ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY

REGULÁTOR HYDRAULICKÉHO ZATĚŽOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Jan Kovář

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2008

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

Prohlášení

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

V Praze dne 16.5. 2008 …….

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé práce Ing. Liborovi Waszniowskému, Ph. D. jehož věcné rady a pomoc mě vždy posunovala o krok vpřed. Chtěl bych také poděkovat všem, kdo mi přímo či nepřímo pomáhali při vzniku této práce a poskytli mi jakoukoli cennou radu.

V nemalé míře bych chtěl poděkovat také své rodině, která mi vytvářela vhodné podmínky a klidné zázemí po celou dobu studia a poskytovala mi veškerou podporu hmotnou i duševní.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Kovář**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Regulátor hydraulického zatěžovacího zařízení**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principy fungování a parametry hydraulického servo-ventilu a principy měření síly tenzometrickým můstkem.
2. Navrhněte zařízení které reguluje sílu vyvíjenou hydraulickým válcem a komunikuje po sběrnici CAN.
3. Realizujte HW navrženého zařízení, otestujte a kalibrujte jeho vstupy a výstupy a spolupracujte při zprovoznění SW regulátoru.
4. Navrhněte a případně realizujte nutné úpravy HW podle zkušeností z provozu.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Libor Waszniowski, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

r.z. M. Dundová
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

Anotace

Cílem této bakalářské práce je návrh měřící a řídící jednotky, která v závislosti na velikosti vstupního signálu z tenzometrického snímače řídí otevření servoventilu LUN 6874-8. Cílem byl nejen návrh zařízení samotného, nýbrž i jeho fyzické sestavení a testování. Práce také seznamuje s principy měření síly pomocí tenzometrických můstků a s principy hydraulického servoventilu. Vedle primární DPS regulátoru bylo potřeba navrhnout komunikační modul, který by zajišťoval potřebnou komunikaci s měřícím zařízením, DSP mikrokontrolerem MC56F8367 a s PC s ladícím softwarem. Na závěr této práce jsou popsány výsledky testováni a celkové zhodnocení návrhu s náhledem k budoucímu zdokonalení.

Annotation

The aim of this bachelor thesis is a design of a measurement and control unit controlling servo-operated valve LUN 6874-8 in dependence on the size of the input signal from the strain-gauge bridge. The work also explains reasons of this specific solution and describes its realization. Besides the construction of this device, the next objective of the theses was testing procedure and design of the communication device providing reliable connection of the DSP micro-controller and PC debugging environment. Device tests and proposals of future improvements are mentioned. Fundamental principles of strain gauge measurement and servo-operated valve are also included.

Obsah

1 Úvod 6
2 Popis problému, specifikace cíle 7
2.1 Požadavky na zařízení 8
2.2 Specifikace možných problémů 9
3 Seznámení s principy fungování hydraulického servoventilu 11
3.1 Obecný princip funkce servoventilu a základní parametry 11
3.2 Princip funkce servoventilu LUN 6874-8 12
4 Principy měření síly pomocí tenzometrického můstku 14
4.1 Úvod do měření síly 14
4.2 Tenzometrická rovnice závislosti el. odporu na deformaci 15
4.3 Kompenzace vlivu teploty 16
4.4 Typy tenzometrů a jejich parametry 17
4.5 Můstkové zapojení tenzometrů a princip měření 19
4.6 Měřící obvody a volba napájení pro tenzometrické můstky 21
4.6.1 Stejnosměrné měřící obvody 22
4.6.2 Střídavé měřící obvody 22
4.6.3 Volba měřícího obvodu pro REGULATOR 22
4.7 Profesionálně vyráběná zařízení pro měření síly 23
5 Regulátor hydraulického zatěžovacího zařízení 25
5.1 Rozbor návrhu regulátoru 25
5.2 Blokové schéma REGULATORu 26
5.3 Obvody napájení regulátoru 27
5.3.1 Analýza a návrh obvodů napájení 27
5.3.2 Implementace obvodů napájení 30
5.3.3 Implementace zdroje záporného napětí 32
5.4 Obvody zpracování vstupního signálu 33
5.4.1 Analýza a návrh obvodů zpracování vstupního signálu 33
5.4.2 Implementace obvodů zpracování vstupního signálu 35
5.5 Obvody řízení servoventilu 37
5.5.1 Analýza a návrh obvodů pro řízení servoventilu 37
5.5.2 Implementace obvodů řízení servoventilu 38
5.5.3 Simulace výstupního převodníku napětí-proud 39
5.6 Centrální část regulátoru a komunikační obvody 41
5.6.1 Analýza centrální části regulátoru 41
5.6.2 Implementace centrální části regulátoru 43
5.7 Návrh a osazení DPS pro REGULATOR 45
5.7.1 Návrh DPS regulátoru 45
5.7.2 Návrh DPS zdroje záporného napětí 47
5.8 Volba konektorů 47
5.8.1 Zapojení konektorů na čelním panelu 48
6 Ladící přípravek DEBUGunit 49
6.1 Blokové schéma DEBUGunit 49
6.2 Analýza a implementace DEBUGunitu 50
6.2.1 JTAG komunikace 50
6.2.2 Sériová komunikace 51

6.3 Návrh DPS pro DEBUGunit 51
6.4 Fyzické propojení REGULATORu a DEBUGunitu 51
7 Testování modulů REGULATOR a DEBUGunit – výsledky měření 53
7.1 Průběh testování 53
7.2 Poznatky z testování a budoucí zdokonalení 57
8 Závěr 58
9 Použitá literatura a zdroje 59
Příloha A - Schémata zapojení 62
Příloha B - Plošné spoje a výrobní podklady 71
Příloha C - Obrázky k simulaci převodníku u/i 78
Příloha D - Slovník použitých zkratek 79
Příloha E - Fotodokumentace 80
Příloha F - Obsah CD 82
Příloha G - Soupiska součástek 83

Seznam obrázků

Obr. 2.1 – Blokové schéma regulačního obvodu 7
Obr. 3.1 - Principiální schéma dvoutryskového rozvodu a výsledná převodní charakteristika 12
Obr. 3.2 - Schéma dvoustupňového servoventilu a dva stavy ventilu 12
Obr. 3.3 - Sestava servobloku LUN 6874-8, včetně řezových nákresů 13
Obr. 4.1 - Kompenzace vlivu teploty můstkovým zapojením tenzometrů 17
Obr. 4.2 - Diagram rozdělení tenzometrických snímačů 17
Obr. 4.3 - Čtvrtinový tenzometrický můstek 20
Obr. 4.4 - Plný tenzometrický můstek 20
Obr. 4.5 - Poloviční tenzometrický můstek a princip měření ohybu vetknutého nosníku 21
Obr. 5.1 - Blokové schéma REGULATORU 26
Obr. 5.2 - Blokové schéma obvodů napájení REGULATORu 28
Obr. 5.3 - Schéma prvního stupně napájení REGULATORu 31
Obr. 5.4 - Schéma druhého stupně napájecího okruhu REGULATORu 32
Obr. 5.5 - Schéma zapojení zdroje záporného napájení 33
Obr. 5.6 - Schéma zapojení vstupního zesilovače 35
Obr. 5.7 - Schéma zapojení vstupního antialiasingového filtru 36
Obr. 5.8 - Graf závislosti výst. proudu na vst. napětí převodníku – výsledek simulace 40
Obr. 5.10 - Vnitřní blokové schéma mikrokontroléru 56F8367 42
Obr. 5.11 - Blokové schéma interní distribuce napájení v 56F8367 45
Obr. 5.12 - Vnější napájecí a výstupní konektory 47
Obr. 5.13 – Popis zapojení vnějších konektorů na čelním panelu regulátoru 48
Obr. 6.1 - Blokové schéma DEBUGunitu 49
Obr. 6.2 - Schéma plochého kabelu s konektorem PFL 52
Obr. 6.3 - Propojovací kabely mezi DEBUGunitem a PC – Sériový kabel, paralelní kabel 52
Obr. 7.1 - Změřený 400Hz signál při zesílení G = 800 54
Obr. 7.2 - Změřený 1100Hz signál při zesílení G = 800 54
Obr. 7.3 - Změřený 2,5kHz signál při zesílení G = 800 55
Obr. 7.4 - Změřený 5kHz signál při zesílení G = 800 55
Obr. 7.5 - Změřená výstupní charakteristika převodníku PWM- proud 56

Obr. A. 1 - Blokové pseudoschéma jednotky REGULATOR 62
Obr. A. 2 - Schéma zapojení procesoru 56F8367 63
Obr. A. 3 - Schéma zapojení AD převodníku a externích součástek pro 56F8367 64
Obr. A. 4 - Schéma zapojení LED a JTAG konektoru 65
Obr. A. 5 - Schéma zapojení CAN kontrolerů a propojení CAN konektoru 66
Obr. A. 6 - Schéma zapojení vstupních a výstupních konektorů 67
Obr. A. 7 - Schéma zapojení mikrospínače z hydraulického rozvaděče 68
Obr. A. 8 - Schéma zapojení spínače elektromagnetu hydr. rozvaděče 68
Obr. A. 9 - Schéma zapojení výstupního převodníku PWM – proud 69
Obr. A. 10 - Schéma zapojení DEBUGunitu 70

Obr. B. 1 - Vrchní vrstva DPS REGULATORu 71
Obr. B. 2 - Spodní vrstva DPS REGULATORu 72
Obr. B. 3 - Vrchní sítotisková vrstva pouzder REGULATORu 73
Obr. B. 4 - Spodní sítotisková vrstva pouzder REGULATORu 74
Obr. B. 5 - Vrchní vrstva DPS DEBUGunitu 75
Obr. B. 6 - Spodní vrstva DPS DEBUGunitu 75
Obr. B. 7 - Vrchní sítotisková vrstva pouzder DEBUGunitu 76
Obr. B. 8 - Spodní sítotisková vrstva pouzder DEBUGunitu 76
Obr. B. 9 - Spodní vrstva DPS NEGsource 77
Obr. B. 10 - Vrchní sítotisková vrstva pouzder NEGsource 77

Obr. C. 1 - Simulační schéma výstupního převodníku u/i 78
Obr. C. 2 - Detail simulace DC sweep 78

Obr. E. 1 - Pohled shora na výsledné zařízení 80
Obr. E. 2 - Pohled na propojené moduly REGULATOR a DEBUGunit 80
Obr. E. 3 - Jednotka REGULATOR s propojenýma výstupníma konektorama 81
Obr. E. 4 - Pohled na výsledný uzavřený box 81

Seznam tabulek

Tab. 4.1 - Základní materiály fóliových tenzometrů a jejich K-faktor 18
Tab. 4.2 - Základní materiály polovodičových tenzometrů a jejich parametry 18
Tab. 5.1 – Realizované napájecí úrovně regulátoru 28

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout měřící a vyhodnocovací zařízení (dále jen REGULATOR), které v závislosti na velikosti vstupního signálu z tenzometrického snímače řídí otevření hydraulického servoventilu LUN 6874-8. Dále bylo potřeba navrhnout ladící přípravek (dále jen DEBUGunit) připojitelný k REGULATORu a PC s vhodným softwarem. Tento periferní modul měl především sloužit ke spolehlivé real-time komunikaci se zařízením regulátoru a k ladicím účelům při vývoji softwaru regulátoru.

V prvních kapitolách této práce dojde k seznámení čtenáře s principy fungování hydraulického servoventilu, měření síly pomocí tenzometrického můstku a porovnání možností profesionálně vyráběných zařízení s ohledem na konkrétní aplikaci pro navrhovaný REGULATOR.

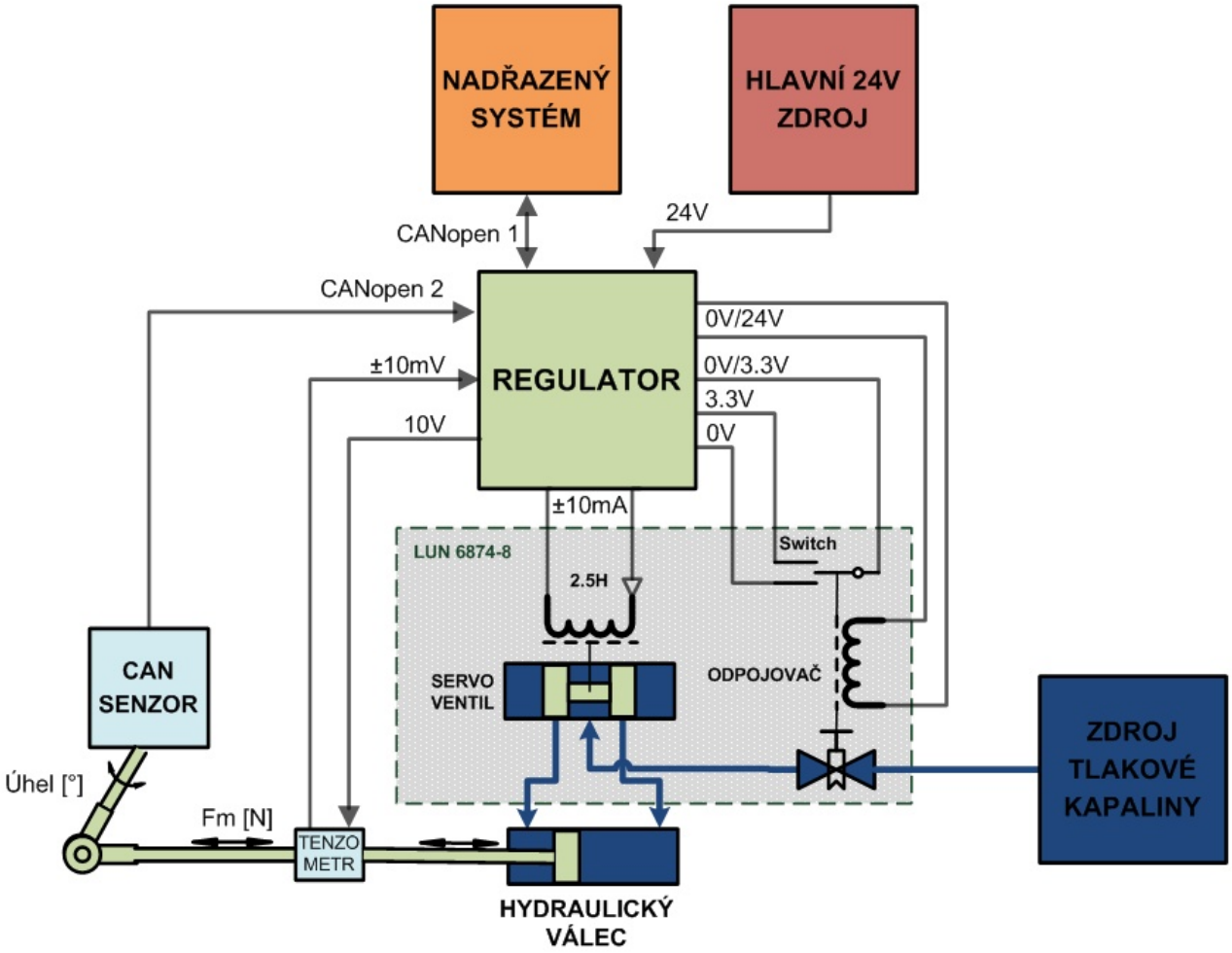
V následujících kapitolách se diskutuje konkrétní návrh jednotlivých částí REGULATORu a DEBUGunitu. Nejdříve bude provedena analýza daného problému a bude navrženo blokové schéma. Poté je zvlášť diskutována syntéza jednotlivých podsystémů modulu s odůvodněním volby komponent a popisem daného schématu.

Dále jsou přiložena technologická data potřebná k výrobě, včetně schémat zapojení a výsledné desky plošných spojů. Po návrhových kapitolách dojde ke zhodnocení testů celého navrženého hardwaru a navržení změn v zapojení regulátoru.

V závěru práce jsou shrnuty dosažené výsledky a porovnání s prvotními teoretickými předpoklady. Jednou z částí závěru je budoucí zdokonalení zařízení a poznatky z testování regulátoru v reálném provozu.

2 Popis problému, specifikace cíle

Cílem je navrhnout regulátor hydraulického zatěžovacího zařízení (dále jen REGULATOR), který reguluje sílu hydraulického válce. Síla je měřena tenzometrem nalepeným na táhle řízeného hydraulického válce. Měřenou veličinou je tedy napětí na tenzometrickém můstku. Řídicí veličina je elektrický proud cívky servoventilu. Žádaná síla je vypočítávána v závislosti na poloze hydraulického válce. Ta je získávána z inteligentního senzoru úhlové výchylky s integrovaným CANem. Regulátor musí být dále schopen komunikovat s nadřazeným řídicím systémem přes CAN. Regulátor dále ovládá elektrické napětí na elektromagnetu hydraulického rozvaděče servobloku LUN 6874-8. informaci o odpojení nebo připojení poskytuje napětí na mikrospínači hydraulického rozvaděče. Jako hlavní napájecí zdroj pro regulátor je použit stabilizovaný 24V zdroj. Celkové blokové schéma regulačního obvodu lze nalézt na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 – Blokové schéma regulačního obvodu

2.1 Požadavky na zařízení

Tenzometrický můstek:

Rezistory	4 x 350Ω
Napájení	DC 10V
Výstupní signál	± 10mV
Offset	cca 6mV
Zapojení	Můstkové

Elektromagnet odpínacího hydraulického rozvaděče:

Min. spínací DC napětí	16V
Max. spínací DC napětí	33V
Odpor vinuti	71ohm
Proud	230 - 465 mA (338 mA při 24V)

Servoventil:

Typ	LUN 6874
Pracovní rozsah proudu	±10 mA
Počet cívek	2
Odpor vinuti jedné cívky	1kΩ
Indukčnost vinutí jedné cívky	2,5H
Zapojení	Paralelní spojení cívek

Detail zapojení v literatuře [14] – technická zpráva LUN 6874-8

Mikrospínač hydraulického rozvaděče:

Integrovaný dvoupolohový přepínač

Hlavní napájecí zařízení:

Hlavní přívod napájení ze ss. stabilizovaného zdroje napětí 24V, sekundárně možnost napájení zařízení z CAN (max. odběr 1A)

MCU:

Mikrokontrolér	MC56F8367 FREESCALE

Rozměry DPS měřícího modulu:

Délka	≤110mm
Šířka	≤70mm

Ochranný box:

Hammond Manufacturing Series 1590TF (Flanged Box)
Detaily a technický popis ochranného boxu v dokumentaci [35]

Funkčnost

Možnost flexibilní změny parametrů jednotlivých podsystémů REGULATORu, především možnost softwarového nastavování analogových měřících a komunikačních obvodů

Šířka pásma

1kHz

2.2 Specifikace možných problémů

Vzhledem k tomu, že zařízení bude obsahovat na jedné DPS čistě digitální a analogové obvody, je velice pravděpodobné očekávat problém s interferencemi od spínaných a číslicových obvodů do analogových částí. Zde bude nejproblémovější zamezit vniku rušení na vstupním signálu z tenzometru.

Kritická je především volba vstupního měřícího subsystému. Je potřeba porovnat možnost využití komerčně prodávaných zařízení na měření síly a návrhu specializovaného měřícího obvodu s ohledem na požadavky z 2.1.

Dále je potřeba počítat s nutností zamezit aliasingu správným frekvenčním omezením vstupního signálu a s tím související vhodnou volbou antialiasingového filtru. S ohledem na, ne přesně známou, dynamiku řízeného procesu, pak zvolit zlomovou frekvenci antialiasingového filtru (nesmí dojít ke ztrátě informace).

Další problém, který musíme brát v úvahu je maximální tepelná ztráta na výkonových součástkách a následný odvod tepla do okolí. Za úvahu bude také stát možnost budoucího rozšíření a napojení externích zařízení. S tím úzce souvisí správné vyvedení napájení.

V první fázi návrhu regulátoru bude nutné zvolit vhodné typy a množství napájecích oblastí pro jednotlivé subsystémy, a to s ohledem na oddělení zemí (oddělit analogovou část a digitální část). Díky tomu, že lze předpokládat rušivé impulsní signály, například z hodin mikrokontroléru či spínaných zdrojů, bude kladen důraz na dostatečnou filtraci výstupních napětí stabilizátorů a lokální filtraci napájecích napětí v bezprostřední blízkosti integrovaných obvodů. Při návrhu nelze opomenout ani dostupnost vybraných součástek na trhu.

3 Seznámení s principy fungování hydraulického servoventilu

3.1 Obecný princip funkce servoventilu a základní parametry

Servoventily patří k základním hydraulickým zesilovacím prvkům. Tyto prvky umožňují řízení velkých výkonů malým řídícím signálem, přesné nastavování výstupních parametrů, korekci výstupních parametrů při odchylkách a řízení parametrů výstupního signálu podle vstupní řídicí veličiny.

Princip funkce těchto prvků lze přirovnat k hydraulické verzi operačního zesilovače, tj. prvku, u kterého malá změna vstupu vyvolá velkou změnu odezvy na výstupu.

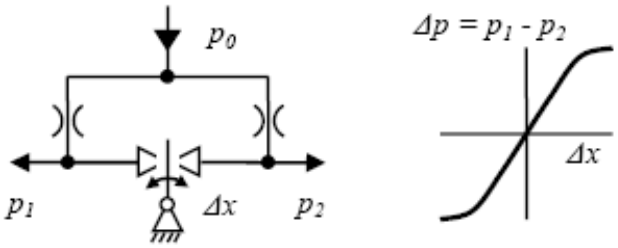
Existuje několik verzí vnitřního uspořádání ventilů, mezi ty nejrozšířenější patří tryskový rozvod (Askania), dvoutryskový rozvod, který se nazývá také systém klapka-tryska, a šoupátkový rozvod. Zde se budeme zabývat pouze systémem klapka-tryska, protože přesně tento typ je potřeba řídit REGULATORem.

Principiální schéma je uvedeno na Obr. 3.1. Obecně lze říci, že výstupní tlak v obou větvích ve dvoutryskovém obvodu určuje poloha otočné klapky (někdy nazývaný flapper). Nulová poloha klapky je centrována pružinami. Na klapku působí také krouticí moment otočně uložené kotvy elektromagnetu s nastavitelným proudem. Výstupní tlaky $p1$ a $p2$ dvoutryskového rozvodu určují polohu šoupátka, druhého stupně ventilu. Mezi polohou šoupátka a klapky působí mechanická zpětná vazba, která je zprostředkována pérem.

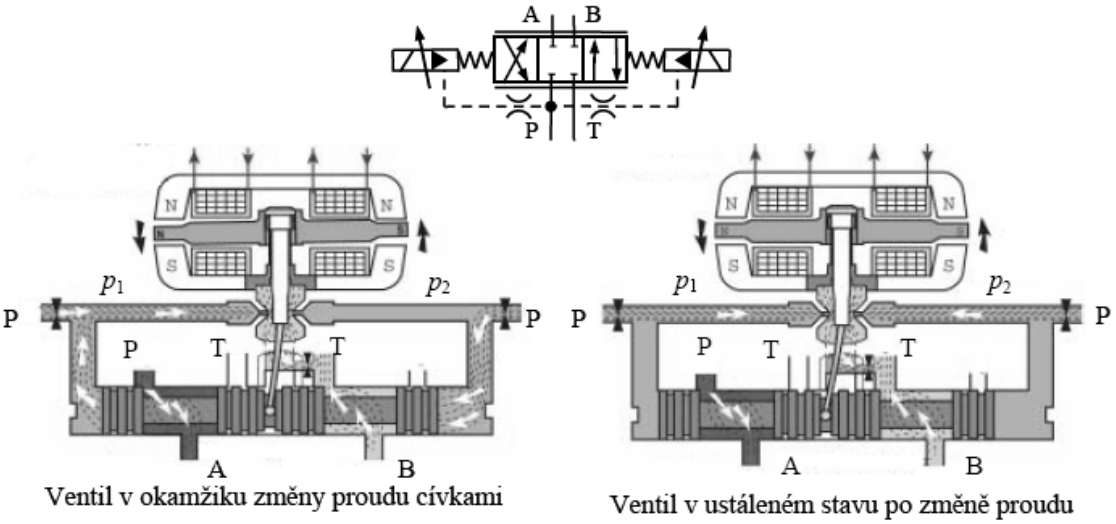
Chování servoventilu lze rozložit na několik fází. V okamžiku změny proudu cívkami dojde k vychýleni klapky a ovlivnění rozdílu tlaků v obou tryskách. Šoupátko druhého stupně ventilu se uvede do pohybu a začne unášet konec péra tak, že se snaží obnovit neutrální polohu klapky mezi tryskami. To vede k vyrovnání tlaků v tryskách a zastavení pohybu šoupátka druhého stupně. Schéma dvoustupňového servoventilu lze nalézt na Obr. 3.2.

Výhodou servoventilu oproti proporcionálním ventilům je především jejich dynamika (hlavně celková reakční rychlost). Nevýhodou je mnohem větší citlivost na čistotu oleje a především vyšší cena. Výsledná cena celého servobloku závisí složitosti celého zařízení. Čím kvalitnější je servoventil, tím menší je odchylka od ideální lineární závislost výsledné převodní charakteristiky servoventilu.

Z důvodu vynikajících dynamických vlastností se servoventily používají v rychlostních a polohových aplikacích.



Obr. 3.1 - Principiální schéma dvoutryskového rozvodu a výsledná převodní charakteristika



Obr. 3.2 - Schéma dvoustupňového servoventilu a dva stavy ventilu

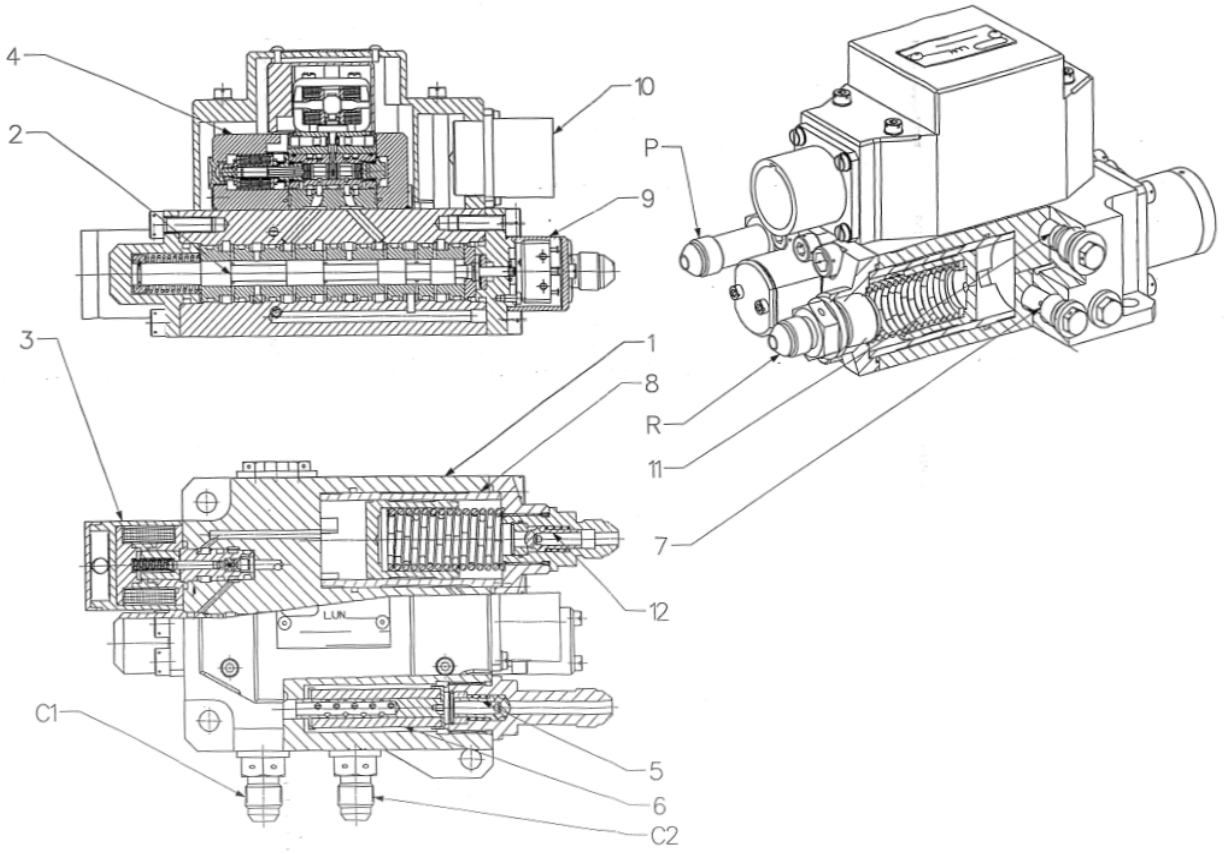
Pozn.: Obrázky převzaty z [20].

3.2 Princip funkce servoventilu LUN 6874-8

Servoventil LUN 6874-8, přesněji řečeno servoblok, se skládá z několika hlavních podsestav a celkový seznam komponentů lze nalézt např. v literatuře [11], [12]a [13]. Zde budou shrnuta nejdůležitější fakta, co se funkce servoventilu LUN 6874-8 týče. Celková sestava servoventilu LUN 6874-8 je znázorněna na Obr. 3.3.

Ve své podstatě se jedná o dvoutryskový servoventil doplněný o hydraulický odpojovač. Principiálně funguje tak, že ve stavu vypnuto vstupuje tlaková kapalina od hydrogenerátoru do vstupního hrdla P, následně protéká přes vstupní ventil (5) a lokální filtr (6) k elektrohydraulickému rozvaděči (3). Pokud elektromagnetem rozvaděče neprochází elektrický proud, je další průtok uzavřen a servoventil (4) je také bez přívodu tlakové kapaliny. V tomto stavu jsou obě výstupní hrdla C1 a C2 propojena přes dvoupolohový hydraulický rozvaděč (2) a zpětný výstupní ventil (12).

Do zapnutého stavu se dostaneme přivedením elektrického napětí na elektromagnet rozvaděče (3). Rozvaděč se tak přestaví do průchozí polohy a následným tlakem kapaliny dojde k přestavení hydraulického rozvaděče (2) a tím i k sepnutí mikrospínače (9) . Tlaková kapalina je následně vpuštěna na vstup servoventilu (4). Neprochází-li cívkou servoventilu proud, je další průtok kapaliny uzavřen a tlaky v obou výstupních hrdlech C1 a C2 jsou vyrovnány. Při průchodu elektrického proudu cívkou servoventilu dojde v závislosti na jeho polaritě a velikosti k nárůstu tlaku v jednom výstupním hrdle a současně k poklesu tlaku v druhém.



Obr. 3.3 - Sestava servobloku LUN 6874-8, včetně řezových nákresů

Pozn.: Obr. 3.3 převzat z [14]

Z výše uvedené funkce servoventilu je patrno, že řídicí veličinou výstupního tlaku bude vstupní elektrický proud cívky servoventilu (velikost a polarita řídicího proudu je uvedena v kapitole 2.1 nebo v literatuře [14]). Nutností je také přivádět elektrické napětí na elektromagnet rozvaděče, aby bylo možno servoventil řídit. Dále je potřeba snímat hodnotu mikrospínače, pro informaci a stavu hydraulického rozvaděče.

Detailní popis a princip funkce servoventilu lze nalézt v datasheetu dodávaném výrobcem nebo v literatuře [14].

4 Principy měření síly pomocí tenzometrického můstku

Tato kapitola je úvodem do problematiky měření síly. V následujících podkapitolách lze nalézt důležité informace týkající se možných způsobů měření síly. Důraz je kladen na tenzometrické můstky. V kapitole 4.5 a 4.6 je pojednáno o výhodách a nevýhodách tenzometrických můstků a měřících obvodů, s ohledem na aplikaci v navrhovaném REGULATORu.

4.1 Úvod do měření síly

Podle definice je síla vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje míru vzájemného působení těles nebo polí. Přesněji řečeno časově proměnná síla *F(t)* je vyvolána zrychlením objektu o hmotnosti *m*. V naprosté většině případů se však měření síly převádí na deformační účinky daného objektu, vhodného tvaru a složení. Tedy v principu měření síly se jedná vždy o převod *síla -> deformace -> fyzikální účinky deformace*. Detailnější informace o měření síly a mechanického napětí lze nalézt v [2], [15], [16] a [17].

Jako hlavní prostředky k měření síly se používají deformační pružné členy. Ty převádějí deformace vyvolané silou na hodnoty měřitelné senzorem. V tomto místě je potřeba upozornit na fakt, že se jedná o prvotní část měřícího řetězce a chyby zde vznikající lze jen velice obtížně korigovat. Hlavní možností snížení chyby je vhodné a precizní umístění snímače.

Nejpoužívanějším senzorem pro měření mechanického napětí a tedy i síly jsou tenzometrické senzory. Základem měření pomocí tenzometrů je závislost jejich nominálního odporu na mechanickém namáhání (deformaci). Obecně totiž platí, že namáháme-li vodič délky *l* s plochou *S* tahovou silou *F,* způsobuje námi dodávaná síla geometrické (viditelné) deformace, ale také mikrostrukturální změny v materiálu. Tím dochází ke změně rezistivity vodivého objektu.

Je-li vodič tenzometru pevně spojený s povrchem měřeného namáhaného objektu, má stejné deformace jako objekt. Tedy při natahování se zvětšuje jeho délka, zmenšuje průřez a podle použitého materiálu se mění i jeho měrný elektrický odpor. U polovodičových odporových tenzometrů, v nichž vodičem je například křemíkový pásek, se však výrazněji projevuje piezorezistivní jev.

Při použití tenzometrů musíme dbát na potlačení rušivých vlivů, které působí při měření. Mezi hlavní patří teplota, která ovlivňuje nejen vodivost materiálu tenzometru, ale její změna způsobuje i teplotní roztažnost tenzometru. Nejčastěji se dá kompenzovat vliv teploty vhodným zapojením více tenzometrů. S tím úzce souvisí velikost napájecího proudu tenzometru. Ten musí být zvolen dostatečně malý, aby tenzometr zahříval jen zanedbatelně. Dalším rušivým elementem je tzv. tečení (creep), díky kterému tenzometr, na který působí konstantní mechanické zatížení, po čase ztrácí citlivost.

Důvodem jsou nejen časové mikrostrukturální změny materiálu, ale také použité materiály pro lepidla.

Nezanedbatelná je také hystereze. Samotný tenzometr má obvykle zanedbatelnou hysterezi, avšak větší hysterezi vykazuje materiál, na který je tenzometr nalepen.

V úvahu se musí také brát vlastnosti prostředí, ve kterém bude tenzometr umístěn, protože některá lepidla mění s vlhkostí své vlastnosti. Proto se po nalepení tenzometru na deformovaný objekt chrání celý senzor ochrannou fólií proti vlhkosti. V našem případě může hrát také velký vliv vnější elektromagnetické pole. Elektrickou složku pole lze sice poměrně snadno odstínit, nicméně problémy může způsobovat silné střídavé magnetické pole a s ním spojená indukce rušivých signálů v přívodních kabelech.

Přes všechny tyto zmíněné neduhy jsou tenzometry nejspolehlivější a nejpoužívanější metodou pro měření síly.

4.2 Tenzometrická rovnice závislosti el. odporu na deformaci

Rovnice (1) udává závislost elektrického odporu tenzometru na deformaci a je shodná pro všechny typy tenzometrů. Pro kovové tenzometry lze rovnici (1) zjednodušit na tvar (2). Kde *K* udává tzv.K-faktor tenzometru. U většiny kovových tenzometrů se blíží hodnotě +2. U polovodičových tenzometrů nelze rovnici (1) ani (2) přesně použít, protože závislost odporů na deformaci není u těchto snímačů lineární. Hodnota *K* u polovodičových tenzometrů nabývá výrazně vyšších hodnot než u kovových tenzometrů a je přibližně v rozmezí –170 do +200.

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 + \frac{\Delta l}{l} + C_2\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 = C_1 e + C_2 e^2 \qquad (1)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 e = Ke \qquad (2)$$

kde: R - odpor nedeformovaného tenzometru (Ω),

Δl - změna délky tenzometru v důsledku deformace objektu (m),

l - délka tenzometru před deformací (m),

$C1$, $C2$ - konstanty deformační rovnice,

ε - poměrná deformace (m/m).

K - součinitel deformační citlivosti

4.3 Kompenzace vlivu teploty

Charakteristickou veličinou udávající závislost odporu na teplotě je teplotní součinitel odporu α_R. Důležitým bodem při návrhu měřícího zařízení s tenzometrickým snímačem je kompenzace vlivu teploty. Důvodem je fakt, že při nalepení tenzometrického můstku na měřený objekt dojde k incidenci obou materiálů a následně k deformaci rozdílem teplotní roztažnosti materiálu měřící mřížky a materiálu měřeného objektu.

Nejčastějším řešením tohoto problému je využití polovičního nebo plného můstkového zapojení tenzometrů. Princip kompenzace této metody je dán využitím dalšího tzv. „kompenzačního“ tenzometru T_k. Tento tenzometr je nalepen na stejný měřený objekt jako „aktivní“ tenzometr T_A. Obvykle se tento kompenzační tenzometr T_k nalepuje na měřený objekt tak, aby snímal deformaci opačného smyslu než aktivní tenzometr T_A . Díky tomuto zapojení teplota působí na oba tenzometry T_A a T_k stejně ale mechanické namáhání měřeného objektu nezpůsobuje změnu délky T_k a současně nedochází k rozvažování můstku. Uvedené zapojení kompenzuje aditivní chybu měření, což je v tomto případě teplota. Velikost zbylých odporů R_1 a R_2 na paralelních větvích se volí tak, aby nastala rovnováha můstku při $F = 0\ N$.

Princip kompenzace teploty pomocí polovičního můstku je znázorněn na Obr. 4.1. Závislost odporu tenzometru na teplotě udává rovnice (3). Aby nedocházelo k ovlivňování odporu tenzometru teplotou musí být výraz v hranaté závorce rovnice (3) nulový.

Přidáním dalších dvou tenzometrů do všech ramen můstku dojde ke zvýšení citlivosti měření a kompenzace vlivu teploty. Tomuto zapojení se věnuje následující kapitola, v níž jsou rozebrány výhody a nevýhody polovičního můstku a především princip měření pomocí plného tenzometrického můstku.

$$\frac{\Delta R_t}{R} = \left[a_R + K\left(a_{Lmat} - a_{Ltenz}\right)\right]\Delta t \qquad (3)$$

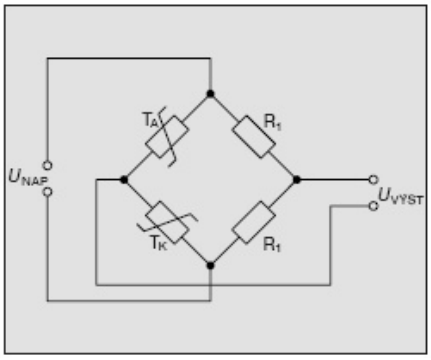
kde: ΔR_t - změna odporu tenzometru způsobená změnou teploty o Δt (Ω),

α_R t - teplotní součinitel elektrického odporu tenzometru (K^{-1}),

α_{Lmat} - teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu měřeného objektu (K^{-1}),

α_{Ltenz} - teplotní součinitel délkové roztažnosti měřicí části tenzometru (K^{-1}),

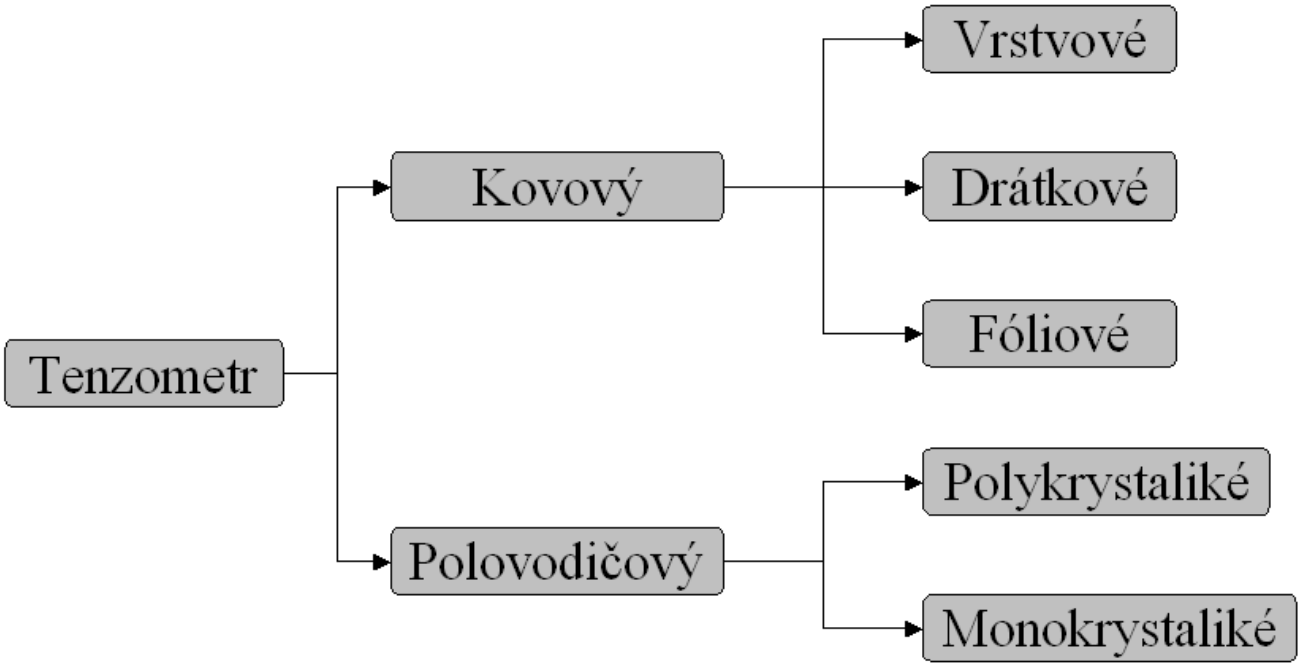
Δt - změna teploty (K).



Obr. 4.1 - Kompenzace vlivu teploty můstkovým zapojením tenzometrů

4.4 Typy tenzometrů a jejich parametry

V dnešní době existuje nepřeberné množství tenzometrických snímačů. Základní rozdělení tenzometrů je podle použitého materiálu. Grafické rozdělení tenzometrů a typy používaných materiálů uvádí následující Obr. 4.2.



Obr. 4.2 - Diagram rozdělení tenzometrických snímačů

Protože bude zařízení primárně pracovat se signálem z kovového odporového tenzometrického můstku, bude následující část ohledně možných parametrů tenzometrů zaměřena právě na tuto skupinu. Další typy tenzometrů a jejich parametry budou shrnuty do závěrečné tabulky uvedené v této podkapitole.

Jedním z důvodů, proč jsou v dnešní době kovové tenzometry v automatizačních systémech nejpoužívanějšími mechanicko-elektrickými snímači je fakt, že jsou charakteristické svou dlouhodobou časovou a teplotní stabilitou, dlouhou životností a přesností měření.

Další výhodou těchto typů senzorů je, že dokáží měřit jak statické tak dynamické mechanické deformace a to v řádech až několika stovek kilohertzů při relativní změně své velikosti od řádu mikrometrů do stovek mikrometrů. Prahová hodnota, kdy lze ještě měřit užitečný deformační signál je okolo 1.10^{-9} mm, přičemž maximální poměrná deformace je okolo 20% až 25%. Rozsah pracovních teplot pro odporové kovové tenzometry je od –200°C do +500°C. Délka aktivní měřící části tenzometrů dosahuje 1 až 20mm avšak ve speciálních aplikacích jsou známy i hodnoty okolo 100mm.

Přehled používaných materiálů pro kovové fóliové tenzometry a jejich součinitel deformační citlivosti K uvádí Tab. 4.1.

Materiál	Složení	Součinitel deformační citlivosti při 200°C
Konstantan	57 Cu, 43 Ni	2,05
Karma	73 Ni, 20 Cr, resp. Fe+Al	2,1
Nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Platina - wolfram	92 Pt, 8 W	4
Cermet	CrSi, CrSi2	2

Tab. 4.1 - Základní materiály fóliových tenzometrů a jejich K-faktor

V následující Tab. 4.2 je stručné shrnutí všech základních parametrů pro polovodičové tenzometry typu P a N.

Materiál	Křemík	Křemík	Germanium	Germanium
Typ polovodiče	Typ P	Typ N	Typ P	Typ N
Měrný odpor [Ω.m]	0,017-0,02	0,35	1	0,25
Jmenovitý odpor při 200°C [Ω]	100-350	100-400	50-500	50-300
Součinitel deformační citlivosti při 200C	130	-100 až-130	55	-100

Tab. 4.2 - Základní materiály polovodičových tenzometrů a jejich parametry

4.5 Můstkové zapojení tenzometrů a princip měření

Nejčastější konfigurace, v níž se zapojují tenzometrické snímače, je můstkové zapojení. Základní uspořádání je zapojení do Wheatsonova můstku, kdy je můstek napájen do jedné ze svých diagonál a z další je následně měřeno rozdílové napětí, které je úměrné měřené veličině.

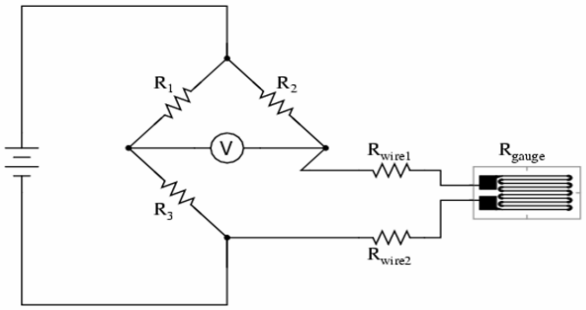
Pro tenzometrická měření se používá čtvrtinového, polovičního nebo plného můstku. Čtvrtinový můstek je nakreslen na Obr. 4.3. Tato konfigurace se však v praxi téměř nikdy nerealizuje, protože zapojení poskytuje mnohem menší citlivost na změnu deformace a hlavně neposkytuje teplotní kompenzaci.

Polovičního můstku lze užít v případech, kdy je vhodné měřit namáhání na objektu typu vetknutého nosníku. Princip tohoto měření je znázorněn na Obr. 4.5. Zde je na opačných stranách nosníku umístěn vždy jeden tenzometr: Jeden je na kompresní straně (přítlak) a druhý na straně tahu. V tomto uspořádání lze výstupní mV signál efektivně zdvojnásobit při stejném pnutí, přičemž je zajištěna teplotní kompenzace a zlepšena linearita výsledného měření.

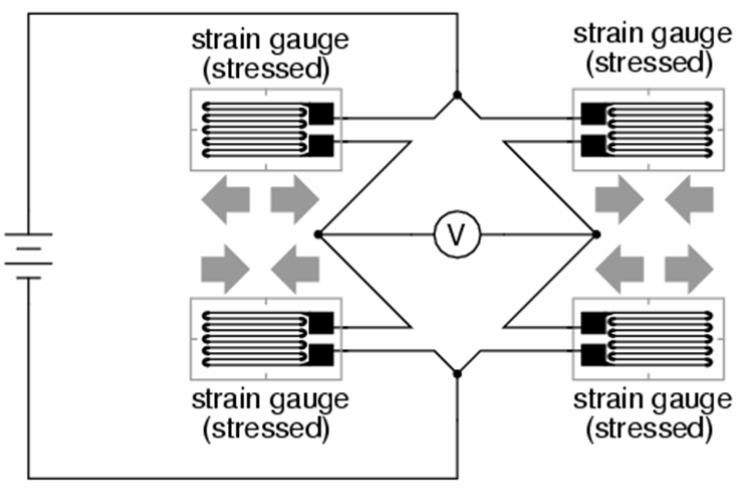
Nejvýhodnější z hlediska měření deformace je zapojení tenzometrů do všech ramen můstku. V tomto uspořádání (plný můstek) dochází ke zvýšení citlivosti na čtyřnásobek, současně k plné kompenzaci teploty, možnosti vytvoření celého můstku již při výrobě a díky rovnosti tenzometrických odporů k výraznému potlačení nelinearity. Zároveň lze minimalizovat chyba odporu přívodů a to díky minimální délce spojů mezi rameny můstku.

Jelikož výsledné zařízení má zpracovávat signál z plného tenzometrického můstku 4 x 350Ω, bude následný text zaměřen pouze na zapojení a zpracovávání signálu z plného můstku. Umístění jednotlivých tenzometrů v plném můstku ukazuje Obr. 4.4.

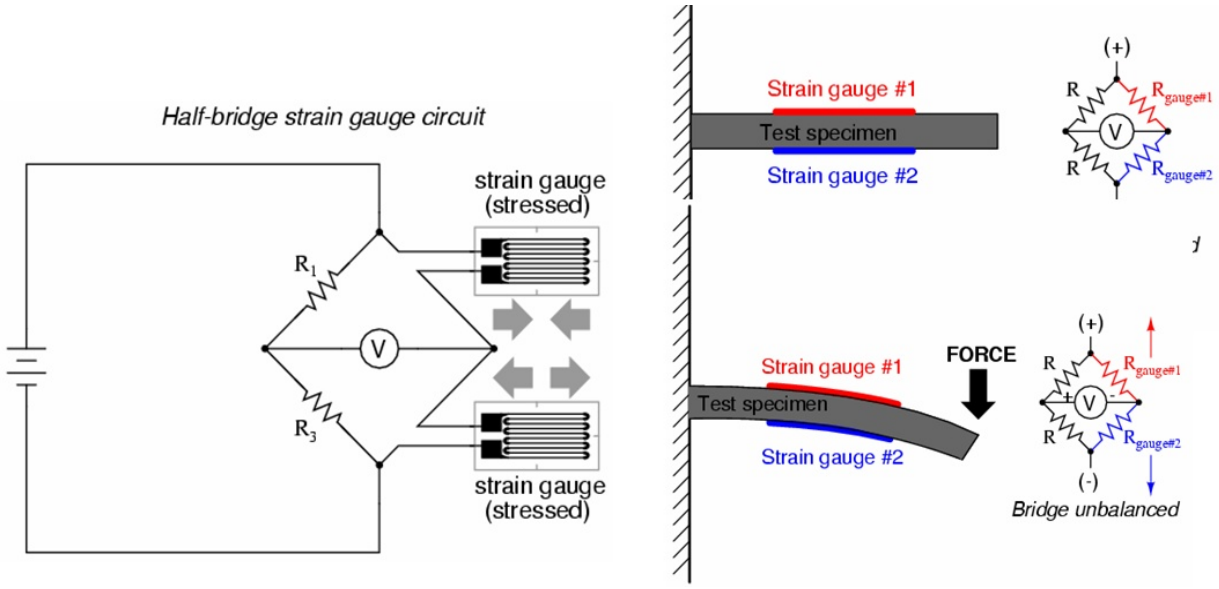
Dalším faktorem a důvodem k zamyšlení je volba napájení a měřícího obvodu. Tyto poznatky budou diskutovány v následující podkapitole. Nezanedbatelnou části při návrhu měřícího zařízení je volba propojení můstku a měřícího obvodu. Zde se nejčastěji používá čtyřvodičového nebo šestivodičového zapojení, kde díky dalším dvěma přívodům dochází ke korekci délky vedení čili odstranění vlivu impedance kabelů. Šestivodičového zapojení však nebylo v návrhu zařízení uvažováno, z důvodu poměrně velké složitosti měřícího obvodu.



Obr. 4.3 - Čtvrtinový tenzometrický můstek



Obr. 4.4 - Plný tenzometrický můstek



Obr. 4.5 - Poloviční tenzometrický můstek a princip měření ohybu vetknutého nosníku

4.6 Měřící obvody a volba napájení pro tenzometrické můstky

Jednou z nejdůležitější částí měřícího řetězce je v tomto případě měřící obvod. V případě tenzometrických měření jsou na něho kladeny mimořádné nároky, protože velikost výstupního diferenčního napětí z diagonály můstku téměř nikdy nepřesáhne hodnoty v řádech jednotek až desítek mV. Ve své podstatě se zde jedná o měření velmi malých napětí, a proto je potřeba výsledný obvod tomuto faktu přizpůsobit.

Nejzávažnější problémy spojené s měřením tenzometrických můstků jsou vyloučení vlivu přívodů, potlačení termoelektrických napětí a volba napájecího napětí popř. proudu.

Zde se zaměříme pouze na diskuzi ohledně volby stejnosměrného nebo střídavého napájení můstku a napájecích úrovní.

V dnešní době se k měření deformací (resp. síly) využívá dvou typů napájení můstku, a to stejnosměrného napájení a střídavého napájení. Obě metody mají několik výhod a nevýhod a jsou určeny pro jiný druh aplikace. Aby bylo možno určit jaký druh napájení je vhodný pro návrh měřící části REGULATORu, budou zde probrána základní fakta o obou typech napájení. Hlavním požadavkem pro oba druhy napájení je zajistit, aby bylo napájecí napětí můstku co nejvíce nezávislé na délce vedení a na okolní teplotě.

4.6.1 Stejnosměrné měřící obvody

Nejrozšířenější jsou stejnosměrné můstkové obvody, hlavně v kombinaci plného můstku a čtyřvodičového připojení. Zde je možnost využití jak stabilizovaného teplotně kompenzovaného napěťového zdroje, tak proudového zdroje. Proudové napájení je lepší z hlediska úplného odstranění vlivu odporu přívodů, ale pro složitost stavby zdroje proudu a nemožnosti nalezení vhodné monolitické verze proudového zdroje s danými výstupními parametry, bylo zvoleno řešení s napěťovým zdrojem.

Standardně používané napájecí úrovně jsou konstantní napětí 5V, 10V nebo 15V, případně konstantní proud 5mA, 10mA, 20mA nebo 30mA. Výstupní napětí Wheatstoneova můstku se vyjadřuje v mV na Volt (mV/V) napájecího napětí.

Výhoda stejnosměrného napájení oproti střídavému je necitlivost na parazitní impedance, relativní jednoduchost zapojení zdroje a především vhodnost pro dynamické, rychle se měnící deformace.

Problémem u stejnosměrných můstků je především nestálost nuly stejnosměrných zesilovačů a termoelektrická napětí.

4.6.2 Střídavé měřící obvody

Ke střídavému napájení můstku se nejčastěji používají frekvence střídavého napětí okolo 5kHz až 10kHz. Napájecí napětí je modulováno změnami odporů měřicího můstku (Podobně jako modulační signál nosnou vlnu při amplitudové modulaci). V tomto zapojení musí být kompenzováno zkreslení velikosti napětí signálu (tzv. R-kompenzace) i zkreslení fázovým posunutím sinusového průběhu signálu (tzv. C-kompenzace).

Další nutností u střídavých napájení je použití podstatně vyššího kmitočtu pro kmitočet nosného signálu, než je nejvyšší frekvence ve spektru vstupního měřeného signálu. To zapříčiňuje nemožnost využití pro velice rychlé změny vstupního signálu. S tím úzce souvisí fakt, že s rostoucí frekvencí se zvyšuje vliv parazitních impedancí v celém měřícím řetězci. Řešením tohoto problému je využití synchronní detekce, ovšem za cenu výrazně složitějšího zapojení měřícího obvodu.

4.6.3 Volba měřícího obvodu pro REGULATOR

Navrhovaný REGULATOR bude měřit především rychle se měnící mechanické napětí (důležitá je dynamika), a tak volba střídavého napájení byla vyloučena. Proto bylo zvoleno stejnosměrné napájení.

Ve výsledném návrhu bylo dále zvoleno čtyřvodičové připojení měřícího můstku, z důvodu značné jednoduchosti zapojení a jeho dostačujících parametrů.

4.7 Profesionálně vyráběná zařízení pro měření síly

Na trhu existuje nepřeberné množství tenzometrů a tenzometrických měřících obvodů. Základní rozdělení těchto měřících systému je podle typu napájení tenzometrického můstku a podle počtu aktivních tenzometrů v můstku. Cílem této kapitoly je zhodnotit možnost využití profesionálně vyráběných zařízení pro měření síly s ohledem na jejich parametry, snadnost integrace do navrhovaného systému REGULATORu a cena.

Jelikož je na trhu velký počet výrobců těchto zařízení, uvedu zde jen dvě řešení těchto měřících obvodů. Další výrobky jsou obvykle velice podobné nebo jsou doplněny o možnost připojení více můstků. Některé mají integrováno číslicové zpracování měřeného signálu.

Jedním z předních výrobců na českém trhu je firma Aterm. Ta vyrábí převodníky řady TZA, konkrétně se jedná o převodníky se stejnosměrným napěťovým i proudovým napájením ve verzích 10mA nebo 10V a při výstupních rozsazích 0V až 10V a –10V až 10V.

Zesílení signálu z tenzometrického snímače je realizováno přesným operačním zesilovačem od firmy Analog Devices, který se vyznačuje velmi nízkým teplotním driftem offsetového vstupního napětí (0,5uV/°C) a šířkou frekvenčního pásma až 500kHz. Převodníky jsou standardně dodávány buď jako funkční modul plošného spoje nebo v plastové skříňce na lištu DIN. Na zakázku lze dodat převodník v podstatě s libovolnými parametry, avšak za podstatně větší pořizovací náklady. Od výrobce je obvykle převodník nastaven tak, že základní zesílení měřicího zesilovače je dáno hodnotou rezistoru R_z, který je přiletován na pájecích špičkách. Hodnota rezistoru R_z je obvykle 1kΩ. Trimrem je pak nastavena přesná hodnota zesílení pro jmenovitý signál. Minimální hodnota zesílení je dána vztahem $G = 300/ R_z$, maximální hodnota zesílení je dána vztahem $G = 600/ R_z$. Pro rezistor $R_z = 1k\Omega$ je zesílení v rozmezí 300 až 600. Výstupní zesílený signál je závislý na typu použitého modulu. Nicméně v úvahu přicházejí hodnoty 0V až 10 V, -10V až 10 V a 6V až 12V.

Základní cena tenzometrických modulů TZA je v dnešní době okolo 2200 až 6000 Kč. Další podrobnosti ohledně výrobků této firmy lze nalézt na jejich firemních stránkách.

Dalším uvažovaným profesionálním výrobkem jsou zesilovací moduly od firmy HBM. Firma vyrábí tenzometrické zesilovače typu RM4220, zesilovače řady DF30x a DF31x. Všechny zmíněné moduly využívají stejnosměrného nebo střídavého napájení 2.5, 5V a10V při výstupních rozsazích ±10V, 4 až 20mA a ±20mA. Základní zesílení je nastavitelné od 80 do 8000. Tyto moduly jsou charakteristické velice přesným měřením a oplývají téměř všemi prostředky pro kompenzaci vlivu

teploty, napěťového a teplotního driftu zesilovače a obsahují precizní filtraci šumů z tenzometrických můstků. Nevýhodou těchto měřících modulů je velká pořizovací cena.

Problémem u všech výše zmiňovaných výrobků je, kromě poměrně velké ceny, nemožnost volby úrovně výstupního napětí z tenzometrického můstku. Důvodem, proč

je požadována změna unifikovaných výstupních signálů je, že dopředu není známo v jakých rozsazích se bude pohybovat výstupní napětí můstku.

Jinými slovy je požadováno maximální využití rozsahu tenzometrického můstku při neznalosti vstupního rozsahu deformačních změn. Jediným řešením tohoto problému je možnost nastavení zesílení výstupního napětí můstku, např. softwarovou cestou přímo z MCU. Některé zmíněné moduly sice měli možnost konfigurace zesílení a jiných parametrů přes CAN, avšak jejich pořizovací náklady byly velice vysoké a výrazně tak omezovali výběr. Většina měřících modulů měla možnost nastavení velikosti zesílení výstupního napětí, ale nastavování bylo manuální, pomocí trimru.

Další nevýhodou profesionálních zařízení je užití pevně zvolených unifikovaných typů napájecích úrovní. Tato nevýhoda je důležitá zejména pro správné umístění hodnoty výstupního zesíleného signálu do středu napěťového rozsahu zesilovače AD8555 (Bude vysvětleno dále). Použitý zesilovač potřebuje umístit střed vstupního napětí přibližně na hodnotu +2V, aby bylo možno využit celý rozsah pro oba směry změny deformace.

Výše zmíněné požadavky zapříčinily, že nebylo zvoleno využití profesionálně vyráběných prostředků a byl navržen vlastní měřící obvod s digitálně nastavitelným zesílením výstupního napětí tenzometru.

5 Regulátor hydraulického zatěžovacího zařízení

Celá tato kapitola se věnuje návrhu, fyzickému zhotovení a testování regulátoru hydraulického zatěžovacího zařízení (dále jen REGULATOR). V první podkapitole je diskutován návrh a dekompozice REGULATORu na jednotlivé podsystémy. Z této dekompozice posléze vyplyne blokové schéma REGULATORu.

V následujících podkapitolách jsou vždy nejdříve rozebrány možné návrhy řešení a odůvodněny volby komponent .Poté jsou následně vysvětleny zapojení daného bloku.

Celé zařízení bylo navrhováno v systému OrCAD, a to včetně návrhu desky plošných spojů (dále jen DPS). Některé části zařízení byli simulovány v programu PSpice A/D, který je součástí balíku OrCAD.

Návrh a výběr filtrů byl prováděn s pomocí programu FilterCAD od firmy Linear Technology. Změřené průběhy v podkapitole zabývající se testováním regulátoru byly vytvářeny v prostředí Matlab R2006.

5.1 Rozbor návrhu regulátoru

Rozbor návrhu REGULATORu vychází především z požadavků z kapitoly 2.1. Ten jasně vymezuje funkce a použití daného zařízení. Z uvedených požadavků plyne, že zařízení musí obsahovat tyto bloky:

1) Obvody napájení
2) Obvody zpracování vstupního signálu z tenzometru
3) Obvody řízení servoventilu
4) MCU, AD převodník a komunikační obvody

Středem celého zařízení je mikrokontrolér 56F8367 od firmy Freescale. Celý návrh REGULATORu se bude odvíjet od zapojení s tímto procesorem a následným připojením dalších funkčních bloků. Zařízení bude dále schopno komunikovat s PC přes ladící hardware.

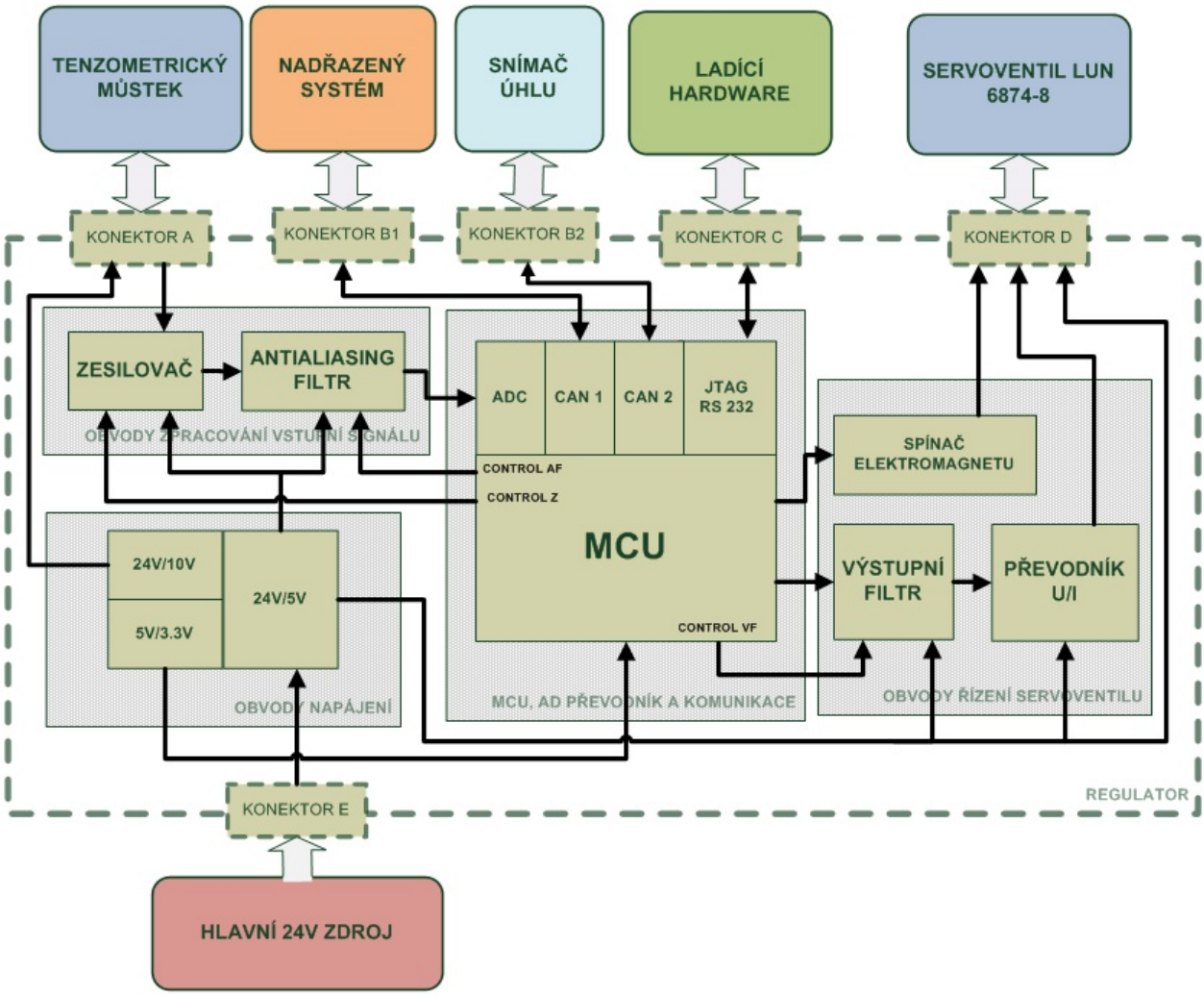
Velice důležitým krokem návrhu je výběr komponent. Ten totiž výrazně pomáhá při umísťování jednotlivých součástek na DPS zařízení. Proto je zde kladen důraz na volbu součástek s co největší integrací na čipu.

Další fáze návrhu zařízení je již konkrétní tvorba a umístění součástek na DPS. Bude se jednat o dvouvrstvou desku plošného spoje, což zvyšuje nejen nároky na vhodné umístění součástek na DPS, ale také větší pravděpodobnost vzniku interferencí mezi jednotlivými částmi zařízení REGULATORu. Proto je vhodné již při návrhu jednotlivých bloků počítat s kvalitní filtrací a lokální stabilizací napájení (blokovací kondenzátory, atd.).

Hned po vysvětlení zapojení a odůvodnění výběru komponent bude vysvětlen návrh DPS. Bude zde shrnuto hlavní blokové rozvržení DPS a rozmístění součástek na desce plošných spojů.

5.2 Blokové schéma REGULATORu

V této podkapitole je uvedeno blokové schéma jednotky REGULATOR a následně popsán význam jednotlivých bloků a stručně uveden účel jejich použití.



Obr. 5.1 - Blokové schéma REGULATORU

Na Obr. 5.1 je uvedeno blokové funkční schéma modulu REGULATOR. Jádrem celého REGULATORu je centrální blok MCU. V něm se nachází mikrokontrolér 56F8367, který je doplněn o podpůrné, komunikační a signalizační obvody. Centrální jednotka je napájena potřebnými napětími z OBVODŮ NAPÁJENÍ. Tato část do všech dalších bloků distribuuje potřebné napájecí úrovně.

Vstupním bodem regulátoru je měřený signál z tenzometrického můstku. Ten je zesilován ve vstupním ZESILOVAČi a následně filtrován přes blok ANTIALIASINGového FILTRu, kde dochází k frekvenčnímu omezení vstupního signálu. Zlomovou frekvenci filtru bude nejspíše nutné měnit, a tak se počítá při návrhu s přivedením řídicího signálu z MCU (signál CONTROL AF). Dále bude potřeba softwarově měnit parametry vstupního zesílení v bloku ZESILOVAČ. Proto je přiveden řídicí signál CONTROL Z.

Výsledný zesílený signál je zpracováván v bloku MCU, kde dochází k jeho převodu na číslicový signál pomocí AD převodníku mikrokontroléru. Výstupním blokem jsou OBVODY ŘÍZENÍ SERVOVETILU. Ten obsahuje převodník PWM na proud. Tímto proudem dochází k otvírání servoventilu LUN 6874-8. Celý převodník se skládá z bloků VÝSTUPNÍho FILTRU a PŘEVODNÍKu napětí-proud. Zlomovou frekvenci VÝSTUPNÍho FILTRu bude potřeba měnit, a tak je přiveden taktovací signál CONTROL VF.

Pro otevření servoventilu je potřena mít možnost ovládat elektromagnet hydraulického rozvaděče. Tuto funkci zastává blok SPÍNAČe ELEKTROMAGNETU.

Styk s vnějšími zařízeními je zprostředkován přes konektory A, B1, B2, C a D. Na konektor E je připojen primární zdroj 24V napájení REGULATORu. KONEKTOR A je konektor k tenzometrickému můstku, přes který je můstek zároveň napájen. KONEKTOR D je výstupní konektor k servoventilu a k řízení elektromagnetu hydraulického rozvaděče servobloku LUN 6874-8.

REGULATOR bude schopen komunikovat s nadřazeným řídicím systémem přes CANopen, proto je vyvedena CAN komunikace přes KONEKTOR B1. Přes CAN 2 pak bude REGULATOR přijímat informaci z úhlového senzoru. K ladícím účelům je nutné vyvést také sériovou komunikaci a JTAG rozhranní. Tuto funkci zastává KONEKTOR C.

5.3 Obvody napájení regulátoru

V této podkapitole bude vysvětlen návrh a následně implementace napájecí soustavy REGULATORu. Bude zde odůvodněn výběr komponent a popsáno konkrétní řešení jednotlivých zapojení.

5.3.1 Analýza a návrh obvodů napájení

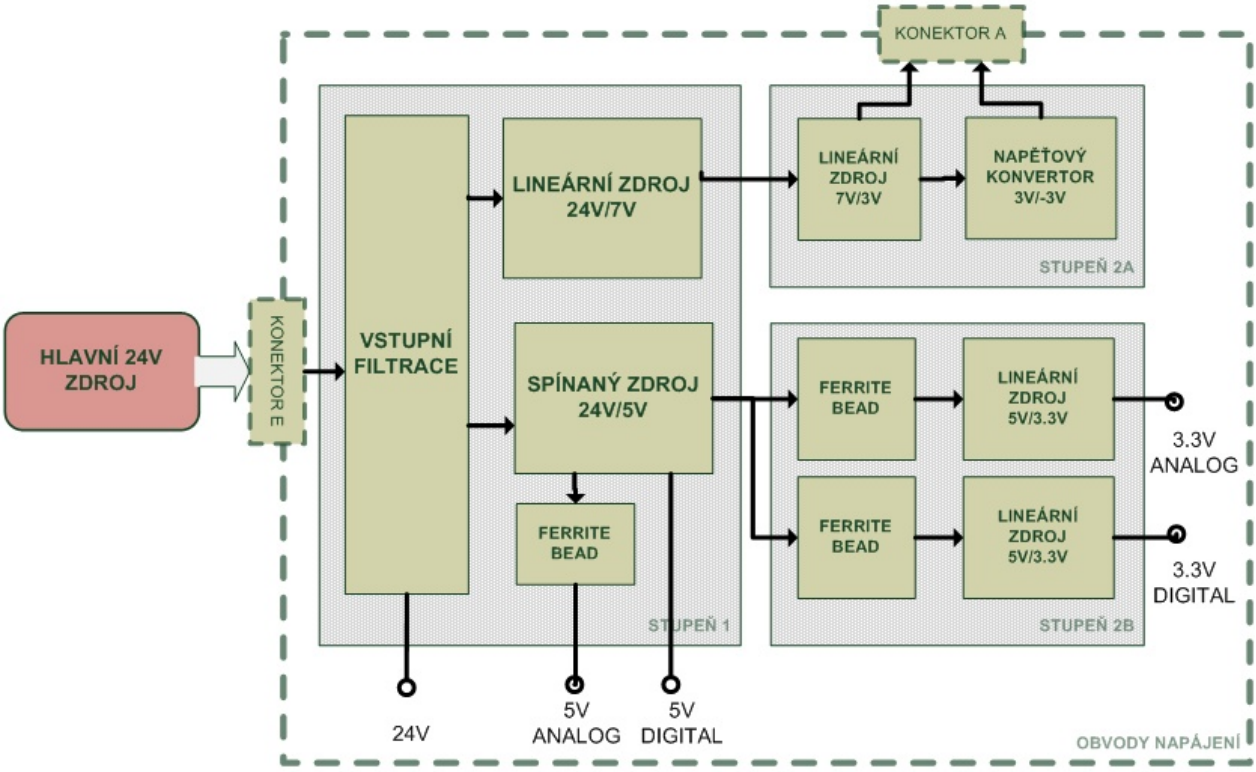
Napájení je jednou z nejdůležitějších částí celého zařízení. Je kladen důraz na kvalitní stabilizaci napěťových úrovní pro jednotlivé subsystémy REGULATORu, dobrou filtraci šumů a zároveň zajištění lokální dodávky energie pro spínací a digitální součástky pro případ nárazových špičkových odběrů.

Pro zajištění všech napájecích úrovní jednotlivých podsystémů je potřeba realizovat ze vstupních 24V tyto napájecí úrovně:

Jmenovité napětí [V]	Max. odběr [mA]	Typ zdroje
5V	600	Spínaný
7V	20	Lineární
-3V	10	Konvertor
3.3V	300	Lineární
3.3V	400	Lineární

Tab. 5.1 – Realizované napájecí úrovně regulátoru

Návrh napájecí soustavy je zobrazen na Obr. 5.2. Z něho lze pozorovat propojení jednotlivých napájecích bloků a postupné vytvoření požadovaných napájecích úrovní.



Obr. 5.2 - Blokové schéma obvodů napájení REGULATORu

Jako hlavní zdroj pro napájení REGULATORu bude použit 24V napěťový zdroj s dostatečným výkonem. Předpokládá se také, že tento zdroj bude stabilizovaný.

Nicméně pro jistotu je vhodné jeho napětí filtrovat. Proto je na vstupu napájecí soustavy blok VSTUPNÍ FILTRACE. Na tento blok navazuje 1.stupeň napájení. Ten vytvoří prvotních 5V pro další napájecí okruhy.

V tomto prvním stupni je potřeba zajistit nejen dostatečný výkon zdroje, ale především jeho minimální zahřívání a minimalizaci velikosti výsledného zapojení. Proto zde bylo zvoleno řešení pomocí spínaného zdroje. Bylo zvažováno použití standardního návrhu s externí indukčností a spínací logikou a nebo využití plně integrované verze spínaného zdroje. S ohledem na požadavek výsledné velikosti DPS bylo zvoleno řešení plně integrované. Nevýhodou sice byla vyšší cena, avšak menší velikost součástky a hlavně jednoduchost zapojení převýšily neintegrovaný návrh. Další mírnou nevýhodou je poměrně malý výběr integrovaných komponent na trhu.

Dále bude potřeba vytvořit 5V a 3.3V napájení pro analogovou část REGULATORu. Tyto potřebné napájecí úrovně vytváří spínaný 5V zdroj a lineární 3.3V stabilizátor. Jelikož je 5V zdroj spínaného typu, je nutné zajistit oddělení zemí mezi analogovou částí a spínanými obvody (zajišťuje blok FERRITE BEAD). Důvodem je odstranění šumů a zamezení vzniku interferencí mezi jednotlivými vysokofrekvenčními a nízkofrekvenčními obvody.

Tento analogový okruh bude distribuovat energii do OBVODŮ ZPRACOVÁNÍ VSTUPNÍHO SIGNÁLU a do obvodů AD převodníku.

Další napájecí okruh musí být vybudován pro spínací a digitální logiku. Zde je potřeba realizovat 3.3V a 5V napájení s dostatečným počtem blokovacích kondenzátorů. Do tohoto napájecího okruhu patří blok MCU, OBVODY ŘÍZENÍ SERVOVENTILU a KOMUNIKACE.

Dalším požadavkem je vytvoření kvalitního stabilizovaného zdroje napětí pro tenzometrický měřící můstek. Jeho jmenovitá hodnota musí být 10V. V první fázi vývoje se počítalo pouze s využitím 10V precizního zdroje napětí, ovšem při budoucím testování zařízení se ukázalo, že bude potřeba generovat záporné napětí pro posun výstupního napětí můstku do středu vstupního rozsahu zesilovače AD8555. V této verzi zařízení je tak na desce REGULATORu použit 7V stabilizovaný napěťový zdroj, přičemž další úprava napájení pro tenzometrický můstek probíhá na přídavné desce připojené jako mezičlánek mezi konektor tenzometrického můstku a samotný můstek. Tento přídavný modul (dále jen NEGsource) upravuje napájení můstku tak, aby rovnovážná poloha můstku znamenala posun jeho výstupního napětí přibližně do +2V. Pro tyto účely se využívá napěťového konvertotu +3/-3V. Toto napájení je následně vyvedeno pro tenzometrický můstek na KONEKTOR A.

5.3.2 Implementace obvodů napájení

VSTUPNÍ FILTRACE napájení byla realizována tantalovými, keramickým a elektrolytickými kondenzátory.

Základem zapojení prvního stupně 5V spínaného zdroje je integrovaný obvod LM2825. Jedná se 1A DC-DC konvertor, který vytváří ze vstupních 24V stabilizovaných 5V.

V pouzdře součástky je již integrována veškerá ochranná i spínací logika včetně integrované indukčnosti. Obvod LM2825 má minimální nároky na externí součástky a oplývá širokým vstupním rozsahem napětí (až 40V).

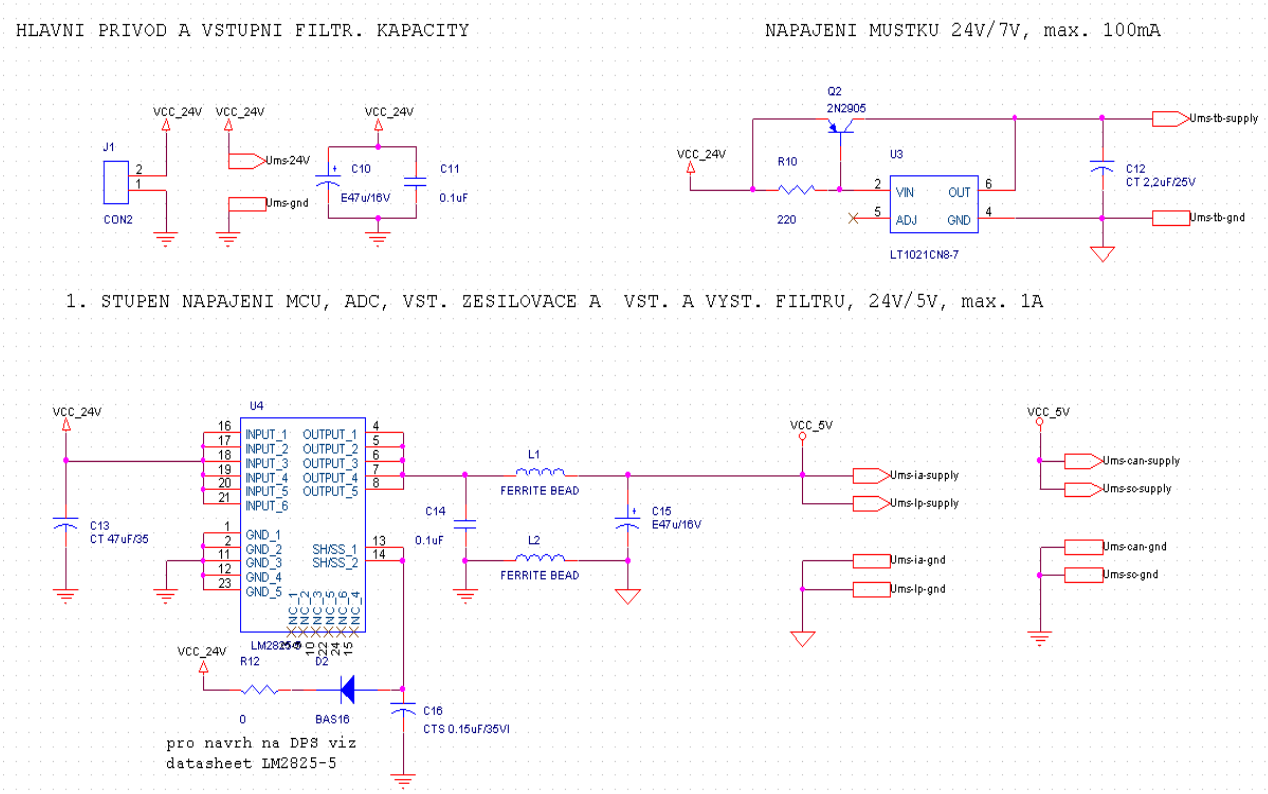
Konkrétní zapojení lze nalézt na Obr. 5.3. V zapojení spínaného zdroje není využita funkce shutdown pro tzv. soft start. Vstupní napětí 24V je filtrováno elektrolytickými a keramickými kondenzátory C10 a C11, a poté přímo napojeno na vstup spínaného zdroje U4 (LM2825). Na výstupu U4 je generováno stabilizované napětí 5V, které je z důvodu možnosti vzniku rušení odfiltrováno LC filtrem L1, L2, C14 a C15. Poté je 5V distribuováno do druhého stupně (Obr. 5.2 blok 2A a 2B) napájecích obvodů. Toto 5V napájení déle slouží k napájení vstupního zesilovače AD8555 (U1) a SCF dolnopropustných filtrů U2 a U12.

Pro napájení tenzometrického snímače je použito zapojení s precizní referencí napětí LT1021CN8-7 (U3). Ta na svém výstupu vytváří stabilizované napětí s tolerancí ±0.05%. V prvotní fázi byla použita 10V reference, avšak z důvodu nastavení prac. bodu pro AD8555 (U1) bylo nutné snížit tuto hodnotu na 7V a použít přídavného zapojení se zdrojem záporného napětí –3V, čímž jsme se dostali do středu prac. rozsahu U1. Tento přídavný zdroj záporného napětí bude popsán v kapitole 5.3.3.

Obvod LT1021CN8-7 nepoužívá pro nastavení výstupního napětí ve své vnitřní struktuře odporový dělič, což se projevuje dlouhodobou stabilitou výstupního napětí. Jelikož samotný obvod dokáže dodávat pouze 10mA při 7V, je nutné použít zapojení s „boost“ tranzistorem Q2. Ten je řízen v závislosti na vstupním proudu do U3 (čím je vyšší proud do LT1021, tím vyšší úbytek je na snímacím rezistoru R10, a tím víc se otvírá samotný tranzistor 2N2905). Na výstupu U3, pak může být odebírán proud až 100mA.

Při testech se projevilo nadměrné zahřívání 220Ω snímacího rezistoru R10, a proto se před samotné zapojení s referencí LT1021 vřadil výkonový 5W rezistor 600Ω, který snížil napětí 24V přibližně na polovinu. Tím odvedl podstatnou část výkonu ve formě tepelný ztrát, následně se snížila výkonová ztráta na snímacím rezistoru R10 a současně nedocházelo k nadměrnému vyzařování tepla do okolí přes obvod U3.

Toto 7V a –3V napětí bylo poté vyvedeno na konektor tenzometru.

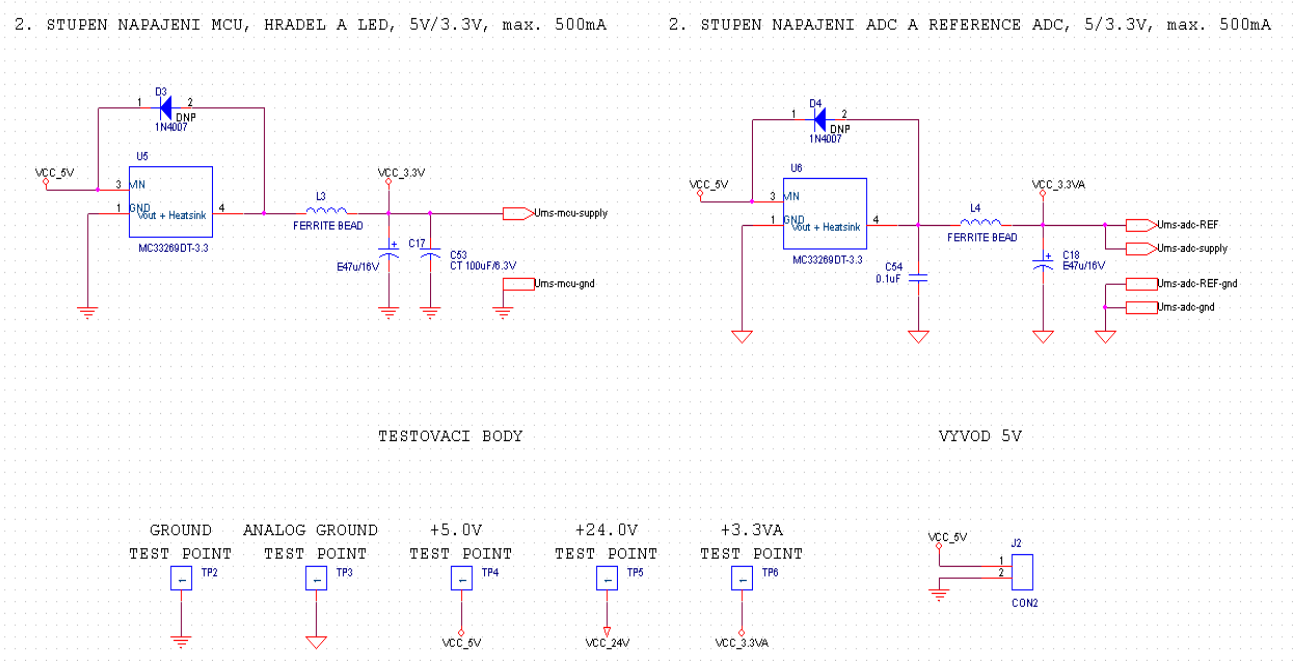


Obr. 5.3 - Schéma prvního stupně napájení REGULATORu

Pro napájení MCU a AD převodníku slouží integrované stabilizátory napětí MC33269DT-3.3 (U5 a U6), které vytvářejí 3.3V. Jedná se o 800mA nízkoodběrový stabilizovaný zdroj napětí s jmenovitou hodnotou napětí 3.3V. Má integrovánu teplotní ochranu přímo na čipu a mezi jeho výhody patří malá velikost pouzdra. Další informace o tomto obvodu lze nalézt v [22].

V zapojení s MC33269DT-3.3 jsou dále přidány ochranné diody D3 a D4 a na výstup U5 a U6 zapojeny LC filtry L3, L4 a C17, C18.

Při testech však bylo zjištěno, že použité indukčnosti L3 a L4 negativně působí na samotný stabilizátor a narušují jeho činnost. Proto byli odstraněny a nahrazeny moderními FERRITE BEAD součáskami. Indukčnosti L1 a L2, které odrušují a oddělují země byli také nahrazeny FERRITE BEAD komponenty. Detaily zapojení 2. stupně lze nalézt na Obr. 5.4.



Obr. 5.4 - Schéma druhého stupně napájecího okruhu REGULATORu

Dále bylo potřeba vytvořit napájení pro výstupní převodník PWM na proud. Ten se skládá ze součástek vyžadující 5V a 24V napájení. Obě tyto úrovně již byly vytvořeny v prvním stupni, a tak po dostatečné filtraci a oddělení zemí se využilo právě těchto již vytvořených napětí.

5.3.3 Implementace zdroje záporného napětí

Pro nastavení vstupního středového bodu zesilovače AD8555 bylo nutné využít přídavného zapojení se zdrojem záporného napětí –3V. Konkrétní zapojení je na Obr. 5.5.

Jádrem tohoto zapojení je obvod LMC7660IM (U1), což je CMOS konvertor kladného napětí na jemu odpovídající záporné napětí. Tento obvod má v sobě zaintegrovánu veškerou spínací logiku a ke své činnosti potřebuje jen tři externí kapacitory C1, C3 a C4. Důležitou vlastností je 97% účinnost převodu vstupního napětí na jemu odpovídající záporné napětí.

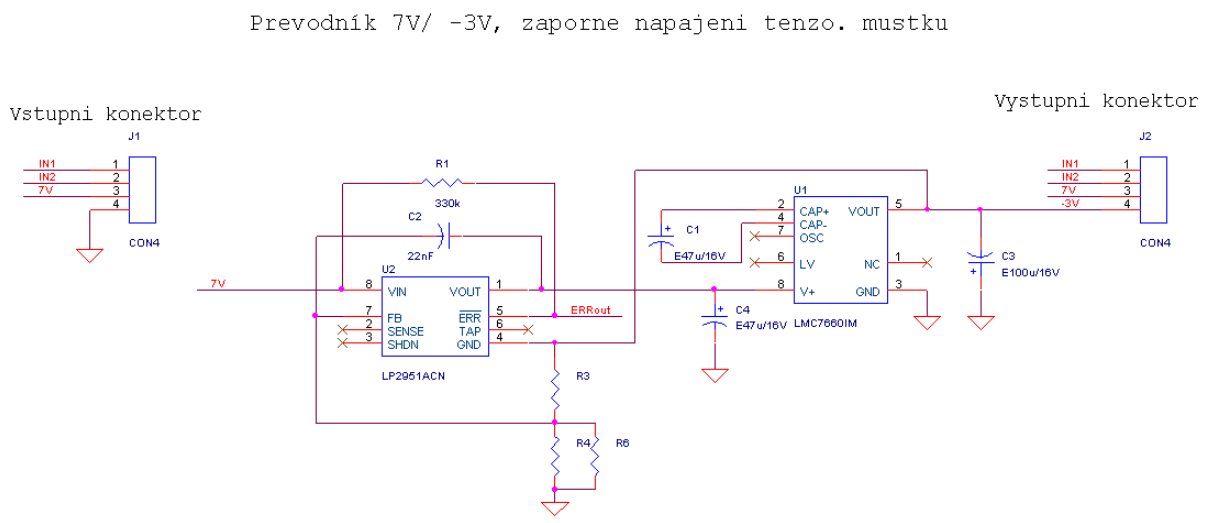
Dále je využito obvodu LP2951ACN (U2), který vytváří ze vstupních 7V potřebné kladné napětí 3V. Tento obvod je charakteristický nízkým odběrem, vysokou přesností a stabilitou výstupního napětí. Výstupní napětí z LP2951ACN je poté překonvertováno obvodem U1 na odpovídajících –3V a slouží jako záporný pól tenzometrického můstku.

Zapojení celého zdroje záporného napětí bylo převzato z oficiálního datasheetu obvodu LMC7660IM. Detaily ohledně obou obvodů a zapojení lze nalézt v [28] a [29].

Jelikož se na tento problém posunu pracovního bodu přišlo až při testech zařízení, je tento modul fyzicky připojen jako adaptér na původní konektor

tenzometrického můstku, kde vytváří z původních 0V a +7V nových –3 a +7V se středem můstku okolo +2V.

Tento adaptér je fyzicky samostatný modul s vlastní DPS. DPS tohoto zdroje lze nalézt v Příloha B - na .Obr. B. 9 a Obr. B. 10 .



Obr. 5.5 - Schéma zapojení zdroje záporného napájení

Návrh DPS tohoto externího přídavného modulu bude popsán v kapitole 5.7 , kde je primárně popsána DPS REGULATORu

5.4 Obvody zpracování vstupního signálu

V následujících podkapitolách je rozebrán návrh a konkrétní řešení obvodů zpracovávajících vstupní měřený signál z tenzometru.

5.4.1 Analýza a návrh obvodů zpracování vstupního signálu

V této podkapitole je popsán ideový návrh vstupního měřícího obvodu a vstupního filtru. Z blokového schématu REGULATOR na Obr. 5.1. vyplývá, že hned za vstupním KONEKTORem A tenzometrického můstku dochází k zesilování změřeného signálu.

Již v kapitole 4.7 došlo k úvaze nad využitím profesionálně vyráběných zesilovačů tenzometrického signálu. Jelikož byla tato možnost vyloučena, byl navržen vlastní měřící obvod.

Na začátku je dobré říci, že obecně se diferenční napětí měří pomocí přístrojových zesilovačů, ty jsou totiž vhodné k zesilování malých rozdílových napětí s velkou souhlasnou napěťovou složkou. Obecně se analogový přístrojový zesilovač

skládá ze dvou stupňů. První stupeň je tvořen dvěma zrcadlově zapojenýma operačníma zesilovačema v invertujícím zapojení. Následně je diferenční signál zesílen koncovým operačním zesilovačem, který tvoří druhý stupeň. Celkové rozdílové zesílení je dáno součinem rozdílového zesílení vstupních zesilovačů a výstupního zesilovače.

V některých případech se využívá speciálních zapojení pro potlačení vlivu souhlasného napětí a svodu přívodu. Pro tyto účely se používá zapojení Guarding nebo Bootstrapping.

V zapojení REGULATORu však těchto metod nebylo využito, protože metoda Guarding potřebuje speciálně upravený přístrojový zesilovač a metoda bootstrapping užití měniče napájecího napětí. Další informace ohledně přístrojových zesilovačů lze nalézt v literatuře [1] a [4].

Opět je možno na trhu vybrat nepřeberné množství různých typů přístrojových zesilovačů. Proto tento výběr byl zúžen na obvody s těmito parametry:

1) Zesílení od 100 do 1000
2) Minimální rozměry
3) Jednoduchost zapojení
4) 5V napájení
5) Číslicové řízení zesílení
6) Minimální vstupní napěťový offset

Těmto požadavkům vyhovoval obvod AD8555 od firmy Analog device. Jedná se o automaticky nulovaný precizní přístrojový zesilovač s digitálním nastavením výsledného zesílení a výstupního offsetu. Je přímo určen pro aplikace s tenzometrickými můstky a dovoluje zesílit vstupní signál od 70 do 1280. Velkou výhodou je také minimální velikost pouzdra (4mm x 4mm). Další informace lze nalézt v [24].

Po prvotním zesílení signálu dochází k filtraci měřeného signálu. Tuto funkce zastává ANTIALIASINGový FILTR. Zde z požadavků z kapitoly 2.1 jasně nevyznívá, jaký rozsah frekvencí bude mít vstupní měřený signál. To znamená, že nelze předem říci jaká zlomová frekvence bude ideální.

V případě rychlých dynamických dějů lze předpokládat, že zlomová frekvence bude muset být okolo desítek kHz, ale je možné že i tento odhad bude příliš vysoký.

Proto bylo nutné vybrat takový vstupní dolnopropustný filtr, aby bylo možno jeho zlomovou frekvenci měnit v obou směrech. V ideálním případě softwarově z MCU.

Dále je potřeba se zamyslet na tvarem a sklonem amplitudové frekvenční charakteristiky použitého filtru. Je potřeba, aby okolo zlomové frekvence nebyla příliš velká rezonance a přitom, aby její sklon byl dostatečně strmý. Ideální je v tomto případě využití Butterworthovy dolní propusti.

Výsledným obvodem, který by tyto, výše zmíněné požadavky splňoval, je obvod LTC1062, což je filtr typu dolní propust 5. řádu, operující do 20kHz s možností napájení nesymetrickými 5V. Obvod LTC1062 je filtr se spínanými kapacitory s možností externího taktování. Toho je právě využito, pro snadné přenastavení zlomové frekvence přímo z MCU. Jeho výběr byl také upřednostněn z důvodu snadné dostupnosti na trhu a

možnosti využítí návrhového prostředí FilterCad, který určil všechny potřebné externí součástky. Informace o tomto programu a filtru lze nalézt v [23] a [25].

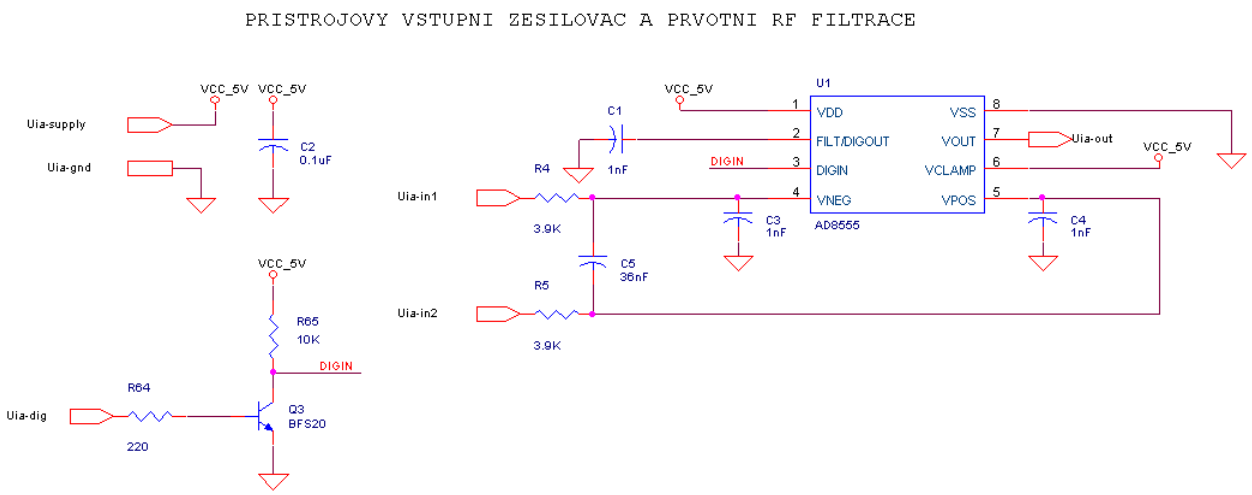
5.4.2 Implementace obvodů zpracování vstupního signálu

V této části je popsáno zapojení vstupního ZESILOVAČe a ANTIALIASINGového FILTRU vstupního měřícího obvodu. Jádrem zapojení vstupního zesilovače je integrovaný přístrojový zesilovač AD8555. Vnitřně používá zapojení s automatickým nulováním vstupního offsetu zesilovače.

Konkrétní obvodové řešení lze nalézt na Obr. 5.6. V něm je AD8555 (U1) použit v zapojení s 5V napájením a s omezením na výstupu na 5V (Zapojení VCLAMP na 5V). Před jeho vstupní piny NEG a POS je umístěn RFI filtr R4, R5 a C5, z důvodu prvotní filtrace vstupního signálu.

Vstupní rozsah napětí zesilovače je od 0.3V do 4.7V. Proto je potřeba umístit výstup z tenzometrického můstku přibližně do středu tohoto pásma. Díky zapojení s napěťovým konvertorem LMC7660IM bylo dosaženo umístění nerozváženého můstku do hodnoty přibližně +2,5V. Přičemž jmenovité napájení tenzometrického můstku je 10V DC (-3V až +7V).

V důsledku nutnosti programování AD8555 bylo potřeba propojit programovací pin zesilovače na výstupní pin MCU. Jelikož mikrokontroler 56F8367 pracuje interně s 3.3V logikou a i jeho výstupní obvody pracují na úrovni 3.3V, je mezi pin mikrokontroléru a programovací pin AD8555 vřazen převodník napěťových úrovní. Toto jednoduché invertující zapojeni s tranzistorem BFS20 (Q3), pak převádí napěťové úrovně z 0V na 5V a z 3.3V na 0V. Tranzistor pracuje ve spínacím režimu a je otvírán proudem do báze přes odpor R64.



Obr. 5.6 - Schéma zapojení vstupního zesilovače

Na výstup U1 je připojena dolní propust 5. řádu. Základem je obvod LTC1062CN8 (U2), který vytváří filtr pro vysokofrekvenční šumy obsažené ve vstupním signálu z tenzometru. Obvod U2 je napájen 5V a je použito doporučené zapojení z programu FilterCAD od společnosti Linear Technology.

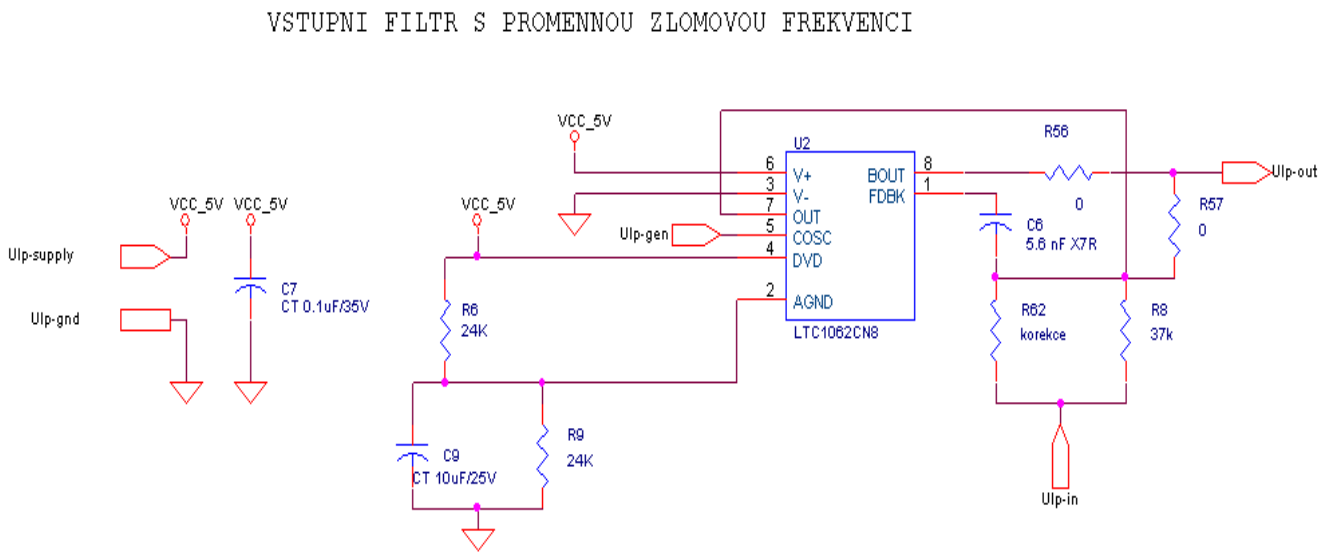
V zapojení se nevyužívá interních hodin LTC1062, nýbrž externích generovaných přímo z mikrokontroleru, což dovoluje nastavit programově požadovanou zlomovou frekvenci filtru.

Na DPS se pak propojovacím rezistorem R56 nebo R57 volí zapojení bez nebo s výstupním bufferem (zapojení DC accuracy).

Napájení obvodu LTC1062 je blokováno keramickým kondenzátorem C7.

Filtrovaný signál následně vede přímo na vstupní obvody AD převodníku. Na Obr. 5.7 je znázorněno schéma filtru s obvodem LTC1062. Detailnější informace lze nalézt v [25].

Pozn.: Z důvodu nekompatibilních napěťových úrovní antialiasingového filtru U2 (a také výstupního filtru U12) a mikrokontroleru 56F8367 se nevyužívá externích hodin z mikrokontroleru ale interních hodin filtru. V budoucím návrhu bude tento problém odstraněn díky vhodným napěťovým převodníkům.



Obr. 5.7 - Schéma zapojení vstupního antialiasingového filtru

5.5 Obvody řízení servoventilu

V této podkapitole bude diskutován návrh obvodů pro řízení servoventilu LUN 6874-8. Nejdříve dojde k rozboru možných řešení, a poté k popisu konkrétní obvodové implementace.

5.5.1 Analýza a návrh obvodů pro řízení servoventilu

Tato část se zabývá návrhem výstupního akčního členu, který řídí servoventil LUN 6874-8. Nejsnazší cesta, jak řídit výstupní servoventil v celém svém rozsahu, je navrhnout převodník PWM na proud.

Důvodem je snadné vytvoření PWM signálu přímo v mikrokontroléru. Ten má totiž na svém čipu realizován PWM modulátor. Z požadavků v 2.1 je zadáno řízení servoventilu v rozsahu ± 10mA při jmenovitém odporu cívek 1kΩ. Aby bylo možno vůbec servoventil řídit, musí sepnout elektromagnet hydraulického rozvaděče.

V následujících odstavcích této podkapitoly bude diskutován návrh převodníku PWM na proud a v závěrečných odstavcích spínač elektromagnetu hydraulického rozvaděče.

Převodník PWM-proud lze rozdělit na dvě části, první je převod PWM na napětí a další částí je převod napětí na proud. Nejdříve zde bude probrána realizace převodníku PWM na napětí, s teoretickými úvahami nad možností využití dolnofrekvenční propustí.

Ve své podstatě lze šířkově modulovaný signál rozložit na nekonečnou Furrierovu řadu:

$$sig_{PWM}(t) = A_i\left(\frac{t_{\min}}{T_i} - \frac{t_{\max}}{T_i}\right)\sin(\Omega t) + \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{1}{kp}J_m(kw_i t_{\max})\sin[(kw_i - n\Omega)t - kw_i t_{\max}] - \sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{kp}\sin(kw_i t - t_{\min}) \quad (4)$$

Kde:

t_{min}	- minimální šířka impulzu
t_{max}	- maximální šířka impulzu
T_i	- perioda PWM signálu
w_i	- úhlová frekvence sledů impulzů ($w_i = 2p/ T_i$)
W	- úhlová frekvence řídícího signálu
J_m	- Besselova funkce *m*-tého řádu

Z předchozí rovnice (4) jasně plyne, že spektrum PWM signálu obsahuje stejnosměrnou složku a složky s frekvencemi f_{wi} s f_W , složky s bočními frekvencemi ($k\ f_{wi} \pm f_W$) a složky s bočními frekvencemi ($k\ f_{wi} \pm nf_W$). (pro k a $n \in$ celá čísla) .

Přičemž amplitudy postranních složek velice prudce klesají, a tak většina výkonu je soustředěna do menšího pásma a lze ho orientačně vypočítat podle vzorce (5).

$$\Delta Fs \approx \frac{2}{t} \qquad \text{pro (95\% výkonu)} \qquad (5)$$

kde: ΔFs - šířka pásma, které zaujímají modulované impulzy

τ - šířka impulzu

Z výše uvedených faktů přímo plyne demodulace řídícího napětí pomocí dolnofrekvenční propusti vyššího řádu. Vyšší řád je volen z důvodu spolehlivého potlačení frekvencí vyšších, než je zlomová frekvence filtru. Na výstupu filtru tak dostaneme nízkofrekvenční signál s výrazně potlačenými vysokými frekvencemi. Další informace ohledně PWM modulaci a PWM signálech lze nalézt v [27].

Tím je vyřešena otázka výběru obvodu pro převod PWM na napětí . Opět je na trhu velmi široká nabídka dolnofrekvenčních filtrů. Jako vhodné řešení byla vybrána dolní propust 5. řádu typu Butterworth. Tyto parametry splňuje opět již použitý obvod LTC1062, který byl použit již na vstupním měřícím obvodě. Popis tohoto obvodu lze nalézt v [25] nebo v kapitole 5.3.2.

Další částí převodníku PWM-proud je převodník napětí na proud. Zde je možno použít několik druhů zapojení s operačními zesilovači, a tak podrobnosti ohledně konkrétního zapojení budou uvedeny až v implementační kapitole 5.5.2.

Aby bylo možno servoventil řídit výstupním proudem, musí být jeho funkce aktivována pomocí přivedení elektrického napětí na elektromagnet hydraulického rozvaděče. Tím dojde k povolení průtoku tlakové kapaliny. Nutností je tedy do návrhu zařízení implementovat spínací prvek, který potřebnou funkci realizuje. Pro tuto funkce plně postačuje výkonový polovodičový spínač s ochranou diodou proti napěťovým špičkám.

5.5.2 Implementace obvodů řízení servoventilu

V této části bude popsána implementace výstupního akční člen, který řídí servoventil LUN 6874-8.

Celé zapojení je zobrazeno v Příloha A - na Obr. A. 9 a dá se rozdělit na dvě části. Zaprvé na část zajišťující převod šířkově modulovaného signálu na stejnosměrné napětí a zadruhé na část převádějící stejnosměrné napětí na výstupní proud.

Jako převodník napětí-proud zde bylo použito známé schéma, primárně určené pro obousměrné řízení stejnosměrných motorů s dvěma výkonovými operačními zesilovači L2722 (U13A a U13B). Toto zapojení bylo upraveno, tak aby výstupní hodnota proudu byla ± 10mA.

Jedná se o zrcadlové zpětnovazební zapojení. Tento Integrovaný výkonový operačním zesilovač L2722 je přímo navržen pro indukční a motorové aplikace středního výkonu s maximálním odběrem do 1A.

Z provedených měření se zjistilo, že výstupní hodnota za filtrem se bude v závislosti na střídě PWM signálu měnit v rozsahu 1,59V až 4,12V při nastavené zlomové frekvenci filtru na 5kHz.

Z datasheetu L2722 bylo převzato schéma pro obousměrné řízení motorů a hodnoty externích součástek upraveny tak, aby vstupní napětí 2,85V odpovídalo nulovému výstupnímu proudu, tedy aby výstupní rozdílové napětí operačních zesilovačů bylo při takovéto vstupní hodnotě 0V.

Krajní hodnoty vstupního napětí 1,59V a 4,12V odpovídají výstupním proudům -11mA a +11mA.

Určitým citlivým místem pro zajištění správného výstupního proudu je dělič R37 a R39, který nastavuje střed operačního zesilovače na 12V. V případě, že by docházelo ke značnému kolísání napájecího napětí 24V, mohlo by to způsobit pohyb výstupního proudu. Při softwarových simulacích v programu PSpice se tato nevýhoda zapojení jevila zanedbatelná. Výsledky simulace včetně grafů simulace lze nalézt v kapitole 5.5.3.V zapojení nebylo použito externích ochranných diod na výstupech operačních zesilovačů, protože tyto diody firma Thomson umístila již přímo do čipu L2722.

5.5.3 Simulace výstupního převodníku napětí-proud

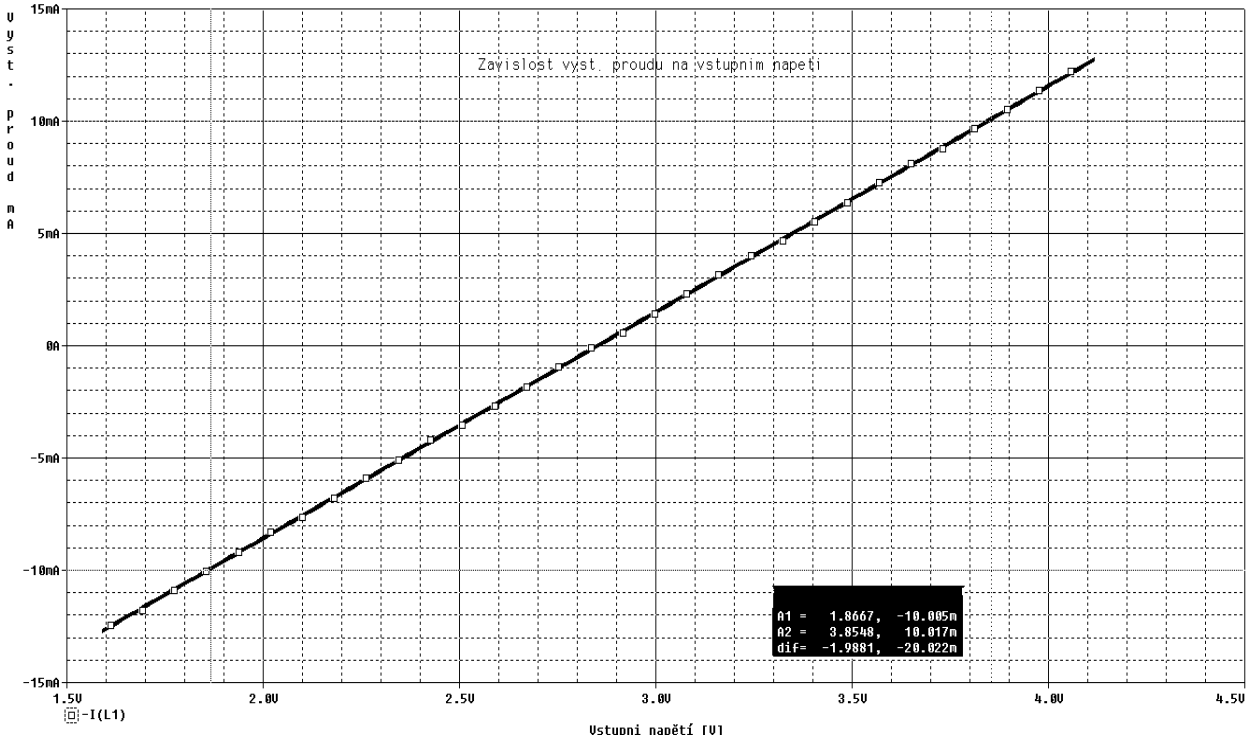
Při vývoji převodníku napětí-proud s operačním zesilovačem L2722 bylo využito počítačové simulace pomocí prostředí OrCAD Capture a Pspice. V prostředí Capture byl nejdříve vytvořen model převodníku.

Poté byla simulována činnost převodníku v požadovaném pracovním rozsahu vstupního napětí. Nejdříve byla provedena simulace Monte Carlo, při které došlo k opakované simulaci s náhodným nastavováním parametrů součástek.

Principiálně funguje simulační metoda Monte Carlo tak, že provede první analýzu s nominálními hodnotami součástek a při následujících iteracích již určí hodnoty náhodně, přičemž jsou měněny všechny součástky u nichž je zadáno toleranční pole. Při simulaci bylo vždy ke všem prvkům nastaveno jejich toleranční pole udávané výrobcem.

Díky této metodě bylo zjištěno, že tolerance součástek neměla na změnu pracovních bodů zesilovačů téměř žádný vliv a nebylo možné ani s pomocí lupy nalézt změnu oproti ideálním hodnotám. Tedy statická převodní charakteristika převodníku byla téměř ideální a odpovídala požadovaným hodnotám.

Další metodou, která měla zjistit možnost vzniku chyby výstupní hodnoty proudu byla DC sweep simulace. Zde se v závislosti na změně napájecího napětí (možné reálné kolísání v hlavním zdroji 24V) posunovala výstupní statická charakteristika převodníku. Napájecí napětí bylo simulováno v rozmezí 22V až 26V. Z výsledné charakteristiky uvedené na Obr. 5.8 lze pozorovat, že se výstupní hodnota proudu téměř nepohybuje a drží se v požadovaných mezích. Při detailnějším pohledu je při konstantním vstupním napětí, rozkmit hodnot výstupního proudu okolo 160µA a je tedy zanedbatelný. Detail této simulace lze nalézt v Příloha C - na Obr. C. 2. V téže příloze lze nalézt simulační schéma se zapojením potřeným součástek.



Obr. 5.8 - Graf závislosti výst. proudu na vst. napětí převodníku – výsledek simulace

5.6 Centrální část regulátoru a komunikační obvody

5.6.1 Analýza centrální části regulátoru

Hlavní částí regulátoru je blok MCU. Zde je z požadavků v 2.1 vyžadováno využití mikrokontroléru MC56F8367. Celá centrální část tak víceméně souvisí se zapojením tohoto mikrokontroléru, a tak konkrétní popis zapojení bude uveden až v implementační části v podkapitole 5.6.2.

Sekce zpracování vstupního signálu z tenzometru, pouze upravuje signál na požadovanou úroveň. Tento signál je poté vzorkován AD převodníkem mikrokontroléru a informace získávána z něho je následně vyhodnocena. Hlavní mikrokontrolér mimoto řídí SPÍNAČ ELEKTROMAGNETU hydraulického rozvaděče servobloku LUN6847-8 a zajišťuje komunikaci přes CAN a ser. linku. Mikrokontrolér lze programovat přes rozhranní JTAG, což musí podporovat i výsledný návrh zařízení.

Protože je výše zmíněný mikrokontrolér výpočetním jádrem celého regulátoru a bude se v něm odehrávat celý regulační zákon, včetně zajištění komunikace s vnějším okolím, bude zde stručně uvedena struktura tohoto mikrokontroléru. Detailnější informace ohledně tohoto sofistikovaného obvodu lze nalézt v [30], [31] a na oficiálních stránkách firmy Freescale.

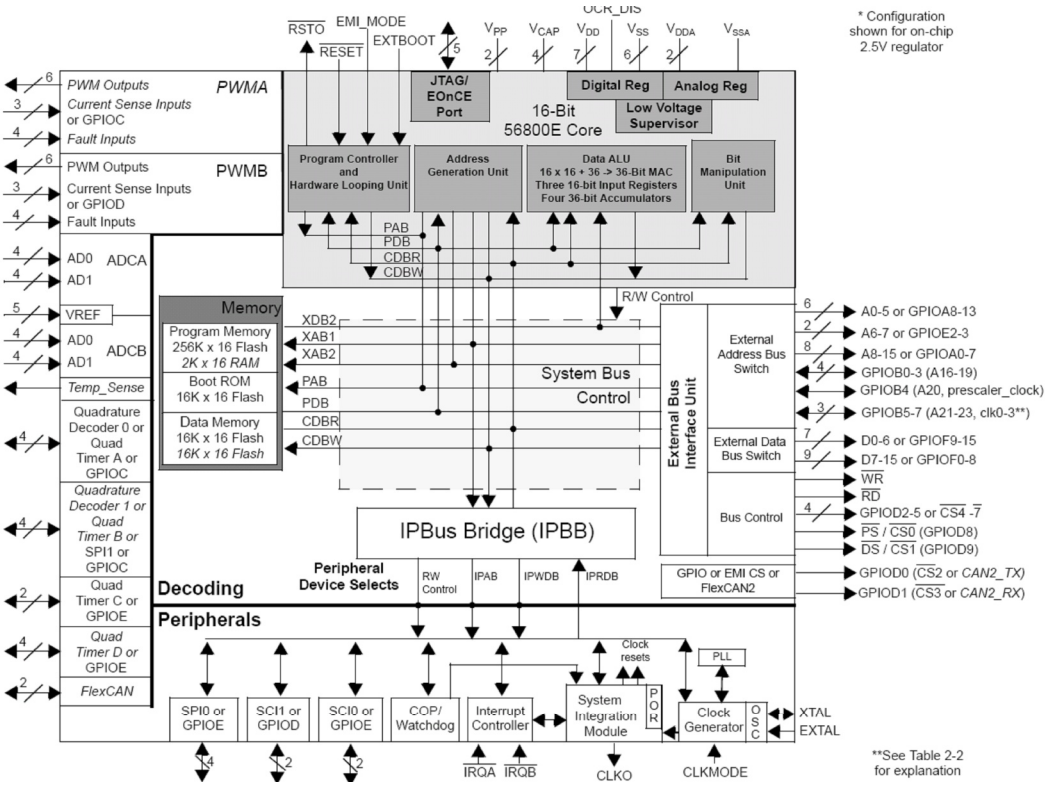
Vnitřní struktura 56F8367 je zobrazena na Obr. 5.9.

Obecná hlavní výhoda DSP mikrokontrolérů oproti jiným druhům mikrokontrolérů je vysoký výpočetní výkon pro operace zpracování signálů v reálném čase. Obvod 56F8367 obsahuje velké množství vstupně-výstupních periferií a značné množství časovačů/čítačů, paměti a další podpůrných integrovaných obvodů. Další informace ohledně programování a užití signálových procesorů lze nalézt v [6] a [32].

Oficiálně je mikrokontrolér 56F8367 uváděn jako 16bitový obvod, nicméně 16bitové zařazení je v tomto případě poněkud nepřesné, neboť jeho jádro dovede zpracovávat i 32bitová data a má vnitřní 32bitovou datovou sběrnici. Jedná se dvojitou Harvardskou architekturu a předností této řady kontrolerů je malý příkon, nízká cena a dobrá výpočetní výkonnost. Konkrétní údaje o 56F8367 a blokové schéma 56F8367 je uvedeno pod tímto odstavcem.

Hlavní vlastnosti a periférie procesoru 56F8367:

- Výpočtový výkon do 60 MIPS při frekvenci procesorového jádra 60 MHz
- Výkonné 16 bitové jádro rodiny 56800E založené na duální Harvardské architektůře,
- Simultální přístup do třech míst paměti: 1x programová, 2x dátová
- 16x16 bitová paralelní násobička (16x16 bit paralel Multiplier Accumulator MAC)
- Interní programová pamět: 512 KB Flash, 4 KB RAM, 32 KB BOOT ROM
- Interní Dátová pamět: 32 KB Flash, 32 KB RAM
- 2x6 kanálů PWM
- 4x4 kanálů 12 bitových A/D převodníků
- 2x Quadrature dekodér (Quadrature Decoder)
- 4x Quad časovače (Quad Timer)
- 2x FlexCan moduly (vyhovující standardu CAN 2.0 B)
- 2x SPI (Serial Peripheral Interface), 2xSCI (Serial Communication Interface)
- 2x vyhrazený vstup externího přerušení (IRQA, IRQB)
- 76x univerzálních vstupně-výstupních vývodů procesoru (General Purose I/O)
- JTAG/OnCE – rozhraní určené k programování, neinvaznímu testovaní a debugovaní aplikací



Obr. 5.9 - Vnitřní blokové schéma mikrokontroléru 56F8367

Další předností tohoto mikrokontroléru je fakt, že většina instrukcí je provedena během jednoho hodinového cyklu, proto je určen pro úlohy zpracování signálu, číslicové filtrace, pro oblast řízení a ovládání. Tedy volba tohoto mikrokontroléru, jako hlavní výpočetní jednotka výsledného regulátoru, byla vhodným řešením. Programy pro tento mikrokontrolér lze psát jak v assembleru, tak v jazyce C. Pro vývoj a ladění aplikací slouží integrované prostředí CodeWarrior. Bohužel rámec této bakalářské práce je značně omezen, a tak další informace ohledně vývoje programů pro tento obvod lze nalézt v [33], [34] a [6].

Na závěr této podkapitoly budou ještě uvedeny základní údaje ohledně napěťových úrovní procesoru. Procesor je vyroben tzv. High density CMOS technologií. Je navrhnut jako 5V TTL kompatibilní obvod, nicméně jeho vnitřní struktura pracuje s 3,3V logikou. Jinými slovy obvod plně podporuje 5V logiku připojitelnou přímo na jeho IO obvody, ale vnitřně se chová jako 3,3V digitální obvod. Obě jeho vnitřní sběrnice mohou také pracovat s 3,3V a 5V logikou. Tyto fakta výrazně zjednodušují návrh zařízení, neboť lze kombinovat starší typy logických obvodů s touto novou technologií.

5.6.2 Implementace centrální části regulátoru

Jádrem centrální části je mikrokontrolér 56F8367 od firmy Freescale. Jeho zapojení pro navrhovaný regulátor bude ve své podstatě vycházet z oficiálního doporučeného zapojení, použitého například pro EVM (evaluation motherboard – vývojová deska) mikrokontroléru 56F8367. V zapojení bude potřeba udělat několik změn, které budou popsány níže. Do tohoto upraveného obvodu se ještě implementovali nové funkční bloky. Konkrétní zapojení lze nalézt v příloze A na Obr. A. 2, Obr. A. 3, Obr. A. 4, Obr. A. 5, Obr. A. 7 a Obr. A. 8.

Princip zapojení je následující. Mikrokontrolér 56F8367 je zapojen podle doporučeného zapojení a jsou k němu přidány potřebné blokovací a filtrační kondenzátory a krystal, který zajišťuje generování hodinových taktů procesoru. Vnitřně pak mikrokontrolér ještě tento kmitočet násobí pomocí PLL závěsu až na hodnotu 80MHz.

Dále je na požadované piny procesoru napojeno 3,3V napájení a zemnící body. Sekce ADC je také zapojena podle doporučení výrobce a na její vstup je přivedeno referenční filtrované napětí 3.3V.

Vnitřní integrovaný teploměr byl využit a jeho výstup byl zaveden na druhý ADC převodník.

Mikrokontrolér ovládá také elektromagnet hydraulického rozvaděče, ten je spínán přes výkonový tranzistor BD 911. Z ochranných důvodů byla ke spínači rozvaděče zapojena ochranná dioda 1N4007.

Jedním z hlavních úkolů, které 56F8367 provádí je zpracování vstupního změřeného signálu. Ten vstupuje přímo na vstupní piny ADC.

Mikrokontrolér musí dále generovat taktovací frekvence pro vstupní a výstupní filtry LTC1062. Proto jsou z procesu vedeny signály k těmto obvodů. Vedle těchto

taktovacích signálů je nutné zajistit řízení vstupního zesilovače AD8555. Ten však pracuje na 5V logice a není kompatibilní s 3,3V logikou. Proto bylo do této cesty nutné zapojit převodník napěťových úrovní ve formě spínacího tranzistoru. Díky tomuto zapojení však dojde k převrácení logických úrovní, a tak se musí s tímto faktem počítat při vývoji softwaru. (Nutná negace)

Další funkcí mikrokontroléru je zajišťovat komunikaci po sériové lince a CAN sběrnici . Z tohoto důvodu je využito sériového rozhranní 56F8367. Úprava signálu na úrovně kompatibilní s RS-232 jsou však zajišťovány na DEBUGunitu, což bude popsáno v kapitolách o DEBUGunitu. Tedy sériová sběrnice ve formě TTL úrovní je pouze vyvedena na komunikační konektor. Dále je potřeba zajistit CAN komunikaci. Ta je díky FlexCan modulům integrovaným přímo na čipu mikrokontroléru poměrně snadno realizovatelná. Potřeba je doplnit zapojení o CAN kontroléry PCA82C250, které vytvářejí fyzickou vrstvu CAN komunikace, tedy potřebné diferenční napětí na sběrnici a obsahují řadu ochrannýc a detekčních obvodů. Jelikož se požaduje komunikace po dvou CANech bylo nutné zapojit ještě jeden identický obvod pro druhý CAN.

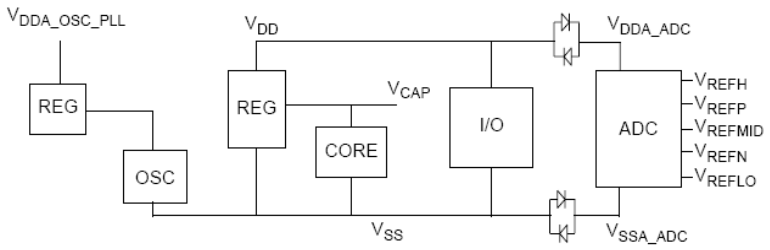
Procesor 56F8367 bude nutné naprogramovat, z tohoto důvodu je implementováno JTAG rozhraní. Opět se zde jedná o doporučené zapojení, s tím že schéma je upraveno, tak aby na jednotce REGULATOR nebyly implementovány budiče sběrnic pro JTAG rozhranní, ale aby se fyzicky umístili do DEBUGunitu. Proto je zde použité JTAG rozhranní vyvedeno na stejný konektor jako sériová linka a bude vždy v okamžiku programování nutné připojit DEBUGunit.

Nejméně podstatnou částí je část signalizační. Ta sice nemá na přímou funkci regulátoru vliv nicméně pro vývoj softwaru a k ladicím účelům byla implementována. V podstatě se jedná pouze o zapojení s dvěmi SMD LED diodami s nízkým odběrem, které jsou buzeny přes obvody 74AC04.

Na závěr této podkapitoly jsou uvedeny hlavní požadavky na zapojení a bude na ně kladen důraz i při návrhu DPS regulátoru. Další fakta a doporučení ohledně zapojení 56F8367 lze nalézt v [33].

Na závěr zde bude uvedeno blokové schéma distribuce napětí po čipu 56F8367.

Uvnitř čipu lze nalézt dva nezávislé napěťové regulátory. Jeden z nich je napájen z obvodu fázového závěsu V_{DDA_OSCPLL} a nelze po celou činnost procesoru vypnout, protože zásobuje energií vnitřní systém hodin. Druhý regulátor je napájen z ADC převodníku (V_{DDA_ADC}) a poskytuje energii do všech interních funkčních bloků včetně samotného jádra procesoru. Jeho činnost může být softwarově utlumena. Flash, RAM a interní logika jsou napájeny nepřímo z jádra 56F8367.



Obr. 5.10 - Blokové schéma interní distribuce napájení v 56F8367

5.7 Návrh a osazení DPS pro REGULATOR

V této podkapitole bude uveden princip návrhu desky plošných spojů pro REGULATOR a v závěrečných odstavcích i návrh DPS pro NEGsource.

5.7.1 Návrh DPS regulátoru

Ve své podstatě se opět při návrhu DPS pro REGULATOR vychází z blokového schématu z Obr. 5.1 v kapitole 5.2. Z uvedeného blokového schématu vyplývá umístění na DPS. Při návrhu byl brán zřetel na co nejnižší možnost ovlivnění nízkonapěťových měřících částí vysokofrekvenčními obvody. Ve větší míře však tomuto jevu nelze zabránit, protože jak na vstupní tak výstupní straně regulátoru jsou použity spínané filtry, a tak k určité interferenci dochází i na vstupní straně. Celé DPS byla vytvořena v OrCAD Layout. Program OrCAD Layout nabízí široký výběr pouzder součástek, a tak jediným problémem byl návrh pouzdra pro MCU.

Ten byl vytvořen pomocí integrovaného generátoru pouzder v OrCAD Layoutu.

Protože blok MCU přibližně leží uprostřed celého blokového schématu byl i návrh DPS podobný, tedy přibližně do středu DPS se situoval mikrokontrolér 56F8367 a to s potřebnými součástkami, včetně blokovacích kondenzátorů. Poté došlo k umístění bloku NAPÁJENÍ a k rozvodu napájení okolo mikrokontroléru. Velkou část napájecí soustavy tvoří obvod LM2825.

Poté došlo k umístění vstupního bloku zesilovače a vstupního antialiasingového filtru.Tato vstupní část byla umístěna s co největší vzdáleností od spínaného zdroje LM2825 a od výstupní výkonové části.

Na opačné straně DPS byly umístěna výstupní část, tedy převodník PWM na proud. Blízko MCU byly umístěny signalizační LED diody a všechny potřebné komunikační obvody pro CAN.

Zásadní otázku při stavbě DPS byla volba počtu vrstev DPS. Zde byla zvolena pouze dvouvrstvá prokovená deska z materálu typu FR4 o síle 1,5 mm a se sílou plátované mědi 18 μm. Na desce byly vytvořeny spoje max. v 5. třídě přesnosti. Velkou roli hrála také volba pouzder součástek. Jelikož je za úkol vytvořit DPS v rozměrech 110mm x 70mm bylo nutné použít co nejvíce součástek s SMD pouzdry. Výkonové

zesilovače a vstupní a výstupní filtry byly použity v klasických DIL pouzdrech. Obvod LM2825 byl z důvodu nedostupnosti na trhu vybrán také v DIL pouzdru. Mikrokontrolér 56F8367 byl jednoznačně dán výrobcem a to umístěním do pouzdra LQFP 160. Ostatní obvody byly zvoleny v klasické DIL technologii. Většina pasivních součástek, rezistorů a kapacitorů byla volena v SMD provedení ve velikostech 0805 a 1206. Kompletní seznam a volba pouzder lze nalézt v soupisce součástek v příloze D. Jako konektory na DPS byly voleny klasické lámací konektory a konektory se zámkem. Všechny konektory měli rozteč vývodů 2,54mm.

Výslednou DPS lze nalézt v příloze B na Obr. B. 1, Obr. B. 2, Obr. B. 3 a Obr. B. 4. Na přiloženém CD pak lze najít podklady k fyzické realizaci zařízení včetně Gerb souborů pro sériovou výrobu.

Při návrhu DPS byly brány v potaz, hlavní zásady tvorby DPS a výrobci definovanými a doporučovanými postupy, Všechny tyto zásady lze nalézt v datasheetech použitých součástek a další informace ohledně správného návrhu DPS v literatuře [36] a [26]. Na závěr této kapitoly bude uvedeno několik zásad, které byly při návrhu centrální části s procesorem 56F8367 použity.

Požadavky na návrh DPS pro zaručení správného chodu 56F8367

- Zajištění nízkoimpedanční cesty od hlavního zdroje ke každému napájecímu pinu procesoru
- Minimální počet blokovacích kapacitorů je 6 s nominální kapacitou 0.01–0.1μF
- Všechny blokovací kapacitory musí být umístěny co nejblíže pouzdru procesoru
- Doporučené kapacitory jsou tantalové a keramické
- Je potřeba umístit ke každé dvojici napájecích pinů (piny s označením VDD, VSS) jeden blokovací kondenzátor
- Maximální vzdálenost blokovacích kondenzátorů nesmí přesáhnout 1,2cm
- Doporučené je použít čtyřvrstvou DPS se samostatnou zemnící a napájecí vrstvou
- Z důvodu vysokofrekvenčního rušení se doporučuje vytvářet minimální délky spojů

Důležitým poznatkem je tedy nutnost dodat okolo MC56F8367 dostatečný počet blokovacích kondenzátorů. Jednotlivé kapacitory by měly být rozmístěny symetricky ke všem stranám MCU, aby jednotlivé integrované periferie měli dostatek energie. Ideální je pak umístit kapacitory na druhou stranu PCB přímo pod MCU, čímž se sníží délka přívodních vodičů.

Po dokončení návrhu DPS byla zadána deska do výroby a po dokončení došlo k osazení jednotlivých součástek a obvodů. Klasické SMD součástky byly zapájeny horkovzdušnou pájecí stanicí a konvenční hrotovou pájecí stanicí. V okamžiku montáže bylo objeveno několik nedostatků. Především u pouzdra mikrokontroléru, který měl poměrně krátké délky padstacků. Tím byla velice ztížena možnost zapájení obvodu MC56F8367 pomocí konvenčních pájecích stanic. Proto se muselo přistoupit k zapájení obvodu v horkovzdušné pícce.

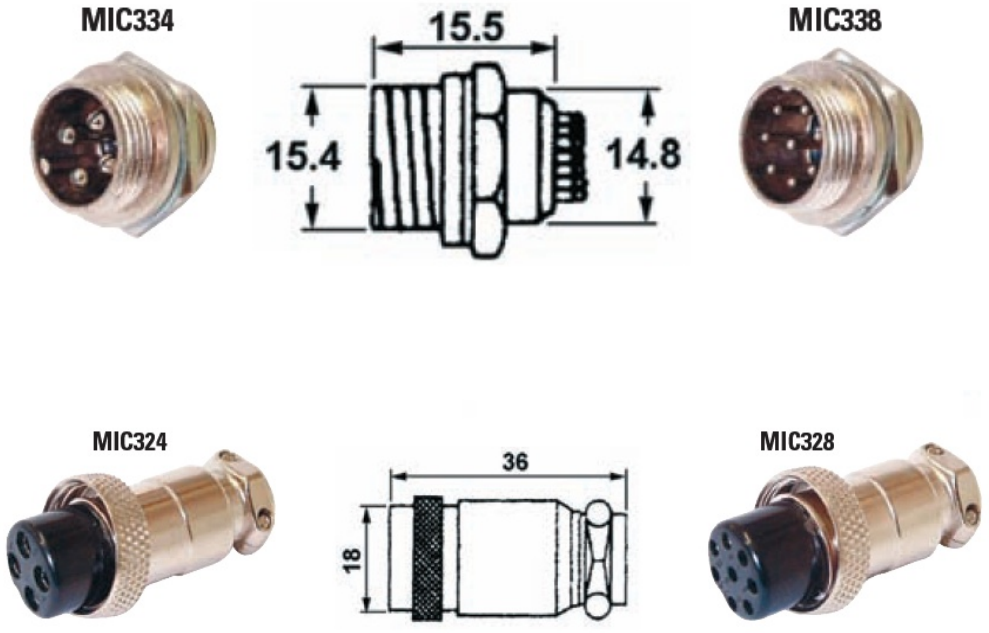
5.7.2 Návrh DPS zdroje záporného napětí

Dalším bodem kapitoly 5.7 je návrh DPS pro externí přídavný modul zdroje záporného napětí – NEGsource. Jeho DPS lze nalézt v příloze B na Obr. B. 9 a Obr. B. 10.

Co se týče rozvržení DPS, tak to vychází přímo ze schématu NEGsource a nekladou se na něho žádné speciální požadavky. Celá DPS byla vytvořena na jednostranném plošném spoji ve 4. třídě přesnosti. Bylo využito klasické SMD a DIL montáže.

5.8 Volba konektorů

Jako vnější konektory byly vybrány 8-pinové a 4-pinové robustní kulaté konektory. Důvodem této volby byla snadná úprava boxu a pevnost konektorů. Jedná se o konektory typu MIC. Tyto konektory byly použity pro přívod 24V napájení, pro připojení tenzometrického můstku a pro výstupní řídicí konektor k servoventilu. Výsledný obrázek těchto konektoru je na Obr. 5.11.

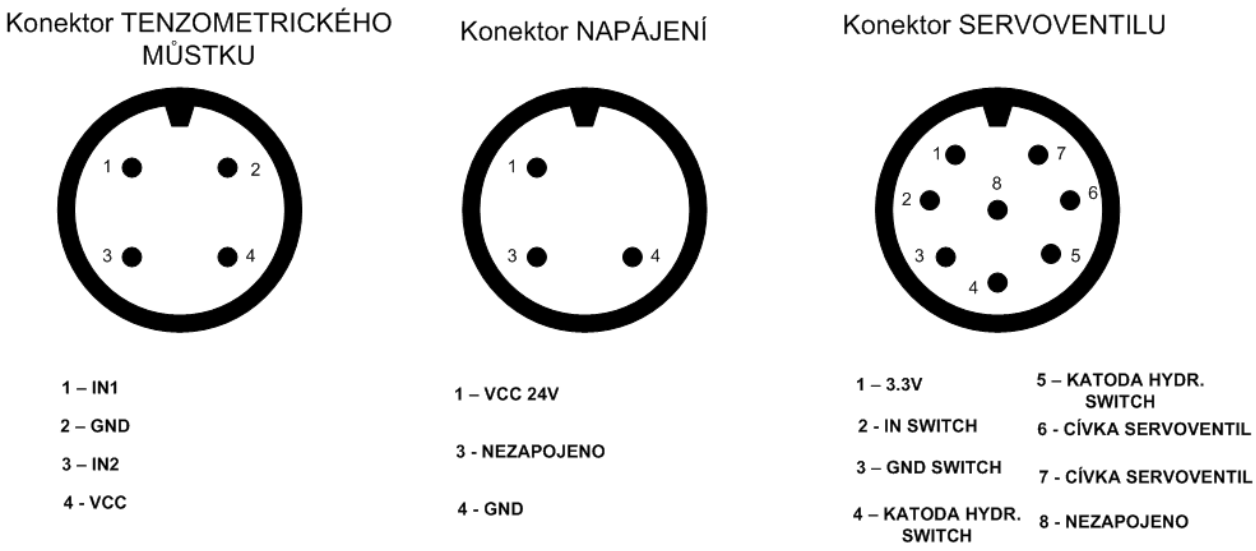


Obr. 5.11 - Vnější napájecí a výstupní konektory

Jako vnější konektory pro CAN byly použity standardní CAN MALE a FEMALE konektory.

5.8.1 Zapojení konektorů na čelním panelu

V této podkapitole bude uvedeno zapojení vnějších konektorů na čelním panelu ochranného boxu. Typ konektorů a jejich parametry lze nalézt v předchozí podkapitole.



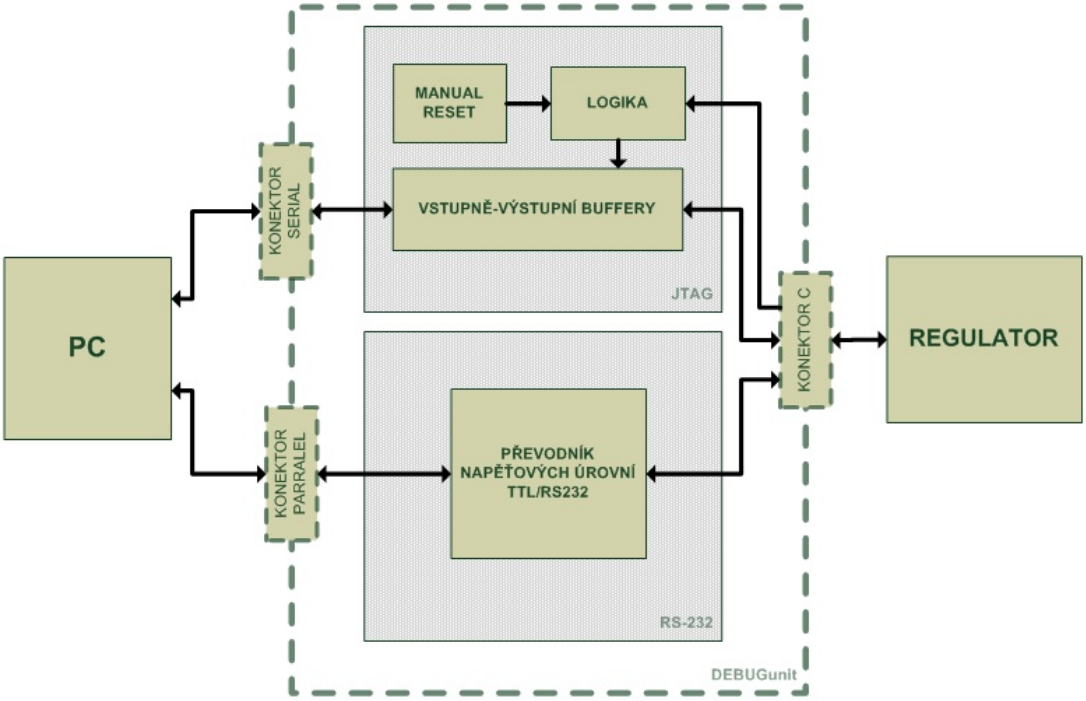
Obr. 5.12 – Popis zapojení vnějších konektorů na čelním panelu regulátoru

6 Ladící přípravek DEBUGunit

Jelikož je potřeba s mikrokontrolérem komunikovat, je dalším cílem navrhnutí komunikační jednotky DEBUGunit, na které budou integrovány veškeré podpůrné obvody a převodníky napěťových úrovní pro připojení k vnějšímu okolí. Zde narozdíl od předchozího návrhu REGULATORu není omezení na velikost celé DPS, a tak není potřeba příliš velká integrace komponent ani nárok na těsnější umístění výsledných součástek na DPS.

6.1 Blokové schéma DEBUGunit

V této podkapitole je uvedeno blokové schéma jednotky DEBUGunit, následně popsán význam jednotlivých bloků a stručně uveden účel jejich použití. Tento modul představuje jakýsi interface mezi REGULATORem a PC. Jeho hlavní využití bude při komunikaci po sériové lince RS-232 a při ladění programu pro mikrokontrolér přes rozhranní JTAG. Na následujícím Obr. 6.1 je uvedeno blokové schéma DEBUGunitu.



Obr. 6.1 - Blokové schéma DEBUGunitu

Základem DEBUGunitu je blok RS-232 a JTAG. V Bloku RS-232 bude implementován převodník napěťových úrovní zajišťující sériovou komunikaci. Blok JTAG slouží jako mezičlánek mezi REGULATORem a PC pro ladící účely. Tlačítko RESET slouží k možnosti manuálního restartu procesoru. Připojení k REGULATORu je vytvářeno přes konektor C. Konektory PARRALEL a SERIAL, pak zajišťují připojení DEBUGunitu k paralelnímu a sériovému portu PC.

6.2 Analýza a implementace DEBUGunitu

V této kapitole bude zmíněn návrh komunikačního modulu DEBUGunit. Primární účel tohoto zařízení je externí úprava signálu pro sériovou komunikaci s PC a dále rozhranní pro programování procesoru přes rozhranní JTAG.

Z blokového schématu DEBUGunitu vyplývá struktura komunikačního interfacu. Proto bude v následujících podkapitolách popsán návrh těchto podsystémů a odůvodněn výběr komponent pro dané bloky. Na rozdíl od předchozích kapitol o REGULATORu, bude spojena návrhová a implementační část jednotlivých podsystémů.

Důvodem je snadnější a méně obsáhlé zapojení. Nicméně zde opět dojde k diskuzi jaké parametry musí daný podsystém splňovat a s ohledem na tuto skutečnost bude vybírána součástková základna.

Hned po vysvětlení zapojení a odůvodnění výběru komponent bude následovat návrh DPS. Na jeho návrh nejsou kladeny žádné speciální požadavky, a tak bylo jeho výsledné navrhování značně jednodušší než u REGULATORu.

V závěru této kapitoly bude uvedeno propojení a volba konektorů.

6.2.1 JTAG komunikace

V této podkapitole bude diskutován návrh JTAG zapojení v DEBUGunitu. Zapojení obvodu pro JTAG komunikaci lze nalézt v příloze A na Obr. A. 10, konkrétně v sekci JTAG.

Jádrem zapojení jsou dva integrované obvody MC74HC244 a MC74LCX244. V obou případech se jedná o CMOS buffery. Rozdíl je v tom, že obvod MC74LCX244 je nízkopříkonový třístavový, TTL kompatibilní, vstupně-výstupní buffer, kdežto obvod MC74HC244 je obyčejný třístavový vstupně-výstupní buffer, pracující v rozmezí 2V až 6V . Podrobnější informace o těchto obvodech lze nalézt v [37] a [38].

V zapojení JTAGu na DEBUGunitu je dále pomocí obvodu 74AC00 vytvořena potřebná logika signalu RESET a TRST. Proto je možno manuálně vyvolat RESET, který přes tuto logiku vyvolá potřebnou změnu logických hodnot. Jako jednoduchý inventor byl využit tranzistor 2N2222A. Napájení všech bufferů a logických hradel je distribuováno z REGULATORu .Všechny vstupy a výstupy z bufferů byly poté napojeny na konektory.

6.2.2 Sériová komunikace

Další funkcí DEBUGunitu je správná úprava napěťových úrovní pro sériový přenos. Zde bylo využito známého obvodu ST3232CD. Jedná se o nízkopříkonový RS-232 převodník. V jeho vnitřní struktuře lze nalézt dva přijímače a dva vysílače, které upravují napěťové TTL úrovně na RS-232 napěťové úrovně. Pro svou funkci používá nábojových pump.

Obvod pro svůj chod vyžaduje pouze 4 externí keramické kapacitory C1,C2, C3 a C4. Další částí obvodu je už jen napojení ST3232 na vstupní a výstupní konektory. Napájení ST3232CD je zajištěno přímo z napájení REGULATORu. Konkrétní zapojení sekce RS-232 lze nalézt v příloze A na Obr. A. 10, konkrétně v sekci sériové komunikace.

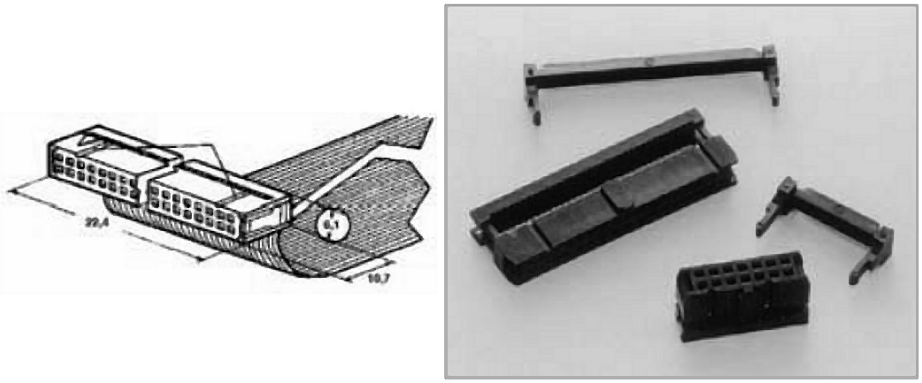
6.3 Návrh DPS pro DEBUGunit

V této podkapitole bude uveden princip návrhu desky plošných spojů pro DEBUGunit.

Ve své podstatě se opět při návrhu DPS pro DEBUGunit vychází z blokového schématu na Obr. 6.1. Z uvedeného blokového schématu vyplývá umístění na DPS, ovšem s tím rozdílem oproti REGULATORu, že nejsou kladeny žádné speciální nároky na konkrétní umístění podsystémů na DPS. Opět je zde snaha o umístění blokovacích kondenzátorů co nejblíže logickým obvodům. Další cílem bylo vytvoření co nejmenšího počtů prokovů, z důvodu nižších výrobních nákladů DPS. Na výsledné DPS byly použity paralelní DB25 a sériový DB9 konektor přímo napájitelné do DPS. Výslednou finální desku plošných spojů lze vidět na Obr. B. 5, Obr. B. 6, Obr. B. 7 a Obr. B. 8.

6.4 Fyzické propojení REGULATORu a DEBUGunitu

Jelikož jsou REGULATOR a DEBUGunit fyzicky samostatné jednotky, musí být propojeny kabelovým vedením. Pro spojení mezi REGULATORem a DEBUGunitem se používá plochý 14-ti žilový a 28-mi žilový kabel, který je na obou koncích zakončen samořezným PFL konektorem s roztečí 2,54mm. Pro sériový přenos se používá 14-ti žilový kabel a pro JTAG paralelní kabel. Na Obr. 6.2 lze nalézt nákres tohoto kabelu s již nakrimpovaným konektorem.



Obr. 6.2 - Schéma plochého kabelu s konektorem PFL

Pro přímé spojení DEBUGunitu a PC se používají dva typy datových kabelů. Pro rozhranní JTAG se používá 25-ti pinový paralelní kabel typu MALE-FEMALE. Pro sériový přenos se používá klasický 9-ti pinový kabel RS-232, někdy též nazývaný CANNON DB9 zakončený na obou koncích FEMALE. Na Obr. 6.3 jsou zobrazeny používané kabely, vlevo je sériový kabel, vpravo pak používaný paralelní kabel.

Obr. 6.3 - Propojovací kabely mezi DEBUGunitem a PC – Sériový kabel, paralelní kabel

7 Testování modulů REGULATOR a DEBUGunit – výsledky měření

7.1 Průběh testování

V této kapitole bude pojednáno o testovaní výsledného zařízení. Při testech se zde bude předpokládat základní funkčnost komunikačních algoritmů mikrokontroléru a ovládání periferií pomocí procesoru. Tím se myslí především komunikace procesoru a AD8555 a generování signálů pro taktování filtrů LTC1062.

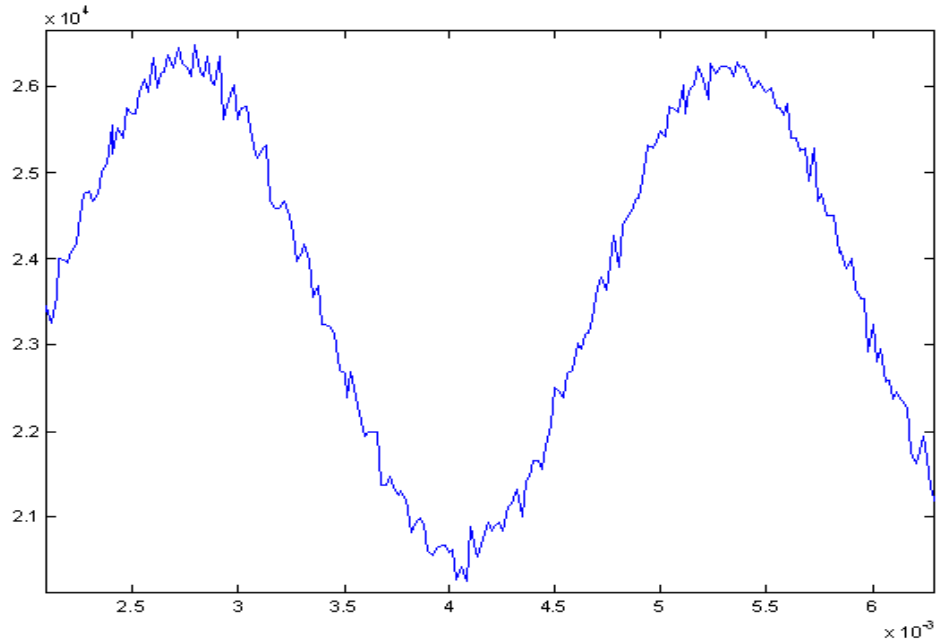
Po dokončení výroby DPS a osazení danými obvody došlo k prvotnímu testu komunikace mezi mikrokontrolérem a PC.

Po tomto prvotním otestování komunikace, mezi procesorem a PC, došlo ke dvěma dalším testům. Tím prvním byl test zesilovače AD8555, jeho komunikace s procesorem a zjištění kvality signálu na vstupní měřící větvi zařízení. Pro splnění vstupních požadavků musela být nejdříve zprovozněna komunikace a ovládání vstupního zesilovače. Po této fázi byly nastaveny parametry vstupního AD převodníku. Jelikož se při prvních testech ukázaly problémy s interferencemi od taktovacího signálu filtru, byly měřeny signály při interním taktování filtru s $f_{zlom} = 1{,}4kHz$. Na následujících změřených charakteristikách na Obr. 7.1, Obr. 7.2, Obr. 7.3 a Obr. 7.4 lze vidět zesílený a filtrovaný vstupní signál. Pro měření byly nastálo nastaveny tyto parametry:

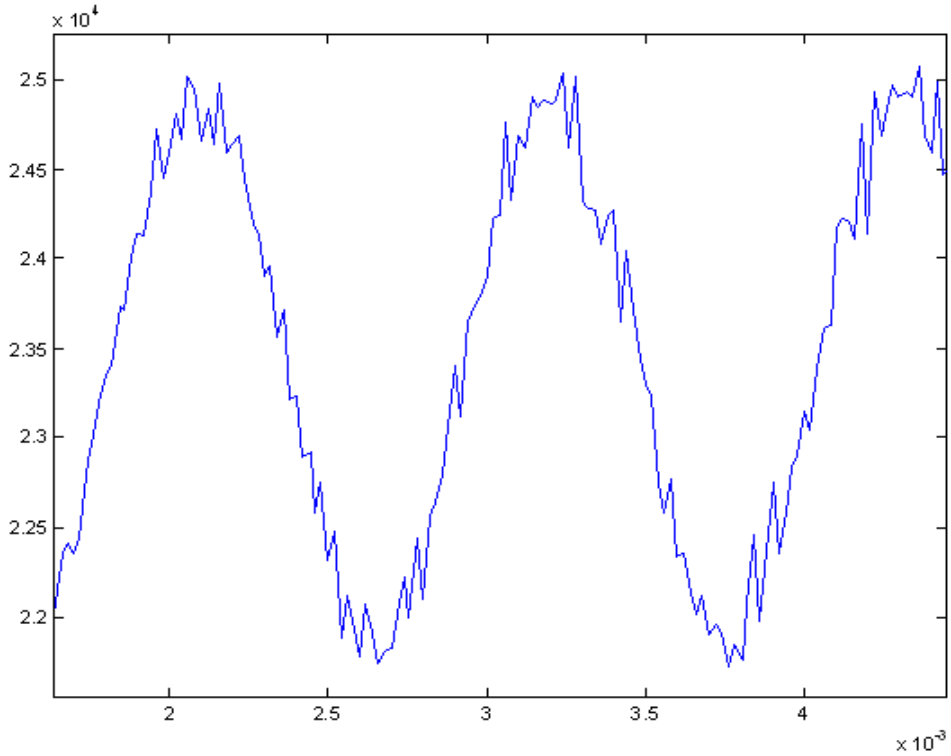
1) Vstupní sinusový signál $U_{pp} = 800mV$ se stejnosměrnou složkou $U_s = 3{,}28V$
2) Můstek nahrazen děličem s hodnotami 800kΩ a 50Ω
3) AD převodník – 12bit a z toho $SNR = 74dB$
4) AD převodník – $f_{vz} = 50kHz$ synchronizováno s PWM
5) Vstupní zesílení $G = 800$
6) Vstupní filtr taktován pomocí interních hodin $f_{zlom} = 1{,}4kHz$

Následující charakteristiky ukazuji kvalitu vstupního signálu, v závislosti na vstupní frekvenci signálu. Vždy se měřilo 1000 vzorků vstupního signálu, tedy časový interval 20µs. V následujících obrázcích je vždy brán pouze výsek hodnot.

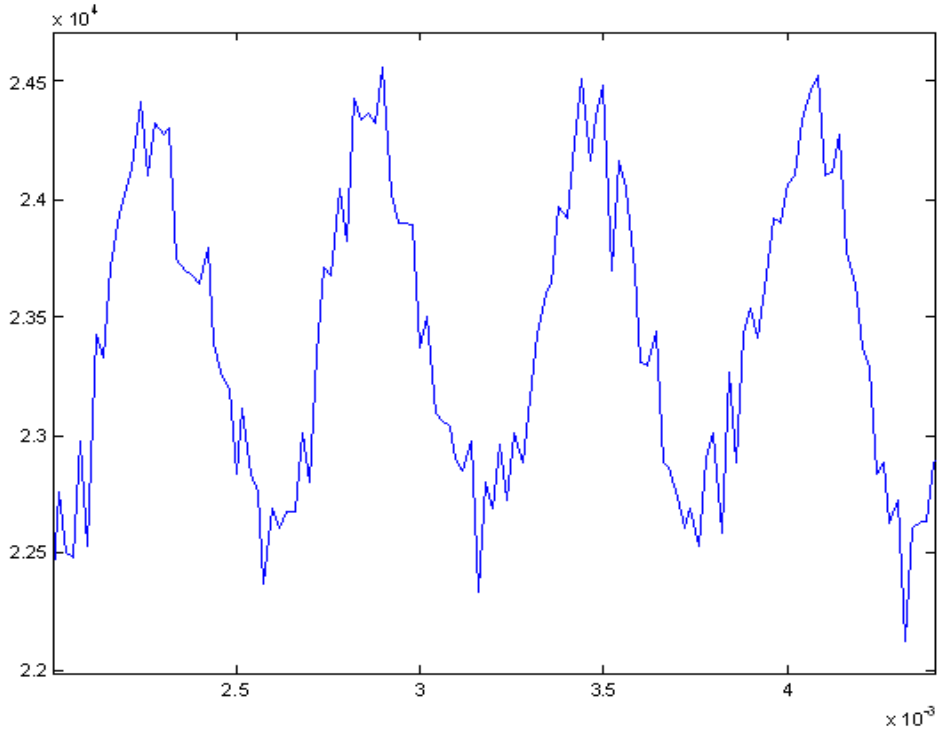
Pro zobrazení těchto charakteristik bylo použito prostředí MATLAB R2006b, kde byl naprogramován komunikační M-File.



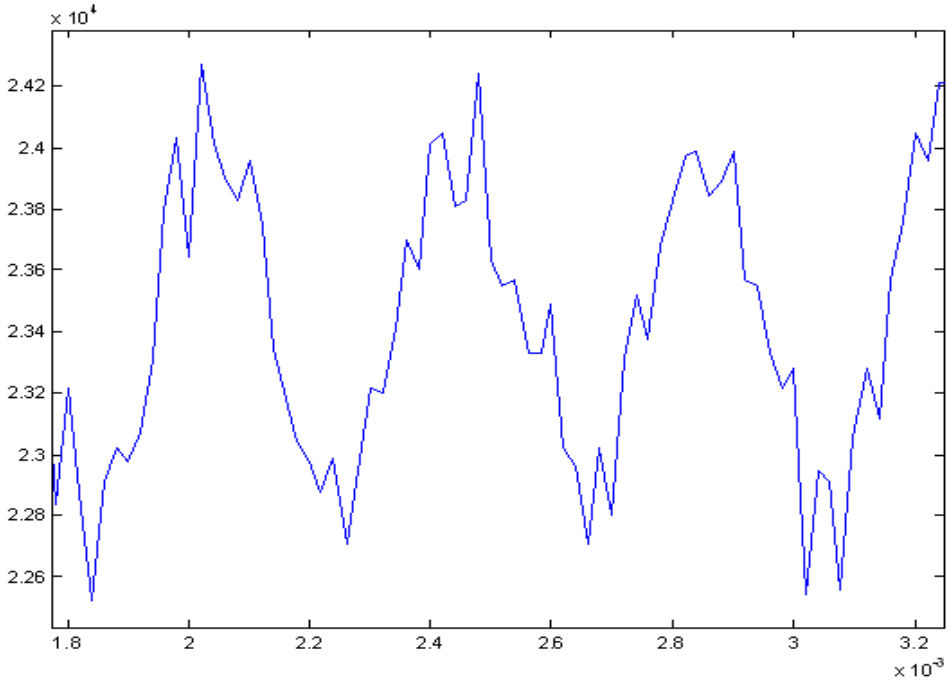
Obr. 7.1 - Změřený 400Hz signál při zesílení G = 800



Obr. 7.2 - Změřený 1100Hz signál při zesílení G = 800



Obr. 7.3 - Změřený 2,5kHz signál při zesílení G = 800

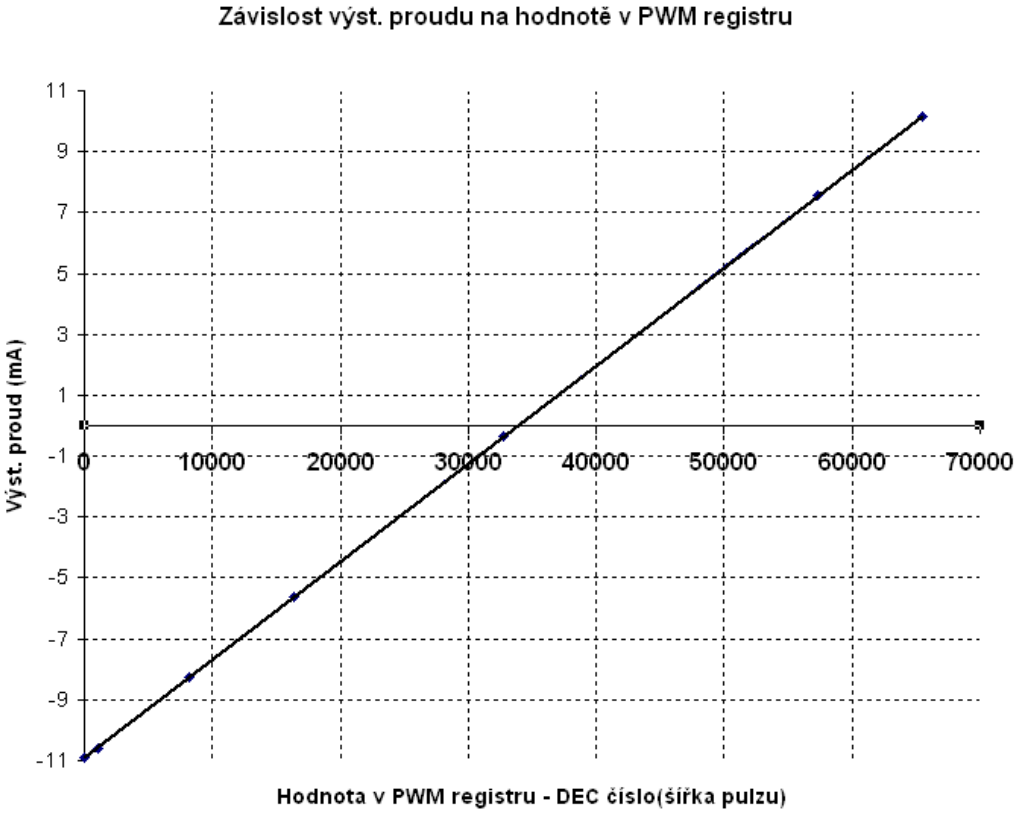


Obr. 7.4 - Změřený 5kHz signál při zesílení G = 800

Z výše zobrazených průběhů lze vidět, že vstupní filtr výrazně tlumí frekvence vyšší než jeho zlomová frekvence. Ve změřené charakteristice, se tak ukáže stejnosměrná složka se superponovaným signálem s velmi nízkou amplitudou. Rozsah hodnot, ve

kterých se může pohybovat amplituda vstupního signálu je dána vstupním rozsahem AD8555.

Druhým testem bylo ověření funkčnosti výstupního převodníku PWM na proud . Díky provedeným simulacím převodníku napětí-proud se předpokládala správná funkčnost celého převodníku, nicméně první část filtru nebyla ověřena. Princip testování celého výstupu probíhal tak, že se nastavovala programově hodnota PWM registru, který řídí výstupní střídu PWM signálu. Následující Obr. 7.5 znázorňuje změřená data.



Obr. 7.5 - Změřená výstupní charakteristika převodníku PWM- proud

Pozn.: Jelikož softwarová část není obsahem této práce, bude zde ponechán odkaz na fakt, že budoucím cílem, který navazuje na tuto práci, je vytvoření softwaru pro tento regulátor. Proto se v této kapitole předpokládá základní implementace programu a ovládání periferií z mikrokontroléru. Při testech byly již dokončeny některé komunikační algoritmy a fungovala plně komunikace mezi 56F8367 a AD8555.

7.2 Poznatky z testování a budoucí zdokonalení

První zjištěnou závadou při testování byla nefunkčnost 3,3V stabilizátorů. Důvodem bylo připojení indukčností na jejich výstup. Proto musela být z jejich výstupů odstraněna filtrační indukčnost a všechny indukčnosti byly nahrazeny moderními prvky FERRITE BEAD. Poté již došlo ke spolehlivému spojení vývojového prostředí CodeWarrior a REGULATORu, resp. mikrokontroléru.

Dále bylo při testech MCU pozorováno výrazné zahřívání obvodu. Jelikož byla k dispozici i vývojová deska s dalším totožným mikrokontrolérem, mohlo dojít k porovnání teploty čipu. Mikrokontrolér na desce regulátoru se zahříval výrazně více než mikrokontrolér na vývojové desce. To se však nijak neprojevilo na funkci mikrokontroléru. Důvodem tohoto jevu může být použití pouze dvouvrstvé desky plošných spojů, bez vnitřní zemnící vrstvy. Další příčinou by mohl být obvod samotný, tj. použití odlišné varianty mikrokontroléru než na vývojové desce.

Dále bylo potřeba použít interních hodin vstupního antialiasingového a výstupního filtru. Důvodem byla nekompatibilita napěťových úrovní mikrokontroléru a zmiňovaných filtrů.

Při testech se přišlo také na zásadní nutnost softwarového nastavení vzorkovací části mikrokontroléru. Zde je nutno zajistit ekvivalentnost vzorkování, například synchronizací vzorkovacích obvodů s interním PWM modulátorem mikrokontroléru.

Jako závěr testů může být považována také úprava napájení tenzometrického můstku, především návrh zdroje záporného napětí.

Vedle laboratorních měření vstupů a regulátoru, došlo na testování v reálném provozu firmy AERO Vodochody. Zde byla ověřena funkčnost vstupního měřícího obvodu a následně výstupního akčního členu REGULATORu. Zde se podařilo dosáhnout požadovaných cílů pro řízení servoventilu LUN 6874-8.

Jako budoucí zdokonalení REGULATORu se doporučuje zaintegrování externího zdroje záporného napětí, čímž by nebylo potřeba externího adapteru a zamezilo by se tím dalším chybám ve vstupním měřícím obvodu REGULATORu.

Dalším doporučením z hlediska vývoje DPS je vhodné využít čtyřvrstvé DPS se samostatnou zemnící a napájecí vrstvou. Tím by se zajistilo nižšího odporu přívodu napájení k jednotlivým blokům REGULATORu, lepšího odrušení a lepšího odvodu tepla z mikrokontroléru .

Při osazování DPS pak vychází další požadavek na budoucí zdokonalení. Tím je prodloužení padstacků pouzdra mikrokontroléru 56F8367 a následně možnost využití konvenčních hrotových pájecích stanic pro osazení mikrokontroléru.

8 Závěr

Úkolem této bakalářské práce byl návrh, zhotovení a testování regulátoru hydraulického zatěžovacího zařízení, používaného k testování řídícího systému ve firmě AERO Vodochody.

Celý návrh regulátoru byl rozdělen do několika fází. Nejdříve jsme vždy zhodnotili možné varianty řešení a poté zvolili konkrétní, s ohledem na výhodnost zapojení a dostupnost součástek na trhu. Z prvotního blokového schématu zařízení jsme specifikovaly vstupní požadavky na regulátor, zvolily vstupní a výstupní rozsahy signálů a rozdělili regulátor do několika funkčních bloků.

Měření síly zprostředkovává tenzometr. Jelikož je na trhu značné množství komerčně vyráběných zařízení, byla zde diskutována možnost využití těchto měřících systémů. S ohledem na jejich parametry, však bylo nutné přistoupit ke stavbě měřícího obvodu REGULATORu.

V této práci byly také rozebrány možná zapojení tenzometrických snímačů a diskutovány jejich výhody a nevýhody. Především byla rozebrána detailněji metoda teplotní kompenzace a volba počtu tenzometrů v měřícím můstku

Použitým akčním členem je hydraulický servoventil LUN 6874-8.

Návrh regulátoru byl dekomponován do několika bloků, které byly poté řešeny jednotlivě. Schémata zapojení byly vytvářeny za pomoci návrhového programu OrCAD Capture a kritické části byly simulovány v PSpice. Poté byla navržena DPS. Všechny bloky REGULATORu byly sestaveny s ohledem na jednoduchost a minimalizaci místa na výsledné DPS. Vzhledem k tomu, že některé parametry nebyli plně specifikovány (rozsah vstupních napětí tenzometru) bylo využito obvodů s možností softwarové změny parametrů (filtry, zesilovač).

Vedle primárního návrhu REGULATORu byl vytvořen ladící přípravek DEBUGunit, který slouží jako mezičlánek mezi vývojovým prostředím CodeWarrior a mikrokontrolérem 56F8367.

Po fyzickém zhotovení DPS a osazení součástkami bylo velké úsilí věnováno testování všech funkcí zařízení. Největší důraz byl kladen na zajištění kvality měření a dosažení linearity a plného rozsahu výstupního signálu. Pro tyto testy byl implementován základní testovací software. Funkčnost byla úspěšně ověřena i na hydraulickém stojanu v AERO Vodochody.

Další fází vývoje tohoto regulátoru bude vytvoření softwarové části implementující regulátor a komunikační protokol CANopen.

Součástí bakalářské práce je přiložené CD se zdrojovými soubory schémat a DPS.

9 Použitá literatura a zdroje

[1] Haasz V., Sedláček M.: Elektrická měření, přístroje a metody, Vydavatelství ČVUT, 2005

[2] Ripka P., Ďaďo S., Kreidl M., Novák J.: Senzory a převodníky, Vydavatelství ČVUT, 2005

[3] Sedláček M., Hlaváč V..: Zpracování signálů a obrazu, Vydavatelství ČVUT, 2005

[4] Vedral .J, Fischer J.: Elektronické obvody pro měřící techniku, Vydavatelství ČVUT, 2004

[5] Hájek K. Sedláček J.: Kmitočtové filtry, Vydavatelství BEN, 2002

[6] Smékal Z., Sysel P.: Signálové procesory, Vydavatelství Sdělovací technika, 2006

[7] Vobecký J., Záhlava V.: Elektronika, součástky a obvody, principy a příklady, Vydavatelství Grada, 2005

[8] 56F8367 Evaluation Module User Manual. Freescale Semiconductors, www.freescale.com, 2005

[9] www.wikipedia.com

[10] www.wikipedia.cz

[11] http://de.wikipedia.org/wiki/Servoventil

[12] http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab02/noskievic.pdf

[13] http://strojar2003.ic.cz/2strojar2003.wz.cz/data/fyles/sps_hydrostatika.ppt

[14] Technická dokumentace k servobloku LUN 6874-8, interní dokument

[15] http://cs.wikipedia.org/wiki/Tenzometr

[16] http://www.micro.feld.cvut.cz/home/kulha/X34SES+SEE/

[17] http://www.aterm.cz/Tenzometry.htm

[18] http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070427.pdf

[19] http://www.automatizace.cz/article.php?a=510¨

[20] http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k42-tlak.htm

[21] http://www.national.com/mpf/LM/LM2825.html

[22] http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC33269-D.PDF

[23] http://www.linear.com/designtools/software/filtercad.jsp

[24] http://www.analog.com/en/prod/0,,759_782_AD8555,00.html

[25] http://www.linear.com/pc/productDetail.jsp?navId=H0,C1,C1154,C1008,C1148,P1264

[26] Záhlava V.: OrCAD 10, Vydavatelství GRADA, 2004

[27] Kocourek P., Novák J.: Přenos informace, Vydavatelství ČVUT, 2004

[28] http://www.national.com/mpf/LM/LMC7660.html

[29] http://www.national.com/mpf/LP/LP2951.html

[30] http://www.freescale.com/files/dsp/doc/user_guide/MC56F8367EVMUM.pdf

[31] http://www.freescale.com/files/dsp/doc/data_sheet/MC56F8367.pdf

[32] Skalický P.: Digitální filtrace a signálové procesory, Vydavatelství ČVUT, 1997

[33] http://www.freescale.com/files/dsp/doc/user_guide/MC56F8300UM.pdf

[34] http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=CW-56800E-DSC

[35] http://www.hammondmfg.com/pdf/1590TF.pdf

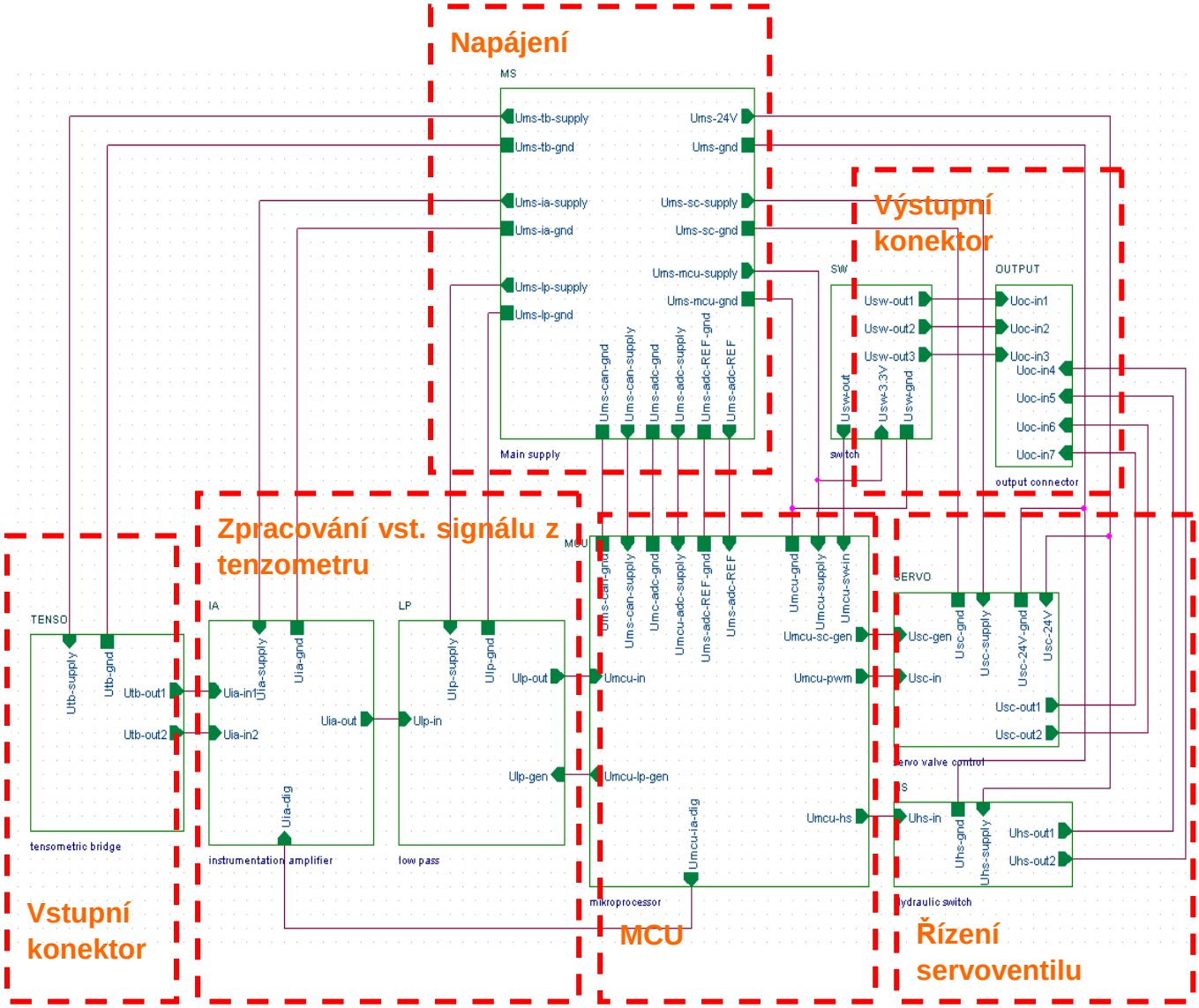
[36] Záhlava V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů, Vydavatelství ČVUT, 2005

[37] http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC74LCX244-D.PDF

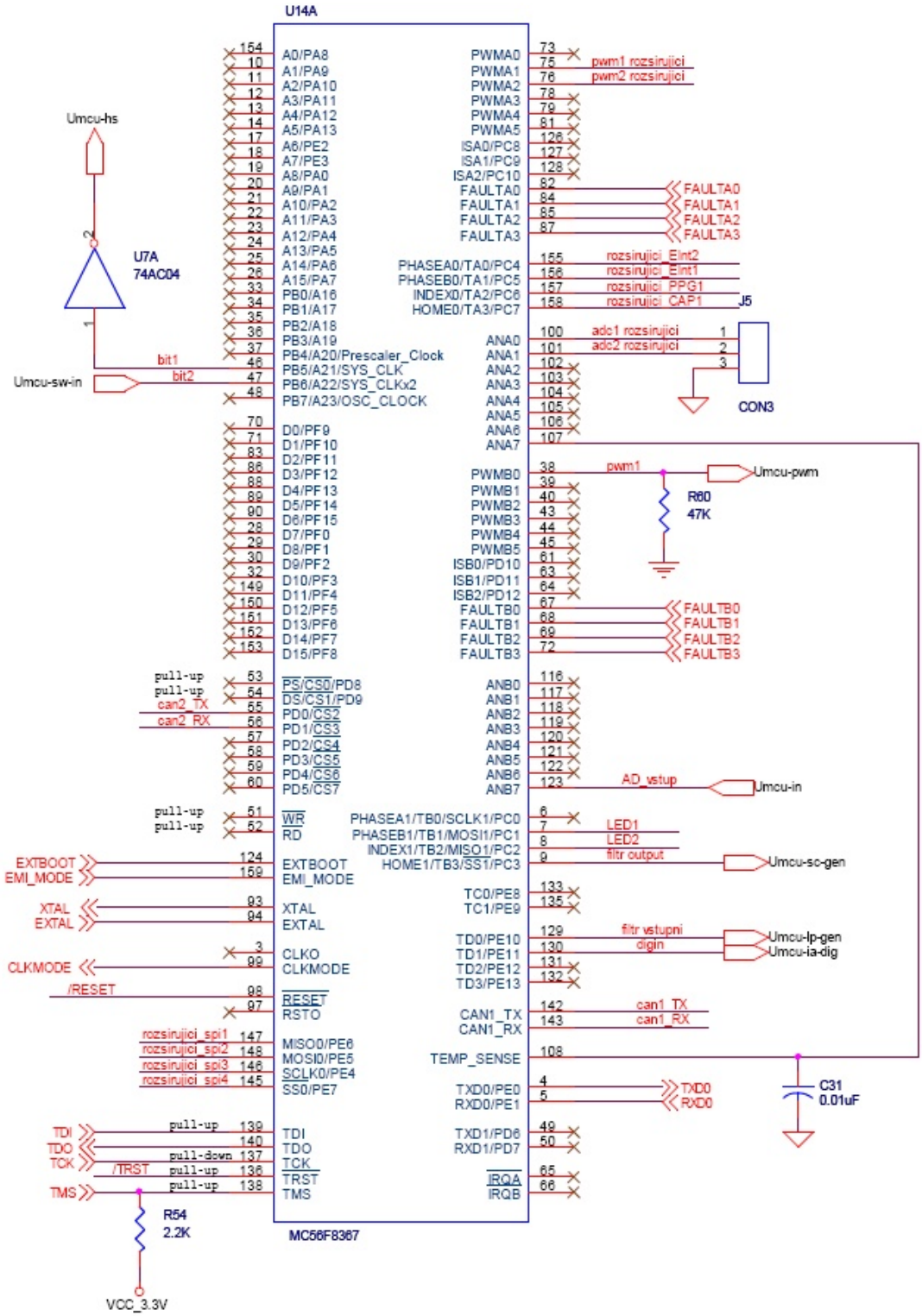
[38] http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/12177/ONSEMI/MC74HC244.html

[39] http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/S/T/3/2/ST3232CD.shtml

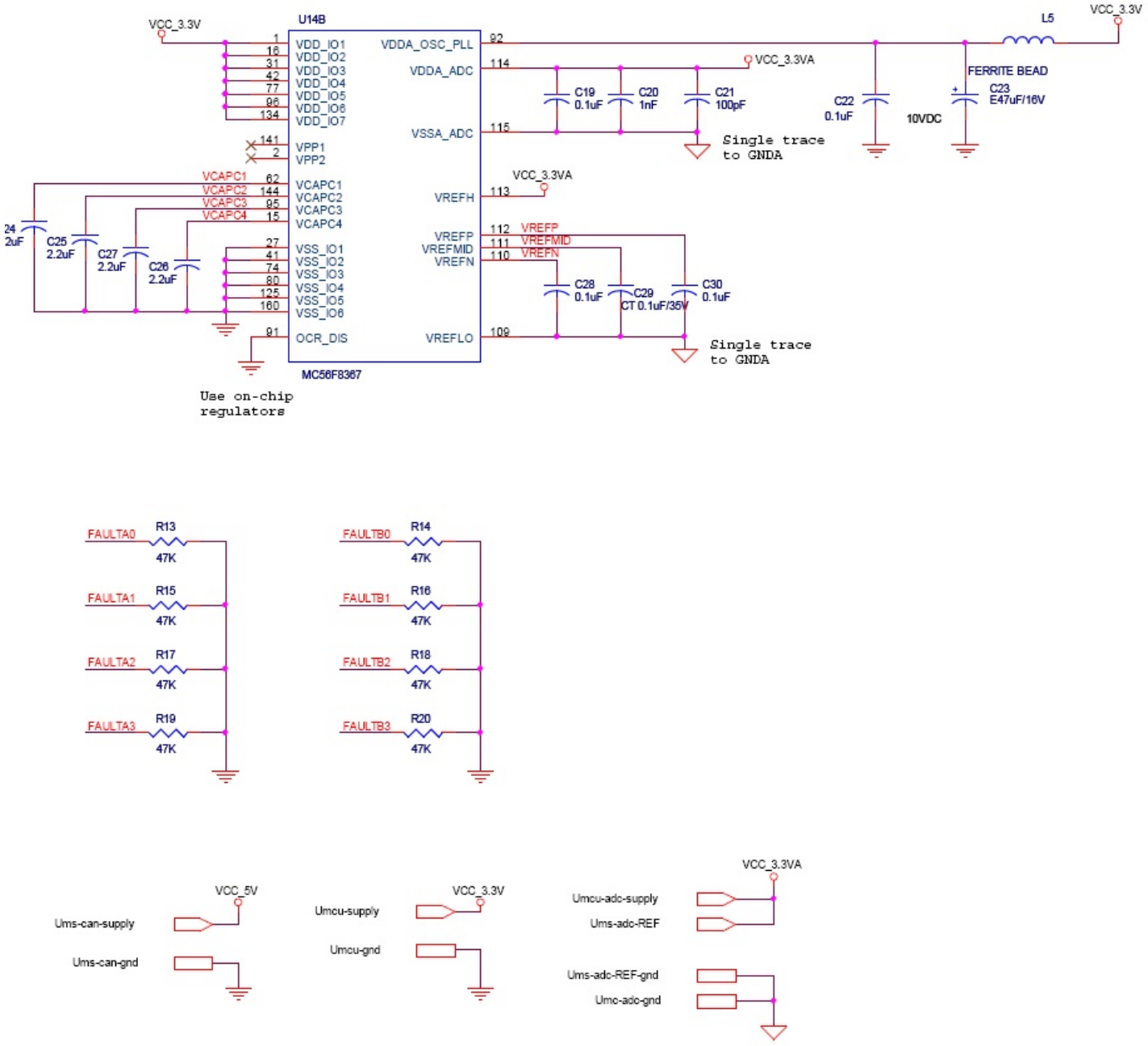
Příloha A - Schémata zapojení



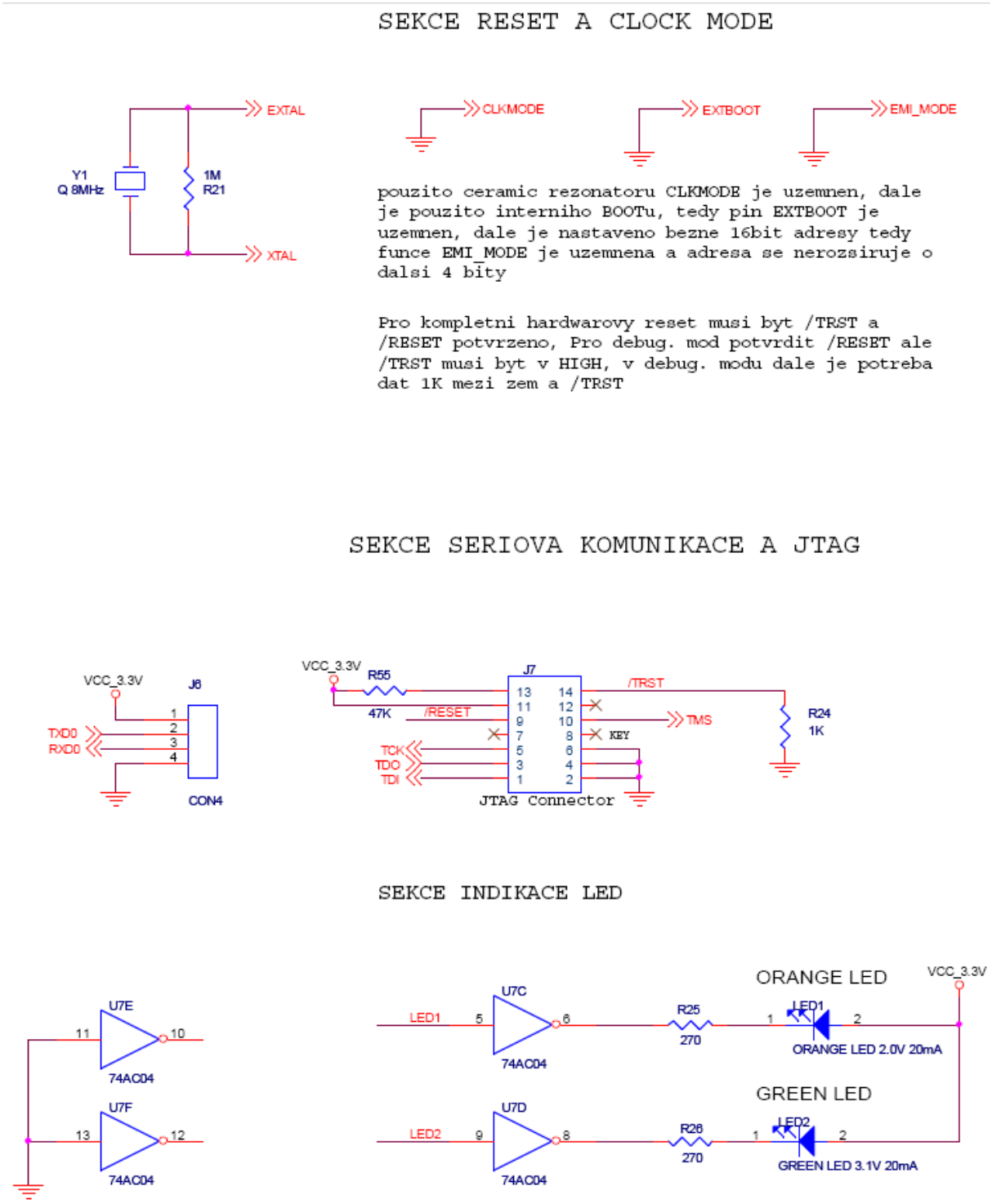
Obr. A. 1 - Blokové pseudoschéma jednotky REGULATOR



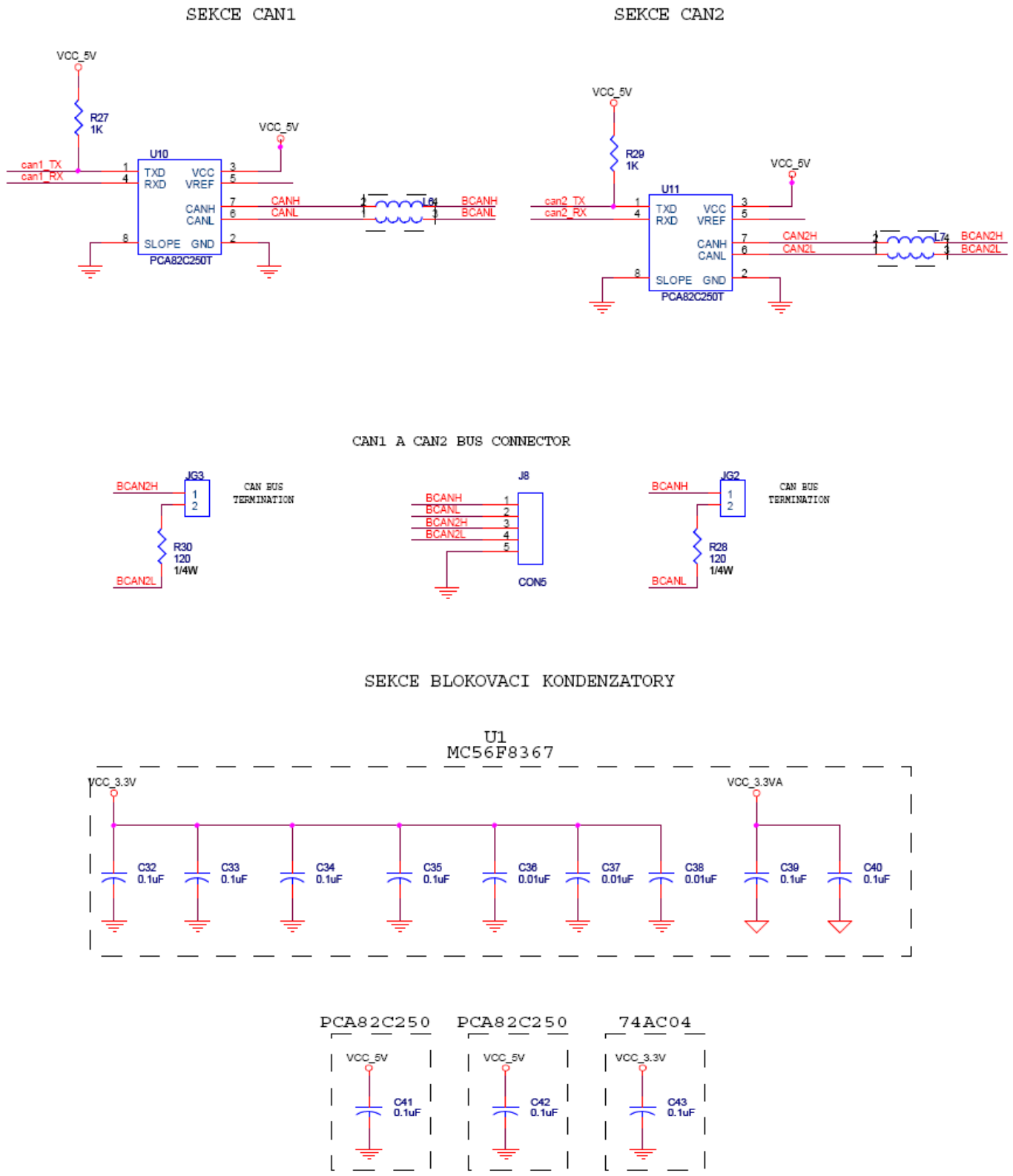
Obr. A. 2 - Schéma zapojení procesoru 56F8367



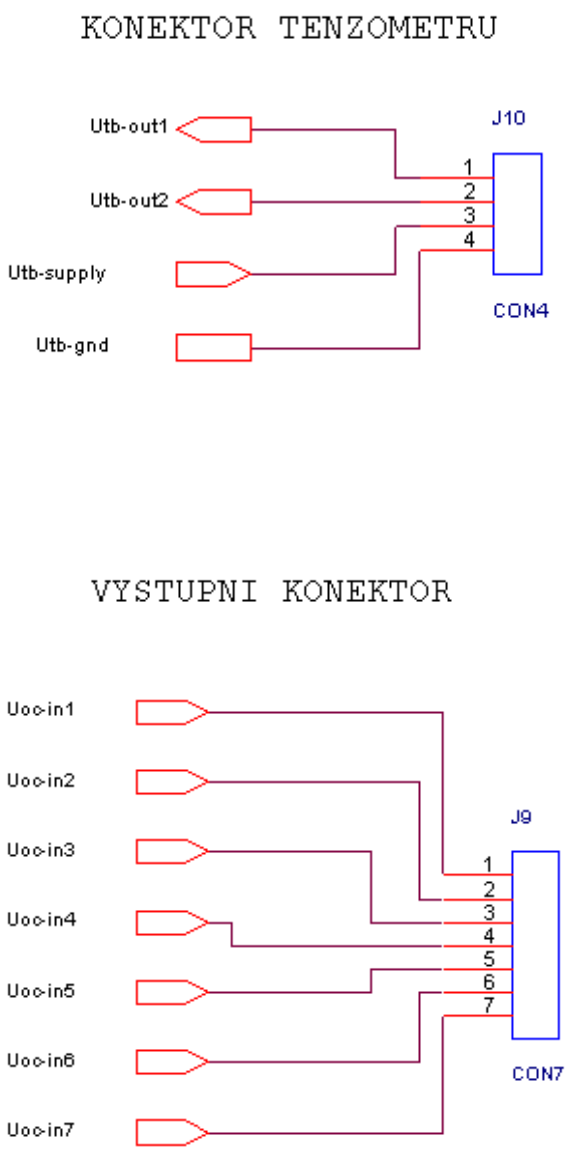
Obr. A. 3 - Schéma zapojení AD převodníku a externích součástek pro 56F8367



Obr. A. 4 - Schéma zapojení LED a JTAG konektoru

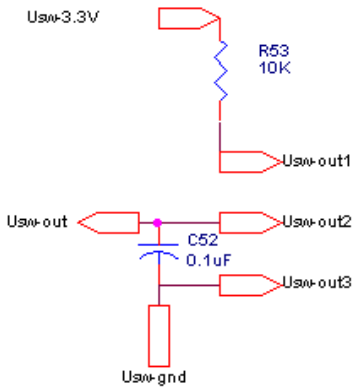


Obr. A. 5 - Schéma zapojení CAN kontrolerů a propojení CAN konektoru



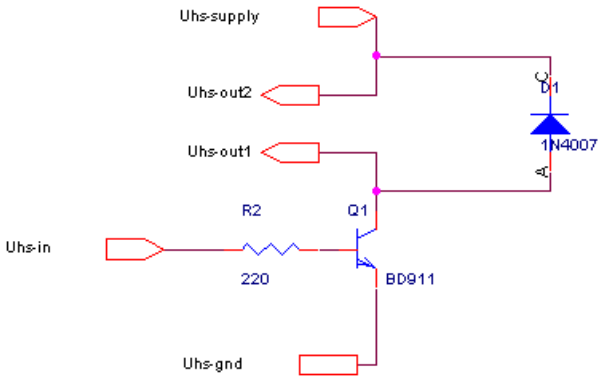
Obr. A. 6 - Schéma zapojení vstupních a výstupních konektorů

MIKROSPINAC ODPINACIHO HYDR. ROZVADECE

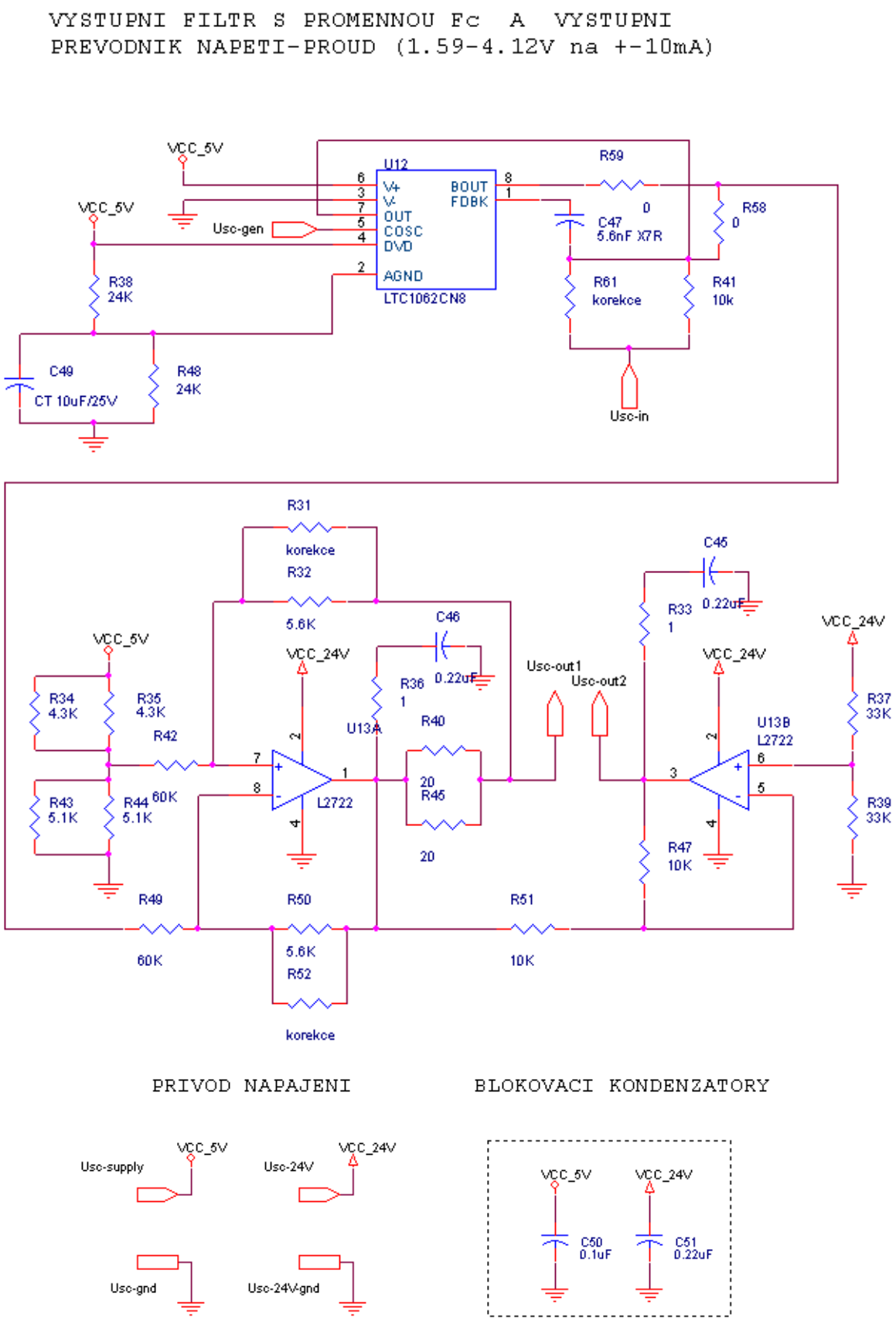


Obr. A. 7 - Schéma zapojení mikrospínače z hydraulického rozvaděče

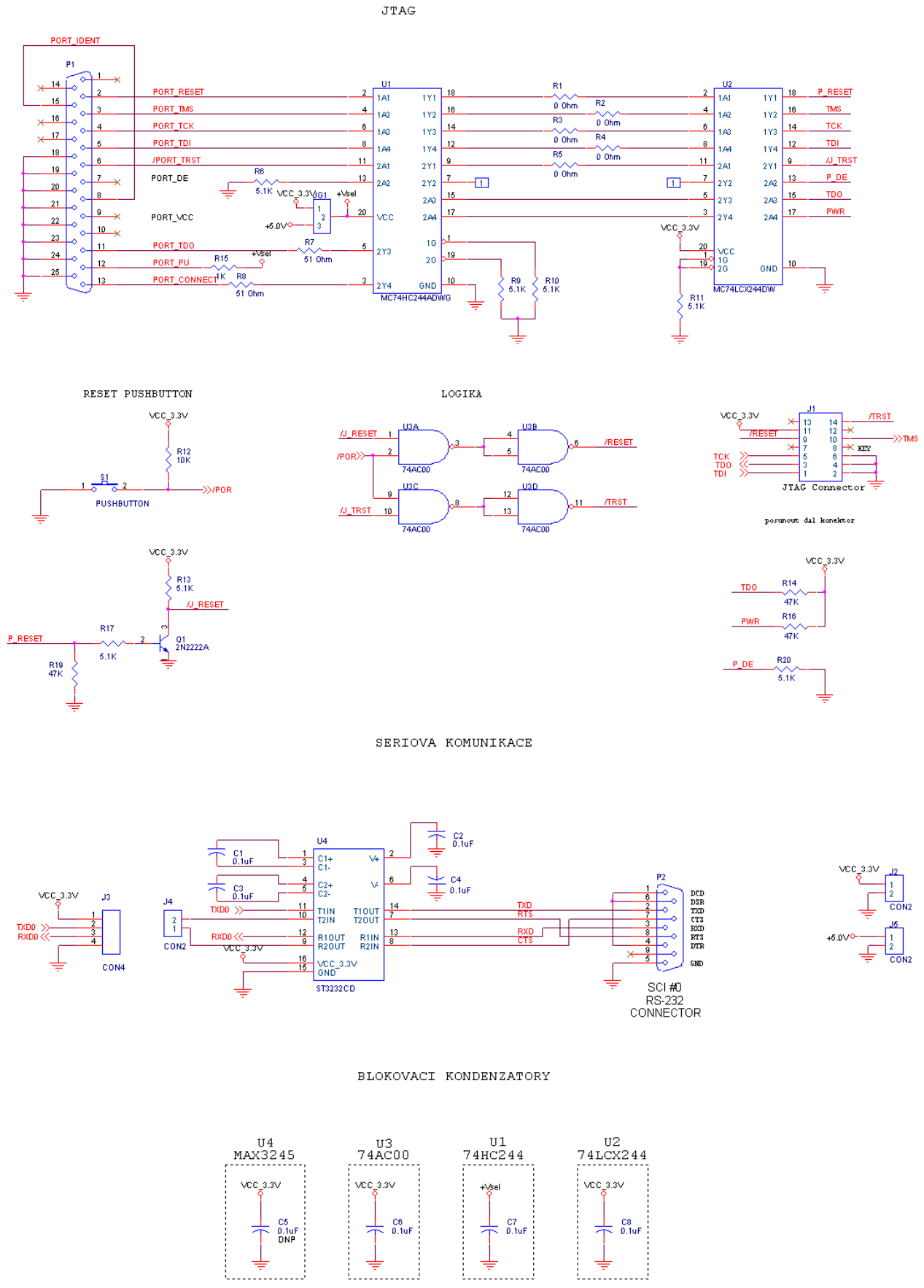
SPINAC ELEKTROMAGNETU HYDR. ROZVADECE



Obr. A. 8 - Schéma zapojení spínače elektromagnetu hydr. rozvaděče

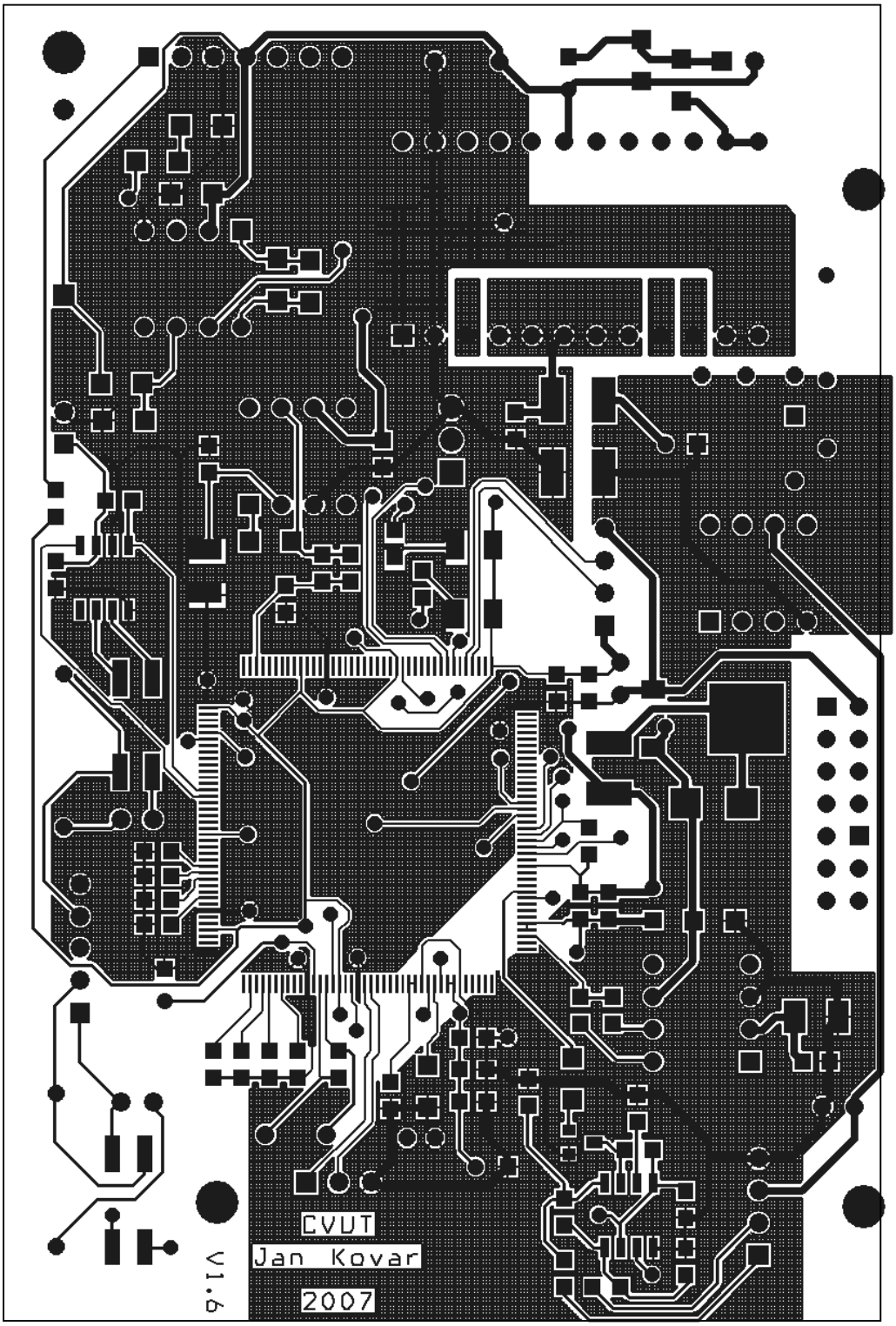


Obr. A. 9 - Schéma zapojení výstupního převodníku PWM – proud

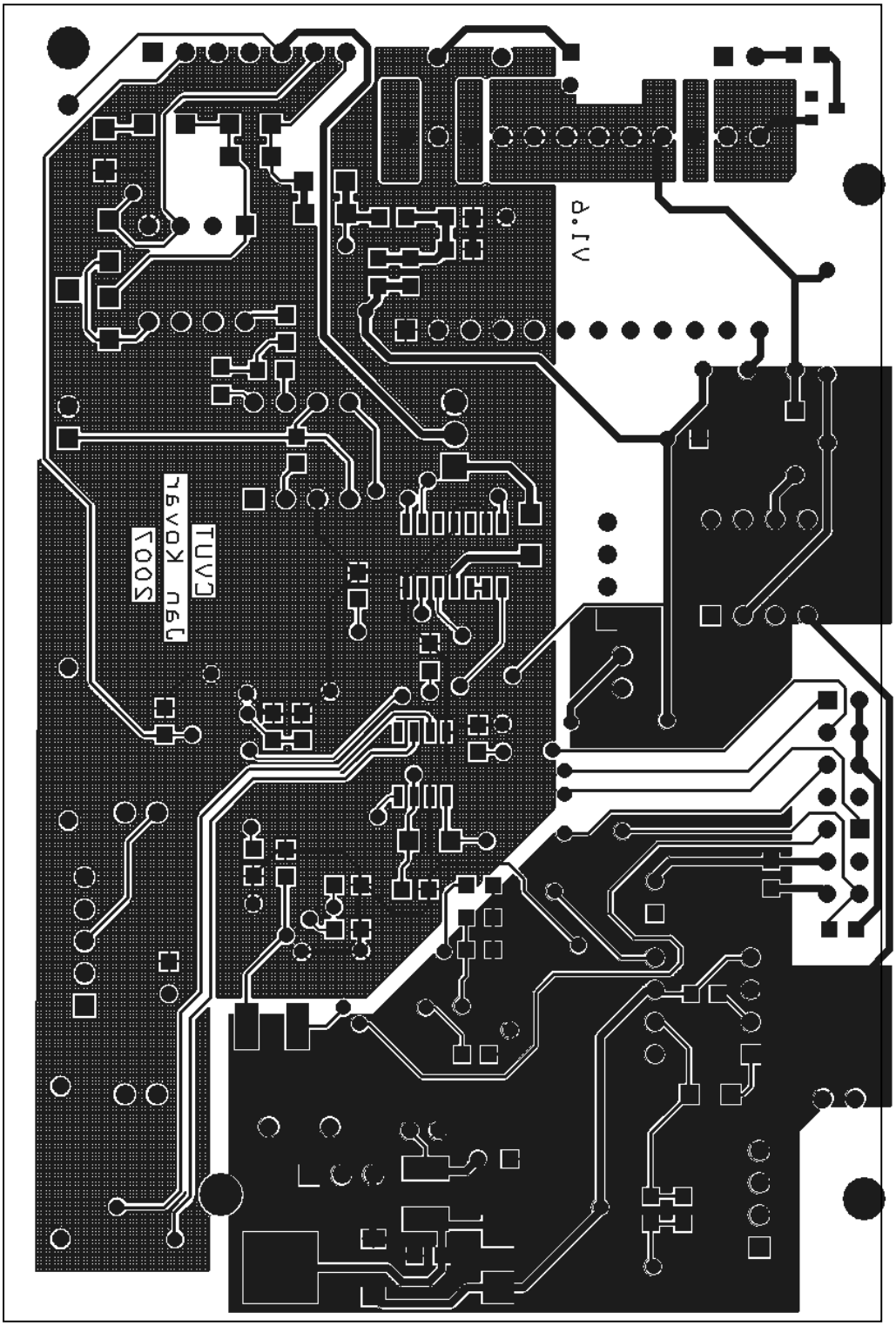


Obr. A. 10 - Schéma zapojení DEBUGunitu

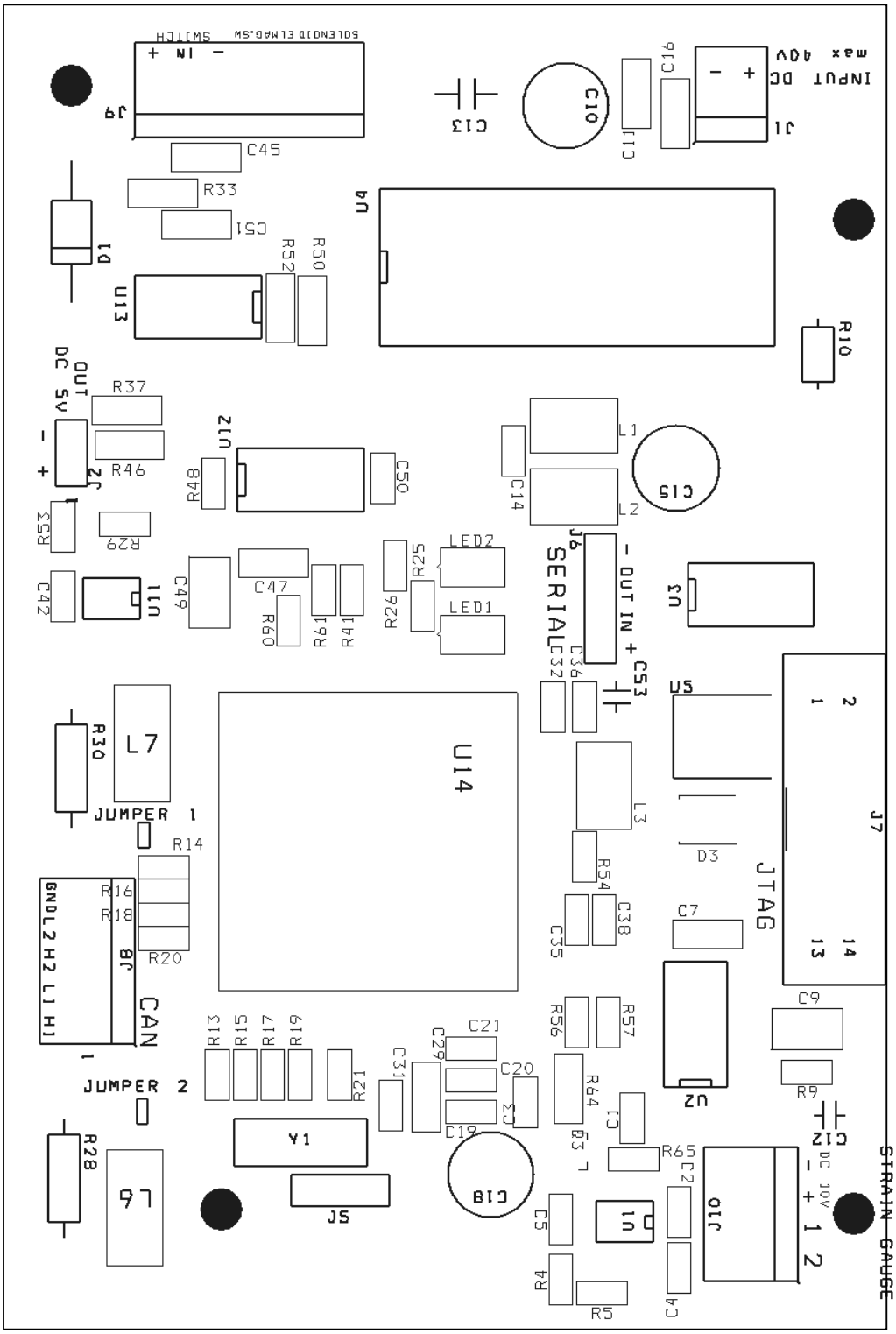
Příloha B - Plošné spoje a výrobní podklady



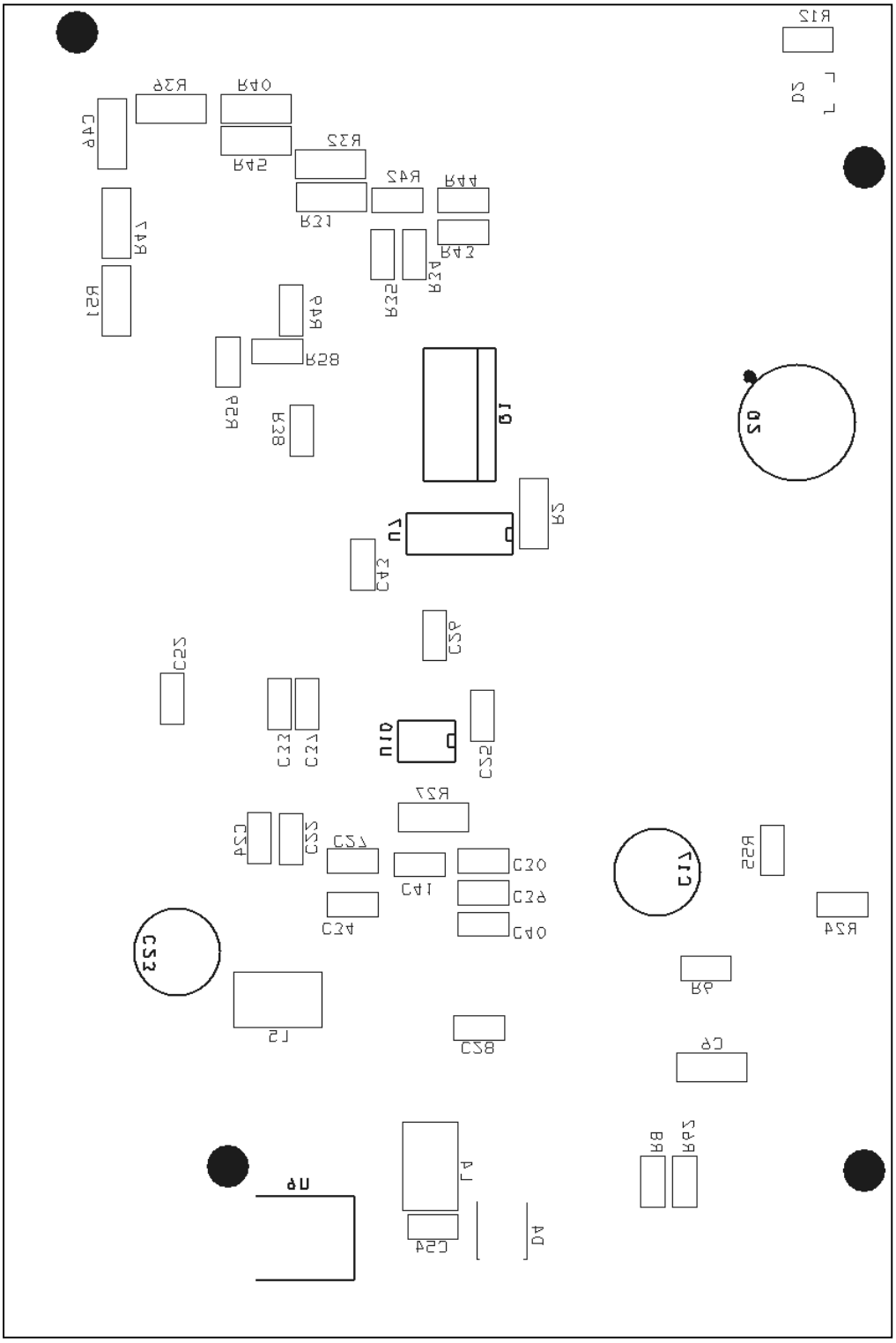
Obr. B. 1 - Vrchní vrstva DPS REGULATORu



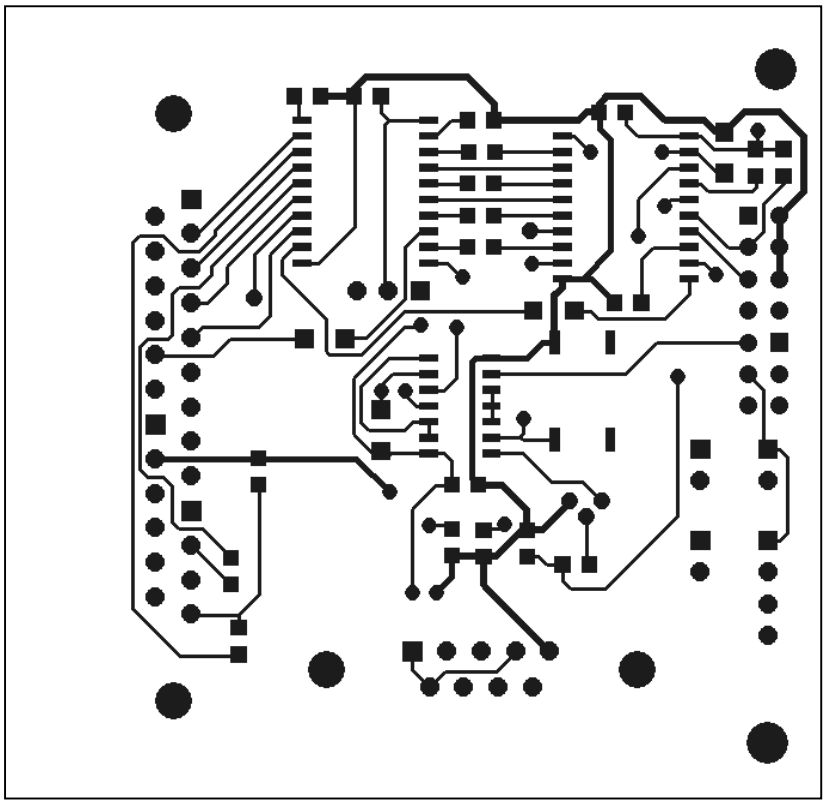
Obr. B. 2 - Spodní vrstva DPS REGULATORu



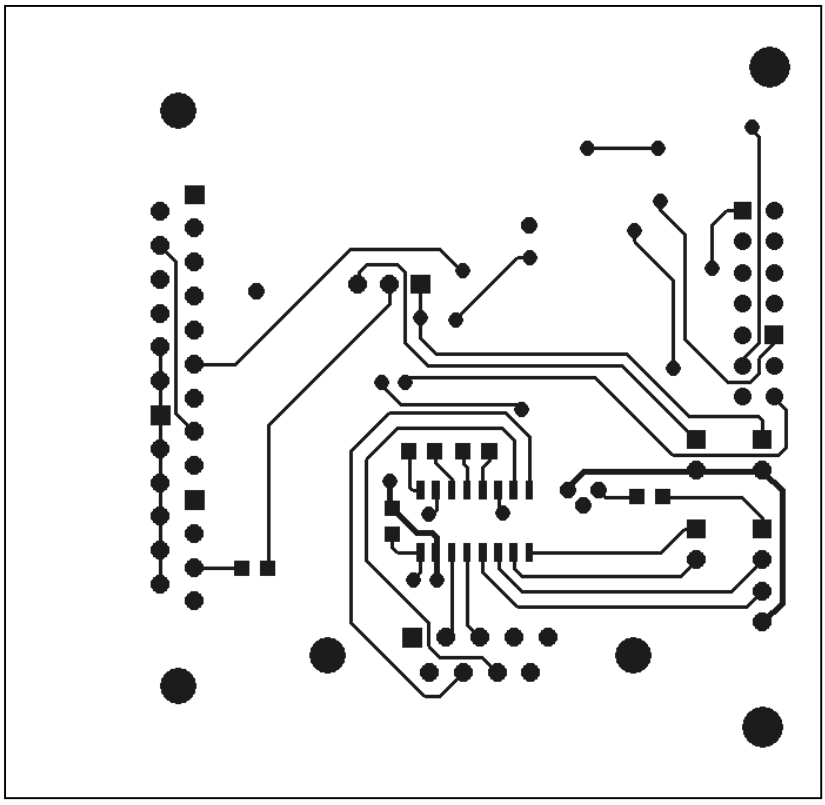
Obr. B. 3 - Vrchní sítotisková vrstva pouzder REGULATORu



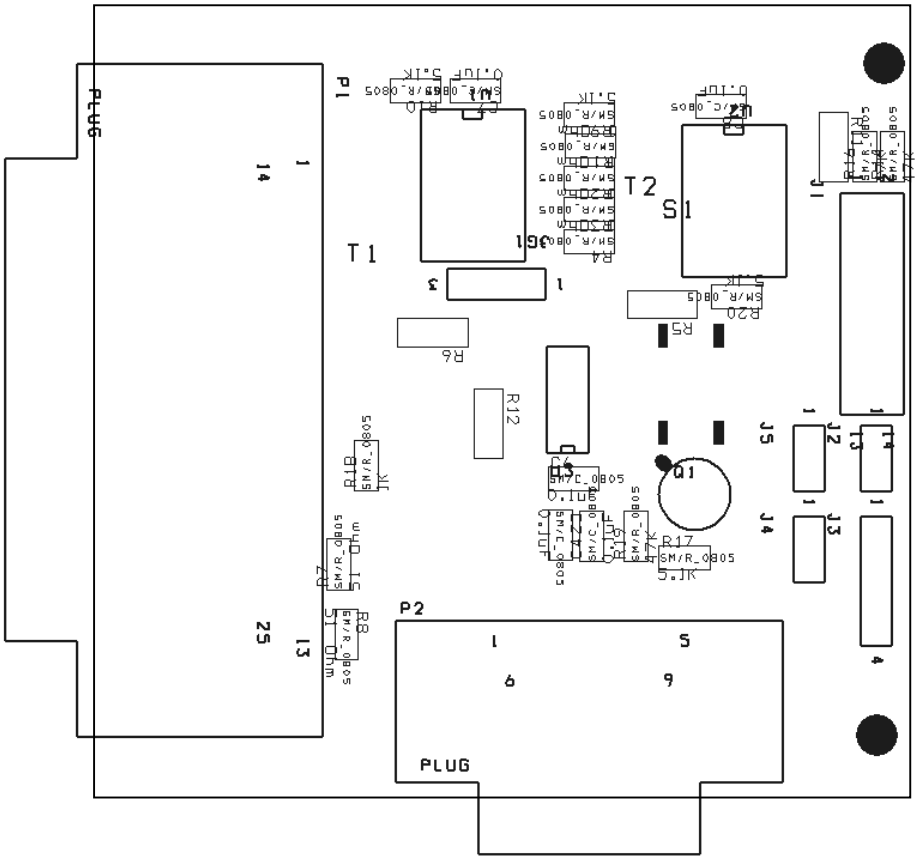
Obr. B. 4 - Spodní sítotisková vrstva pouzder REGULATORu



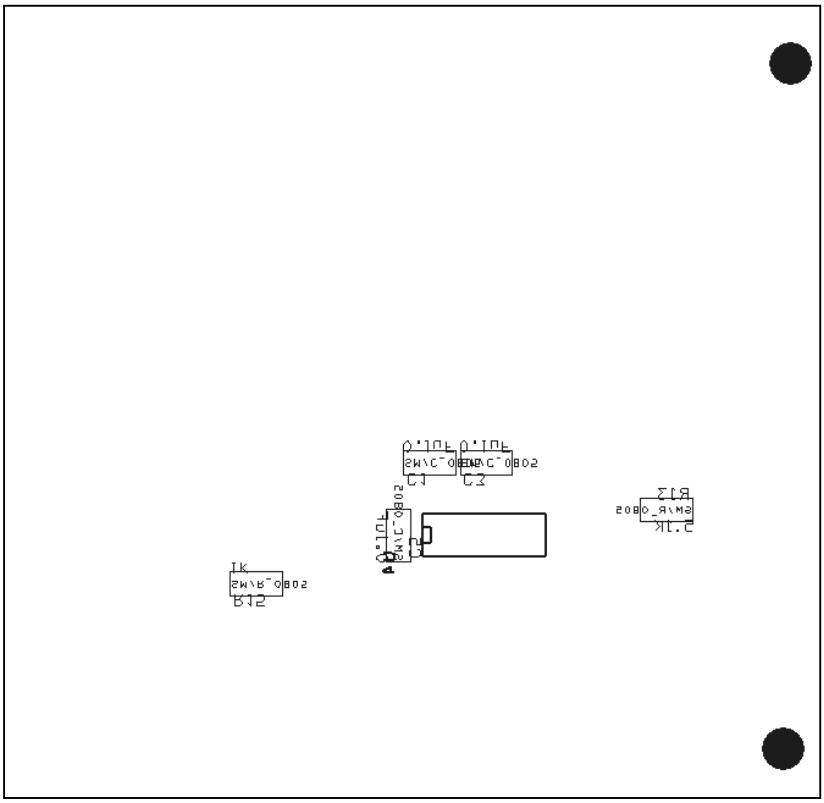
Obr. B. 5 - Vrchní vrstva DPS DEBUGunitu



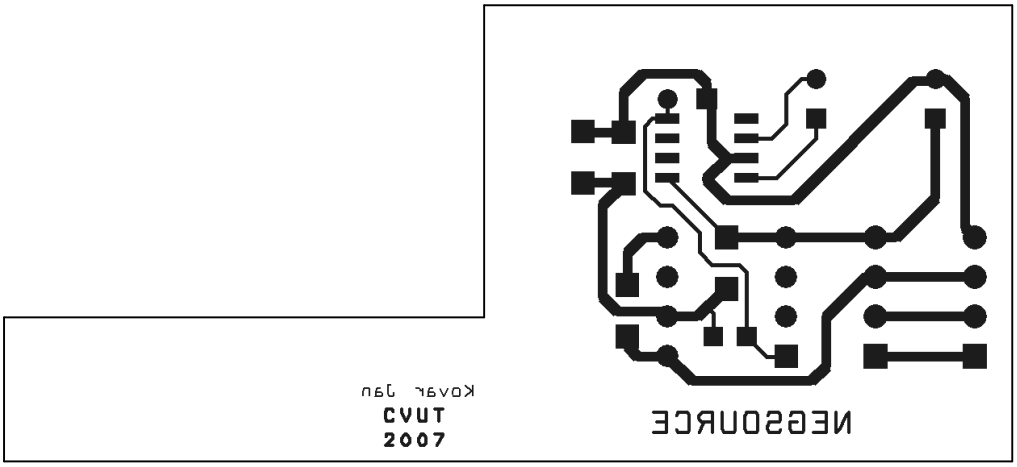
Obr. B. 6 - Spodní vrstva DPS DEBUGunitu



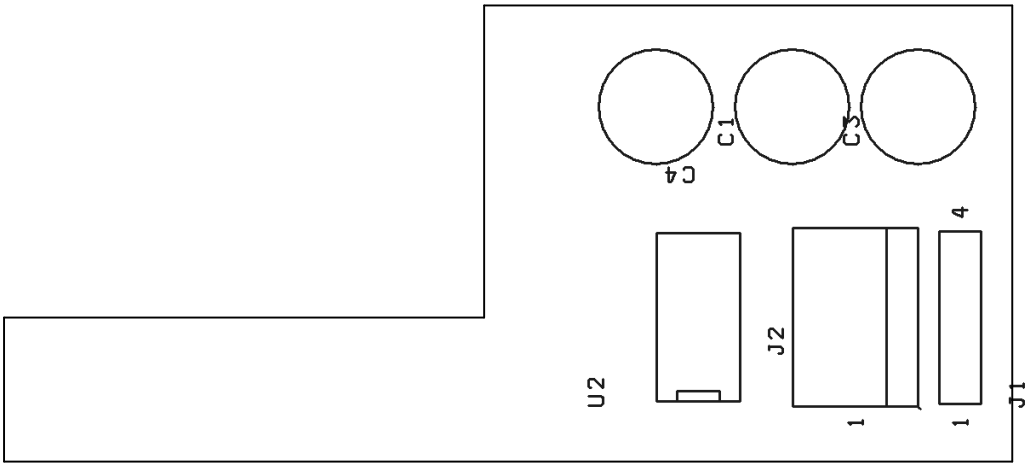
Obr. B. 7 - Vrchní sítotisková vrstva pouzder DEBUGunitu



Obr. B. 8 - Spodní sítotisková vrstva pouzder DEBUGunitu

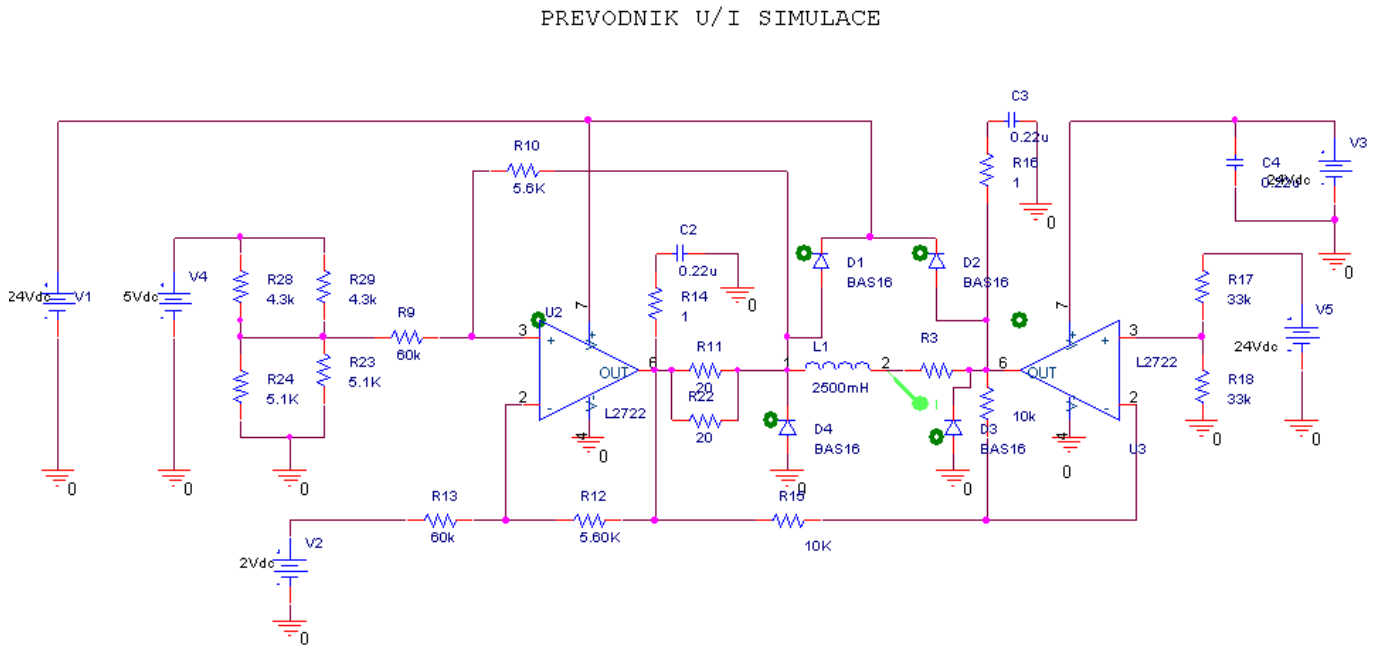


Obr. B. 9 - Spodní vrstva DPS NEGsource

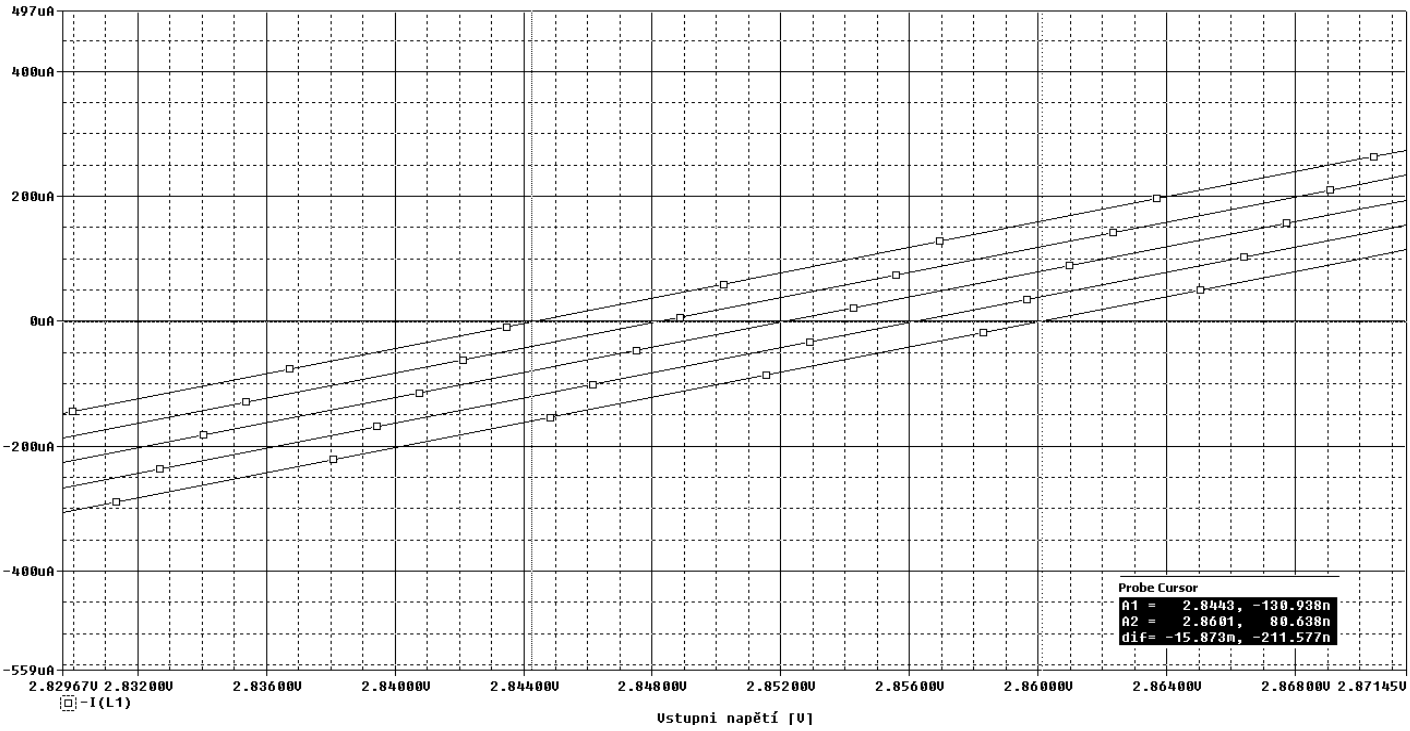


Obr. B. 10 - Vrchní sítotisková vrstva pouzder NEGsource

Příloha C - Obrázky k simulaci převodníku u/i



Obr. C. 1 - Simulační schéma výstupního převodníku u/i

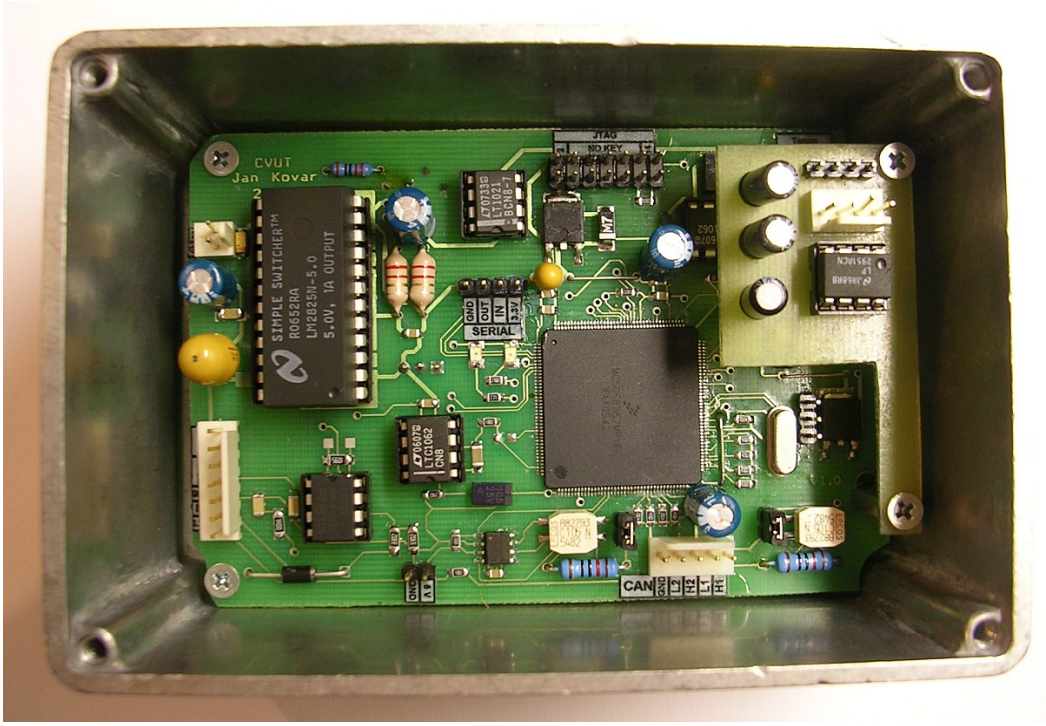


Obr. C. 2 - Detail simulace DC sweep

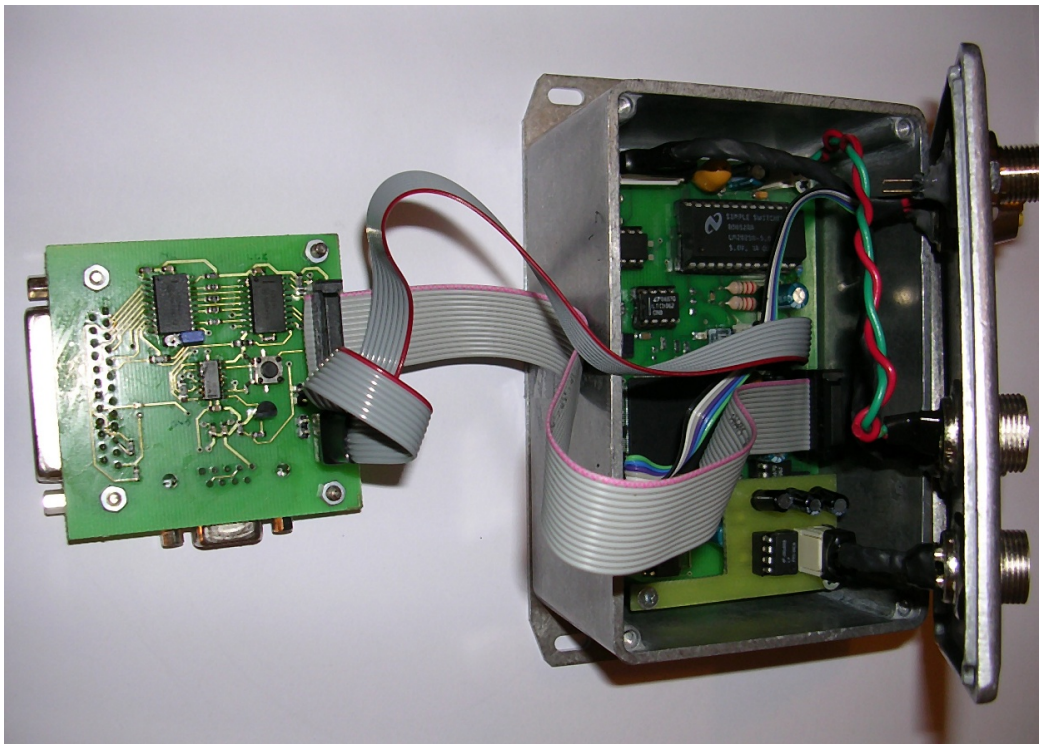
Příloha D - Slovník použitých zkratek

ADC	Analogově/digitální převodník
DPS, PCB	Deska plošných spojů
DSP	Digitální signálový procesor
MCU	Centrální blok rehulátoru, výpočetní jednotka
PWM	Pulzně šířková modulace
PWM signál	Pulzně šířkově modulovaný signál
REGULATOR	Jednotka regulátoru
DEBUGunit	Komunikační interface pro REGULATOR
NEGsource	Přídavný zdroj záporného napětí
HW	Hardware
SCF	Filtr se spínanými kapacitory
JTAG	Joint test action group port – programovací rozhraní
PC	Osobní počítač – pracovní stanice
CodeWarrior	Vývojové prostředí pro DSP
VF	vysokofrekvenční

Příloha E - Fotodokumentace



Obr. E. 1 - Pohled shora na výsledné zařízení



Obr. E. 2 - Pohled na propojené moduly REGULATOR a DEBUGunit

Obr. E. 3 - Jednotka REGULATOR s propojenýma výstupníma konektorama

Obr. E. 4 - Pohled na výsledný uzavřený box

Příloha F - Obsah CD

Na doprovodném CD lze nalézt tuto dokumentaci v PDF formátu, dále složku s navrhnutým schématem zařízení a výslednou navrhnutou DPS. Všechny navrhnuté zapojení a DPS jsou vytvářeny v programu OrCAD, a proto jsou výsledná přiložená data uložena ve formátu OPJ a MAX. Dále je přiloženo simulační schéma výstupního převodníku u/i.

Příloha G - Soupiska součástek

Rozteč	Pouzdro	Reference	Value
2.54mm	C010P	C10	E47u/16V electrolyt 105°C
2.54mm	C010P	C15	E47u/16V electrolyt 105°C
2.54mm	C010P	C17	E47u/16V electrolyt 105°C
2.54mm	C010P	C23	E47u/16V electrolyt 105°C
2.54mm	C010P	C18	E47u/16V electrolyt 105°C
2.54mm	C010	C12	CT 2,2uF/25V tantal
5.08mm	C020	C13	CT 47uF/35 tantal
2.54mm	C010	C53	CT 100uF/6.3V tantal
	SM/C_0805	C14	0.1uF
	SM/C_0805	C2	0.1uF
	SM/C_0805	C19	0.1uF
	SM/C_0805	C22	0.1uF
	SM/C_0805	C28	0.1uF
	SM/C_0805	C30	0.1uF
	SM/C_0805	C50	0.1uF
	SM/C_0805	C32	0.1uF
	SM/C_0805	C33	0.1uF
	SM/C_0805	C34	0.1uF
	SM/C_0805	C35	0.1uF
	SM/C_0805	C39	0.1uF
	SM/C_0805	C40	0.1uF
	SM/C_0805	C41	0.1uF
	SM/C_0805	C52	0.1uF
	SM/C_0805	C42	0.1uF
	SM/C_0805	C43	0.1uF
	SM/C_0805	C1	1nF
	SM/C_0805	C3	1nF
	SM/C_0805	C4	1nF
	SM/C_0805	C20	1nF
	SM/C_0805	C5	0.047uF

	SM/C_0805	C24	2.2uF
	SM/C_0805	C25	2.2uF
	SM/C_0805	C26	2.2uF
	SM/C_0805	C27	2.2uF
	SM/C_0805	C31	0.01uF
	SM/C_0805	C36	0.01uF
	SM/C_0805	C37	0.01uF
	SM/C_0805	C38	0.01uF
	SM/C_0805	C21	100pF
	SM/C_1206	C45	0.22uF
	SM/C_1206	C46	0.22uF
	SM/C_1206	C47	5.6nF X7R
	SM/C_1206	C6	5.6 nF X7R
	SM/C_1206	C16	CTS 0.1M/35V pouzdro A
	SM/C_1206	C7	CTS 0.1M/35V pouzdro A
	SM/C_1210	C9	CTS 10M/25V pouzdro C
	SM/C_1210	C49	CTS 10M/25V pouzdro C
	SM/C_1206	C29	0.1uF
	SM/C_1206	C11	0.1uF
	SM/C_1206	C51	0.22uF
	so14	U7	74AC04
patice DIL 8	DIP8	U13	L2722
14,61mm	DAX/DO41	D1	1N4007
	SM/SOT23_123	D2	BAS16 smd
	SM/_SMB	D3	1N4007 SMB DO-214AA
	SM/_SMB	D4	1N4007 SMB DO-214AA
5mm	XTAL020	Y1	QM 8MHz
	TO220AB	Q1	BD911
	TO39	Q2	2N2905
10.16mm	AX/RW81	L1	FASTRON AXIAL TL 2.2uH
10.16mm	AX/RW81	L2	FASTRON AXIAL TL 2.2uH
10.16mm	AX/RW81	L3	FASTRON AXIAL TL 2.2uH
10.16mm	AX/RW81	L4	FASTRON AXIAL TL 2.2uH
10.16mm	AX/RW81	L5	FASTRON AXIAL TL 2.2uH
obyc	BLKCON.100/VH/TM1SQS/W.100/2	J1	CON2
obyc	BLKCON.100/VH/TM1SQS/W.100/2	J2	CON2

obyc	BLKCON.100/VH/TM1SQS/W.100/	J3	
obyc	BLKCON.100/VH/TM1SQS/W.100/	J4	
obyc	BLKCON.100/VH/TM1SQS/W.100/3	J5	CON3
obyc	BLKCON.100/VH/TM1SQS/W.100/4	J6	CON4
obyc	BLKCON.100/VH/TM2OE/W.200/14	J7	HEADER 7X2
5 se zamkem	POLCON.100/VH/TM1SQS/W.300/5	J8	CON5
7 se zamkem	POLCON.100/VH/TM1SQS/W.300/7	J9	CON7
4 se zamkem	POLCON.100/VH/TM1SQS/W.300/4	J10	CON4
2.54mm	JUMPER100	JG2	HEADER 1X2
2.54mm	JUMPER100	JG3	HEADER 1X2
	SM/D_1206_12	I.01	LED 1206 RED
	SM/D_1206_12	I.02	LED 1206 GREEN
	SM/R_0805	R4	4.2K 1%
	SM/R_0805	R5	4.2K 1%
	SM/R_0805	R6	24K
	SM/R_0805	R9	24K
	SM/R_0805	R38	24K
	SM/R_0805	R48	24K
	SM/R_0805	R8	10K 1%
	SM/R_0805	R41	10K 1%
	SM/R_0805	R53	10K 1%
	SM/R_0805	R56	0
	SM/R_0805	R57	0
	SM/R_0805	R12	0
	SM/R_0805	R58	0
	SM/R_0805	R59	0
	SM/R_0805	R13	47K
	SM/R_0805	R14	47K
	SM/R_0805	R15	47K
	SM/R_0805	R16	47K
	SM/R_0805	R17	47K
	SM/R_0805	R18	47K
	SM/R_0805	R19	47K
	SM/R_0805	R20	47K
	SM/R_0805	R55	47K
	SM/R_0805	R26	270

	SM/R_0805	R25	270
	SM/R_0805	R21	1M
	SM/R_0805	R43	9.1K
	SM/R_0805	R35	9.1K
	SM/R_0805	R24	1K
	SM/R_0805	R29	1K
	SM/R_0805	R54	2.2K
	SM/R_0805	R34	korekce
	SM/R_0805	R60	50K
	SM/R_0805	R42	62K
	SM/R_0805	R49	62K
	SM/R_0805	R44	3.6K
	SM/R_1206	R52	korekce
	SM/R_1206	R2	220
	SM/R_1206	R50	5.6K
	SM/R_1206	R32	5.6K
	SM/R_1206	R40	20
	SM/R_1206	R45	20
	SM/R_1206	R27	1K
	SM/R_1206	R31	korekce
	SM/R_1206	R33	1
	SM/R_1206	R36	1
	SM/R_1206	R46	33K
	SM/R_1206	R37	33K
	SM/R_1206	R51	10K
	SM/R_1206	R47	10K
12.07mm	AX/RN55	R28	120 1W
12.07mm	AX/RN55	R30	120 1W
8.26mm	AX/.325X.100/.031	R10	220 0.6W
patice DIL 24W	DIP24	U4	LM2825-5
patice DIL 8	DIP.100/8/W.300/L.400	U12	LTC1062CN8
	ODDELOVAC-KOMPLETNI	L6	EPCOS-B82790-S0513-N201
	ODDELOVAC-KOMPLETNI	L7	EPCOS-B82790-S0513-N201
	8SOP150	U10	PCA82C250T
	8SOP150	U11	PCA82C250T
	LQFP-160-kopletni	U14	MC56F8367

patice DIL 8	DIP.100/8/W.300/L.400	U2	LTC1062CN8
	8SOP150	U1	AD8555
	TO252AA/DPAK	U5	MC33269DT-3.3
	TO252AA/DPAK	U6	MC33269DT-3.3
patice DIL 8	DIP8	U3	LT1021CN8-10