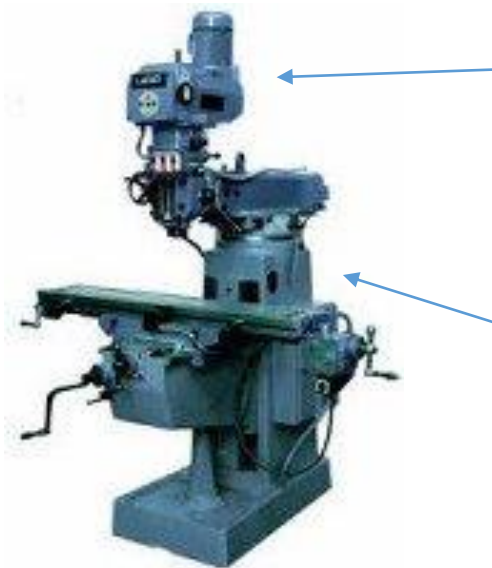


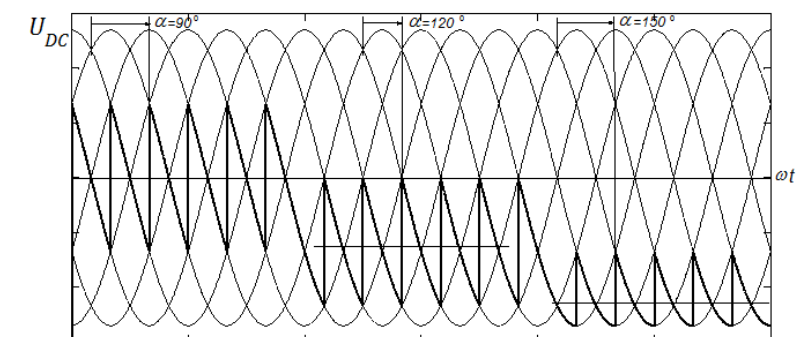
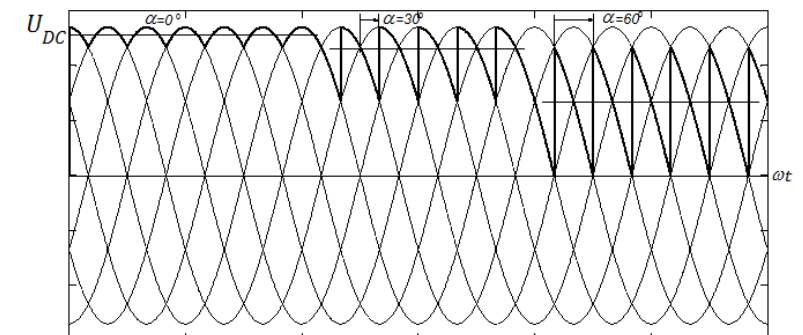
ОСНОВЕ УПРАВЉАЊА

КОНТРОЛА ПРОЦЕСА

- пример процеса:

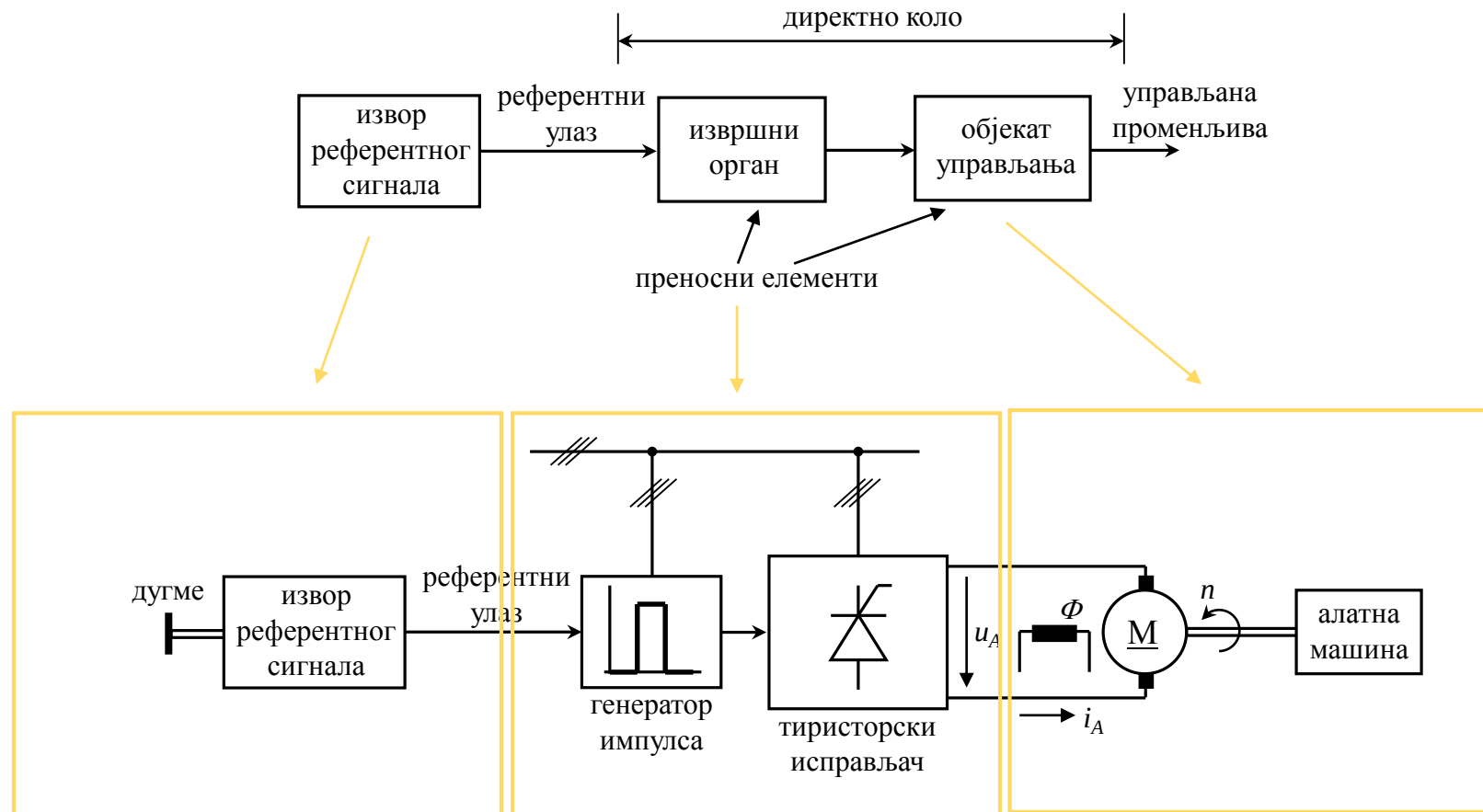


процес - глодалица

објекат управљања –
машина једносмерне струјеизвршни орган –
трофазни тиристорски исправљач

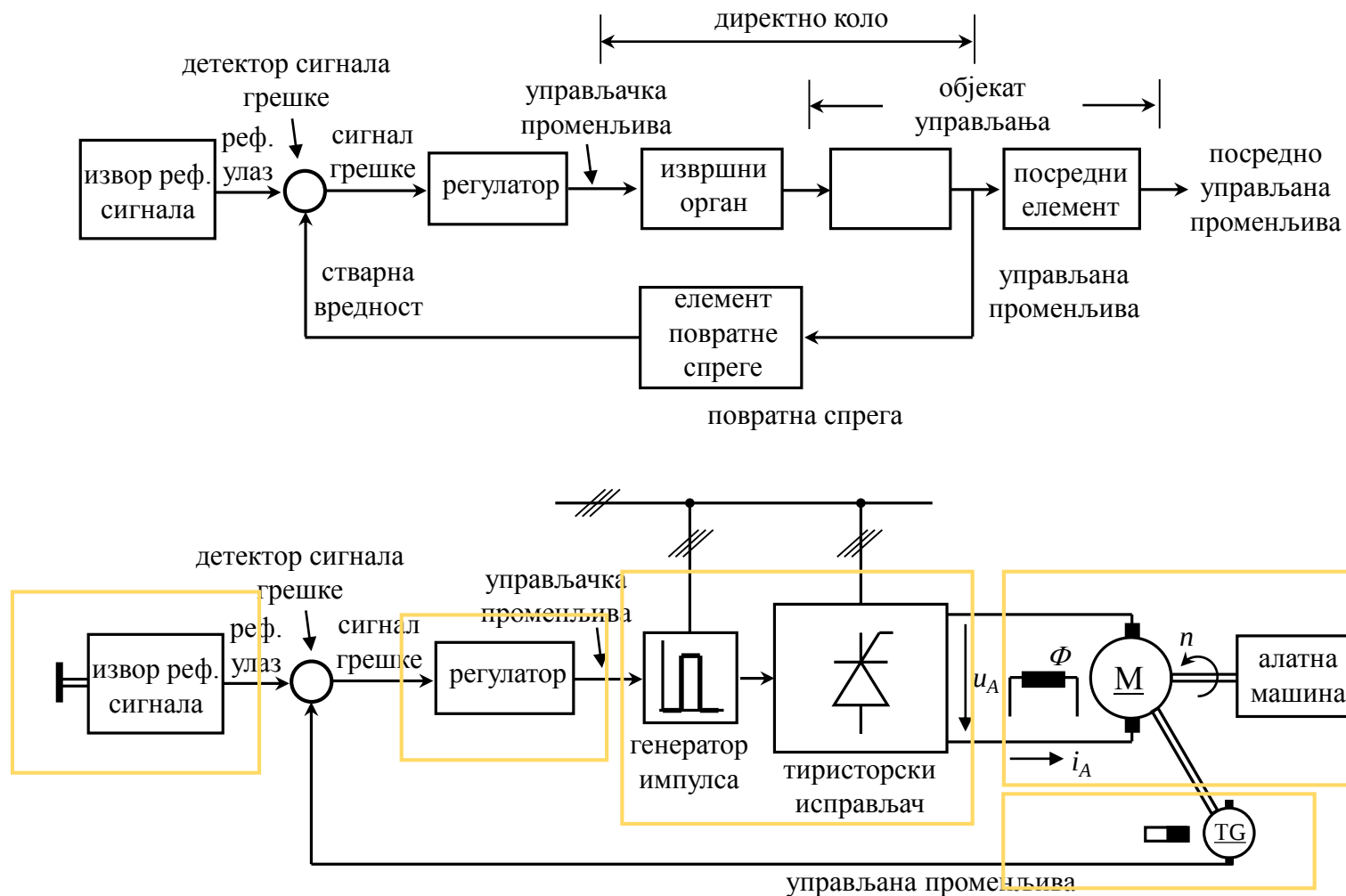
КОНТРОЛА ПРОЦЕСА

• ОТВОРЕНА СПРЕГА:

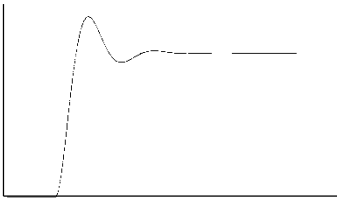
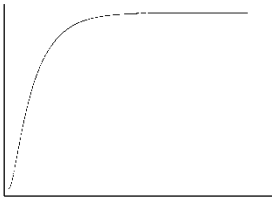
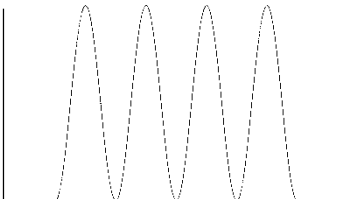
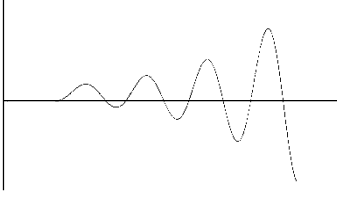
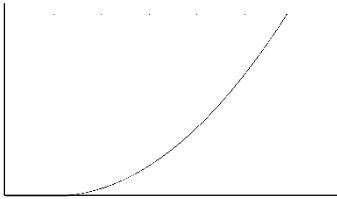


КОНТРОЛА ПРОЦЕСА

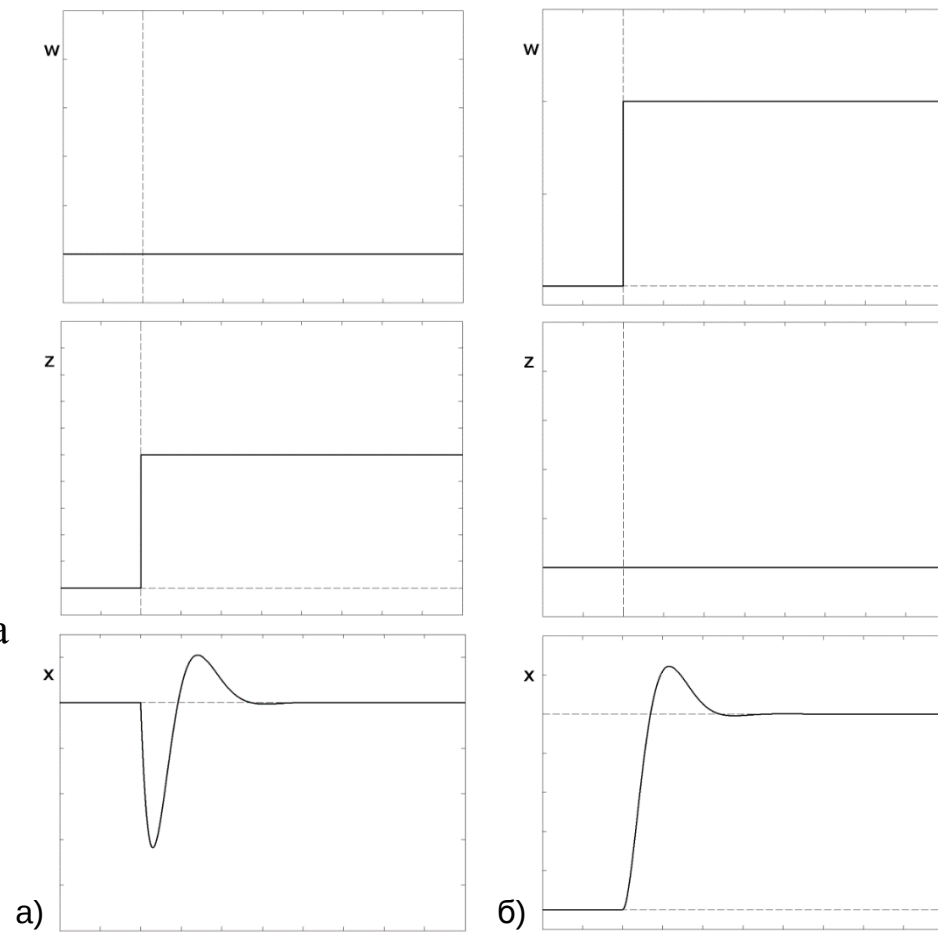
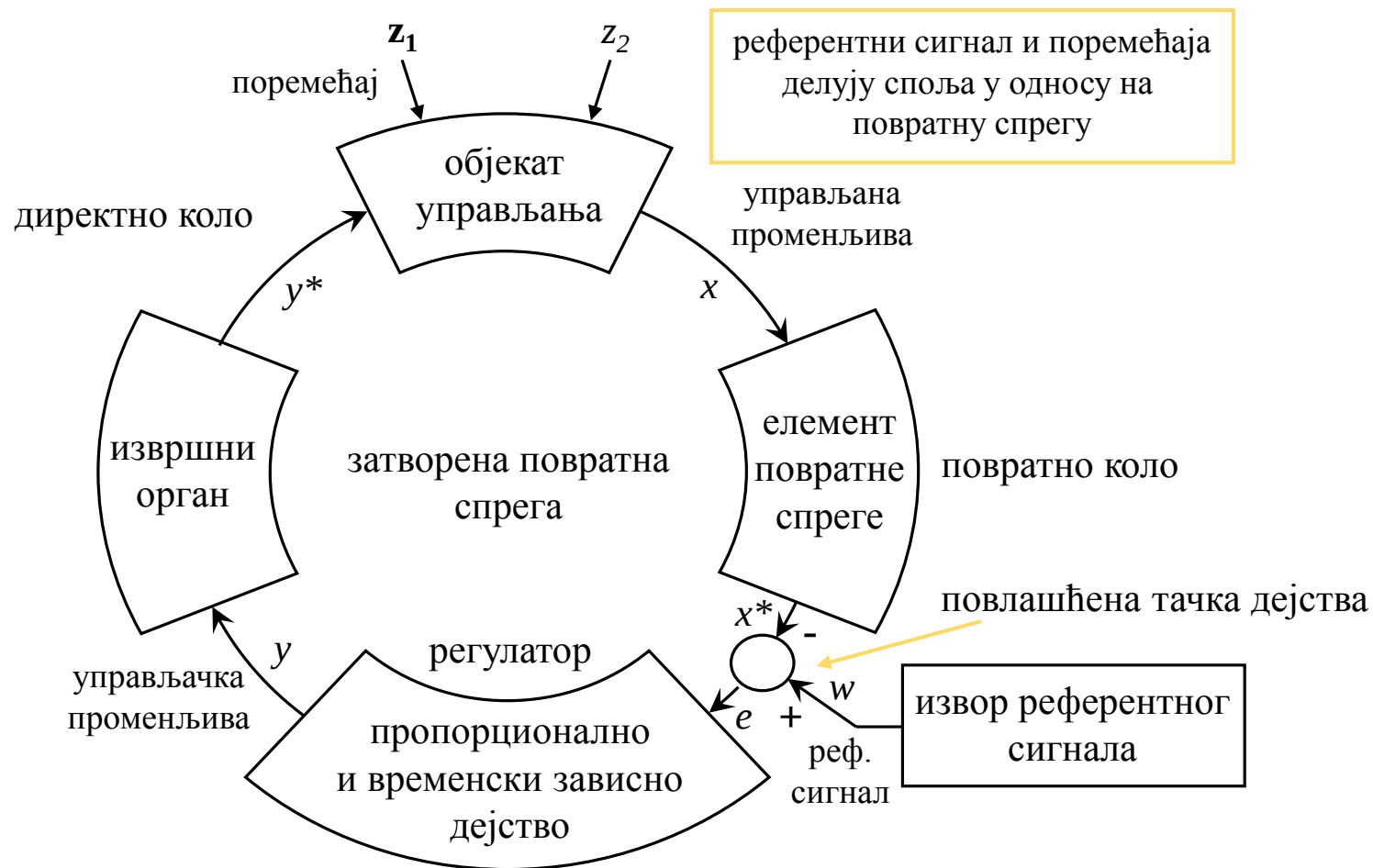
• ЗАТВОРЕНА СПРЕГА:



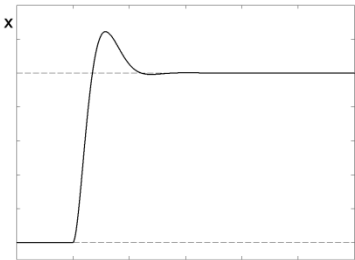
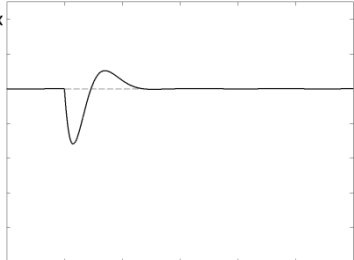
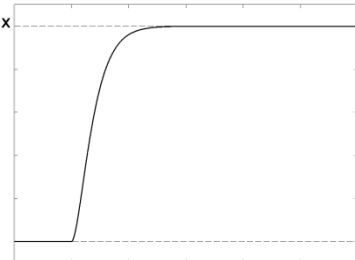
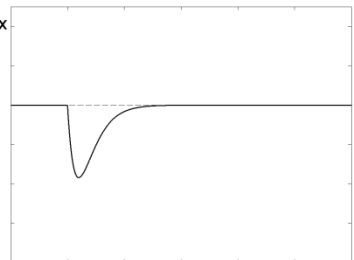
ОБЛИЦИ ПРЕЛАЗНОГ ПРОЦЕСА

одзив	псеудо-периодичан	апериодичан
стабилан		
на граници стабилности		
нестабилан		

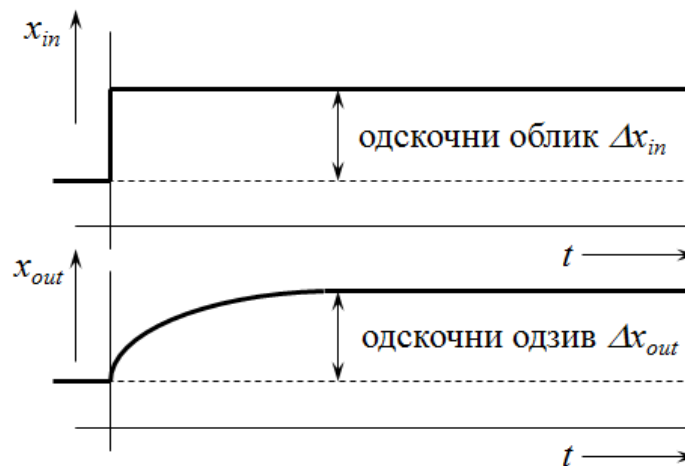
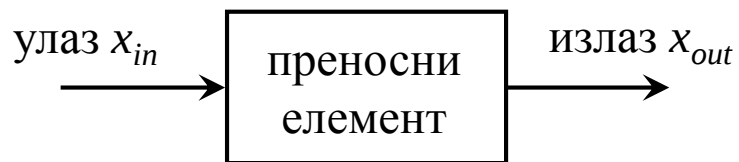
ПРИНЦИП ПОВРАТНЕ СПРЕГЕ



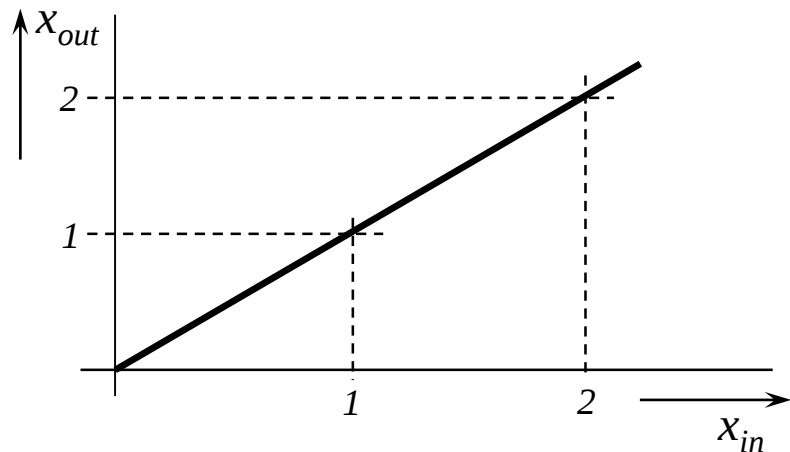
ДЕЈСТВО ЗАДАТЕ ВРЕДНОСТИ И ПОРЕМЕЋАЈА

прелазни процес у управљаној променљивој	при одскочној промени референце	при настанку поремећаја
псеудо-периодичан одзив		
апериодичан одзив		

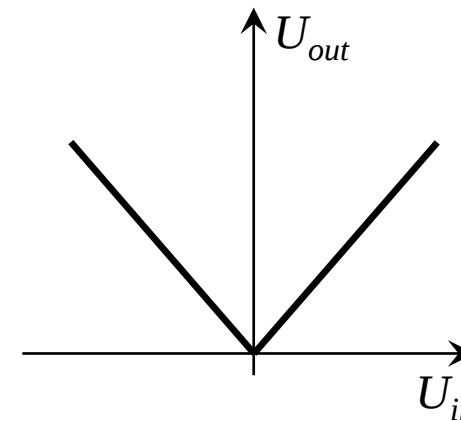
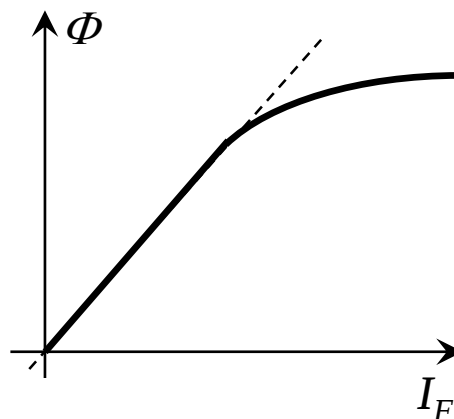
АНАЛИЗА СКЛОПА – ПРЕНОСНИ ЕЛЕМЕНТ



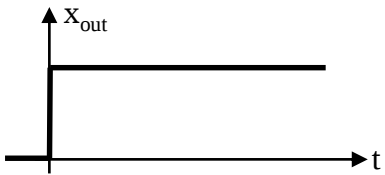
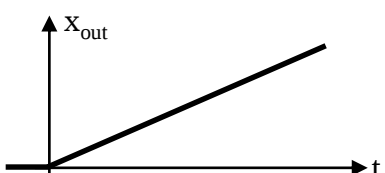
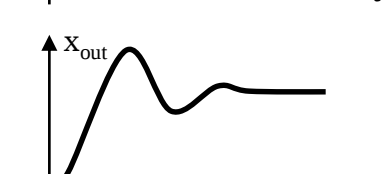
- линарни преносни елемент:



- нелинарни преносни елемент:

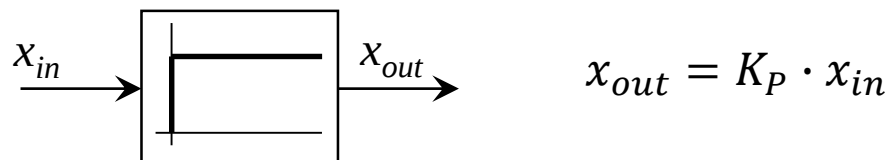


ЛИНЕАРНИ ПРЕНОСНИ ЕЛЕМЕНТИ

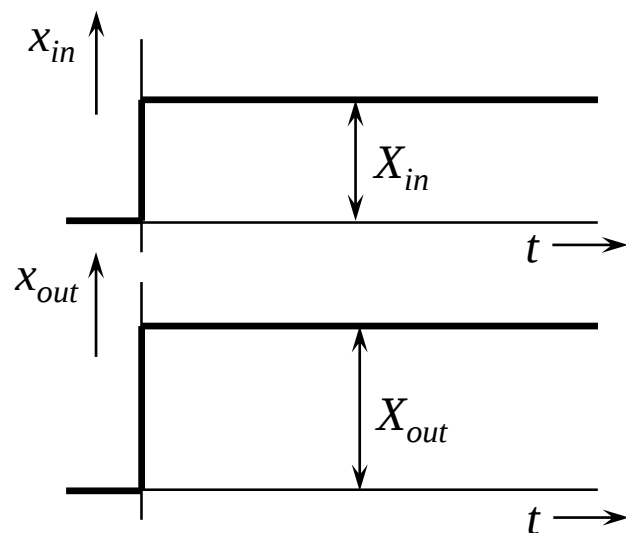
опис елемента	ознака	ОДСКОЧНИ ОДЗИВ	ОБЛИК ОДЗИВА x_{out}
пропорционални елемент	P		без временског кашњења и пропорционалан са x_{in}
интегрални елемент	I		временски интеграл x_{in}
елемент 1. реда	P-T ₁		пропорционалан са x_{in} али закашњен у облику функције 1. реда
елемент 2. реда	P-T ₂		пропорционалан са x_{in} али закашњен у облику апериодичне или псеудо- периодичне функције
кашњење	P-T _t		пропорционалан са x_{in} али закашњен за одређен временски интервал

ПРОПОРЦИОНАЛНИ ЕЛЕМЕНТ

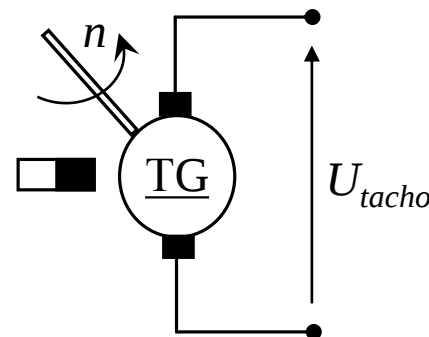
- ознака:



- ОДСКОЧНИ ОДЗИВ:



- пример - тахогенератор

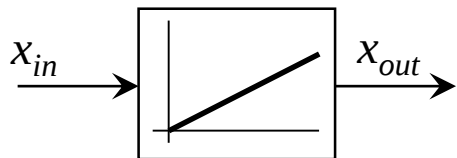


$$K_P = \frac{U_{tacho}}{n} = \frac{15V}{1000 \text{ o/min}} = 0,015 \frac{V}{\text{o/min}}$$

нема карактеристичних учестаности (полова/нула)

ИНТЕГРАЛНИ ЕЛЕМЕНТ

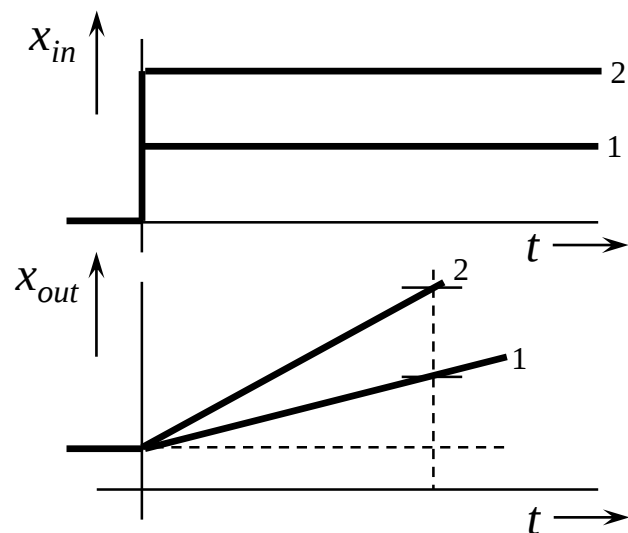
- ознака:



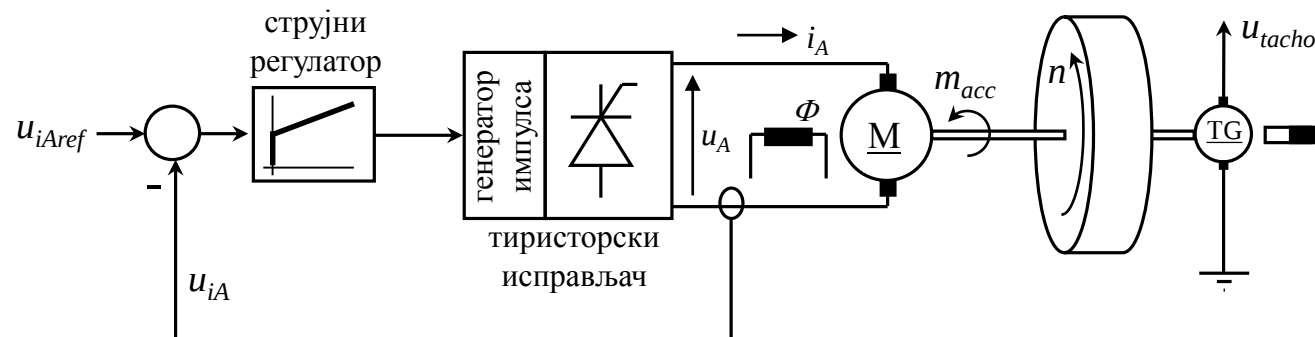
$$x_{out} = K_I \cdot \int_0^t x_{in}(\tau) \cdot d\tau + x_{out-0},$$

$$T_I = \frac{1}{K_I}$$

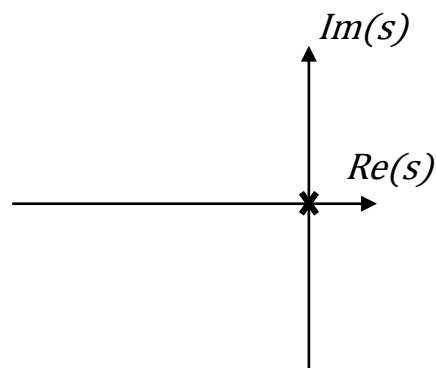
- ОДСКОЧНИ ОДЗИВ:



- пример – механички подсклоп машине



$$G_I(s) = \frac{1}{T_I} \cdot \frac{1}{s}$$



$$J \frac{d\omega}{dt} = m_{EL} - m_{MEH} \Rightarrow J \frac{\Delta\omega}{\Delta T} = m_{EL}$$

$$m_{EL} = \phi \cdot i_A$$

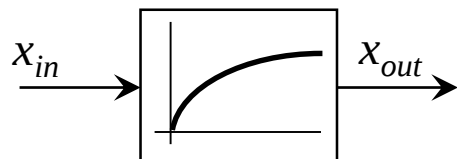
$$u_{tacho} = \omega \cdot K_{tacho}$$

$$u_{iA} = u_{iAref} = K_{SS} \cdot i_A$$

$$\Delta u_{tacho} = \frac{K_{tacho} \cdot \phi}{K_{SS} \cdot J} \cdot u_{iAref} \cdot \Delta T$$

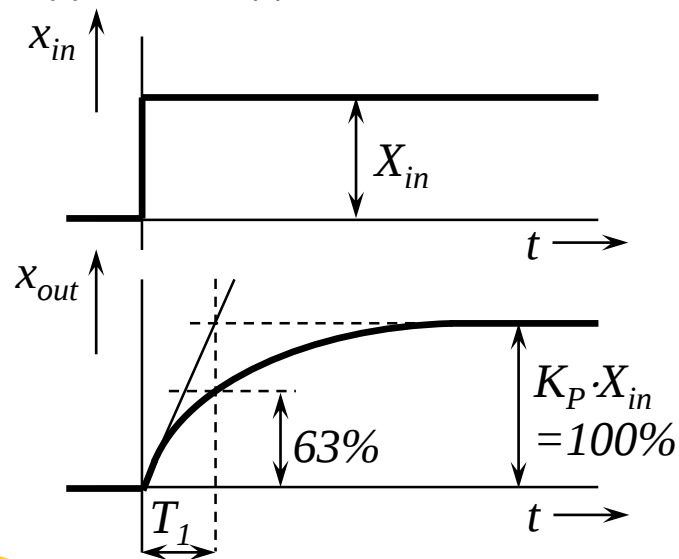
ЕЛЕМЕНТ 1. РЕДА

- ознака:

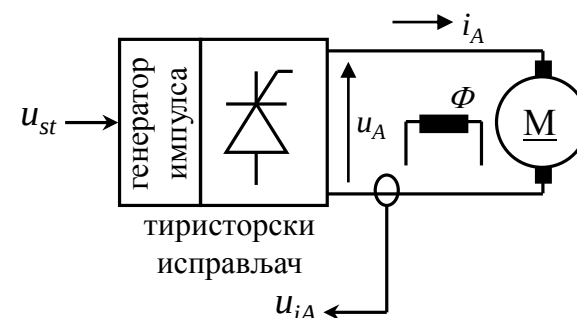


$$x_{out} = K_P \cdot x_{in} \cdot (1 - e^{-(t-t_0)/T_1})$$

- одскочни одзив:



- пример – струјни подсклоп машине



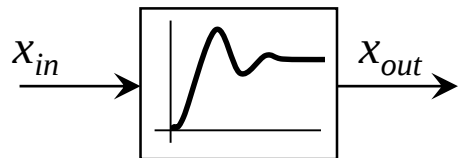
$$K_P = \frac{1}{R_A} \quad T_1 = \frac{L_A}{R_A}$$

- карактеристичне учестаности:

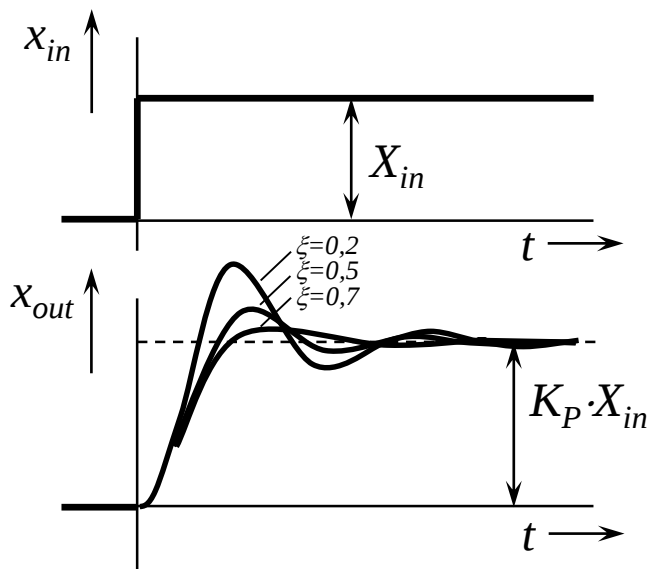
$$G_1(s) = \frac{K_P}{1 + s \cdot T_1}$$

ЕЛЕМЕНТ 2. РЕДА

- ознака:

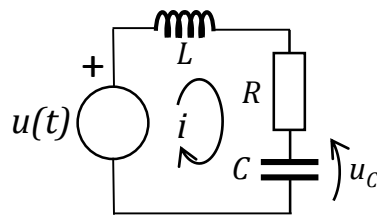


- ОДСКОЧНИ ОДЗИВ:



$$x_{out} = K_P \cdot X_{in} \cdot \left[1 + \frac{e^{-\xi \cdot \omega_n \cdot t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cdot \sin \left(\omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \cdot t - \psi \right) \right], \quad \xi = -\cos(\psi)$$

- пример – RLC коло

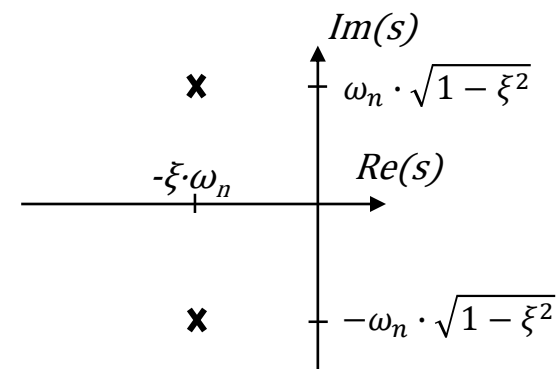


$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad \xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$u(t) = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + u_C \quad i(t) = C \cdot \frac{du_C}{dt}$$

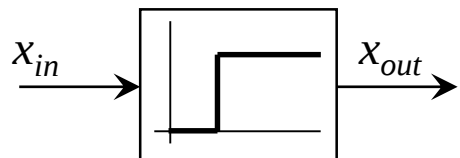
$$u(t) = R \cdot C \cdot \frac{du_C}{dt} + L \cdot C \cdot \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C$$

$$G_2(s) = K_P \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$$



ЕЛЕМЕНТ ВРЕМЕНСКОГ КАШЊЕЊА

- ознака:



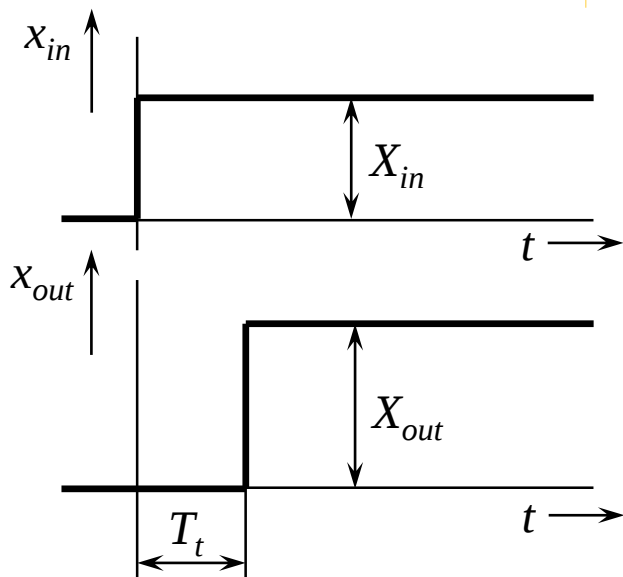
$$G_t(s) = K_P \cdot e^{j\omega \cdot T_t}$$

$\omega \cdot T_t$ - фазно кашњење

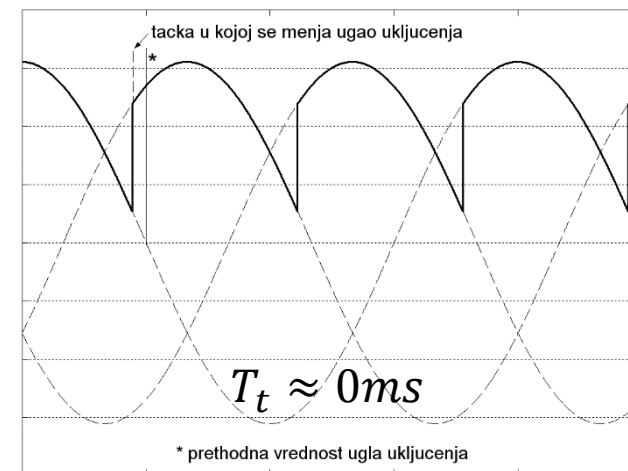
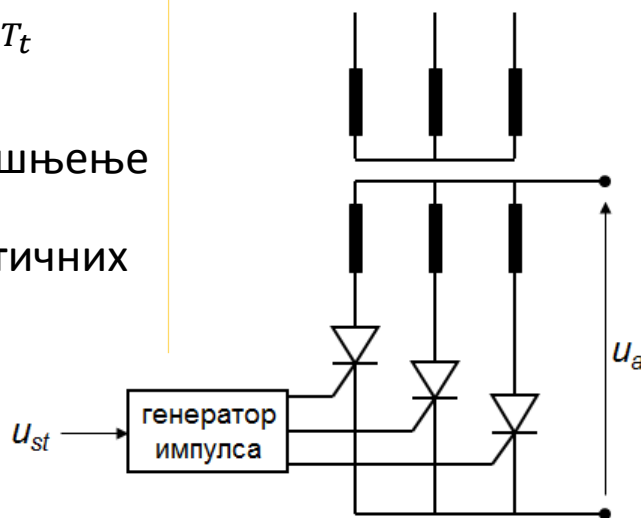
нема карактеристичних учестаности

$$x_{out} = K_P \cdot x_{in}(t - T_t)$$

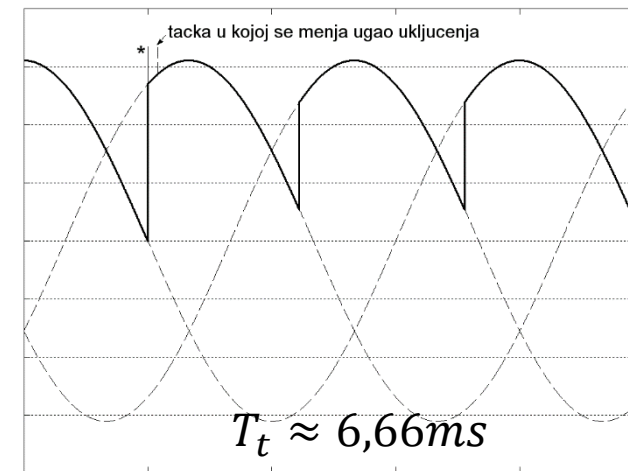
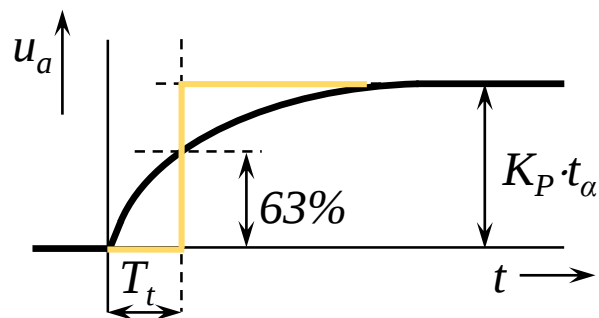
- одскочни одзив:



- пример – тропулсни тиристорски исправљач



- замена са елементом 1. реда



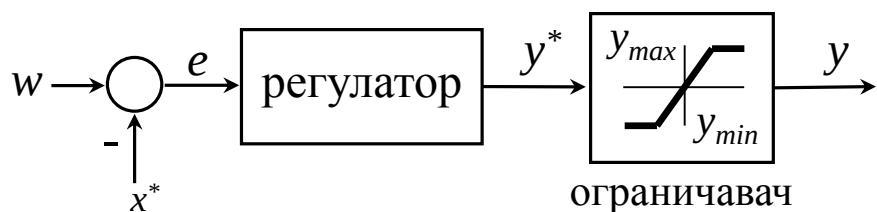
РЕГУЛАТОР - опште

- циљ дејства –

довести управљану променљиву на задату вредност:

- што пре
- што тачније
- са што мањим прескоком и што мање осцилација под дејством промене задате вредности и поремећаја

- поставка регулатора:

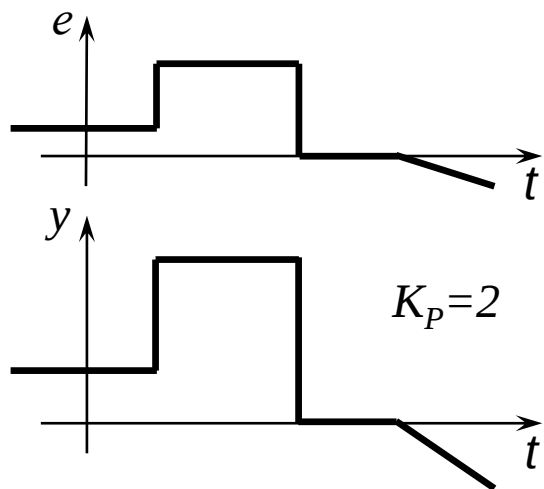


- врсте дејства регулатора:

дејство регулатора	одзив регулатора
P	
I	
PI	
PD	
PID	

ПРОПОРЦИОНАЛНИ РЕГУЛАТОР (P)

- брзина одзива:



тренутно делује на појаву грешке

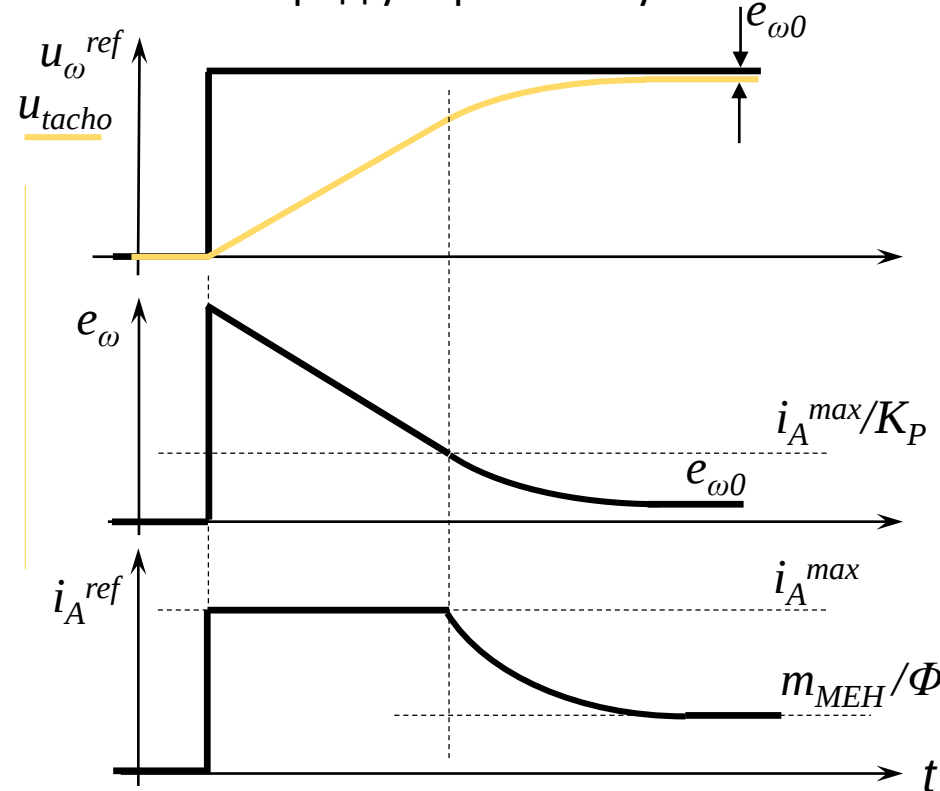
- тачност:

$$m_{MEH} = m_{EL} = \Phi \cdot i_A = \Phi \cdot i_A^{ref} =$$

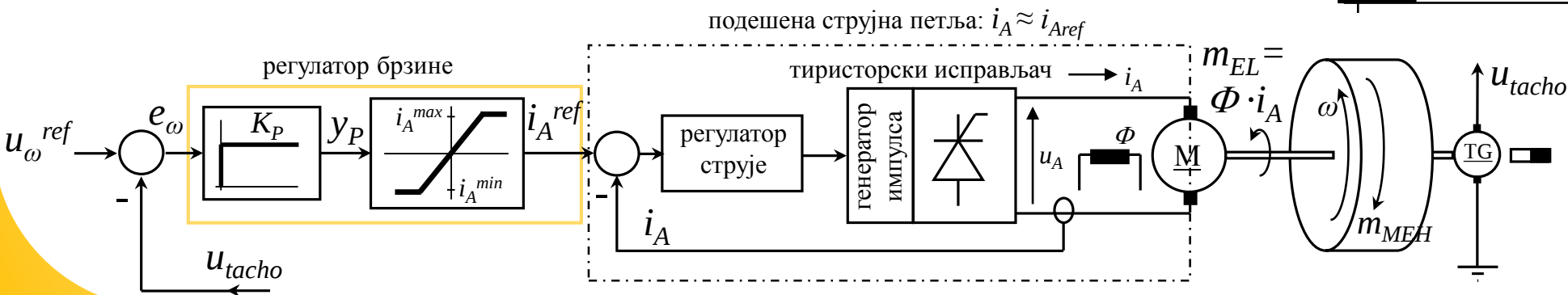
$$= \Phi \cdot K_P \cdot e_{\omega 0} \Rightarrow e_{\omega 0} = \frac{m_{MEH}}{\Phi \cdot K_P}$$

постоји ненулта грешка
устаљеног стања

- рад у ограничењу:



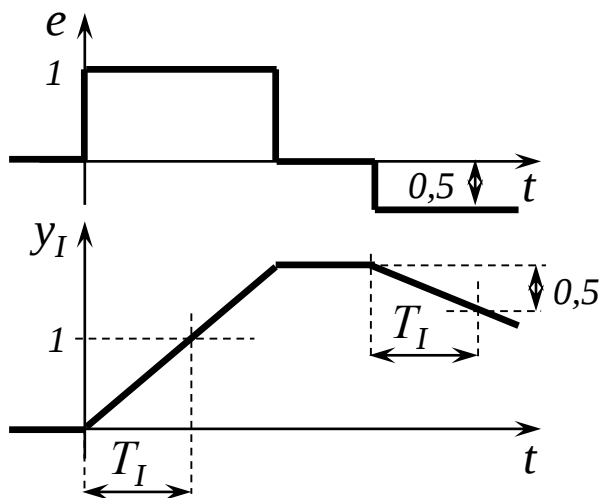
- окружење за испитивање тачности и рада у ограничењу:



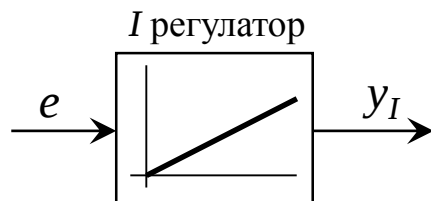
P рег. излази из ограничења
када грешка опадне на
довољно ниску вредност

ИНТЕГРАЛНИ РЕГУЛАТОР (I)

- брзина одзива:



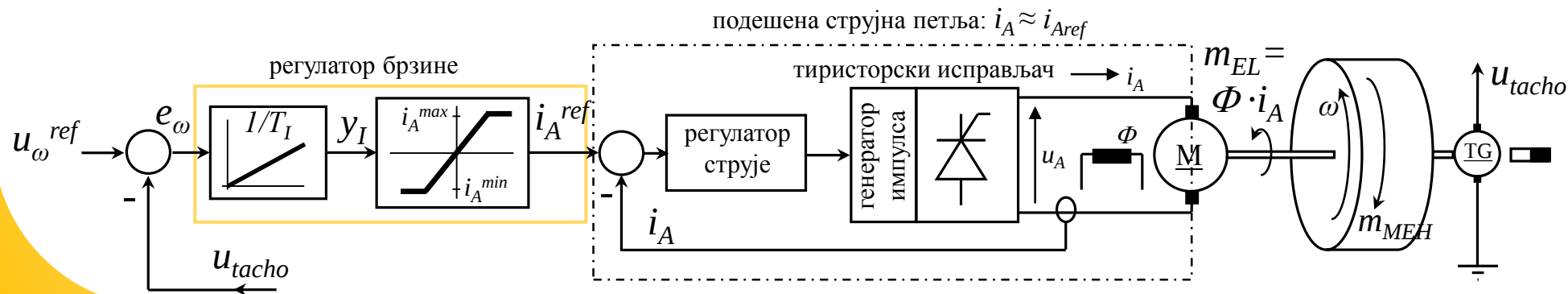
споро реагује на појаву грешке



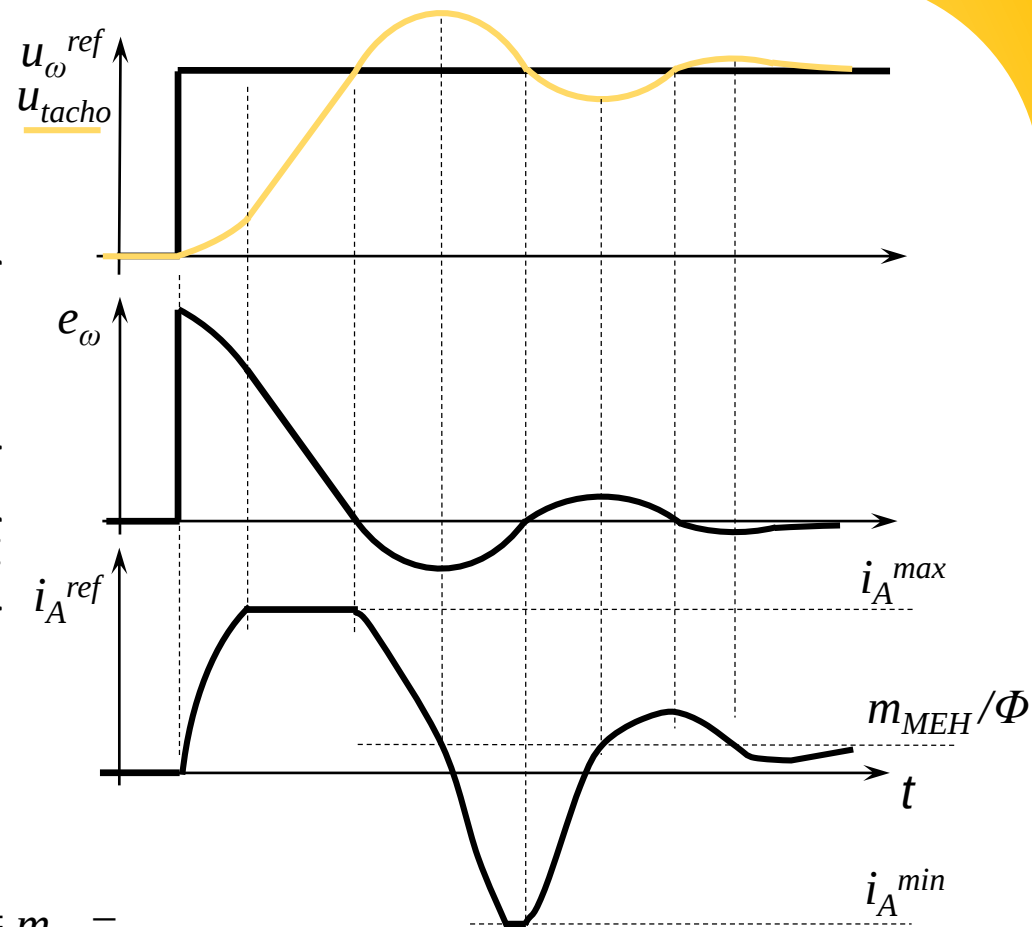
- тачност:

I дејство је у устаљеном стању када је $e=0 \Rightarrow$
I дејство обезбеђује нулту грешку устаљеног стања

- окружење за испитивање рада у ограничењу:



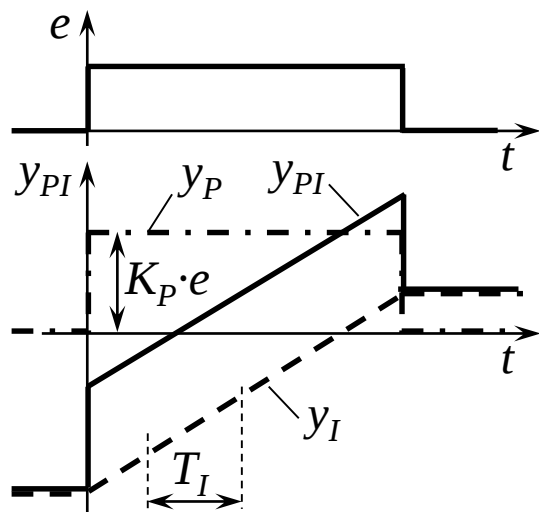
- рад у ограничењу:



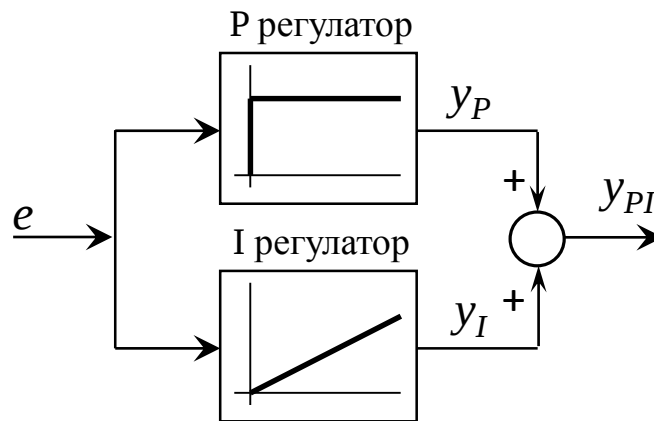
I рег. излази из ограничења када грешка промени знак; са смањењем оптерећења осцилације су наглашеније

ПРОПОРЦИОНАЛНО-ИНТЕГРАЛНИ РЕГУЛАТОР (PI)

- брзина одзива:



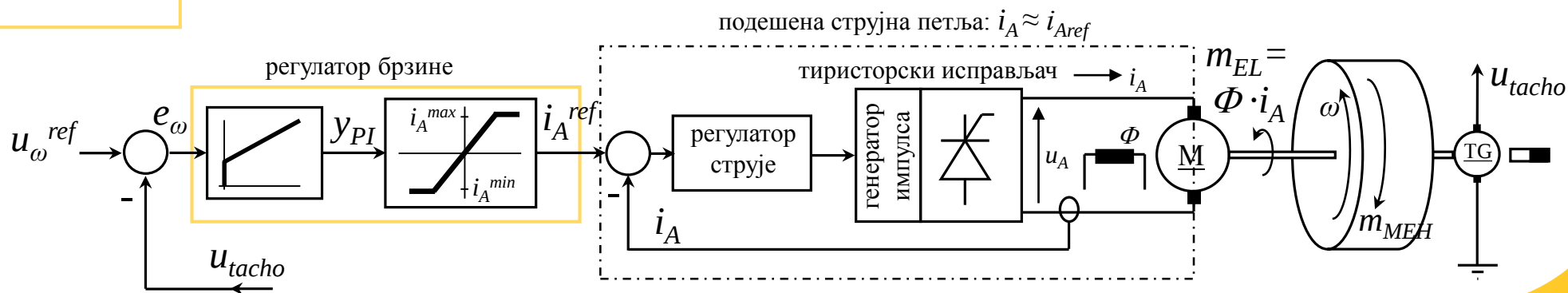
Р дејство тренутно делује на појаву грешке



- тачност:

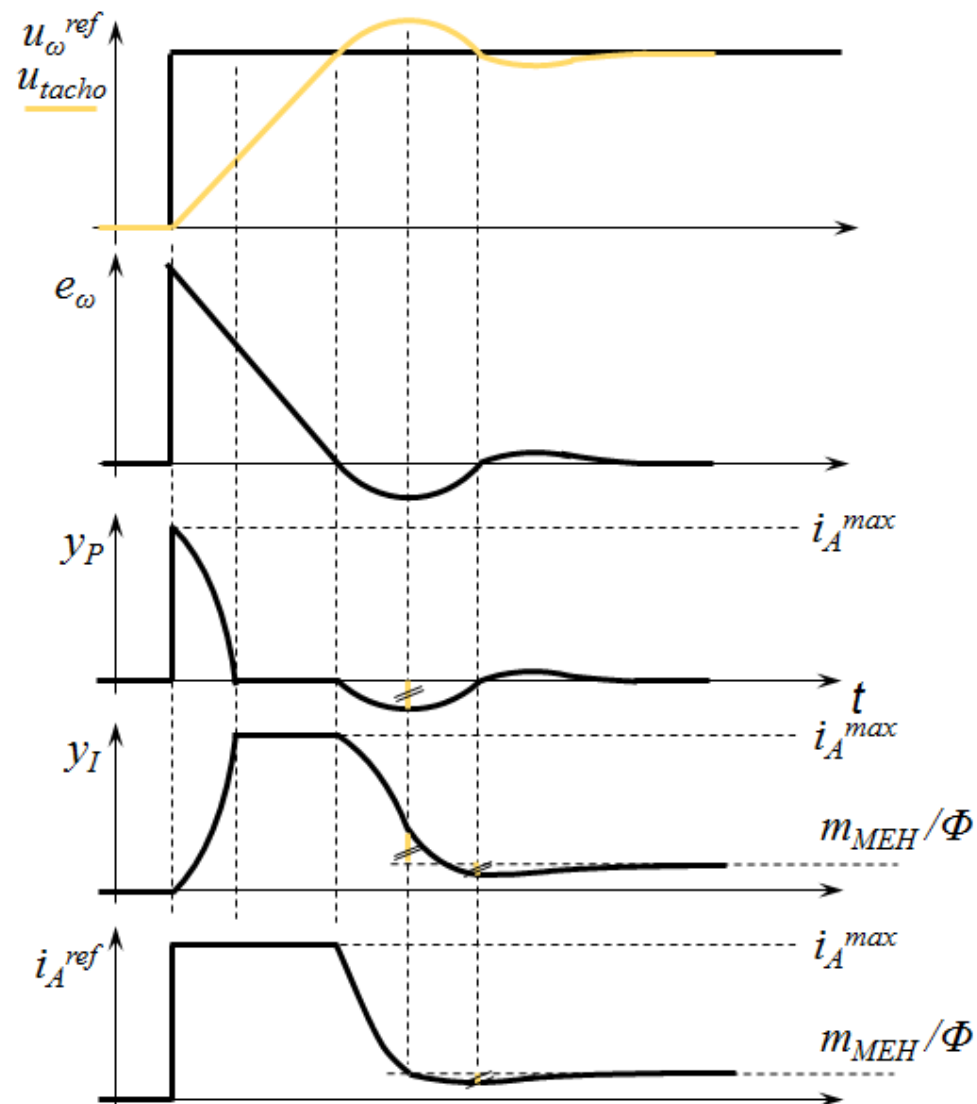
И дејство је у устаљеном стању када је $e=0 \Rightarrow$
И дејство обезбеђује нулту грешку устаљеног стања

- окружење за испитивање рада у ограничењу:



ПРОПОРЦИОНАЛНО-ИНТЕГРАЛНИ РЕГУЛАТОР (PI)

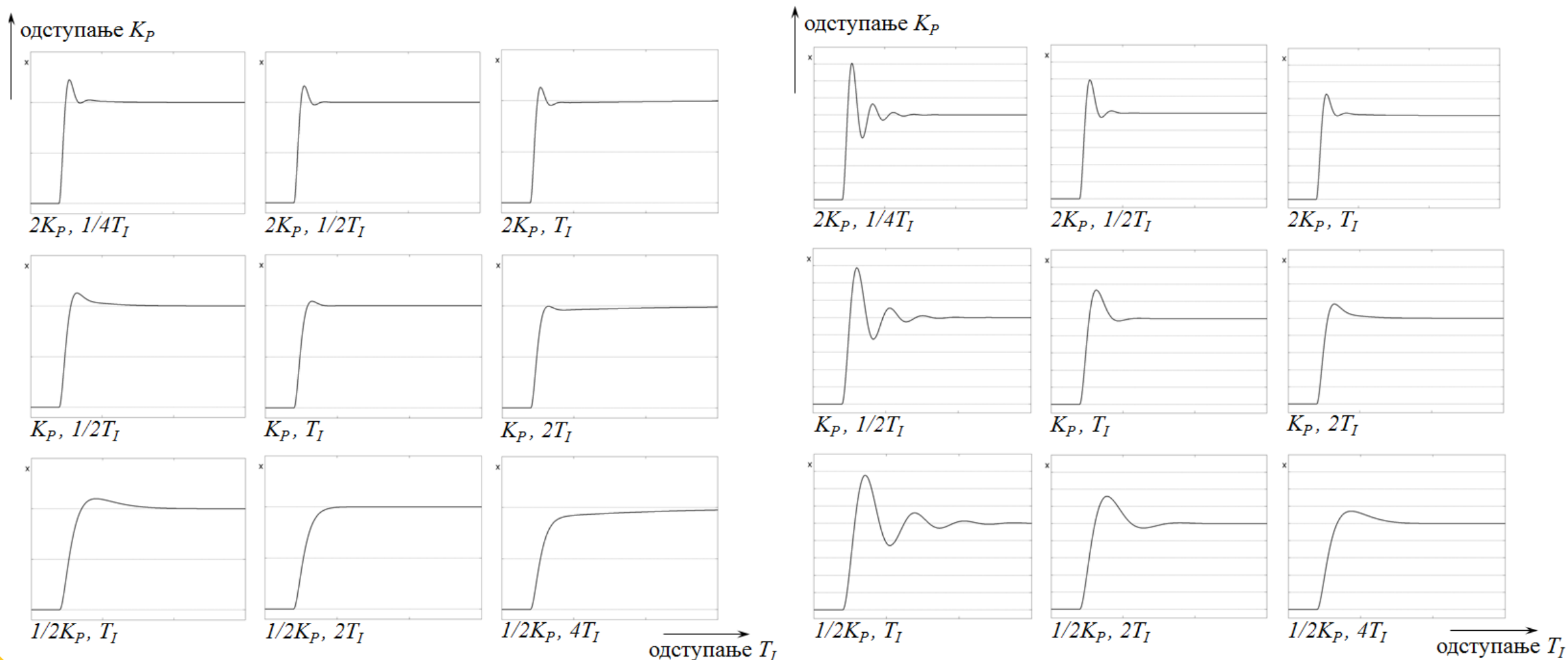
- рад у ограничењу:



регулатор излази из ограничења
када грешка промени знак (као
код I рег.), али P дејство
пригушује даље осцилације

ПРОПОРЦИОНАЛНО-ИНТЕГРАЛНИ РЕГУЛАТОР (PI)

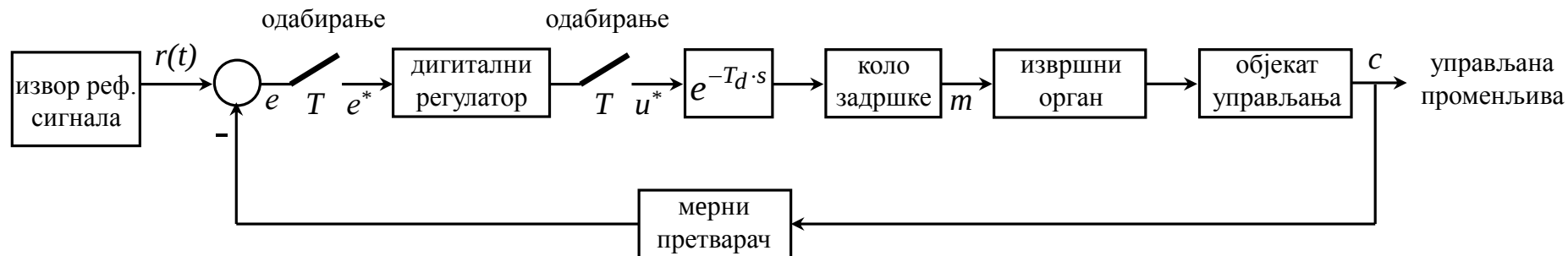
- утицај раздешености параметара регулатора на облик одскочног одзива



ОСНОВЕ ДИГИТАЛНОГ УПРАВЉАЊА

ДИГИТАЛНО УПРАВЉАЊЕ ПРОЦЕСОМ

- поставка управљања:



r – задата вредност

e^* – сигнал грешке у дигиталном облику

u^* – управљачка променљива у дигиталном облику

m – управљачка променљива у континуалном облику

c – управљана променљива

T – период одабирања; одабирање по времену

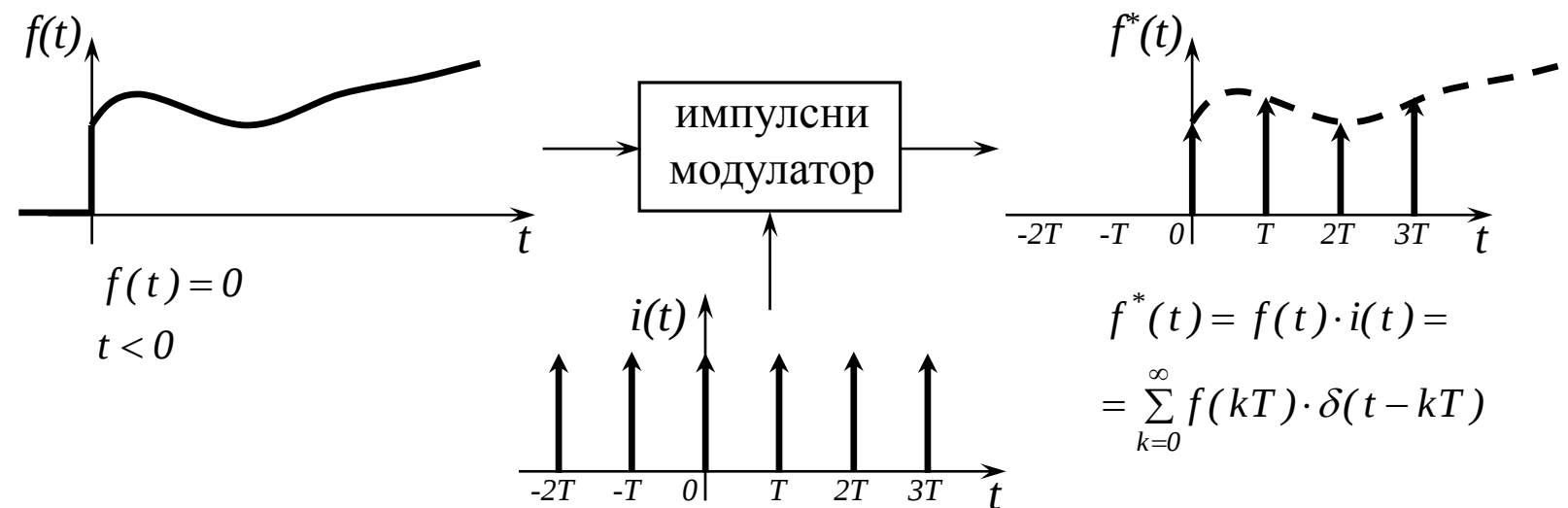
T_d – временско каашњење, време извршавања алгоритма управљања

- циљ дигиталног прављања:

1. смањење утицаја спољашњег зрачења (шума) на обраду сигнала у регулатору
2. једноставна изведба регулатора и алгоритма управљања
3. сагласност дигиталног управљања и прекидачког рада претварача E_e
4. једноставна измена алгоритма управљања
5. остваривање сложених алгоритама управљања
6. повезивање управљања различитих процеса
7. једноставно повезивање са дигиталним мерним претварачима

ОДАБИРАЊЕ

- поступак одабирања:



- математичка представа:

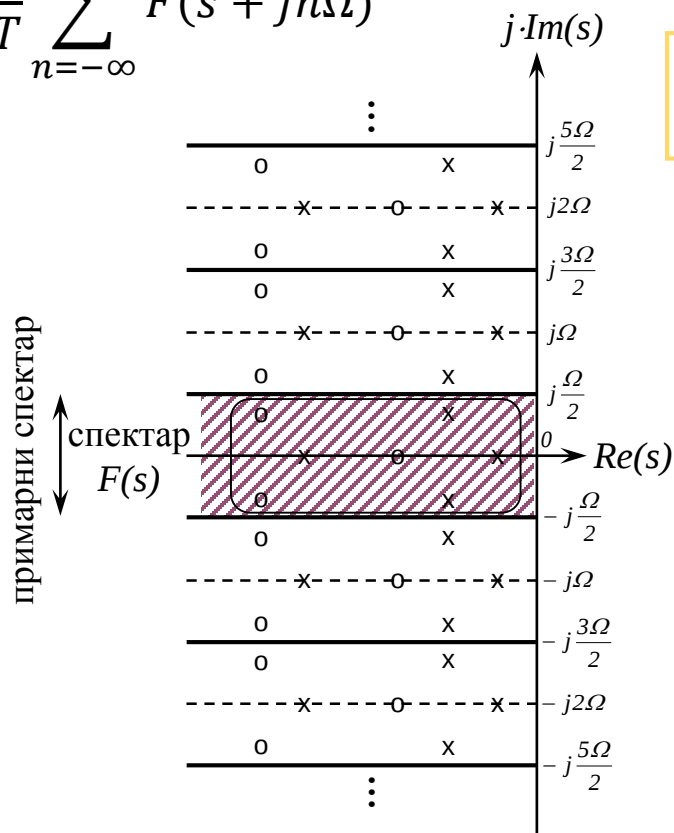
$$f(t)^* = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT) \cdot \delta(t - kT)$$

$$F(s)^* = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT) \cdot e^{-k \cdot T \cdot s}$$

ОДАБИРАЊЕ

- компласни лик поворке одбирака:

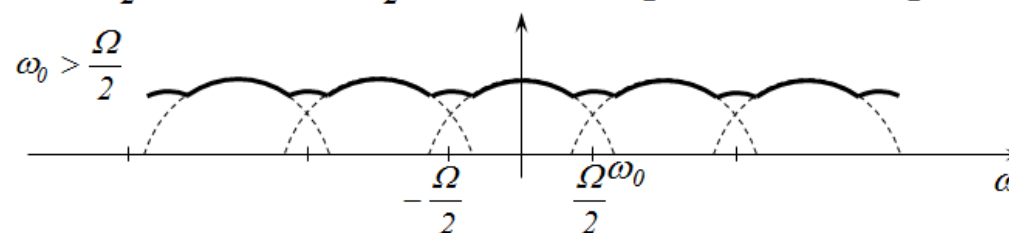
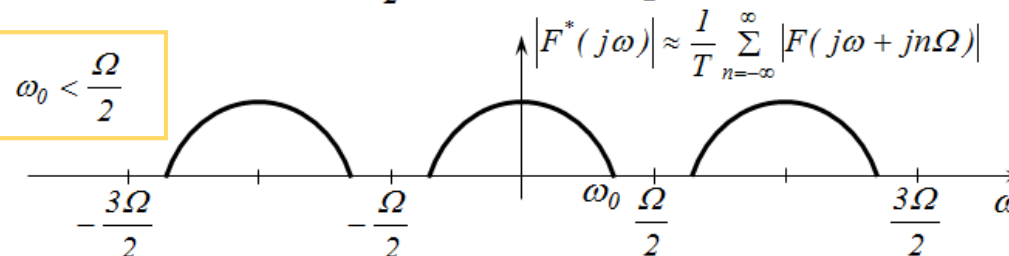
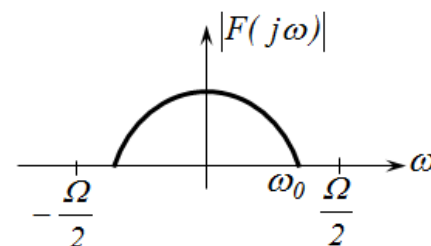
$$F^*(s) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(s + jn\Omega)$$



$\Omega = 2\pi/T$ – кружна учестаност одабирања

анализа и синтеза регулатора немогућа применом алата везаних за комплексни $-s$ домен

- фреквенцијски спектар поворке одбирака:

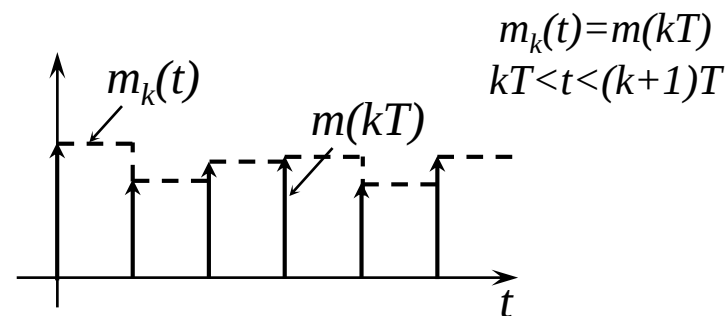


ω_0 – гранична учестаност континуалног сигнала

Никвистов критеријум: $T < \frac{\pi}{\omega_0}$

ЗАДРШКА

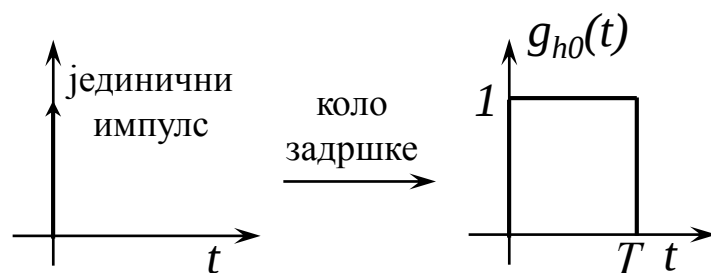
- задршка нултог реда:



$m(kT)$ – одбирок сигнала управљачке променљиве

$m_k(t)$ – управљачка променљива у континуалном облику

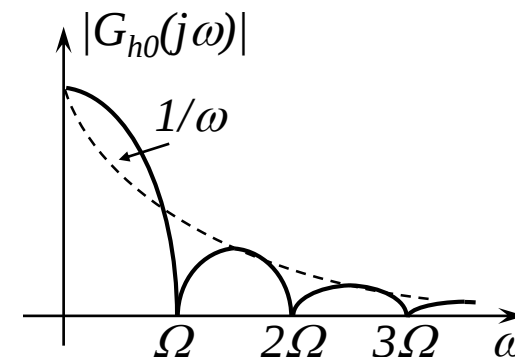
- јединични импулсни одзив



$$g_{h0}(t) = h(t) - h(t - T)$$

$$G_{h0}(s) = \frac{1 - e^{-s \cdot T}}{s}$$

- фреквенцијска карактеристика



Z – ТРАНСФОРМАЦИЈА

- дефиниција: $z = e^{s \cdot T}$

- одређивање z комплексног лика $F(s)$:
$$F(z) = \sum_{s_i} \lim_{s \rightarrow s_i} \frac{1}{(m-1)!} \frac{d^{m-1}}{ds^{m-1}} \left\{ (s - s_i)^m \cdot F(s) \cdot \frac{z}{z - e^{s \cdot T}} \right\}$$

 s_i – пол од $F(s)$; m – вишеструкост пола s_i

- пример одређивања $F(z)$:

коло задршке + струјни подсклоп машине:
$$F(s) = \frac{1 - e^{-s \cdot T}}{s} \cdot \frac{1/R_A}{1 + s \cdot T_A}$$

$$F(z) = \frac{1}{R_A} (1 - z^{-1}) \cdot \left[\lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{T_A} \cdot \frac{1}{s + 1/T_A} \cdot \frac{z}{z - e^{s \cdot T}} + \lim_{s \rightarrow -1/T_A} \frac{1}{T_A} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{z}{z - e^{s \cdot T}} \right] = \frac{1}{R_A} \cdot \frac{1 - e^{-T/T_A}}{z - e^{-T/T_A}}$$

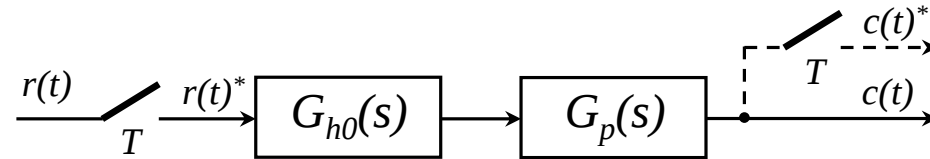
- особина z трансформације: $Z\{f(t - n \cdot T)\} = z^{-n} \cdot F(z)$
- $$F(s) = \frac{1 - e^{-s \cdot T}}{s} \cdot \frac{1/R_A}{1 + s \cdot T_A}$$

ЗАДАТАК: одредити z комплексни лик континуалног дела који садржи коло задршке и механички подсклоп машине ($F(s) = \frac{1 - e^{-s \cdot T}}{s} \cdot \frac{1}{J \cdot s}$)

ПРИМЕНА Z – ТРАНСФОРМАЦИЈЕ

- функција дискретног преноса:

посматрање континуалног дела рег. петље када је ња њен улаз доведен дискретан сигнал:

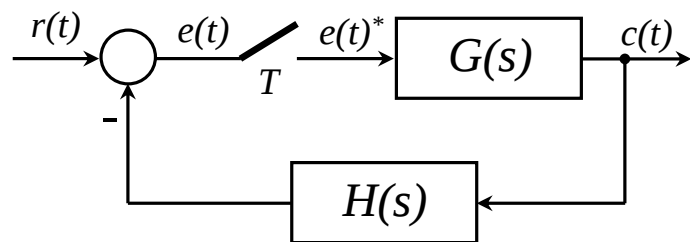


$$C(s) = G_{h0}(s) \cdot G_p(s) \cdot R^*(s)$$

$$C^*(s) = [G_{h0}(s) \cdot G_p(s)]^* \cdot R^*(s) \leftarrow \text{посматрају се вредности } c(t) \text{ у тренуцима } t=kT$$

$$\Rightarrow C(z) = Z\{G_{h0}(s) \cdot G_p(s)\} \cdot R(z)$$

- пример примене:



$$E(s) = R(s) - G(s) \cdot H(s) \cdot E^*(s)$$

$$E^*(s) = R^*(s) - \{G(s) \cdot H(s)\}^* \cdot E^*(s) = \frac{1}{1 + \{G(s) \cdot H(s)\}^*} R^*(s)$$

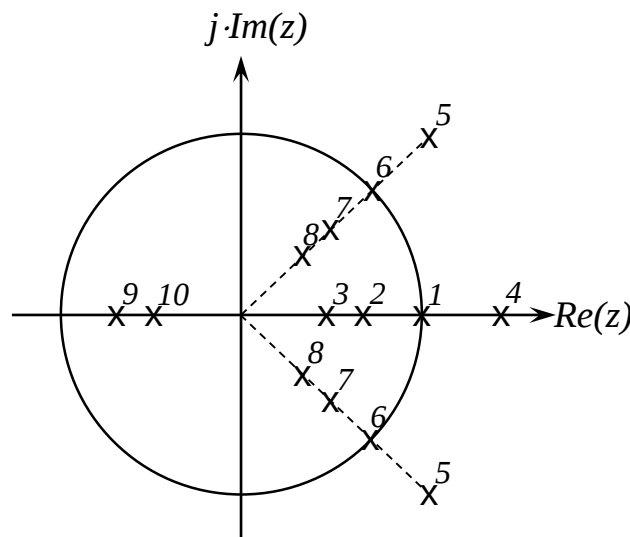
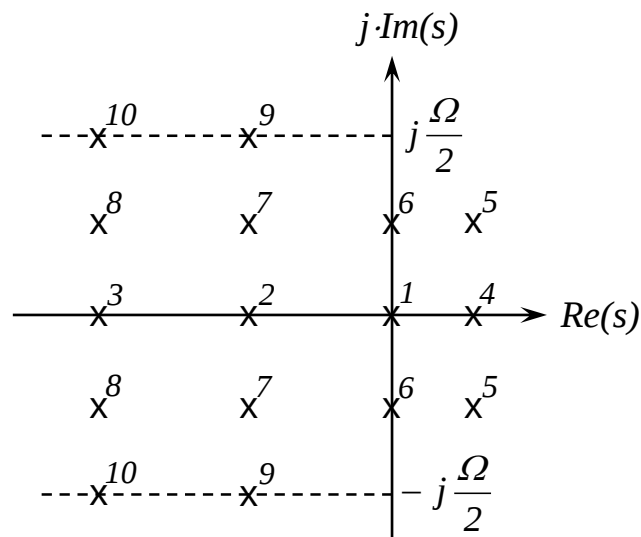
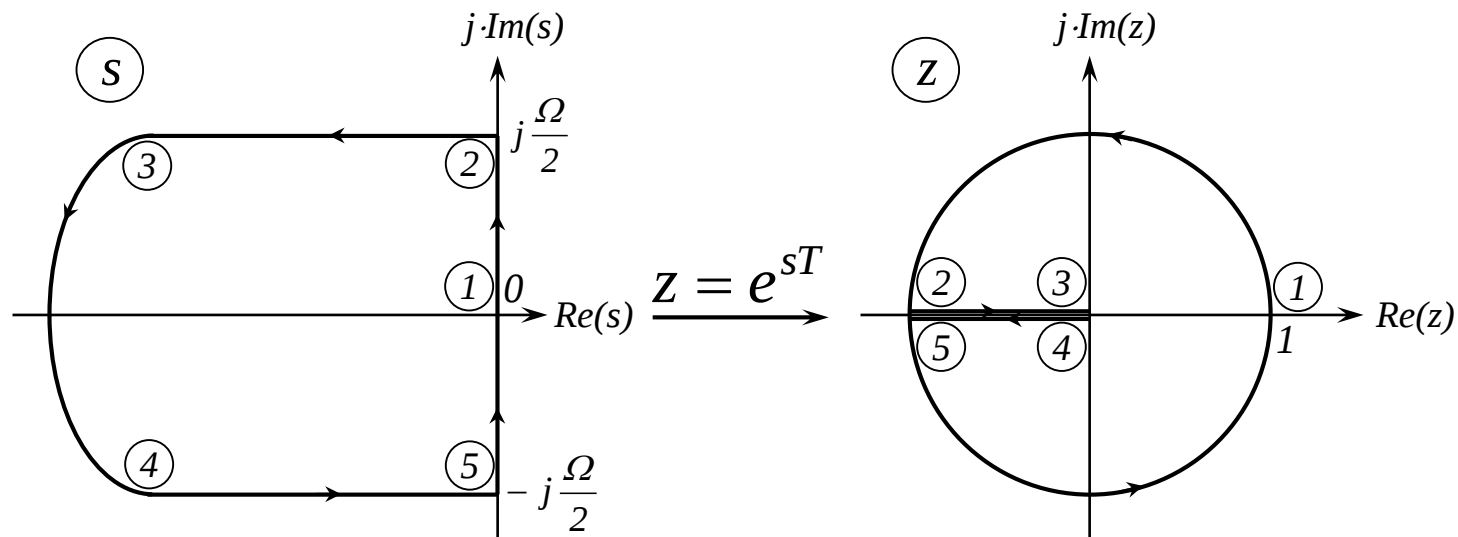
$$C(s) = G(s) \cdot E^*(s)$$

$$C^*(s) = G^*(s) \cdot E^*(s) = \frac{G^*(s)}{1 + \{G(s) \cdot H(s)\}^*} R^*(s)$$

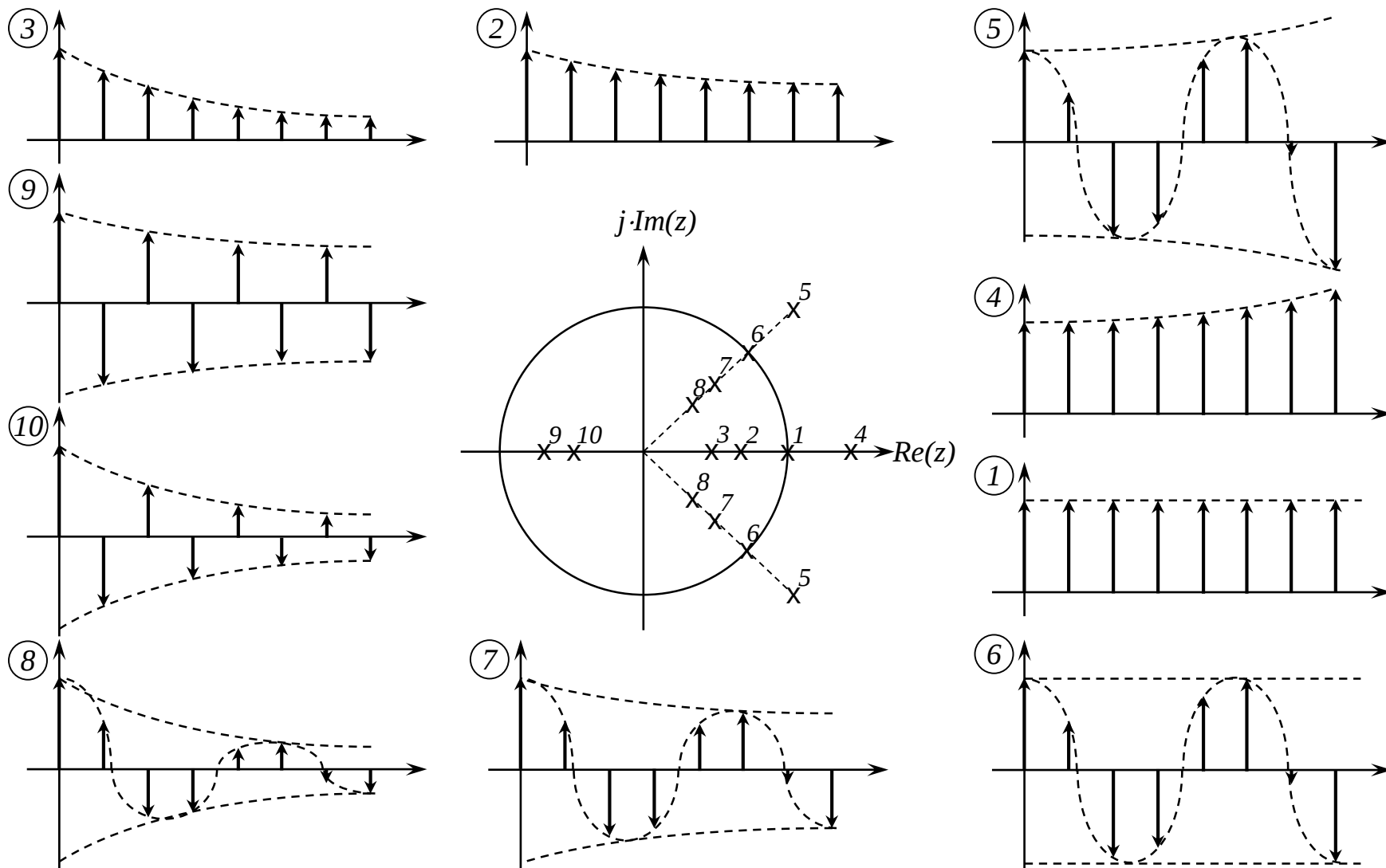
$$\vee C(z) = \frac{G(z)}{1 + GH(z)} R(z)$$

ПРЕСЛИКАВАЊЕ ИЗ S- У Z- РАВАН

- пресликавање примарне и свих комплементарних појаса из s у z :
- пресликавање карактеристичних учестаности $G(s)$ у $G(z)$:



ДИСКРЕТНИ ИМПУЛСНИ ОДЗИВ ПОЛОВА У Z- РАВНИ



ИЗБОР ПЕРИОДЕ ОДАБИРАЊА

• захтеви:

1. испуњење Никвистовог критеријума: $T < \frac{\text{најмања временска константа}}{2}$

2. праћење динамике објекта управљања:

- ако је f_0 пропусни опсег склопа у отвореној спрези (или је T_0 временска константа отворене спреге)
- сматра се да се брзина одзива може повећати $3 \div 5$ пута, а да при томе опсег промене управљачке променљиве остане у прихватљивом опсегу

$$\Rightarrow T = \frac{1}{2 \cdot (3 \div 5) \cdot f_0} \text{ или } T = \frac{T_0}{2 \cdot (3 \div 5)}$$

3. могућност реаговања на поремећај:

- ако поремећај делује у опсегу учестаности $\omega_1 < \omega < \omega_2 \Rightarrow T = \frac{\pi}{\omega_2}$

4. усклађеност са радом претварача:

- претварачи енергетске електронике одређују периоду одабирања својом периодом прекидања (нпр. 3-фазни тиристорски исправљач – $3,33ms$, претварачи засновани на $IGBT$ -у - $100\mu s$)

5. рад у стварном времену: $T > T_d$ (T_d време потребно за извршење алгоритма управљања)

ФУНКЦИЈА ПРЕНОСА PI РЕГУЛАТОРА

- континуални PI регулатор у временском домену: $u(t) = K_P \cdot e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau$
- дигитални PI регулатор у временском домену: $u(k) = K_P \cdot e(k) + \frac{T}{T_I} \cdot \sum_{m=0}^k e(m)$
- дигитални PI регулатор у комплексном домену: $U(z) = (K_P + \frac{T}{T_I} \cdot \frac{1}{1-z^{-1}})$

доказ:

$$u(k-1) = K_P \cdot e(k-1) + \frac{T}{T_I} \cdot \sum_{m=0}^{k-1} e(m)$$

$$u(k) - u(k-1) = K_P \cdot [e(k) - e(k-1)] + \frac{T}{T_I} \cdot e(k)$$

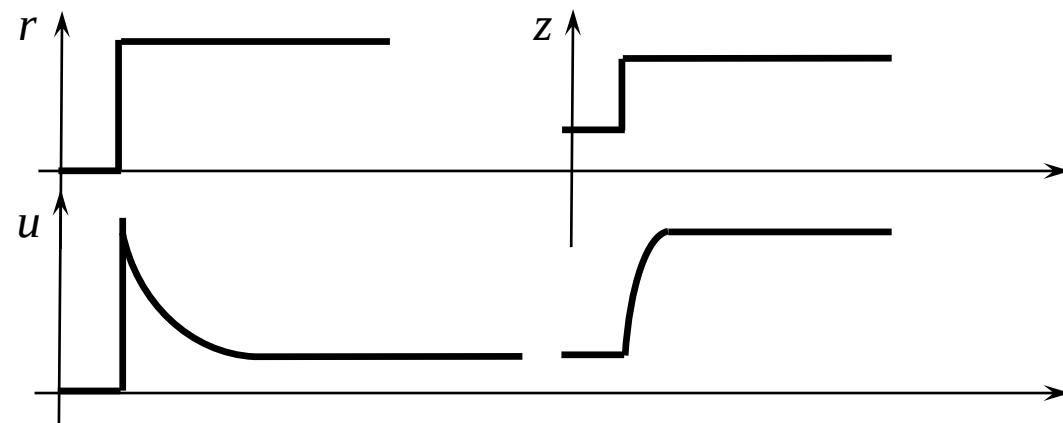
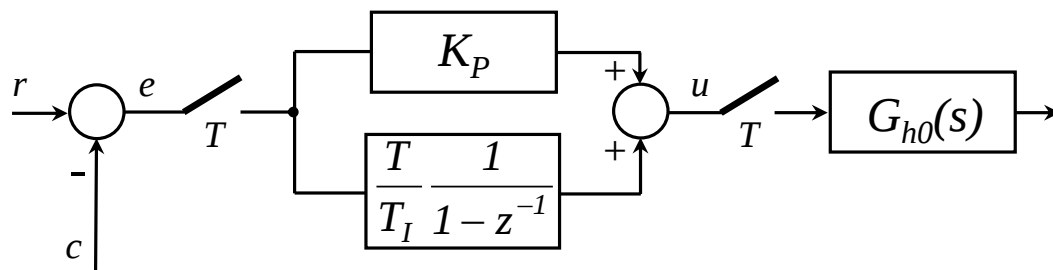
$$U(z)(1 - z^{-1}) = K_P \cdot [1 - z^{-1}] \cdot E(z) + \frac{T}{T_I} \cdot E(z)$$

$$U(z) = K_P \cdot E(z) + \boxed{\frac{T}{T_I} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1}}} E(z)$$

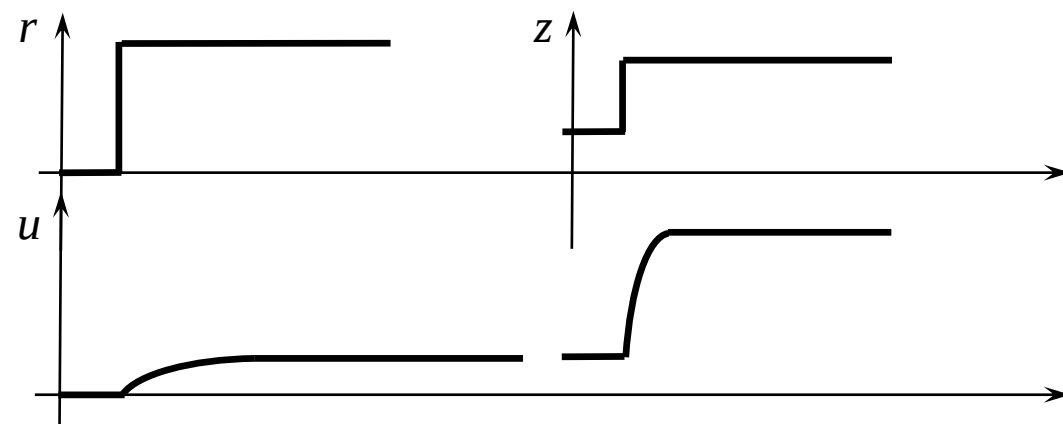
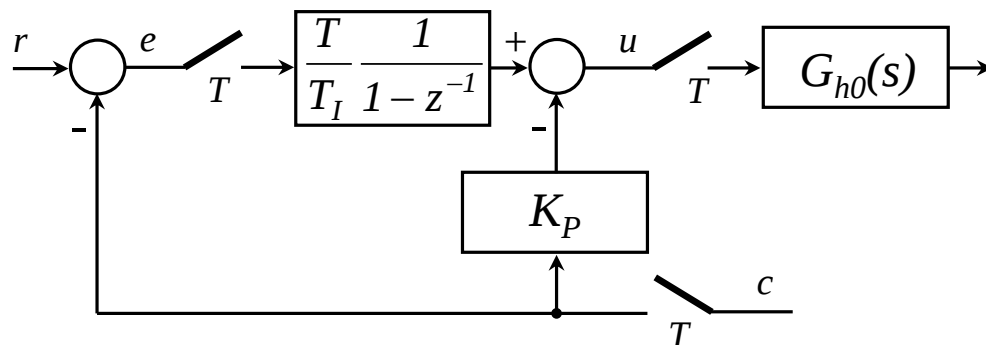
дигитални интегратор

ПОСТАВКА PI РЕГУЛАТОРА

- P дејство у директној грани:

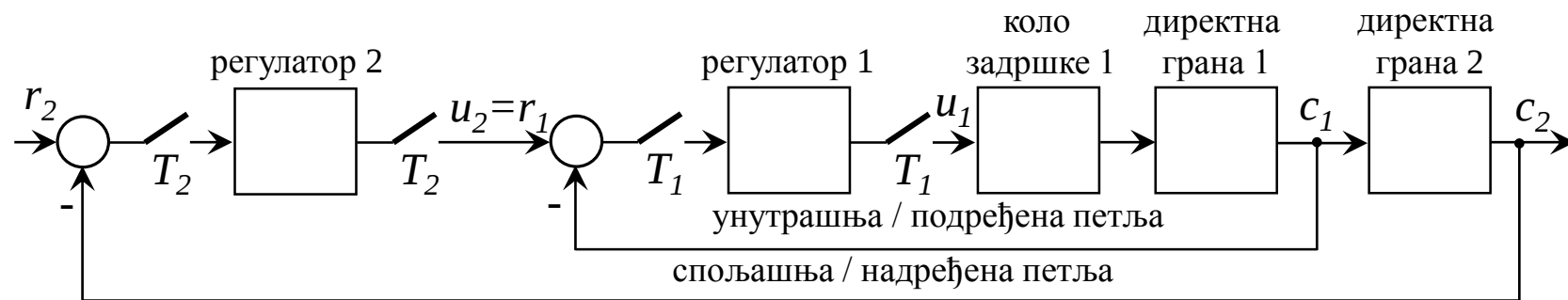


- P дејство измештено у локалну повратну грану:



одстрањен диференцијални одзив на појави поремећаја
 скок у $u(t)$ при наглој $z(t)$ је непромењен
 промени $r(t)$

КАСКАДНА ПОСТАВКА РЕГУЛАЦИЈЕ ПРОЦЕСА

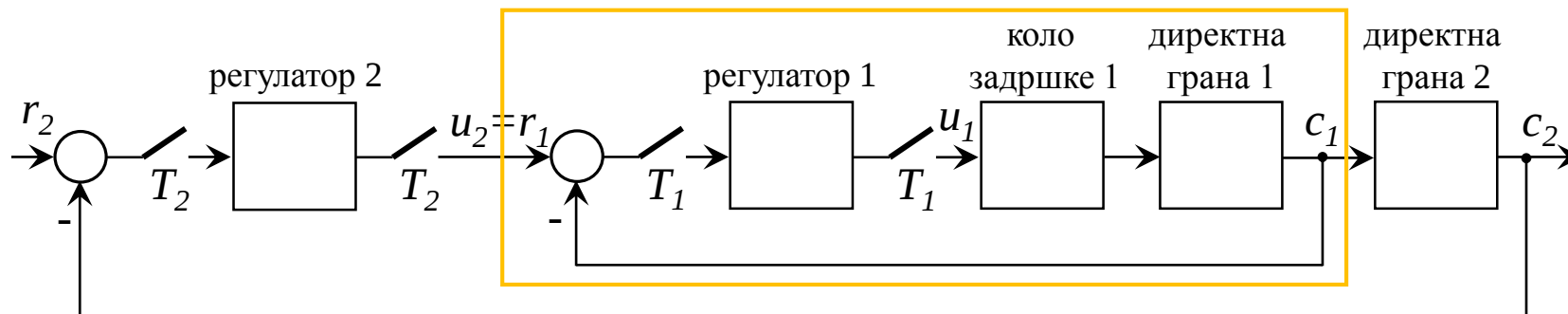


услов:
динамика унутрашње петље > 5 х бржа
од динамике спољашње петље;
 $T_2 > 5 \times T_1$

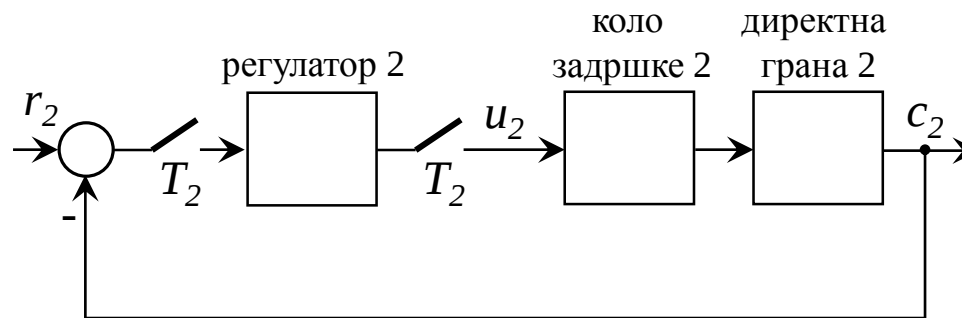
- прорачун регулатора:

подешена унутрашња петља $\equiv$ коло задршке за спољашњу петљу

1. корак = прорачун регулатора унутрашње петље

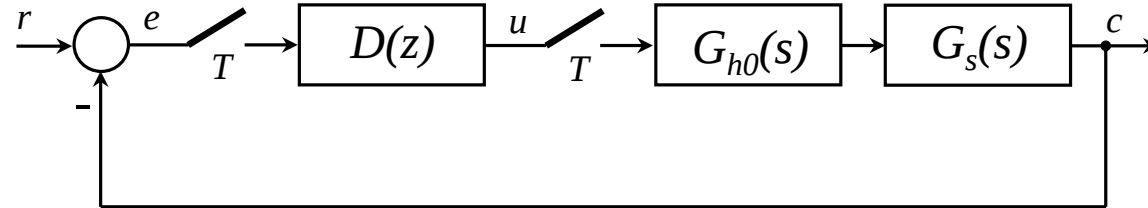


2. корак = замена унутрашње петље колом задршке и прорачун регулатора спољашње петље

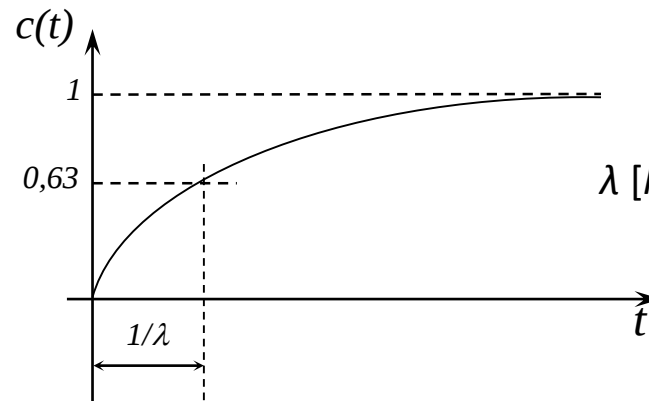


ДАЛИНОВ ПОСТУПАК ПРОРАЧУНА РЕГУЛАТОРА

- поставка петље:



- очекивани облик одскочног одзива:



λ [Hz] – параметар прорачуна преко кога се задаје жељена брзина одзива

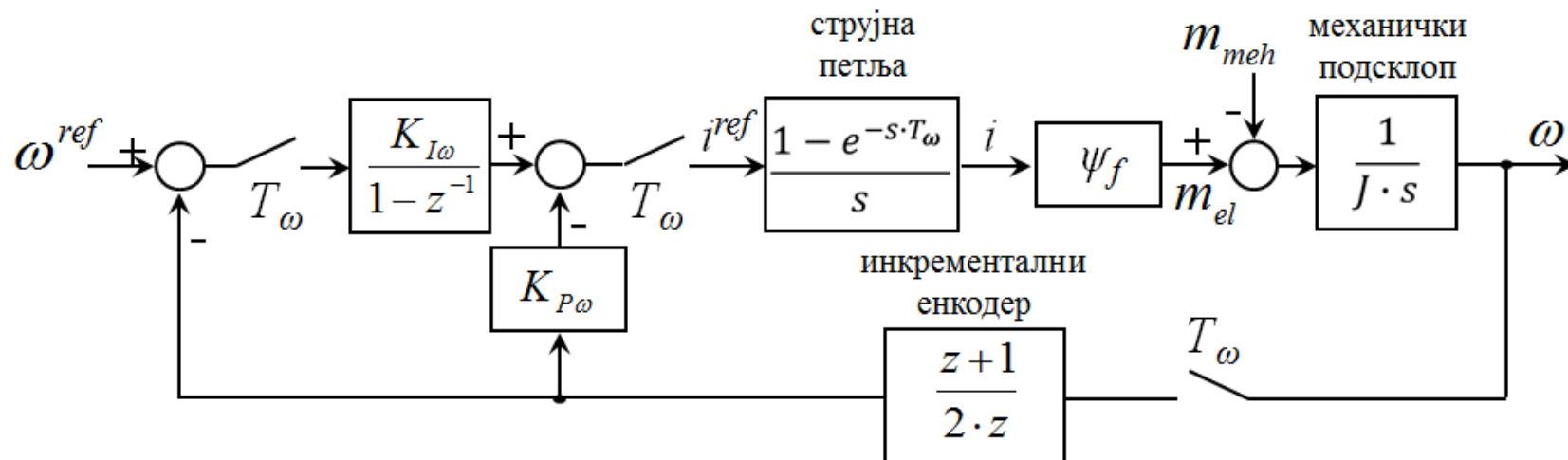
- прорачун регулатора $D(z)$:

1. дискретна функција преноса директне гране: $W_f(z) = Z\{G_{h0}(s) \cdot G_s(s)\}$

2. примена дискретна функција преноса: $C(z) = W_f(z) \cdot D(z) \cdot [R(z) - C(z)] \Rightarrow D(z) = \frac{1}{W_f(z)} \cdot \frac{\frac{C(z)}{R(z)}}{1 - \frac{C(z)}{R(z)}}$

ОПТИМАЛНИ ПРОРАЧУН РЕГУЛАТОРА БРЗИНЕ

- поставка петље:



- модел инкременталног енкодера:

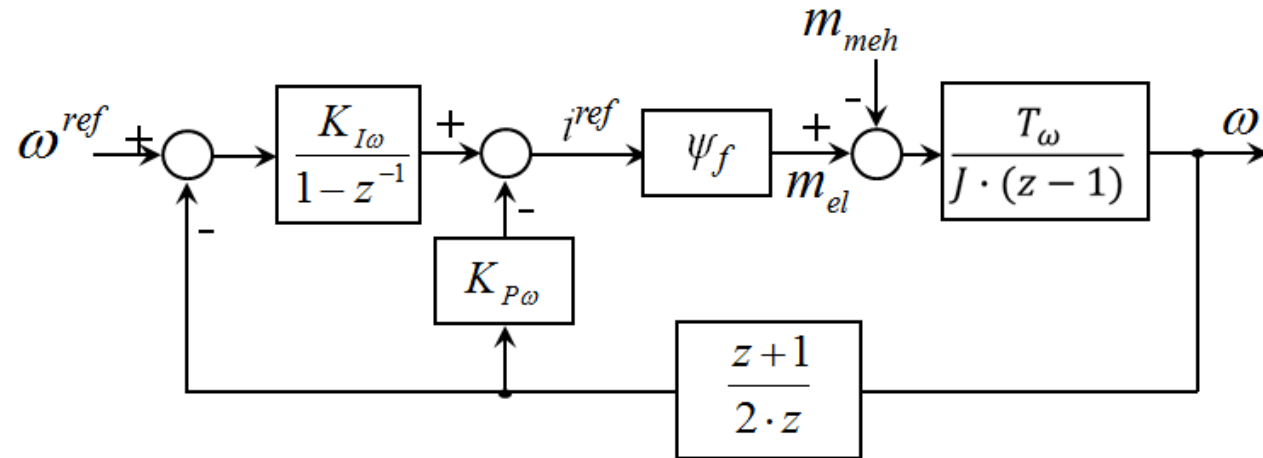
- мери се средња вр. брзине унутар T : $\omega_k^{mer} = \frac{\omega_k + \omega_{k-1}}{2}$

- у Z -домену: $\omega_k^{mer}(z) = \frac{1+z^{-1}}{2} \cdot \omega(z) = \frac{z+1}{2 \cdot z} \omega(z)$

ОПТИМАЛНИ ПРОРАЧУН РЕГУЛАТОРА БРЗИНЕ

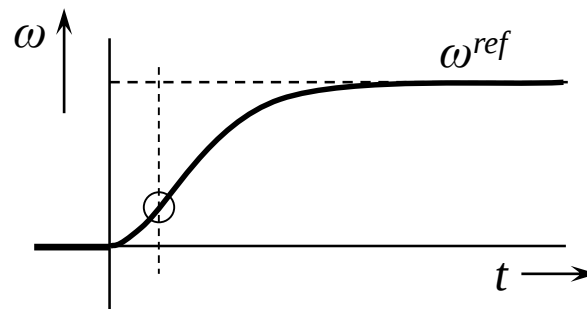
- прорачун регулатора - $K_{I\omega}$, $K_{P\omega}$:

1. превођење у Z – домен:

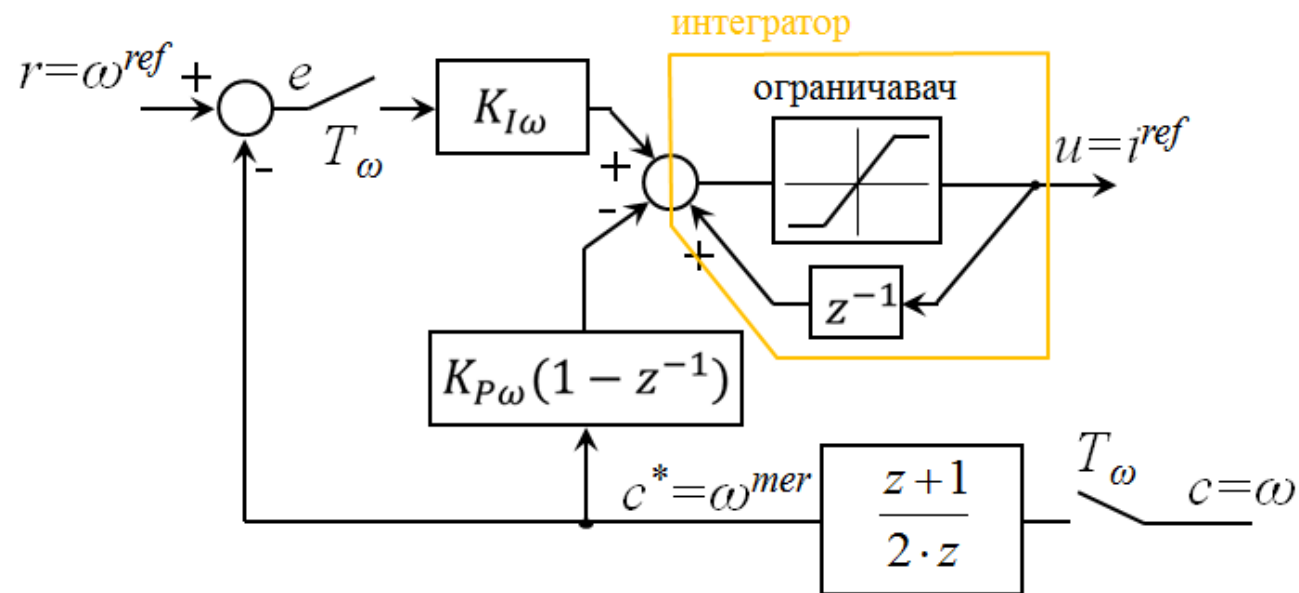


2. одређивање дицкретне функције спрегнутог преноса: $\frac{\omega(z)}{\omega^{ref}(z)}$,
односно карактеристичне једначине: $f(z)$ – имениоца функције спрегнутог преноса
3. прорачун параметара регулатора тако да се добије апериодичан одскочни одзив највеће брзине =
полови су реални и једнаки, $f(z) = (z - z_p)^3$

- облик очекиваног одзива:



ПОСТАВКА PI РЕГУЛАТОРА БРЗИНЕ СА ОГРАНИЧАВАЧЕМ



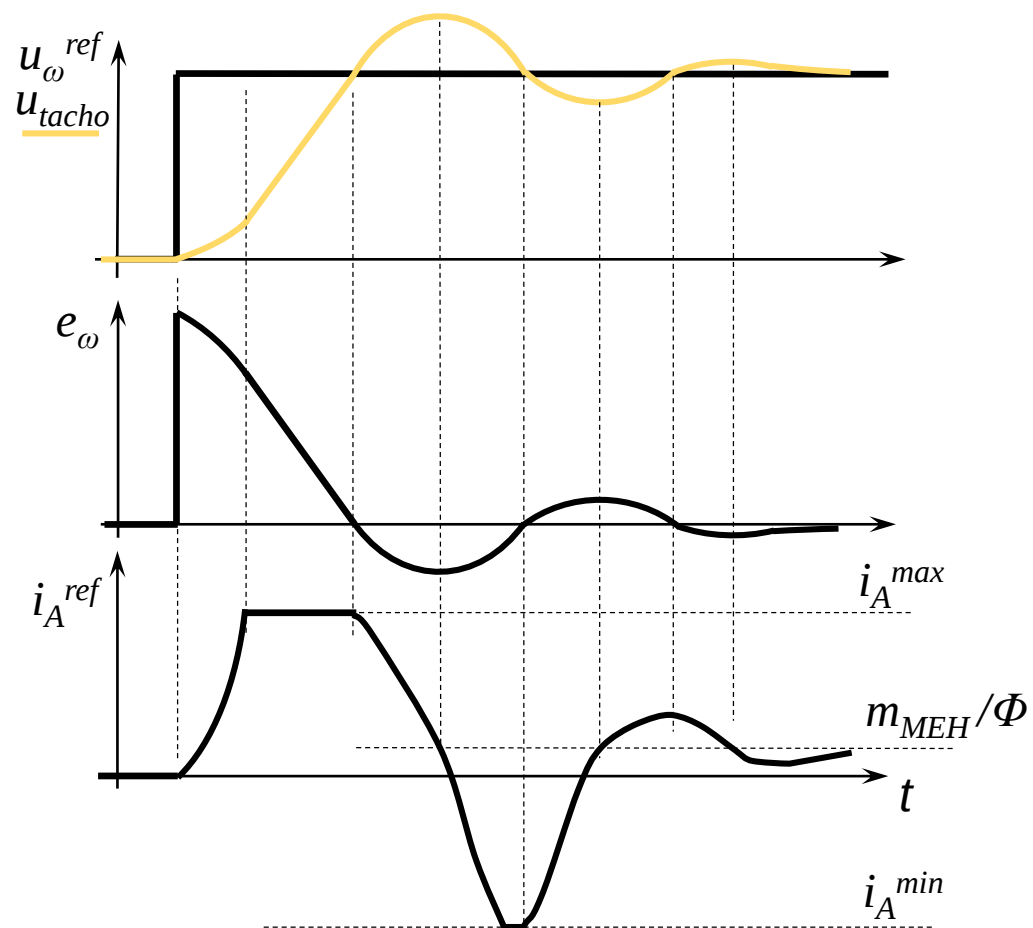
- интегратор:

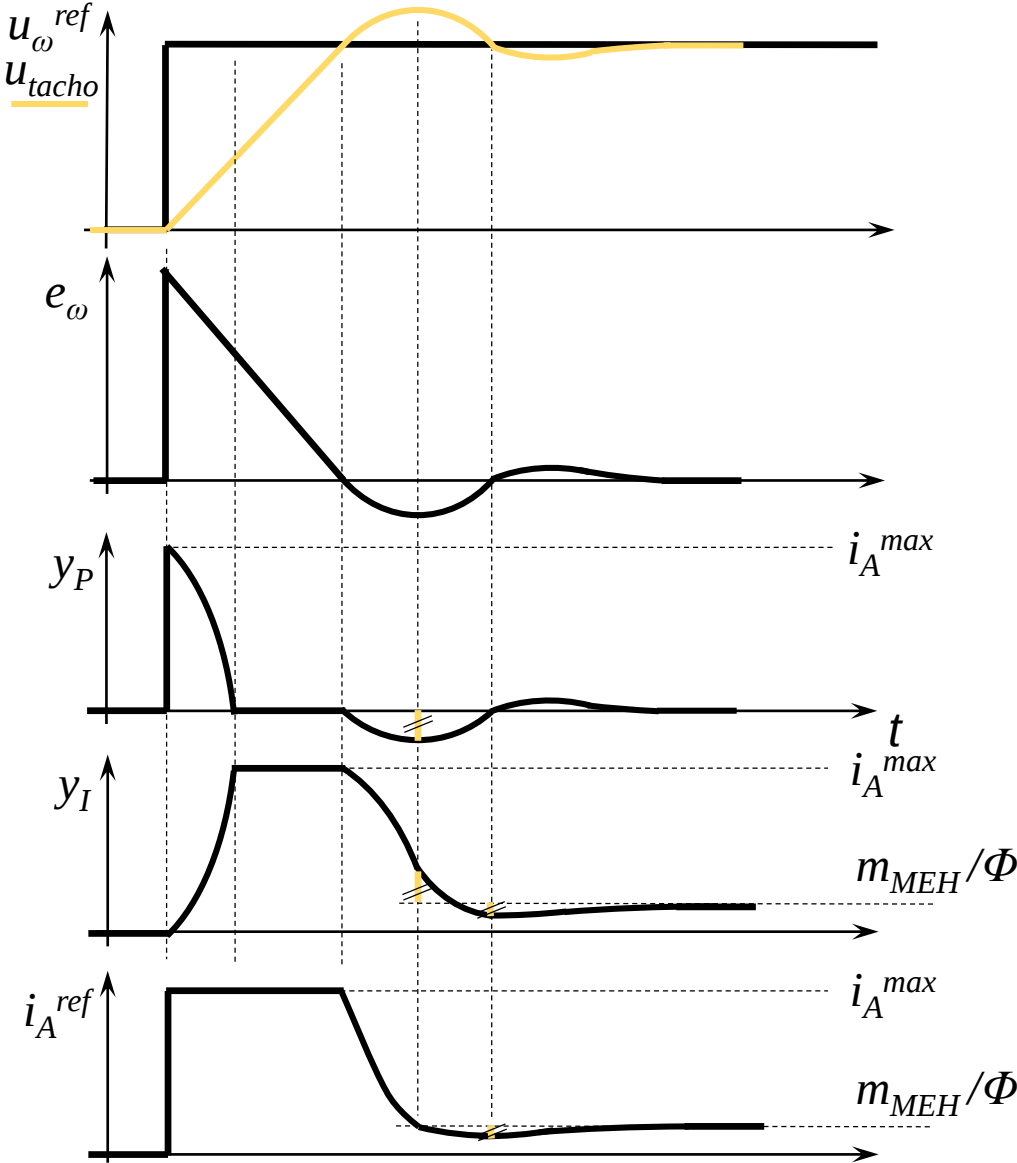
$$u(k) = u_{PI}(k) + u(k-1)]$$

$$U(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \cdot U_{PI}(z)$$

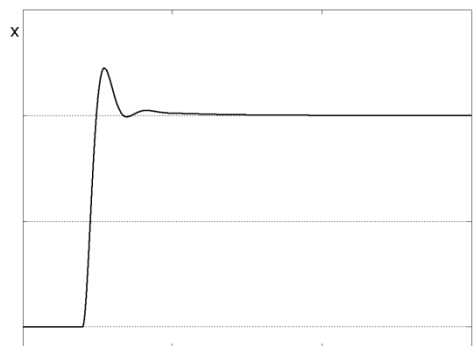
- дејство регулатора:

$$U(z) = K_{I\omega} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1}} \cdot E(z) - K_{P\omega} \cdot C^*(z)$$

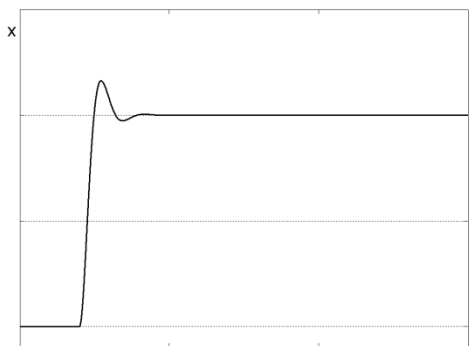




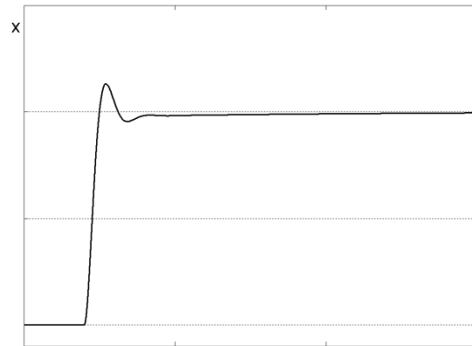
одступање K_P



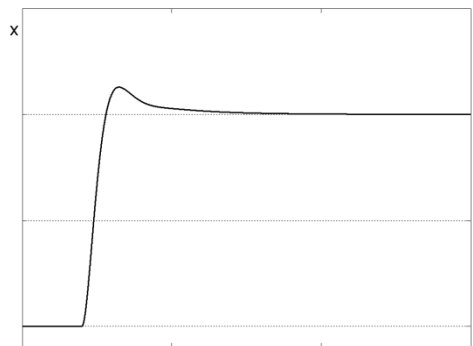
$2K_P, 1/4T_I$



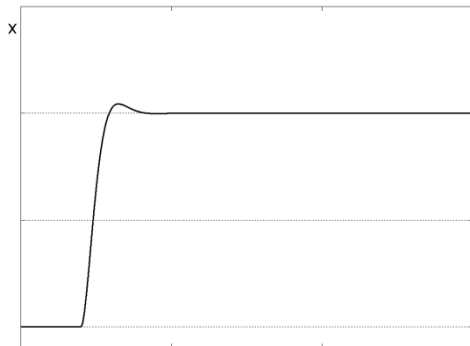
$2K_P, 1/2T_I$



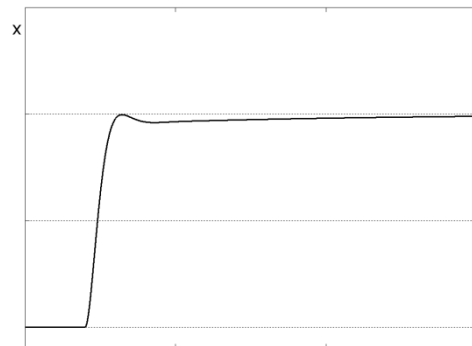
$2K_P, T_I$



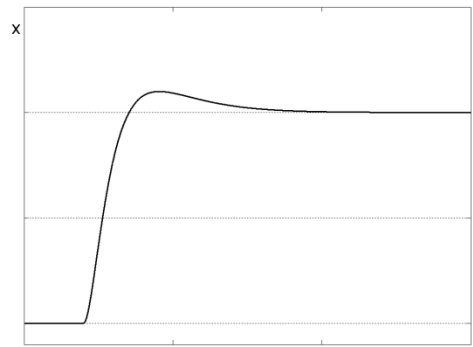
$K_P, 1/2T_I$



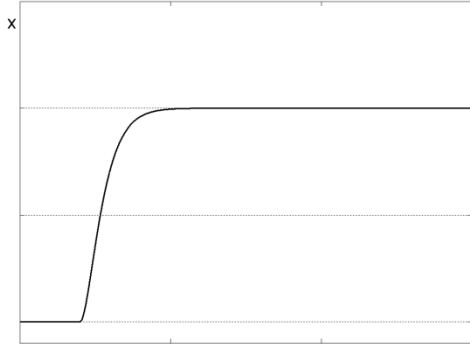
K_P, T_I



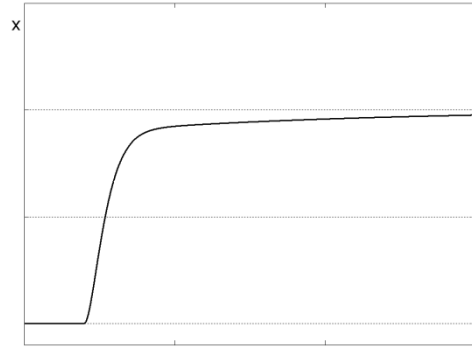
$K_P, 2T_I$



$1/2K_P, T_I$



$1/2K_P, 2T_I$

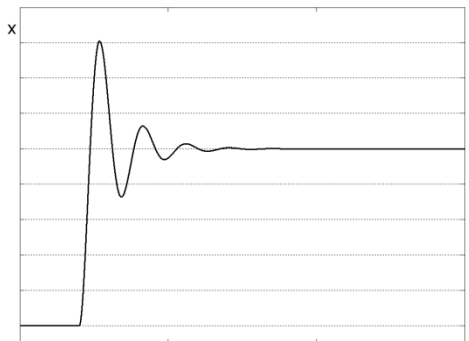


$1/2K_P, 4T_I$

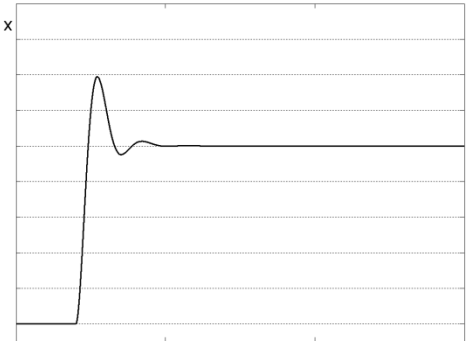
одступање T_I

Стеван Грабић

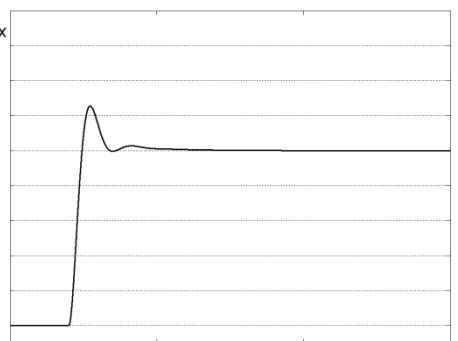
одступање K_P



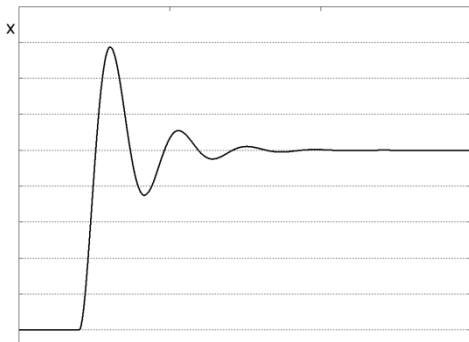
$2K_P, 1/4T_I$



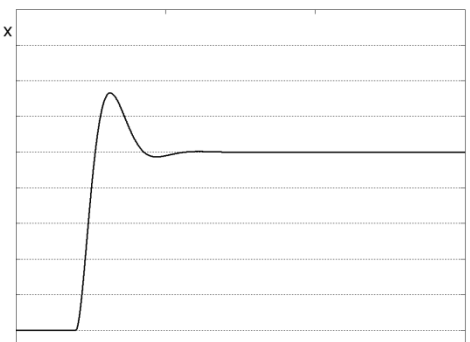
$2K_P, 1/2T_I$



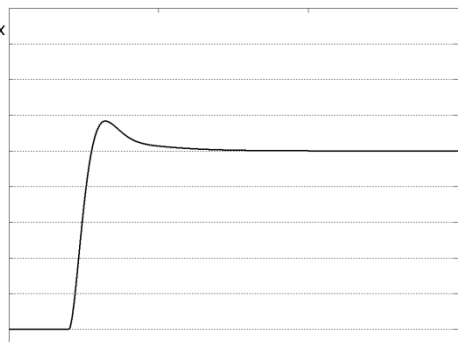
$2K_P, T_I$



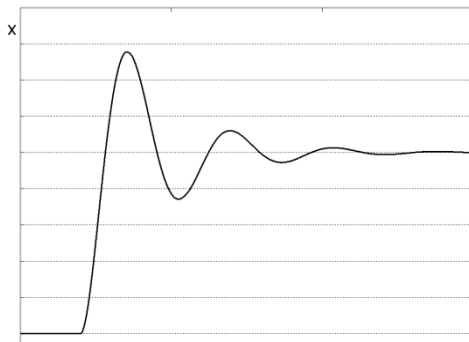
$K_P, 1/2T_I$



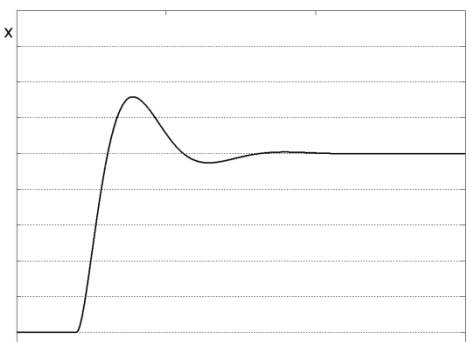
K_P, T_I



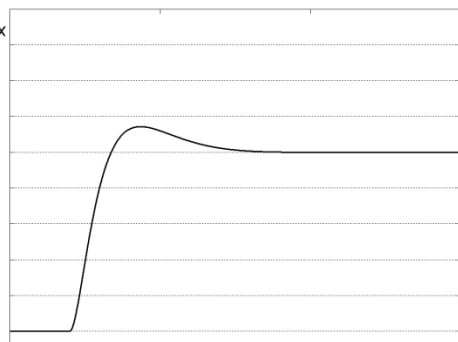
$K_P, 2T_I$



$1/2K_P, T_I$



$1/2K_P, 2T_I$



$1/2K_P, 4T_I$

одступање T_I