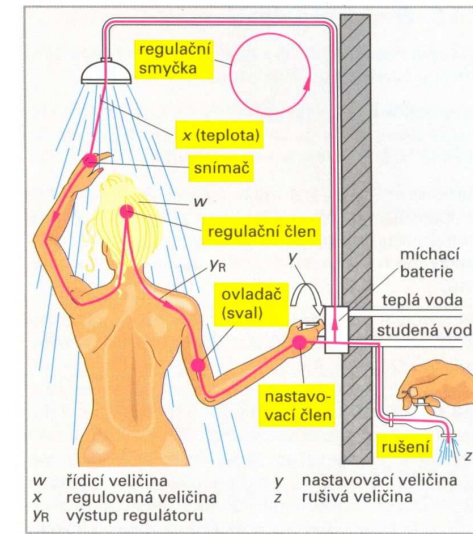


Základy regulace

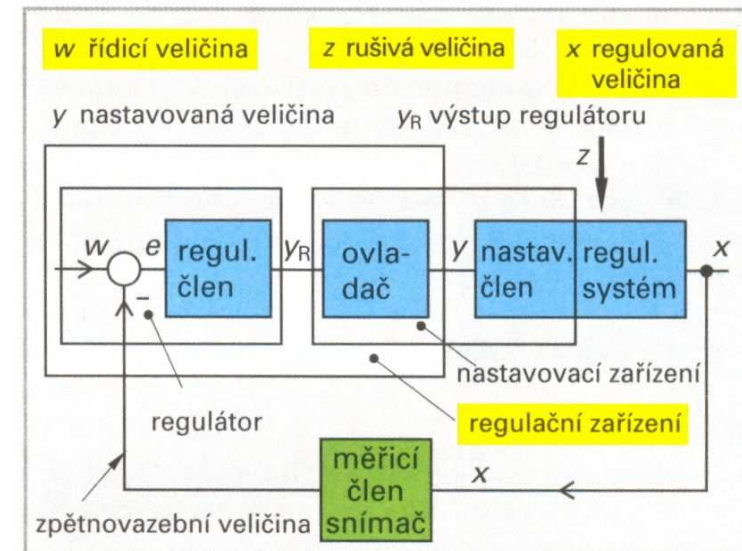
- **Regulace** je proces, který udržuje nějakou fyzikální veličinu na požadované hodnotě, resp. v požadovaných mezích, tj. stabilizuje tuto veličinu. Regulátory se v některých aplikacích nazývají **stabilizátory**.
- Prvky zajišťující regulaci vytvářejí svým vzájemným působením uzavřený okruh, tzv. **regulační okruh** nebo též **regulační smyčku**.
- **Regulace probíhá v uzavřené smyčce tvořené zpětnou vazbou regulované veličiny.**



Ruční regulace

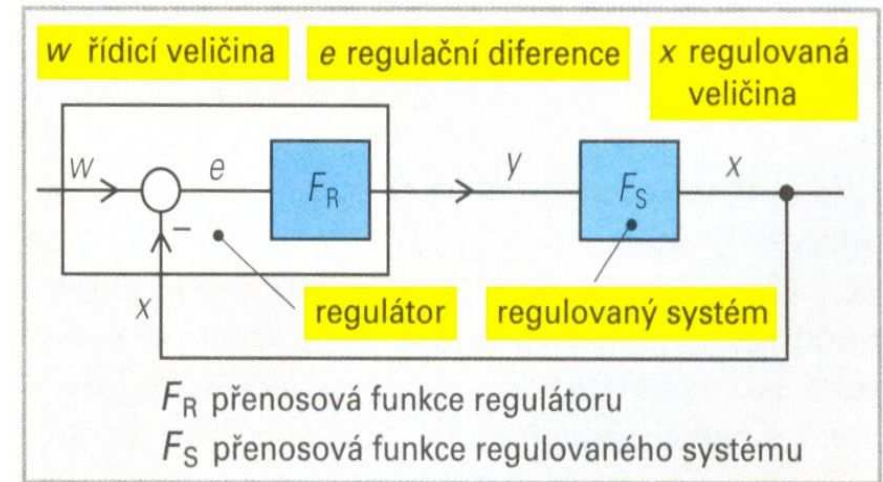
Regulační smyčka

- V regulační smyčce je regulovaná veličina snímána a srovnávána v komparátoru s požadovanou hodnotou. Rozdíl požadované hodnoty **w** a skutečné hodnoty **x** je regulační diference **e = w - x**, která je regulačním členem transformována na nastavovací veličinu **y** a ta je výstupní veličinou **y_R** regulátoru a zároveň vstupní veličinou regulovaného systému ovládaného pouze pomocí nastavovacího členu. Výstupem regulovaného systému je regulovaná veličina **x**.
- Ve stabilizovaném stavu regulační smyčky je regulační diference velmi malá nebo nulová. Při poruchách, nebo změnách nastavení požadované hodnoty řídicí veličiny **w** naroste regulační diference, která je změnou nastavovací veličiny **y** minimalizována.



Regulační smyčka s regulátorem, ovladačem, regulovaným systémem a měřícím členem

- Aby nedocházelo ke kmitání v regulační smyčce, musí být zajištěno, aby změna nastavovací veličiny neprobíhala příliš rychle.
- Zjednodušené schéma regulace obsahuje regulátor a regulovaný systém, nebo při podrobnějším členění komparátor, regulační člen, ovladač, nastavovací člen, regulovaný systém a měřicí zařízení (snímači regulované veličiny). Regulátor se skládá z komparátoru, regulačního členu a ovladače. Regulovaný systém je vybaven nastavovacím členem a snímačem regulované veličiny. Regulátor přímo řídí regulovaný systém nastavovacím signálem y .



Zjednodušené funkční schéma regulace

Druhy regulace

- Při ruční regulaci přebírá některé z funkcí regulační smyčky člověk
- Automatická regulace probíhá bez vlivu člověka s výjimkou zadání hodnoty řídicí veličiny, tj. požadované hodnoty regulované veličiny.
- Automatická regulace může být nastavena časově konstantní řídicí hodnotou $w = \text{konst}$ nebo časově proměnnou funkcí $w = f(t)$. Regulace může být tedy nastavena na konstantní nebo na proměnnou hodnotu.

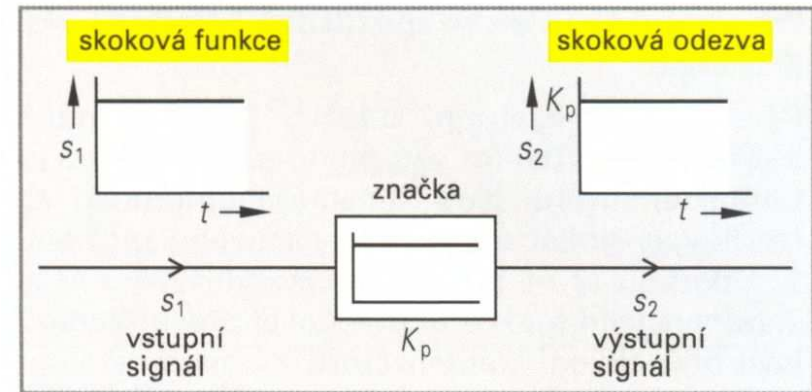
Regulační členy regulátorů

- K charakteristikám regulačního členu transformujícího signál regulační diference patří:
 - výstupní odezva na vstupní skokovou funkci, tj. **skoková odezva**
 - výstupní odezva na vstupní sinusovou funkci, tj. **sinusová odezva**
 - **Bodův diagram**, který znázorňuje zesílení (poměr amplitud) a fázový posun v závislosti na kmitočtu.

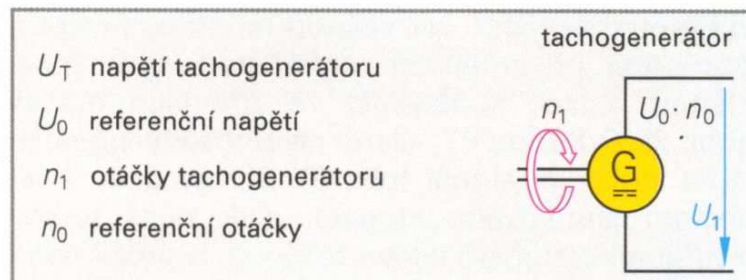
Proporcionální člen bez zpoždění (P-člen)

- Výstupní signál s_2 P-členu je proporcionální vstupnímu signálu s_1 . Funkční závislost výstupu na vstupu je dána násobením konstantním zesilovacím činitelem.
- U tachogenerátoru (chápaného jako P-člen) je konstantou úměrnosti (proporcionality) K_p poměr výstupního napětí a otáček, přičemž výstupní napětí tachogenerátoru U_T je vztaženo k referenčnímu napětí U_0 a otáčky n_1 k referenčním otáčkám n_0 . Dále uvedené příklady P-členů jsou většinou snímače a zesilovače.

P-člen, odezva na skokový signál a schematická značka

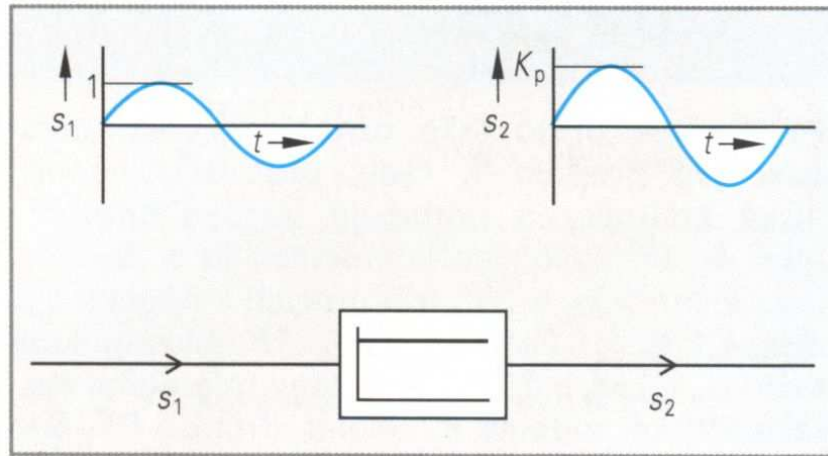


pro P-člen			
$s_2 = K_p \cdot s_1$			
s_1	vstupní signál	K_p	konstanta úměrnosti
s_2	výstupní signál		



Tachogenerátor

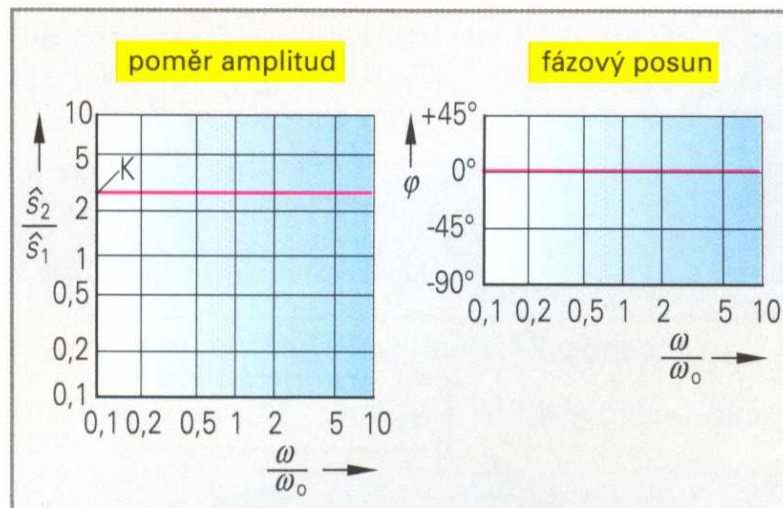
- Odezvou P-členu na skokovou funkci je opět skoková funkce bez zpoždění. Schematická značka P-členu proto nese označení připomínající časový průběh skokové funkce.
- Odezvou P-členu (lineárního členu) na sinusový vstupní signál je rovněž kmitočtově nezávislý sinusový signál. Výstupní signál je zde pro všechny kmitočty ve fázi se vstupním signálem, tj. fázový posun je stále $\varphi = 0$.



Odezva P-členu na sinusový signál

- **Bodův diagram** P-členu ukazuje poměr výstupní amplitudy ke vstupní amplitudě signálu a fázový úhel φ mezi výstupním a vstupním signálem, a to obě veličiny v závislosti na kmitočtu, resp. poměru úhlového kmitočtu ω k referenčnímu úhlovému kmitočtu ω_0 . $|F| = s_2 / s_1$ je hodnota přenosové funkce. Pro lineární člen, tj. P-člen, je $|F| = K_p$ a $\varphi = 0^\circ$.

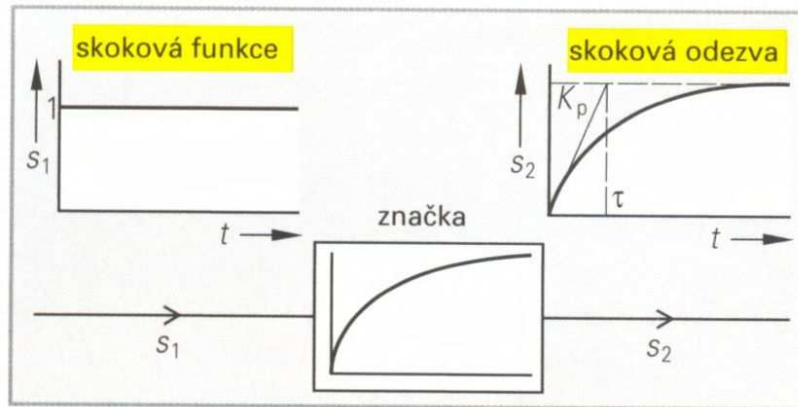
Bodův diagram



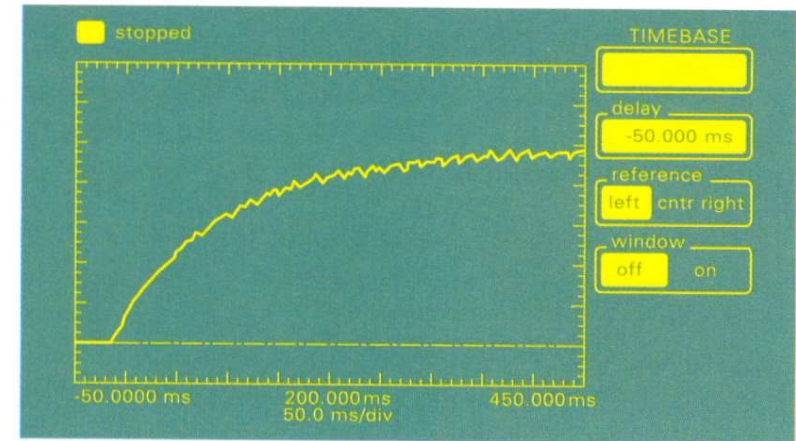
Proporcionální člen se zpožděním 1. řádu (PT₁-člen)

- PT₁-člen má výstupní odezvu proporcionální s určitým zpožděním vstupního signálu. Charakteristikami jsou konstanta úměrnosti K_p (zesilovací činitel) a konstanta časového zpoždění T . Odezvou s_2 na skokovou vstupní funkci s_1 je exponenciální funkce odpovídající přechodnému jevu při nabíjení kondenzátoru v obvodu stejnosměrného napětí, tedy $s_2 = K_p [1 - \exp(-t/T)]$. Exponenciální funkce $\exp(-t/T)$ má po čase $t = 3T$ zanedbatelnou hodnotu $e^{-3} = 0.05$ a výstupní funkce má pak hodnotu K_p -krát větší, než byla vstupní hodnota.
- Příkladem PT₁-členů jsou prvky absorbující část energie vstupního signálu, např. členy s zanedbatelnou vstupní kapacitou, např. s kondenzátorem RC-dolní propusti nebo členy absorbující jiný typ energie. Příkladem může být stejnosměrný motor s určitou setrvačnou hmotností rotoru, který má při změnách napětí na rotoru zpožděnou reakci, spočívající ve změnách otáček

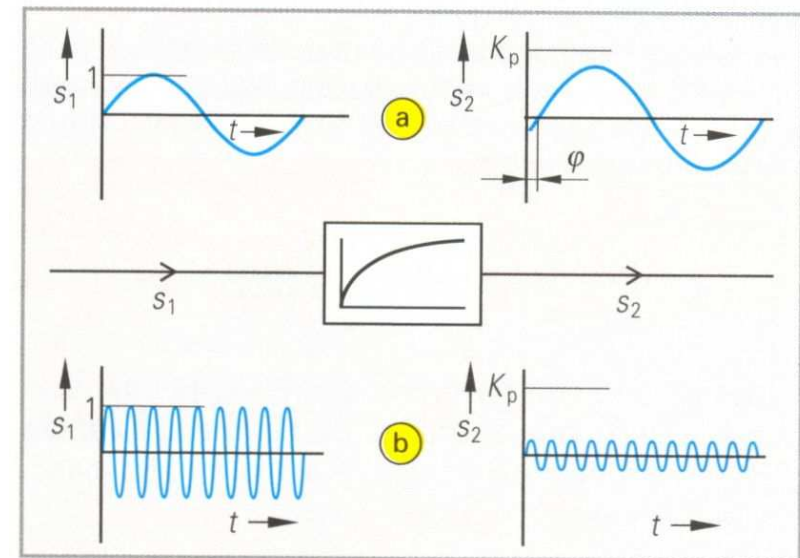
PT₁ — člen, odezva na skokový signál a schematická značka



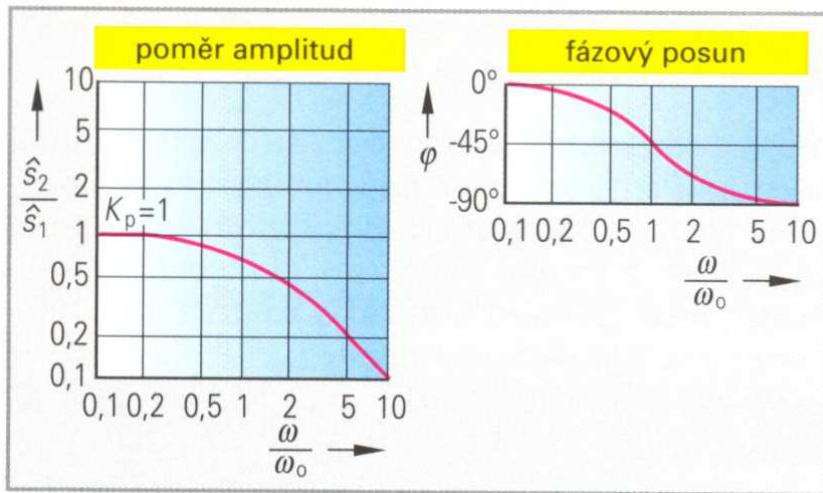
Průběh změny otáček při skokové změně budicího napětí rotoru dynama



- PT₁-člen vyhlazuje signály vysokého kmitočtu.
- PT₁-člen je proto také označován jako dolní pásmová propust 1. řádu, protože propouští nízké kmitočty a potlačuje vysoké kmitočty. Při vysokých kmitočtech je $\omega/\omega_0 > 1$, tj. $\omega = 2\pi f > \omega_0 = 2\pi f_0$, při nízkých kmitočtech je $\omega/\omega_0 < 1$, tj. $\omega = 2\pi f < \omega_0 = 2\pi f_0$. Při úhlovém kmitočtu $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/T$ jsou zjištěny referenční charakteristické hodnoty PT₁-členu. Protože PT₁-člen zpožďuje časově vstupní signál, dochází k fázovému posunu výstupního signálu oproti signálu vstupnímu. Úhel fázového posunu se mění od $\varphi = 0$ při úhlovém kmitočtu $\omega = 0$ až k $\varphi = -90^\circ$ při úhlovém kmitočtu $\omega \rightarrow \infty$. Při $\omega = 2\pi f_{00} = \omega_0$ je úhel fázového posunu $\varphi = -45^\circ$



Chování PT₁ — členu při sinusovém vstupním napětí



Bodův diagram PT_1 — členu

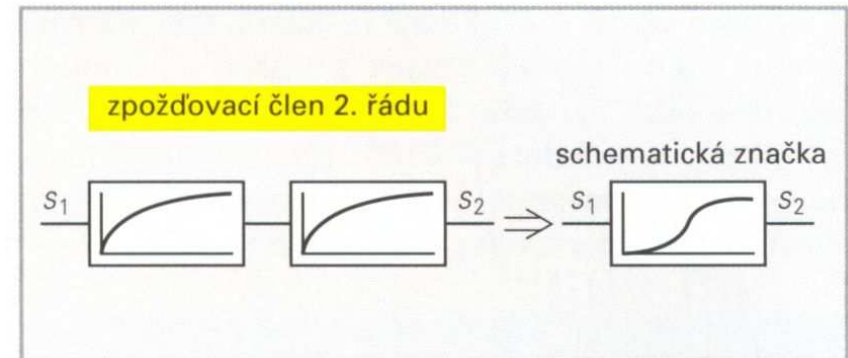
odezva PT_1 -členu na skokovou funkci

$\exp(-t/T) = e^{-t/T}$ $s_2 = K_p \cdot [1 - \exp(-t/T)]$

s_2	výstupní veličina	t	čas
K_p	koeficient úměrnosti	T	časová konstanta

Proporcionální člen se zpožděním 2. řádu (PT_2 -člen)

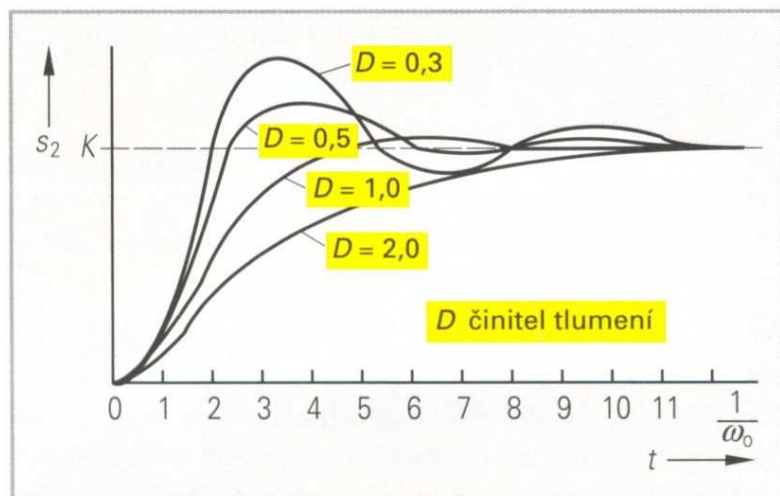
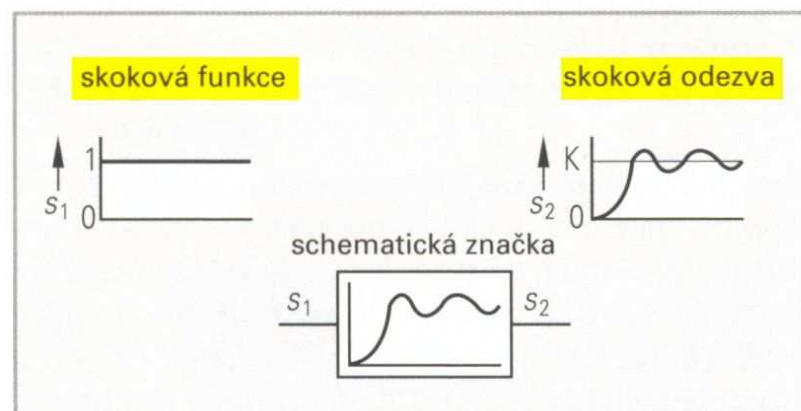
- PT_2 -člen se skládá ze dvou za sebou zapojených PT_1 -členů. Signál zpožděný prvním PT_1 -členem je znovu zpožděn druhým PT_1 -členem absorbujícím (a pak uvolňujícím) energii. Exponenciální odezvu prvního stupně na skokovou funkci transformuje druhý stupeň (druhý PT_1 -člen) na funkci tvaru S, připomínající funkci $y = \sin(x - \pi/2) + 1$. Průběh signálu má v počátku vodorovnou směrnicí.



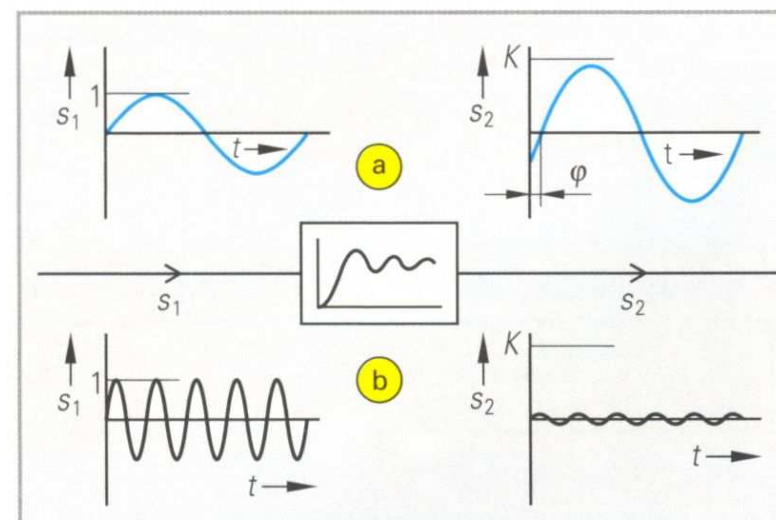
PT_2 člen

Kmitavý člen

- Kmitavý člen (zakmitávající tvarovací obvod) obsahuje rovněž dva akumulátory energie, které se střídavě nabíjejí a vybíjejí. Protože se však přitom část energie mění v teplo, má odezva členu na skokovou funkci tvar průběhu tlumených kmitů. Kmitavý člen je charakterizován vlastním rezonančním kmitočtem f_0 , resp. odpovídajícím vlastním úhlovým kmitočtem (jmenovitým úhlovým kmitočtem) $2\pi f_0$ a činitelem tlumení D (Damping). Při $D = 0$ (bez tlumení) následují po prvním překmitu kmity kolem střední hodnoty amplitudy signálu. Pro $D = 1$ jsou kmity tlumené a pro $D > 1$ má kmitavý člen vlastnost PT_2 -členu. Příkladem kmitavého členu jsou setrvačné pružinové tlumiče. Při tlumení je energie střídavě akumulována v napnuté pružině a v pohybující se hmotě.

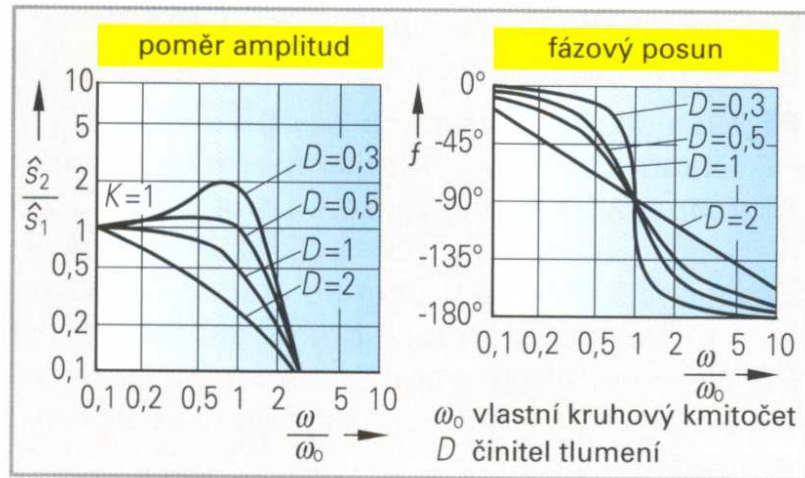


Skokové odezvy kmitavého členu



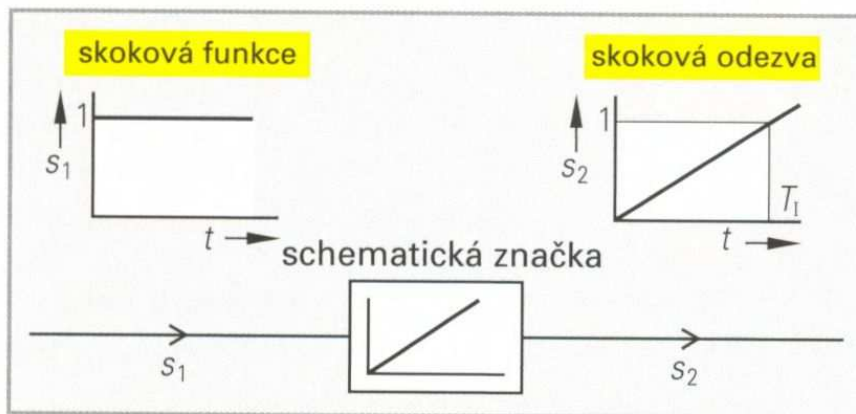
Chování kmitavého členu při sinusovém vstupním signálu

Integrační člen (I-člen)



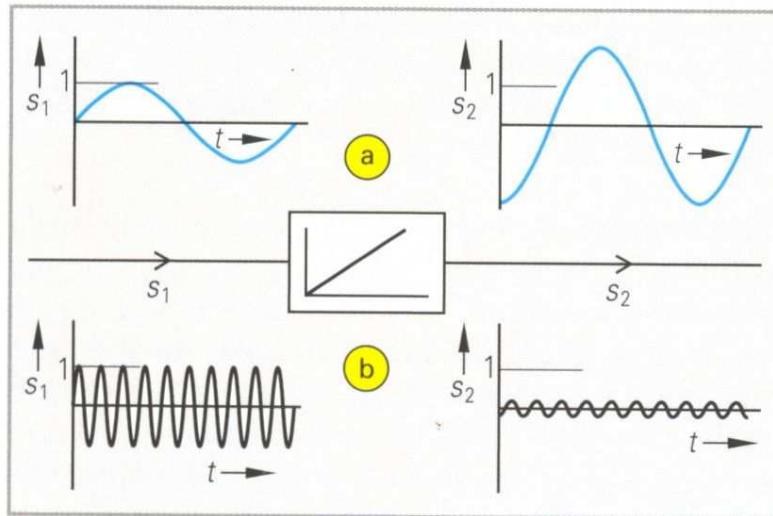
Bodův diagram kmitavého členu a PT_2 členu

- Výstupem I-členu je signál odpovídající průběhem integrálu funkce vstupního signálu
- Tím je myšlena integrace narůstající plochy pod křivkou vstupní funkce. Integrační časová konstanta T_I udává přitom čas, za který dosáhne výstupní veličina hodnoty 1 při hodnotě vstupní skokové funkce 1. Převrácená hodnota integrační časové konstanty se nazývá integrační koeficient $K_I = 1/T_I$.
- Operační zesilovač s kondenzátorem ve zpětné vazbě tvoří integrační člen. Výstupní napětí je úměrné integrálu vstupního napětí.

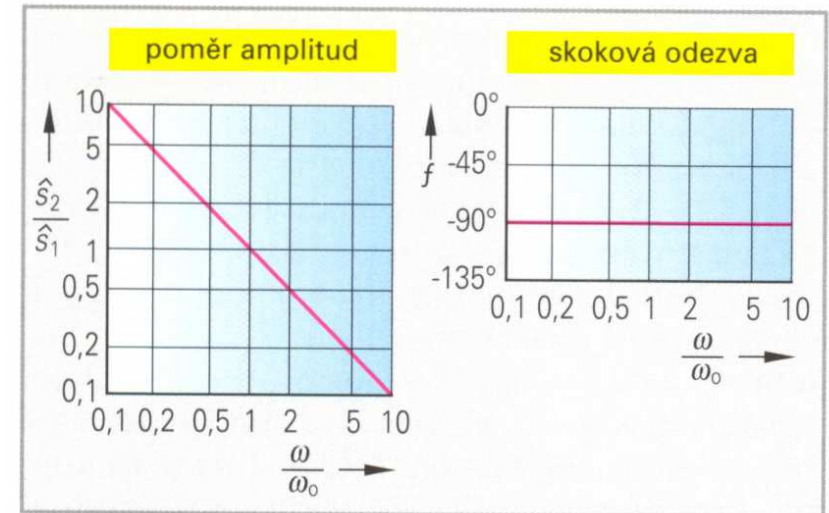


Skoková odezva a schematická značka I-členu

- Odezvou I-regulátoru (integračního členu) na sinusový signál je rovněž sinusový signál. Při malých kmitočtech signálu, tj. při $\omega \ll 1/T_I$ je výstupní signál mnohem větší než vstupní signál (v závislosti na zesílení operačního zesilovače). Při $\omega \gg \omega_0 = 1/T_I$ je výstupní signál integračního členu mnohem menší než vstupní signál. Z Bodova diagramu je také vidět, že při $\omega = \omega_0$ je výstupní amplituda stejná jako vstupní amplituda. Fázový posun je u I-členu stále -90° , což znamená, že je výstupní signál zpožděn za vstupním signálem.



Chování I-členu při sinusovém vstupním signálu



Bodův diagram I-členu

odezva I-členu na skokový signál (skoková odezva)

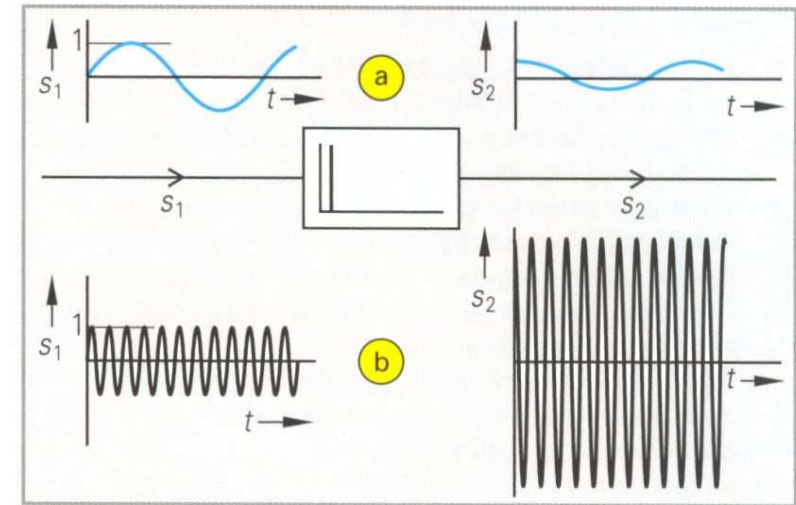
$$s_2 = \frac{1}{T_I} \cdot t = K_I \cdot t$$

s_2 výstupní veličina
 T_I integrační časová konstanta
 K_I integrační koeficient
 t čas

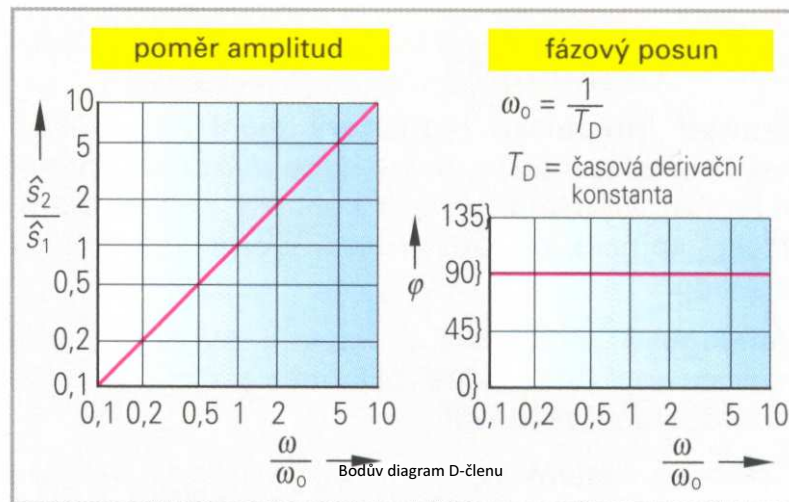
Derivační člen (D-člen)

- Tvar výstupní funkce (signálu) derivačního členu odpovídá derivaci vstupní funkce (vstupního signálu). Derivace odpovídá směrnici tečny, nebo též strmosti grafu vstupního signálu, tj. stoupání funkce. Odezvou D-členu na skokovou změnu (skokovou funkci) je jehlový impuls. Odezvou D-členu na lineárně rostoucí funkci (signál) je konstantní funkce (signál). Matematicky vyjádřeno $y = (k \cdot x)' = k$, kde k je konstanta.
- D-členy na vstupu operačních zesilovačů mohou sloužit např. k derivování signálu snímače. Je-li tímto signálem údaj dráhy (polohy) x , je derivací tohoto signálu signál udávající rychlost $v_x = dx/dt$ (první derivace dráhy podle času).

- Odezvou D-členu na sinusový signál je rovněž signál sinusového průběhu. Amplituda výstupního signálu je však závislá na kmitočtu. Z Bodova diagramu je vidět, že pro $\omega < \omega_0$ je amplituda výstupního signálu menší než amplituda vstupního signálu. Pro $\omega = \omega_0 = 1/T_D$ je výstupní amplituda stejná jako vstupní amplituda.
- Fázový posun mezi výstupním a vstupním signálem je stále $\varphi = +90^\circ$, což znamená, že výstupní signál předbíhá vstupní signál.

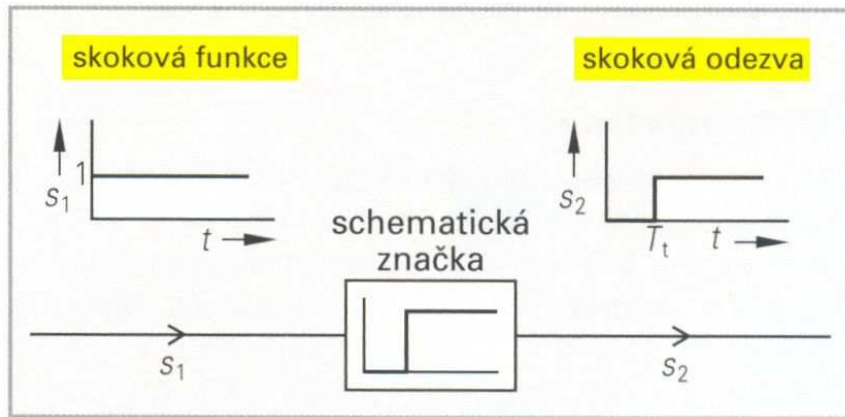


Odezvy D-členu na sinusové signály malých a velkých kmitočtů

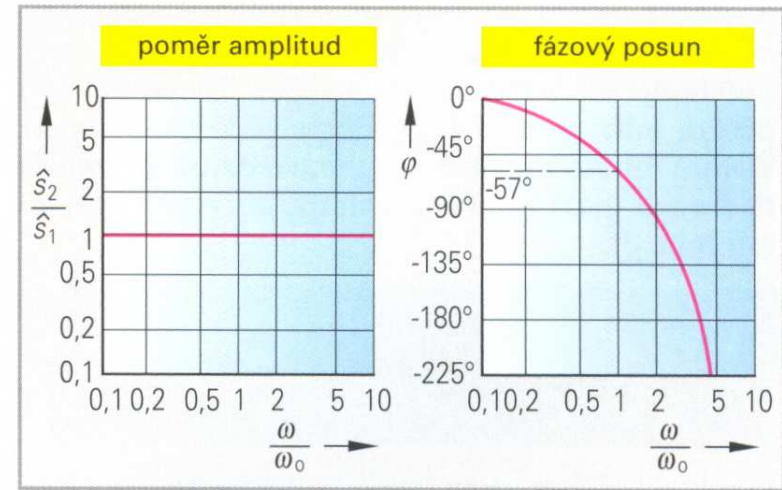


Zpožďovací člen

- Odezvou zpožďovacího členu na skokovou změnu vstupního signálu je časově zpožděná skoková změna výstupního signálu. Změna (reakce) na výstupu následuje po určitém (mrtvém) čase T_z tj. po určitém zpoždění.
- Odezvou zpožďovacího členu na sinusový signál je časově, tedy fázově posunutý sinusový signál. Je-li zpoždění rovno periodě signálu, je fázový posun $= \varphi = -360^\circ$. Pro $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/T_z$ je fázový posun $\varphi = -360^\circ/2\pi = -57^\circ 17'$.
- Zpožďovací členy jsou používány při zpracování signálů pomocí počítače, kdy jsou vstupní signály přesouvány mezi paměťovými místy v rytmu taktovacího kmitočtu. Perioda taktovacího signálu představuje zpoždění T_z .



Skoková odezva a schematická značka zpožďovacího členu



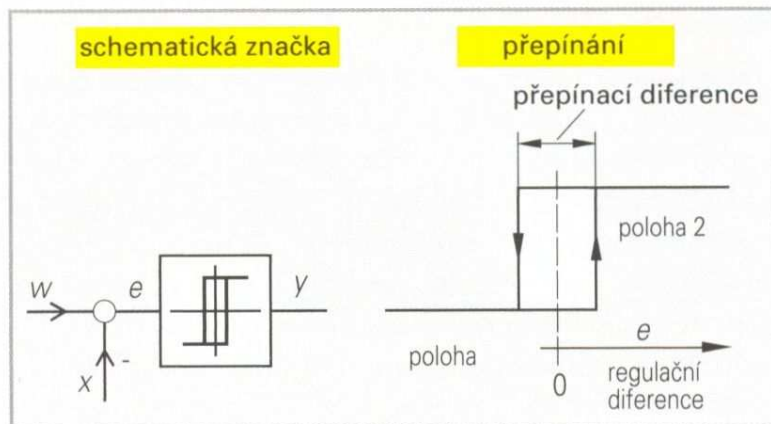
Bodův diagram zpožďovacího členu

Regulátory

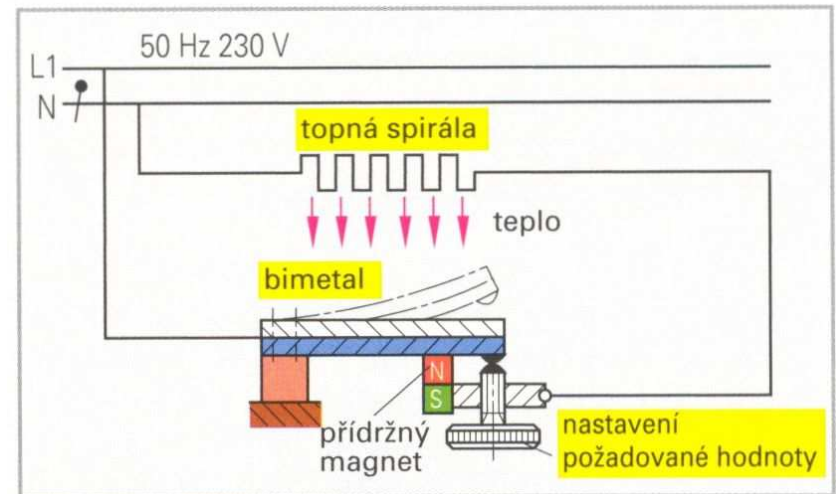
- **Spínací (přepínací) regulátory** mění nastavovací veličinu přepínáním dvou nebo několika hodnot (stupňů). Obsahují spínací kontakty nebo elektronické spínací obvody řízené pomocí klopných obvodů.
- **Analogové regulátory** představují stále (plynule) nastavovací člen. Jejich základním prvkem je většinou operační zesilovač.
- **Číslicové regulátory** mění nastavovanou veličinu stupňovitě. Při mnohastupňové regulaci může být regulace jemná a plynulá téměř jako analogová regulace. Číslicové regulátory bývají většinou řízené mikrokontrolérem.

Spínací regulátory

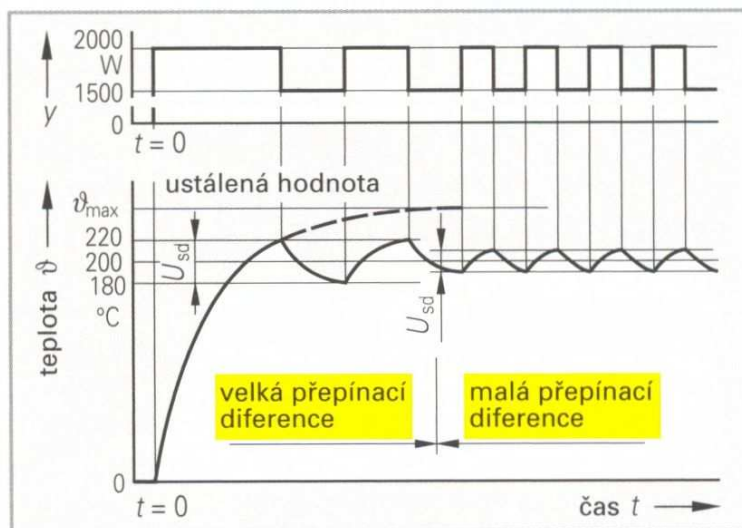
- Dvoustavové regulátory mají dva rozlišitelné stavy nebo též polohy. Používají se např. k regulaci teploty. Bimetalový regulátor spojuje v jedné jednotce snímač, komparátor a spínač. Překročí-li požadovaná teplota požadovanou hodnotu, prohne se bimetalový pásek a odpojí topení. Klesne-li regulovaná teplota pod dolní mezní hodnotu, zapne bimetalový spínač znovu topení. Aby kontakty při malé vzdálenosti nejisřily, je sepnutí (i odtrh) urychleno trvalým magnetem, který při rozpinání pozdrží rozpojení a kontakty jsou pak odtrženy od sebe při napružení bimetalového pásku, tedy rychleji a do dostatečné vzdálenosti.
- Vlivem tohoto trvalého magnetu existuje přepínací diference mezi vypínací teplotou a zapínací teplotou
- Čím větší je přepínací diference, tím více kolísá (kmitá) regulovaná veličina kolem požadované hodnoty. Přepínací diference se také nazývá **hystereze** regulátoru.



Dvupolohový regulátor



Bimetalový regulátor

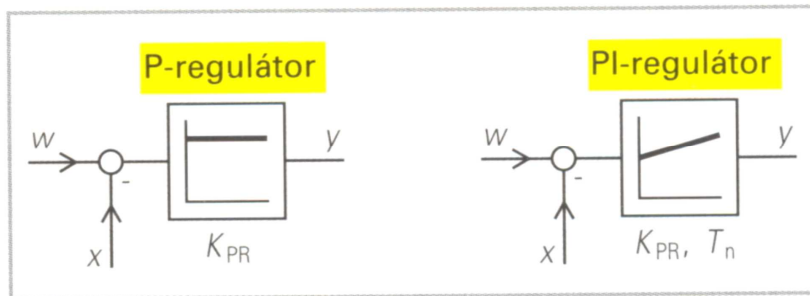


Regulace teploty dvoustavovým regulátorem

Analogové regulátory

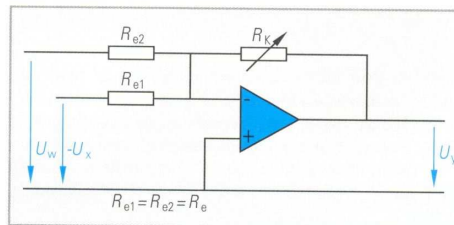
- **Analogové regulátory** jsou regulátory, které mohou nastavit nastavovací veličinu na kteroukoliv hodnotu mezi oběma krajními hodnotami spojitého rozsahu. Jsou také označovány jako **spojité regulátory**.
- Nejdůležitějšími analogovými regulátory jsou **P-regulátor**, **PI-regulátor** a **PID-regulátor**. Vlastností P-regulátoru (proporcionálního regulátoru) je lineární závislost regulované veličiny na nastavovací veličině. Schematická značka P-regulátoru se označuje v regulačních obvodech K_{PR} .

P regulátor a PI regulátor



Elektronický P-regulátor

Jednoduchý elektronický P-regulátor je čtyřpól (dvojbran) pracující jako diferenciální zesilovač regulační difference. Operační zesilovač je v součtovém zapojení a napěťový signál odpovídající skutečné regulované hodnotě je přiváděn v opačné polaritě ($-U_x$) než napěťový signál odpovídající požadované (řídící) hodnotě (U_w). Výstupní napětí regulátoru je pak úměrné regulační difference e , resp. rozdílovému napětí U_e . Pomocí odporů je možno přizpůsobit regulátor přiváděným vstupním signálům. Rovnice regulátoru vyjadřuje lineární závislost (proporcionalitu) mezi výstupním napětím a vstupním napětím. Poměr R_K/R_e je konstantou úměrnosti K_{PR} (a také zesílením) P-regulátoru. P-regulátory pracují bez zpoždění a s trvalou regulační difference (která by mohla být teoreticky odstraněna za nekonečně dlouhou dobu).

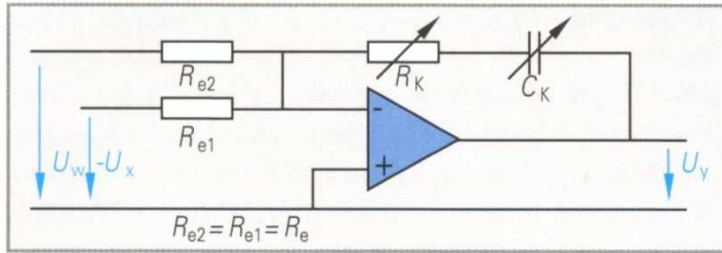


Obr. 3 Elektronický P-regulátor

rovnice P-regulátoru	
$U_y = -K_{PR} \cdot U_e$	
$U_e = U_w - U_x$	$K_{PR} = R_K/R_e$
U_y	výstupní napětí
U_e	napětí regulační difference
U_w	napětí požadované hodnoty (řídící napětí)
U_x	napětí skutečné hodnoty regulované veličiny
K_{PR}	konstanta úměrnosti (proporcionality)
R_K	zpětnovazební odpor
R_e	vstupní odpor

Elektronický PI-regulátor

- PI-regulátor vytváří nastavovací veličinu součtem dvou složek. Jedna složka je tvořena proporcionalní odezvou na regulační difference (P-složka) a druhá složka (I-složka) je úměrná součinu P-složky a času. Elektronický PI-regulátor je kombinací P-regulátoru a I-regulátoru. PI-regulátory se často používají k regulaci otáček, protože díky I-členu úplně odstraňují regulační difference.



Obr. 1 Elektronický PI-regulátor

rovnice PI-regulátoru

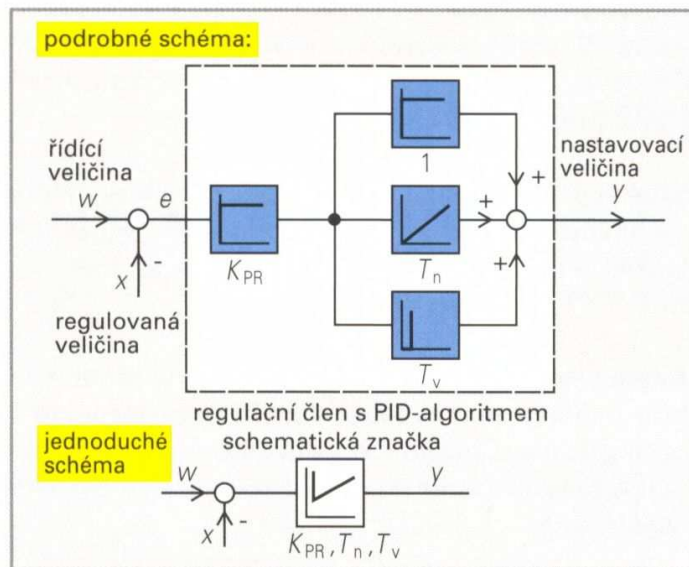
$$K_{PR} = R_K / R_e$$

$$T_n = R_K C_K$$

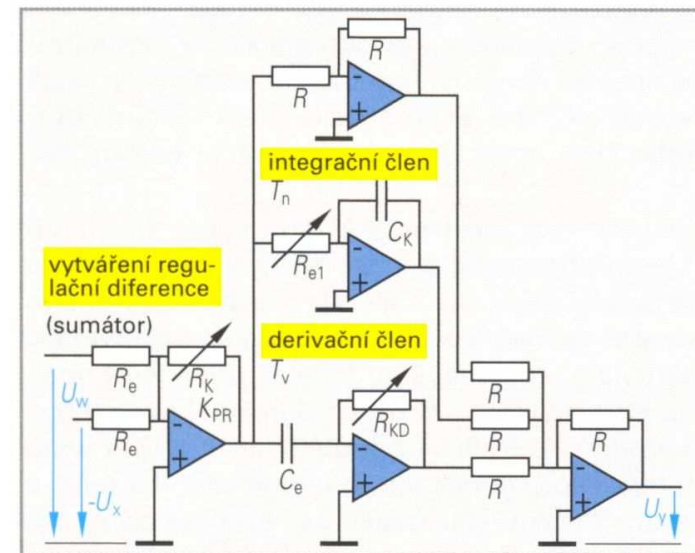
$$U_y = -K_{PR} \left(U_e + \frac{1}{T_n} \int U_e dt \right)$$

PID regulátory

- Univerzálnějším regulátorem je PID-regulátor. Nastavovací signál je tvořen váženým součtem proporcionální odezvy na regulační diferenci (P-složky), integrálu P-složky (I-složky) a derivace P-složky (D-složky). Při vzniku regulační diference vytváří P-složka okamžitě trvalou složku nastavovacího signálu. I-složka vytváří účinnou složku nastavovacího signálu i při nepatrné regulační diferenci, kterou může odstranit v prakticky dosažitelném čase. D-složka se uplatní jenom při změnách regulační diference a může předvídavým překmitem nastavovacího signálu urychlit vyrovnání náhle vzniklé regulační diference.
- Elektronické PID-regulátory jsou tvořeny operačními zesilovači. Regulační diference je vytvářena vstupním operačním zesilovačem a další 3 paralelně zapojené operační zesilovače vytvářejí P-složku, I-složku a D-složku. Ve výstupním operačním zesilovači se sčítají uvedené 3 složky a váhy těchto složek je možno nastavit odpory



PID regulátor



PID regulátor s operačními zesilovači

rovnice PID-regulátoru

$$U_v = K_{PR} \left(U_e + \frac{1}{T_n} \int U_e dt + T_v \frac{dU_e}{dt} \right)$$

$$K_{PR} = \frac{R_K}{R_e}; T_n = C_K \cdot R_{el}; T_v = C_e \cdot R_{KD}; U_e = U_w - U_x$$

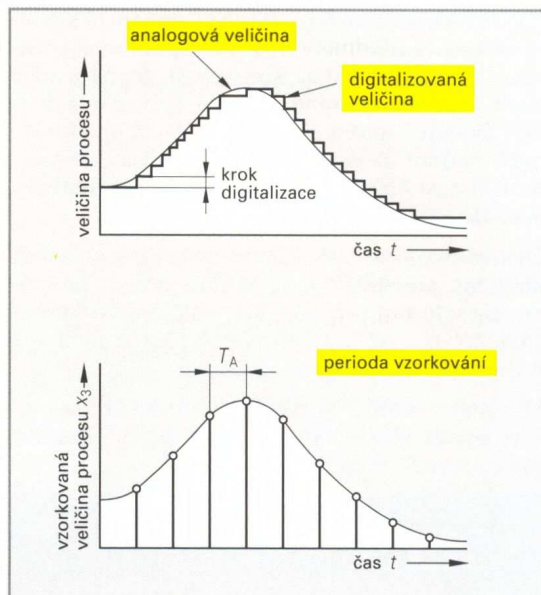
- Nevýhodou PID-regulátoru je obtížnost optimálního nastavení, které vyžaduje nastavení 3 parametrů, a to nastavení K_{PR} a časových konstant T_n a T_v . Pokud bychom chtěli otestovat regulátor pro 10 hodnot každého ze 3 parametrů, museli bychom provést teoreticky $10 \times 10 \times 10 = 1000$ testů.
- Z uvedených důvodů jsou v mnoha případech používány P-regulátory nebo PI-regulátory, což záleží i na vlastnostech regulovaného objektu. Regulační smyčka (okruh) musí být ve všech důležitých a typických situacích stabilní.

Číslicová regulace

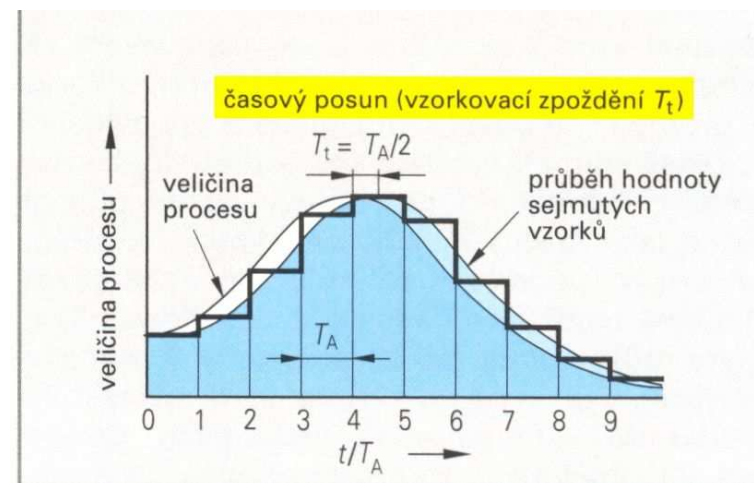
- Úlohou řídicích počítačů v zařízeních je řízení a regulace. V jednotlivých případech se jedná o snímání hodnot veličin, informujících o stavu procesu, např. teploty, dráhy, tlaku nebo otáček, jejich porovnávání s mezními hodnotami vypočtenými z hodnot řídicích veličin a výpočty hodnot nastavovacích signálů.
- Nastavovací hodnoty, např. napětí na motoru, ovlivňují proces a tím opět snímané stavové veličiny. Tím je tvořena uzavřená regulační smyčka mezi regulovaným procesem a regulátorem, který je realizovaný jako počítačový program. Úlohou počítače je tedy počítat regulační diferenci a v souladu s naprogramovanými vlastnostmi regulátoru vypočítávat hodnoty nastavovací veličiny a odpovídající signál předávat aktoru (akčnímu členu) v řízeném či regulovaném procesu. Počítač zpravidla také kontroluje, zda nepřekračuje regulační difference meze bezpečnosti a dohlíží tak na bezpečnost regulovaného procesu.
- Samooptimalizující nebo též adaptivní regulační systém může být programovou změnou parametrů upravován a přizpůsobován regulovanému procesu tak, aby byla regulace optimální, tj. rychlá a bezpečná (bez nebezpečného kmitání).

Digitalizace a vzorkování

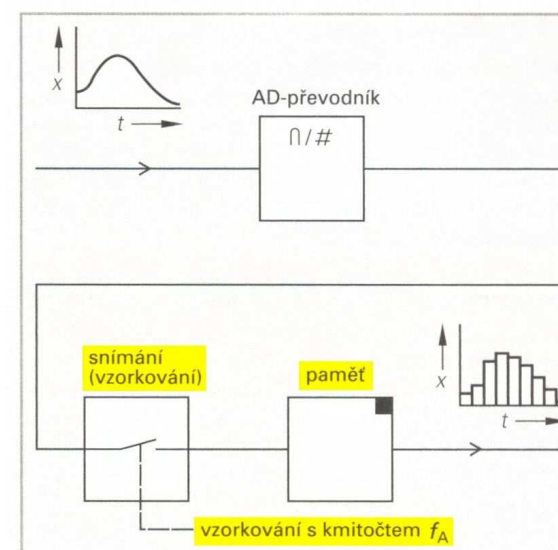
- Analogové veličiny sledované jako parametry regulovaného procesu musí být pro účely číslicového zpracování popisovány čísly s určitou přesností. Podle počtu rozlišitelných stupňů měřeného rozsahu je třeba volit šířku slova při ukládání číselných hodnot s odpovídající přesností do paměti počítače. Numerická rozlišitelnost počítače by měla být výrazně větší, než rozlišitelnost snímače v regulované smyčce, aby byla chyba způsobená zpracováním dat co nejmenší.
- Číslicový počítač nemůže zpracovávat kontinuálně analogové signály z procesu jako analogový regulátor, ale může snímat nebo též odečítat či vzorkovat periodicky jejich okamžité hodnoty, např. s opakovací periodou 10 ms. Mluvíme pak o **časové diskretizaci**.



Digitalizace a vzorkování analogového signálu z regulovaného procesu



- Časově a hodnotově kontinuální signály, tj. signály se spojitým průběhem, jsou digitalizovány pomocí AD-převodníku, spínače a paměťového členu (paměti odečtené hodnoty, tj. vzorku signálu). Snímání (přenos do počítače) digitalizovaných hodnot se uskutečňuje periodicky s periodou T_A v krátkých časových okamžicích (časová diskretizace).
- Časově a hodnotově diskretizovaný signál schodovitého průběhu odpovídá původnímu spojitému signálu tím přesněji, čím větší je vzorkovací kmitočet $f_A = 1/T_A$ a čím větší počet stupňů má A/D-převodník.
- Maximální možný vzorkovací kmitočet je dán délkou regulačního programu, který může regulovat i více smyček, a rychlostí počítače.
- Vzorkovací (snímací) kmitočet regulátoru by měl být s ohledem na přesnost regulace co největší.



- Snímání vzorků signálů a jejich uchovávání ve vstupních pamětech způsobí zpoždění (vzorkovací zpoždění) za původním signálem odpovídající polovině snímací (vzorkovací) periody. Tento časový posun působí stejně jako fázový posun a ovlivňuje regulační smyčku v souvislosti se sklonem ke kmitání podobně nepříznivě, jako např. zpožďovací člen (který může obrátit fázi zpětné vazby a způsobit oscilace). Fázový posun způsobený ukládáním vzorků do vyrovnávacích (vstupních) pamětí narůstá s rostoucím kmitočtem signálů, tj. s rostoucí rychlostí dějů snímaného a regulovaného procesu.
- **Časová diskretizace způsobuje stále fázové zpoždění v regulační smyčce a zhoršuje stabilitu regulace.**

$T_A = \frac{1}{f_A}$	$T_p = \frac{1}{f}$
$T_t = \frac{T_A}{2}$	$\frac{\varphi}{360^\circ} = -\frac{T_t}{T_p}$

T_A perioda vzorkování
 f_A vzorkovací kmitočet
 T_p perioda signálu v procesu
 f kmitočet signálu v procesu
 T_t vzorkovací zpoždění
 φ úhel fázového posunu
 znaménko minus vyjadřuje zpoždění při fázovém posunu

32

Regulační algoritmus

- Analogicky s funkcí analogového PID-regulátoru vypočítává při číslicové regulaci PID-algoritmus hodnoty nastavovací funkce. Algoritmus je realizován programem, který vypočítává z hodnot vstupních signálů hodnoty výstupních signálů (nastavovacích funkcí).
- PID-algoritmy se dělí na **nastavovací algoritmy** a **rychlostní algoritmy**.

PID – nastavovací algoritmus

- Nastavovací funkce PID-regulátoru y se skládá (sčítá) ze tří aditivních částí, a to z části proporcionální regulační odchylce e (P-část), z části odpovídající časovému integrálu regulační difference (I-část) a části odpovídající první derivaci regulační odchylky podle času (D-část). Při číslicové regulaci se regulační difference nemění spojitě, ale skokově v okamžicích $T_A, 2 T_A, 3 T_A, \dots, n T_A$ a nabývá hodnot $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$. Integraci spojitě funkce zde nahradí sčítání hodnot diskrétní funkce a derivaci nahradí rozdíl sousedních hodnot. V časovém okamžiku nT_A je vypočtena hodnota y_n nastavovací veličiny y .
- Při číslicové regulaci je integrování nahrazeno sčítáním a derivování odčítáním.
- Nastavovací algoritmus PID obsahuje výpočet P-části, I-části a D-části.

Složky (části) nastavovací funkce PID-regulátoru v okamžiku nT :

P-část:

$$y_{Pn} = K_p \cdot e_n$$

I-část:

$$y_{In} = K_p \cdot \frac{T_A}{T_n} \sum_{i=0}^n e_i$$

D-část:

$$y_{Dn} = K_p \cdot \frac{T_v}{T_A} \cdot (e_n - e_{n-1})$$

Rovnice PID-regulátoru

$$y = K_p \left[e + \frac{1}{T_n} \int e dt + T_v \cdot \frac{de}{dt} \right]$$

Rovnice PID-nastavovacího algoritmu:

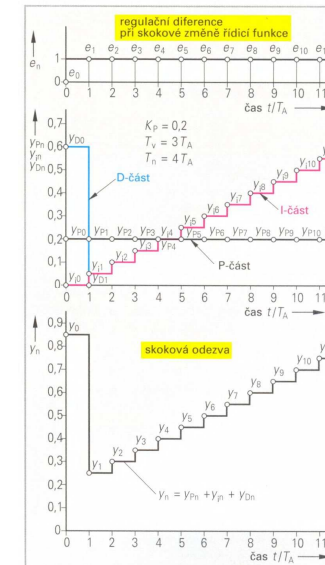
$$y_n = K_p \left[e_n + \frac{T_A}{T_n} (e_1 + e_2 + \dots + e_n) + \frac{T_v}{T_A} (e_n - e_{n-1}) \right]$$

$$y_n = K_p \left[e_n + \frac{T_A}{T_n} \sum_{i=0}^n e_i + \frac{T_v}{T_A} (e_n - e_{n-1}) \right]$$

y nastavovací veličina
 e regulační diference
 K_p konstanta úměrnosti
 y_n hodnota y v okamžiku nT_A
 e_n hodnota e v okamžiku nT_A
 i sčítací index
 T_n časová integrační konstanta
 T_v časová derivační konstanta
 T_A snímací (vzorkovací) perioda

Příklad

- Vytvořte skokovou odezvu číslicového PID-regulátoru s parametry $K_p = 0,2$, $T_v = 3 T_A$ a $T_n = 4 T_A$ jako graf pro prvních 11 odečtů (vzorků) hodnoty skokové funkce.
- Řešení:
 - Postupně jsou sestaveny jednotlivé části odezvy (P-část černě, I-část červeně, D-část modře) a ty jsou pak sečteny viz obr.
 - Nastavovací PID-algoritmus vypočítává hodnoty nastavovací funkce z diskretních hodnot regulační diference.
 - Skoková odezva je srovnávací charakteristika regulátoru konstruovaná za předpokladu neměnicí se regulační diference, tj. za předpokladu neúčinné regulace, která nezmenšuje regulační diferenci.



Skoková odezva číslicového PID regulátoru

PID – rychlostní algoritmus

- Zatímco nastavovací algoritmus vypočítává nastavovací hodnoty, vypočítává rychlostní algoritmus jen její přírůstky $\Delta y_n = y_n - y_{n-1}$ a tyto přírůstky přičítá k hodnotě nastavovací veličiny y_{n-1} uložené v paměti.
- Rovnice rychlostního PID-algoritmu:

$$\Delta y_n = K_p \left[e_n + \frac{T_A}{T_n} \sum_{i=0}^n e_i + \frac{T_v}{T_A} (e_n - e_{n-1}) \right] - K_p \left[e_{n-1} + \frac{T_A}{T_n} \sum_{i=0}^{n-1} e_i + \frac{T_v}{T_A} (e_{n-1} - e_{n-2}) \right]$$

- Rychlostní PID-algoritmus vypočítává přírůstky nastavovací funkce z diskrétních hodnot regulační difference.

$$\Delta y_n = y_n - y_{n-1}$$

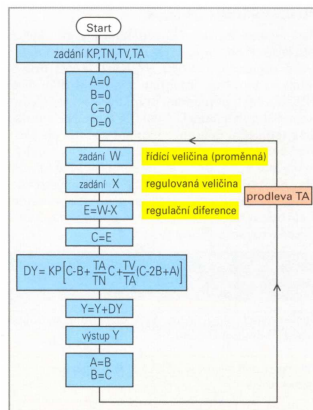
$$\Delta y_n = K_p \left[e_n - e_{n-1} + \frac{T_A}{T_n} \cdot e_n + \frac{T_v}{T_A} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right]$$

Δy_n přírůstek nastavovací veličiny za dobu T_A v čase nT_A
 e_n regulační difference v čase nT_A
 T_A snímací (vzorkovací) perioda
 T_n časová integrační konstanta
 K_p konstanta úměrnosti
 T_v časová derivační konstanta

Příklad

Naprogramujte v jazyce C rychlostní algoritmus PID s parametry $K_p = 0,2$, $T_n = 4 T_A$, $T_v = 3 T_A$, $T_A = 1s$.

- Vytvořte blokové schéma programu.
- Napište odpovídající program v jazyce C.



Blokové schéma programu PID-algoritmu

```
main()
{
    float KP, TN, TV, TA;
    float A, B, C, D, DY, E, W, X, Y;

    A = B = C = D = E = DY = Y = 0;

    printf("KP="); scanf("%f", &KP);
    printf("TN="); scanf("%f", &TN);
    printf("TV="); scanf("%f", &TV);
    printf("TA="); scanf("%f", &TA);

    for (;;) {
        printf("W="); scanf("%f", &W);
        printf("X="); scanf("%f", &X);

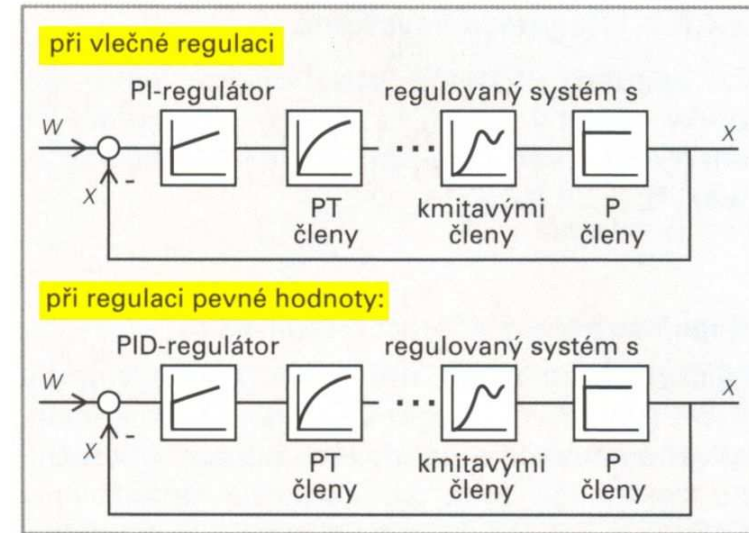
        E = W - X;
        C = E;
        DY = KP * (C - B + TA / TN * C + TV / TA * (C - 2 * B + A));
        Y = Y + DY;
        printf("W=%f, X=%f, Y=%f\n\n", W, X, Y);
        A = B;
        B = C;
    }

    return(0);
}
```

Program v jazyce C

Regulace P-systémů

- V regulačních smyčkách, obsahujících regulované systémy charakterizované lineárními zpožděnými přenosy, tj. proporcionální systémy, jsou většinou používány PI-regulátory nebo PID-regulátory.
- Při rychlých změnách řídicí veličiny (regulaci rychlých dějů) jsou používány PI-regulátory, což je případ **vlečných regulovaných obvodů**, kdy je regulovaná veličina ve stálém vleku (se stálou regulační diferencí bez nebezpečí překmitu) za řídicí veličinou. PID-regulátor je pro děje s prudkými změnami řídicí veličiny nevhodný pro jeho překmit při prudké změně způsobený jeho derivačním členem (částí), který zde není výhodou, ale v tomto případě jen možnou příčinou nelinearity.
- PID-regulátor je efektivní při **regulaci pevné hodnoty**, při které je regulační diference vyvolávaná rušivými vlivy, tj. např. při regulaci pevně nastavené teploty.



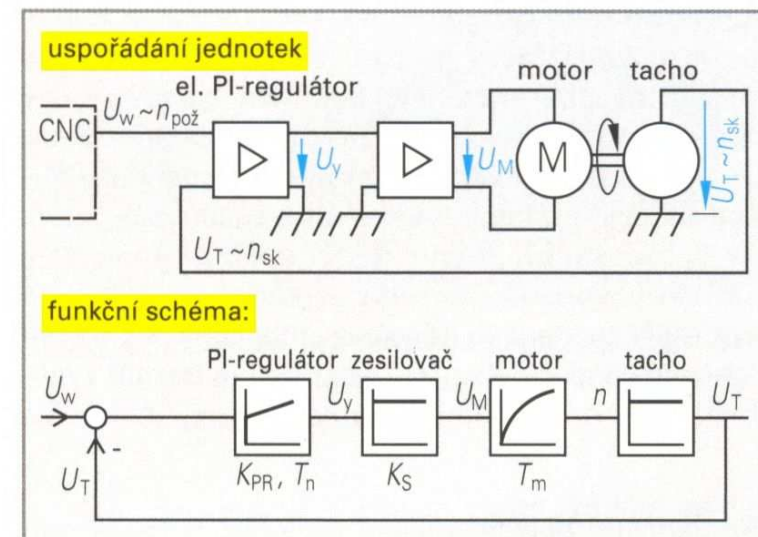
Regulace P-systémů

Regulace otáček pomocí PI-regulátoru

U obráběcích strojů by měly skutečné otáčky n_{sk} hlavního pohonu i pohonů vřeten (posuvů) co nejpřesněji sledovat požadované hodnoty $n_{pož}$ zadávané numerickým řídicím (NC) systémem. Regulační smyčka se skládá z elektronického PI-regulátoru, zesilovače pro řízení pohonu (motoru), motoru s časovou konstantou T_m a tachogenerátoru. Zesilovač pohonu i tachogenerátor pracují téměř bez zpoždění, tzn., že se chovají jako P-členy (lineární členy). Motor může být v regulační smyčce přibližně reprezentován PT-členem. Při požadavku změny otáček o $\Delta n_{pož}$ je generován regulátorem nastavovací signál

$$\Delta U_{yP} \sim K_{PR} * (n_{pož} - n_{sk})$$

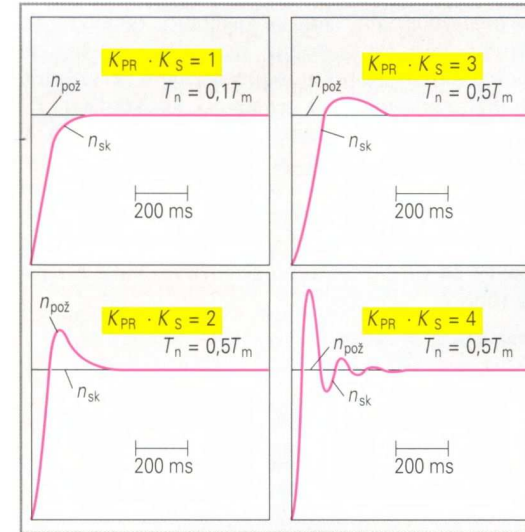
a přenesen zesilovačem pohonu na motor. V souladu s tím, jak se nová hodnota n_{sk} přiblíží požadované hodnotě $n_{pož}$ se zmenší ΔU_{yP} . Integrovaný člen regulátoru (I-část) vytváří složku signálu ΔU_{yI} úměrnou časovému integrálu rozdílu ($n_{pož} - n_{sk}$). To znamená, že PI-regulátor odstraní díky své integrační složce úplně regulační diferencí.



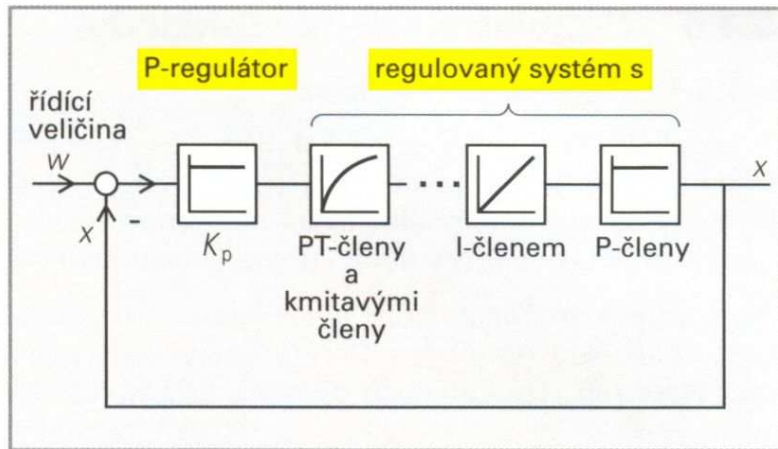
Blokové a funkční schéma regulace otáček

- Při PI-regulaci a PID regulaci je na rozdíl od vlečné P-regulace odstraněna regulační diference.
- Je-li známa maximální rychlost změn řídicí veličiny w , je možno pro mezní kmitočety těchto změn regulátor pomocí parametrů K_{PR} a T_n optimálně nastavit. Při optimálním nastavení je rychle odstraňována regulační odchylka a regulátor ještě nekmitá. Velké hodnoty K_{PR} a malé hodnoty T_n způsobí silné kmitání. Součin $K_{PR} \cdot K_S$ představuje celkové zesílení regulační odchylky (K_S je zesílení v zesilovači pohonu) a T_m časovou konstantu motoru.

Skokové odezvy PI-regulátoru při různém nastavení parametrů K_{PR} , T_n ($T_m = 100$ ms)



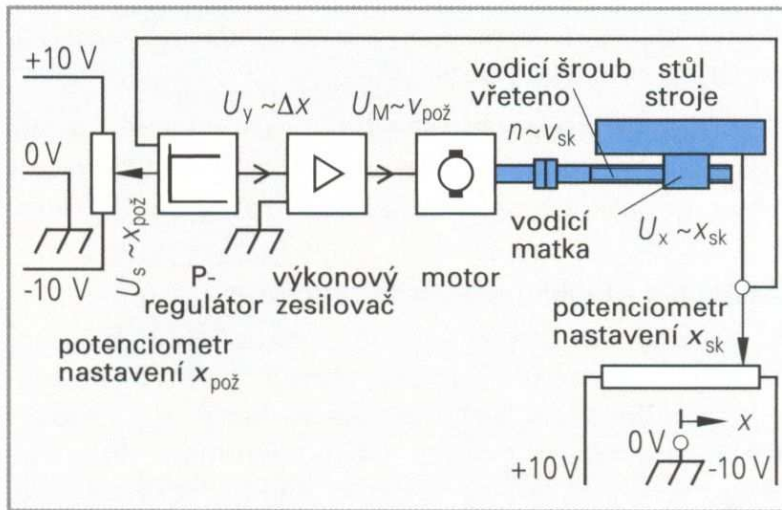
Regulace I-systémů



Při regulaci systémů obsahujících integrující prvky (I-členy) jsou ve vlečných regulačních smyčkách většinou používány P-regulátory

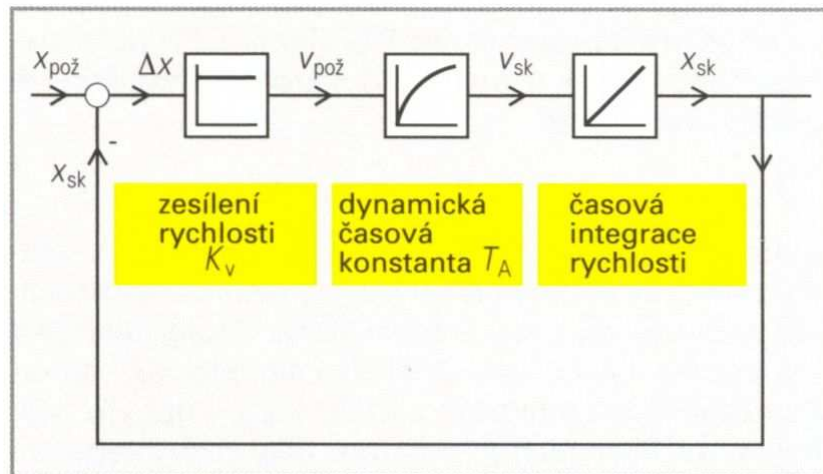
Regulace polohy pomocí P-regulátoru

U obráběcích strojů může být poloha suportu nebo pohyblivého stolu snímána pomocí analogového snímače a regulována pomocí operačního zesilovače. Zadávání požadované polohy je rovněž analogové přes AD-převodník do počítače nebo ručně potenciometrem - viz obr. Vznikne-li regulační diference (např. mechanickým odporem obrábění) $\Delta x = x_{pož} - x_{sk}$, je zesílena a ovlivní otáčky motoru ve smyslu zmenšení regulační diference Δx . Rychlost posuvu v je úměrná (proporcionální) polohové diferenci Δx . Je tím větší, čím větší je konstanta úměrnosti K_{PR} regulátoru, zesílení výkonového zesilovače, otáčky n_0 motoru při jmenovitém napětí a čím větší je stoupání vodicího šroubu vřetene s_{sp} . Všechna tato dílčí zesílení se násobí a jsou zahrnuta v zesílení rychlosti K_v . Zesílení rychlosti je poměr rychlosti posuvu v k diferenci polohy Δx , tj. $K_v = v / \Delta x$.



Uspořádání jednotek analogové regulace polohy suportu (stolu) obráběcího stroje

Při zahrnutí dílčích zesílení do jediného parametru K_v je možno regulaci polohy suportu obráběcího stroje znázornit zjednodušeně pomocí funkčního schématu se třemi členy. První člen je proporcionální člen se zesílením rychlosti K_v . Druhý člen reprezentuje dynamické vlastnosti (setrvačnost) pohonu suportu. Je-li k pohonu použit servomotor s časovou konstantou T_A , je možno jej považovat za zpožďovací člen 1. řádu. Třetím členem je integrující člen reprezentující dráhu jako časový integrál rychlosti suportu, odvozené z rychlosti otáčení vodicího šroubu, který prochází vodicí matkou spojenou pevně se suportem nebo posuvným stolem stroje.



Funkční schéma analogové regulace polohy suportu (stolu) obráběcího stroje

Regulace polohy pomocí P-regulátoru

$$K_v = \frac{v}{\Delta x}$$

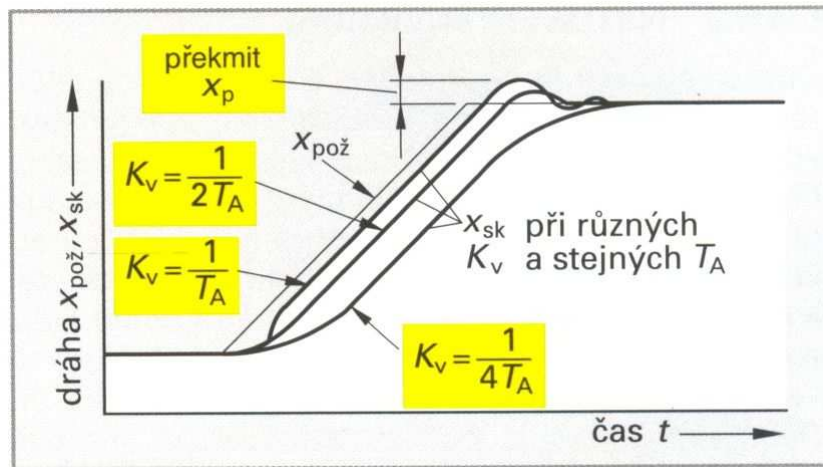
K_v	zesílení rychlosti
v	rychlost posuvu
Δx	diference polohy

Příklad:

- Požadovaná hodnota, tj. řídicí hodnota polohy w , je měněna od počáteční polohy $x_1 = 2 \text{ mm}$ do koncové polohy $x_2 = 12 \text{ mm}$ stálou rychlostí po dobu 1 s . Jaká je diference polohy Δx během pohybu suportu, je-li zesílení rychlosti $K_v = 10 \text{ s}^{-1}$?
- Řešení:

$$\Delta x = v/K_v = (x_2 - x_1)/\Delta t/K_v = 10 \text{ mm s}^{-1}/10 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ mm}$$
- Support se tedy pohybuje se skluzem 1 mm za hodnotou řídicí veličiny w . Tento skluz je způsoben odporem (brzdným) při pohybu suportu.
- Čím je větší zesílení rychlosti K_v , tím menší je při zadané rychlosti posuvu v diference polohy Δx . Rychlostní zesílení K_v však nelze libovolně zvyšovat, protože by mohl support při dané rychlosti v a malé regulační diferenci překmitnout vlivem setrvačnosti přes koncovou polohu a pak kmitat.

- Při použití pohonu s rychlou reakcí, tj. s malou setrvačnou časovou konstantou T_A , tj. s malým momentem setrvačnosti a velkým točivým momentem, může být zvoleno velké rychlostní zesílení K_v , které je stanoveno v závislosti na časové setrvačné (dynamické) konstantě pohonu T_A – viz obr.
- Při $K_v = 1/4 T_A$ nedochází k překmitu suportu přes koncovou polohu při dojezdu. Při požadavku co nejrychlejšího vystavení při přijatelně malé odchylce polohy a malém překmitu v koncové poloze je jako optimální volena většinou hodnota $K_v \approx 0,28/T_A$.

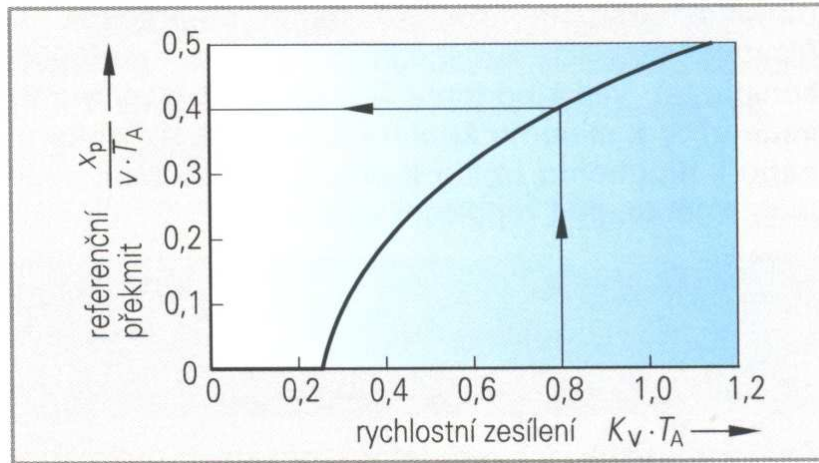


Překmit v závislosti na rychlostním zesílení

Příklad:

- Smyčka regulace polohy zahrnuje pohon s **časovou dynamickou konstantou** $T_A = 80 \text{ ms}$.
- a) Jaké rychlostní zesílení K_v je třeba nastavit na regulátoru polohy, má-li být vystavování co nejrychlejší při malém překmitu a malé regulační odchylce v koncové (cílové) poloze vystavení?
- b) Jak velký bude překmit x_p při rychlosti suportu $v = 120 \text{ mm/min}$?
- Řešení:
- a) $K_v \approx 0,28/T_A = 0,8/0,08 = 10 \text{ s}^{-1}$
- b) Z obrázku je možno pro $K_v \cdot T_A = 0,8$ odečíst hodnotu $x_p/(v \cdot T_A) = 0,41 \rightarrow x_p = 0,41 \cdot v \cdot T_A = 0,41 \cdot 120 \text{ mm/min} \cdot 80 \text{ ms} = 66 \mu\text{m}$

Měření rychlosti zesílení

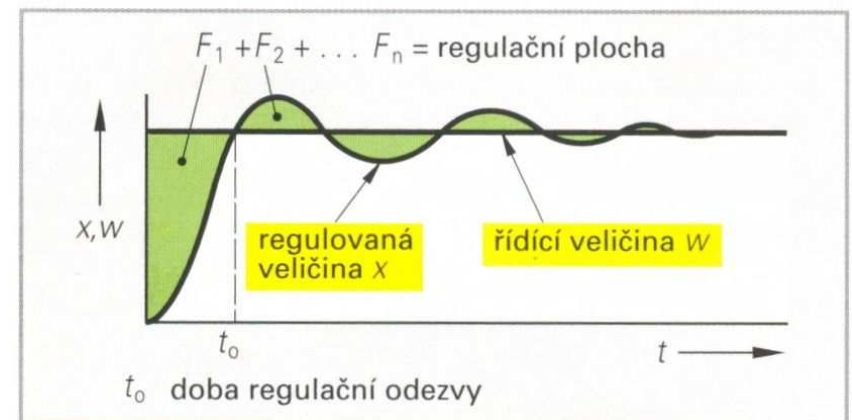


Závislost překmitu na rychlostním zesílení při daných dynamických vlastnostech a rychlosti posuvu

Aby mohlo být rychlostní zesílení optimálně nastaveno, musí být experimentálně ověřeno chování systému. K tomu je třeba oddělit smyčku regulace polohy, např. rozpojením spojky mezi motorem pohonu a vodícím šroubem (vřetenem) posuvu suportu. Pak posuneme ručně suport o malý kousek. Skutečná poloha se potom nekryje s požadovanou polohou, tj. s polohou danou řídicí veličinou. Motor se rozběhne určitými otáčkami, aby vyrovnal diferenci polohy. Protože je však motor odpojen od vodícího šroubu, nedojde ke skutečné regulaci polohy. Otáčky motoru odpovídající určité rychlosti posuvu, zůstávají konstantní a lze je dobře změřit.

Nastavení regulátoru

Dobrá regulace je podmíněna dobrým nastavením regulátoru. Regulátor je většinou nastavován tak, aby při skokové změně řídicí veličiny w dosáhla regulovaná veličina x co nejdříve nově nastavené požadované hodnoty $x_{pož}$ a přitom jen málo a krátkodobě tuto požadovanou hodnotu $x_{pož} = w$ překmitla - viz obr. Rychlost je posuzována podle času regulační odezvy t_o , za který dosáhne regulovaná veličina poprvé nově nastavené hodnoty. Doba regulace t_r je čas, za který se po skokové změně řídicí veličiny zmenší rozkmit oscilací kolem nově nastavené hodnoty w pod předepsané rozpětí $\pm \Delta x$, většinou $\pm 10\% w$. Regulátor je nastavován pomocí parametrů K_{PR} (konstanta úměrnosti), T_n (časová integrační konstanta) a T_v (časová derivační konstanta). Velká hodnota K_{PR} při malé hodnotě T_n vede vždy k silnému kmitání (s velkým rozkmitem) nebo k dlouhému (málo tlumenému) kmitání, vede tedy k **nestabilitě** regulační smyčky.

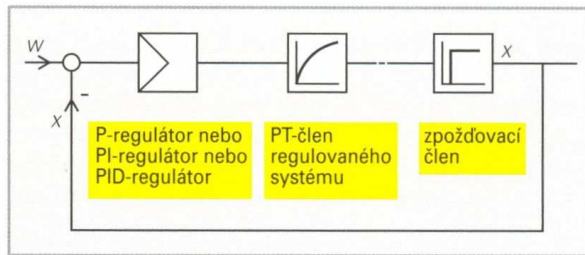


Průběh zakmitávání regulované veličiny při skokové změně řídicí veličiny

- Regulační smyčka je většinou optimálně nastavena, nabývá-li regulační plocha nejmenší hodnoty.
- Samooptimalizující regulátory obsahují mikrokontrolér, který mění parametry a počítá regulační plochu tak dlouho, až najde její minimum. Při výpočtech může být regulační okruh simulován matematickým modelem regulovaného systému a regulačním algoritmem, jehož parametry jsou měněny.

Určení nastavovacích hodnot parametrů regulátoru

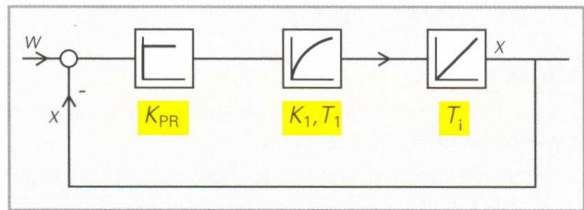
- Regulace systémů s PT_1 -členy a zpožďovacími členy:
Podle metody Zieglera a Nicholse je regulátor nejprve nastavován jako P-regulátor – viz obr. pomocí parametru K_{PR} do stavu, kdy začne netlumeně kmitat a příslušná hodnota parametru je označena jako K_{PRkrit} . Potom je změřena perioda netlumených oscilací T_p . Parametry jsou pak nastaveny na optimální hodnoty dle tabulky.



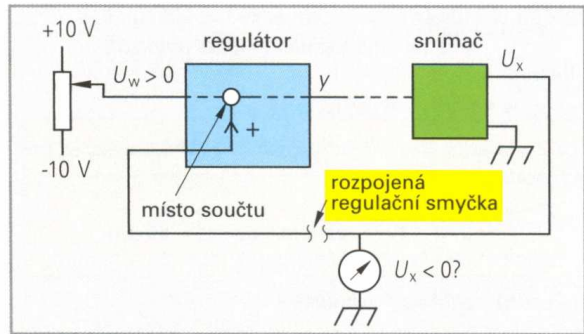
Obr. 2 Regulace PT_1 -systémů

Tabulka 1: Optimální nastavení parametrů regulátoru podle metody Zieglera a Nicholse	
P-regulátor	$K_{PR} = 0,5 K_{PRkrit}$
PI-regulátor	$K_{PR} = 0,45 K_{PRkrit}, T_n = 0,85 T_p$
PID-regulátor	$K_{PR} = 0,6 K_{PRkrit}, T_n = 0,5 T_p, T_v = 0,12 T_p$

- Regulace systémů s I-členem:
K regulaci je opět volen P-regulátor – viz obr. a součin všech zesílení v regulační smyčce je nastaven na výchozí hodnotu $K_0 = TP/TI$. Potom je měněna hodnota K_{PR} a pomocí ní je nastaveno optimální chování regulační smyčky.
- Přezkoušení směru působení regulace:
Regulační smyčka pracuje správně jen tehdy, je-li v komparátoru na vstupu regulátoru regulovaná veličina x od řídicí veličiny w odčítána a ne přičítána. Při nesprávné orientaci musí být snímač přepólován.



Obr. 3 Nastavení regulace I-systému



Obr. 4 Přezkoušení směru působení regulace