Regulisani elektromotorni pogoni sa mašinama za jednosmernu struju

Osnovne karakteristike

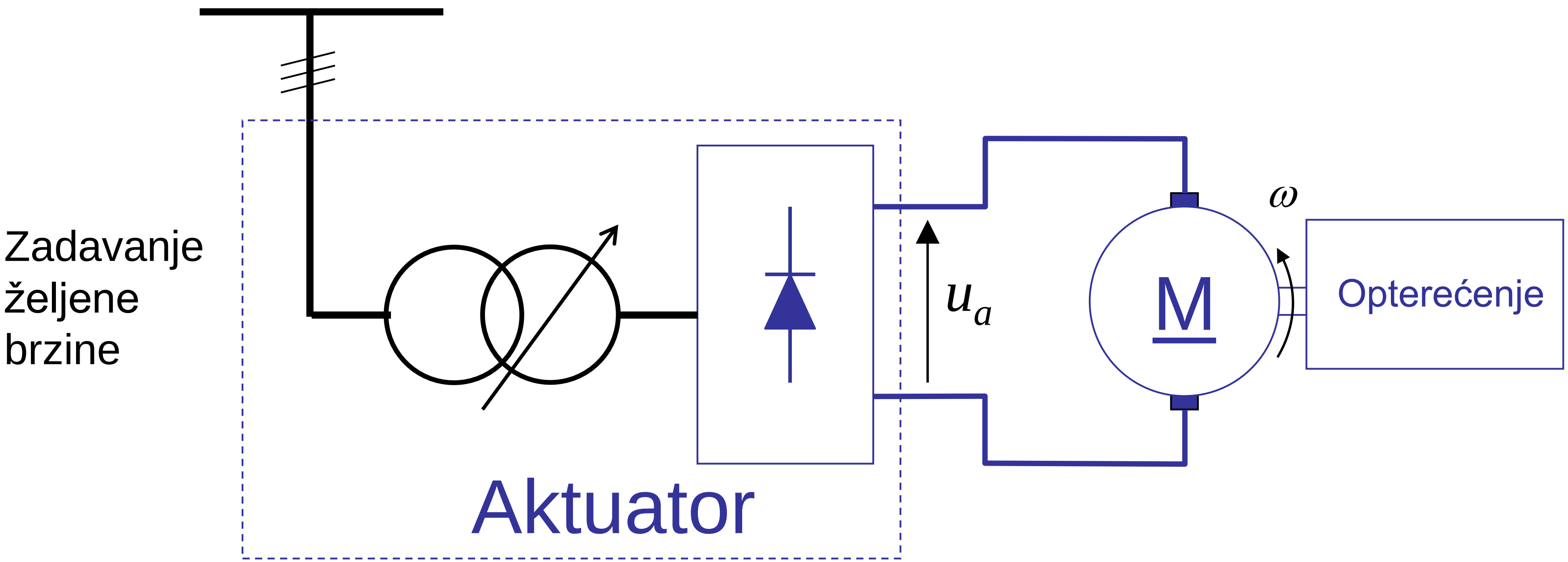
Regulacija momenta - struje indukta

Regulacija brzine

Načini realizacije (aktuatora) za rad u 2 ili 4 kvadranta

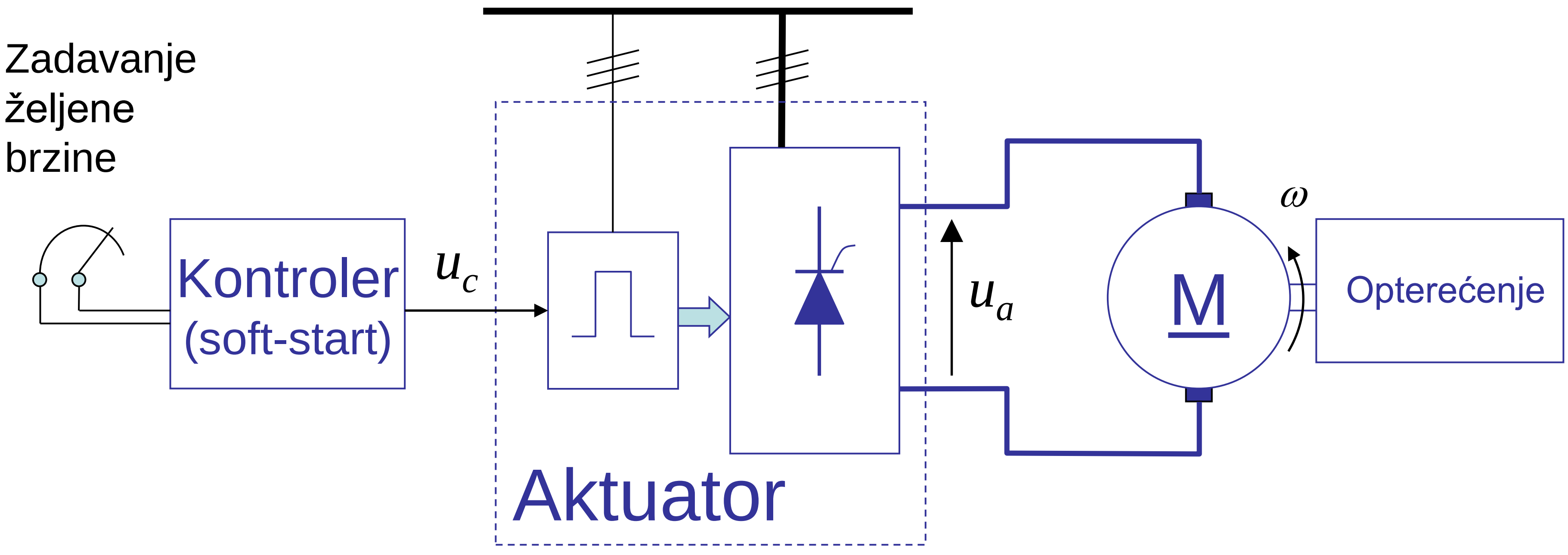
Elektromotorni pogon promenljive brzine sa MJS– sistem bez povratne veze

UPRAVLJANJE - Pogon u otvorenoj sprezi
(primer pogona sa laboratorijskih vežbi)



Elektromotorni pogon promenljive brzine sa MJS– sistem bez povratne veze

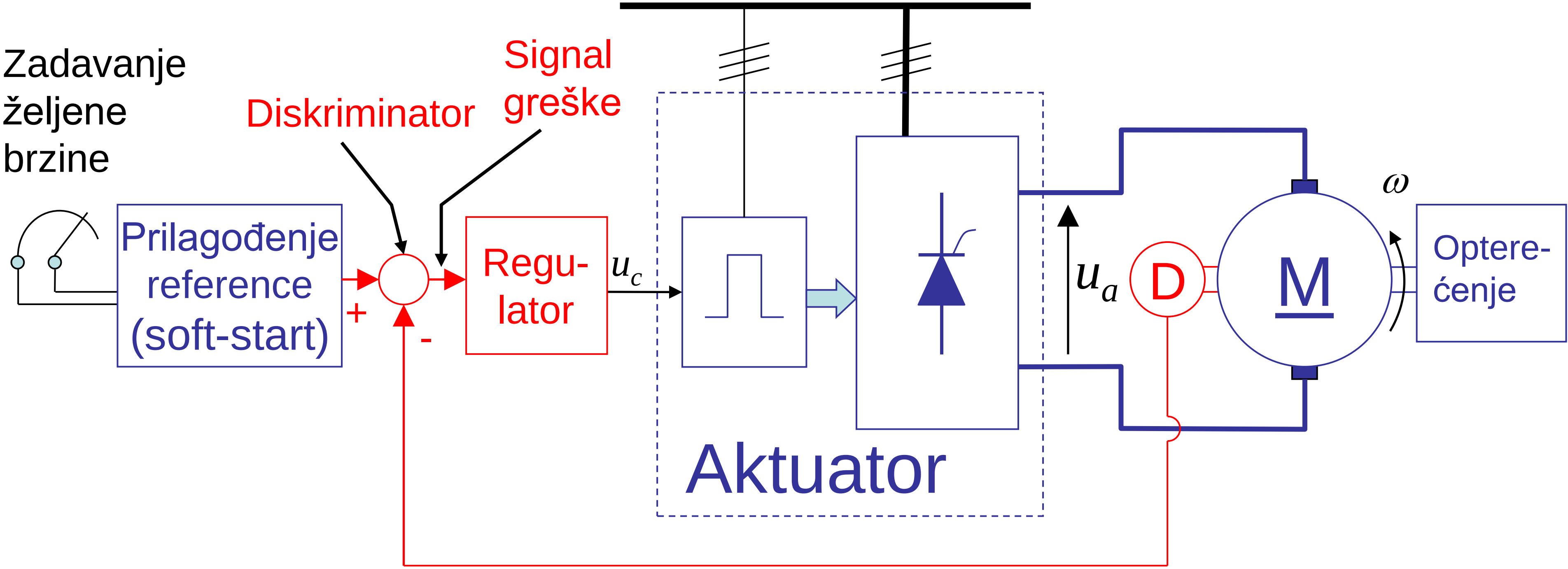
UPRAVLJANJE - Pogon u otvorenoj sprezi
(primer pogona sa tiristorskim mostom)



Regulisani elektromotorni pogon - sistem sa povratnom vezom

REGULACIJA - Pogon u zatvorenoj sprezi

(primer sa regulacijom brzine)

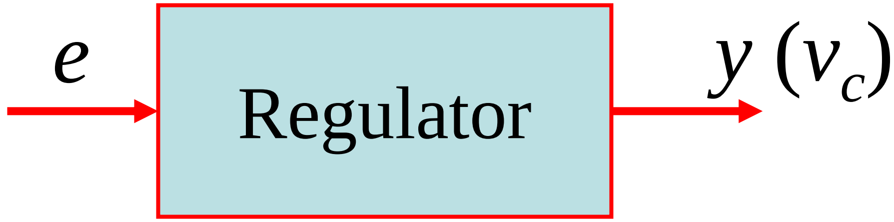


Regulisani elektromotorni pogon - sistem sa povratnom vezom

Elementi karakteristični za regulisane elektromotorne pogone:

- Prilagođenje reference (u statičkom i dinamičkom smislu) (soft start);
- Diskriminator (u sastavu regulatora);
- Regulator;
- Davač regulisane veličine (merenje električnih i neelektričnih veličina, galvansko odvajanje);
- Povratna veza.

Regulatori



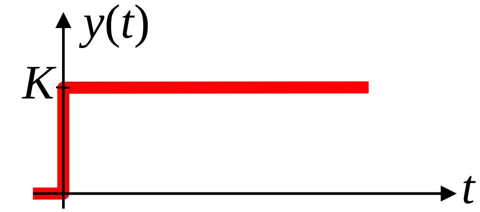
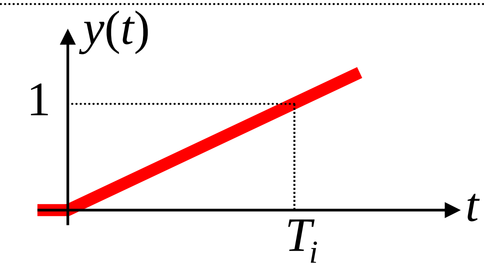
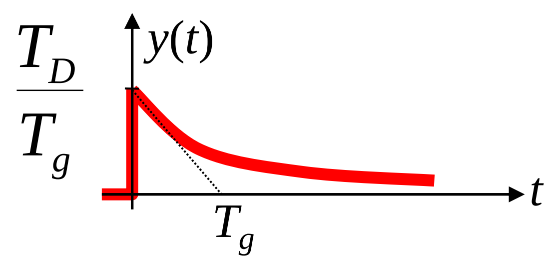
Regulator obezbeđuje:

- Statičke i dinamičke karakteristike RP;
- Odgovarajuću vrednost komandnog signala V_c

Vrste regulatora po karakteristici prenosa:

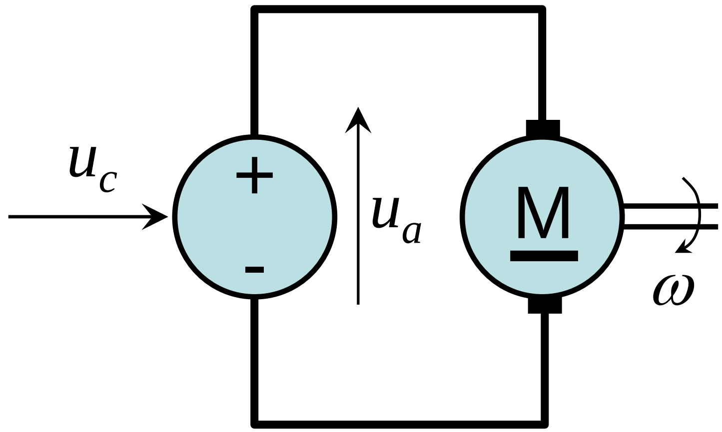
P ; I ; D ; **PI** ; PD ; **PID**.

Karakteristike osnovnih regulatora

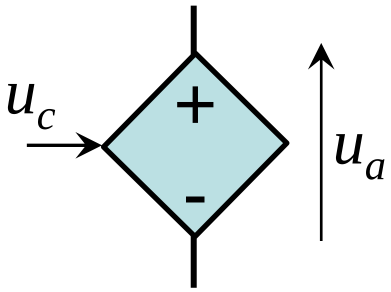
TIP	Dif. jednačina	Funkcija prenosa $\frac{y(p)}{u(p)}$	Odziv na "jedinični step"
P	$y = K \cdot e$	K	
I	$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{T_i} \cdot e$	$\frac{1}{p \cdot T_i}$	
D	$y = T_D \cdot \frac{de}{dt}$	$p \cdot T_D$	
"Realni" D	$T_g \cdot \frac{dy}{dt} + y = T_D \cdot \frac{de}{dt}$	$\frac{p \cdot T_D}{1 + p \cdot T_g}$	

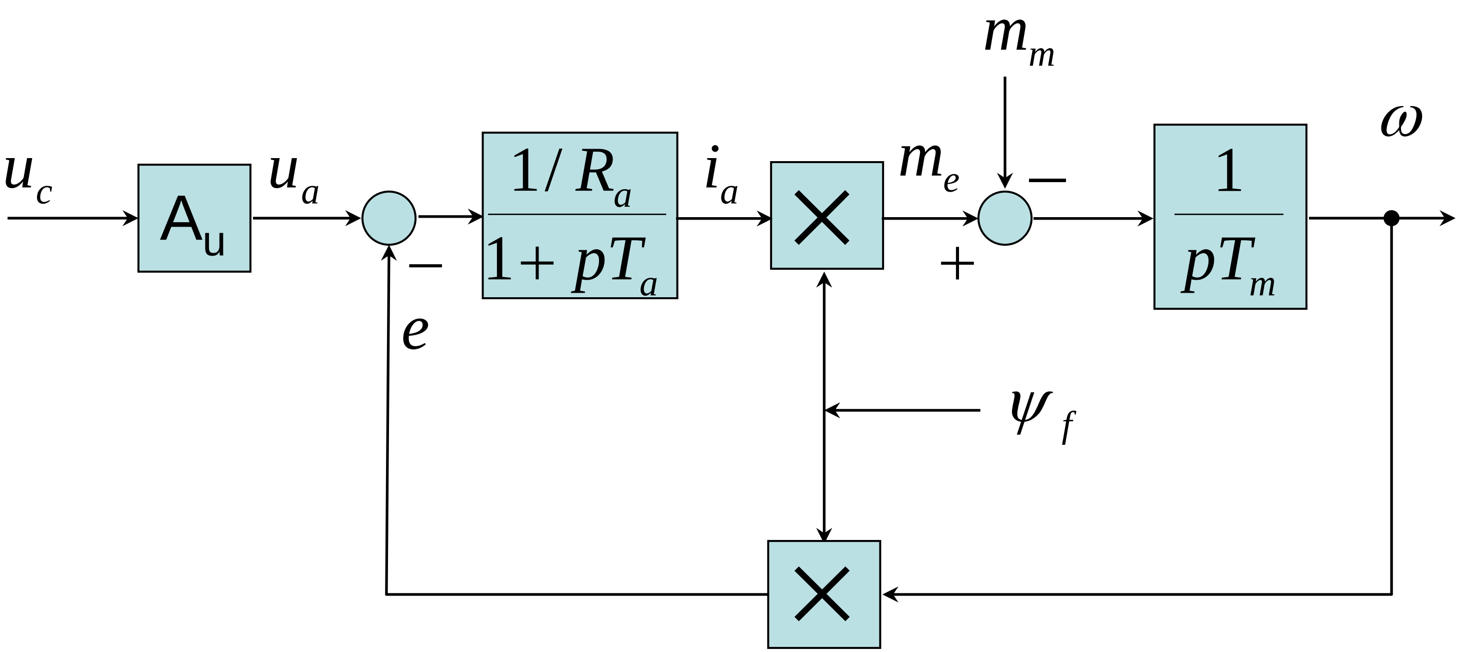
Naponski izvor

naponski
upravljivi
izvor



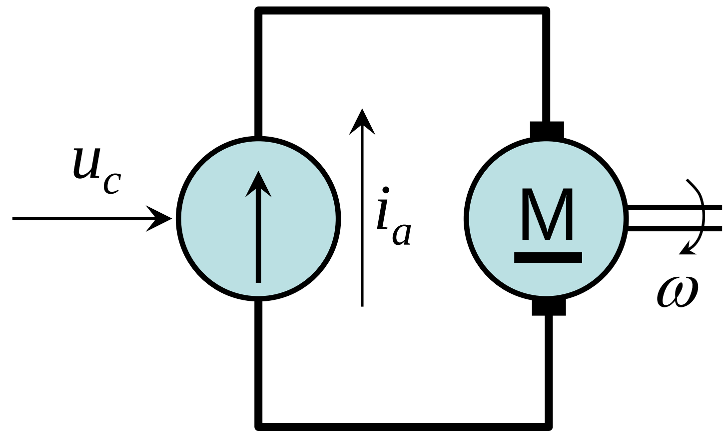
Drugačiji simbol



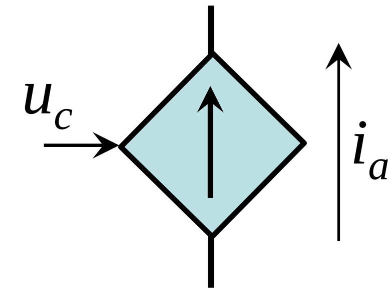


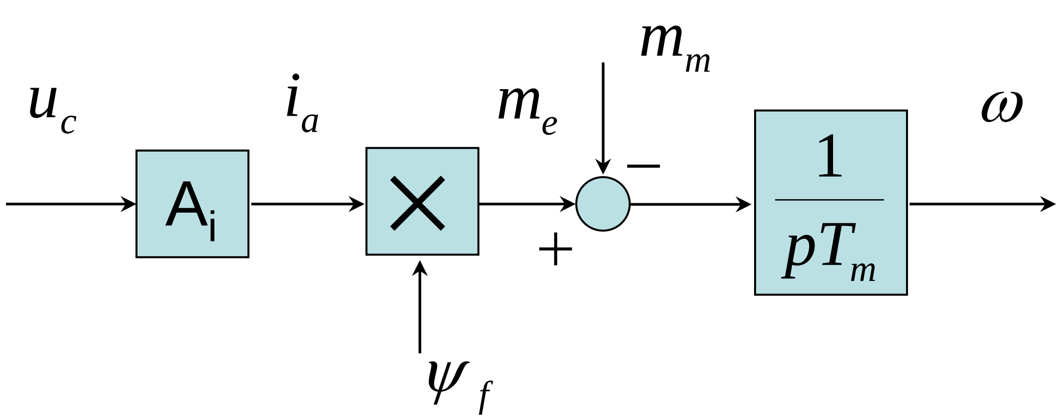
Strujni izvor

strujni
upravljivi
izvor



Drugačiji simbol

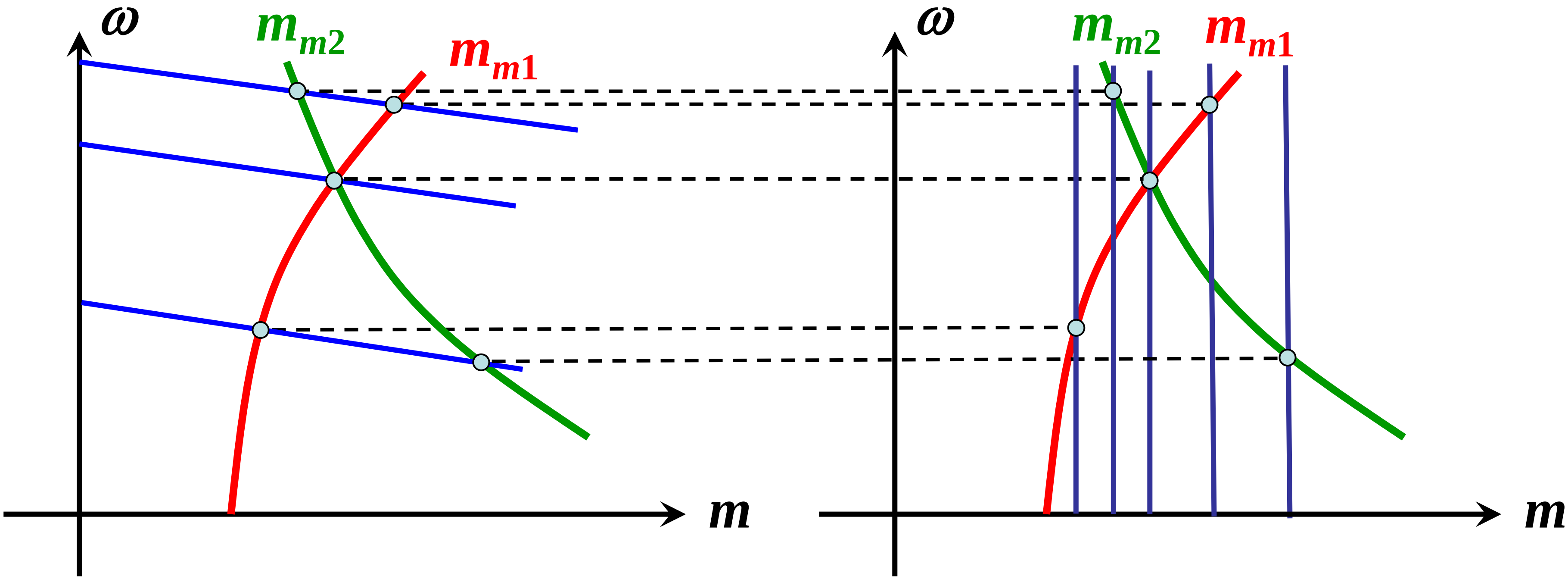




Poređenje statičkih mehaničkih karakteristika

Naponski izvor
(naponsko napajanje)

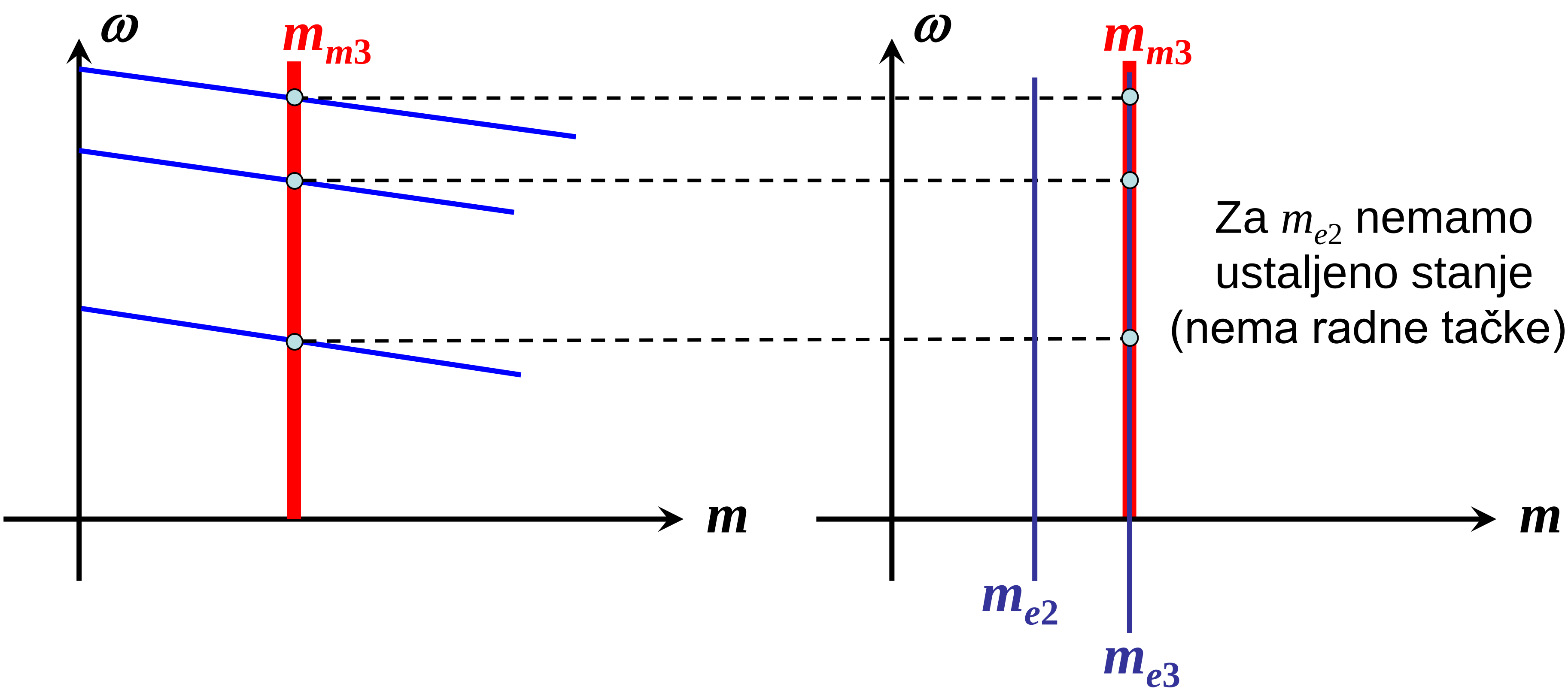
Strujni izvor
(strujno napajanje)



Ukoliko je mehanička karakteristika opterećenja nezavisna od brzine

Naponski izvor
(naponsko napajanje)

Strujni izvor
(strujno napajanje)



Za m_{e2} nemamo ustaljeno stanje (nema radne tačke).

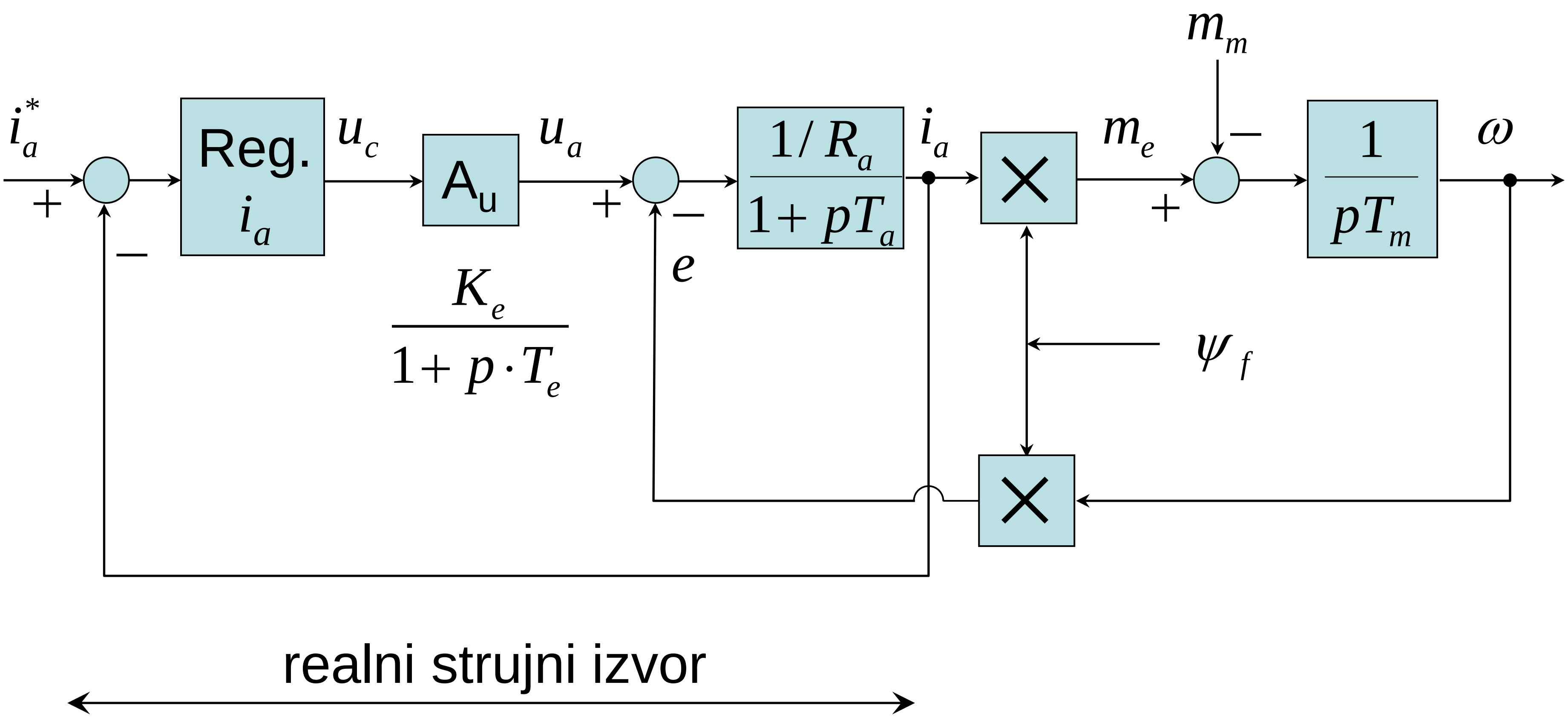
Naponsko napajanje:

- ☒ sporiji odziv
- ☑ statička stabilnost radne tačke
- ☒ nema kontrole nad strujom (prevazilazi se korišćenjem regulatora struje)

Strujno napajanje:

- ☑ brži odziv (!)
- ☒ statička stabilnost radne tačke (prevazilazi se korišćenjem regulatora brzine)
- ☑ neposredna kontrola nad strujom (momentom)

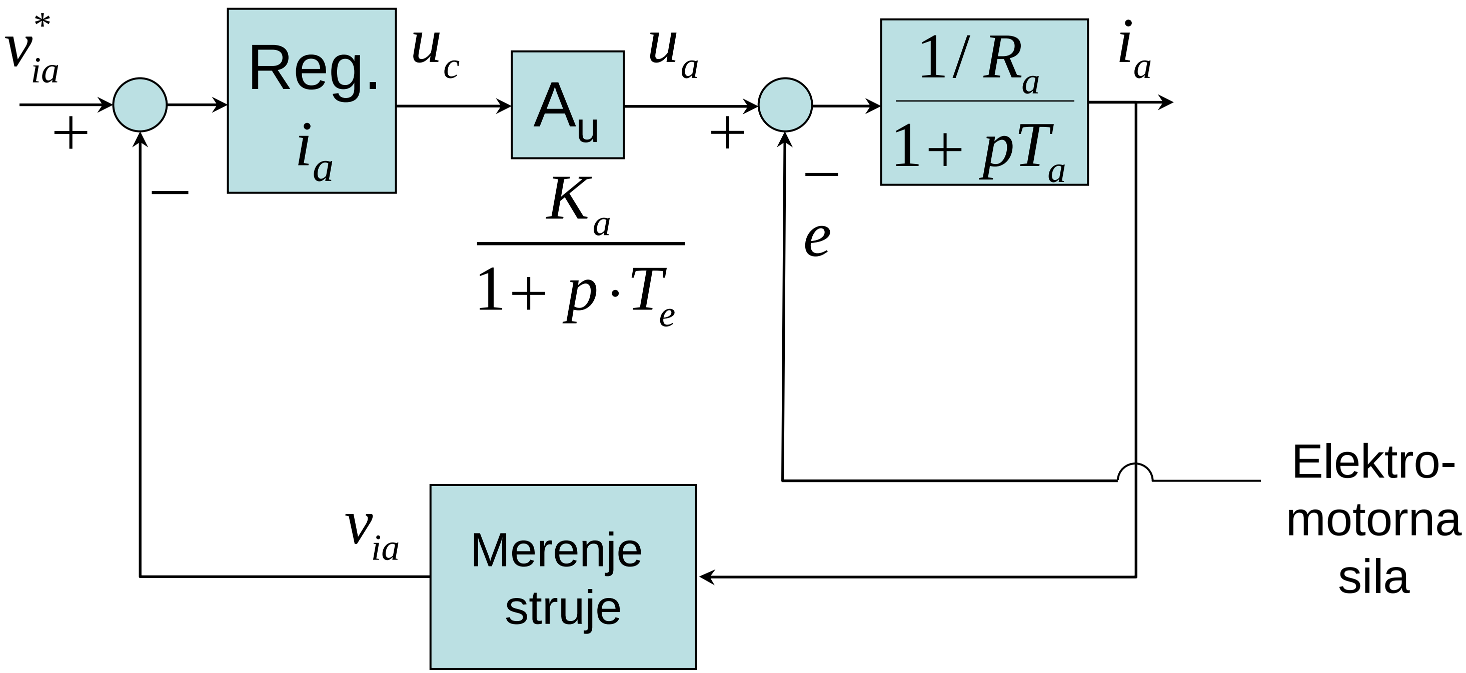
Praktična realizacija strujnog izvora
Naponski izvor + regulator struje



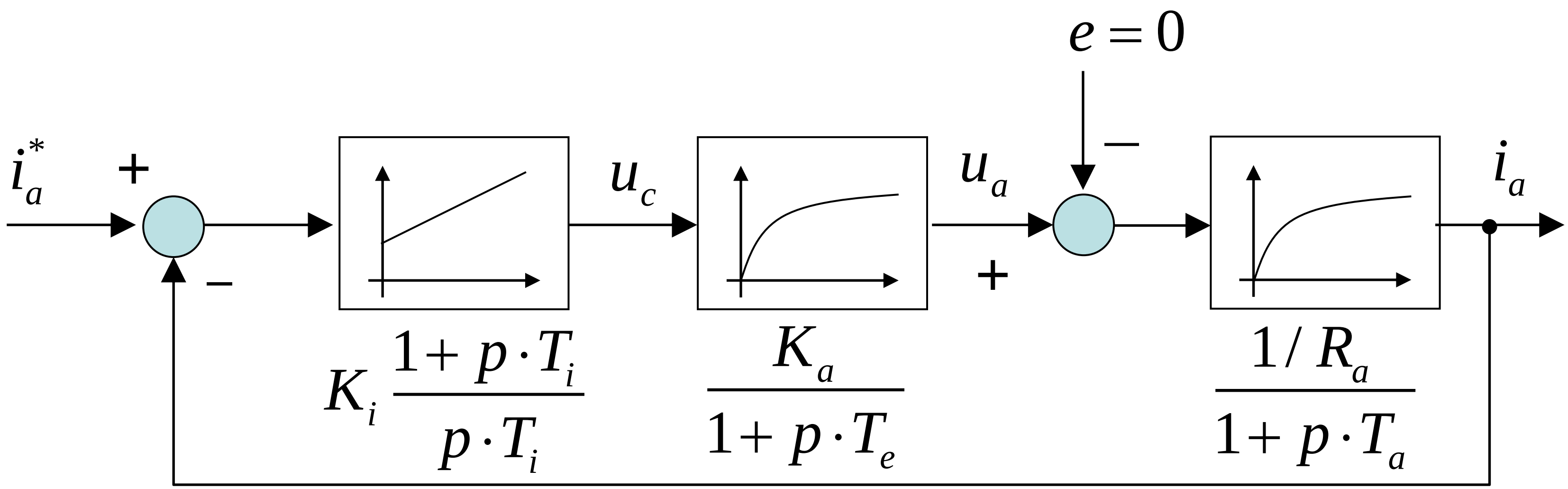
$T_e < T_a \ \left(T_e \ll T_a\right) \qquad T_a \ll T_m$

Podešavanje parametara regulatora struje

Blok dijagram sistema



Blok dijagram konture regulacije struje



$$F_{0i}\left(p\right) = K_i \cdot \frac{1 + p \cdot T_i}{p \cdot T_i} \cdot \frac{K_a}{1 + p \cdot T_e} \cdot \frac{1/R_a}{1 + p \cdot T_a} \qquad T_a \gg T_e$$

Zanemarili smo blok (senzor) za merenje struje, smatramo da je idealan. Aktuator ima pojačanje i kašnjenje (uprošćeno).

Zanemarili smo uticaj elektromotorne sile, pošto se sporo menja. Smatramo da je to za konturu regulacije struje poremećaj, i u postupku podešavanja parametara vrednost je $e=0$

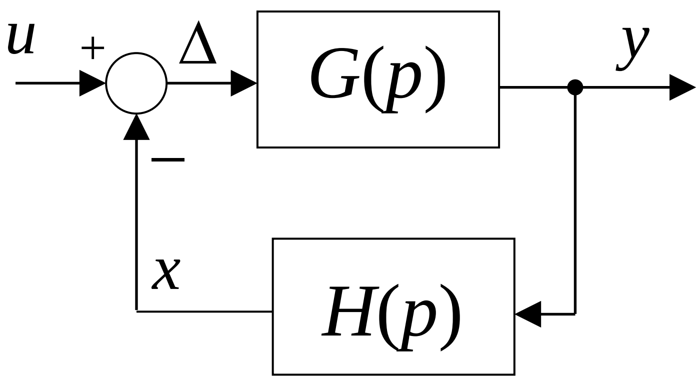
Funkcija prenosa konture regulacije struje

$$F_{0i}(p) = K_i \cdot \frac{1 + p \cdot T_i}{p \cdot T_i} \cdot \frac{K_a}{1 + p \cdot T_e} \cdot \frac{1/R_a}{1 + p \cdot T_a} \qquad T_a \gg T_e$$

Izvršimo kompenzaciju veće vremenske konstante

$$\rightarrow T_i = T_a$$

$$F_{0i}(p) = \frac{K_i \cdot K_a \cdot 1/R_a}{p \cdot T_i \cdot (1 + p \cdot T_e)}$$



$$\frac{y}{u}(p) = \frac{G(p)}{1 + G(p) \cdot H(p)} \qquad H(p) = 1$$

$$F_{wi}(p) = \frac{F_{0i}(p)}{1 + F_{0i}(p)}$$

Izbor parametara regulatora

$$F_{wi}(p) = \frac{K_i \cdot K_a \cdot (1/R_a)}{K_i \cdot K_a \cdot (1/R_a) + p \cdot T_i + p^2 \cdot T_i \cdot T_e}$$

$$a_0 = K_i \cdot K_a \cdot (1/R_a); \quad a_1 = T_i; \quad a_2 = T_i \cdot T_e$$

$$|F_w(j\omega)| = \sqrt{\frac{a_0^2}{a_0^2 + \omega^2 \cdot (a_1^2 - 2a_0a_2) + \omega^4 \cdot a_2^2}}$$

Ovo će biti ≈1 za male učestanosti ako je:

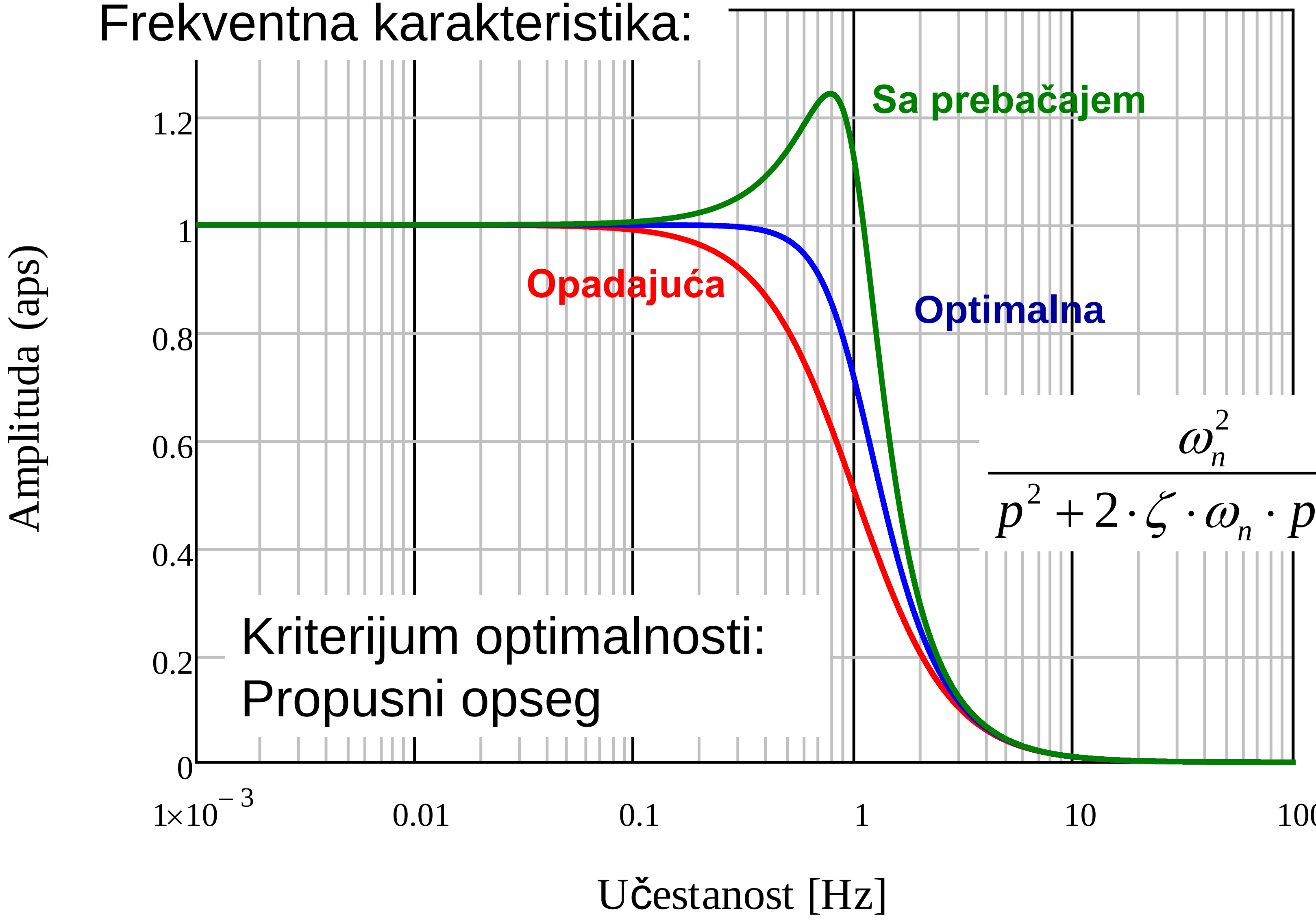
$$a_1^2 - 2a_0a_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{a_1^2 = 2a_0a_2}$$

Posle čega se dobija:

$$|F_w(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^4 \cdot (a_2/a_0)^2}}$$

Izbor parametara regulatora

Frekventna karakteristika:

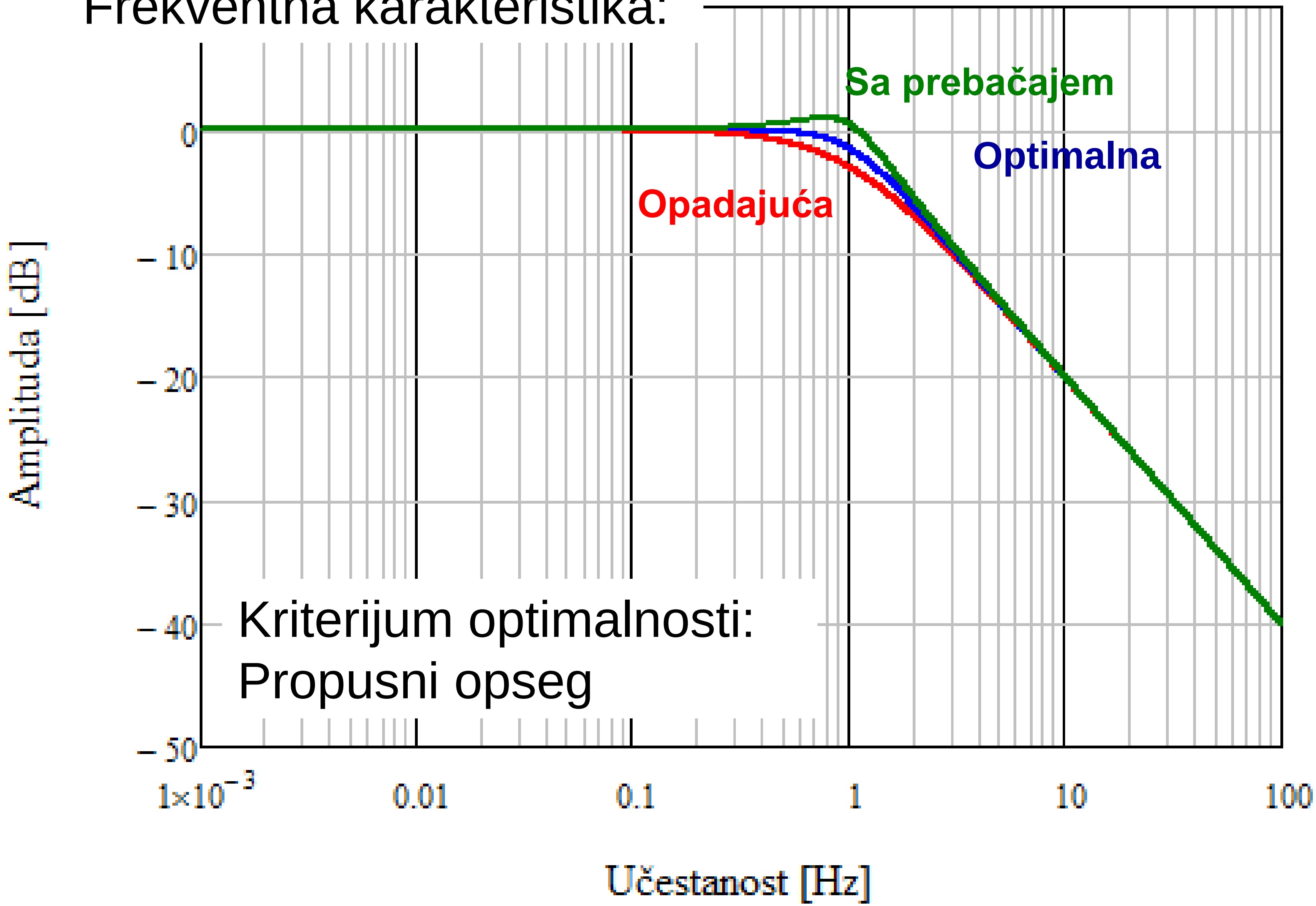


$$\frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\cdot\zeta\cdot\omega_n\cdot p + \omega_n^2}$$

Kriterijum optimalnosti:
Propusni opseg

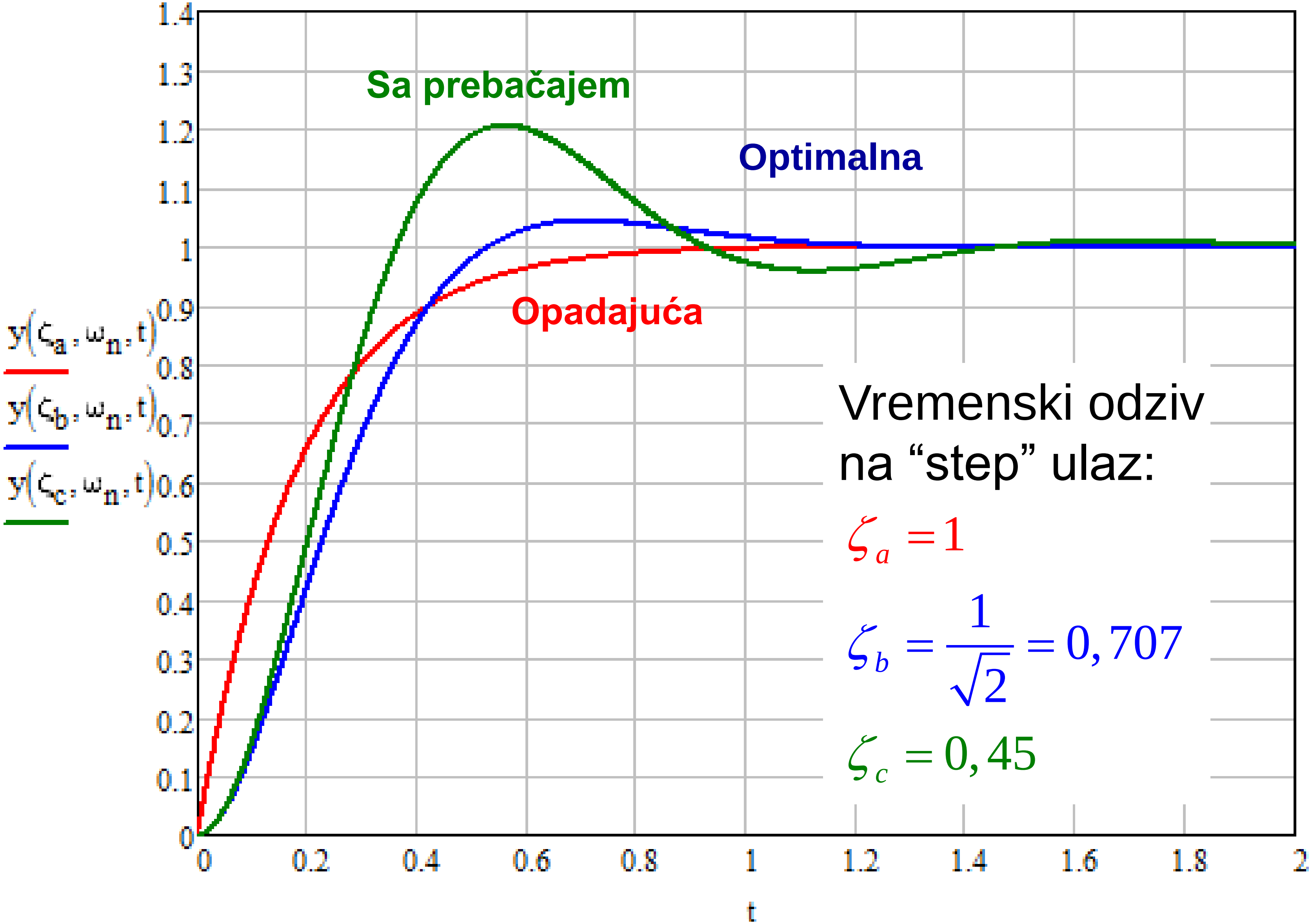
Izbor parametara regulatora

Frekventna karakteristika:



Kriterijum optimalnosti:
Propusni opseg

Izbor parametara regulatora



Vremenski odziv na “step” ulaz:

$$\zeta_a = 1$$

$$\zeta_b = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

$$\zeta_c = 0,45$$

$$a_0 = K_i \cdot K_a \cdot \left(1/R_a\right); \qquad a_1 = T_i; \qquad a_2 = T_i \cdot T_e$$

Primenjujemo definisan kriterijum optimizacije modula funkkcije prenosa

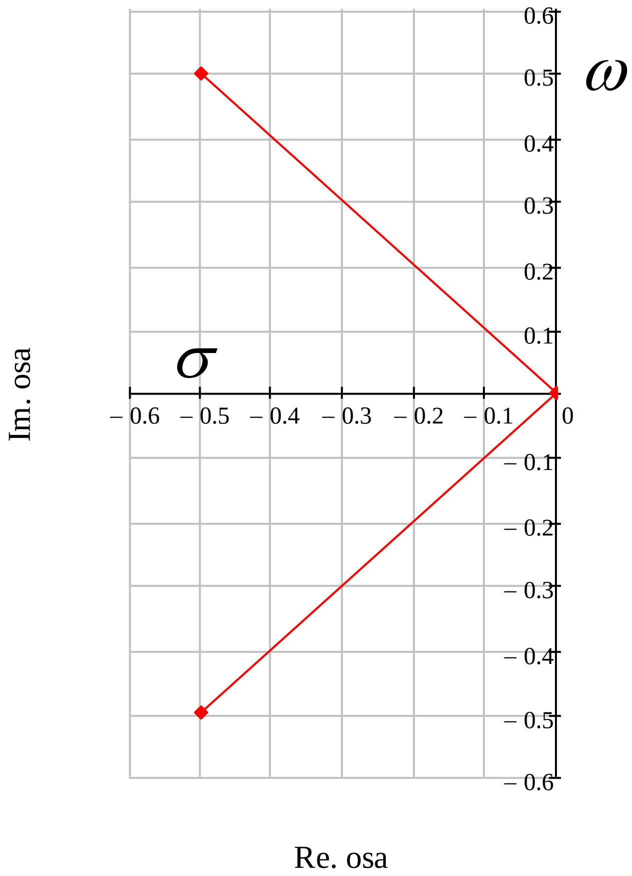
$$a_1^2 = 2 \cdot a_0 \cdot a_2$$

$$K_i \cdot K_a \cdot 1/R_a = \frac{T_i}{2 \cdot T_e} \longrightarrow K_i = \frac{T_i}{2 \cdot K_a \cdot \left(1/R_a\right) \cdot T_e}$$

$$F_{wi}\left(p\right)_{opt.} = \frac{i_a\left(p\right)}{i_a^*\left(p\right)} = \frac{1}{1 + p \cdot 2 \cdot T_e + p^2 \cdot 2 \cdot T_e^2}$$

$$F_{wi}(p)_{opt.} = \frac{i_a(p)}{i_a^*(p)} = \frac{1}{1 + p \cdot 2 \cdot T_e + p^2 \cdot 2 \cdot T_e^2}$$

Polovi funkcije prenosa $F_w(p)$ za T_e=1:



$$p_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot T_e} \pm i \cdot \frac{1}{2 \cdot T_e} =$$

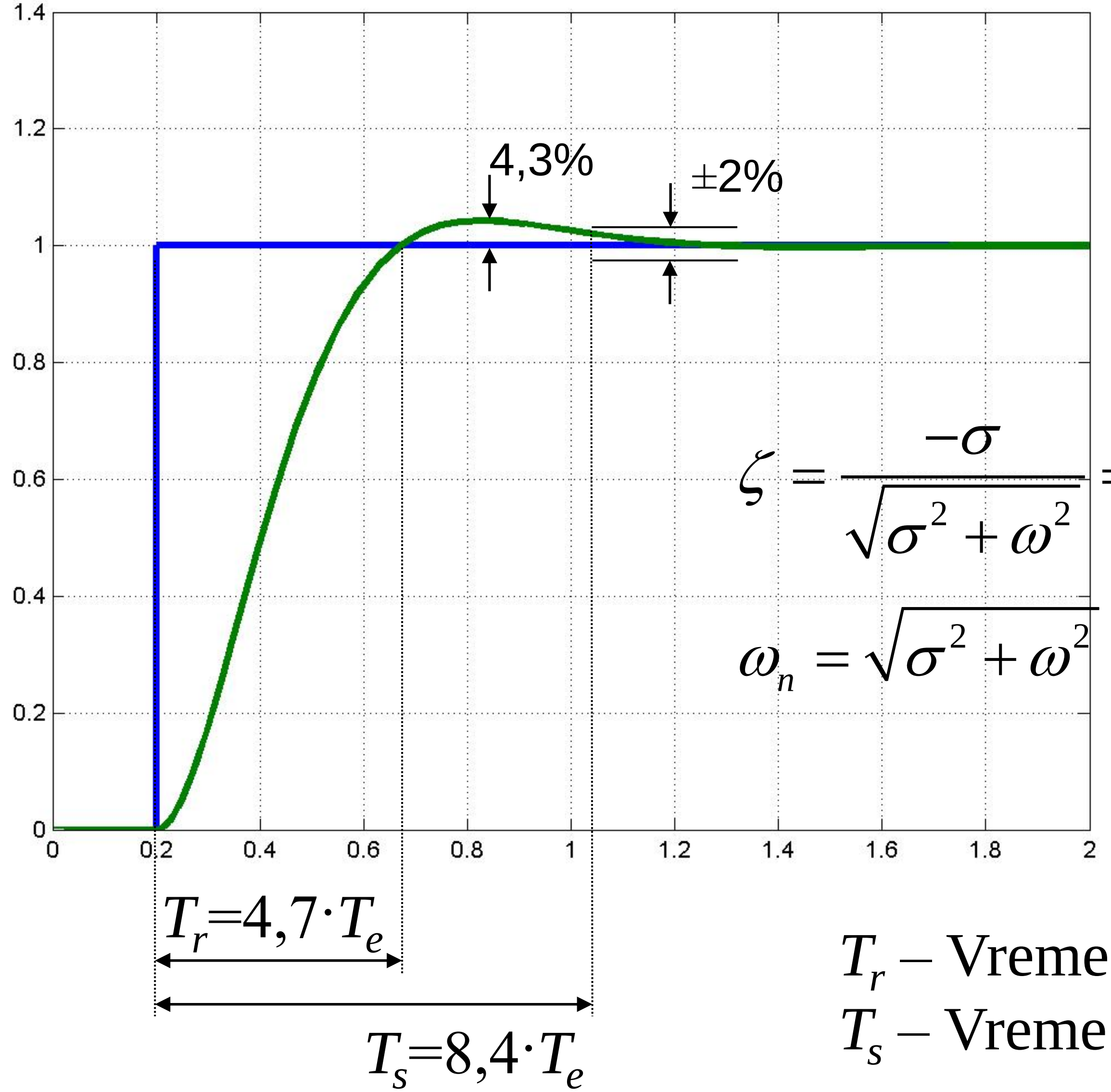
$$= \frac{1}{2 \cdot T_e} \cdot (-1 \pm i) = \sigma \pm i \cdot \omega$$

Ako je $u^*(t)$ step funkcija $h(t)$, onda je:

$$y(t) = £^{-1}\left\{u^*(p) \cdot F_w(p)\right\} =$$

$$= 1 - e^{-\frac{t}{2 \cdot T_e}} \left[\cos\left(\frac{t}{2 \cdot T_e}\right) + \sin\left(\frac{t}{2 \cdot T_e}\right)\right]$$

Odziv u vremenskom domenu (T_e=0,1s)



$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2+\omega^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

$$\omega_n = \sqrt{\sigma^2+\omega^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{T_e}$$

T_r – Vreme reagovanja

T_s – Vreme smirenja

Brzina promene brzine je značajno manja od brzine promene struje indukta i_a.

Pri promeni $\Delta i_a^* \sim \Delta i_a$ važi $\Delta\omega \approx 0$ i $\Delta e \approx 0$

Ako uzmemo PI - regulator i_a:

$$K_i \frac{1 + p \cdot T_i}{p \cdot T_i}$$

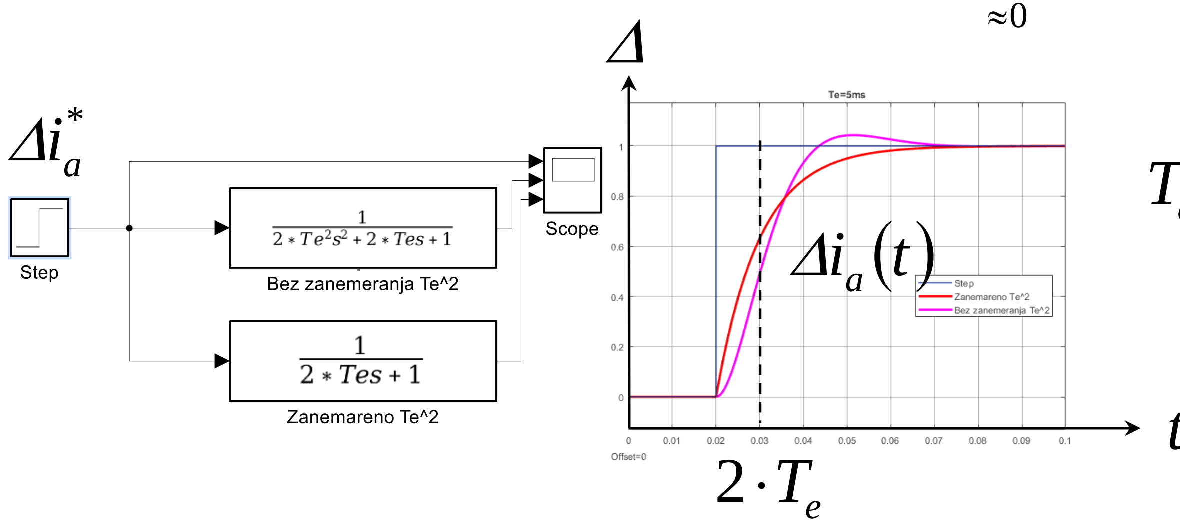
kompenzacija $\rightarrow T_i = T_a$

Optimizacija po modulu

realni strujni izvor:

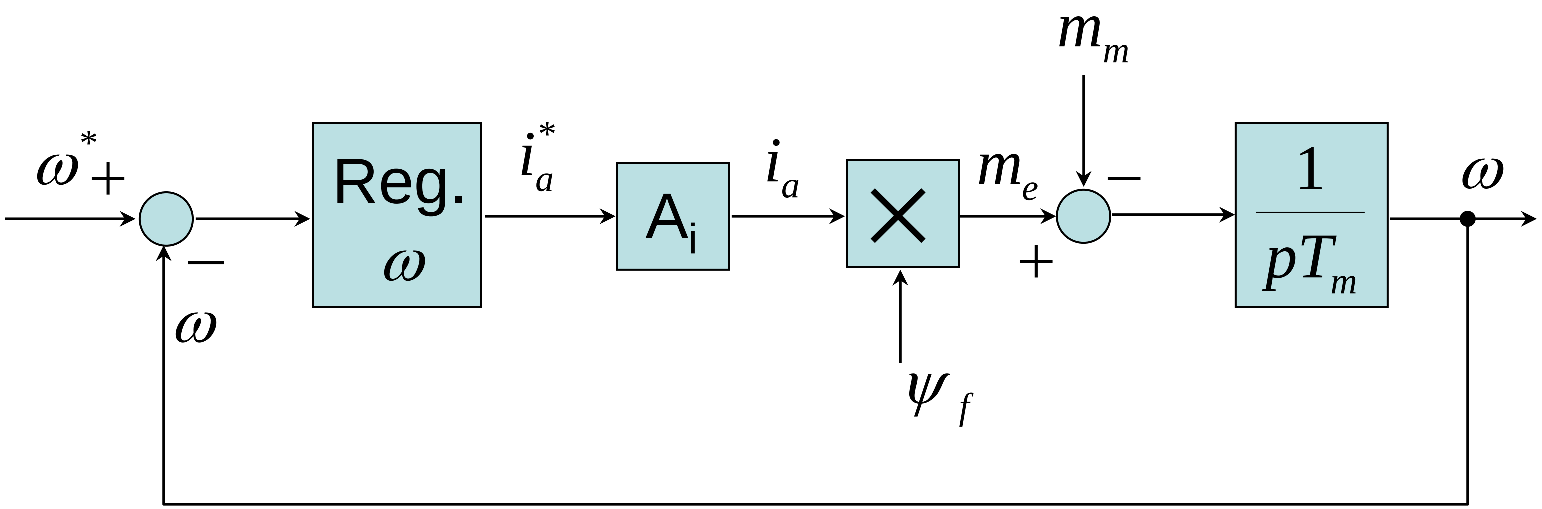
$$\frac{1}{1 + p \cdot 2 \cdot T_e + \underbrace{p^2 \cdot 2 \cdot T_e^2}_{\approx 0}} \approx \frac{1}{1 + p \cdot 2 \cdot T_e}$$

0

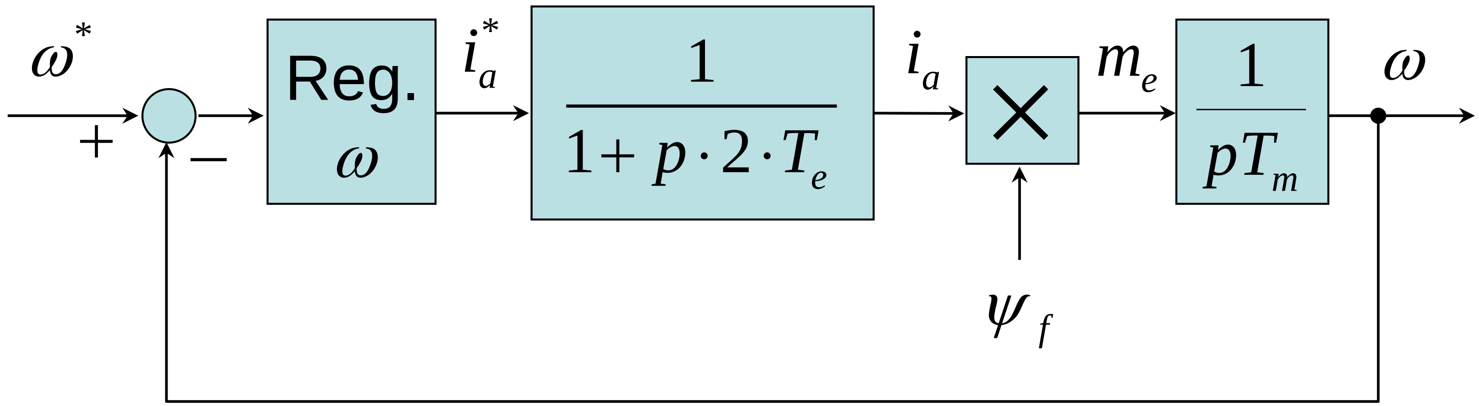


$T_e = 5\ \mathrm{ms}$

Regulisani pogon sa regulatorom brzine sa motorom za jednosmernu struju napajan iz strujnog izvora



Regulator brzine:



$$F_{\omega}(p) = K_{\omega} \cdot \frac{1 + p \cdot T_{\omega}}{p \cdot T_{\omega}}$$

$$F_{0\omega}(p) = \frac{K_{\omega} \cdot (1 + p \cdot T_{\omega}) \cdot \psi_f}{p^2 \cdot T_{\omega} \cdot T_m \cdot (1 + p \cdot 2 \cdot T_e)} = \frac{K'_{\omega} \cdot (1 + p \cdot T_{\omega})}{p^2 \cdot T_{\omega} \cdot T_m \cdot (1 + p \cdot 2 \cdot T_e)}$$

$$K'_{\omega} = K_{\omega} \cdot \psi_f$$

$$F_{w\omega}(p) = \frac{F_{0\omega}(p)}{1 + F_{0\omega}(p)}$$

Funkcija spregnutog prenosa brzinske petlje

$$F_{w\omega}(p)=\frac{K'_\omega\cdot(1+p\cdot T_\omega)}{p^2\cdot T_\omega\cdot T_m\cdot(1+p\cdot 2\cdot T_e)+K'_\omega\cdot(1+p\cdot T_\omega)}$$

$$F_{w\omega}(p)=\frac{K'_\omega\cdot(1+p\cdot T_\omega)}{p^3\cdot\underbrace{T_\omega\cdot T_m\cdot 2\cdot T_e}_{a_3}+p^2\cdot\underbrace{T_\omega\cdot T_m}_{a_2}+p\cdot\underbrace{T_\omega\cdot K'_\omega}_{a_1}+\underbrace{K'_\omega}_{a_0}}$$

Primenom optimizacije: $a_1^2=(a)\cdot a_0\cdot a_2 \quad a_2^2=(a)\cdot a_1\cdot a_3$

$$T_\omega=a^2\cdot 2\cdot T_e;\quad K'_\omega=\frac{1}{a}\cdot\frac{T_m}{2\cdot T_e}$$

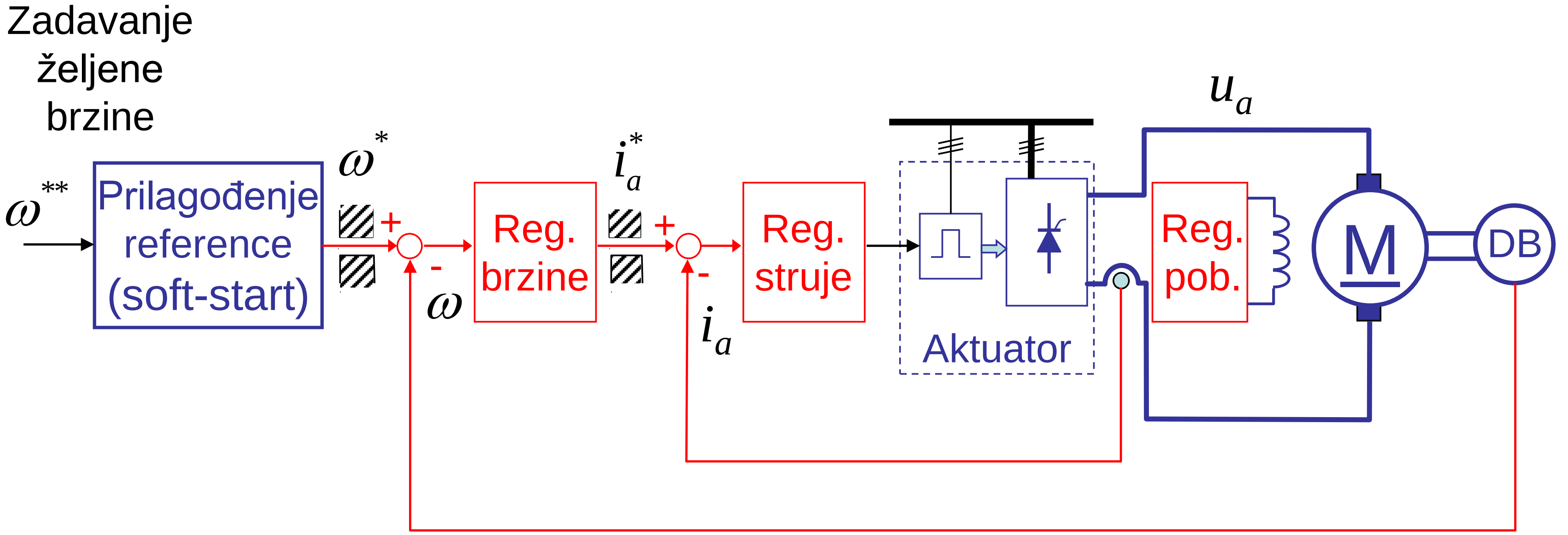
gde je $a=2\zeta+1$

ζ - željeni relativni faktor prigušenja zatvorene brzinske petlje.

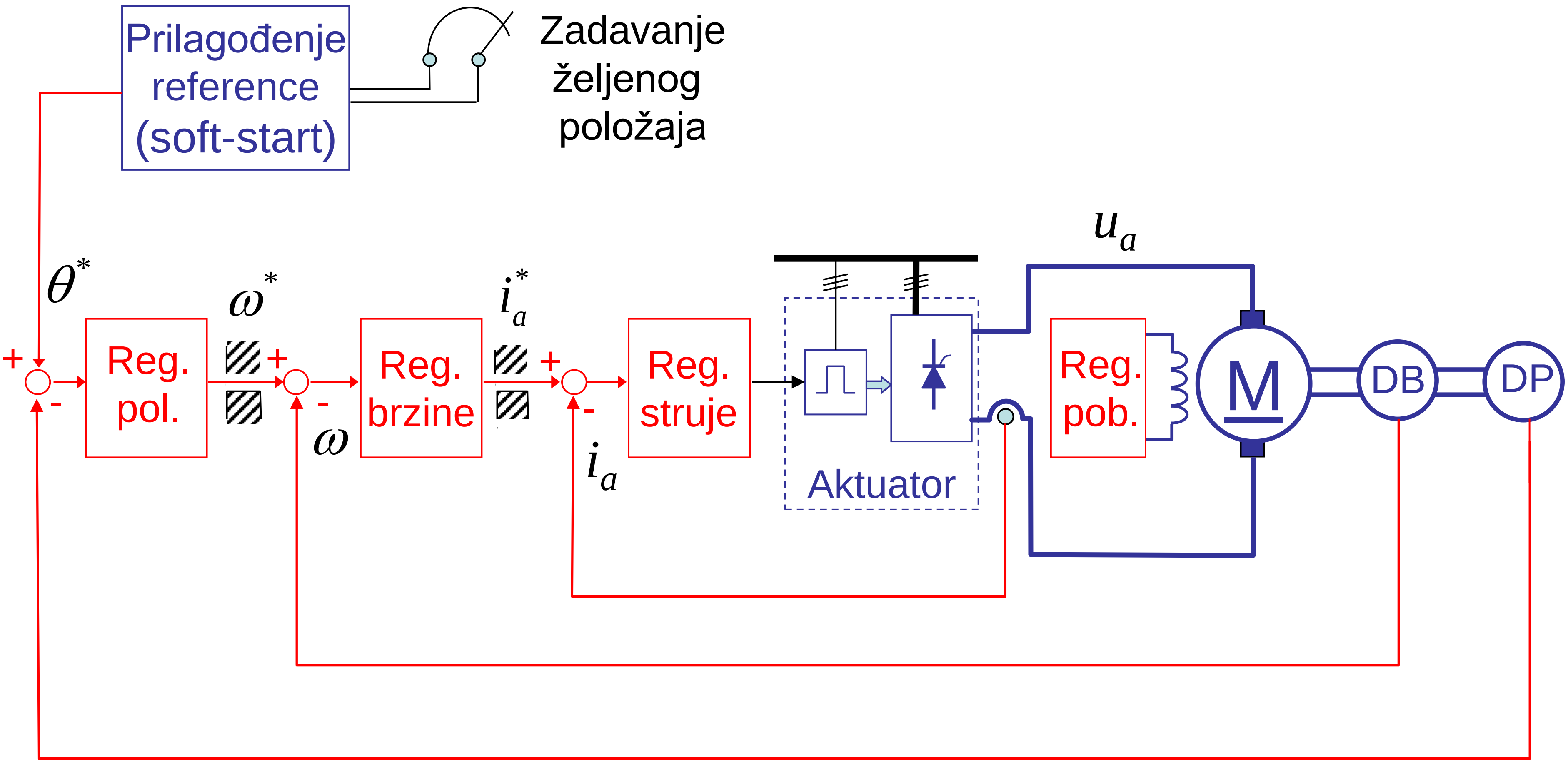
Sledi da je:

$$K_\omega=\frac{1}{\psi_f}\cdot\frac{T_m}{a\cdot 2\cdot T_e}$$

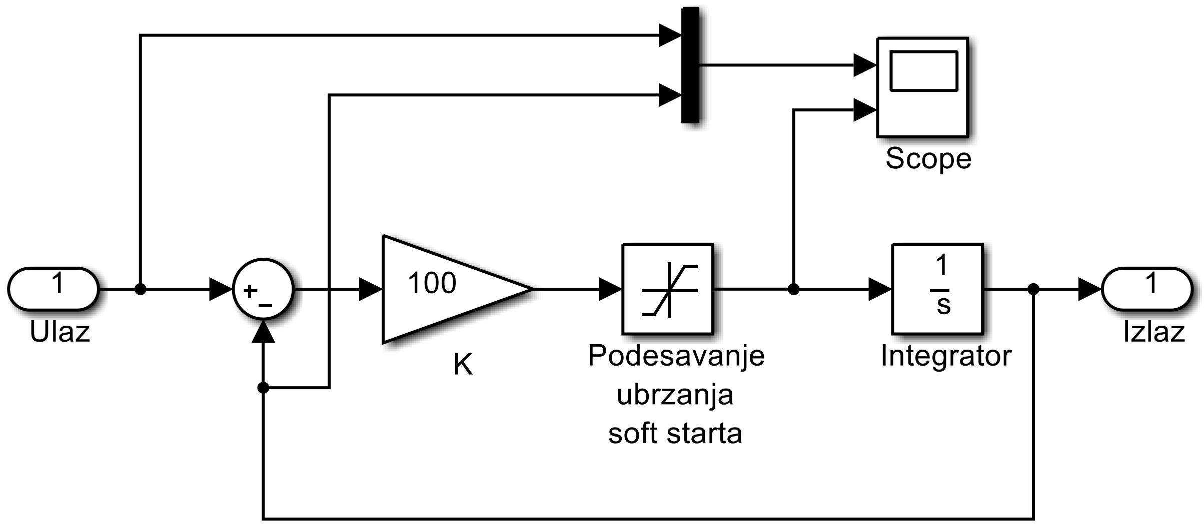
Regulisani elektromotorni pogon sa motorom za jednosmernu struju osnovna struktura



Regulisani elektromotorni pogon sa motorom za jednosmernu struju – sa regulacijom pozicije

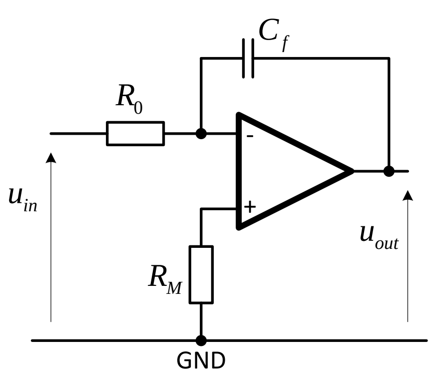


Realizacija bloka za prilagođenje reference

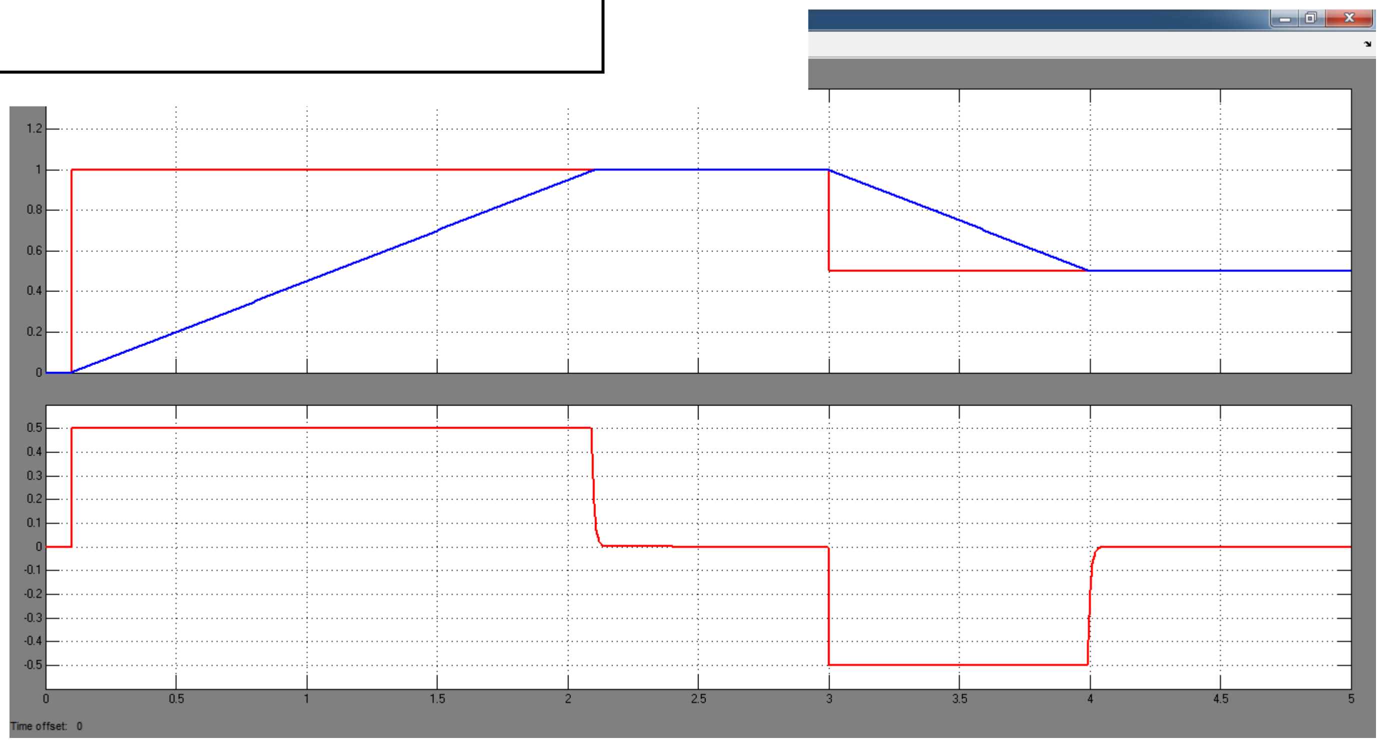


Integrator u kontinualnom vremenskom domenu

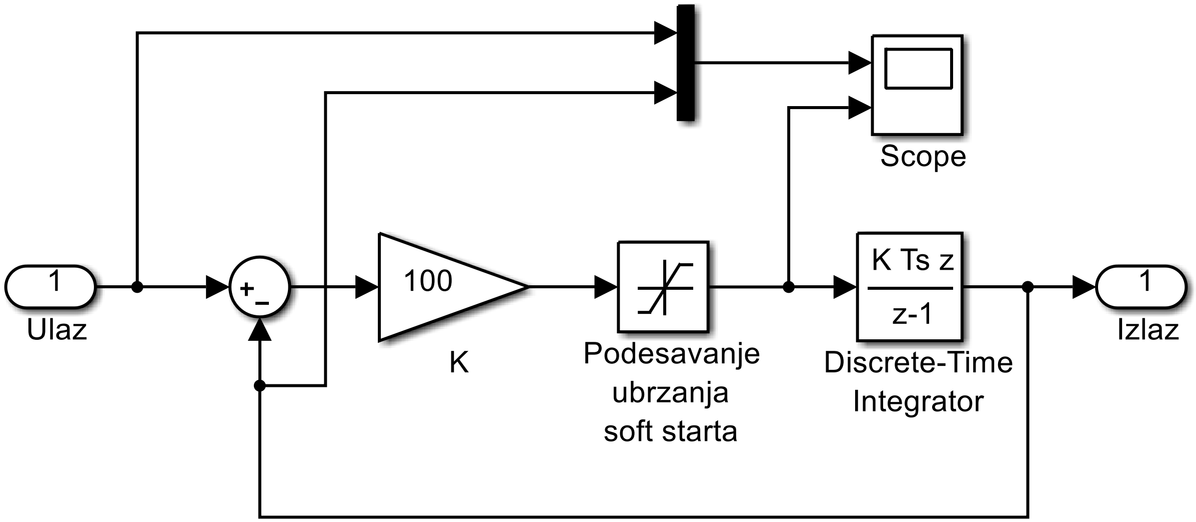
Limit = ±0,5



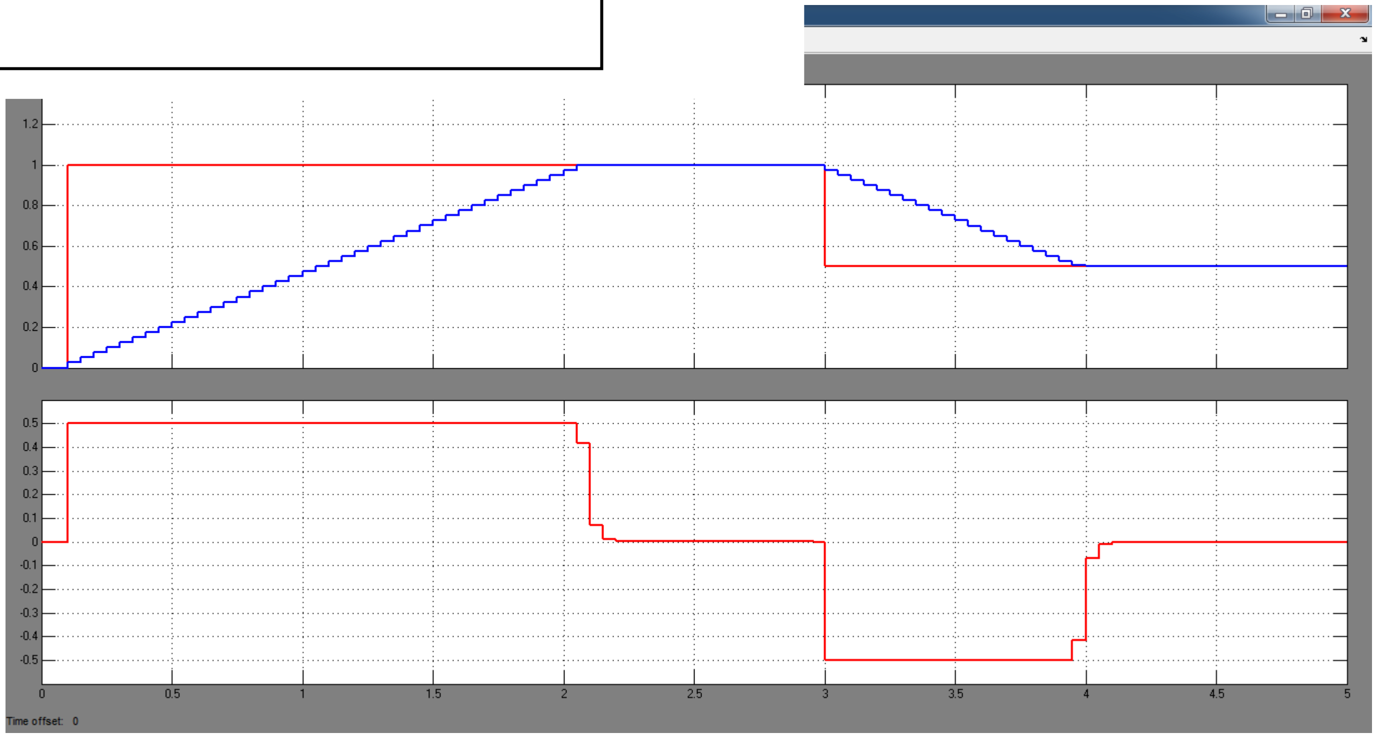
Invertuje signal



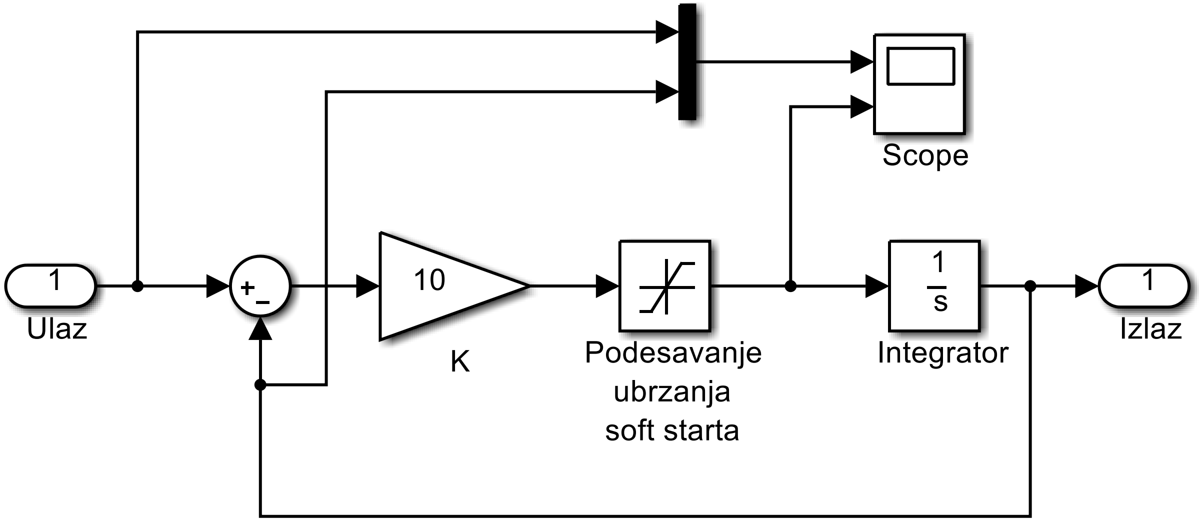
Realizacija bloka za prilagođenje reference



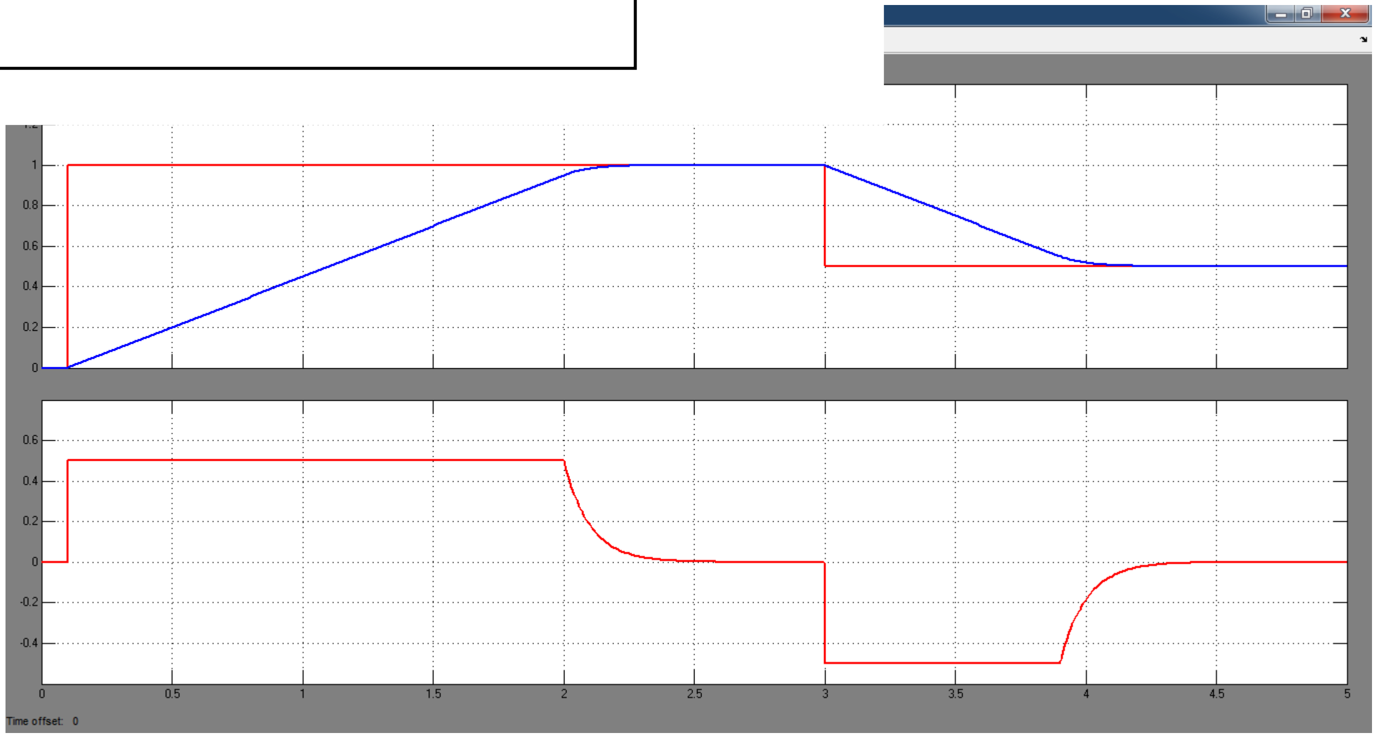
Integrator u diskretnom vremenskom domenu



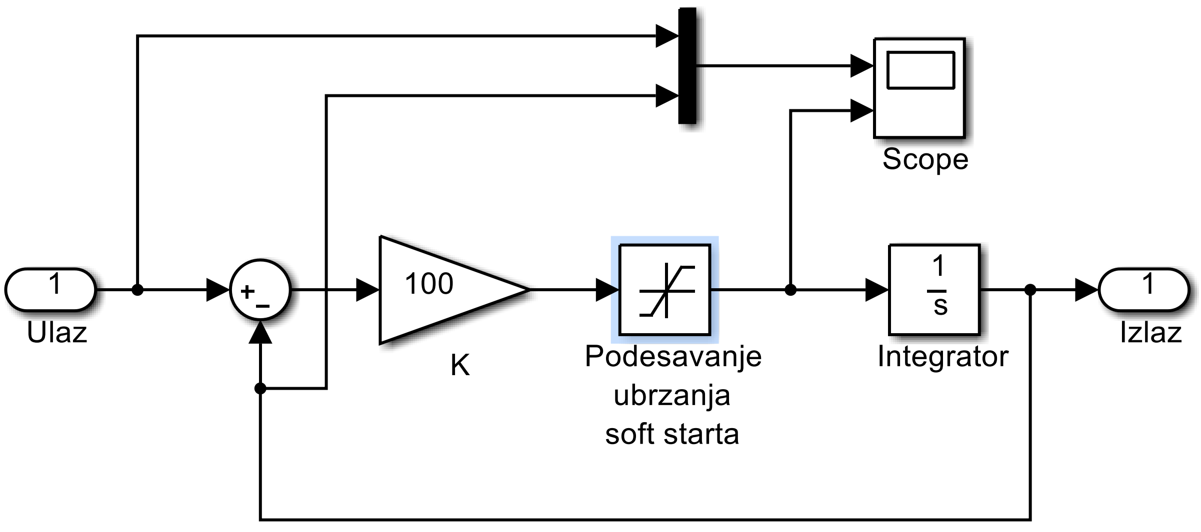
Realizacija bloka za prilagođenje reference



Uticaj pojačanja

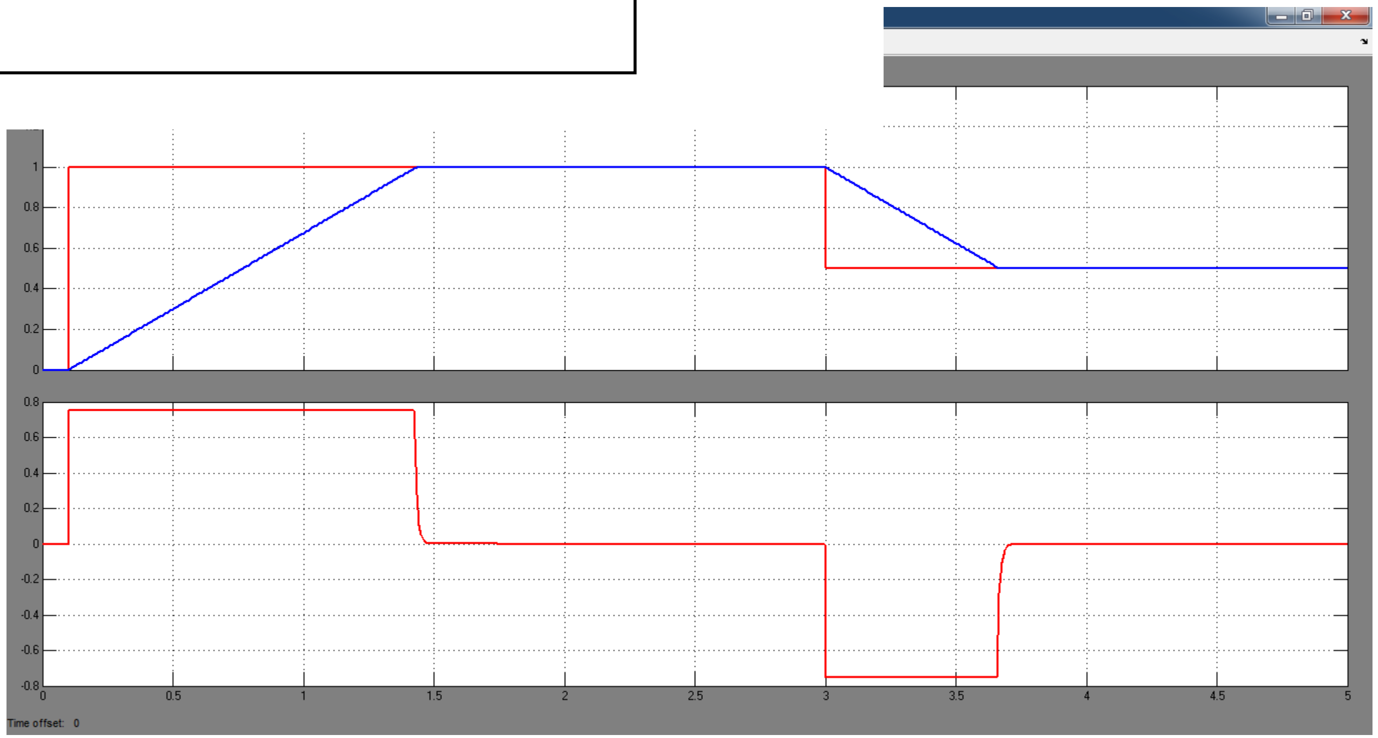


Realizacija bloka za prilagođenje reference

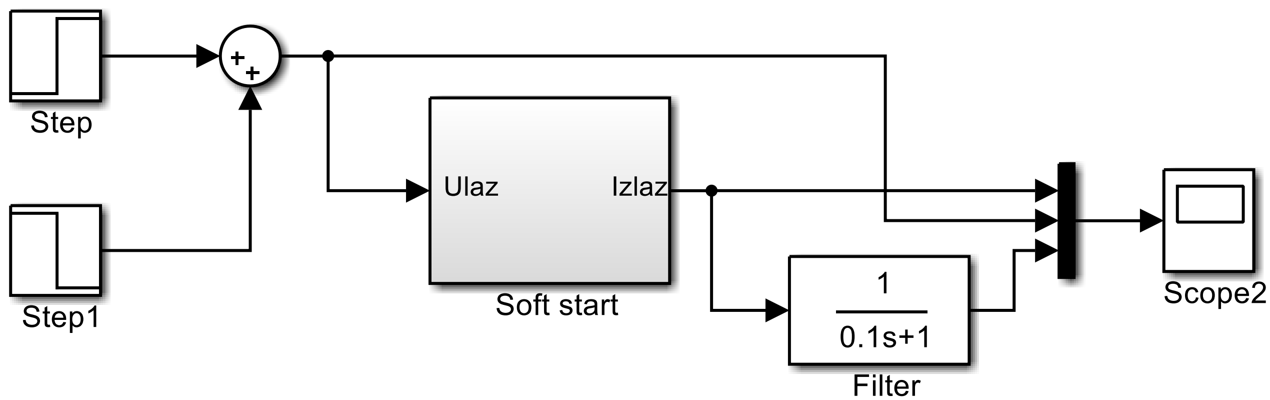


Uticaj promene limita na ubrzanje

Limit = ±0,75

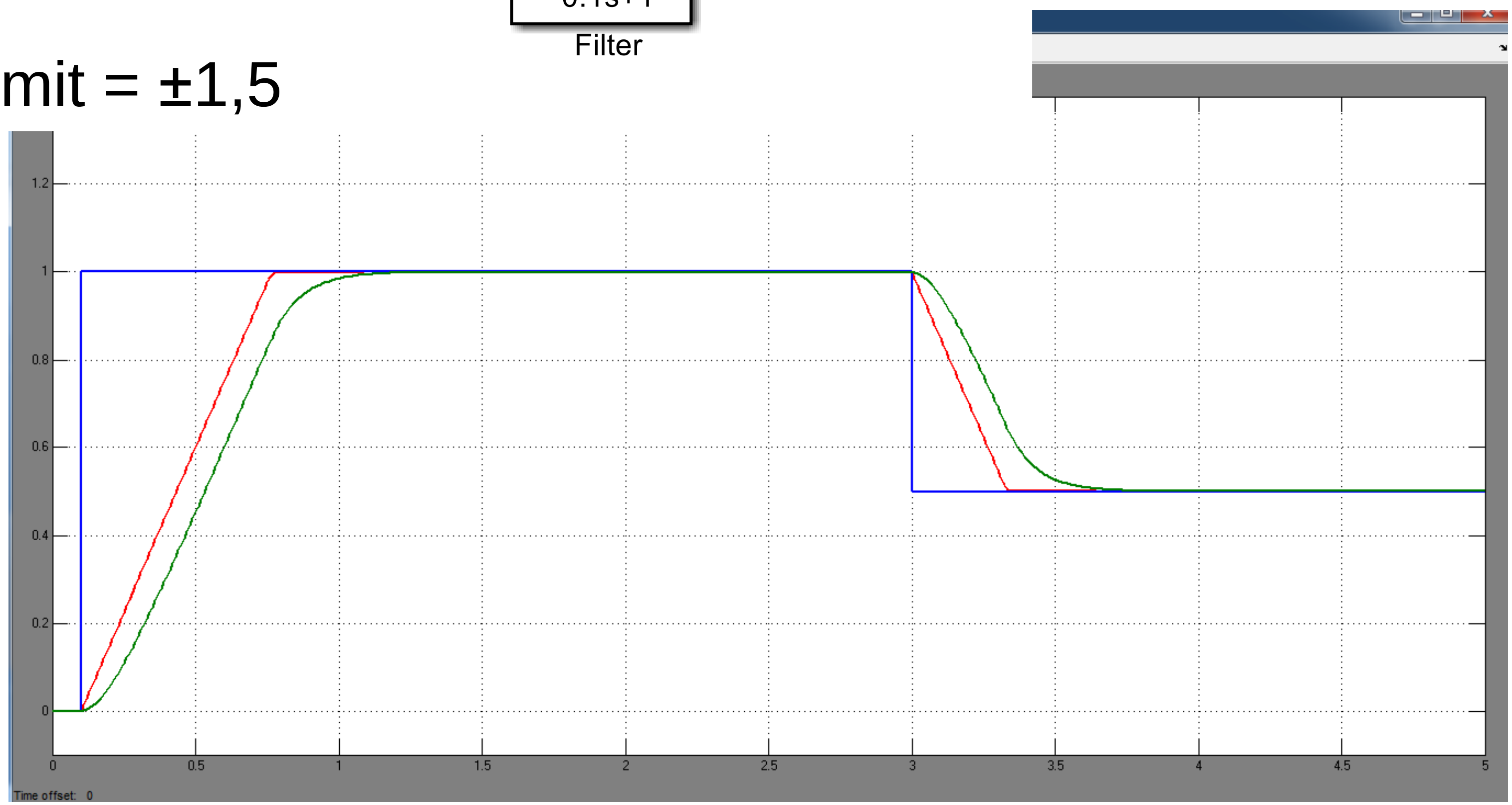


Realizacija bloka za prilagođenje reference

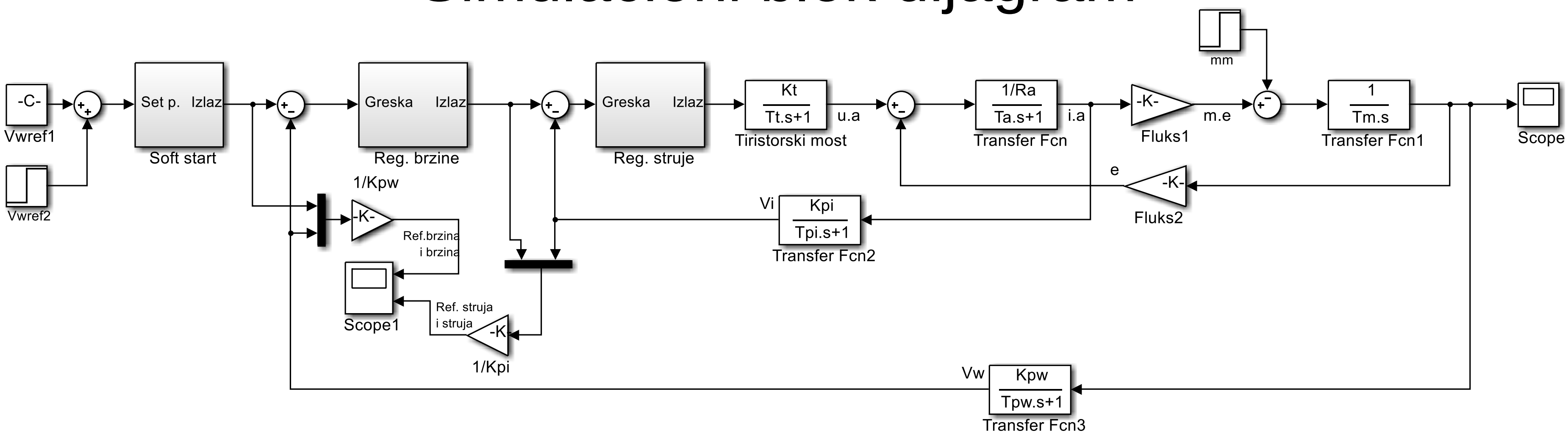


Soft-start
+
filter

Limit = ±1,5



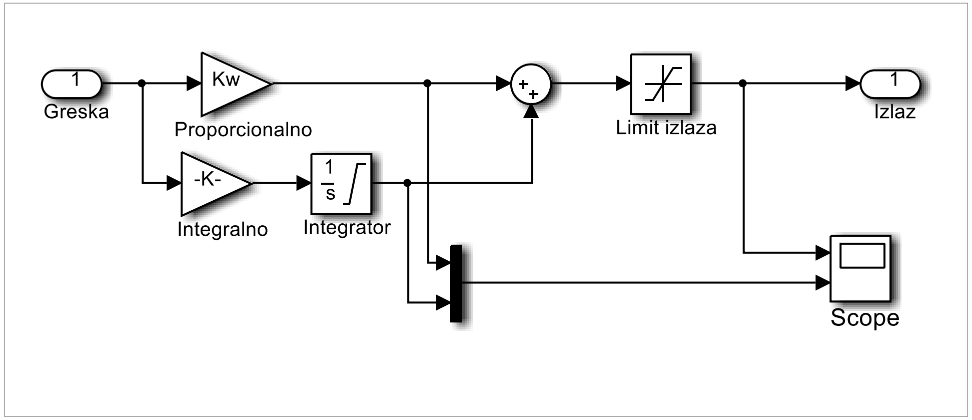
Simulacioni blok dijagram




```
Ra = 0.075;
PsiFn = 1-Ra;
Ta = 30e-3;
Tm = 1.92;
ktg = 0.05;
Kpw = ktg;
Tpw = 52.8e-3;
Kpi = 0.025;
Tpi = 2.6e-3;
Tt = 1.66e-3;
Kt = 30;
```

```
Ti = Ta;
Ki = 0.3516;
Tw = 245.33e-3;
Kw = 8.46;
mm = PsiFn/2;

Vwref1 = 0.5 * Kpw;
Vwref2 = 0.25 * Kpw;
LIM_UC = 1;
LIM_IA = 2 * Kpi;
LIM_SS = 0.5 * Kpw;
```



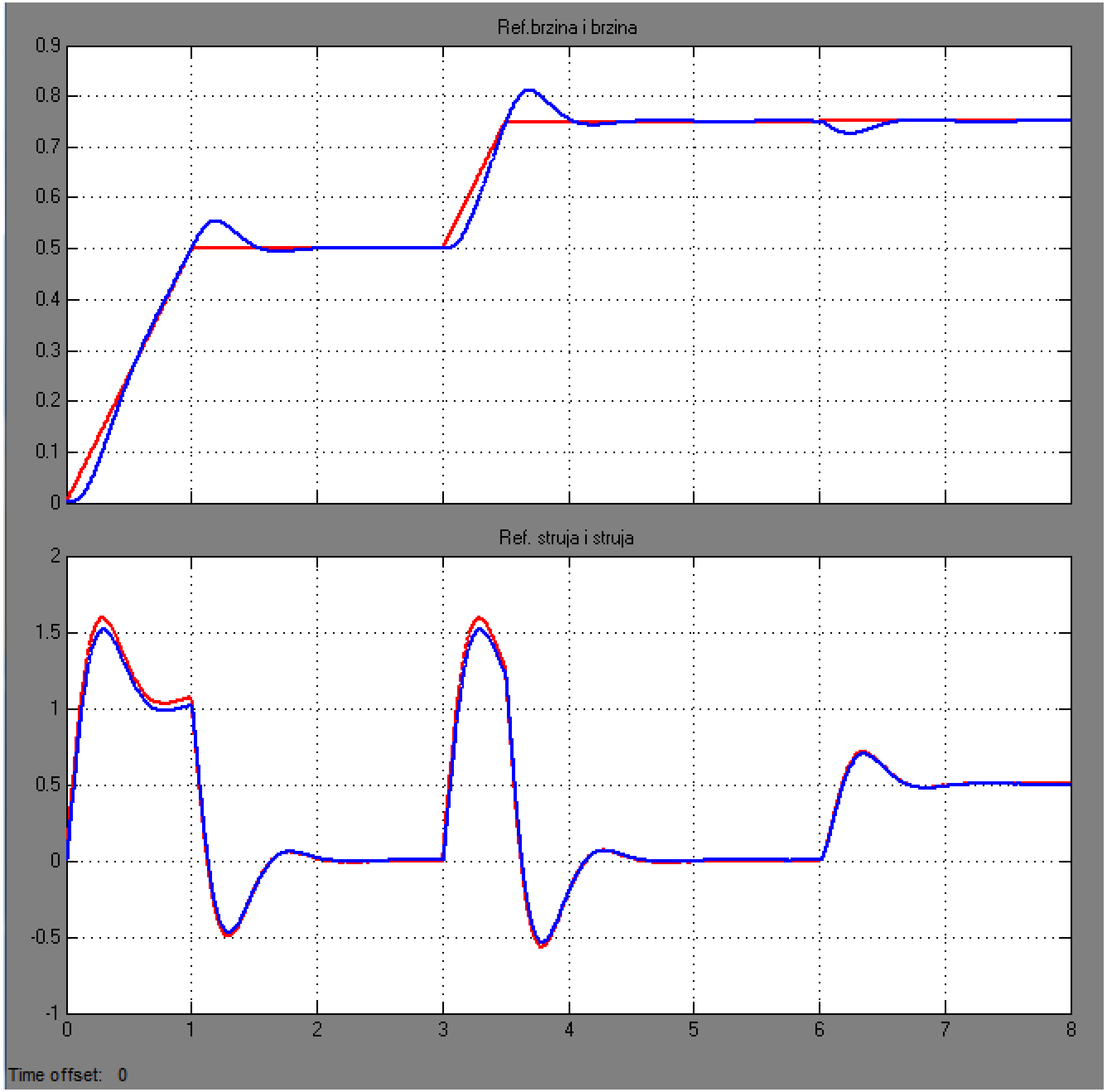
Regulator brzine

Regulator struje ima isti blok dijagram, ali druge parametre: pojačanje (Ki), vremensku konstantu integralnog dejstva (Ti) i limite integralnog dejstva i izlaza (LIM_IA)

Početna zadata brzina je $0{,}5\ \omega_{nom}$.

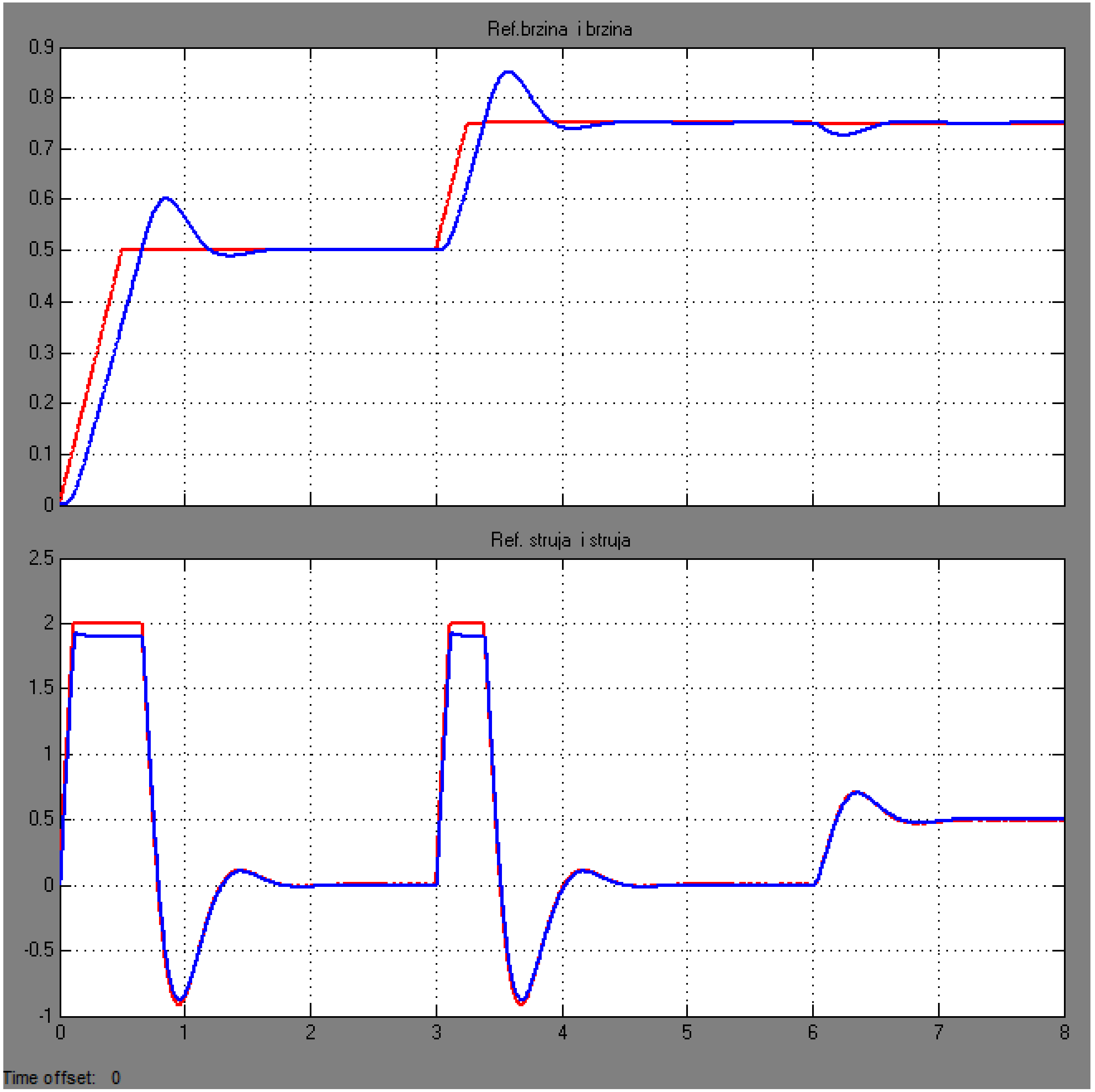
U trenutku t=3s zadaje se brzina $0{,}75\ \omega_{nom}$.

Opterećenje pogona polovinom nominalnog momenta je u $t = 6\text{s}$



Uticaj limita momenta na odziv regulatora brzine

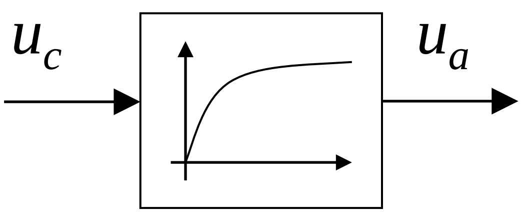
Povećano je željeno ubrzanje u bloku soft starta. Zbog ograničenja struje, ne dostiže se zadata brzina u toku soft-starta.



Aktuatori

- Tiristorski ispravljači
- Više-kvadratni rad
- Čoperi

Uprošćeni blok dijagram aktuatora



Uprošćena funkcija prenosa aktuatora

$$\frac{U_a}{U_c}(p) = \frac{K_a}{1 + p \cdot T_{ak}}$$

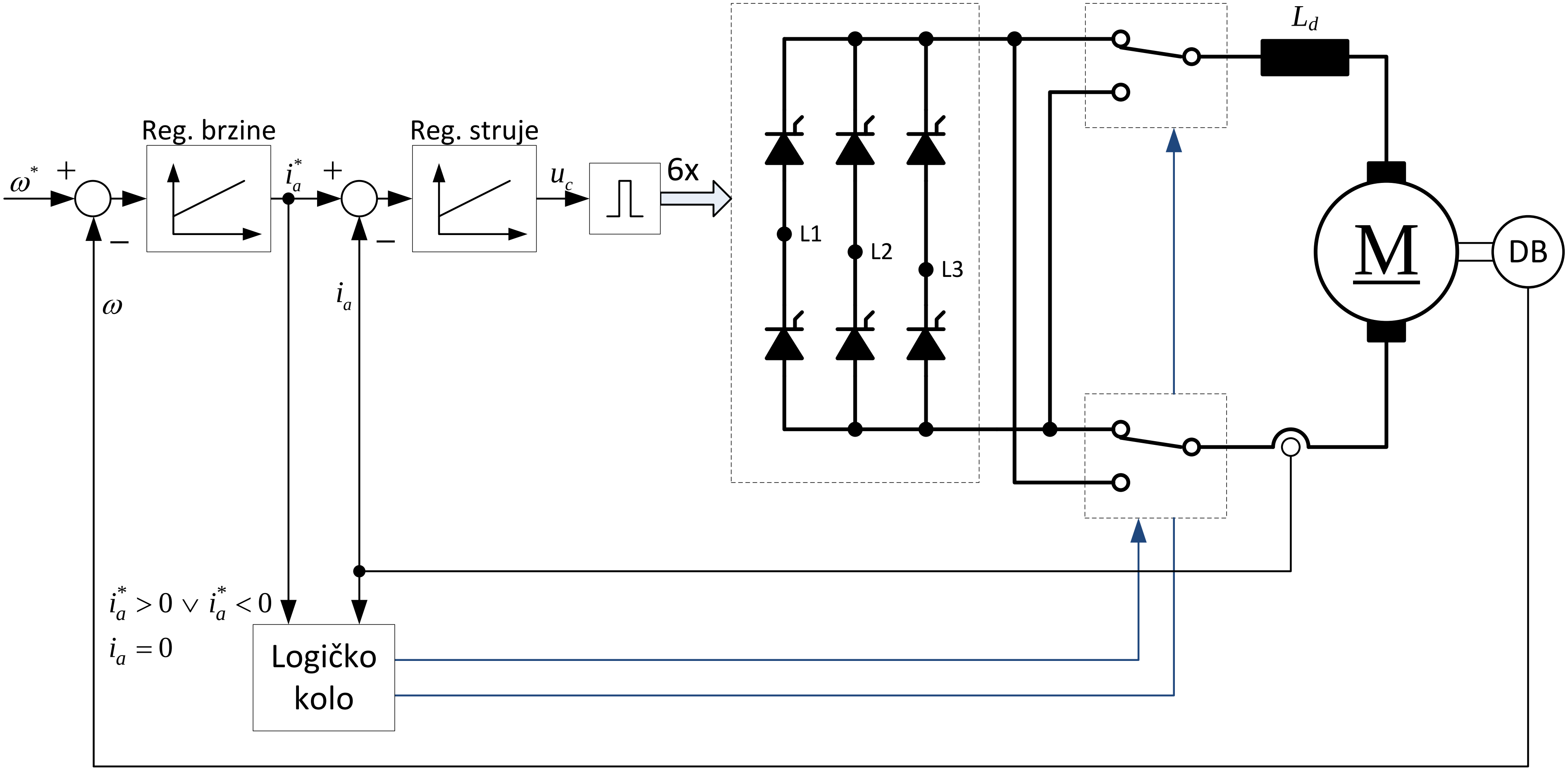
$T_{ak} = ?$ zavisi od vrste aktuatora

Četvoro- kvadratni rad sa preklopnikom

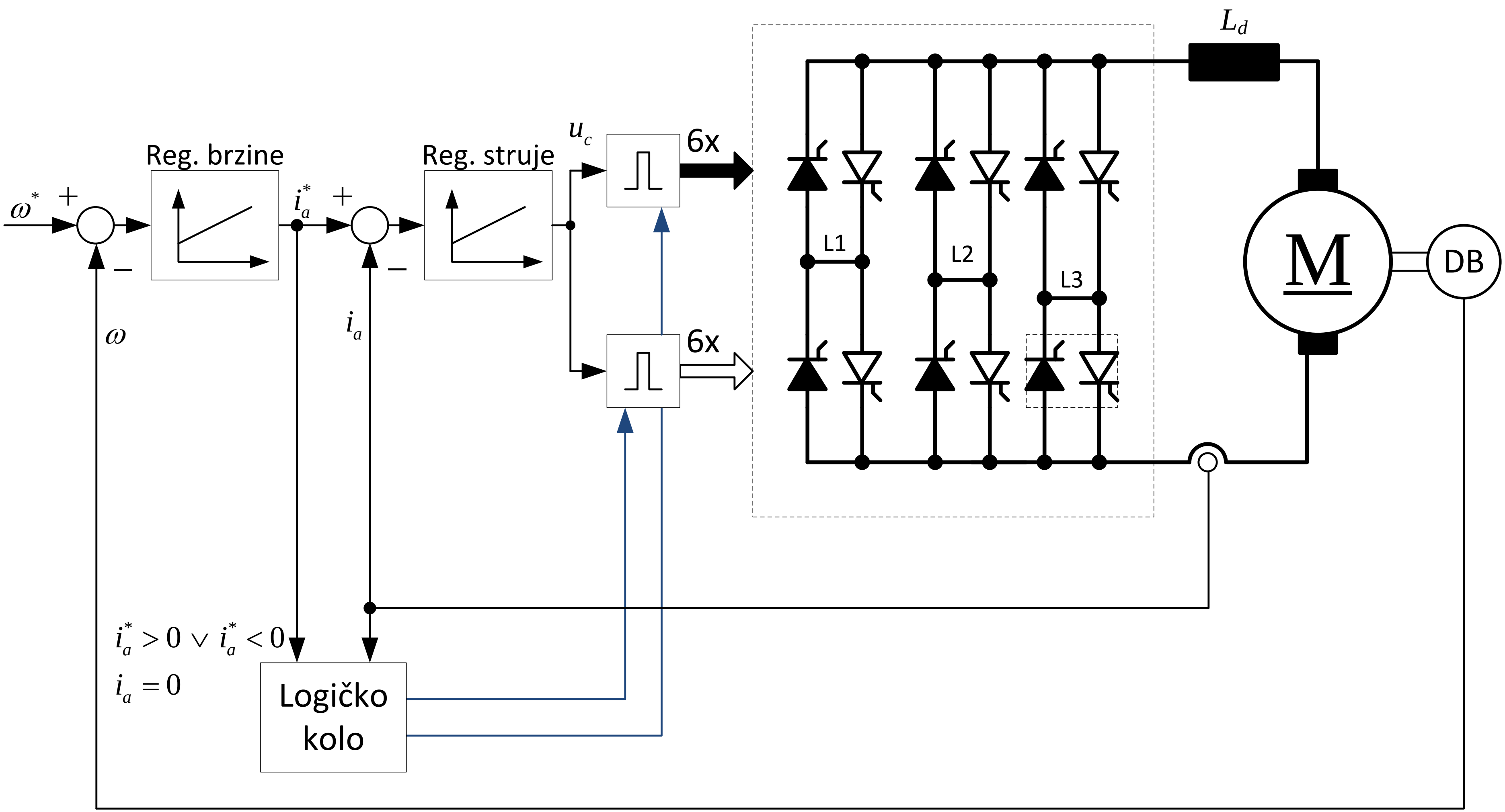
Regulacija brzine za male brzine reversa!

Logičko kolo: - promena stanja prekidača samo kada je $i_a = 0$

- položaj prekidača u funkciji od znaka i_a*

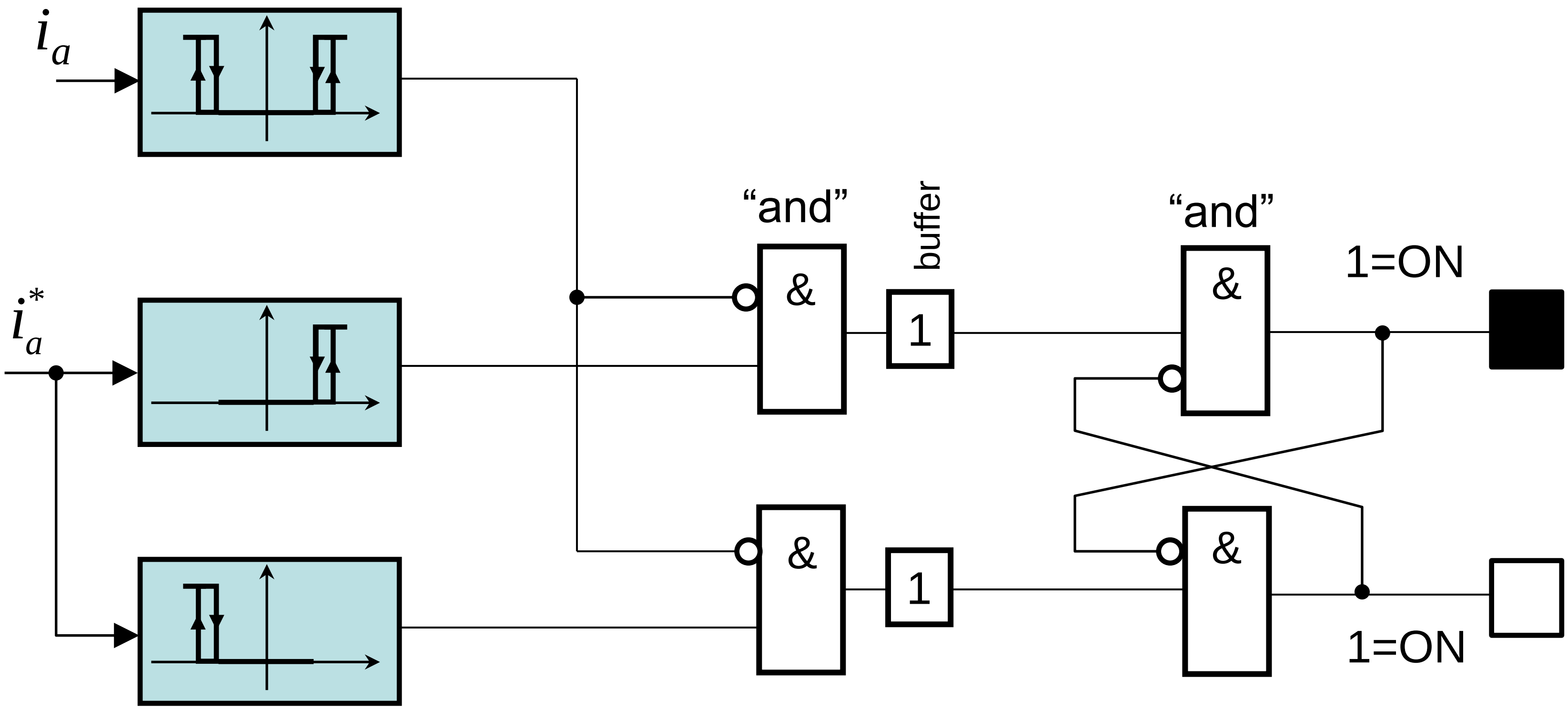


Četvoro-kvadratni rad sa dva anti-paralelna mosta (razdeljeno upravljanje)



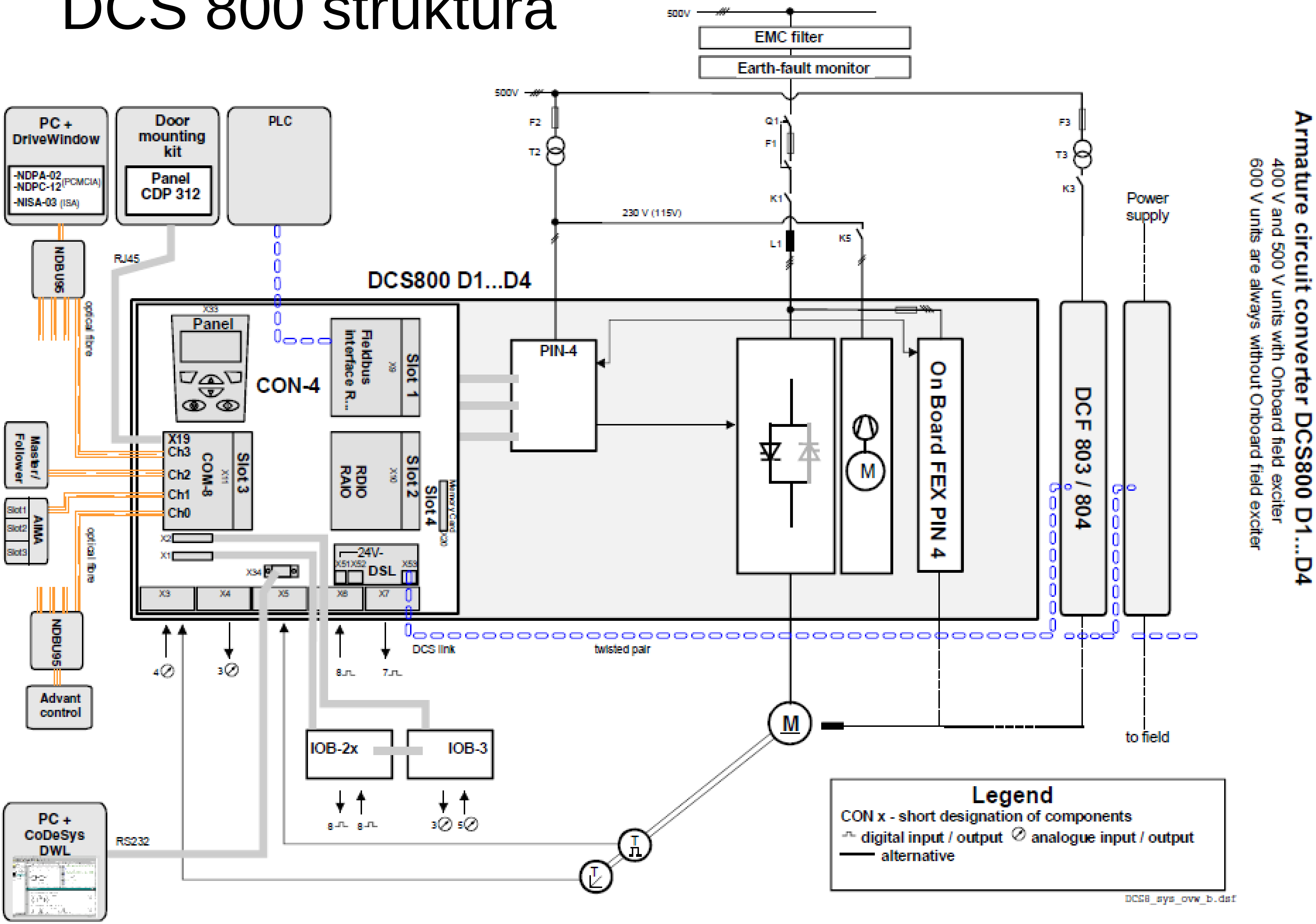
Logičko kolo

Logičko kolo deluje na blokiranje impulsa mosta koji ne treba da vodi.

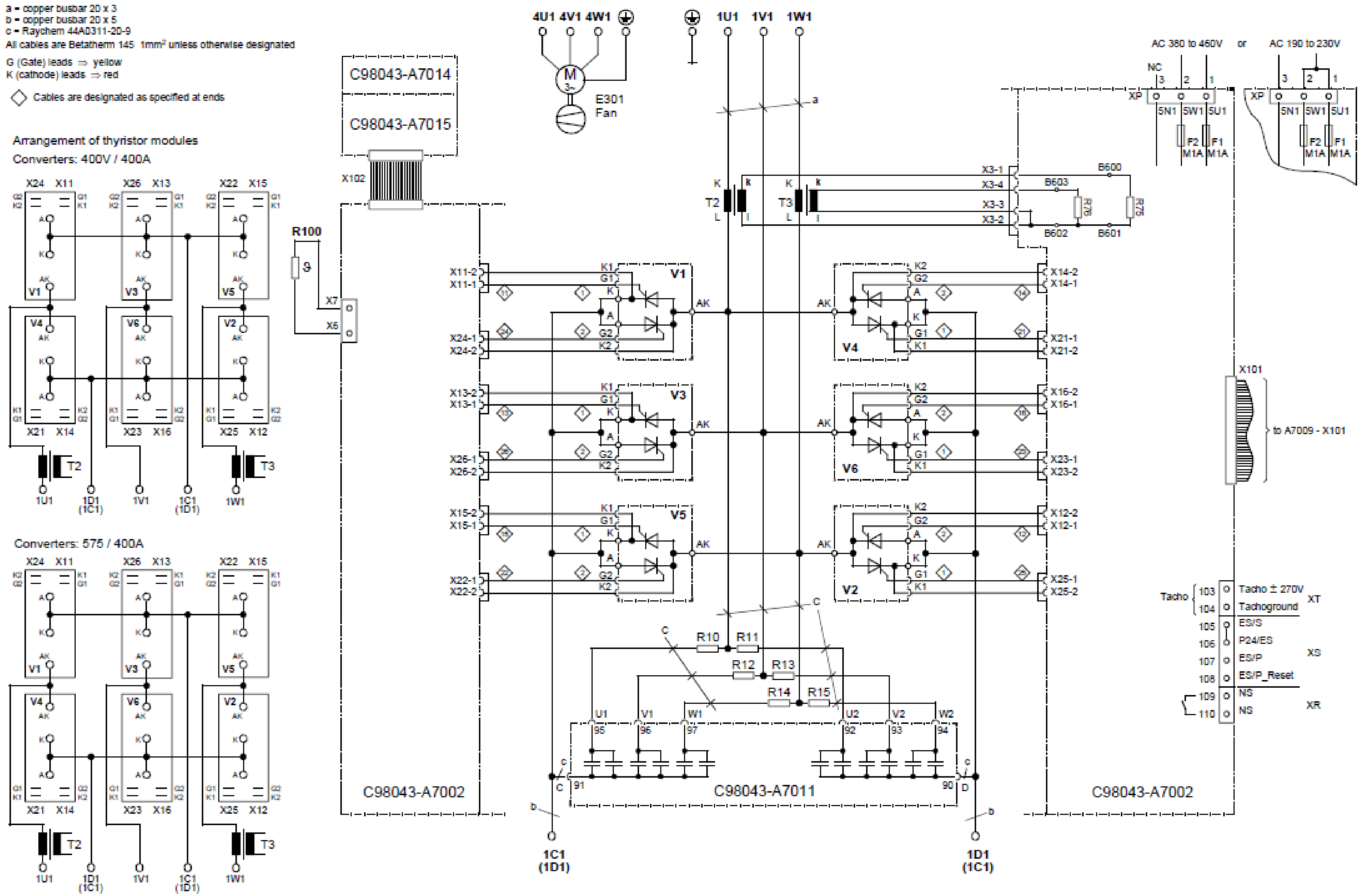


Pogoni sa razdeljenim upravljanjem mogu da ostvare bržu promenu znaka struje nego pogoni sa preklopnikom.

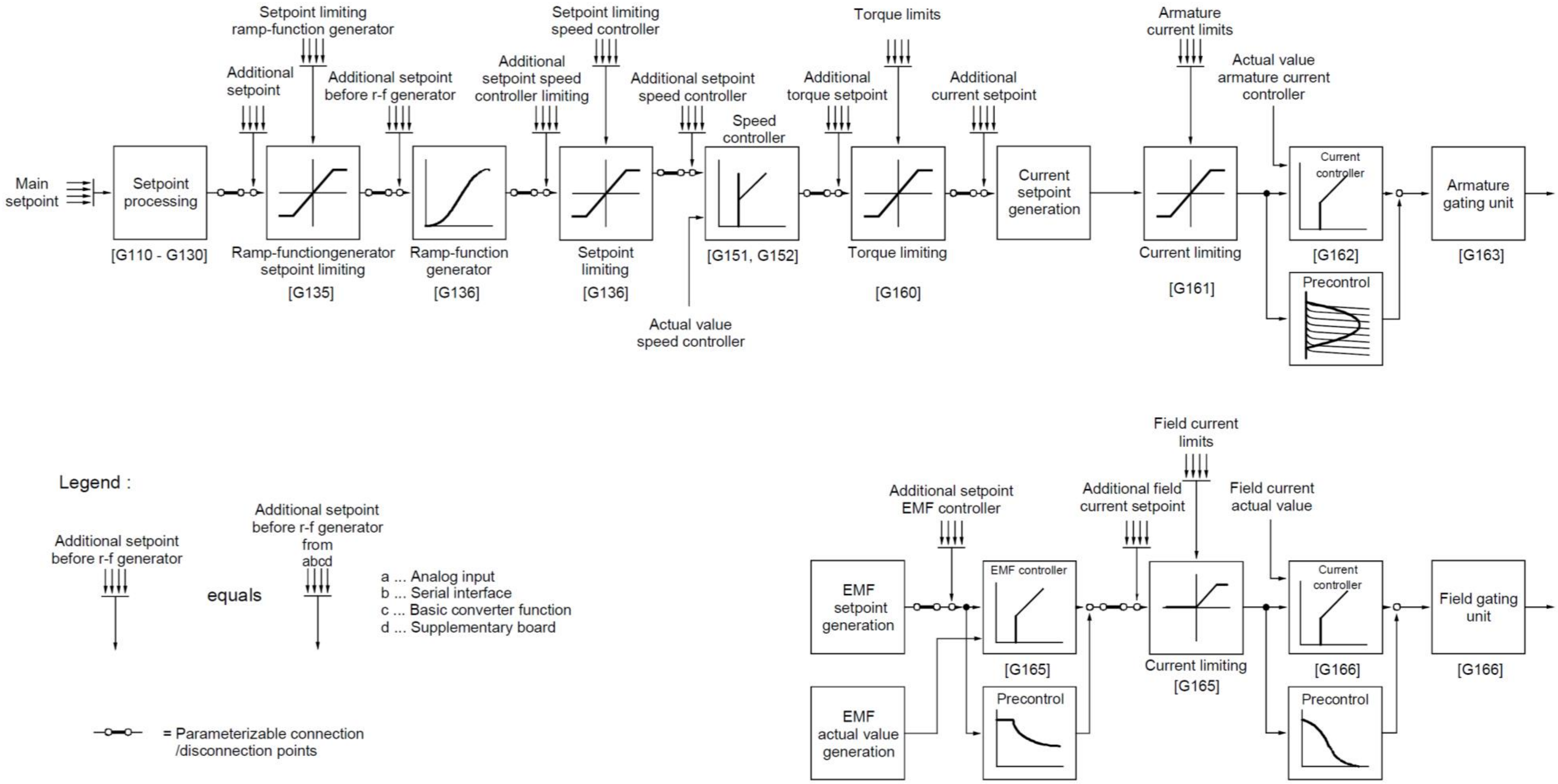
DCS 800 struktura



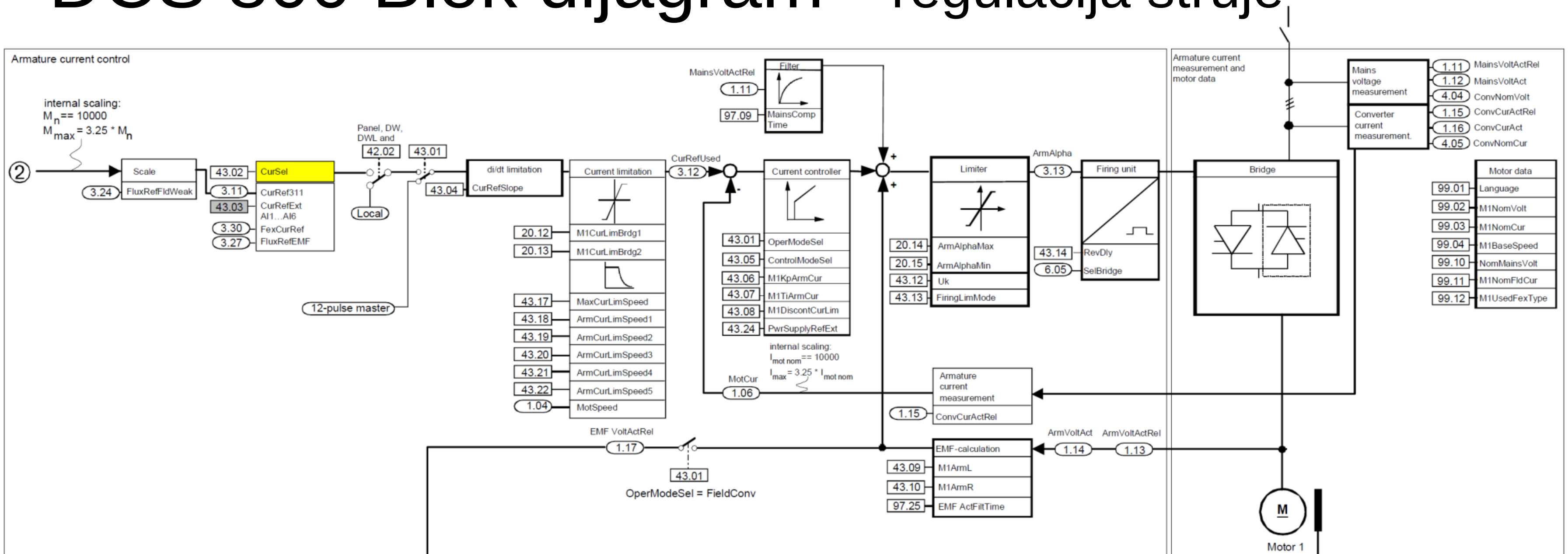
SIMOREG struktura (energetski deo)



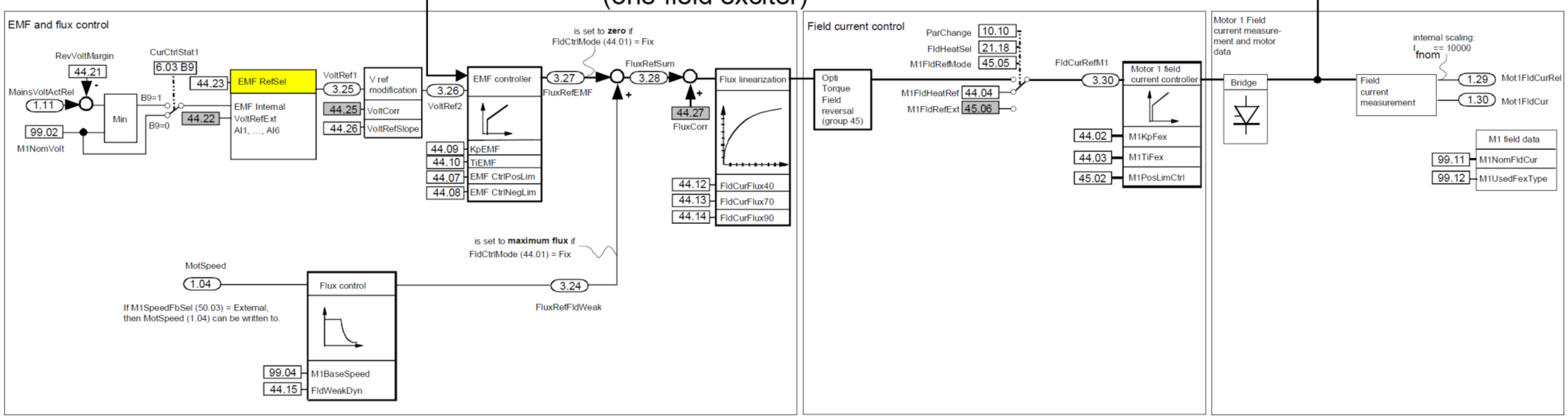
SIMOREG blok dijagram



DCS 800 Blok dijagram – regulacija struje

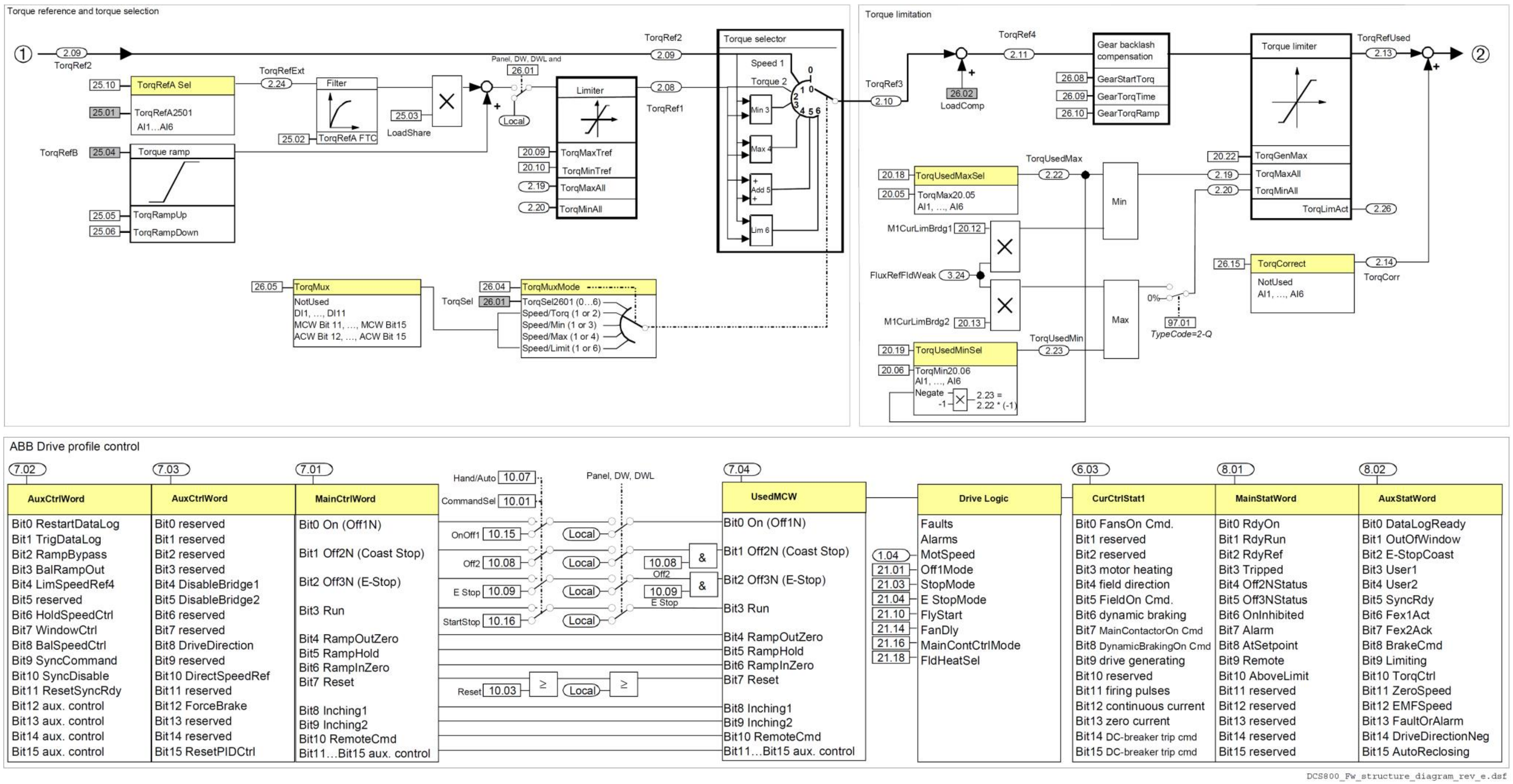


FIELD CURRENT CONTROL
(one field exciter)

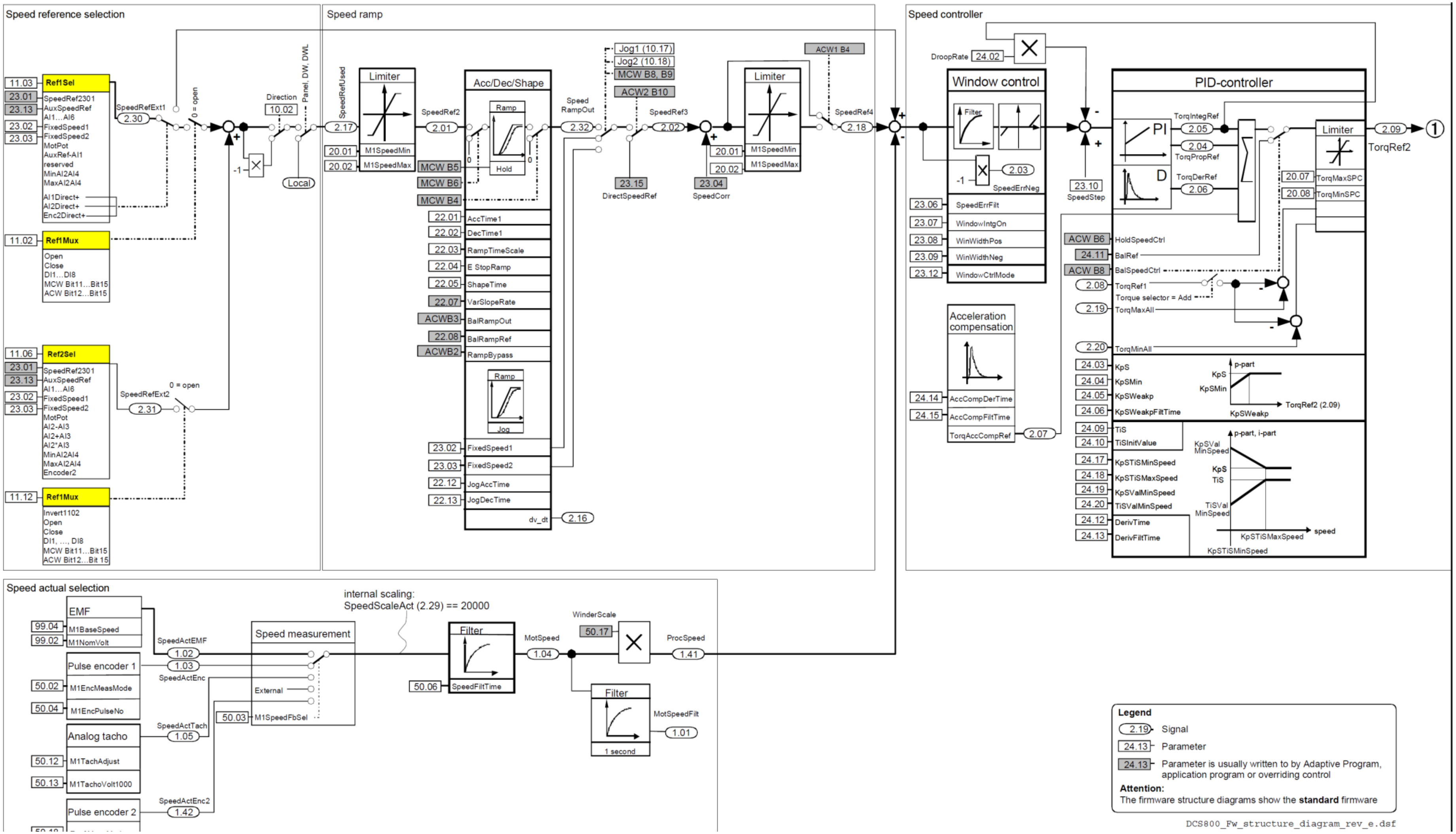


DCS800_Fw_structure_diagram_rev_e.dsf

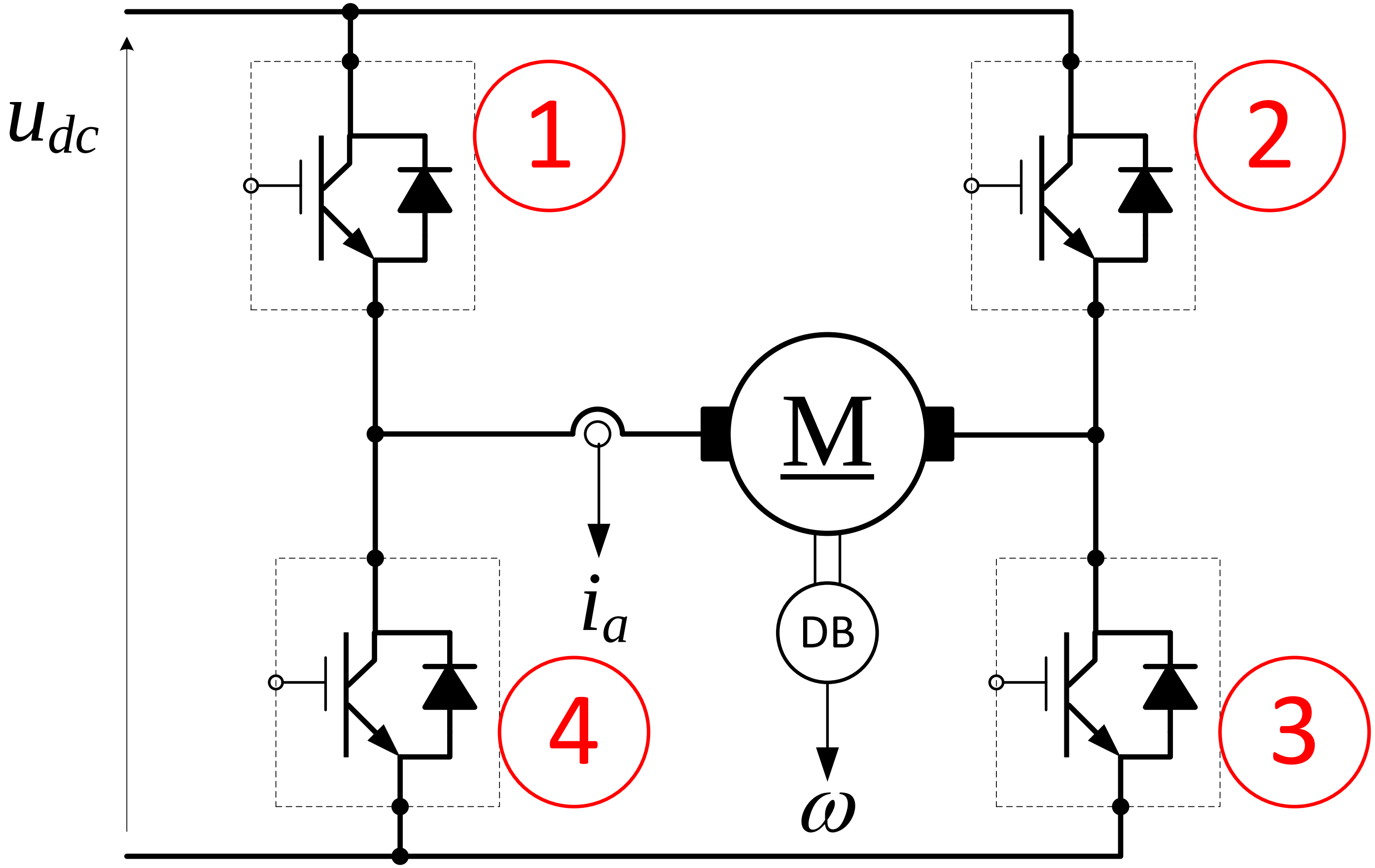
DCS 800 Blok dijagram – upravljanje momentom



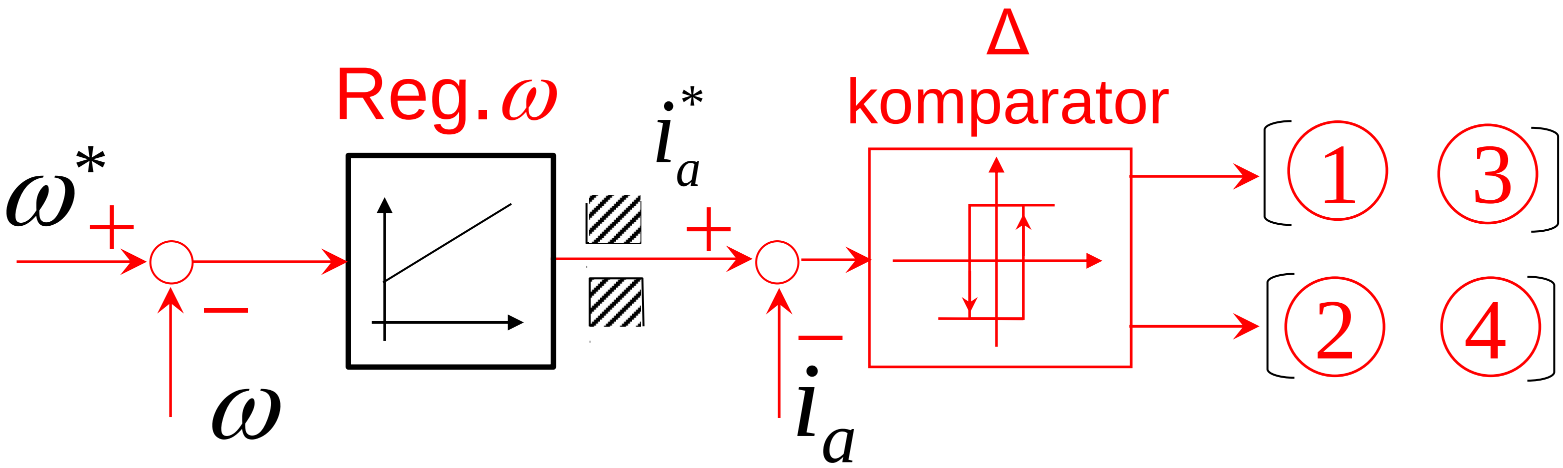
DCS 800 Blok dijagram – regulacija brzine



Četvoro-kvadrantni čoper



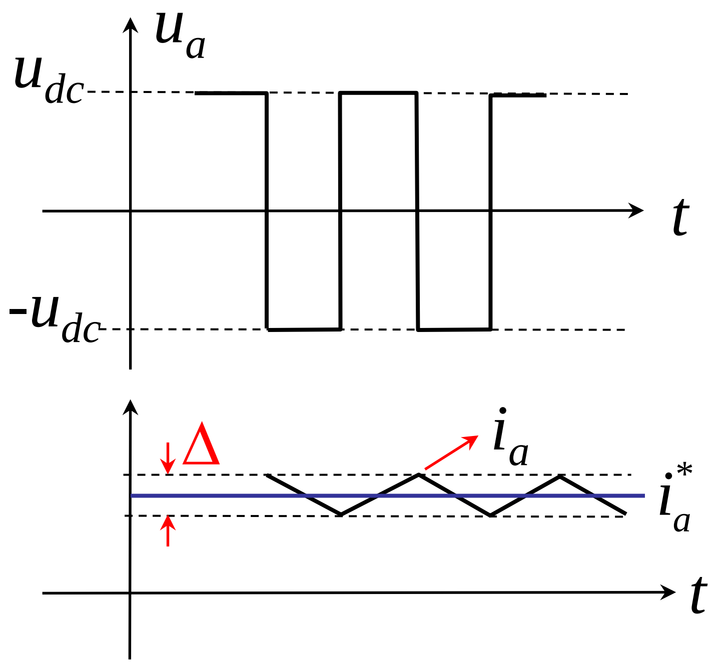
Struktura nelinearnog regulatora



Trenutne vrednosti napona

i

struje motora



Savremeni elektromotorni pogon sa motorom za jednosmernu struju napajanim iz čopera