



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ PROPORCIONÁLNÍHO HYDRAULICKÉHO VENTILU

CONTROL OF PROPORTIONAL DIRECTIONAL CONTROL VALVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Hoferek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

BRNO 2017

Ing. Libor Veselý, Ph.D.

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Martin Hoferek

ID: 146006

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Řízení proporcionálního hydraulického ventilu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a realizace regulátoru proporcionálního hydraulického ventilu PRM7-04 pro ovládání hydromotoru.

1. Proveďte literární rešerši a průzkum trhu v oblasti hydraulických ventilů
2. Popište použité prvky a systém vodní elektrárny
3. Identifikujte vlastnosti soustavy a proveďte návrh regulátoru
4. Realizujte navržený regulátor v PLC AC-500 s využitím prostředí ABB Control Builder PLUS
5. Řešení uveďte do provozu na vodní elektrárně v Rájci - Jestřebí

Práce bude realizována ve spolupráci se společností Mavel a.s.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JELALI, M., KROLL, A.: Hydraulic Servo-systems Modelling, Identification and Control. London: Springer London, 2003. ISBN 1447100999.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 15.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Libor Veselý, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a implementací řízení proporcionálního hydraulického ventilu PRM7-04, který bude součástí hydraulického systému řídící malou vodní elektrárnu v Rájci – Jestřebí. Tento ventil bude sloužit k ovládání jednoho z rozváděcích kol dvojité Francisovy turbíny. Zadavatelem práce je firma Mavel a.s., která je vlastníkem MVE. Cílem práce je vytvořit řízení tohoto ventilu dle požadavků zadavatele, jeho implementace do řídicího systému a uvedení do provozu.

Klíčová slova

proporcionální hydraulický ventil, polohová regulace, ABB Control Builder Plus, AC-500, MVE

Abstract

The thesis deals with design and implementation of proportional hydraulic valve, which will be integrated to hydraulic system of small hydro in Rájec - Jestřebí. This valve will be used to control one of the wicket gates of double Francis turbine. The thesis is processed for the company Mavel a.s., which is the owner of SH. The goal of this thesis is to create control of the valve according to the client's requirements, its implementation to the control system and commissioning.

Keywords

proportional hydraulic valve, position control, ABB Control Builder Plus, AC-500, small hydro

Bibliografická citace:

HOFEREK, M. *Řízení proporcionálního hydraulického ventilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 72s.
Vedoucí práce: Ing. Libor Veselý, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Řízení proporcionálního hydraulického ventilu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 15. května 2017

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Liboru Veselému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Děkuji svému nadřízenému a zároveň konzultantovi Ing. Josefu Rybkovi za ochotnou odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Děkuji své rodině a blízkým za podporu při celém studiu.

V Brně dne 15. května 2017

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	MVE RÁJEC – JESTŘEBÍ	2
2.1	Struktura MVE.....	3
2.2	Řídící systém.....	6
3	Hydraulické systémy	9
3.1	Základní struktura hydraulických systémů.....	9
3.2	Základní elementy hydraulických systémů	10
3.2.1	Ventily	11
3.2.2	Čerpadla.....	14
3.2.3	Hydraulické aktuátory	14
3.3	Průzkum trhu v oblasti hydraulických prvků.....	15
4	Hydraulický ventil PRM7-04	16
4.1	Popis konstrukce a funkce	16
4.2	Integrovaná elektronika.....	17
4.3	Elektrické připojení	18
4.4	Konfigurace.....	20
4.4.1	Konfigurační program PRM7Conf.....	20
4.4.2	Nastavení ventilu	23
4.5	Variety rozváděčů řady PRM7 - 04	23
4.6	PRM7 – 043Y11/04-24E01.....	26
5	Požadavky.....	29
6	Popis soustavy	31
6.1	Rozbor a popis soustavy z pohledu řízení.....	31
7	Měření.....	33
7.1	Časová konstanta hydraulického válce	33
7.2	Závislost řídicího napětí na průtoku ventilem	34
7.3	Hystereze hydraulického ventilu.....	38
8	Návrh regulátoru	40
8.1	Výběr regulátoru.....	40
8.2	Diskretizace.....	45
8.3	Kód regulátoru a jeho simulace.....	45
9	Implementace.....	49
9.1	Popis kódu	49
9.2	Regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty	51
9.3	Adaptivní zesílení	53
	Závěr.....	57
	Literatura	59

Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	60
Seznam příloh.....	61

Seznam obrázků

obr. 1: Princip derivační vodní elektrárny	2
obr. 2: Převod z turbíny na generátor	3
obr. 3: Dvojitá Francisova turbína a její popis, oběžné kolo [16]	3
obr. 4: Pohled na hřídel oběžného kola ze strojovny	4
obr. 5: Hydraulický válec BQ322 ovládající RK2	4
obr. 6: Hydraulický systém + Řídící rozvaděč	5
obr. 7: Procesorová jednotka PM583 [11]	7
obr. 8: Nastavení 3. vstupu AI531 na 4 až 20 mA	7
obr. 9: Analogová vstupně výstupní karta AX521, analogová vstupní karta AI531 [11]	8
obr. 10: Základní struktura hydraulických systémů	10
obr. 11: Čtyřcestný třípolohový ventil ovládaný elektrickým signálem	12
obr. 12: Ilustrace překrytí šoupátek [1]	14
obr. 13: Popis konstrukce ventilu PRM7-04 [2]	17
obr. 14: Schéma integrované elektroniky ve ventilu [2]	18
obr. 15: Konektor K1 – M23	19
obr. 16: Konektor K2 – M12x1	19
obr. 17: Konektor K3 – M12x1	20
obr. 18: PRM7Conf – Panel Nástrojů	21
obr. 19: Blokové funkční schéma rozváděče v programu PRM7Conf pro model E04S01	22
obr. 20: Blokové funkční schéma rozváděče v programu PRM7Conf pro model E01	22
obr. 21: Tabulka parametrů PRM7Conf	23
obr. 22: Struktura typového klíče rozváděčů PRM7	25
obr. 23: Závislost průtoku na pracovním tlaku při různých otevřeních ventilu	27
obr. 24: Závislost průtoku na hodnotě řídicího signálu	27
obr. 25: Instalovaný ventil PRM7 – 043Y11/04-24E01 v hydraulickém systému MVE	28
obr. 26: Požadovaný průběh otevírání/zavírání rozváděcího kola	29
obr. 27: Ideové regulační schéma	30
obr. 28: Popisné schéma regulačního obvodu	32
obr. 29: Průběh otevírání a zavírání válce	33
obr. 30: Průběhy otevírání válce při různém řídicím napětím	34
obr. 31: Průběhy zavírání válce při různém řídicím napětím	35
obr. 32: Závislost průtoku na řídicím napětí	36

obr. 33: Vybrané úseky závislosti průtoku na řídicím napětí pro účely proložení funkcí	37
obr. 34: Polynomická regrese 2. řádu závislosti řídicího napětí na průtoku	37
obr. 35: Měření hystereze při otevírání válce s krokem napětí 0,67 V/s	38
obr. 36: Vypočtená hystereze při otevírání válce s krokem napětí 0,67 V/s	38
obr. 37: Měření hystereze při zavírání válce s krokem napětí 0,67 V	39
obr. 38: Vypočtená hystereze při zavírání válce s krokem napětí 0,67 V	39
obr. 39: Simulační schéma regulátorů P a PT1	41
obr. 40: Simulace regulační smyčky s regulátorem PT1	42
obr. 41: Výsledek simulace regulační smyčky s regulátorem PT1	42
obr. 42: Akční zásah regulátoru PT1 s různými časovými konstantami	43
obr. 43: Simulace regulační smyčky s regulátorem PT1 a s filtrací žádané hodnoty	43
obr. 44: Výsledek simulace regulační smyčky regulátoru PT1 a s filtrací žádané hodnoty	44
obr. 45: Akční zásah regulátoru PT1 s filtrací žádané hodnoty	44
obr. 46: Simulace diskrétního přenosu PT1 (8)	46
obr. 47: Simulace diskrétního přenosu PT1 pro implementaci do PLC	46
obr. 48: Simulace správnosti řešení	47
obr. 49: Výsledek simulace diskrétního řešení spojitě soustavy	48
obr. 50: Průběh otevírání s regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty $T = 10$ s ..	51
obr. 51: Akční zásah při otevírání s regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty $T = 10$ s ..	52
obr. 52: Průběh zavírání s regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty $T = 10$ s ...	52
obr. 53: Akční zásah při zavírání s regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty $T = 10$ s ..	53
obr. 54: Vytvoření závislosti pro adaptivní zesílení	54
obr. 55: Průběh při otevírání válce s regulátorem PT1 a adaptivním zesílením	54
obr. 56: Akční zásah při otevírání válce s regulátorem PT1 a adaptivním zesílením	55
obr. 57: Průběh při zavírání válce s regulátorem PT1 a adaptivním zesílením	55
obr. 58: Akční zásah při zavírání válce s regulátorem PT1 a adaptivním zesílením ..	56
obr. 59: Průběh a akční zásah při otevírání válce a malé změně žádané hodnoty s regulátorem PT1 a adaptivním zesílením	56

Seznam tabulek

tab. 1: Popis procesorové jednotky PM 583	6
tab. 2: Popis analogového I/O modulu AX521	8
tab. 3: Porovnání vlastností servoventilů a proporcionálních ventilů [1]	13
tab. 4: Popis prvků pro schéma integrované elektroniky.....	18
tab. 5: Zapojení konektoru K1 [2]	19
tab. 6: Zapojení konektoru K2 [2]	19
tab. 7: Zapojení konektoru K3 [2]	20
tab. 8: Označení a symbolů variant ventilů PRM7-04 [2]	24
tab. 9: Nepřímé stanovení závislosti řídicího napětí na průtoku ventilem	35
tab. 10: Typy regulátorů pro různé druhy regulace [1]	40

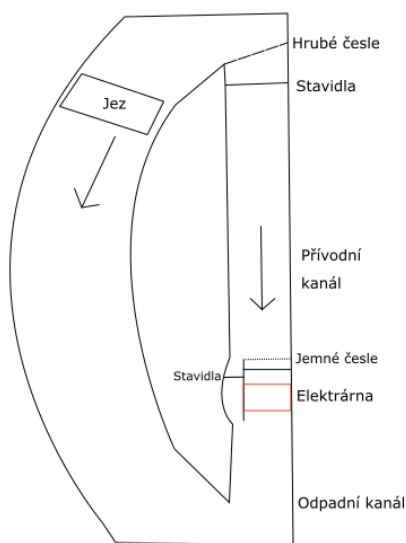
1 ÚVOD

Téma diplomové práce je zadáno firmou Mavel a.s., která je výrobcem vodních elektráren a zároveň vlastníkem malé vodní elektrárny v Rájci – Jestřebí. Vznikl požadavek na návrh a realizaci implementace proporcionálního hydraulického ventilu PRM7-04. Tento ventil bude sloužit k řízení jednoho z rozváděcích kol dvojité Francisovy turbíny. V hydraulickém systému elektrárny nyní slouží k tomuto účelu klasický třícestný směrový ventil (rozdávěč), který neumožňuje proporcionalitu. Nevýhoda tohoto řešení je nemožnost tvarovat průběh pohybu rozváděcího kola a působení rázů v soustavě plynoucích z „on-off“ principu ventilu. Nasazení proporcionálního ventilu tedy přináší precizní kontrolu průtoku hydraulické kapaliny, což umožňuje přizpůsobovat chování rozváděcího kola dle stanovených požadavků a tím zamezení rázů. Celá práce bude postupovat v následujících krocích. Na začátek bude proveden teoretický úvod do dané problematiky. Budou popsány vlastnosti ventilu PRM7-04 a možnosti jeho konfigurace. Následně budou definovány požadavky na vlastnosti regulátoru a provedena analýza systému. Poté se provede samotná implementace ventilu do hydraulické soustavy elektrárny a budou naměřeny potřebné charakteristiky a údaje potřebné k dalšímu postupu práce. Po vyhodnocení naměřených hodnot se provede identifikace soustavy a příprava k návrhu řízení. Následně se provede samotný návrh regulátoru a popíše tak, aby jej bylo možné implementovat do řídicího systému elektrárny. Řídicí systém elektrárny obstarává PLC AC – 500 od firmy ABB a k jeho konfiguraci slouží software Control Builder Plus. Poté se může přistoupit k testování a ladění řídicího programu. Výsledkem celé práce tedy bude samotné uvedení do provozu.

2 MVE RÁJEC – JESTŘEBÍ

Malá vodní elektrárna je situována v Rájci – Jestřebí v areálu pobočky firmy Mavel a.s., která je vlastníkem elektrárny. Firma Mavel a.s. se zabývá výrobou vodních turbín typu Kaplan, Francis a Pelton a kompletní realizací technologických celků vodních elektráren. Elektrárna v Rájci – Jestřebí prošla v roce 2006 poměrně rozsáhlou rekonstrukcí. Tato rekonstrukce obsahovala kromě jiného také nové kompletní řízení celého objektu. Před rekonstrukcí se elektrárna řídila klasickým olejovým regulátorem, který nahradilo elektrické řízení kontrolované PLC automatem.

Elektrárna je řešena jako derivační a leží ve vzdálenosti cca 215 m od jezu, který je umístěn na cca 39 km řeky Svitavy. Derivační znamená, že je hydroenergetický spád vytvořený převážně derivačním kanálem. Nejnižší hodnoty spádu v derivačních elektrárnách bývají okolo 10 m, nejvyšší 200 m a víc. Princip je znázorněn na obrázku níže (obr. 1).



obr. 1: Princip derivační vodní elektrárny

Voda je k turbíně přiváděna kanálem, který začíná u jezu a je tvořen betonovým korytem šířky 3,7 m, hloubky 2 m s průměrným sklonem 0,51 promile. Odpad do řeky je zaústěn kanálem na 40,42 km. Vtok do prostoru, kde je umístěna vodní turbína, je chráněn česlicovou stěnou z ocelových nosníků a prutů. Obsluha česlí je manuální. Před česlicemi je dřevěná norná stěna, jejíž poloha je stavitelná elektromechanicky. Pro odstranění rázů v náhonu je za nornou stěnou umístěno stavidlo šířky 2,0 m o průtočné kapacitě 5 m³/s.

2.1 Struktura MVE

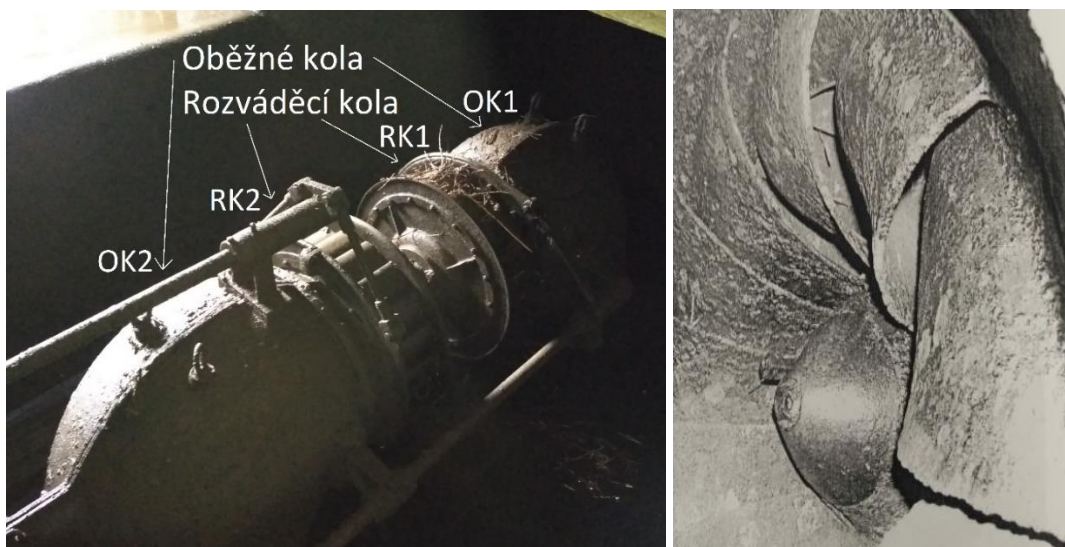
Hlavním elementem elektrárny je dvojitá Francisova turbína z roku 1928 od firmy Prokop. Průměr oběžných kol je 800 mm o maximálním výkonu 114-115 kW. Převod turbíny na generátor je tvořen dlouhým koženým řemenem (obr. 2). Soustrojí pracuje v synchronním režimu.



obr. 2: Převod z turbíny na generátor

Vyrobená elektrická energie je spotřebována přímo ve výrobě a přebytek je dodáván do sítě.

Dvojitá Francisova turbína se tedy skládá z dvou oběžných kol. Přívod vody na tyto kola řídí tzv. rozváděcí kola (obr. 3).



obr. 3: Dvojitá Francisova turbína a její popis, oběžné kolo [16]

Tyto rozváděcí kola řídí průtok vody na oběžná kola pomocí naklánění listů, které se ovládají přes mechanický převod (obr. 4) hydraulickým válcem.



obr. 4: Pohled na hřídel oběžného kola ze strojovny

Jedná se o hydraulický válec ZH1 70/40x180 vyrobený firmou HYDRAULICS s.r.o. a nese interní označení BQ322. Válec (obr. 5) je řízen třístavovým hydraulickým ventilem. Ten bude nahrazen novým proporcionálním ventilem, který bude skrz válec řídit rozváděcí kolo č. 2 – RK2, které řídí průtok na OK2.



obr. 5: Hydraulický válec BQ322 ovládající RK2

Poloha hydraulického válce je sledována magnetostrikčním snímačem polohy. Jedná se o snímač Balluff BTL01P0. Snímač je napájen 24 V a má analogový proudový výstup 4–20 mA. [12] Jeho vzorkovací frekvence je 1 kHz a rozlišení menší než 0.2 μ A. Pracuje na magnetostrikčním principu. Princip magnetostrikce spočívá ve schopnosti některých materiálů pod vlivem magnetického pole měnit své rozměry nebo při deformaci naopak vykazovat magnetizaci. Interakce magnetického pole permanentního magnetu a magnetického pole magnetostrikčního vodiče vybudí ve feromagnetickém vodiči torzní magnetostrikční impuls. Na jednom konci snímače je impuls pohlcen tlumícím prvkem (z důvodu odrazů) a na druhé straně se zachytává snímačem. Ze známé rychlosti šíření mechanického vzruchu v daném feromagnetickém materiálu a doby od vyslání proudového pulsu se určí poloha. [13] Tyto snímače se používají pro bezkontaktní měření polohy. Je velmi robustní a odolný, tudíž vhodný pro průmyslové řešení. Mezi další výhody magnetostrikčních snímačů patří linearita až 0,01 %, nulová údržba, absolutní měřicí systém, krytí až IP68, necitelnost na znečištění, jednoduchá montáž a bez nutnosti přívodu energie k pohyblivému magnetu [4]. Jak je z obrázku patrné, pohyblivý magnet je přes tyč připojen k referenčnímu bodu, který je umístěn na kloubu, ke kterému je upevněn i válec, jehož polohu snímá. Tím se zajišťuje vzájemná nepohyblivost.

Hydraulický systém integrovaný do elektrárny je od společnosti Argo-Hytos. Na obrázku níže jej můžete vidět společně s rozvaděčem, kde je umístěn i řídicí systém s PLC AC – 500 (obr. 6).



obr. 6: Hydraulický systém + Řídicí rozvaděč

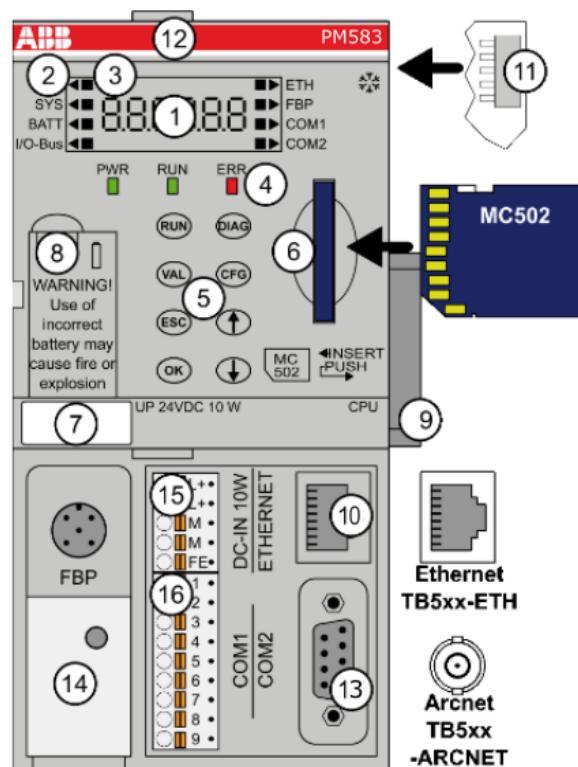
2.2 Řídící systém

Chod elektrárny je řízen pomocí PLC od firmy ABB z řady AC-500. Konkrétně jde o procesorovou jednotku PM583. Pro analogové vstupy je zde modul AI531. Dále kombinovaný modul se čtyřmi analogovými vstupy a čtyřmi výstupy AX521. Pro digitální vstupy slouží modul DI524. Poslední dva moduly jsou kombinované digitální vstupy/výstupy DC532 a DC522. Dále komunikační Ethernet karta CM577, která má další dva Ethernet porty, pak komunikační karta se sériovou linkou CM 574. Vývojové prostředí pro PLC od firmy ABB se nazývá ABB Control builder Plus. Ten využívá pro programování software Codesys, což je vývojové prostředí pro průmyslové aplikace dle mezinárodního průmyslového standardu IEC 61131-3.

Procesorová jednotka PM583 (obr. 7) je hlavním prvkem řídicího systému. V následující tabulce jsou popsány jednotlivé prvky procesorové jednotky. [11]

1	6 – ti místný segmentový displej s podsvícením
2	„Šipky“ slouží pro orientaci v menu
3	„Čtvereček“ slouží k zobrazení aktivní komunikace
4	Stavové led diody (Power, Run, Error)
5	Tlačítka pro pohyb v menu PLC
6	Slot pro paměťovou SD kartu
7	Oblast sloužící k umístění popisku (např. v rámci rozvaděče)
8	Skříňka pro baterii TA 521
9	Úchytka na DIN lištu
10	RJ45 konektor pro Ethernetové připojení
11	I/O sběrnice pro připojení I/O modulů
12	Odejmutí procesorové jednotky z patice
13	D-SUB konektor pro sériovou linku COM1
14	Konektor pro připojení FieldBus
15	Patice pro připojení napájecího napětí
16	Patice pro připojení sériové linky COM2

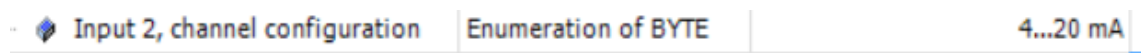
tab. 1: Popis procesorové jednotky PM 583



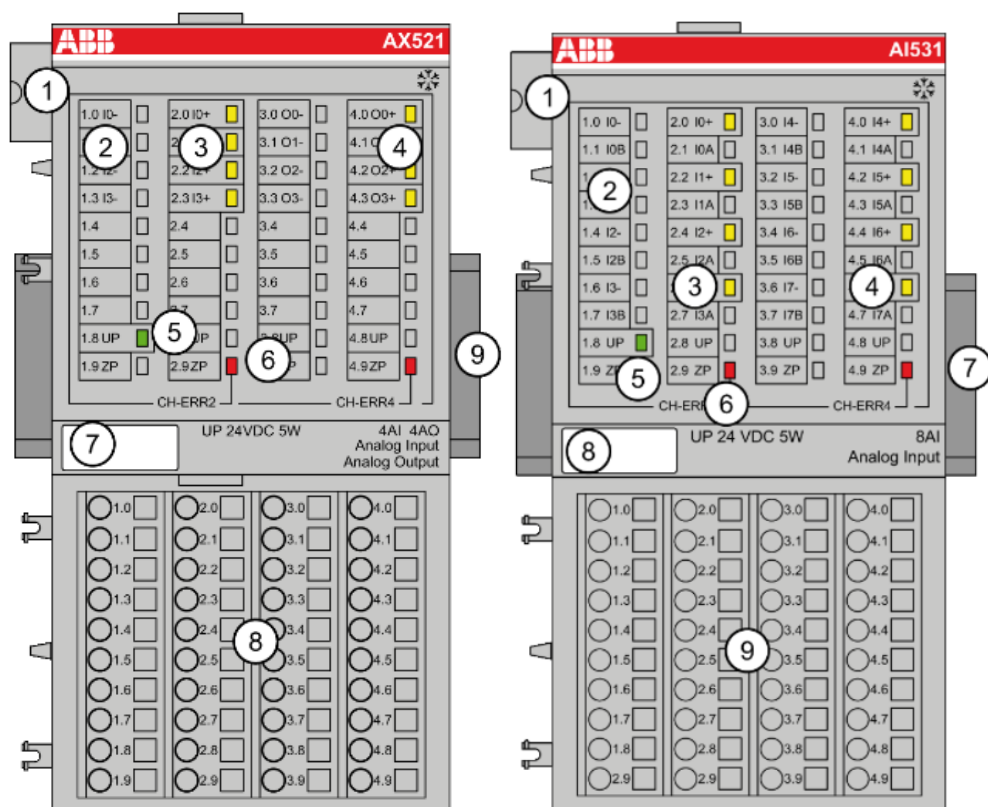
obr. 7: Procesorová jednotka PM583 [11]

Procesor PM583-ETH, který je instalován na MVE má programovou paměť 1 MB, cyklus pro binární instrukci 0,05 μ s, pro word 0,06 μ s a pro pohyblivou řádovou čárku 0,5 μ s.

Z připojených přídatných modulů nás budou zajímat moduly AX521, který na sobě má 4 analogové vstupy a 4 analogové výstupy a AI531, který obsahuje 8 analogových vstupů. Pro řízení ventilu využijeme první výstup modulu AX521 (obr. 9). Výstupy jsou modifikovatelné a umožňují 3 druhy nastavení a to ± 10 V, 0...20 mA nebo 4...20 mA. Pro signál ze snímače Balluff BTL01P0 pro snímání polohy hydraulického válce, je použit třetí vstup (Input 2) na kartě AI531. V programu Control Builder PLUS se tento vstup nakonfiguruje pro signál 4 až 20 mA.



obr. 8: Nastavení 3. vstupu AI531 na 4 až 20 mA



obr. 9: Analogová vstupně výstupní karta AX521, analogová vstupní karta AI531 [11]

1	Připojení k I/O sběrnici
2	Popisky k signálům
3	LED pro zobrazení úrovně vstupu/výstupu (mění intenzitu světla)
4	LED pro zobrazení úrovně vstupu/výstupu (mění intenzitu světla)
5	LED pro zobrazení napájení
6	LEDky pro zobrazení chyby
7	Oblast sloužící k umístění popisku (např. v rámci rozvaděče)
8	Konektory pro připojení vodičů na patici TU515 nebo TU516
9	Úchytka na DIN lištu

tab. 2: Popis analogového I/O modulu AX521

Protože jsou navzájem propojeny napájecí piny, stačí přivést napětí 24 V DC například jenom na 1.8. Piny 1.9, 2.9, 3.9 a 4.9 jsou taktéž vzájemně propojeny a slouží k připojení 0 V ze zdroje.

3 HYDRAULICKÉ SYSTÉMY

Pro komplexnost celé práce je nutné zabývat se i problematikou hydraulických systémů. V této kapitole bude popsána základní struktura hydraulických soustav a funkce jeho jednotlivých částí. Dále budou podrobněji popsány jednotlivé elementy, ze kterých se celá soustava sestává a jejich konstrukční varianty.

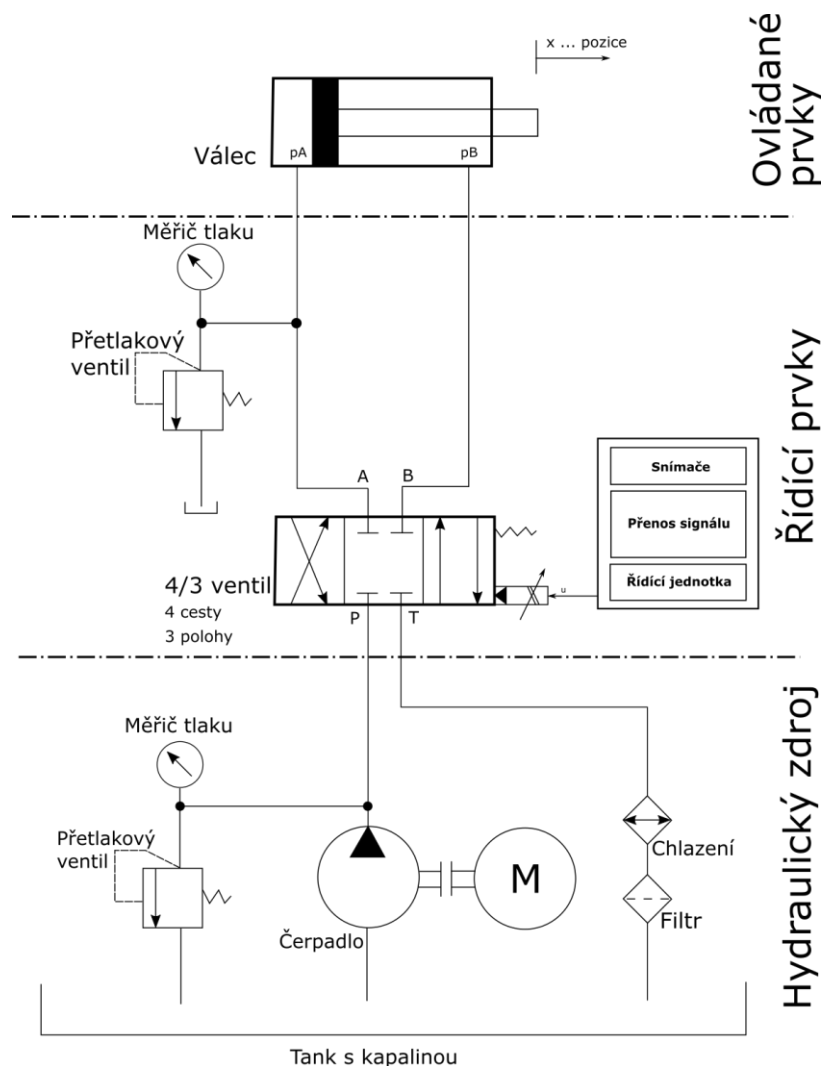
Hlavními přednostmi hydraulických pohonů jsou jejich poměr hmotnosti vůči výkonu, dlouhá životnost, rychlá odezva, rozběh z klidu i při nejvyšších zatíženích nebo přesnost pohybu, a to i při velmi nízkých rychlostech. Tato kombinace vlastností je činí v dnešní době nenahraditelnými. [6]

3.1 Základní struktura hydraulických systémů

Základní struktura hydraulických servosystémů je složena z [1]:

- a) Hydraulického zdroje (čerpadlo)
- b) Řídících elementů (ventily, snímače)
- c) Ovládacích prvků (válce, motory)
- d) Dalších prvků (potrubí, měřící zařízení)

Příklad takového zařízení je znázorněn na další straně (obr. 10).



obr. 10: Základní struktura hydraulických systémů

Čerpadlo přeměňuje mechanickou sílu (elektrický, naftový motor) na hydraulickou. To vytváří proudění kapaliny s dostatečným výkonem nutným pro překonání tlaku vyvolané zátěží na výstupu čerpadla. Kapalina použitá jako přenosové médium je skladována v nádrži (tanku) a poskytuje přímý přenos řízení, stejně jako mazání komponent, těsnění ventilů a chlazení systému. Hydraulické čerpadlo vytváří na vstupu podtlak, což vtlačuje kapalinu z nádrže do čerpadla a mechanickým působením dodává tuto tekutinu na výstup čerpadla a vytlačuje dále do hydraulického systému. Ventily jsou použity k řízení směru toku, množství kapaliny a tlaku do pohonu. Lineární pohon (válec) přeměňuje hydraulickou sílu na použitelnou mechanickou sílu na výstupu. [1]

3.2 Základní elementy hydraulických systémů

V této kapitole budou popsány nejzákladnější prvky hydraulických systémů. Bude nastíněn jejich princip, konstrukční varianty a běžné praktické využití.

3.2.1 Ventily

Mezi nejdůležitější prvky celé hydraulické soustavy patří ventily. Ventily můžou být ovládané buďto mechanicky nebo elektricky. [7] Typy ventilů se dle své funkce v systému v podstatě dělí do čtyř hlavních kategorií:

3.2.1.1 Tlakové ventily (Pressure valves)

Odlehčovací a redukční ventily nabízejí široké aplikační možnosti pro jejich schopnost regulovat nastavený tlak proporcionálně k referenčnímu signálu (až do tlaku, který je ručně nastaven a zablokován)

- Přetlakové ventily – používají se pro nastavení a omezení tlaku v hydraulickém obvodu. Mají za úkol odklonit některé nebo všechny větve čerpadla do nádrže, když je dosaženo úrovně nastaveného tlaku přetlakového ventilu. Přetlakové ventily jsou NC – „normal closed“ (v klidovém stavu zavřené). Vstupní tlak působí na vstupu P a tlačí na sedlo upevněné k pružině. Síla této pružiny určuje tlak, při kterém se ventil otevře. Odpor pružinky je nastavitelný. Když bude síla na vstupu větší, než síla pružinky, ventil se otevře a určité množství odteče do nádrže. Při zvyšování tlaku proteče celý průtok.
- Redukční ventily – většinou se zapojují ke zdrojům tlaku za úkolem snížit tlak hlavního obvodu na tlak ve vedlejším nebo řídicím obvodu. Redukční ventily jsou "v klidu otevřené". Tlak působící na výstupu A je přiveden kanálkem na plochu válečku. Síla na něj působící se porovnává se silou pružiny. Ventil se začne přivírat, když je větší jak síla pružiny. Váleček stlačuje pružiny, dokud se síly nevyrovnají. To způsobí přivření či úplné uzavření vstupu.

3.2.1.2 Zpětné (Jednosměrné) ventily

Jsou zvláštní druh směrového řídicího ventilu, protože umožňuje proudění tekutiny pouze v jednom směru a blokuje proudění v opačném směru. Mohou být rozděleny na: unloaded nebo spring-loaded zpětné ventily a zpětné ventily pro logické operace (OR, AND). Důležitým požadavkem je jejich minimální tlaková ztráta. Těsnění probíhá buďto pomocí kuličky, nebo pomocí kužele, které jsou jištěny pružinkou.

3.2.1.3 Průtokové (škrťací) ventily (Flow valves)

Jsou používány pro řízení rychlosti toku z jedné části hydraulického systému do druhé a tím omezují maximální rychlosti válců a motorů. Omezují také maximální sílu hydraulických podokruhů nebo proporcionálně rozdělují či regulují průtok z čerpadla do různých větví obvodu. Pracují na principu škrcení průtoku, proto se jim říká také škrťací ventily (pokud mají proměnlivý odpor). Škrťací ventily s

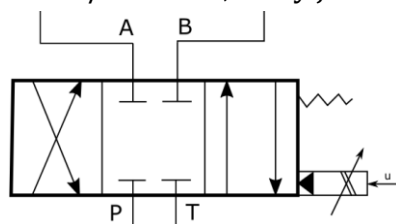
konstantním odporem se nazývají clony (kruhový otvor) či trysky (zúžená část potrubí po celé délce).

3.2.1.4 Směrové ventily (Rozváděče) (Directional valves)

Jsou používány jako multipolární přepínače. Před příchodem servo a proporcionálních ventilů byly používány k řízení směru pohybu pohonu speciální řídicí obvody provádějící logické funkce. V současné době existují nejrůznější druhy a provedení těchto ventilů. Používají se pro řízení směru pohybu přímočarého, rotačního, pro řízení rychlosti, připojování a odpojování tlakových zdrojů, blokování atd. Dělení probíhá podle:

- Počtu cest, které propojují
- Počtu poloh, ve kterých může ventil pracovat
- Podle způsobu ovládání ventilu (mechanické, pneumatické, elektrické)

Toto dělení bude vysvětleno na 4/3 ventilu, který je ovládán elektricky (obr. 11).



obr. 11: Čtyřcestný třípolohový ventil ovládaný elektrickým signálem

Vstup P nám znázorňuje místo, do které je kapalina tlačena. Označuje se P, protože tento tlak vytváří čerpadlo, které se v anglickém jazyce nazývá pump. Vstup s označením T (Tank) nám spojuje ventil s nádrží, ve které je kapalina skladována. Výstupy A a B vedou na hydraulický pohon, který může být lineární (válec) nebo rotační (hydromotor). V našem případě nepropojuje v klidovém stavu ventil žádnou z cest. Tak tomu však nemusí být vždy. Když se přepne (dle obrázku) ventil do levé polohy, poteče kapalina dle schématu P -> B -> (např. válec) -> A -> T do tanku. Přepne-li se ventil do pravé polohy, poteče médium opačným směrem. Toto se ovládá v našem případě elektrickým napětím priváděným na solenoid.

3.2.1.5 Třístavové, servo a proporcionální ventily

Nejjednodušší variantou ventilu jsou třístavové ventily (Solenoid – valves). Jde o tzv. „on -off“ ventily, které jinak řečeno nemají žiadné mezipolohy. Buď jsou naplno otevřené jedním či druhým směrem (podle toho, o jaký typ ventilu se jedná – kolik poloh) nebo jsou v klidovém stavu. Protože jejich chování a nemožnost přesné

regulace přestala v průmyslových aplikacích stačit, byly vyvinuty daleko přesnější servoventily. Jako první se začaly používat v leteckém průmyslu a postupně se rozšířily do dalších oblastí průmyslu (např. hutní, zemědělský).

Servoventily jsou velmi přesné, avšak poměrně nákladné řešení. Třístavové ventily jsou však pro mnoho aplikací již nevyhovující a vznikl tudíž požadavek na nějaký mezistupeň mezi sofistikovanými servoventily a jednoduchými třístavovými ventily. To dalo za vznik proporcionálním ventilům. Ty nejsou tak přesné jako servoventily, zároveň však umožňují proporcionalitu. Umožňují pomocí řídicího signálu nastavitelnost v teoreticky nekonečném množství poloh. Některé ventily mají přímo na svém těle integrovanou řídicí elektroniku, která se stará o zesílení řídicího signálu na vyšší výkon. Pro ty ventily, které tuto elektroniku nemají, se dají dokoupit externí moduly s řídicí elektronikou.

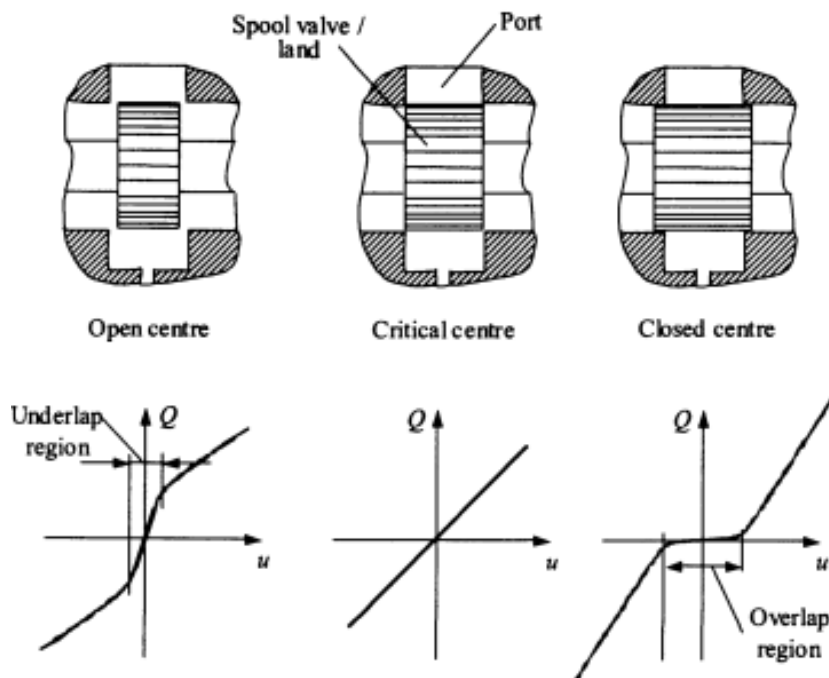
Srovnání vlastností proporcionálních a servoventilů ukazuje následující tabulka (tab. 3).

Vlastnost	Servoventily	Proporcionální ventily
Princip	Torzní motor	Proporcionální solenoid
Spotřeba	0.02 – 1.0 W	10 – 100 W
Zdvih	Několik cm	Okolo ± 1 mm
Požadovaná čistota kapaliny	Velmi vysoká	Přiměřená
Hystereze	0,1 až 0,5 %	0,3 – 7 % 0,2 – 0,5 % (vylepšené)
Překrytí „šoupátka“	Nulové nebo „podkrytí“	Překrytí (5 – 20 %) 0 nebo < 0 (vylepšené)
Max. frekvence	100 – 200 Hz	10 – 70 Hz 50 – 150 Hz (vylepšené)
Povolené výrobní tolerance	Velmi malé	Mnohem vyšší
Náklady	Velmi drahé	Průměrně drahé

tab. 3: Porovnání vlastností servoventilů a proporcionálních ventilů [1]

Z porovnání zobrazeného v tabulce plyne, že jsou servoventily nejen dražší, ale i náročnější na provozní podmínky (čistota hydraulické kapaliny). Hodnota hystereze je již s novějšími proporcionálními ventily porovnatelná, což se dá přibližně říct i o frekvenci. Pro pochopení termínu překrytí „šoupátka“ si pojem rozebereme. Jde o to, jestli v klidové poloze „šoupátko“ nebo to co směřuje a ovládá tok kapaliny, překrývá i dál, než by nutně muselo – překrytí. Pokud je přesně tak velké, jak má být, jedná se o nulové překrytí a v případě, že je menší, jde o podkrytí. Při podkrytí tedy

kapalina mírně prosakuje, což způsobuje ztráty. Naopak při překrytí vzniká necitlivost, jelikož při malém pohybu z klidové polohy kapalina stále neprotéká. Všechny tři případy jsou znázorněny na následujícím obrázku (obr. 12). Zleva jde o podkrytí, pak nulové překrytí a nakonec překrytí. [1]



obr. 12: Ilustrace překrytí šoupátek [1]

3.2.2 Čerpadla

Zařízení, která přeměňují mechanickou energii na energii hydraulickou. Čerpadla můžou být zubová, lamelová či pístová. Zubová používají k čerpání dvě ozubená kola v různých provedeních a jedná se o nejčastější typy čerpadel. Lamelová čerpadla používají takzvaných lamel, které jsou upevněny na otáčivém tělese a mezi sebou nesou dávky kapaliny. Hojně se používají například v automobilovém průmyslu. Pístová čerpadla fungují tak, že pohybem pístu vzniká podtlak, a tím dojde k nasátí určitého objemu kapaliny do komory čerpadla. Dalším pohybem pístu dojde k natlakování a následnému vytlačení kapaliny mimo čerpadlo. Protože nejsou čerpadla předmětem této práce, bude tento stručný přehled dostačovat.

3.2.3 Hydraulické aktuátory

Hydraulický aktuátor je zařízení přeměňující hydraulickou energii, vytvořenou čerpadlem a dopravenou k válci pomocí řídicích elementů (ventily atd.), v energii mechanickou. Na výstupu můžou provádět pohyb buďto lineární (válec) nebo rotační (motory).

Tato práce se bude zabývat lineárním pohonem, kterému se říká hydraulický válec (někdy také hydromotor, servomotor či hydroválec). Tento tedy převádí hydraulickou energii na lineární mechanickou sílu. Válce by se daly

rozdělit v základním dělení na jednočinné a dvojčinné. Jednočinný válec má jenom jeden vstup pro hydraulickou kapalinu. Může se tedy pohybovat jenom jedním směrem. Do klidové polohy se vrací jiným, většinou mechanickým způsobem (pružina).

Dvojčinné válce už mají dva vstupy pro hydraulickou kapalinu. Tlakem kapaliny do jednoho vstupu se pohybuje jedním směrem a do druhého druhým směrem. Tyto vstupy se zpravidla označují A a B.

3.3 Průzkum trhu v oblasti hydraulických prvků

V této podkapitole bude uveden výčet a stručný popis několika poskytovatelů řešení v oblasti hydraulických systémů. Mezi světové lídry působící v České republice se řadí například americká firma Parker Hannifin Corporation, která nabízí řešení pro oblast technologií a systémů pro řízení pohybu. Firma Parker má v České republice výrobní závod v Chomutově a v Sadské. Nabízí širokou škálu proporcionálních hydraulických rozváděčů. [8]

Podobně velkou společností poskytující kompletní nabídku pohonné a řídicí technologie je společnost Bosch Rexroth AG. Hlavní sídlo Bosch Rexroth, spol. s r. o. v České republice je v Brně v Černovicích, kde jsou montovány hydraulické agregáty. [9]

Mezi menší výrobce hydraulických systémů a zařízení patří v České republice například Hydroma, HYDRAULICS s.r.o., Argo-Hytos.

Proportionální hydraulický ventil PRM7-04, který je předmětem této práce, pochází od společnosti Argo-Hytos, která je častým dodavatel hydraulických řešení pro firmu Mavel. Společnost se zabývá výrobou, servisem a dalšími službami ohledně řídicí a regulační techniky v oblasti mobilní a průmyslové hydrauliky. [10]

4 HYDRAULICKÝ VENTIL PRM7-04

Jedná se o proporcionální hydraulický směrový ventil (někdy se také nazývá rozváděč) dodávaný společností ARGO-HYTOS. Čtyřcestný třípolohový ventil, který je ovládaný volitelným řídicím signálem. Ventil PRM7-04 se vyrábí v různých provedeních.

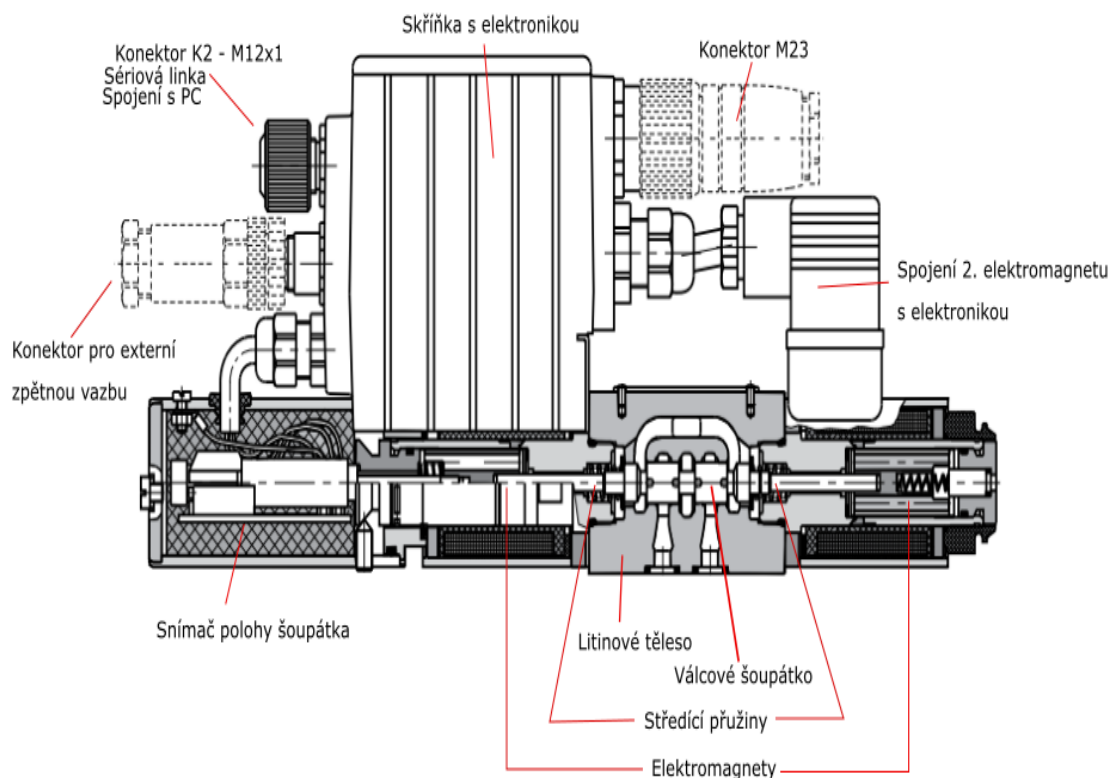
4.1 Popis konstrukce a funkce

Základní část je litinové těleso (povrchová úprava je fosfátování), které vytváří prostor (jakési tunely), kudy se kapalina šíří. V něm je umístěno válcové šoupátko, které řídí, kudy se bude kapalina šířit. Toto šoupátko drží uprostřed dvě středící pružiny s opěrnými podložkami. Se šoupátkem se pohybuje jedním nebo v našem případě dvěma elektromagnety (povrchová úprava je pozinkování). Dále může obsahovat snímač polohy šoupátka. Jako poslední součást snímače je skříňka s digitální elektronikou, která umožňuje různé nastavení snímače (není ve všech provedeních, ale ve většině ano). Skříňka leží na jednom z elektromagnetů a se druhým elektromagnetem je připojena přes konektorovou nástrčku EN 175301-803. Napájecí napětí, řídicí signál, kontrolní výstup ze snímače polohy šoupátka (pokud je snímač polohy v daném typu) a taky výstupní ss napětí 10 V je na konektoru M23. Blíže si konektory představíme v samostatné kapitole. Připojení do hydraulického obvodu je dle DIN 24 340 a ISO 4401.

Proud, pomocí něhož se ovládají, je řízen pomocí PWM. Výstupní proud může být modulován signálem dynamického mazání. Digitální elektroniku k ventilu lze konfigurovat přes sériovou linku RS 232 a softwarem dodávaným výrobcem PRM7Conf. Na vrchí straně krabičky s digitální elektronikou jsou dvě ledky indikující správnou funkci ventilu (Zelená – Power, Červená – Error). Zelená led dioda svítí při připojení napájení a červená led dioda bliká při chybovém stavu elektroniky. Příčiny chybových stavů mohou být například:

- přerušené propojení výstupu elektroniky s cívkou elektromagnetu
- proudový řídicí signál je mimo stanovený rozsah (je – li nastavený řídicí signál 4 – 20 mA, nebo 12 ± 8 mA)
- proudový signál externí zpětné vazby je mimo stanovený rozsah (je-li nastavený řídicí signál 4-20 mA)

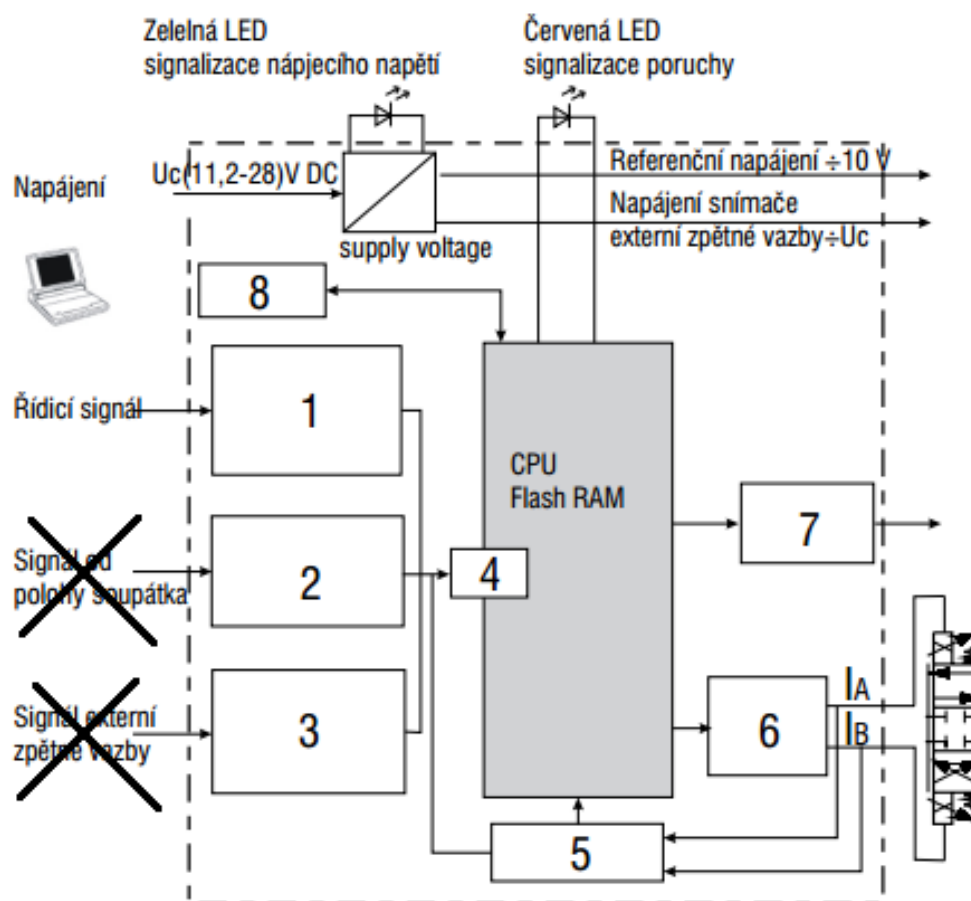
Jestliže červená led dioda pouze svítí, signalizuje to vnitřní softwarový problém. Pokud se chyba odstraní, provede se aktivace elektroniky přerušáním a znovu zapojením napájecího napětí, nebo pomocí softwaru. [2]



obr. 13: Popis konstrukce ventilu PRM7-04 [2]

4.2 Integrovaná elektronika

Na proporcionálním rozváděči je na jednom z elektromagnetů skříňka s integrovanou digitální elektronikou. Ta je řízena firmwarem, který je ve flash paměti a stará se o základní funkce elektroniky. Integrovaná elektronika například zajišťuje převod řídicího signálu na signál ovládající jednotlivé solenoidy pomocí PWM. Pokud má ventil k dispozici signály interní zpětné vazby od polohy šoupátka nebo externí zpětné vazby, stará se o jejich zpracování. Pokud je nějaký problém, signalizuje to na červené LED diodě na horní straně skříňky s elektronikou. Celé schéma popisující funkci integrované elektroniky je na následujícím obrázku (obr. 14).



obr. 14: Schéma integrované elektroniky ve ventilu [2]

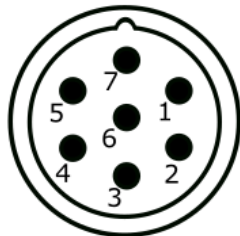
	Technická data	Popis
1	Vstup žádané hodnoty	± 10V 4 ... 20 mA rozlišení 0 ... 10 V 0 ... 20 mA 12 bit ± 10 mA 12 ± 8 mA
4	A/D převodník	
5	Ochrana proti proudovému přetížení	
6	Koncový stupeň PWM	Max. 3,5 A (f = 18 kHz)
7	Kopie signálu snímače polohy šoupátka	0 ... 5 V
8	Sériové rozhraní RS232	

tab. 4: Popis prvků pro schéma integrované elektroniky

4.3 Elektrické připojení

Na jednom z elektromagnetů je v plastové krabici umístěna digitální integrovaná elektronika. S elektromagnetem, na němž elektronika leží, je propojení uvnitř plastové krabice, a s druhým elektromagnetem je propojena přes kabel s konektorem DIN 43650.

Na ventilu můžou být až tři typy konektorů. První konektor se označuje K1 a je typu M23. Slouží k připojení napájecího napětí, řídicího signálu, ochranného vodiče a také je z něj možno vyčítat kontrolní signál ze snímače polohy šoupátka nebo odtud využít výstup referenčního napětí +10 V DC s maximálním odběrem 10 mA.

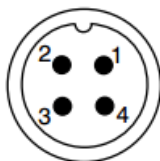


obr. 15: Konektor K1 – M23

Konektor K1 – typ M23 (zástrčka)		
PIN	Parametry	Hodnoty
1	Napájecí napětí	11.2 ... 28 V DC
2	Zem (výkonová)	0 V
3	Řídicí signál	Dle nastavení
4	Zem (signálová)	0 V
5	Výstup referenčního napětí	+10 V DC/max. 10 mA
6	Kontrolní signál ze snímače polohy šoupátka	0 ... 5 V
7	Ochranný vodič (PE)	---

tab. 5: Zapojení konektoru K1 [2]

Další typ konektoru se označuje K2 a je typu M12x1. Jedná se o čtyřpinovou zástrčku sloužící ke komunikaci s PC. Jedná se o sériovou linku (dle standardu), která obsahuje signály TxD, RxD, dále pak signálovou zem a poslední pin je nevyužitý (tab. 6).

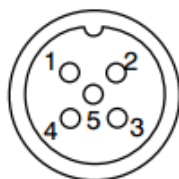


obr. 16: Konektor K2 – M12x1

Konektor K2 – typ M12x1 (zástrčka)		
PIN	Parametry	Hodnoty
1	TxD	Dle standardu RS 232
2	RxD	
3	Zem (signálová)	0 V
4	Nevyužitý PIN	x

tab. 6: Zapojení konektoru K2 [2]

Posledním typem konektoru použitým na rozváděčích je konektor K3 typu M12x1. Jedná se o pětipinovou zásuvku (tab. 7) sloužící k připojení signálu z externí zpětné vazby. Tento konektor je pouze ve variantách E03 a E04S01. Na prvním pinu je k dispozici napájecí napětí 11,2 až 28 V DC s maximálním odběrem 100 mA. Na druhý pin se přivádí signál z externí zpětné vazby a třetí je zem. Poslední dva piny jsou nevyužity.



obr. 17: Konektor K3 – M12x1

Konektor K3 – typ M12x1 (zásuvka)		
PIN	Parametry	Hodnoty
1	Napájecí napětí (výstup)	11,2 až 28 V DC/max. 100 mA
2	Signál externí zpětné vazby	Dle nastavení
3	Zem	0 V
4	Nevyužitý PIN	x
5	Nevyužitý PIN	x

tab. 7: Zapojení konektoru K3 [2]

4.4 Konfigurace

Proporcionální rozváděče v řadě PRM7 mají poměrně širokou možnost konfigurace digitální elektroniky. K ventilu se dá připojit pomocí sériové linky přes konektor K2. K samotnému nastavení ventilu slouží software dodávaný výrobcem, který má název PRM7Conf. Ve zkratce se v programu dá nastavit například doba náběžné/sestupné hrany, pásmo necitlivosti, u některých typů také konstanty regulátoru, kompenzace pozitivního krytí šoupátka či nastavení dynamického mazání. Dále nabízí možnost on-line sledování a měření chování ventilu.

4.4.1 Konfigurační program PRM7Conf

Program PRM7Conf slouží ke konfiguraci integrované elektroniky hydraulických ventilů od firmy Argo-Hytos proporcionálních rozváděčů řady PRM7. Program je vytvořený pro prostředí Windows. Uživatelské prostředí obsahuje hlavní části:

- Hlavní menu
- Panel nástrojů

- Stavový řádek
- Pracovní plocha

4.4.1.1 Hlavní menu

V hlavním menu je zahrnuto veškeré ovládání programu. Začneme jednotlivými položkami menu. Položka Soubor obsahuje klasickou práci se soubory, tedy otevření, uložení a tisk souboru. Uložení souboru probíhá do formátu (*.prm). V položce Zobrazit je možné definovat, co se zobrazí na pracovní ploše. Zobrazit si můžeme blokové schéma zvolené konfigurace, tabulku parametrů a měřící body, kde se zobrazují hodnoty měřených signálů z vybraných částí elektroniky rozváděče.

V položce Rozváděč jsou funkce vykonávající komunikaci mezi softwarem PRM7Conf a samotným rozváděčem. Nahlédnutí na aktuální nastavení ventilu umožňuje funkce pro načtení dat z elektroniky rozváděče do programu, což se může mnohdy hodit. Funkcí zápisu dat do rozváděče se nastavení vytvořené v PC přenesou do ventilu. Jako poslední možností v této položce menu je změna konfigurace. V této položce jsou přednastavená tovární nastavení k jednotlivým ventilům. To se hodí v případě, že se uživatel nechce zabývat nastavením, nebo se potřebuje vrátit k továrnímu nastavení. Je zde celkem 12 možných konfigurací.

Položka komunikace nám, jak název napovídá, definuje komunikaci s proporcionálním rozváděčem. Ta probíhá přes sériovou linku. V nastavení komunikace se nastavuje komunikační port, ke kterému je rozváděč připojen a režim programu po jeho spuštění (on-line nebo offline). Parametry jako rychlost, parita a další jsou automaticky nastaveny na hodnoty: přenosová rychlost 19200 bit/s, 8 datových bitů, žádná parita a jeden stop bit. Dále je zde informace, zobrazující nastavení komunikace s elektronikou, chybové stavy elektroniky a verzi firmwaru. Položka reset umožňuje kompletní reset elektroniky. Možnost on-line umožní připojení nebo odpojení od aktuálního sledování toho, co se děje v rozváděči v reálném čase.

4.4.1.2 Panel nástrojů

Na panelu nástrojů jsou umístěny ikony jako zkratky neboli odkazy k jednotlivým nejpoužívanějším funkcím z hlavního menu.



obr. 18:PRM7Conf – Panel Nástrojů

4.4.1.3 Stavový řádek

Nachází se ve spodní oblasti uživatelského okna a sdružuje důležité informace o aktuálním stavu programu. Zobrazuje aktuální režim činnosti programu, tedy on-

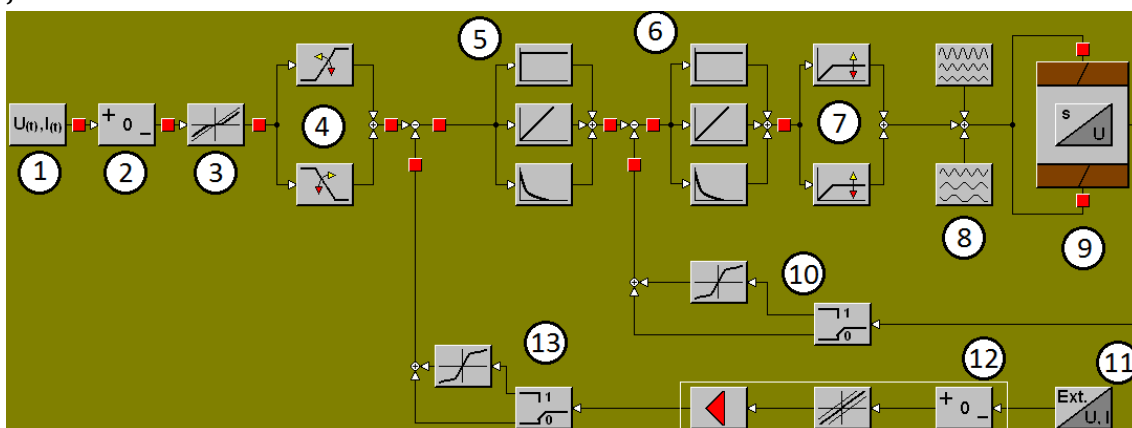
line nebo off-line. Dále informaci o aktuální verzi firmwaru. Aktuální konfiguraci rozváděče (typové označení) a při načítání či zapisování dat zobrazí popis této činnosti. A nakonec název souboru se kterým aktuálně pracuje.

4.4.1.4 Pracovní plocha

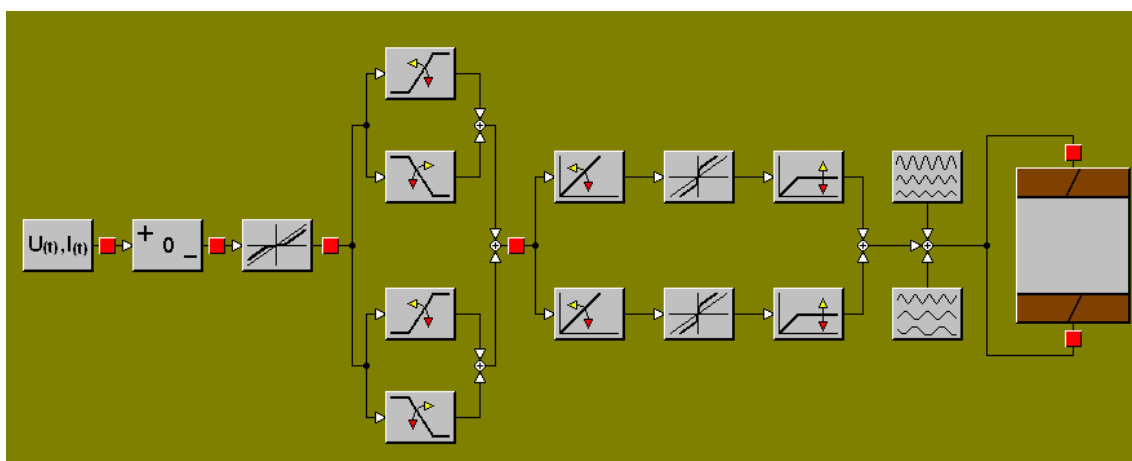
Zde se odehrává všechno důležité a jak bylo zmíněno v podkapitole hlavní menu, tak je možné zde zobrazit tři možné pohledy a to:

- Blokové schéma a jednotlivé dialogové okna sloužící k nastavení
- Tabulka parametrů
- Měření

Na následujícím obrázcích (obr. 19, obr. 20) je znázorněno blokové schéma a pod ním jsou v tabulce popsány jednotlivé členy schématu. Červené čtverečky značí body, kde je možné měřit aktuální hodnotu, pokud je program připojený k ventilu a je v on-line režimu.



obr. 19: Blokové funkční schéma rozváděče v programu PRM7Conf pro model E04S01



obr. 20: Blokové funkční schéma rozváděče v programu PRM7Conf pro model E01

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
1 Konfigurace rozváděče	US_int&ext_A&B	23 Aktivace linearizace interní zpětné vazby	neaktivní
2 Řídicí signál	+/-10 V	24 Bod linearizace interní zpětné vazby X1	-80.00 %
3 Polarita řídicího signálu	kladná	25 Bod linearizace interní zpětné vazby Y1	-80.00 %
4 Prahová úroveň řídicího signálu	0.00 %	26 Bod linearizace interní zpětné vazby X2	-60.00 %
5 Rampa vzestup	0.00 s	27 Bod linearizace interní zpětné vazby Y2	-60.00 %
6 Rampa sestup	0.00 s	28 Bod linearizace interní zpětné vazby X3	-40.00 %
7 P parametr regulátoru interní zpětné vazby	0.20 -	29 Bod linearizace interní zpětné vazby Y3	-40.00 %
8 I parametr regulátoru interní zpětné vazby	14.7 1/s	30 Bod linearizace interní zpětné vazby X4	-20.00 %
9 D parametr regulátoru interní zpětné vazby	2.72 ms	31 Bod linearizace interní zpětné vazby Y4	-20.00 %
10 T parametr regulátoru interní zpětné vazby	0.0 ms	32 Bod linearizace interní zpětné vazby X5	0.00 %
11 Proudové omezení - cívka B	800 mA	33 Bod linearizace interní zpětné vazby Y5	0.00 %
12 Proudové omezení - cívka A	800 mA	34 Bod linearizace interní zpětné vazby X6	20.00 %
13 Parametr amplitudy dynamického mazání	10 -	35 Bod linearizace interní zpětné vazby Y6	20.00 %
14 Frekvence dynamického mazání	90 Hz	36 Bod linearizace interní zpětné vazby X7	40.00 %
15 P parametr regulátoru externí zpětné vazby	1.00 -	37 Bod linearizace interní zpětné vazby Y7	40.00 %
16 I parametr regulátoru externí zpětné vazby	0.0 1/s	38 Bod linearizace interní zpětné vazby X8	60.00 %
17 D parametr regulátoru externí zpětné vazby	0.00 ms	39 Bod linearizace interní zpětné vazby Y8	60.00 %
18 T parametr regulátoru externí zpětné vazby	0.0 ms	40 Bod linearizace interní zpětné vazby X9	80.00 %
19 Typ signálu externí zpětné vazby	0...10 V	41 Bod linearizace interní zpětné vazby Y9	80.00 %
20 Polarita signálu externí zpětné vazby	vypnuto	42 Aktivace linearizace externí zpětné vazby	neaktivní
21 Posunutí nuly signálu externí zpětné vazby	0.00 %	43 Bod linearizace externí zpětné vazby X1	-80.00 %
22 Zesílení signálu externí zpětné vazby	0.00 -	44 Bod linearizace externí zpětné vazby Y1	-80.00 %

obr. 21: Tabulka parametrů PRM7Conf

4.4.2 Nastavení ventilu

Samotné nastavení ventilu pro náš případ bude provedeno následovně a vychází jednak z doporučení výrobce pro daný ventil a také z empiricky získaných poznatků. Řídicí signál byl zvolen napěťový +/-10 V. Co se týče rampových funkcí, prahové úrovně řídicího signálu, či kompenzace pozitivního krytí, budou nastaveny do defaultních hodnot a veškeré řízení a tvarování chování ventilu bude provedeno v kódu PLC. Využita bude funkce dynamického mazání, kde bude nastavena amplituda 10 a frekvence 90 Hz. Úkolem dynamického mazání je udržovat šoupátko rozváděče v neustálém mikropohybu (kmitání s malou amplitudou), což je z důvodu potlačení tření mezi pohybujícími se částmi rozváděče. Výsledný efekt by měl být snížení hystereze ventilu a zvýšení citlivosti na změny řídicího signálu. V provedení E01 se tato funkce velmi doporučuje a byla nastavena dle doporučení výrobce.

4.5 Varianty rozváděčů řady PRM7 - 04

Jednotlivé typy ventilů z řady PRM7-04 se označují tzv. typovým klíčem. Strukturu tohoto klíče popisuje obrázek níže (obr. 22). První část klíče PRM7 - 04 označuje, že jde o proporcionální rozváděč řady 7 a číslo 04 popisuje jmenovitou světlost ventilu. Jedná se o hodnotu udávající přibližný vnitřní průměr potrubí v mm (DN – Diametral Nominal).

Ostatní typy ventilů řady PRM7 se tedy budou lišit jmenovitou světlostí ventilů. Další část klíče je čtyřmístný kód určující počet elektromagnetů a také vnitřní zapojení

hydraulického vedení mezi přípojnými body P, T, A a B. Jednotlivé typy jsou znázorněny v následující tabulce (tab. 8).

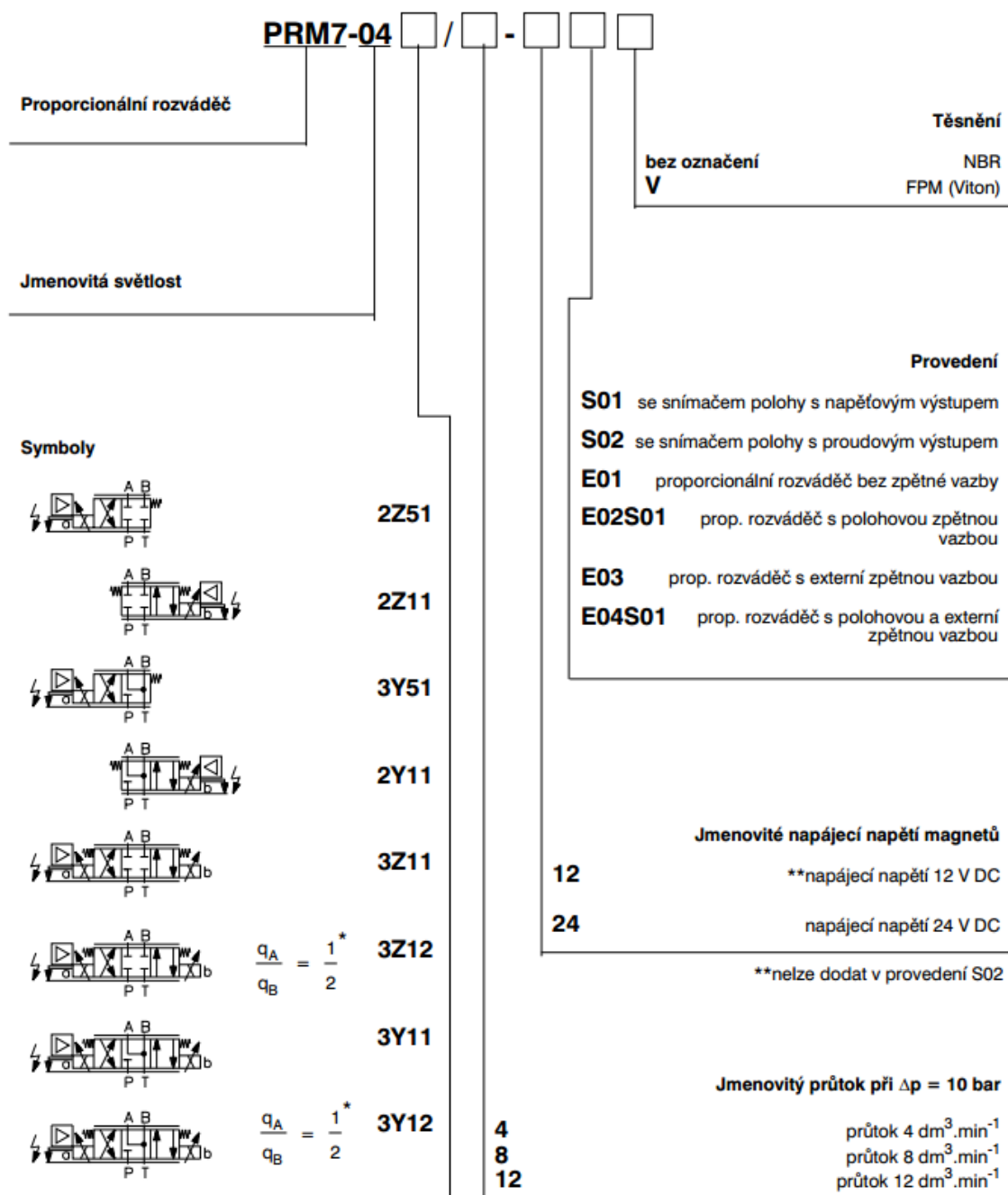
Symbol	Označení
	2Z51
	2Z11
	2Y51
	2Y11
	3Z11
	3Z12
	3Y11
	3Y12

tab. 8: Označení a symbolů variant ventilů PRM7-04 [2]

První číslo v čtyřmístném kódu označuje počet poloh ventilu, ve kterých může pracovat (2 nebo 3). Další písmeno označuje vnitřní zapojení hydraulických přípojí (P, T, A, B). Písmeno Z značí, že jsou všechny přípoje v klidovém stavu od sebe odpojeny. Pokud je to písmeno Y, jsou propojeny A, B s odtokem kapaliny do tanku T. Poslední dvojčíslí může nabývat hodnot 11, 12 a 51. Klasické provedení je 11. Provedení 12 jsou provedení pro válce s jednostrannou pístnicí s poměrem ploch 1:2. Provedení 51 je u dvoustavových ventilů označení pro rozdílný směr proudění kapaliny oproti ventilům s označením 11, jak je vidět na obrázcích v tabulce.

Další číslo označuje jmenovitý průtok při $\Delta p = 10$ bar. Rozváděče mohou být v provedení 4, 8 a 12 dm³.min⁻¹. Dále je v klíči jmenovité napájecí napětí magnetů, které je buď 12 nebo 24 V DC. Poslední údaj v klíči udává provedení ventilu co se týče zpětných vazeb. Provedení E01 je proporcionální rozváděč bez zpětné vazby (tento typ je předmětem této práce), dále je E02S01 rozváděč s polohovou zpětnou

vazbou od polohy šoupátka. Typ E03 má pouze externí zpětnou vazbu a typ E04S01 má jak polohovou, tak externí zpětnou vazbu.



obr. 22: Struktura typového klíče rozváděčů PRM7

4.6 PRM7 – 043Y11/04-24E01

Typový klíč PRM7 – 043Y11/04-24E01 označuje ventil (rozdávěč), který bude použit jako řešení této aplikace. Jedná se o nejlevnější variantu z řady PRM7-04, z čehož plyne několik nevýhod, které budou popsány dále. Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, jedná se o proporcionální rozváděč se jmenovitou světlostí DN 4. Kód 3Y11 nám značí, že se jedná o třípolohový ventil, který má propojené vývody A, B s odvodem do tanku T. Při $\Delta p = 10$ bar má jmenovitý průtok $4 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Jmenovité napájecí napětí magnetů je 24 V DC. Jde o provedení bez zpětné vazby, tedy E01.

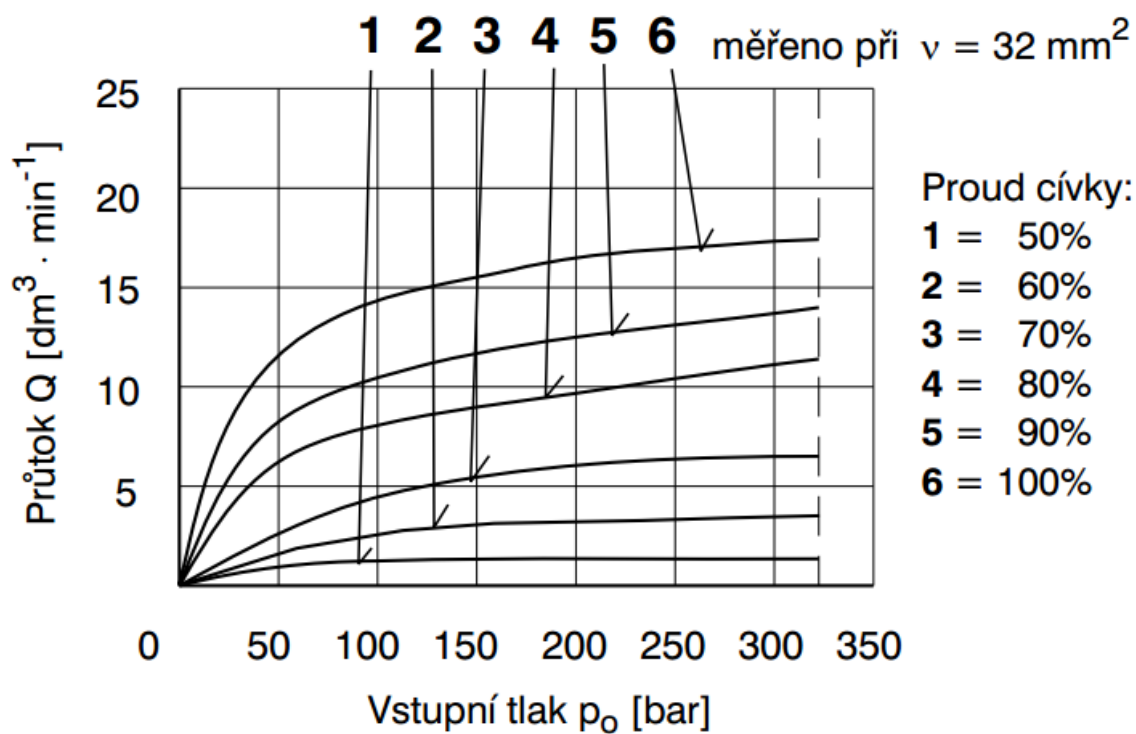
Maximální tlak ve vývodech P, A, B je 320 barů a ve vývodu T 210 barů. Pro správnou funkci musí být použita jako tlaková kapalina minerální olej výkonových tříd HL, HLP dle DIN 51524. Rozsah provozních teplot je -30 až $+80$ °C a maximální teplota okolí 50 °C. Rozsah provozní viskozity je 20 až 400 mm^2s^{-1} .

Co je důležité, je hodnota hystereze, která dosahuje až 6 %. To je způsobeno tím, že nemá zpětnou vazbu od polohy šoupátka. Ventily s touto zpětnou vazbou mají přímo ve své elektronice hysterezi ošetřenou a dosahuje díky tomu jen 0,5 %. U ventilu v provedení E01 lze k potlačení hystereze využít dynamické mazání ventilu. Stupeň elektrického krytí odpovídá dle ČSN EN 60529 IP 65, což je úplná ochrana proti prachu a ochrana proti vlnobití.

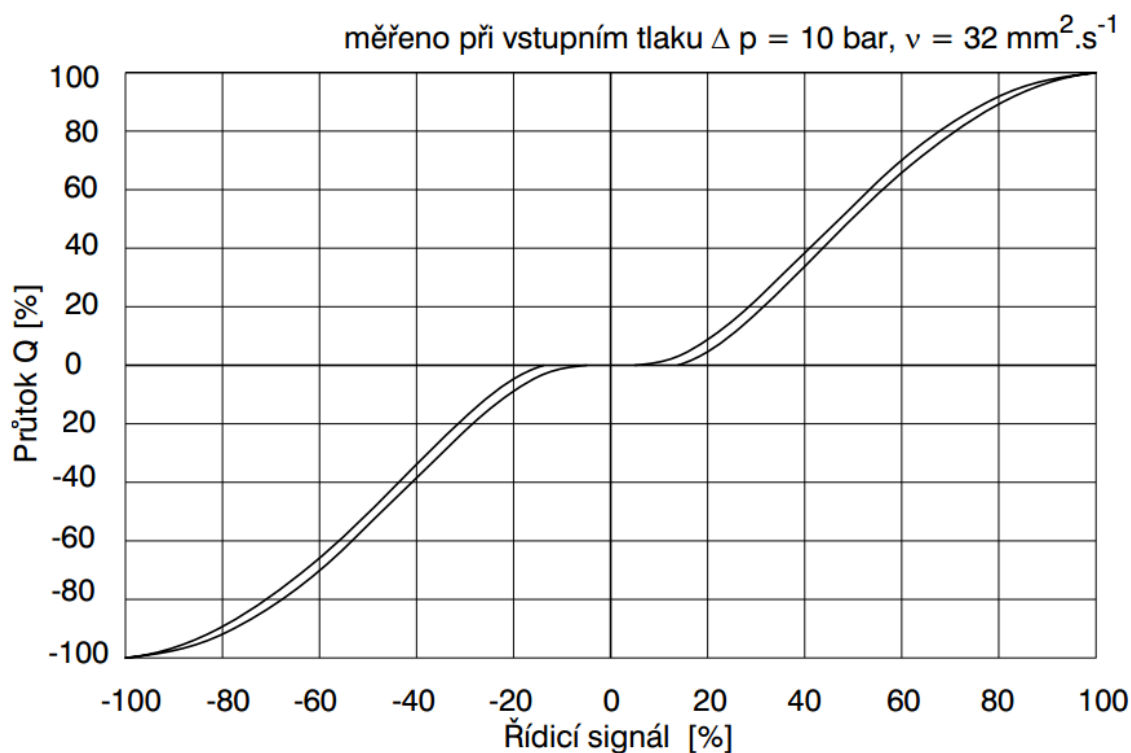
Limitní proud cívek elektromagnetů je 800 mA a odpor při 20 °C je 21 Ω . Napájecí napětí integrované elektroniky je 11,2 až 28 V DC. Řídící signál může být v tomto provedení ± 10 V, ± 10 mA a 12 ± 8 mA. Rozlišení A/D převodníků je 12 bit. Frekvence PWM, kterým se ovládají elektromagnety je 18 kHz. O zprostředkování komunikace se stará software PRM7Conf.

Závislost průtoku na hodnotě tlaku pro provedení PRM7 – 043Y11/04-24E01 je znázorněn v následujícím grafu (obr. 23). Z grafu je patrné, že při kolísání tlaku se bude měnit hodnota průtoku. Největší rozdíl bude při maximálním otevření ventilu.

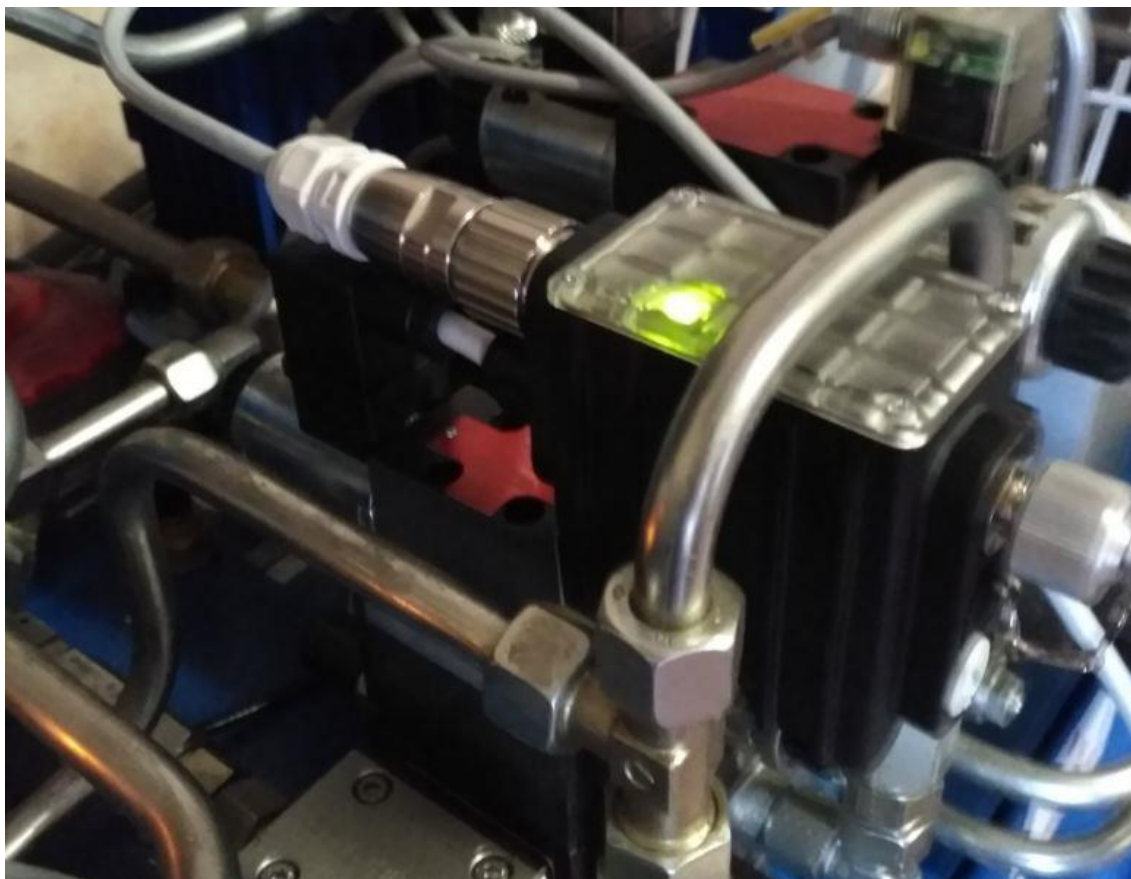
Na dalším grafu (obr. 24) je znázorněna závislost průtoku na hodnotách řídicího signálu tzn. na procentuálním otevření ventilu. Hodnota 100 % odpovídá maximálnímu otevření na jednu stranu a -100 % maximálnímu otevření na druhou stranu. Z grafu je patrné, že má ventil hysterezi. To je způsobeno tím, že ventil v provedení E01 nemá interní zpětnou vazbu od polohy šoupátka. V provedeních kde zpětná vazba je, řeší problém hystereze elektronika ventilu. Dále je z grafu patrné, že má ventil poměrně vysokou oblast necitlivosti (dead -zone). Pohybuje se od 10 do 15 %. To je způsobeno právě překrytím šoupátka, jak je vysvětleno v kapitole 3.2.1.5. Tedy že šoupátko, které se stará o řízení toku kapaliny, je mírně větší než otvory, které zakrývá a tudíž při menších výkyvech z klidové polohy je ventil uzavřený.



obr. 23: Závislost průtoku na pracovním tlaku při různých otevřeních ventilu



obr. 24: Závislost průtoku na hodnotě řídicího signálu

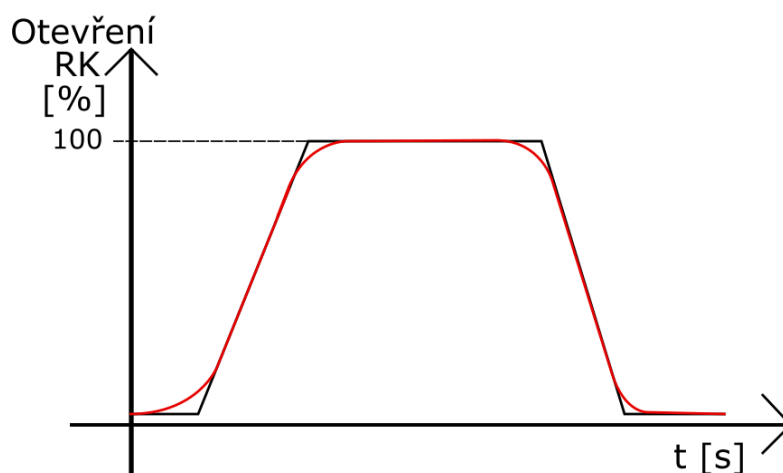


obr. 25: Instalovaný ventil PRM7 – 043Y11/04-24E01 v hydraulickém systému MVE

5 POŽADAVKY

Jedním z hlavních důvodů pro nasazování proporcionálních hydraulických ventilů je především možnost přesnější regulace, tedy možnost lépe tvarovat výsledné chování členu ovládaného ventilem. Z toho plyne vyšší šetrnost k soustavě, což je velká výhoda oproti klasickým třístavovým ventilům. Výhoda oproti hydraulickým servoventilům je pak cena. V oblasti vodních elektráren se nasazování proporcionálních ventilů stává nezbytnou součástí řešení hydraulických systémů.

Jak již bylo zmíněno, prvek na vodní elektrárně, který se bude nahrazovat, je ventil ovládající rozváděcí kolo, přivádějící vodu na oběžné kolo. Požadovaný průběh rozváděcího kola, tedy otevírání a zavírání (obr. 26), vypadá tak, že při začátku a konci otevírání/zavírání bude požadavek na nižší nárůst akční veličiny a mezi těmito stavy naopak rychlejší, jak je znázorněno na obrázku.

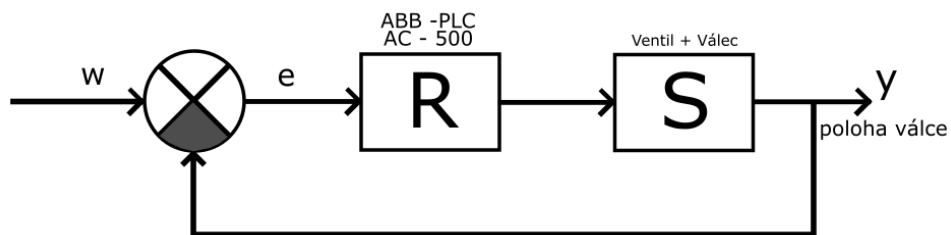


obr. 26: Požadovaný průběh otevírání/zavírání rozváděcího kola

Dalším požadavkem na výsledné chování bude, aby přechodové charakteristiky neměly překmit. Toho se docílí tím způsobem, že se navrhne uzavřená smyčka tak, aby póly jejího charakteristického polynomu nebyly komplexně sdružené.

Jak již bylo zmíněno v kapitole popisující MVE RÁJEC – JESTŘEBÍ, rozváděcí kolo je ovládáno přes hydraulický válec pomocí ventilu. U proporcionálního ventilu tudíž máme možnost ovlivňovat rychlost otevírání rozváděcího kola, a to procentuálním nastavením otevření proporcionálního ventilu v požadovaném směru.

Zpětnou vazbu bude v našem případě představovat poloha hydraulického válce snímaná magnetostrikčním snímačem polohy. Celé ideové schéma bude tudíž vypadat následovně (obr. 27).



obr. 27: Ideové regulační schéma

Celá elektrárna je řízena programovatelným automatem od firmy ABB AC – 500. Pro výstup, kterým se bude řídit ventil, se využívá analogový I/O modul AX521. Náš ventil se řídí napětím ± 10 V. Připojení bude provedeno na první (nultý) výstup z této karty a v softwaru Control Builder Plus bude provedeno nastavení příslušného výstupu na danou funkci.

Nejprve bude provedena simulace soustavy, poté se změří její skutečné chování a následně bude dle těchto poznatků navrhnut regulátor, který splní dané požadavky.

6 POPIS SOUSTAVY

Než se přistoupí k naměření skutečných hodnot a identifikaci soustavy, bude provedena její analýza. Jako hlavní ovládaný prvek je hydraulický válec. Když např. funkci hydraulického válce převedeme do teorie řízení, bude se jednat o integrační prvek bez setrvačnosti.

6.1 Rozbor a popis soustavy z pohledu řízení

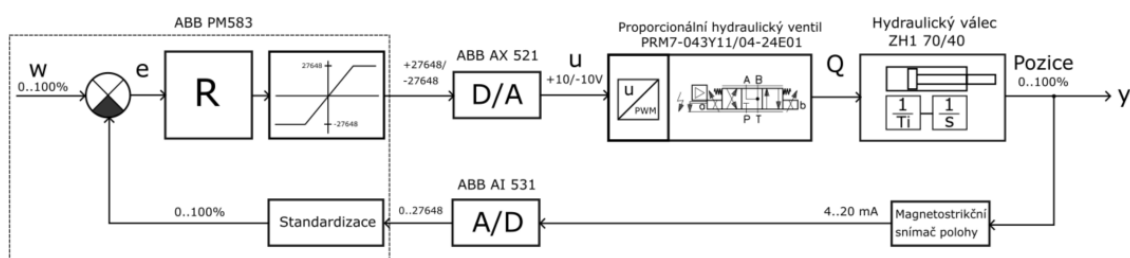
V této kapitole bude popsáno složení našeho hydraulického systému z pohledu řízení a regulace. Jak již bylo řečeno, hlavní prvek, který se bude skrze soustavu řídit, je hydraulický válec. Ten lze v naší simulaci nahradit integračním prvkem bez setrvačnosti s definovanou časovou konstantou, tedy zesílením. Zesílení tohoto válce, resp. jeho časová konstanta nám bude říkat, jak dlouho trvá válci jeho úplné otevření či úplné uzavření. Tedy čas, za který se při maximální rychlosti připojených hydraulických větví dostane válec z polohy úplného zavření do polohy úplného otevření a naopak. Tyto dva údaje se, pokud vezmeme v úvahu jenom samotný válec, většinou liší. Je to z důvodu principu mechanické konstrukce hydraulických válců. Na jedné straně je totiž prostor menší o velikost pístové tyče. Tento údaj bude ale nastavitelný, protože u hydraulického ventilu ovládající válec jsou umístěny škrtkící ventily. Těmito škrtkícími ventily se nastaví, jakou rychlostí se bude válec otvírat a zavírat, a tím pádem je možné toto zesílení nastavit pro oba směry stejné. Toho se i při realizaci budeme snažit dosáhnout.

Dalším prvkem v naší soustavě bude hydraulický ventil, který bude válec řídit pomocí změny směru toku a pomocí množství propuštěné kapaliny. Bude tedy proporcionálně řídit rychlost otevírání válce. Popis hydraulického ventilu a jeho simulace je popsána v [1], v kapitole popisující modelování hydraulických systémů a konkrétně proporcionální směrové ventily. Abychom zjistili vztah mezi posunutím cívký a elektrickým signálem, který ovládá systém, je třeba se blíže podívat na přesnou funkci proporcionálního směrového ventilu. Signál přicházející na vstup ventilu je zesílen a namodulován pulzně šířkovou modulací. Takto upravený signál už se posílá na solenoidy, které se pohybují v závislosti na velikosti proudu. Čím vyšší je úroveň signálu přicházející z řídicího systému, tím více se posune řídicí cívka. Funkce přenosu mezi vstupním signálem a otevřením ventilu je obvykle systém druhého řádu. [1]

$$G(p) = \frac{x(s)}{u(s)} = \frac{k}{\frac{1}{\omega^2} p^2 + \frac{2\xi}{\omega} p + 1} \quad (1)$$

Kde ω je mezní frekvence a ξ je tlumení. Mezní frekvence našeho ventilu je 20 Hz. V našem případě je dynamika ventilu, v porovnání s dynamikou hydraulického systému, zanedbatelná a není potřeba s ní nadále počítat. S čím ale budeme muset počítat jsou nelinearity hydraulického ventilu a to celková nelinearita, pásmo necitlivosti, saturace a také hystereze. Tyto nežádoucí vlastnosti ventilu budou proměřeny a pokud to bude možné i eliminovány.

Dále je v soustavě snímač polohy hydraulického válce BTL5-E10, který posílá na vstup karty AI 531 proudový signál 4 až 20 mA. Má vzorkovací frekvenci 1 kHz a rozlišovací schopnost menší než 0,2 μ A, což je pro naše účely více než dostačující. Jak již bylo zmíněno, k řízení je použito PLC ABB AC-500. Vzorkovací perioda regulátoru byla zvolena na 100 ms. Tato hodnota vychází z praktických zkušeností pracovníků firmy Mavel. Výstupní signál +10/-10 V ovládající ventil PRM7-04 obstarává vstupně/výstupní karta AX521. Celkový souhrn je ilustrován na obr. 28.



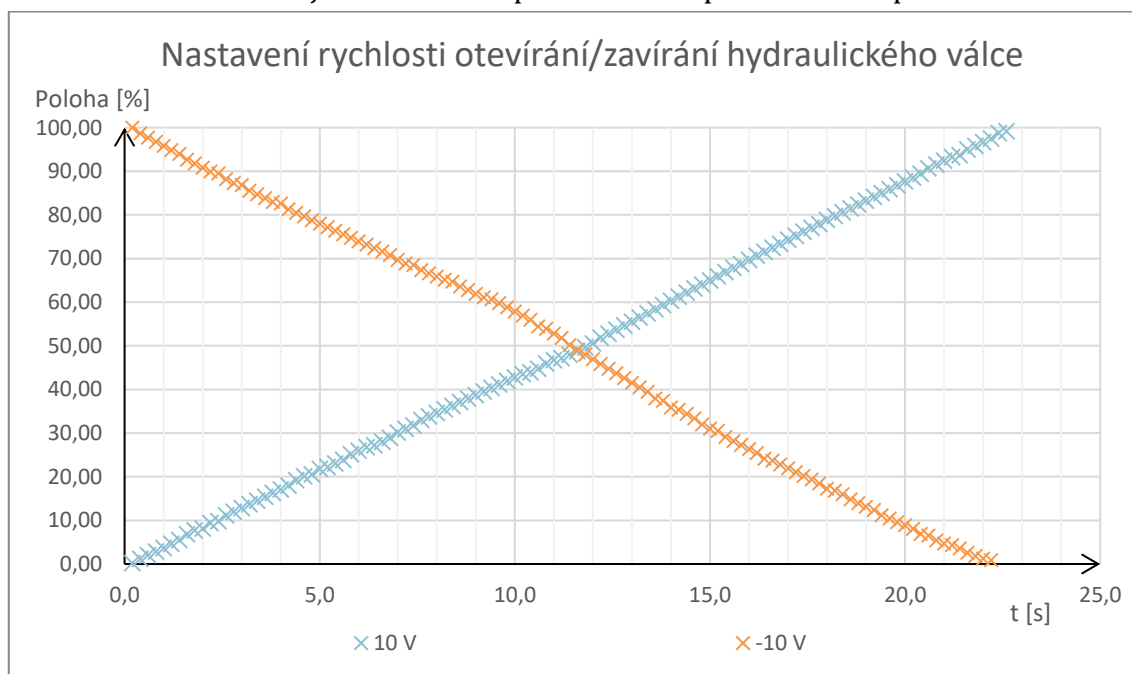
obr. 28: Popisné schéma regulačního obvodu

7 MĚŘENÍ

Než se pustíme do samotného návrhu regulátoru, je nutné analyzovat chování soustavy pomocí měření v různých stavech systému. Jedním z hlavních cílů bude zjistit časovou konstantu hydraulického válce. Tedy rychlost otevření/zavření válce z úplného otevření/zavření. Tato hodnota je nastavitelná pomocí škrtících ventilů umístěných u hydraulického ventilu. Pro šetrnost k celému systému vodní elektrárny bylo nutné zjistit, jak nastavit bezpečnou maximální rychlost pohybu válce. Po konzultaci s projektantem celého hydraulického systému elektrárny jsme se rozhodli tuto hodnotu nastavit na 23 sekund. Dále bylo potřeba zjistit reálné chování proporcionálního ventilu, který bude válec, resp. rozváděcí kolo, řídit. Ventil byl tedy připojen do soustavy namísto dosavadního třístavového ventilu. Jelikož jde o nejlevnější variantu ventilu bez zpětné vazby od polohy šoupátka, předpokládala se celková nelinearita, pásmo necitlivosti, saturace a také hystereze.

7.1 Časová konstanta hydraulického válce

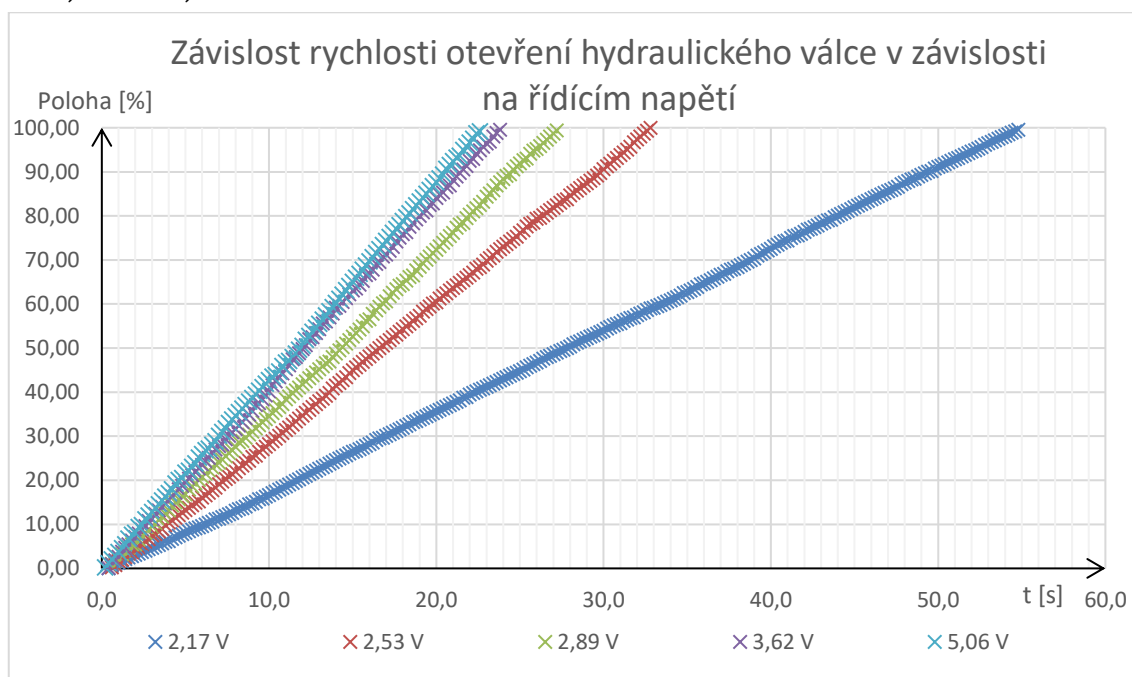
Měření bylo provedeno následujícím způsobem. Časovou konstantu hydraulického válce, tedy jeho maximální rychlost otevření a zavření, byla pomocí škrtících ventilů nastavena na hodnotu 23 s. Zesílení hydraulického válce je tedy $1/23$. Pro plné otevření ventilu se na jeho řídicí vstup nastavilo napětí $+10\text{ V}$ resp. -10 V .



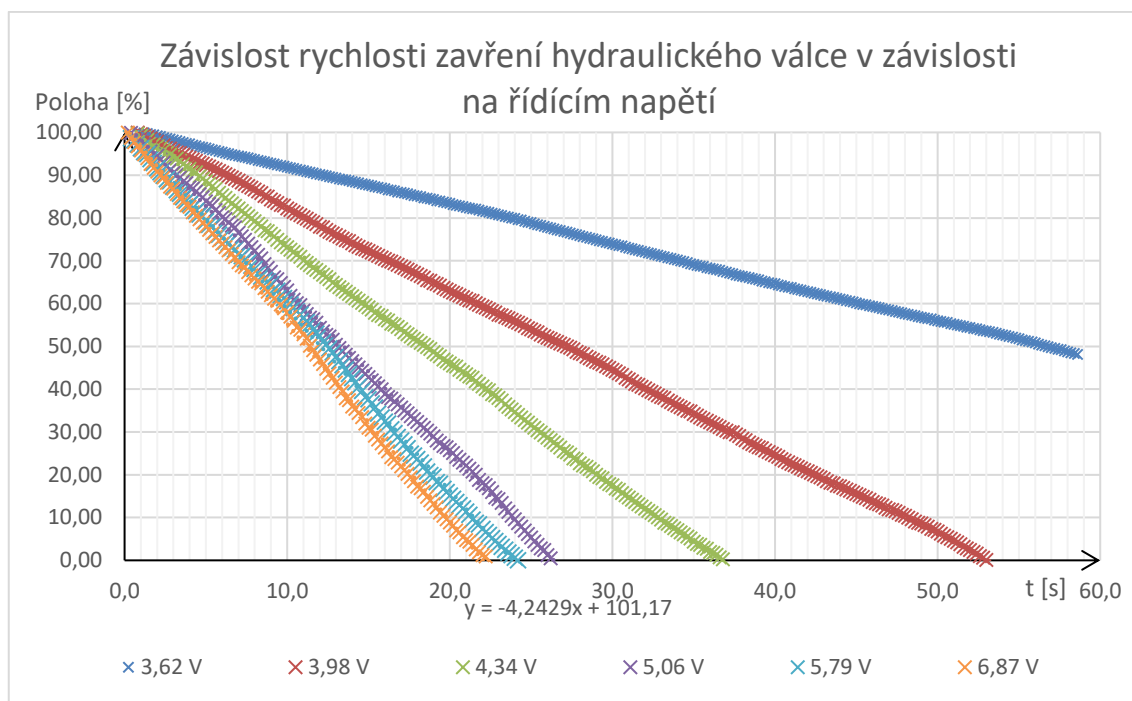
obr. 29: Průběh otevírání a zavírání válce

7.2 Závislost řídicího napětí na průtoku ventilem

Dále bylo nutné proměřit závislost otevření ventilu na výsledném průtoku. Na ventil se tedy posílalo napětí v rozmezí od 0 do 10 V pro otevření ventilu a -10 až 0 V pro zavření ventilu. V programu jsou tyto hodnoty reprezentovány rozsahem -27648 až 27648. Proměnná v programu, do které se zapisuje hodnota posílaná na výstup, tedy na vstup ventilu, je v programu pojmenovaná AOUT_proporc_OK. Měřicí krok se nastavoval v této relaci, proto jsou výsledné hodnoty napětí takto zdánlivě nesourodé. Jak je vidět v grafu níže, dosahoval ventil maximálního průtoku již přibližně při 5 V, což je přibližně v polovině rozsahu. Naopak při hodnotě okolo 2 V už byl takřka zavřený. Při zavírání válce jsou tyto hodnoty posunuté na rozmezí od 3,6 V do 6,9 V.



obr. 30: Průběhy otevírání válce při různém řídicím napětím



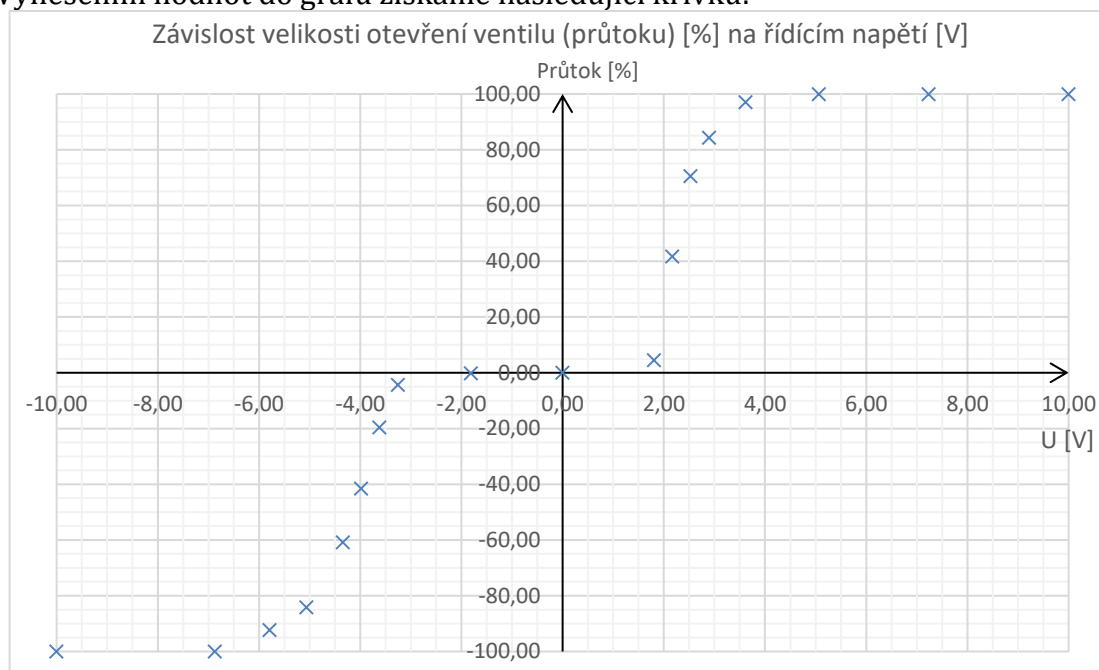
obr. 31: Průběhy zavírání válce při různém řídicím napětím

Pro nepřímé stanovení závislosti průtoku hydraulické kapaliny na velikosti řídicího napětí ventilu je nutná derivace polohy. Tu získáme jednoduše lineární regresí průběhů, tedy zjištěním jejich směrnic. Hodnoty směrnic jsou vyneseny v následující tabulce. Hodnoty směrnic se přepočítaly na průtok tak, že se stanovila hodnota největší směrnice jako 100 % průtoku.

AOUT	U [V]	k [%/V]	Průtok [%]
27648	10,00	4,4094	100,00
20000	7,23	4,4094	100,00
14000	5,06	4,4094	100,00
10000	3,62	4,2812	97,09
8000	2,89	3,7207	84,38
7000	2,53	3,1121	70,58
6000	2,17	1,8428	41,79
5000	1,81	0,2	4,54
0	0,00	0	0
-9000	-3,26	-0,2	-4,35
-10000	-3,62	-0,9026	-19,62
-11000	-3,98	-1,909	-41,50
-12000	-4,34	-2,7965	-60,80
-14000	-5,06	-3,8688	-84,11
-16000	-5,79	-4,2429	-92,24
-19000	-6,87	-4,5996	-100,00
-27648	-10,00	-4,5996	-100,00

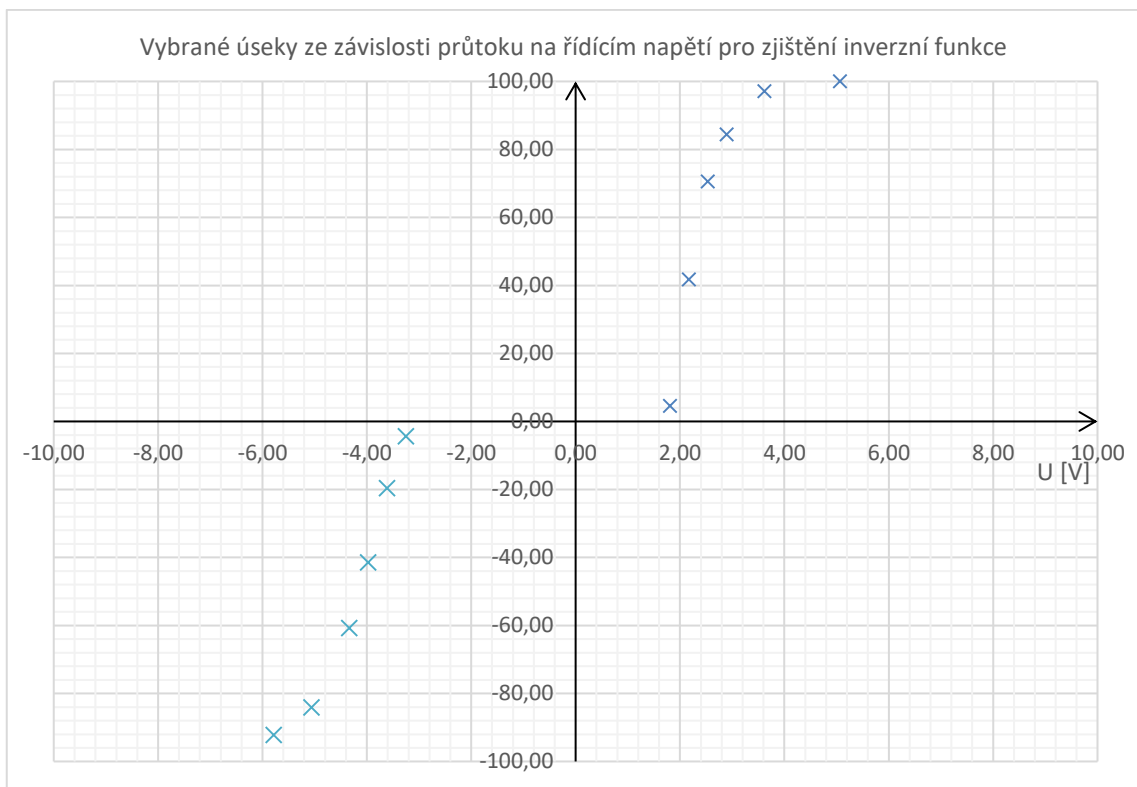
tab. 9: Nepřímé stanovení závislosti řídicího napětí na průtoku ventilem

Vynesením hodnot do grafu získáme následující křivku:

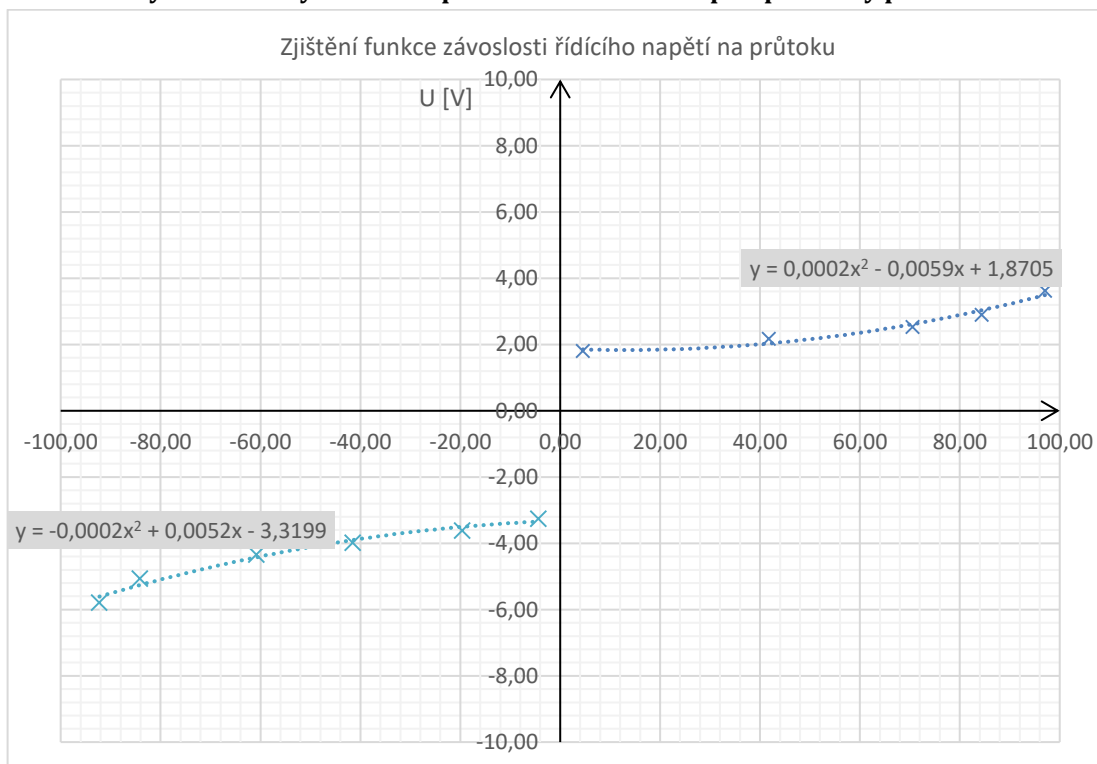


obr. 32: Závislost průtoku na řídicím napětí

Z grafu je patrných několik poznatků. Prvním z nich je pásmo necitlivosti. U otevírání je počátek necitlivosti přibližně u hodnoty 2 V a u zavírání jsou to přibližně -3 V. Toto je způsobeno tzv. pozitivním krytím (překrytím) šoupátka ventilu. Tato problematika je rozebrána v kapitole 3.2.1.5. Toto se dá částečně kompenzovat softwarovým přenastavením ventilu, ale to jsme se rozhodli nepoužívat z důvodu rizika průsaků hydraulické kapaliny, které by se při přibližování k nule zvyšovalo. Dalším zjištěním je poměrně blízká saturace. U otevření dosahuje saturace již u hodnoty 4 V a u zavírání je to při -6 V. To znamená, že při dalším zvyšování napětí už se nadále nemění průtok. Mezi těmito dvěma stavy bude naše pracovní pásmo. Průběh v tomto pásmu je nelineární, a proto bude nutné tuto funkci proložit a získat tak rovnici závislosti řídicího napětí na průtoku. Abychom tuto závislost získali, provede se nejprve prohození os. Poté se za pomoci softwaru Microsoft Excel provede polynomická regrese potřebného řádu a tato rovnice se použije pro nastavování řídicího napětí na ventil.



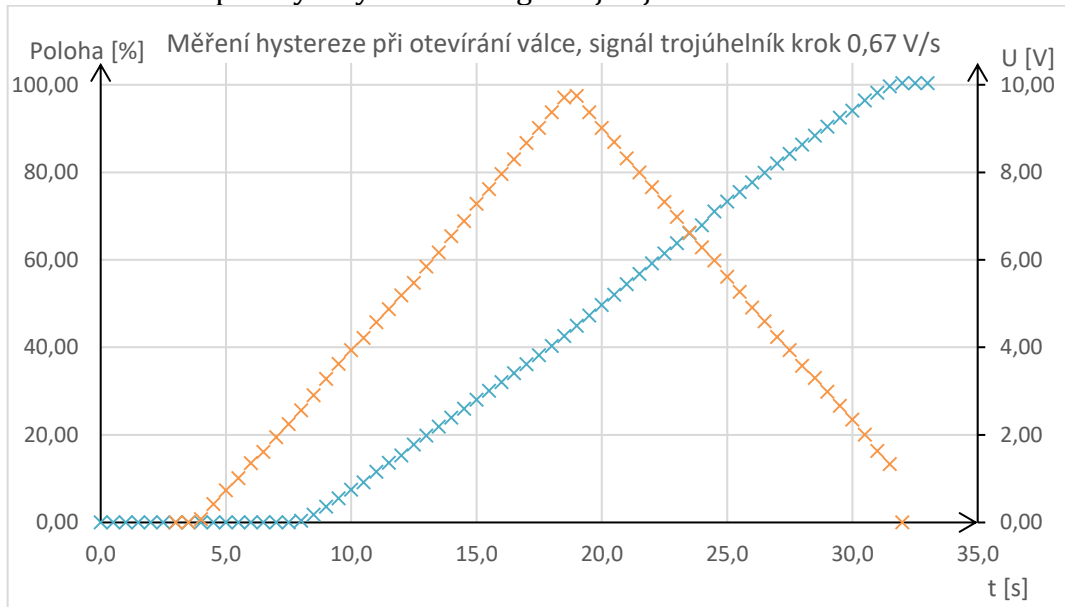
obr. 33: Vybrané úseky závislosti průtoku na řídícím napětí pro účely proložení funkcí



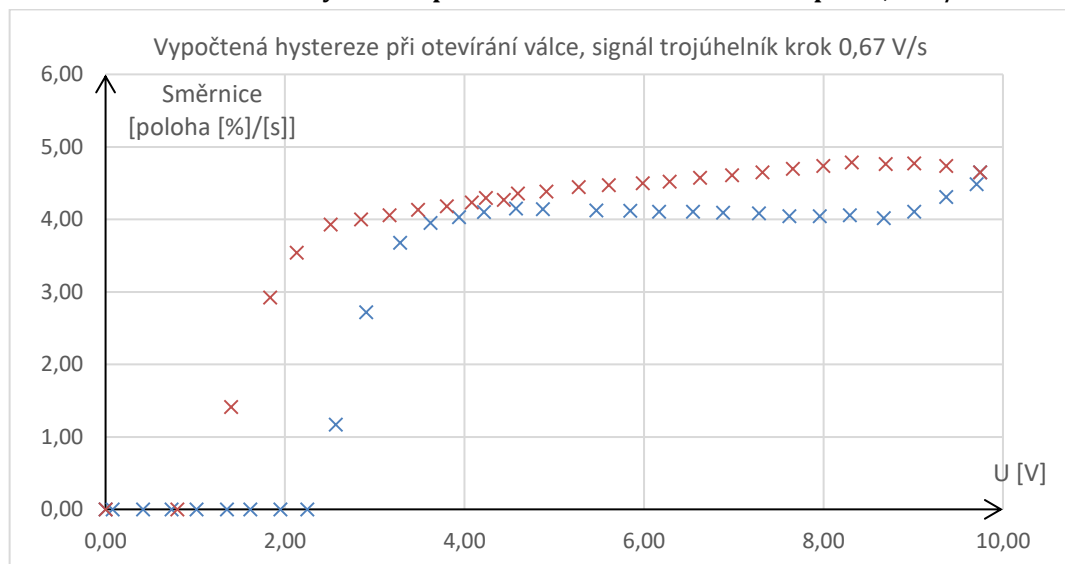
obr. 34: Polynomická regrese 2. řádu závislosti řídícího napětí na průtoku

7.3 Hystereze hydraulického ventilu

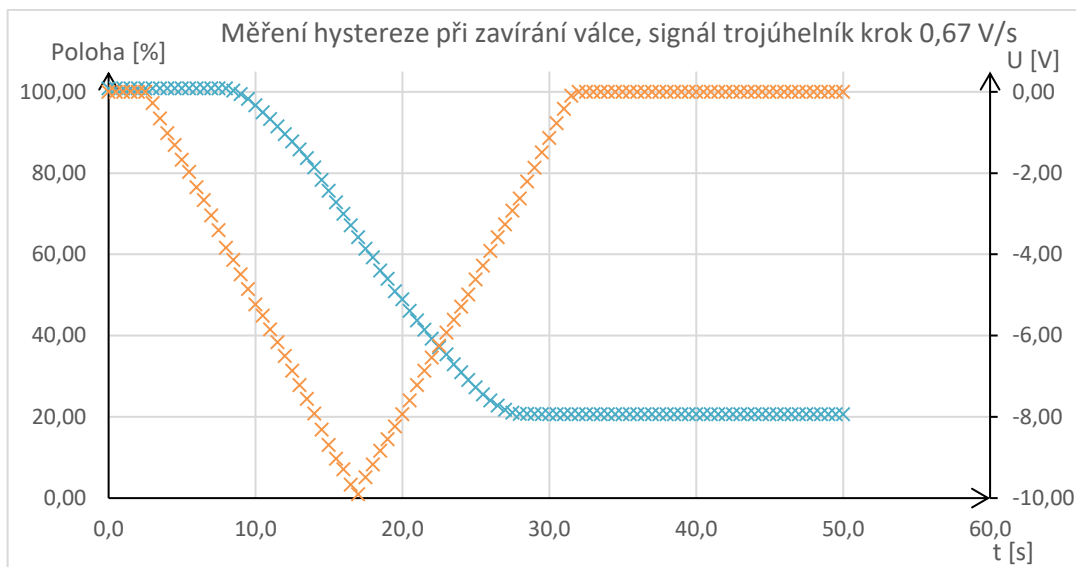
Dalším krokem v zjišťování vlastností soustavy bylo proměření hystereze ventilu. Protože nebyla možnost měřit přímo průtok hydraulické kapaliny ventilem, muselo se přistoupit k naměření hystereze nepřímo. Proto byl vytvořen generátor signálu trojúhelníkového tvaru, který byl v rozsahu od 0 do 10 V a pak od 0 do -10 V. Jeho krok byl napočítaný tak, aby se během jednoho průběhu tohoto signálu posunul válec přes co nejdelší dráhu svého pohybu. Následně byla vypočtena difference hodnot polohy a vynesena do grafů jak je vidět níže.



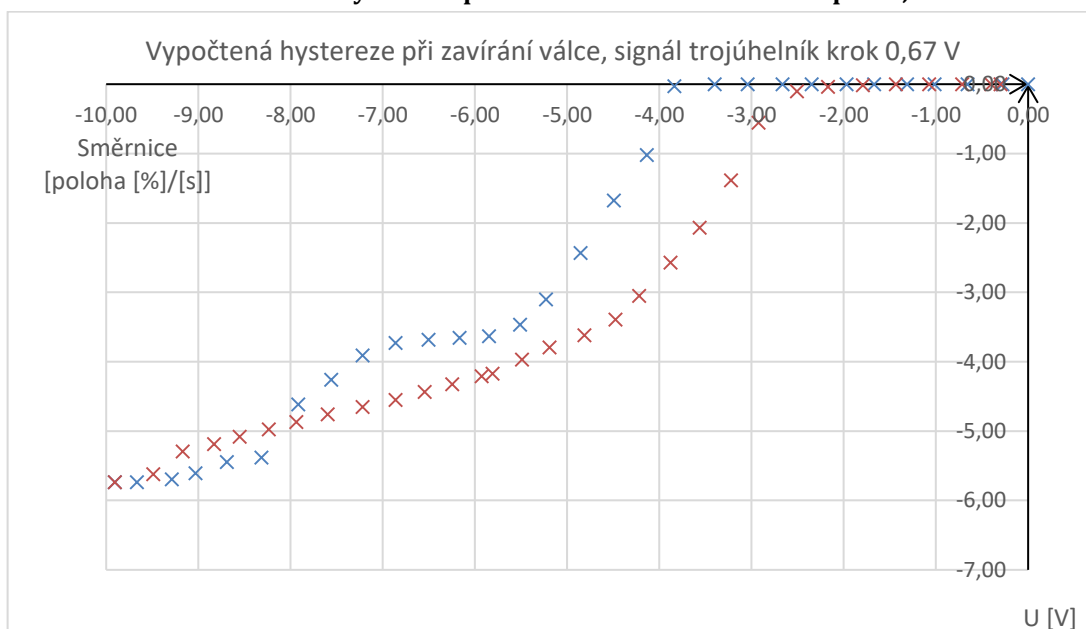
obr. 35: Měření hystereze při otevírání válce s krokem napětí 0,67 V/s



obr. 36: Vypočtená hystereze při otevírání válce s krokem napětí 0,67 V/s



obr. 37: Měření hystereze při zavírání válce s krokem napětí 0,67 V



obr. 38: Vypočtená hystereze při zavírání válce s krokem napětí 0,67 V

Z výsledných grafů je patrná poměrně velká hystereze. Po naměření více závislosti s různě velkým krokem, tedy rychlostí změny akčního zásahu, byla zjištěna klesající tendence hystereze. Přesněji řečeno čím nižší byla rychlost změny akčního zásahu, tím nižší byla hystereze. Už v tuto chvíli je jasné, že změna akčního zásahu bude, oproti 0,67 V/s, několikanásobně nižší. Předpoklad je okolo 0,06 až 0,1 V/s. Při tak nízké rychlosti změny řídicího napětí se projevuje hystereze už jen nepatrně. Je to především z toho důvodu, že rozsah napětí, ve kterém se bude pohybovat akční veličina ventilu, bude jen v určité oblasti celého rozsahu. Viz. kapitola 7.2. Kompenzace hystereze tudíž nebude nutná.

8 NÁVRH REGULÁTORU

Při návrhu regulátoru se bude vycházet z požadavků, které byly specifikovány v kapitole 5 a dále také z poznatků a doporučení popsanych v knize zabývající se komplexním popisem řízení hydraulických systémů [1].

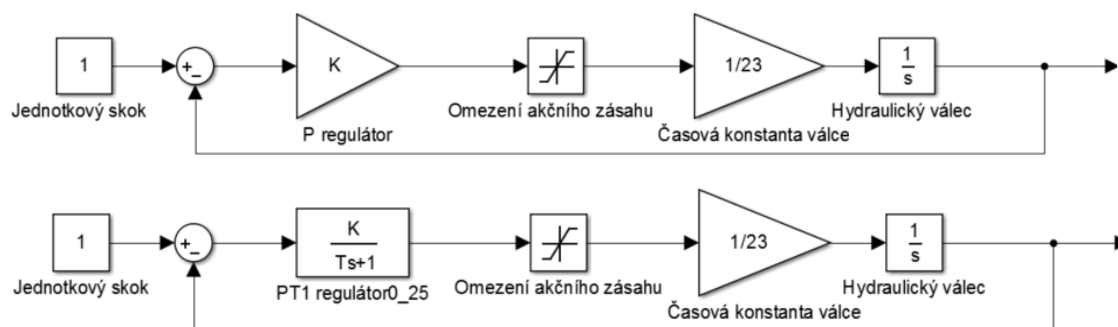
8.1 Výběr regulátoru

Jedním z hlavních poznatků o celé soustavě je ten, že se řízený hydraulický válec chová jako integrátor. Z toho plyne, že se jedná o soustavu s astatismem a tím pádem je automaticky zajištěná nulová ustálená odchylka. [15] Tím se nám vyřazuje nutnost přidávat do regulátoru integrační složku. Přidáním další integrační složky by se potencionálně zvyšovalo riziko nestabilního chování. Dále je nutné si vymezit, jaký způsob řízení bude použit. Jak z rozboru vyplývá, půjde o řízení polohy válce v anglické literatuře označované jako „position control“. Jelali a Kroll uvádí ve své knize následující tabulku, která ilustruje, jaké typy regulátorů je vhodné použít pro jaký typ řízení.

	Typy regulátorů						
	P	I	PI	PD	PID	PT ₁	PPT ₁
Přenosová funkce	K_p	$\frac{1}{T_I s}$	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$	$K_p(1 + T_D s)$	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)$	$\frac{K_{p1}}{1 + T_p s}$	$K_{p1} + \frac{K_{p2}}{1 + T_p s}$
Polohová regulace	+	--	-/0	-	0/-	++	++
Regulace rychlosti	-	+	++	--	++	+/0	

tab. 10: Typy regulátorů pro různé druhy regulace [1]

V tabulce jsou uvedeny pro náš případ nejvhodnější regulátory: klasický P regulátor a PT₁ regulátor, což je setrvačný člen prvního řádu (někdy také označovaný jako proporcionální člen se zpožděním prvního řádu) nebo jejich kombinace PPT₁. Všechny tyto regulátory jsou samozřejmě uvažovány v uzavřené smyčce. Nasimulujeme si tedy regulátory P a PT₁. V simulaci již použijeme naměřenou časovou konstantu hydraulického válce (kapitola 7.1).



obr. 39: Simulační schéma regulátorů P a PT1

U jednoduchého P regulátoru je z principu patrné, že nebude splňovat jednu z hlavních podmínek, a to plynulý náběh akčního zásahu. K tomu, aby byl průběh akčního zásahu plynulejší, bude třeba zvýšit řád celého systému, tudíž přidat další pól. To už je zajištěno u druhého případu, tedy u regulátoru označovaného jako PT1. Je zde ale potřeba zajistit, aby byla dodržena další podmínka, a to přechodová charakteristika bez překmitu. Toho se dá docílit volbou vhodné časové konstanty regulátoru. Nejprve je tedy nutné vypočítat výsledný operátorový přenos uzavřené smyčky.

$$F_{CL} = \frac{Fo}{1 + Fo} = \frac{\frac{1}{23} * \frac{1}{p} * \frac{1}{Tp + 1}}{1 + \frac{1}{23} * \frac{1}{p} * \frac{1}{Tp + 1}} = \frac{1}{23Tp^2 + 23p + 1} \quad (2)$$

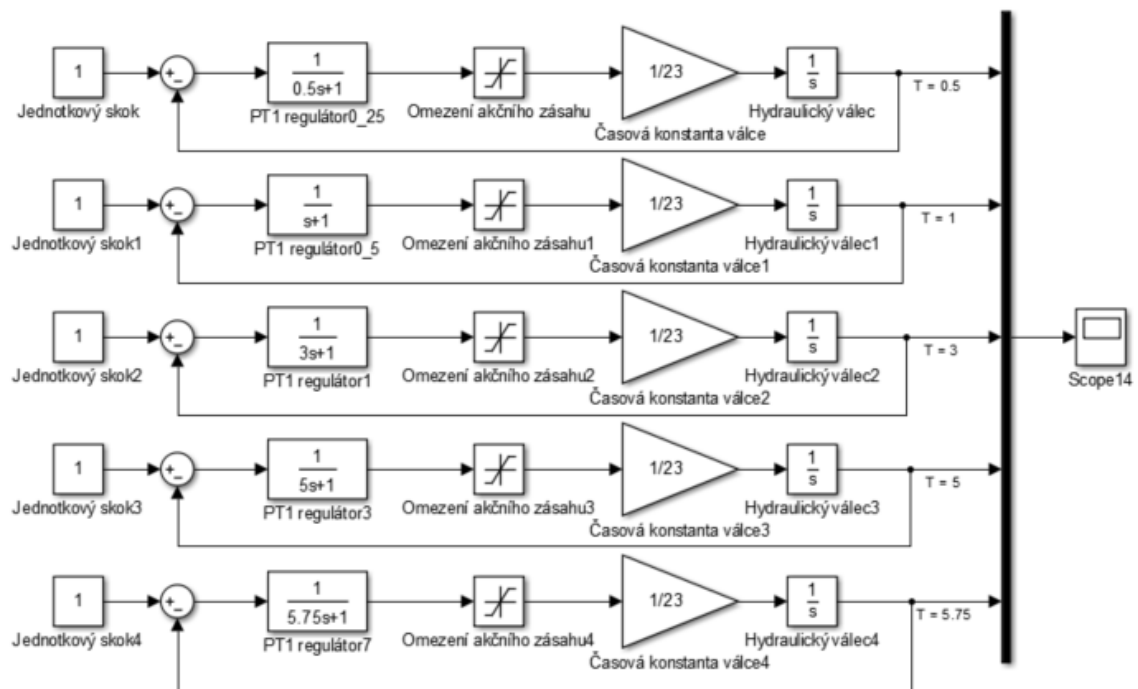
Zmíněný požadavek na nulový překmit lze docílit tím, že kořeny charakteristického polynomu nebudou komplexně sdružené. [15] To bude zajištěno, jestliže bude diskriminant tohoto polynomu větší než nula.

$$D = b^2 - 4ac = 23^2 - 4 * 23T$$

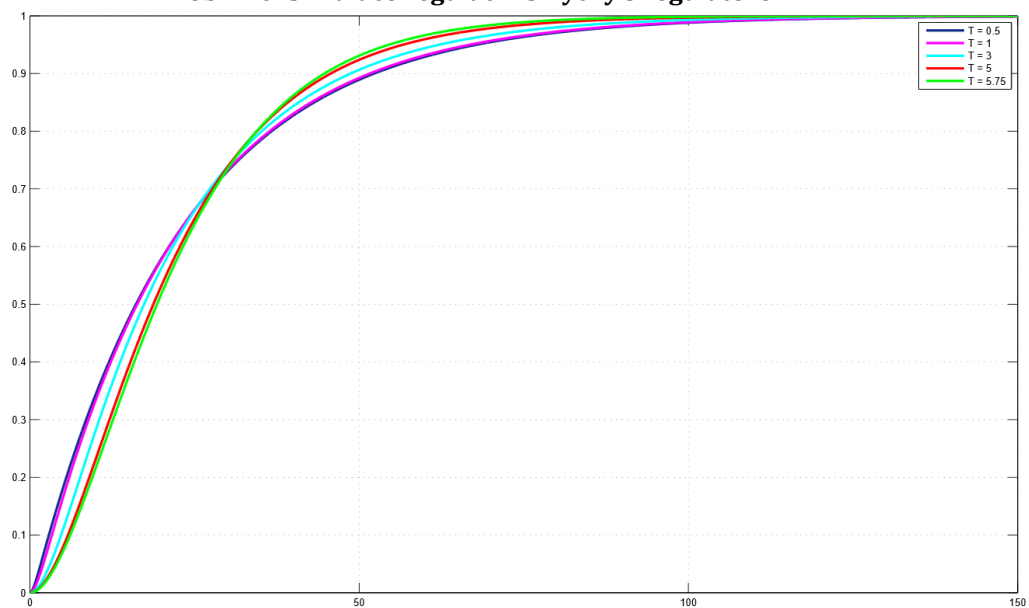
$$23^2 - 4 * 23T > 0$$

$$T \leq \frac{529}{92} = 5,75 \quad (3)$$

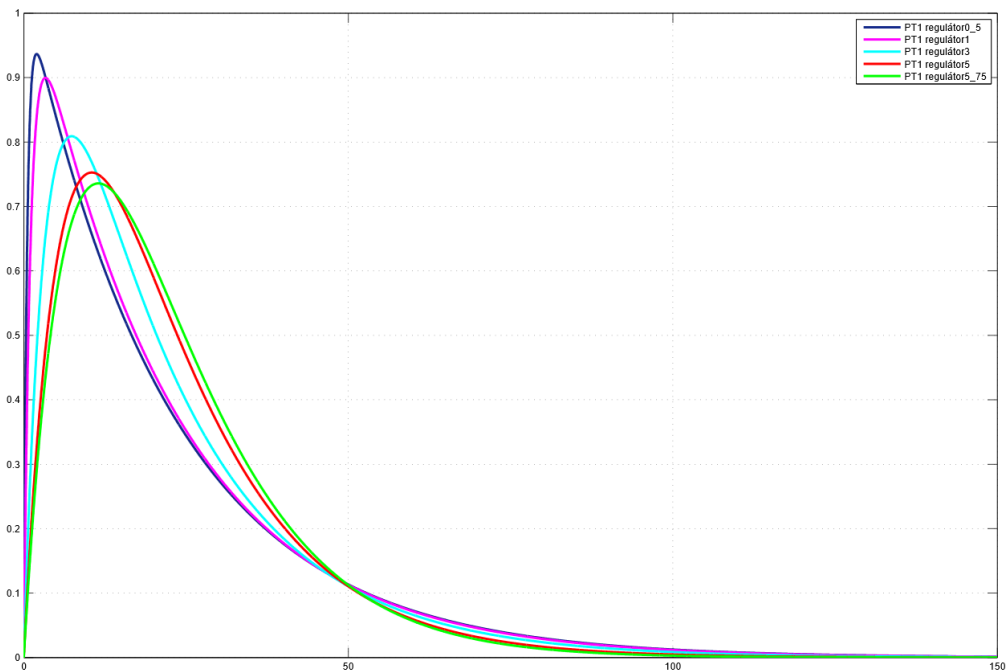
Výsledek je tedy ten, že volba časové konstanty setrvačného članku musí být maximálně 5,75. Budeme pokračovat simulací v softwaru MATLAB Simulink [17]. Na obr. 40 jsou zadrátovány regulační obvody s různými časovými konstantami regulátoru PT1. Na obr. 41 jsou zobrazeny výsledné přechodové charakteristiky a na obr. 42 akční zásahy regulátoru.



obr. 40: Simulace regulační smyčky s regulátorem PT1

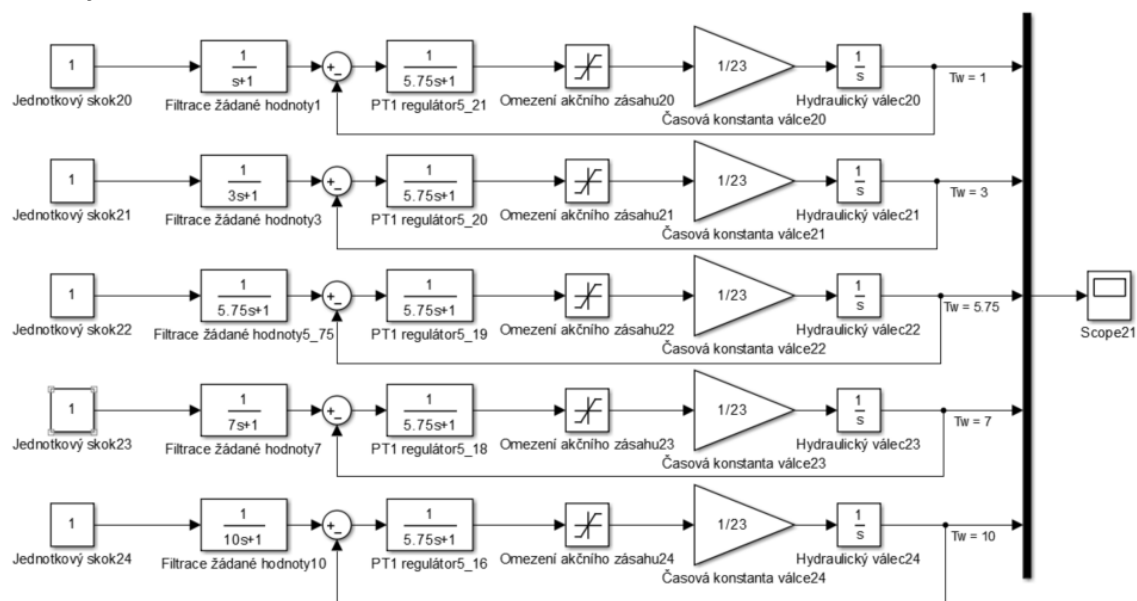


obr. 41: Výsledek simulace regulační smyčky s regulátorem PT1

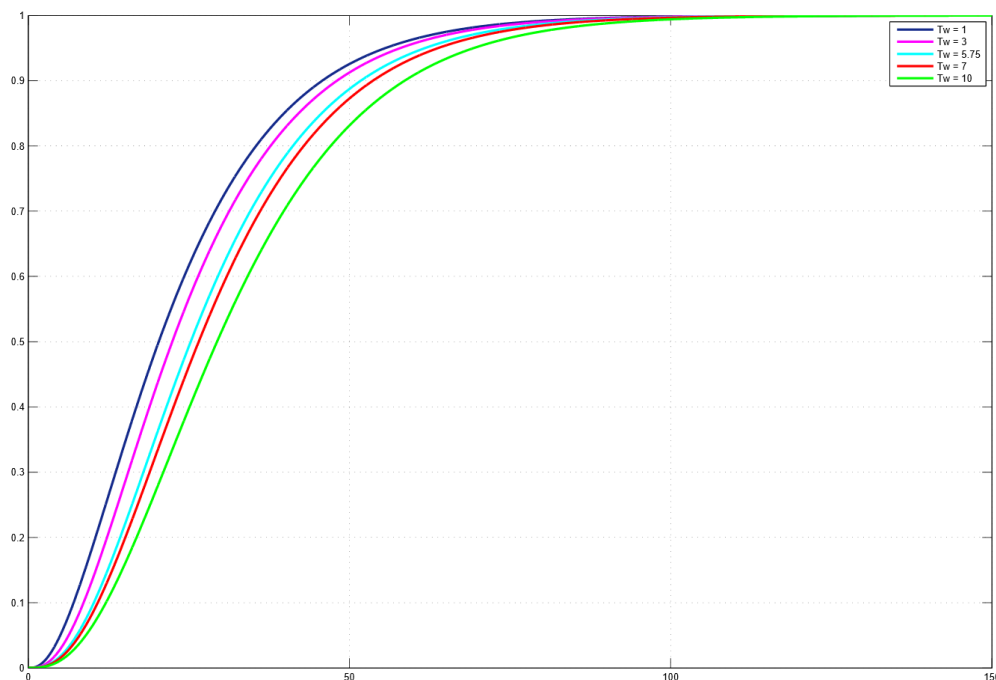


obr. 42: Akční zásah regulátoru PT1 s různými časovými konstantami

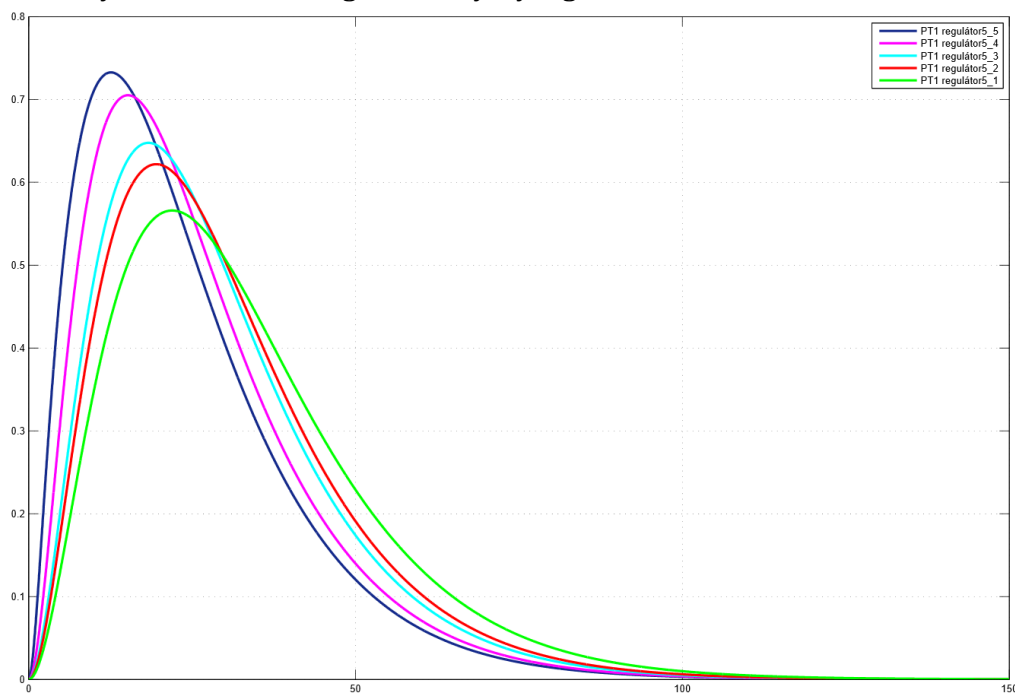
Pro ještě pomalejší náběh se dá využít filtrace žádané hodnoty. Pro tuto filtraci se opět využije setrvačný členek 1. řádu. [14] Nasimulujeme si průběhy s různými časovými konstantami těchto filtrů.



obr. 43: Simulace regulační smyčky s regulátorem PT1 a s filtrací žádané hodnoty



obr. 44: Výsledek simulace regulační smyčky regulátoru PT1 a s filtrací žádané hodnoty



obr. 45: Akční zásah regulátoru PT1 s filtrací žádané hodnoty

Se zvyšující se časovou konstantou filtrace se zpomaluje náběh akční veličiny, ale zároveň se zpomaluje celá přechodová charakteristika. Nicméně v našem případě nehraje rychlost přechodové charakteristiky velkou roli, tudíž se při následné implementaci bude volit vyšší časová konstanta pro filtraci žádané hodnoty. Tento způsob regulace se zatím jeví jako nejvhodnější. Nyní je potřeba si vše převést do diskrétního tvaru. Tomu se věnuje další podkapitola.

8.2 Diskretizace

Po návrhu řízení ve spojitém tvaru je nutné vše přetransformovat do diskrétního tvaru. Jediný prvek, který je potřeba v našem případě diskretizovat, je obecný přenos setrvačného članku prvního řádu, který se bude používat jak pro regulátor, tak pro filtraci žádané hodnoty. Zapišeme si tedy jeho přenos ve spojitém tvaru.

$$F_R = \frac{1}{Tp + 1} = \frac{a}{p + a}, \quad a = \frac{1}{T} \quad (4)$$

V tabulce převodů [5] mezi Laplaceovou a Z-transformací je uveden přímo náš případ, tudíž není nutné tvar nijak upravovat.

$$\begin{aligned} F(z) &= (1 - z^{-1}) * Z_{ekv} \left\{ \frac{F_R(p)}{p} \right\} \\ &= (1 - z^{-1}) * Z_{ekv} \left\{ \frac{1}{p} \frac{a}{p + a} \right\}, \quad a = \frac{1}{T} \end{aligned} \quad (5)$$

$$F(z) = \frac{z - 1}{z} * \frac{(1 - e^{-aT}) * z}{(z - 1) * (z - e^{-aT})} = \frac{(1 - e^{-aT})}{(z - e^{-aT})} \quad (6)$$

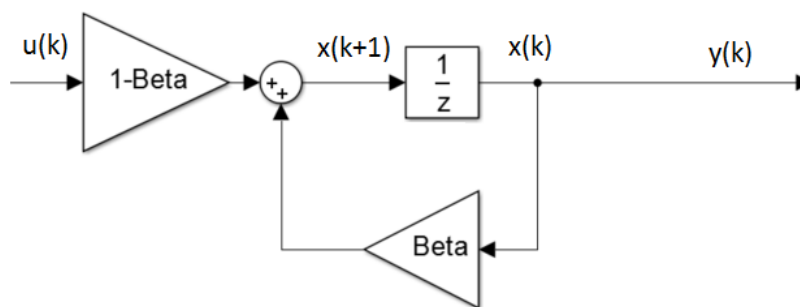
$$= \frac{(1 - \beta)}{(z - \beta)}, \quad \beta = e^{-aT} \quad (7)$$

Pro výraz e^{-aT} bylo zavedeno, z důvodu přehlednosti a následné implementaci do zdrojového kódu programu, označení β .

8.3 Kód regulátoru a jeho simulace

Po diskretizaci spojitého přenosu setrvačného členu je potřeba převést toto řešení do tvaru, který se dá implementovat do kódu řídicího systému. Pojdme si tedy nasimulovat vypočtený přenos. [18]

$$F(z) = \frac{(1 - \beta)}{(z - \beta)} = \frac{(1 - \beta)z^{-1}}{(1 - \beta z^{-1})} \quad (8)$$



obr. 46: Simulace diskrétního přenosu PT1 (8)

$$x(k+1) = \beta * x(k) + (1 - \beta) * u(k)$$

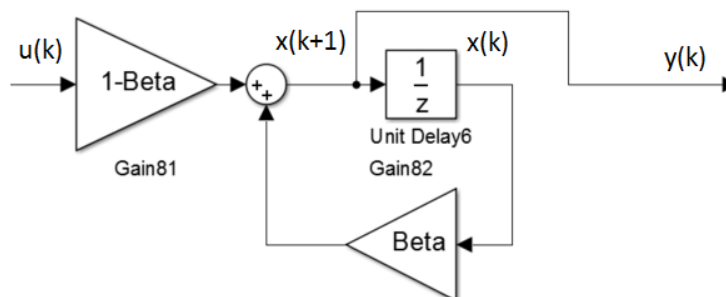
$$y(k) = x(k)$$

$$y(k+1) = x(k+1)$$

$$y(k+1) = \beta * y(k) + (1 - \beta) * u(k)$$

$$y(k) = \beta * y(k-1) + (1 - \beta) * u(k-1) \quad (9)$$

Při implementaci výsledné rovnice do PLC je ovšem nutné počítat s tím, že bude celý proces automaticky přidávat zpoždění o jeden krok. S tímto zpožděním budeme počítat při návrhu. Proto použijeme zapojení znázorněné na následujícím obrázku.



obr. 47: Simulace diskrétního přenosu PT1 pro implementaci do PLC

Ze zapojení je patrné, že by se „předpovídala budoucnost“. Jelikož je ale do soustavy zaneseno zpoždění o jeden krok, bude výsledné chování odpovídat zapojení z předchozího schématu (obr. 46). Znovu si odvodíme rovnici pro výstup regulátoru.

$$x(k+1) = \beta * x(k) + (1 - \beta) * u(k)$$

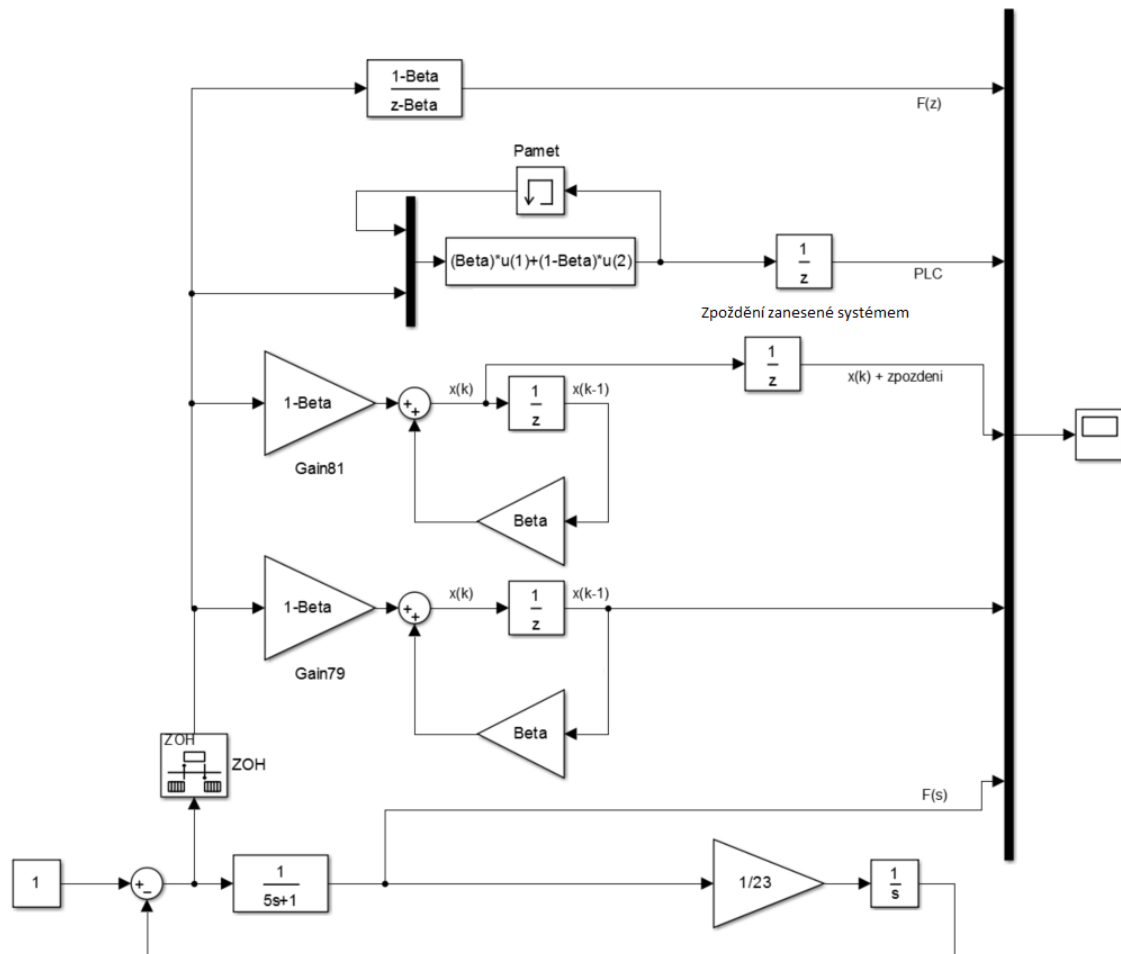
$$y(k) = x(k+1)$$

$$y(k-1) = x(k)$$

Výsledná rovnice, která se bude implementovat do PLC tedy bude:

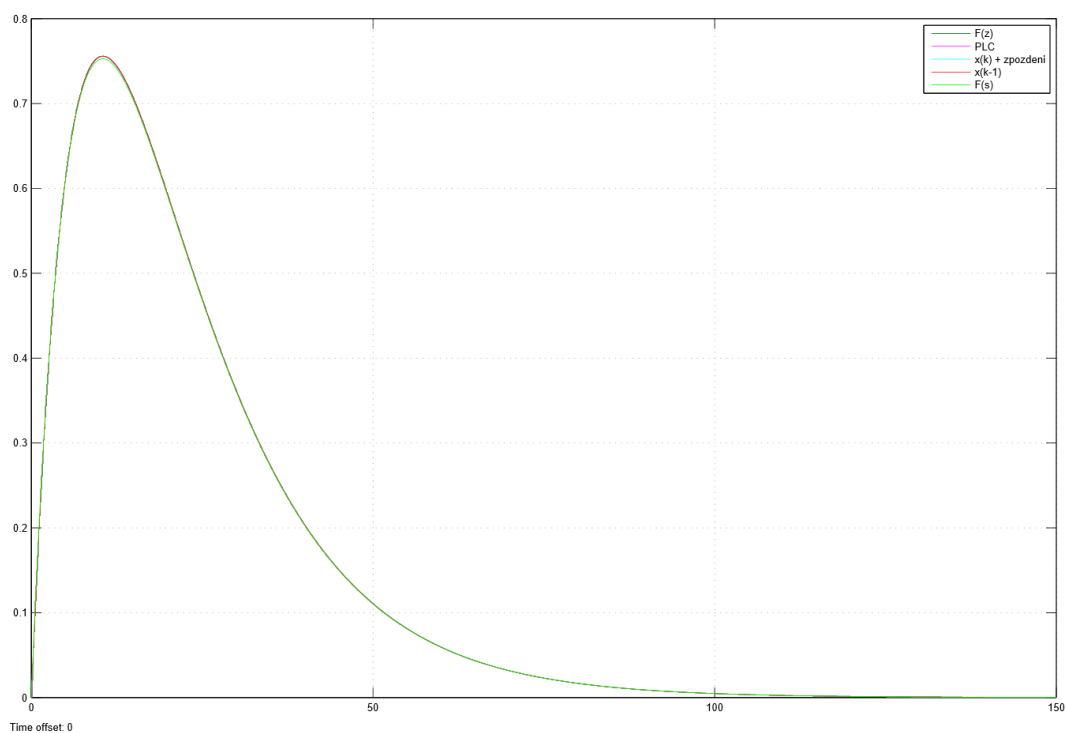
$$y(k) = \beta * y(k-1) + (1 - \beta) * u(k) \quad (10)$$

Nyní si provedeme v Simulinku kontrolu správnosti implementace.



obr. 48: Simulace správnosti řešení

Úplně dole je zadrátována simulace soustavy s regulátorem PT1 s časovou konstantou 5 sekund. Odtud je odebrán signál regulační odchylky, který je po vzorkování pomocí ZOH použit jako vstup do dalších simulačních větví. Seshora je to diskrétní přenos $F(z)$, pod ním simulace výsledné rovnice (10) a následně dvě zapojení dle obr. 46 a obr. 47. Na obr. 49 je vidět porovnání výstupu spojitého regulátoru s diskrétními zapojeními. Signály jsou totožné, řešení je tedy správné.



obr. 49: Výsledek simulace diskrétního řešení spojité soustavy

9 IMPLEMENTACE

V této kapitole bude popsáno uvedení návrhu do praktického řešení a jeho případná modifikace. Dále zde budou popsány jednotlivé části výsledného programu a vybráno konečné nastavení regulátoru.

9.1 Popis kódu

Nejprve si popíšeme pojmy, resp. proměnné, které se v programu vyskytují a případně jejich způsob implementace.

AIN_OK – Signál ze snímače polohy hydraulického válce (neupravený)

PolohaS – Standardizovaný údaj o poloze hydraulického válce (0–100 %)

Signál z magnetostrikčního snímače polohy je zaznamenáván do proměnné AIN_OK v rozsahu 26570, což ve skutečnosti odpovídá poloze, kdy je hydraulický válec, a tedy i rozváděcí kolo uzavřeno, až 10697, což zase odpovídá úplnému otevření rozváděcího kola. Tudíž je potřeba tuto hodnotu standardizovat na požadovaný rozsah, což je v našem případě 0–100 %. K tomu bude sloužit převodní vztah:

$$\text{PolohaS} := (\text{AIN_OK} - 26570) * (-0.00630);$$

PolohaZ – Žádaná hodnota, žádaná poloha hydraulického válce (0–100%)

Pro zapojení s filtrací žádané hodnoty se bude hodnota filtrovat setrvačným členem prvního řádu.

PolohaZV – Výstup z filtrace žádané hodnoty

PolohaZVM – Minulá hodnota výstupu filtrace žádané hodnoty

BetaZ – Proměnná Beta plynoucí z návrhu regulátoru viz. předchozí kapitola

$$\begin{aligned}\text{PolohaZV} &:= (\text{BetaZ}) * \text{PolohaZVM} + (1 - \text{BetaZ}) * \text{PolohaZ}; \\ \text{PolohaZVM} &:= \text{PolohaZV};\end{aligned}$$

e_odchylka – Regulační odchylka, rozdíl mezi žádanou a skutečnou polohou

VystupR – Hodnota výstupu regulátoru

VystupRM – Hodnota výstupu regulátoru v předchozím kroku

BetaR – Proměnná Beta plynoucí z návrhu regulátoru viz. předchozí kapitola

Kpro – Hodnota proporcionálního zesílení

```

VystupR :=Kpro*e_odchylka;
VystupR :=(BetaR)*VystupRM+(1-BetaR)*e_odchylka;
VystupRM :=VystupR;

```

VystupNaVentil – Hodnota typu real představující vypočtenou hodnotu akčního zásahu regulátoru.

```

IF e_odchylka > filtr THEN
VystupNaVentil:=((0.0002*(vystupR^2))-
(0.0059*vystupR)+1.8705)*2764.8;
ELSE IF e_odchylka < -filtr THEN
VystupNaVentil:=-((0.0002*(vystupR^2))-
(0.0052*vystupR)+3.3)*2764.8);
ELSE
VystupNaVentil :=0;
END_IF
END_IF

```

V programu je pro bezpečnost ještě zavedeno omezení akčního zásahu na maximální hodnoty 27648 a -27648, což odpovídá +10 až -10 V.

```

IF VystupNaVentil > 27648 THEN
VystupNaVentil:=27648;
ELSE IF VystupNaVentil < -27648 THEN
VystupNaVentil:=-27648;
ELSE
VystupNaVentil:=VystupNaVentil;
END_IF
END_IF

```

AOUT_proporc_RK – Hodnota typu integer posílaná na výstupní kartu ABB AX 521, která ji převádí na analogový signál v rozsahu -10 až 10 V. Toto napětí poté řídí proporcionální hydraulický ventil.

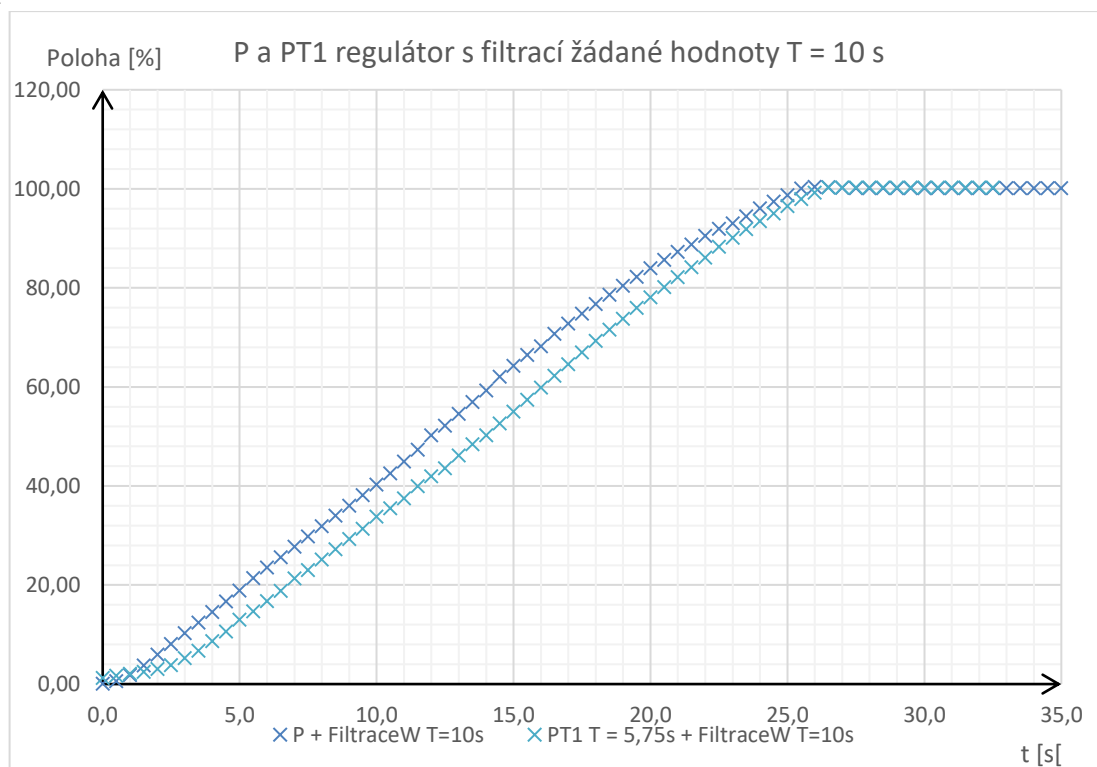
```

AOUT_proporc_RK :=REAL_TO_INT(VystupNaVentil);

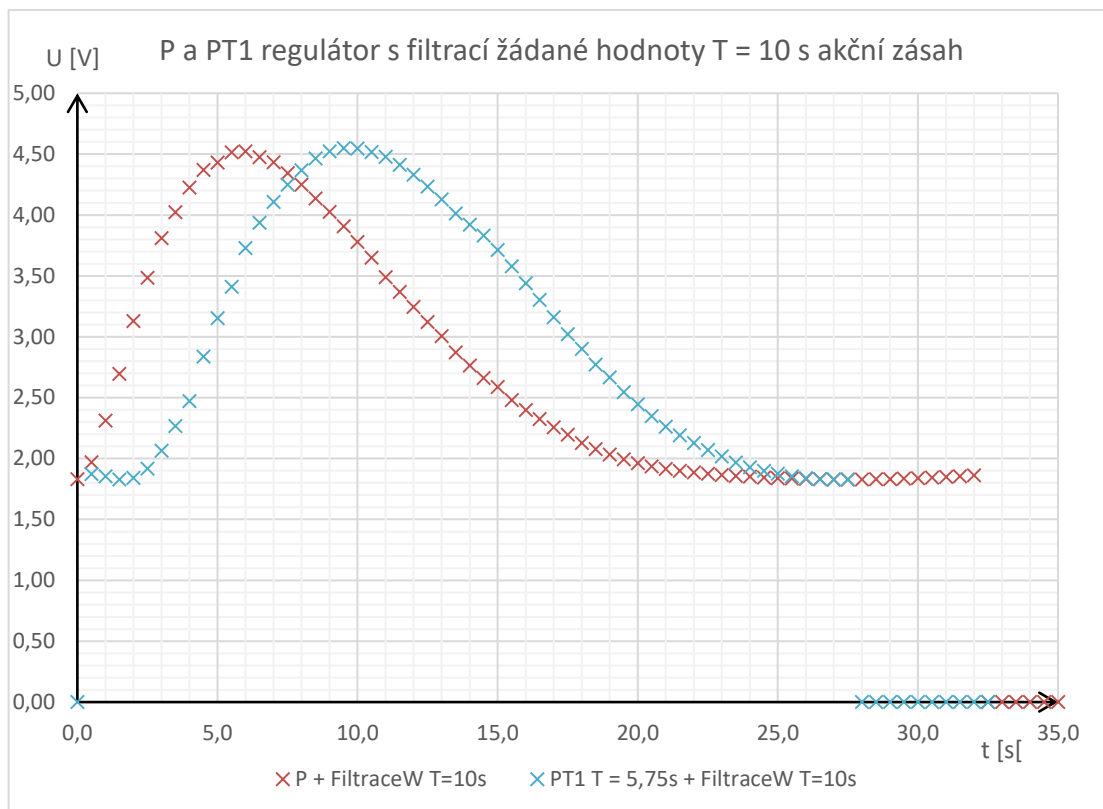
```

9.2 Regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty

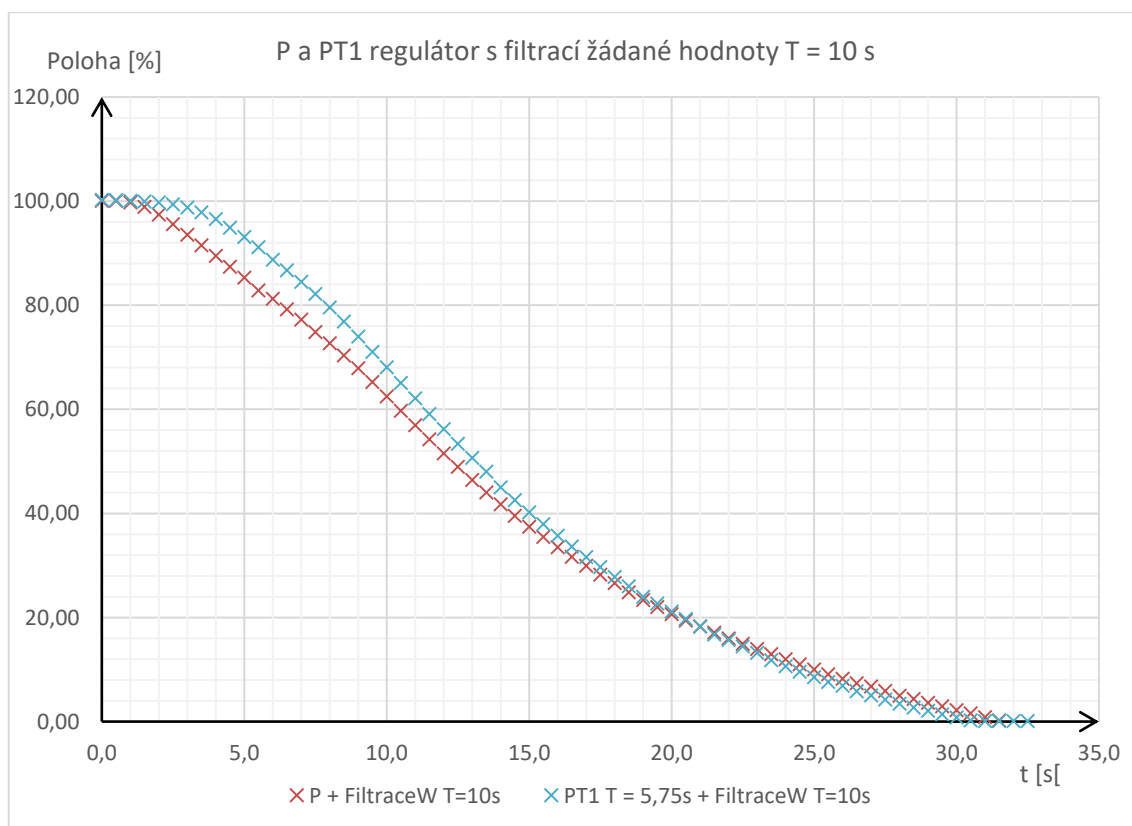
Nyní přistoupíme k výsledkům. Byly vyzkoušeny regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty. Jako časová konstanta regulátoru PT1 byla nastavena vypočtená hodnota $T = 5,75\text{ s}$ (viz. kapitola 8.1). Hodnota časové konstanty byla nastavena empiricky s ohledem na poměr zpomalení náběhu akčního zásahu a zpomalení celého průběhu.



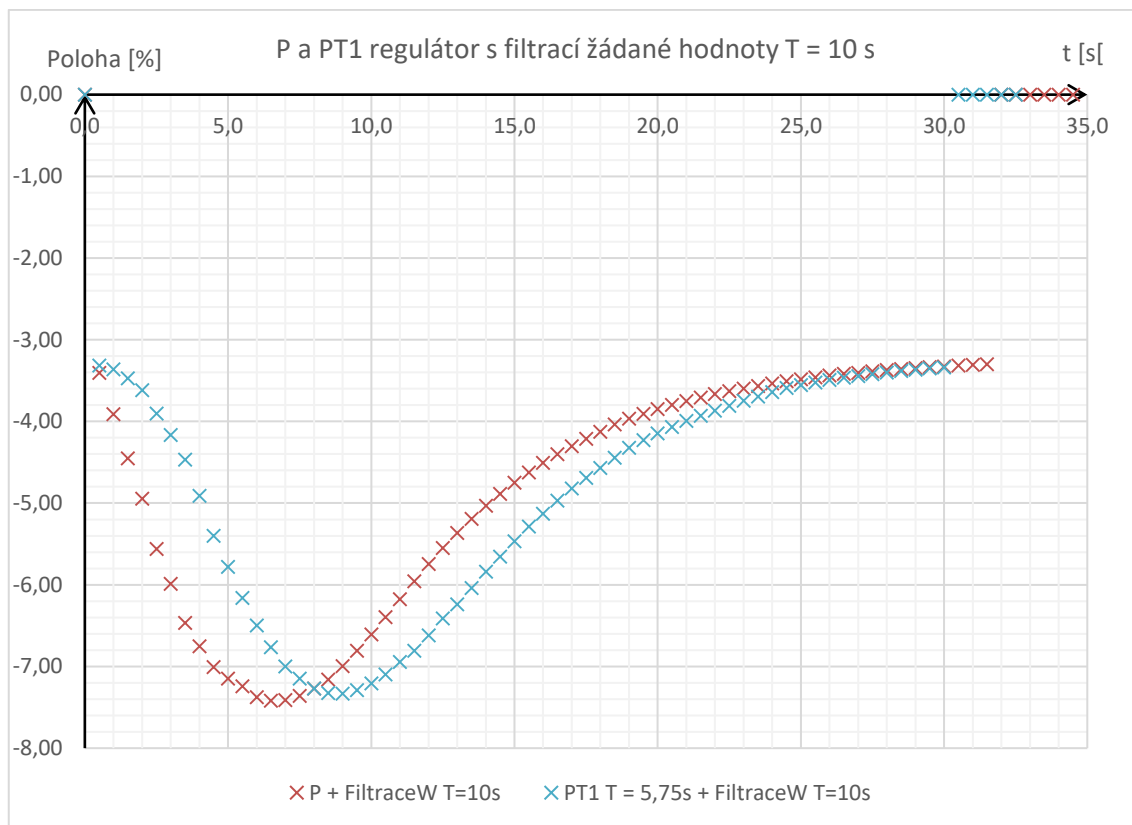
obr. 50: Průběh otevírání s regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty $T = 10\text{ s}$



obr. 51: Akční zásah při otevírání s regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty $T = 10$ s



obr. 52: Průběh zavírání s regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty $T = 10$ s

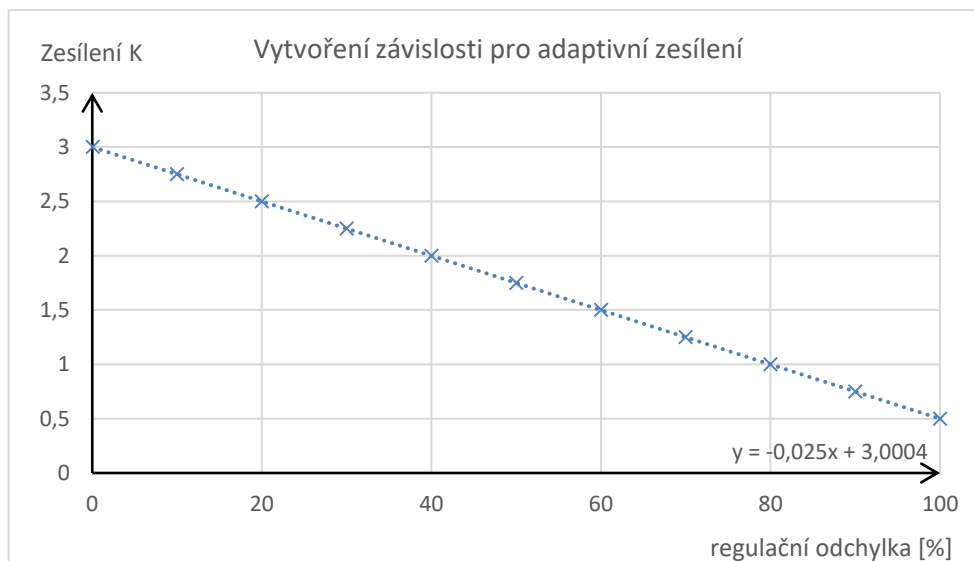


obr. 53: Akční zásah při zavírání s regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty $T = 10$ s

Regulátor PT1 s filtrací regulační odchylky splnil požadavky a očekávání. Nicméně jak bude přiblíženo v další kapitole, vznikl další požadavek na chování regulátoru.

9.3 Adaptivní zesílení

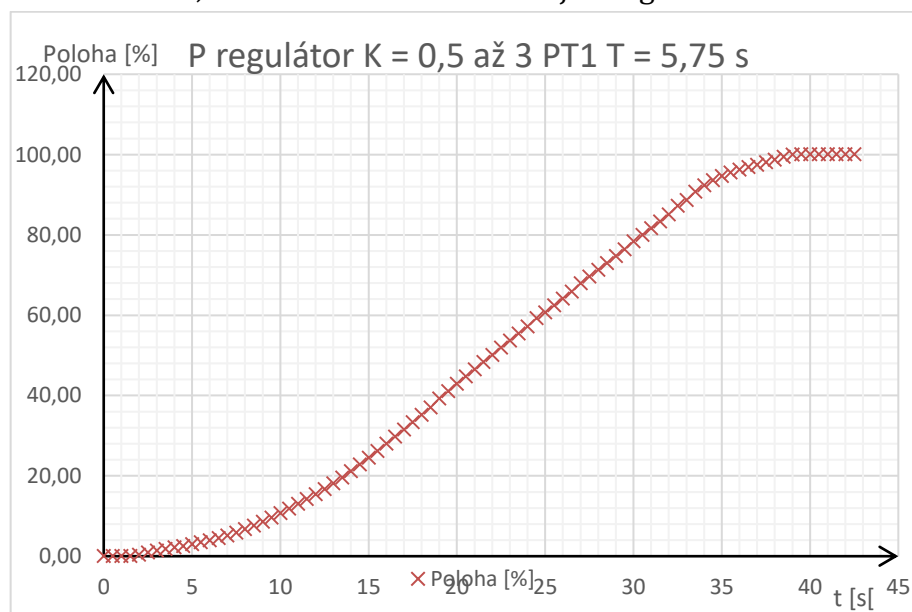
V průběhu realizace navržených regulátorů vznikl jeden požadavek. Šlo o to, aby malé změny nastavení žádané hodnoty měly rychlejší přechodové charakteristiky než změny velké. Dosavadně navržené regulátory tento požadavek nesplňovaly. Jednoduše řečeno čas při pohybu válce z 0 na 100 % byl stejný jako čas například z 0 na 5 %. Vznikl nápad použít v závislosti na velikosti regulační odchylky nějaký způsob adaptivního zesílení. Nejen, že splní požadavek na rychlejší pohyb válce při malých změnách žádané hodnoty, ale také vytvaruje akční zásah, a tudíž celý průběh blíže požadovanému tvaru. Proto byly empiricky stanoveny hodnoty zesílení na obou stranách rozsahu regulační odchylky a vytvořena pro toto chování lineární závislost.



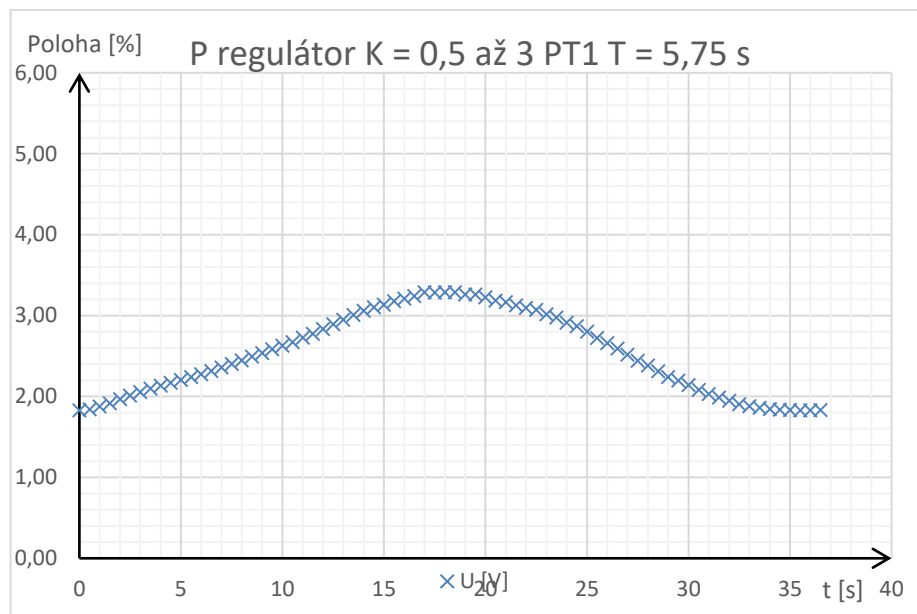
obr. 54: Vytvoření závislosti pro adaptivní zesílení

```
k_adapt := -0.025 * (ABS(e_odchylka)) + 3;
vystupR := k_adapt * vystupR;
```

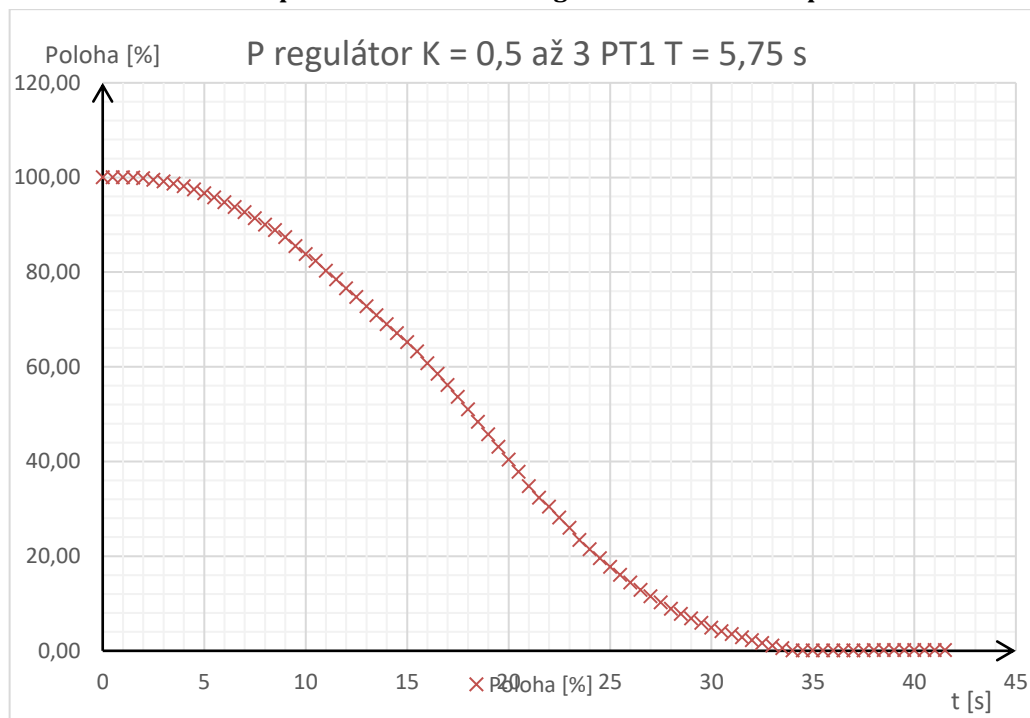
Výsledné průběhy regulátoru PT1 s časovou konstantou 5,75s a adaptivním zesílením v rozsahu 0,5 až 3 lze vidět na následujících grafech.



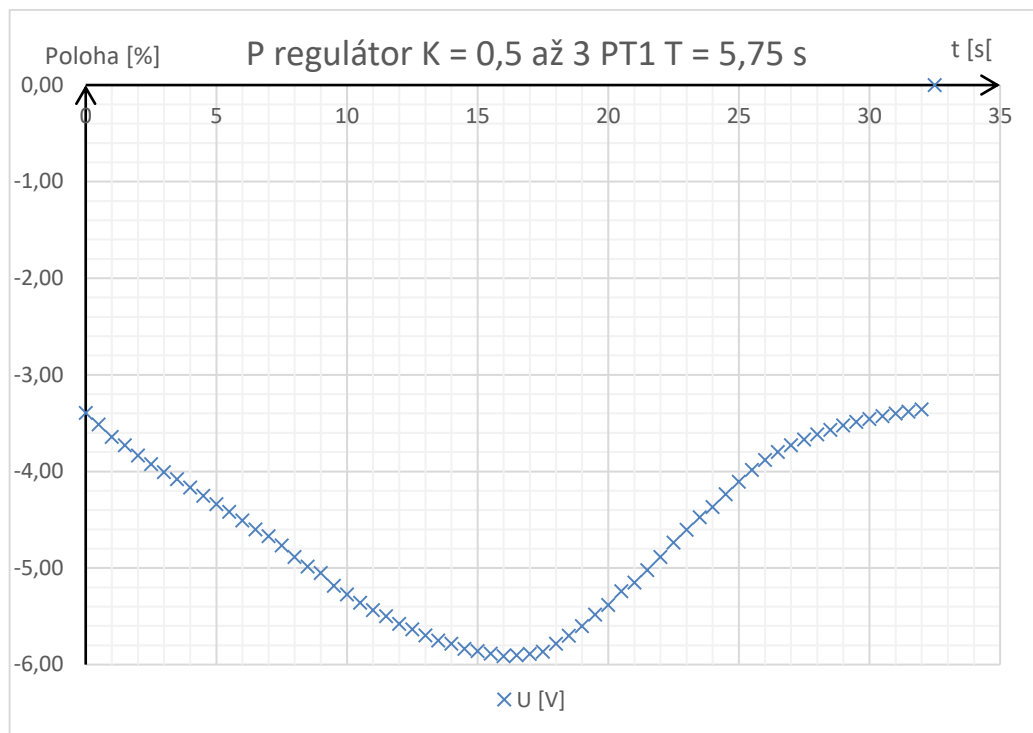
obr. 55: Průběh při otevírání válce s regulátorem PT1 a adaptivním zesílením



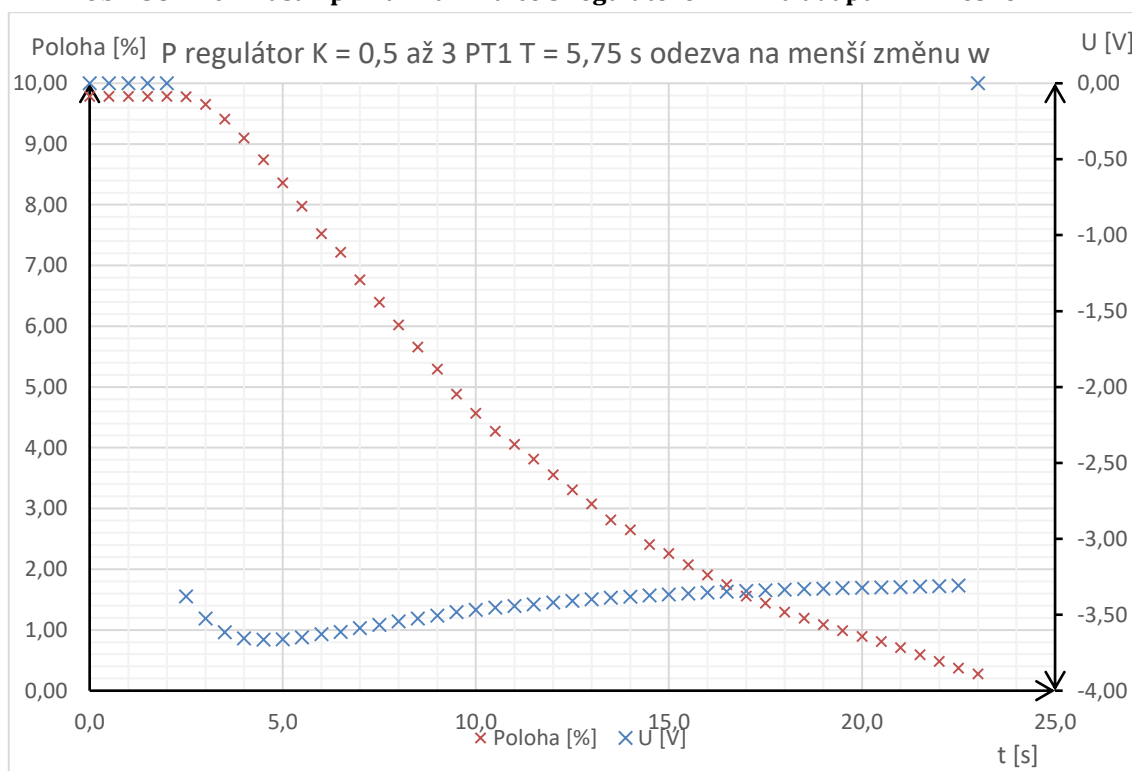
obr. 56: Akční zásah při otevírání válce s regulátorem PT1 a adaptivním zesílením



obr. 57: Průběh při zavírání válce s regulátorem PT1 a adaptivním zesílením



obr. 58: Akční zásah při zavírání válce s regulátorem PT1 a adaptivním zesílením



obr. 59: Průběh a akční zásah při otevírání válce a malé změně žádané hodnoty s regulátorem PT1 a adaptivním zesílením

Z grafů je patrná zmíněná další výhoda tohoto řešení, a to ještě pozvolnější náběh akční veličiny oproti řešení PT1 s filtrací žádané hodnoty.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl návrh a implementace řízení proporcionálního hydraulického ventilu PRM7 – 043Y11/04-24E01 na MVE v Rájci-Jestřebí. Malá vodní elektrárna je majetkem společnosti Mavel a.s., která je zároveň zadavatelem práce. Tento ventil slouží k řízení hydraulického válce, který přes mechanický převod, ovládá rozváděcí kolo přivádějící vodu do Francisovy dvojité turbíny na jedno z oběžných kol.

V první fázi této práce byla popsána struktura a jednotlivé prvky MVE Rájec – Jestřebí. Byl proveden teoretický úvod a průzkum trhu v oblasti hydraulických prvků a následně popsán ventil samotný.

Hlavním důvodem nasazení proporcionálního hydraulického ventilu namísto klasického třístavového ventilu byla možnost přesnější regulace a z toho plynoucí šetrnost k soustavě. Hlavním požadavkem na výslednou regulaci bylo dosáhnout co nejplynulejší přechodové charakteristiky pohybu hydraulického válce a tím i rozváděcího kola.

Po analýze celé soustavy z hlediska řízení se definovalo, co bude potřeba naměřit. Po následné implementaci ventilu do hydraulického systému MVE se přistoupilo k měření. Nejprve se stanovila a nastavila, po konzultaci s projektantem hydraulického systému MVE, časová konstanta hydraulického válce. Poté se naměřila závislost rychlosti otevírání válce na řídicím napětí, z čehož se dala nepřímo stanovit závislost průtoku na řídicím napětí. Z těchto hodnot se vyčetly nelinearity ventilu, kterými jsou saturace a pásmo necitlivosti. Mezi těmito pásmy byla stanovena oblast, ve které se bude pohybovat akční zásah. Pomocí polynomické regrese se získala funkce v této oblasti a ta se použila v samotném řízení. Poslední část se týkala proměření hystereze ventilu, která byla pro naše účely prohlášena za zanedbatelnou.

Následně se přistoupilo k návrhu regulátoru. Jako nejvhodnější způsob regulace byl zvolen setrvačný článek prvního řádu, v anglické literatuře [1] označovaný jako PT1. K němu byla přiřazena filtrace žádané hodnoty. Tato kombinace vytvořila požadovaný pozvolný průběh akční veličiny.

V poslední fázi přišla na řadu implementace do řídicího systému vodní elektrárny. Systém je řízen PLC ABB AC-500 a programuje se v prostředí Control Builder Plus. Po vytvoření a optimalizaci řešení byly vyzkoušeny regulátory P a PT1 s filtrací žádané hodnoty. Regulátor PT1 splnil teoretické předpoklady pozvolného akčního zásahu. Po představení hotového funkčního řešení představitelům firmy Mavel vznikl dodatečný požadavek, týkající se možnosti rychlejší přechodové charakteristiky pro malé změny žádané hodnoty. Tento požadavek byl vyřešen adaptivním zesílením v závislosti na velikosti regulační odchylky. Toto řešení se

ukázalo jako nejvhodnější a bylo použito pro výsledné řízení, které bylo uvedeno do provozu.

Literatura

- [1] JELALI, Mohieddine a Andreas KROLL. *Hydraulic Servo-systems Modelling, Identification and Control*. London: Springer London, 2003. ISBN 1447100999.
- [2] Argo-hytos.com: *Manual_PRM7_hc5175_CZ* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.argo-hytos.com/cz/vyrobky/ridici-a-regulacni-technika/proporcionalni-technika/prm7-04.html>
- [3] NYCE, David S. *Linear position sensors: theory and application*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004. ISBN 978-0471233268.
- [4] CHOUX, Martin a Geir HOVLAND. *Design of a hydraulic servo system for robotic manipulation* [online]. Norway, 2008 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://home.uia.no/geirh/PDF/C39.pdf>. University of Agder: Department of Engineering Sciences/Mechatronics.
- [5] CASINI, Marco. *Table of Laplace and Z-transforms* [online]. Siena, 2016 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://control.dii.unisi.it/sdc/altro/TabellaTrasformataZ.pdf>. Univerzita Siena.
- [6] MAJUMDAR, S.R. *Oil hydraulic systems: principles and maintenance*. 7th ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2001. ISBN 9780074637487.
- [7] HUNT, Trevor M., N. D. VAUGHAN a R. H. WARRING. *The hydraulic handbook*. 9th ed. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier Advanced Technology, c1996. ISBN 9781856172509.
- [8] *Parker Hannifin* [online]. 2014 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.parker.cz/>
- [9] *Bosch Rexroth. The Drive & Control Company* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com>
- [10] *ARGO-HYTOS* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.argo-hytos.com>
- [11] *ABB Group: Leading digital technologies for industry* [online]. 2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://new.abb.com>
- [12] *Balluff* [online]. 2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.balluff.com>
- [13] DAVID S. NYCE. *Linear Position Sensors Theory and Application*. Hoboken: John Wiley, 2003. ISBN 9780471474272.
- [14] PIVOŇKA, Petr. *Číslicová řídící technika*. Brno, 2012. Skriptum. VUT Brno.
- [15] BLAHA, Petr a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace I*. Brno. Skriptum. VUT Brno.
- [16] Firemní dokumentace MVE Rájec-Jestřebí Mavel a.s.
- [17] KARBAN, P.: *Výpočty a simulace v programech MATLAB a Simulink*. Computer Press, a.s., 2006, ISBN 978-80-251-1448-3
- [18] ŠTĚCHA, Jan a Vladimír HAVLENA. *Teorie dynamických systémů*. Praha, 2005. Skriptum. VUT Brno.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

FEKT	-	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	-	Vysoké učení technické v Brně
MVE	-	Malá vodní elektrárna
OK	-	Oběžné kolo
RK	-	Rozváděcí kolo ovládající přítok vody na oběžné kolo
PLC	-	Programovatelný logický automat

Seznam příloh

Příloha 1. CD obsahující:

- Elektronickou verzi diplomové práce
- Zdrojový text pro regulátory v textovém souboru