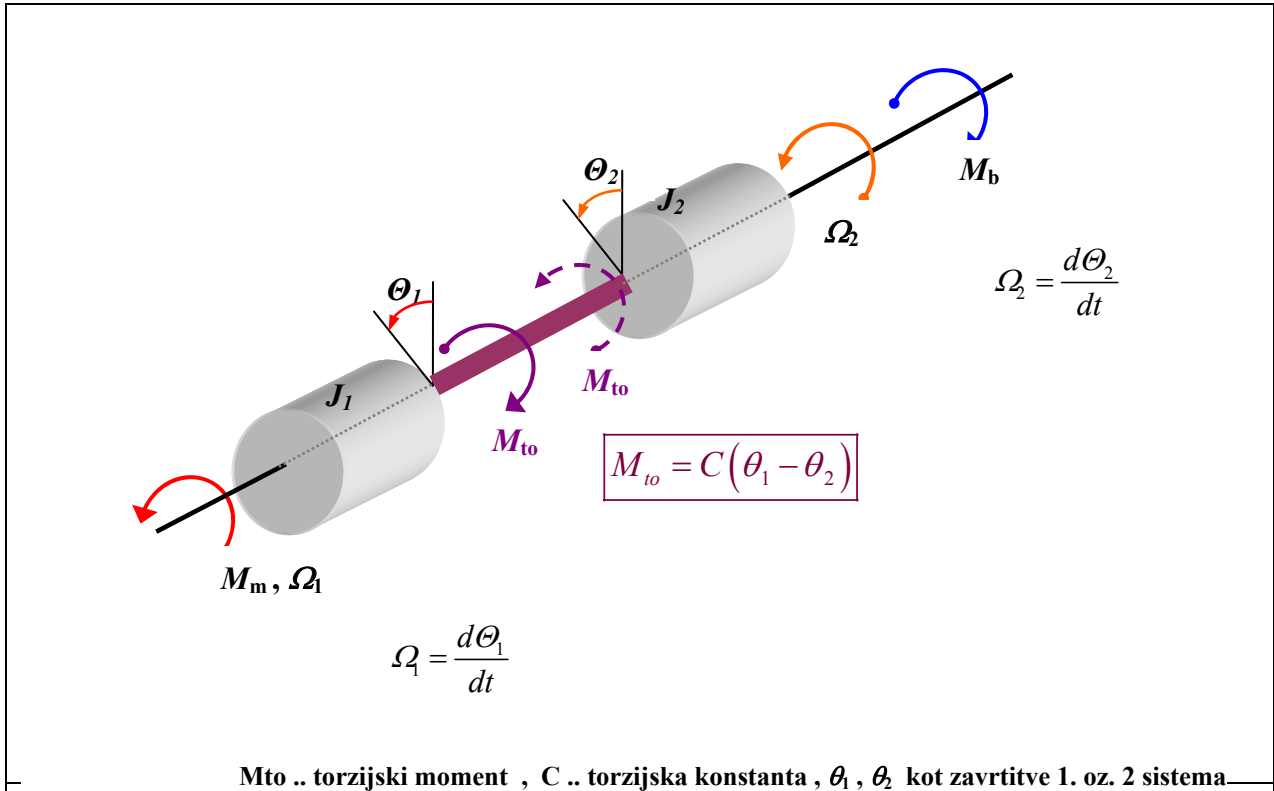
**Splošni primer:**

$$J_e = J + \overbrace{J_a + J_b + J_c + \dots}^{\Omega = \Omega_a = \Omega_b = \Omega_c = \dots} + \overbrace{J_1 \left( \frac{\Omega_1}{\Omega} \right)^2 + J_2 \left( \frac{\Omega_2}{\Omega} \right)^2 + J_3 \left( \frac{\Omega_3}{\Omega} \right)^2 + \dots}^{\Omega \neq \Omega_1 \neq \Omega_2 \neq \Omega_3 \neq \dots}$$

$$+ \overbrace{m_1 \left( \frac{v_1}{\Omega} \right)^2 + m_2 \left( \frac{v_2}{\Omega} \right)^2 + m_3 \left( \frac{v_3}{\Omega} \right)^2 + \dots}^{v_1 \neq v_2 \neq v_3 \neq \dots}$$

$$J_e = J + \sum_{i=a,b,c,\dots} J_i + \sum_{j=1,2,3,\dots} J_j \left( \frac{\Omega_j}{\Omega} \right)^2 + \sum_{k=1,2,3,\dots} m_k \left( \frac{v_k}{\Omega} \right)^2$$

**Vpliv torzije gredi:** v primeru, ko gred povezuje dva rotirajoča sistema v okviru EP in ne moremo predpostaviti toge povezave med sistemoma, je potrebno zapisati za oba sistema ustrezni enačbi in jih vključiti v osnovno enačbo rotacijskega gibanja (Newtonov zakon).



$$M_m - M_{to} = J_1 \frac{d\Omega_1}{dt}$$

$$M_{to} - M_b = J_2 \frac{d\Omega_2}{dt}$$

$$M_m - C(\theta_1 - \theta_2) = J_1 \frac{d\Omega_1}{dt}$$

$$C(\theta_1 - \theta_2) - M_b = J_2 \frac{d\Omega_2}{dt}$$

$$\Omega_1 = \frac{d\Theta_1}{dt}$$

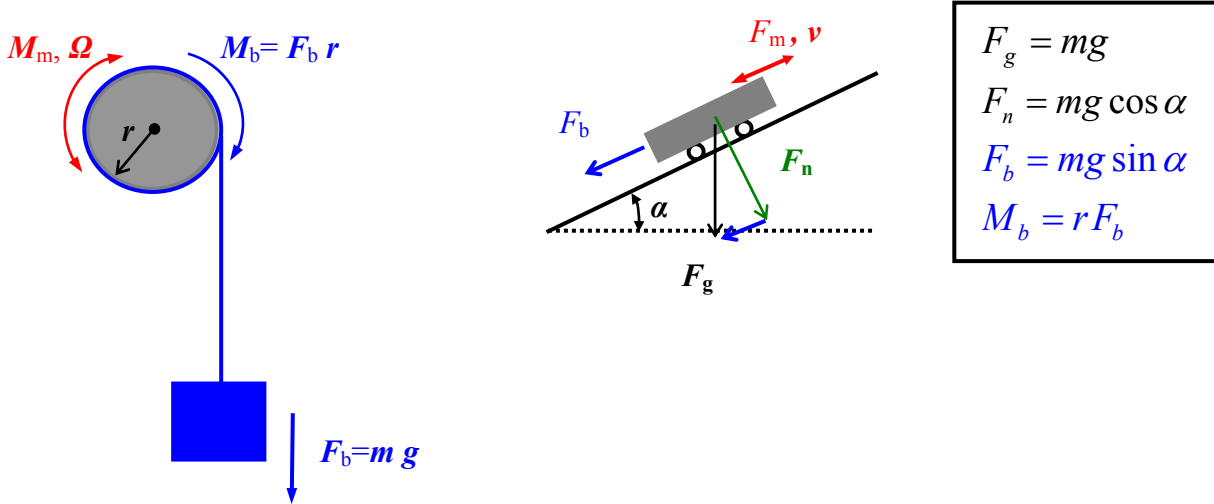
$$\Omega_2 = \frac{d\Theta_2}{dt}$$

**Brez upoštevanja torzije gredi:**

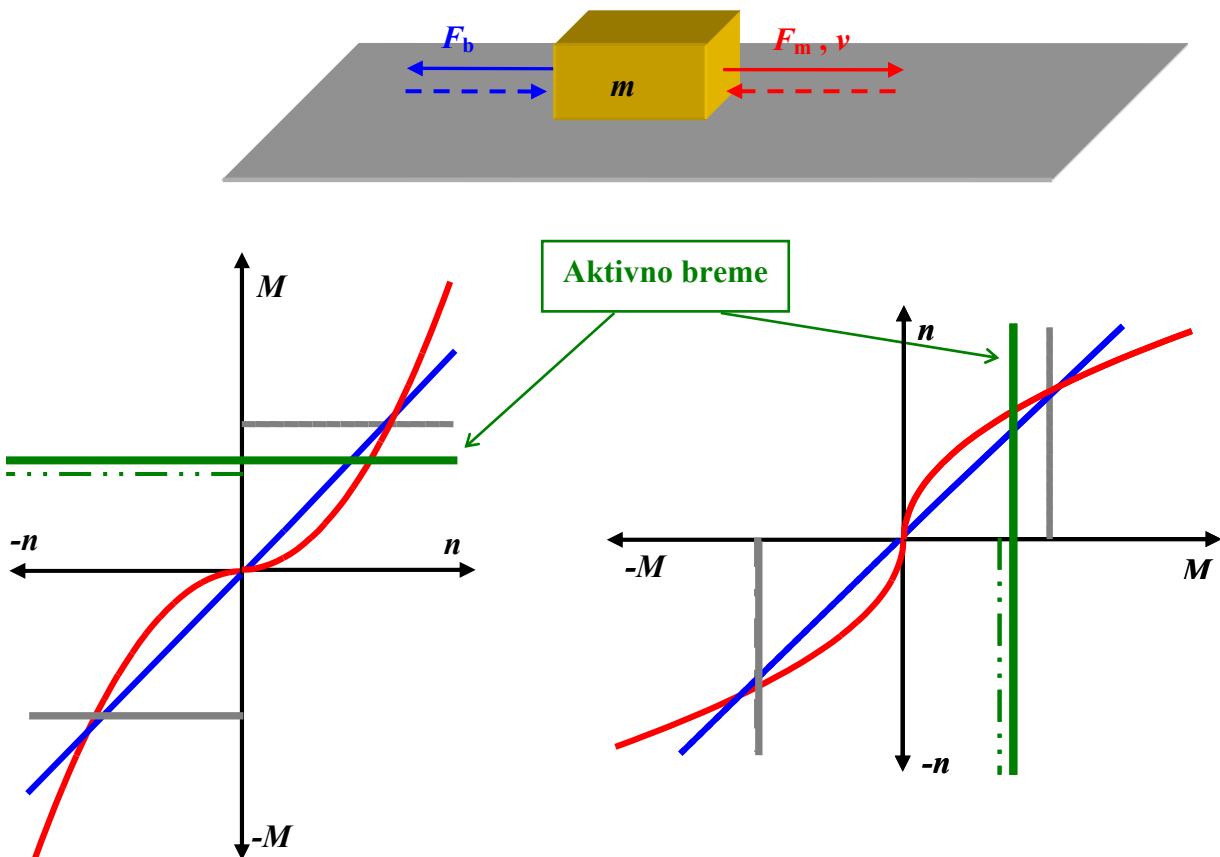
$$\theta_1 = \theta_2 \Rightarrow \Omega_1 = \Omega_2 \Rightarrow \Omega \Rightarrow M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt}$$

## 1.5. VRSTE BREMEN

**Aktivno oz. potencialno breme** - ne glede na smer **pogonskega navora** -  $M_m$  (vrtilnega momenta) ali sile -  $F_m$  PS (elektromotorja) ima **navor** -  $M_b$  ali **sila** -  $F_m$  **vedno enako smer**. To pomeni, da karakteristika za aktivno breme vedno poteka skozi I. in II. oz. I. in IV. kvadrant izbranega KS.



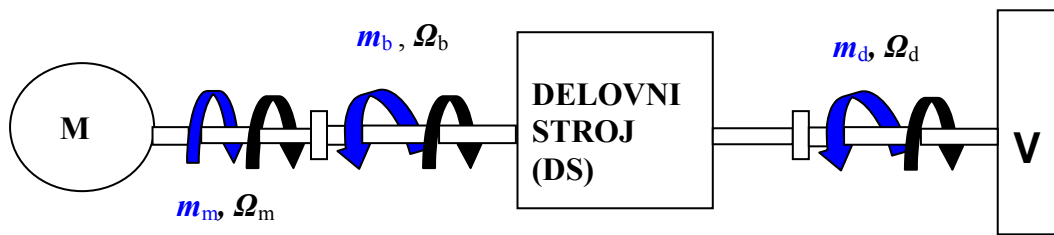
**Pasivno oz. reaktivno breme** - smer navora -  $M_b$  ali sile -  $F_m$  bremena je odvisna od **pogonskega navora** -  $M_m$  (vrtilnega momenta) ali sile -  $F_m$  PS (elektromotorja) **in mu vedno nasprotuje!** To pomeni, da karakteristika za pasivno breme vedno poteka skozi I. in III. kvadrant izbranega KS.



Slika: Primeri karakteristik za različna pasivna bremena in ene karakteristike za aktivno breme



## 1.6. STATIČNA IN DINAMIČNA STANJA POGONA



Slika 3: Slika splošnega pogona

$m_m(\Omega, \Theta, t)$ .....trenutni navor motorja ( pogonski navor )

$m_b(\Omega, \Theta, t)$ .....trenutni navor bremena (pasivni (reaktiven), aktivni (potencialni))

$m_d(\Omega, \Theta, t)$  .....trenutni t.i. dinamični navor ( $m_m - m_b = m_d = J \frac{d\Omega}{dt}$ )

$\Omega$  .... mehanska kotna hitrost ,  $n$  ..... vrtljaji ,  $\Theta$  .....mehanski kot zavrtitve(rad) ,

$\Omega$  (rad/s , s<sup>-1</sup>) ,  $n$  (vrt/s, s<sup>-1</sup>)  $\rightarrow \Omega = 2\pi n$

$\Omega$  (rad/s , s<sup>-1</sup>) ,  $n$  (vrt/min, min<sup>-1</sup>)  $\rightarrow \Omega = 2\pi n/60$

**Mehanski sistem lahko opišemo z gibalno enačbo:**  $\sum_{i=1} m_i = 0$

$$\pm m_m \mp m_b \mp m_d = 0$$

Ta velja v vsakem trenutku, pomembna pa sta dva karakteristična primera:

<b>1.</b> $\Omega = \text{konst.} \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = 0$	<b>2.</b> $\Omega \neq \text{konst.} \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = \text{konst.}$
---	--

Prvi primer nam definira t.i. **statično stanje pogona** (tudi **stacionarno** oz. **ravnovesno stanje**), saj se tako navor kot vrtljaji ne spreminjajo. Nastopi, ko se v koordinatnem sistemu obe karakteristiki  $m_m$  in  $m_b$  sekata.

$$\pm m_m \mp m_b = 0 \Rightarrow m_d = 0 \Rightarrow M_m = M_b \Rightarrow \Omega = \text{konst.} \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

Drugi primer definira t.i. **dinamično stanje pogona** (tudi **prehodno, neravnovesno, nestacionarno stanje**), npr. **zagon, zaviranje, spreminjanje vrtljajev, ...**).

$$\pm m_m \mp m_b \mp m_d = 0 \Rightarrow m_d \neq 0 \Rightarrow \Omega \neq \text{konst.} \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} \neq 0$$

### Primer obratovalnih stanj (idealiziranega) pogona dvigala

$$2 \Rightarrow 3(4) \quad \boxed{M}$$

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0; \frac{dv}{dt} < 0 \rightarrow M, \text{ pospešek}$$

$$3 \Rightarrow (4) \quad \boxed{G}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0; \frac{dv}{dt} < 0 \rightarrow G, \text{ pospešek}$$

$$n \downarrow > 0; v \downarrow > 0 \rightarrow \text{ZAGON}$$

$$4, 4' \Rightarrow \quad \boxed{M/G}$$

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = 0; \frac{dv}{dt} = 0 \rightarrow M/G$$

$$n \downarrow = \text{konst.}; v \downarrow = \text{konst.}$$

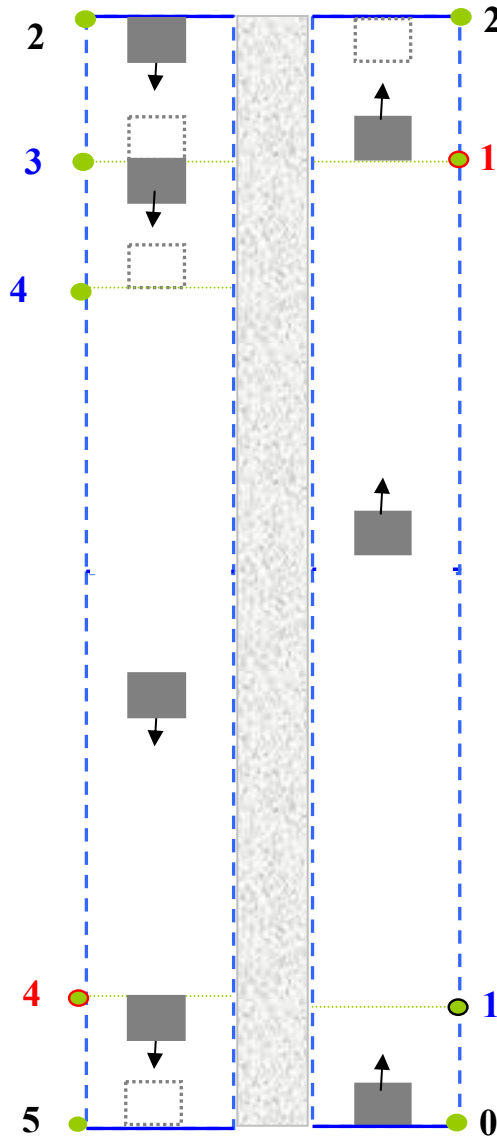
obratovanje s konstantno hitrostjo

$$4 \Rightarrow 5 \quad \boxed{Z}$$

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} > 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} > 0; \frac{dv}{dt} > 0 \rightarrow \text{zaviranje}$$

$$n \downarrow > 0; v \downarrow > 0 \rightarrow \text{ZAVIRANJE}$$



$$1' \Rightarrow 2 \quad \boxed{Z}$$

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0; \frac{dv}{dt} < 0 \rightarrow -\text{pospešek}$$

$$n \uparrow > 0; v \uparrow > 0 \rightarrow \text{ZAVIRANJE}$$

$$1 \Rightarrow 1' \quad \boxed{M}$$

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = 0; \frac{dv}{dt} = 0$$

$$n \uparrow = \text{konst.}; v \uparrow = \text{konst.}$$

obratovanje s konstantno hitrostjo

$$0 \Rightarrow 1 \quad \boxed{M}$$

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} > 0$$

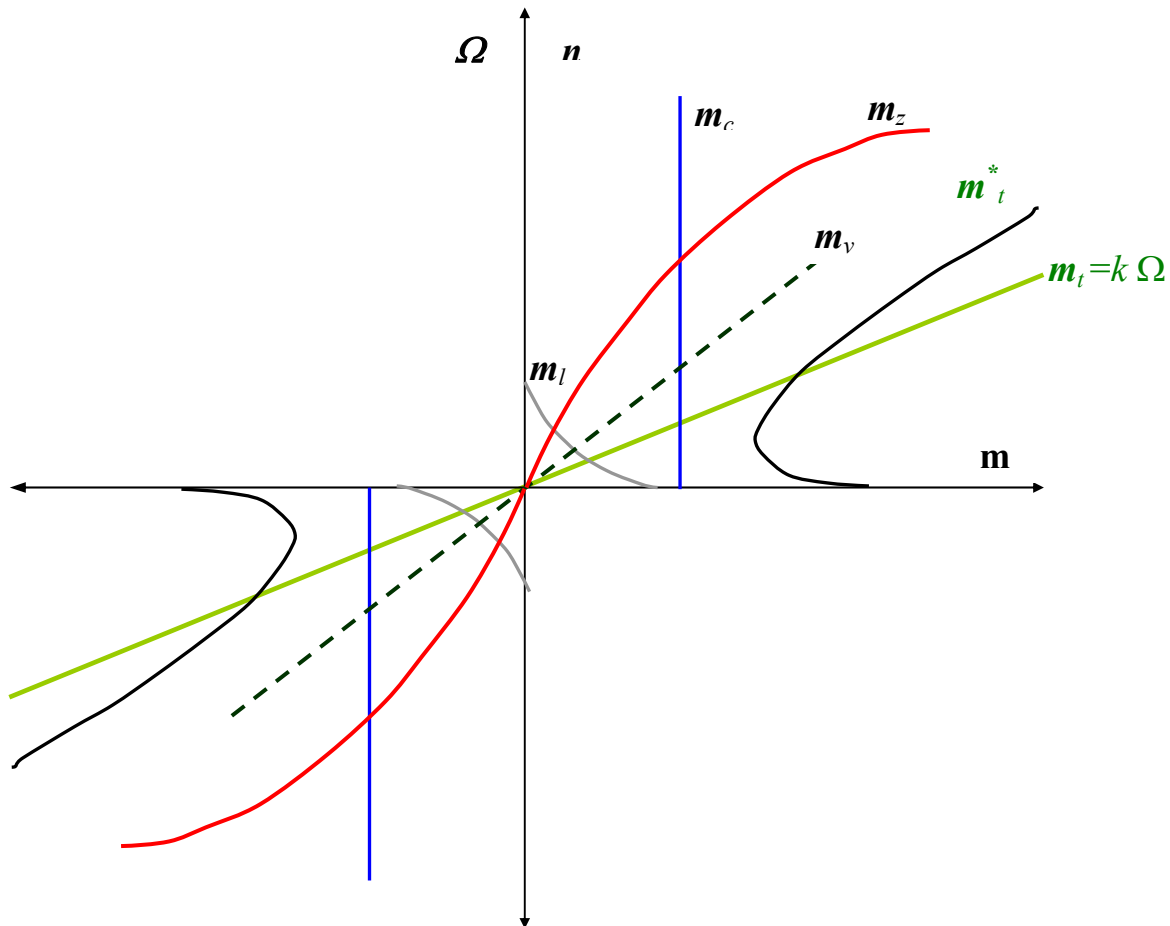
$$\frac{d\Omega}{dt} > 0; \frac{dv}{dt} > 0 \rightarrow +\text{pospešek}$$

$$n \uparrow > \uparrow 0; v \uparrow > 0 \rightarrow \text{ZAGON}$$

Pri bolj natančnem izračunu moramo upoštevati tudi navor zaradi trenja v pogonskem sistemu. Tako dobi prejšnja enačba obliko

$$\pm m_m \mp m_b \mp m_t \mp m_d = 0$$

pri čemer je  $m_t$  v splošnem podan z naslednjo enačbo, ki podaja posamezne komponente navora



$m_t = m_v + \langle m_l + m_c + m_z \rangle$	$m_l$ ... navor lepenja (samo na začetku, pri majhnih $n$ ) $m_c$ ... t.i. Coulombov navor trenja (=konst. pri $n \neq 0$ ) $m_v$ .... navor viskozne trenja (= $k_1 * n$ pri $n \neq 0$ ) $m_z$ ..... navor zaradi zračnega upora (= $k_2 * n^2$ pri $n \neq 0$ )
---	---

Velikokrat upoštevamo samo komponento viskozne trenja  $m_t = k \cdot \Omega$  ( $m_t = k * n$ ), tako je končna enačba zapisana v obliki

$$\pm m_m \mp m_b \mp k \cdot \Omega \mp J \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial t} = 0$$

$$\left\langle \pm m_m \mp m_b \mp k \cdot n \mp J \cdot \frac{\partial n}{\partial t} = 0 \right\rangle$$

$$\Omega = \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \dot{\Theta} \quad ; \quad \frac{\partial \Omega}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = \ddot{\Theta}$$

$$\pm m_m \mp m_b \mp k \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial t} \mp J \cdot \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = 0$$

$$\pm m_m \mp m_b \mp k \cdot \dot{\Theta} \mp J \cdot \ddot{\Theta} = 0$$

Pri spreminjanju vrtiljajev se del energije sistema spreminja v kinetično energijo, ki jo predstavimo akumulirano v vztrajniku ( $J\Omega^2/2$ ). Sistem čuti ta pretok energije v obliki dinamičnega navora (vrtilnega momenta), ki je lahko pospeševalni ( $m_d > 0$ ) oz. zaviralni ( $m_d < 0$ ).

### Kako se troši mehanska moč motorja med obratovanjem?

$$m_m - m_b - k \cdot \Omega = J \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial t} \quad \langle m_t = k \cdot \Omega \rangle$$

$$m_m - m_b - k \Omega = J \frac{\partial \Omega}{\partial t} \quad \| * \Omega$$

↓

$$m_m \Omega - m_b \Omega - k \Omega^2 = J \Omega \frac{\partial \Omega}{\partial t} \quad \left\langle \begin{array}{l} P_m = m_m \Omega, P_b = m_b \Omega, P_t = k \Omega^2, \\ \text{sprememba kinetične energije } \frac{dW_K}{dt} = J \Omega \frac{\partial \Omega}{\partial t} \end{array} \right\rangle$$

$P_m$  ..... "idealna" mehanska (električna) moč motorja  
 $P_t$  ..... izgubna moč, ki se troši za trenje in ventilacijo mot.  
 $P_b$  ..... mehanska moč, ki se porablja za breme  
 $dW_K/dt$  moč potrebna za spremembo kinetične energije  
 $P_m - P_t$  ... mehanska moč na gredi motorja

$$P_m = P_b + P_t + \frac{dW_K}{dt}$$

$$\Omega = konst. \quad \left\langle \frac{dW_K}{dt} = 0 (!) \right\rangle \Rightarrow P_e = P_b + P_t$$

### Kakšen je pretok energije med obratovanjem?..

$W_m$  ..... "idealna" mehanska energija motorja  
 $W_t$  ..... energija za trenje in ventilacijo m.  
 $W_b$  ..... energija, ki se predaja bremenu  
 $W_k = J \Omega^2 / 2$  kinetična energija  
 $W_m - W_t$  ... mehanska energija na gredi motorja

$$P_m = P_b + P_t + \frac{dW_K}{dt} \quad \left\| \int_0^t (\dots) dt \rightarrow \int_0^t P_m dt = \int_0^t P_b dt + \int_0^t P_t dt + \int_0^t \frac{dW_K}{dt} dt \right.$$

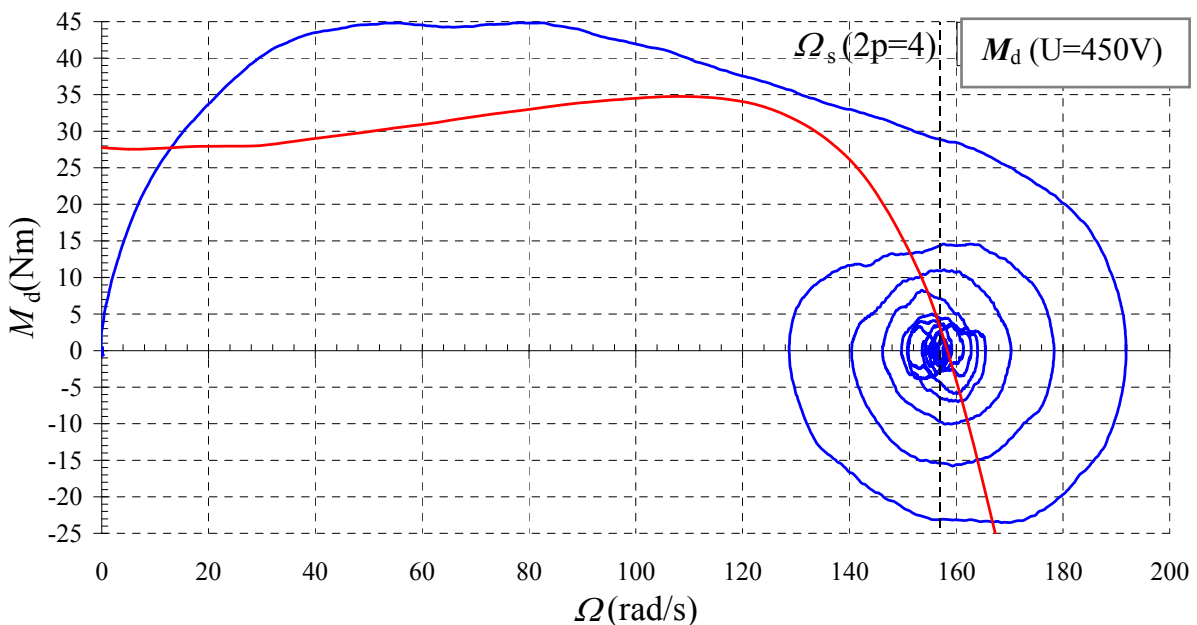
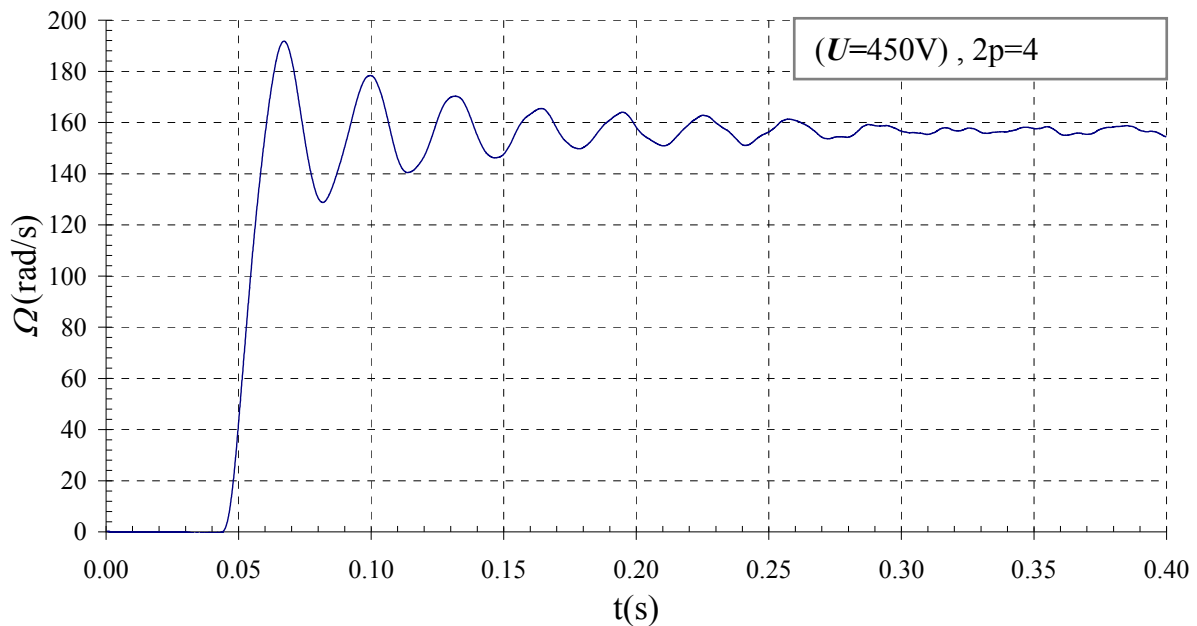
$$W_m(t) = W_b(t) + W_t(t) + J \frac{\Omega^2}{2}$$

$$\Omega = konst. \quad \left\langle \frac{dW_K}{dt} = 0 (!) \right\rangle \Rightarrow W_m = W_b + W_t$$

Glede na pogoje pri katerih karakteristike merimo oz. računamo ločimo **statične** in **dinamične karakteristike**.

**Statična karakteristika** nam predstavlja karakteristiko stroja kjer so vse točke izmerjene oz. izračunane šele ko so vrtljaji konstantni.

**Dinamična karakteristika** nam predstavlja karakteristiko stroja kjer so vse točke izmerjene oz. izračunane pri trenutni vrednosti vrtljajev.

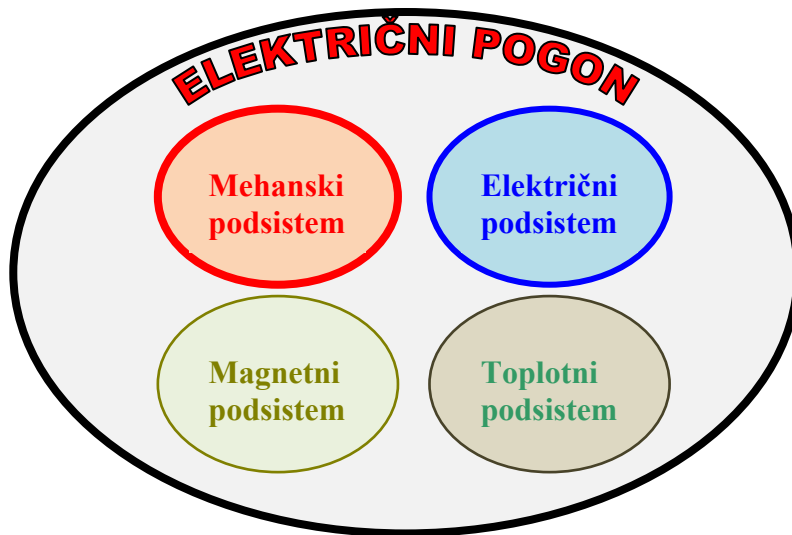


Slika: Primer **dinamične** oz. **statične** karakteristike AM.

## 1.7. PODSISTEMI V EP

V EP običajno uporabljamo statične karakteristike, tudi pri dinamičnih pojavih, če lahko predpostavimo, da se je dinamični pojav odvijal dovolj počasi, da ni spremenil statičnih karakteristik; govorimo o t.i. **kvazistatičnih karakteristikah**. Tako dinamični navor (!) rišemo v statični diagram in v njem opazujemo dinamični pojav.

Dinamično (nestacionarno) stanje ne pomeni samo spremembo **mehanskih veličin** ( $m_m, n_m$ ), ampak tudi spremembo **električnih** ( $I, U, R, L, \dots$ ), **magnetnih** ( $\Phi, B, \mu, \dots$ ) in **toplotnih veličin** ( $T$ , segrevanje/ohlajevanje, ....)



Povsod, kjer je možno želimo obravnavati te pojave ločeno, ker je skupno obravnavanje matematično preveč kompleksno in praktično nerešljivo brez dobrega matematičnega modela, ustreznih numeričnih metod in računalnika. Običajno sta zanimiva samo **mehanski** in **električni podsistem**. Pogoji za ločeno obravnavanje je:

**dinamični pojavi v enem podsistemu potekajo bistveno hitreje kot v drugem podsistemu**

**OZ.**

**dinamični pojavi v enem podsistemu potekajo bistveno počasneje kot v drugem podsistemu**

Do spreminjanja vrednosti fizikalnih veličin med dinamičnimi pojavi prihaja zaradi različnih vzrokov, vendar pa je zaradi **vztrajnosti sistema sprememba časovno končna** in **karakterizirana s časovno konstanto**. Čas trajanja dinamičnega pojava je **SORAZMERNEN skupnemu vztrajnostnemu momentu ( $J$ ) sistema** in **OBRATNO SORAZMERNEN razliki navora ES in bremenskih navorov ( $m_m - (m_b - m_{vt})$ )**, pri čemer je potrebno upoštevati predznake navorov.

$$m_m - (m_b + m_{vt}) = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \Rightarrow t = \int \frac{J}{m_m - (m_b + m_{vt})} d\Omega \Rightarrow t \Leftrightarrow J$$

$$t \Leftrightarrow \frac{1}{m_m - (m_b + m_{vt})}$$

**Mehanski podsistem**

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} \Leftrightarrow \mathbf{T}_{meh} \Leftarrow \left( \frac{\mathbf{J} \cdot \Omega_*}{M_*} \right) = \left( \frac{mD^2 \cdot n_*}{38.2 \cdot M_*} \right)$$

$$T_{meh} (s), t (s), \Omega (\text{rad/s}, s^{-1}), n (\text{min}^{-1}), J (\text{kg m}^2), M (\text{Nm})$$

**Električni podsistem**

$$\frac{\partial i}{\partial t} \Leftrightarrow \mathbf{T}_e \Leftarrow \left( \frac{L}{R} \right)$$

$$T_e (s), t (s), i (A), L (\text{Vs/A}), R (\text{Ohm}, \Omega)$$

**Toplotni podsistem**

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \Leftrightarrow \mathbf{T}_t \Leftarrow \left( \frac{m \cdot c}{S \cdot h} \right)$$

$$T_e (s), t (s), \vartheta (A), m (\text{kg}), c (\text{Ws/kgK}), S (\text{m}^2), h (\text{Ws/m}^2\text{K})$$

Pri EP sta navadno zanimiva **mehanski** in **električni** prehodni pojav, ki sta med seboj povezana, kar moramo pri matematičnem reševanju problema upoštevati. **To pomeni, da je pri opisu matematičnega modela potrebno zapisati ustrezne enačbe (diferencialne enačbe 1. reda) za oba podsistema in jih zaradi medsebojne povezanosti, reševati kot enotni sistem enačb.** Ločeno ju lahko obravnavamo le v primeru ko se časovni konstanti posameznih pojavov zelo razlikujeta. Velikokrat je to res (počasne mehanske spremembe) saj je običajno  $T_m \gg T_e$ , vendar ne vedno (hitre mehanske spremembe).

Ko opazujemo mehanski prehodni pojav sta za EP pomembna dva parametra:

- **trajanje spreminjanja hitrosti**, kar je pomembno za dinamiko proizvodnega procesa
- **izguba energije**, ki je pomembna za gospodarnost pogona in segrevanje motorja. V stacionarnem obratovanju so generirane izgube v ravnovesju napram mehanskemu delu, ki ga ES opravlja. V dinamičnih pojavih pa se pojavljajo dodatne t.i. dinamične izgube, zaradi spremembe kinetične energije, ki povzročajo dodatno segrevanje motorja in tako vplivajo na obratovanje pogona.

## 1.8. STATIČNA STABILNOST POGONSKEGA STROJA

Pod statično stabilnostjo pogonskega stroja mislimo **obratovanje, ko ta obratuje stabilno, ne glede na pojave zunanjih motenj oz. sprememb**. Na splošno velja, da motor stabilno obratuje, ko mu z **naraščanjem obremenitve** ( $M_b \uparrow$ ) **padajo vrtljaji** ( $n \downarrow$ ). Generator pa obratuje stabilno, ko mu z **naraščanjem obremenitve** ( $I_b \uparrow$ ) **pada napetost** ( $U \downarrow$ ).

<b>motor:</b> ( $M_b \uparrow \Leftrightarrow n_m \downarrow$ ) , <b>generator:</b> ( $I_b \uparrow \Leftrightarrow U \downarrow$ )
---

### Delovna točka pogona

Delovna točka pogona je točka določena s **presečiščem statične mehanske karakteristike pogonskega stroja (motorja) in delovnega stroja**. Torej mora veljati:

$m_m - m_b - m_d = 0 \Rightarrow (DT : M_m = M_b)$	
$m_d = J_s \frac{d\Omega}{dt} = 0 \Rightarrow$ $\frac{d\Omega}{dt} = 0 \Rightarrow \Omega = konst.$	$m_d = J^* \frac{dn}{dt} = \frac{mD_s^2}{38.2} \frac{dn}{dt} = 0 \Rightarrow$ $\frac{dn}{dt} = 0 \Rightarrow n = konst.$

### Statično stabilna delovna točka (DT)

DT je statično **stabilna** takrat, **ko se pogon, ki je bil zaradi neke zunanje motnje premaknjen iz DT, samodejno vrne v DT, ko motnja izgine**.

DT je statično **nestabilna** takrat, **ko zunanja motnja povzroči oddaljevanje pogona od DT**.

### Pogoj za statično stabilnost DT je

$\frac{\partial M_b}{\partial n} > \frac{\partial M_m}{\partial n}$
---

in je vedno izpolnjen pri padajočih karakteristikah  $n = f(M_m)$  motorja.

**Dinamična stabilnost EP** zajema celotni prehodni pojav od enega do drugega obratovalnega stanja (zagon, sprememba vrtljajev, motnja, ...) in je pri modernih reguliranih pogonih bolj pomembna kot statična stabilnost EP.



### Primer statično stabilne delovne točke

**DT:**  $n_{DT}, M_{mDT}, (M_{bDT})$ ..... **zmanjšanje bremenskega navora**

motnja se pojavi  $M_{bDT} \Rightarrow M_{bDT} - \Delta M_b = M_b^{(1)}$

$$M_{mDT} > M_b^{(1)} \Rightarrow M_d > 0$$

$\Rightarrow$  (pospeševanje do točke ( $M_m = M_b^{(1)}$ ))

$$M_d = 0 \Rightarrow \frac{dn}{dt} = 0 \Rightarrow n_{DT} = n^{(1)}$$

motnja izgine  $M_b^{(1)} \Rightarrow M_{bDT}$

$$M_m < M_{bDT} \Rightarrow M_d < 0$$

$\Rightarrow$  (zaviranje do točke ( $M_m = M_{bDT}$ ))

$$M_d = 0 \Rightarrow \frac{dn}{dt} = 0 \Rightarrow n^{(1)} = n_{DT}$$

**DT:**  $n_{DT}, M_{mDT}, (M_{bDT})$ ..... **povečanje bremenskega navora**

motnja se pojavi  $M_{bDT} \Rightarrow M_{bDT} + \Delta M_b = M_b^{(2)}$

$$M_{mDT} < M_b^{(2)} \Rightarrow M_d < 0$$

$\Rightarrow$  (zaviranje do točke ( $M_m = M_b^{(2)}$ ))

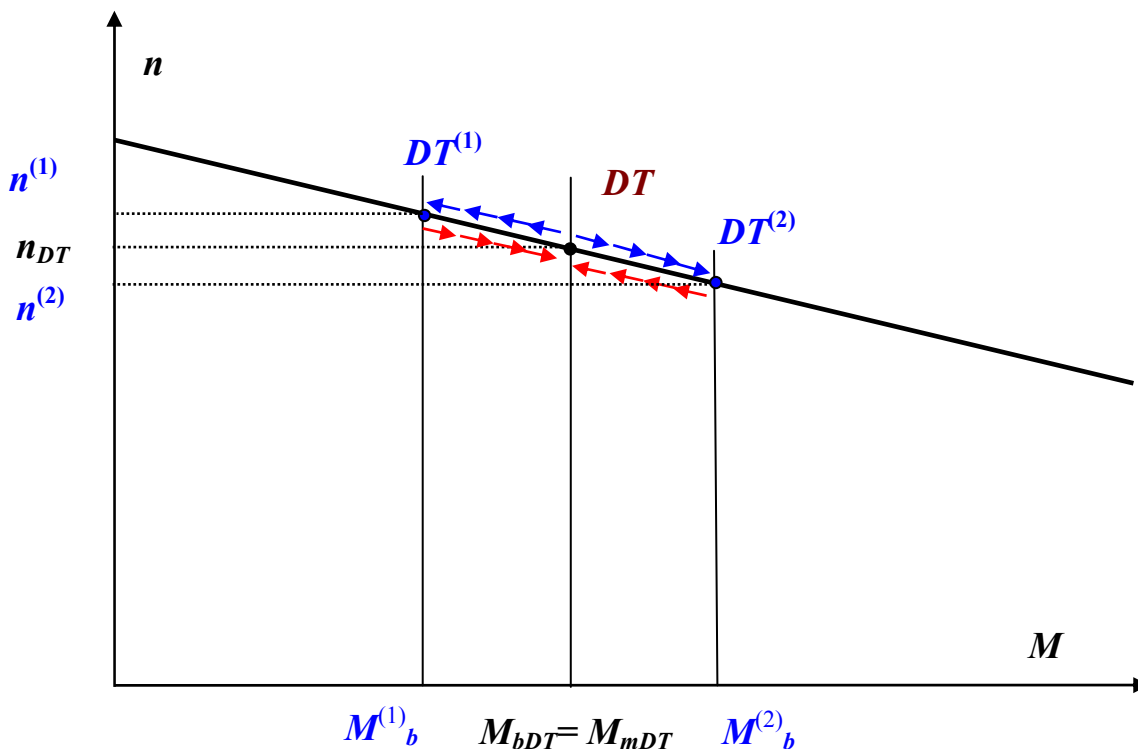
$$M_d = 0 \Rightarrow \frac{dn}{dt} = 0 \Rightarrow n_{DT} = n^{(2)}$$

motnja izgine  $M_b^{(2)} \Rightarrow M_{bDT}$

$$M_m > M_{bDT} \Rightarrow M_d > 0$$

$\Rightarrow$  (pospeševanje do točke ( $M_m = M_{bDT}$ ))

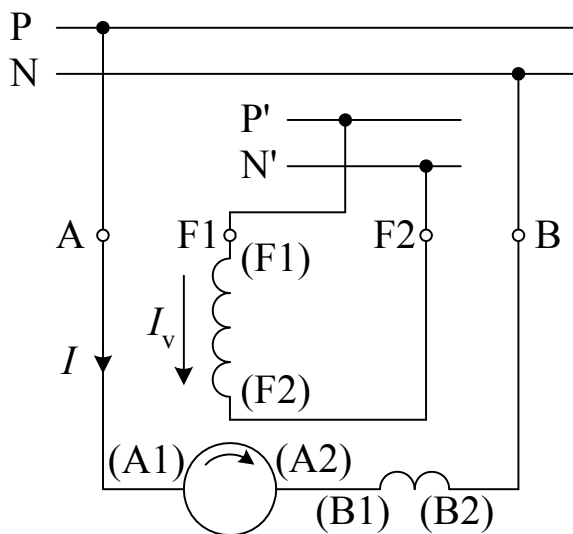
$$M_d = 0 \Rightarrow \frac{dn}{dt} = 0 \Rightarrow n^{(2)} = n_{DT}$$



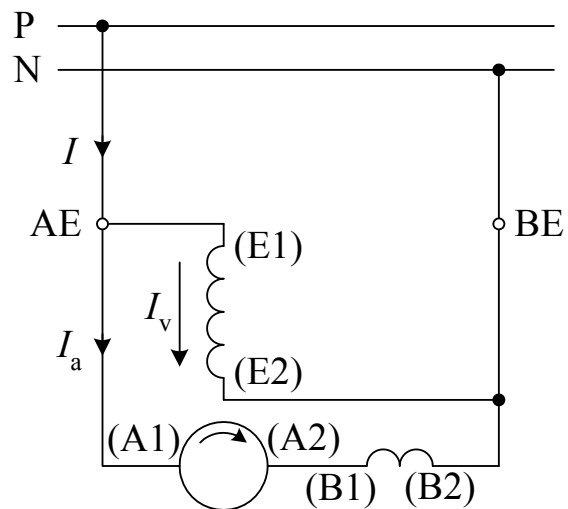
## 2. UPORABA ENOSMERNIH MOTORJEV ZA POGONSKI STROJ

Glede na vezavo vzbujalnega navitja delimo EM na :

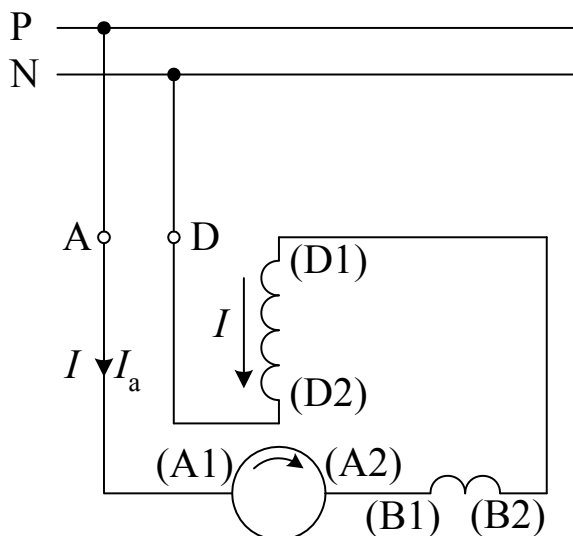
- ◆ EM s tujim vzbujanjem
- ◆ EM s paralelnim vzbujanjem
- ◆ EM s serijskim vzbujanjem
- ◆ EM z mešanim (kompandnim) vzbujanjem



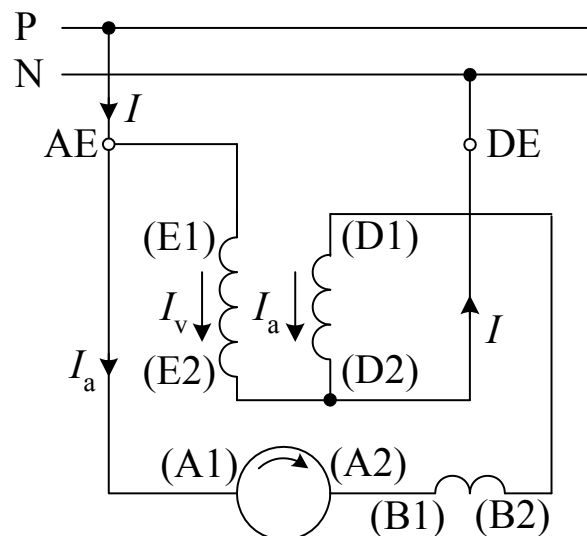
Motor s tujim vzbujanjem



Motor s paralelnim vzbujanjem



Motor s serijskim vzbujanjem



Motor s kompaundnim vzbujanjem

Primeri vezav enosmernih motorjev [L9].

$R$ ... celotna ohmska upornost rotorskega tokokroga	$L_a$ – induktivnost rotorskega navitja
$R_v$ ... ohmska upornost vzbujalnega tokokroga	$L_v$ – induktivnost vzbujalnega navitja
$e$ – inducirana napetost v rotorskem tokokrogu	

Splošni EP opisuje **sistem DIFERENCIALNIH ENAČB** za električni in mehanski podsistem

Električni podsistem (uporabimo 2. Kirchoffov zakon)	1. napetostna enačba rotorskega tokokroga 2. napetostna enačba vzbujačnega tokokroga
Mehanski podsistem (uporabimo Newtonov zakon)	3. enačba mehanskega ravnovesja

Motor s tujim oz. paralelnim vzbujanjem

$$U = R i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e(t)$$

$$U_v = R_v i_v + L_v \frac{di_v}{dt}$$

$$m_m - m_b - m_{vt} = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Motor s serijskim vzbujanjem

$$U = (R + R_v) i_a + (L_a + L_v) \frac{di_a}{dt} + e(t)$$

$$m_m - m_b - m_{vt} = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$\Omega(t)$ ,  $n(t)$ ,  $m_m(t)$

$i_a(t)$ ,  $i_v(t)$ ,  $\Phi_g(t)$ ,  $e(t)$

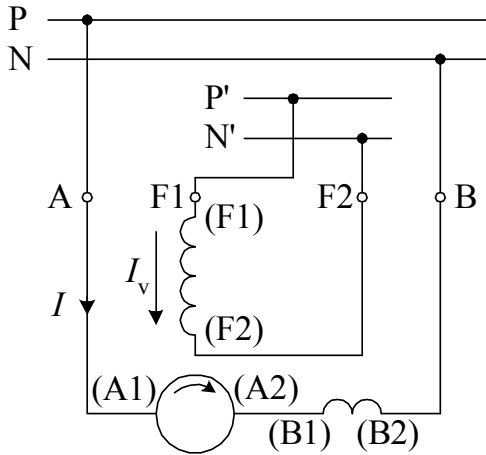
$$e = k_e \phi_g \Omega \quad , \quad m_m = k_m \phi_g i_a \quad , \quad \phi_g(i_v)$$

V ravnovesnem stanju (v DT) se zapis poenostavi, saj velja, da se veličine (tok, inducirana napetost navor, vrtljaji, itd.) s časom ne spreminjajo. Primer EM s tujim vzbujanjem.

Dinamično stanje pogona	Ravnovesno stanje pogona – obratovanje v DT
$U = R i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e(t)$	$i_a \Rightarrow I_a$ $i_v \Rightarrow I_v$ $e(t) \Rightarrow E$ $U = R i_a + E$
$U_v = R_v i_v + L_v \frac{di_v}{dt}$	$m_m(t) \Rightarrow M_m$ $U_v = R_v i_v$
$m_m - m_b - m_{vt} = J \frac{d\Omega}{dt}$	$m_b(t) \Rightarrow M_b$ $m_{vt}(t) \Rightarrow M_{vt}$ $M_m = M_b + (M_{vt})$
	$\Omega(t) \Rightarrow \Omega = konst.$

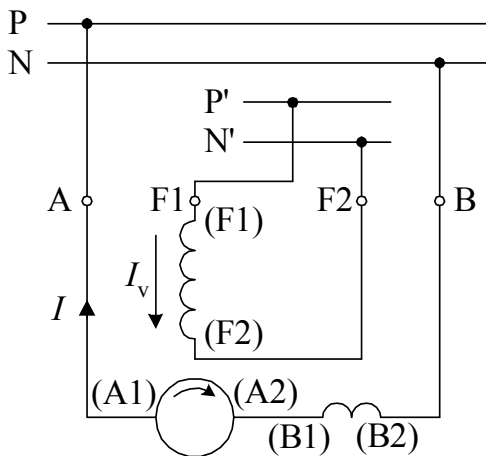
## 2.1. OSNOVNE ENAČBE ZA MOTORSKO IN GENERATORSKO OBRATOVANJE

Za ES lahko ne glede na vzbujanje (čeprav je slika samo za primer ES s tujim vzbujanjem) zapišemo za rotorski tokokrog naslednjo napetostno enačbo.



### **MOTOR:**

$$U = E + I_a R_a + \left( \sum_{i=1} I_a R_{d,i} + \Delta U_{sc} \right) \quad (.1)$$



### **GENERATOR:**

$$E = U + I_a R_a + \left( \sum_{i=1} I_a R_{d,i} + \Delta U_{sc} \right) \quad (.2)$$

V obeh enačbah sta člena v oklepaju sestavljena iz padcev napetosti na dodatnih uporih v rotorskem tokokrogu, na ščetkah in glede na izvedbo npr. padca napetosti na kompenzacijskem navitju, oz. glede na vezavo npr. padca napetosti na serijskem vzbujaalnem navitju. Če posebej ne bomo poudarili bomo v nadaljevanju upoštevali vse te dodatne padce napetosti in padec  $I_a R_a$  s členom  $I_a R$ .

$$I_a R_a + \left( \sum_{i=1} I_a R_{d,i} + \Delta U_{sc} \right) = I_a R_a + I_a \left( \sum_{i=1} R_{d,i} + R_{sc} \right) \Rightarrow I_a R$$

$$M = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \cdot \phi_g \cdot I_a$$

$$E = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \cdot \phi_g \cdot \Omega$$

$$\left( M = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{E \cdot I_a}{\Omega} = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \phi_g \cdot \Omega \frac{I_a}{\Omega} = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \phi_g I_a \right) \dots \text{idealni (električni) vrtilni moment (navor)}$$

**E** ... inducirana napetost v rotorskem navitju

**RAZLIČNI ZAPISI ENAČB ( $n - \Omega - M$ ):**

$$\underline{M(Nm), E(V), \phi(Vs), n(\text{min}^{-1})}$$

$$E = \frac{p \cdot z}{60 \cdot a} \cdot \phi_g \cdot n \Rightarrow \left( k_e^* = \frac{p \cdot z}{60 \cdot a} \right) \Rightarrow E = k_e^* \cdot \phi_g \cdot n$$

$$M = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \cdot \phi_g \cdot I_a \Rightarrow \left( k_m = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \right) \Rightarrow k_m \cdot \phi_g \cdot I_a \Rightarrow \left( K_\phi = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \cdot \phi_g \right) \Rightarrow M = K_\phi \cdot I_a$$

$$\frac{k_e^*}{k_m} = 0.1047$$

$$\underline{M(Nm), E(V), \phi(Vs), n(s^{-1})}$$

$$E = \frac{p \cdot z}{a} \cdot \phi_g \cdot n \Rightarrow \left( k_e = \frac{p \cdot z}{a} \right) \Rightarrow k_e \cdot \phi_g \cdot n$$

$$M = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \cdot \phi_g \cdot I_a \Rightarrow \left( k_e = \frac{p \cdot z}{2\pi a}, K_\phi = k_e \cdot \phi_g \right) \Rightarrow M = K_\phi \cdot I_a$$

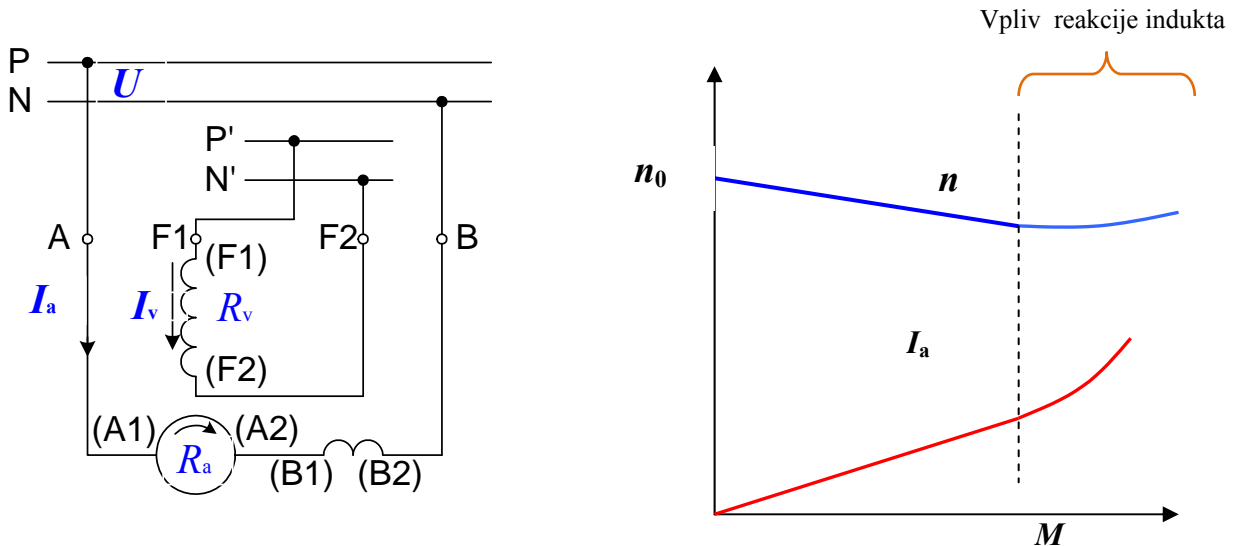
$$\underline{M(Nm), E(V), \phi(Vs), \Omega\left(\frac{\text{rad}}{s}, s^{-1}\right)}$$

$$E = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \cdot \phi_g \cdot \Omega \Rightarrow \left( k_e = \frac{p \cdot z}{2\pi a}, K_\phi = k_e \cdot \phi_g \right) \Rightarrow E = K_\phi \cdot \Omega$$

$$M = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot a} \cdot \phi_g \cdot I_a \Rightarrow \left( k_e = \frac{p \cdot z}{2\pi a}, K_\phi = k_e \cdot \phi_g \right) \Rightarrow M = K_\phi \cdot I_a$$

## 2.2. ENOSMERNI MOTOR S TUJIM VZBUJANJEM

Za EM z tujim vzbujanjem (oz. za EM s paralelnim vzbujanjem in EM s trajnimi magneti) lahko zapišemo naslednje tri enačbe, ki veljajo vse za stacionarne razmere, dokler je vpliv reakcije indukta zanemarljiv.



$$M = k_m \phi_g I_a \quad (.1)$$

$$n = \frac{U - I_a R}{k_e^* \phi_g} \quad (.2a)$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \phi_g^2} M \quad (.2b)$$

$$k_e^* = \frac{p \cdot Z}{60 \cdot a}, \quad k_m = \frac{p \cdot Z}{2\pi \cdot a} \quad (.3)$$

Upornost  $R$  predstavlja celotno upornost rotorskega tokokroga, ki jo sestavljajo upornost rotorskega navitja, prehodna upornost ščetke-komutator in vse dodatne upornosti v rotorskem tokokrogu.

$$R = R_a + \sum_{i=1} R_{d,i} + R_{sc} \quad (.4)$$

Ker nas zanimajo karakteristika vrtljajev od navora (zunanja oz. mehanska karakteristika motorja) in **kako lahko vplivamo na njen potek**, zapišimo enačbi (.2a in .2b) v obliki (.5a,.5b).

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g} = n_0 - \Delta n \quad (.5a)$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \phi_g^2} M = n_0 - \Delta n \quad (.5b)$$

Pri tem nam  $n_0$  predstavlja vrtljaje praznega teka,  $\Delta n$  pa spremembo vrtljajev pri spremembi obremenitve. Ker pri projektiranju  **pogona želimo vplivati na obliko mehanske karakteristike**, da **zadovoljimo** zahtevam delovnega stroja, je pomembno od česa sta odvisna  $n_0$  in  $\Delta n$ . Iz primerjave enačb (.2a, .2b) in (.5a, .5b), lahko zapišemo naslednje relacije (.6, .7a, .7b).

$$n_0 = f(U, \phi_g) \quad (.6)$$

$$\Delta n = g(I_a, R, \phi_g) \quad (.7a)$$

$$\Delta n = g(M, R, \phi_g) \quad (.7b)$$

- Zgornje enačbe veljajo v področju, **kjer ni vpliva reakcije indukta**  $\theta_g(I_v)$ , to je v področju, kjer je karakteristika praktično linearna. To področje lahko **razširimo s kompenzacijskim navitjem**.
- V področju, kjer prihaja do vpliva reakcije indukta se karakteristiki za vrtljaje in navor **bistveno razlikujeta od idealnih karakteristik**. Vzrok je v **reakciji indukta**, ki na eni strani **pola zmanjša fluks, na drugi pa ga poveča**. Če pride do delnega zasičenja magnetnega materiala (zaradi nelinearne magnetilne karakteristike magnetnega materiala), se to kaže v **zmanjšanem in popačenem**  $\theta_g$ . To povzroči **večanja vrtljajev (nestabilno obratovanje)** pri povečevanju obremenitve in **hitrejše naraščanje toka (problem povečanega segrevanja in problem komutacije!)**.

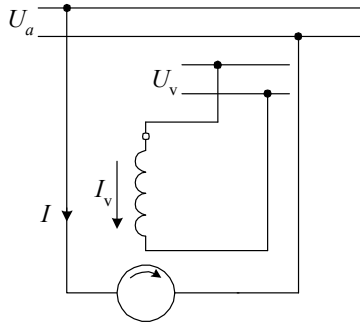
$$M = k_m (\phi_g \downarrow) (I_a \uparrow)$$

$$\phi_g \downarrow \Rightarrow$$

$$n \uparrow = \frac{U}{k_e^* (\phi_g \downarrow)} - \frac{I_a \cdot R}{k_e^* (\phi_g \downarrow)}$$

- ◇ reakcija **indukta bistveno omejuje maksimalno dopustno obremenitev EM** s paralelnim oz. tujim vzbujanjem (nekompenzirani  $\frac{M_{max}}{M_n} \approx 1.6 \div 1.8$ , kompenzirani  $\frac{M_{max}}{M_n} \approx 2.2$ ).

### 2.2.1 Nastavljanje vrtljajev EM s tujim vzbujanjem



$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g} = n_0 - \Delta n \quad (.5a)$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \phi_g^2} M = n_0 - \Delta n \quad (.5b)$$

Iz enačb (.5a, .5b) vidimo, da lahko spreminjamo vrtljaje oz. mehansko karakteristiko EM s tujim oz. paralelnim vzbujanjem na različne načine (.8).

$$n = h(I_a, U, R, \phi_g) \quad , \quad n = h(M, U, R, \phi_g) \quad (.8)$$

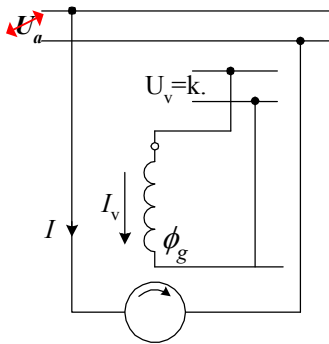
$$n_0 = f(U, \phi_g)$$

$$\Delta n = g(I_a, R, \phi_g) \quad \Delta n = g(M, R, \phi_g)$$

1. s spreminjanjem napetosti  $U$  na sponkah indukta
2. s spreminjanjem magnetnega pretoka.  $\phi_g$  v zračni reži
3. s spreminjanjem napetosti  $U$  na sponkah indukta in s spreminjanjem magnetnega pretoka  $\phi_g$ . v zračni reži
4. s spreminjanjem upornosti  $R$  rotorskega tokokroga
5. s pulznim napajanjem EM



### 2.2.1.1 Spreminjanje napetosti $U$ na sponka indukta ( $\Phi_g = \text{konst.}$ )



$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g} \quad n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \phi_g^2} M$$

$$\langle U \uparrow \downarrow ; \phi_g = \text{konst} \rangle: \Rightarrow n_0 = f(U)$$

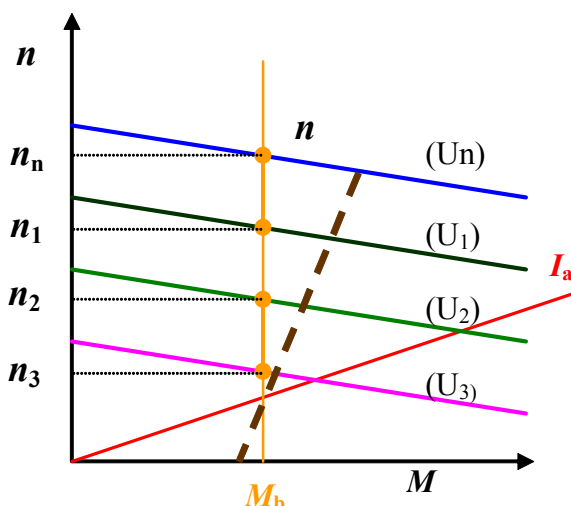
$$\Rightarrow \Delta n \neq f(U)$$

$$\Rightarrow I_a \neq f(U) \Leftrightarrow I_a = f(M_b) !!$$

⇒ s spreminjanjem napetosti **kotve** **direktno** vplivamo na spreminjanje  $n_0$  in s tem posredno na **celotno mehansko karakteristiko EM**. **Ker se drugi člen  $\Delta n$  ne spreminja**, predstavlja pa spremembo vrtljajev v odvisnosti od obremenitve, pomeni to, da je **naklon karakteristike v vseh primerih enak**.

⇒ s spreminjanjem napetosti kotve se **pri nespremenjeni obremenitvi ne spreminja tok  $I_a$** , kar bi na prvi pogled pričakovali. Razlog tiči v tem, da se spremenijo vrtljaji, ki zmanjšajo  $E$  in s tem kompenzirajo vpliv spremembe  $U$ .

Napetost na sponkah kotve **znižujemo**, kar pomeni, da dobimo umetne karakteristike, ki ležijo **pod naravno karakteristiko** in so **paralelne z njo**.



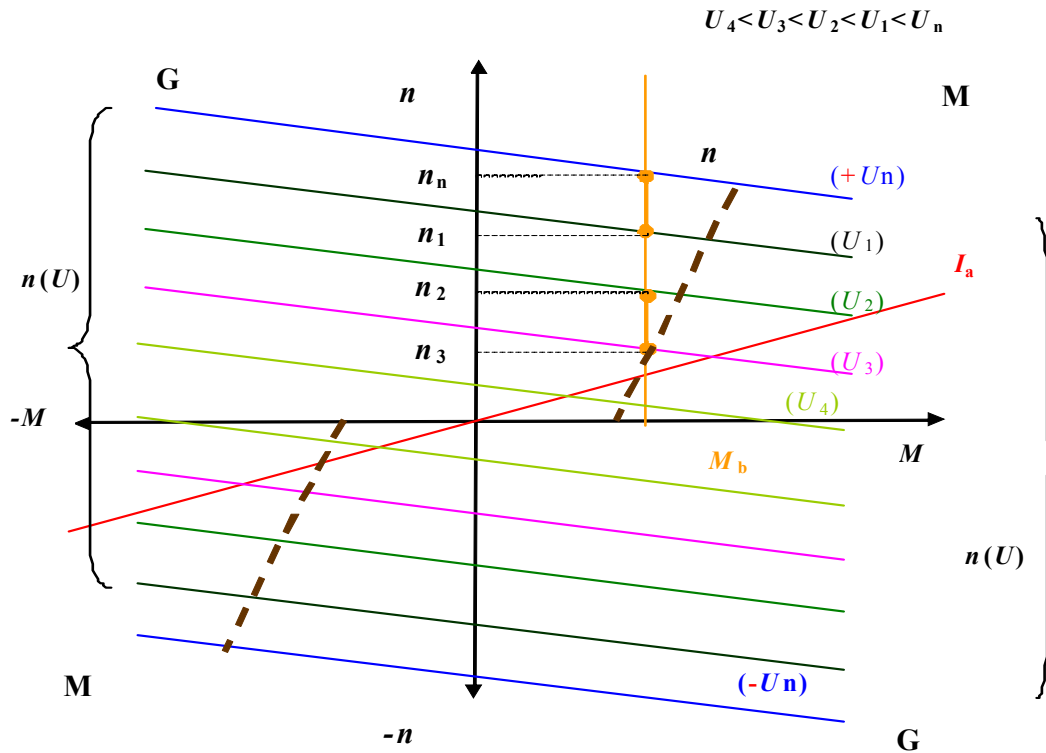
Enačba za preračunavanje vrtljajev iz ene na drugo karakteristiko, pri različnih napetostih.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1 - I_a R}{U_2 - I_a R} \quad (9)$$

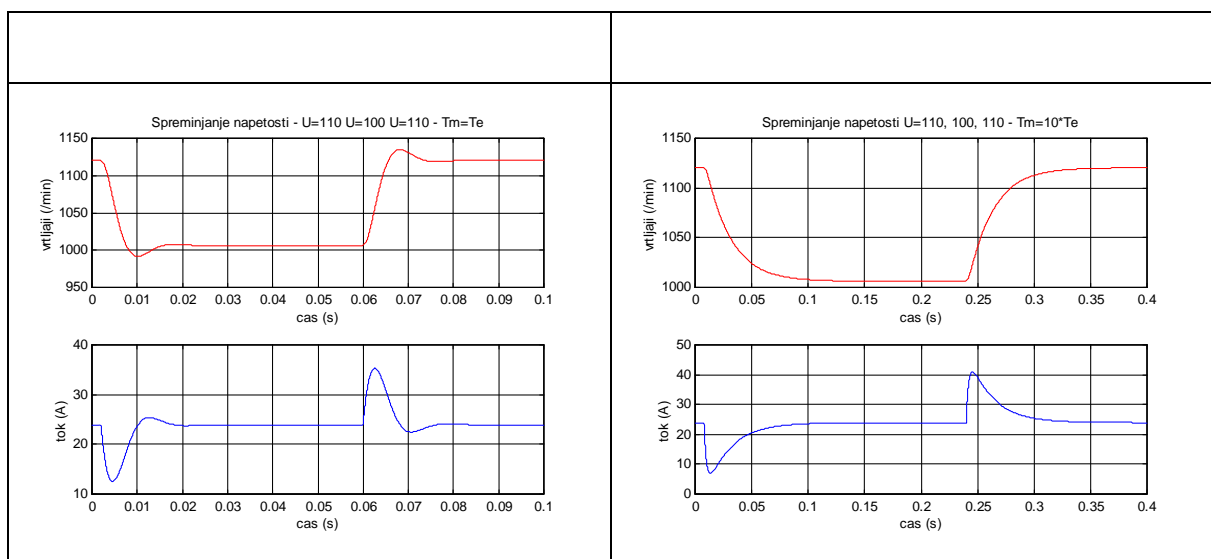
◇ zaradi spreminjanja  $U$  **ni dodatnih izgub**

► **gospodarno nastavljanje vrtljajev**

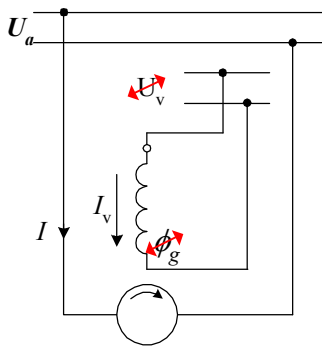
◇ če pri EM s lastnim hlajenjem pri zmanjševanju  $U$  ni dodatnega hlajenja, ► **moramo znižati dopustni bremenski navor pod vrednost, ki jo določa meja trajne obremenitve** (črtkana linija (— — —) na sliki).



- Ker lahko napetost spreminjamo od  $+U_n$  do  $-U_n$  dobimo karakteristike v vseh štirih kvadrantih (motorsko in generatorsko obratovanje ter možnost zaviranja)
- V stacionarnem obratovanju je rotorski tok proporcionalnem navoru bremena, tako da sprememba napetosti ne vpliva na karakteristiko  $M(I_a)$ .
- Pri EM je lahko navor pri zavrtem rotorju (zagonski navor) tudi  $10x M_n$ , vendar je normalno obratovanje omejeno na področje  $-2 \leq \frac{M}{M_n} \leq 2$



### 2.2.1.2 Spreminjanje magnetnega pretoka $\Phi_g$ zračne reže ( $U = \text{konst.}$ )



$$n = \frac{U}{k_e^* \Phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \Phi_g} \qquad n = \frac{U}{k_e^* \Phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \Phi_g^2} M$$

$$\langle \Phi_g \updownarrow ; U = \text{konst} \rangle : \quad \Rightarrow \quad n_0 = f(\Phi_g)$$

$$\qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \Rightarrow \quad \Delta n = f(\Phi_g)$$

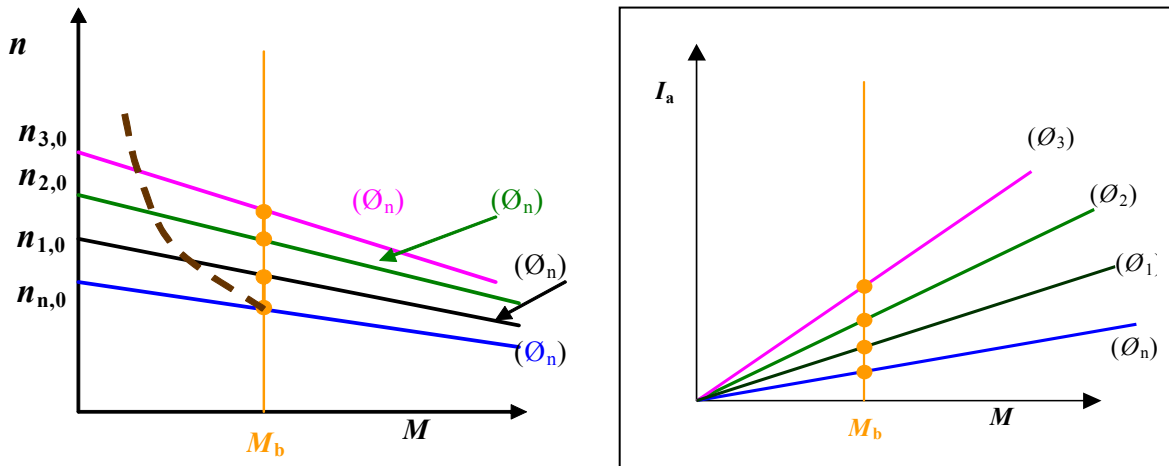
$$\Rightarrow \quad I_a = f(\Phi_g) \quad \Leftrightarrow \quad I_a = f(M_b, \Phi_g)$$

⇒ s spreminjanjem  $\Phi_g$  direktno vplivamo tako na spreminjanje  $n_0$  kot  $\Delta n$  in s tem na **celotno mehansko karakteristiko EM**. Ker se drugi člen  $\Delta n$  tudi spreminja, se spreminja tudi **naklon karakteristike v odvisnosti od  $\Phi_g$**  in ne tako kot pri spreminjanju napetosti, ko je bil enak

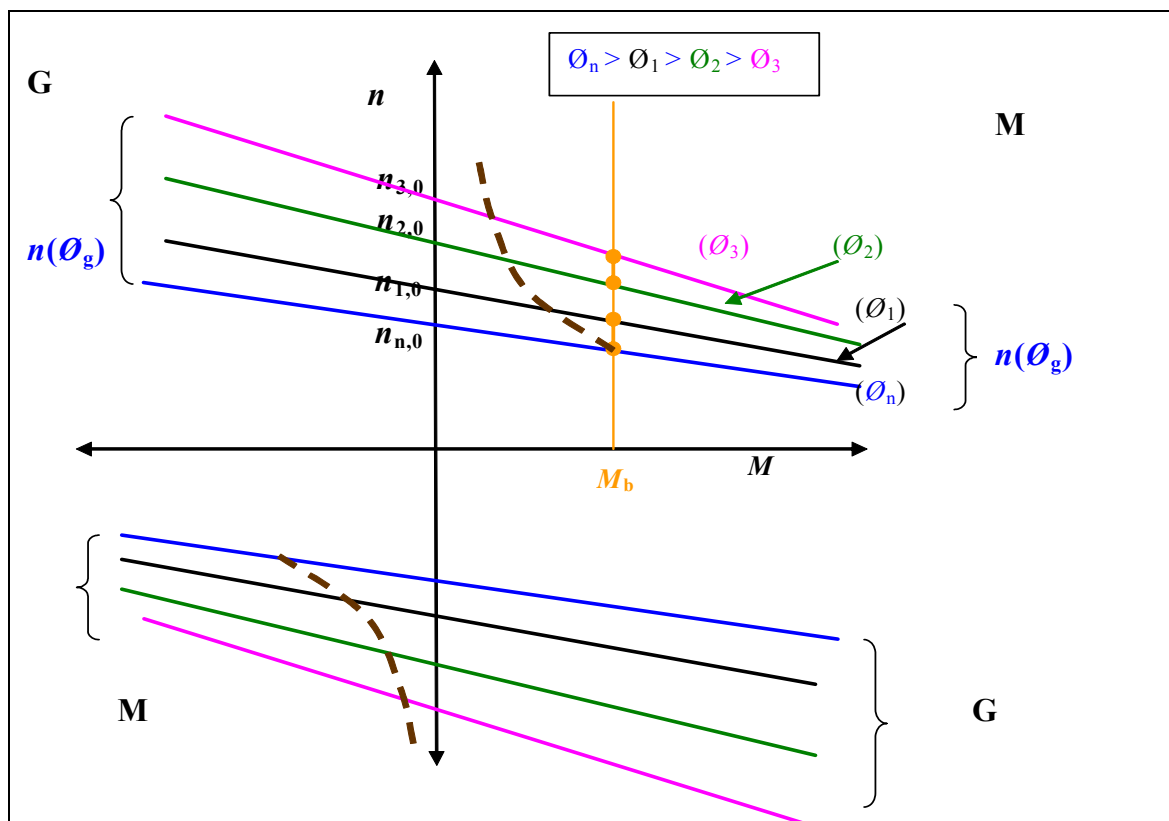
⇒ s spreminjanjem napetosti kotve se pri nespremenjeni obremenitvi **spreminja tok  $I_a$**

Fluks lahko spreminjamo v območju  $-\phi_{g,n} \leq \phi_g \leq \phi_{g,n}$ . Tako dobimo karakteristike vrtljajev v vseh štirih kvadrantih t.j. za obe smeri vrtenja in obe smeri navora. Možno je tudi spremeniti smer vrtenja (reverzirati) z zamenjavo polaritete napetosti vzbujalnega tokokroga. **Vendar zaradi običajno veliko večje električne časovne konstante vzbujalnega tokokroga napram časovni konstanti indukta, tega načina ne uporabljamo, ker so časi prehodnega pojava v primerjavi s spremembo napetosti  $U_a$ , veliko večji.** Uporabljamo pa ta način, takrat ko ni možno reverzirati s spremembo napetosti armature, ali ko to zahteva velike stroške.

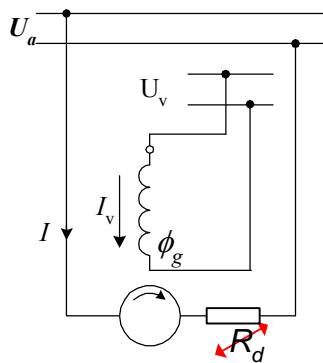
**Zaradi problemov s komutacijo in vplivom reakcije indukta, se polje ne slabi pod  $\phi_{g,n}/3$ . Pri večjih strojih pa je potrebno še omejiti maksimalno tok armature.**



- ◇ z zmanjšanjem fluksa **vrtljaji naraščajo** ► karakteristike vrtljajev pa **postajajo vse bolj strme**, kar ni ugodno pri pogonih, kjer želimo obdržati konstantne vrtljaje, ne glede na obremenitev
- ◇ pri enaki obremenitvi se **povečuje tok** in s tem **izgube** kar ni ugodno s strani segrevanja motorja ► **zaradi tega moramo razbremeniti motor pod mejo trajne obremenitve** (črtkana linija (— — —) na sliki). Kolikšna je razbremenitev je odvisno tudi od tega, ali gre za lastno ali tuje hlajen motor. Takšen način spreminjanja  $n$  je ugoden pri pogonih, kjer z naraščanjem  $n$  pada  $M_b$  ( $P=M*n$ )
- ◇ pri EM brez kompenzacijskega navitja, je **vpliv reakcije armature je pri slabljenju polja še posebej močan**.



### 2.2.1.3 Spreminjanje upornosti v rotorskem tokokrogu ( $U = \text{konst.}, \phi_g = \text{konst.}$ )



$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g} \quad n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \phi_g^2} M$$

$\langle R \uparrow ; U_a = \text{konst.}, \phi_g = \text{konst.} \rangle :$

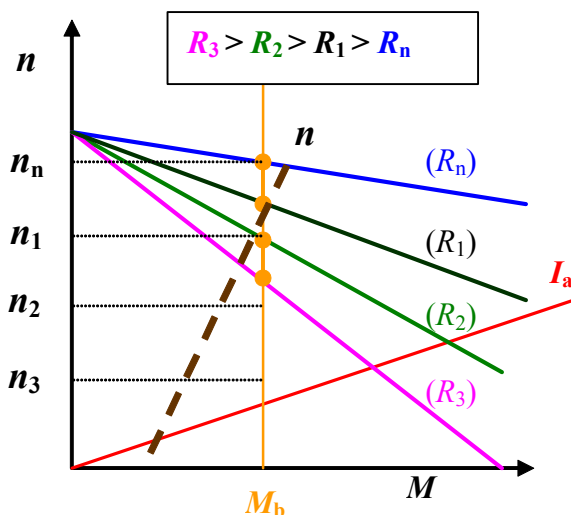
$$\Rightarrow n_0 \neq f(R)$$

$$\Rightarrow \Delta n = f(R)$$

$\Rightarrow$  s spreminjanjem upornosti rotorskega tokokroga (kotve) **direktno vplivamo na spreminjanje  $\Delta n$**  in s tem posredno na **celotno mehansko karakteristiko EM**. Ker se člen  $n_0$  ne spreminja, potekajo **vse umetne karakteristike potekajo skozi enako točko ( $n_0$ )**, kot naravna karakteristika

$\Rightarrow$  s spreminjanjem upornosti kotve se pri nespremenjeni obremenitvi **ne spreminja tok  $I_a$** , kar bi na prvi pogled pričakovali. Razlog tiči v tem, da se spremenijo vrtljaji, ki zmanjšajo  $E$  in s tem kompenzirajo vpliv spremembe  $R$ .

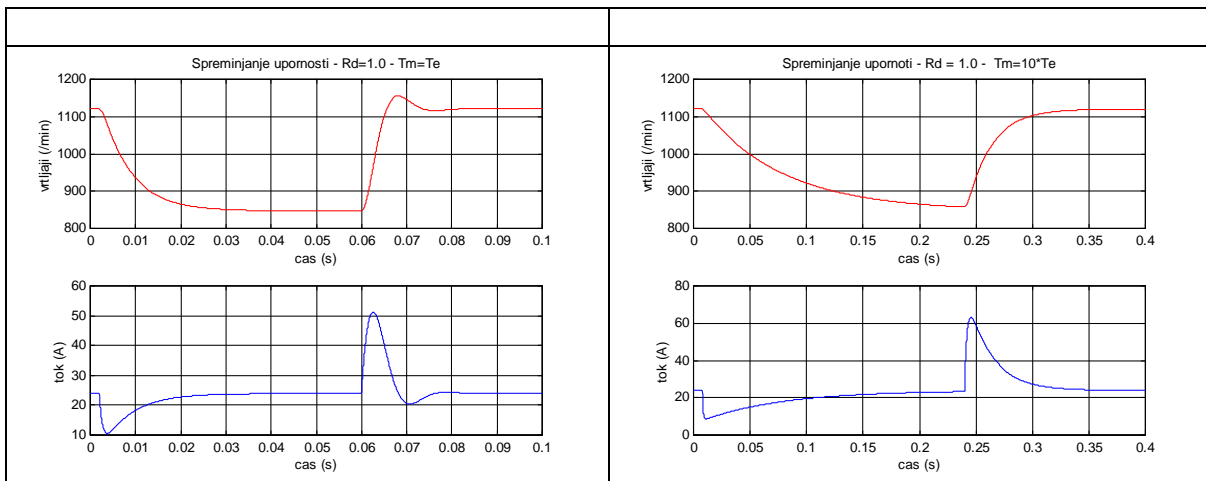
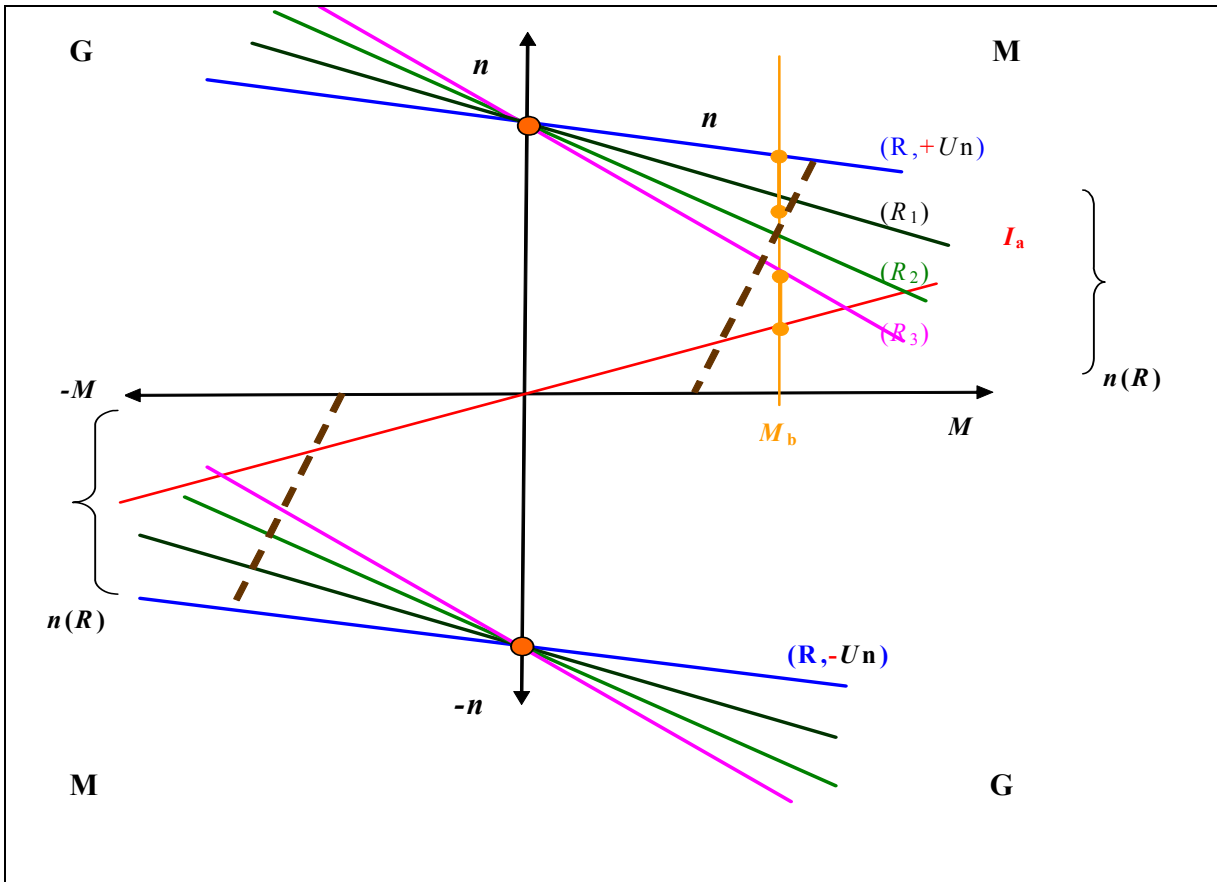
Upornost rotorskega tokokroga **povečujemo**, kar pomeni, da dobimo umetne karakteristike, ki ležijo **pod naravno karakteristiko**.



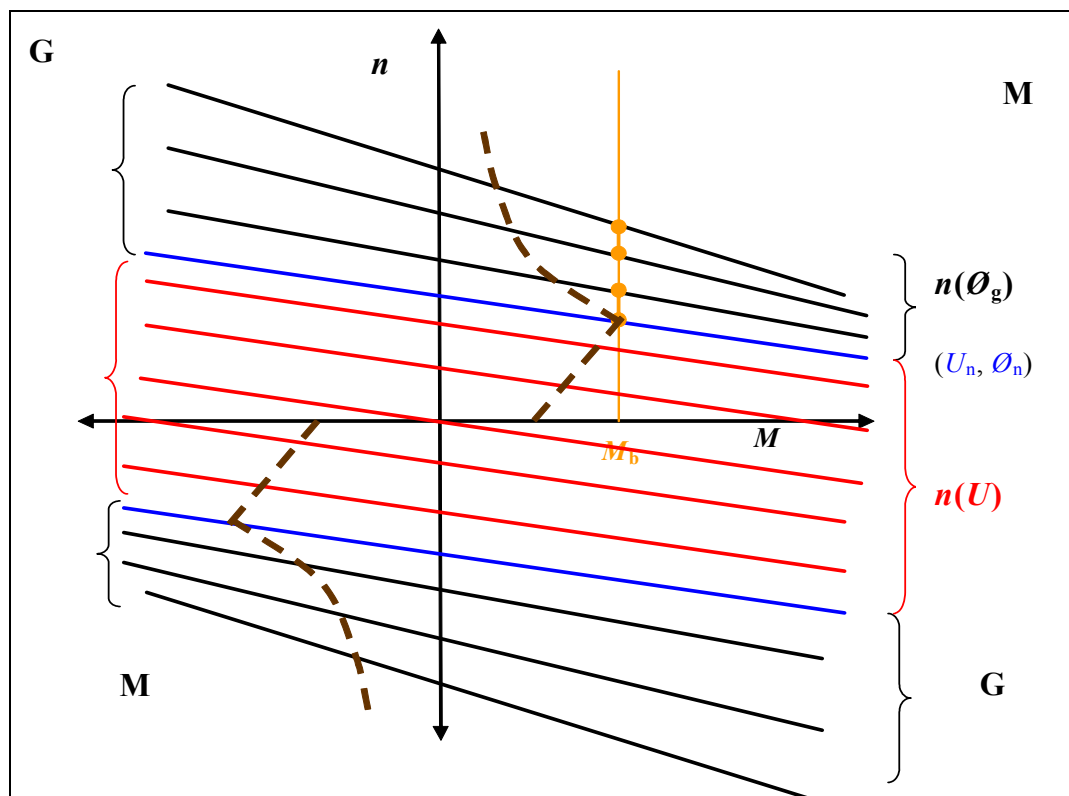
Enačba za preračunavanje vrtljajev iz ene na drugo karakteristiko, pri različnih rotorskih upornostih.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_a - I_a R_1}{U_a - I_a R_2} \quad (10)$$

- ◇ dodatne izgube zaradi  $R \uparrow$  so **▶ negospodarno nastavljanje vrtljajev**
- ◇ če pri EM s lastnim hlajenjem pri  $R \uparrow$  ni dodatnega hlajenja, **▶ moramo znižati dopustni bremenski navor pod vrednost, ki jo določa meja trajne obremenitve** ( linija ---- na sliki).



### 2.2.1.4 Spreminjanje $U$ na sponka indukta in magnetnega pretoka $\Phi_g$ zračne reže

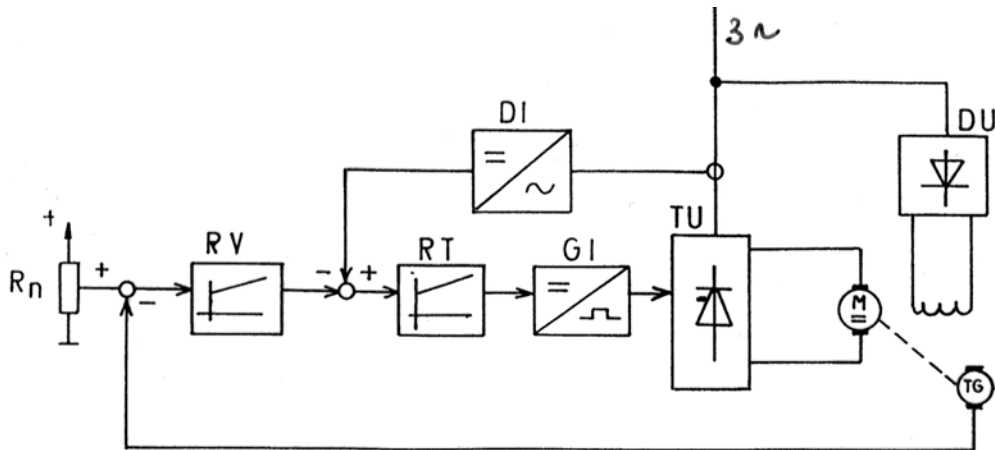


### 2.2.1.5 Regulacija vrtljajev z $U$ in $\Phi_g$

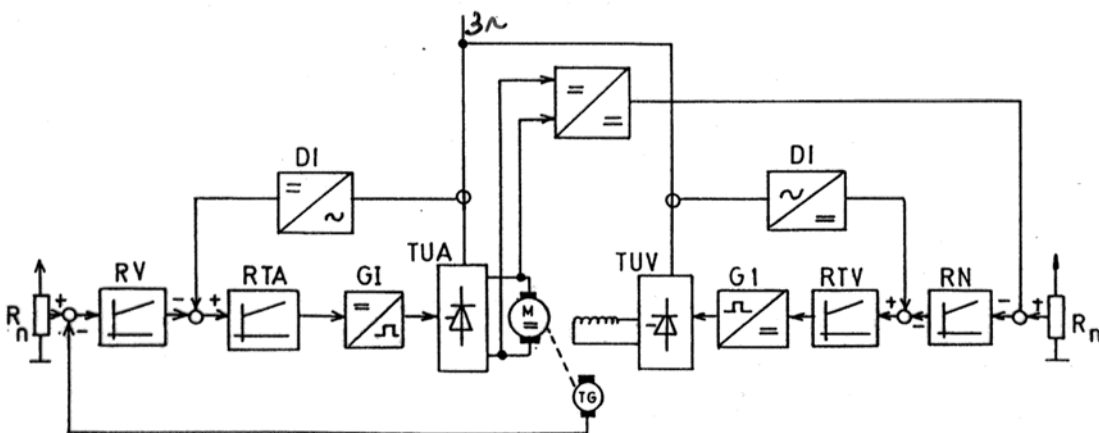
Dosedanje slike prikazujejo statične karakteristike pri spremembi napetosti kotve in fluksa. Velikokrat pa je potrebno zagotoviti določeno obnašanje motorja v pogonu, ne glede na vpliv bremena ali napajalne napetosti. To je seveda možno le z reguliranim pogonom.

**Pri tem regulacija ne skrbi samo za zahtevano obratovalno stanje ampak omogoča tudi omejevanje toka ali navora v dinamičnih stanjih (zagon, zaviranje) ter preobremenitve motorja pri stacionarnem obratovanju. S tem regulacija ščiti motor, kot tudi izvor napajanja.**

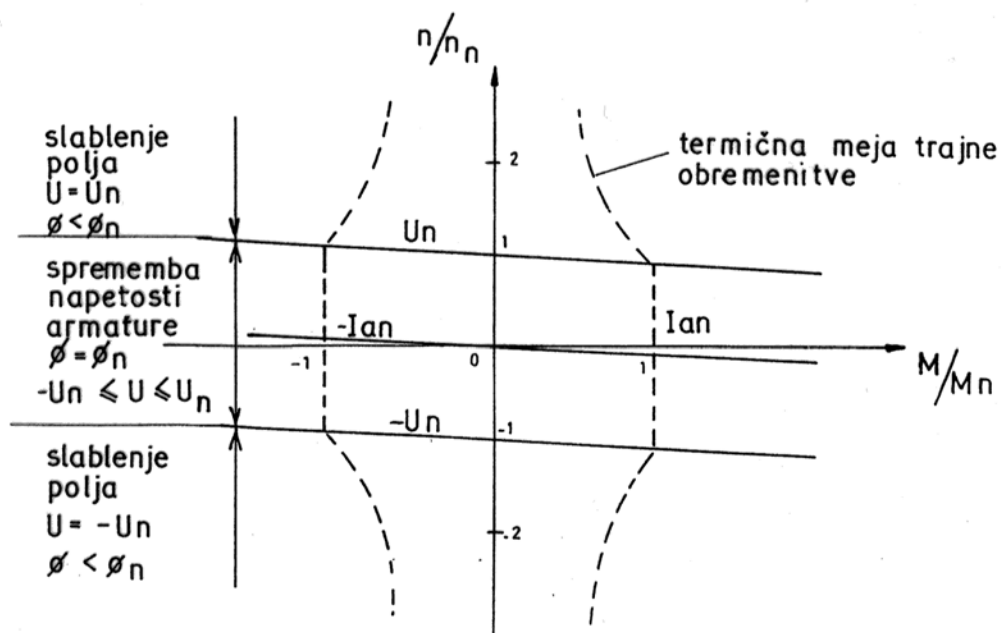
Pri velikem številu pogonov se zahtevajo nespremenjeni vrtljaji, v določenem območju obremenitve ( $\pm 2M_n$ ), ne glede na karakteristiko bremena. Ko doseže obremenitev maksimalno vrednost, pa mora regulacija omejiti nadaljno naraščanje obremenitve. Principielna shema regulacije vrtljajev s spremembo napetosti armature je prikazana na sliki. Želeni  $n$  se podajo z potenciometrom  $R_n$ . Dejanski vrtljaji se merijo, npr. s pomočjo tahogeneratorja in preko povratne zveze pripeljejo na primerjalni člen, ki je vhod v regulator vrtljajev. Izhod iz tega regulator je tokovna referenca, ki se na naslednjem primerjalnem členu primerja s merjenim tokom armature, ki ga lahko merimo na enosmerni ali izmenični strani napajalnika (usmernika). Razliko tokov peljemo v regulator toka, ki preko svojega izhoda vpliva na napajalnik.



Slika: regulacija vrtljajev s spremembo napetosti rotorskega tokokroga.



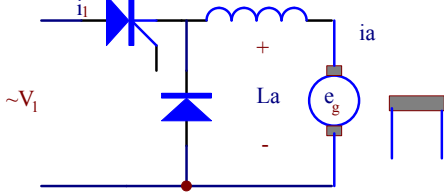
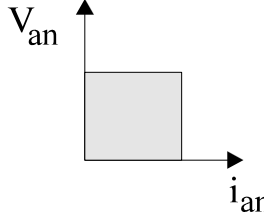
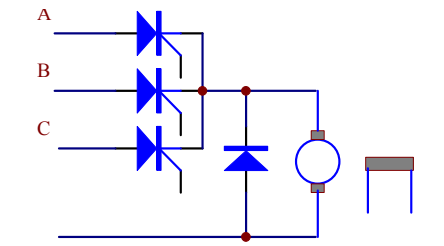
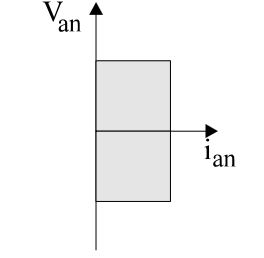
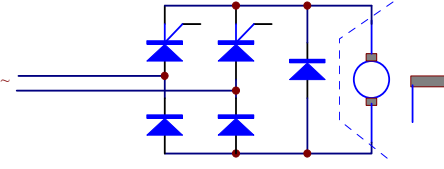
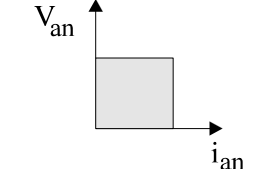
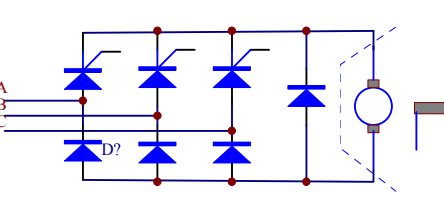
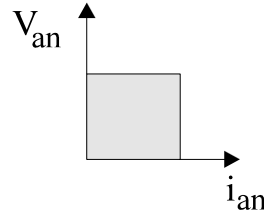
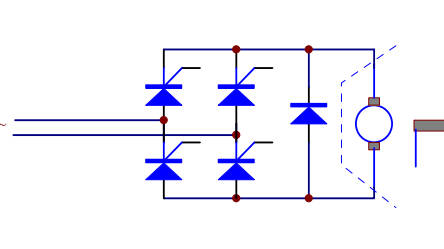
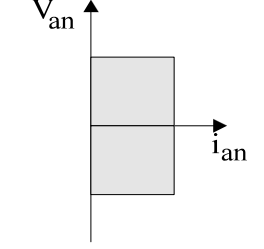
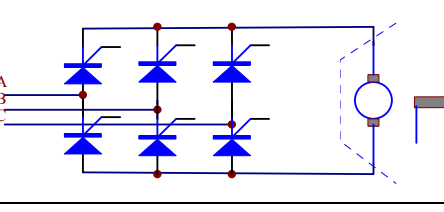
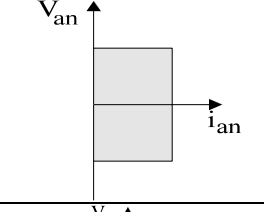
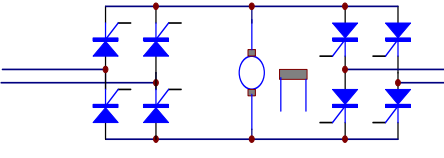
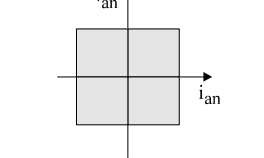
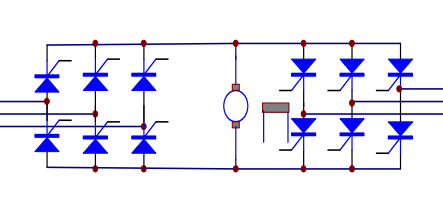
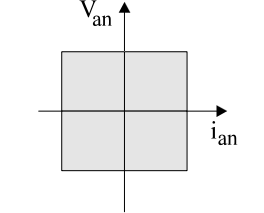
Slika: regulacija vrtljajev s spremembo napetosti rotorskega in vzbujalnega tokokroga.



Slika: karakteristike  $n(M)$  in območje spreminjanja vrtljajev pri spreminjanju napetosti rotorskega in vzbujalnega tokokroga.

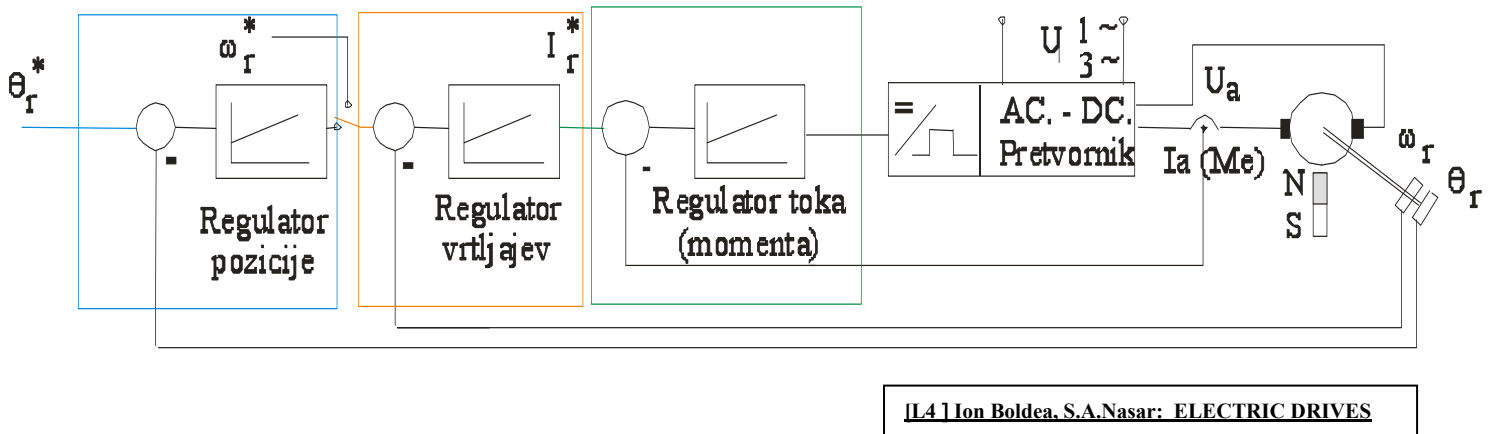


Pri izbiri pretvorniki (npr. tiristorskega ali tranzistorskega usmernika) moramo poznati zahteve pogona glede vrste obratovanja in smeri vrtenja (motorsko za eno ali obe smeri, generatorsko ali kakšno drugo zaviranje, itd.), da lahko pravilno izberemo ustrezní pretvornik.

Vezje	Območje $P$	Obratovalni kvadrant
	pod 0.5KW	
	do 50KW	
	do 75KW	
	do 100KW	
	do 75KW	
	do 150KW	
	do 15KW	
	do 1500KW	

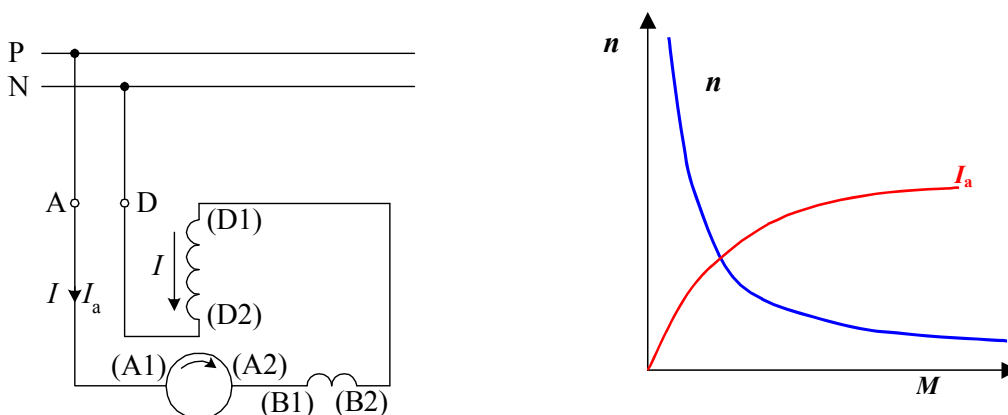
## REGULACIJA EM s trajnimi magneti ( s tujim vzbujanjem)

Na spodnji sliki je princip regulacije EM s PM (oz. enako za EM s tujim vzbujanjem pri  $\phi = \text{konst.}$ ) z možnostjo regulacije pozicije, vrtljajev ali toka (navora).



### 2.3. ENOSMERNI MOTOR S SERIJSKIM VZBUJANJEM

Za EM z serijskim vzbujanjem lahko zapišemo naslednje tri enačbe, ki veljajo vse za stacionarne razmere.



$$\underline{\phi_g(I_v) \xrightarrow{I_v=I_a} \phi_g(I_a)}$$

$$M = k_m \phi_g I_a \quad \langle \phi_g(I_a) = k I_a^\alpha \rangle = k_m k I_a^{\alpha+1} \quad (.1)$$

$$n = \frac{U - I_a R}{k_e^* \phi_g} \quad (.2a)$$

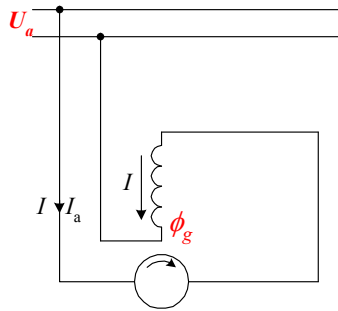
$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \phi_g^2} M \quad (.2b)$$

$$k_e^* = \frac{p \cdot Z}{60 \cdot a} \quad , \quad k_m = \frac{p \cdot Z}{2\pi \cdot a} \quad (.3)$$

Upornost  $R$  predstavlja **celotno upornost rotorskega tokokroga**, ki jo sestavljajo upornost **rotorskega** in **vzbujalnega** navitja, prehodna upornost ščetke-komutator in vse dodatne upornosti v rotorskem tokokrogu.

$$R = R_a + R_v + \sum_{i=1} R_{d,i} + R_{sc} \quad (.4)$$

### 2.3.1 Nastavljanje vrtljajev EM s serijskim vzbujanjem



$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g} \quad (.5a)$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \phi_g^2} M \quad (.5b)$$

Iz enačb (.5a, .5b) vidimo, da lahko spreminjamo vrtljaje oz. mehansko karakteristiko EM s serijskim vzbujanjem na različne načine (.8).

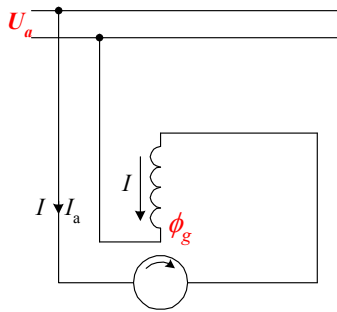
$$n = h(I_a, U, R, \phi_g) \quad , \quad n = h(M, U, R, \phi_g) \quad (.8)$$

$$n(I_a \rightarrow 0) \Rightarrow \infty$$

$$\Delta n = g(I_a, R, \phi_g) \quad \Delta n = g(M, R, \phi_g)$$

1. s spreminjanjem napetosti  $U$  na sponkah indukta
2. s spreminjanjem magnetnega pretoka.  $\phi_g$  v zračni reži
3. s spreminjanjem napetosti  $U$  na sponkah indukta in s spreminjanjem magnetnega pretoka  $\phi_g$  v zračni reži
4. s spreminjanjem upornosti  $R$  rotorskega tokokroga
5. s spreminjanjem upornosti  $R_p$ , ki je paralelno vezan k induktu
6. kombinacija 4+5
7. z impulznim napajanjem EM

### 2.3.1.1 Spreminjanje napetosti $U$ na sponka indukta



$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g} \quad (.1)$$

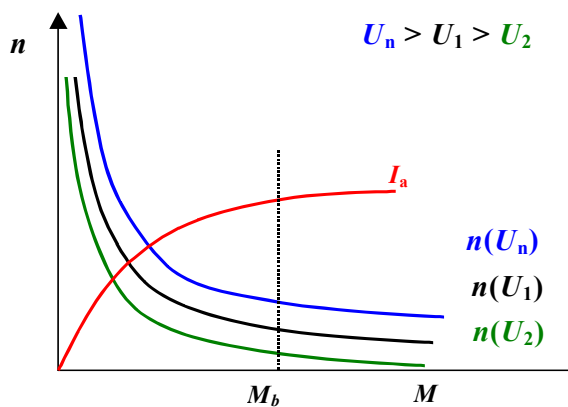
$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \phi_g^2} M \quad (.2)$$

⇒ s spreminjanjem napetosti **kotve** direktno vplivamo na spreminjanje **celotne mehanske karakteristike EM**.

⇒ s spreminjanjem napetosti kotve se pri nespremenjeni obremenitvi **ne spreminjata**  $I_a \cdot \Phi_g$

⇒ s spreminjanjem napetosti kotve **in** pri spreminljivi obremenitvi **se spreminjata**  $I_a \cdot \Phi_g$

Napetost na sponkah kotve **običajno znižujemo**, kar pomeni, da dobimo umetne karakteristike, ki ležijo **pod naravno karakteristiko**.

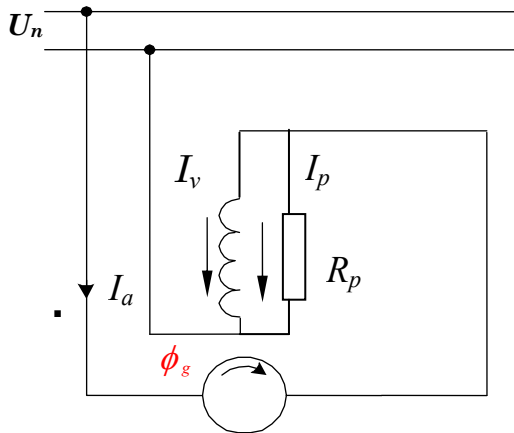


Enačba za preračunavanje vrtljajev iz ene na drugo karakteristiko, pri različnih napetostih.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1 - I_a R}{U_2 - I_a R} \quad (3)$$

- ◇ dodatnih izgub, zaradi spreminjanja  $U$  ni      ► **gospodarno nastavljanje vrtljajev**
- ◇ če pri EM s lastnim hlajenjem pri zmanjševanju  $U$  ni dodatnega hlajenja, ► **moramo znižati dopustni bremenski navor pod vrednost, ki jo določa meja trajne obremenitve.**
  - Napetost spreminjamo med **0** in  $U_n$ . Tako lahko dobimo ob kombinaciji z zamenjavo polaritete karakteristike v vseh štirih kvadrantih (**motorsko in zavorno obratovanje**)
  - V stacionarnem obratovanju je rotorski tok proporcionalnem navoru bremena, **tako da sprememba napetosti ne vpliva na karakteristiko  $M(I_a)$ .**

### 2.3.1.2 Spreminjanje magnetnega pretoka $\Phi_g$



$$n = \frac{U}{k_e^* \Phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \Phi_g} \quad (.1)$$

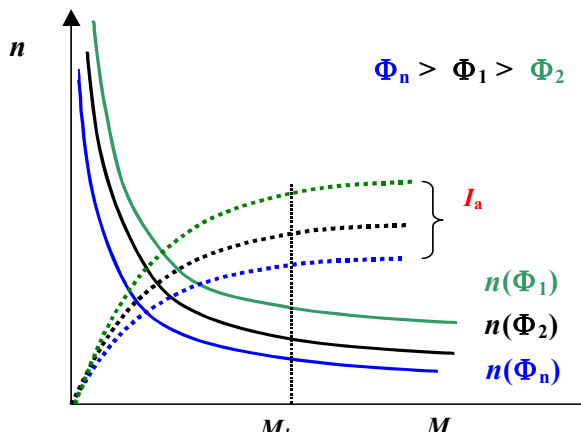
$$n = \frac{U}{k_e^* \Phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \Phi_g^2} M \quad (.2)$$

⇒ s spreminjanjem  $\Phi_g$  direktno vplivamo na spreminjanje **celotne mehanske karakteristike EM**.

⇒ s spreminjanjem  $\Phi_g$ , pri nespremenljivi obremenitvi, **se spreminjata**  $I_a \cdot \Phi_g$

⇒ s spreminjanjem  $\Phi_g$ , pri spremenljivi obremenitvi, **se spreminjata**  $I_a \cdot \Phi_g$

$\Phi_g$  vedno slabimo (zmanjšujemo), kar pomeni, da dobimo umetne karakteristike, ki ležijo **nad naravno karakteristiko**.

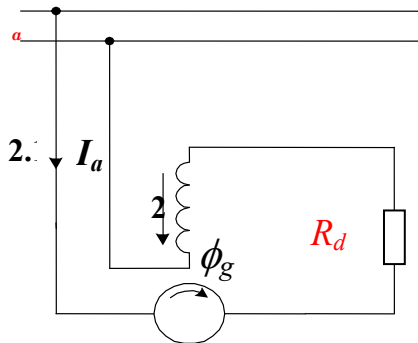


$$\phi_g(I_v) \quad , I_a = \alpha I_v \quad , \alpha = \frac{R_p}{R_v + R_p}$$

$$M = k_m \phi_g(I_v) I_a = k_m \alpha \phi_g(I_v) I_v$$

- ◇ zaradi spreminjanja  $\Phi_g$  se pri enakem navoru pojavijo dodatne izgube
- ◇ če pri EM s lastnim hlajenjem pri zmanjševanju  $\Phi_g$  ni dodatnega hlajenja, ► **moramo znižati dopustni bremenski navor pod vrednost, ki jo določa meja trajne obremenitve.**
  - $\Phi_g$  spreminjamo s spreminjanjem  $R_p$ . Z zmanjševanjem  $\Phi_g$ , se pri enaki obremenitvi povečuje tok. Ker preveliko povečevanje toka prinaša probleme s komutacijo, je možno zmanjševanje  $\Phi_g$  le v omejenem obsegu ( **$\alpha$  je približno v področju  $0.5 \leq \alpha \leq 1$** ).
  - V kombinaciji z zamenjavo polaritete (rotorskega ali vzbujačnega navitja) dobimo karakteristike v I. oz. III. kvadrantu **-motorsko obratovanje**.

### 2.3.1.3 Spreminjanje upornosti $R$ rotorskega tokokroga



$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g} \quad (1)$$

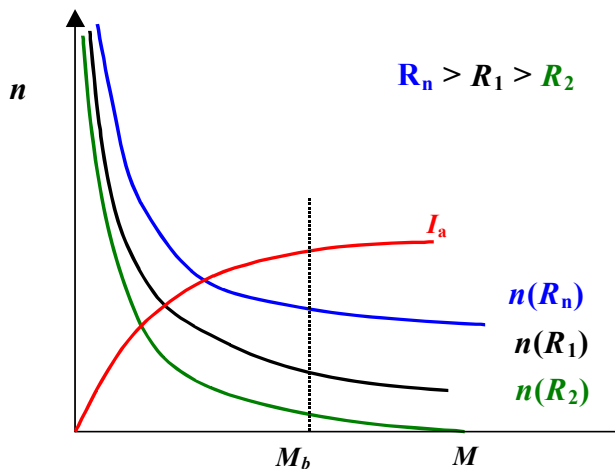
$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{R}{k_e^* k_m \phi_g^2} M \quad (2)$$

⇒ Z dodajanjem upora v rotorski tokokrog **direktno vplivamo na spreminjanje celotne mehanske karakteristike EM.**

⇒ s spreminjanjem upornosti RT se pri nespremenjeni obremenitvi **ne spreminjata**  $I_a \cdot \Phi_g$

⇒ s spreminjanjem upornosti RT in pri spremenljivi obremenitvi **se spreminjata**  $I_a \cdot \Phi_g$

Ker upornost RT povečujemo dobimo umetne karakteristike, ki ležijo **pod naravno karakteristiko** in so glede na primer ko spreminjamo napajalno napetost RT bolj odvisne od obremenitve.

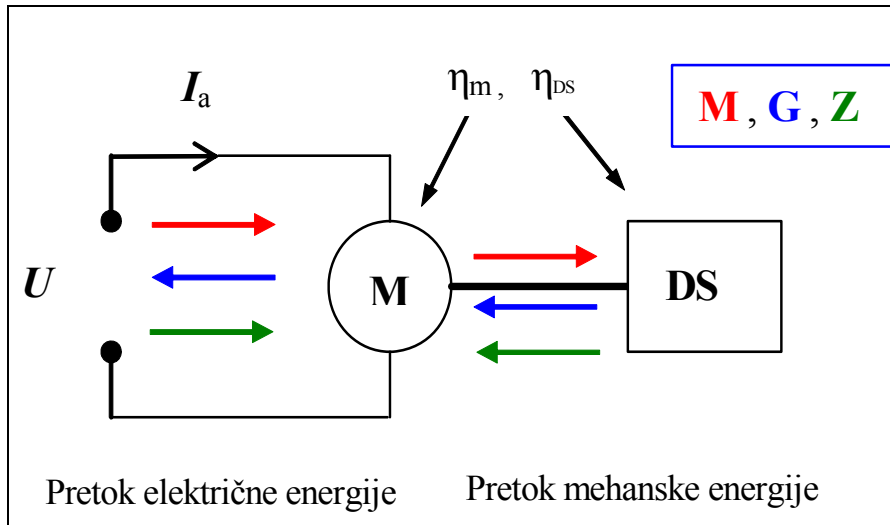


Enačba za preračunavanje vrtljajev iz ene na drugo karakteristiko, pri različnih upornosti rotorskega tokokroga.

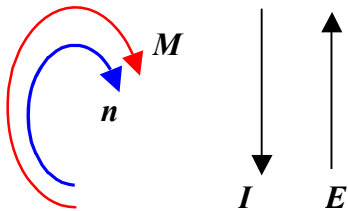
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U - I_a R_1}{U - I_a R_2} \quad (3)$$

- ◇ Pri povečevanju  $R$ , se pri enaki obremenitvi pojavijo dodatne izgube
  - ▶ negospodarno nastavljanje vrtljajev
- ◇ če pri EM s lastnim hlajenjem pri povečevanju  $R$  ni dodatnega hlajenja, ▶ moramo znižati dopustni bremenski navor pod vrednost, ki jo določa meja trajne obremenitve.
- V stacionarnem obratovanju je rotorski tok proporcionalen navoru bremena, tako da sprememba  $R$  ne vpliva na karakteristiko  $M(I_a)$ .

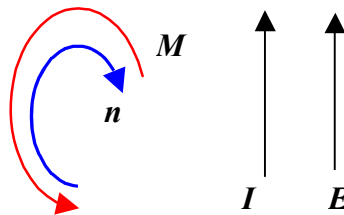
## 2.4. ZAVIRANJE ENOSMERNIH MOTORJEV



Motorsko obratovanje:



Generatorsko obratovanje:



ZAVIRANJE:

**Koristno zaviranje** (del mehanske energije se lahko pretvori v električno energijo oz. vrne v omrežje)

➤ **GENERATORSKO**

**Zaviranje z izgubo** (mehanska energija se pretvori v toploto – segrevanje ES ↑)

➤ **ELEKTRODINAMIČNO (UPOROVNO)**

➤ **PROTITEČNO (PROTITOČNO)**



## 2.4.1 Zaviranje enosmernega motorja s tujim (paralelnim) vzbujanjem

### 1./a Generatorsko zaviranje (v 4. kvadrantu):

⇒ Potencialno breme

⇒ zamenjava polaritete  $U$

1 ⇒ 1'

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = 0 \rightarrow \Omega, n, = \text{konst.}$$

$$n = n_{DT} \quad ; U > E \quad ; I_a = I_{DT}$$

$$n_{DT} = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g}$$

1' ⇒ 2

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow \text{zaviranje}$$

$$n \downarrow > 0 \quad ; U > E \quad ; I_a < 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

2 ⇒ 3

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow M, \text{ pospeševanje}$$

$$n \downarrow < 0 \quad ; U > E \quad ; I_a < 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

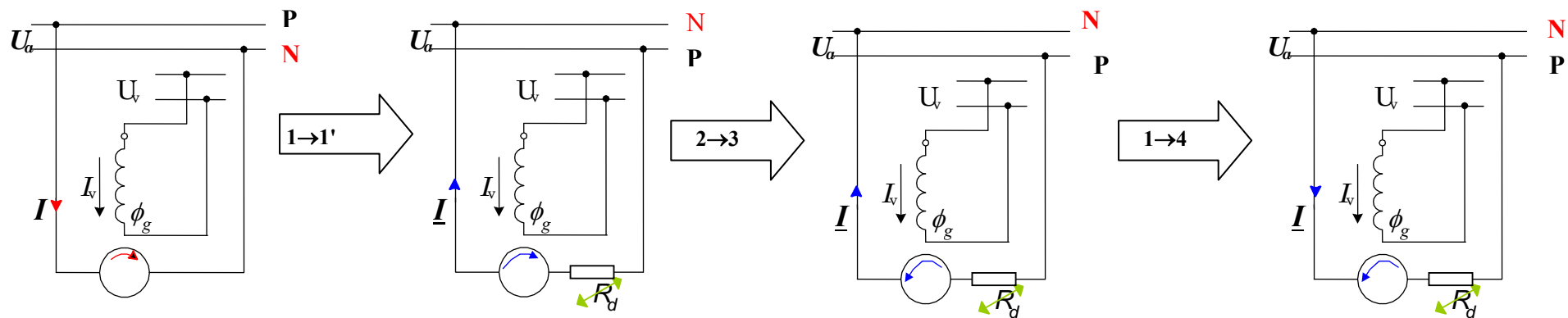
3 ⇒ 4

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

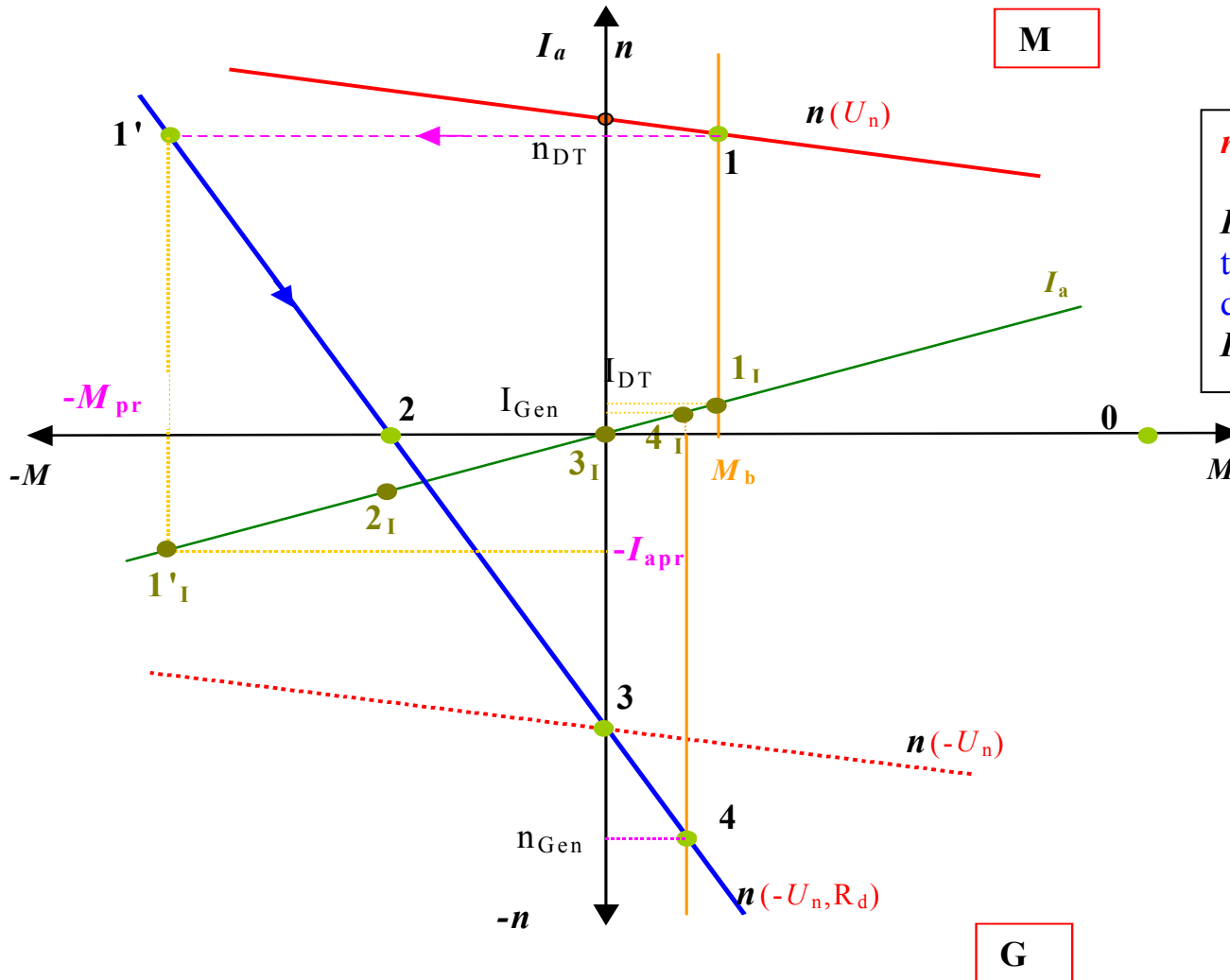
$$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow G, \text{ pospeševanje}$$

$$n \downarrow < 0 \quad ; E > U \quad ; I_a > 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} + \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$



1./a Generatorsko zaviranje (v 4. kvadrantu):



$$n_{DT} = n_{Mot} \quad , \quad I_{DT} = I_{Mot} = I_G$$

$R_d$  - omejuje momentni in tokovni sunek, ter definira DT v generatorskem področju delovanja

$R_d$  - dodatne izgube

4  $\Rightarrow$

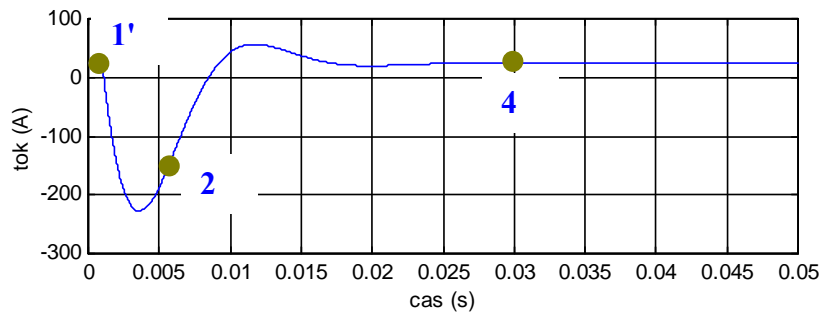
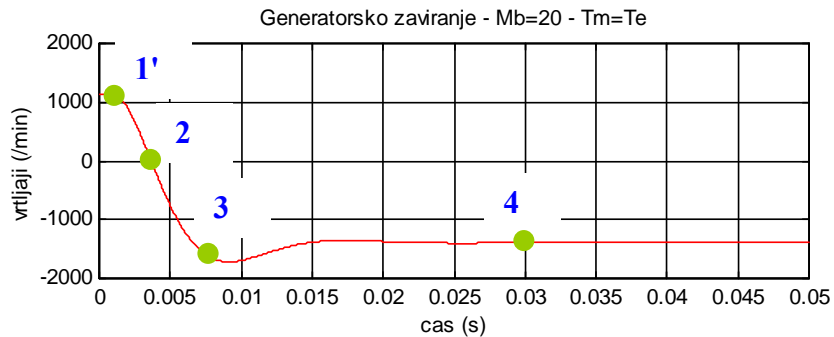
$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = 0 \rightarrow G, \quad \Omega, n = konst.$$

$$n = n_{Gen} \quad ; \quad E > U \quad ; \quad I_a = I_{Gen}$$

$$n_{Gen} = \frac{U}{k_e^* \phi_g} + \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

## Generatorsko zaviranje



1 ⇒ 1'

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = 0 \rightarrow \Omega, n = \text{konst.}$$

$$n = n_1 ; U > E ; I_a = I_{11}$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g}$$

1' ⇒ 2

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow \text{zaviranje}$$

$$n \downarrow > 0 ; U > E ; I_a < 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

2 ⇒ 3

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow M, \text{pospeševanje}$$

$$n \downarrow < 0 ; U > E ; I_a < 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

3 ⇒ 4

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow G, \text{pospeševanje}$$

$$n \downarrow < 0 ; E > U ; I_a > 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} + \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

1./b Generatorsko zaviranje (v 2. kvadrantu):  
 ⇒ Potencialno breme (električno vozilo)

2 ⇒ 3

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} > 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} > 0 \rightarrow G, \text{ pospeševanje}$$

$$n \uparrow < 0 ; E > U ; I_a < 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} + \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

1 ⇒ 2

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} > 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} > 0 \rightarrow M, \text{ pospeševanje}$$

$$n \uparrow < 0 ; U > E ; I_a > 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

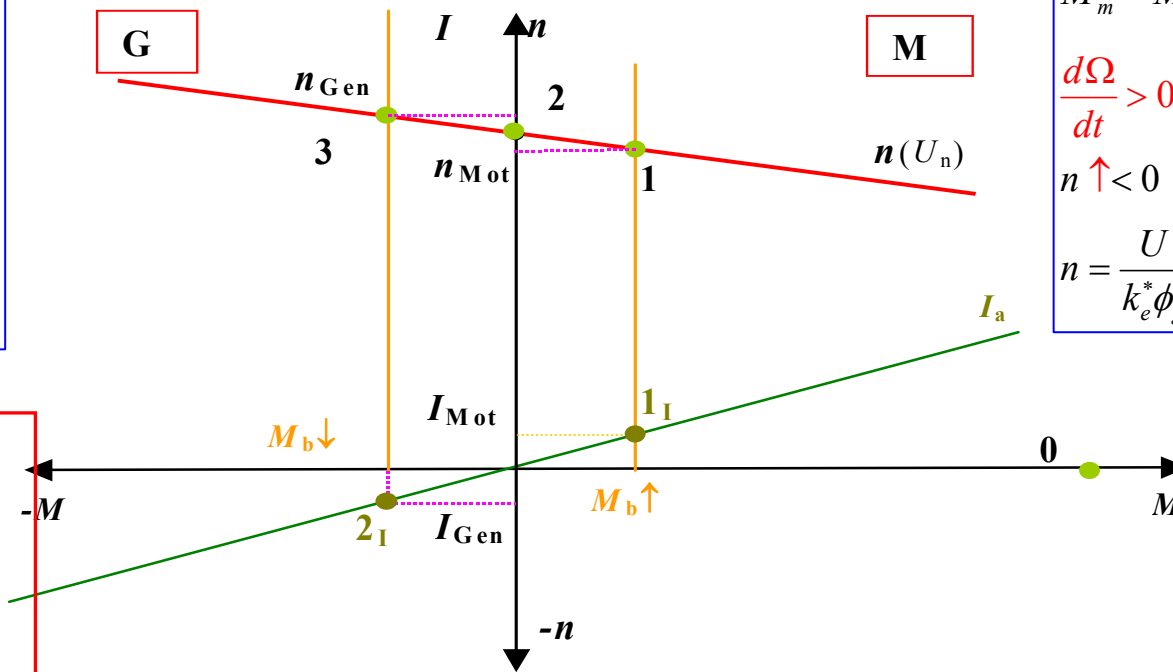
3 ⇒

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = 0 \rightarrow G, \Omega = \text{konst.}$$

$$n = n_{Gen} ; E > U ; I_a = I_{Gen}$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} + \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$



## 2./a Protitočno zaviranje

⇒ Aktivno breme

1 ⇒ 1'

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = 0 \rightarrow \Omega = \text{konst.}$$

$$n > 0 ; U > E ; I_a > 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g}$$

1' ⇒ 2

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow \text{zaviranje}$$

$$n \downarrow > 0 ; U > E ; I_a > 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

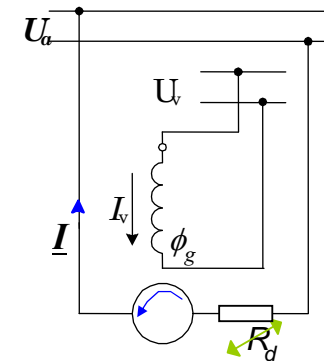
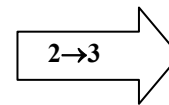
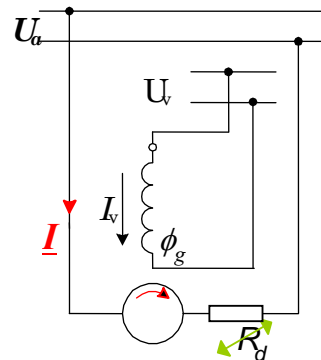
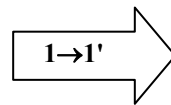
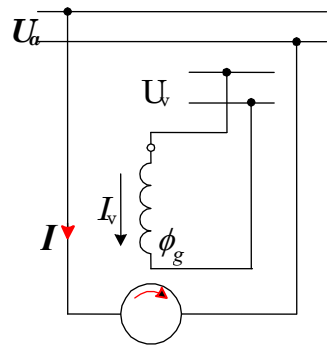
2 ⇒ 3

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

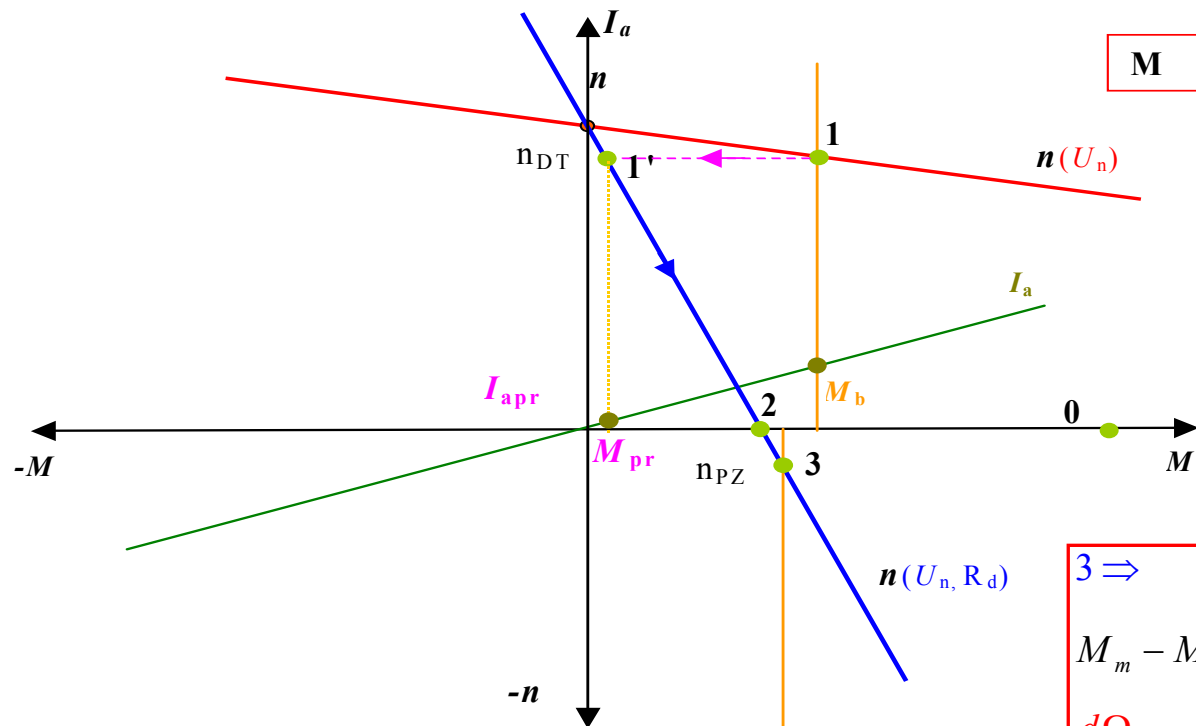
$$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow M, \text{ pospeševanje}$$

$$n \downarrow < 0 ; U > E ; I_a > 0$$

$$-n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$



2./a Protitočno zaviranje  
 ⇒ (aktivno breme)



Motor se vrti od točke 2 naprej v nasprotno smer, kot je smer za katero je priključen !!

$$n_{DT} = n_{Mot} , I_{DT} = I_{Mot}$$

$R_d$  - omejuje momentni in tokovni sunek, ter definira DT v IV. kvadrantu

$R_d$  - dodatne izgube

3 ⇒

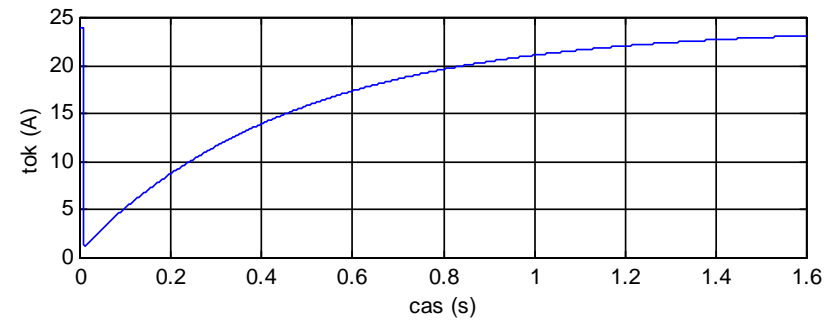
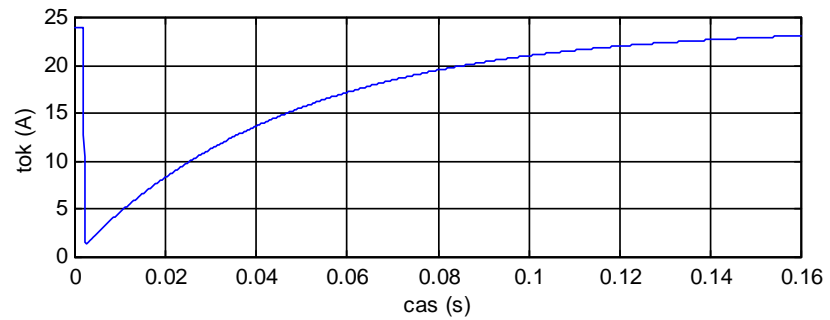
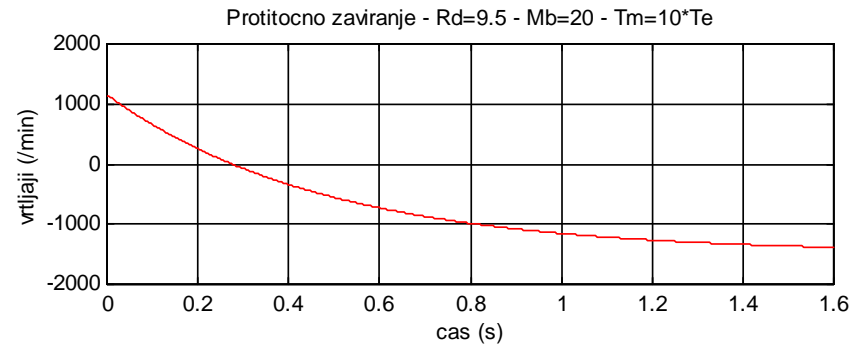
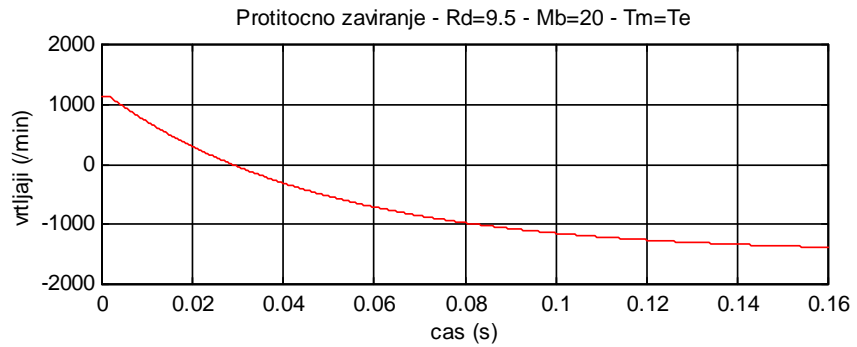
$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = 0 \rightarrow M, \Omega = konst.$$

$$n = n_{PZ} ; U > E ; I_a = I_{PZ}$$

$$-n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

Primer: časovni potek vrtljajev ( $n$ ) in toka ( $I_a$ ) pri protitočnem zaviranju pri različnih razmerjih električnih in mehanskih časovnih konstant



## 2./b Protitočno zaviranje

⇒ Pasivno breme

1 ⇒ 1'

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = 0 \rightarrow \Omega, n = \text{konst.}$$

$$n = n_{DT} \quad ; U > E \quad ; I_a = I_{DT}$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a R}{k_e^* \phi_g}$$

1' ⇒ 2

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow \text{zaviranje}$$

$$n \downarrow > 0 \quad ; U > E \quad ; I_a < 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

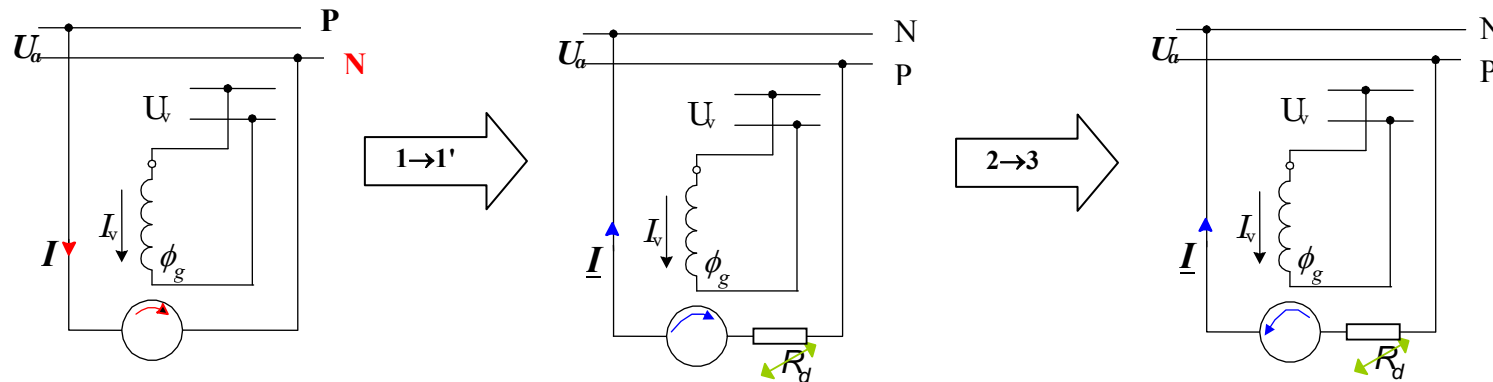
2 ⇒ 3

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} < 0 \rightarrow M, \text{ pospeševanje}$$

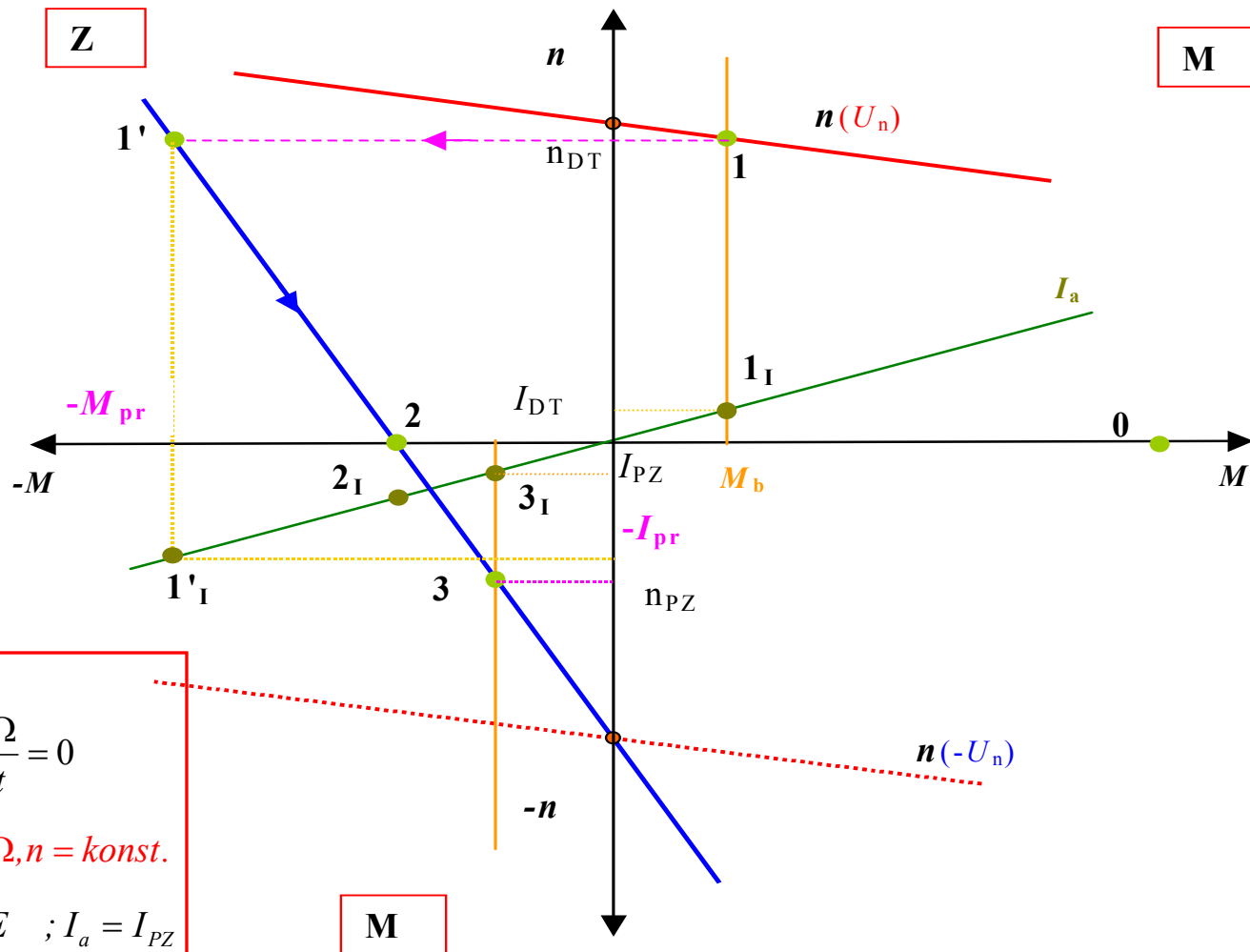
$$n \downarrow < 0 \quad ; U > E \quad ; I_a < 0$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$





## 2./b Protitočno zaviranje (pasivno breme)

3  $\Rightarrow$ 

$$M_m - M_b = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = 0 \rightarrow M, \Omega, n = \text{konst.}$$

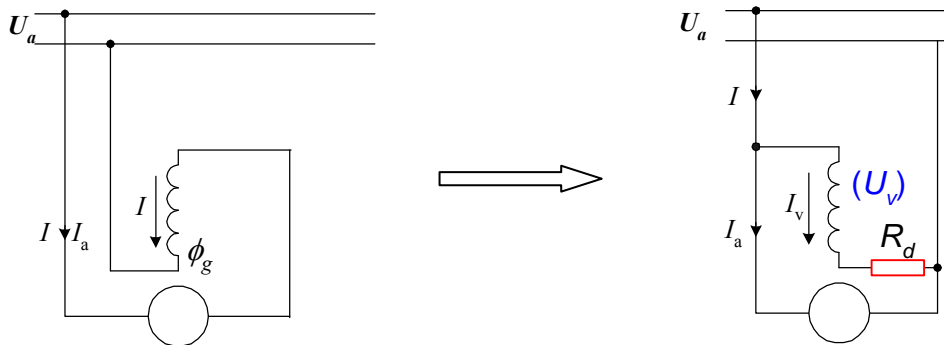
$$n = n_{PZ} \quad ; U > E \quad ; I_a = I_{PZ}$$

$$n = \frac{U}{k_e^* \phi_g} - \frac{I_a (R + R_d)}{k_e^* \phi_g}$$

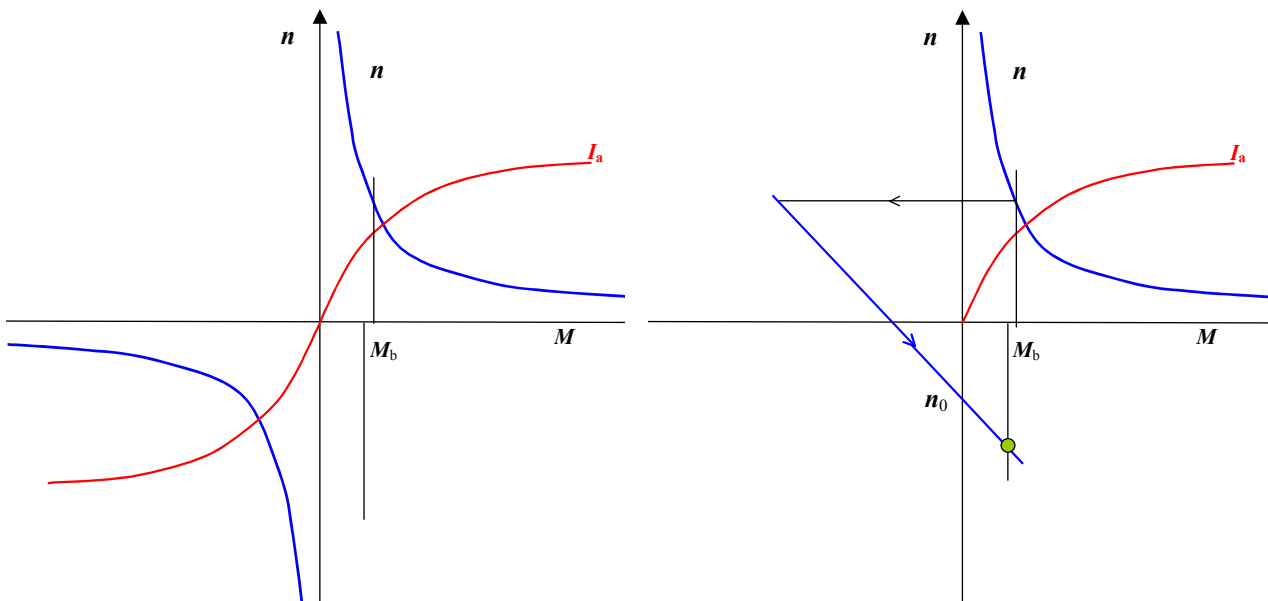
## 2.4.2 Zaviranje enosmernega motorja s serijskim vzbujanjem

### A. Generatorsko zaviranje

- v osnovni vezavi to ni mogoče
- mogoče s prevezavo vzbujalnega navitja (→EM s tujim/paralelnim vzbujanjem)

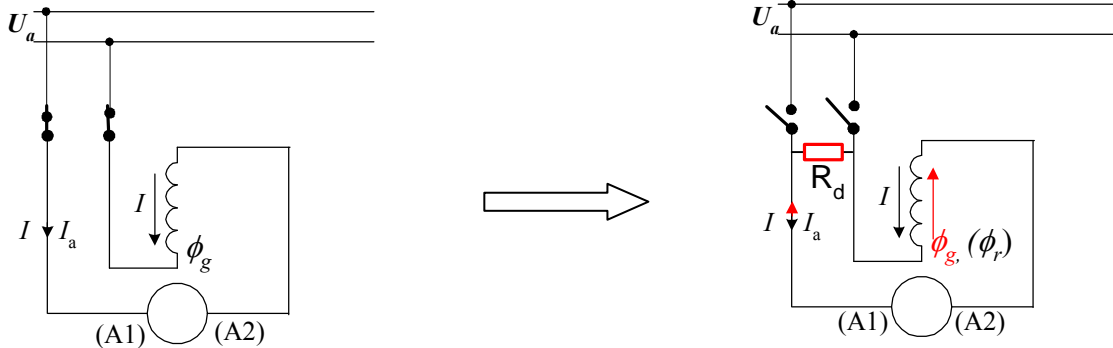


- potrebno je prilagoditi napetost na vzbujalnem navitju, ki je dimenzionirano na **majhno napetost** in **velik tok**
- V  $R_d$  nastopajo znatne izgube zaradi velikega  $I_v$



## B. Uporovno zaviranje (zaviranje s samovzbujanjem)

- motor odklopimo od mreže in zaključimo rotorski tokokrog sam vase preko upora

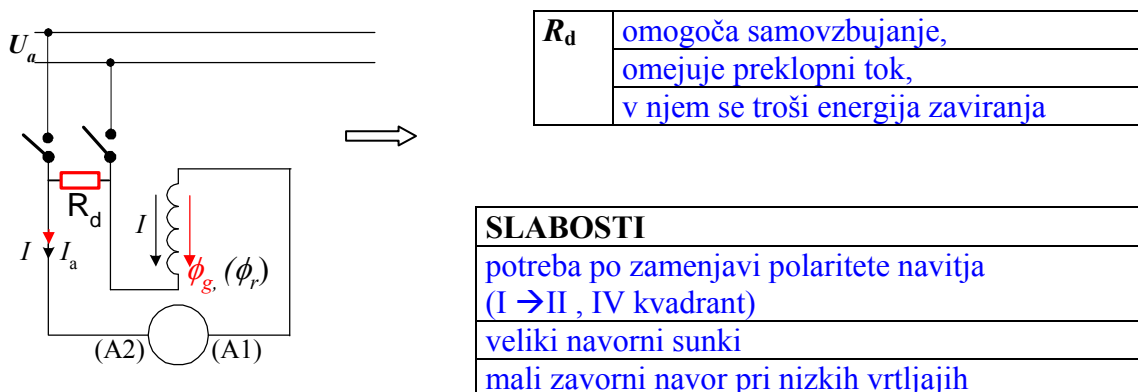


⇒ tok  $I_a$  pade na  $0$ , fluks  $\Phi_{gl} \rightarrow \Phi_r$

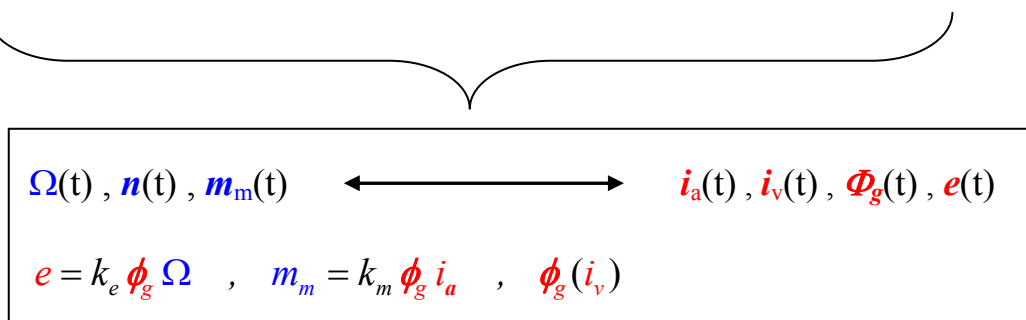
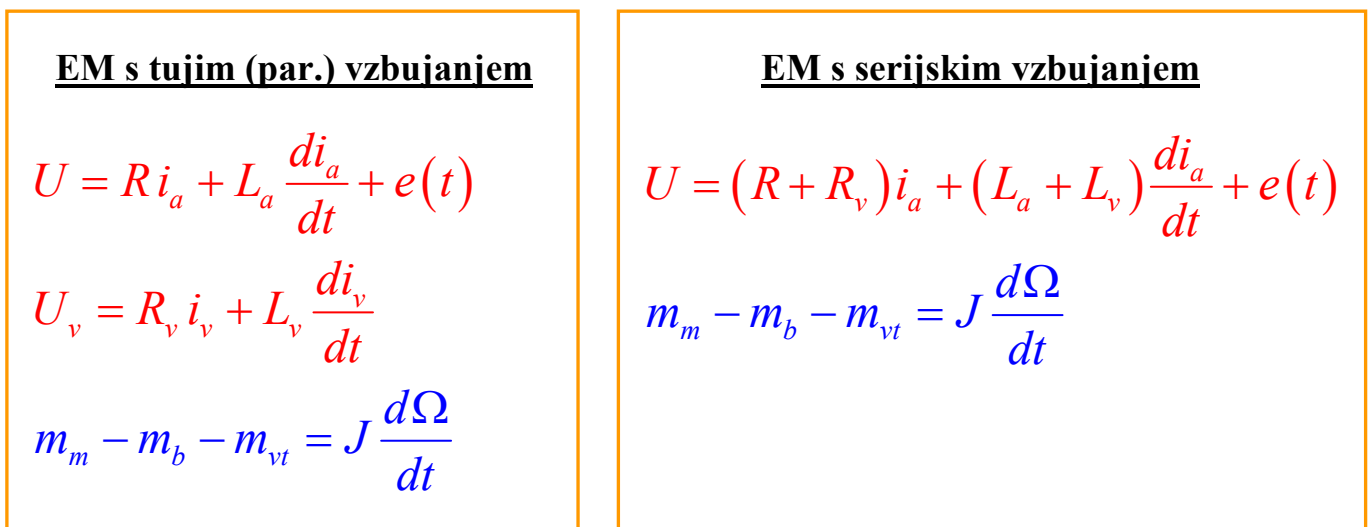
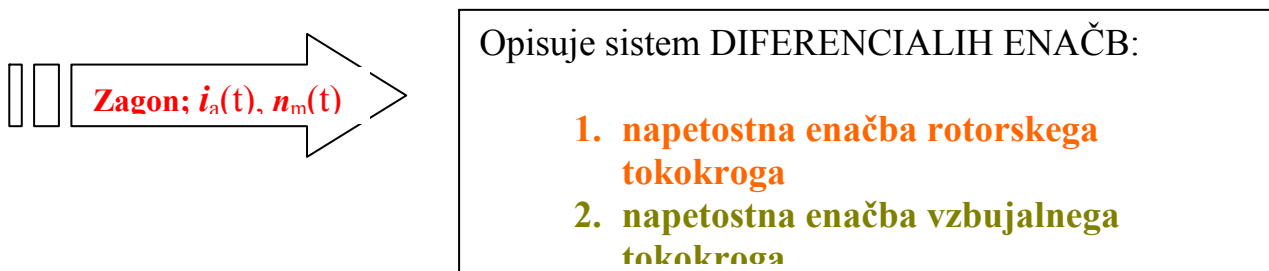
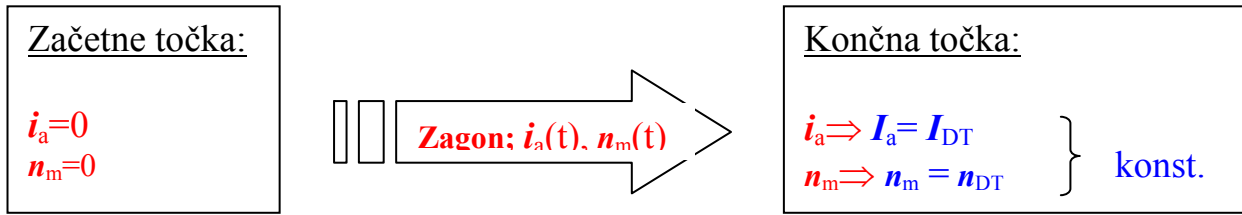
⇒ ker se motor vrti, se inducira napetost  $E$ , ki požene tok v nasprotni smeri ta ustvari fluks  $\Phi_{gl}$  prav tako v nasprotni smeri glede na  $\Phi_r$ , ki

- ali razmagneti motor ( $\Phi_r \rightarrow 0$ )
- ali se ustvari vzbujanje, ki povzroči motorski ne pa zavorni navor motorja (spremeni se smer tako  $\Phi_{gl}$  kot  $I_a$ )

- zaradi tega je potrebno preprečiti razmagnetenje, kar dosežemo z zamenjavo ali polaritete rotorskega ali vzbujalnega navitja, ko preidemo v uporovno zaviranje



## 2.5. Zagon enosmernega motorja



### 2.5.1 Zagon enosmernega motorja s tujim vzbujanjem

$$U = R i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e(t)$$

$$U_v = R_v i_v + L_v \frac{di_v}{dt}$$

$$m_m - m_b - m_{vt} = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Prehodni pojav določa velikost časovnih konstant ( $T_m, T_a, T_v$ ) ter njuna razmerja.

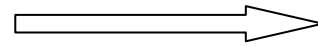
$$T_m \longleftrightarrow T_e (T_a, T_v)$$

Zagon enosmernega motorja s tujim vzbujanjem ( $\Phi_g = \text{konst.}$ )

$$U = R i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e(t) \quad , \quad T_a = T_e = \frac{L_a}{R}$$

$$m_m - m_b - m_{vt} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad , \quad T_m = J \frac{\Omega_*}{M_*}$$

Splošni primer

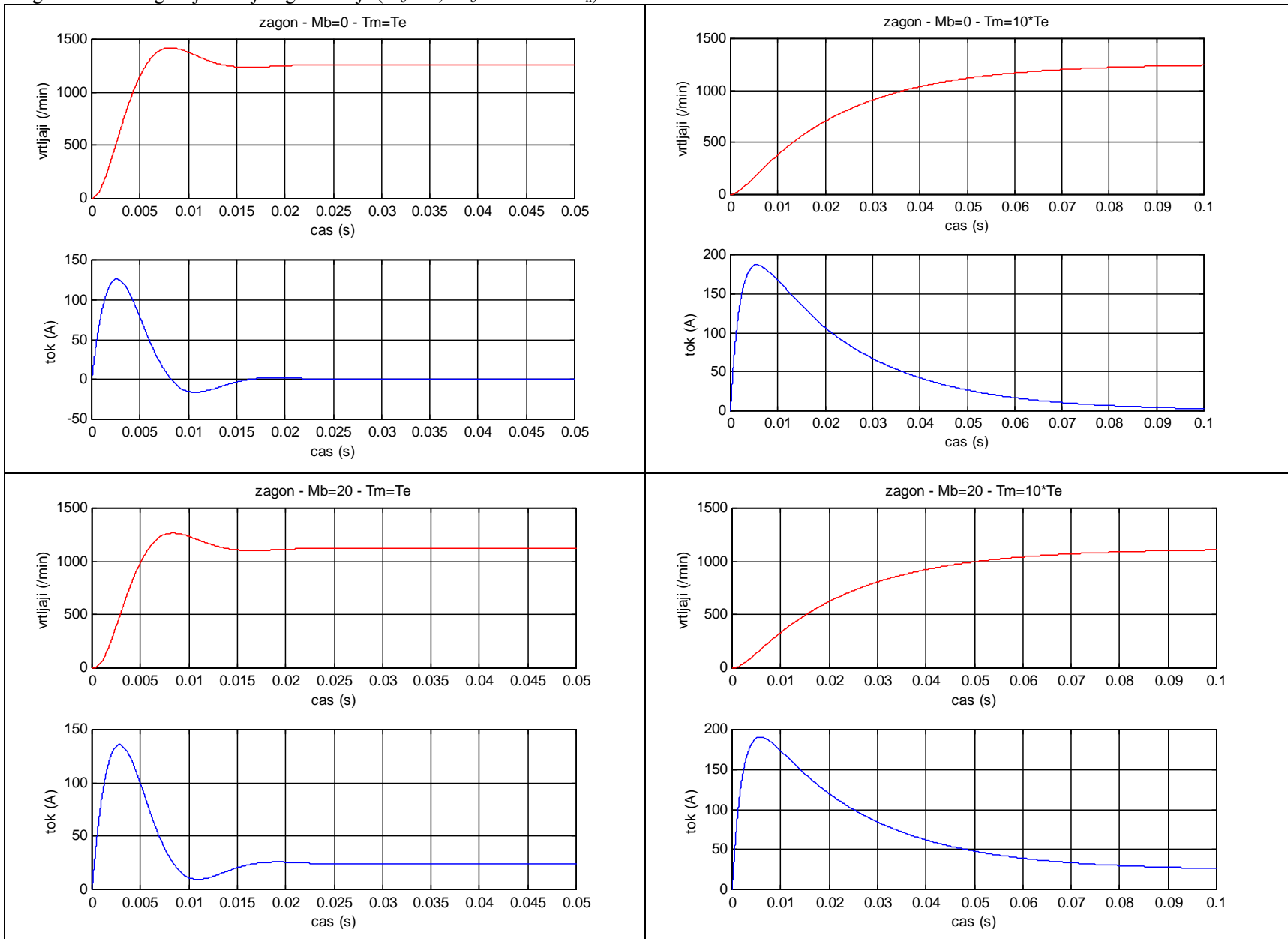


Posebni primer



$$T_m \gg T_e$$

$$U = R i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e(t) \quad / \quad m_m - m_b - m_{vt} = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Zagon enosmernega tuje vzbujanega motorja ( $M_b = 0$ ;  $M_b = 20 \text{ Nm} = M_n$ )

## Prikaz zagona brez in z uporabo P in PID regulatorjev:

