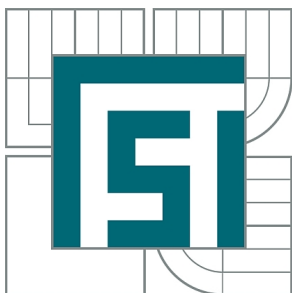


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

TESTOVACÍ JEDNOTKA PROPORCIONÁLNÍCH VENTILŮ

TESTING UNIT FOR PROPORTIONAL VALVES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VÁCLAV SOVA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ROBERT GREPL, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Václav Sova

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Testovací jednotka proporcionálních ventilů

v anglickém jazyce:

Testing unit for proportional valves

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je navrhnout testovací jednotku proporcionálních ventilů, která bude sloužit pro ověřování funkce ventilů při uvádění hydraulických systémů do provozu. Jednotka musí být kompatibilní se standardními ventily renomovaných světových výrobců a musí umožňovat volbu typu řídicích signálů.

V úvodu je nutné provést analýzu dostupných řešení a provést jejich zhodnocení. Na základě této analýzy bude dále rozpracovaná nová koncepce, která bude optimální dle požadavků zadavatele. Jedná se o návrh kompaktní přenosné jednotky, včetně tvorby dokumentace a výroby prototypu. V závěru bude provedeno testování jednotky a zhodnocení výsledků testů.

Tato práce je zadána a bude řešena ve spolupráci se společností ŽĎAS, a.s., Žďár nad Sázavou, Czech Republic.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Studium dokumentace k proporcionálním ventilům a přehled požadovaných I/O signálů pro jejich řízení. Zpracování požadavků na testovací jednotku.
- 2) Realizace testovací jednotky v prostředí Matlab/Simulink a RT Toolbox s použitím karty MF624. Konzultace se zadavatelem (ŽĎAS).
- 3) Návrh a výroba přenosné jednotky založené na mikrokontroléru PIC. Tvorba SW pomocí nástrojů v Simulinku (RT Workshop, Kerhuel tbx.).
- 4) Testování prototypu jednotky na ventilu dodaném zadavatelem.

Seznam odborné literatury:

- Valášek, M.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT 1995
- Noskiewicz: Modelování a identifikace systémů
- dokumentace k proporcionálním ventilům dodaná firmou ŽĐAS

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Robert Grepl, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem a konstrukcí přenosné testovací jednotky hydraulických proporcionálních ventilů, jejíž předpoklad využití je především při údržbě, kontrole a uvádění hydraulických zařízení do provozu. Součástí je úvod do problematiky proporcionálních ventilů a již existujících testovacích jednotek. Během práce se seznámíme s vývojem a konstrukcí elektroniky, která je založena na mikrokontroléru dsPIC, jehož obslužný program budeme vyvíjet pomocí Kerhuel Toolboxu v prostředí Simulink. Výsledkem práce bude prototyp testovací jednotky.

Klíčová slova:

testovací jednotka proporcionálních ventilů; proporcionální ventil

Abstract

This bachelor thesis deals with development and construction of a portable testing unit for hydraulic proportional valves, whose assumption of usage is primarily for maintenance, inspection and commissioning of hydraulic machinery in operation. The thesis also includes an introduction to the issue of proportional valves and the existing testing units. Through the work, the development and design of electronics, based on dsPIC microcontroller is introduced and its utility program will be developed using Kerhuel Toolbox in Simulink environment. The result of the work will be a prototype of testing unit.

Keywords:

testing unit for proportional valves; proportional valve

Bibliografická citace práce

SOVA, V. Testovací jednotka proporcionálních ventilů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Robert Grepl, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně na základě svých znalostí, dovedností, rad a pokynů vedoucího bakalářské práce. A uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Brně dne:

.....
Václav Sova

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě této bakalářské práce. Především vedoucímu práce Ing. Robertu Greplovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky. Dále pak kolegům z Mechlabu za příjemné a přátelské pracovní prostředí. A v neposlední řadě rodině, jež mě podporuje a umožnila mi studovat a věnovat se škole.

Obsah

1	Úvod	1
2	Rozbor zadání a stanovení cíle řešení	2
3	Rešerše	3
3.1.	Proporcionální ventily	3
3.1.1	Akční člen.....	3
3.1.2	Senzor.....	3
3.1.3	Elektronika	4
3.2.	Existující testovací jednotky	5
3.2.1	Parker EX-M03.....	5
3.2.2	Bosch Rexroth VT-VETSY-1	6
3.2.3	Dietz ValveExpert Checker	7
4	Elektronika testovací jednotky.....	8
4.1.	Hlavní DPS a DPS pro μ C.....	9
4.2.	Diferenční zesilovač	11
4.3.	Převodník U/I	14
4.4.	Převodník analogových napěťových úrovní	16
4.5.	Převodník I/U	18
4.6.	Připojení displeje	20
5	Obslužný program	22
5.1.	Kerhuel Toolbox	22
5.2.	Obsluha DAC	22
5.3.	Obsluha LCD displeje	23
5.4.	Kompletní program.....	24
6	Testovací jednotka s kartou MF 624.....	28
6.1.	Karta MF 624	28
6.2.	Testování ventilu	28
7	Závěr	29
8	Použité zkratky.....	30
9	Použité zdroje a literatura.....	31

Seznam obrázků

Obr. 1: Proporcionální ventil s integrovanou elektronikou a zpětnou vazbou [2]	1
Obr. 2: Schéma proporcionálního šoupátkového rozvaděče [18]	3
Obr. 3: Princip LVDT [19].....	4
Obr. 4: Vstupní konektor 6 + PE [2]	4
Obr. 5: Parker EX-M03 [5]	5
Obr. 6: Bosch Rexroth VT-VETSY-1 [6]	6
Obr. 7: Dietz ValveExpert Checker [7]	7
Obr. 8: Blokové schéma propojení jednotlivých DPS	9
Obr. 9: Osazená hlavní DPS a DSP pro μC	10
Obr. 10: Základní schéma diferenčního zesilovače	11
Obr. 11: Frekvenční charakteristika diferenčního zesilovače.....	12
Obr. 12: Skutečné zapojení diferenčního zesilovače	12
Obr. 13: Šum na výstupu diferenčního zesilovače (20 mV peak-peak)	13
Obr. 14: Skutečné zapojení U/I převodníku	14
Obr. 15: Frekvenční charakteristika U/I převodníku.....	15
Obr. 16: Kmitání na výstupu U/I převodníku	15
Obr. 17: Osazená DPS U/I převodníku.....	15
Obr. 18: Základní schéma sumačního zesilovače	16
Obr. 19: Frekvenční charakteristika U/U převodníku	17
Obr. 20: Skutečné zapojení U/U převodníku	17
Obr. 21: Osazená DPS U/U převodníku	17
Obr. 22: Základní schéma I/U převodníku	18
Obr. 23: Skutečné zapojení I/U převodníku	19
Obr. 24: Osazená DPS I/U převodníku.....	19
Obr. 25: Foto displeje testovací jednotky.....	21
Obr. 26: Globální proměnné definované v Simulinku	25
Obr. 27: Volání externích C funkcí Simulinkem	25
Obr. 28: Hlavní funkční schéma	26
Obr. 29: Voltage OUT subsystém.....	26
Obr. 30: Vypisování výstupních hodnot na displej	27
Obr. 31: Obsluha podsvícení a blikající LED	27

Seznam tabulek

Tab. 1: Popis kontaktů konektoru 6 + PE	4
Tab. 2: Digitálně analogový převod před a po úpravě zesílení	13
Tab. 3: Převod krajních rozsahů U/U převodníku	17
Tab. 4: Popis vývodů displeje s řadičem HD44780	20
Tab. 5: Propojení komunikačních linek displeje s μ C	21
Tab. 6: Instrukce displeje s řadičem HD44780	24

1 Úvod

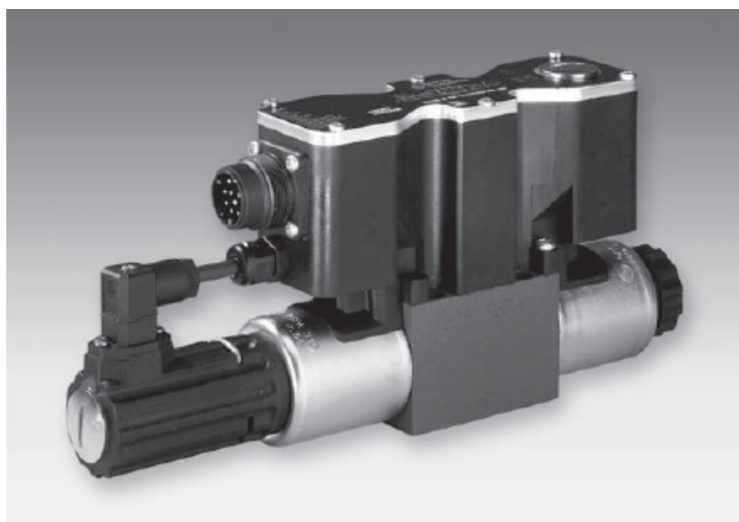
Hydraulické obvody jsou důležitou součástí průmyslových strojů a zařízení. Jejich výhodou je možnost působení velkou silou při malých rozměrech a hmotnosti. Také jejich složitost a náročnost na údržbu je poměrně nízká. S rozvojem elektroniky a řízení se tyto technické disciplíny začaly propojovat a nyní hydraulika ve spojení s elektronikou a řízením umožňuje dosahovat dříve nemyslitelných, velice rychlých a přesných pohybů při zachování nenáročného provozu.

Článkem, který spojuje hydraulické a elektronické části jsou proporcionální a servo ventily. Přijímají elektrické signály a na jejich základě pak řídí tlak a průtok v hydraulických obvodech.

Servo ventily dosahují velice dobré dynamiky a přesnosti. Řízení rozdělovacího členu, šoupátka řídí servomotor. Řízení je zpětnovazební a zpětnou vazbou může být poloha šoupátka, tlak v systému, případně poloha řízeného aktuátoru. Nevýhodou servo ventilů je jejich vysoká cena a náročnost na čistotu hydraulické kapaliny.

Proporcionální ventily se liší v tom, že poloha šoupátka je nastavována elektromagnetem. Ventil může být vybaven zpětnou vazbou, kterou je poloha šoupátka. Jejich výhodou proti servo ventilům je příznivější cena a menší náročnost na čistotu hydraulické kapaliny, což je vykoupeno menší rychlostí a přesností. Rozdíl v rychlosti a přesnosti se v dnešní době pomalu smazává s rozvojem řízení.

Cílem této práce je navrhnout testovací jednotku proporcionálních ventilů, která bude sloužit především k usnadnění uvádění zařízení a provozů do chodu, k jednoduché diagnostice a bude využívána při údržbě a montáži. Součástí práce je také průzkum a studie již existujících testovacích jednotek. Ve spolupráci s firmou ŽDAS, a.s. budou zároveň zpracovány požadavky na prototyp testovací jednotky tak, aby jednotka odpovídala požadavkům na funkčnost a jednoduchou obsluhu při průmyslovém využití.



Obr. 1: Proporcionální ventil s integrovanou elektronikou a zpětnou vazbou [2]

2 Rozbor zadání a stanovení cíle řešení

Zadání bakalářské práce obsahuje tyto body:

- Studium dokumentace k proporcionálním ventilům a přehled požadovaných signálů I/O signálů pro jejich řízení. Zpracování požadavků na testovací jednotku.
- Realizace testovací jednotky v prostředí Matlab/Simulink a RT Toolbox s použitím karty MF624. Konzultace se zadavatelem (ŽŽAS).
- Návrh a výroba přenosné testovací jednotky založené na mikrokontroléru PIC. Tvorba SW pomocí nástrojů v Simulinku (RT Workshop, Kerhuel tbx.).
- Testování prototypu jednotky na ventilu dodaném zadavatelem.

Důležité je důkladně se seznámit s proporcionálními ventily, především nastudovat jejich řídicí signály a spojovací konektory. Zaměřit se přitom na ventily různých firem, aby testovací jednotka nebyla použitelná pouze pro výrobce jednoho typu ventilů.

Otázce realizace testovací jednotky s použitím I/O karty MF624 se budeme věnovat spíše okrajově. Je to z toho důvodu, že ventil nebude pravděpodobně trvale k dispozici a realizace testovací jednotky pomocí karty MF624 nemá smysl pro průmyslový provoz. Využití by mohlo být třeba pro laboratorní podmínky, při měření parametrů a stability řízení ventilu. Pokud bude ventil k dispozici můžeme se například pokusit odměřit frekvenční charakteristiku.

Plně se budeme věnovat návrhu prototypu testovací jednotky. Na testovací jednotku jsou stanoveny tyto požadavky:

- Jednotka bude umožňovat tyto řídicí signály: $\pm 10\text{ V}$, $0..10\text{ V}$, $0..20\text{ mA}$, $4..20\text{ mA}$.
- Možnost generovat tyto průběhy signálu:
 - **konstantní** – ovládání potenciometrem
 - **sinusový** – nastavení střední hodnoty, amplitudy a frekvence
 - **obdélníkový** – nastavení střední hodnoty, amplitudy a frekvence
 - **pilový** - nastavení střední hodnoty, amplitudy a frekvence
- Jednoduché a přehledné uživatelské rozhraní.
- Robustní konstrukce s dostatečným krytím pro průmyslové použití.
- Napájení ze sítě, případně akumulátorový provoz.

Požadavky na testovací jednotku jsou příliš rozsáhlé na to, abychom se hned pustili do finální konstrukce. Nejdříve bude nutné vytvořit prototyp, na kterém si ověříme jednotlivé funkční bloky a správnost koncepce. Tyto poznatky pak budou využity při návrhu finální verze.

3 Rešerše

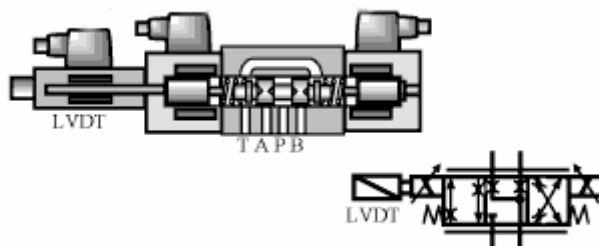
3.1. Proporcionální ventily

Proporcionální ventily jsou meziklánek mezi hydraulickými a elektronickými systémy. Umožňují spojitě regulovat tlak nebo průtok hydraulického systému na základě elektronického řídicího signálu. Proporcionální ventil se skládá z hydraulické části, která může zastávat různé funkce. Hlavní dělení je na:

- **Tlakové řídicí ventily:** odlehčovací a redukční ventily, nabízejí možnost regulovat tlak na základě řídicího signálu.
- **Čtyřcestné šoupátkové rozvaděče:** umožňují regulovat směr proudění a škrcení kapaliny proporcionálně k řídicímu signálu.
- **Ventily řízení průtoku:** dvou nebo třicestné, tlakově kompenzované, k řízení toku nezávisle na zátěži.

3.1.1 Akční člen

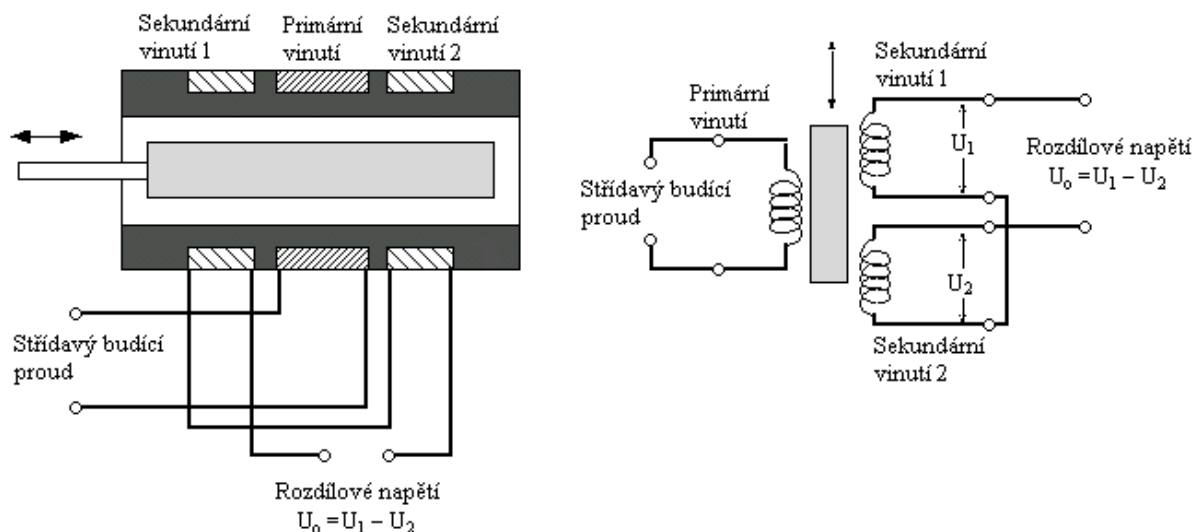
Akčním členem ventilu jsou jeden nebo dva solenoidy, které působí na hydraulickou část. V případě čtyřcestného šoupátkového rozvaděče je šoupátko uprostřed a na koncích jsou jádra, která zasahují do solenoidů. Při požadavku na vychýlení šoupátka se pustí elektrický proud do odpovídající cívky, která se snaží vtáhnout jádro do sebe. Velikost síly závisí na proudu procházejícím cívkou. Šoupátko je drženo v neutrální poloze pružinami. Z toho vyplývá výhoda, že v případě poruchy, ztráty napájení, zaujme šoupátko předem definovanou, bezpečnou polohu. Solenoidy se většinou konstruují tak, aby mohlo být napájecí napětí výkonové elektroniky 24 V stejnosměrných a maximální proud bývá 2 až 3 A. Přesné hodnoty najdeme v katalogových listech každého ventilu.



Obr. 2: Schéma proporcionalního šoupátkového rozvaděče [18]

3.1.2 Senzor

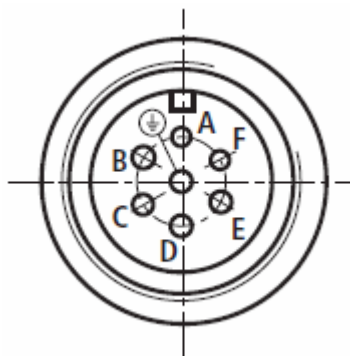
Senzorem, pokud je jím ventil vybaven, je diferenciální transformátor LVDT (linear variable differential transformer) sloužící k měření polohy. Obsahuje jedno primární vinutí a dvě sekundární vinutí vzájemně vázané pohyblivým feromagnetickým jádrem. Sekundární cívky jsou zapojeny sériově, ale opačnými konci k sobě. Primární vinutí je buzeno střídavým elektrickým proudem. V sekundárním vinutí se indukuje napětí přímo úměrné poloze jádra. Když je jádro uprostřed, v každé cívce se indukuje stejně velké napětí ale v protifázi. Tedy celková velikost napětí je nulová. V případě vychýlení jádra na jednu nebo druhou stranu je jedno napětí větší než druhé a celkový součet je nenulový. Velikost napětí odpovídá vzdálenosti od nulové polohy a z fáze se určí strana.



Obr. 3: Princip LVDT [19]

3.1.3 Elektronika

Ventily se dodávají ve dvou provedeních: s integrovanou elektronikou nebo bez ní. V případě integrované elektroniky tvoří ventil kompaktní celek, který sdružuje výkonovou a řídicí elektroniku s dostatečným krytím. Ventil může být řízen analogovým napěťovým nebo proudovým signálem, typicky ± 10 V nebo 4..20 mA. Objevují se i jiné hodnoty jako 0..10 V a 0..20 mA, ± 20 mA. Také může být k dispozici signál z polohového senzoru LVDT, který je již upraven a vyveden jako napěťový nebo proudový výstup. Propojení ventilu s okolím obstarává většinou jeden 6 + PE konektor podle normy DIN EN 175201-804 nebo DIN 43563, ještě se vyskytují konektory čtyř a jedenácti pinové. Dva kontakty slouží pro napájení ventilu, dva slouží pro vstupní signál a dva pro výstupní signál, pokud je k dispozici.



Obr. 4: Vstupní konektor 6 + PE [2]

Kontakt	Funkce
A	napájení (+24 V nebo + 15 V)
B	napájení (0 V nebo -15 V)
C	zem výstupního signálu nebo Enable
D	řídicí signál
E	zem řídicího signálu
F	výstupní signál
PE	ochranné uzemnění

Tab. 1: Popis kontaktů konektoru 6 + PE

Poslední dobou, kdy většinu řízení nad celým technologickým procesem obstarávají PLC automaty a mikrokontroléry, začíná se objevovat digitální komunikace s ventilem a její použití bude stále častější. Využívají se průmyslová rozhraní jako CANopen, RS-232, ProfiBus. Výhod digitální komunikace je mnoho. Netrpí problémy s rušením, odpadá potřeba AD a DA převodníků, na jednu komunikační linku může být připojeno více zařízení a mohou mezi sebou komunikovat.

V případě provedení bez integrované elektroniky obsahuje ventil jeden až tři konektory. Jeden pro každý solenoid a jeden pro senzor. Konektory se musí propojit s externím regulátorem, který sám ovládá solenoidy a snímá polohu senzoru. Výkonový stupeň pracuje v režimu PWM (pulsně šířková modulace).

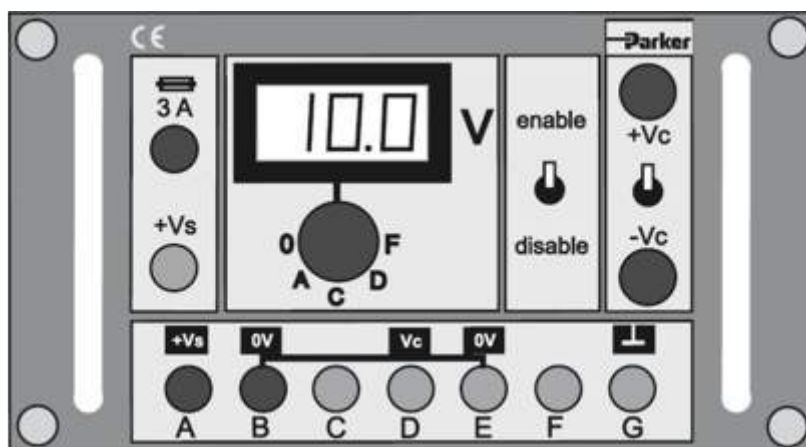
Nejnámějšími výrobci proporcionálních ventilů jsou firmy Bosch Rexroth, Moog, Parker, ARGO-HYTOS.

3.2. Existující testovací jednotky

Testovací jednotky usnadňují uvedení systému do provozu, umožňují provádět funkční testy a jednoduchou diagnostiku. Dělí se na testovací jednotky pro ventily s integrovanou elektronikou a pro ventily bez integrované elektroniky. My se zabýváme testovacími jednotkami pro ventily s integrovanou elektronikou, které jsou mnohem jednodušší a lehčí, neobsahují výkonovou elektroniku. Pro přehled zde uvedeme pár testovacích jednotek pro ventily s integrovanou elektronikou.

3.2.1 Parker EX-M03

Testovací jednotka pro proporcionální ventily s integrovanou elektronikou od firmy Parker Hannifin GmbH. Tvoří ji robustní pouzdro s rukojeťmi o rozměrech 220x120x90. Jednotka je určena pro napájení ze sítě 115/230 V, 50-60 Hz. Pro připojení ventilu je vybavena zásuvkou podle normy DIN 40 040 a dodávána s kabelem, na jehož jednom konci je zástrčka do tohoto konektoru a na druhém konci je konektor pro ventil 6 + PE podle DIN 43 563. Jednotka má na přední straně vyvedeny testovací přípojky jednotlivých kontaktů a je vybavena segmentovým displejem, na kterém si můžeme zobrazit napětí na jednotlivých linkách. Řídicí signál je pouze napětí ± 10 V.



Obr. 5: Parker EX-M03 [5]

3.2.2 Bosch Rexroth VT-VETSY-1

Testovací jednotka od firmy Bosch Rexroth AG. Proti testovací jednotce firmy Parker je kompaktnější. Obsahuje tři konektory. Jeden pro připojení k řídicímu obvodu, druhý slouží pro připojení k ventilu, oba jsou typu 6 + PE. Posledním BNC konektorem se může připojit externí řídicí signál. Jednotka je uzpůsobena tak, aby se mohla připojit mezi ventil a řídicí obvod a podle potřeby volit interní nebo externí provoz (jestli bude ventil ovládat testovací jednotka nebo původní řídicí obvod). Jednotka si bere napájení z konektoru řídicího obvodu. Pokud není řídicí obvod dostupný, napájí se jednotka ze síťového adaptéru +24 V nebo ± 15 V s konektorem stejný jako má řídicí obvod. Řídicí signál může být napěťový ± 10 V nebo proudový ± 20 mA, nastavuje se otočným ovladačem. Není zde přímá možnost sledovat přesnou hodnotu signálu. Může se využít propojek, které jsou na vrchní straně a propojují jednotlivé linky. Je nutné použít externí voltmetr nebo ampérmetr, který se zapojí místo propojky.



Obr. 6: Bosch Rexroth VT-VETSY-1 [6]

3.2.3 Dietz ValveExpert Checker

Testovací jednotka od firmy DIETZ automation GmbH pro proporcionální a servo ventily s integrovanou elektronikou. Konceptně se podobá jednotce od firmy Bosch Rexroth. Umožňuje interní a externí provoz, ale navíc má dva segmentové displeje pro zobrazení hodnoty řídicího a zpětnovazebního signálu. Jednotka umí tyto řídicí signály: 0..20 mA, ± 10 V, ± 10 mA, nastavované otočným ovladačem.



Obr. 7: Dietz ValveExpert Checker [7]

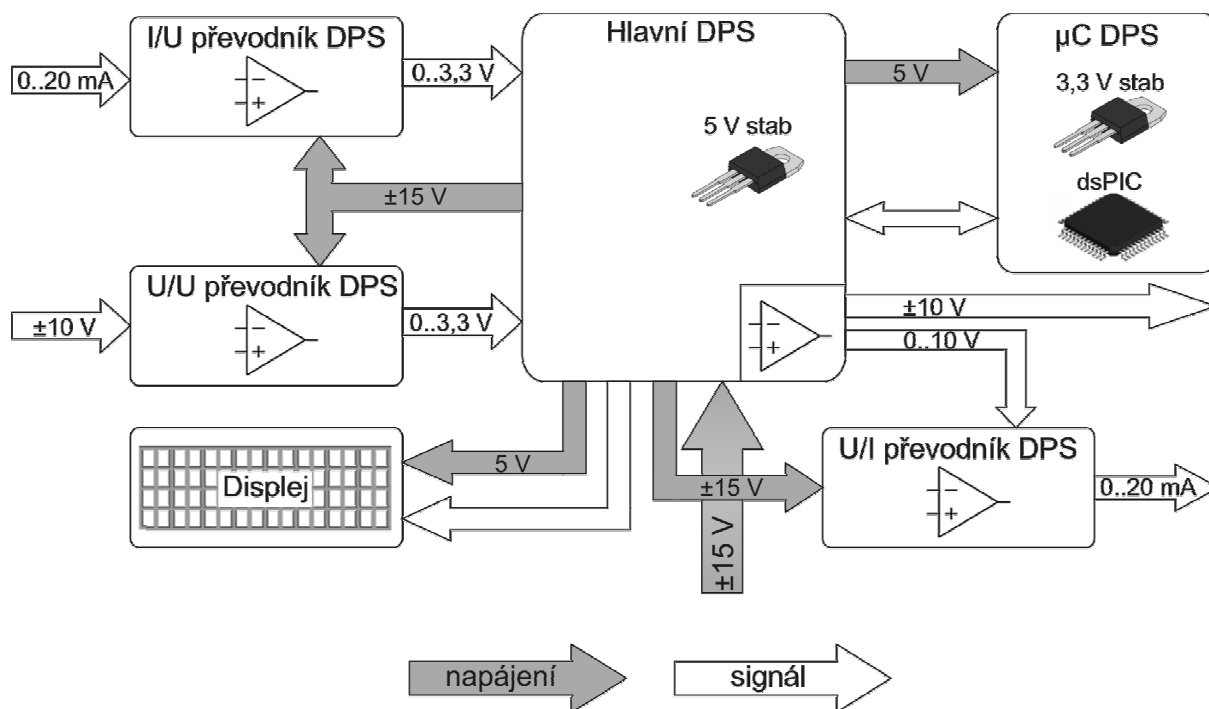
4 Elektronika testovací jednotky

Komplikované požadavky na testovací jednotku: především možnost volby testovacích funkcí, volby řídicího signálu a zobrazování aktuálních hodnot, nás přivedly k rozhodnutí využít pro řízení mikrokontrolér (dále μC). Vybrali jsme dsPIC33FJ128MC804, což je mikrokontrolér s šestnácti bitovou architekturou s rozšířenými funkcemi pro zpracování signálu od firmy Microchip. Tento mikrokontrolér jsme vybrali, protože obsahuje všechny potřebné periferie, máme již s ním kladné zkušenosti, máme kvalitní vývojové prostředí a byl ihned k dispozici. Zbývá vytvořit hardware, který nám umožní využít potřebné periferie mikrokontroléru ke splnění požadavků a poté se budeme zabývat vývojem a tvorbou obslužného programu. Elektronikou se musí vyřešit tyto funkční celky:

- Napájení
- Převodníky analogových úrovní
- Spojení s displejem
- Ovládací prvky

Protože se jedná o prototyp, seznamujeme se s mnoha novými konstrukcemi, vydali jsme se cestou tvorby více jednotlivých desek plošných spojů (dále DPS). K tomuto kroku jsme se rozhodli také z důvodu obavy o funkčnost jednotlivých částí, aby v případě chyby nebyla celá velká DPS na vyhození. Také proto, že se budeme moci s jednotlivými celky dobře seznámit, proměřit je a správně vyhodnotit funkčnost, což využijeme pro návrh finální verze. Prototyp testovací jednotky bude obsahovat tyto jednotlivé DPS:

- Hlavní DPS
- DPS pro μC
- Převodník U/I (napětí na proud)
- Převodník U/U (napětí na napětí)
- Převodník I/U (proud na napětí)



Obr. 8: Blokové schéma propojení jednotlivých DPS

4.1. Hlavní DPS a DPS pro μC

Hlavní DPS a DPS pro μC tvoří celek, jakoby dvoupatrovou DPS spojenou čtyřmi jedenácti pinovými konektory. Je to především z toho důvodu, že námi vybraný μC je určen pro povrchovou montáž, tedy vývody z něj můžeme vést pouze ve vrchní vrstvě DPS, což je při tolika vývodech obtížné na návrh. Umístěním μC na vlastní DPS a propojením přes konektory, máme možnost na spodní DPS vést cesty po vrchní i spodní straně, což už je pro návrh mnohem snadnější.

Vrchní DSP obsahuje mikrokontrolér, oscilátor, programovací přípojku a dva stabilizátory napětí. Při návrhu vrchní části jsme se inspirovali řešením již použitým u nás v laboratoři na ACU44 [9]. Pouze jsme DPS rozšířili o paralelní stabilizátor napětí TL431, sloužící pro oddělené napájení analogových částí μC . Předchozí verze měla pouze jeden sériový stabilizátor napájející obě části μC , což není pro analogové periferie příliš vhodné z hlediska rušení.

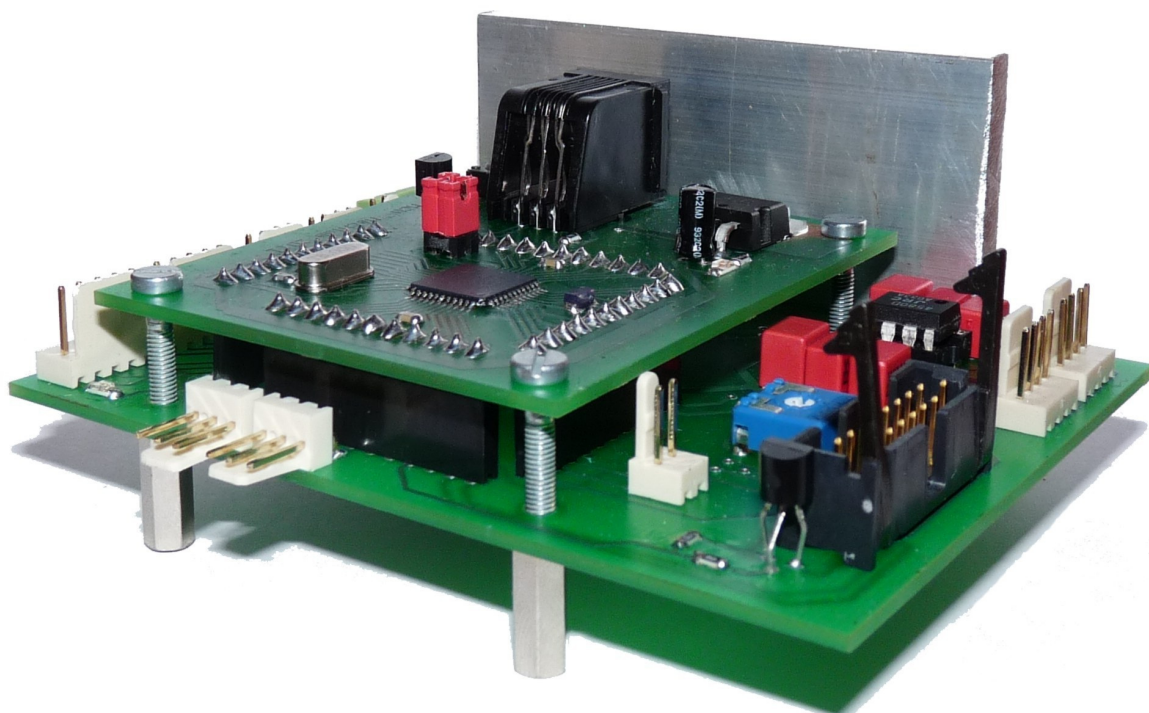
Spodní DPS obsahuje diferenční zesilovač pro výstup digitálně analogového převodníku (dále DAC, digital-to-analog converter), pětivoltový stabilizátor, množství konektorů pro připojení převodníků, ovládacích prvků, displeje a napájení. Vstupní napájecí napětí jsme zvolili symetrické ± 15 V. Takto vysoké napětí je potřeba pro napájení operačních zesilovačů a z něho si už pomocí stabilizátorů vytvoříme potřebná napětí pro displej a μC .

Při osazování a oživování DPS nevznikly výraznější potíže. Proti očekávání, že oddělené napájení analogové části μC paralelním stabilizátorem nám umožní stabilnější provoz ADC, došlo k úplně opačné situaci. Převod byl výrazně nestabilní. Po prozkoumání osciloskopem jsme spatřili, že napětí za paralelním stabilizátorem kmitá s amplitudou asi 0,2 V na frekvenci kolem 100kHz. To nás donutilo lépe se podívat do katalogových listů stabilizátoru TL431. Tady jsme zjistili, že námi použitý keramický kondenzátor o kapacitě 100 nF, který je za stabilizátorem, není vhodný. Hodnota 100 nF leží v grafu stabilního provozu v nestabilní oblasti. Po zvětšení kapacity tohoto kondenzátoru kmitání ustalo, napětí je méně zarušené než napětí pro digitální část a převod je stabilní.

Ještě jeden poznatek vyplynul. A to, že odběr podsvícení displeje je až 200 mA při 5 V. Což v součtu s maximálně taktovaným μC , který odebírá 120 mA dává kolem 320 mA. Tedy na stabilizátoru napětí, který převádí +15 V na +5 V dochází k tepelné ztrátě:

$$P_z = U \cdot I = (15 - 5) \cdot 0,320 = 3,2W, \quad (1)$$

což není problém v případě napájení ze sítě. Ale při případném akumulátorovém provozu je to již ztráta citelná a bude třeba napětí +5 V získat jinak, než lineárním stabilizátorem z +15 V.



Obr. 9: Osazená hlavní DPS a DSP pro μC

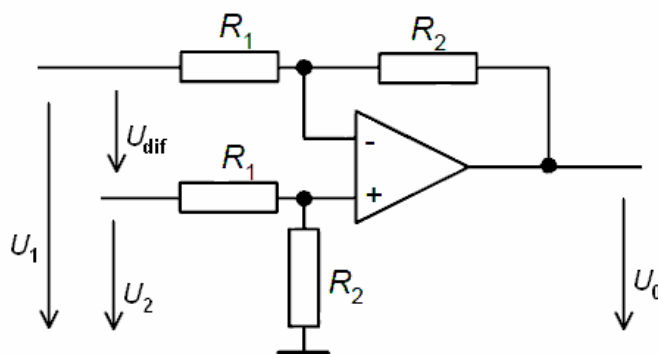
4.2. Diferenční zesilovač

Jako analogový výstup jsme využili DAC. Byla zde i možnost využít PWM výstup, ten poté filtrovat dolní propustí tvořenou například RC článkem. Ovšem výstupní napětí by bylo zvlněné a signál by mohl být pouze velmi nízké frekvence.

DAC má diferenční výstup. Každý kanál obsahuje dva komplementární výstupy: pozitivní a negativní. Signál na těchto výstupech se pohybuje okolo středního napětí 1,65 V s maximální amplitudou 1 V. Vlastní velikost výstupního signálu je dána rozdílovým napětím mezi těmito komplementárními výstupy.

Po provedení měření na skutečném μC jsme zjistili, že maximální amplituda napětí na jednotlivých výstupech není 1 V, jak se píše v referenčním manuálu k DAC [17], ale je daleko menší, přibližně 0,55 V. V novějším vydání tohoto manuálu [16] již žádné informace o velikosti signálu uvedeny nejsou.

K úpravě signálu je nutno použít diferenčního zesilovače, který nám zesílí rozdíl signálů z komplementárních vstupů a převede na jeden signál vztažený k zemi.



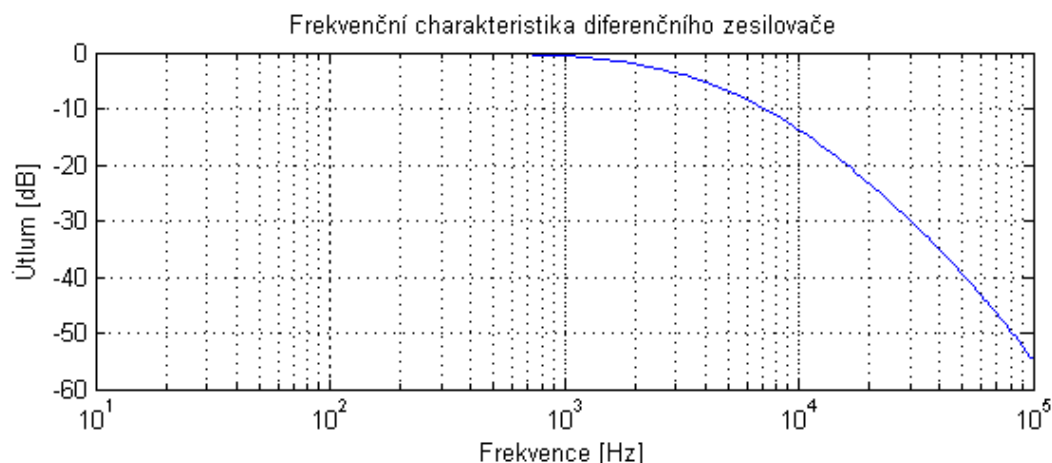
Obr. 10: Základní schéma diferenčního zesilovače

Výstupní napětí je dáno rozdílem vstupních podle vzorce:

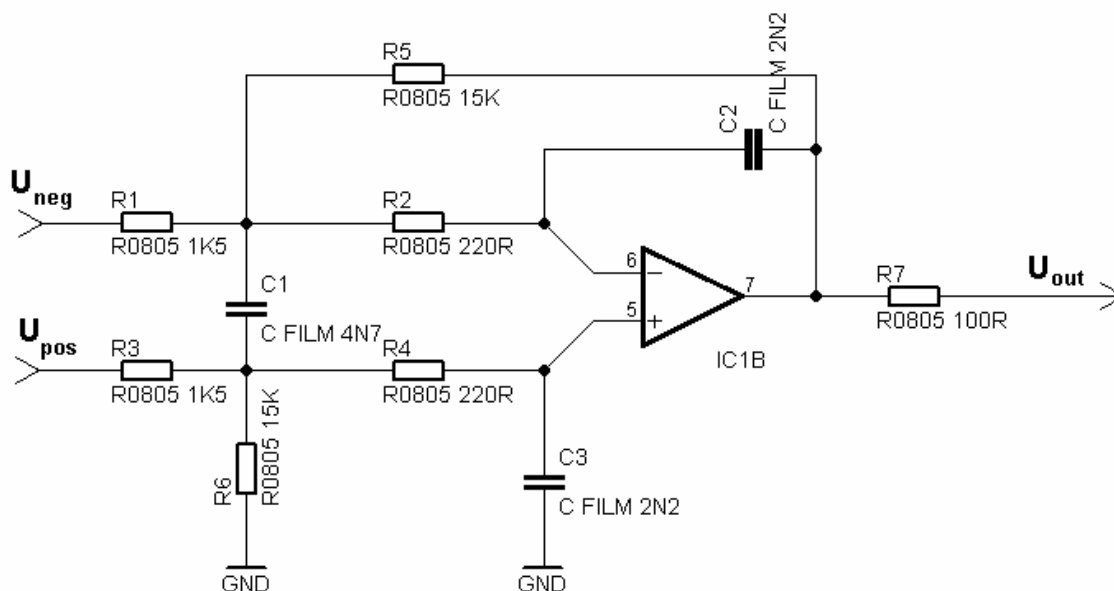
$$U_0 = U_{dif} \cdot \frac{R_2}{R_1} = (U_2 - U_1) \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

Požadujeme, aby výstupní signál přesáhl rozkmit ± 10 V při rozkmitu vstupního rozdílového signálu $\pm 1,1$ V. Odpor R_2 jsme zvolili $15 \text{ k}\Omega$ a R_1 jsme dopočítali a vybrali z dostupných řad E12 a E24 jako 1500Ω . Tedy diferenční zesilovač zesiluje vstupní rozdíl 10x a na výstupu obdržíme rozkmit signálu až ± 11 V a měli bychom mít rozsah napětíového řídicího signálu pokrytý. Pro reálnou konstrukci musí celý zesilovač fungovat jako dolní propust, aby byl signál hladký a bez rušení. Inspirovali jsme se u hudebních DAC, kde je také použit diferenční zesilovač a schéma se rozšířilo o několik kondenzátorů.

Pro ověření správnosti schématu a volbu přesných hodnot součástek jsme si diferenční zesilovač namodelovali v prostředí Simulink a jeho rozšířeních Simscape a SimElectronics. Především nám šlo o vlastní funkčnost, dále pak o jeho dynamické chování, které jsme testovali na obdélníkovém a sinusovém testovacím signálu a také jsme zjistili frekvenční charakteristiku.



Obr. 11: Frekvenční charakteristika diferenčního zesilovače



Obr. 12: Skutečné zapojení diferenčního zesilovače

Pro stavbu bylo nutno použít součástky v co nejužších tolerancích, aby zesilovač pracoval správně. Odporů jsou běžně k dostání v 1% toleranci a kondenzátory jsou fóliové, také v toleranci 1%. Jako operační zesilovač byl zvolen NJM4580, používaný často v hudebních aplikacích. Jeho předností je nízký šum a poměrně nízký vstupní offset.

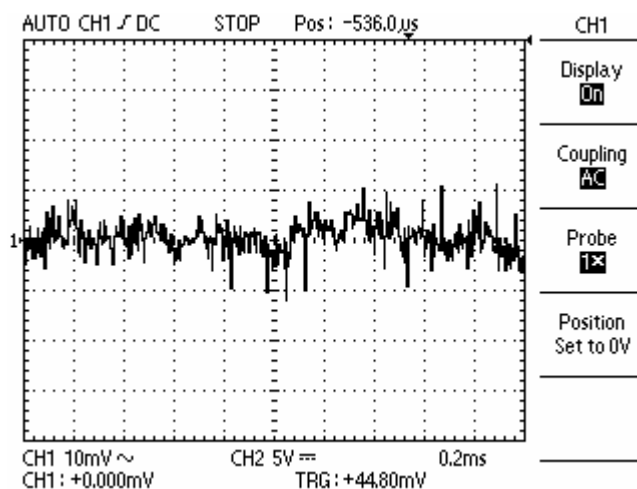
Po stavbě a vyzkoušení, navzdory očekávání, výstupní signál z diferenčního zesilovače nepokrýval celé pásmo signálu ± 10 V. Dokonce ani oba kanály neměly stejné rozsahy. Dobrou zprávou bylo, že rozsahy obou kanálů jsou dlouhodobě časově stabilní. Problém tedy půjde vyřešit softwarovou kalibrací a zvýšením zesílení. Zvýšení zesílení jsme provedli na již hotové DPS připojením odporů 10 k Ω paralelně k odporům 1,5 k Ω , čímž klesl původní odpor na 1,3 k Ω a alespoň jeden kanál pokrýval celý rozsah.

Před úpravou		
Vstupní hodnota DAC [unsigned integer]	Levý kanál [V]	Pravý kanál [V]
0	-9,73	9,08
65535	9,08	-8,72
33856	0	-
33360	-	0
Po úpravě		
0	-10,85	10,10
65535	10,16	-9,70

Tab. 2: Digitálně analogový převod před a po úpravě zesílení

Nečekané je především to, že každý kanál má jiný rozsah a je posunutý trochu jinak. Na osazené DPS jsme proměřili a vzájemně porovnali odpor v jednotlivých uzlech obou kanálů a neshledali jsme žádný výrazný rozdíl. Na tento problém se bude nutně v budoucnu zaměřit a zjistit, co způsobuje takový rozdíl. Zda to způsobuje DAC, který je původně určen pro hudební účely nebo špatně navržený diferenční zesilovač.

Při kontrole a měření diferenčního zesilovače jsme se také zaměřili na šum na jeho výstupu. Podmínky při měření byly následující: Signál z jezdce potenciometru byl přiveden na ADC, v mikrokontroléru byl zpracován a filtrován digitálním FIR filtrem, zaveden na DAC a na výstupu diferenčního zesilovače jsme měřili osciloskopem. Na výstupu jsme naměřili asi 20 mV rozpětí šumu (rozpětí signálu je 20 V).



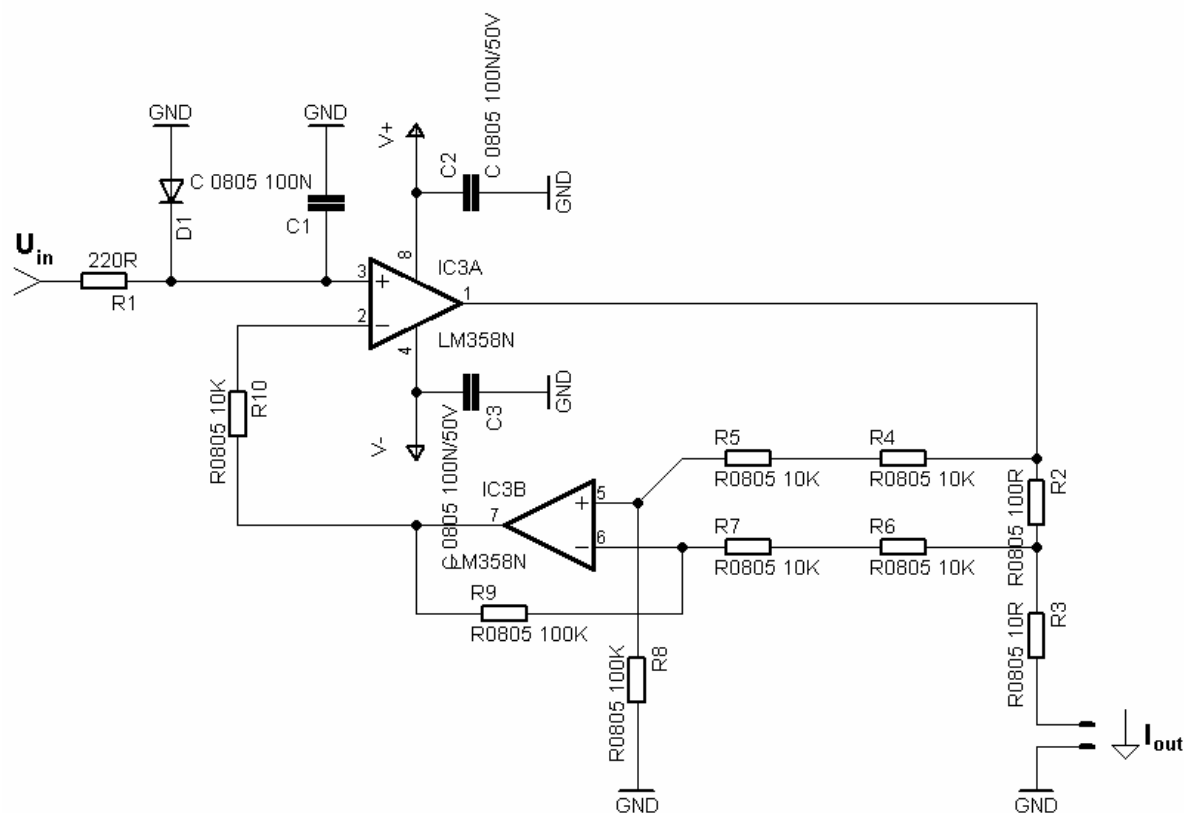
Obr. 13: Šum na výstupu diferenčního zesilovače (20 mV peak-peak)

4.3. Převodník U/I

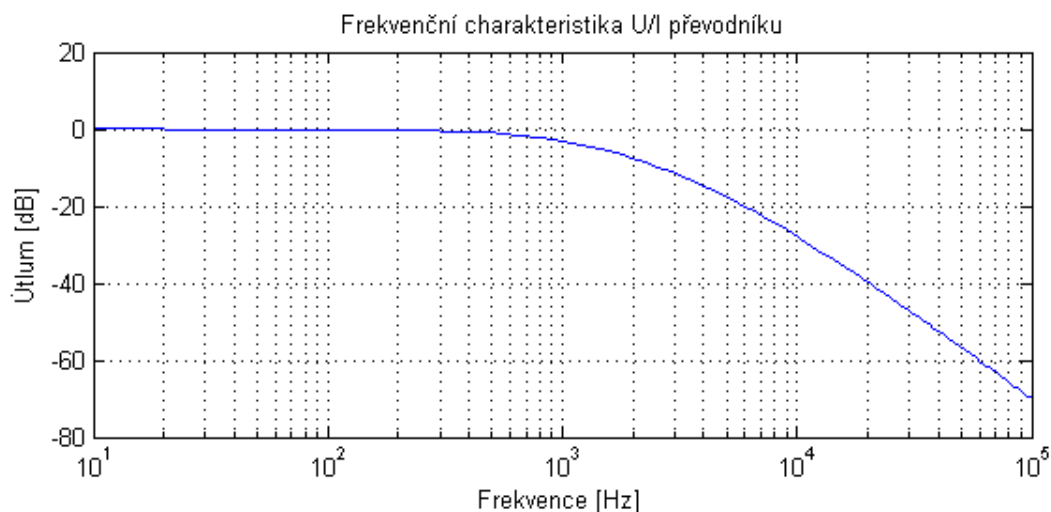
Slouží k převodu napětového signálu 0..10 V na proudový o velikosti 0..20 mA. Proudový signál má proti napětovému mnoho výhod. Je mnohem odolnější vůči naindukování šumu a rušení, signál zůstane zachován bez ohledu na úbytky napětí na přechodových a jiných odporech po vedení a vedení může dosahovat délky až stovky metrů.

Dlouho jsme vybírali vhodnou koncepci. Jednoduchý převodník s jedním operačním zesilovačem nemá ani jeden konec zátěže spojený se zemí, což by mohlo působit problémy při spojení s ventilem. Tuto nevýhodu odstraňuje zapojení tzv. Howlandova pumpa, která má ovšem pro náš případ značnou nevýhodu. V závislosti na zátěžném odporu, který v případě proporcionálního ventilu může být až 500 Ω , by odběr z operačního zesilovače byl až 90 mA, což je na běžně dostupné typy příliš mnoho. Nalezli jsme řešení [10], které má zátěž připojenou jedním koncem k zemi, odběr z operačního zesilovače je roven proudu výstupního signálu a upravili jsme si ho pro naše potřeby.

Na neinvertující vstup prvního operačního zesilovače je přiveden vstupní napětový signál a tento operační zesilovač slouží jako zdroj proudu. Tento proud je snímán pomocí úbytku napětí na odporu 100 Ω . Napětí na odporu je zesíleno druhým operačním zesilovačem v diferenčním zapojení se zesílením rovným pěti a toto napětí je poté jako zpětná vazba zavedeno do prvního operačního zesilovače. Pro maximální hodnotu signálu +10 V zajistí zpětná vazba výstupní proud 20 mA.

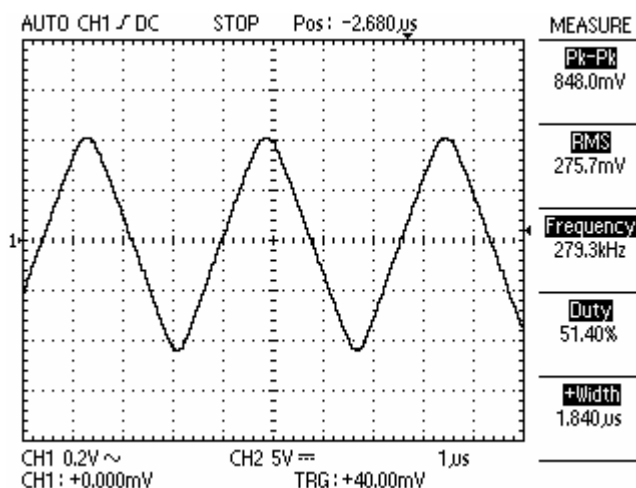


Obr. 14: Skutečné zapojení U/I převodníku

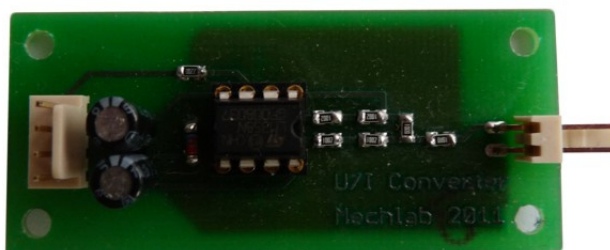


Obr. 15: Frekvenční charakteristika U/I převodníku

Po osazení a zkoušení převodníku do zátěže $220\ \Omega$ a měření multimetrem vypadalo vše v naprostém pořádku. Ovšem po přiložení osciloskopu jsme zjistili, že obvod kmitá na frekvenci 280 kHz. Při takto vysoké frekvenci by pravděpodobně nedošlo k narušení řídicí schopnosti signálu, ale situaci jsme se snažili vylepšit. Kmitání ustalo po připájení malého keramického kondenzátoru 1 nF paralelně k odporu R_9 a kondenzátoru o kapacitě 470 nF k výstupnímu konektoru paralelně k zátěži.



Obr. 16: Kmitání na výstupu U/I převodníku



Obr. 17: Osazená DPS U/I převodníku

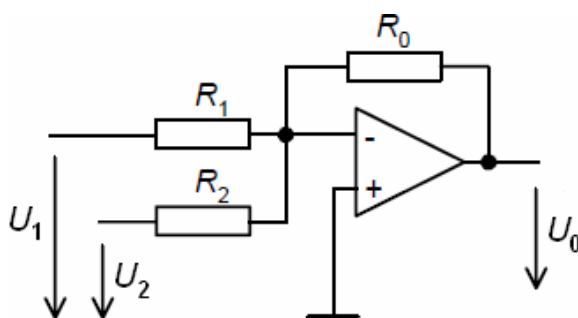
4.4. Převodník analogových napět'ových úrovní

Převodník slouží k úpravě výstupního napět'ového signálu ventilu na hodnoty, které může zpracovávat ADC mikrokontroléru. Tedy signál v rozmezí ± 10 V musí převést na 0..3,3 V.

Protože může vstupní signál nabývat kladných i záporných hodnot a výstupní signál je pouze jednopolaritní, nevystačíme pouze s jednoduchým zesilovačem. Převodník obsahuje dva operační zesilovače. První je v zapojení jako sumační zesilovač, který zajišťuje vlastní převod signálu. Druhý operační zesilovač je v invertujícím zapojení se zesílením rovným -1 a převádí polaritu signálu, která je již změněna sumačním zesilovačem.

Sumační zesilovač pracuje tak, že výstupní napětí U_0 je lineární kombinací vstupních napětí, vážených jednotlivými vahami R_0/R_i :

$$U_0 = -\left(\frac{R_0}{R_1} \cdot U_1 + \frac{R_0}{R_2} \cdot U_2\right) \quad (3)$$



Obr. 18: Základní schéma sumačního zesilovače

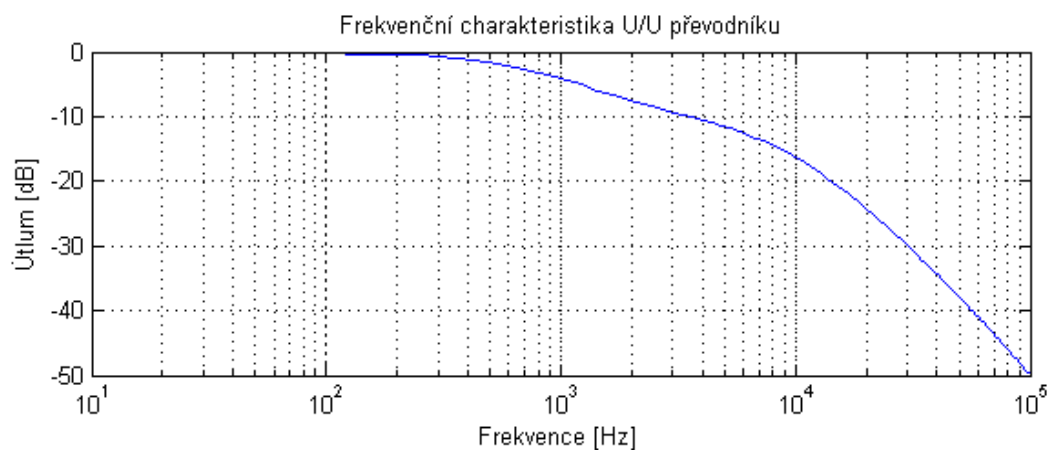
Na vstup U_1 je přiveden vstupní signál a na vstupu U_2 bude referenční napětí, které nám umožní posuv signálu. Referenční napětí U_2 bylo zvoleno +3,3 V z důvodu použití stejného napětí pro napájení μC a možnosti jednoduše získat toto napětí pomocí paralelního stabilizátoru napětí TL431. V případě, že by bylo použito záporné referenční napětí, mohli bychom se obejít bez druhého operačního zesilovače, který převádí polaritu signálu, protože ze sumačního zesilovače by už vycházel správný signál. Toto nebude nutné, neboť bude použito operačních zesilovačů v pouzdře DIP-8, které obsahuje dva oddělené zesilovače.

Jako operační zesilovač jsme zvolili běžně dostupný univerzální typ LM358 se vstupní napět'ovou nesymetrií 3 mV. Pokud by se toto ukázalo v průběhu ladění nedostatečné, nebude problém jej vyměnit, protože bude umístěn v patici. Nyní zbývá určit vhodné odpory, abychom dosáhli žádaného přenosu. Odpor R_0 jsme zvolili 3,3 k Ω . Zbývající odpory jsme dopočítali a zvolili nejbližší vhodnou kombinaci z odporových řad E12 a E24. Volili jsme tak, aby výstupní signál byl bezpečně v rozmezí 0..3,3 V. Odpor R_1 tvoří sériová kombinace odporů 18 k Ω a 2,2 k Ω . Odpor R_2 pak dva 3,3 k Ω odpory. Sériová kombinace odporů je vhodná z důvodu možnosti umístit na jejich spojení blokovací kondenzátor proti rušení. Výsledný přenos potom vypadá:

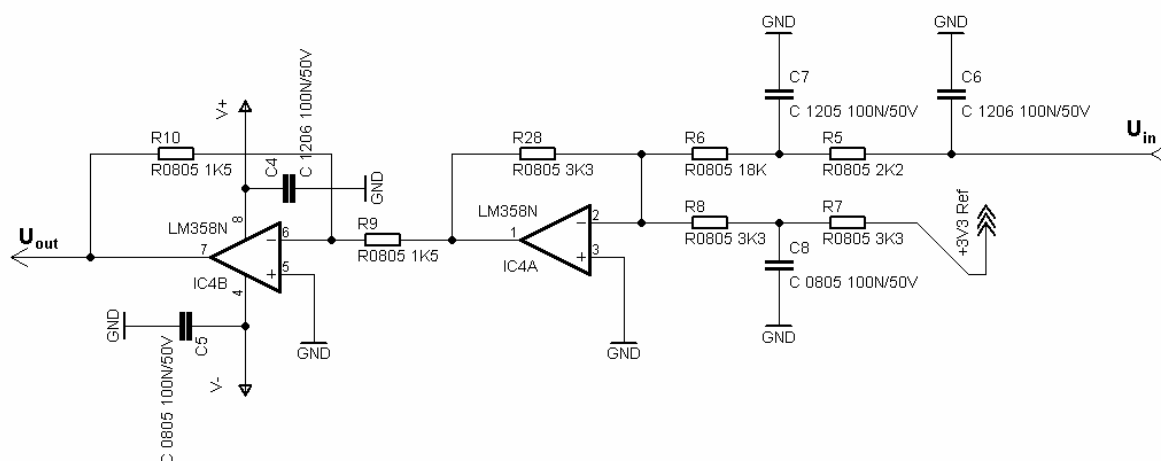
$$U_0 = -\left(\frac{3300}{18000 + 2200} \cdot U_1 + \frac{3300}{3300 + 3300} \cdot 3,3\right) \quad (4)$$

U1 [V]	U2 [V]	U0 [V]
10	3,3	-3,28
0	3,3	-1,65
-10	3,3	-0,02

Tab. 3: Převed krajních rozsahů U/U převodníku

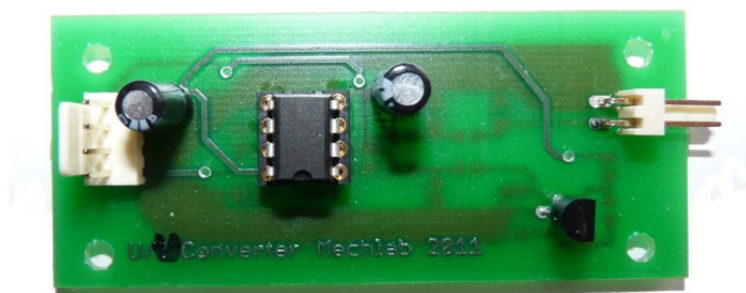


Obr. 19: Frekvenční charakteristika U/U převodníku



Obr. 20: Skutečné zapojení U/U převodníku

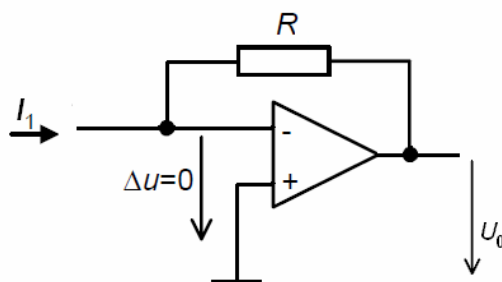
Stavba a oživení proběhlo v pořádku, objevil se jenom stejný problém se špatně zvolenou kapacitou kondenzátoru za paralelním stabilizátorem TL431.



Obr. 21: Osazená DPS U/U převodníku

4.5. Převodník I/U

Převádí proudový signál 0..20 mA na signál napěťový 0..3,3 V. Spíše však trochu menší, aby byl signál bezpečně v rozmezí napětí akceptovatelných ADC.



Obr. 22: Základní schéma I/U převodníku

Realizace převodníku I/U je mnohem snadnější než u ostatních převodníků. Jeho princip je založen na použití invertujícího zapojení, kde chybí vstupní odpor. Mezi vstupy operačního zesilovače musí být nulové napětí a proud do nich je zanedbatelný. Tedy veškerý proud musí jít přes odpor R_0 do výstupu operačního zesilovače a napětí je dáno úbytkem na odporu:

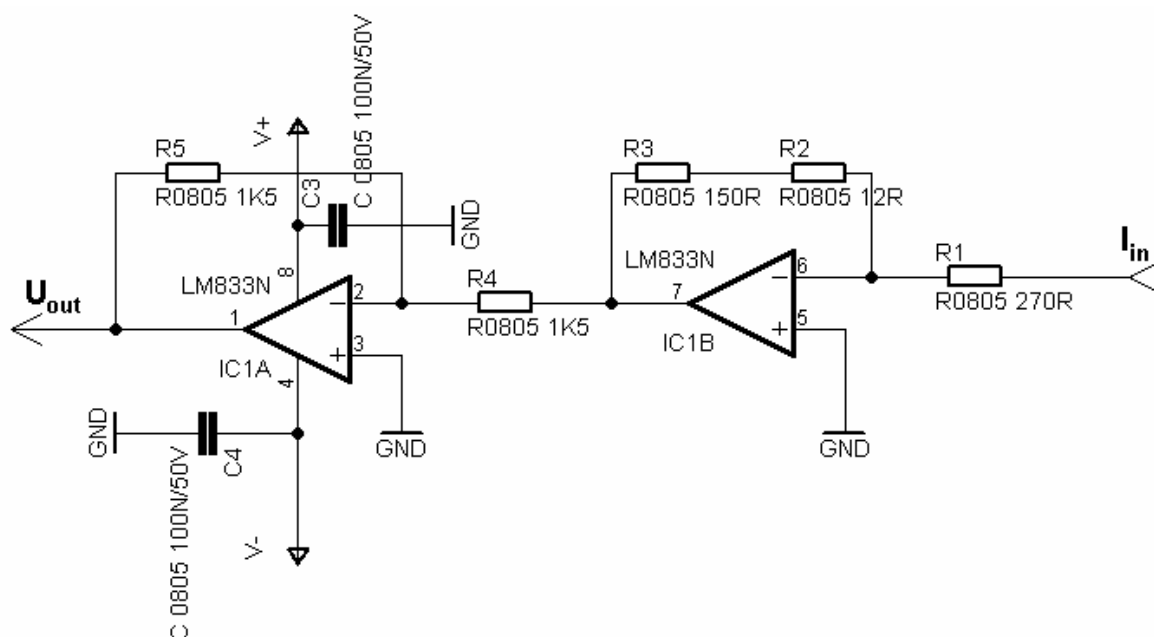
$$U_0 = -R_0 \cdot I_1 \quad (5)$$

Jako R_0 byla vybrána sériová kombinace odporů 150 Ω a 12 Ω . Výsledný přenos vypadá takto:

$$U_0 = -(150+12) \cdot I_1 \quad (6)$$

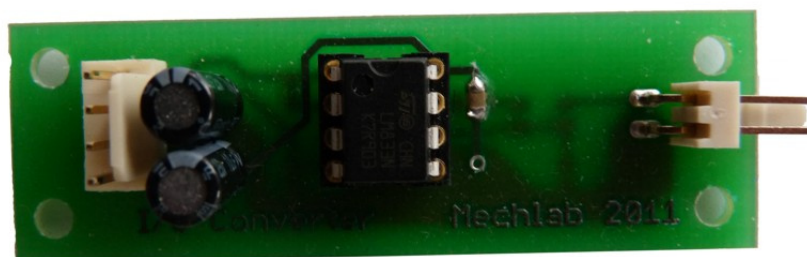
Proudový signál v rozmezí 0..20 mA je převeden na napěťový 0..-3,24 V a je třeba ho ještě převést invertorem na kladný. Kompletní schéma neobsahuje žádné blokové kondenzátory v cestě signálu. Není to třeba, proudový signál je odolný proti rušení. Filtrační RC články budou až těsně u vstupu μC , kde je již napěťový signál. Rychlost vlastního převodníku je tedy teoreticky neomezená, prakticky budou omezení tvořit parametry použitého operačního zesilovače. Zde je použit běžně dostupný univerzální typ LM833 z důvodu většího proudu, který snese. Oproti převodníku U/I je rozdíl v tom, že zde se operační zesilovač chová jako spotřebič proudu a ne jako zdroj, což je pro operační zesilovač trochu jiná situace.

Vstup samotného převodníku se chová jako zkrat (realizován uměle, elektronicky), proto jsme převodníku proudu ještě předřadili odpor 270 Ω , na kterém vznikne při maximálním proudu úbytek napětí 5,4 V. Jestli je toto nutné, zatím nevíme. Nevíme totiž, jak se chovají zdroje proudového řídicího signálu na ventilech. V případě potřeby může být odpor změněn nebo nahrazen zkratem.



Obr. 23: Skutečné zapojení I/U převodníku

Při stavbě převodníku I/U se nevyskytl žádný problém a převodník ihned správně fungoval.



Obr. 24: Osazená DPS I/U převodníku

4.6. Připojení displeje

Je nutné, aby byl uživatel informován přesně a srozumitelně o nastavených hodnotách, stavu činnosti zařízení a měl možnost přehledné volby funkcí. K tomu bude sloužit alfanumerický maticový LCD displej.

Tyto displeje se vyrábějí s řadičem, který ovládá celý displej a komunikuje s okolím. Standardem se stal řadič HD44780 [14] od firmy HITACHI. Jeho rozšíření je velké a velká většina displejů je vybavena tímto řadičem nebo jeho ekvivalentem. Zapojení přívodního konektoru je stejné, a proto nezáleží na výrobci a na tom, v jaké variantě displej použijeme. To značně zjednodušuje použití v praxi. Displeje se podle počtu sloupců a řádků vyrábějí ve variantách od 8x1 po 40x4 a s možností podsvícení. Řadič HD44780 ovšem umožňuje zobrazení pouze 80-ti znaků. V případě displeje s více jak 80-ti znaky se používají dva řadiče pro jeden displej a komunikace je trochu odlišná.

Číslo vývodu	Označení	Funkce
1	Vss	napájení GND
2	Vcc	napájení +5 V
3	Vo	nastavení kontrastu 0..5 V
4	RS	0 - vstup je instrukce, 1 - vstup jsou data
5	R/W	0 - zápis dat do LCD, 1 - čtení dat z LCD
6	E	Enable
7	DB0	Data, bit 0
8	DB1	Data, bit 1
9	DB2	Data, bit 2
10	DB3	Data, bit 3
11	DB4	Data, bit 4
12	DB5	Data, bit 5
13	DB6	Data, bit 6
14	DB7	Data, bit 7
15	A	Napájení podsvětlení, anoda
16	K	Napájení podsvětlení, katoda

Tab. 4: Popis vývodů displeje s řadičem HD44780

My použijeme displej 20x4, který by měl mít pro nás dostatečný počet znaků a bude mít pouze jeden řadič. Pro ušetření vstupně výstupních (dále I/O) portů μC jsme zvolili čtyřbitovou komunikaci. Pro komunikaci musíme displej s μC propojit sedmi linkami. Čtyři pro data a dále RS, E a R/W. Pokud bychom vystačili pouze s posíláním dat do displeje a nepotřebovali bychom je zpětně načítat, obešli bychom se bez R/W linky, která by zůstala trvale nastavená na posílání dat. Nastavení kontrastu jsme vyřešili potenciometrem zapojeným jako dělič napětí, jehož jezdec je spojen se vstupem V_o . Mikrokontroléru je umožněno spínat podsvětlení. Port RB5 μC je připojen na bázi tranzistoru BC337, jež řídí proud podsvětlení.

Vývod LCD	Port MCU
RS	RC9
E	RC8
RW	RB6
D4	RB7
D5	RB8
D6	RB9
D7	RB10

Tab. 5: Propojení komunikačních linek displeje s μC



Obr. 25: Foto displeje testovací jednotky

5 Obslužný program

Máme vytvořen potřebný hardware a nyní je třeba dát mu žádanou funkcionalitu pomocí obslužného programu, který se může stále vyvíjet a přinášet vylepšení.

Psát obslužný program můžeme ručně pomocí C kódu, případně v jazyce symbolických adres (assembleru). Tato cesta může vytvářet velice efektivní kód, pokud je programátor schopný a znalý věci. Ovšem doba tvorby programu je velmi dlouhá.

5.1. Kerhuel Toolbox

V naší laboratoři se využívá cesta mnohem rychlejší. Umožňuje to Kerhuel Toolbox, což je rozšiřující knihovna pro prostředí Simulink, která generuje C kód, případně už strojový kód pro cílový μ C. Samotné programování potom probíhá ve stylu Simulinku. Programování je intuitivní, rychlé a není k tomu tolik potřeba znalost programovacího jazyka a cílové platformy. Bločky Kerhuel Toolboxu mohou být rozděleny do několika kategorií:

- **Konfigurační** – nastavení parametrů μ C, kompilátoru, simulinku
- **Komunikační** – komunikační periferie μ C (CAN, I²C, UART,...)
- **I/O** – vstupně výstupní periferie jako PWM výstup, ADC, přístup k digitálním portům,...
- **Ostatní** – volání C funkce, softwarový reset, NOP,...

Ovšem některé námi potřebné funkce nejsou obsaženy. Jsou to funkce pro obsluhu LCD displeje a DAC. Nezbyvá nic jiného než využít možnosti přidat vlastní zdrojový C kód, a to tak, aby spolupracoval se schématem v Simulinku.

5.2. Obsluha DAC

Obsluha DAC spočívá v jeho samotné inicializaci a poté pravidelném doplňování zásobníku, ze kterého bere DAC signál.

Parametry DAC:

- 16-bitové rozlišení (14-bitová přesnost)
- 100 ksp/s maximální vzorkovací frekvence
- diferenciální analogový výstup
- zásobník pro čtyři 16-bitové hodnoty

DAC je ovládán těmito registry:

- **DACxCON:** DAC Control Register
Slouží pro zapínání/vypínání modulu, specifikuje datový formát, nastavuje děličku kmitočtu a upřesňuje funkci pro sleep mód
- **DACxSTAT:** DAC Status and Control Register
Upřesňuje práci se zásobníkem a volání přerušení
- **DACxDFLT:** DAC Default Data Register
Hodnota, která je v případě prázdného zásobníku na výstupu DAC
- **DACxLDAT:** DAC Left Channel Data Register
Data pro levý kanál
- **DACxRDAT:** DAC Right Channel Data Register
Data pro pravý kanál

Inicializace se provede jednou na začátku programu, upřesní se všechny parametry pro správnou funkci. Je třeba zvolit, odkud se vezme pracovní kmitočet pro DAC. Jako zdroj se nabízí primární oscilátor, primární oscilátor s PLL děličem/násobičem, jiný externí oscilátor. Zvolili jsme jako zdroj primární oscilátor a pomocí děliček jsme dosáhli vzorkovací frekvence 15625 Hz, což by zatím mělo být pro signál do 100 Hz dostatečné.

Nastavili jsme, aby bylo přerušení voláno vždy, když zásobník není plný. Během obsluhy přerušení dochází k tomu, že hodnoty globálních proměnných DAC_L_Value a DAC_R_Value typu unsigned int jsou uloženy do registrů DAC1LDAT a DAC1RDAT, tedy na vrch zásobníku. Globální proměnné jsou přístupné i ze Simulinku a je možno k nim přistupovat pomocí bločku Data Store Write.

5.3. Obsluha LCD displeje

Po zapnutí napájení je displej v osmibitovém komunikačním módu a je nutné provést prvotní inicializaci displeje, která spočívá v nastavení čtyřbitové komunikace. Poté už komunikace probíhá čtyřbitově. Nejdříve se odešlou horní čtyři bity a poté spodní čtyři bity. Při inicializaci ještě nastavujeme počet řádků, sloupců, velikost znaků, posouvání ukazatele v paměti po přijmutí znaku, viditelnost, případně blikání kurzoru.

Posíláme dva druhy dat. V případě, že je hodnota linky RS 0, považuje displej poslaná data za instrukce. Hodnota linky RS 1 říká, že se posílají data a tato jsou zapsána na určité místo v paměti DDRAM nebo CGRAM.

DDRAM je paměť zobrazovaných znaků, které se vypisují na displeji. Hodnoty pro znaky v paměti DDRAM z větší části odpovídají tabulce ASCII.

CGRAM je paměť pro uložení vlastního znaku. Každý znak je realizován maticí 5x8 nebo 5x10 bodů. V této paměti je uloženo zobrazení bodů pro každý znak.

Po každé odeslané instrukci nebo zápisu dat je třeba počkat určitý časový interval, než řadič informaci zpracuje a je schopen přijímat další data. Nebo po každé odeslané informaci kontrolovat příznak Busy Flag a čekat na jeho spadnutí, indikující, že displej může opět přijímat.

Součástí vytvořené knihovny jsou tyto funkce upravené pro spolupráci se schématem v Simulinku:

- **void LCD_Init(void);** slouží pro inicializaci displeje
- **void sendStr(char * str, unsigned char CR);** slouží pro vypsání řetězce, začíná se vypisovat na pozici danou proměnnou CR, C - sloupec (0..19), R – řádek (0..3)
- **void sendNumXY(int num, unsigned char CR);** slouží pro vypsání čísla ve formátu ±XX.XX, začíná se vypisovat na pozici danou proměnnou CR, C - sloupec (0..19), R – řádek (0..3)

Instrukce	Linka										Popis funkce	Čas vykonání
	RS	R/W	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0		
Smaže displej	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Smaže displej a nastaví kurzor na pozici 0.	1,52 ms
Nastaví kurzor na začatek	0	0	0	0	0	0	0	0	1	x	Nastaví adresu v DDRAM na 0. Nastaví kurzor na pozici 0.	1,52 ms
Nastaví vstupní režim	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S	Určí směr pohybu kurzoru (I/D) a posun displeje (S). Tyto operace se provádějí během čtení/zápisu.	37 μ s
Zapne/vypne kurzor a jeho blikání	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	Zapíná/vypíná displej (D), kurzor (C) a jeho blikání (B).	37 μ s
Nastaví pohyb kurzoru/displeje	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	x	x	Nastaví pohyb kurzoru nebo displeje (S/C) a směr pohybu (R/L).	37 μ s
Nastavení rozhraní	0	0	0	0	1	DL	N	F	x	x	Nastaví délku interface (DL), počet řádků displeje (N) a znakový font (F).	37 μ s
Nastaví pozici v CGRAM	0	0	0	1	CGRAM adresa						Po tomto příkazu jsou data ze vstupu zaznamenávána do CGRAM.	37 μ s
Nastaví pozici v DDRAM	0	0	1	DDRAM adresa							Po tomto příkazu jsou data ze vstupu zapisována do a čtena z DDRAM.	37 μ s
Čtení příznaku Busy Flag a adresy	0	1	BF	DDRAM / CGRAM adresa							Čte příznak Busy Flag indikující, že displej ještě provádí některou operaci, a pozici ukazatele adresy.	37 μ s
Zápis dat do CGRAM nebo DDRAM	1	0	data								Zapíše data ze vstupu do DDRAM nebo do CGRAM.	37 μ s
Čtení dat z CGRAM nebo DDRAM	1	1	data								Čte data z aktuální adresy DDRAM nebo CGRAM.	37 μ s

Tab. 6: Instrukce displeje s řadičem HD44780

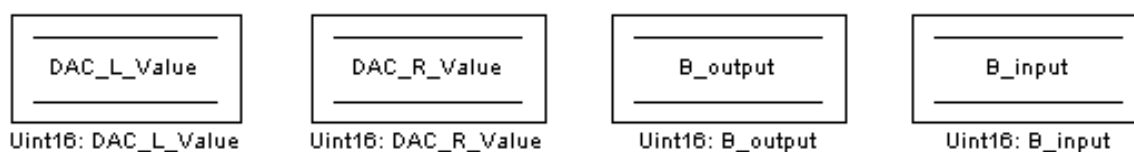
5.4. Kompletní program

Zde popíšeme funkční bloky tvořící program testovací jednotky. Jedná se o jeden z programů vzniklých během průběhu vývoje. Program umožňuje volbu řídicího signálu, a to napětového s rozsahem ± 10 V nebo proudového s rozsahem 0..20 mA. Volba se provádí pomocí tlačítka, kterým se přepíná mezi jednotlivými rozsahy. O volbě a hodnotě signálu, která se nastavuje potenciometrem, jsme informováni pomocí displeje. Dalším tlačítkem se zapíná a vypíná podsvětlení displeje.

Program vytvořený pomocí Simulinku, Kerhuel Toolboxu a vlastně většina programů pro mikrokontroléry běží v nekonečné smyčce, která se stále opakuje a provádí se požadované operace. Základní opakovací čas této nekonečné smyčky jsme v Simulinku nastavili 1 ms a musíme si dát pozor, aby se všechny požadované operace v daném cyklu stihly vykonat.

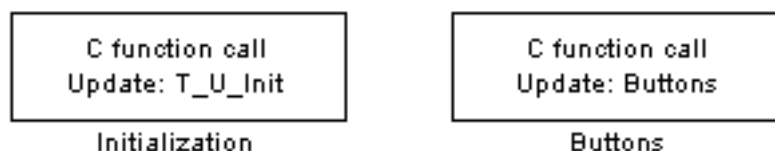
Používáme tyto globální proměnné přístupné Simulinku a zároveň externím C kódům:

- **DAC_L_Value** [unsigned int] vstup pro levý kanál DAC
- **DAC_R_Value** [unsigned int] vstup pro pravý kanál DAC
- **B_output** [unsigned int] ukládá, jaký řídicí signál je na výstupu (0 odpovídá napěťovému výstupu a 1 výstupu proudovému)
- **B_input** [unsigned int] ukládá, jaký řídicí signál je na vstupu (0 odpovídá napěťovému vstupu a 1 vstupu proudovému)



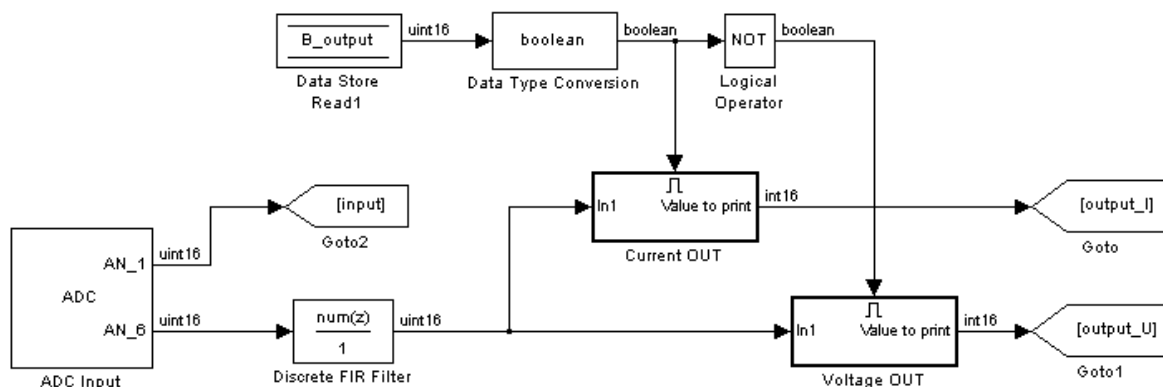
Obr. 26: Globální proměnné definované v Simulinku

Při startu programu se volá funkce T_U_Init napsaná v C jazyce, která se provede pouze jednou a postará se o inicializaci displeje a DAC. Dále se v každé smyčce volá funkce Buttons také napsaná v C jazyce. Tato funkce kontroluje, zda nebyla stisknuta nějaká tlačítka a podle toho upraví hodnotu proměnných B_output, B_input, případně přepíše text na displeji.



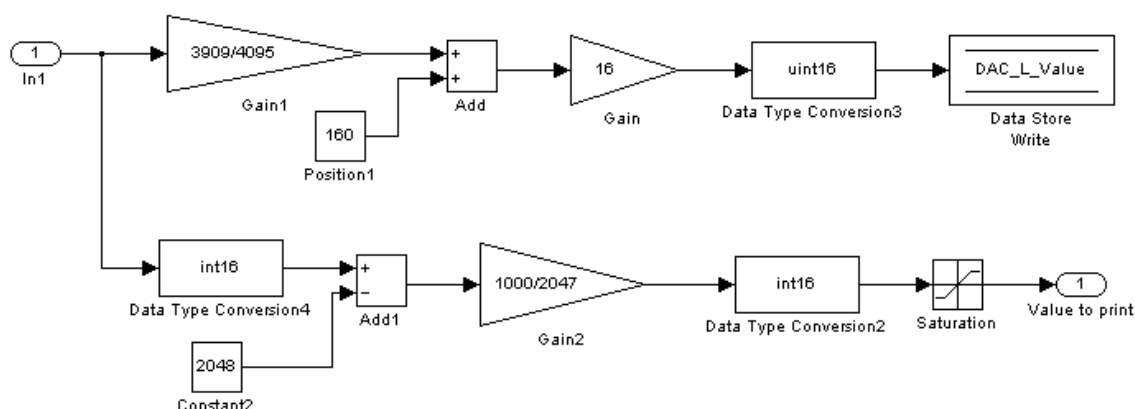
Obr. 27: Volání externích C funkcí Simulinkem

Hlavní funkční blok programu čte hodnotu z ADC, na jehož vstupu je připojen potenciometr. Výstup z ADC nabývá hodnot 0..4095 a je filtrován diskretní FIR filtrem, jehož funkce spočívá v tom, že vždy vezme posledních deset snímků a výstupem je jejich průměrná hodnota. Proměnná B_output řídí, který z výstupních subsystémů bude aktivní. Zda napěťový nebo proudový. Jednotlivé subsystémy obsahují převodní vztahy, aby z DAC vycházel signál v požadovaném rozmezí. Součástí subsystémů jsou ještě převodní vztahy pro hodnotu zobrazenou na displeji. Tato hodnota je ze subsystému vyvedena a vede na navěstí output_U nebo output_I, ze kterých se potom hodnota posílá na displej.



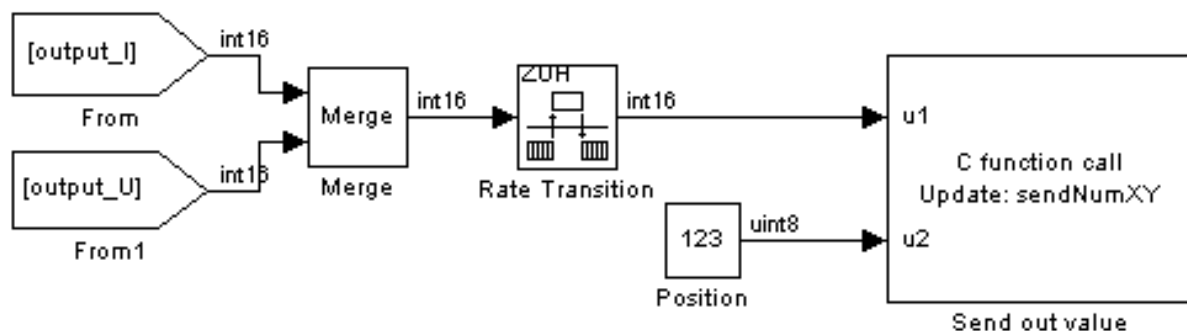
Obr. 28: Hlavní funkční schéma

Subsystem pro výstup napětí tvoří dvě větve. Jedna pro úpravu signálu zapisovaného do DAC a druhá pro úpravu signálu pro vypsání na displej. Obě větve obsahují matematické operace, které převedou vstup v rozmezí 0..4095 na ± 1000 v případě hodnoty vypisované na displej. Hodnota pro DAC může nabývat 0..65535. To by se ovšem uplatnilo v případě, že na výstupu obdržíme napětí přesně ± 10 V. Skutečný rozsah napětí DAC je ale vyšší. Experimentálně bylo zjištěno, že rozsahu výstupního napětí ± 10 V odpovídá přibližně rozsah vstupních hodnot 2592..65104 a matematickými operacemi je tohoto rozsahu dosaženo. Proudový subsystem vypadá podobně, jenom převodní vztahy jsou odlišné.



Obr. 29: Voltage OUT subsystem

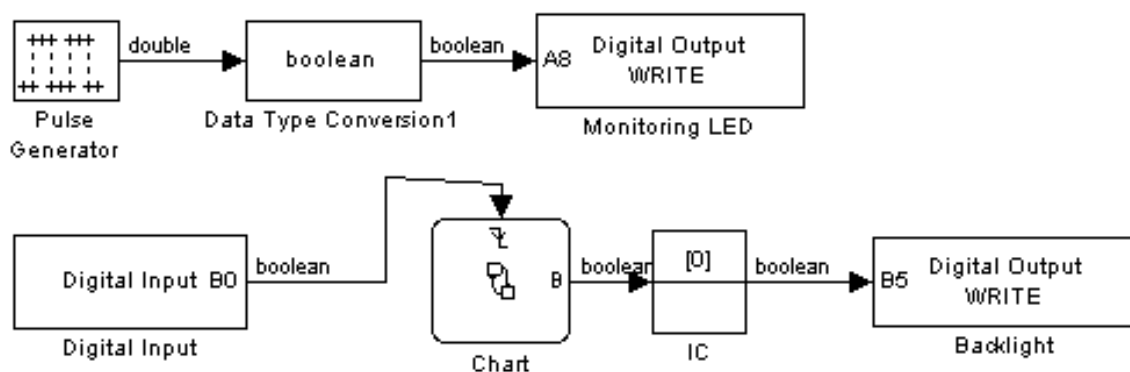
O vypisování hodnot na displej se stará bloček, jež volá funkci napsanou v C jazyce. Vstupem tohoto bločku jsou dva signály. Jeden je vlastní číslo k výpisu, které se vypíše na displej ve tvaru XX.XX a druhý signál říká, na kterou pozici se má číslo začít vypisovat. První signál prochází bločkem Rate Transition, který zajistí, že obnovovací čas výpisu hodnot nebude 1 ms jako zbytek programu, ale pouze 0,5 s.



Obr. 30: Vypisování výstupních hodnot na displej

Program obsahuje schéma pro zapínání displeje. Zde jsme obsluhu tlačítka neřešili pomocí externího C kódu, ale využili jsme knihovnu Stateflow, což je rozšíření Simulinku na modelování stavových automatů.

Součástí programu je ještě obsluha blikající LED diody, což je pozůstatek z doby, kdy nebyl připojen displej. Pomocí této diody jsme se dozvěděli, že program je nahrán v μC a běží.



Obr. 31: Obsluha podsvícení a blikající LED

6 Testovací jednotka s kartou MF 624

6.1. Karta MF 624

MF 624 je multifunkční I/O karta sloužící pro spojení osobního počítače se signály z okolního světa. Karta se s počítačem propojuje pomocí PCI sběrnice a obsahuje množství periférií jako ADC, DAC, I/O porty, čítače a časovače. Tyto se ovládají pomocí Simulinku a Real Time Toolboxu a umožňují řízení v reálném čase.

6.2. Testování ventilu

Firmou ŽĎAS nám byl zapůjčen ventil PRL1, což je proporcionální rozvaděč s lineárním motorem od firmy ARGO-HYTOS. Ventil je řízen externí elektronikou EL2-4DA také od stejného výrobce. Elektronika může fungovat ve dvou konfiguracích: v otevřené smyčce nebo v uzavřené regulační smyčce. Uzavřená regulační smyčka obsahuje PID regulátor s možností nastavení zesílení jednotlivých složek. Senzorem zpětné vazby regulační smyčky může být například externí tlakový nebo polohový snímač. Řídicí signál této externí elektroniky je pouze napěťový ± 10 V.

Bohužel ventil neobsahuje polohovou zpětnou vazbu, tak námi provedené zkoušky sestávají pouze z posílání různých signálů, bez možnosti ověřit si skutečnou polohu šoupátka ventilu. Výstupní analogový signál karty MF624 je ± 10 V, což je stejné rozmezí jako řídicí signál externí elektroniky. Nepotřebujeme tedy žádný zesilovač nebo omezovač signálu a propojení externí elektroniky a karty je snadné. Řídicí schéma v Simulinku je také maximálně jednoduché. Obsahuje jeden bloček z knihovny Sources (například zdroj konstantního nebo sinusového signálu) a druhý bloček Analog output, který obsluhuje DAC.

7 Závěr

Hlavním úkolem bylo navrhnout a sestavit přenosnou testovací jednotku proporcionálních ventilů. Při zadání této práce nám z problematiky proporcionálních ventilů nebylo nic známo. Postupně jsme se s ní seznamovali a úkol se ukázal jako značně komplikovaný. Sestavit funkční zařízení využitelné v průmyslovém provozu není snadná záležitost.

Začali jsme od základů, sestavili jsme nejdůležitější funkční bloky a až na pár drobných problémů, které jsme v průběhu vývoje odstranili, veškeré obvody fungují. Při psaní obslužného programu byly překonány hlavní překážky, kterými byla obsluha displeje a DAC. Vývoj testovací jednotky je nyní ve fázi, kdy se může jednotka propojit s ventilem, ovládat ho pomocí voleného konstantního napěťového nebo proudového signálu a zobrazovat hodnotu signálu snímače polohy šoupátka.

Při konzultaci s firmou ŽĐAS vyplynulo, že vývoj se dosud ubíral správným směrem a testovací jednotka by mohla být velkým pomocníkem. Vývoj zařízení tedy může dále pokračovat.

Z hlediska elektroniky je třeba vyřešit přepínání jednotlivých signálů z převodníků. Toto bude vyřešeno pravděpodobně pomocí relé, pro jejichž spínání máme na μC rezervováno šest digitální I/O pinů. Pro připojení ventilů je třeba zvolit vhodné konektory. Na zadním panelu testovací jednotky by mohly být jednotlivé konektorové zásuvky a ventil by se vždy pomocí kabelu připojil do té odpovídající. Velká otázka je spojena s napájením celého zařízení. Značnou výhodou by byl provoz nezávislý na síti, akumulátorový. Je třeba počítat s tím, že provoz testovací jednotky vyžaduje tři úrovně napájecího napětí: +24 V (max. 3 A) pro napájení ventilu, +5 V (300 mA) pro μC , displej a ± 15 V (60 mA) pro napájení převodníků. Je vhodné, aby napájení ventilu a řídicí elektroniky bylo galvanicky odděleno. S ohledem na tyto požadavky je třeba zvolit vhodný typ a napětí akumulátoru a použití převodníků napětí.

Program se neustále může vyvíjet a přinášet vylepšení. K ovládaní budou sloužit tlačítka, kterými se budou přepínat funkce a rozsahy. Nastavování hodnot a parametrů testovacích signálů se bude provádět potenciometry. Námi použitý μC dsPIC33FJ128MC představuje dostatečnou výkonovou rezervu a tak by v budoucnu mohly být vytvořeny i testovací funkce spíše laboratorního charakteru, jako zjištění frekvenční charakteristiky, odezvy na signál apod.

Během stavby jsme získali cenné poznatky ze spojení analogové elektroniky a digitálního ovládání. Především konstrukce analogové části není tak jednoduchá, jak se na první pohled zdá. Vyžaduje od konstruktéra jisté zkušenosti, aby věděl, co si počít s případným rušením a kmitáním, které se v digitální elektronice tolik nevyskytuje. My jsme tyto zkušenosti teprve získávali a uplatníme je při úplném dokončení testovací jednotky.

8 Použité zkratky

μC	<i>microcontroller</i>	<i>mikrokontrolér</i>
PWM	<i>pulse-width modulation</i>	<i>pulsně šířková modulace</i>
PE	<i>protective earth</i>	<i>ochranný vodič</i>
LVDT	<i>linear variable differential transformer</i>	<i>diferenciální transformátor</i>
AD	<i>analog-to-digital</i>	<i>analogově digitální</i>
DA	<i>digital-to-analog</i>	<i>digitálně analogový</i>
ADC	<i>analog-to-digital converter</i>	<i>analogově digitální převodník</i>
DAC	<i>digital-to-analog converter</i>	<i>digitálně analogový převodník</i>
DPS		<i>deska plošných spojů</i>
FIR	<i>finite impulse response</i>	<i>filtr s konečnou impulsní odezvou</i>
LCD	<i>liquid crystal display</i>	<i>displej z tekutých krystalů</i>
I/O	<i>input/output</i>	<i>vstupně/výstupní</i>
NOP	<i>no operation</i>	<i>instrukce prázdná operace</i>
LED	<i>light-emitting diode</i>	<i>dioda emitující světlo</i>
CAN	<i>controlle- area network</i>	<i>komunikační sběrnice</i>
RS-232	<i>Recommended Standard 232</i>	<i>sériové komunikační rozhraní</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>	<i>sériová komunikační sběrnice</i>
UART	<i>universal asynchronous receiver/transmitter</i>	<i>asynchronní sériové rozhraní</i>
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>	<i>sběrnice základní desky</i>

9 Použité zdroje a literatura

- [1] *Proporcionální řízení: průvodce pro uživatele* [online, pdf]. Hykom, s.r.o.. [cit. 9.1.2011].
Dostupné z: <www.hykom.cz/getdoc.php?id=40&filename=f001.pdf>.
- [2] Katalogy proporcionálních ventilů. Bosch Rexroth AG
Dostupné z: <<http://www.boschrexroth.com>>.
- [3] Katalogy proporcionálních ventilů. Moog Inc., Industrial Controls
Dostupné z: <<http://www.moog.com/worldwide/>>.
- [4] Katalogy proporcionálních ventilů. Parker Hannifin GmbH
Dostupné z: <<http://www.parker.com>>.
- [5] EX-M03, *Test Unit for Proportional Valves with Integrated Electronics*. Parker Hannifin GmbH. Datasheet [cit. 8.5.2011].
Dostupné z: <http://www.parker.com/literature/Hydraulic%20Controls%20Europe/HY11-3500UK/C11/EXM03_UK.pdf>.
- [6] VT-VETSY-1, *Service case with test unit for servo and proportional valves with integral electronics*. Bosch Rexroth AG. Datasheet [cit. 8.5.2011].
Dostupné z: <http://www.boschrexroth.com/RDSearch/rd/r_29685/re29685_2011-03.pdf>.
- [7] *ValveExpert Checker*. DIETZ automation GmbH. Datasheet [cit. 9.5.2011].
Dostupné z: <<http://dietzautomation.com/download/User%20Manual%20Checker%20%20-%20English.pdf>>.
- [8] Vorel P., Patočka M.: *Průmyslová elektronika*. Elektronické skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2007.
- [9] Vejlupek, J.: *Vývoj elektroniky pro řízení trakce experimentálního vozidla*. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2010.
- [10] Brent Brown. *Analog Output with jumper settings for voltage and current ranges* [online]. Datum revize 24.6.2010 [cit. 2.3.2011].
Dostupné z: <<http://www.piclist.com/techref/microchip/aout.htm>>.
- [11] HW server, *Intelligentní displeje a jejich připojení k PC* [online]. Publikováno 17.2.2000, [cit. 22.3.2011].
Dostupné z: <http://hw.cz/docs/lcd_iq_displays/lcd_iq_dip.html>.
- [12] Joshua Galloway, *HD44780 Controlled LCD* [online]. [cit. 13.4.2011].
Dostupné z: <<http://joshuagalloway.com/lcd.html>>.
- [13] PIClist server, *PIC Microcontroller LCD Display IO routines* [online]. Datum revize 22.4.2011 [cit. 13.3.2011].
Dostupné z: <<http://www.piclist.com/techref/io/lcd/pic.htm>>.
- [14] HD44780U, *Dot matrix LCD driver*. Datasheet, revize 0.0.
Dostupné z: <<http://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>>.

- [15] dsPIC33FJ128MC, *High-Performance, 16-bit Digital Signal Controller*. Datasheet, datum revize 17.1.2011.
Dostupné z: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70291E.pdf>>.
- [16] *Audio Digital-to-Analog Converter*. Referenční manuál, revize B (září 2009).
Dostupné z: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70211B.pdf>>.
- [17] *Audio Digital-to-Analog Converter*. Referenční manuál, revize A (říjen 2007).
Dostupné z: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70211A.pdf>>.
- [18] *Proportional and servovalves: Infinitely variable directional control valves* [online].
[cit. 2.2.2011].
Dostupné z: <<http://www.hydraulicspneumatics.com/200/eBooks/Article/True/45672/>>.
- [19] *Note on LVDTs* [online]. Department of Mechanical Engineering, The University of Texas at Austin. Datum revize 30.3.2000 [cit. 12.4.2011].
Dostupné z: <<http://www.me.utexas.edu/~dsclab/labs/forcemotion/lvdt.html>>.
- [20] PRL1, *Rychlé proporcionální rozvaděče s lineárním motorem*. ARGO-HYTOS a.s.. Datasheet, datum revize leden 2002.
- [21] EL 2, *Elektronické jednotky pro řízení PRL1 a PRL2*. ARGO-HYTOS a.s.. Datasheet, datum revize únor 1999.
- [22] Mechlab, *Mechatronics laboratory* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Květen 2011.
Dostupné z: <<http://www.umat.fme.vutbr.cz/mechlab>>.