

Upravljanje elektromotornim pogonima 2009/2010

Prof.dr.sc. Nedjeljko Perić

Zavod za automatiku i računalno inženjerstvo
Fakultet elektrotehnike i računarstva

Predavanje 3 – Kaskadna regulacija – primjena na elektromotorni
pogon s istosmjernim nezavisno uzbuđenim motorom

Kaskadna regulacija - primjer elektromotornog pogona s istosmjernim nezavisno uzbuđenim motorom

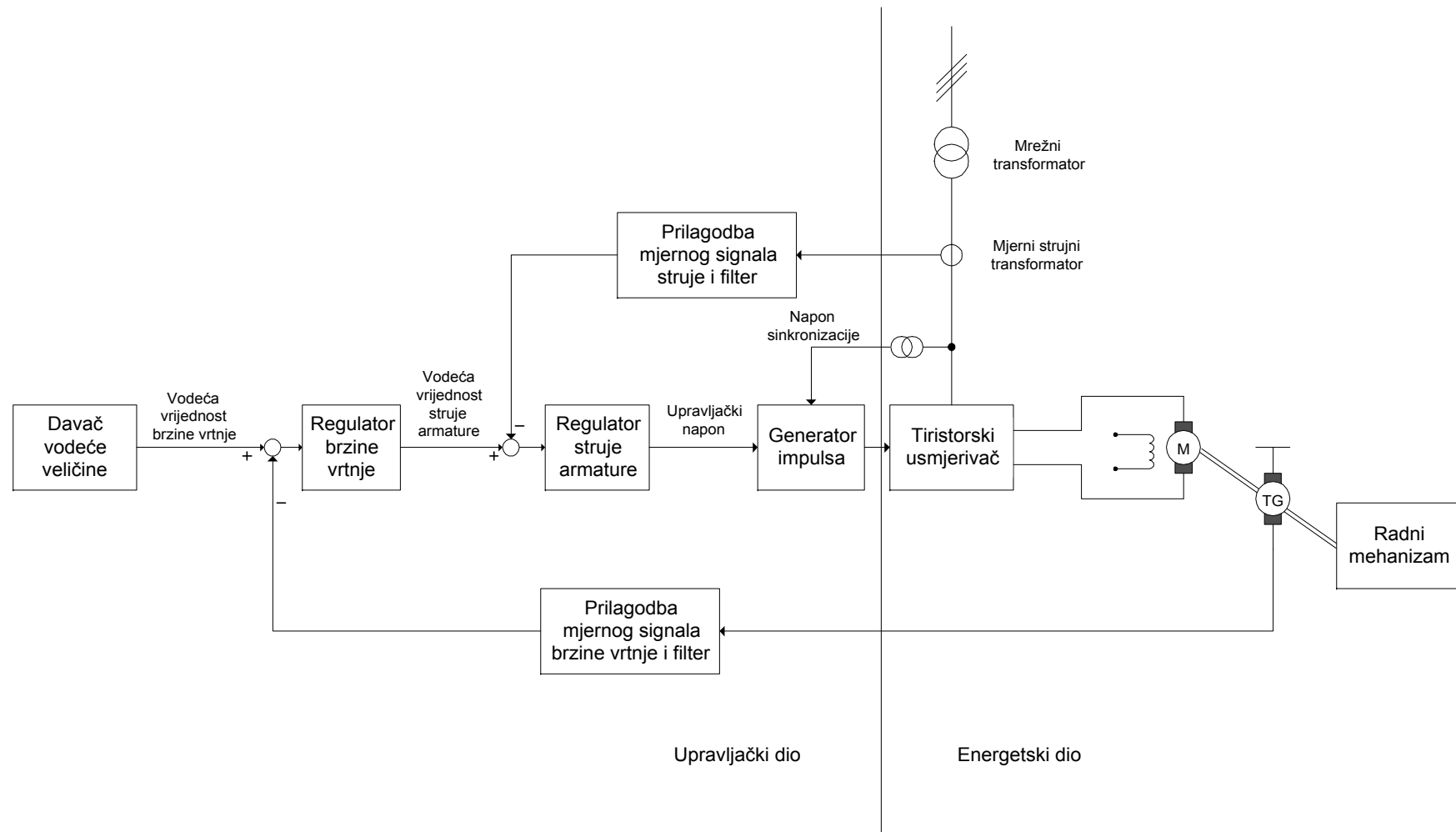
- Razmatrani EMP često je sastavni dio slijednog sustava (servosustava).
- Pri razradi ovoga primjera pretpostavlja se:
 - a) poznavanje fizikalne slike istosmjernog stroja;
 - b) poznavanje matematičkog modela istosmjernog stroja;
 - c) poznavanje načina rada tiristorskog usmjerivača te njegove dinamičke i statičke karakteristike.
- U konkretnom primjeru tiristorski usmjerivač služi za napajanje armaturnog kruga istosmjernog motora. Mogu se koristiti i drugi elektronički energetske pretvarači.

Kaskadna regulacija - primjer elektromotornog pogona s istosmjernim nezavisno uzbuđenim motorom

- U narednim razmatranjima slijedom se obrađuje:
 - a) principna shema reguliranog EMP-a;
 - b) strukturna shema reguliranog EMP-a;
 - c) izvedbena shema reguliranog EMP-a (pojednostavljeni prikaz);
 - d) sinteza regulatora struje armature i brzine vrtnje.
- Radi se o kaskadnoj strukturi upravljanja.
- U razmatranom primjeru ne obrađuje se:
 - a) utjecaj dinamike radnog mehanizma na vladanje EMP-a;
 - b) utjecaj tiristorskog usmjerivača na napojnu mrežu;
 - c) specijalni oblici vodeće veličine i postupci za poboljšanje slijeđenja što je od posebnog interesa za slijedne sustave.

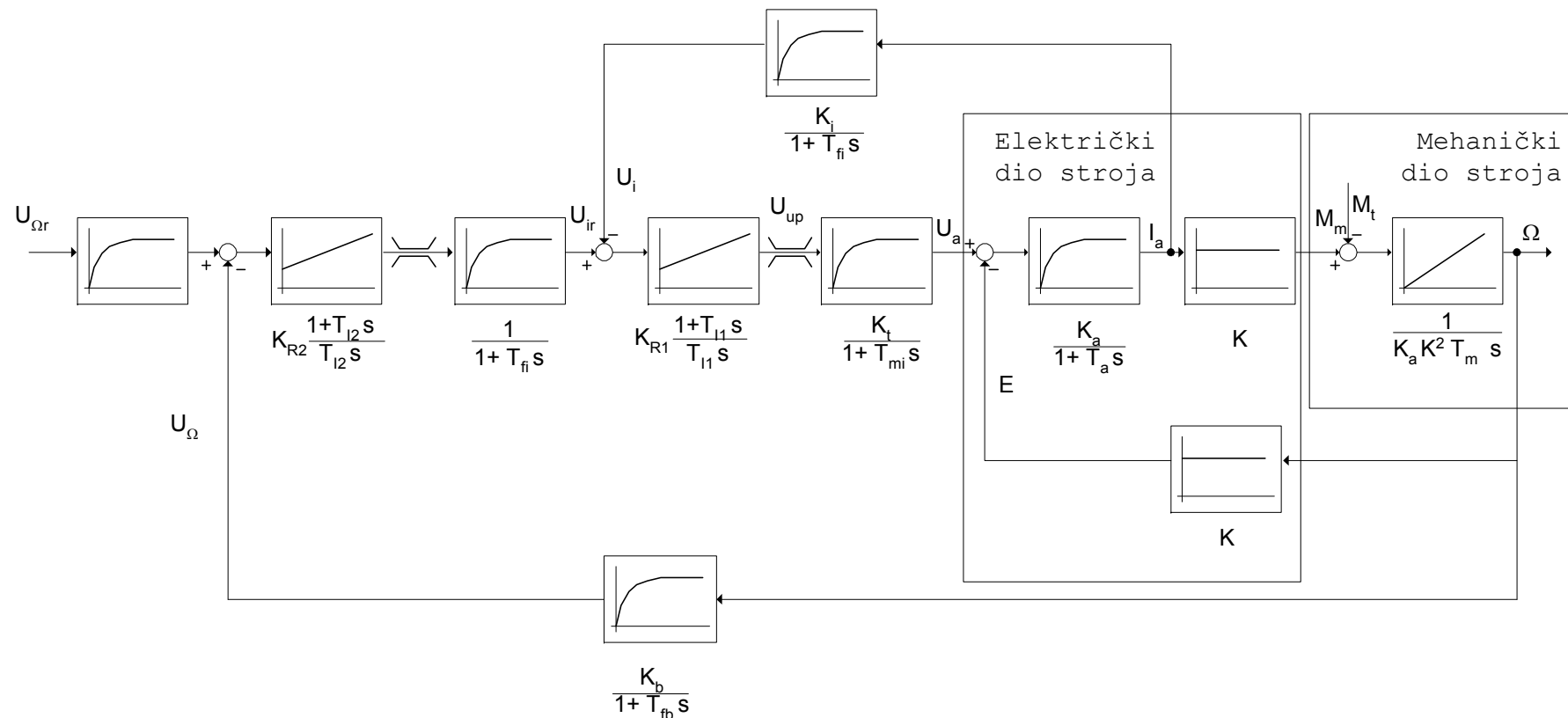
Principna shema kaskadne regulacije

- Principna shema kaskadne regulacije istosmjernog elektromotornog pogona prikazana je na slici 3.1.:



Strukturna shema kaskadne regulacije

- Unutarnju (podređenu) petlju predstavlja petlja struje armature, a vanjsku (nadređenu) petlju predstavlja petlja brzine vrtnje.
- Strukturna shema sustava regulacije istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzбудom prikazana je na slici 3.2.:

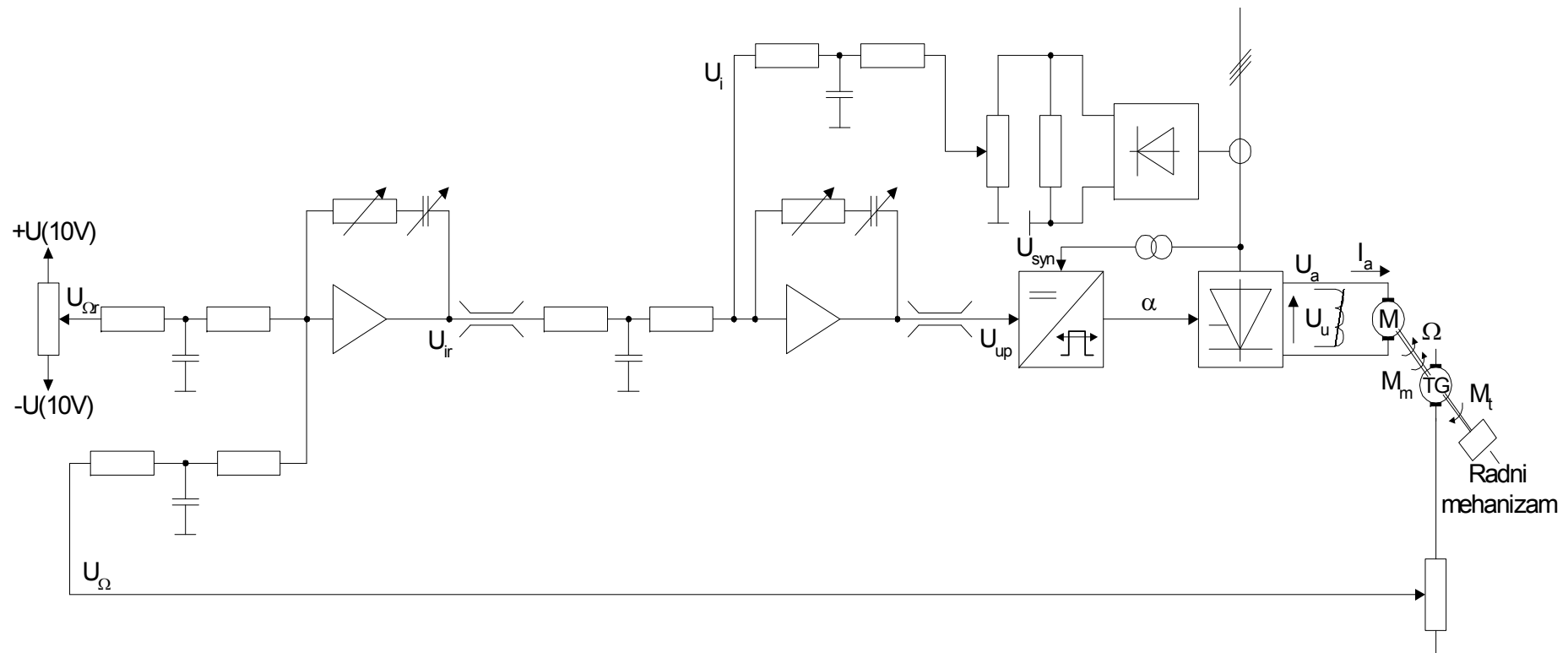


Fizikalna pozadina

- Motor se može promatrati kao objekt u kojem se obavlja elektromehanička pretvorba energije.
- U tom se slučaju u “električkom dijelu stroja” odvija elektromagnetski potproces; izlaz iz toga potprocesa je razvijen moment motora M_m .
- U “mehaničkom dijelu stroja” odvija se pod djelovanjem razvijenog momenta motora mehanički potproces koji rezultira zakretanjem, odnosno vrtnjom osovine motora.
- Prema shemi na slici 3.2. podređenom petljom po struji armature regulira se elektromagnetski potproces motora; razvijen moment u razmatranom slučaju proporcionalan je struji armature.
- Vanjskom petljom po brzini vrtnje regulira se mehanički potproces.

Izvedba sustava kaskadne regulacije

- Pojednostavljena izvedba sustava regulacije prikazana je na slici 3.3:



Sl. 3.3.

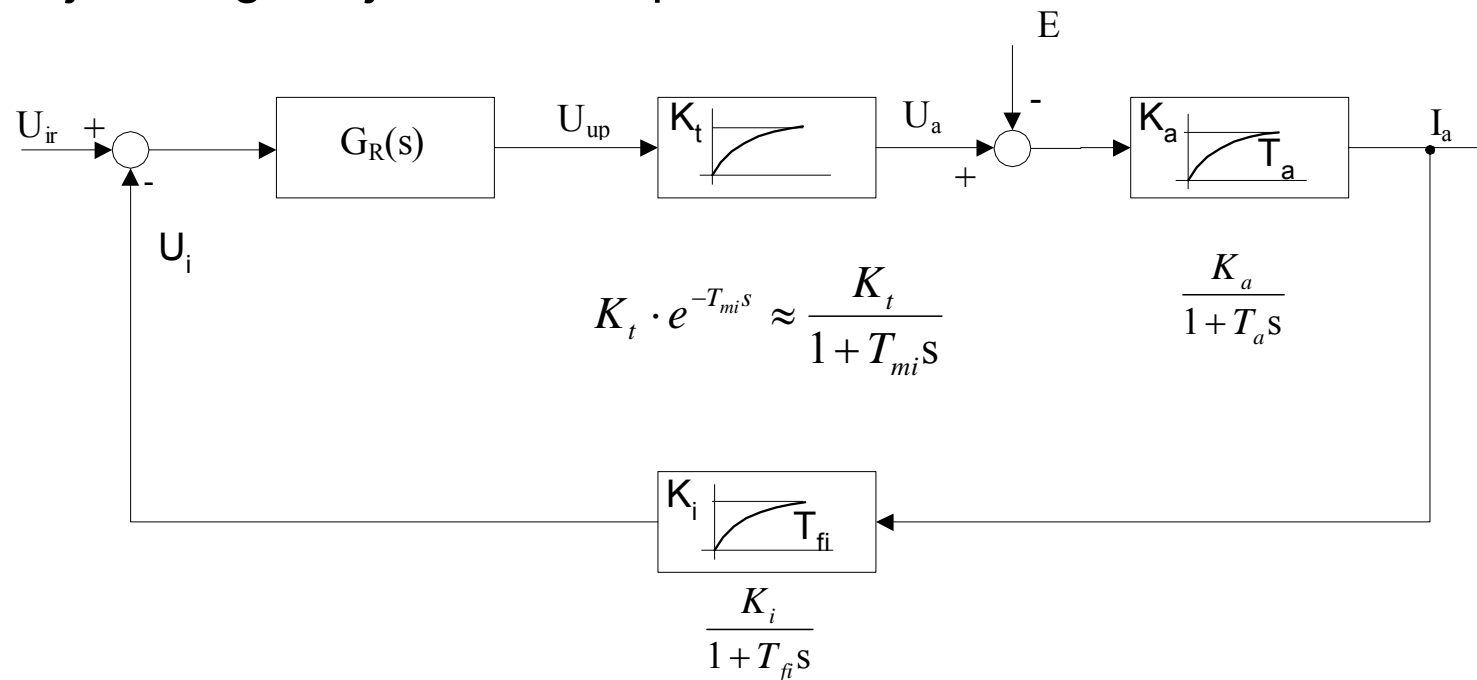
- Oba regulatora, i regulator brzine vrtnje i regulator struje armature, su PI - djelovanja.

Sinteza sustava upravljanja

- U nastavku je dan u praksi afirmirani postupak sinteze regulatora struje armature i brzine vrtnje EMP-a.

Sinteza regulatora struje armature

- Iz strukturne sheme sustava upravljanja (Sl. 3.2.) dobije se zatvoreni regulacijski krug struje armature prikazan na slici 3.4.:



Sinteza regulatora struje armature

- U regulacijskom krugu (Sl. 3.4.) inducirana protuelektromotorna sila E manifestira se kao smetnja sustava. Pri promjenljivoj brzini vrtnje ova je smetnja, također, promjenljiva.
- Primjerice, pri zaletu (kočenju) motora konstantnim momentom (strujom) linearno raste (opada) brzina vrtnje (protuelektromotorna) sila.
- Za dovoljno **veliki odnos T_m/T_a** može se pri sintezi regulatora struje armature **zanemariti E** ($E = 0$, tj. motor zakočen).
- Prema blokovskoj shemi istosmjernog motora slijedi:

$$\frac{I_a(s)}{U_a(s)} = \frac{K_a T_m s}{1 + T_m s + T_a T_m s^2} \xrightarrow{T_m \rightarrow \infty} \frac{T_m s}{T_m s} \frac{K_a}{\frac{1}{T_m s} + 1 + T_a s} = \frac{K_a}{1 + T_a s}. \quad (3 - 1)$$

$$(T_m = \frac{J R_a}{K^2}; \quad T_m \rightarrow \infty \text{ znači } J \rightarrow \infty)$$

Sinteza regulatora struje armature

- Prema slici 3.4. proces kojim se upravlja ima prijenosnu funkciju:

$$G_{s1}(s) = \frac{K_t}{1 + T_{mi}s} \frac{K_i}{1 + T_{fi}s} \frac{K_a}{1 + T_a s}, \quad T_{mi}, T_{fi} \ll T_a \quad (3 - 2)$$

gdje je:

- ◆ T_{mi} - nadomjesno mrtvo vrijeme tiristorskog usmjerivača, [s];

$$(T_{mi} = \frac{1}{2} \frac{1}{mf} ; m - \text{pulsni broj usmjerivača} ;$$

f - frekvencija napojne mreže [Hz].)

- ◆ T_{fi} - vremenska konstanta povratne veze struje armature, [s];
- ◆ K_t - pojačanje tiristorskog usmjerivača i generatora impulsa;
- ◆ K_i - pojačanje povratne veze struje armature, [V/A].

Sinteza regulatora struje armature

- S obzirom da je u (3 - 2) vremenska konstanta T_a jedina dominantna vremenska konstanta, može se dobiti strukturnim pojednostavljenjem:

$$G_{s1}(s) = \frac{K_{s1}}{(1 + T_a s)(1 + T_{\Sigma} s)}, \quad (3 - 3)$$

gdje je:

$$K_{s1} = K_t K_i K_a,$$

$$T_{\Sigma} = T_{mi} + T_{fi}.$$

- Struktura procesa (3 - 3) prikladna je za **primjenu tehničkog optimuma**.
- Mogu se primijeniti i drugi postupci sinteze (npr. Bodeov dijagram, Ziegler-Nicholsov postupak).

Sinteza regulatora struje armature

- Za regulator struje armature

$$G_{R1}(s) = K_{R1} \frac{1 + T_{I1}s}{T_{I1}s}$$

odabere se prema relacijama za tehnički optimum:

$$T_{I1} = T_a, \quad (3 - 4)$$

$$K_{R1} = \frac{1}{2} \frac{1}{K_{s1}} \frac{T_a}{T_{\Sigma}}. \quad (3 - 5)$$

Sinteza regulatora struje armature

- Prijenosna funkcija zatvorenog regulacijskog kruga struje armature, uz parametre PI - regulatora prema (3 - 4) i (3 - 5) glasi:

$$\frac{I_a(s)}{U_{ir}(s)} = \frac{1 + T_{fi}s}{K_i} \frac{1}{1 + 2T_{\Sigma}s + 2T_{\Sigma}^2s^2} \quad (3 - 6)$$

- Član $(1 + T_{fi}s)$ u (3 - 6) kompenzira se prefiltrom u grani referentne vrijednosti struje armature $G_V(s) = \frac{1}{1 + T_{fi}s}$ pa se dobije:

$$\frac{I_a(s)}{U_{ir}(s)} = \frac{1}{K_i} \frac{1}{1 + 2T_{\Sigma}s + 2T_{\Sigma}^2s^2} \quad (3-7)$$

Sinteza regulatora struje armature

- S obzirom da je regulacijski krug struje armature podređen regulacijskom krugu brzine vrtnje vrlo je praktično, sa stajališta sinteze regulatora brzine vrtnje, **strukturno pojednostaviti** prijenosnu funkciju (3 - 7), tj. nadomjestiti je prijenosnom funkcijom:

$$\frac{I_a(s)}{U_{ir}(s)} \approx \frac{1}{K_i} \frac{1}{1 + T_s s}, \quad (3 - 8)$$

gdje je: T_s - nadomjesna vremenska konstanta, [s] => T_s treba odrediti

- Prikladan način određivanja T_s zasniva se na **jednakosti integrala regulacijskih pogrešaka nereduciranog i reduciranog** (nadomjesnog) **modela**:

$$\int_0^{\infty} \left[1 - \left(1 - e^{-t/T_s} \right) \right] dt = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \left[1 - e^{-t/2T_{\Sigma}} \left(\cos \frac{t}{2T_{\Sigma}} + \sin \frac{t}{2T_{\Sigma}} \right) \right] \right\} dt. \quad (3 - 9)$$

- Iz (3 - 9) slijedi nakon provedenog integriranja: $T_s = 2T_{\Sigma}. \quad (3 - 10)$

Sinteza regulatora struje armature

- Također, T_s se može odrediti i kao:

$$T_s \approx \frac{1}{\omega_{ci}}, \quad (3 - 11)$$

gdje je:

- ♦ ω_{ci} - presječna frekvencija otvorenog regulacijskog kruga struje armatura $G_{oi}(j\omega)$ ($G_{oi}(s) = G_{s1}(s) G_{R1}(s)$).

- Iz $|G_{oi}(j\omega_{ci})| = 1$ dobije se:

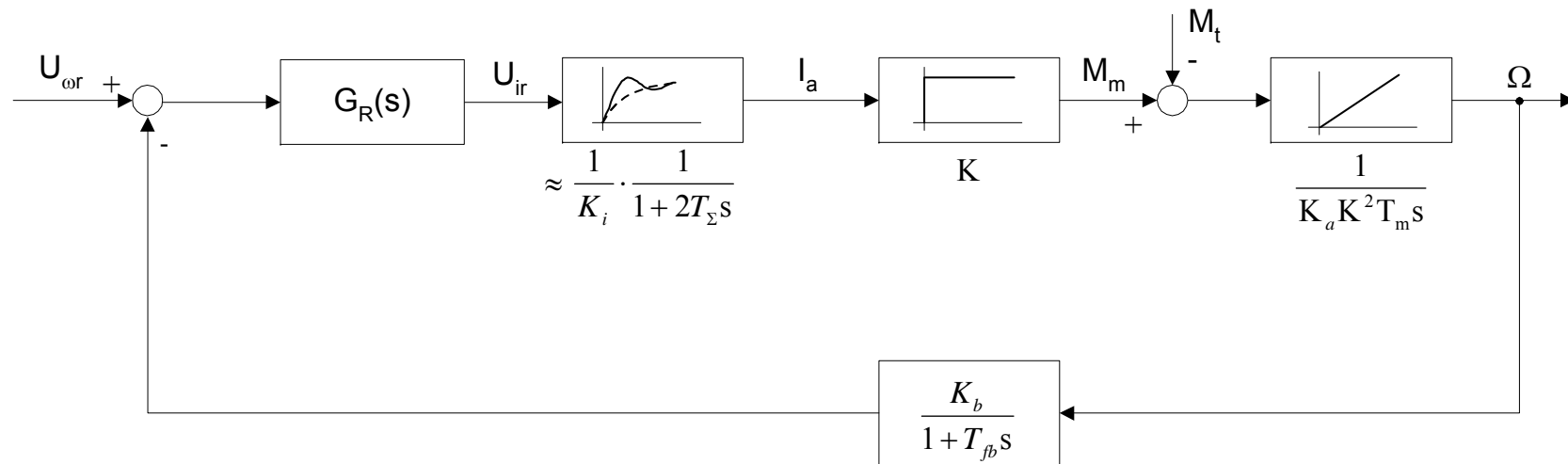
$$\omega_{ci} = \frac{1}{T_\Sigma} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \frac{1}{4\zeta^2}} - 1}. \quad (3 - 12)$$

- Za $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2}$ slijedi:

$$\omega_{ci} = \frac{0,46}{T_\Sigma} \rightarrow T_s = 2,2T_\Sigma. \quad (3 - 13)$$

Sinteza regulatora brzine vrtnje

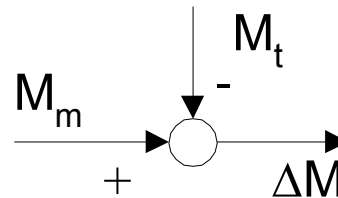
- Sinteza regulatora brzine vrtnje obavlja se uz pretpostavku strukturnog pojednostavljenja zatvorenog regulacijskog kruga struje armature, prema (3 - 8) ($\frac{I_a(s)}{U_{ir}(s)} \approx \frac{1}{K_i} \frac{1}{1+T_s s}$).
- U tom slučaju strukturna shema sa slike 3.2. poprima oblik (Sl.3.5.):



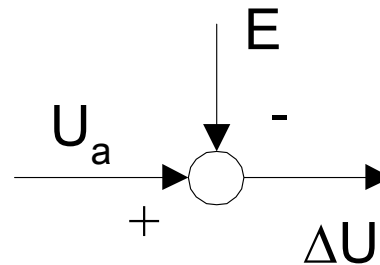
- Moment tereta M_t predstavlja smetnju regulacijskog kruga.

Analogija mehaničkog i električnog dijela

Digresija: Analogije:



♦ $\Delta M \rightarrow$ pogoni rotirajuće mase



♦ $\Delta U \rightarrow$ tjera struju kroz induktivni armaturni krug

Sinteza regulatora brzine vrtnje

- Proces kojim upravlja regulator brzine vrtnje ima prijenosnu funkciju:

$$G_{s2}(s) = \frac{1}{K_i} \frac{1}{1 + 2T_\Sigma s} K \frac{K_b}{1 + T_{fb}s} \frac{1}{K_a K^2 T_m s}, \quad (3 - 14)$$

gdje je:

- ♦ K_b - pojačanje povratne veze brzine vrtnje, [Vs];
- ♦ T_{fb} - vremenska konstanta filtera povratne vezi brzine vrtnje, [s];
- ♦ T_m - elektromehanička vremenska konstanta, [s].

($2T_\Sigma$ i T_{fb} su male (nedominantne) vremenske konstante).

- Iz (3 - 14) slijedi:

$$G_{s2} = \frac{K_{s2}}{1 + T_\Sigma^* s} \cdot \frac{1}{T_m s}, \quad (3 - 15)$$

gdje je:

$$T_\Sigma^* = 2T_\Sigma + T_{fb}, \quad K_{s2} = \frac{K_b}{K_i K_a K}.$$

Sinteza regulatora brzine vrtnje

- Struktura procesa (3 - 15) prikladna je za **primjenu simetričnog optimuma**.

$$G_{s2} = \frac{K_{s2}}{1 + T_{\Sigma}^* s} \cdot \frac{1}{T_m s}, \quad (3 - 15)$$

- Za regulator brzine vrtnje

$$G_{R2}(s) = K_{R2} \frac{1 + T_{I2} s}{T_{I2} s}$$

odabere se prema relacijama za simetrični optimum (uz **a = 2**)

$$T_{R2} = 4T_{\Sigma}^*, \quad (3 - 16)$$

$$K_{R2} = \frac{1}{2} \frac{1}{K_{s2}} \cdot \frac{T_m}{T_{\Sigma}^*}. \quad (3 - 17)$$

Sinteza regulatora brzine vrtnje

- Prijenosna funkcija zatvorenog regulacijskog kruga brzine vrtnje, uz parametre PI - regulatora prema (3 - 16) i (3 - 17) glasi:

$$\frac{\Omega(s)}{U_{\Omega r}(s)} = \frac{1 + T_{fb}s}{K_b} \cdot \frac{1 + 4T_{\Sigma}^*s}{1 + 4T_{\Sigma}^*s + 8T_{\Sigma}^{*2}s^2 + 8T_{\Sigma}^{*3}s^3} \quad (3 - 18)$$

- Član $(1 + T_{fb}s)(1 + 4T_{\Sigma}^*s)$ u (3 - 18) kompenzira se prefiltrom u grani referentne vrijednosti brzine vrtnje:

$$G_V(s) = \frac{1}{(1 + T_{fb}s)(1 + 4T_{\Sigma}^*s)},$$

pa se dobije:

$$\frac{\Omega(s)}{U_{\Omega r}(s)} = \frac{1}{K_b} \cdot \frac{1}{1 + 4T_{\Sigma}^*s + 8T_{\Sigma}^{*2}s^2 + 8T_{\Sigma}^{*3}s^3} \quad (3 - 19)$$

Sinteza regulatora brzine vrtnje

$$\frac{\Omega(s)}{U_{\Omega r}(s)} = \frac{1}{K_b} \cdot \frac{1}{1 + 4T_{\Sigma}^* s + 8T_{\Sigma}^{*2} s^2 + 8T_{\Sigma}^{*3} s^3} \quad (3 - 19)$$

- Grubim strukturnim pojednostavljenjem prijenosne funkcije (3 - 19) dobije se:

$$\frac{\Omega(s)}{U_{\Omega r}(s)} \approx \frac{1}{K_b} \frac{1}{1 + T_S^* s}, \quad (3 - 20)$$

gdje je: T_S^* - nadomjesna vremenska konstanta, [s].

- T_S^* se određuje na analogan način kao u (3 - 9), tj.:

$$\int_0^{\infty} \left[1 - \left(1 - e^{-t/T_{\Sigma}^*} \right) \right] dt = \int_0^{\infty} \left[1 - \left(1 - e^{-t/2T_{\Sigma}^*} - \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-t/4T_{\Sigma}^*} \sin \frac{\sqrt{3}}{4T_{\Sigma}^*} t \right) \right] dt. \quad (3 - 21)$$

- Iz (3-21) slijedi nakon provedenog integriranja:

$$T_S^* = 2T_{\Sigma}^* + \sqrt{3}T_{\Sigma}^* \approx 3,7T_{\Sigma}^*. \quad (3 - 22)$$

Osnovna svojstva kaskadne regulacije

- Prednosti:

- a) Utjecaji smetnji koje djeluju na unutarnje regulacijske krugove kompenziraju se u samim tim krugovima i praktički su bez djelovanja na nadređene krugove; podređeni krugovi su brži od nadređenih krugova.
- b) Svaka regulirana veličina sustava (to je svaka veličina kojoj je pridružen vlastiti regulator) ograničava se na jednostavan način ugradnjom ograničivača vodeće (referentne) vrijednosti regulirane veličine; ovo je **zaštitno** svojstvo.
- c) Puštanje u pogon i podešavanje parametara sustava obavlja se jednostavno, korak po korak, počev od unutarnjih petlji prema vanjskim.
- d) Djelovanje nelinearnih i nestacionarnih članova sustava znatno je ograničeno korištenjem kaskadne regulacije (Unutarnja petlja s jediničnom povratnom vezom uz regulator koji ima integralnu komponentu ima pojačanje jedan, bez obzira da li su neki elementi kruga nelinearni).

Osnovna svojstva kaskadne regulacije

- Nedostaci:
 - a) Za svaku reguliranu veličinu potreban je regulator s pripadnim mjernim članom (cijena).
 - b) Brzina slijeđenja (točnost slijeđenja) opada s brojem kaskada što je posebno važno, primjerice, za slijedne sustave.