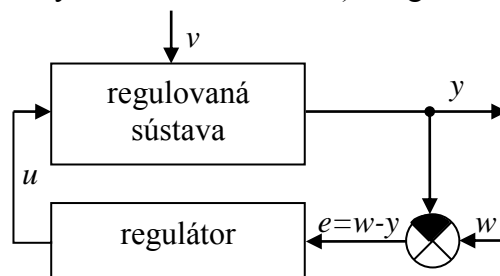


3. Regulátory

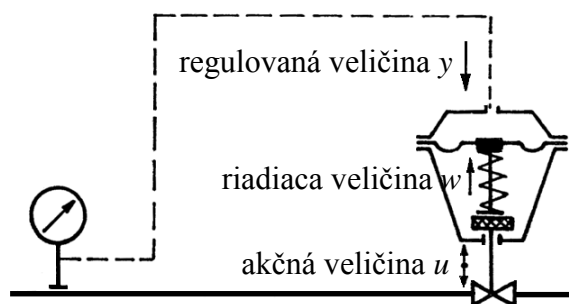
3.1. Základné pojmy, rozdelenie

Regulátor je zariadenie, ktoré vykonáva reguláciu, čiže ktoré prostredníctvom akčnej veličiny pôsobí na regulovanú sústavu tak, aby sa regulovaná veličina udržovala na predpísanej hodnote (vo zvláštnych prípadoch to nemusí byť konštantná hodnota) a regulačná odchýlka bola nulová alebo čo najmenšia. Podľa Obr. 38 sa regulačný obvod skladá z regulovanej sústavy a regulátora. Všetky členy tohto obvodu s výnimkou regulovanej sústavy teda zahrňame pod pojem regulátor. Vo väčšine priemyselných regulácií ho vyrába špecializovaný výrobca, iný než je výrobca regulovanej sústavy. Preto v týchto priemyselných reguláciách býva výrazne odlišný od regulovanej sústavy.



Obr. 38

Vplyvom poruchy v dôjde ku zmene regulovanej veličiny, ktorá sa odchyľ od požadovanej hodnoty, ktorá je nastavená prostredníctvom riadiacej veličiny w . Ak nie je zhoda medzi riadiacou veličinou w a regulovanou veličinou y vznikne regulačná odchýlka $e = w - y$. A práve túto odstraňuje regulátor svojim zásahom do regulovanej sústavy prostredníctvom akčnej veličiny u . Vplyvom toho, že v obvode je záporná spätná väzba, je zásah regulátora takého charakteru, že spôsobuje znižovanie regulačnej odchýlky. A ak je regulačná odchýlka nulová, je regulátor bez „práce“, na jeho vstupe je nula.



Obr. 39

Klasické rozdelenie regulátorov bolo na regulátory **direktné (priame)** a **indirektné (nepriame)**. Direktné regulátory nepotrebovali ku svojej činnosti pomocnú energiu a všetku energiu potrebnú ku svojej činnosti odoberali z regulovanej sústavy. Príkladom je regulátor tlaku, uvedený na Obr. 39. Sila tlaku tu stačí na prestavenie regulačného ventilu. Ako direktný regulátor funguje ihlový ventil pri regulácii hladiny v karburátore. Ale najznámejším direktným regulátorom bol dnes už klasický Wattov regulátor otáčok s rozťažníkom, používaný prv pri parných strojoch http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f0/Steam_engine_in_action.gif. Direktné regulátory sa až na malé výnimky dnes už nepoužívajú. Boli síce jednoduché a spoľahlivé, ale ich regulačné dynamické vlastnosti neboli dobré.

Dnes používané indirektné regulátory vyžadujú vždy pomocný zdroj energie. A práve podľa tejto pomocnej energie ich konštrukčne delíme na regulátory **pneumatické, hydraulické a elektrické**.

Pneumatické regulátory sú vhodné v závodoch, kde je urobený rozvod tlakového vzduchu. Skôr sa hojne používali vo výbušných prostrediach (chemické výroby, naftové rafinérie, ...), kde sa nemohli použiť elektrické regulátory. Dnes je ale vytlačili práve elektrické regulátory vyrobené v nevybušnom vyhotovení. Pneumatické regulátory sú prepojené rúrkami, porucha sa môže zistiť podľa syčania unikajúceho vzduchu. Pre svoju činnosť používajú ventily, membrány, clony a podobné pneumatické prvky.

Hydraulické regulátory využívajú ako napájanie tlakový olej. Môžu vyvinúť veľkú silu. Preto sa používajú (aj v kombinácii s inými typmi regulátorov) hydraulické servoválce

PRIEMYSELNÁ INFORMATIKA
SPOJITÉ LINEÁRNE RIADENIE – regulátory

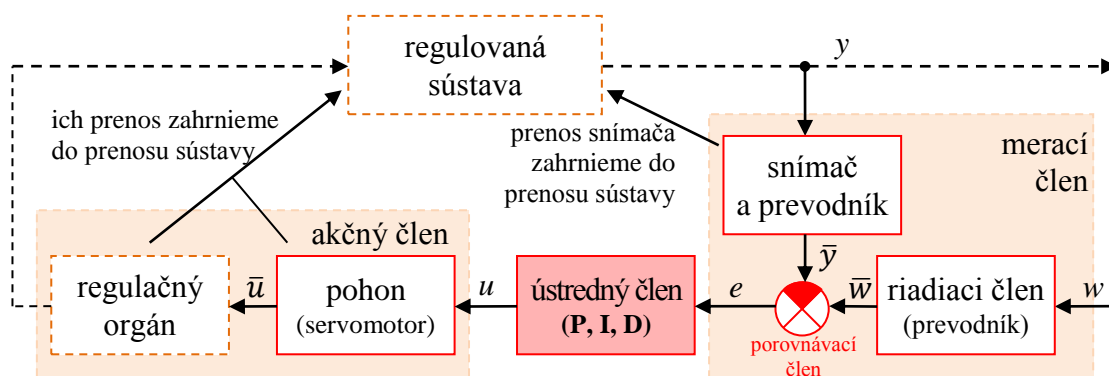
ako silové ovládacie servomotory napr. pre ovládanie regulačných lopatiek vodných turbín a pod.

Najpoužívanejšie sú elektrické regulátory, ktoré využívajú pre napájanie elektrickú energiu. Väčšinou sú to elektronické zariadenia (operačné zosilňovače), iba akčné členy sú elektromechanické (servomotory, elektromagnety). Najväčšou výhodou elektronických regulátorov sú dobré regulačné vlastnosti, malé rozmery a malá hmotnosť, vysoká energetická účinnosť, čistá a bezhlučná prevádzka, relatívne nízka cena. Nevýhodou je väčšia zložitosť, ktorá komplikuje opravy. Nasadením integrovaných obvodov a ďalších moderných súčiastok vzrástla aj spoľahlivosť týchto systémov. Dnes nemajú konkurenciu v ostatných typoch regulátorov.

Podľa priebehu výstupného signálu sa regulátory delia na **spojité a nespojité**. Spojité regulátory pracujú so spojitémi signálmi. Hlavnými stavebnými prvkami sú operačné zosilňovače. Kvalita regulácie je veľmi dobrá, návrh regulácie je pomerne jednoduchý. Sú základom regulačnej techniky. Nespojité regulátory pracujú s nespojitými signálmi. Dnes do popredia vystupujú diskrétny regulátory, ktorých výstup je postupnosťou numerických hodnôt – sú to číslicové počítače vo funkcii regulátora. Medzi nespojité regulátory zaradíme aj regulátory dvojpolohové – charakter nespojitosti je tu však trochu iný, než pri diskrétnych regulátoroch.

Používa sa tiež delenie regulátorov na **lineárne a nelineárne**. Rozhodujúcim prvkom je tu statická charakteristika. Ďalej sa budeme zaoberať regulátormi lineárnymi.

Regulátor nie je jeden prvok. Skladá sa z niekoľkých prvkov, ako je zrejme z Obr. 39. Základom sú tri prvky zapojené v sérii a to **merací člen** (tiež snímač), **ústredný člen** a **akčný člen** (pohon, servomotor).



Obr. 39

Meracím členom zisťujeme skutočnú hodnotu regulovanej veličiny, meníme ju na elektrické napätie (v elektrických regulátoroch) a vytvárame regulačnú odchýlku. Merací člen sa skladá zo snímača s prevodníkom, z prevodníka riadiacej veličiny a z porovnávacieho člena.

Snímač zisťuje časový priebeh regulovanej veličiny. Podľa toho, akú fyzikálnu veličinu regulujeme, volíme druh snímača. Aby sme docielili dobrú reguláciu, musíme voliť vhodný snímač a jeho umiestnenie v regulovanej sústave. U snímača nás zaujíma hlavne jeho presnosť, lebo regulačný obvod nemôže regulovať presnejšie, ako je presnosť snímača. Výstupom snímača je signál úmerný regulovanej veličine, ktorý má inú fyzikálnu povahu (preto hovoríme o snímači s prevodníkom – regulovaná veličina je snímačom zmenená, a to najčastejšie na elektrické napätie alebo prúd, tlak vzduchu alebo oleja).

Porovnávací člen vykonáva odčítanie výstupného signálu zo snímača od signálu žiadanej hodnoty regulovanej veličiny a takto vytvorený rozdiel je regulačná odchýlka.

Ústredný člen regulátora spracováva regulačnú odchýlku. Regulačnú odchýlku môže zosilňovať, integrovať a derivovať. Označuje sa často ako regulátor v užšom slova zmysle a často teda pod pojmom regulátor myslíme iba ústredný člen. Ústredný člen má rozhodujúci vplyv na regulačný pochod. Jeho vlastnosti môžeme voliť a práve pri návrhu regulátora hľadáme taký ústredný člen s takými parametrami, ktoré nám zaistia vyhovujúce vlastnosti celého obvodu. Ak sa budeme v ďalšom zaoberať dynamickými vlastnosťami regulátora, budeme sa zaoberať výhradne dynamickými vlastnosťami ústredného člena.

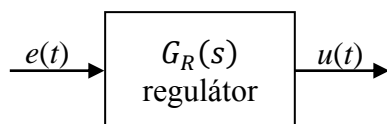
Akčný člen regulátora sa skladá z pohonu a regulačného orgánu. Regulačný orgán je už často považovaný za súčasť regulovanej sústavy. Pohon alebo niekedy tiež servomotor dodáva energiu regulačnému orgánu, mení jeho polohu, natočenie, otvorenie a pod. Regulačný orgán priamo ovláda akčnú veličinu. Medzi regulačné orgány zaraďujeme rôzne ventily, klapky, posúvače a pod. Od regulačného orgánu požadujeme lineárnu závislosť medzi polohou pohonu a akčnou veličinou.

Z funkcie regulátora vyplýva, že úlohou snímača s prevodníkom a prevodníka pre riadiacu veličinu je zmeniť obe veličiny y , w na rovnakú fyzikálnu veličinu (u elektrických regulátorov na elektrické napätie), aby sa v porovnávačom člene mohol realizovať ich rozdiel. Pretože žiadne iné požiadavky na tieto členy nekladíme, bude vhodné, keď ich prenos sa bude približne rovnať jednej. To je možné obvykle ľahko splniť pri prevodníku pre riadiacu veličinu. V prípade snímača je to ťažké, snímače majú charakter proporcionálneho člena s oneskorením niekedy aj vyššieho rádu. Aby sme mohli blokovú schému regulačného obvodu zjednodušiť (Obr. 38), zahŕňame prenos snímača do prenosu regulovanej sústavy. Rovnako je tomu s prenosom pohonu a regulačného orgánu, ak sa ich prenos neblíži jednej a nie je teda zanedbateľný (vzhľadom k malým časovým konštantám).

Niektoré pohony však majú integračný charakter a potom výrazne menia charakter regulovanej sústavy.

3.2. Dynamické vlastnosti regulátora

Teraz sa budeme zaoberať dynamickými vlastnosťami regulátora, presnejšie povedané dynamickými vlastnosťami ústredného člena regulátora. Podľa Obr. 40 je vstupom regulátora regulačná odchýlka (jej časový priebeh) $e(t)$ a výstupom akčná veličina $u(t)$.



Obr. 40

Regulátor môže regulačnú odchýlku zosilňovať, integrovať a derivovať. Najjednoduchší prípad je len zosilňovanie – regulátor je iba zosilňovač. V tomto prípade je akčná veličina úmerná regulačnej odchýlke

$$u = r_0 e \quad (39)$$

Taký regulátor sa nazýva **proporcionálny** alebo **P regulátor**.

Častým prípadom regulátora je tiež taký, kedy akčná veličina je úmerná integrálu regulačnej odchýlky

$$u = r_{-1} \int e dt \quad (40)$$

a potom ide o **integračný** alebo **I regulátor**.

Technická realizácia nie je možná v prípade regulátora, kde by akčná veličina bola úmerná derivácii regulačnej odchýlky (pretože by došlo k rozpojeniu regulačného obvodu v ustálenom stave)

$$u = r_1 e' \quad (41)$$

PRIEMYSELNÁ INFORMATIKA
SPOJITÉ LINEÁRNE RIADENIE – regulátory

a to by bol prípad regulátora **derivačného** alebo **D regulátora**.

Kombináciou týchto základných typov vzniknú ďalšie regulátory. Regulátor **proporcionálno-integračný** alebo **PI regulátor** má akčnú veličinu úmernú ako regulačnej odchýlke, tak jej integrálu, pričom vplyv toho alebo onoho sa dá zväčšiť alebo zmenšiť voľbou konštánt

$$u = r_0 e + r_{-1} \int e dt \quad (42)$$

Podobne regulátor **proporcionálno-derivačný** alebo **PD regulátor** má akčnú veličinu úmernú regulačnej odchýlke a jej derivácii

$$u = r_0 e + r_1 e' \quad (43)$$

a napokon regulátor **proporcionálno-integračno-derivačný** alebo **PID regulátor** má akčnú veličinu úmernú regulačnej odchýlke, jej integrálu a jej derivácii

$$\boxed{u = r_0 e + r_{-1} \int e dt + r_1 e'} \quad (44)$$

PID je vzhľadom k predchádzajúcim typom všeobecným typom regulátora a na ostatné sa môžeme pozerať tak, že niektorá z konštánt r_0 , r_{-1} alebo r_1 sa rovná nule.

Regulátor popísaný rovnicou (44) je však ideálny PID regulátor. U každého skutočného regulátora sa uplatňujú rôzne oneskorenia spôsobené zotrvačnosťou, pasívnymi odpormi, kapacitou a pod. To znamená, že sa na ľavej strane diferenciálnej rovnice ešte objaví oneskorujúce členy

$$\dots + T_2 u'' + T_1 u' + u = r_0 e + r_{-1} \int e dt + r_1 e' \quad (45)$$

To je rovnica skutočného PID regulátora. Hydraulické a pneumatické regulátory majú oneskorujúce konštanty T_1 , T_2 , ... dosť veľké. Naproti tomu elektronické regulátory majú tieto konštanty T_1 , T_2 , ...zanedbateľné a svojim charakterom sa blížia ideálnemu regulátoru.

Prenos ideálneho PID regulátora je z rovnice (44)

$$\boxed{G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s} \quad (46)$$

a skutočného PID regulátora z rovnice (45)

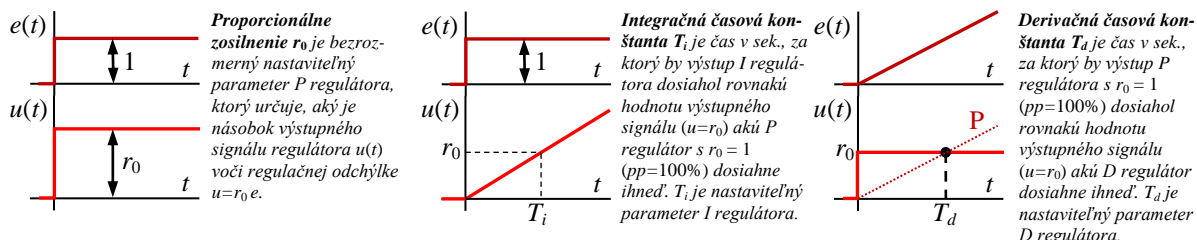
$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s}{1 + T_1 s + T_2 s^2 + \dots} \quad (47)$$

Konštanty r_0 , r_{-1} , a r_1 v rovnicach regulátora určujú vplyv jednotlivej zložky (proporcionálna, integračná alebo derivačná) na tvorbu výslednej akčnej veličiny. V regulátoroch sú nastaviteľné a dajú sa nastaviť tak, aby výsledná regulácia spĺňala to, čo od nej očakávame. Častejšie sa však udávajú v inom tvare. Prenos ideálneho PID regulátora (46) si vyjadríme vyňatím r_0 v inom tvare

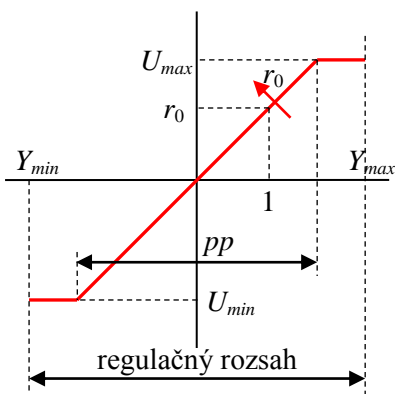
$$\boxed{G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s = r_0 \left(1 + \frac{1}{\frac{r_0}{r_{-1}} s} + \frac{r_1}{r_0} s \right) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)} \quad (48)$$

SPOJITÉ LINEÁRNE RIADENIE – regulátory

Člen r_0 je bezrozmerná proporcionálna konštanta, nazývaná **zosilnenie regulátora**, v bežných regulátoroch nastaviteľná v rozmedzí cca 0,5 až 50. T_i je **integračná konštanta regulátora** s rozmerom v sekundách a nastaviteľná v rozmedzí cca 0 až 1800 s, rovnako ako T_d , čo je **derivačná časová konštanta regulátora**. V komerčných vyhotoveniach regulátorov sa teda tieto konštanty dajú nastavovať, hovorí sa im nastaviteľné parametre regulátorov a ich hodnotu môžeme odčítať na stupniciach alebo displejoch regulátorov. Jednotlivé konštanty regulátora sú zobrazené v prechodových charakteristikách (P, I) a rampovej charakteristike (D) regulátora na Obr. 41.



Obr. 41



Obr. 42

Namiesto zosilnenia r_0 sa často používa termín **pásmo proporcionality pp** , ktoré je udávané v percentách. Zo statickej charakteristiky P regulátora - Obr. 42, je vidieť, že udáva, o koľko percent z celého regulačného rozsahu (Y_{min} až Y_{max}) sa musí zmeniť vstupný signál regulátora, aby sa výstup zmenil v celom rozsahu (U_{min} až U_{max}). Vzťah medzi pásmom proporcionality pp a zosilnením r_0 je

$$pp = \frac{1}{r_0} 100 \text{ [%]} \quad (49)$$

Je dobré si všimnúť, že zväčšovaním zosilnenia sa pásmo proporcionality znižuje.

Dynamické vlastnosti jednotlivých typov (ideálnych) regulátorov (čo sú rovnice, prenosy, charakteristiky) sú uvedené v tab. 4 a postup ich zostavenia a konštrukcie bude ukázaný na príkladoch.

Príklad 25:

Vypočítajte prechodovú funkciu a nakreslite prechodovú charakteristiku PI regulátora.

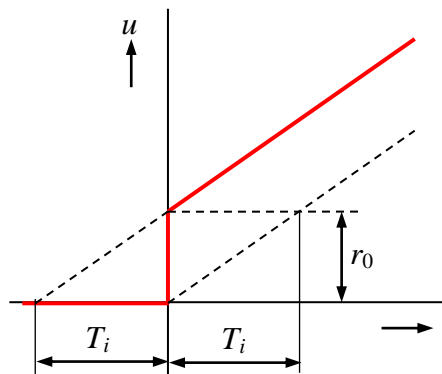
Riešenie: Do rovnice tohto regulátora (42) $u = r_0 e + r_{-1} \int e dt$ dosadíme za vstupnú funkciu e jednotkový skok ($e = 1$ pre $t \geq 0$)

$$u = r_0 \cdot 1 + r_{-1} \int 1 dt$$

a jej vyriešením získame prechodovú funkciu

$$u = r_0 + r_{-1}t$$

ktorej graf resp. prechodová charakteristika je na Obr. 43.



Obr. 43

Príklad 26:

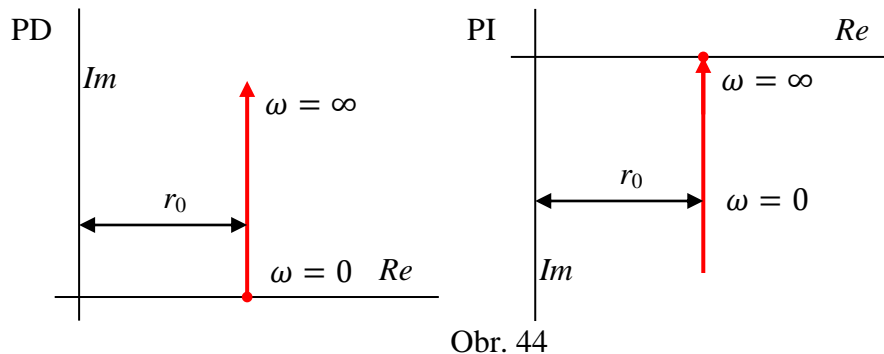
Aké sú frekvenčné charakteristiky PI a PD regulátorov? Zdôvodnite konštrukciu.

Riešenie: Frekvenčné prenosy sú

PI: $G_R(j\omega) = r_0 + \frac{r_{-1}}{j\omega} = r_0 - j \frac{r_{-1}}{\omega}$

PD: $G_R(j\omega) = r_0 + r_1 j\omega$

Ak konštruujeme z týchto frekvenčných prenosov frekvenčné charakteristiky vidíme, že reálna časť je konštantná, nezávislá na frekvencii a rovná sa r_0 . Preto budú charakteristiky v oboch prípadoch polpriamky vo



vzdialenosti r_0 od imaginárnej osi. Pri PI regulátore bude charakteristika začínať úplne dole v zápornej – imaginárnej časti komplexnej roviny a končiť v bode r_0 na reálnej osi. Naopak pri PD regulátore bude začínať v bode r_0 a končiť úplne hore v kladnej – imaginárnej časti komplexnej roviny – Obr. 44.

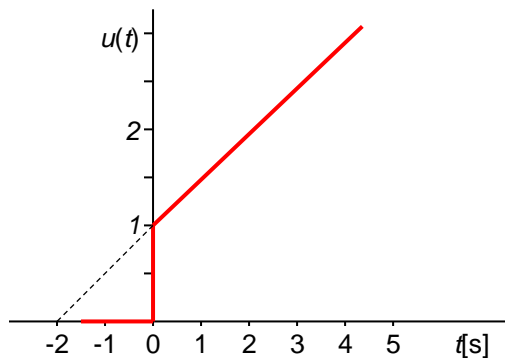
Príklad 27:

Určte r_0 , T_i a z toho aj prenos PI regulátora, ktorého prechodová charakteristika je na Obr. 45.

Riešenie: Rovnicu prechodovej funkcie z príkladu 25 $u = r_0 + r_{-1}t$ upravíme vyňatím r_0

$$u = r_0 \left(1 + \frac{1}{\frac{r_0}{r_{-1}}} t \right) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i} t \right)$$

Pre $t = 0$ je $u = r_0$ (zosilnenie je úsek na osi u) a naopak pre $u = 0$ je $t = -T_i$ (integračná konštanta je úsek na osi t , ktorý vznikne predĺžením priamkovej časti prechodovej charakteristiky až k osi t).



Obr. 45

Z grafu sú hodnoty $r_0 = 1$; $T_i = 2$ [s] a potom prenos regulátora je

$$G_R(s) = 1 + \frac{1}{2s}$$