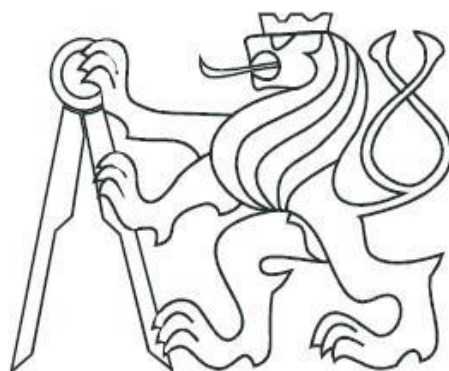


eské vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky



Bakalárska práca

Presný regulátor prietoku

Vypracoval: Peter Matisko

Vedúci práce: Prof. Ing. Vladimír Havlena, CSc.

Praha, 2007

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Katedra řídicí techniky

Školní rok: 2006/2007

Zadání bakalářské práce

Student: Peter Matisko
Obor: Kybernetika a měření
Název tématu: Přesný regulátor průtoku

Zásady pro vypracování:

V moderním zemědělství je požadována aplikace konzervačních látek na krmoviny co nejrychleji po sběru. Rostliny jsou přepravovány pomocí pásového dopravníku a přímo na něm se rozprašují fermentační látky. Potřeba přesné regulace vychází z nutnosti aplikace dostatečného a zároveň ne příliš velkého množství konzervačních látek.

1. Analyzujte problém z praxe, vytvořte model řízené soustavy v programu Simulink.
2. Navrhněte regulátor průtoku PI (PID) a algoritmy pro rozhraní mezi regulátorem a instrumentací (předpokládejte impulsní vstup z měření průtoku; PWM výstup pro čerpadlo). Ověřte vlastnosti navrženého řešení v Simulink-u.
3. Navrhněte a implementujte SW modul pro regulátor a algoritmy rozhraní pro procesor Atmel AT90S včetně pomocných algoritmů k zajištění inicializace regulátoru, beznárazového přepnutí a omezení jevu wind-up a jednoduchého HMI.

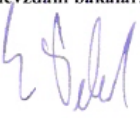
Seznam odborné literatury:

- Astrom, K.J. and T. Hagglund, PID Controllers: Theory, Design, and Tuning (2nd Ed.). Instrumentation Society and Automation (ISA), 1995, ISBN: 1556175167.
- Shinskey, F.G., Process Control Systems: Application, Design, And Tuning (4th Ed.) McGraw Hill, 1996

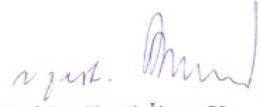
Vedoucí bakalářské práce: Prof. ing. Vladimír Havlena, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: zimní semestr 2006/07

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. 8. 2007


Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry




Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.
děkan

V Praze, dne 6. 3. 2007

Poďakovanie

.. patrí predovšetkým Prof. Ing. Vladimírovi Havlenovi, CSc za trpezlivosť a podporu počas celej doby vytvárania bakalárskej práce. Vďaka jeho neoceniteľným odborným znalostiam a výbornému prístupu som mal možnosť naučiť sa a pochopiť množstvo nových vecí.

Abstrakt

Bakalárska práca popisuje postup riešenia regula nej úlohy so zadaním z praxe. Snaží sa ukáza analytický prístup k problémom. Práca iasto ne vysvet uje príslušné teoretické poznatky z fyziky a systémového popisu a následne ich prakticky aplikuje v riešení úlohy. Výsledkom práce je regulátor, ktorého funk nos je overená simuláciami programom MATLAB Simulink. Na záver je na rtnutý postup íslicovej implementácie, na základe ktorého je možné zostavi funk - ný program pre danú aplikáciu.

Abstract

The bachelor thesis describes analytic steps in a solution of controlling task which source is based on real demand. It explains basic physics and dynamic systems theory before using the knowledge in the solution. The objective of the project is to design applicable controller whose functionality is tested by MATLAB Simulink simulations. The last chapter contains basic notes that can be usable for digital controller software programming.

Obsah

1. Úvod	8
2. Zadanie a technický rozbor úlohy	10
2.1. Popis problému	10
2.2. Formulácia zadania	10
2.3. Technický rozbor zadania, prvotné návrhy riešenia	11
3. Teoretický rozbor úlohy	12
3.1. Mechanika tekutín	12
3.2. Všeobecný úvod systémového popisu	13
3.3. Fyzikálny a matematický model sústavy	15
3.4. Všeobecný úvod návrhu regulátorov	27
3.5. Návrh spojitého regulátora	28
3.6. Návrh 2-DOF regulátora	30
3.7. Návrh diskrétného regulátora	33
3.8. Wind up, beznárazové prepnutie, HMI	37
4. Implementácia regulátora	42
4.1. Voľba základných parametrov implementácie	42
4.2. Návrh implementácie regulačných algoritmov	43
5. Záver	45

1. Úvod

Bakalárska práca si dáva za cieľ ukázať postup analýzy problému z praxe a jeho následné riešenie. Jednotlivé kroky sú doložené teoretickými poznatkami, ktoré sú podľa dôležitosti bližšie rozvedené, prípadne overené simuláciami. V praxi býva takýto postup často nahradený experimentovaním s reálnou sústavou a uplatnením inžinierskej skúsenosti. V reálnych projektoch je jedným z najdôležitejších parametrov cena, prípadne aj najkratší čas dodávky, ktoré majú mnohokrát prednosť pred maximálnymi presnosťami alebo vysokou kvalitou. Riešenie býva, kvôli cenovým nárokom, často nútený použiť napríklad lacnejšie, menej presné senzory, ktoré síce znížia kvalitu aj rýchlosť regulácie, ale sú jedinou cestou ako splniť finančné požiadavky zákazníka.

Projekt začína rozborom zadania, z ktorého vychádza postup riešenia a základné obmedzujúce faktory. Po vytvorení hrubej predstavy o riešení a vo vhodnom spôsobe je možné začať sústavu modelovať. Popis začína formuláciou fyzikálnych zákonov, ktorým sústava podlieha. Na ich základe sme schopní vytvoriť fyzikálny model so vstupnou veličinou, ktorú sme schopní zmeniť, napríklad elektrické napätie a výstupnou veličinou, od ktorej požadujeme konkrétne vlastnosti podľa zadania. Z tohto modelu môžeme vytvoriť matematický popis, ktorý umožní zovšeobecniť problém a prípadne danú fyzikálnu sústavu analogicky nahradiť inou. Pri teoretických analýzach reálnych sústav nemáme väčšinou k dispozícii komplexné informácie, a tak sme nútení nahradiť ich rôznymi zjednodušeniami. Vzniknuté nepresnosti vo výsledku nemusia vadiť, alebo ich môžeme zmenšiť na základe pokusov s reálnou sústavou a následnou úpravou parametrov.

Druhým dôležitým krokom v riešení, ktorý je v podstate pevne spojený s tvorbou modelu, je voľba vhodných komponent. V niektorých prípadoch zákazník požaduje komplexné riešenie, takže máme voľbu výberu. V projektoch dopĺňajúcich väčší celok býva veľa možností, často zadaná konkrétna špecifikácia použitých komponent, napríklad konkrétny výrobca, alebo dokonca presne daný typ zariadenia. V prípade, že máme možnosť výberu, je dôležité mať prehľad o dostupných riešeniach a vybrať, podľa možnosti, to najvhodnejšie z pohľadu parametrov a ceny. V tomto projekte sú kľúčové dva prvky, ktorými sú výber peradiel a senzoru. Procesor, prípadne elektronika, ktorá bude riešiť reguláciu je zvyčajne mimo záujmu zákazníka, preto môžeme použiť komponenty, ktoré dobre poznáme. Výberu jednotlivých prvkov sa venujú nasledujúce kapitoly. Stručný popis princípov peradiel a senzorov je v dodatku 1.

Na základe požiadaviek zadania vyberieme vhodné komponenty a podľa ich parametrov doładíme simulované modely. Pokiaľ máme k dispozícii všetky súčasti a meraciu techniku, je možné upresniť model experimentmi na reálnej sústave.

Podstatnou časťou riešenia je návrh regulátora. Výber metódy a typu regulátora závisia od nárokov na kvalitu regulácie. V širokej skupine úloh sa uplatní PID regulátor, ktorý je jednoduchý na nastavenie aj implementáciu. Pre zložité regulačné úlohy je nutné siahnuť po zložitejších metódach z moderných teórií riadenia, napríklad prediktívne riadenie. Ich nevýhodou je značne zložitejší a tým aj finančne drahší návrh, ale aj zvýšené nároky na výpočtovú silu počítača, ktorý bude regulátor implementovať.

Po navrhnutí regulátora a overení celej sústavy simuláciami programovo implementujeme regulačný algoritmus. Celková zložitosť a rozsah programu závisia od požiadaviek zákazníka. Väčšinou je potrebné, aby zariadenie komunikovalo s obsluhou a bolo schopné prispôbiť niektoré parametre podľa nastavení. Jednou z dôležitých požiadaviek býva oznamovanie, prípadne konkrétne odstránenie chybových stavov sústavy.

Poslednou fázou projektu je testovanie, tvorba dokumentácie a užívateľského manuálu. Pokiaľ nemáme prístup k zariadeniu, kde bude regulátor pracovať, musíme vytvoriť testovacie prípravky na overenie základnej funkčnosti. Pri odovzdávaní projektu je potrebné čo najlepšie predviesť výrobok ako sú časť celej regulovanej sústavy.

Zadanie bakalárskej práce v oblasti vzniku predpokladalo možnosť overenia výsledkov na reálnej sústave. Tento bod nebolo možné splniť, pretože fyzické zariadenie nebolo z organizačných dôvodov partnerom dodané. Po dohode s vedúcim práce pánom Prof. Havlenom bol posledný bod zrušený. Praktická realizácia bola nahradená podrobnejším popisom implementácie a predovšetkým rozšíreným teoretickým spracovaním celej úlohy. Tým vznikol priestor na hlbšiu analýzu problémov a práca získala všeobecnejší charakter.

2. Zadanie a technický rozbor úlohy

2.1. Popis problému

Zadanie pochádza z oblasti poľnohospodárstva. Po kosení krmovín je potrebné rastliny o najskôr zakonzervovať aplikovaním fermentovaných probiotických látok. V súčasnosti existujú kosáky a iné špecializované stroje umožňujúce aplikáciu týchto látok hneď po kosení na dopravníku. Pre tento systém konzervácie sa využívalo direktívne riadenie. Obsluha približne odmerala závislosť požadovaného prietoku a napätia na výpadle. Toto riešenie vykazovalo radu nedostatkov ako sú slabá presnosť, kolísanie prietoku podľa množstva kvapaliny v nádrži, problematické nastavovanie prietoku a podobne. Poľnohospodári majú záujem predovšetkým na ekonomickej stránke technológie. Pri direktívnom riadení nie je možné efektívne určiť množstvo použitej konzervatívnej kvapaliny. Ak sa napríklad použije v priemere o 10% kvapaliny viac ako je potrebné, pri kosení plochy o rozlohe desiatok hektárov toto použité množstvo navyše má vysoký negatívny finančný dopad. Ďalším problémom je zložité kontrolovanie havarijných stavov, napríklad porucha trúbiek, alebo minutie konzervatívnej látky. Pre dodržanie technológie je nevyhnutné na chybu čo najrýchlejšie upozorniť obsluhu. Uvedené problémy a nedostatky direktívneho riadenia odstránime použitím spätno-väzbovej regulácie.

2.2. Formulácia zadania

- a) Vytvorí regulátor prietoku a navrhne vhodné komponenty pre realizáciu.
- b) Rozsah regulácie 1,5 až 3,0 l/min, možnosť nastavovania v tomto rozsahu.
- c) Koncovým prvkom bude vhodná rozprašovacia tryska.
- d) Ohlásí chybový stav ak regulovaná odchýlka viac ako 10% trvá dlhšie ako 20s.
- e) Ohlásí chybový stav a vypne výpadlo pri nulovom prietoku dlhšie ako 4s.

2.3. Technický rozbor zadania, prvotné návrhy riešenia

Výsledkom riešenia má byť regulátor s určitou formou interakcie s obsluhou. Efektívnou cestou k splneniu týchto podmienok je využitie mikroprocesora, ktorý obsahuje mnoho programových možností a umožňuje jednoducho implementovať algoritmy riadenia a rozhranie komunikácie s obsluhou. Ako merací prvok spätnej väzby využijeme vhodný senzor prietoku, ktorý sa jednoducho inštaluje do hydraulického systému. Riadiacou veličinou bude jednosmerné napätie poháňajúce ventil. Pri použití mikroprocesora je najjednoduchšou a zároveň najefektívnejšou možnosťou regulácie napätia pulzná šírková modulácia (PWM). Niektoré procesory v súčasnosti obsahujú priamu podporu PWM.

Zákazník môže potenciálne požadovať rozšírenie rozsahu voliteľných prietokov z toho plynie niekedy kvôli obmedzujúcim faktorom. Každá tryska obsahuje sústavu otvorov, ktoré zabezpečujú rozprašovanie kvapaliny. Pri nízkom tlaku, ktorého hodnota závisí od typu a parametrov trysky, za určitá kvapalina plynule vyteka, prípadne je úroveň rozprašovania nedostatočná. Horná hranica prietoku danou tryskou je obmedzená maximálnym tlakom, ktorý ventil vyvinie. Keďže obsluha pred začatím práce pozná požadované rozsahy prietokov, môže zvoliť vhodnú trysku. Regulátor by v takom prípade musel umožňovať nastavenie programu, ktorý presne odpovedá používaným tryskám. Každý zvolený program automaticky obmedzí nastavenie dolnej a hornej hranice prietoku. Vyriešenie fyzikálnej a matematickej úlohy pre rôzne trysky je analogické ako nižšie uvedený postup. Program mikroprocesora by vhodne zmenil parametre regulácie podľa zadanej voľby obsluhy.

Zo zadania plynú požadované parametre na jednotlivé prvky. Veľká väčšina dostupných ventilov je určená na vyššie prietoky ako 3 l/min. Podstatnejšou informáciou pri voľbe ventilu je maximálny tlak, ktorý vznikne na základe parametrov vybranej trysky. Voľba typu mikroprocesora je značne subjektívna, pretože závisí od skúseností alebo vernosti značiek. Dostupné moderné procesory majú podobné vlastnosti aj cenu. V tejto práci je zvolený procesor z rady Atmel ATmega, ktorý disponuje veľmi dobrými parametrami ako sú veľká dátová pamäť, implementovaný A/D prevodník, priama podpora PWM, rozsiahla inštrukčná sada, dostupný vývojový softvér a podobne.

Princípy a hodnoty jednotlivých komponent sú krátko popísané v ďalších častiach textu, prípadne v dodatku 1.

3. Teoretický rozbor úlohy

3.1. Mechanika tekutín

V prvej fáze analýzy úlohy je potrebné popísa fyzikálne vlastnosti a správanie prúdiacej kvapaliny. Využijeme základné poznatky z mechaniky tekutín ktorými sú Bernoulliho rovnica a rovnica kontinuity. Podrobnejšie informácie v [7] alebo [8].

1) Rovnica kontinuity.

Rovnica kontinuity popisuje prúdenie kvapalín v trubici rôzneho prierezu S [m³]. Vychádza z toho, že z uzavretej trubice kvapalina nemôže uniknúť, ani žiadna nová nevznikne. Ak sa zmenší prierez trubice, musí sa zvýšiť rýchlosť kvapaliny v [m/s²], pretože hmotnosť pretečenej kvapaliny s hustotou ρ [kg/m³] za jednotku času musí byť konštantná. Vzhľadom na to vyjadruje zákon zachovania hmotnosti. Pre stacionárne ustálené prúdenie tekutiny v trubici premenlivého prierezu platí vzťah (3.1.1), ktorý upravíme na základe predpokladu nestlačitelnosti kvapaliny s rovnakou hustotou v celom objeme.

$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2 = \text{konšt.} \quad (3.1.1)$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{konšt.} \quad (3.1.2)$$

2) Bernoulliho rovnica

Tento zákon vychádza z poznatku, že čím rýchlejšie prúdi kvapalina uzavretou trubicou, tým je každý jej objemový element vystavený nižšiemu tlaku okolných elementov. S rastúcou rýchlosťou klesá tlak p [Pa]. Vzhľadom na to vyjadruje konštantnosť súčtu tlakovej a kinetickej energie. Je v podstate zákonom zachovania energie prúdiacej kvapaliny (vzťahnutej na elementy hmotnosti).

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + p_2 = \text{konšt.} \quad (3.1.3)$$

Jednotlivé členy Bernoulliho rovnice vyjadrujú hustotu kinetickej, potenciálnej hydrostatickej a potenciálnej tlakovej energie v danom priereze trubice (často používané názvy sú dynamický, hydrostatický a statický tlak.) Druhý člen na oboch stranách rovnice je možné zanedbať pokiaľ ide o prúdenie v konštantnej výške. V danej aplikácii je táto podmienka približne splnená, takže bez veľkej ujmy na presnosti môžeme hydrostatický tlak z úvah vylúčiť.

3.2. Všeobecný úvod systémového popisu

Výraz systém je veľmi obtiažne definovať, pretože sa vyskytuje v mnohých rozmanitých súvislostiach viacerých vedných oborov. Môžeme ho určiť pomocou všeobecných vlastností. Napríklad, systém dokážeme oddeliť, a už fyzickou alebo myšlienkovou hranicou od svojho okolia, s ktorým nejakým spôsobom interaguje. Interakcia prebieha formou výmeny energie alebo informácie. Určitá forma energie (príp. informácie) do systému vstupuje a systém na základe svojich vnútorných vlastností vytvorí odpovedajúcu odozvu na výstupe. Pri tomto deji môže dochádzať k rozmanitým transformáciám energie na rôzne formy (tepelná, mechanická, elektrická, magnetická,...).

Pre popis systémov sa využívajú abstraktné nástroje nazývané modely, bližšie v [3]. Môžeme rozlíšiť dva základné typy – fyzikálne a matematické. Fyzikálny model môže predstavovať zmenšený objekt, ktorého konkrétne vlastnosti sa blížia k vlastnostiam skutočného telesa. Príkladom môže byť fyzikálny model mostu umožňujúci testovanie pevnosti konštrukcie, odolnosť voči vetru a podobne.

Matematický model vytvára ďalší stupeň abstrakcie nad fyzikálnym. Práve vyšší stupeň abstraktného popisu umožňuje použitie rovnakých nástrojov na analýzu rozdielnych systémov. Systémy pracujúce s rôznymi druhmi energie sú ekvivalentné a vďaka tejto vlastnosti môžeme napríklad popísať a simulovať termodynamickú sústavu pomocou elektrického obvodu. V rôznych sústavách teda nájdeme veličiny, ktoré sú si navzájom ekvivalentné.

Výkonové veličiny ako všeobecné funkcie času Energetické veličiny ako funkcie času

- úsilie $e(t)$ - z anglického slova effort
- obecná hybnosť $p(t)$
- tok $f(t)$ - z anglického slova flow
- obecná výchylka $q(t)$

Výkon prechádzajúci bránou

$$P(t) = e(t) f(t) \quad (3.2.1)$$

Energia, ktorá prešla bránou

$$E(t) = \int P(\tau) d\tau = \int e(\tau) f(\tau) d\tau \quad (3.2.2)$$

Energetické veličiny sú charakteristické tým, že nie je možné ich hodnotu zmeniť skokom. Zmena hybnosti alebo výchylky sa deje vždy spojitou, v opačnom prípade by bola potrebná nekonečná energia. Toto je základná vlastnosť, z ktorej vyplýva dynamika všetkých systémov.

Reálne sústavy sa takmer vždy správajú ako filtre vysokých frekvencií. Hoci sme schopní prudko, dokonca aj skokom, zmeniť vstupnú veličinu, výstup reálneho zariadenia reaguje s určitým časovým oneskorením. To je dané tým, že na skokovú zmenu výstupu sú potrebné práve vysoké frekvencie, ktoré systémy filtrujú.

Medzi energetickými a výkonovými veličinami platia vzťahy:

- zmena hybnosti v ňom je daná úsilím

$$dp = e dt \quad e = \frac{dp(t)}{dt} \quad p(t) = \int_0^t e(t).dt + p(0) \quad (3.2.3)$$

- zmena výchylky v ňom je daná tokom

$$dq = f dt \quad f = \frac{dq(t)}{dt} \quad q(t) = \int_0^t f(t).dt + q(0) \quad (3.2.4)$$

Všeobecné výkonové a energetické veličiny využívané v modeloch sú interpretáciou reálnych fyzikálnych veličín. Elektrické, mechanické a hydraulické systémy sú popísané v tabuľke.

Obecné premenné	Elektrické	Mechanické translačné	Hydraulické
e úsilie	u – el. napätie [V]	F – sila [N]	p – tlak [Pa]
f tok	i – el. prúd [A]	v – rýchlosť [m/s]	Q – objem. prietok [m ³ /s]
p hybnosť	Φ – indukčný tok [Wb = V.s]	p – mechanická hybnosť [N.s]	H – prietok. hybnosť [Pa.s]
q výchylka	Q – el. náboj [C = A.s]	x – poloha [m]	V – objem [m ³]

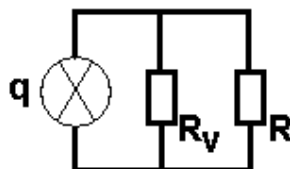
Odpor je všeobecne funkčne závislosťou medzi výkonovými veličinami

$$e = \Phi_R(f) \quad (3.2.5)$$

3.3. Fyzikálny a matematický model sústavy

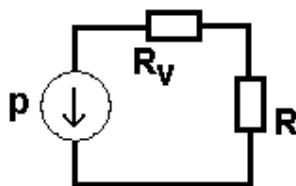
Podľa zadania úlohy máme regulovať prietok, teda zoberený tok. Čerpadlo môžeme všeobecne popísať ako zdroj toku s oneskorením druhého rádu, ktoré zahrňuje elektrickú a mechanickú časovú konštantu. Elektrická konštantka je omnoho nižšia ako mechanická, preto ju môžeme zanedbať, resp. použijeme jedinou časovú konštantu na zjednodušený popis dynamiky celého systému. Tryska predstavuje hydraulický odpor.

Pre riešenie danej situácie sa najviac hodí model, ktorý je sériovým spojením zdroja tlaku, vnútorného hydraulického odporu zdroja a odporu vo forme trysky. Z údajov a charakteristík, ktoré poskytuje výrobca sme obvykle schopní popísať čerpadlo ako zdroj prúdu pri nulovom tlaku. Závislosť tlaku na prietoku, ktorá je jednou zo základných charakteristík udávaných výrobcom, predstavuje vnútorný hydraulický odpor paralelne zaradený ku zdroju. Tryska je potom ďalším odporom R paralelne k vnútornému R_V , ako zobrazuje obr. 3.3.1. Odpor R_V zahrňuje všetky odporové prvky v systéme, ako sú mechanické odpory točivých častí, hydraulické odpory stien trubice, znižovanie rýchlosti kvapaliny v dôsledku turbulencií a podobne.



obr. 3.3.1

Toto usporiadanie je výpočtovo zložité, pretože obsahuje paralelné spojenie dvoch nelineárnych odporov. Matematickými úpravami môžeme sústavu popísať analogicky ako zdroj úsilia, v našom prípade tlaku, ku ktorému je do série zaradený vnútorný odpor R_V a odpor trysky R .



obr. 3.3.2

V hydraulických systémoch platia dve základné rovnice popísané v kapitole 3.1 – rovnica kontinuity a Bernoulliho rovnica.

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

Z druhej rovnice môžeme vyjadriť objemový prietok $Q = S v = S \frac{x}{t}$, kde x je vzdialenosť, ktorú ura-

ziahla kvapalina v trubici prierezu S [m²] za čas t [s]. Súčin Sx predstavuje objem. Výraz $S \frac{x}{t}$ je teda

objem kvapaliny, ktorá prejde trubicou za čas t . Objemový tok značíme Q , jednotka m³/s.

Keďže budeme pracovať s tlakom a prietokom, upravíme prvú rovnicu do vhodného tvaru, aby sme vylúčili rýchlosť:

$$S_1 v_1 = Q_1 \quad \text{z toho} \quad v_1 = \frac{Q_1}{S_1}$$

objemový prietok v trubici a za tryskou je rovnaký $Q_1 = Q_2$, preto platí

$$S_1 v_1 = Q_1 = Q_2 = S_2 v_2 \quad \text{z oho vyplýva} \quad v_2 = \frac{Q_1}{S_2}$$

Bernoulliho rovnicu upravíme dosadením za v_1 a v_2 do tvaru:

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{Q_1}{S_2} \right)^2 - \left(\frac{Q_1}{S_1} \right)^2 \right]$$

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} \frac{S_1^2 - S_2^2}{S_1^2 \cdot S_2^2} Q_1^2 \quad (3.3.1)$$

Rovnica (3.3.1) je funkčnou závislosťou medzi prietokom a tlakom v trubici zakončenou tryskou s plochou otvoru S_2 . Jej tvar umožňuje zvoliť všetky známe konštanty pravej strany do jednej, ktorú označíme k_t . Tlak p_2 by v našom prípade predstavoval atmosférický, ale nie je nutne ho uvažovať, pretože pôsobí na kvapalinu v nádrži rovnako ako na rozprašovanú, a preto sa jeho účinky neprejavajú. Tlak, ktorý uvažujeme v ďalších výpočtoch nie je absolútny, ale relatívny k atmosférickému. Grafy charakteristík $p = f(Q)$ odpovedajú tomuto predpokladu, pretože začínajú v nule.

V ďalších zápisoch bude prietok označovaný malým q . Výraz (3.3.1) upravíme na tvar

$$p = k_t q^2 \quad (3.3.2)$$

z ktorého vieme vyjadriť prietok závislý od tlaku v trubici. Zdrojom tlaku je v našom prípade erpadlo a jeho hodnota závisí od vstupného napätia. Na trhu je niekoľko druhov erpadiel popísaných v dodatku 1, ktoré majú podstatne rôzne závislosti tlaku, prietoku, vstupného napätia a prípadne otáčky.

Pre daný projekt je možné použiť odstredivé erpadlo. Tento typ patrí medzi rozšírené a cenovo dostupné. Ďalším príkladom často používaného typu sú membránové erpadlá, ktorých charakteristiky sú popísané v dodatku 1. Pokiaľ zákazník trvá na určitom konkrétnom erpadle, v teoretickom postupe sa uplatnia iné funkčné závislosti, ale princíp riešenia ostane totožný.

Model erpadla

Pri vytváraní modelu erpadla za neme uvedením vz arov, ktoré platia pre jednosmerný motor s permanentným magnetom. Pre malé napätia (v priemysle typicky 24V) a malé výkony sa takýto motor používa najastejšie.

$$u = Ri + k_e \omega \quad (3.3.3)$$

$$M = k_m i \quad (3.3.4)$$

Vo vz ahoch je u vstupné napätie, R odpor vinutia a ω je uhlová rýchlosť. Z informácií o odstredivých erpadlách poznáme nasledujúce závislosti

- a) príkon rastie kubicky s otáčkami
- b) tlak rastie kvadraticky s otáčkami
- c) prietok pri nulovom tlaku narastá lineárne s otáčkami
- d) moment na hriadeľ rastie kvadraticky s otáčkami

Účinnosť jednosmerného elektromotora budeme predpokladať 92%. Z tohto údaja môžeme určiť odpor vinutia R vo vz ahu (3.3.3). Okrem strát elektrických častí budeme uvažovať odliv energie na mechanických a hydraulických častiach sústavy.

V tomto projekte použijeme erpadlo s nasledovnými menovitými hodnotami

$$P = 96 \text{ W}$$

$$n = 3000 \text{ ot./min}$$

$$U = 12 \text{ V (DC)}$$

$$p_{\max} = 3 \text{ bar}$$

Podľa príkonu a vstupného napätia vieme, že menovitý prúd bude 8A. Keďže v našej aplikácii budeme regulovať relatívne malý prietok cez škrtiacu trysku, podstatnou informáciou je hodnota maximálneho tlaku, ktorý erpadlo vyvinie. Minimálny potrebný tlak určíme z parametrov trysky. Výpočet uvedený nižšie v tejto kapitole udáva, že erpadlo musí vyvinúť tlak aspoň 1,78 bar, aby zvolenou tryskou prešiel maximálny požadovaný tok 3 l/min. Maximálny prietok erpadla býva obvykle v hodnotách desiatok litrov za minútu, v závislosti na konštrukcii erpadla.

V rovnici (3.3.4) vystupuje moment, ktorý môžeme určiť s využitím znalostí systémového popisu. Poznáme elektrický príkon erpadla na vstupe vyjadrený súčinom napätia a prúdu. Analogicky súčinná platí aj pre premenné popisujúce rotačný pohyb. Týmito veličinami sú moment

a uhlová rýchlosť. Súčin elektrického príkonu spolu s úhlovou rýchlosťou je teda rovný mechanickému výkonu na hriadeľ motora, ktorý je vyjadrený súčinom momentu a uhlovej rýchlosti. Menovitá úhlová rýchlosť erpadla poznáme a jedinou neznámou v rovnici tak ostáva moment

$$u i_n \eta = M \omega \quad (3.3.5)$$

Výsledný moment pri menovitých hodnotách veličín i_n a ω elektrickej časti 92% je 0,281 Nm. Pre model erpadla moment nepotrebujeme, preto ho vyjadríme pomocou iných veličín. O elektromotore vieme, že v regulovanom rozsahu moment závisí približne lineárne na vstupnom prúde – rovnica (3.3.4). Zanedbané nelinearity sú spôsobené hysteréziami magnetickej časti. O hydraulickej časti erpadla máme poznatok, že moment narastá kvadraticky s otáčkami

$$M = k_c \omega^2 \quad (3.3.6)$$

Z menovitého prúdu a momentu určíme konštantu k_m v rovnici (3.3.4) a z menovitých otáčok a momentu určíme k_c v rovnici (3.3.6). Výsledné hodnoty konštant sú

$$k_m = 3,514 \cdot 10^{-2} \text{ [Nm/A]}$$

$$k_c = 2,848 \cdot 10^{-6} \text{ [Nms}^2\text{/rad}^2\text{]}$$

Moment sa prenáša z motora na hydraulickú časť hriadeľom a bude vo všetkých jeho častiach rovnaký. Momenty v rovniciach (3.3.6) a (3.3.4) sú totožné, preto pravé strany môžeme dať do rovnosti a vyjadriť prúd pomocou otáčok a tento výraz dosadíme do rovnice (3.3.3). Výsledný vzťah je

$$u = \frac{k_c}{k_m} R \omega^2 + k_n \omega \quad (3.3.7)$$

Posledné dve neznáme hodnoty sú odpor vinutia a konštanta k_n . Odpor R môžeme určiť pomocou predpokladanej účinnosti jednosmerného motora 92%. Pri menovitom prúde sa na tomto odpore premení 8% príkonu na teplo. Zo vzorca $P_s = R I^2$, kde P_s je stratový výkon, v našom prípade 8% z 96 W, vyjde $R = 0,12 \Omega$. Po dosadení do vzorca (3.3.7) vypočítame poslednú konštantu

$$k_n = 3,514 \cdot 10^{-2} \text{ [Vs/rad]}$$

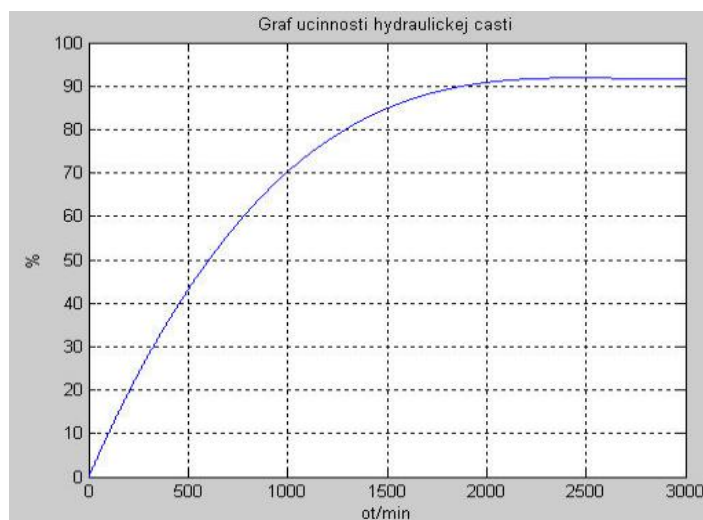
Prvý člen rovnice (3.3.7) predstavuje straty motora. V ideálnom prípade je odpor vinutia nulový a dostaneme lineárnu závislosť medzi napätím a otáčkami. Súčin napätia a prúdu predstavuje príkon, ktorý musí byť kubicky závislý na otáčkach podľa bodu a) na zozname poznatkov o odstredivom čerpadle. To zjavne platí, pretože závislosť prúdu na otáčkach je z kombinácie rovníc (3.3.6) a (3.3.4) kvadratická.

Do modelu čerpadla zahrnieme účinnosť mechanickej a hydraulickej časti. Jej popis je užko matematicky vyjadriteľný. Výrobcovia obvykle udávajú krivky závislosti účinnosti na prietoku pri menovitých otáčkach. Faktorom ovplyvňujúcim účinnosť je aj spôsob riadenia otáčok. V súčasnosti sa výrazne uprednostňuje pulzová šírková modulácia (PWM) oproti odporovej regulácii, ktorá sa v minulosti používala. Prínos sa ukazuje predovšetkým v závislosti účinnosti od otáčok. Pri použití PWM je celková účinnosť pri maximálnych otáčkach približne 85% a pri polovičných otáčkach približne 78%. Pri použití odporovej regulácie otáčok klesá pri polovičných otáčkach účinnosť až na 40%.

Zložitú závislosť účinnosti hydraulickej časti od otáčok budeme vyjadrovať polynómom tretieho stupňa. Graf závislosti je na obr. 3.3.3. Pre ďalšie výpočty použijeme vzťah (3.3.9) s premennou ω .

$$\eta = 5,00 \cdot 10^{-11} n^3 - 3,98 \cdot 10^{-7} n^2 + 1,05 \cdot 10^{-3} n \quad (3.3.8)$$

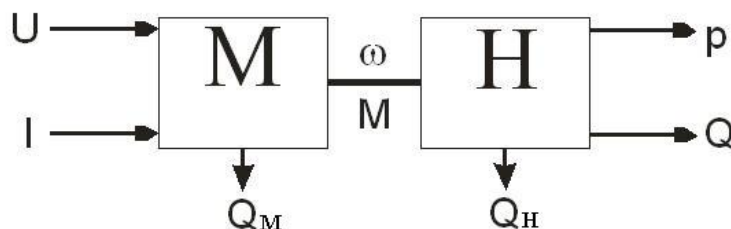
$$\eta = 4,354 \cdot 10^{-8} \omega^3 - 3,629 \cdot 10^{-5} \omega^2 + 1,003 \cdot 10^{-2} \omega \quad (3.3.9)$$



obr. 3.3.3 Graf závislosti účinnosti hydraulickej časti od otáčok

Straty elektromotora sa premenia na teplo, ktoré sa dostane do okolia a straty vyjadrené vzorcom (3.3.8) vyjadrujú teplo, ktoré ohreje prúdiacu kvapalinu. Iné formy strát, napríklad kvôli turbulენტnému prúdeniu, tlakové straty na senzore prietoku a podobne zanedbáme.

Nasledujúci obrázok ukazuje jednotlivé premeny energie v sústave.



obr. 3.3.4

Vstupnou formou energie je elektrická, ktorá sa v jednosmernom motore **M** premení na mechanickú energiu hriade a vyjadrenú veli inami moment M a uhlová rýchlos ω . Hydraulická as **H** premení mechanickú energiu na hydraulickú vyjadrenú veli inami tlak p a prietok q . V oboch blokoch sú naznačené straty energie, ktoré sa vo forme tepla Q dostanú do okolia, alebo sa prejavujú zvýšením teploty kvapaliny. Sú to iné jednotlivých dvojíc vyznačených veliín predstavujú výkon ako uvádza systémový popis z kapitoly 3.2.

Pre kompletný popis čerpadla je potrebné ešte vyjadriť závislosť medzi otáčkami a tlakom. Z popisu odstredivých čerpadiel využijeme fakt, že tlak pri nulovom prietoku je kvadraticky závislý na otáčkach. Predpokladáme všeobecnú závislosť v tvare

$$p = \eta k_p \omega^2 \quad (3.3.10)$$

kde konštantu k_p určíme z menovitých hodnôt čerpadla. Jej číselná hodnota je

$$k_p = 3,311 \text{ [Pa}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2\text{]}$$

V tomto okamihu máme k dispozícii závislosť medzi veliínami v čerpadle. Poznáme prevodnú charakteristiku medzi vstupným napätím a výstupným tlakom.

Ostáva ešte určiť popis hydraulických veličín na tryske. Pre zadanú úlohu sa hodí tryska ktorá rozprašuje plochý prúd, pretože kvapalina sa bude aplikovať na rastliny na pohyblivom páse. Výrobca udáva, že pri tlaku 3 bar prejde tryskou 3,9 l/min. Z týchto hodnôt môžeme určiť veľkosť priepustnej plochy trysky a zároveň vypočítame aký najmenší tlak musí čerpadlo vyvinúť, aby sme dosiahli požadovaný prietok 3 l/min. Z informácií o tryske poznáme tlak p , prietok Q_1 a prierez trubice 3/8". Hustotu kvapaliny uvažujeme 1000 kg/m^3 . Trubica s prierezom 3/8" = 3/8 · 25,4 = 9,525 mm má plochu $71,13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Udaný prietok 3,9 l/min = $65,00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ a 1 bar predstavuje 100 000 Pa.

Úpravou vzťahu (3.3.1) vyjadríme aktívnu rozprašovaciu plochu trysky S_2 :

$$S_2 = \sqrt{\left(\frac{2p}{\rho Q_1^2} + \frac{1}{S_1^2}\right)^{-1}} \quad (3.3.11)$$

Po dosadení konštant a vyčíslení dostávame hodnotu $S_2 = 2,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$.

Opätovným použitím vzťahu (3.3.1) určíme minimálny tlak nutný na požadovaný prietok 3 l/min. Táto hodnota bude kľúčová pre výber vhodného čerpadla. Do vzťahu (3.3.1) dosadíme prietok 3 l/min a vypočítame potrebný tlak. Výsledná hodnota je 178 KPa.

Vzťah hydraulických veličín na tryske tiež podlieha vzťahu (3.3.1), ktorý upravíme na tvar (3.3.12). Dosadíme hodnoty určené výrobcom (3,9 l/min pri 3 bar) a vypočítame konštantu k_q .

$$q = k_q \sqrt{p} \quad (3.3.12)$$

$$k_q = 1,187 \cdot 10^{-7}$$

Prietok vyjadrený vzťahom (3.3.12) je veličina, ktorú chceme regulovať. Pre zavedenie spätnej väzby ju odmeriavame turbínkovým senzorom.

Na modelovanie dynamiky využijeme vzťah (3.3.13). Uholové zrýchlenie je dané momentom zotrvačnosti J [kg/m^2] a rozdielom momentov na elektromotore a na čerpacom kotúči. Oba momenty následne vyjadríme pomocou známych veličín

$$J \dot{\omega} = M_m - M_c \quad (3.3.13)$$

$$J \dot{\omega} = k_m i - k_c \omega^2 \quad (3.3.14)$$

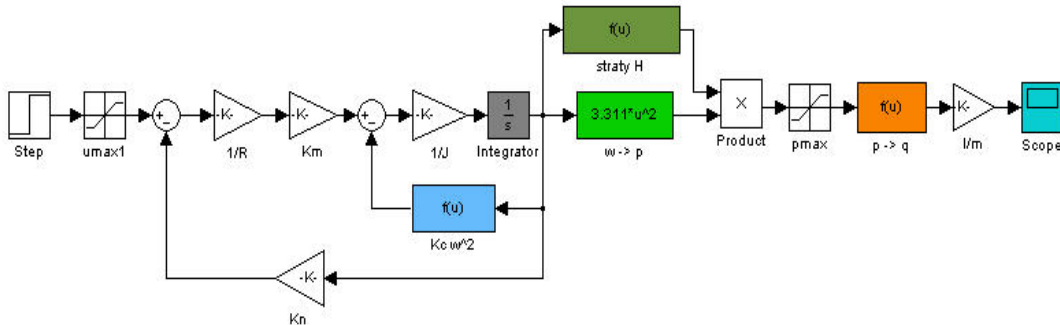
Prúd vyjadríme pomocou vstupného napätia, odporu vinutia R a indukovaného elektromotorického napätia rovnicou (3.3.15). Týmto výrazom zároveň zohľadníme aj straty na elektromotore dané prvým členom základnej rovnice (3.3.7). Druhý člen rozdielu v (3.3.15) je indukované elektromotorické napätie.

$$i = \frac{u}{R} - \frac{k_n \omega}{R} \quad (3.3.15)$$

Moment zotrvačnosti J vyjadruje rozloženie hmoty okolo osi otáčania a určuje dynamiku točivých častí v sústave. Jeho hodnotu obvykle nepoznáme, pretože výrobcovia takéto podrobné informácie neuvádzajú. Jej presné určenie je možné identifikáciou systému, ktorá býva občas jedinou možnosťou ako spoznať správanie sústavy. V tejto úlohe vyjadríme hodnotu J empiricky. Obežný kotúč v erpadle môžeme považovať približne za homogénny kotúč, pre ktorý platí $J = 0,5 m r^2$ kde m je hmotnosť v [kg] a r je polomer kotúča v [m]. U zvoleného erpadla môžeme predpokladať ve kos obežného kotúča a s polomerom približne 5 cm a hmotnosťou rádovo stovky gramov. Výsledný moment zotrvačnosti sa bude pohybovať v ráde 10^{-4} až 10^{-3} kg/m². V našom modeli zanedbáme dynamické trenie vznikajúce v ložiskách a točivých častiach. Toto trenie iasto nezačleníme do vyššej konštanty J . V ďalších simuláciách uvažujeme $J = 3.10^{-3}$ kg/m², z čoho vyplýva typická časová konštanta približne 0,4 s.

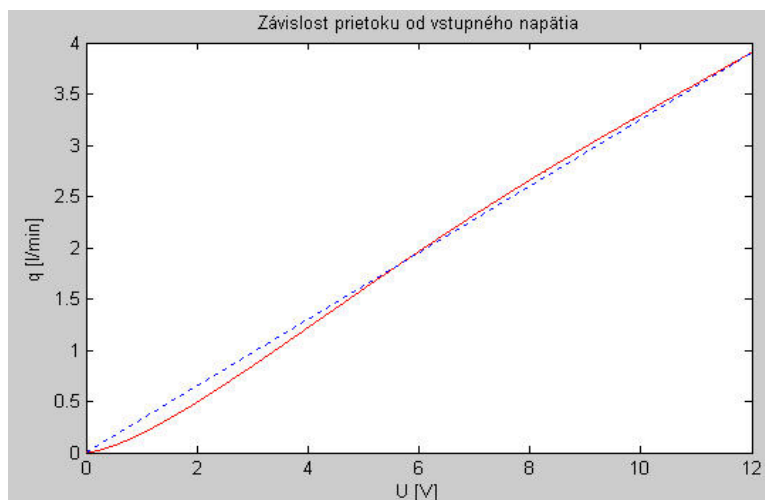
Simulačné schéma sústavy erpadla s tryskou je na obr. 3.3.5. Hlavným prvkom dynamiky je integrátor zvýraznený šedou. Na jeho výstupe je uhlová rýchlosť ω . Na vstupe je analogicky derivácia ω , teda uhlové zrýchlenie. Prvá spätná väzba s modrým blokom vyjadruje druhý člen v rovnici (3.3.14). Druhá spätná väzba s konštantou k_n vyjadruje druhý člen výrazu (3.3.15).

Uhlovú rýchlosť transformuje svetlo-zelený blok „ $\omega \rightarrow p$ “ na tlak, ktorý je zmenšený podľa účinnosti zo vzťahu (3.3.8). Účinnosť podľa tmavo zelený blok označený „straty H“. Oranžový blok modeluje trysku - tlak transformuje na prietok v [m³/s]. Posledný blok „l/m“ vyjadrí prietok v lepšie známej jednotke [l/min].

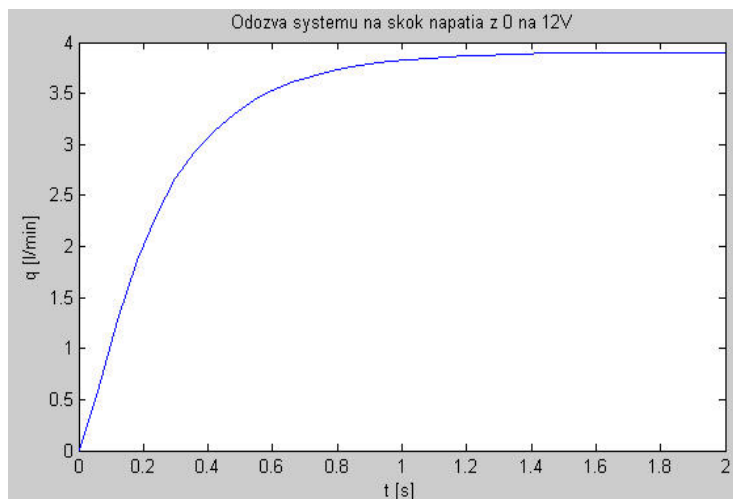


obr. 3.3.5 Simulačné schéma v Simulinku

Nasledujúce grafy ukazujú prevodnú charakteristiku sústavy a odozvu na skok riadiacej veličiny z 0V na 12V. V obrázku 3.3.6 vidíme červenú nelineárnu závislosť veličín. Modrá prerušovaná čiara naznačuje lineárny priebeh.



obr. 3.3.6 Prevodná charakteristika vstupného napätia na prietok



obr. 3.3.7 Prechodová charakteristika sústavy

Lineárny model

Sústavu s tryskou sme zjednodušili na prvý rád. Keďže ide o nelineárny systém, je nutné ho zlinearizovať. Podľa zadania máme regulovať výstupný prietok v rozsahu 1,5 až 3,0 l/min. Z prechodovej charakteristiky vidíme, že v požadovanom rozsahu prietoku je prevodná

charakteristika ve mi málo nelineárna. Môžeme to overi linearizovaním v krajných bodoch a porovnaním asových konštánt a zosilnenia.

Pomocou simula nej schémy na obr. 3.3.5 a s využitím vyššie uvedených matematických vz ahov môžeme zostavi nelineárnu diferenciálnu rovnicu. Vz ah (3.3.15) dosadíme do (3.3.14) Touto úpravou získame vyjadrenie stavovej veli iny, v našom prípade uhlovej rýchlosti ω . Táto rovnica zodpovedá asti simula nej schémy od integrátora v avo. Za integrátorom je práve stavová veli ina ω . Druhou rovnicou, ktorá zahr uje pravú as simula nej schémy bez spätných väzieb je vyjadrenie výstupnej veli iny pomocou stavovej. Znovu pôjde o nelineárny výraz, ktorý vznikne dosadením (3.3.9) do (3.3.10) a výsledok do (3.3.12). Výsledné vz ahy sú

$$\frac{d\omega}{dt} = \left[(u - k_n \omega) \frac{1}{R} k_m \right] \frac{1}{J} - \frac{k_c}{J} \omega^2 \quad (3.3.16)$$

$$q = k_q \sqrt{(4,354 \cdot 10^{-8} \omega^3 - 3,629 \cdot 10^{-5} \omega^2 + 1,003 \cdot 10^{-2} \omega) k_p \omega^2} \quad (3.3.17)$$

Na linearizáciu rovníc potrebujeme pozna hodnoty vstupu, výstupu a stavu v pracovnom bode. Zvolili sme si dva pracovné body dané výstupným prietokom. Zvolenú hodnotu dosadíme do (3.3.12). Zo známeho tlaku potom ur íme ω s prihliadnutím na ú innos (3.3.9) alebo vyriešime priamo rovnicu (3.3.17). Pracovný bod reprezentuje ustálený stav, takže zmena ω bude vo výraze (3.3.16) nulová. Pomocou odvodených vz ahov vypo ítame vstupné napätie potrebné pre udržanie ustáleného prietoku pracovného bodu. Na ur enie jednotlivých veli ín môžeme využi numerické výpo ty, alebo simuláciu v Simulinku. Postupne upravujeme vstup tak, aby sme získali požadovaný výstup. Táto metóda môže slúži predovšetkým ako kontrola výpo tu. Hodnoty veli ín v oboch pracovných bodoch sú zapísané v tabu ke. Pre porovnanie sú uvedené aj hodnoty tlaku a ú innosti hydraulickej asti.

Q = 1,5 l/min	Q = 3,0 l/min
p = 4,436.10 ⁴ Pa	p = 1,774.10 ⁵ Pa
n = 1246	n = 2306
η = 78,7%	η = 91,9%
u = 4,75 V	u = 9,05 V

Rovnice (3.3.16) a (3.3.17) linearizujeme rozvojom do Taylorovho radu v pracovných bodoch. Výsledné linearizované vzťahy sú

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\omega} &= 97,61 \Delta u - 3,678 \Delta \omega \\ \Delta q_1 &= 2,359 \cdot 10^{-7} \Delta \omega\end{aligned}\tag{3.3.18}$$

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\omega} &= 97,61 \Delta u - 3,889 \Delta \omega \\ \Delta q_2 &= 2,103 \cdot 10^{-7} \Delta \omega\end{aligned}\tag{3.3.19}$$

Uvedené lineárne vzťahy je možné previesť pomocou Laplaceovej transformácie na prenos. Deriváciu ω nahradíme súčinnom Ω_s a osamostatníme premenné U a Q. Podiel $Q(s)/U(s)$ predstavuje lineárny prenos. Prenosy pre oba pracovné body sú

$$P_1(s) = \frac{6,261 \cdot 10^{-6}}{0,272 s + 1}\tag{3.3.20}$$

$$P_2(s) = \frac{5,278 \cdot 10^{-6}}{0,257 s + 1}\tag{3.3.21}$$

V uvedených výrazoch si môžeme všimnúť len malý rozdiel v časových konštantách. To je dané tým, že regulovaná sústava nevykazuje v požadovanom rozsahu veľké nelinearity. Pokiaľ by sme regulovali nižšie prietoky, prejavila by sa vyššia nelinearita úmernosti erpadla. Nižšia časová konštanta a zároveň vyššie zosilnenie v druhom prípade sú dôsledkom vyššej úmernosti pri vyšších otáčkach.

Na základe tohto výpočtu môžeme zvoliť bezveľkej ujmy na presnosti jeden pracovný bod v strede rozsahu a pre tento bod navrhnuť regulátor. Linearizáciu analogicky k predchádzajúcim výpočtom urobíme ešte raz pre pracovný bod $Q = 2,25$ l/min. Výsledné lineárne stavové rovnice a prenos sú

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\omega} &= 97,61 \Delta u - 3,780 \Delta \omega \\ \Delta q_3 &= 2,266 \cdot 10^{-7} \Delta \omega\end{aligned}\tag{3.3.22}$$

$$P_3(s) = \frac{5,851 \cdot 10^{-6}}{0,265 s + 1}\tag{3.3.23}$$

3.4. Všeobecný úvod návrhu regulátorov

Návrh regulátorov dynamických sústav je obecné zložitá úloha. Od vzniku prvého spätno-väzbového regulátora bolo vyvinutých mnoho metód. S rozvojom výpočtovej techniky sa výrazne zlepšili predovšetkým možnosti simulácií. Vývojári tak môžu v značnej miere overiť teoretické výsledky pred uvedením zariadenia do prevádzky. Vďaka pokroku sa v dnešnej dobe navrhujú zložité sústavy, ktoré dokonca môžu byť bez regulátora nestabilné. Tým je možné dosiahnuť napríklad vysoké manévrovacie schopnosti stíhačiek a podobne.

Za najrozšírenejší regulátor môžeme určiť považovať PID. Obsahuje tri zložky: proporcionálnu, integračnú a deriváciu. Podľa dynamických vlastností sústavy je možné uplatniť aj PD prípadne PI variantu. O regulátoroch PID bolo napísané veľké množstvo publikácií, ktoré sa venujú teoretickej i praktickej stránke a rôznym variáciám.

Kľúčovými bodmi návrhu regulátora je voľba konštánt P, I, D. V minulosti bola veľmi rozšírená empirická Ziegler-Nicholsova metóda, ktorá určuje konštanty z priebehu odozvy sústavy na jednotkový skok alebo z frekvencie kmitania sústavy na medzu stability. Metóda Ziegler-Nicholsa bola veľmi obľúbená pre svoju jednoduchosť a umožňuje približne nastaviť regulátor aj technikom bez odborného teoretického vzdelania. Z matematickej stránky sa však dá ukázať, že táto metóda niektoré sústavy nedokáže ani stabilizovať.

U jednoduchých dynamických sústav do rádu 3 je možné dynamické deje analyticky popísať. V praxi sa však často stretávame so sústavami rádu aj niekoľko desiatok. Pri popise takýchto zložitých systémov je nutné zjednodušenie. To je možné tak, že zanedbáme niektoré dynamické vlastnosti sústavy, ktoré majú relatívne malý vplyv. Ak máme sústavu napríklad tretieho rádu s dvomi konštantami rádovo desiatky sekúnd a tretiu v ráde desiatín, môžeme bez veľkej ujmy na presnosti poslednú konštantu zanedbať. Ak však znížime rád sústavy príliš, výpočty a predpokladané odozvy sa môžu vo výsledku značne líšiť.

Ďalším prvkom, ktorý komplikuje riešenie regulácie, sú nelinearity systému. Môžu byť vo forme nelineárnych závislostí, napríklad mocninné, goniometrické atď., alebo vo forme saturácií reálnych členov. Väčšina matematických metód je navrhnutá pre lineárne systémy, v ktorých platí princíp superpozície. Ak chceme využiť tieto metódy pre popis nelineárnych systémov, je nutné zvoliť pracovné body a v nich prevodné funkcie linearizovať. Odozvy nelineárneho systému budú v okolí pracovného bodu približne lineárne. To, aké veľké toto okolie bude, závisí od toho, ako veľmi sa nelineárny systém líši od lineárneho. Ak chceme regulovať nelineárny systém vo veľkom rozsahu, je nutné navrhnuť regulátor v niekoľkých pracovných bodoch a meniť parametre regulácie „za behu“. Druhá možnosť je využiť pokročilejšie metódy návrhu.

Pri ladení regulátora sa môže uplatniť niekoľko metód. Napríklad frekvenčné charakteristiky systému, metóda geometrického miesta koreňov, simulácia nástroje alebo je možné aplikovať novšiu výpočtovú metódu, ktorou je riešenie polynomiálnych rovníc.

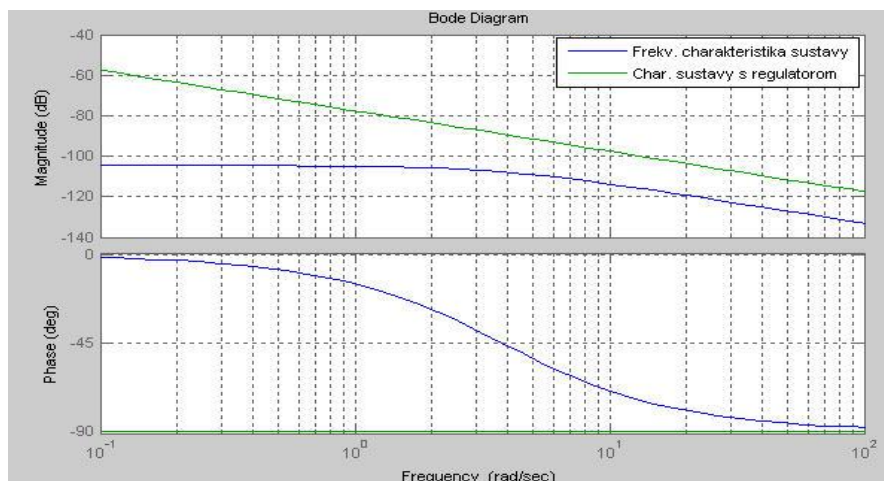
3.5. Návrh spojitého regulátora

Pri návrhu regulátora vyjdeme z lineárneho prenosu sústavy v pracovnom bode uprostred požadovaného rozsahu. Nelineárny systém sme zjednodušili na prvý rád. Ako regulátor môžeme použiť typ PI, ktorý sa obvykle používa pre systémy s jednoduchšou dynamikou.

Prenos PI regulátora je obecné $k_p + k_i \frac{1}{s}$. Prepíšeme ho do tvaru $k \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$, ktorý je výhodný pretože konštanty k a T_i v ňom neinteragujú. Pri zmene jedného parametra nie ovplyvnený druhý.

Konštanta k je priamo zosilnením a pre k_i platí $k_i = \frac{k}{T_i}$.

Parameter T_i zvolíme tak, aby jeho hodnota odpovedala časovej konštante sústavy. V našom prípade podľa prenosu (3.3.23) je to 0,265 s. Tým dostaneme integračný charakter sústavy s regulátorom. Teoretické zvyšovanie k je samozrejme obmedzené možnosťami reálneho akčného zásahu, ktorý je v našom prípade veľkosť napätia na erpadle maximálne 12 V. Charakteristiky sústavy a sústavy s regulátorom sú na nasledujúcom obrázku.

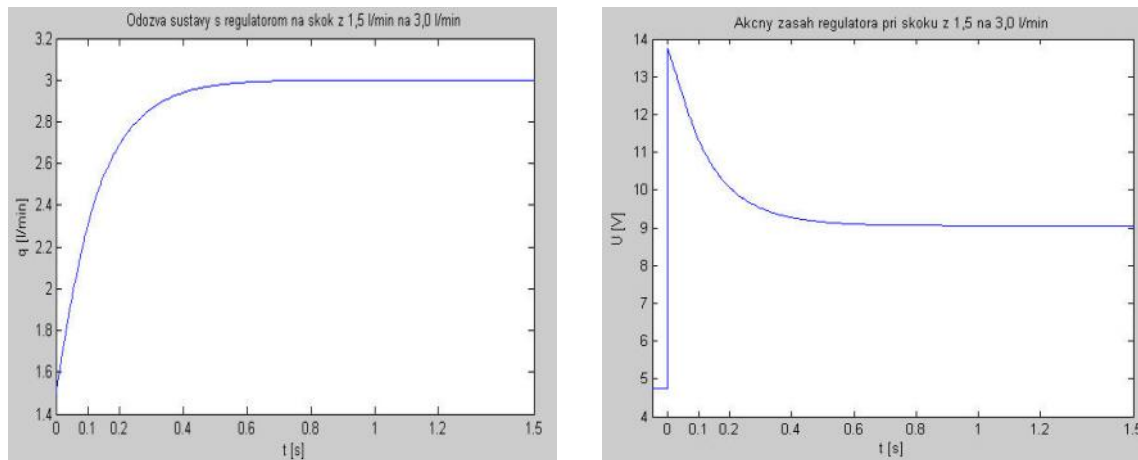


obr. 3.5.1 Frekvenčné charakteristiky.
Modrá je charakteristika sústavy, zelená je char. sústavy s regulátorom.

Pri zvyšovaní konštánt regulátora sa zelená charakteristika sústavy s regulátorom posúva smerom hore a tým sa zvyšuje prenášané frekvenčné pásmo. Čas odozvy výstupu za požadovanou hodnotou sa tak skraca.

Vhodné nastavenie konštánt dosiahneme postupným doladením v Simulinku. Pozorujeme výstupnú odozvu a samozrejme veľkosť akčného zásahu pred saturačným členom. Konštanty sú nastavené postupne doladené tak, že $P = 6,0$ a $I = 22,6$.

V Simulinku môžeme porovnať presnosť lineárneho modelu oproti nelineárnemu. Všetky nasledujúce výsledky simulácií odpovedajú nelineárnemu modelu.



obr. 3.5.2 Odozva regulovanej sústavy na skok v okolí pracovného bodu. Akčný zásah regulátora.

Z ľavého obrázku vidíme pomerne rýchle ustálenie, ktorému odpovedá akčný zásah na pravom obrázku. Pri skokovej zmene požadovaného prietoku dochádza na krátku dobu k orezaniu akčného zásahu. Vzhľadom na to, že úlohou je regulovať ustálený stav, je toto orezanie prípustné. Pri použití prírastkového tvaru PI regulátora zabránime javu wind-up. Úpravou regulátora na tvar s dvomi stupňami voľnosti sa tento výrazný skok akčnej veličiny zníži a parametre regulátora bude prípadne možné zvýšiť bez prekročenia saturačnej hodnoty.

3.6. Návrh 2-DOF regulátora

Regulátor s dvomi stupami vo nosi je modifikáciou klasického PID, [1] [17]. Cieľom tejto modifikácie je znížiť citlivosť regulačného obvodu na zmeny požadovanej hodnoty (SP – set point). Tento efekt sa dosiahne vylúčením núl z priamej väzby regulátora. Nuly predstavujú derivatívne zložky a reagujú práve na zmeny vstupnej veličiny. Pri prudkých zmenách SP je to ale nevýhodné, pretože derivácia skoku je vždy veľké číslo (teoreticky nekonečno). Pri skokovom vstupe vyvolá zložka D aj skokovú odozvu s vysokou amplitúdou, čo je v mnohých prípadoch značne nevhodné (napr. pre rôzne mechanické akčné členy ako ventily a podobne). Vo väčšine prípadov sa skokovým zmenám akčnej veličiny snažíme vyhnúť. Zlepšenie odozvy dosiahneme tak, že P (príp. D) zložku zaradíme do spätnej väzby. V priamej väzbe ostane len integračná zložka, ktorá zabezpečí zmenu akčného zásahu podľa regulačnej odchýlky. Tá je daná rozdielom referencie (SP) a aktuálneho výstupu.

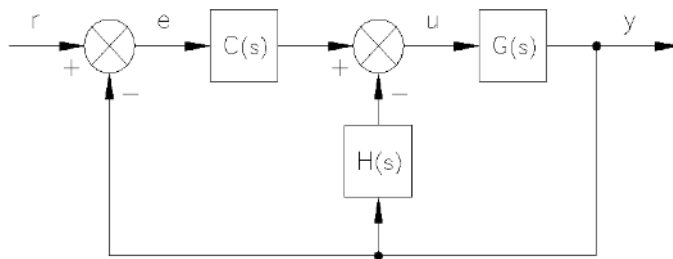
Pre výpočet akčného zásahu obecného 2-DOF PID regulátora platí podľa normy ISA vzťah

$$U(s) = k \left\{ bW(s) - Y(s) + \frac{1}{T_i s} [W(s) - Y(s)] + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} [c W(s) - Y(s)] \right\} \quad (3.6.1)$$

$U(s)$ je Laplaceov obraz akčného zásahu, $W(s)$ je obraz žiadanej hodnoty a $Y(s)$ je obraz výstupného signálu, ktorý je privedený spätnou väzbou. Menovateľ zlomku posledného člena je filtrácia derivatívnej zložky, ktorá je nutná kvôli kauzalite regulátora.

Parametrami b , c je možné zvoliť, akou váhou bude derivatívna a proporcionálna zložka zastúpená v priamej, resp. spätnej väzbe. V obidvoch prípadoch $b, c = 1$ dostaneme klasický 1-DOF regulátor. Pre 2-DOF regulátor je doporučené zvoliť b z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ a c nulové.

V našom prípade môžeme uvažovať aj konštantu b , tým necháme proporcionálnu zložku plne v spätnej väzbe a integračnú v priamej, derivatívna zložka použitá nie je. Konštanty regulátora odpovedajú spojitému návrhu z predchádzajúcej kapitoly.

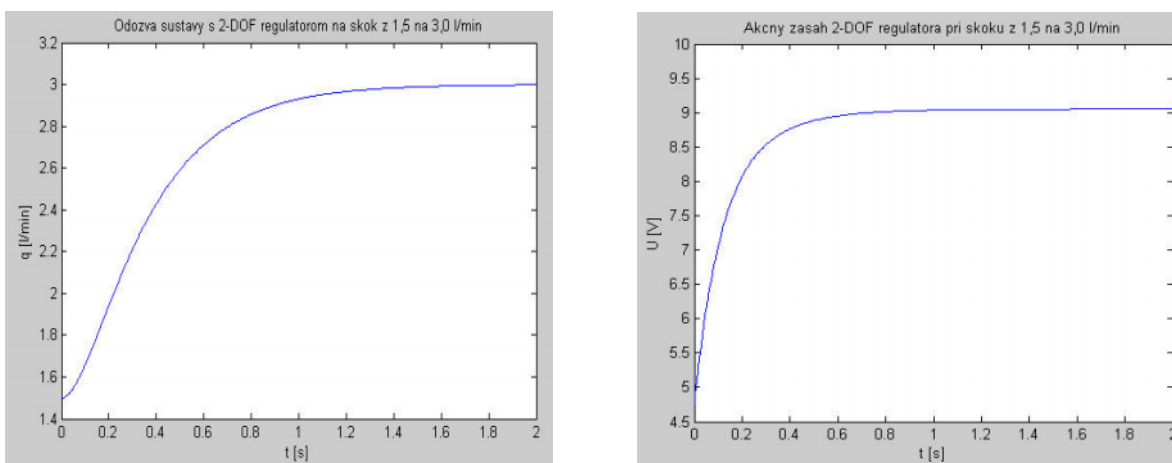


obr. 3.6.1 Obecná schéma 2-DOF regulátora

Upravený vzťah pre regulátor PI je

$$U(s) = k \left\{ \frac{1}{T_i s} [W(s) - Y(s)] - Y(s) \right\} \quad (3.6.2)$$

Na nasledujúcom obrázku sú analogické grafy k obr. 3.6.2 s použitým 2-DOF PI regulátorom. Môžeme si všimnúť plynulejší a rýchly zásah bez výrazných prekmitov a hlavne bez saturácie alebo orezania. V ľavom obrázku vidíme v porovnaní s klasickým PI dlhšiu odozvu sústavy. Máme možnosť zvýšiť hodnoty konštánt a tým skrátiť dobu nábehu.

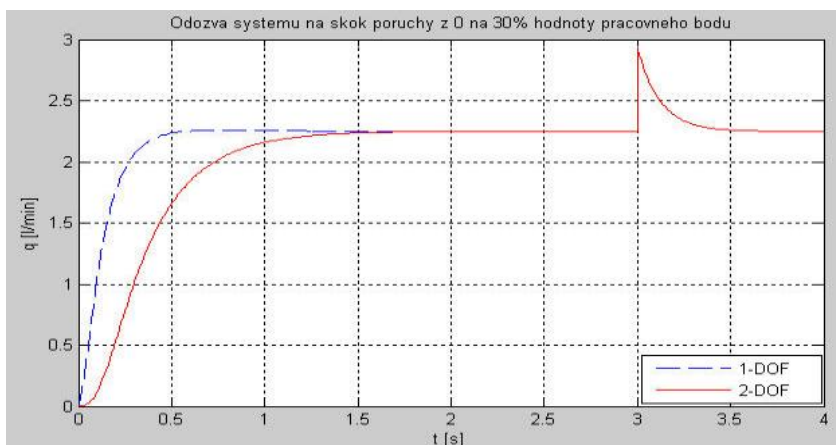


obr. 3.6.2 2-DOF regulátor.

Odozva regulovanej sústavy na skok referencie v okolí pracovného bodu. Aktivný zásah.

Z teórie o 2-DOF regulátore vieme, že upravuje odozvu regulačného obvodu na zmenu referencie (SP) a zároveň nezmení odozvu na zmenu poruchy. Nasledujúci obrázok doplní predošlú dvojicu na obr. 3.6.2. Ďalšie obrázky 3.6.3 (v časovom rozsahu 0 až 2 s) ukazujú odozvu na skok referencie z nuly do pracovného bodu 2,25 l/min. Vidíme, že 2-DOF regulátor spomalí odozvu na skok referencie. To je dané tým, že tento regulátor nevyvolá tak rýchlu zmenu ako klasický PI ako dokazuje pravý obrázok 3.6.2 v porovnaní s obr. 3.5.2.

Druhý skok v časovom rozsahu 3 s je reakcia obvodu na poruchu vo výške 30 % z ustálenej hodnoty. Pri vyvolaní poruchy vidíme, že oba PI regulátory, 1-DOF aj 2-DOF, s rovnakými parametrami reagujú identicky a obidve krivky splývajú.



obr. 3.6.3 Porovnanie odozvy regula ného obvodu na poruchu s regulátorom 1-DOF a 2-DOF.

Nastavenie konštánt regulátora je vždy určitým kompromisom. Pokiaľ použijeme vyššie hodnoty, zrýchli sa odozva, ale zároveň sa zvýši aj citlivosť na šum. Tento fakt si môžeme overiť napríklad pridaním aditívneho šumu s rovnomerným rozdelením k meranej veličine a následným porovnaním rozptylu hodnôt v ustálenom stave pre rôzne parametre PI. Uvedieme príklad nastavenia konštánt a porovnanie rozptylu hodnôt výstupnej veličiny pri rušení $\pm 5\%$ z hodnoty pracovného bodu, teda $\pm 0,1125$ l/min. Frekvencia rušenia je zvolená na 120 ms, čo zodpovedá vzorkovacej frekvencii v diskretnom modeli. Podstatná časť tohto rušenia je spôsobená kvantizačným šumom senzoru. Nasledujúca tabuľka ukazuje v štyroch rôznych nastaveniach a rozptyl výstupnej veličiny v ustálenom stave.

$k_p = 6,0$	$k_p = 10,0$
$k_I = 22,6$	$k_I = 37,7$
var = 0,0011	var = 0,0018
	zvýšenie rozptylu o 64%

V našom prípade je dôležitejšia presnosť ustáleného stavu ako maximálna rýchlosť náběhu. Z obrázku 3.6.2 vidíme, že pri použití nižšej dvojice uvedených konštánt sa sústava dostane do ustáleného stavu za menej ako 2 s, čo je plne vyhovujúci stav. Ako ukazuje tabuľka, nárast rozptylu pri zvýšení konštánt je veľmi výrazný. Podobné zvýšenie rozptylu (67%) nastane aj pre rušenie $\pm 10\%$ z hodnoty pracovného bodu.

3.7. Návrh diskrétného regulátora

U číslicových regulátorov sa integrálna zložka nahrádza sumáciou a derivácia diferenciou. Preto sa číslicový PID regulátor označuje PSD. Integrál je možné aproximovať obdĺžnikovým alebo lichobežníkovým pravidlom. Postupom ako aproximovať integrál je niekoľko, ale dva zmienené sa používajú najčastejšie pre praktické matematické výpočty. Obecný vzorec pre výpočet výstupu PSD regulátora pri nulových počiatočných podmienkach, s regulačnou odchýlkou $e(kT)$ a s využitím obdĺžnikového pravidla pre náhradu integrácie je

$$u(kT) = r_0 \left[e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k e(iT) + \frac{T_d}{T} \{e(kT) - e[(k-1)T]\} \right] \quad (3.7.1)$$

Regulátor PSD, ktorý obsahuje sumáciu nazývame polohový. Pre našu aplikáciu sa hodí tzv. prírastkový tvar, niekedy nazývaný rýchlostný, ktorý má rekurentný charakter. Algoritmus neurčuje okamžitú odozvu v danom čase, ale vypočíta prírastok k hodnote v predchádzajúcom diskrétnom okamihu. Oproti polohovému algoritmu má výhodu, že automaticky rieši problémy beznárazového prepnutia a anti-wind up. Presnejší popis je v kapitole 3.8. K tvaru prírastkového algoritmu dospejeme tak, že vo vzorci (3.7.1) nahradíme k výrazom $k-1$. Dostaneme tak vyjadrenie aktuálneho zásahu v okamihu $k-1$.

Odčítaním „ $u(k) - u(k-1)$ “ dostaneme vyjadrenie daného prírastku $\Delta u(k)$. Výsledný tvar prírastkového algoritmu pre PID regulátor dostaneme v tvare

$$\Delta u(kT) = q_0 e(kT) + q_1 e[(k-1)T] + q_2 e[(k-2)T] \quad (3.7.2)$$

kde parametre q_x závisia od použitých náhrad integrálu. Pre spätnú obdĺžnikovú náhradu integrálu platia vzťahy

$$q_0 = r_0 \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) \quad q_1 = -r_0 \left(1 + 2\frac{T_d}{T} \right) \quad q_2 = r_0 \frac{T_d}{T} \quad (3.7.3)$$

V našom prípade používame regulátor s dvomi stupňami vonosti. Prírastkový tvar tohto regulátora určíme výpočtom analogicky ako pre klasický PID. Vydeme zo vzťahu (3.6.2), ktorý sme použili pre simulácie spojitého regulačného obvodu. Upravíme ho na tvar v premennej kT tak, že Laplaceov obraz integrálu $1/s$ nahradíme obdĺžnikovým pravidlom. Zosilnenie budeme značiť r_0 , aby nedošlo k zámene s aktuálnou vzorkou značenou k .

$$U(s) = k \left\{ \frac{1}{T_i s} [W(s) - Y(s)] - Y(s) \right\} \quad (3.7.4)$$

$$u(kT) = r_0 \left\{ \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k [w(kT) - y(kT)] - y(kT) \right\} \quad (3.7.5)$$

Ak ný zásah v prechádzajúcom kroku je

$$u[(k-1)T] = r_0 \left\{ \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^{k-1} (w[(k-1)T] - y[(k-1)T]) - y[(k-1)T] \right\} \quad (3.7.6)$$

Od ťaním (3.7.6) od (3.7.5) dostaneme h adaný prírastkový tvar 2-DOF PS regulátora

$$\Delta u(kT) = r_0 \left\{ \frac{T}{T_i} w(kT) - \left(\frac{T}{T_i} + 1 \right) y(kT) + y[(k-1)T] \right\} \quad (3.7.7)$$

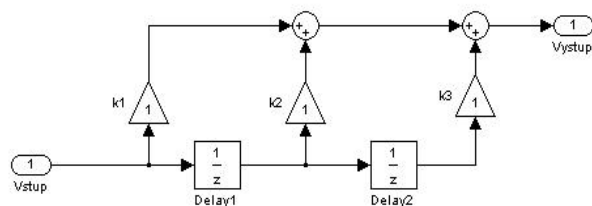
kde w je požadovaná hodnota (SP – set point) a y je hodnota výstupu. Pre výpo et hodnoty akného zásahu v ase kT teda platí

$$u(kT) = \Delta u(kT) + u[(k-1)T] \quad (3.7.8)$$

Odozvu regula ného obvodu môžeme zlepši využitím filtrácie. Existuje nieko ko možností ako postupova . Môžeme sa vráti k spojitému prenosu a k sústave prida filter prvého rádu. Frekvenciu zlomu nastavíme tak, aby ležala za frekvenciou zlomu sústavy. Amplitúdová frekven ná charakteristika sa zmení tak, že za druhým zlomom bude klesa 40 db/dek. Tým odfiltrujeme vyššie frekvencie lepšie ako samotná sústava a znížime vplyv vysokofrekven ného šumu. Spojitý filter implementujeme íslicovo diskretizovaním, napríklad použitím Eulerovej alebo Tustinovej metódy. Druhým spôsobom je použitie diskrétného návrhu FIR filtra napríklad metódou DFT a okien.

Na ukážku aplikácie jednoduchého filtra použijeme simuláciu a empirický prístup. Vychádzame z filtra „k zavý priemer“ (anglicky moving average, v skratke MA), ktorý eliminuje rýchle zmeny vstupnej veli iny tak, že uvažuje vplyv prechádzajúcich hodnôt s ur itou váhou. Tento filter je obecné typu FIR, teda nerekurzívny. Pri vysokých rádoch je náro ný na pamä .

Pri ladení filtra postupne upravujeme konštanty tak, že znižujeme podiel prvej zložky a zvyšujeme druhú. Sú et všetkých zložiek musí by rovný 1, pretože od filtra požadujeme zosilnenie jedna. Nasledujúci obrázok ukazuje štruktúru MA filtra s tromi lenmi.



obr. 3.7.1 Štruktúra filtra „k zavý priemer“

Bloky $1/z$ predstavujú pamäťové bunky. Za prvým blokom je hodnota v_{k-1} a za druhým v_{k-2} . Ak požadujeme zosilnenie 1, platí $k_1 + k_2 + k_3 = 1$.

Signál, ktorý nás zaujíma je samozrejme veľkosť prietoku, respektíve jeho ustálená hodnota. Budeme teda upravovať konštanty filtra v Simulinkovej schéme a porovnáme rozptyl hodnôt okolo maximálnej ustálenej hodnoty 3 l/min. Pre zvýšenie presnosti rozptylu odsimulujeme dostatočne dlhý čas, napríklad 20 s. Výsledky merania sú zapísané v tabuľke. Prvé štyri riadky sú hodnoty parametrov filtra odpovedajúce konštantám k_x v obrázku 3.7.1. Šum je aditívny, rovnomerne rozdelený s hraničnou amplitúdou $\pm 10\%$ z hodnoty pracovného bodu 2,25 l/min. Predpokladáme, že sústava nebude trvalo vystavená vyššiemu šumu. Rozptyl hodnôt prietoku bez filtra je 0,0077.

parametre filtra				rozptyl ustálenej hodnoty
k_1	k_2	k_3	k_4	
0,9	0,1			0,0075
0,8	0,2			0,0076
0,7	0,3			0,0079
0,8	0,1	0,1		0,0070
0,8	0,05	0,15		0,069
0,75	0,05	0,1	0,1	0,0066

Pri postupnom doladovaní zistíme, že zvýšením rádu filtra tak, že posledným členom priradíme len malé váhy rádovo 0,05, mierne znížime rozptyl ale za cenu nárastu pamäťových a výpočtových nárokov. Pri nevhodnom nastavení parametrov filtra môže dôjsť dokonca k zhoršeniu priebehu výstupného signálu. To je dané tým, že filter skresí skutočnú hodnotu

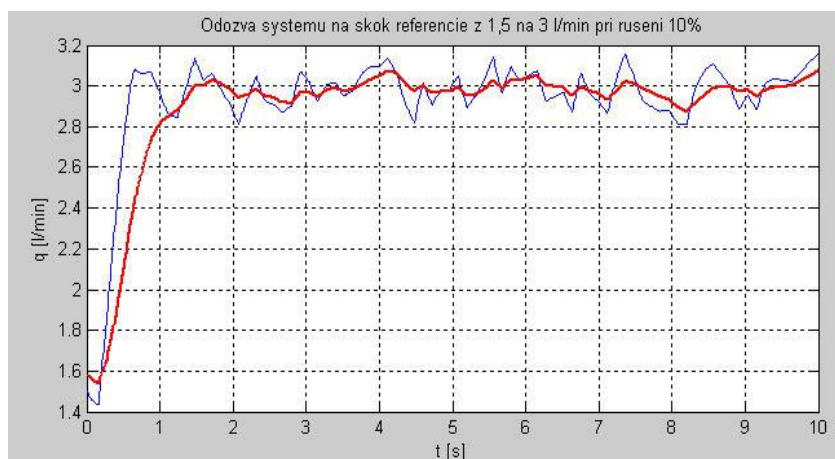
prietoku a regulátor tak po ťa ak ný zásah pre inú hodnotu než je reálna. Tento jav je ukázaný v tabu ke tre ou verziiou hodnôt, pri ktorom je rozptyl vä ťí ako bez filtra.

V predchádzajúcich kapitolách sme uviedli, že zvýšením konštant regulátora získame rýchlejšiu odozvu, ale zároveň narastá aj citlivosť na šum. Skúsime znížiť zosilnenie PI regulátora zo 6 na 5 a zistíme odozvu a rozptyl s použitím posledného filtra z tabu ky. Meraný rozptyl sa znížil na 0,0055, ustálenie trvá približne sekundu.

Pozorujme odozvu pri výraznom znížení zosilnenia regulátora. Nastavíme $k = 2$. Ustálenie pri skoku z 1,5 na 3 l/min je približne 2 s, čo sme klasifikovali ako hraničnú vyhovujúcu hodnotu. Ako finálne môžeme považovať nastavenie regulátora s konštantami $k_p = 2$ a $k_I = 7,55$, ktoré vykazuje rozptyl 0,0020, čo je značný pokles oproti predošlej úvahe. Parametre by bolo možné doladiť pri praktických meraniach a overení celého simulovaného modelu.

Pri danom nastavení konštant sa regulátor dokáže dostatočne vysporiadať s rušením a filter MA s nízkym rádom prinesie len veľmi malé zlepšenie. Pre filtrovanie náhodných vysokých frekvencií môžeme implementovať filter s hodnotami členov (0,85 ; 0,05 ; 0,1), ktorý zníži prípadné veľké prekmity.

Nasledujúci obrázok ukazuje odozvy pri skoku z 1,5 na 3 l/min pri rôznom nastavení konštant s rušením $\pm 10\%$ z hodnoty pracovného bodu.



obr. 3.7.2 červená (tuňá iara) charakteristika odpovedá zosilneniu 2, modrá zosilneniu 6

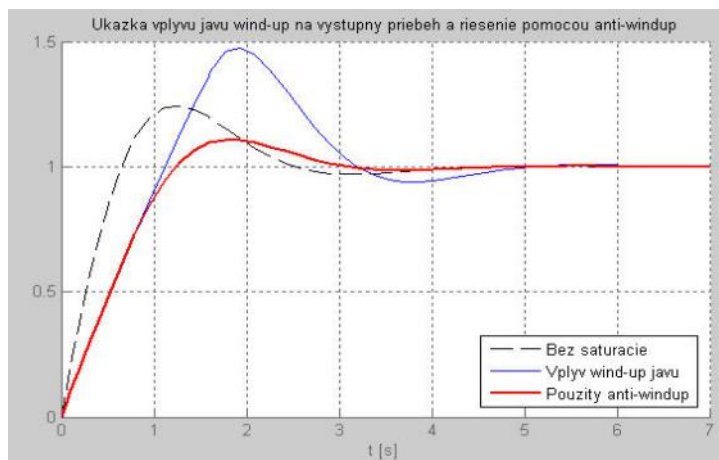
Z obrázku vidíme, že maximálna odchýlka od ustálenej hodnoty je do 5%, čo je vzhľadom na veľké rušenie dobrý výsledok. Pri rušení na úrovni 5% z pracovného bodu ustálená hodnota dosahuje maximálne odchýlky približne 3% a rozptyl hodnôt 0,0017. Výsledné teoretické nastavenie regulátora môžeme na základe simulácií považovať za dobré.

3.8. Wind up, beznárazové prepnutie, HMI

Wind-up

Regulačný obvod obsahuje regulátor, ktorý na základe rozdielu požadovanej (referencie) a skutočnej hodnoty meranej veličiny určí akčný zásah. Ten je vždy realizovaný fyzickým prvkom s určitými obmedzeniami. Napríklad maximálne otvorenie ventilu, maximálne napätie na pohonnej jednotke a podobne. Aj keď regulátor určí vysoký akčný zásah, regulačný orgán po dosiahnutí svojho maxima ďalšiu požiadavku nie je schopný splniť. Toto orezanie požadovanej amplitúdy akčného zásahu je pre regulačný obvod nevhodné, pretože sa tým po dobu saturácie rozpája spätná väzba. Je potrebné navrhovať regulátor tak, aby jeho výsledkom bola hodnota, ktorú je reálny prvok schopný previesť na regulačný zásah do sústavy. Nie vždy je však možné tento bod úplne splniť a s malými orezaniami je potrebné počítať.

Problém nastáva, ak dôjde k orezaniu akčného zásahu, pretože pretrváva regulačná odchýlka. Následkom toho sa alej narastá integračná zložka, ktorá sa už neprejaví na rýchlejšom znížení regulačnej odchýlky, pretože regulačný orgán dosiahol maximum. Keď sa regulačná odchýlka zníži, vysoká hodnota integračnej zložky zabráni poklesu regulačného zásahu. Tým vznikne oneskorená reakcia regulátora na zníženie odchýlky, po ktorej výstup prekmitne do zápornej hodnoty. Záporná odchýlka po určitej dobe zníži integračnú zložku. Negatívnym následkom tohto javu, nazývaného **wind-up**, je kmitanie výstupu. Prvok, ktorý pri dosiahnutí saturačnej hodnoty regulačného orgánu zabráni nárastu integračnej zložky sa nazýva anti-windup. Nasledujúci graf ukazuje negatívny vplyv efektu wind-up a zlepšenie priebehu výstupu pomocou anti-windup.



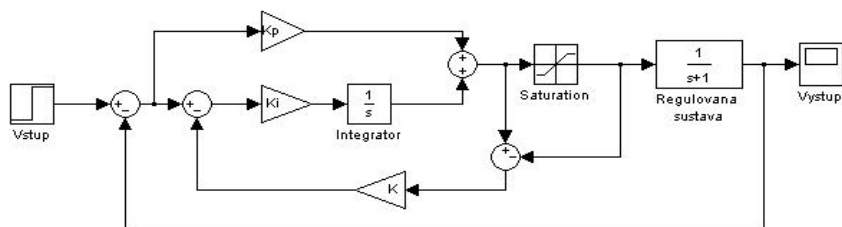
obr. 3.8.1 Ukážka vplyvu wind-up javu na prechodovú charakteristiku a jeho eliminácia

V grafe sú zobrazené prechodové charakteristiky regulovanej sústavy prvého rádu s PI regulátorom. Čierne označený graf je charakteristika obvodu bez saturačných obmedzení. Modrý graf (plná čiara) vyjadruje priebeh výstupu regulovanej sústavy s obmedzením akéhokoľvek výstupu, kde sa výrazne uplatňuje wind-up jav. Červený graf (tužná čiara) je odozva na jednotkový skok systému s anti-windup prvkom. V regulátore je zámerné zvolená vysoká konštanta I , aby sa zdôraznil wind-up jav. U modrého grafu je vidieť, že regulačný zásah dosiahne v krátkej dobe svoje maximum. Regulačná odchýlka však pretrváva a hodnota integrátora narastá. V momente, keď výstup prekročí hodnotu 1, regulátor by mal znížiť regulačný zásah, pretože regulačná odchýlka je záporná. Kvôli naintegrovaní hodnote však regulačný orgán ostáva stále naplno otvorený, až kým nedojde k „odintegrovaniu“ hodnoty integrátora. Toto oneskorenie má za následok vyšší a dlhšie trvajúci prechod oproti regulátoru s anti-wind up prvkom. U modrého grafu je zároveň vidieť aj prechod pod požadovanú hodnotu. Pokiaľ by bol jav wind-up ešte výraznejší, sústava by sa mohla rozkmitať na dlhú dobu, čo je neprípustné. Kvôli wind-up javu môže dôjsť aj k porušeniu stability celej sústavy tak, že kmitanie výstupu sa samovoľne nezastaví. Červený priebeh názorne ukazuje výhodu použitia anti-windup prvku pre zlepšenie kvality regulácie.

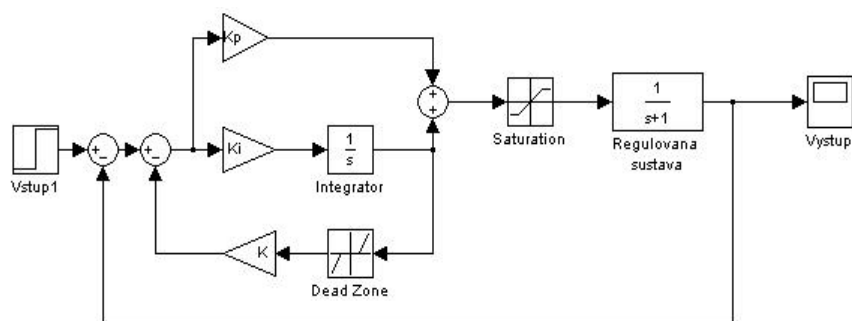
System anti-wind up je jednoduché implementovať pri použití číslicového regulátora. Kontrolujeme hodnotu akéhokoľvek zásahu, pri dosiahnutí maxima softvérového zabránime nárastu integrálnej zložky. Pri analógovej implementácii je možné použiť nelineárny prvok typu „mŕtve pásmo“ (anglicky dead-zone). Vstup bloku je výstupná hodnota integrátora. Výstupný signál z bloku dead-zone sa odpojí od regulačnej odchýlky. Ak sa bude rozdiel regulačnej odchýlky a integrálnej zložky zväčšovať, narastie hodnota, ktorá sa na vstupe integrátora odpojí. Tým sa zabráni nárastu výstupu integrátora. Štruktúru regulačného obvodu ukazuje obr. 3.8.3.

Druhým spôsobom analógovej implementácie je využiť rozdiel požadovanej hodnoty akéhokoľvek zásahu a skutočnej hodnoty. Tento rozdiel sa potom vhodnou váhou (konštanta K na obr. 3.8.2) odpojí na vstupe integrátora. Keď regulačný zásah dosiahne saturačnú hodnotu, v obvode vznikne druhá spätná väzba. Prenos regulátora je tak ovplyvnený práve konštantou K a vieme ho upraviť týmto parametrom tak, aby spĺňal naše požiadavky.

Nasledujúce obrázky ukazujú dve vyššie popísané možnosti implementácie mechanizmu anti-wind-up. Regulačný obvod obsahuje proporcionálny a integrálny člen a regulovanú sústavu. Konštanta K v oboch riešeniach vyjadruje váhu, akou sa zvýšená integrálna zložka odpojí od vstupnej hodnoty integrátora.



obr. 3.8.2 Implementácia mechanizmu anti-windup



obr. 3.8.3 Implementácia mechanizmu anti-windup pomocou bloku „dead-zone“

Pri číslicovej implementácii je wind-up jav možné odstrániť jednoducho tak, že nedovolíme ak nemože zasahovať viac ako dovoľuje akýkoľvek orgán. Presnejší popis ukazuje prechádzajúca kapitola, kde je popísaný prírastkový tvar PS regulátora. Ak nemože zasahovať sa po čase prírastkovo, takže ak nedovolíme premennej u narásť na saturačnú medzu, k wind-up javu nedôjde.

Beznárazové prepnutie

V praxi občas potrebujeme ovládať sústavu manuálne. Napríklad chceme ručne nastaviť vstupné napätie na 50 % a sledovať výstup. Problém nastane, pokiaľ chceme prepnúť regulátor z manuálneho režimu do automatického. Konkrétny problém je naakumulovaná integračná zložka, ktorá narastá (resp. klesá) pri ručnom režime. Pri prepnutí na automatický režim nastane „náraz“ tak, že ak nás veliteľina bude mať v okamihu prepnutia maximálnu (resp. minimálnu) hodnotu, danú saturačným obmedzením. Aby nedochádzalo k tomuto negatívnemu javu, je nutné vybaviť regulátor systémom nazývaným *beznárazové prepnutie*. Princíp spočíva v tom, že v manuálnom behu integračná zložka mení svoju hodnotu tak, aby odpovedala aktuálnemu, manuálne zvolenému

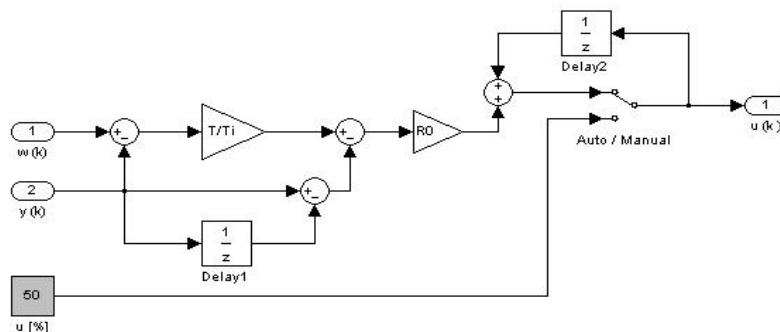
mu, ak nemá zásahu. V momente prepnutia tak nedochádza k saturácií a automatický režim plynule prejde do ustáleného stavu.

Beznárazové prepnutie u regulátora PS v prírastkovom tvare vyplýva priamo z rovnice (3.7.7) V každom okamihu sa aktuálny výstup a aký zásah ukladajú do pamäti bez ohľadu na to, či výstup u nastavujeme ručne alebo nie. Pri prepnutí na automatický režim sa korektné vypočítaná hodnota pre ďalší diskretný okamih. Regulačný obvod sa tak plynule dostane do ustáleného stavu, ktorý je daný v obojoch referenciách. Tento postup je blokovo naznačený obrázkom 3.8.4, ktorý odpovedá rovnici (3.7.7) dosadenej do (3.7.8). Výsledný výraz upravíme na tvar

$$u(kT) = r_0 \left\{ \frac{T}{T_i} [w(kT) - y(kT)] - [y(kT) - y([k-1]T)] \right\} + u([k-1]T) \quad (3.9.1)$$

Vstupom sú referencia w a hodnota meranej veličiny y . Regulačná odchýlka „ $w - y$ “ sa násobí konštantou T/T_i a od výsledku sa odčíta prírastok výstupného prietoku. Výsledný súčet sa násobí konštantou r_0 . Za násobiacim členom r_0 dostávame $\Delta u(kT)$, teda člen v zloženej zátvorke vo výraze (3.9.1). Oneskorovací člen $1/z$ s označením „Delay2“ predstavuje pamäťovú bunku, ktorá ukladá poslednú hodnotu akéhokoľvek zásahu v predošlom diskretnom okamihu. Obdobne člen „Delay1“ ukladá predošlú hodnotu výstupného prietoku. Výsledný aký zásah sa určí ešte v okamihu kT , na výstup sa dostane až v nasledujúcom diskretnom okamihu $(k+1)T$.

Pri prepnutí prepínača do polohy *Manual* sa pomocou šedého bloku „ u [%]“ nastaví hodnota akéhokoľvek zásahu u_{ru} – napríklad percentuálnym vyjadrením. Toto nastavenie sa ukladá do pamäti rovnako ako zásah určený regulátorom. Pri opätovnom prepnutí do režimu *Auto* regulátor vypočítá nový prírastok podľa referencie a ten sa pripočíta k ručne nastavenému akému zásahu v predošlom diskretnom okamihu.



obr. 3.8.4 Blokovo schéma beznárazového prepnutia

HMI

Skratka HMI je z angličtiny a znamená *Human-Machine Interface*. Ide o rozhranie medzi zariadením, napríklad regulátorom a obsluhou. Je dôležitým prostriedkom pre ladenie vnútorných parametrov zariadenia, napríklad konštánt regulátora, filtrov, časové konštanty a podobne. Prístup k tomuto režimu býva často autorizovaný len pre konštruktérov alebo vyškolenú obsluhu. Umožňuje, okrem ladenia, použiť aj rôzne testovacie manuálne režimy prípadne funkcie diagnostiky. Príkladom môže byť situácia, keď sa rozhodneme používať senzor s vyšším počtom impulzov na liter a tým získame možnosť nastaviť vyššiu vzorkovaciu frekvenciu a spresniť reguláciu.

Moderné riadiace počítače sú často vybavené interaktívnym a jednoduchým ovládaním. V zariadeniach, ktoré vyžadujú pravidelnú zmenu parametrov alebo rôzne nastavenia, sa používajú aj farebné dotykové obrazovky urýchľujúce prácu obsluhy. V rozsiahlych výrobných procesoch je na obrazovke zjednodušený obrázok linky a obsluha na prvý pohľad vidí, v ktorej časti sú aké aktuálne hodnoty. HMI zahŕňa napríklad pripojenie riadiacich jednotiek technologických procesov s počítačmi. Hodnoty meraných veličín sa ukladajú do databázy a následne sa vyhodnocujú. Získané údaje môžu slúžiť ako informácia pre ďalšie vylepšenie výroby, alebo priamo na priebežnú aktualizáciu parametrov regulácie sústavy.

V tomto projekte uvažujeme zmenu požadovaného prietoku, ktorý nastavuje obsluha. Možnosť riešenia HMI je mnoho. Pomocou procesora môžeme ovládať autonómny zobrazovací systém, ktorý je bežne dostupný. Iné riešenie predstavuje využitie 7-segmentových displejov pre zobrazenie meraného prietoku, prípadne manuálne nastaveného napätia. Na zadanie vstupu postačí niekedy niekoľko tlačidiel s inkrementálnou funkciou. HMI zahŕňa tak isto aj formu oznamovania poruchových stavov, realizovanú zvukovým prípadne svetelným znamením.

4. Implementácia regulátora

V kapitole 3.5 sme navrhli spojitý PI regulátor sústavy erpadla s tryskou. V súčasnej dobe sa riadiace algoritmy implementujú takmer výlučne číslicovo. V našom prípade pomocou procesora. Pre výpočtový algoritmus ako nášho zásahu použijeme poznatky z kapitoly 3.7, kde sme odvodili prírastkový tvar 2-DOF PI regulátora.

Prechod od spojitého popisu k digitálnemu závisí od voľby parametrov, napríklad vzorkovacej frekvencie. Ak je vzorkovacia perióda dostatočne nižšia ako typická časová konštanta sústavy, je možné bez problémov nahradiť deriváciu diferenciou. Integrál sa číslicovo implementuje obdĺžnikovým, lichobežníkovým, Simpsonovým alebo iným pravidlom. V praxi pojem „nižšia“ vzorkovacia perióda znamená aspoň päťnásobný rozdiel oproti časovej konštante sústavy. Pokiaľ je časová konštanta porovnateľná so vzorkovacou, nastávajú problémy, napríklad prílišné kmitanie a podobne. V tomto prípade je nevyhnutné použiť metódy diskrétného návrhu regulátora.

4.1. Voľba základných parametrov implementácie

Implementáciu regulačného algoritmu závisí od voľby vzorkovacej frekvencie. Tým bude daný interval, v ktorom sa bude snímať aktuálny prietok. Na základe tejto hodnoty a príslušných výpočtov regulácie sa nastaví trieda pulzne šírkovej modulácie ovládajúcej motor erpadla.

Vyjdeme z parametrov turbínkového senzoru prietoku. Výrobca udáva rozsah meraných hodnôt 0,5 až 5,0 l/min čo plne vyhovuje zadaniu. Senzor dáva na výstupe 6900 impulzov na liter. Voľba vzorkovacej frekvencie je kompromis. Pri vyšších hodnotách narastá rýchlosť odozvy regulátora, ale klesá odolnosť voči šumu vstupného signálu. Čím dlhší čas sa počítajú impulzy zo senzoru, tým je meranie presnejšie a menej sa prejaví aditívny šum, u ktorého predpokladáme nulovú strednú hodnotu. Tým, že impulzy sa počítajú ako celé číslo, pri dlhšej dobe počítania sa znižuje vplyv zaokrúhľovacej chyby, takzvaný kvantizačný šum.

Doba nábehu sústavy je približne 1s. Je vhodné, aby tejto dobe odpovedalo aspoň 5 vzoriek. V takom prípade nedôjde k prílišnému kmitaniu okolo ustálenej hodnoty. V našom prípade môžeme zvoliť niečo vyššiu vzorkovaciu frekvenciu, napríklad 8 Hz.

Ukážeme výpočet, prečo nie je vhodné voliť vyššiu vzorkovaciu frekvenciu. Zvoľme napríklad 20 Hz. Odpovedajúci vzorkovací interval je 50 ms. Uvažujeme najnižší prietok žiadaného rozsahu, pri ktorom bude na vstupe najmenej impulzov. Senzor dáva 6900 impulzov na liter, teda 10 350 impulzov za minútu, čo je 172,5 impulzov za sekundu. Za jeden vzorkovací interval je teoreticky počet impulzov 8,625. V skutočnosti ale program stále počítá celistvý počet impulzov.

Pri odítavaní po tu impulzov za vzorkovaciu periódu dostaneme íslo 8 alebo 9. Pri najnižšom požadovanom prietoku získavame výsledok merania s možnou chybou až 8%. Pri nižších prietokoch táto chyba narastá.

Uvažujme vzorkovanie s periódou 120 ms (približne 8,3 Hz) a zopakujme predchádzajúcu úvahu. Za vzorkovací interval sa teoreticky spoíta 20,7 impulzov, reálne však 20 alebo 21 impulzov. Najväšia zaokrúhlovacia chyba je tak približne 3,4% a s rastúcim prietokom klesá. Táto nepresnosť je pre danú aplikáciu priateľná. Kvantizačný šum vieme iasto neznížiť filtrovaním vstupného signálu.

Druhý problém prechodu od spojitého signálu k diskretnému je kvantovanie. Meraná hodnota prietoku je kvantovaná prirodzene použitím senzoru s impulzným výstupom. V opačnom prípade je nutné použiť A/D prevodník. Bežne dostupné prevodníky majú na výstupe 8 bitov, ale iasto sa používa aj vyššie rozlíšenie. Niektoré procesory ATmega majú zabudovaný 10-bitový A/D prevodník.

Kvantovanie výstupného signálu implementujeme použitím PWM. Procesor umožní použiť 8-bitový alebo 16-bitový register. Pri použití 8-bitového registra získame 256 rozlišovacích možností. Pri uvažovaní PWM tak máme možnosť nastaviť 256 pomerov striedy výstupného signálu. Spíname 12 V, takže rozlíšenie, ktoré získame 8-bitovým registrom je $12/256 = 0,0469$ V, teda približne 0,4%. Toto rozlíšenie môžeme považovať za úplne dostatočné, pretože je približne o rád vyššie ako vstupný kvantizačný šum. Simuláciou overíme minimálny vplyv zavedenia kvantovania výstupného napätia.

4.2. Nárt implementácie regulačných algoritmov

Na implementáciu algoritmov využijeme poznatky z kapitoly 3.7. Vstupné impulzy poíta program v prerušení vyvolávanom nábežnou hranou externého signálu. Druhé prerušenie odasova a zabezpečí vzorkovanie vstupnej veličiny tak, že každých 120 ms uloží počet naítaných impulzov do zvoleného registra a vynuluje íta. Po et impulzov sa následne prepoíta pod adoby merania na aktuálny prietok. Na túto hodnotu vstupu aplikujeme jednoduchý filter typu kazavý priemer podľa popisu v závere kapitoly 3.7. Pre výpočet filtrovanej hodnoty si musíme pamätať posledné tri hodnoty. Na túto funkciu využijeme jednoduchú FIFO frontu s tromi prvkami.

Pre výpočet akčného zásahu použijeme vzťah (3.7.7) tak, že jeho výslednú hodnotu násobíme konštantou 255/12. Tým získame dĺžku impulzu pre PWM v rozsahu 8-bitového registra. Procesor umožní nastavenie až štyroch rôznych priebehov PWM. Pre našu aplikáciu sa hodí nastaviť

venie s pevnou periódou a premenlivou dĺžkou impulzu, ktoré sa naj častejšie používa pre ovládanie motorov. Anti wind-up vyriešime tým, že hodnota akčného zásahu nemôže prekročiť maximum registra, teda 255. Kontrolujeme pretečenie pri sčítaní a ak nastane, do registra uložíme číslo 255.

Požadovanú hodnotu prietoku (set point) je možné získať niekoľkými spôsobmi. Napríklad inkrementálnym tlačením s rozlíšením 0,1 l/min. Výsledné nastavenie zobrazíme na displeji. Pre zložitejšie aplikácie, alebo náročnejšie požiadavky na zobrazenie by bolo možné použiť autonómny zobrazovací systém, ktorý komunikuje pomocou 8-bitovej dátovej zbernice a niekoľkých riadiacich signálov. Pomocou procesora vieme túto komunikáciu ošetriť, požadovanú hodnotu tak dostaneme priamo ako 1 bajtové číslo.

Pri zobrazovaní aktuálneho prietoku nie je vhodné meniť tento výstupný údaj každý vzorkovací interval 120 ms. Ak by sme zobrazovali dve desatinné miesta, posledná číslica by značiek blikala a údaj by tak bol nečitateľný. Postačujúce bude, ak sa zmena zobrazí napríklad každé dve sekundy. Bez toho, aby sme museli ukladať do pamäti niekoľko posledných hodnôt, vytvoríme pre zobrazenie jednoduchý aritmetický priemer. Ak chceme zobrazený údaj meniť približne každé dve sekundy, môžeme určiť priemer za 16 vzoriek. V každom vzorkovacom intervale pripočítame k celkovej sume 1/16 aktuálneho prietoku. Po sčítaní všetkých čiastkových prietokov pošleme výsledok na zobrazovací výstup a vynulujeme príslušný počítací register. Čas zmeny zobrazovacieho údajja je možné nastaviť v podstate ľubovoľne. Cieľom je, aby zobrazené číslo príliš neblíkalo a zároveň aby čo najlepšie odpovedalo skutočnosti. Samotná hodnota nemá vplyv na reguláciu ani hlásenie chybových stavov.

Zadanie ešte požaduje ošetrenie chybových stavov. V každom kroku (vzorkovacom intervale) kontrolujeme veľkosť regulačnej odchýlky. V prípade, že je väčšia ako 10 %, začneme počítať časové kvantá (napríklad podoba vzorkovacej periódy – rozlíšenie 120 ms je dostatočné). Pri prekročení času 20 s sa ohlásí chybový stav nastavením príslušného výstupného bitu. Možnosť signalizácie je niekoľko, zvukové, vizuálne – blikaním displeja, výstražným svetlom a podobne. V prípade, že regulačná odchýlka je blízka nule viac ako 4 s, program okamžite vypne erpadlo a prejde do ohlásenia chybového stavu.

S použitím moderných prostriedkov sa implementácia regulačných algoritmov stáva jednoduchšou. Pri využití jazyka C a prekladača pre procesor sa zjednodušujú aj matematické operácie a prípadné počítanie s desatinnými číslami. Zložitejšiu časť tvorí komunikácia procesora navonok a užívateľské rozhranie.

5. Záver

Bakalárska práca mala ukáza postup riešenia regula nej úlohy z praxe. Teoretické riešenie je spojené s výberom reálnych sú astí, u ktorých musíme po íta s konkrétnymi obmedzeniami napríklad presnos senzoru, parametre erpadla a podobne. Tieto charakteristiky je nutné bra do úvahy a prispôbi sa im. Zásadné problémy, ktoré sa vyskytujú pri isto teoretickom riešení sú nedostatok informácie o niektorých uvažovaných sú astiach a tento fakt bol hlavnou prekážkou v rýchlejšom postupe na za iatku tvorby práce. Napríklad, je takmer nemožné sa dozvedie presné popisy erpadiel zo stránok výrobcov alebo predajcov. V našom postupe sme využili niektoré základné teoretické poznatky o odstredivých erpadlách a jednosmernom motore. Na základe týchto informácií bol vytvorený zjednodušený model celej sústavy, pri om niektoré konštanty sú v rovine predpokladu. V praxi je pre upresnenie zložitejších sústav asto nevyhnutný experiment.

Riešenie úlohy môžeme považova za úspešné a dosiahnuté výsledky za vyhovujúce. Prostredie MATLAB Simulink poskytuje výborné možnosti na overenie modelu a prípadne ru né upravenie parametrov. Následná realizácia a experimenty na reálnej sústave by ukázali priestor na doladenie jednotlivých prvkov, prípadne upresnenie modelu a to predovšetkým erpadla.

V práci bol použitý aj empirický prístup, napríklad pri návrhu filtra. V tomto prípade nie sú na filter žiadne náro né požiadavky, cie om je iasto ne vylepši odozvu regula ného obvodu, prípadne odstráni náhodné rušivé signály. Návrh filtrov je obecné komplexná a zložitá teória a v tejto práci nebola v takom rozsahu použitá. V rade aplikácií by však bolo nevyhnutné tieto poznatky uplatni .

Vzh adom na to, že nebolo dodané reálne zariadenie na experiment, z dôvodov popísaných v úvode, bola implementácia regula ných algoritmov ponechaná v rovine na rnutého postupu. Najrozsiahlejšiu as softvéru by tvorilo rozhranie komunikácie s užívateľom. Algoritmy regulácie boli podrobnejšie odvodené a popísané, takže ich naprogramovanie pre konkrétnu platformu je len otázkou krátkeho asu. Zrušenie posledného bodu realizácie po dohode s vedúcim práce poskytlo priestor na detailnejšie teoretické spracovanie a získanie nových poznatkov z oboru riadenia a teórie systémov.

Dodatok 1

erpadlá

erpadlá rozde ujeme medzi tri základné kategórie pod a princípu konštrukcie. Sú to *hydrostatické*, *hydrodynamické* a *ostatné*. Do skupiny hydrostatické patria rota né (napríklad zubové, vretenové, lamelové) a s kmitavým pohybom (napríklad piestové, membránové, vlnovcové). Do skupiny hydrodynamické patria odstredivé, axiálne, obvodové, labyrintové a rôzne kombinované. V poslednej kategórii sú prúdové, plyno-tlakové, elektromagnetické a zdvižné erpadlá. Na webovej stránke [14] je niekoľko animácií rôznych erpadiel, ktoré vysvetujú konštrukciu a spôsob fungovania daného typu. Medzi základné parametre patrí maximálny tlak a prietok a závislosť týchto dvoch velíín pri menovitom vstupnom napätí motora. Charakteristiky $p = f(q)$ sa u rôznych typov môžu zna nelíši. U erpadla s pružným obežným kolesom je táto závislosť kvadratická, napríklad u membránového erpadla je lineárna.

Pri výbere vhodného erpadla si alej všímame, či je schopné bežať nasucho bez poškodenia, respektíve, či je možné za chodu úplne zastaviť prietok. Niektoré erpadlá sú schopné samo-nasávania, iné musia byť počas prevádzky priamo ponorené v kvapaline.

Krátky popis niektorých erpadiel je uvedený na ďalších riadkoch.

Odstredivé erpadlá

Elektromotor, jednosmerný alebo striedavý, poháňa a kotúča, na ktorom sú umiestnené lopatky. Ich poloha a tvar môžu byť rôzne v závislosti od požadovaných parametrov prietoku a tlaku. Kvapalina vstupuje kolmo na os otáčania kotúča a pôsobí na ňu odstredivá sila, ktorá vytlá kvapalinu von. Pôsobiacia sila sa prejaví ako tlak kvapaliny na výstupe, ktorý môže byť zna nelvyšší ako na vstupe.

Výhodou tohto typu je, že prietok na výstupe môžeme úplne zastaviť bez toho, aby sa erpadlo poškodilo. Výstupný tok je spojitý, bez kmitavých zmien rýchlosti kvapaliny.

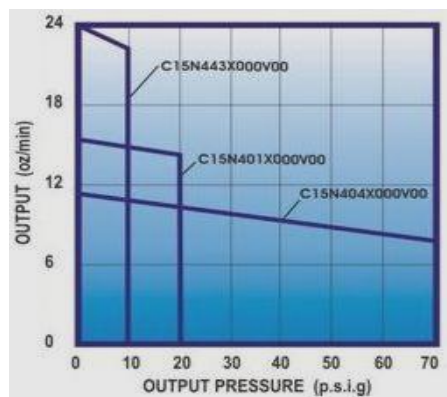
Axiálne erpadlá

Sú v podstate vrtulové. Od odstredivých sa líšia tým, že kvapalina vchádza aj vychádza v smere osi rotácie vrtule. Tento typ sa hodí pre udržiavanie rýchlosti kvapaliny. Použitie rovnakého princípu je napríklad u lodných vrtúl.

Membránové erpadlá

Mechanický pohyb týchto erpadiel je podobný ako u spa ovacieho motora. Miesto valca sa tu nachádza membrána. Ventily na vstupe a na výstupe pracujú na základe tlaku. Keď sa membrána pohybuje smerom dolu, erpadlo je v procese nasávania. Tým sa otvorí vstupný ventil a uzavrie výstupný. Pri pohybe smerom hore je stav ventilov opačný a membrána vytlá kvapalinu na výstup. Membrán môže byť aj viac, záleží to od konštrukcie a zložitosti erpadla. Prúdenie kvapaliny na výstupe má pulzujúci charakter. Frekvencia pulzov závisí od otáčok motora a od počtu membrán.

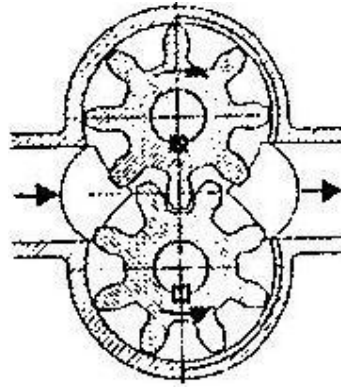
Charakteristika $q = f(p)$ je lineárna so záporným sklonom, ktorý v závislosti od konštrukcie môže byť aj relatívne malý. To znamená, že erpadlo udržiava prietok v malom intervale hodnôt v relatívne veľkom rozsahu tlaku. Dôležitým bodom krivky $q = f(p)$ je kritická hodnota tlaku. Pokiaľ výstupný tlak dosiahne túto hodnotu, motor nie je schopný vytlačiť membránu. Skokom klesne prietok na nulu, ako ukazuje nasledujúci obrázok. To je nežiadúci stav, pretože hrozí poškodenie erpadla, ak nastane je nutné erpadlo do niekoľkých sekúnd vypnúť.



Ukážka charakteristiky $q = f(p)$ membránového erpadla zo stránok výrobcu

Zubové erpadlá

Patria medzi najrozšírenejšie, konštrukcie sú jednoduchšie. Hydraulická časť obsahuje spojené ozubené kolesá, ktoré vytvárajú pohyb kvapaliny a vytlačujú ju von. Princíp je naznačený na obrázku. U väčších erpadiel sa používa aj viac ozubených kolies nad sebou.



Princíp zubového erpadla

Senzory prietoku

Senzor prietoku predstavuje hlavný článok v spätnej väzbe regulátora. Princípov týchto senzorov je niekoľko. Podrobnejšie o senzoroch v publikácii [9].

Vírové senzory

Založené na princípe oscilácií kvapaliny za rebrovitou prekážkou. Frekvencia oscilácií je priamo úmerná rýchlosti prúdiacej kvapaliny.

Ultrazvukové senzory

Pracujú na princípe merania rýchlosti zvuku, ktorá je ovplyvnená rýchlosťou prúdiacej kvapaliny.

Indukčné senzory

Určené pre kvapaliny obsahujúce vodivé ióny. Tok iónov predstavuje slabý elektrický prúd. Ióny prechádzajúce magnetickým poľom intenzity B sú vychyované silou $F_m = qvB$ k elektródam na stenách potrubia. Na elektródach tak vzniká napätie, ktoré je úmerné rýchlosti kvapaliny.

Turbínkové senzory

Kvapalina prechádza turbínkou, ktorej otáčky sú priamo úmerné rýchlosti kvapaliny. Výhodou tohto typu senzoru je široký rozsah lineárnej závislosti, jednoduché prevedenie a hlavne nízka cena. Pre daný projekt je veľkou výhodou impulzný výstup, ktorý sa jednoducho priamo spracuje mikroprocesorom bez nutnosti A/D prevodov, typických pre iné typy senzorov.

Turbínkové senzory dostupné na trhu sa líšia v niekoľkých parametroch: prierez veľkosti trubice, ktorý sa štandardne vyjadruje v palcoch (typicky 1/2", 3/4", 3/8", 1 1/2" atď. 1" = 25,4 mm) a počet impulzov na liter. Výrobcovia udávajú aj informáciu o tlakovej strate, ktorá má kvadratický charakter odpovedajúci (3.3.1).

Procesory Atmel rady ATmega

Procesory AVR 8-bit RISC patria medzi hlavné produkty firmy Atmel. Rada ATmega nahradila staršiu radu AT90S. Základom týchto procesorov je architektúra RISC, ktorá poskytuje veľmi dobré vlastnosti ako vysokú rýchlosť, väčší počet rovnocenných registrov, ktoré môžu byť parametrami funkcií. Procesory obsahujú širokú inštrukčnú sadu, v porovnaní s procesormi typu 8051 je programovanie efektívnejšie a jednoduchšie. Ďalšou výhodou rady ATmega je možnosť výberu kapacity programovej flash pamäte až do veľkosti 256KB, dátovej EEPROM až 4KB a dátovej RAM pamäte až 8192B. Maximálna frekvencia sa líši podľa typu procesora – 4/8/16/20 MHz. Procesory majú implementované 8/16 bitové časovače, PWM kanály, 10-bitové A/D prevodníky, analógové komparátory, sériovú komunikáciu atď.

Výhodou procesorov AT je ich jednoduché (pre)programovanie. Program uložený do pamäte typu flash je možné prepísať pomocou softvéru. Interná programová pamäť býva dostatočne veľká bez nutnosti použitia externej. Všetky dôležité programovacie a testovacie nástroje Atmelu sú dostupné na webe zdarma. Existujú dokonca prekladače, ktoré umožňujú písať programy v jazyku C s následným prekladom do assembleru alebo priamo strojového kódu.

Literatúra

- [1] Astrom, K.J., Hagglund T.: PID Controllers: Theory, Design, and Tuning (2nd Ed.). Instrumentation Society and Automation (ISA), USA, 1995
- [2] Franklin, G. F., Powell J.D., Emami-Naeini A., Feedback Control of Dynamic Systems (5th edition), Addison-Wesley, New York
- [3] Horáček, P.: Systémy a modely, Vydavatelství VUT, Praha, 2001
- [4] Hlaváček, V., Sedláček M.: Zpracování signálů a obrazů, Vydavatelství VUT, Praha, 2005
- [5] Šebek M.: materiály k predmetu *Systémy a řízení*
- [6] Hyniová K.: řídicí technika Přednášky, Vydavatelství VUT, 2006
- [7] Ježek J., Váradiová B., Adamec J.: Mechanika tekutin, Vydavatelství VUT, 2000
- [8] Kubeš P., Kyncl Z.: Fyzika 1, Vydavatelství VUT, Praha, 2003
- [9] Ripka P., Štálo S., Kreidl M., Novák J.: Senzory a převodníky, Vydavatelství VUT, Praha, 2005
- [10] Štálo S.: Materiály k predmetu *Instrumentace procesů*

Internetové zdroje

- [11] www.automatedbuildings.com/news/apr04/articles/esbe/esbe.htm
- [12] progress-energy.com/custservice/carcig/resourcectr/presentations/variablespeed.pdf
- [13] www.coleparmer.ca/techinfo/techinfo.asp?htmlfile=PumpTypesDefs.htm&ID=622
- [14] www.liquid-dynamics.com/animations/pumps.htm
- [15] www.eere.energy.gov/industry/bestpractices/energymatters/full_issue.cfm/volume=10
- [16] www.khs.sjf.stuba.sk/staff/varchola/skripta1_files/05_kapitola_3a.pdf
- [17] academic.csuohio.edu/cact/publications/PID36333.pdf
- [18] rexcontrols.cz/downloads/clanky/PIDTutor_CZ.pdf
- [19] www.upce.cz/priloha/krpvt-asr-kap12
- [20] www.atmel.com