

REMP kao sistem automatskog upravljanja (SAU i REMP)

Regulisani elektromotorni pogoni (REMP)

– Mehatronika

(Mart 2022)

Sadržaj SAU i REMP

- 1 Šta regulišemo u REMP ?**
 - 5.1 Regulacija momenta**
 - 5.2 Regulacija brzine**
 - 5.3 Regulacija položaja**
 - 5.4. Kaskadna regulacija**
- 2. Motor kao objekat upravljanja**
- 3. Linearni regulatori u REMP**
- 4. Primeri sinteze parametara linearnih regulatora pogodne i za REMP**
- 5. Prednost kaskadne regulacije u REMP**

1. Šta regulišemo u pogonima ?

Kako se reguliše momenat, kako brzina a kako položaj?

1. Regulacione petlje u pogonu

1.1 Pogon regulisan po momentu

- U neregulisanom pogonu se motor napaja bez regulacije, i moment koji EMP razvija nije regulisan,
- U regulisanom EMP želimo da promenimo radnu tačku pogona a to je jedino moguće uticajem na jednačinu kretanja:

$$m_e - m_m = J \frac{d\omega}{dt}$$

Ostaje nam da menjamo moment koji razvija motor

Momenat opterećenja ne možemo da menjamo !!!

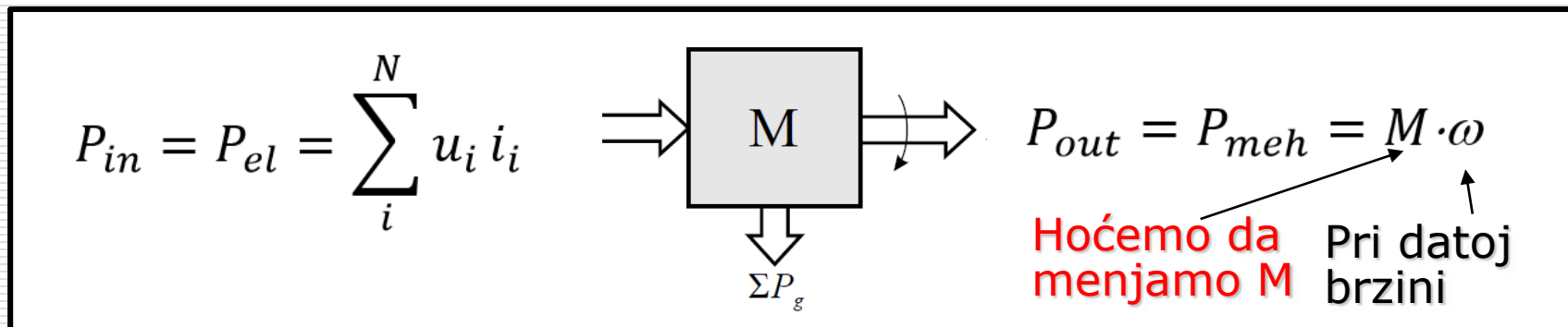
Znak promene brzine zavisi od odnosa m_e i m_m

Za REMP je idealno da motor ostvari potrebni moment tj da postane linearni konvertor momenta !!!

Da bi se to ostvarilo neophodni su adekvatni pretvarač i upravljanje za dati motor

1. Kako upravljati momentom motora ?

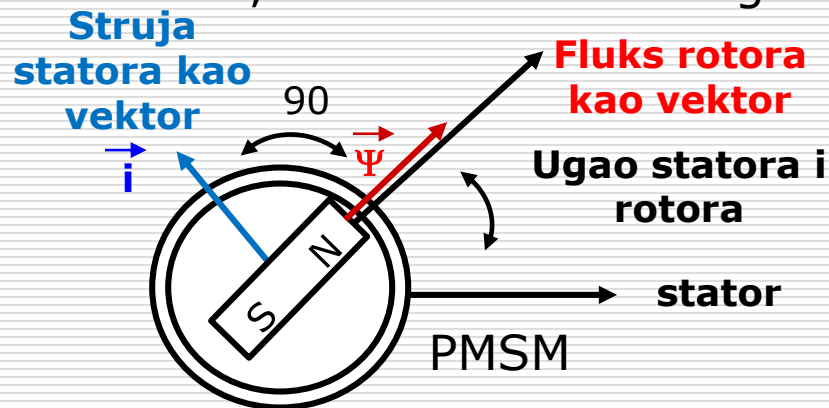
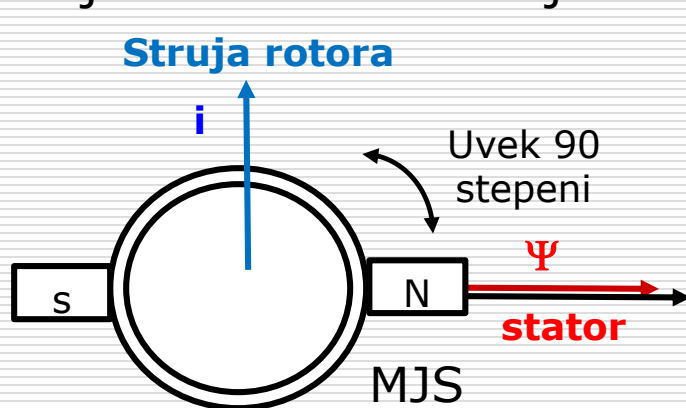
Motor konvertuje električnu snagu na ulazu u mehaničku snagu na izlazu



Pravilnim upravljanjem je moguće kontrolisati moment koji motor razvija. **Princip se razlikuje od motora do motora** ali uglavnom se svodi na kontrolu struje

$$\vec{M} = \vec{\Psi} \times \vec{i}$$

Rešenje: kontrolisati struju u odnosu na fluks, za svaki motor drugačije



1.MJS kao generator momenta

Princip nastanka momenta kod MJS je prost

- Magnet na statoru pravi polje normalno na provodnike rotora.
- Napon se dovede na provodnike rotora i uspostavi se struja u provodnicima rotora
- Na provodnik sa strujom u magnetnom kolu deluje Lorencova sila

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \rightarrow F = BIl$$

Sila na provodnik generiše momenat sile

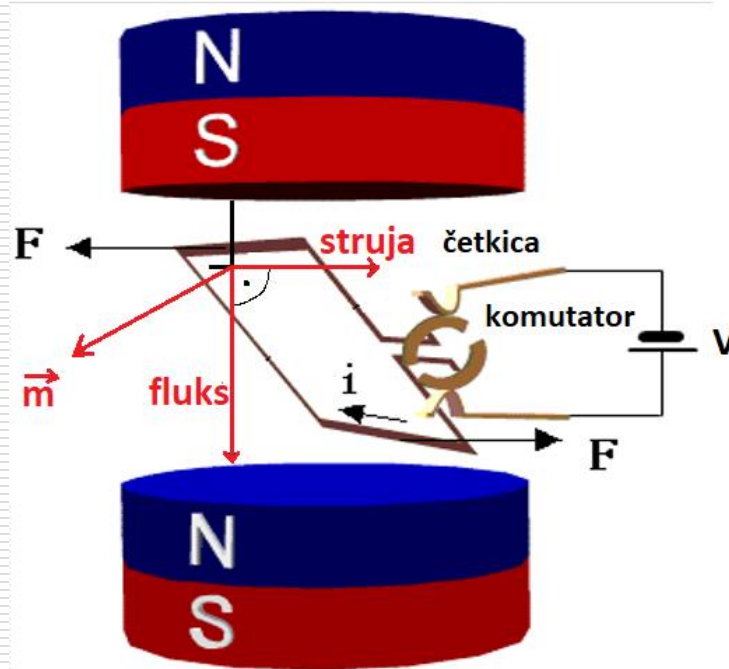
$$\vec{M} = \vec{R} \times \vec{F}$$

Momenat sile je vektorski proizvod vektora fluksa i vektora struje

$$\vec{M} = \vec{\Psi} \times \vec{i}$$

Pošto su flux (sa statora) i struja (kroz rotor) uvek normalni važi:

$$M = \Psi \cdot i \sim i$$

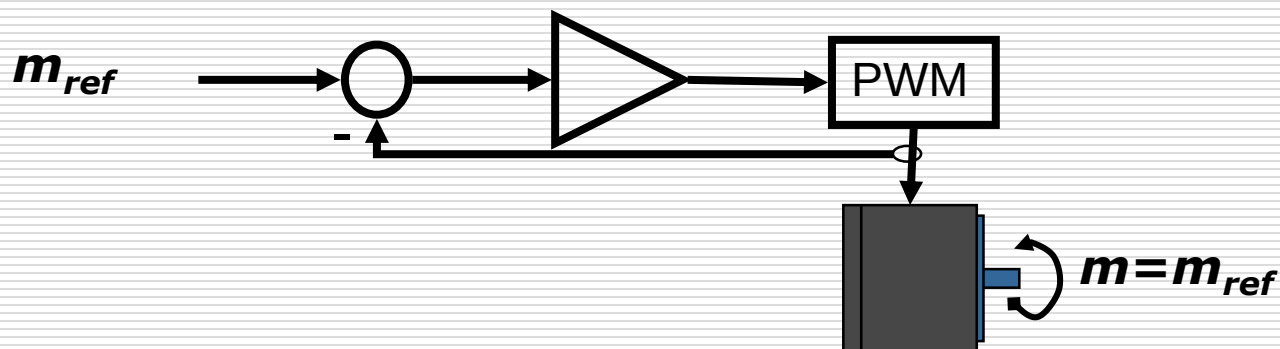


- **Fluks** već postoji (magnet) i normalan je na provodnike rotora
- **Moment**: za konst. fluks će biti proporcionalan struji rotora
- **Znači strujom pravimo moment ! A kako uspostaviti struju rotora:**
 - Nametnuti rotoru napon i čekati da se uspostavi struja
 - Nametnuti rotoru struju

1. Regulacione petlje u pogonu

5.1 Pogon regulisan po momentu

- Da bi se ostvarilo upravljanje momentom neophodni su adekvatni pretvarač i upravljanje za dati motor
- Najprostije je upravljati momentom MJS jer je moment proporcionalan struji ! $m = k i_{ref}$



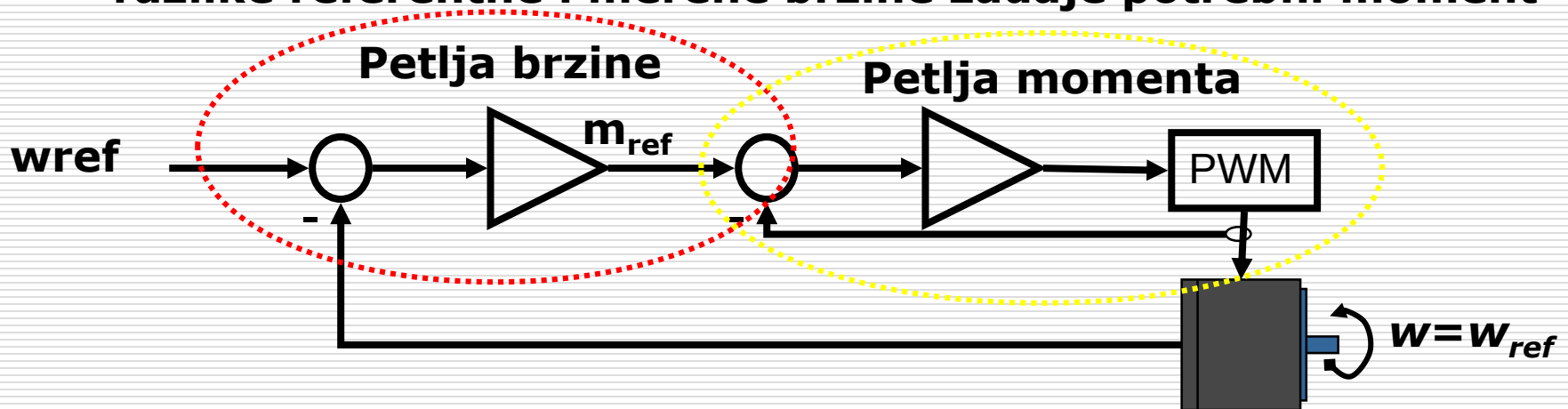
Regulaciona struktura momenta se koristi

- Kao glavna u pogonima regulisanim po momentu
- Kao podređena u pogonima regulisanim po brzini i položaju

1. Regulacione petlje u pogonu

5.2 Pogon regulisan po brzini

- Pogon regulisan po brzini ima zadatak da ostvari zadati referentu brzinu
- Da bi to ostvari dodaje se regulator brzine koji na osnovu razlike referentne i merene brzine zadaje potrebnii moment



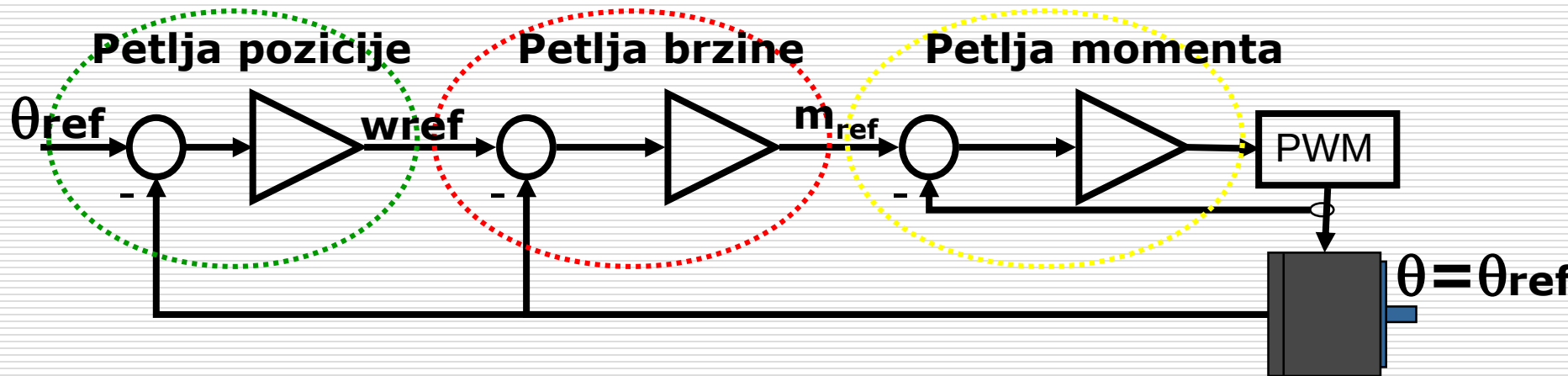
- Na osnovu Newton-ove jednačine kretanja je jasno da se samo upravljanjem momentom može izregulisati brzina

$$m - m_{opt} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

1. Regulacione petlje u pogonu

5.3 Pogon regulisan po položaju

- Pogon regulisan po položaju ima zadatak da rotor dovede u željeni (referentni) položaj
- Da bi to ostvario dodaje se regulator položaja koji na osnovu razlike referentne i merene brzine zadaje potrebnu brzinu,

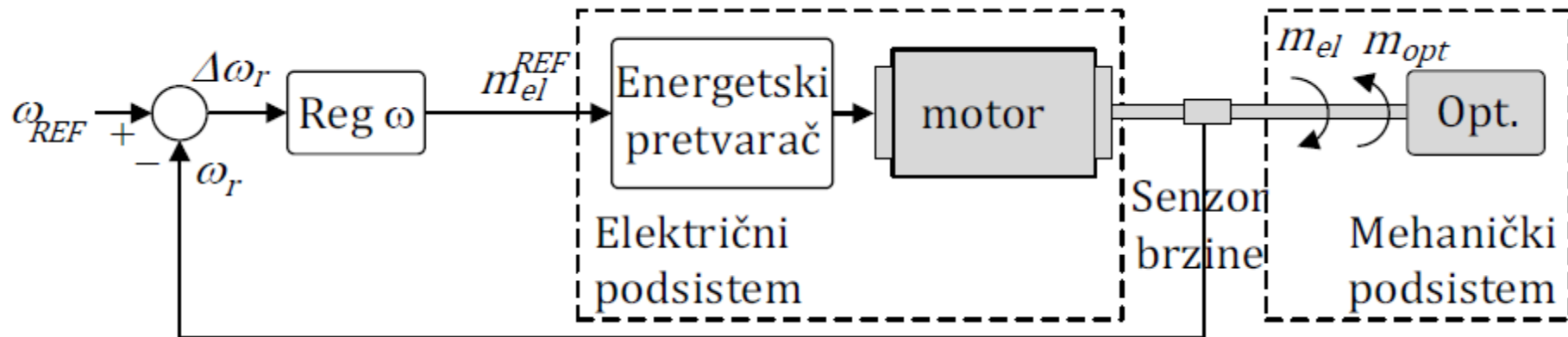


Pošto je položaj integral brzine jasno je da se u novi položaj može doći upravljanjem brzinom motora $\theta = \int \omega dt$

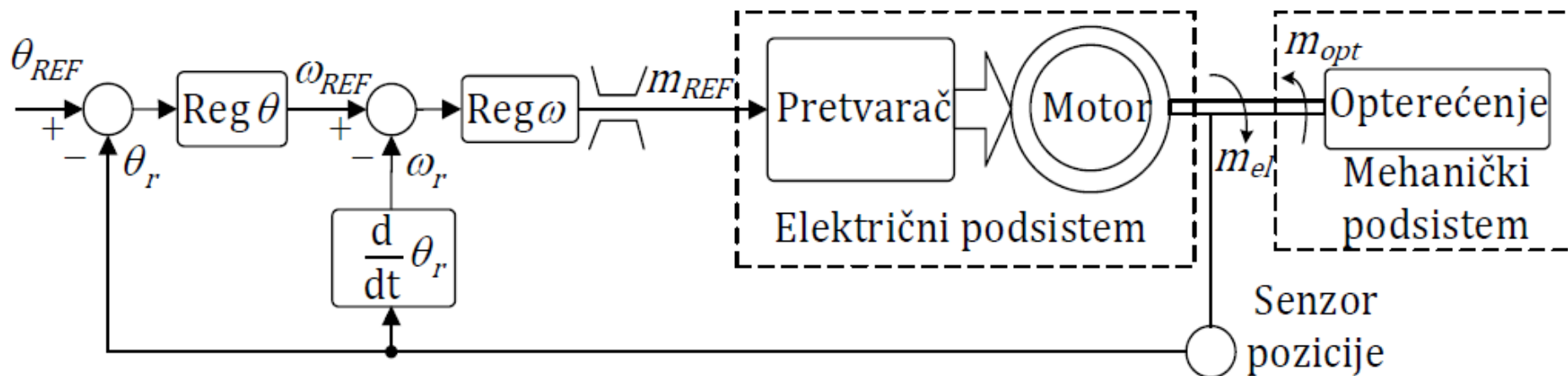
U ovom pogonu sve reg. petlje moraju da rade. Poziciona menja ref. Brzinu, ona se ostvaruje akcijom reg. brzine koji menja ref. moment. Taj moment se mora ostvari.

1. Regulacione petlje u pogonu

Blok šema pogona regulisanog po brzini



Blok šema pogona regulisanog po položaju

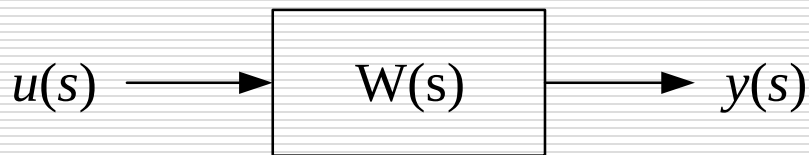


2. Motor kao objekat upravljanja

2. Model objekta upravljanja u s-domenu

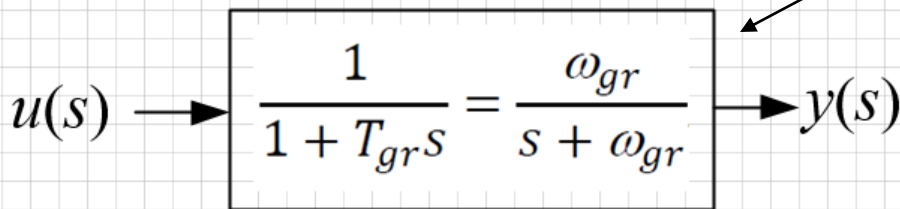
Analiza odziva objekta (oblik signala koji se dobije na izlazu) na razne oblike ulaznih signala i na eventualne poremećaje (ako ih objekat ima) se najčešće vrši u kompleksnom domenu.

Objekat ima svoju funkciju prenosa $W(s)$

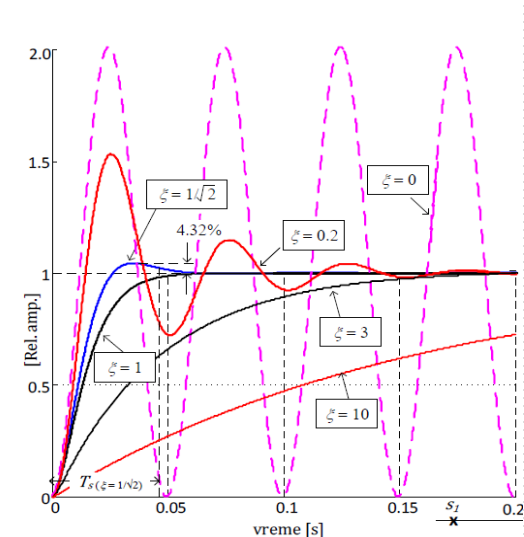
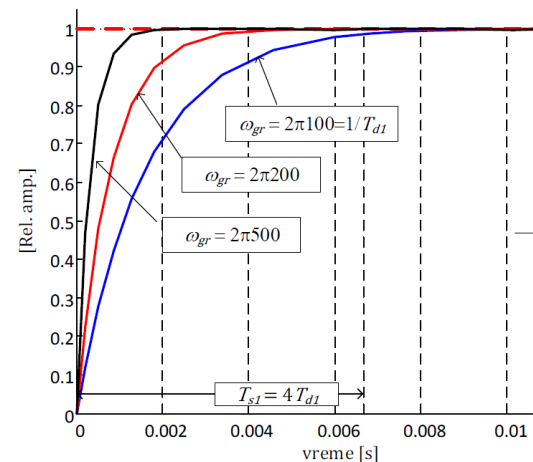
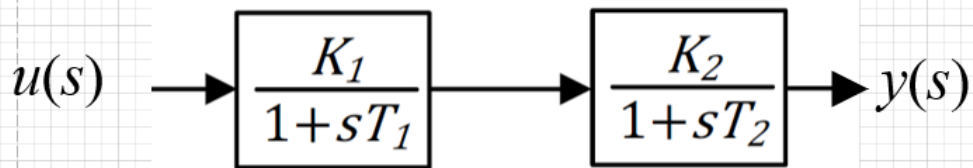


U zavisnosti od funkcije prenosa, broja/mesta polova i nula, objekat ima drugačije odzive, slede primeri za step pobudu:

Objekat I reda



Objekat II reda



2. Model objekta upravljanja u s-domenu

Objekat I reda (jedan pol)

$$u(s) \rightarrow \frac{1}{1 + T_{gr}s} = \frac{\omega_{gr}}{s + \omega_{gr}} \rightarrow y(s)$$

Ovaj objekat ne osciluje, ima aperiodičan odziv, zašto?

Objekat ima funkciju prenosa sa jednim polom

$$G(s) = \frac{a}{s + a}$$

i njegov odziv na step ponudu

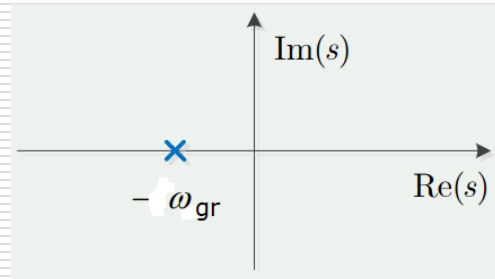
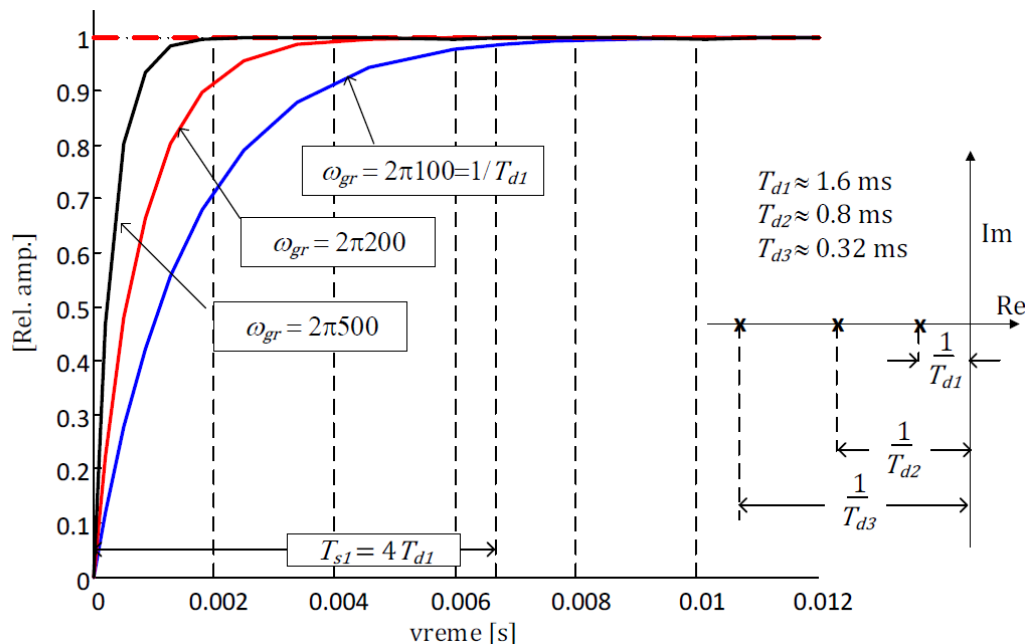
$$y(s) = \frac{1}{s} \frac{a}{as + 1} = \frac{1}{s} - \frac{a}{s + a}$$

u vremenskom domenu odziv glasi

$$y(t) = 1 - e^{-at} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$$

τ vremenska konstanta sistema

$$\tau = 1/\omega_{gr} \quad (\text{obrnuto proporcionalna wgr})$$



Što je pol bliži koordinatnom početku odziv je sporiji

2. Model objekta upravljanja u s-domenu

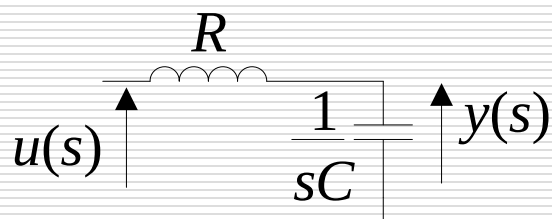
Objekat I reda (jedan pol)

$$u(s) \rightarrow \boxed{\frac{1}{1 + T_{gr}s} = \frac{\omega_{gr}}{s + \omega_{gr}}} \rightarrow y(s)$$

Ovaj objekat ne osciluje, ima aperiodičan odziv

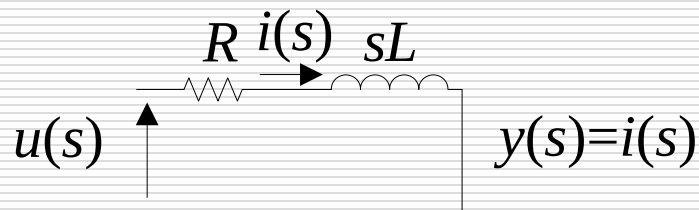
Dva primera objekta I reda

RC kolo

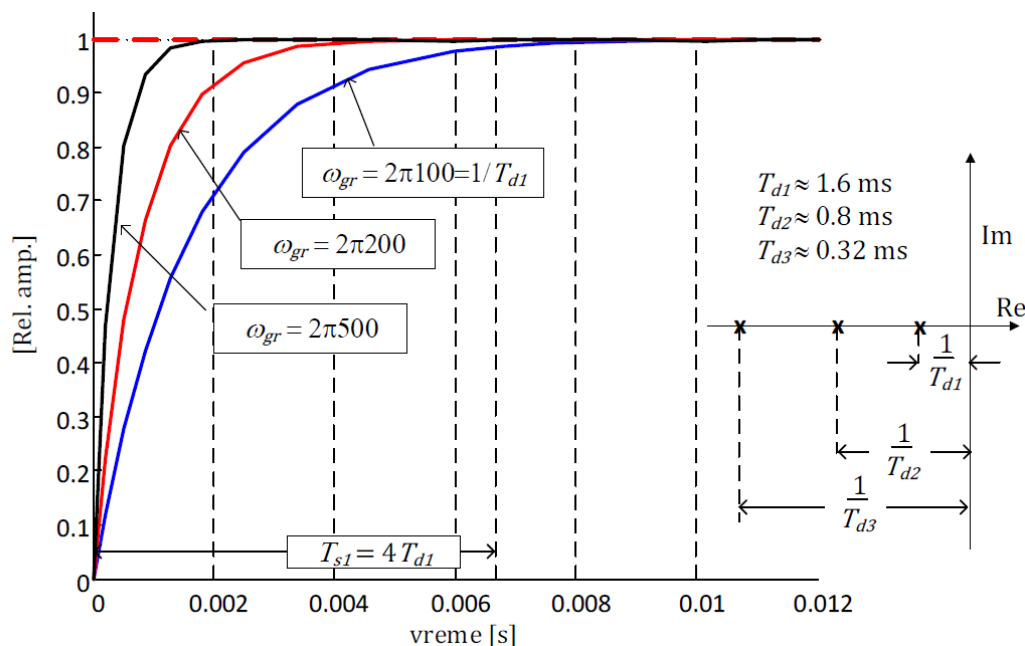


$$y = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} u \rightarrow W_{LC}(s) = \frac{1}{1 + sCR} = \frac{\omega_{gr}}{s + \omega_{gr}} \quad \omega_{gr} = 1/CR$$

RL kolo



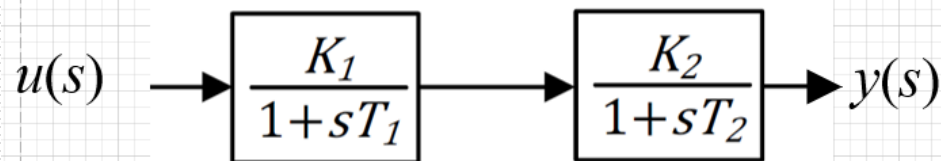
$$y = \frac{u}{R + sL} \rightarrow W_{LC}(s) = \frac{1}{R} \frac{1}{1 + sL/R} = \frac{\omega_{gr}}{s + \omega_{gr}} \quad \omega_{gr} = R/L$$



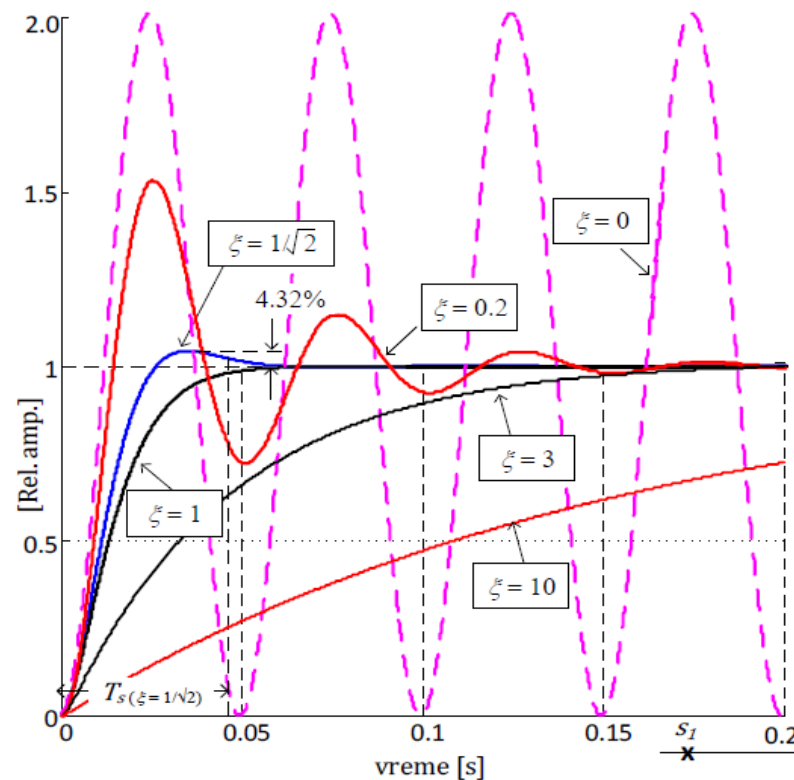
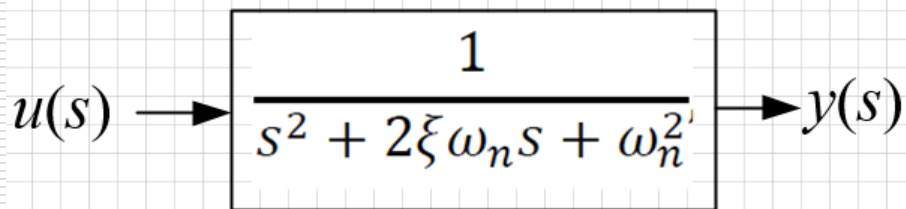
2. Model objekta upravljanja u s-domenu

Objekat II reda

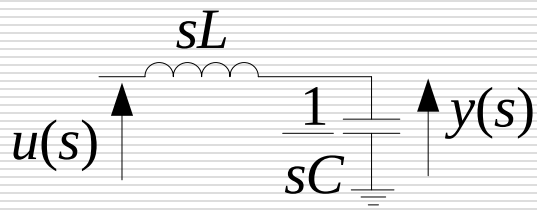
Npr, objekat sa dva pola:



U teoriji automatskog upravljanja kolo II reda se opisuje sa prirodnim učestanošću i faktorom prigušenja



Primer LC kolo



$$y = \frac{\frac{1}{sC}}{\frac{1}{sC} + sL} u \rightarrow W_{LC}(s) = \frac{1}{1 + s^2 LC}$$

$$\omega_n = \sqrt{LC} \quad \xi = 0$$

**LC kolo osciluje !!!
C i L razmenjuju energiju
R donosi prigušenje**

2. Model objekta upravljanja u s-domenu

U teoriji automatskog upravljanja kolo

II reda se opisuje sa

1. prirodnom učestanošću ω_n

2. faktorom prigušenja ξ

Polovi:

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}$$

$$\xi \geq 1$$

Realni polovi

$$\xi = 1$$

Dva ista realna pola

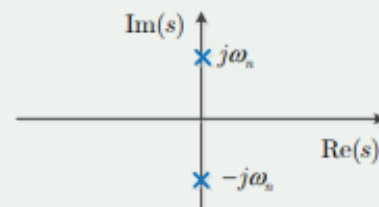
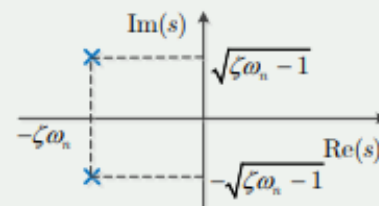
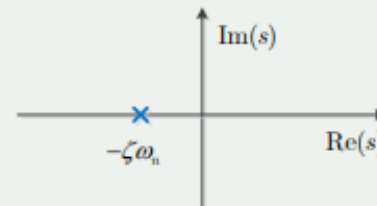
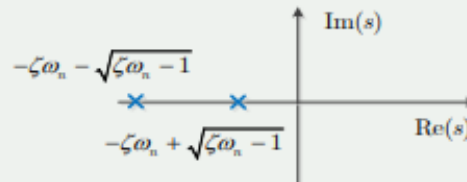
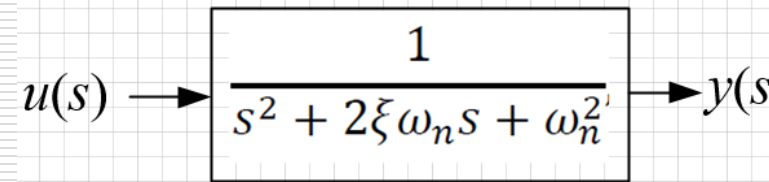
$$\xi < 1$$

Konj. kompleksni par polova i prigušen odziv

$$s_{1,2} = -\sigma \pm j\omega = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$$

$$\xi = 0$$

Konj. kompleksni par polova na Im osi, nema prigušenja



$$\xi > 1$$



$$\xi = 1$$



$$0 < \xi < 1$$

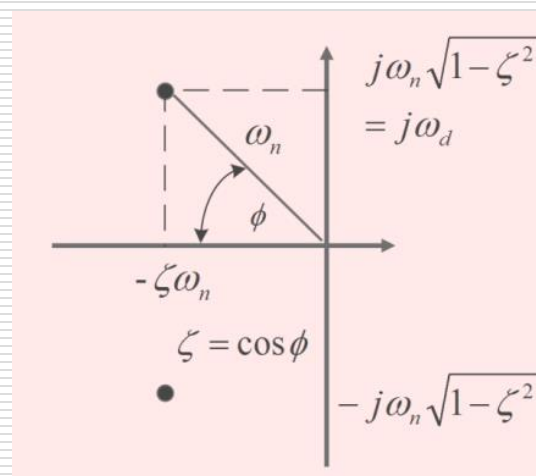


$$\xi = 0$$

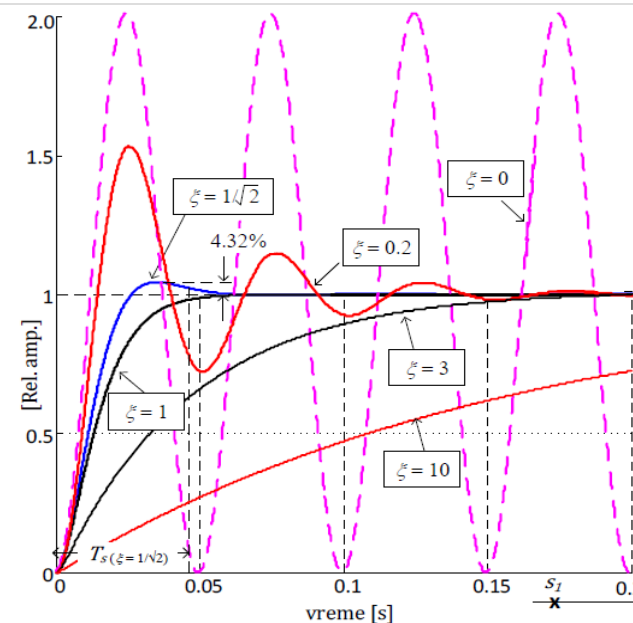
2. Model objekta upravljanja u s-domenu

Objekat II reda

$$u(s) \rightarrow \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \rightarrow y(s)$$



Položaj polova



Prinudni i prirodni odziv

$$y(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left(\cos \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t \right)$$

Prinudni odziv

$$= 1 + \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \cos \left(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t - \phi \right).$$

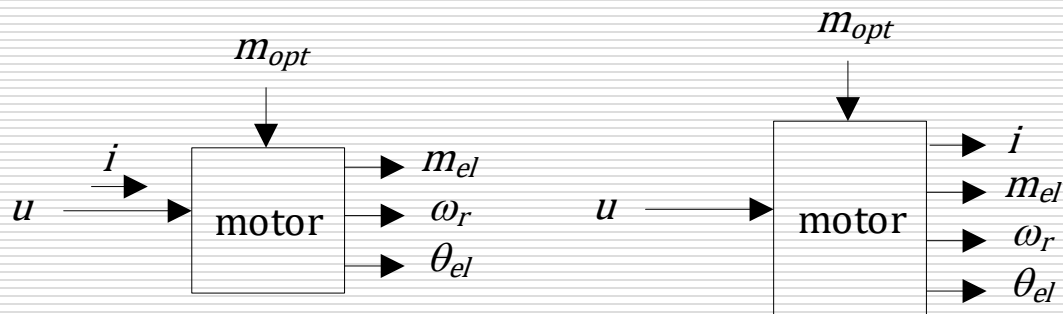
2. El. motor kao objekat upravljanja

Nadamo se da u ovom trenutku znate konstrukciju motora, princip rada ... Ali, za REMP nam je najvažnije da razumemo kako upravljati motorom tako da od njega dobijemo ono što nam treba, potreban moment na vratilu, željena brzinu ili položaj vratila.

Ukratko, motoru nametnemo neki napon, na osnovu tog napona pojavi se struja motora, na osnovu te struje motor generiše neki moment, na osnovu koga se razvija brzina i menja položaj vratila.

Za dublje razumevanje rada motora mora se znati šta je unutra, koje jednačine opisuju procese, konačno koji je model motora?

- Modelu motora napon je ulaz.
- Struja motora se tretira kao izlaz modela, nju model računa.
- Logično, izlazi modela su i ostvarena brzina i položaj.



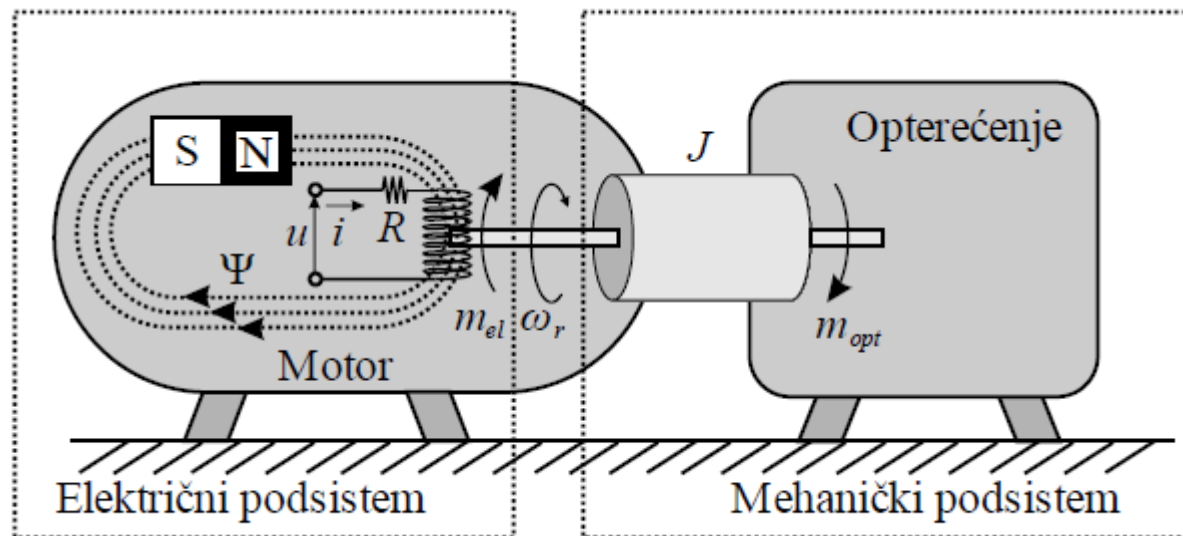
Trebaju nam jednačine koje opisuju procese u motoru !!!

2. El. motor kao objekat upravljanja

Svaki električni motor ima dva jasno razdvojena podsistema:

Električni podsistem obuhvata izvor električne energije i proces generisanja elektromagnetnog momenta m_{el} u motoru, sa ciljem elektromehaničkog pretvaranja (konverzije) energije iz električnog u mehanički oblik, ili obrnuto, posredstvom elektromagnetnog polja.

Mehanički podsistem obuhvata mehaničke procese u kojima se suprotstavljaju generisani moment motora, i moment potreban opterećenju m_{opt} , čiji odnos definiše procese uspostavljanja i promene brzine i položaja vratila.



2. El. motor kao objekat upravljanja

Električni podsistem

Ekvivalentni namotaj motora se napaja naponom $u(t)$ iz pogonskog pretvarača, i u njemu se uspostavlja struja $i(t)$ sa dinamikom opisanom jednačinom naponske ravnoteže

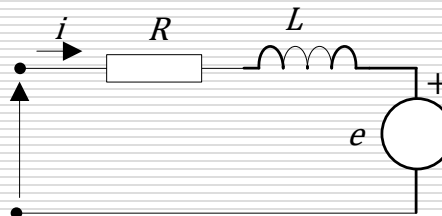
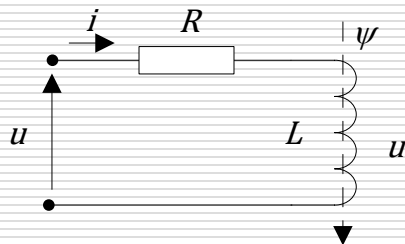
$$u(t) = R \cdot i(t) + \frac{d\Psi(t)}{dt} = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e(t).$$

gde su $u(t)$, $i(t)$ i $\Psi(t)$ trenutne vrednosti napona, struje i fluksnog obuhvata namotaja.

Indukovana elektromotorna sila je uvek proporcionalna brzini i amplitudi fluksa,

$$e(t) \sim \omega_r \cdot \Psi$$

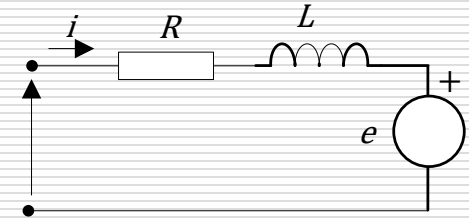
Električni podsistem motora može se posmatrati kao redno kolo otpornika, induktivnosti i elektromotorne sile (redno RLE kolo).



2. El. motor kao objekat upravljanja

Električni podsistem

$$u(t) = R \cdot i(t) + \frac{d\Psi(t)}{dt} = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e(t)$$



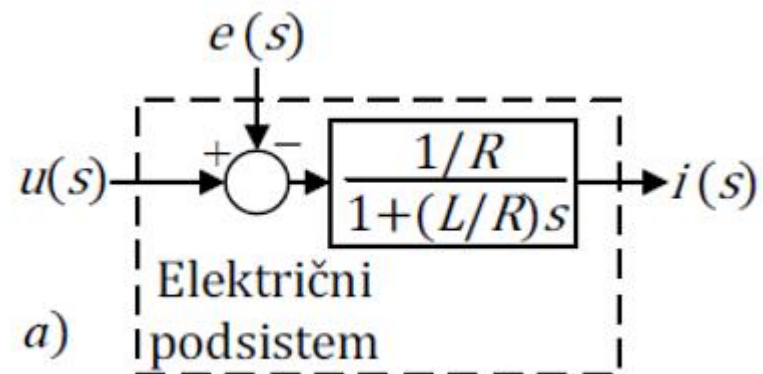
Analiza kola u s-domenu

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + e(t) \xrightarrow{\text{prelazak u s domen}}$$

$$i(s) = \frac{1/R}{1 + (L/R)s} u(s) - \frac{1/R}{1 + (L/R)s} e(s),$$

Gde god vidiš d/dt ,
ti operator s posadi !

Model električnog dela
(sistem prvog reda)



2. El. motor kao objekat upravljanja

Mehanički podsistem REMP

je identičan za sve vrste pogona i opisuje se Njutnovom jednačinom

$$J \frac{d\omega_r(t)}{dt} = m_{el}(t) - (m_{opt}(t) + k_f \omega_r(t))$$

Prelazak u s -domen:

$$J \frac{d\omega_r(t)}{dt} = m_{el}(t) - (m_{opt}(t) + k_f \omega_r(t)) \xrightarrow{\text{prelazak u s domen}}$$

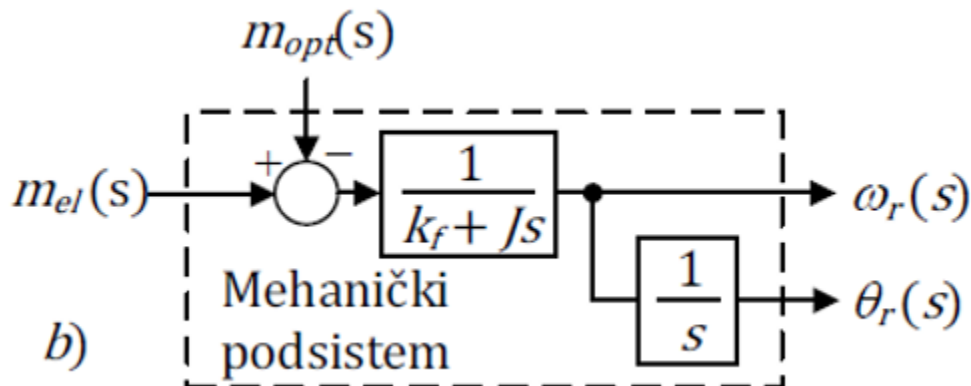
A položaj je integral brzine

$$\omega_r(s) = \frac{1/k_f}{1 + (J/k_f)s} m_{el}(s) - \frac{1/k_f}{1 + (J/k_f)s} m_{opt}(s),$$

$$\theta_r(s) = \frac{1}{s} \omega_r(s)$$

Model mehaničkog dela
(sistem prvog reda)

Opterećenja kao
poremećaj!



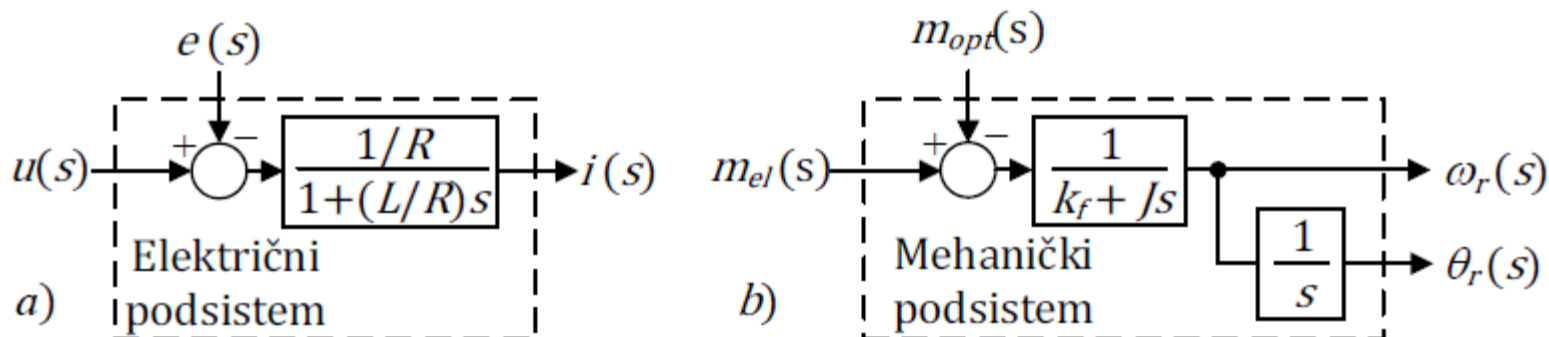
2. El. motor kao objekat upravljanja

Funkcije prenosa električnog i mehaničkog podsistema motora se u dovoljno dobroj aproksimaciji mogu opisati kao kola prvog reda

$$G_{el}(s) = \frac{K_1}{1 + sT_1}, \quad G_m(s) = \frac{K_2}{1 + sT_2}, \quad (1.32)$$

gde su $K_1 = 1/R$ i $K_2 = 1/k_f$ pojačanja električnog i mehaničkog podsistema, a $T_1 = L/R$ i $T_2 = J/k_f$ odgovarajuće vremenske konstante, pri čemu je tipično $T_2 \gg T_1$. Funkcija prenosa od brzine do položaja (1.29) je jednostavan integrator, koji treba dodati u model kada se posmatra funkcija prenosa mehaničkog podsistema sa položajem kao izlazom,

$$G_\theta(s) = \frac{1}{s}. \quad (1.33)$$



Sl. 1.20. Funkcije prenosa u REMP-u: a) struje, b) brzine i položaja

Znači motor je sistem II reda sa dva spregnuta kola I reda !!!!!

2. El. motor kao objekat upravljanja

Funkcije prenosa električnog i mehaničkog podsistema motora se u dovoljno dobroj aproksimaciji mogu opisati kao kola prvog reda

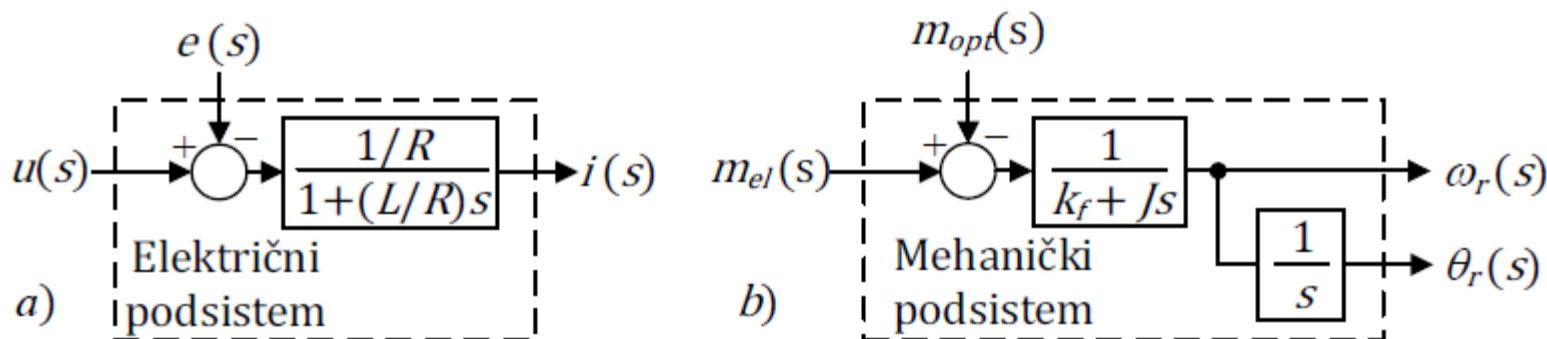
Električni i mehanički podsistemi motora su spregnuti na dva načina

1. Moment koji je ulaz mehaničkog podsistema zavisi od struje koja je izlaz električnog

$$m_{el} = \Psi \cdot i$$

2. Elektromotorna sila kao poremećaj u električnom podsistemu zavisi od brzine koja je izlaz mehaničkog dela

$$e(t) \sim \omega_r \cdot \Psi$$



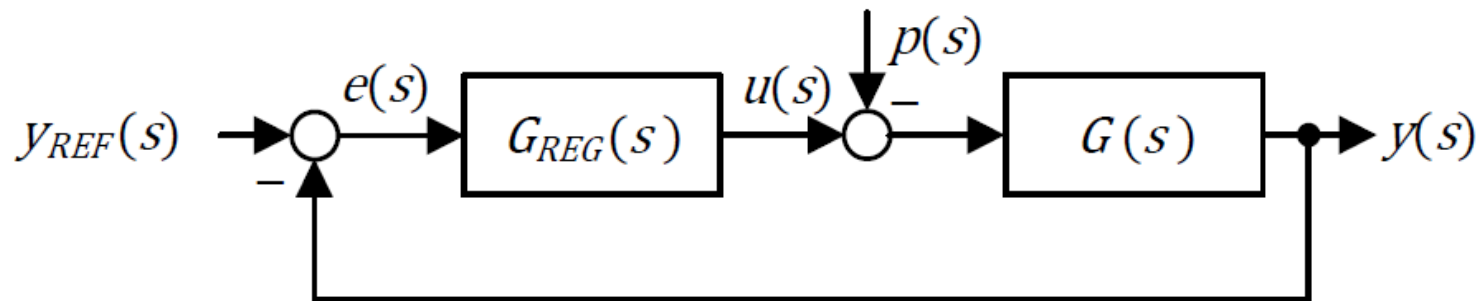
Sl. 1.20. Funkcije prenosa u REMP-u: a) struje, b) brzine i položaja

3. Linearni regulatori u REMP

3.1. Sistem automatskog upravljanja

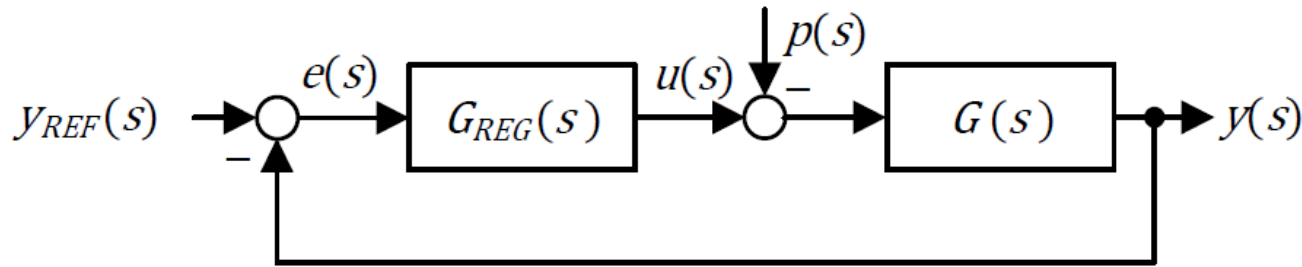
Nadamo se da u ovom trenutku poznajete SAU, ali evo kratko ponavljanje o SAU, regulatorima ...

Tipična struktura SAU sa jediničnom negativnom povratnom spregom je data na Sl. 1.21 i sastoji se od objekta upravljanja $G(s)$, Sl. 1.20, sa objedinjenom povratnom granom za merenje izlaznog signala $y(s)$, diskriminatorom signala greške $e(s)$ i upravljačkog sklopa sa regulatorom, $G_{REG}(s)$. Referentni signal $y_{REF}(s)$ se poredi sa izlazom $y(s)$, i generiše signal greške $e(s)$ koji se uvodi u regulator sa funkcijom prenosa $G_{REG}(s)$. Zadatak regulatora je da generiše upravljački signal $u(s)$ sa ciljem da izlazni signal $y(s)$ nakon prelaznih procesa, nezavisno od signala poremećaja $p(s)$, bude jednak referentnom $y_{REF}(s)$.



Sl. 1.21. Blok dijagram tipičnog SAU u zatvorenoj sprezi

3.1. Sistem automatskog upravljanja



$$e(s) = y_{REF}(s) - y(s), \quad y(s) = G(s)(u(s) - p(s)).$$

Funkcija povratnog (tzv. otvorenog) prenosa kojom se greška vodi na izlaz glasi

$$W_o(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = G_{REG}(s)G(s).$$

Funkcija spregnutog prenosa koja daje vezu izlaza i reference u sistemu sa negativnom jediničnom povratnom vezom glasi

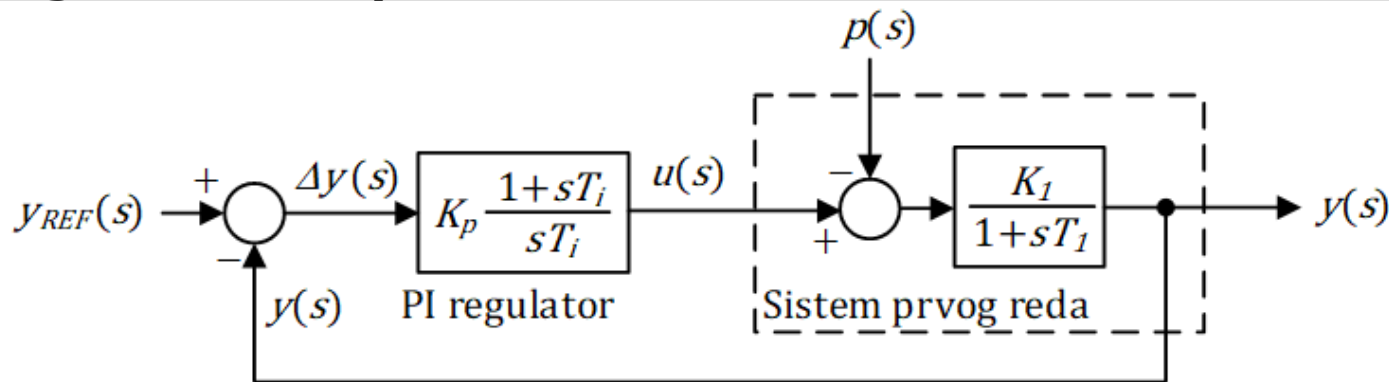
$$W_s(s) = \frac{y(s)}{y_{REF}(s)} = \frac{W_o(s)}{1 + W_o(s)} = \frac{G_{REG}(s)G(s)}{1 + G_{REG}(s)G(s)}.$$

3.4. Odabir tipa regulatora – PI tip

Ako se za regulaciju struje i brzine , čiji se objekti opisuju sa

$$i(s) = \frac{1/R}{1 + (L/R)s} u(s) - \frac{1/R}{1 + (L/R)s} e(s) \quad \omega_r(s) = \frac{1/k_f}{1 + (J/k_f)s} m_{el}(s) - \frac{1/k_f}{1 + (J/k_f)s} m_{opt}(s)$$

koristi **regulator PI tipa**



Sa proporcionalno integralnom akcijama

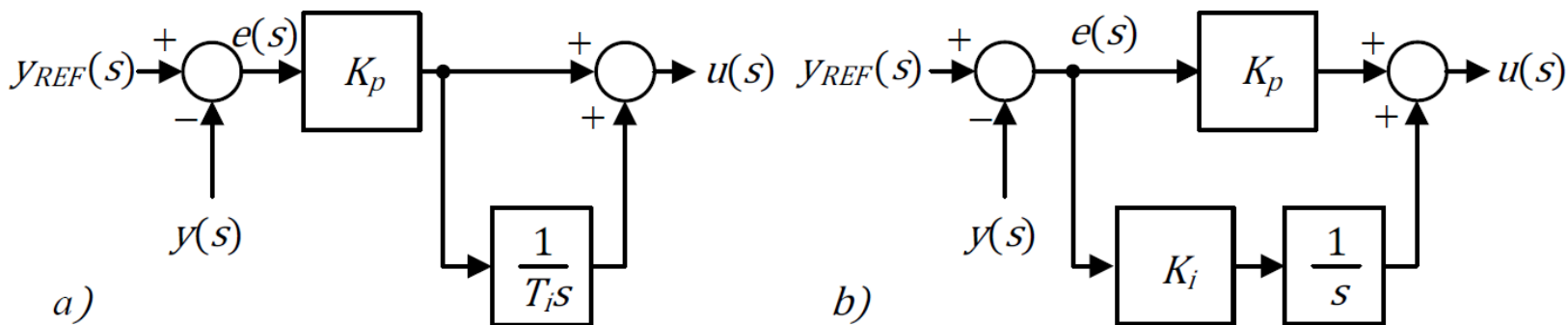
$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

I funkcijom prenosa

$$G_{PI_REG}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} = K_p + K_i \frac{1}{s}$$

3.4. Odabir tipa regulatora – PI tip

Blok dijagram PI regulatora sa parametrima K_p i T_i dat je na Sl. 1.22 (a), a sa pojačanjima K_p i K_i na Sl. 1.22 (b).



Sl. 1.22. Blok dijagram PI regulatora: a) parametri K_p , T_i , b) pojačanja K_p , K_i

Funkcija spregnutog prenosa sistema tipa filtra prvog reda sa PI regulatorom i njen moduo u stacionarnom stanju iznose, respektivno:

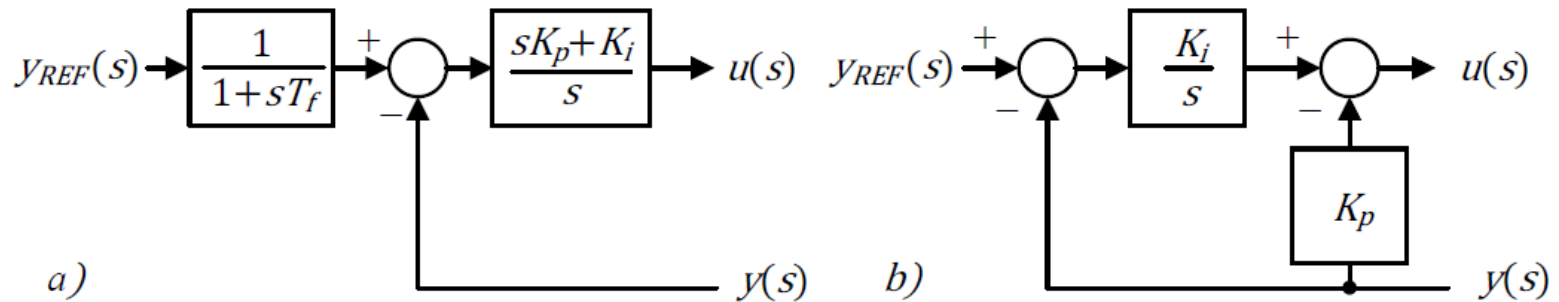
$$W_s(s) = \frac{G_{PI_REG}(s)G(s)}{1 + G_{PI_REG}(s)G(s)} = \frac{K_p K_0 (1 + T_i s)}{T_i T_0 s^2 + (1 + K_p K_0) T_i s + K_p K_0},$$

$$W_s(t \rightarrow \infty) = \lim_{s \rightarrow 0} W_s(s) = \frac{K_p K_0}{K_p K_0} = 1, \quad e(t \rightarrow \infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot e(s) = 0$$

Greške nema, izlaz će u stacionarnom stanju biti jednak referenci, a pravilnim izborom K_p i K_i mogu da se eliminišu oscilacije !!!

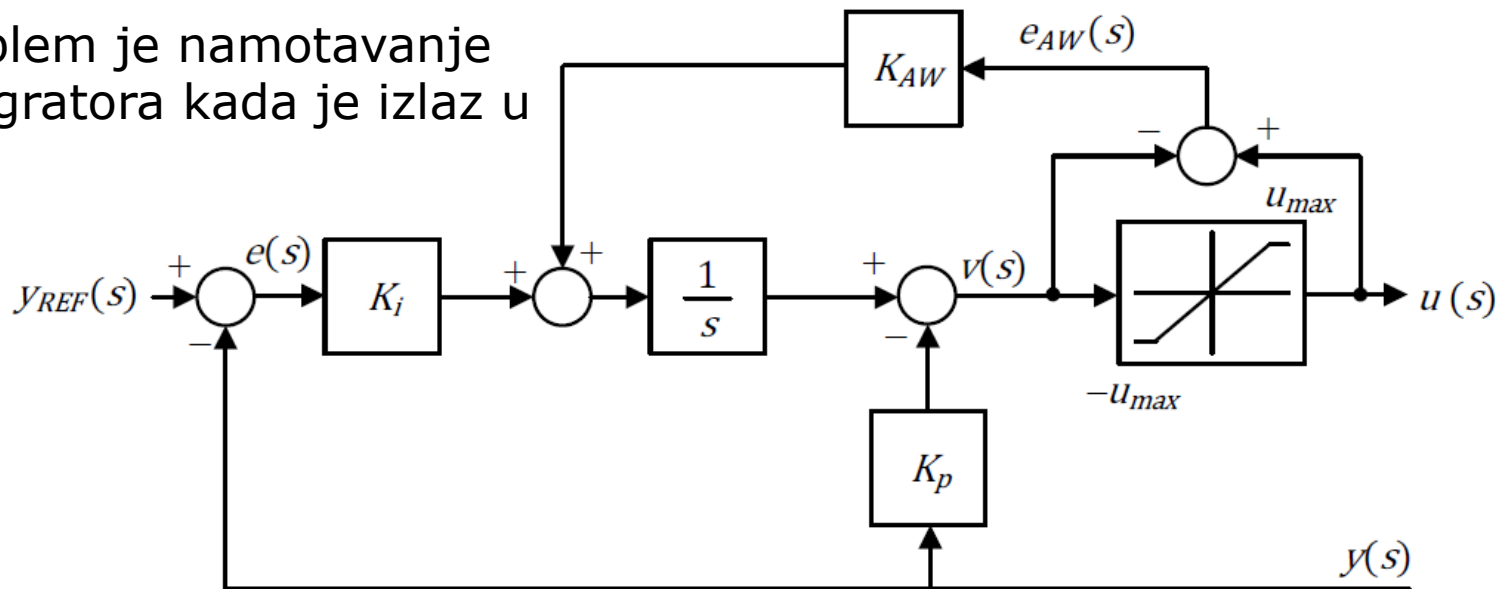
3.5. Modifikavani PI regulator za REMP

Prvi problem PI regulatora je pojava preskoka za K_p u direktnoj grani



Sl. 1.23. Eliminisanje preskoka: a) dodavanje predfiltra, b) izmeštanje K_p u povratnu granu

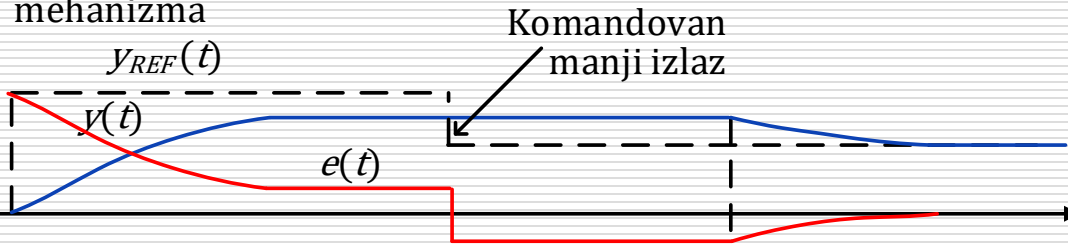
Drugi problem je namotavanje sume integratora kada je izlaz u limitu.



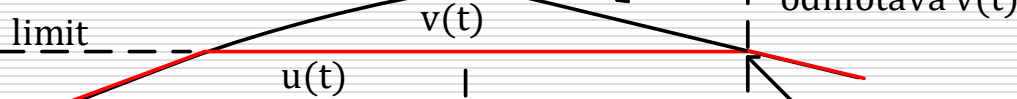
Sl. 1.24. Modifikovani PI regulator sa anti-wind-up strukturom i proporcionalnim dejstvom u

3.5. Modifikavani PI regulator za REMP

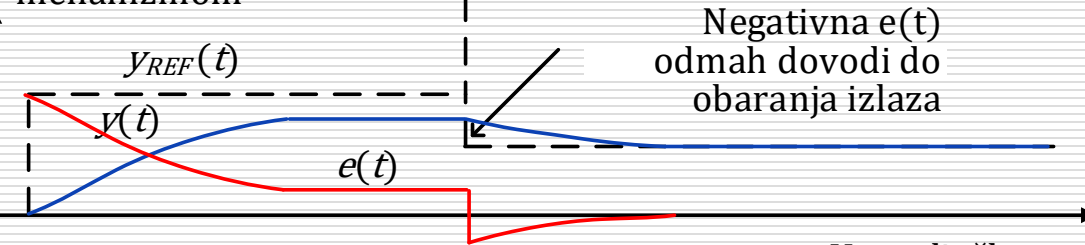
PI bez AW mehanizma



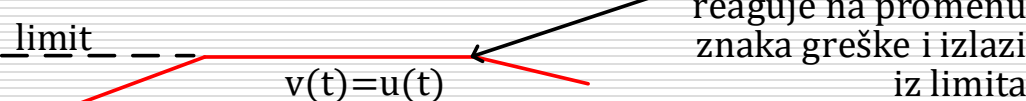
Upravljačka veličina



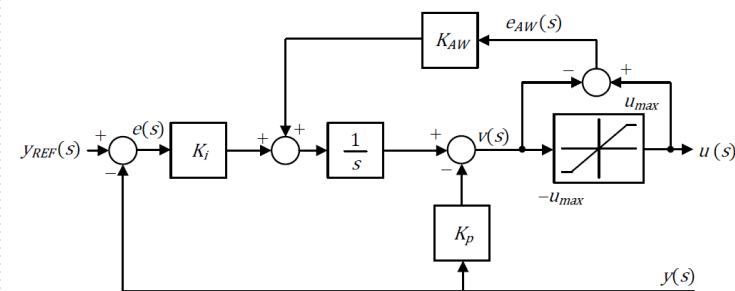
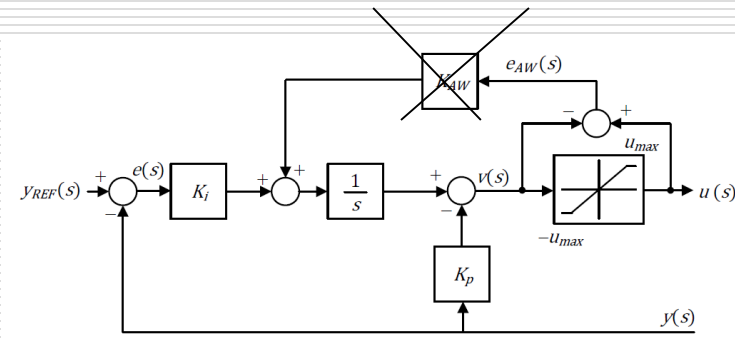
PI sa AW mehanizmom



Upravljačka veličina



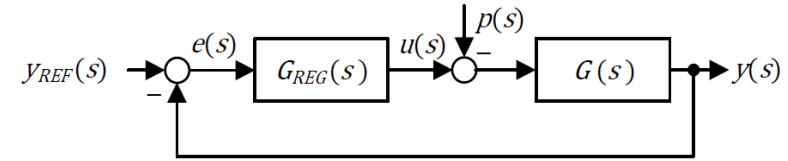
Tek sad izlaz počinje da se spušta



4. Primeri sinteze parametara linearnih regulatora pogodnih za REMP

4.1. Šta je cilj sinteze parametara PI reg.

Cilj je da se dobije željeni odziv, $y(t)$, kako u stacionarnom stanju, tako i u prelaznom režimu



U stac. stanju želimo izlaz jednak ref.

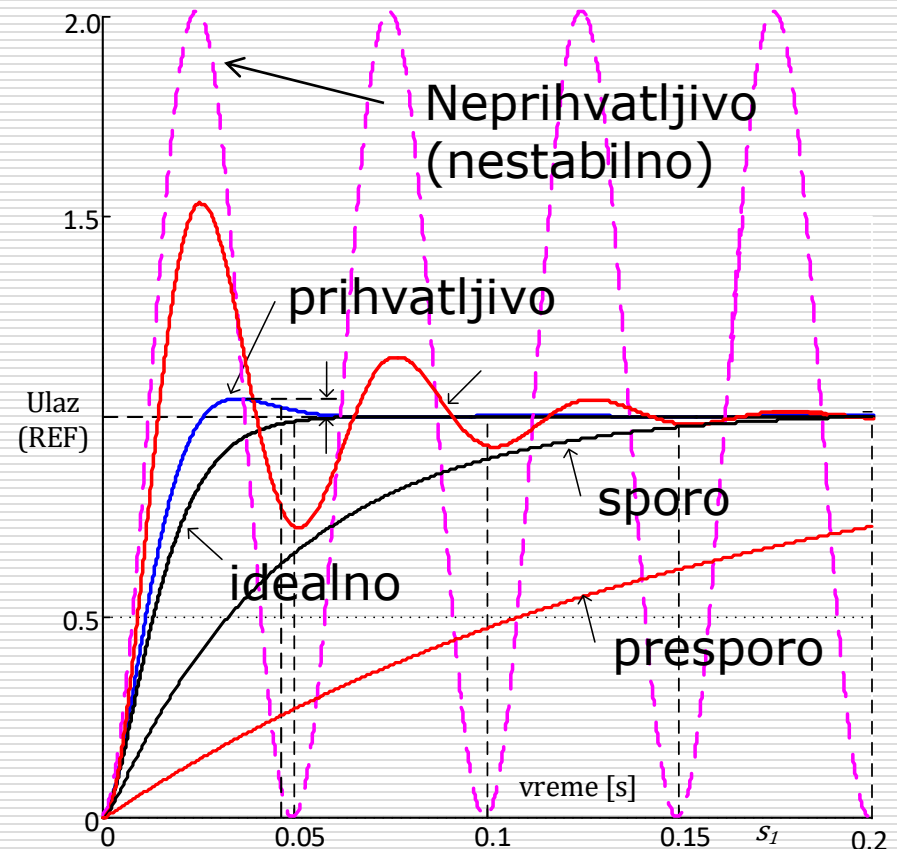
$$y(t \rightarrow \infty) = U, \quad e(t \rightarrow \infty) = 0$$

A šta želimo u prelaznom režimu:

Ulaz je odskočna referenca, treba da se ostvari na izlazu, šta želimo:

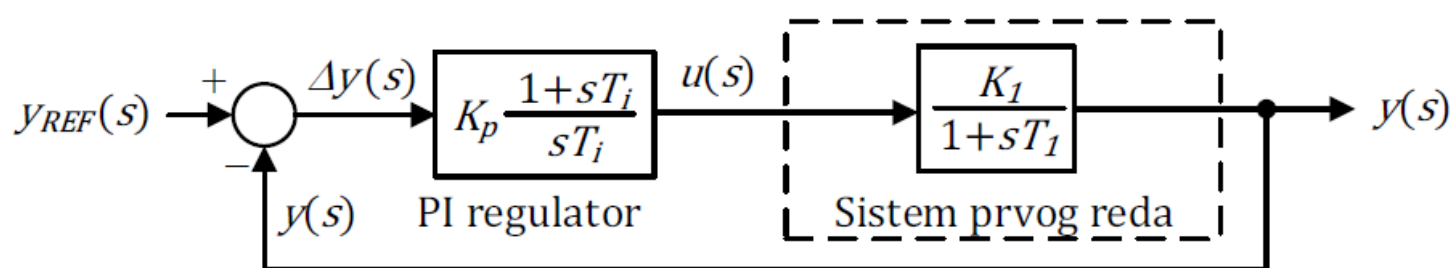
- Striktno aperiodičan odziv, bez imalo prebačaja
- što brži odziv sa malim prebačajem ?
- Još brži sa većim prebačajem?

Kada mora kompromis kada ne mora ?



4.2. Podešavanje PI reg. za sistem I reda

Ako je sistem prvog reda, sinteza parametara je relativno prosta. Jedan način za sintezu parametara PI regulatora koji reguliše izlaz sistema prvog reda je **kompensacija dominantne vremenske konstante**



Sl. 1.25. Regulacija izlaza sistema prvog reda PI regulatorom

Funkcija otvorenog prenosa

$$W_o(s) = \frac{y(s)}{\Delta y(s)} = G_{REG}(s)G_I(s) = K_p \frac{1 + sT_i}{sT_i} \frac{K_1}{1 + sT_1}$$

Postupkom kompenzacije se eliminiše pol tako što se vreme reakcije PI reg. izjednači sa vremenskom konstantom sistema prvog reda T_1 ,

pa funkcija otvorenog prenosa postaje

$$T_i = T_1.$$

$$W_o(s) = \frac{y(s)}{\Delta y(s)} = K_p \frac{1 + sT_{\mp}}{sT_1} \frac{K_1}{1 + sT_{\mp}} = \frac{K_p K_1}{sT_1}$$

4.2. Podešavanje PI reg. za sistem I reda

A kakav je novi odnos izlaz/referenca, tj. funkcija spregnutog prenosa

$$W_o(s) = \frac{K_p K_1}{s T_1} \quad \Rightarrow \quad W_s(s) = \frac{y(s)}{y_{REF}(s)} = \frac{W_o(s)}{1 + W_o(s)}$$

$$W_s(s) = \frac{y(s)}{y_{REF}(s)} = \frac{\frac{K_p K_1}{s T_1}}{1 + \frac{K_p K_1}{s T_1}} = \frac{K_p K_1 / T_1}{s + K_p K_1 / T_1}$$

*ha, vidi zareze,
greška u knjizi*

Ima novi pol koji se može podesiti sa pojačanjem PI regulatora K_p .
Ako se želi propusni opseg ω_{gr} , tj. da važi,

$$W_s(s) = \frac{K_p K_1 / T_1}{s + K_p K_1 / T_1} = \frac{\omega_{gr}}{s + \omega_{gr}} = \frac{1}{1 + s T_d}$$

Željeni propusni opseg ω_{gr} će se dobiti za sledeće pojačanje K_p

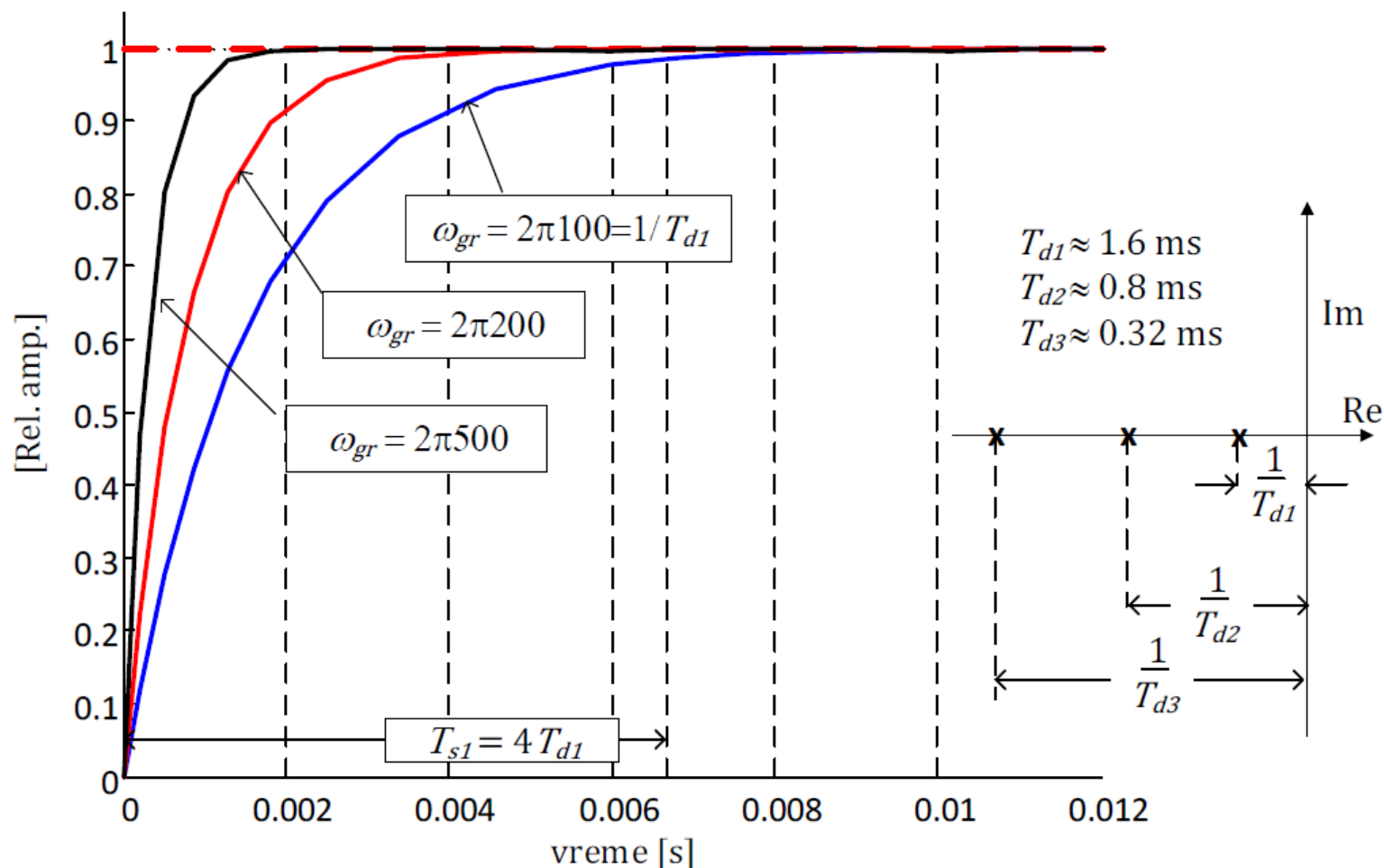
$$K_p = \frac{T_1}{K_1} \omega_{gr}$$

Znači sa jednim parametrom PI regulatora poništimo stari pol, a sa drugim parametrom postavimo novi, obično brži pol!!!

4.2. Podešavanje PI reg. za sistem I reda

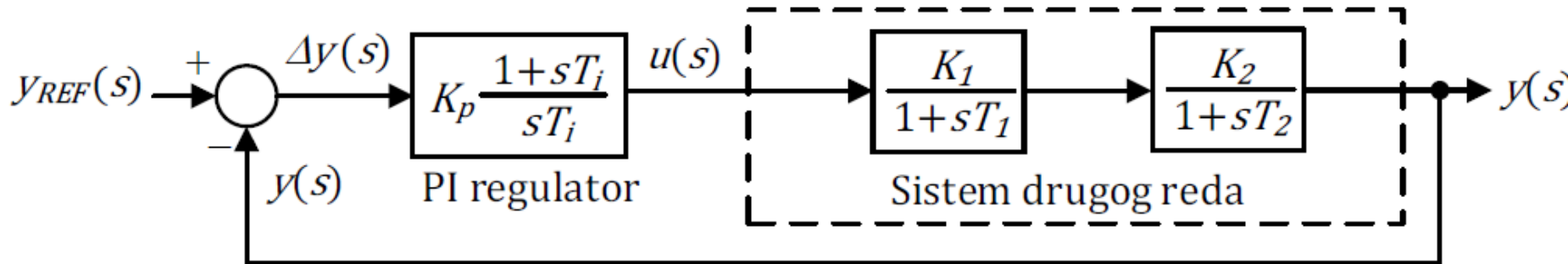
Funkcija spregnutog prenosa novonastalog sistema i dalje ima jedan pol, bez obzira na pojačanje odziv je aperiodičan bez oscilacija: idealno!

Step odzivi za različita pojačanja. Za odabrano veće pojačanje K_p , dobija se širi propusni opseg (veće ω_{gr}), pol bliži Im osi, i sistem je brži.



4.3. Podešavanje PI reg. za sistem II reda

Sistem drugog reda ima dva pola, pa nije moguće sa dva parametara PI regulatora poništiti oba pola i trećim parametrom (koga nema) podesiti novi pol, pa time i novu dinamiku sistema.



Sl. 1.27. Regulacija izlaza sistema drugog reda PI regulatorom

Sistem je sada drugog reda, sa dva prirodna pola

$$s_{p1} = -1/T_1 \text{ i } s_{p2} = -1/T_2$$

U većini sistema drugog reda, jedan pol ima mnogo veću vremensku konstantu pa je samim tim dominantan (praktično, jedino dominantan pol usporava uspostavljanje izlaza).

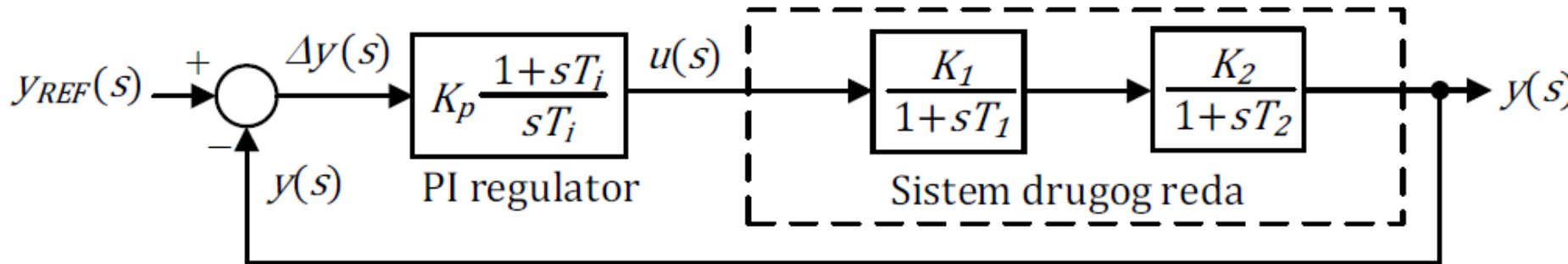
Kod motora, struja se mnogo brže uspostavlja od brzine.

T_1 za električni podistem $\sim 100 \text{ us} - 1 \text{ ms}$ (zavisi od veličine motora)

T_2 za mehanički podistem $\sim 1 \text{ ms} - 1 \text{ s}$ (zavisi od veličine motora)

4.3. Podešavanje PI reg. za sistem II reda

Sistem drugog reda ima dva pola, pa nije moguće sa dva parametara PI regulatora poništiti oba pola i trećim parametrom (koga nema) podesiti novi pol, pa time i novu dinamiku sistema.



Sl. 1.27. Regulacija izlaza sistema drugog reda PI regulatorom

Sa jednim PI regulatorom u ovom sistemu ne možemo dobiti aperiodičan odziv bilo kog propusnog opsega. Zato, za podešavanje PI regulatora neophodan je kompromis.

Jedan od načina je opet kompenzacija, sada veće dominantne vremenske konstante $T_i = T_2$.

A pojačanje PI regulatora K_p se bira kao kompromis, da bude dovoljno veliko da sistem dovoljno brzo reaguje, a dovoljno malo da ne zaosciluje

...

4.3. Podešavanje PI reg. za sistem II reda

Ako je vremenom reakcije T_1 poništen T_2 , funkcija spregnutog prenosa je

$$W_s(s) = \frac{K_p K_1 K_2 / (T_1 T_2)}{s^2 + s/T_1 + K_p K_1 K_2 / (T_1 T_2)}$$

Dakle, zatvaranjem povrtane spreze se **opet dobija sistem II reda**, ali **čija karakteristična jednačina, pa i položaj polova, zavise od izabranog pojačanja K_p**

$$s^2 T_1 T_2 + s T_2 + K_p K_1 K_2 = (s - s_1)(s - s_2)$$

Odabir pojačanja K_p PI regulatora je predmet optimizacije tj. kompromisa, koji se vrši na osnovu željenog propusnog opsega sistema sa zatvorenim povratnom spregom, ali i uz postizanje potrebnog kvaliteta odziva tokom prelaznih procesa. Pojačanjem K_p kao jedinim preostalim parametrom regulatora se ne može u potpunosti kontrolisati položaj dva pola ove funkcije, pa se njegovim menjanjem istovremeno menjaju i propusni opseg sistema i karakter i kvalitet odziva. Ako se podesi premalo pojačanje K_p , po pravilu se dobijaju dva realna pola, što dovodi do aperiodičnog odziva, ali taj odziv na promenu referentne vrednosti je spor. S druge strane, ako se izabere preveliko pojačanje K_p , polovi (1.69) napuštaju realnu osu i postaju konjugovano kompleksni, tako da je neminovna pojava oscilacija u odzivu. Naravno, što je imaginarni deo polova veći u odnosu na realni, oscilatoran odziv sistema sa povratnom spregom će biti manje prigušen. Dakle, za izbor pojačanja PI regulatora kojim se reguliše sistem drugog reda je neophodan kompromis, jer njegovim uvećanjem se proširuje propusni opseg konture regulacije, a time i kvalitet REMP-a, ali uvećavaju se i nepoželjne oscilacije u odzivu.

4.3. Podešavanje PI reg. za sistem II reda

Ponašanje novonastalog SAU možemo menjati odabirom K_p (menjamo položaj polova). Za kvantitativnu predstavu uticaja položaja polova na odziv, u SAU se funkcija spregnutog prenosa drugog reda posmatra u formi filtra niskopropusnika

drugog reda

$$W_s(s) = \frac{K_p K_1 K_2 / (T_1 T_2)}{s^2 + s/T_1 + K_p K_1 K_2 / (T_1 T_2)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Polovi ovog sistema su

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \sqrt{\xi^2 - 1}\omega_n$$

Ako polovi ostanu **realni**, odziv ostane aperiodičan, a važi

$$s_1 = -\xi\omega_n - \sqrt{\xi^2 - 1}\omega_n, \quad s_2 = -\xi\omega_n + \sqrt{\xi^2 - 1}\omega_n$$

Pri uvećanju **faktora prigušenja** ξ polovi se još više razdvajaju. U graničnom slučaju, $\xi = 1$, polovi su realni ali i jednaki, ali sa daljim povećanjem pojačanja će da napuste Re osu

$$s_{1,2} = -\omega_n$$

Kada polovi napuste Re osu postaju konjugovano kompleksni, $\xi < 1$,

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\sqrt{1 - \xi^2}\omega_n$$

Tada se javljaju oscilacije na **prirodnoj učestnosti para polova** ω_n

4.3. Podešavanje PI reg. za sistem II reda

Ponašanje novonastalog SAU možemo menjati odabirom K_p (menjamo položaj polova). Za kvantitativnu predstavu uticaja položaja polova na odziv, u SAU se funkcija spregnutog prenosa drugog reda posmatra u formi filtra niskopropusnika drugog reda

$$W_s(s) = \frac{K_p K_1 K_2 / (T_1 T_2)}{s^2 + s/T_1 + K_p K_1 K_2 / (T_1 T_2)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Polovi ovog sistema su

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \sqrt{\xi^2 - 1}\omega_n$$

Povećanjem pojačanja PI regulatora K_p ubrzava se sistem jer se povećava prirodna učestnost para polova ω_n

$$\omega_n = \sqrt{K_p K_i K_2 / T_1 T_2}$$

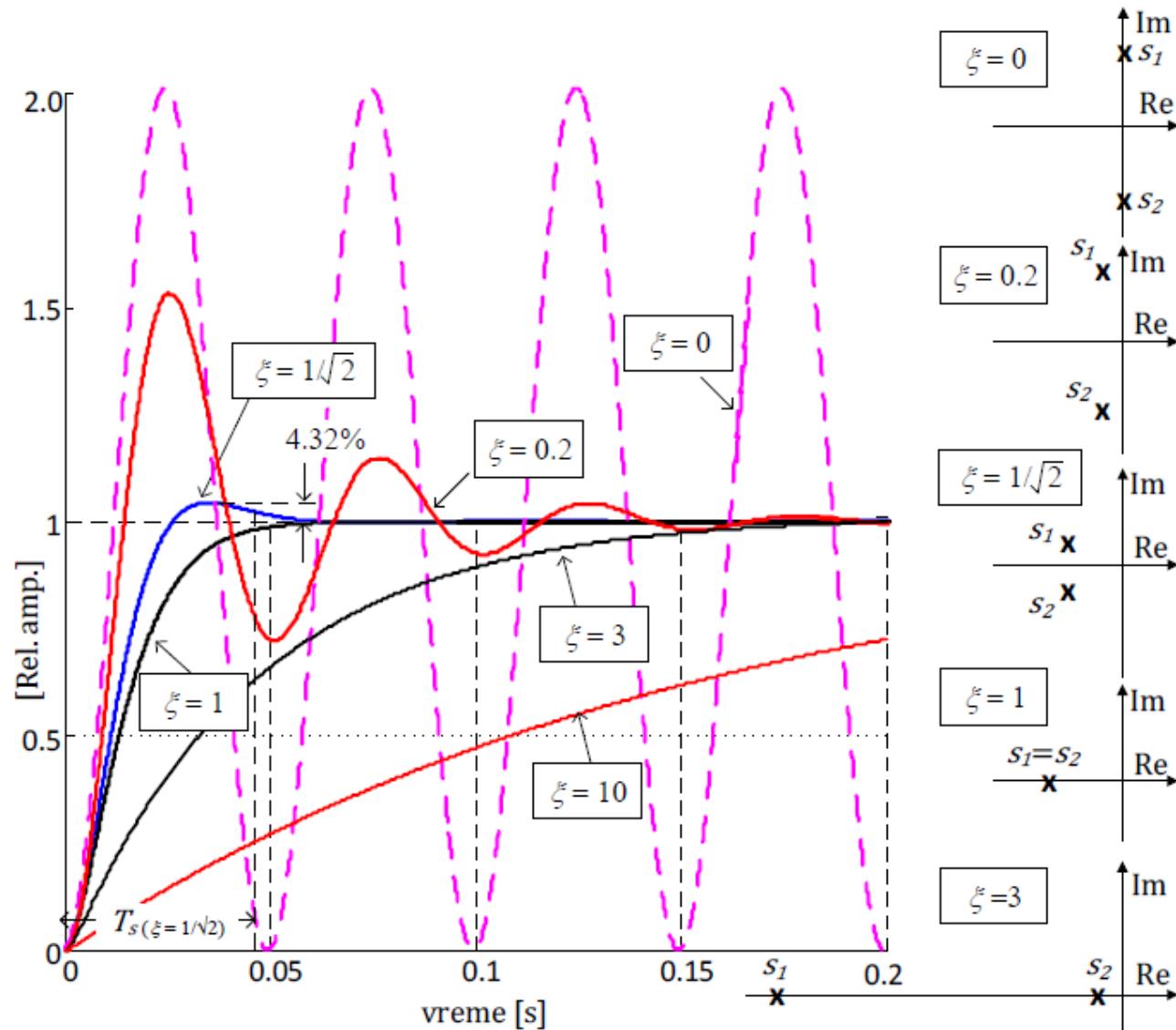
Ali, povećanjem K_p se ujedno smanjuje faktora prigušenja ξ i nakon neke vrednosti K_p sistem počinje da osciluje

Znači, ne smemo previše da ubrzamo odziv sistema!

$$\xi = \frac{1}{2T_1\omega_n}$$

4.3. Podešavanje PI reg. za sistem II reda

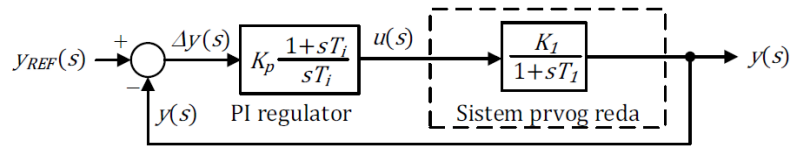
Ilustracija uticaja povećanja pojačanja K_p na odziv i položaj polova



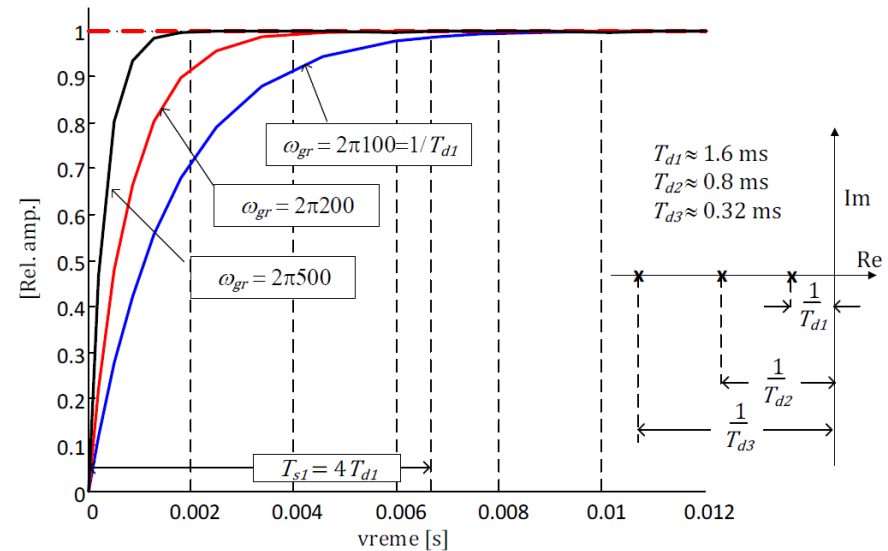
5. Prednost kaskadne strukture u REMP

5. Prednosti kaskadne regulacije u REMP

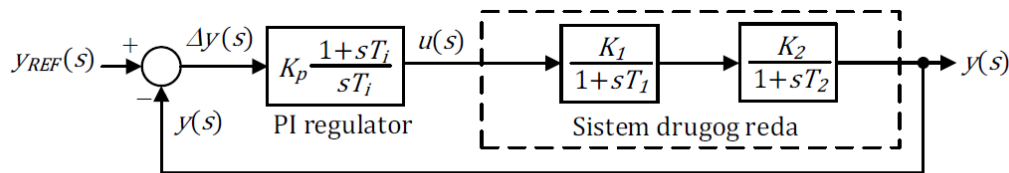
Rezultat regulacije sistema I reda PI regulatorom je aperiodičan odziv i željena brzina odziva (propusni opseg)



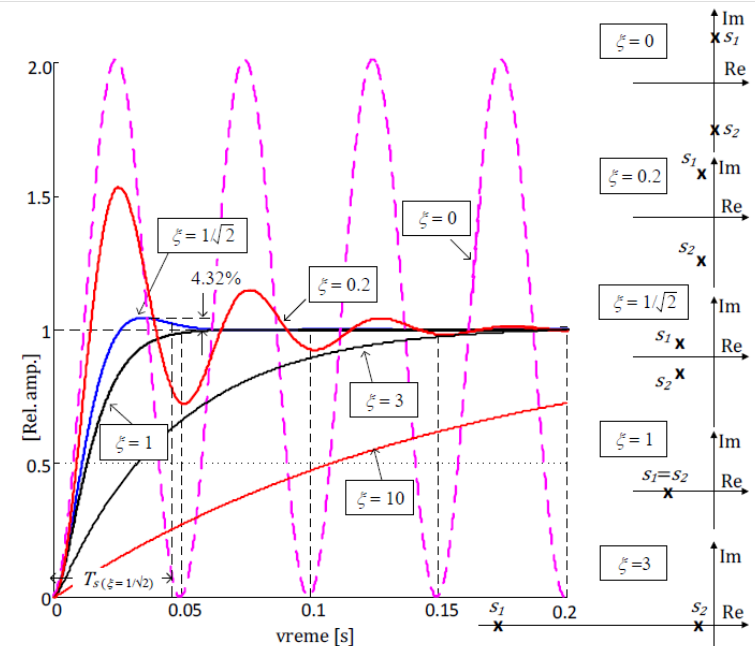
Sl. 1.25. Regulacija izlaza sistema prvog reda PI regulatorom



Rezultat regulacije sistema II je kompromis, ne može uvek željena brzina odziva i aperiodični odziv

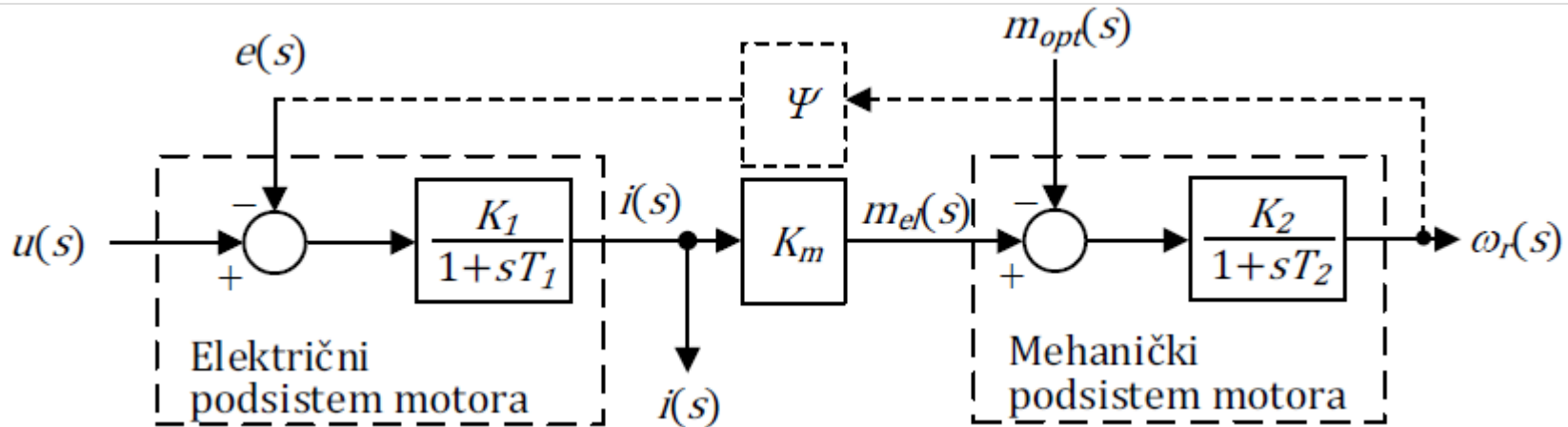


Sl. 1.27. Regulacija izlaza sistema drugog reda PI regulatorom



5. Prednosti kaskadne regulacije u REMP

Motor je objekat II reda, onda ne može željena brzina i aperiodičan odziva?



Kada se elektromotorna sila tretira kao zavisna od brzine, za funkciju otvorenog prenosa brzine od napona se dobija

$$\omega_r(s) = \frac{K_1 K_2 K_m}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} (u(s) - \Psi \omega_r(s)) \longrightarrow G_{mot}(s) = \frac{\omega_r(s)}{u(s)} =$$

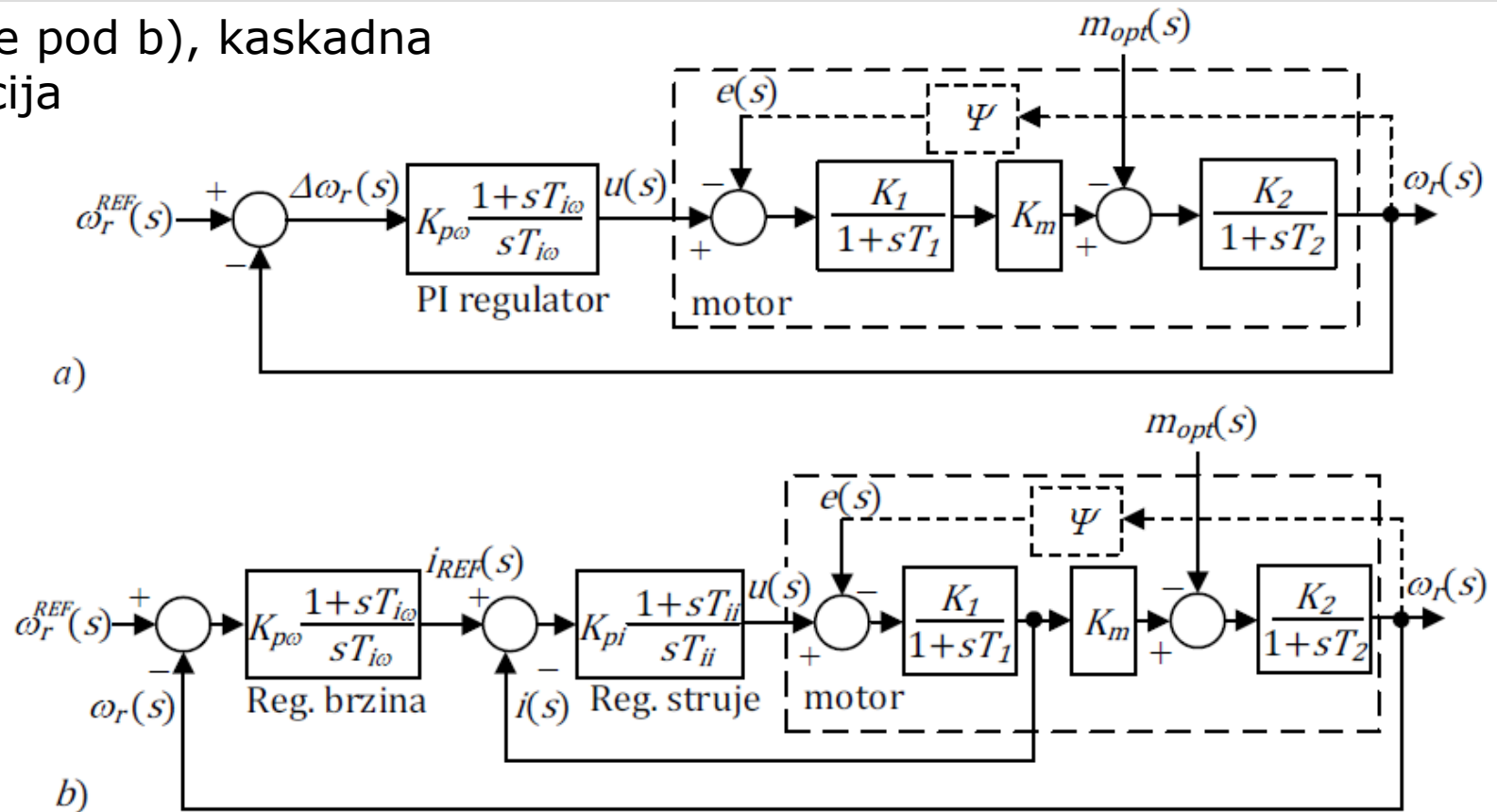
$$= \frac{K_1 K_2 K_m}{(1 + sT_1)(1 + sT_2) + K_1 K_2 K_m \Psi} = \frac{K_1 K_2 K_m}{s^2 T_1 T_2 + s(T_1 + T_2) + 1 + K_1 K_2 K_m \Psi}$$

Ako se to zanemari, jer je brzina sporopromenljiva, tada važi,

$$G_{mot}(s) = G_{el}(s)G_m(s) = \frac{m_{el}(s)}{u(s)} \frac{\omega_r(s)}{m_{el}(s)} = \frac{\omega_r(s)}{u(s)} = \frac{K_1}{1 + sT_1} K_m \frac{K_2}{1 + sT_2}$$

5. Prednosti kaskadne regulacije u REMP

Rešenje pod b), kaskadna regulacija



Sl. 1.31. Model REMP–a: a) sa jednom petljom regulacije brzine, b) sa spoljašnjom petljom regulacije brzine i unutrašnjom petljom regulacije struje sa regulatorima vezanim u kaskadi

Razdvajanjem dinamika, u obe regulacione konture Pi regulator upravlja sistemom I reda. Svaki regulator poništi po jedan pol, a svako pojačanje podešava dinamiku svoje petlje. O ovome mnogo više u nastavku ...