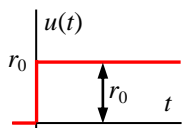
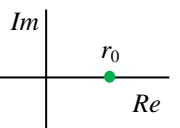
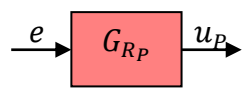
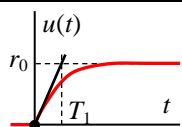
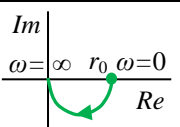
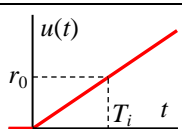
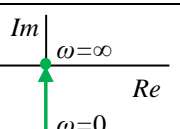
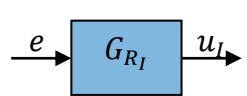
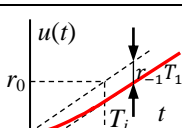
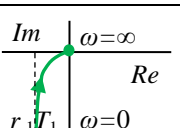
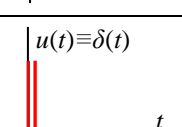
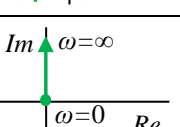

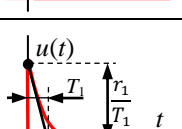
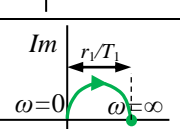
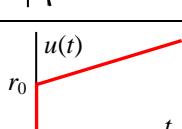
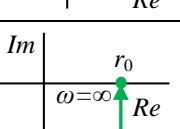
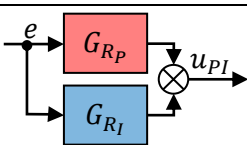
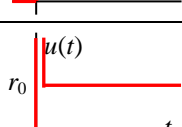
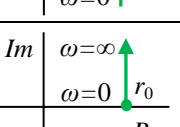
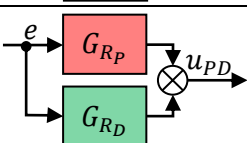
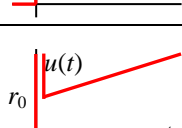
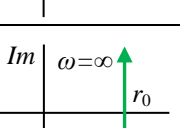
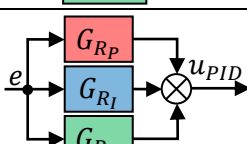


typ regulátora	rovnicu $u = f(e)$ prechodová funkcia $h(t)$	prenos $G_R(s)$	prechodová charakteristika	frekvenčná charakteristika	bloková schéma	konštanty regulátora
P	$u_p = r_0 e$ $u_p(t) = r_0$	r_0				r_0
P s oneskorením 1. rádu	$T_1 u_p' + u_p = r_0 e$ $u_p(t) = r_0 (1 - e^{-t/T_1})$	$\frac{r_0}{T_1 s + 1}$				
I	$u_i = r_{-1} \int e dt$ $u_i(t) = r_{-1} t$	$\frac{r_{-1}}{s}$				T_i $\begin{bmatrix} r_0 \\ r_{-1} \end{bmatrix}$ resp. pre $r_0 = 1$ $\begin{bmatrix} 1 \\ r_{-1} \end{bmatrix}$
I s oneskorením 1. rádu	$T_1 u_i' + u_i = r_{-1} \int e dt$ $u_i(t) = \frac{t}{T_i} - \frac{T_1}{T_i} (1 - e^{-t/T_1})$	$\frac{r_{-1}}{s(T_1 s + 1)}$				
D	$u_D = r_1 e'$ resp. $u_D = r_1 \frac{de}{dt}$ $u_D(t) \equiv \delta(t)$	$r_1 s$				T_d $\begin{bmatrix} r_1 \\ r_0 \end{bmatrix}$ resp. pre $r_0 = 1$ $[r_1]$
D s oneskorením 1. rádu	$T_1 u_D' + u_D = r_1 e'$ $u_D(t) = \frac{T_d}{T_1} e^{-t/T_1}$	$\frac{r_1 s}{T_1 s + 1}$				
PI	$u_{PI} = r_0 e + r_{-1} \int e dt$ $u_{PI}(t) = r_0 + r_{-1} t$	$r_0 + \frac{r_{-1}}{s}$				r_0, T_i
PD	$u_{PD} = r_0 e + r_1 e'$ $u_{PD}(t) = r_0 + \delta(t)$	$r_0 + r_1 s$				r_0, T_d
PID	$u_{PID} = r_0 e + r_{-1} \int e dt + r_1 e'$ $u_{PID}(t) = r_0 + r_{-1} t + \delta(t)$	$r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s$				r_0, T_i, T_d

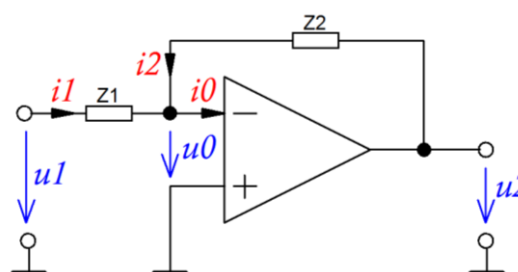
3.1. Konštrukčné princípy a použitie regulátorov

Doteraz sme sa zaoberali dynamickými vlastnosťami spojitého regulátora. Teraz obrátíme svoju pozornosť na konštrukčné princípy spojitého regulátora. Rovnako ako pri dynamických vlastnostiach aj tu hovoríme o ústredných členoch regulátora. A pretože v dnešnej dobe je viac ako 90% regulátorov elektrických, budeme sa zaoberať konštrukčnými princípmi elektrických regulátorov (respektíve ich ústredných členov).

Spojité elektrické regulátory (ústredný člen regulátora) majú ako základ **operačný zosilňovač**. Operačný zosilňovač (ďalej len OZ) je jednosmerný zosilňovač s veľkým napätovým zosilnením okolo 10^6 a veľkým vstupným odporom³. OZ má spätnú väzbu, v ktorej je spätnoväzbová impedancia (ohmický odpor alebo kapacita) a vstupnú impedanciu (tiež ohmický odpor alebo kapacita). Jeho vstupné napätie u_0 a prúd i_0 majú takmer nulové hodnoty. Ako vstup sa používa mínus vstup, ktorý je invertujúci a vytvára tak zápornú spätnú väzbu (vstup plus je neinvertujúci a nevyužíva sa).

Všeobecné zapojenie OZ pre účely realizácie regulátora je na obr. 46. Za predpokladu $i_0 = 0$ platí

$$\begin{aligned} i_1 &= -i_2 \\ i_1 &= \frac{u_1}{Z_1} & i_2 &= \frac{u_2}{Z_2} \\ \frac{u_1}{Z_1} &= -\frac{u_2}{Z_2} \\ A_u &= -\frac{u_2}{u_1} = -\frac{Z_2}{Z_1} \\ u_2 &= -A_u u_1 \end{aligned}$$



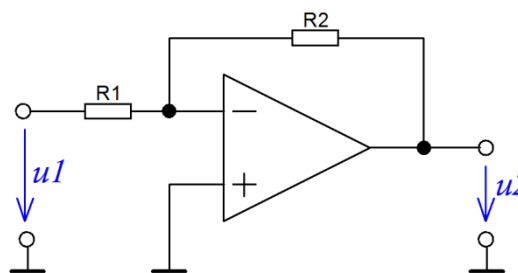
Obr. 46

Kde A_u je napätové zosilnenie OZ.

Proporcionálny regulátor vytvoríme podľa Obr. 47 zapojením ohmického odporu R_1 do vstupu a R_2 do spätnej väzby. Pomer odporov v spätnej väzbe a na vstupe predstavuje proporcionálne zosilnenie regulátora r_0 , teda jeho prenos $G(s)$.

$$\begin{aligned} G(s) &= -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2}{R_1} = -r_0 \\ u_2 &= -\frac{R_2}{R_1} u_1 \\ \boxed{u_2} &= \boxed{-r_0 u_1} \end{aligned}$$

Tu napätie u_1 reprezentuje regulačnú odchýlku e a napätie u_2 akčnú veličinu u .



Obr. 47

Integračný regulátor vytvoríme podľa Obr. 48 zapojením kondenzátora s kapacitou C_2 do spätnej väzby a ohmického odporu R_1 do vstupu. Platí

$$\begin{aligned} Z_2 &= X_{C_2}(j\omega) = \frac{1}{j\omega C_2}; & X_{C_2}(s) &= \frac{1}{sC_2} \\ G(s) &= -\frac{1}{sC_2 R_1} = -\frac{1}{sC_2 R_1} = -\frac{r_{-1}}{s} \end{aligned}$$

³ Požadované vlastnosti ideálneho OZ sú: $A_u = \infty$; $R_{vst} = \infty \Omega$; $R_{vys} = 0 \Omega$. Reálne OZ dosahujú: $A_u = 10^4$ až 10^6 ; $R_{vst} = 10^5$ až $10^{13} \Omega$; $R_{vys} = 10$ až 150Ω

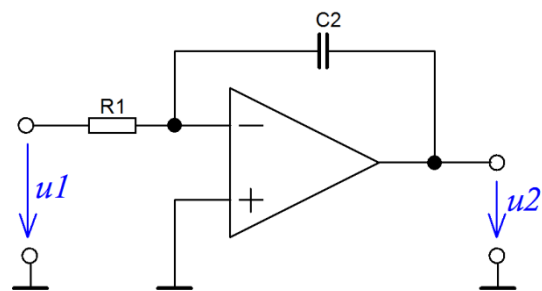
$$T_i = C_2 R_1$$

$$i_1 = \frac{u_1}{R_1}; \quad i_2 = C_2 \frac{du_2}{dt};$$

$$u_2 = -\frac{1}{C_2 R_1} \int u_1 dt = -\frac{1}{T_i} \int u_1 dt$$

resp.

$$u_2 = -r_{-1} \int u_1 dt$$



Obr. 48

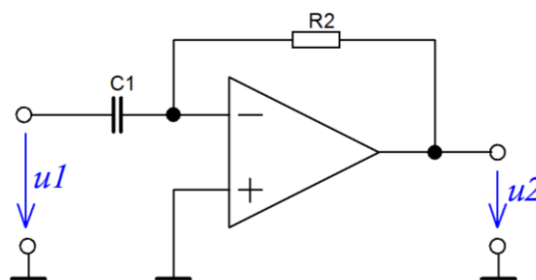
Derivačná zložka regulátora má v spätnej väzbe odpor R_2 a vo vstupe kapacitu C_1 – Obr. 49.

$$G(s) = -\frac{R_2}{\frac{1}{sC_1}} = -sC_1 R_2 = -sr_1 = -sT_d$$

$$T_d = C_1 R_2$$

$$i_1 = C_1 \frac{du_1}{dt}; \quad i_2 = \frac{u_2}{R_2}$$

$$u_2 = -C_1 R_2 \frac{du_1}{dt} = -T_d \frac{du_1}{dt} = -r_1 u_1'$$



Obr. 49

Na rozdiel od P a I regulátora o derivačnej zložke nehovoríme ako o D regulátore. Táto zložka **nemôže byť samostatne použitá**. Ideálna derivačná zložka zosilňuje šumy. Šum predstavuje napätie malej amplitúdy, ale vysokej frekvencie ω . S určitým zjednodušením ho môžeme vyjadriť vzťahom

$$u = u_0 \sin \omega t$$

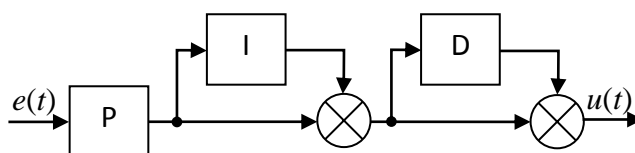
Ak by sme priviedli tento šum na vstup ideálneho derivačného regulátora, bude na jeho výstupe derivácia

$$u = u_0 \omega \cos \omega t$$

Pôvodne malá amplitúda u_0 je vynásobená veľkou frekvenciou ω a výsledný signál (derivácia šumového napätia) by mohol byť tak veľký, že by prevýšil užitočný signál. Preto môžeme D zložku len pridať k P regulátoru alebo k PI regulátoru.

Nastaviteľnosť parametrov sa realizuje zaradením potenciometrov. V popísanom vyhotovení by sme zmenou niektorej z hodnôt Z_2, Z_1 menili parametre regulátora, teda r_0, T_i alebo T_d .

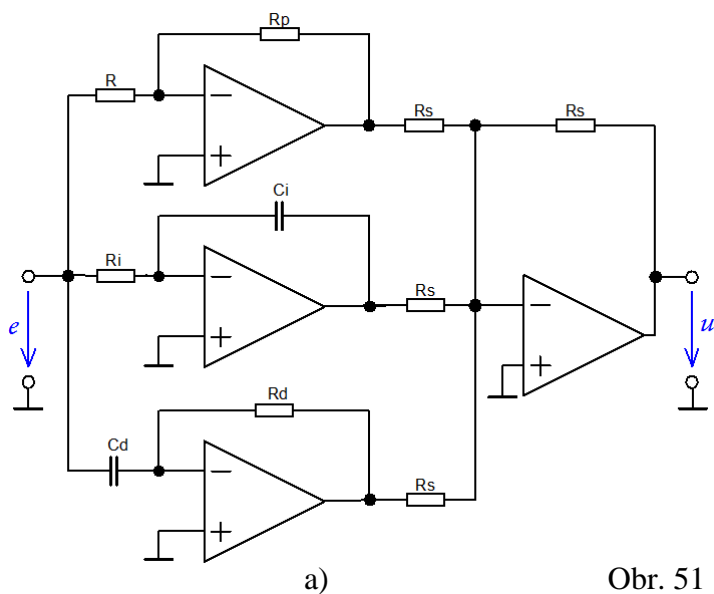
Kombinácie základných typov regulátorov, ktoré umožňujú dosiahnuť vyššiu kvalitu regulácie než jednoduché regulátory, sa realizujú sériovým ale najčastejšie paralelným radením základných regulátorov – dosahuje sa najkvalitnejší výsledok ale za cenu vyššieho počtu zosilňovačov. Ďalšou možnosťou je realizácia rôznych spätoväzbových obvodov s použitím OZ, čím sa upravuje prenos regulátora. Na Obr. 50 je alternatíva sériového radenia základných regulátorov. Problémom takéhoto radenia



Obr. 50

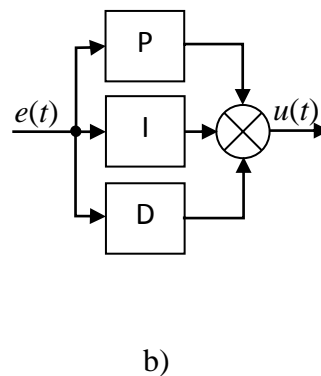
SPOJITÉ LINEÁRNE RIADENIE – regulátory

je to, že pri zmene konštanty niektorého člena dochádza k ovplyvňovaniu konštant ostatných členov. Tento nepriaznivý stav sa nazýva **interakcia**.

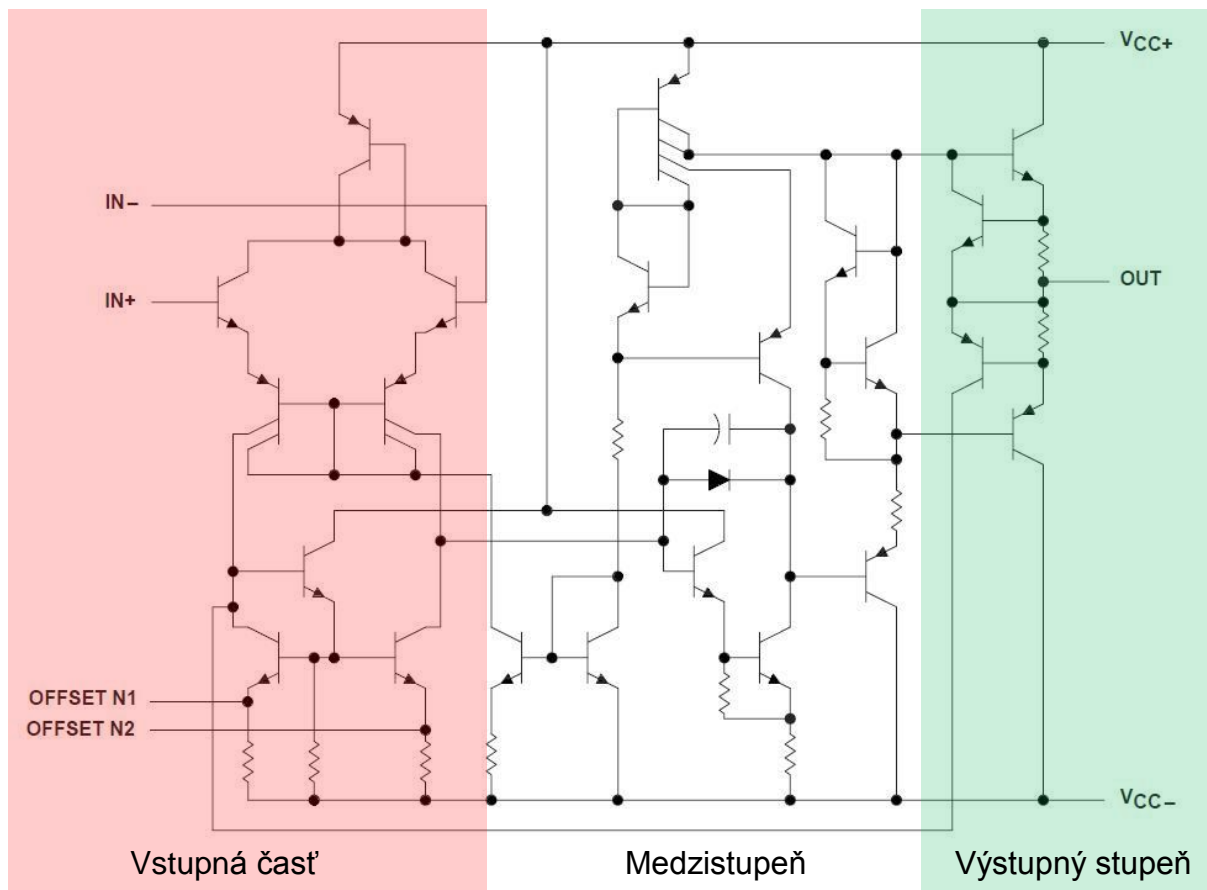


Obr. 51

Na Obr. 51 je spôsob realizácie PID regulátora paralelným zapojením základných regulátorov. Takýto kombinovaný regulátor je **bez interakcie**.



Vnútročné zapojenie bežného OZ – Obr. 52



Obr. 52

Priemyselné regulátory tiež často obsahujú ďalšie prídavné obvody, napr. pre filtráciu šumov, pre potlačenie vplyvu riadiacej veličiny (špeciálne v prípade D zložky sa ako vstupná

veličina zapája miesto regulačnej odchýlky $e = w - y$ (regulovaná veličina y), pre ručné a automatické riadenie s beznárazovým prepnutím, spolupráca s počítačom, atď.

Teraz sa budeme stručne zaoberať **použitím jednotlivých typov regulátorov**. Spracovanie regulačnej odchýlky $e = w - y$ je rozložené v PID regulátore do troch paralelne pracujúcich zložiek regulátora, ktoré každá svojim spôsobom ovplyvňuje veľkosť tzv. **akčného zásahu**, teda zmenu akčnej veličiny u tak, ako je to podľa ich „názoru“ pre odstránenie existujúcej regulačnej odchýlky nutné.

Matematicky najmenej komplikovaným objektom zo všetkých troch zložiek PID regulátora je jeho proporcionálna zložka, spravidla označovaná ako **P regulátor**. Ten ku svojej činnosti využíva všeobecne dobre známy princíp priamej (proporcionálnej) úmernosti – čím väčšiu detekuje okamžitú regulačnú odchýlku, tým väčší („dôraznejší“) generuje aj akčný zásah. Ak je napr. P regulátorom pripojeným k ventilu, ovládajúcemu prívod paliva do plynového horáku, udržiavaná teplota vody v nádrži, do ktorej neustále priteká studená voda, na hodnote 100°C a jej skutočná hodnota poklesne na 98°C , teda regulačná odchýlka resp. rozdiel medzi žiadanou (100°C) a skutočnou (98°C) teplotou bude 2°C , pootvorí, pri konštante úmernosti $r_0 = 2$, P regulátor ventil prívodu paliva do horáka o štyri dieliky (každý dielik pritom zodpovedá určitému prietoku plynu, a tým aj výkonu horáka). Ak teplota vody v nádrži klesne na 96°C , pootvorí sa ventil o osem dielikov, ak sa vráti na 100°C , prívod plynu do horáku sa uzavrie a pod. Spomenutá konštanta úmernosti alebo prevodná konštanta medzi veľkosťou regulačnej odchýlky e a generovanou hodnotou akčnej veličiny u je jediný nastaviteľný parameter P regulátora a je to tzv. zosilnenie regulátora r_0 . Určuje aj dobu trvania regulačného pochodu (čím väčšie je r_0 , tým dôraznejší je regulačný zásah a kratšia doba regulácie). Zosilnenie regulátora môže byť dosť vysoké bez toho, aby hrozila nestabilita alebo prekmity regulovanej veličiny.

V praxi sú samostatné P regulátory obľúbené predovšetkým vďaka svojej jednoduchosti (jeden premenný parameter a prehľadná štruktúra) dostatočne rýchlemu priebehu regulácie a stabilite. Ich základnou nevýhodou je však existencia tzv. **trvalej regulačnej odchýlky** (klesá s rastúcim zosilnením), teda nie sú schopné z princípu svojej činnosti samy úplne odstrániť rozdiel medzi skutočnou a žiadanou hodnotou regulovanej veličiny. O trvalej regulačnej odchýlke bude spomenuté ďalej. P regulátor nie je tiež vhodný pre regulované systavy vyšších rádov a pre systavy s dopravným oneskorením.

Trochu komplikovanejšie, a to nielen z matematického hľadiska, je spracovanie regulačnej odchýlky **I regulátorom**. Zmena akčnej veličiny je v tomto prípade úmerná časovej hodnote integrálu regulačnej odchýlky. To znamená, že momentálna rýchlosť zmeny akčnej veličiny závisí priamo na veľkosti regulačnej odchýlky [$u \sim \int edt \rightarrow u' \sim e$]. Na objasnenie použijeme predošlý príklad regulácie teploty v nádrži. Predpokladajme, že za určitý interval napr. $\Delta t = 10$ s bude rozdiel medzi žiadanou a skutočnou teplotou konštantný rovnajúci sa 2°C . Počas uvedenej doby sa v pamäti I regulátora „naintegruje“ hodnota 20 resp. obsah plochy o rozmeroch $2^{\circ}\text{C} \times 10$ s. Ak pritom začiatok sledovaného intervalu leží zároveň na začiatku časovej osi (pôvodná hodnota integrálu je nulová) a konštanta úmernosti je napríklad $r_{-1} = 0,1$, otvorí počas sledovaného intervalu I regulátor ventil prívodu plynu do horáku lineárne (s konštantnou rýchlosťou zmeny $0,2$ dielika/s) z nuly na dva dieliky. Tu sme uvažovali konštantu úmernosti r_{-1} , čo je konštanta priamej úmernosti. Podľa prenosu daného rovnicou (48) sa častejšie vyskytuje vo svojej prevrátenej hodnote $T_i = r_0 / r_{-1}$. Tu však platí, že čím väčšia je hodnota T_i , tým menší je vplyv I regulátora na hodnotu akčnej veličiny.

Bez ohľadu na typ a hodnotu použitej integračnej konštanty je však I regulátor schopný úplne odstrániť regulačnú odchýlku, teda vrátiť „odchýlenú“ hodnotu napr. teploty

vody v nádrži späť na je požadovanú úroveň. Pokým jestvuje regulačná odchýlka teda hodnota integrálu nie je nulová regulátor reguluje. Táto jedinečná vlastnosť (P ani D zložka regulátora ju nemajú) je však vykúpená zhoršením stability regulačného obvodu – regulačný pochod ovplyvňovaný I regulátorom býva spravidla viac či menej kmitavý, čo môže pomerne nepriaznivo ovplyvňovať aj opotrebenie akčných orgánov (predĺžením prechodového deja, teda doby, počas ktorú sa regulovaná sústava ustáľuje). Tieto nevýhody tak obmedzujú samostatné pôsobenie I regulátora len na pomerne úzky okruh konkrétnych zariadení, a v praxi sa preto objavuje v spojení so svojim proporcionálnym „kolegom“ v podobe PI regulátora, ktorý výhodne spája charakteristické vlastnosti oboch. Integračná zložka má na starosti úplné odstránenie regulačnej odchýlky (s vzrastajúcim podielom I regulácie však rastie kmitavosť akčného zásahu), proporcionálna potom skracaje dobu trvania regulačného pochodu.

Regulátor I je veľmi vhodný pre proporcionálne regulované sústavy bez zotrvačnosti, jeho zosilnenie môže byť veľmi vysoké bez hrozby rozkmitania. Je vhodný aj pre zotrvačné sústavy 1. rádu, pri poruche však dochádza k väčšiemu prekmitu regulovanej veličiny. Regulátor I je najvhodnejší zo všetkých ostatných typov pre reguláciu statických sústav s dopravným oneskorením. V prípade týchto sústav najviac hrozí rozkmitanie regulačného obvodu. Preto musíme nastaviť menšie zosilnenie regulátora. Regulátor I je menej vhodný pre reguláciu sústav vyšších rádov, v ich prípade sa lepšie uplatní regulátor PI. Nie je možné ho použiť pre integračné (astatické) sústavy, lebo regulačný obvod je nestabilný.

Približne na rovnakej úrovni ako v prípade integračného regulátora, aspoň z pohľadu matematickej zložitosti, je spracovanie regulačnej odchýlky aj **derivačnou zložkou** klasického PID algoritmu s ktorou sa môžeme stretnúť tiež pod zjednodušeným označením D regulátor. Ako názov napovedá, je zmena akčnej veličiny úmerná hodnote derivácie regulačnej odchýlky. To znamená, že hodnota akčnej veličiny generovaná D regulátorom zodpovedá okamžitej hodnote rýchlosti zmeny rozdielu medzi žiadanou a skutočnou hodnotou regulovanej veličiny [$u \sim e' = (w - y)'$]. Ak teda regulačná odchýlka teploty vody v nádrži z nášho príkladu vzrastie napr. počas časového intervalu o dĺžke $\Delta t = 10$ s lineárne, teda s rovnomerným nárastom, z 2°C na 3°C , bude na výstupe D regulátora počas celého sledovaného intervalu hodnota úmerná priemernej rýchlosti zmeny regulačnej odchýlky, teda $0,1^\circ\text{C/s}$ a ventil prívodu plynu do horáka tak bude, pri konštante úmernosti $r_1 = 10$, počas celého sledovaného intervalu otvorený na jeden dielik. V prípade, že odchýlka zväčší tempo svojho rastu napr. na $0,2^\circ\text{C/s}$, zareaguje derivačná zložka otvorením ventilu na dva dieliky, ak sa odchýlka naopak ustáli na konštantnej hodnote, teda rýchlosť rastu, prípadne klesania sa bude rovnať nule, ventil sa úplne uzavrie a pod. Konštanta úmernosti je v prípade D regulátora označovaná ako tzv. derivačná časová konštanta T_d , alebo r_1 – pozri prenos v rovnici (48). Ako už bolo povedané, v praxi nie je možné použiť D regulátor samostatne. Je to predovšetkým pre už spomínanú vlastnosť zosilňovať deriváciou šumové napätie a ďalej pre jeho neschopnosť reagovať na ustálenú hodnotu regulačnej odchýlky a pre nestabilitu celého regulačného obvodu spôsobenú veľkými odozvami D regulátora na prudké zmeny regulačnej odchýlky (pri skokovej zmene regulačnej odchýlky teoreticky až nekonečne veľkými), ktoré môžu viesť až k nekontrolovateľnému rozkmitaniu regulačných orgánov. V praxi sa preto D regulátory používajú predovšetkým v kombináciách s P, prípadne PI regulátormi. V klasickej kombinácii s ostatnými zložkami PID regulátora zlepšujú stabilitu regulácie, skracajú periódu kmitov akčnej veličiny a znižujú rýchlosť reakcie regulačného obvodu na poruchu a tak zrýchľujú a zlepšujú priebeh regulačného pochodu (prechodový dej), avšak len do určitej miery. Príliš veľká derivačná konštanta môže totiž vlastnosti regulačného obvodu aj zhoršiť, čo je výrazné pri systémoch s vysokou hladinou šumu, na ktorý D regulátor reaguje zbytočným rozkmitávaním akčného člena.

SPOJITÉ LINEÁRNE RIADENIE – regulátory

Na záver môžeme konštatovať, že **PD regulátor** je vhodný tam, kde vyhovuje regulátor P. Jeho prednosťou je väčšia rýchlosť regulácie. **PI regulátor** úplne odstraňuje regulačnú odchýlku a vo väčšine prípadov zlepšuje stabilitu regulačného obvodu. Regulátor PI sa najviac používa pri regulácii kmitavých sústav druhého a vyšších rádo. Čím je rád sústavy vyšší, tým viac musíme znižovať zosilnenie, resp. zväčšovať integračnú časovú konštantu T_i . Pre proporcionálne sústavy s dopravným oneskorením poskytuje lepšie výsledky regulátor I. Pre integračné sústavy (a to aj s dopravným oneskorením) je regulátor PI vhodný tam, kde sa požaduje úplné odstránenie regulačnej odchýlky. Inde je vhodnejší regulátor P.

PID regulátor je vhodný všade tam, kde vyhovuje regulátor PI. Oproti regulátoru PI je rýchlejší, takže lepšie tlmí rýchle prekmity regulovanej veličiny.

Rekapitulačný prehľad vhodnosti použitia jednotlivých druhov regulátorov podľa rôznych kritérií uvádza Tab. 5.

Prehľad vhodnosti použitia jednotlivých druhov regulátorov

Tab. 5

Regulátor		P	I	PI	PD	PID	
Sústava	statická	$T_u/T_n \ll 1$	+	+	+	±	±
		$T_u/T_n < 1$	-	-	+	-	+
		$T_u/T_n \geq 1$	-	-	±	-	-
	astatická (integračná) $T_u = 0$	+	-	±	+	-	
	s dopravným oneskorením	-	-	+	-	-	
	s veľkými časovými konštantami	-	-	+	±	+	
Charakter porúch	veľká amplitúda	-	+	+	-	+	
	veľká rýchlosť	+	-	-	+	+	
Požiadavky na regulačný pochod	nulová trvalá regulačná odchýlka	-	+	+	-	+	
	krátky čas vyregulovania porúch	+	-	-	+	+	
	malé preregulovanie	+	-	-	+	+	
Poznámky: + vhodný - nevhodný ± podľa okolností môže byť vhodný aj nevhodný T_u čas prietahu regulovanej sústavy T_n čas nábehu regulovanej sústavy							