

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jednotka regulace tlaku brzdové kapaliny pro zkoušky ve
vývojové zkušebně

Liberec 2006

Michal Nesvadba

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program : M2301 Strojní inženýrství

Obor : 3902T021 Automatizované systémy řízení ve strojírenství

Zaměření : Automatizace inženýrských prací

Katedra aplikované kybernetiky

**Jednotka regulace tlaku brzdové kapaliny pro zkoušky ve
vývojové zkušebně**

Control pressure brake liquid for tests in development test room

Michal Nesvadba

Vedoucí diplomové práce : prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.

Konzultant diplomové práce : Dipl. Ing. Petr Novák

Rozsah diplomové práce:

Počet stran : 57

Počet příloh : 3

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146086275



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Michal NESVADBA**
Studijní program **M2301 Strojní inženýrství**
Obor **3902T021 Automatizované systémy řízení ve strojírenství**
Zaměření **Automatizace inženýrských prací**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Jednotka regulace tlaku brzdové kapaliny pro zkoušky ve vývojové zkušebně

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce doporučené metody pro vypracování)

- 1) Seznamte se s požadavky na regulaci tlaku při zkouškách ve vývojové zkušebně.
- 2) Seznamte se se systémy pro regulaci tlaku používanými v současné době a identifikujte jejich klady a zápory. Pro tuto analýzu použijete data, které byla naměřena při různých zkouškách.
- 3) Navrhněte akční člen pro generaci tlaku a proveďte jeho identifikaci známými metodami.
- 4) Navrhněte typ řídicího systému s ohledem na fakta zjištěná v bodě 3.
- 5) Navržený systém zrealizujte a otestujte v praxi:
 1. připravte mechanickou část vámi navrženého systému,
 2. instalujte měřicí systém (snímač tlaku, DAQ systém používaný ve firmě používající HW a SW firmy National Instruments).

+CD

KKY/AIP

540, [40 J. pil-

gh, lab, arat

V195/06S

ANOTACE

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra aplikované kybernetiky

Studijní program :	M2301 Strojní inženýrství
Obor :	3902T021 Automatizované systémy řízení ve strojírenství
Studijní zaměření :	Automatizace inženýrských prací
Diplomant :	Michal Nesvadba
Téma práce :	Jednotka regulace tlaku brzdové kapaliny pro zkoušky ve vývojové zkušebně
Theme of work :	Control pressure brake liquid for tests in development test room
Rok obhajoby DP :	2006
Vedoucí DP :	prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.
Konzultant DP :	Dipl. Ing. Petr Novák

Anotace :

Cílem diplomové práce je navrhnout novou jednotku pro regulaci tlaku brzdové kapaliny pro zkoušky ve vývojové zkušebně. Dále je třeba tento návrh zrealizovat a otestovat v praxi, zda splňuje požadavky vývojové zkušebny.

Annotation :

The aim of this diploma work is propose new control pressure brake liquid for tests in development test room. Further it is necessary to implement and test this conception in practice, whether it satisfies standard of development test room.

Místopřísežné prohlášení

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.“

V Liberci 22. 5. 2006

Michal Nesvadba

Michal Nesvadba

Seznam zkratek a symbolů:

A.Č.	akční člen
AI	analogový vstup
AO	analogový výstup
c_p	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
c_v	měrná tepelná kapacita při konstantním objemu [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
c_0	průtokový součinitel
D	derivační složka regulátoru
e	regulační odchylka
$E(s)$	Laplaceův obraz regulační odchylky
F	síla [N]
$F(s)$	spojitý přenos soustavy
$g(t)$	impulsová funkce
$G_R(s)$	přenos regulátoru
h	geodetická výška [m]
$h(t)$	přechodová funkce
I	integrační složka regulátoru
K	zesílení soustavy
k_R	proporcionální zesílení regulátoru
MK	měřicí karta
m	hmotnost [kg]
q	hmotnostní tok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
P	proporcionální složka regulátoru
p	tlak [Pa]
R	universální plynová konstanta [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
r_0	proporcionální konstanta regulátoru
$r_{0\text{krit}}$	proporcionální kritická konstanta regulátoru
r_{-1}	integrační konstanta regulátoru
r_1	derivační konstanta regulátoru
s	stlačení pružiny [m]
S_0	průřez [m^2]
T	perioda vzorkování [s]
T_D	derivační časová konstanta

T_I	integrační časová konstanta
T_{krit}	kritická perioda [s]
u	akční zásah
U_w	žádaná hodnota napětí [V]
U_{mod}	modifikovaná hodnota napětí [V]
$U(s)$	Laplaceův obraz vstupu
V	objem [m^3]
v	rychlost [$m.s^{-1}$]
w	žádaná hodnota
$W(s)$	Laplaceův obraz žádané hodnoty
y	výstupní veličina
$Y(s)$	Laplaceův obraz výstupní veličiny
Δu	změna vstupního signálu
$\delta(t)$	jednotkový impuls
$\eta(t)$	jednotkový skok
τ	časová konstanta obrazového přenosu
ρ	hustota [$kg.m^{-3}$]
χ	Poissonova konstanta

OBSAH

1.	ÚVOD	9
2.	ANALÝZA ŘÍZENÍ POLOHOVÝCH SERVOMECHANISMŮ	10
2.1.1.	Hlavní způsoby regulace pohonů	10
2.1.2.	Základní typy řízení servomechanismů	11
3.	JEDNOČIPOVÉ MIKROKONTROLÉRY (MCU)	12
3.1.	Výběr vhodného typu MCU	12
3.2.	MCU řady PIC 16F87xA fi Microchip	13
3.2.1.	CCP jednotky - PWM režim	15
3.2.2.	10bitový A/D převodník	18
3.2.3.	Jednotka sériové komunikace USART (RS232C)	19
3.2.4.	Obsluha přerušení	21
3.2.5.	Pomocné obvody	22
3.2.6.	Programování paměti FLASH	22
3.2.7.	Vývojové prostředí (IDE) SourceBoost IDE	24
4.	NÁVRH TECHNICKÝCH PROSTŘEDKŮ A SOFTWARE MODELU	24
4.1.	Návrh řídicí jednotky – hardware (HW)	26
4.1.1.	Vstupní signály a jejich zpracování	26
4.1.2.	Výstupní signály a jejich generování	27
4.1.3.	Technické parametry řídicí jednotky	29
4.2.	Návrh řídicí jednotky – software (SW)	29
4.3.	Návrh výkonové jednotky (VJ)	31
4.3.1.	Obvod L298	31
4.3.2.	Průběhy napětí a proudu motoru	33
4.3.3.	Mechanická konstrukce výkonové jednotky	34
4.3.4.	Technické parametry výkonové jednotky	35

4.4.	Mechanické uspořádání a propojení řídicí a výkonové jednotky	35
4.5.	Návrh modelu v prostředí MATLAB/Simulink	36
4.5.1.	Řízení rychlosti – model ‘motor_PID.mdl’	38
4.5.2.	Subsystem ‘Modelová technologie s PID regulátorem	38
4.5.3.	S-Funkce ‘smotor.m’	40
4.5.4.	Simulace za použití P, PD, PI a PID regulátoru	41
4.5.5.	Řízení polohy – model ‘motor_poloha.mdl’	44
4.6.	Ověření funkčnosti a verifikace navrženého modelu	45
5.	ZÁVĚR	47
	POUŽITÁ LITERATURA	49

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1 - SCHÉMA ZAPOJENÍ ŘÍDICÍ JEDNOTKY	50
PŘÍLOHA 2 - SCHÉMA ZAPOJENÍ VÝKONOVÉ JEDNOTKY	51
PŘÍLOHA 3 - SEZNAM SOUČÁSTEK	52

1. Úvod

Žádné moderní stroje a zařízení se dnes neobejdou bez přesného a spolehlivého řídicího systému. Téměř v každém odvětví průmyslu i spotřební techniky se tyto systémy hojně používají. V současné době je již drtivá většina těchto řídicích systémů založena na bázi mikroprocesorového řízení (počínaje jednodušími, mikrokontroléry řízenými, zařízeními a konče složitými PLC systémy či průmyslovými PC řídicí celé výrobní linky s možností vizualizace).

Kde dříve pro řízení postačovala pevně naprogramovaná logika, dnes už by byla pro složité a rychlé regulační a řídicí obvody nevyhovující; a když ano, tak za cenu vysoké složitosti a ceny. Neméně podstatnou výhodou číslicově řízených řídicích systémů je i flexibilita při změně obslužného programu a tudíž i daleko větší univerzálnost použití oproti pevně programované logice. Bez těchto mikroprocesorově řízených systémů by ani nebyl možný prudký rozvoj nejrůznějších servomechanismů.

Především při stavbě moderních obráběcích strojů se již pomalu začíná narážet na hranice možností mechanických převodů a proto není vývoj v této oblasti tak překotný, jako ve vývoji elektrických a elektronických systému. Na mechanické součásti jsou kladeny vysoké požadavky na tuhost konstrukce, odolnost proti vnějším silám apod. Řešení těchto problémů je proto daleko složitější a finančně náročnější než vývoj elektronických dílů. Stále více se proto výrobci strojů snaží nahrazovat mechanické převody elektricky regulovanými jako jsou např. lineární či krokové motory, umožňující přesné nastavení polohy obrobku, zrychlení posuvu apod.

Tato diplomová práce si dala za cíl vytvořit kompletní řídicí systém ovládající elektrický pohon (SS motor) z prostředí Matlab/Simulink, který bude sloužit v laboratoři pro názornou výuku servomechanismů a číslicových počítačů. Praktická část práce sestává z vytvoření řídicí a výkonové jednotky a vytvoření zkušebního řídicího modelu v prostředí Matlab/Simulink.

Řídicí jednotka byla navržena tak, aby ji bylo možné použít i na výuku programování mikrokontrolérů rodiny PIC 16F87x (vývojová deska).

2. Analýza řízení polohových servomechanismů

Polohový servomechanismus je zařízení, jehož úkolem je přeměna vstupní energie na mechanický pohyb. Pohon servomechanismu zajišťuje motor, přeměňující vstupní energii (elektrickou, chemickou atd.) na mechanický pohyb (otáčivý či posuvný). Tato mechanická energie se dále pomocí vhodného transformačního prvku (spojka, hřídel, řemen atd.) přenáší na pohyblivou část pohybového ústrojí mechanismu.

Nejčastějším pohonem dnešních strojů je elektrický motor napájený výkonovým měničem, který je řízen pomocí povelů, které posílá řídicí jednotka stroje na základě dat, zjištěných z různých čidel polohy, rychlosti, proudu atd. Často již pohon obsahuje výkonový měnič i řídicí jednotku a jako takový je řízen povely přímo z CNC stroje.

2.1.1. Hlavní způsoby regulace pohonů

Pro regulaci pohonů se používají tyto tři základní typy regulací:

- proudová
- rychlostní
- polohová

Proudová a rychlostní regulace (smyčka) se nacházejí přímo v bloku pohonu (jsou tedy v jeho rámci uzavřené). Proudová regulace slouží k co nejrychlejšímu nárůstu/poklesu napájecího proudu motoru při náhlé (skokové) změně vstupní veličiny. Zároveň umožňuje kontrolu maximálního povoleného proudu, tekoucího měničem resp. motorem a dokáže tak zamezit případnému poškození motoru či měniče v důsledku proudového přetížení. Pohon je pak odolný i vůči zkratu. V této práci nebyla proudová regulace použita především díky použití pouze nezatíženého motoru, kterým pak protéká relativně malý proud (do 1A).

Rychlostní regulace vyhodnocuje signál z čidla rychlosti a porovnává ho s rychlostí požadovanou. Tato odchylka je rychlostním regulátorem převedena na požadovaný proud a tento signál je zaveden do výkonového měniče, který patřičně změní otáčky motoru. Tato vlastnost rychlostní regulace proto pohonu umožňuje být nezávislým na zatížení a výrazně ovlivňuje i statickou tuhost pohonu. Propustné pásmo této smyčky též výrazně ovlivňuje dynamickou tuhost a plynulost pohybu při malých rychlostech. Dobře fungující rychlostní regulátor by měl být při skokové změně rychlosti co nejrychlejší s maximálním překmitem 15 až 25% a pak rychlým útlumem.

Vstupním signálem pro polohovou regulaci je okamžitá odchylka skutečné a žádané polohy. Opět je požadována mj. absolutní statická tuhost polohy vůči působení vnějších sil. Jelikož jsou poloha i rychlost matematicky svázány, stačí použití pouze P regulátoru (není nutný regulátor typu PI). Jeho hlavním parametrem je tzv. polohové zesílení K_v . Tato rychlostní konstanta proto vyjadřuje požadovanou rychlost při jednotkové odchylce žádané a skutečné polohy. Kvalitu funkce polohové smyčky lze proto ověřit měřením odezvy na skok rychlosti a příslušné regulační odchylky polohy Δ . Její časový průběh by měl být bez překmitu s minimem kmitavých složek.

2.1.2. Základní typy řízení servomechanismů

Servomechanismy jsou řízeny nejčastěji těmito systémy řízení:

- CP řízení – v každém časovém okamžiku se kontroluje rychlost a poloha pohybových os pro dosažení požadované pohybové trajektorie; dále se toto řízení dělí na:
 - Multi point řízení - řídicí veličiny jsou odebírány a ukládány do paměti jako sled žádaných hodnot
 - Dráhové řízení – používá menší počet tzv. uzlových bodů, které je doplněno výpočtem prostorové křivky interpolací nebo inkrementálními procesy
- Point to Point řízení – používá omezený počet řízených bodů. Rychlost mezi těmito body je daná předběžným nastavením regulačních prvků. Obvykle se pohybuje pouze jedna pohybová jednotka, při současném pohybu více pohybových jednotek nelze přesně určit polohu a vzniká tak tzv. nebezpečná zóna

Pro dráhové řízení se dříve používaly analogové či analogově digitální regulátory. V současné době jsou již tyto nahrazovány plně digitálními typy. Výhodou analogových regulátorů byla především rychlost zpracování, ovšem nevýhody jako teplotní nestabilita parametrů či seřizování parametrů přímo na regulátoru převážily.

Proto se dnes pro řízení pohonů již téměř výhradně používají jednoúčelové mikrokontroléry či speciální průmyslové počítače na bázi architektury Intel x86 . Tyto mikrokontroléry jsou vhodné především díky speciálním obvodům v podobě čítačů, časovačů, PWM jednotek, přesných A/D převodníků (10-12bitů), moderních komunikačních sběrnic (CAN, USART, SPI...), hlídacích obvodů (watchdog, brown-out

detektor) atd. Nejpoužívanějšími mikrokontroléry byly 8 a 16bitové typy založené na jádrech 8096, 8051 či 68HC11. Tyto MCU byly dostatečně výkonné pro jednodušší aplikace. Pro složitější úlohy lze použít moderních 32bitových mikrokontrolérů či speciálních signálních procesorů (DSP).

Rychlý vývoj v oblasti procesorů umožnil výrazně zvýšit možnosti využití PLC automatů pro řízení servomechanismů. Tyto moderní systémy disponují vysokým výpočetním výkonem a obsahují řadu funkcí, umožňující řízení i v několika osách najednou. PLC automaty jsou často schopny mimo samotné řízení servopohonu ovládat komplexně celý technologický proces.

3. Jednočipové mikrokontroléry (MCU)

Jednočipové mikrokontroléry (mikropočítače) jsou polovodičové součástky dnes používané již téměř ve všech výrobcích spotřební elektroniky a mnoha oblastech průmyslu. Každé moderní zařízení měřicí, automatizační a regulační techniky si lze dnes už těžko bez těchto jednoúčelových mikrokontrolérů představit.

MCU používají z pohledu struktury dvě různé topologie: harwardskou – paměť dat a programu je oddělená a nebo Von Neumannovu – paměť programu a dat je v jednom společném adresním prostoru. Stejně tak se MCU dělí dle počtu instrukcí, používaných pro jejich programování; buď na CISC – s kompletním souborem instrukcí (velký počet instrukcí, málo registrů) a RISC – s redukováným souborem instrukcí (jen základní instrukce, mnoho registrů). Základním vybavením MCU je procesor (CPU), paměť RAM, paměť pro uložení programu - dnes už nejčastěji typu FLASH (umožňující opakované přeprogramování), sběrnice propojující CPU s paměťmi a další pomocné a periferní obvody. Těmi jsou především A/D převodníky, komunikační sběrnice (I2C,UART,CAN...), PWM jednotky, komparátory atd.

3.1. Výběr vhodného typu MCU

Nejjednodušší MCU jsou 8bitové (vhodné pro méně náročné aplikace) např. od firem Microchip (např. řady PIC10,12,14,16) či základní rodina procesorů x51 (Intel,Atmel...). Ovšem i přes malou šířku zpracovávaných dat (8bitů), dosahují některé typy výkonu 5-10 MIPS (milionů instrukcí za sekundu), což jejich použití posouvá i do oblastí náročnějších úloh. Velkou výhodou těchto MCU je především relativní jednoduchost při

programování, dostupné vývojové a ladící prostředky a v neposlední řadě i příznivá cena samotného MCU. Především z těchto důvodů byl pro tuto diplomovou práci vybrán 8bitový MCU fi Microchip, typ 16F876A, který bude podrobněji popsán v následujících kapitolách. Sám mikrokontrolér v této práci nezastává funkci regulátoru polohy či rychlosti; pouze zprostředkovává komunikaci mezi výkonovou jednotkou (měničem) a osobním počítačem, který vykonává funkci regulátoru. Z tohoto důvodu nejsou požadavky na výkon MCU tak důležité.

Pro složité aplikace řízení v reálném čase spolu se zpracováváním mnoha vstupních a výstupních dat je už nezbytné použití 16/32bitových MCU, jako jsou např. typy MPC500/MPC5500 fi Motorola, ARM MCU (16/32bit), dsPIC, (DSP MCU) atd. Použití těchto vysoce výkonných MCU je však nutné dobře zvážit s ohledem na již poměrně drahé vývojové prostředky (kompilátory, IDE, programátory), větší složitost při programování a v neposlední řadě i komplikace spojené s povrchovou montáží (např. moderní TQFP pouzdra s až 144 vývody).

3.2. MCU řady PIC 16F87xA fi Microchip

Tyto moderní 8bitové RISC MCU se vyznačují především výhodným poměrem cena/výkon, snadným programováním a velkou škálou vývojových a ladících prostředků dostupným i v ČR.

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I ² C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

Obrázek 3-1

Z tabulky na obr. 3.1 jsou patrné hlavní rozdíly jednotlivých typů této řady MCU. Především je to počet vstupně/výstupních (I/O) pinů, a to 22 (pouzdro 28pin) a nebo 33 (pouzdro 40/44pin). Dalším rozdílem je velikost datové (SRAM), programové (FLASH) a EEPROM paměti. Ostatní parametry, jako je počet vstupů A/D převodníku, počet časovačů atd. jsou již totožné. Přehled nejdůležitějších vlastností MCU 16F876A shrneme níže:

- pouze 35 instrukcí

- všechny instrukce vykonány v jednom cyklu (mimo větvení programu – dva cykly)
- pracovní frekvence až 20Mhz (instrukční cyklus 200ns) => výkon až 5 MIPS
- 14.3kBytu (8192 instrukčních slov) programové paměti typu FLASH
- 368 x 8 Bytu paměť RAM
- 256 bytu paměť EEPROM
- pinově kompatibilní s 28/40-44 pin typy PIC 16Cxxa 16Fxxx
- 15 vnitřních nebo vnějších zdrojů přerušení
- 8-mi úroňový STACK (pro návratové adresy přerušení a podprogramů)
- přímé, nepřímé a relativní adresování
- ochrana programového kódu
- Timer 0 (časovač/čítač) – 8bit – s programovatelným předděličem
- Timer 1 (časovač/čítač) – 16bit – může být zvětšován v SLEEP módu
- Timer 2 (časovač/čítač) – 8bit (časová základna pro PWM) s předděličem i děličem po
- 2x CCP jednotky s módy: Capture - 16bit, Compare - 16bit a PWM - 10bit
- Synchronní Sériový port (SSP)s módy SPI (master) a I2C (master/slave)
- Univerzální Synchronní Asynchronní Přijímač Vysílač – USART/SCI módy
- 10bitový AD převodník s 5ti vstupy
- 2x analogové komparátory
- instrukce SLEEP pro programové uvedení MCU do úsporného režimu
- Watchdog Timer (WDT) – s vlastním RC oscilátorem pro zvýšení spolehlivosti funkce
- Brown-Out detektor – obvod vyvolávající Reset při poklesu napájení
- prodleva při zapnutí napájení (Power UP Timer) a prodleva pro start oscilátoru (Oscillator Start-Up Timer)
- programování a ladění dvouvodičovou linkou v koncové aplikaci (ICSP)

- 100 000 cyklů mazání/zápis programové paměti FLASH
- 100 000 000 cyklů mazání/zápis paměti EEPROM
- doba zachování dat v EEPROM > 40 let
- proud vývodu až 25mA (ven/dovnitř)
- široký rozsah napájecího napětí: +2.0V až +5.5V
- nízká spotřeba díky CMOS technologii (např. < 2mA při 5V a 4Mhz)
- teplotní rozsahy COMMERCIAL, INDUSTRIAL a AUTOMOTIVE

Jak již bylo napsáno v odstavci 3.1, pro použití jako hlavního MCU v této DP byl vybrán typ 16F876A. Tento MCU má dostatek I/O pinů, velkou paměť programu (14.3KBytes), paměť SRAM o velikosti 368Bytes, dělenou do čtyř paměťových bank, kde v první je k dispozici spolu se speciálními registry také 96 volně přístupných registrů a v dalších třech pak po dalších 80 volných registrech. Paměť EEPROM se může použít pro uložení dat, které v ní zůstanou zachovány i po vypnutí napájení.

3.2.1. CCP jednotky - PWM režim

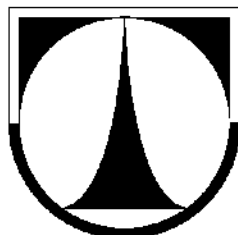
Velice důležitou periférií použitou v této DP na změnu a regulaci otáček SS motoru je jednotka CCP – Capture/Compare/PWM. Jeden z jejích pracovních režimů je generování signálu s proměnnou střídou – tzv. pulsně šířkovou modulací (Pulse Width Modulation – PWM). Jelikož je PWM jednotka přímo součástí MCU, je generování tohoto signálu poměrně jednoduché a sestává se víceméně pouze ze zápisu hodnot do příslušných systémových registrů ('x' v názvu registrů nabývá hodnot 1 nebo 2, podle zvolené CCP jednotky; PIC 16F876A obsahuje 2 jednotky CCP) :

1. Zapsáním hodnoty do registru PR2 (0-255) - určit periodu PWM signálu
2. Zapsáním hodnoty do registrů CCPRxL (8bit) a CCP1CON<5:4> (2bit) - určit střidu sepnutí (Duty Cycle)
3. Zajistit aby pin CCPx (sdílený s portem C) byl nastaven jako výstupní
4. Určit hodnotu předděliče časovače TIMER2 a povolit tento časovač
5. Přepnout CCPx jednotku do režimu PWM v systémovém registru CCP1CON

Jak z principu PWM modulace vyplývá, střida může nabývat hodnot 0 (trvalé vypnutí) až 100% (trvalé sepnutí). PWM jednotka použitá v MCU 16F876A dosahuje rozlišení až

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jednotka regulace tlaku brzdové kapaliny pro zkoušky ve
vývojové zkušebně

Liberec 2006

Michal Nesvadba

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program : M2301 Strojní inženýrství

Obor : 3902T021 Automatizované systémy řízení ve strojírenství

Zaměření : Automatizace inženýrských prací

Katedra aplikované kybernetiky

**Jednotka regulace tlaku brzdové kapaliny pro zkoušky ve
vývojové zkušebně**

Control pressure brake liquid for tests in development test room

Michal Nesvadba

Vedoucí diplomové práce : prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.

Konzultant diplomové práce : Dipl. Ing. Petr Novák

Rozsah diplomové práce:

Počet stran : 57

Počet příloh : 3

ANOTACE

Technická univerzita v Liberci Fakulta strojní

Katedra aplikované kybernetiky

Studijní program :	M2301 Strojní inženýrství
Obor :	3902T021 Automatizované systémy řízení ve strojírenství
Studijní zaměření :	Automatizace inženýrských prací
Diplomant :	Michal Nesvadba
Téma práce :	Jednotka regulace tlaku brzdové kapaliny pro zkoušky ve vývojové zkušebně
Theme of work :	Control pressure brake liquid for tests in development test room
Rok obhajoby DP :	2006
Vedoucí DP :	prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.
Konzultant DP :	Dipl. Ing. Petr Novák

Anotace :

Cílem diplomové práce je navrhnout novou jednotku pro regulaci tlaku brzdové kapaliny pro zkoušky ve vývojové zkušebně. Dále je třeba tento návrh zrealizovat a otestovat v praxi, zda splňuje požadavky vývojové zkušebny.

Annotation :

The aim of this diploma work is propose new control pressure brake liquid for tests in development test room. Further it is necessary to implement and test this conception in practice, whether it satisfies standard of development test room.

Poděkování

Na tomto místě je mojí milou povinností poděkovat prof. Ing. Miroslavu Olehlovi, CSc., Ing. Michalu Moučkovi, Ph.D., Miloši Hejzlarovi, Ing. Petru Mrázkovi, Ing. Petru Novákovi a Ing. Pavlu Polodnovi za odborné vedení, cenné rady, poskytnuté informace a za pomoc při zpracování diplomové práce.

Místopřísežné prohlášení

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.“

V Liberci 22. 5. 2006

.....
Michal Nesvadba

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/200 Sb. O právu autorském, zejména §60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 22. 5. 2006

.....
Michal Nesvadba

Přílohy

Příloha 1: Katalogový list ventilu MPYE

Příloha 2: PID regulátor

Příloha 3: CD

Seznam zkratek a symbolů:

A.Č.	akční člen
AI	analogový vstup
AO	analogový výstup
c_p	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
c_v	měrná tepelná kapacita při konstantním objemu [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
c_0	průtokový součinitel
D	derivační složka regulátoru
e	regulační odchylka
E(s)	Laplaceův obraz regulační odchylky
F	síla [N]
F(s)	spojitý přenos soustavy
g(t)	impulsová funkce
$G_R(s)$	přenos regulátoru
h	geodetická výška [m]
h(t)	přechodová funkce
I	integrační složka regulátoru
K	zesílení soustavy
k_R	proporcionální zesílení regulátoru
MK	měřicí karta
m	hmotnost [kg]
q	hmotnostní tok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
P	proporcionální složka regulátoru
p	tlak [Pa]
R	universální plynová konstanta [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
r_0	proporcionální konstanta regulátoru
$r_{0\text{krit}}$	proporcionální kritická konstanta regulátoru
r_{-1}	integrační konstanta regulátoru
r_1	derivační konstanta regulátoru
s	stlačení pružiny [m]
S_0	průřez [m^2]
T	perioda vzorkování [s]
T_D	derivační časová konstanta

T_I	integrační časová konstanta
T_{krit}	kritická perioda [s]
u	akční zásah
U_w	žádaná hodnota napětí [V]
U_{mod}	modifikovaná hodnota napětí [V]
$U(s)$	Laplaceův obraz vstupu
V	objem [m ³]
v	rychlost [m.s ⁻¹]
w	žádaná hodnota
$W(s)$	Laplaceův obraz žádané hodnoty
y	výstupní veličina
$Y(s)$	Laplaceův obraz výstupní veličiny
Δu	změna vstupního signálu
$\delta(t)$	jednotkový impuls
$\eta(t)$	jednotkový skok
τ	časová konstanta obrazového přenosu
ρ	hustota [kg.m ⁻³]
χ	Poissonova konstanta

Obsah

1	Úvod	10
2	Požadavky na regulaci tlaku.....	11
3	Teorie pneumatických systémů	12
	3.1. Základní fyzikální zákony	12
	3.2. Výroba a úprava stlačeného vzduchu	15
	3.3. Další prvky pneumatických obvodů.....	18
4	Teorie systému	19
	4.1. Definice systému	19
	4.2. Chování systému	19
	4.3. Schéma systému	19
	4.4. Popis vlastností systému	20
5	Systémy pro regulaci tlaku	24
	5.1. Popis současného systému	24
	5.2. Popis nového systému	26
6	Identifikace systému	29
	6.1. Popis průběhu odezev.....	31
	6.2. Přejíhodové charakteristiky soustavy	31
	6.3. Nelinearita soustavy	31
7	Volba akčního členu	32
	7.1. Požadavky kladené na akční člen	32
	7.2. Výběr akčního členu.....	32
	7.3. Popis akčního členu.....	32
8	Identifikace soustavy	36
	8.1. Popis měření	36
9	Návrh řídicího systému	40
10	Odvození rovnice PID regulátoru	41
	10.1. Ovládání regulátoru.....	43
	10.2. Popis algoritmu regulátoru	44
	10.3. Čelní panel regulátoru	45

11	Seřízení regulátoru	46
11.1.	Metoda ručního seřízení v provozních podmínkách	46
11.1.1.	Postup při seřízení	46
11.1.2.	Výsledky seřízení	46
11.2.	Zieglerova-Nicholsova metoda kritických parametrů	49
11.2.1.	Modifikace pro číslicové regulátory	50
11.2.2.	Postup při seřizování	50
11.2.3.	Výsledky seřízení	50
11.3.	Porovnání obou metod seřízení	54
11.4.	Žádaná veličina tvaru rampy	55
12	Závěr	56
13	Použitá literatura	57
14	Přílohy	

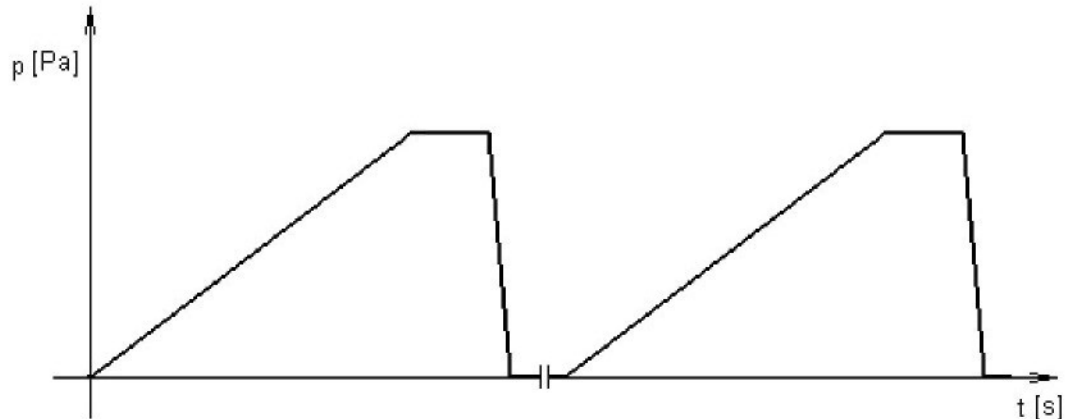
1 Úvod

Cílem této diplomové práce je vytvořit novou jednotku pro regulaci tlaku brzdové kapaliny pro zkoušky ve vývojové zkušební firmě TRW Lucas Varity, s.r.o v Jablonci nad Nisou. Tato jednotka by měla zlepšit vlastnosti regulace.

Jednotka používaná v současné době přestává splňovat požadavky kladené na regulaci tlaku brzdové kapaliny. Nejvýraznější problém spočívá v ovlivnění procesu regulace pasivními odpory použitého systému. Proto se firma rozhodla hledat nové řešení, které by tyto negativní vlivy odstranilo. Došlo ke změně systému, kde se již tyto problémy nepředpokládají. Tento systém je jen jeden z mnoha možností, jak lze již zmíněné chyby eliminovat a zlepšit tak regulační pochod. Zda-li zvolený systém vyhoví ve všech požadavcích kladených vývojovou zkušebnou na regulaci hydraulického tlaku ukáže až přímo řešení této diplomové práce.

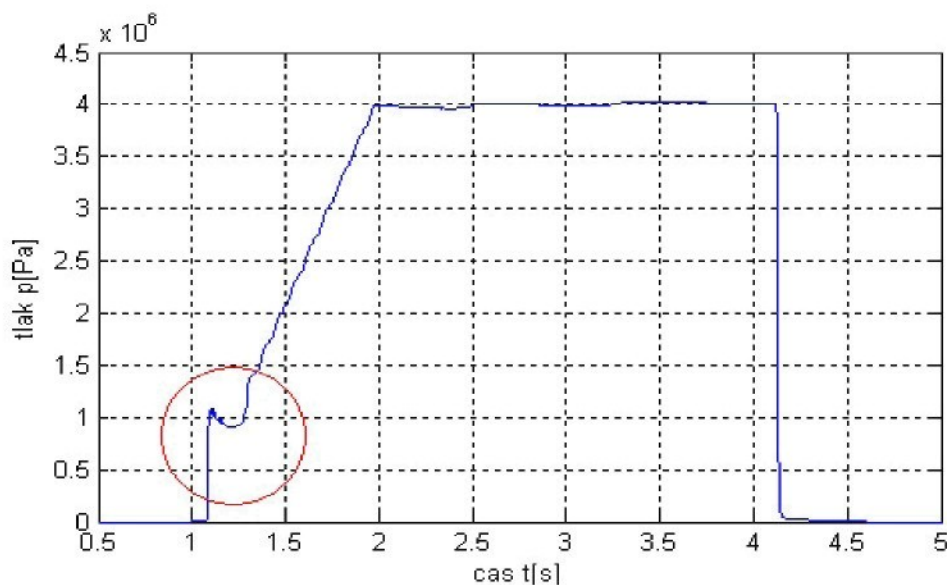
2 Požadavky na regulaci tlaku

Při zabrzdění pedálem v automobilu narůstá v brzdové soustavě hydraulický tlak. Jednotka regulace tlaku brzdové kapaliny slouží k simulování tohoto jevu. Proto požadavky na regulaci tlaku brzdové kapaliny vychází ze skutečného děje při brzdění. Při zkoušení brzd ve vývojové zkušebně má průběh tlaku brzdové kapaliny tvar rampy, kterou je potřeba při různých zkouškách modifikovat (změnit hodnotu ustálení, směrnici náběhu).



Obr. 1: Požadovaný průběh hydraulického tlaku p .

Na obrázku 1 vidíme jak by měla jednotka pro regulaci tlaku reagovat na zadanou rampu. V praxi se bohužel setkáváme s různými překmyty a nepravidelnostmi okolo žádané rampy, které jsou při prováděných zkouškách brzd nežádoucí (obr.2). Snaha je odstranit tyto chyby. K tomu má pomoci nová soustava generující tlak kapaliny. Při zkouškách se hodnota maximálního hydraulického tlaku pohybuje až do 20 MPa.



Obr. 2: Naměřený průběh hydraulického tlaku p .

3 Teorie pneumatických systémů

V pneumatických systémech probíhají termomechanické jevy. Pracovním médiem jsou plyny, které jsou pod tlakem, aby vykonaly práci. Stlačený plyn je nositelem tří základních forem energie. Je to energie potenciální, deformační a kinetická. Tepelnou energii stlačeného vzduchu v pneumatických mechanismech nevyužíváme a ve výpočtech ji jako nežádoucí zanedbáváme. Pneumatické systémy pracují s nižším tlakem než hydraulické systémy. Výhodou pneumatických systémů oproti hydraulickým je, že vzduch použitý jako pracovní médium může být vypuštěn do okolí a není zapotřebí zpětné potrubí.

Při analýze pneumatických systémů je nutné používat zákonů mechaniky tekutin i zákonů termomechaniky. Musí být uvažována interakce všech tří základních termodynamických veličin - tlaku p , hustoty ρ , případně objemu V a teploty T . Při analýze pneumatických systémů musíme sledovat více stavových veličin než při analýze hydraulických systémů. Tlak p je hlavní stavovou proměnnou, která je středem našeho zájmu, jelikož při působení tlaku na plochu vzniká síla, která působí na mechanickou zátěž a může konat mechanickou práci. Dále je nutné sledovat zda se neobjeví velké změny teploty, když se mechanická energie přeměňuje v tepelnou. Teplota se mění podle zákonů termomechaniky.

V pneumatických systémech se mohou objevit velké změny teploty, když se mechanická energie přeměňuje v tepelnou. Teplota se mění podle zákonů termomechaniky.

V důsledku stlačitelnosti plynů je odezva na změnu stavu pneumatických systémů pomalejší než u hydraulických.

3.1 Základní fyzikální zákony

Mezi základní používané fyzikální zákony patří zákon zachování hmotnosti [3] :

$$m = \rho V = konst. \quad (1)$$

Zákon zachování mechanické energie je vyjádřen pomocí Bernoulliho rovnice [3] :

$$g \cdot h + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot v^2 = konst, \quad (2)$$

kde $g \cdot h$ je energie potenciální,

$\frac{p}{\rho}$ je energie tlaková,

$\frac{1}{2} v^2$ je energie kinetická.

Bernoulliho rovnice (2) však předpokládá nestlačitelnost média, což nelze použít pro pneumatické systémy. Pro ně je nutné použít analogický vztah v diferenciálním tvaru [3] :

$$g \cdot dh + \frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2} dv^2 = 0, \quad (3)$$

kde dh , dp a dv jsou přírůstky proměnných h , p a v , které vzniknou podél dráhy sledované malým objemem tekutiny v ustáleném proudu, kdy rychlost proudění je tečná k proudnici. Bernoulliho rovnici lze získat integrací uvedeného diferenciálního tvaru. Pro stlačitelné médium ale nelze rovnici integrovat přímo, protože hustota není konstantní. Proto pro plyny vycházíme z uvedeného diferenciálního tvaru, do kterého se dosadí uvažované změny hustoty.

Popis změn termomechanických veličin se provede pomocí stavové rovnice plynu. Pro ideální plyn platí v termodynamickém rovnovážném stavu Boyle - Mariotův zákon [3] :

$$pV = mRT, \quad (4)$$

kde p je tlak plynu ,

V je objem plynu,

m je hmotnost plynu,

R je universální plynová konstanta (pro vzduch je rovna $287 \frac{m^2}{s^2 \cdot K}$),

T je termodynamická teplota plynu.

Další důležitý předpoklad pro usnadnění modelování termodynamických dějů je, že všechny termodynamické procesy jsou adiabatické. To znamená, že jsou reverzibilní, bez tření a probíhají podle adiabatické změny stavu, teplo není dodáváno z okolí nebo do něho

odváděno a systém je dokonale izolován. Adiabatický děj je idealizací - představuje náhradní model probíhajících změn. Pro hodnoty stavových veličin platí [3] :

$$pV^{\chi} = konst , \quad (5)$$

kde χ je podíl měrných tepelných kapacit a nazývá se Poissonova konstanta [10] :

$$\chi = \frac{c_p}{c_v} , \quad (6)$$

Tab. 1 : Různé hodnoty χ :

Plyny	χ
jednoatomové	1,66
dvouatomové	1,4
tříatomové	1,33

Měrné tepelné kapacity c_p , c_v jsou množství tepla, které je nutno přivést látce o hmotnosti $m = 1$ kg, aby se ohřála o 1 K při konstantním tlaku, objemu.

3.2 Výroba a úprava stlačeného vzduchu

Zdroji stlačeného vzduchu pro pneumatickou regulaci jsou různé druhy kompresorů v průmyslovém provedení, které musejí být schopny průběžného dlouhodobého provozu a musejí mít další vlastnosti vhodné k danému použití. Ze současných požadovaných vlastností uveďme alespoň tyto:

- velmi dobrá účinnost (stlačený vzduch je drahý, ceny energií rostou),
- dobrá kvalita stlačeného vzduchu pro dané použití (čistota, vlhkost, výstupní teplota, výtlak bez významných pulsací),
- dobrá a ekonomicky přijatelná regulace při změnách zátěže,
- provozní spolehlivost,
- minimální údržba,
- dlouhá životnost.

V technické praxi se lze setkat s těmito druhy kompresorů :

Mazné kompresory

Mazné kompresory mají stlačovací prostor přimazávaný kompresorovým olejem pro snížení tření a lepší utěsnění (pístové kompresory) nebo častěji mazaný, utěšňovaný a chlazený velkým množstvím vstříkovaného oleje do kompresního prostoru, který nejen maže třecí plochy kompresoru, ale současně odvádí velkou část tepla, vzniklou stlačováním vzduchu. Tím účinně ochlazuje stlačovaný vzduch, což významně zvyšuje účinnost stlačování (šroubové a lamelové kompresory). Vytlačovaná směs vzduchu a oleje se musí zbavit oleje ještě před výtlakem z kompresoru. K tomu se používají obvykle dvoustupňové až třístupňové odlučovače oleje. Pro vyšší nároky se obvykle řeší dodatečnou filtrací zařazenou v rozvodu stlačeného vzduchu. Mazné kompresory se vstříkem oleje do stlačovacího prostoru jsou v současné době nejrozšířenějšími průmyslovými kompresory.

Druhy mazných kompresorů :

- šroubové kompresory
- lamelové kompresory
- pístové kompresory

Šroubové kompresory

Hlučnost šroubových kompresorů je značná, proto se důsledně montují do odhlučňovací skříně. Velkou část odpadního ztrátového tepla kompresorů větších výkonů obvykle lze snadno využít pro ohřev vody či otop. Dodávají stlačený vzduch bez pulsů.

Lamelové kompresory

Rotační lamelové kompresory jsou jedny z nejnižších na trhu, mají nepatrně lepší účinnost než šroubové, jsou spolehlivé a technický život všech jejich hlavních dílů je jedním z nejdelších – 100 000 provozních hodin. Zásluhou malé pulsace stlačeného vzduchu na výtlaku a dobré regulace nemusejí mít pro mnoho aplikací vzdušník (tlakovou nádobu). Avšak tyto kompresory větších výkonů jsou o přibližně třetinu dražší než kvalitní šroubové kompresory. Rovněž je možné využít zhruba stejnou část odpadního tepla lamelových kompresorů shodných výkonů jako u šroubových kompresorů.

Pístové kompresory

Nejméně se v současné době k danému účelu používají pístové kompresory, protože jsou hlučné, namáhají svůj základ vibracemi a rázy, dodávají na výtlaku teplejší pulsující stlačený vzduch, nemají účinnost a spolehlivost ani šroubových, ani lamelových kompresorů. Oproti nim mají též kratší životnost a větší nároky na údržbu.

Bezmazné kompresory

Při použití speciálních materiálů – vznikly bezmazné pístové, šroubové, lamelové a spirální varianty průmyslových kompresorů. Zatím jsou v různých aplikacích rozšířeny málo, protože většinou jsou pro daný výkon a výstupní tlak pořizovacími a provozními náklady dražší, mají menší účinnost, vytlačují teplejší vzduch, a vyžadují tedy i výkonnější dochlazovač. Jejich spolehlivost je většinou menší, životnost kratší, navíc vyžadují častější údržbu. Zatím je použití těchto kompresorů opodstatněno pouze v případech extrémních požadavků na průběžně zaručovaný nulový obsah oleje ve výtlaku.

Úpravy stlačeného vzduchu

Je-li vzduch vytlačovaný kompresory příliš teplý je nutné je zchladit v dochlazovači. Dochlazovač se používá pro snížení teploty vzduchu stlačeného kompresorem a dochází v něm i k dílčímu vysrážení (zkondenzování) vlhkosti ze stlačeného vzduchu, proto bývá navíc opatřen i výpustí kondenzátu.

Vysoušení stlačeného vzduchu

Protože pro naprostou většinu aplikací je vlhkost stlačeného vzduchu, která se do kompresoru dostává vzduchem nasávaným z atmosféry, nepřipustně velká, musí se ze stlačeného vzduchu účinně odstraňovat. Část vlhkosti se sice ochlazením vysráží v dochlazovači, ovšem i přesto by se dál do rozvodu dostával vlhký vzduch, jenž je pro mnoho aplikací nepřijatelný. Proto se do procesu úpravy vzduchu zařazuje sušička.

Filtrace stlačeného vzduchu

Prvním stupněm filtrace je sací filtr použitý ještě před stlačením. Vzduch nasávaný kompresorem není zdaleka čistým atmosférickým vzduchem. V průmyslových areálech je zamořen všemi možnými nečistotami včetně spalín, popílků, aerosolů, rozptýlených olejů, par a plynů různých látek a tvrdých abrazivních částic. Aby se zabránilo rychlému opotřebení kompresoru, předřazuje se kompresoru velkoplošný sací filtr s malou tlakovou ztrátou, který odstraní hrubé nečistoty poškozující kompresor. Další filtrační stupně se zařazují do rozvodu stlačeného vzduchu podle potřeby.

Tab. 2: Definice tříd kvality stlačeného vzduchu dle ISO EN 8573-1 (www.automa.cz).

Třída	Přípustný zbytkový obsah oleje [mg.m⁻³]	Přípustný obsah prachu [mg.m⁻³] / velikost částic [μm]	Přípustná vlhkost [g.m⁻³] / tlakový rosný bod [°C]
1	0,01	0,1 / 0,1	0,003 / -70
2	0,10	1,0 / 1,0	0,11 / -40
3	1,00	5,0 / 5,0	0,88 / -20
4	5,00	40,0 / 40,0	6,0 / 3
5	25,00	x	7,8 / 7
6	x	x	9,4 / 10
7	x	x	x

Pozn.: x...nespecifikováno

3.3 Další prvky pneumatických obvodů

Vzdušník

Kolísá-li v provozu odběr stlačeného vzduchu tak, že se v něm vyskytují tlakové rázy, doporučuje se vestavět do rozvodu vzdušník vhodné velikosti. Ten je navíc nutný pro zajištění optimální účinnosti při přerušovaně řízeném provozu kompresoru vypnuto/zapnuto (stop/start). Kolísá-li rázově v rozvodu s více odběrovými místy odběr jen v jednom místě, je vhodné při malém průřezu dlouhého potrubí rozvodu předřadit vzdušník až tam. Pro dílčí ochlazení a současnou částečnou kondenzaci vlhkosti stlačeného vzduchu se téměř vždy předřazuje vzdušník před sušičku.

Rozvod

Rozvod tvoří spojovací potrubí stlačeného vzduchu mezi kompresorem, použitými součástmi úpravy stlačeného vzduchu a odběrovými místy spotřebičů. Potrubí tvoří tlakové trubky kovové z galvanizované oceli, korozivzdorné oceli, mědi či hliníku nebo z vhodných plastů (nyní velmi často používaných). Pro snadný odtok kondenzátu má mít hlavní rozvod spád minimálně 2° a v jednotlivých úsecích nesmí tvořit průhyby, které by se zanášely nečistotami a kondenzátem a omezovaly by světlý průřez potrubí. Je zapotřebí upozornit na to, že rozvody bývají nejčastějšími a značně velkými zdroji ztrát drahého stlačeného vzduchu.

Výpusti kondenzátu

Všechna nízko položená místa rozvodu, dochlazovače, vzdušníky, sušičky a filtry se opatřují výpustmi kondenzátu. Ty jsou ruční (nyní již zřídka) nebo automatické. Kondenzát z jednotlivých výpustí se svádí do jednoho sběrného místa. [11]

Tlumiče hluku

Tlumí hluk vznikající při expanzi vzduchu při výfuku z pneumatického prvku. Hluk se zvyšuje, zvyšuje-li se množství odfukovaného vzduchu. Tlumí hlavně zvuky o vysokých frekvencích. Přispívají k lepším pracovním podmínkám na pracovištích s pneumatickými obvody. Tlumiče se vyrábějí kónického tvaru z pórovitého keramického materiálu a jsou většinou připevněny pomocí závitů. Jejich nevýhoda je, že zhoršují dynamické vlastnosti.

4 Teorie systému

4.1 Definice systému

Systémem rozumíme obecně soubor prvků, mezi nimiž existují vzájemné vztahy a jako celek má určité vztahy ke svému okolí.

Každý systém je charakterizován dvěma základními vlastnostmi :

1. chováním systému, charakterizujícím jeho vnější vztahy k okolí; chování systému je závislost mezi podněty okolí systému působícími na jeho vstup a příslušnými odezvami, objevujícími se na jeho výstupu;
2. strukturou systému, charakterizující jeho vnitřní funkční vztahy; strukturou systému rozumíme jednak způsob uspořádání vzájemných vazeb mezi prvky systému a jednak chování těchto prvků

Systémem rozumíme množinu $S = \{A, W, K, Q\}$, (7)

kde je A množina prvků a_i systému S ($i = 1, 2, \dots, p$), tj. $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$,

W množina vstupních veličin w_j , $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$,

Q množina výstupních veličin q_h , $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$,

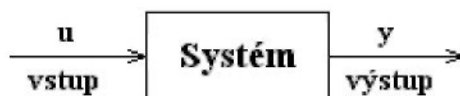
K množina vazebních závislostí výstupních a vstupních veličin prvků systému.

4.2 Chování systému

Dynamické vlastnosti systému určují jeho chování. Statické vlastnosti jsou limitní případem dynamických vlastností po odeznění přechodového děje. Chování je vyjádřeno závislostí mezi vstupním a výstupním signálem systému.

Chování systému lze rovněž studovat tak, že známe cíl, kterého chce systém dosáhnout a zkoumáme způsoby, jakými může být uskutečněna .[2]

4.3 Schéma systému



4.4 Popis vlastností systému

Popis dynamických vlastností lineárního systému lze provést několika způsoby, které lze rozdělit do dvou skupin :

1. vnější popis systému, který vyjadřuje dynamické vlastnosti reakcí mezi vstupem a výstupem. Systém zde považujeme za černou skříňku (nevíme co se děje uvnitř), analyzujeme pouze reakci systému na vstupní signály.
2. vnitřní popis systému, který vyjadřuje dynamické vlastnosti reakcí mezi vstupem, vnitřním stavem a výstupem.

Popis systému s jednou vstupní i výstupní veličinou

- lineární diferenciální rovnicí systému,
- přenosem systému (v Laplaceově transformaci),
- přechodovou funkcí a přechodovou charakteristikou systému,
- impulsovou funkcí a impulsovou charakteristikou,
- frekvenčním přenosem,
- frekvenční charakteristikou v komplexní rovině,
- frekvenční charakteristikou v logaritmických souřadnicích,
- polohou pólů a nul přenosu soustavy.

Zvláštním případem vnějšího popisu systému je **statická charakteristika**, což je grafická závislost výstupní veličiny systému na vstupní veličině v ustáleném stavu (po odeznění přechodového děje). [1],[2]

Popis systému lineární diferenciální rovnicí

Chování spojitého systému s jednou vstupní a jednou výstupní veličinou lze popsat lineární diferenciální rovnicí s konstantními koeficienty ve tvaru :

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_m u^{(m)}(t) + \dots + b_1 u'(t) + b_0 u(t) \quad (8)$$

kde jsou $a_i, b_j \dots$ konstantní koeficienty,

$u(t)$... vstupní veličina,

$y(t)$... výstupní veličina soustavy.

Z podmínky fyzikální realizovatelnosti soustavy musí platit $m \leq n$. To znamená, že stupeň nejvyšší derivace výstupní veličiny musí být větší nebo roven nejvyššímu stupni derivace vstupní veličiny. Řád diferenciální rovnice n určuje řád soustavy. [2]

Přenos systému

Přenos systému je definován jako poměr Laplaceova obrazu výstupní veličiny k Laplaceově obrazu vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách systému a vstupního signálu. Lineární diferenciální rovnici s konstantními koeficienty (8) můžeme transformovat použitím Laplaceovy transformace při splnění výše uvedených podmínek :

$$[a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0]Y(s) = [b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0]U(s). \quad (9)$$

A z této rovnice na základě výše uvedené definice je přenos systému tvaru [1], [2] :

$$F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0}. \quad (10)$$

I zde musí platit podmínka fyzikální realizovatelnosti systému.

Přenos systému můžeme vyjádřit také pomocí pólů (kořeny jmenovatele) a nulových bodů (kořeny čitatele) [1], [2] :

$$F(s) = \frac{b_m}{a_n} \cdot \frac{(s - n_1) \dots (s - n_m)}{(s - p_1) \dots (s - p_n)} \quad (11)$$

Jsou-li nulové body i póly soustavy reálné, lze psát přenos soustavy pomocí časových konstant [1], [2] :

$$F(s) = \frac{b_o}{a_o} \cdot \frac{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2) \dots (1 + s\tau_m)}{(1 + sT_1)(1 + sT_2) \dots (1 + sT_n)} \quad (12)$$

kde jsou $\tau_j = -\frac{1}{s_j}$... časové konstanty čitatele,

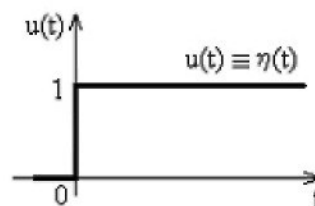
$$T_i = -\frac{1}{s_i} \dots \text{časové konstanty jmenovatele,}$$

$$\frac{b_0}{a_0} = k_0 \dots \text{zesílení systému.}$$

Přechodová funkce a přechodová charakteristika systému

Přechodová funkce $h(t)$ je odezva systému na jednotkový skok při nulových počátečních podmínkách. Přechodová charakteristika je pak grafické znázornění přechodové funkce. Jednotkový (Heavisideův) skok je definován vztahem [2] :

$$u(t) = \eta(t) = 1 \text{ pro } t \geq 0, \quad u(t) = \eta(t) = 0 \text{ pro } t < 0. \quad (13)$$



Obr. 3: Jednotkový (Heavisideův) skok.

Laplaceův obraz jednotkového skoku je [2]:

$$L\{\eta(t)\} = L\{1(t)\} = \frac{1}{s}. \quad (14)$$

Obraz přechodové funkce [1],[2] :

$$L\{h(t)\} = H(s) = F(s)U(s) = \frac{F(s)}{s}. \quad (15)$$

Hodnota přechodové funkce v čase $t = 0$ je $h(t) = 0$, je-li stupeň jmenovatele přenosu soustavy alespoň o jednotku vyšší než stupeň čitatele. Hodnota přechodové funkce v čase $t = \infty$ (věta o koncové hodnotě) je rovna [1], [2] :

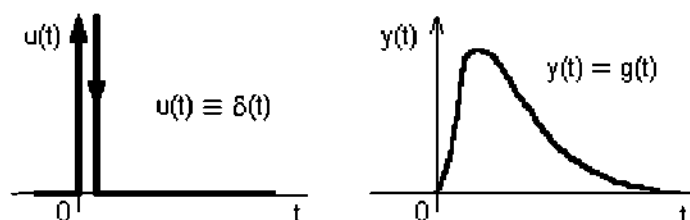
$$h(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sH(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{F(s)}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} F(s). \quad (16)$$

Z tohoto hlediska rozpoznáváme tři základní skupiny dynamických členů:

- proporcionální (statické) – $h(\infty) = b_0/a_0$,
- derivační – $h(\infty) = 0$,
- integrační (astatické) – $h(\infty) = \infty$ [2], [1].

Impulsová funkce a impulsová charakteristika

Impulsová funkce $g(t)$ je odezva na jednotkový (Diracův) impuls při nulových počátečních podmínkách soustavy. Impulsová charakteristika je grafické znázornění impulsové funkce. [2]



Obr. 4: Jednotkový (Diracův) impuls, impulsová charakteristika.

Jednotkový (Diracův) impuls je idealizovaná funkce, fyzikálně nerealizovatelná, která je definována [2] :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1, \quad \delta(t) = 0 \text{ pro } t \neq 0. \quad (17)$$

Laplaceův obraz Diracova impulsu je [2] :

$$L\{\delta(t)\} = 1. \quad (18)$$

Obraz impulsové funkce je roven obrazovému přenosu soustavy [1],[2] :

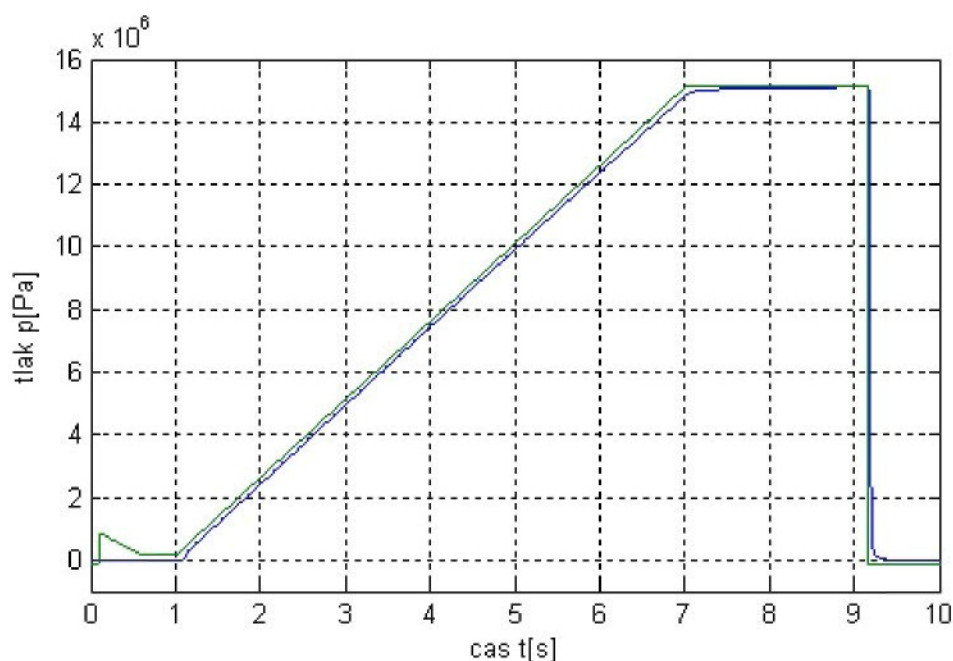
$$L\{g(t)\} = F(s)L\{\delta(t)\} = F(s). \quad (19)$$

Praktická část diplomové práce

5 Systémy pro regulaci tlaku

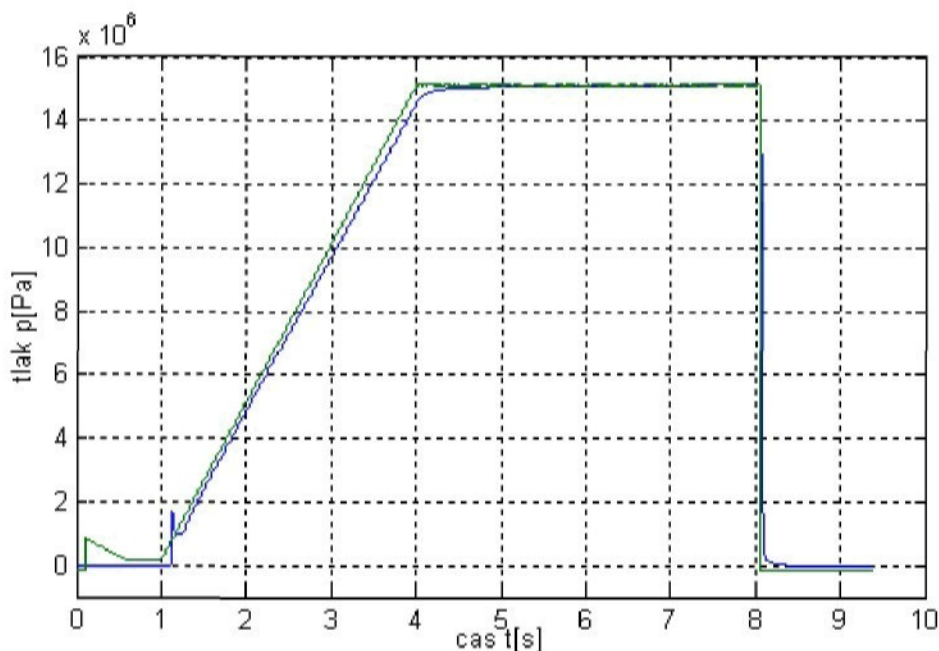
5.1 Popis současného systému

Jednotka regulace tlaku brzdové kapaliny, používaná v současné době při různých zkouškách ve vývojové zkušebně, již nevyhovuje požadavkům kladeným na regulační proces. Velký problém spočívá v ovlivnění procesu regulace pasivními odpory použitého systému, které se výrazně projevují v začátku regulování. Tuto chybu se ve firmě snažili odstranit tím, že měnili průběh žádané hodnoty na začátku.



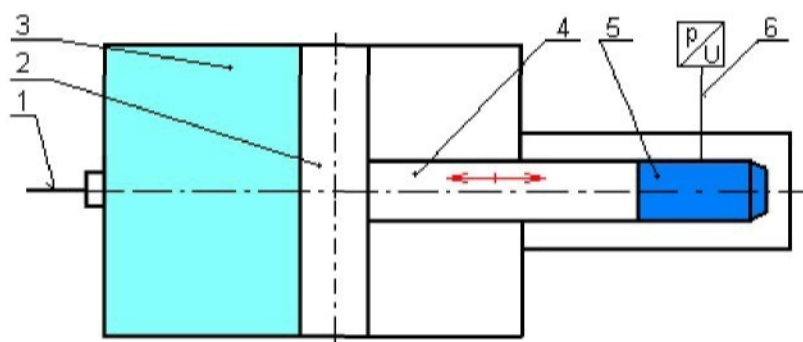
Obr. 5: Průběh regulované veličiny (tlak kapaliny – modrý) a žádané veličiny (zelený).

Nejedná se ale o řešení systémové. Jakákoliv změna parametru regulovaného tlaku brzdové kapaliny (směrnice rampy, ustálení na jiném tlaku) vedla k tomu, že se opět projevila vliv pasivních odporů (obr. 6). Proto se ke každému požadovanému průběhu regulované veličiny muselo hledat optimální nastavení začátku žádané hodnoty.



Obr. 6: Průběh regulované veličiny(modrý) a žádané hodnoty(zelený) při změně směrnice rampy.

Hlavní příčinou, jak jsem se již zmínil dříve, jsou pasivní odpory. Konkrétně tření, které vzniká při rozběhu pístu (při malých rychlostech pístu). Při zvyšování pneumatického tlaku z 0 MPa se píst nejprve vůbec nepohybuje. Jakmile síla vyvinutá pneumatickým tlakem dosáhne velikosti síly, která působí proti pohybu pístu dojde k nepravidelnému posunutí(tzn. píst se začne pohybovat. Jakmile se ale pohne dojde ke zvětšení objemu a tím k poklesu tlaku, respektive síly, co uvedla píst do pohybu. Poklesem této síly dojde k zastavení pístu, jelikož síla působící proti pohybu je rázem větší než síla, která pohyb pístu způsobila). To trvá až do určité úrovně pneumatického tlaku. Dále je již pohyb pístu plynulý.



Legenda :

- 1.Přívod vzduchu
- 2.Píst
- 3.Pneumatický válec
- 4.Generátor hydr. tlaku
- 5.Hydraulický válec
- 6.Snímač tlaku

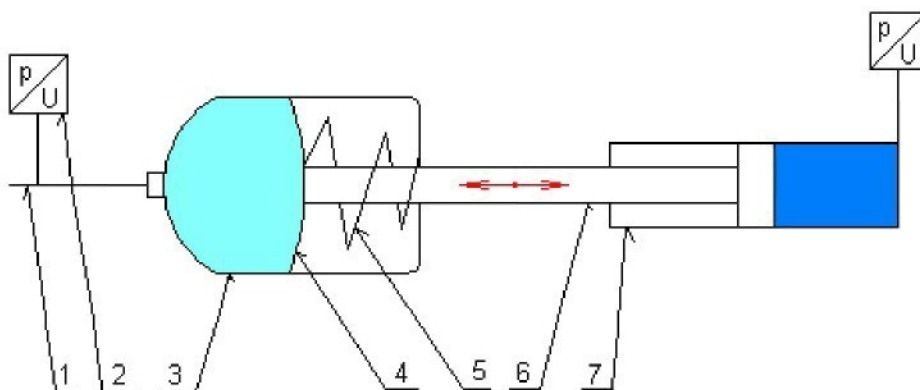
Obr. 7: Principiální schéma původní soustavy.

5.2 Popis nového systému

Tento systém má membránový převodník tlaku pneumatického na tlak hydraulický. U tohoto zařízení se předpokládá výrazné snížení vlivu pasivních odporů (tření) při uvedení do pohybu. A následně zlepšení vlastností regulace oproti stávající tlakové jednotce, která na začátku vykazovala nepravidelný až trhaný pohyb, což výrazně ovlivňovalo průběh regulované veličiny (hydraulického tlaku).

Jako převodník slouží hydraulický válec naplněný brzdovou kapalinou, který je z jedné strany uzavřen pístem. Píst je pevně spojen s membránou, která je umístěna v membránovém válci. Na vstup do tohoto válce se přivádí stlačený vzduch. Ten při zvyšování pneumatického tlaku působí silou na membránu, která se postupně posouvá. A zároveň pomocí pístu v hydraulickém válci stoupá tlak v brzdové kapalině. Tlak v membránovém i hydraulickém válci je měřen snímačem tlaku. Při uvolnění tlaku stlačeného vzduchu se pomocí pružiny vrátí membrána do výchozí polohy.

Při zkouškách brzd se přivede do brzdy tlak z hydraulického válce.



Obr. 8: Principiální schéma nového systému.

Legenda :

1. Přívod stlačeného vzduchu do systému
2. Snímač tlaku
3. Membránový válec
4. Membrána
5. Kuželová tlačná pružina (Ø drátu 4 mm)
6. Tyč spojující membránový válec a hydraulický válec
7. Hydraulický válec

Prívod stlačeného vzduchu

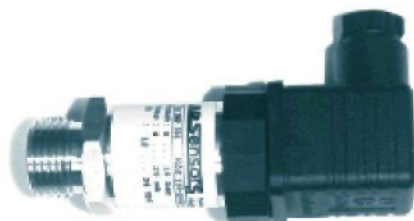
Zdrojem stlačeného vzduchu je kompresor, umístěný v kompresorové stanici. Rozvody vede stlačený vzduch do vzdušníku, který vyrovnává tlakové rázy při odběru. Dále je redukční ventil. Ten udržuje konstantní nastavený výstupní tlak. Rozvody je tento tlak rozveden po pracovištích a jeho maximální hodnota je přibližně 0,7 MPa.

Po odběru stlačeného vzduchu ve vývojové zkušebně následuje další redukční ventil firmy Bosch ($p_{\max} = 1,6 \text{ MPa}$; $T_{\max} = 50^{\circ}\text{C}$) a pak vzdušník firmy Topos o objemu 12 litrů a jmenovitém přetlaku 0,7 MPa. A ze vzdušníku jde stlačený vzduch na vstup do soustavy.

Snímače tlaku

Snímače tlaku jsou od firmy BD senzors. Hlavní oblasti uplatnění těchto snímačů jsou při měření tlaku v energetice, strojírenském, plynárenském, chemickém a jiném průmyslu. Pro snímání hydraulického tlaku je použit snímač DMP 333, který pracuje v rozsahu 0 až 25 MPa. A pro snímání pneumatického tlaku je použit snímač DMP 331 pracující v rozsahu od 0 do 1 MPa.

Oba typy senzorů pracují na stejném principu. Tlak je z oddělovací membrány senzoru přenášen pomocí minimálního množství silikonového oleje na měřicí membránu polovodičového tenzometru. Výstupní signál senzorů je napěťový (0 až 10 V) nebo proudový (4 až 20 mA). Snímače tlaku dosahují přesnosti 0,1 % a chyby vlivem teploty 0,1 % v rozsahu pracovních teplot od -20 do $+80^{\circ}\text{C}$. Používané snímače v diplomové práci mají napěťový výstupní signál.



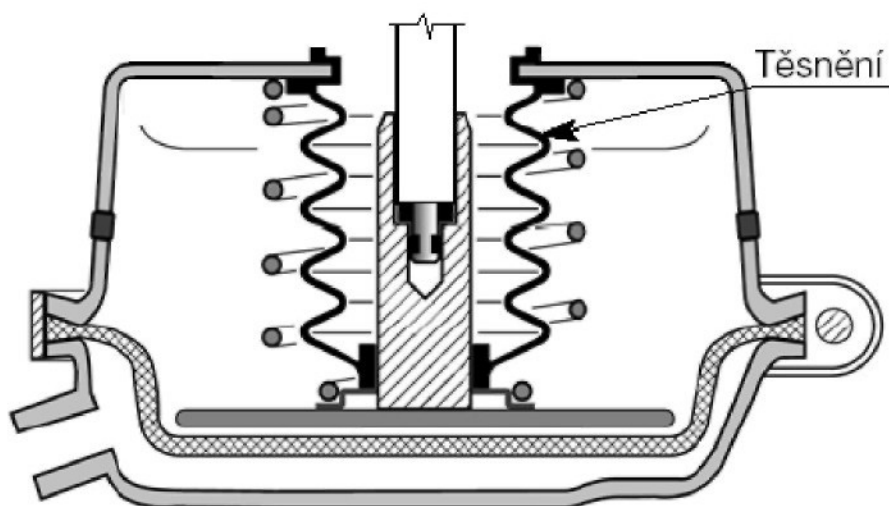
Obr. 9: Provedení snímačů tlaku DMP 333, DMP 331.

Hydraulický válec s pístem

Zde vzniká hydraulický tlak. Jedná se o ocelový válec s vnitřním průměrem 40 mm, ve kterém se pohybuje píst. Prostor ve válci je vyplněn brzdovou kapalinou.

Membránový válec

Jedná se o výrobek firmy Knorr - Bremse s označením typu - BZ 3421. Vnitřní průměr válce je 80 mm. Membrána je pryžová.



Obr. 10: Membránový válec (Zdroj www.knorr-bremsesfn.com).

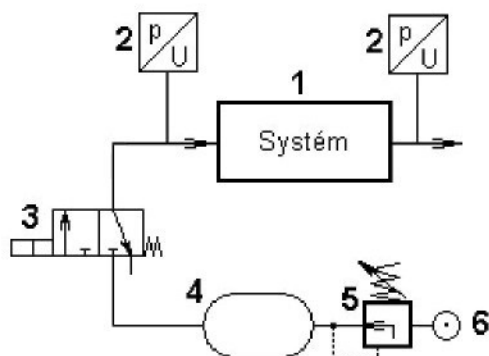
6 Identifikace systému

Na začátku řešení zadaného úkolu jsem se snažil novou soustavu matematicky popsat. Proto jsem provedl měření dynamických charakteristik, na jejíž základě provedu identifikaci. Pro zjištění, zda je systém lineární či nikoliv, jsem použil statickou charakteristiku.

Před měřením byl k systému namontován elektromagnetický ventil MFH-3-1/8 od firmy Festo. Jedná se o ventil pracující s pneumatickým tlakem 0 až 0,75 MPa v provedení 3/2. Jeho základní poloha je zavřeno. Pomocí napětí, které jsem na ventil přivedl spínačem, se dostal do polohy otevřeno.



Obr. 11: Ventil MFH-3-1/8 (Zdroj www.festo.com).

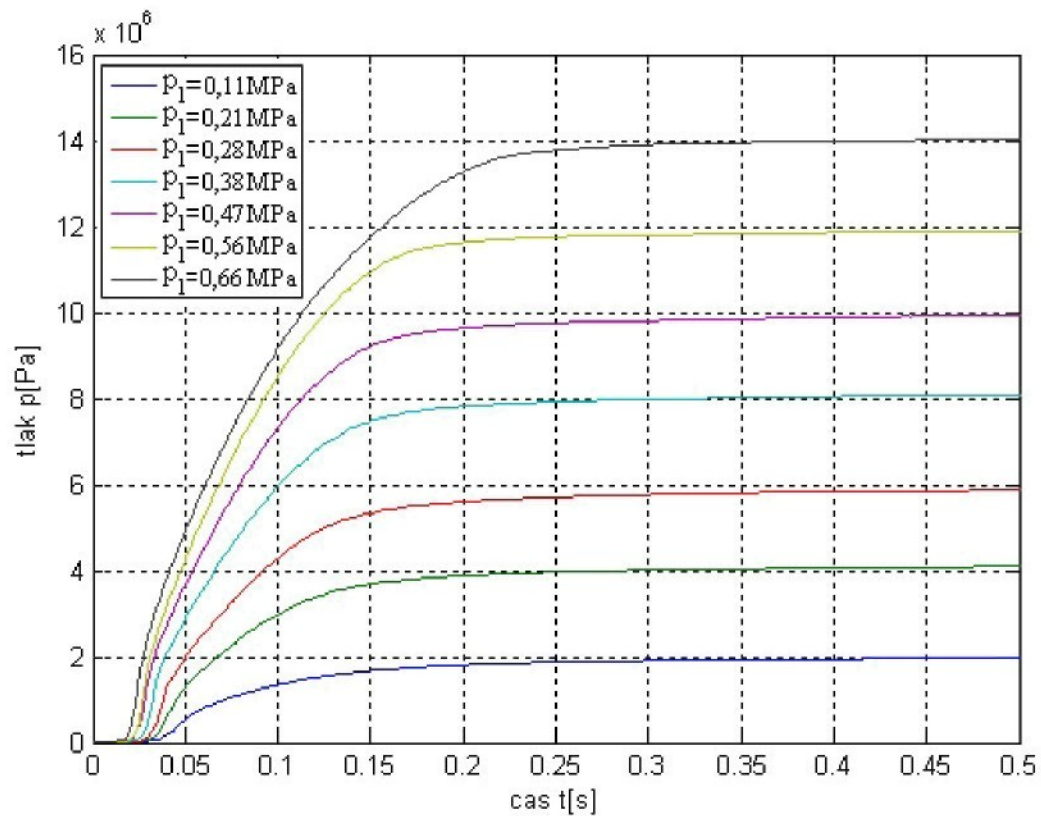
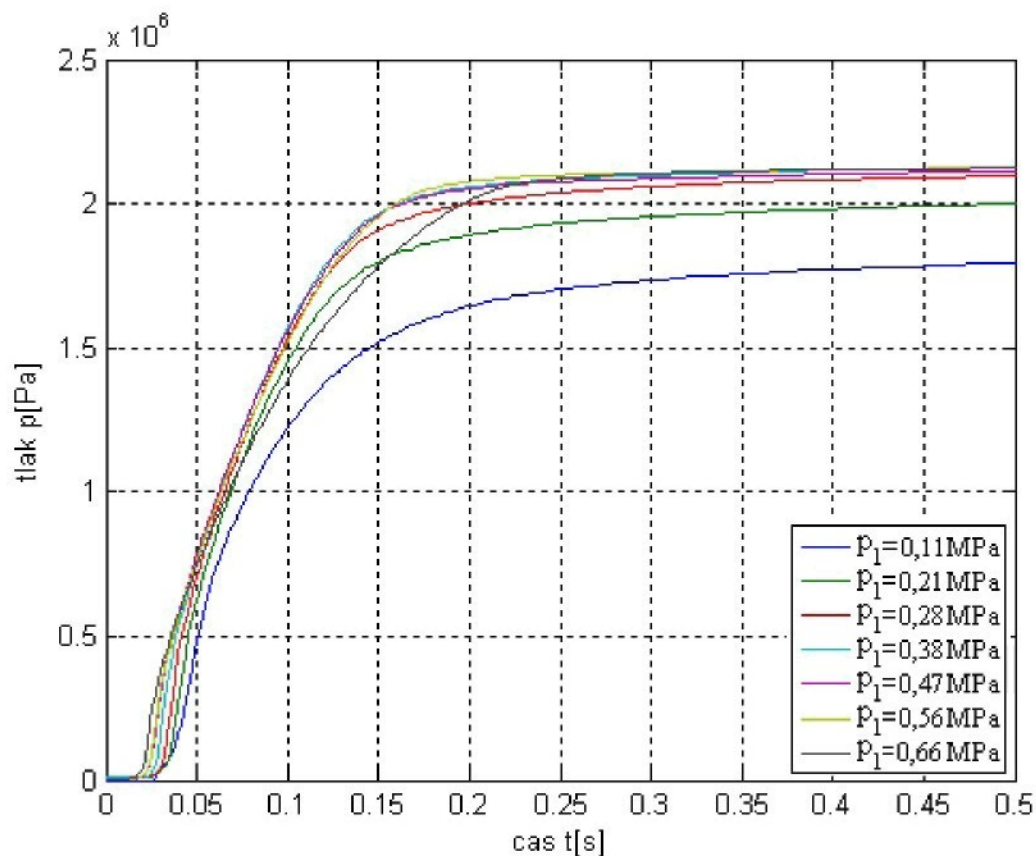


Legenda :

1. Zkoumaný systém (Obr. 8)
2. Snímače tlaku
3. Ventil MFH-3-1/8
4. Vzdušník (Objem 12 litrů)
5. Redukční ventil Bosch s manometrem
6. Přívod vzduchu z rozvodu

Obr. 12: Schéma identifikované soustavy.

Tímto způsobem jsem měřil odezvy soustavy na skokovou změnu tlaku. Na začátku měření byla soustava v rovnovážném stavu (ventil byl uzavřen). Otevřením ventilu se hydraulický tlak po určité době dostal na ustálenou hodnotu. Změny vstupního pneumatického tlaku soustavy jsem provedl ručním nastavením výstupního tlaku redukčního ventilu(5). Měření jsem z důvodu potlačení chyb opakoval desetkrát pro každou úroveň vstupního tlaku. A pro další výpočty jsem použil střední pravděpodobný průběh odezvy soustavy. Vstupní pneumatický tlak jsem měnil tak, aby výstupní hydraulický tlak byl odstupňován po 2 MPa.

Obr. 13: Průběh odezvy soustavy na vstupní signál p_1 .

Obr. 14: Přechodové charakteristiky soustavy.

Místnost vývojové zkušebny, ve které jsem prováděl měření, není klimatizovaná. Teplota při tomto měření byla 23°C. Naměřené průběhy jsem zpracovával pomocí programu Matlab a Microsoft Excel.

6.1 Popis průběhu odezev

Z naměřených odezev soustavy (obr.13) je patrné, že se jedná o soustavu proporcionální (statickou) n - tého řádu setrvačnosti, která se ustálí na konečné hodnotě. Tato hodnota odpovídá zesílení soustavy $k_0 = b_0 / a_0$. Odezvy soustavy vykazují i malé dopravní zpoždění, které je ale tak malé, že ho neuvažuji.

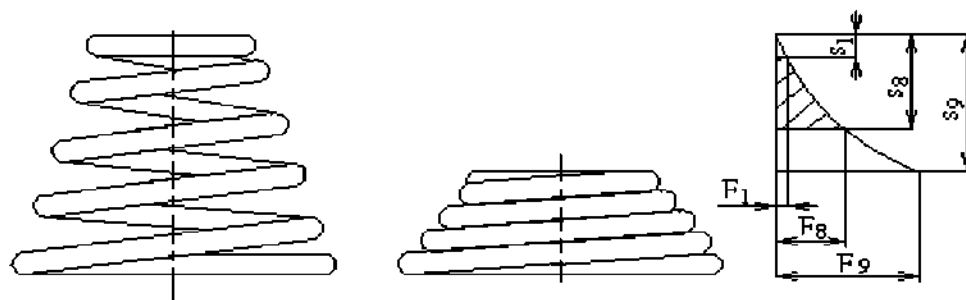
6.2 Přechodové charakteristiky soustavy

Na obrázku 14 jsou sestrojené přechodové charakteristiky. Při jejich sestrojení jsem postupoval následovně. Vybral jsem si jeden naměřený průběh odezvy (obr. 13) a ten jsem podělil odpovídající hodnotou vstupního napájecího pneumatického tlaku p_1 . Tuto hodnotu jsem si předem nastavil pomocí redukčního ventilu BOSCH. Tímto způsobem jsem postupoval i u ostatních průběhů na obrázku 13.

Jak je patrné ze sestrojených přechodových charakteristik (obr. 14) jedná se o systém nelineární. Každý průběh z přechodových charakteristik znázorňuje jinou soustavu s jinými parametry (charakteristiky mají různá zesílení a různé časové konstanty).

6.3 Nelinearita soustavy

Nelinearita soustavy je dána charakteristikou tlačné kuželové pružiny (obr. 15), která je umístěna v membránovém válci (obr. 8). A která vrací membránu do původní polohy, při uvolnění napájecího pneumatického tlaku p_1 . Tento nelineární průběh charakteristiky kuželové pružiny výrazně komplikuje řešení zadané diplomové práce. Dostávám nelineární systém, který nelze popsat metodami z lineární regulace.



Obr. 15: Tvar charakteristiky tlačné kuželové pružiny.

7 Volba akčního členu

7.1 Požadavky kladené na akční člen

1. A.Č. by měl umět pracovat se stlačeným vzduchem o maximálním tlaku až 1 MPa.
2. A.Č. by měl umět regulovat tlak stlačeného vzduchu plynule, přestavení z jedné krajní polohy do druhé je nedostačující.
3. A.Č. by měl mít vysokou dynamiku (co nejrychlejší přestavení z jedné polohy do druhé).
4. Řídicí signál A.Č. by měl být elektrický (napěťový, proudový).

7.2 Výběr akčního členu

Vybrat akční člen splňující všechny požadavky je velice obtížné. Hlavním důvodem je, že firmy zabývající se pneumatickými prvky většinou nevyrábí ventily, které se přestavují plynule tj., že mezi dvěma krajními polohami je libovolný počet mezipoloh. Jejich hlavním zájmem jsou prvky, bez plynulého přestavení. Tento fakt velmi komplikoval výběr akčního členu a zúžil možnosti výběru. Volba akčního členu je kompromisem mezi plynulou regulací a regulací tlaku.

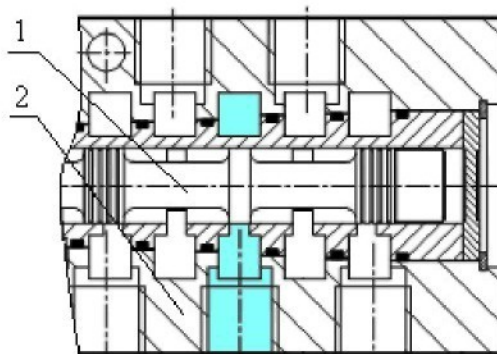
Jako akční člen jsem vybral proporcionální průtokový ventil MPYE -5-1/8-HF-010B od firmy Festo. Tento ventil nereguluje tlak stlačeného vzduchu, ale jeho průtok. Což výrazně zkomplikovalo celou úlohu.

7.3 Popis akčního členu

Přímo ovládaný proporcionální průtokový ventil MPYE-5-1/8-HF-010B obsahuje polohovací pístové šoupátko, které svým posuvem uzavírá resp. propojuje jednotlivé kanály mezi sebou (obr. 16).

Legenda :

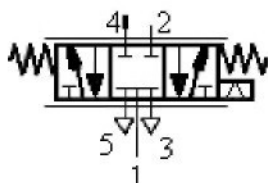
1. Šoupátko
2. Tělo ventilu



Obr. 16: Řez ventilem (Zdroj www.festo.com).

Potřebná přestavná síla je malá, protože je šoupátko zatíženo symetricky. Ovládání je elektrické (elektromagnetem se dvěma cívkami s navzájem opačným účinkem), převádí analogový vstupní signál ve formě napětí (0V až 10V) na odpovídající průřez na výstupu. Pracuje s pneumatickým tlakem 0 až 1MPa. Funkce ventilu 5/3 (5 přípojí : napájení, 2 výstupní, 2 odfuky; 3 funkční stavy s splynulým přestavováním).

Funkční značka

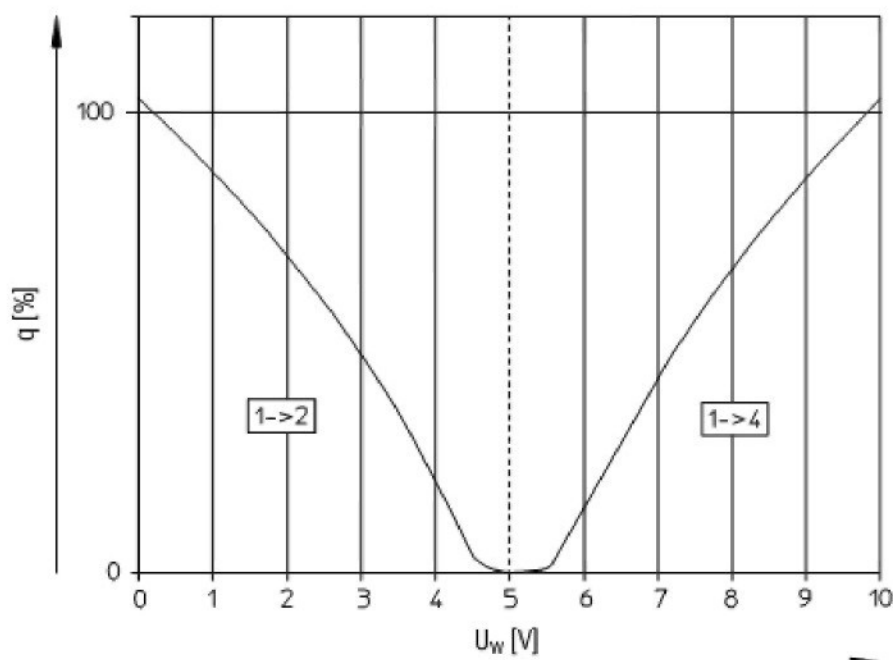


Legenda :

1. Napájení
2. Používaný výstup
- 3., 5. Odfuky
4. Nepoužívaný výstup (zaslepen)

Obr. 17: Ventil MPYE.

Tento ventil se používá k ovládání pneumomotorů (dva výstupy pro dva směry pneumomotoru). Při použití k ovládání hydraulického tlaku pomocí převodníku (obr.8) stačí jen jeden výstup, druhý výstup je zaslepen. Šoupátko se pohybuje pouze jedním směrem. Proto využívám pouze napěťového signálu v rozsahu 0 až 5V, kterým nastavuji průtok stlačeného vzduchu z 1 → 2. Plynulá změna požadovaného napětí na ventilu vyvolá plynulou změnu průtoku dle charakteristiky na obrázku 18.

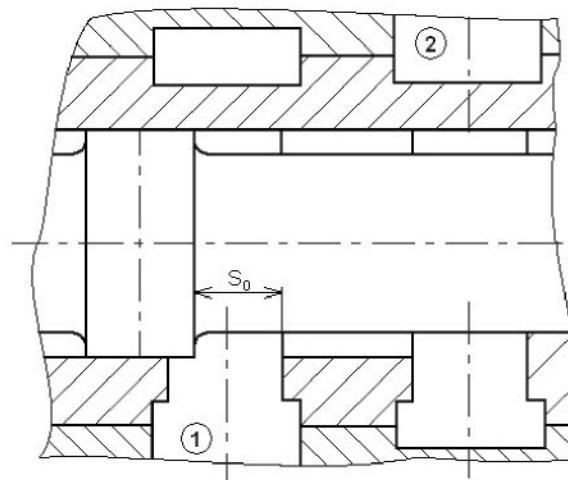


Obr. 18: Průtok ventilu v závislosti na požadované hodnotě napětí (Zdroj www.festo.com).

Znám hodnoty stavových veličin p_1 , T_1 stlačeného vzduchu připojeného na vstup ventilu (obr.19 vstup 1). Posunutím šoupátka v závislosti na hodnotě napětí vznikne průřez S_0 , kterým proudí stlačený vzduch na výstup (obr.19 výstup 2). Změnou tohoto průřezu dochází i ke změně výsledného průtoku. Závislost průtoku q na průřezu clonky S_0 je lineární, jak je vidět z rovnice průtoku [3] :

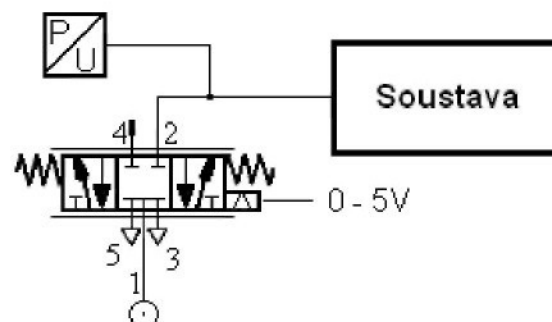
$$q = \frac{c_0 S_0 p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2}{\chi - 1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\chi}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \right]}, \quad (20)$$

kde c_0 je průtokový součinitel ($c_0 < 1$), χ je adiabatický exponent (pro vzduch $\chi = 1,4$), R je plynová konstanta (pro vzduch $R = 287,1 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K}$).

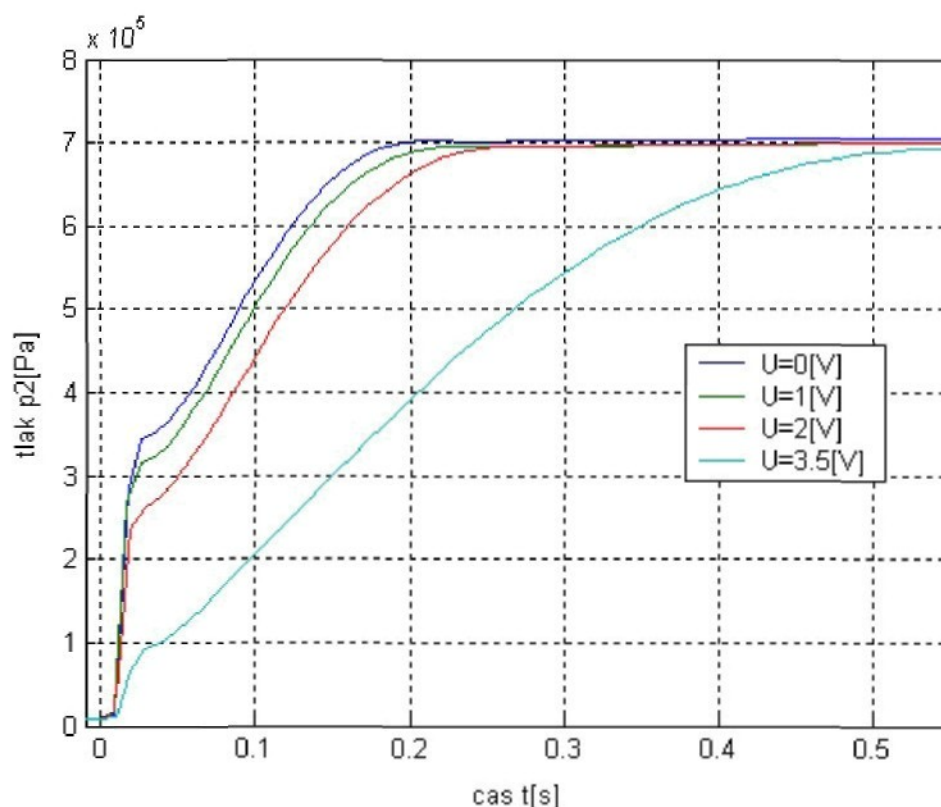


Obr. 19: Proudění stlačeného vzduchu přes průřez S_0 .

Dalším členem ovlivňující průtok je poměr tlaků $\frac{p_2}{p_1}$. Závislost průtoku q na poměru tlaků je složitá a nelineární. Při konkrétním průřezu S_0 je tlak p_1 na vstupu konstantní (0,7 MPa), ale tlak p_2 na výstupu mění svůj průběh v čase. Průběh tlaku p_2 vidíme na obrázku 21.



Obr. 20: Schéma měření výstupního tlaku p_2 zapojeného k soustavě.

Obr. 21: Průběh výstupního tlaku p_2 připojeného k zátěži.

Skutečný průběh průtoku v závislosti na poměru tlaků je rozdělen na 2 části, pro které je rozhodující hodnota poměru tlaků. První část, kde je poměr tlaků menší než 0,528 (tabulková hodnota pro vzduch, podzvuková oblast) je hmotnostní tok q pro daný napájecí tlak p_1 proudící přes clonu o průřezu S_0 konstantní a popsán rovnicí [3] :

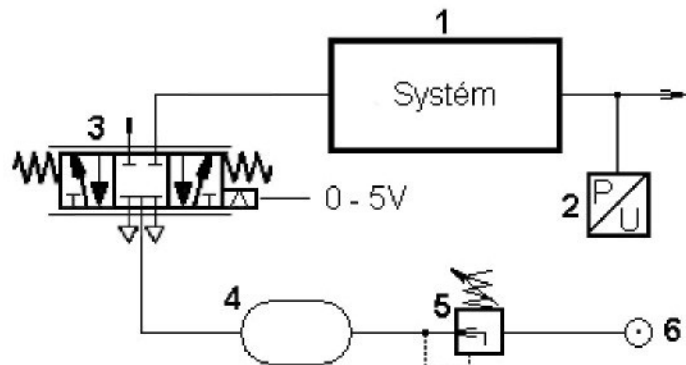
$$q_{\max} = \frac{c_0 S_0 p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2\chi}{\chi-1} \left[\left(\frac{2}{\chi+1} \right)^{\frac{2}{\chi-1}} \right]} \quad (21)$$

Pro druhou část, kde je poměr tlaků větší než 0,528 je průtok dán rovnicí 20. Hmotnostní tok q zde klesá z maximální hodnoty až k 0 [kg/s].[3]

Obr. 22: Ventil MPYE -5-1/8-HF-010B (Zdroj www.festo.com).

8 Identifikace soustavy

Po namontování ventilu MPYE jsem se snažil změřit dynamické charakteristiky soustavy, abych si ověřil předpokládané chování soustavy.



Legenda :

1. Zkoumaný systém (Obr. 8)
2. Snímač tlaku
3. Ventil MPYE
4. Vzdušník (Objem 12 litrů)
5. Redukční ventil BOSCH
6. Přívod vzduchu z rozvodu

Obr. 23: Schéma identifikované soustavy.

8.1 Popis měření

Místnost vývojové zkušebny, ve které jsem prováděl měření, není klimatizovaná. Teplota při měření dynamických charakteristik byla 25°C. Napájecí tlak ventilu p_1 je konstantní a má hodnotu 0,7 MPa.

Naměřené průběhy jsem pomocí programu Data Processing ukládal na harddisk PC a zpracovával pomocí programu Matlab a Microsoft Excel.

Dynamické charakteristiky

Při měření dynamických charakteristik jsem postupoval následovně. Přivedl jsem pomocí PC žádanou hodnotu napětí U_w na ventil a měřil jsem odezvy soustavy ve formě hydraulického tlaku. Takto jsem postupoval pro hodnoty napětí $U_w = 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4V$. Pro hodnotu 0V je dán maximální průtok ventilem a pro hodnotu $5V \pm 0,1V$ (tolerance udávaná výrobcem) má být ventil uzavřen. Posíláním různých hodnot napětí U_w na ventil jsem získal různou hodnotu průřezu S_0 (viz obr. 19), resp. různý průtok ventilem. Obecně platí čím větší průtok (0V na ventilu se rovná maximálnímu průtoku média ventilem), tím jsou naměřené odezvy soustavy (hydraulický tlak p) rychlejší (viz obr. 24).

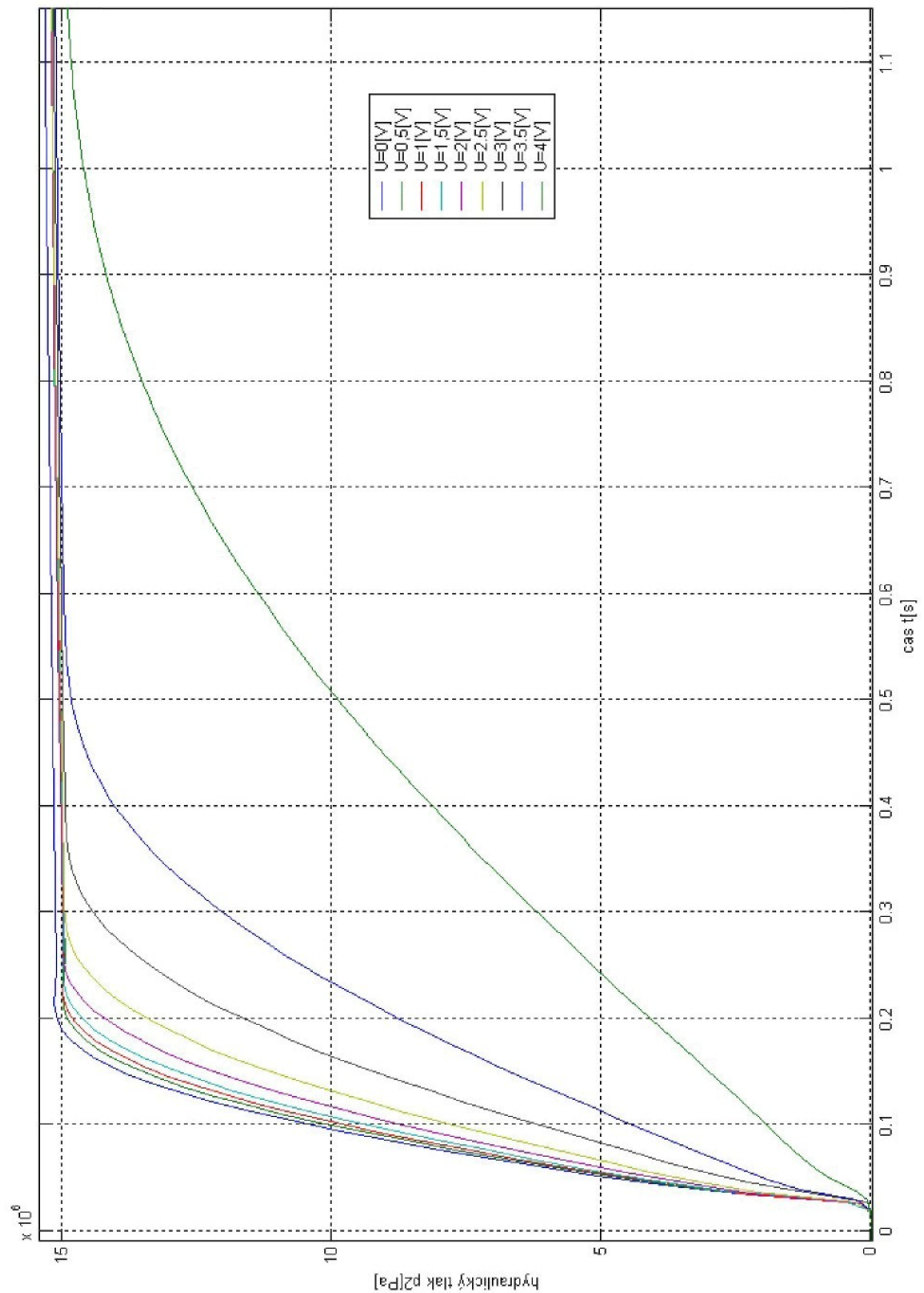
Přechodové charakteristiky

Na obr. 25 jsou přechodové charakteristiky soustavy. Sestrojil jsem je tak, že jsem podělil naměřené odezvy soustavy hodnotou modifikovaného vstupního napětí U_{mod} . Vstupní napětí jsem modifikoval proto, že pro 5V je ventil uzavřen a pro 0V je ventil maximálně otevřen. Hodnotu napětí 5V, kdy je ventil uzavřen, беру jako nulové modifikované napětí $U_{\text{mod}} = 0\text{V}$. A pro napětí odpovídající maximálnímu průtoku ventilem $U_w = 0\text{V}$ je hodnota modifikovaného vstupního napětí $U_{\text{mod}} = 5\text{V}$. Dle vzorce $U_{\text{mod}} = 5 - U_w$ přepočítám U_{mod} pro všechny hodnoty žádaného napětí U_w .

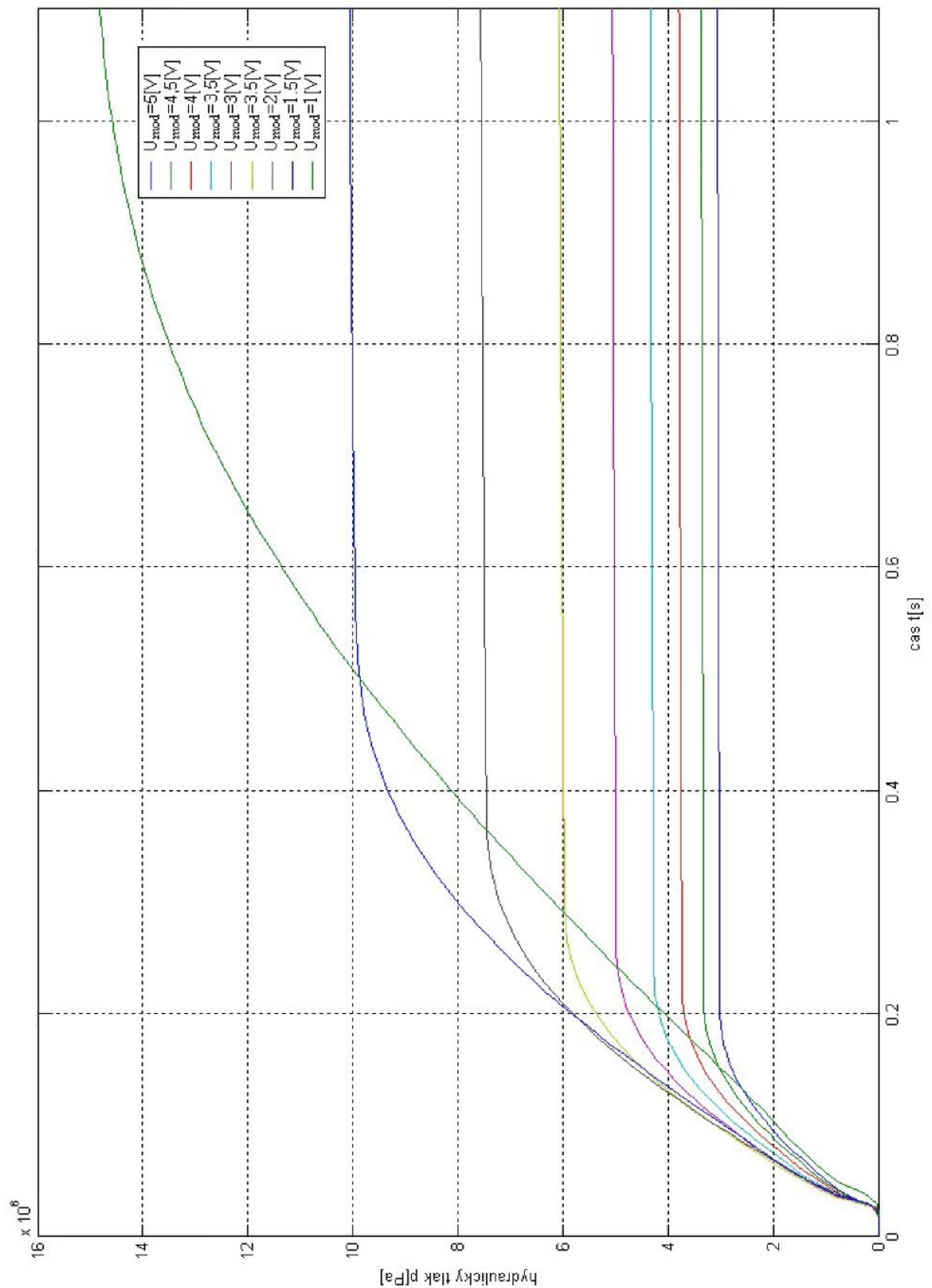
U_w [V]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
U_{mod} [V]	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1	0

Tab. 3: Hodnoty modifikovaného vstupního napětí U_{mod} přepočítané z U_w

Jak je vidět z přechodových charakteristik jedná se nelineární systém. Každá z těchto křivek představuje přechodovou charakteristiku jiné soustavy.



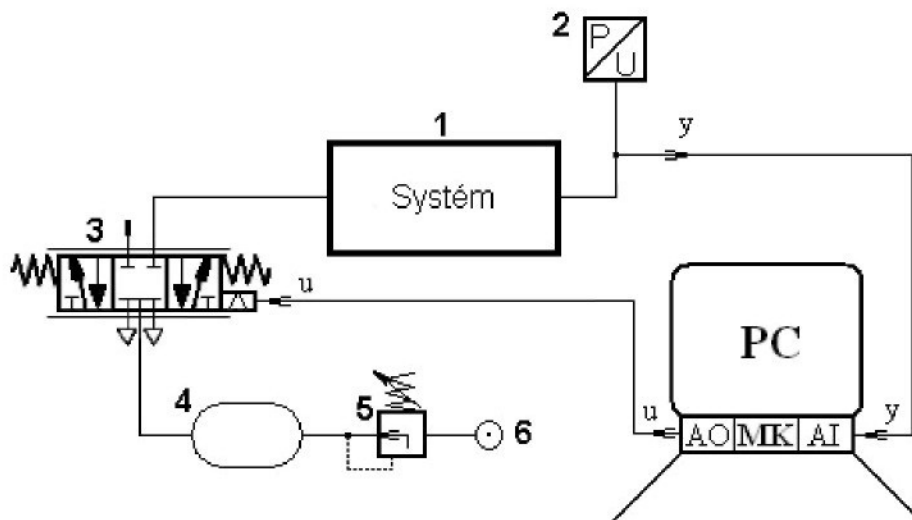
Obr. 24: Naměřené dynamické charakteristiky soustavy.



Obr. 25: Přechodové charakteristiky soustavy sestavené z dynamických char. soustavy.

9 Návrh řídicího systému

Dalším krokem je navrhnout řídicí systém pro danou soustavu. Funkce systému je patrná z obrázku 26.



Obr. 26: Funkční schéma navrženého řídicího systému.

Legenda :

1. Zkoumaný systém (Obr. 8)
2. Snímač tlaku
3. Ventil MPYE
4. Vzdušník (Objem 12 litrů)
5. Redukční ventil BOSCH
6. Přívod vzduchu z rozvodu
7. PC (MK ...měřicí karta NI 6040E, AO... analogový výstup, AI ...analogový vstup)

Hlavním prvkem řídicího systému je stolní PC. Zde se zadávají hodnoty regulátoru (k_p , k_i , k_D), velikost žádané hodnoty hydraulického tlaku w a horní, dolní omezení výstupu. Dále do stolního PC vstupuje přes měřicí kartu (MK) hodnota regulované veličiny. Okamžitá hodnota hydraulického tlaku (regulované veličiny) je snímána snímačem o rozsahu 0 až 25 MPa, kterému odpovídá napěťový výstup 0 až 10V. V počítači je naprogramovaný regulátor (popsán v kapitole regulátor) pomocí programu LABVIEW, který všechny tyto parametry vyhodnocuje a počítá hodnotu akční veličiny, kterou posílá na výstup měřicí karty. A tato hodnota napětí U_w je posílána na ventil jakožto akční člen.

10 Odvození rovnice PID regulátoru

Popis činnosti ideálního spojitého PID regulátoru vyjádřím rovnicí [2]:

$$u(t) = k_R \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (22)$$

přičemž $e(t) = w(t) - y(t),$ (23)

$$k_R = r_0, \quad T_I = \frac{k_R}{r_{-1}}, \quad T_D = \frac{r_1}{k_R}, \quad (24), (25), (26)$$

kde $e(t)$ je regulační odchylka,
 $u(t)$ je akční veličina,
 $w(t)$ je žádaná hodnota regulované veličiny,
 $y(t)$ je regulovaná veličina.

Dále k_R je zesílení regulátoru,
 T_I je integrační časová konstanta,
 T_D je derivační časová konstanta.

Rovnici (22) převedeme pomocí Laplaceovy transformace :

$$U(s) = k_R \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] E(s). \quad (27)$$

A z rovnice (27) určíme přenos spojitého PID regulátoru [2] :

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_R \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right]. \quad (28)$$

Číslicový PID regulátor nevyhodnocuje informaci spojitě, nýbrž diskretních časových okamžicích $t = kT$ (pro $k = 0, 1, 2, \dots$) a kde T je perioda vzorkování. Měla by být co nejmenší abychom dosáhli dobré shody mezi spojitým a diskretizovaným signálem.

Abychom dostali číslicový PID regulátor je nutno diskretizovat integrační a derivační složku rovnice (22). Pro malá T lze nalézt diskretní náhradu spojitého regulátoru tak, že integrál nahradíme sumou a derivaci zpětnou diferencí 1. řádu.

Pro náhradu integrace použijí tzv. zpětnou obdélníkovou metodu. Pro určení hodnoty integrálu poslouží součet ploch obdélníků nahrazující plochu pod původní křivkou $e(t)$. Požitím této metody získáme vztah [2] :

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \approx T \sum_{k=1}^n e(kT) \quad (29)$$

Pro náhradu derivace se používá zpětná diference 1. řádu [2] :

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \quad (30)$$

Při náhradě integrálu zpětnou obdélníkovou metodou (29) a derivace zpětnou diferencí vyjádřenou rovnicí (30) dostanu rovnici číslicového PID regulátoru [2] :

$$u(kT) = k_R \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{k=1}^n e(kT) + \frac{T_D}{T} \{e(kT) - e[(k-1)T]\} \right\} + u(0) \quad (31)$$

Takto popsany algoritmus číslicového PID regulátoru (31) se nazývá polohový. A je nerekurentní, což znamená že pro vytvoření součtu je nutné uchovat v paměti všechny hodnoty $e(kT)$ $i = 1, 2, 3, \dots n$.

Algoritmus regulátoru v přírůstkovém, tzv. rekurentním tvaru (33) neurčuje celou hodnotu $u(kT)$ akční veličiny v daném časovém okamžiku, ale jen její přírůstek (změnu) [2] :

$$\Delta u(kT) = u(kT) - u[(k-1)T], \quad (32)$$

$$\Delta u(kT) = k_R \left\{ e(kT) - e[(k-1)T] + \frac{T}{T_I} e(kT) + \frac{T_D}{T} \{ e(kT) - 2e[(k-1)T] + e[(k-2)T] \} \right\}, \quad (33)$$

kde

$$u(kT) = k_R \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_I} \sum_{k=1}^n e(kT) + \frac{T_D}{T} \{ e(kT) - e[(k-1)T] \} \right\}, \quad (34)$$

$$u((k-1)T) = k_R \left\{ e((k-1)T) + \frac{T}{T_I} \sum_{k=1}^{n-1} e(kT) + \frac{T_D}{T} \{ e((k-1)T) - e[(k-2)T] \} \right\}. \quad (35)$$

Stavitelnými parametry regulátoru jsou : k_R , T_I , T_D . Po vypočítání hodnot jakéhokoliv optimalizačního postupu pro výpočet parametrů spojitého PID regulátoru, lze za tyto parametry dosadit. [2]

Číslicový PID regulátor vypočítává hodnotu akční veličiny na základě aktuální hodnoty regulační odchylky $e(kT)$ a její minulé i předminulé ($e[(k-1)T]$, $e[(k-2)T]$).

Naprogramování algoritmu číslicového PID regulátoru pomocí LABVIEW 7.1 je v příloze 2.

10.1 Ovládání regulátoru

Regulátor byl naprogramován v programu LabView 7.1 vytvořený firmou National Instruments. Jedná se o programové prostředí, které se hojně využívá při měřicích i řídicích procesech v různých odvětvích průmyslu. Pomocí grafického prostředí, lze vytvářet různé aplikace k danému problému, které jsou schopny pomocí měřicích karet (jejich softwaru, pomocí jejich vstupu a výstupu) vykonávat požadované činnosti.

V tomto grafickém prostředí byl vytvořen regulátor, který lze snadno pomocí ovládacího panelu nastavit. Do regulátoru vstupují : žádaná hodnota w , hodnota regulované

veličiny (hydraulického tlaku) y , parametry regulátoru r_0, r_{-1}, r_1 (r_0 je proporcionální složka P, r_{-1} je integrační složka I, r_1 je derivační složka D), horní a dolní omezení výstupní (akční) veličiny. A z regulátoru vystupuje dle algoritmu číslicového regulátoru vypočítaná hodnota akční veličiny, která je pak posílána na výstup měřicí karty a dále na ventil MPYE.

10.2 Popis algoritmu regulátoru

Algoritmus regulátoru provede 6 sekvencí za sebou pro každou periodu vzorkování (kT , kde $k = 1, 2, \dots, n$).

V první sekvenci spočítá časový okamžik T , pomocí rozdílu aktuální a předchozí hodnoty vygenerované blokem Tick Count(ms). Tento rozdíl pak podělí frekvencí vzorkování (1000Hz). Tím dostanu hodnotu periody vzorkování T v milisekundách.

V druhé sekvenci spočítá regulační odchylku:

$$e(kT) = w(kT) - y(kT), \quad (36)$$

kde w je žádaná hodnota a y je aktuální hodnota regulované veličiny.

Ve třetí sekvenci vypočte proporcionální složku akční veličiny, tím že vynásobí proporcionální složku zesílení regulátoru P regulační odchylkou :

$$P.e(kT) = k_R . e(kT) . \quad (37)$$

Ve čtvrté sekvenci spočte integrační složku akční veličiny. Vynásobí mezi sebou regulační odchylku, periodou vzorkování T a integrační složku zesílení regulátoru I (získám člen: $e.T.I$). Hodnotu tohoto členu sečte s předchozí hodnotou tohoto členu (při prvním zpuštění je předchozí hodnota nastavená na 0) :

$$\sum_{k=1}^n I T e(kT) = I T . \sum_{k=1}^n e(kT) = \frac{k_R}{T_I} . T . \sum_{k=1}^n e(kT) . \quad (38)$$

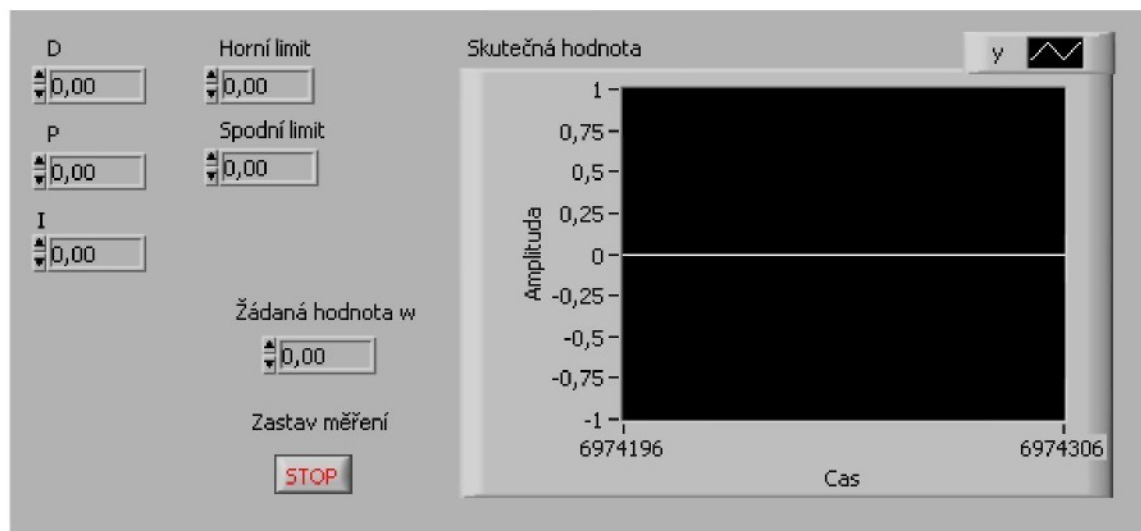
V pátém kroku spočte derivační složku akční veličiny. Nejprve vytvoří rozdíl mezi regulační odchylkou aktuální a reg. odchylkou předchozí. Dále tento rozdíl podělí periodou vzorkování T a vzniklý člen vynásobí s derivační složkou regulátoru D . Při prvním průběhu je hodnota derivační složky akční veličiny rovna 0 :

$$\frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \cdot D = k_R \cdot T_D \cdot \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T}. \quad (39)$$

V poslední sekvenci dojde k tomu, že se všechny tři složky akční veličiny sečtou. A výsledná hodnota se porovná s horním i dolním omezením, případně se upraví :

$$u(kT) = k_R \left(e(kT) + \frac{T}{T_I} \cdot \sum_{k=1}^n e(kT) + T_D \cdot \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \right). \quad (40)$$

10.3 Čelní panel regulátoru



Obr. 27: Čelní panel pro zadávání parametrů regulátoru naprogramovaného v LabView 7.1.

11 Seřízení regulátoru

Jelikož se soustava chová nelineárně není vhodné pro seřízení regulátoru použít žádnou z metod lineární regulace. Proto jsem si zvolil experimentální a empirické metody seřizování PID regulátorů. Seřízením dle těchto metod dostaneme regulační pochod, který se od optimálního regulačního pochodu může i výrazně lišit. Záleží na zvolených postupech a zkušenostech. Pro seřízení jsem použil dva postupy, kterými nastavuji P, PI regulátor použitý při regulaci soustavy.

11.1 Metoda ručního seřízení v provozních podmínkách

První metodu, kterou jsem použil je metoda ručního seřízení regulátoru v provozních podmínkách. Kritériem je pro ní dosažení maximálního zesílení proporcionální a integrační složky regulátoru při co nejrychlejším přechodovém ději.

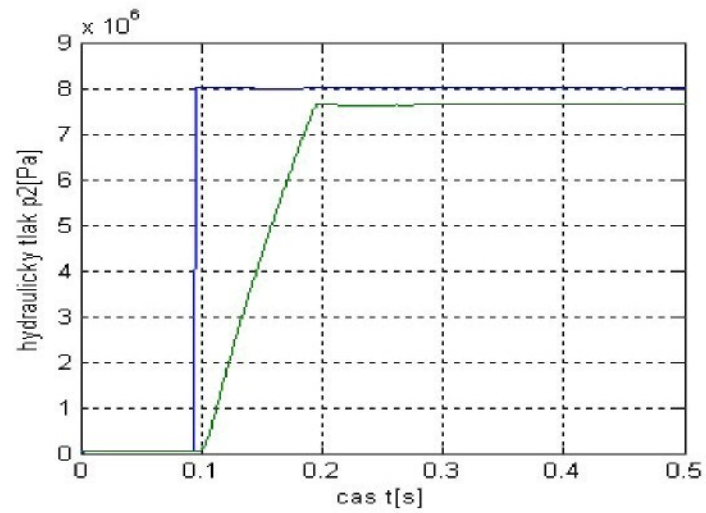
11.1.1 Postup při seřízení

Postupoval jsem následovně. Proporcionální složku regulátoru r_0 nastavím na malou hodnotu. A pro derivační i integrační složku nastavím nulové hodnoty zesílení. Počkám až se regulovaná soustava ustálí a pak zadám skok řízení a pozoruji odezvu soustavy. Proporcionální složku neustále zvětšuji. Po každé změně velikosti proporcionální složky zadám skok řízení. To provádím tak dlouho až u odezvy soustavy nastane viditelný překmit. Vráťím r_0 na hodnotu, při které se překmit téměř neprojeví a začnu podobně zvyšovat zesílení integrační složky r_{i1} .

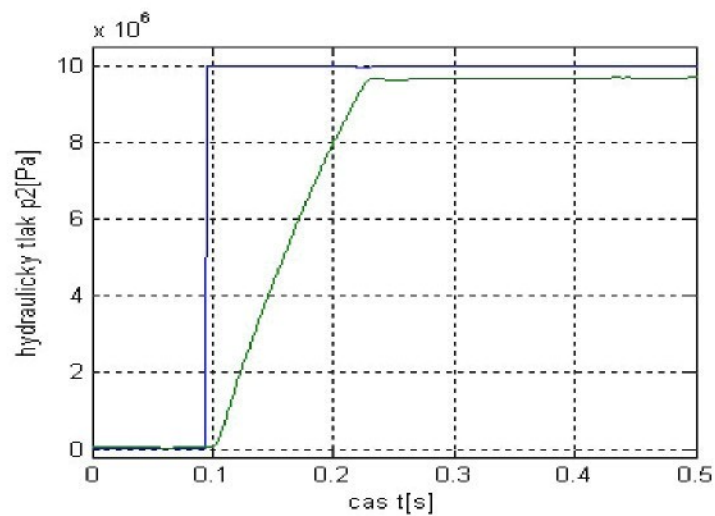
11.1.2 Výsledky seřízení

Regulátor P

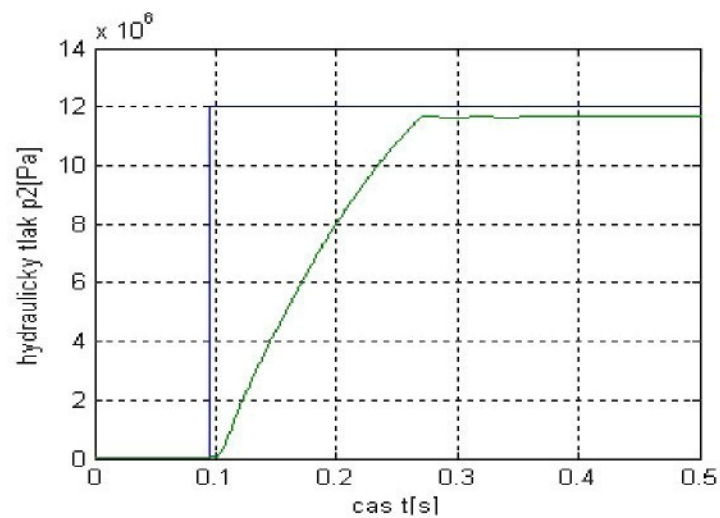
Postupoval jsem dle výše uvedeného návodu a získal jsem parametry regulátoru P, PI. Regulátoru P jsem našel hodnotu proporcionální složky $r_0 = 10,5$. Odezvy soustavy (zelená křivka na obrázcích) na různé hodnoty žádané veličiny (modrá křivka na obrázcích) jsou znázorněny na obrázcích 28 až 30.



Obr. 28: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 8$ MPa.



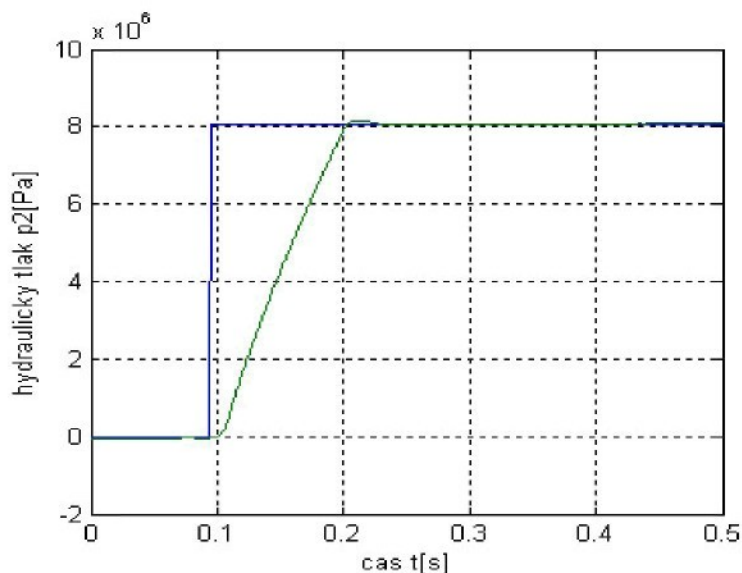
Obr. 29: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 10$ MPa.



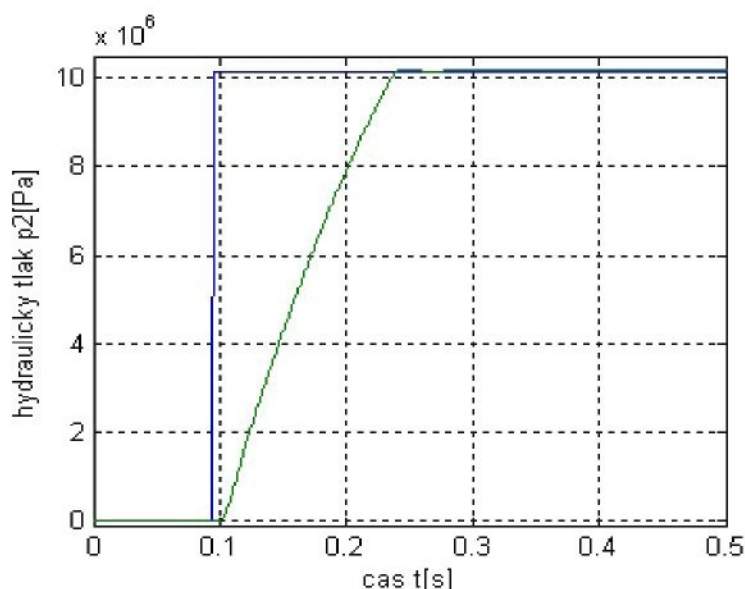
Obr. 30: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 12$ MPa.

Regulátor PI

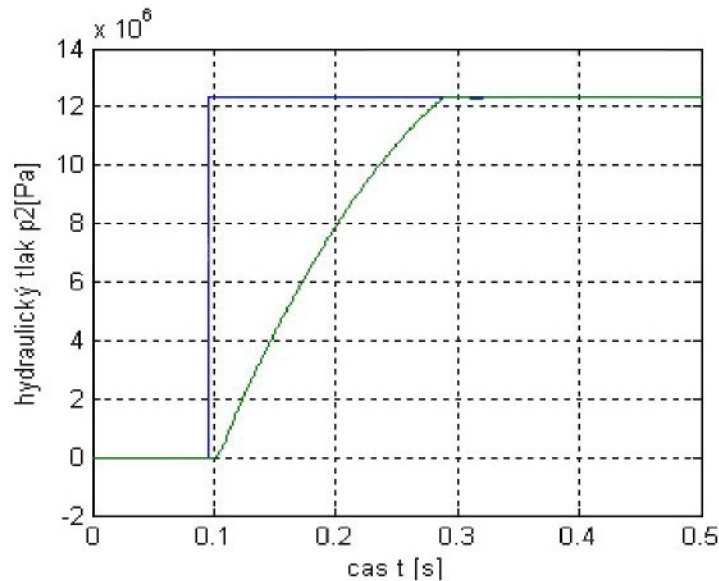
Regulátoru PI jsem našel hodnotu proporcionální složky $r_0 = 9,3$ a hodnotu integrační složky $r_1 = 0,9$. Odezvy soustavy (zelená křivka na obrázcích) na různé hodnoty žádané veličiny (modrá křivka na obrázcích) jsou znázorněny na obrázcích 31 až 33.



Obr. 31: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 8$ MPa.



Obr. 32: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 10$ MPa.

Obr. 33: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 12,5$ MPa.

Jelikož se nejedná o nastavení regulátoru žádnou optimalizační metodou, není regulační pochod nastaven optimálně. Hlavně z pohledu výměny energie při regulačním pochodu. Nicméně požadavek na rychlost ustálení soustavy při zavedení žádané hodnoty lze hodnotit jako dostatečný pro další práci.

11.2 Zieglerova-Nicholsova metoda kritických parametrů

Metoda kritických parametrů, nazývaná také metodou uzavřeného regulačního obvodu, předpokládá přivedení regulačního obvodu pouze zesílením regulátoru r_0 při vyřazené integrační ($T_I = \infty$) a derivační ($T_D = 0$) složce na kmitavou mez stability. To znamená, že je třeba regulační obvod rozkmitat pouze proporcionální složkou regulátoru. Z periodického průběhu libovolné veličiny regulačního obvodu se odečte kritická perioda T_{krit} a z odpovídajícího nastavení regulátoru kritické zesílení r_{0krit} . Pak se na základě tab. 4, resp. 5 určí hodnoty stavitelných parametrů zvoleného typu regulátoru. [7]

Regulátor	r_0^*	T_I^*	T_D^*
P	$0,5r_{0krit}$	-	-
PI	$0,45r_{0krit}$	$0,83T_{krit}$	-
PID	$0,6r_{0krit}$	$0,5T_{krit}$	$0,125T_{krit}$

Tab. 4: Hodnoty nastavení parametrů regulátorů dle metody kritických parametrů.

Zieglerova-Nicholsova metoda kritických parametrů je výhodná tím, že nevyžaduje znalost modelu vlastností regulované soustavy a že seřízení lze provést s konkrétní reálnou regulovanou soustavou a reálným regulátorem (s proporcionální složkou P). Její zásadní vadou je, že se musí rozkmitat regulační obvod, což většina provozů a zařízení nepřipouští a dále, že se mohou výraznějším způsobem projevit jejich nelineární vlastnosti. Metoda kritických parametrů může být použita i v těch případech, kdy kritické parametry r_0 a T_{krit} byly získány analyticky na základě matematického modelu regulované soustavy. [7]

11.2.1 Modifikace pro číslicové regulátory :

Regulátor	K_P^*	K_S^*	K_D^*
P	$0,5r_{0krit}$	-	-
PS	$0,45r_{0krit} - 0,5 K_S^*$	$(0,54r_{0krit}T) / T_{krit}$	-
PSD	$0,6r_{0krit} - 0,5 K_S^*$	$(1,2r_{0krit}T) / T_{krit}$	$(3r_{0krit}T_{krit}) / 40T$

Tab. 5: Hodnoty stavitelných parametrů číslicových regulátorů pro modifikovanou metodu kritických parametrů.

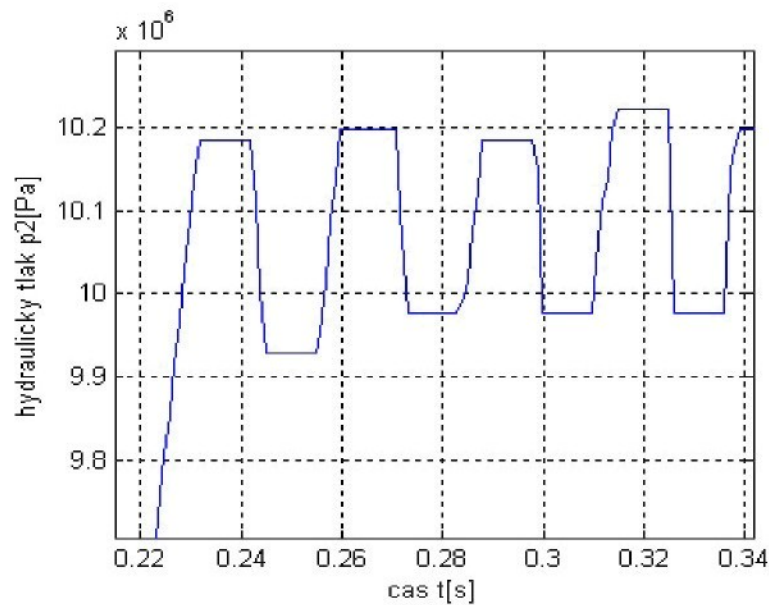
11.2.2 Postup při seřizování

Při vyřazené sumační ($T_I = \infty$) a diferenční ($T_I = 0$) složce regulátoru pro zvolenou vzorkovací periodu T z rozkmitaného regulačního obvodu na mezi stability určit z nastavení regulátoru kritické zesílení r_{0krit} a z periodického průběhu libovolné veličiny kritickou periodu T_{krit} .

Na základě tabulky 5 pro r_{0krit} a T_{krit} a zvolenou vzorkovací periodu T určit hodnoty vah zvoleného typu číslicového regulátoru. [7]

11.2.3 Výsledky seřízení

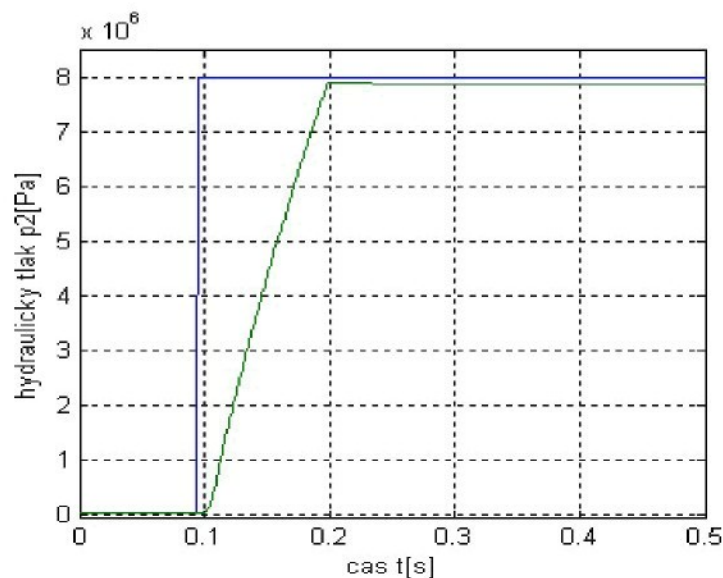
Seřízení regulátoru proběhlo pro vzorkovací periodu $T = 0,001$ s. Při vyřazené integrační i derivační složce jsem se snažil regulační obvod přivést na kmitavou mez stability (obr. 34). Odečetl jsem hodnoty kritických parametrů : $r_{0krit} = 50,31$ a $T_{krit} = 0,0255$ s.



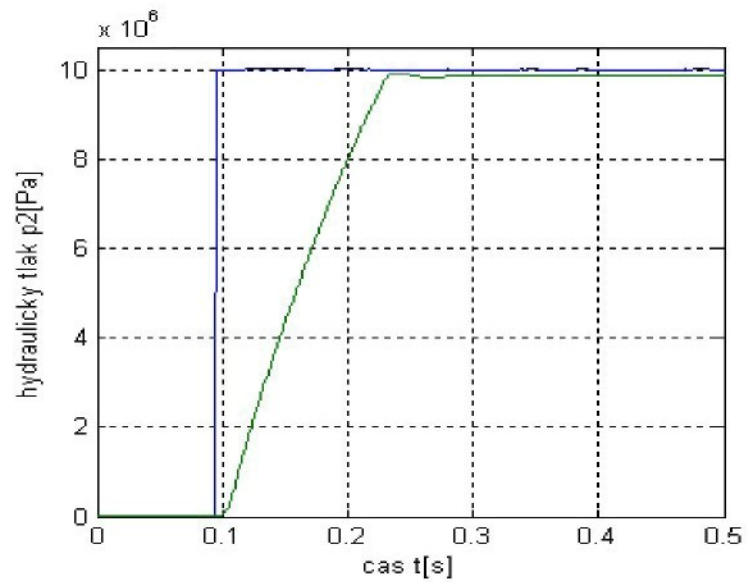
Obr. 34: Kmitání regulačního obvodu na mezi stability pro určení kritických parametrů.

Regulátor P

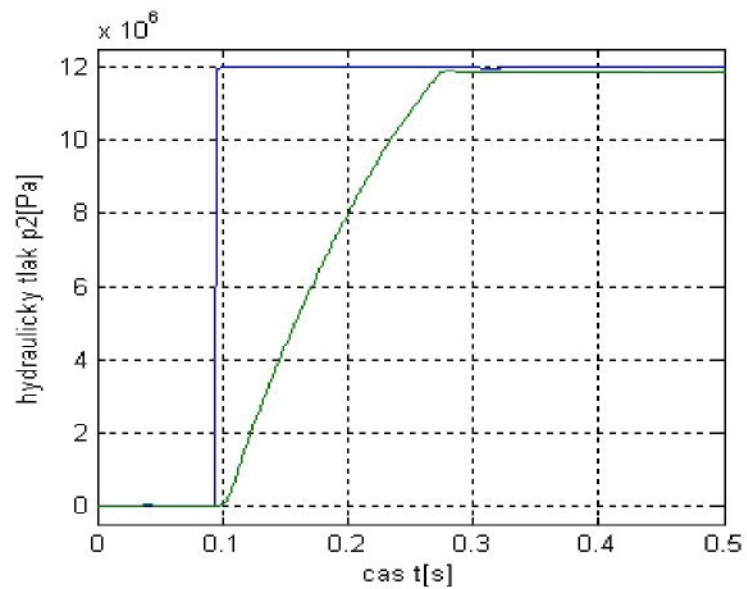
Z kritických hodnot r_{okrit} , T_{krit} jsem vypočítal hodnoty stavitelných parametrů P regulátoru dle tabulky 5. Pro P regulátor je hodnota zesílení $r_o = 25,16$. Odezvy soustavy (zelená křivka na obrázcích) na různé hodnoty žádané veličiny (modrá křivka na obrázcích) jsou znázorněny na obrázcích 35 až 37.



Obr. 35: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 8$ MPa.



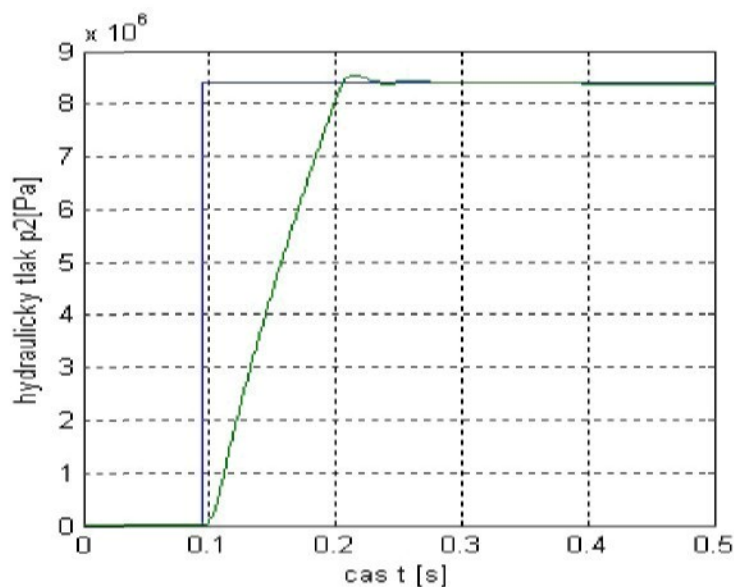
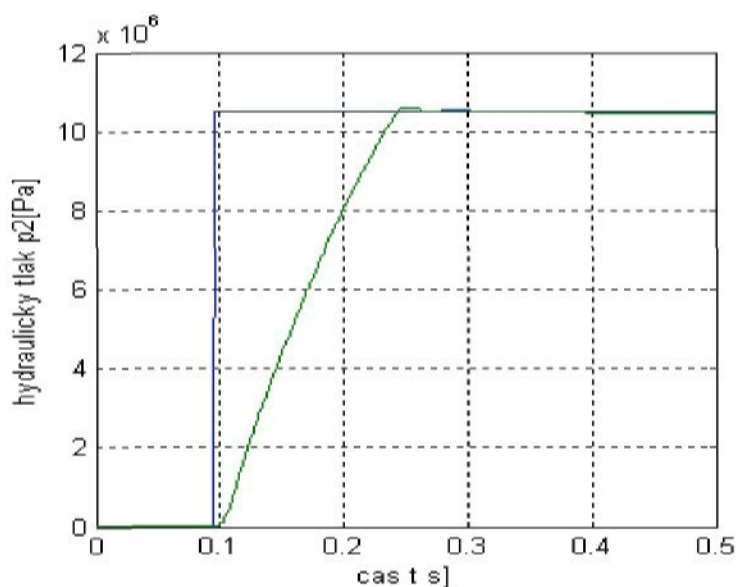
Obr. 36: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 10$ MPa.

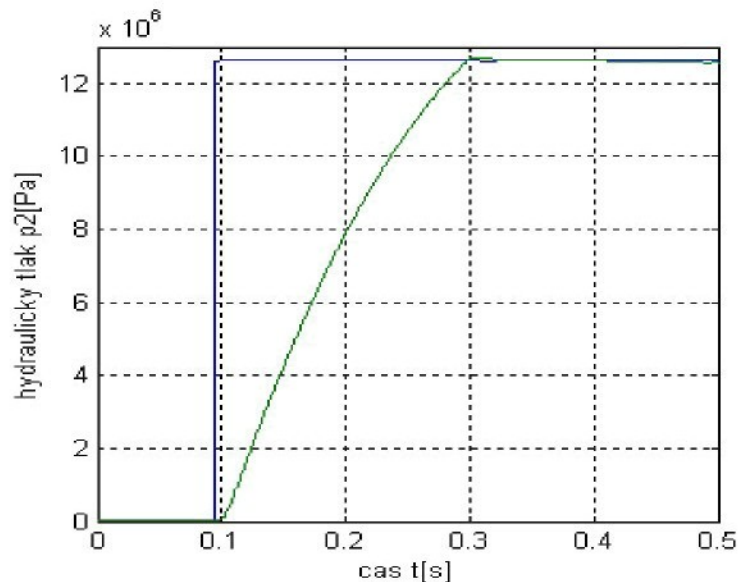


Obr. 37: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 12$ MPa.

Regulátor PI

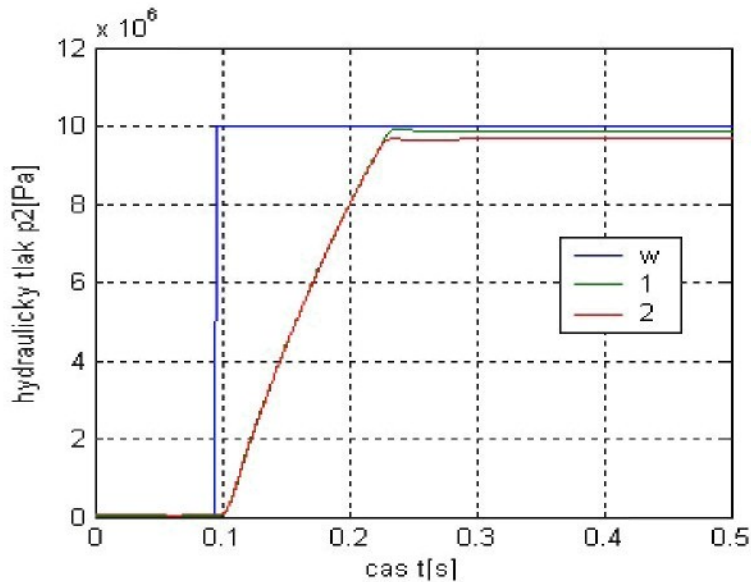
Pro regulátor PI jsem vypočetl na základě tabulky 5 hodnotu proporcionální složky r_0 a hodnotu integrační složky r_{i1} , které jsem ale po shlédnutí regulačního pochodu modifikoval. Výsledná hodnota proporcionální složky je $r_0 = 21,83$ a hodnota integrační složky je $r_{i1} = 0,98$. Odezvy soustavy (zelená křivka na obrázcích) na různé hodnoty žádané veličiny (modrá křivka na obrázcích) jsou znázorněny na obrázcích 38 až 40.

Obr. 38: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 8,5$ MPa.Obr. 39: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 10,5$ MPa.

Obr. 40: Regulační pochod při žádané hodnotě $w = 12,5$ MPa.

11.3 Porovnání obou metod seřízení

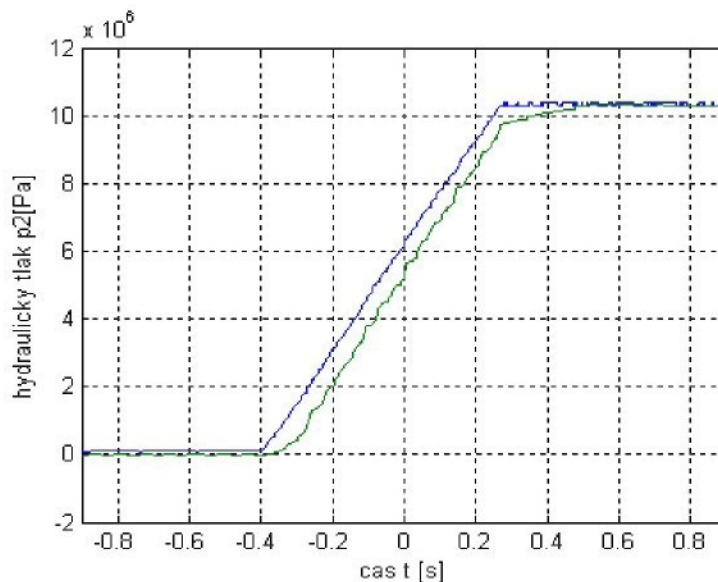
Porovnáním obou metod seřízení P, PI regulátorů jsem dospěl k následujícím závěrům. Průběhy regulačních pochodů soustavy s P, PI regulátorem seřízeným metodou ručního seřízení v provozních podmínkách jsou velmi podobné s průběhy regulačních pochodů soustavy s P, PI regulátorem seřízeným metodou kritických parametrů. Liší se pouze ve velikosti ustálené hodnoty regulačního pochodu. A to tak, že regulační pochod soustavy s regulátorem seřízeným Zieglerovou – Nicholsovou metodou kritických parametrů se u P regulátoru více blíží žádané hodnotě (oproti druhé metodě seřízení) a u PI regulátoru vykazuje regulační pochod větší překmit (ve srovnání s druhou metodou seřízení). Pro názornost je na obrázku 41 porovnání obou metod seřízení P regulátoru při žádané hodnotě $w = 10$ MPa.



Obr. 41: Porovnání seřízení P regulátoru (1 – Zieglerova – Nicholsova metoda kritických parametrů, 2 – metoda ručního seřízení v provozních podmínkách).

11.4 Žádaná veličina tvaru rampy

Po nalezení parametrů regulátorů a po shlédnutí porovnání regulačních pochodů, jsem zkusil zadat žádanou veličinu ve tvaru rampy a pozoroval chování regulačního obvodu (viz obr. 42). Regulační proces byl pro P i PI regulátory velmi podobný. Ukázka je pro nastavení PI regulátoru s parametry : $r_0 = 21,83$, $r_{-1} = 0,98$.



Obr. 42: Regulační proces, kdy je žádaná veličina(modrá křivka) ve tvaru rampy (odezva soustavy má barvu zelenou).

Jak je vidět z obrázku 42 není již nutné hledat optimální tvar žádané veličiny jak bylo vidět na obrázku 5. Tvar žádané veličiny je už opravdu jen tvarem rampy, kterou lze libovolně modifikovat.

12 Závěr

Na začátku řešení dané úlohy se zmínil o současném zařízení a jeho nedostacích. Poukázal jsem v práci na to, co tyto nedostatky způsobuje (vliv pasivních odporů). Proto jsme hledali zařízení (systém), u kterého jsme příčiny těchto nedostatků nepředpokládali. Možností se nabízelo hned několik a po zvážení kladů a záporů jednotlivých variant, jsme se rozhodli pro membránový převodník vzduch - kapalina. U tohoto systému jsme předpokládali výrazné snížení pasivních odporů (oproti současnému systému) – tření, které vznikalo mezi pístem a pneumatickým válcem bylo nahrazeno podstatně menším vnitřním třením, které vzniká při pohybu pryžové membrány. Jestli zvolená varianta je opravdu ta správná, jestli dokáže splnit požadavky kladené vývojovou zkušebnou, nedokázal nikdo s jistotou říci.

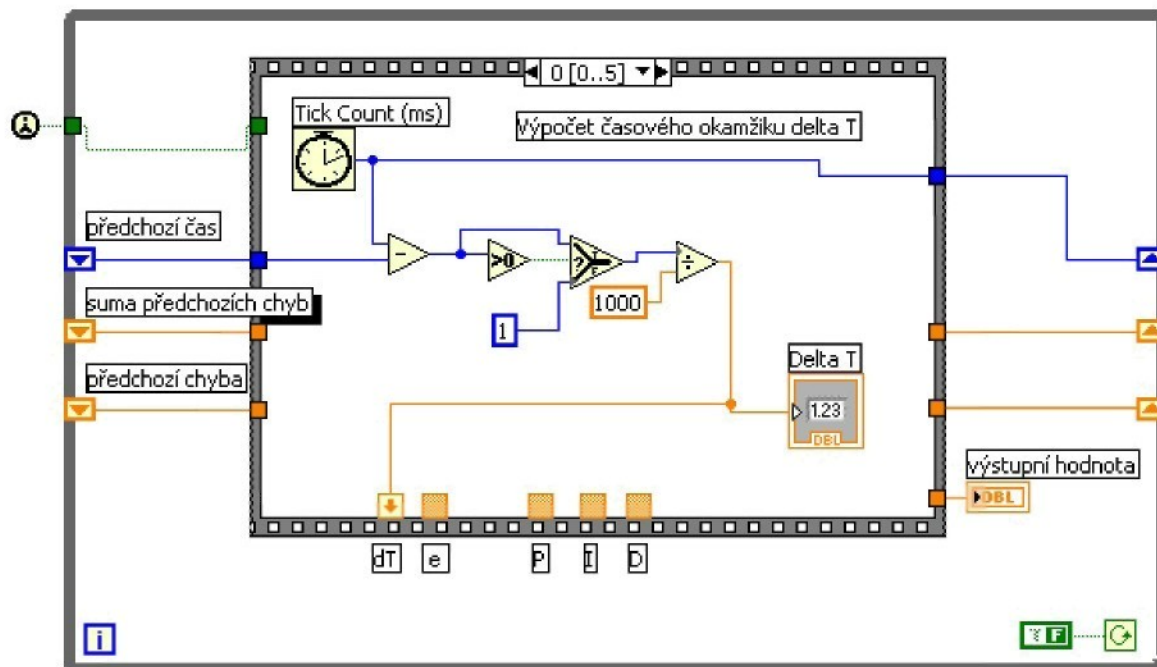
Postupem času jsem při řešení diplomové práce narazil na problém lineárních a nelineárních soustav. Průběhy odezev soustavy, které jsem naměřil byly výrazně nelineární. Podle toho jsem musel k danému problému přistoupit. Snažil jsem se přijít na důvody nelinearity z důvodů možnosti jejího odstranění. Po zjištění příčin jsem mohl konstatovat, že linearita se odstranit jednoduše nedá. Proto jsem byl nucen pokračovat dále v řešení metodami, které lze použít pro nelineární soustavy. Jelikož se ale jedná o soustavu s velmi proměnnými parametry, kterou nelze popsat jedním přenosem (viz přechodové charakteristiky obr. 23), lze jí jen velmi obtížně přesně regulovat PID regulátorem. Pro regulaci takovéto soustavy by byla vhodná metoda adaptivní regulace. Průběžně by probíhala identifikace soustavy a při změně parametrů soustavy by proběhla korekce parametrů regulátoru. Tento způsob jsem ale z časových důvodů nevykonal.

Po otestování vytvořené regulační jednotky a ověření všech požadavků kladených na regulovanou soustavu vývojovou zkušebnou jsem zjistil, že bude potřeba provést ještě nějaké úpravy u soustavy, případně nalézt jiné parametry regulátoru aby se regulační pochod ještě zrychlil. Lze ale konstatovat, že tato soustava nesplnila všechna očekávání a tak se musí hledat jiné řešení problému.

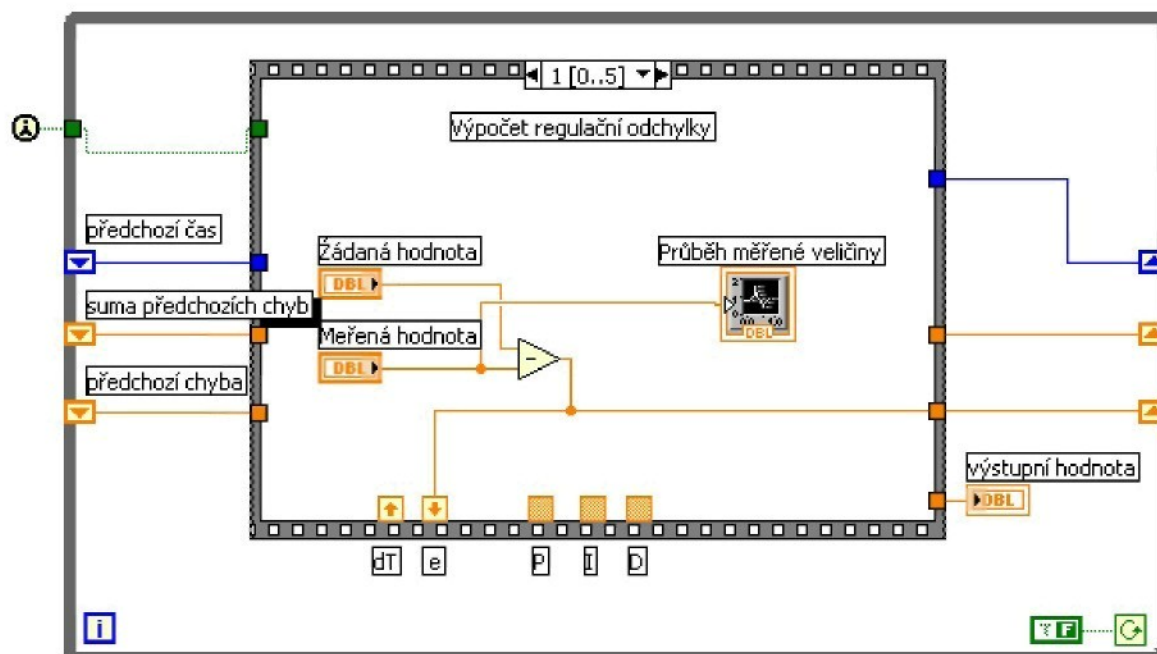
13 Použitá literatura

- [1] OLEHLA, M. - NĚMEČEK, S.: Základy aplikované kybernetiky. TUL, Liberec 2002, ISBN 80-7083-652-0
- [2] BALÁTEĚ, J.: Automatické řízení. BEN, Praha 2004, ISBN 80-7300-148-9
- [3] NOSKIEVIČ, P.: Modelování a identifikace systémů. Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
- [4] BALÁTEĚ, J. a kol.: Technické prostředky automatického řízení. SNTL, Praha 1986
- [5] DUŠEK, F.: Matlab a simulink. Univerzita Pardubice, Pardubice 2000, ISBN 80-7194-273-1
- [6] OLEHLA, M.: Identifikace technologických soustav. TUL, Liberec 1997, ISBN 80-7083-231-2
- [7] ŠULC, B. – VÍTEČKOVÁ, M. : Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. ČVUT 2004
- [8] BENEŠ, P. – MYKISKA, A.: Úvod do pneumatiky. ČVUT 1989, ISBN 80-01-00042-7
- [9] BENEŠ, P. – MYKISKA, A.: Pneumatické řídicí systémy ČVUT 1989, ISBN 80-01-001300-X
- [10] STŘEDA, I.: Základy rovnovážné termodynamiky. TUL, Liberec 1998, ISBN 80-7083-287-8
- [11] www.automa.cz

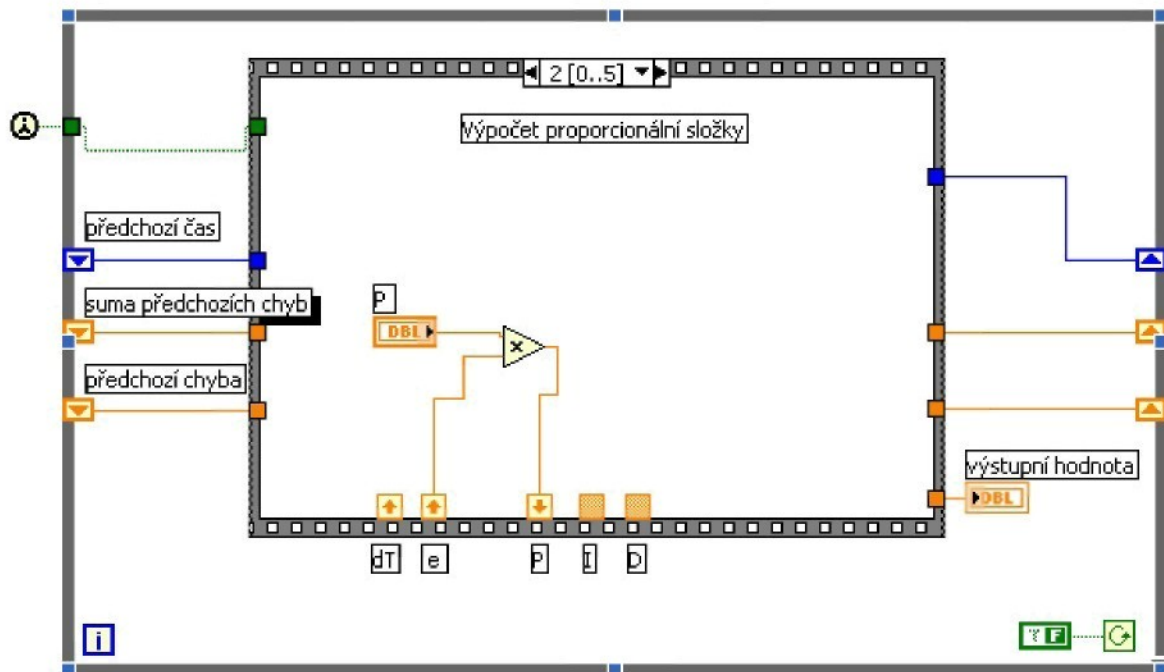
Regulátor naprogramovaný v LabVIEW 7.1



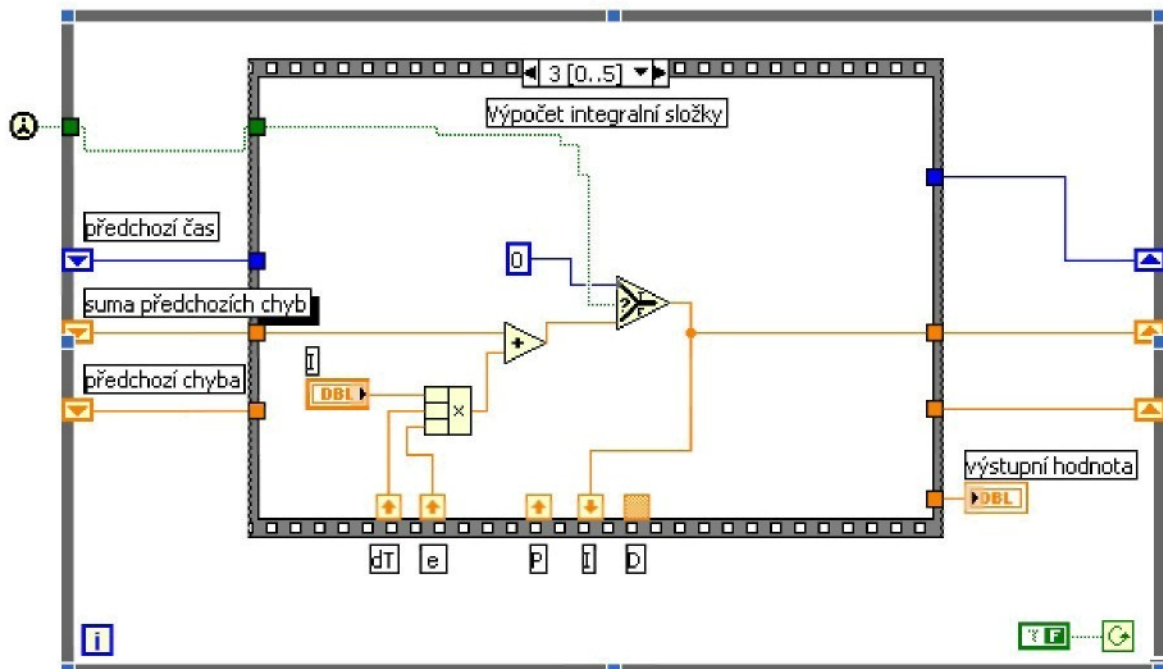
Sekvence číslo 0



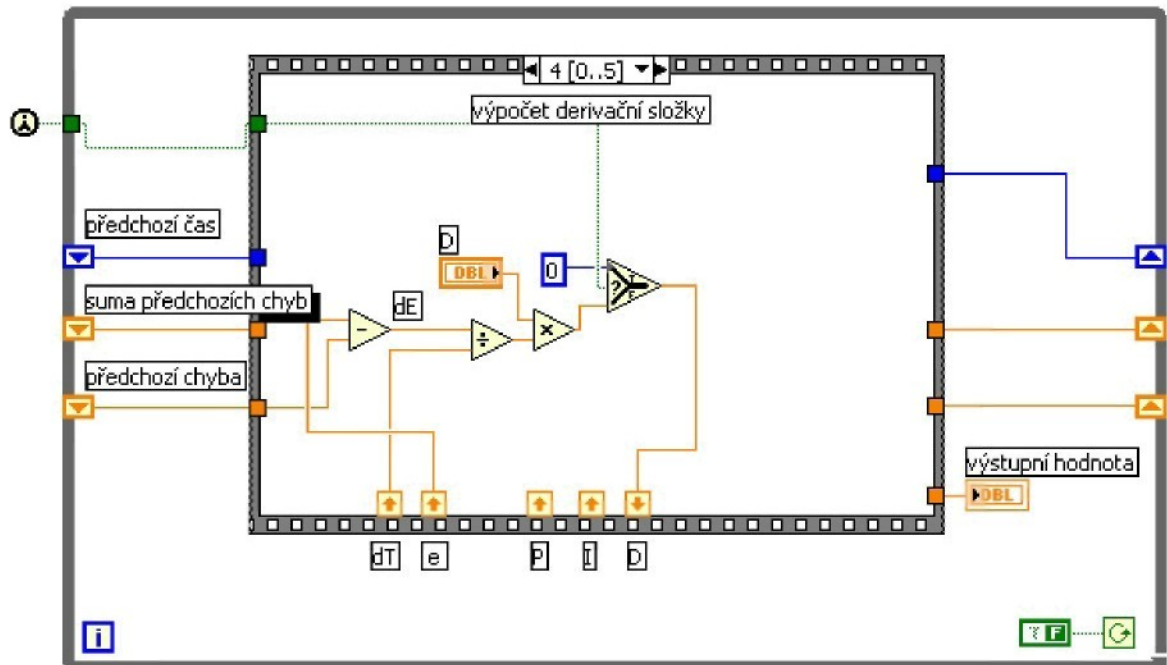
Sekvence číslo 1



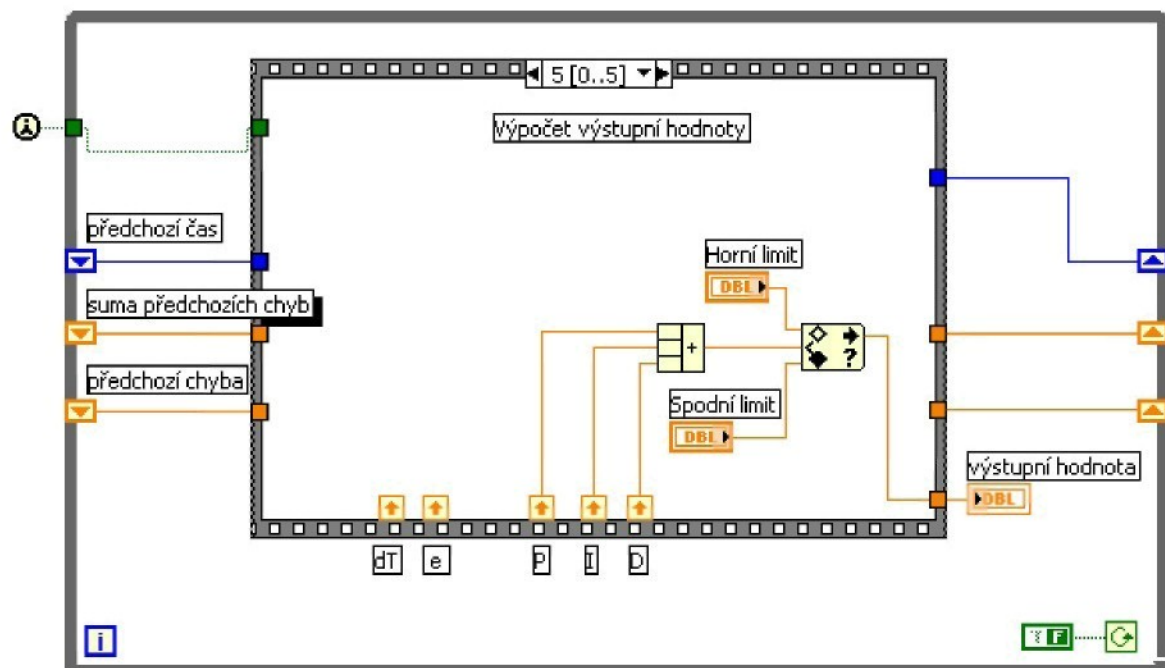
Sekvence číslo 2



Sekvence číslo 3



Sekvence číslo 4



Sekvence číslo 5

Proporcionální průtokové ventily MPYE

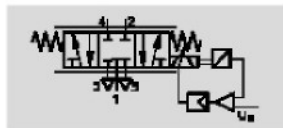
hlavní údaje a vysvětlení typového značení

Vysvětlení typového značení

	MPYE	5	1/8 LF	010	B
typ					
MPYE	proporcionální průtokový ventil				
funkce ventilu					
5	ventil 5/3				
připojení pneumatiky					
M5	M5				
1/8 LF	G1/8 Low Flow (malý průtok)				
1/8 HF	G1/8 High Flow (velký průtok)				
1/4	G1/4				
3/8	G3/8				
ovládací signál					
010	analogový napět'ový signál				
420	analogový proudový signál				
generace					
B	řada B				

technické údaje

funkce



- napětí
17 ... 30 V DC
- průtok
100 ... 2 000 l/min
- tlak
0 ... 10 barů

Varianty

- za dávání požadovaných hodnot ve formě a na logového napět'ového signálu 0 ... 10 V
- za dávání požadovaných hodnot ve formě a na logového proudového signálu 4 ... 20 mA

- servis oprav

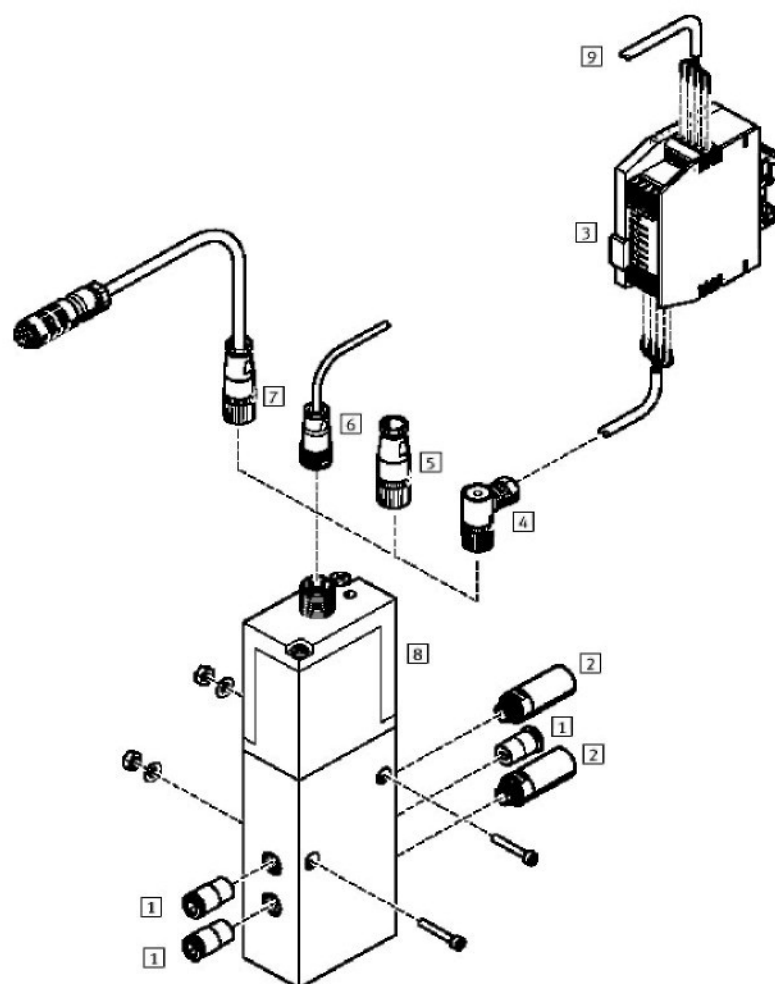


Obecné technické údaje					
připojení pneumatiky	M5	G1/8	G1/4	G3/8	
		malý průtok	velký průtok		
funkce ventilu	5/3, střední poloha uzavřená				
konstrukce	pístové šoupátko, přímé ovládání, řízená poloha				
těsnění	keramika				
druh ovládání	elektrické				
návrat do základní polohy	mechanickou pružinou				
ovládání	přímé				
směr proudění	nelze obrátit				
upevnění	průchozí díry				
montážní poloha ¹⁾	libovolná				
provozní médium	filtrovaný stlačený vzduch, nemazaný, jemnost filtrace 5 µm				
jmenovitá světlost [mm]	2	4	6	8	10
normální jmenovitý průtok [l/min]	100	350	700	1 400	2 000
hmotnost výrobku [g]	290	330	330	530	740

1) Pokud se proporcionální ventil při činnosti pohybuje, musí být namontován příčně ke směru pohybu.

Proporcionální průtokové ventily MPYE

přehled periférií



Příslušenství		krátký popis	→ strana
1	šroubení s nástrčnou koncovkou QS	pro připojení hadic na stlačený vzduch, s tolerovaným vnějším průměrem, dle normy CETOP RP 54 P	svazek 3
2	tlumič hluku	pro montáž do odvětrávacích výstupů	svazek 3
3	modul pro zadávání požadovaných hodnot MPZ	pro vytváření 6+1 analogových napěťových signálů	5 / 1.5-9
4	zásuvka SIE-WD-TR	úhlová, 4 póly, M12x1	5 / 1.5-11
5	zásuvka SIE-GD	přímá, 4 póly, M12x1	5 / 1.5-11
6	připojovací kabel KMPYE	–	5 / 1.5-11
7	připojovací kabel KVIA-MPYE	spojovací kabel pro analogový modul ventilového terminálu typ 03	5 / 1.5-11
8	proporcionální průtokový ventil MPYE	–	5 / 1.5-5
9	digitální vstup/výstup	pro řízení modulu pro zadávání požadovaných hodnot	–

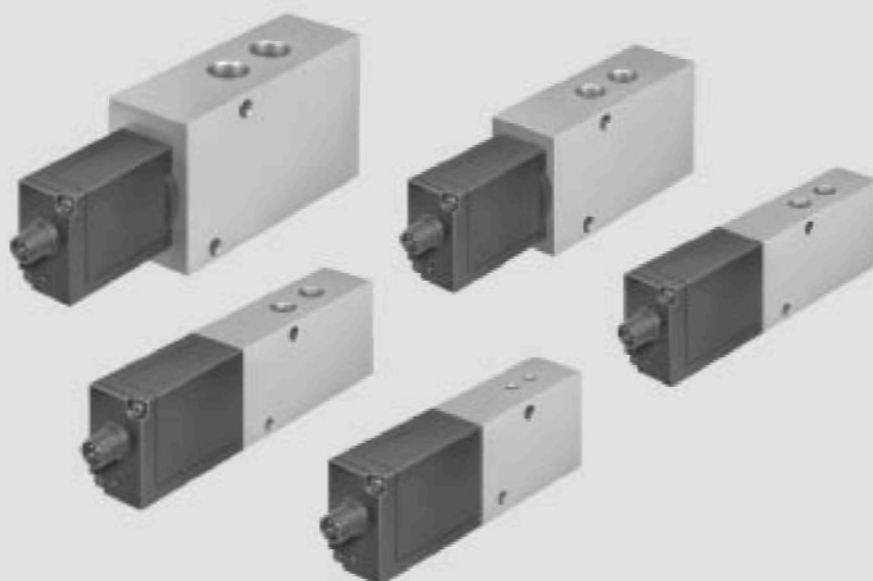


- vysoká dynamika
- regulační člen pro regulační obvod
- – funkce 5/3

Proporcionální průtokové ventily MPYE

hlavní údaje

FESTO



Všeobecné údaje

- Přímý ovládaný proporcionální ventil obsahuje polohovací šoupátko. Převádí analogový vstupní signál na odpovídající průřez na výstupu.
- V kombinaci s vnějším regulátorem koncových poloh a odměřovacím systémem lze vytvořit přesný pneumatický polohovací systém.
- Funkce škrcení pro změnu rychlosti válce.
- Funkce 5/3 pro změnu směru pohybu.

Velké množství variant

- vstup požadované hodnoty
 - analogový napětový signál
 - analogový proudový signál
- průtok
100 ... 2 000 l/min

Proporcionální průtokové ventily MPYE

hlavní údaje a vysvětlení typového značení



Pomalé časy cyklů stroje – rychlé přepínání naprogramovaných průtoků

- cyklus stroje lze zkrátit optimalizací rychlostí válců

–

montážní technika

–

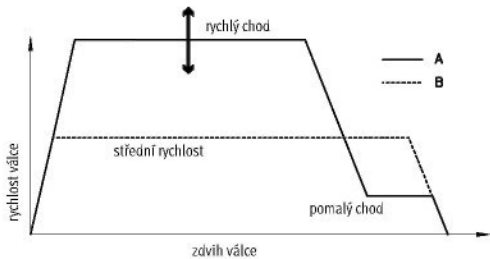
manipulační technika

–

nábytkový průmysl
- A:

Proporcionálními ventily lze nastavit různé rychlosti a zrychlení.
- B:

Regulace rychlosti při ovládání běžnými ventily škrcením na výstupu je velmi nepříznivá.



Proměnné rychlosti válců – plynulé řízení průtoku

- Rychlosti válců přizpůsobené procesům. Charakteristika s různým zrychlením (jemné zrychlení pro citlivé výrobky)

–

dodavatelé automobilů

–

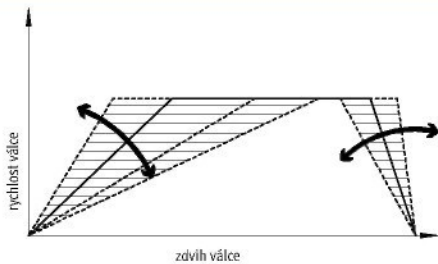
montážní technika

–

technika dopravníků

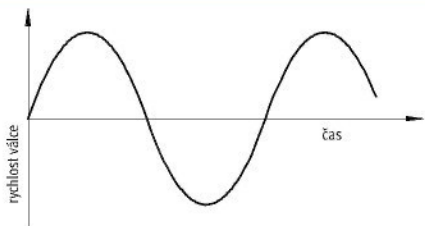
–

zkušební technika



Proporcionální ventil jako nastavovací člen – dynamická a rychlá změna průtoku

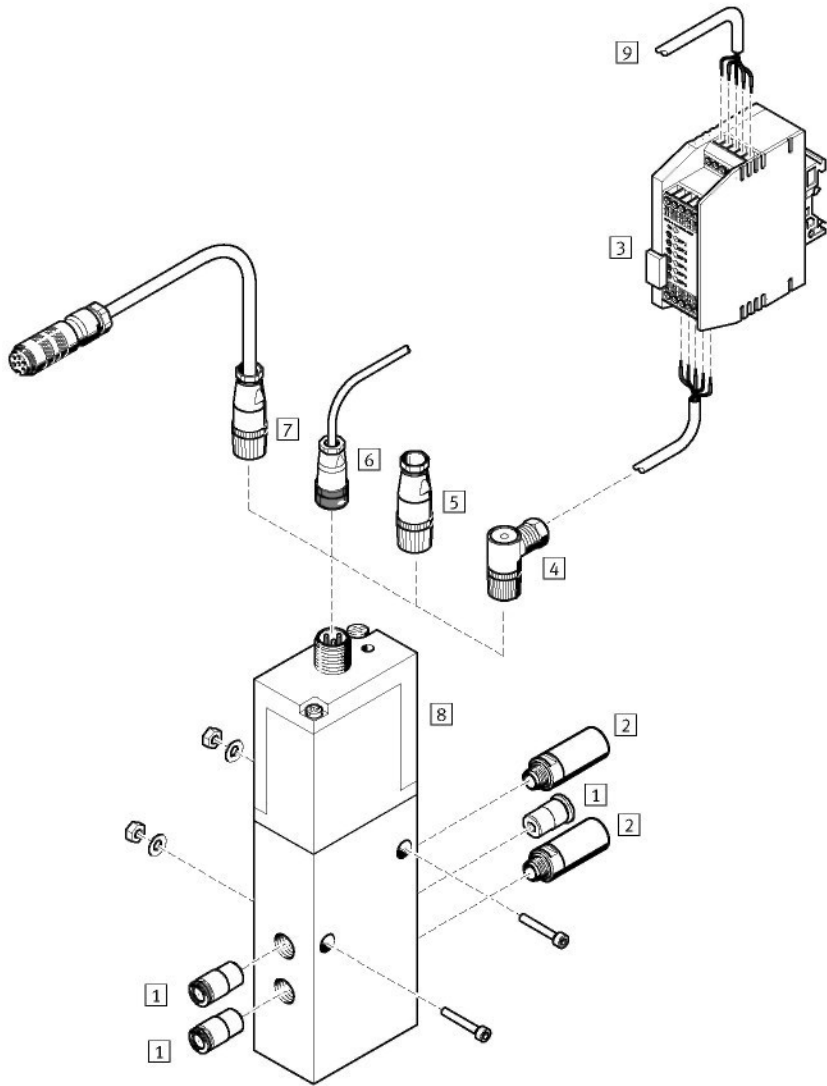
- únavové testy
- pneumatické polohování s SPC200
- SoftStop s regulátorem koncových poloh SPC11



Vysvětlení typového značení

		MPYE	–	5	–	1/8 LF	–	010	–	B
typ										
MPYE	proporcionální průtokový ventil									
funkce ventilu										
5	ventil 5/3									
připojení pneumatiky										
M5	M5									
1/8 LF	G1/8 Low Flow (malý průtok)									
1/8 HF	G1/8 High Flow (velký průtok)									
1/4	G1/4									
3/8	G3/8									
ovládací signál										
010	analogový napěťový signál									
420	analogový proudový signál									
generace										
B	řada B									

Proporcionální průtokové ventily MPYE
přehled periférií



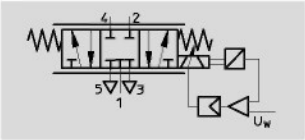
Příslušenství			
	krátký popis	→ strana	
1	šroubení s nástržnou koncovkou QS	pro připojení hadic na stlačený vzduch, s tolerovaným vnějším průměrem, dle normy CETOP RP 54 P	svazek 3
2	tlumič hluku	pro montáž do odvětrávacích výstupů	svazek 3
3	modul pro zadávání požadovaných hodnot MPZ	pro vytváření 6+1 analogových napětových signálů	5 / 1.5-9
4	zásuvka SIE-WD-TR	úhlová, 4 póly, M12x1	5 / 1.5-11
5	zásuvka SIE-GD	přímá, 4 póly, M12x1	5 / 1.5-11
6	připojovací kabel KMPYE	–	5 / 1.5-11
7	připojovací kabel KVIA-MPYE	spojujací kabel pro analogový modul ventilového terminálu typ 03	5 / 1.5-11
8	proporcionální průtokový ventil MPYE	–	5 / 1.5-5
9	digitální vstup/výstup	pro řízení modulu pro zadávání požadovaných hodnot	–

Proporcionální průtokové ventily MPYE

technické údaje



funkce



- - napětí
17 ... 30 V DC
- - průtok
100 ... 2 000 l/min
- - tlak
0 ... 10 barů

Varianty

- zadávání požadovaných hodnot ve formě analogového napětového signálu 0 ... 10 V
- zadávání požadovaných hodnot ve formě analogového proudového signálu 4 ... 20 mA

- - servis oprav

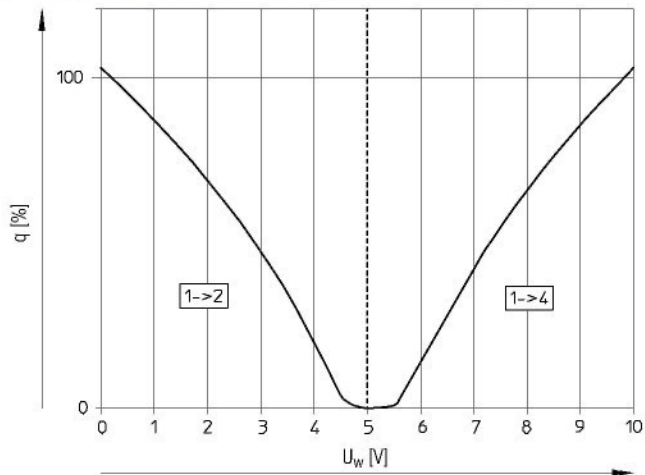


Obecné technické údaje						
připojení pneumatiky	M5	G1/8 malý průtok velký průtok		G1/4	G3/8	
funkce ventilu	5/3, střední poloha uzavřená					
konstrukce	pístové šoupátko, přímé ovládání, řízená poloha					
těsnění	keramika					
druh ovládání	elektrické					
návrat do základní polohy	mechanickou pružinou					
ovládání	přímé					
směr proudění	nelze obrátit					
upevnění	průchozí díry					
montážní poloha ¹⁾	libovolná					
provozní médium	filtrovaný stlačený vzduch, nemazaný, jemnost filtrace 5 µm					
jmenovitá světlost	[mm]	2	4	6	8	10
normální jmenovitý průtok	[l/min]	100	350	700	1 400	2 000
hmotnost výrobku	[g]	290	330	330	530	740

1) Pokud se proporcionální ventil při činnosti pohybuje, musí být namontován přičně ke směru pohybu.

MPYE-5-...-010-B s ovládáním napětím

průtok q při 6 > 5 barech v závislosti na požadované hodnotě napětí U

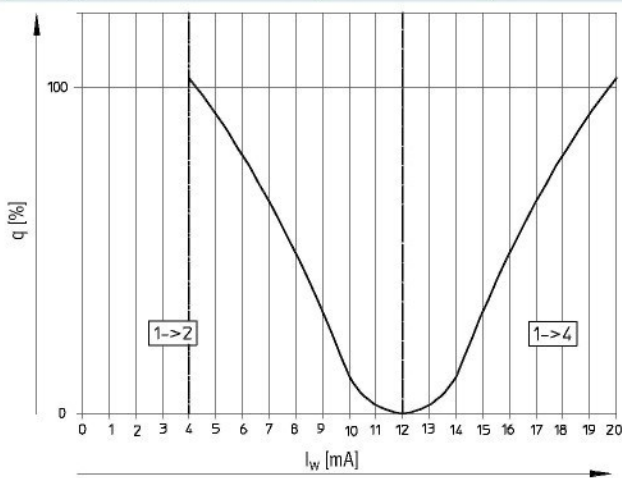


Proporcionální průtokové ventily MPYE

technické údaje



MPYE-5-...-420-B s ovládáním proudem
průtok q při 6 > 5 barech v závislosti na požadované hodnotě proudu I



Elektrické údaje							
připojení pneumatiky			M5	G1/8 malý průtok velký průtok		G1/4	G3/8
napájení			[V DC]	17 ... 30			
max. proudový příkon	ve střední poloze	[mA]	100				
	při plné výchylce	[mA]	1 100				
požadovaná hodnota	napětový typ	[V DC]	0 ... 10				
	proudový typ	[mA]	4 ... 20				
max. hystereze ¹⁾		[%]	0,4				
střední poloha ventilu	napětový typ	[V DC]	5 (±0,1)				
	proudový typ	[mA]	12 (±0,16)				
doba sepnutí ²⁾		[%]	100				
mezní frekvence ³⁾		[Hz]	125	100	100	90	65
bezpečnostní nastavení			při přerušení kabelu požadované hodnoty aktivní návrat do střední polohy				
ochrana proti přepólování	napětový typ	pro všechna elektrická připojení					
	proudový typ	pro požadovanou hodnotu					
stupeň krytí			IP65				
elektrické připojení			zásuvka, 4 póly, kulatá, M12x1				

1) Vztahuje se na maximální zdvih pístového šoupátka.
2) Při přehřátí se proporcionální ventil automaticky vypne (přejde do střední polohy) a po ochlazení se znovu zapne.
3) Odpovídá útlumu 3dB při maximálním zdvihu pohybu pístového šoupátka.

Provozní a okolní podmínky		
provozní tlak	[bar]	0 ... 10
teplota okolí	[°C]	0 ... 50
odolnost vibracím ¹⁾		dle DIN/IEC 68, část 2 -6, stupeň 2
trvalá odolnost nárazům ¹⁾		dle DIN/IEC 68, část 2 -27, stupeň 2
značka CE		dle 89/336/EWG (zákon EMV)
teplota média	[°C]	5 ... 40, není přípustná žádná kondenzace

1) Pokud se proporcionální ventil při činnosti pohybuje, musí být namontován příčně ke směru pohybu.

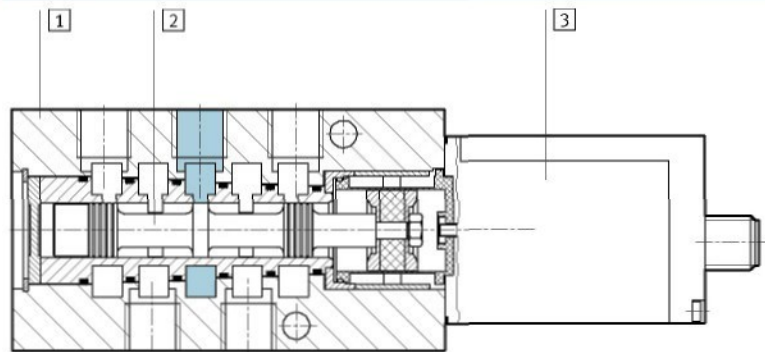
Proporcionální průtokové ventily MPYE

technické údaje



Materiály

funkční řez



1	těleso	eloxovaný hliník
2	šoupátko	hliník, tvrzený
3	těleso pro elektroniku	akrylbutadienstyrol, galvanizovaný
-	těsnění	nitrilkaučuk

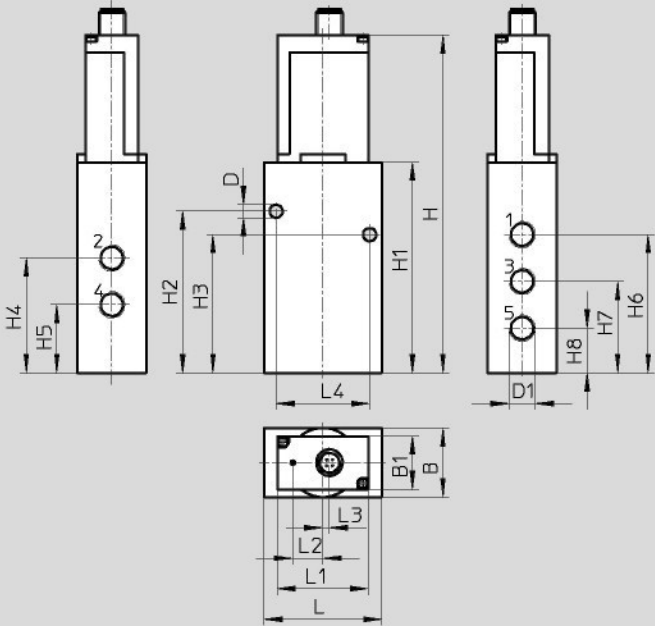
Proportional flow valves MPYE

technical data



Rozměry

CAD models for download → www.festo.cz/engineering



připojení pneumatiky D1	B	B1	D Ø	H	H1	H2	H3	H4
M5	26	–	5,5	129,9	69	56,1	38,1	32,1
G1/8	26	–	5,5	149,3	88,4	71,3	55,1	45,8
G3/4	35	26	6,5	164,6	103,7	79,6	68,1	56,6
G3/8	40	26	6,5	176,6	115,7	98,4	79,4	65,4

připojení pneumatiky D1	H5	H6	H7	H8	L	L1	L2	L3	L4
M5	20,1	38,1	26,1	14,1	45	–	14,8	3,2	32
G1/8	26,8	55,3	36,3	17,3	45	–	14,8	3,2	35
G3/4	33,6	68,1	45,1	22,1	58	45	14,8	3,2	46
G3/8	37,4	82,4	51,4	20,4	67	45	14,8	3,2	54

zapojení



- 24 V DC, napájecí napětí
- GND
- U_w/I_w, zadání požadované hodnoty
- GND

Údaje pro objednávky

připojení pneumatiky	napěťový typ 0 ... 10 V		proudový typ 4 ... 20 mA	
	č. dílu	typ	č. dílu	typ
M5	154 200	MPYE-5-M5-010-B	162 959	MPYE-5-M5-420-B
G1/8	151 692	MPYE-5-1/8LF-010-B	161 978	MPYE-5-1/8LF-420-B
	151 693	MPYE-5-1/8HF-010-B	161 979	MPYE-5-1/8HF-420-B
G1/4	151 694	MPYE-5-1/4-010-B	161 980	MPYE-5-1/4-420-B
G3/8	151 695	MPYE-5-3/8-010-B	161 981	MPYE-5-3/8-420-B

Proporcionální průtokové ventily MPYE

příslušenství – modul pro zadávání požadovaných hodnot MPZ

FESTO

napětí
20 ... 30 V DC

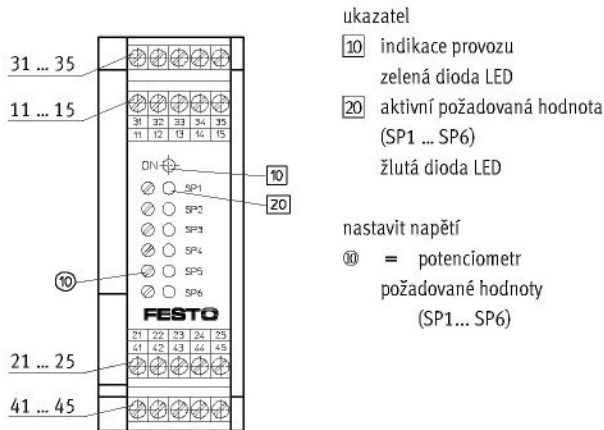
- funkce
- vytváření analogových požadovaných hodnot 6+1 pro proporcionální ventily MPPE, MPPES a MPYE
 - digitální ovládání
 - výstupní napětí nastavitelné otočným potenciometrem



MPZ-1-24DC-SGH-6-SW

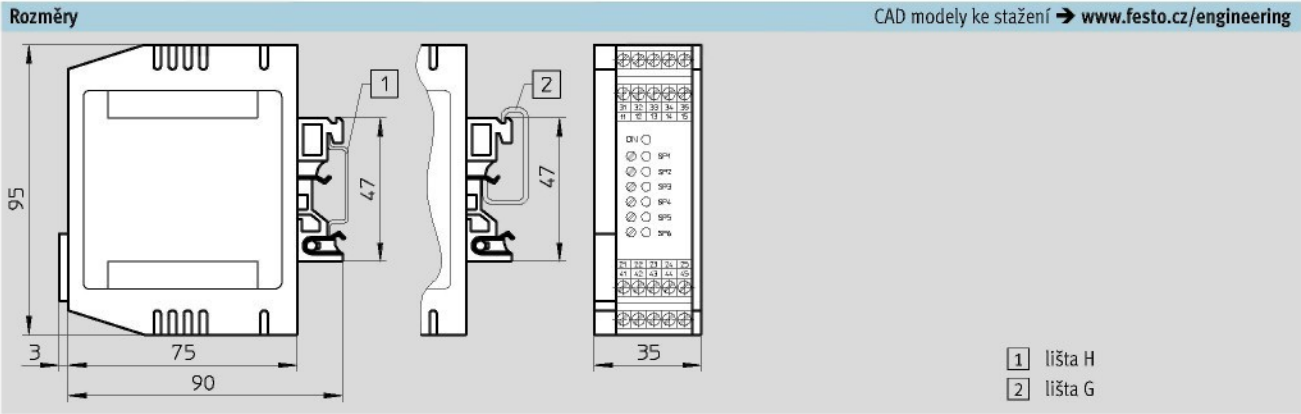
Obecné technické údaje				
funkce			digitálně-analogový obvod s analogovým výstupem	
způsob upevnění			montáž na lištu G nebo H	
montážní poloha			libovolná	
elektrické připojení	šroubovací svorkovnice	[mm²]	2,5	
rozsah napájecího napětí		[V DC]	20 ... 30	
výstupní napětí		[V DC]	0 ... 10	
výstupní proud		[mA]	5	
příkon při 24 V DC		[W]	1,5	
napájení nastavení požadované hodnoty	napětí ± 3 %	[V]	10	
	proud ± 3 %	[mA]	6	
vnější vstup požadované hodnoty	napětí	[V DC]	0 ... 10	
	vstupní odpor	[kΩ]	cca 100	
	potenciometr	[kΩ]	2,5 ... 10	
řízení požadované hodnoty	vstupní odpor	[kΩ]	3	
elektromagnetická snášenlivost (DIN 843, část 2 a 4)			stupeň 2	
zbytkové zvlnění			max. 10 % provozního napětí	
indikace	napájení		zelená dioda LED	
	aktivní požadovaná hodnota		žlutá dioda LED	
teplota okolí			[°C]	0 ... 60
stupeň krytí dle DIN 60 529			IP20	
hmotnost výrobku			[g]	190

Přívody a obslužné prvky			
přívody			priorita
31	ovládání požadované hodnoty 1	SP1	1 (nejvyšší)
32	ovládání požadované hodnoty 2	SP2	2
33	ovládání požadované hodnoty 3	SP3	3
34	ovládání požadované hodnoty 4	SP4	4
35	ovládání požadované hodnoty 5	SP5	5
11	ovládání požadované hodnoty 6	SP6	6
13	ovládací přívod	0 V	–
21	ovládací přívod	0 V	–
22	vnější vstup požadované hodnoty	U _{w, in}	7 (nejnižší)
23	ovládací přívod	10 V DC	–
24	stínění	PE	–
41	ovládací přívod	0 V DC	–
42	výstup požadované hodnoty	U _{w, out}	–
43	napájení	–	–
44	zem	GND	–
45	napájení	+	–



Proporcionální průtokové ventily MPYE

příslušenství – modul pro zadávání požadovaných hodnot MPZ



Údaje pro objednávky			
	popis	č. dílu	typ
	modul pro zadávání požadovaných hodnot analogových napětových signálů 6 + 1	36 101	MPZ-1-24DC-SGH-6-SW

Proporcionální průtokové ventily MPYE
 příslušenství



Údaje pro objednávky		technické údaje → svazek 4	
	popis	č. dílu	typ
zásuvky pro čidla			
	přímá, 4 póly, M12x1	18 494	SIE-GD
	úhlová, 4 póly, M12x1	12 956	SIE-WD-TR
připojovací kabely			
	přímá zásuvka se stíněným kabelem, 5 m	151 909	KMPYE-5
	přímá zásuvka se stíněným kabelem, délka na přání ¹⁾	151 910	KMPYE-...
	spojovací kabel pro analogový modul ventilového terminálu typ 03 přímá zásuvka, s kabelem, 5 m	161 984	KVIA-MPYE-5
	spojovací kabel pro analogový modul ventilového terminálu typ 03 přímá zásuvka, s kabelem, 10 m	161 985	KVIA-MPYE-10
	spojovací kabel pro interakce osy u systému řízení os SPC200 přímá zásuvka, kabel, 0,3 m	170 239	KMPYE-AIF-1-GS-GD-0,3
	spojovací kabel pro interakci osy u systému řízení os SPC200 přímá zásuvka, kabel, 2 m	170 238	KMPYE-AIF-1-GS-GD-2
šroubení s nástrčnými koncovkami			
	pro připojení hadic na stlačený vzduch, s tolerovaným vnějším průměrem, dle normy CETORP RP 54 P	→ svazek 3	
tlumič hluku			
	pro montáž do odvětrávacích výstupů	→ svazek 3	
redukce			
	-	→ svazek 3	

1) maximálně 10 m