

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Ověření jednotlivých principů vyhodnocení
tenzometrických senzorů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš LEŇCZYK**
Osobní číslo: **E15B0160P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Ověření jednotlivých principů vyhodnocení tenzometrických senzorů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Ověřte jednotlivé typy možností vyhodnocení užitečného signálu z tenzometrických senzorů. Využijte, jak integrované řešení, tak řešení sestavené pomocí precizních diskretních součástek. Měření musí umožňovat obsluhu všech tří možných zapojení Wheatstoneova můstku s tenzometry.

1. Zpracujte rešerši zabývající se principy měření tenzometrických senzorů.
2. Navrhněte obvodová řešení pro měřicí přípravky s odlišnými topologiemi zapojení.
3. Tato řešení zpracujte do podoby funkčních vzorků.
4. Ověřte jednotlivé principy zpracování signálu při různých klimatických podmínkách.
5. Jednotlivé metody porovnejte dle různých parametrů, např. zabraná plocha na PCB, teplotní stabilita, přesnost měření nebo cena měřicího řetězce.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

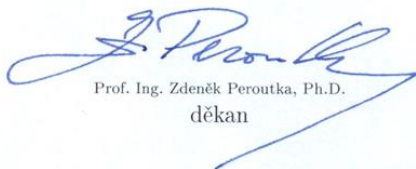
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jindřich Křivka

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá vlastnostmi jednotlivých druhů tenzometrických senzorů. V práci jsou popsány zejména možnosti jejich měření za pomoci Wheatstonova můstku. Elektronická zapojení pro vyhodnocení změn odporu tenzometrů byla navržena jak čistě analogová, tak i digitální. Měření byly prováděny na různých typech tenzometrů se simulovanou zátěží i se změnou klimatických podmínek.

Klíčová slova

Tenzometrické senzory, Wheatstoneův můstek, Operační zesilovač, Přístrojový zesilovač, Microcontroller

Abstract

This bachelor thesis deals with different types of strain gauge sensors and their features. The thesis is focused mainly to sensors measuring by using of the Wheatstone bridge. Electronic wiring to evaluate changes in strain gauge resistance has been designed both - purely analog and digital. The measurements were carried out on different types of strain gauges with simulated load and with different climate conditions.

Key words

Strain Gauge Sensors, Wheatstone Bridge, Operational Amplifier, Instrumentation Amplifier, Microcontroller

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 12.6.2019

Lukáš Leńczyk

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jindřichu Křivkovi za cenné profesionální rady a připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Zahourovi a Ing. Ondřeji Lufinkovi za poskytnuté konzultace a užitečná doporučení.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
1 TENZOMETRICKÉ SENZORY	10
1.1 PRINCIP FUNKCE.....	11
1.2 DRUHY KOVOVÝCH TENZOMETRICKÝCH SENZORŮ	12
1.2.1 Drátové.....	12
1.2.2 Vrstvové.....	12
1.2.3 Fóliové.....	13
1.3 VLASTNOSTI TENZOMETRICKÝCH SENZORŮ	13
1.4 LEPENÍ TENZOMETRICKÝCH SENZORŮ.....	15
2 WHEATSTONEŮV MŮSTEK	15
2.1 ČTVRTINOVÝ MŮSTEK.....	16
2.2 POLOVIČNÍ MŮSTEK.....	17
2.3 CELÝ MŮSTEK.....	17
3 OBVODOVÁ ŘEŠENÍ PRO ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU	18
3.1 NÁVRH DPS V1	19
3.1.1 Blokové uspořádání.....	19
3.1.2 Zapojení microcontrolleru.....	20
3.1.3 Zapojení zesilovacího prvku.....	21
3.2 VÝROBA DPS V1	22
3.3 ZPROVOZNĚNÍ DPS V1	23
3.4 NÁVRH DPS V2	24
3.4.1 Blokové uspořádání.....	24
3.4.2 Zapojení napájecích obvodů.....	25
3.4.3 Zapojení Microcontrolleru	26
3.4.4 Zapojení zesilovacích obvodů.....	27
3.5 VÝROBA DPS V2	29
3.6 ZPROVOZNĚNÍ DPS V2	30
3.7 KONTROLA NAPÁJENÍ.....	30
4 PROGRAMOVÉ ŘEŠENÍ	31
5 VYHODNOCOVÁNÍ UŽITEČNÉHO SIGNÁLU	31
5.1 JEDNOTLIVÁ MĚŘENÍ.....	32
5.1.1 Měření celý můstek.....	32
5.1.2 Měření čtvrt můstek.....	33
5.2 ZPRACOVÁNÍ ZA RŮZNÝCH KLIMATICKÝCH PODMÍNEK	35
5.2.1 Chování při změně teploty.....	35
5.2.2 Chování při změně vlhkosti ovzduší.....	37
5.2.3 Chyby měření.....	37
6 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ŘEŠENÍ	38
6.1 OBECNÉ POROVNÁNÍ	38
6.2 ZABRANÁ PLOCHA DPS.....	39
6.3 TEPLOTNÍ STABILITA	39
6.4 CENA MĚŘICÍHO KOMPONENTU	39
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	42
PŘÍLOHY	43

Úvod

V mé bakalářské práci pod názvem *Ověření jednotlivých principů a vyhodnocení tenzometrických senzorů* se na začátku stručně zabývám teoretickým úvodem, kterým bych chtěl přiblížit problematiku tenzometrických senzorů, princip jejich funkce, dále základní rozdělení a nejdůležitější vlastnosti. V druhé kapitole mé práce se věnuji problematice zapojení tenzometrů v obvodech Wheatstoneova můstku, který se využívá pro zpracování tenzometrických signálů.

Cílem mé práce je navrhnout a zrealizovat obvody řešení pro měřicí přípravky s odlišnými topologiemi, což je obsahem třetí kapitoly mé práce pod názvem *Obvodová řešení pro zpracování signálu*. Kapitola je zaměřená na analogové zpracování signálu s různými metodami řešení. Dalším cílem bylo dosáhnout funkční podoby měřících přípravků pro zpracování signálu z tenzometrických senzorů za pomoci Wheatstoneova můstku ve všech třech možných variantách zapojení. Následně provedu měření signálů mnou realizovanými měřícími zařízeními.

Měření bude prováděno za účelem získání statických a dynamických parametrů, ze kterých bude možné jednotlivá zařízení porovnat. Cílem bude také získat data při měření za různých klimatických podmínek. Měření dále doplním o digitální způsob zpracování signálu, za účelem širší možnosti porovnání.

Na základě získaných dat zrealizuji grafická řešení, ze kterých je možné jednotlivá zařízení porovnat. Dále je porovnám na základě jejich vlastností, zabrané plochy DPS, teplotní stability a ceny měřících komponentů.

1 Tenzometrické senzory

Úvodem bych rád sdělil základní informace o tenzometrech, princip jejich základní funkce a hlavní aplikace, ve kterých se tenzometrické senzory objevují v praxi.

Tenzometrické senzory jsou pasivní elektromechanické součástky, využívané jako snímače. Lze říci, že se jedná o převodníky, které snímáním mechanického namáhání a vlivem určitého druhu deformace mění své elektrické vlastnosti.

Počátky těchto snímačů sahají do roku 1938, kdy byl sestrojen první kovový drátový tenzometr. Od-té doby našly uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, zejména jako snímače tlaku nebo síly. Během let docházelo k modifikaci jak v technologii výroby, tak i v konstrukci v závislosti na druhu použití. V dnešní době existuje velké množství druhů, právě z důvodu širokého spektra použití. [1] [2]

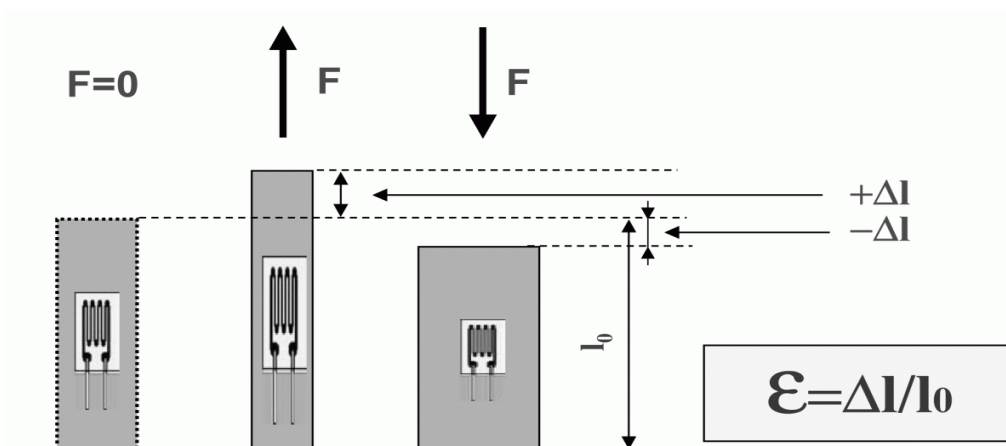
1.1 Princip funkce

Pro pochopení funkce tenzometrických senzorů je nutné si přiblížit tyto fyzikální a elektrické vztahy, bez kterých by nebylo možné jejich funkci vysvětlit.

Z obrázku (1.1.1) je viditelné, že vlivem mechanického namáhání (působící síla F) dochází ke změně délky vodiče Δl průřezu vodiče S a rezistivity ρ ; tyto změny jsou dány vztahem $R = \rho * \frac{l}{S}$, jehož výsledkem je odpor R . Veličina, která nám nejvíce ovlivňuje výsledný odpor, je změna délky Δl . Je zde využita meandrová struktura z důvodu maximalizace délky. Poměr odporu vyjadřujeme jako relativní změnu odporu vztahenou vůči nominální hodnotě odporu $\frac{\Delta R}{R_0}$. Změna délky Δl vůči nominální délce l_0 je dána

vztahem, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, který je charakterizován jako relativní deformace ε .

Pokud tyto veličiny dosadíme do vztahu $S = \frac{l_0 * \Delta R}{\Delta l * R_0} = \frac{\Delta R}{R_0 * \varepsilon}$, získáme jeden z nejvýznamnějších parametrů, a to koeficient S , který nám představuje součinitel deformační citlivosti. Ten se liší zejména s použitými materiály. [1] [2]



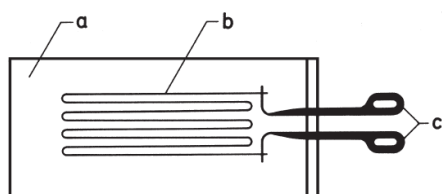
Obr. 1.1.1: Příklad funkce tenzometru při deformaci ε protažením o Δl působením síly $F \Rightarrow$ změna odporu o ΔR (převzato z [2])

1.2 Druhy kovových tenzometrických senzorů

Rozlišujeme tři základní druhy konstrukcí tenzometrů: drátové, vrstevné a fóliové. Tyto druhy se liší jak technologií výroby, tak svými vlastnostmi, či použitými materiály, naopak vyznačují se lineární změnou odporu vůči délce, která je žádoucí pro přesná měření. Rád bych přiblížil zejména drátové z důvodu historického vývoje a fóliové, které jsem zvolil pro účely své práce.

1.2.1 Drátové

Drátové tenzometry byly z historického hlediska první tenzometry, které se začaly využívat. Důvodem byla jednoduchá konstrukce, která je pro lepší představu zobrazena na obrázku 1.2.1. Lze ji rozdělit na tři základní části: nosný materiál (a), odporový drát (b) a připojovací vývody (c). Důležitý je zde zejména odporový drát, který je obvykle z konstantanu, z důvodu dobré teplotní stálosti (samořejmě používají i jiné materiály viz. přílohy tabulka (1.2.5). Ten je nalepen na nevodivé podložce, ze které jsou již vyvedeny pouze připojovací vývody.



Obr. 1.2.1: Drátový tenzometr (převzato z [1])

1.2.2 Vrstvové

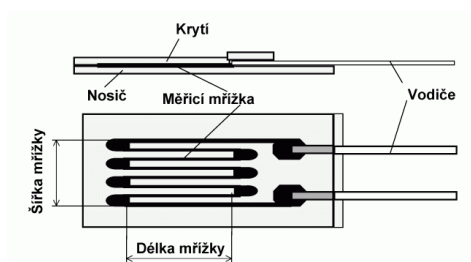
Vrstvové tenzometry lze rozdělit na dva druhy dle způsobu výroby: vakuové a naprašované. Tento druh našel uplatnění zejména jako snímač tlaku. Vyznačuje se dobrými reakcemi na změny tlaku. Jeho konstrukce je zobrazena na obrázku.



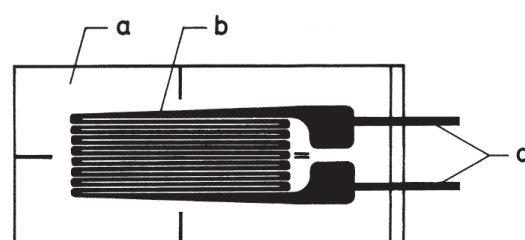
Obr. 1.2.2: Vrstvový tenzometr (převzato z [1])

1.2.3 Fóliové

Fóliové tenzometry jsou nejrozšířenějším typem kovových tenzometrů. Skladba je velmi obdobná jako v případě odporových tenzometrů vyobrazená na obrázku (1.2.4): nosný materiál (a), kovová fólie (b), připojovací vývody (c). Změna je zejména v použité kovové fólii, která se obvykle vyrábí fotolitografickou technologií. Její tloušťka se pohybuje okolo 3 až 6 μm . Jako materiál se používá zejména konstantan či karma (další vhodné materiály). Fólie je připevněná k nosnému materiálu obvykle z polyamidu nebo fenolovém filmu, který je vyztužován sklem. Výhodou je zejména upevnitelnost na tvarované povrchy díky ohebnosti. Udávaná životnost se uvádí 10 miliónů cyklů deformace vztaženou vůči změně rozměru délky o 0,5%, nebo vztaženou vůči změně délky rozměru 3mm/m. Hodnoty klidového odporu jsou obvykle 100,120,350,700,1000 Ω . fóliové provedení se vyznačuje dobrou proudovou zatížitelností až 100 A/mm².



Obr. 1.2.3: Fóliový tenzometr (převzato z [2])



Obr. 1.2.4: Fóliový tenzometr (převzato z [1])

1.3 Vlastnosti tenzometrických senzorů

Vlastnosti jednotlivých tenzometrů se liší v závislosti na typu, kvalitě, technologii výroby či použitém materiálu. Na jejich vlastnosti má vliv ještě mnoho dalších aspektů. Vzhledem k tomu je každá vyrobená série tenzometrů podrobena cejchování. Mezi významné vlastnosti, dle kterých se tenzometry posuzují, patří zde: linearita, teplotní stabilita, příčná citlivost tenzometru, krátkodobé či dlouhodobé zatížení.

- **Linearita**

Ideální závislost deformace jak pro zatížení, tak pro odlehčení je přímka, čili lineární závislost. Ve skutečnosti dochází k určité odchylce a vzniká tak lineární odchylka, která vytváří hysterezi. Pro snížení této nežádoucí vlastnosti se doporučuje provést před začátkem měření jeho cyklické zatížení, a to alespoň pětkrát v rozsahu větším, než je předpokládaná měřená deformace.

- **Teplotní stabilita**

Tenzometry jsou ovlivňovány teplotou vzhledem k roztažnosti materiálu, která má za následek ovlivnění měření změnou odporu. Míra ovlivnění teplotou závisí na použitých materiálech. Kompenzace těchto vlivů se provádí obvodovými zapojeními popsány v kapitole (2).

- **Příčná citlivost**

Lze rozlišit příčnou a podélnou citlivost tenzometru. Je snaha, aby citlivost v příčném směru byla co nejmenší a neovlivňovala tak měření. Tato citlivost je při deformaci způsobena danou šířkou tenzometru.

- **Krátkodobé konstantní a Dlouhodobé zatížení**

Vliv na krátkodobé konstantní zatížení má zejména kvalita nalepení tenzometru. Při nedodržení daného postupu či zanedbání jednotlivých kroků může docházet k posunu v místě lepení, což má za následek chybu měření.

Dlouhodobé zatížení má za následek relaxaci, jejíž projevem je pokles změřené deformace při konstantní deformaci. Změny jsou způsobeny únavou podložky, či vlastnostmi použitého lepidla.

1.4 Lepení tenzometrických senzorů

Vzhledem k velké citlivosti tenzometru je zapotřebí klást důraz na lepení tenzometru. Pro tyto účely se využívají lepidla přímo od daných výrobců tenzometrů. Vhodný typ se vybírá na základě podmínek měření v katalogu výrobce. Je nutné pro správnou funkci tenzometru striktně dodržet postup lepení. Ten se nachází na obalu tenzometru.

Obecný postup pro lepení je následující: Plocha umístění tenzometru musí být očištěna; pokud se jedná o lesklý povrch, je zapotřebí ho zdrsnit. Umístění se musí vhodně vyznačit a následně očistit a odmastit. Vhodné je zde použít přípravek doporučený výrobcem. Při vyjmutí tenzometru z obalu nesmí dojít ke kontaktu s jeho spodní stranou. Tenzometr se za pomoci průhledné lepicí pásky přenesse na vybrané místo a pak se páska odtrhne a na dané místo se nanese potřebné množství lepidla. V případě potřeby se tenzometr vhodně zabezpečí, aby nedošlo k jeho posunutí či jinému nežádoucímu jevu.

2 Wheatstoneův můstek

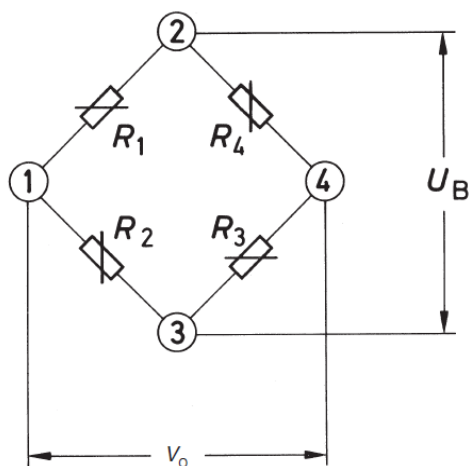
Vzhledem k velmi malé změně odporu tenzometru, řádově $\mu\Omega$, je velmi obtížné vyhodnocení změny odporu metodou přímého měření. Z tohoto důvodu se využívá zapojení do Wheatstoneova můstku.

Zapojení se skládá ze čtyř odporů: R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , které tvoří jednotlivá ramena můstku. Tímto spojením vzniknou čtyři uzly. Pokud připojíme uzly 2 a 3 ke zdroji konstantního napětí, mezi uzly 1 a 4 bude napětí nulové a můstek bude ve vyváženém stavu. Tento předpoklad platí, pokud je splněna podmínka $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$. Velikost výstupního

napětí je dána vztahem $V_0 = U_B \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$

Ke změně výstupního napětí dochází změnou některého z odporů. V aplikaci s tenzometry, se zde využívá změna jeho délky, tedy změna jeho odporu, která má za následek rozvážení můstku.

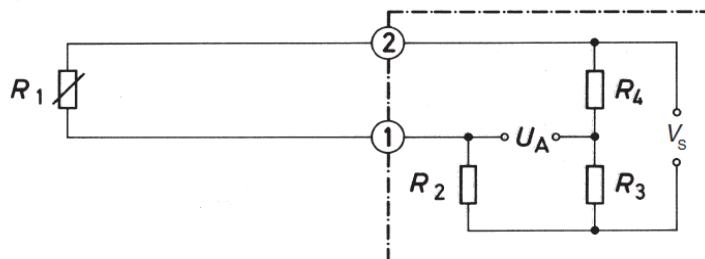
Rozlišujeme tři možná zapojení tenzometrů v můstku: čtvrt, půl a celý můstek. Z každého tohoto zapojení vychází odlišné vlastnosti výstupního signálu.



Obr. 2.1.1: Wheatstoneův můstek (převzato z [1])

2.1 Čtvrtinový můstek

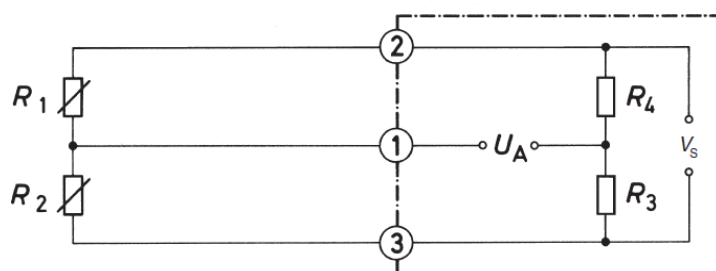
Jedná se o zapojení, které obsahuje jeden aktivní tenzometr spolu se třemi odpory. V tomto zapojení se ve velké míře projevuje nelinearita a teplotní nestabilita. Není zde možnost kompenzace působících teplotních změn.



Obr. 2.1.2: Čtvrtinový můstek (převzato z [1])

2.2 Poloviční můstek

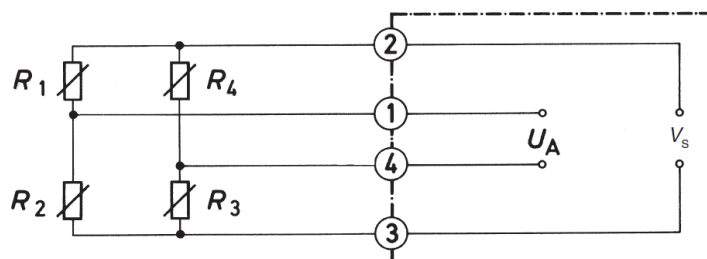
Možnost zapojení jedné aktivní dvojice je provedena za pomoci dvou tenzometrů a dvou odporů vyobrazených na obrázku (2.2.1). Zde je nutné zajistit stejné délkové změny obou tenzometrů a v případě použití tenzometrů se stejným odporem je zde kompenzována nelinearita. V případě působení stejných teplotních změn na oba tenzometry je zajištěna také jejich teplotní kompenzace.



Obr. 2.2.1: Poloviční můstek (převzato z [1])

2.3 Celý můstek

Jedná se o zapojení, kdy všechny odpory jsou nahrazeny tenzometry se stejnou hodnotou odporu. Je zde zajištěna jak kompenzace nelinearit, tak teplotní závislost odporu. Vzhledem k dobré stabilitě mají využití především pro přesná měření.

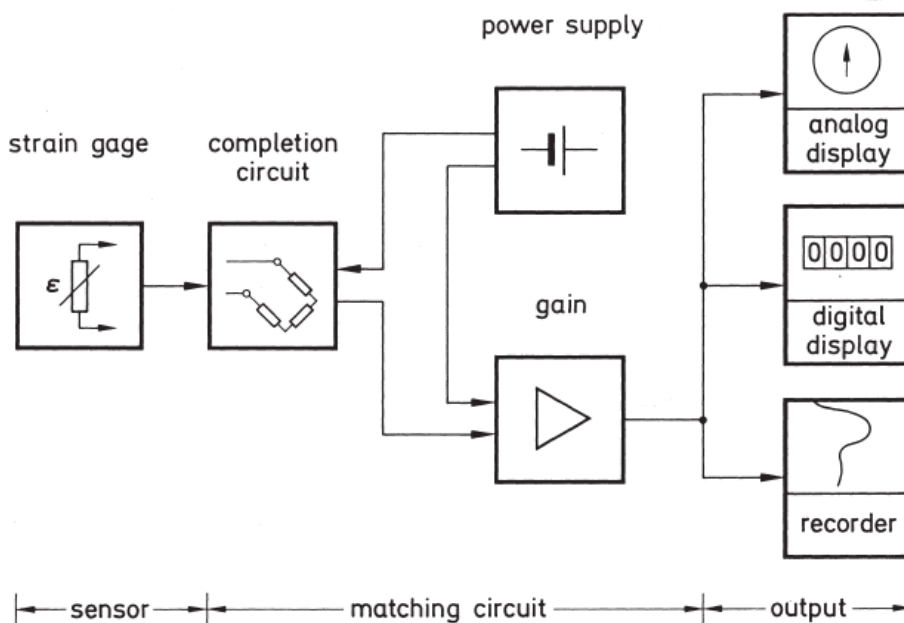


Obr. 2.3.1: Celý můstek (převzato z [1])

3 Obvodová řešení pro zpracování signálu

V této kapitole se budu zabývat návrhem a realizací obvodů pro zpracování a vyhodnocení signálu z Wheatstoneova můstku. Během postupného vývoje jsem narazil na určité nedostatky a byl jsem nucen přehodnotit původní předpoklady pro návrh obvodového řešení. Z tohoto důvodu jsem svou práci realizoval na dvou odlišných deskách plošného spoje (DPS). Z velké části se zde budu zabývat zejména DPS V2.

Základní myšlenka vycházela ze zjištěných základních informací. Úkol byl jednoznačný: získaný signál o velmi malé hodnotě (řádově v milivoltech) zesílit pomocí zesilovacího členu, abychom ho mohli efektivně využít. Následně analogový signál převést do digitální podoby. Převod nám umožnil zpracovat tento užitečný signál na hodnoty a ty odesílat do zařízení, které ho zobrazuje a zaznamenává. Vycházel jsem ze základního blokového schématu, do kterého jsem postupně volil jednotlivé komponenty.



Obr. 3.1.1: Schéma měřícího systému tenzometrů (převzato z [1])

3.1 Návrh DPS V1

První obvodové řešení jsem zrealizoval na základě teoretických předpokladů a zkušeností získaných z předmětů Vývojové práce na projektech 1/2 (VPP1/2). Jako návrhový systém jsem zvolil Altium Designer (verzi 18.1) vzhledem k jeho dobré ovladatelnosti, intuitivnosti a grafickému zpracování, které se mi opravdu zalíbilo. Výhodou byla také již zavedená knihovna součástek pro předměty VPP1/2, která mi značně zjednodušovala tvorbu schémat a nebylo tak nutné příliš součástek hledat či vytvářet.

3.1.1 Blokové uspořádání

První obvodové řešení se skládá ze dvou základních stavebních prvků: procesoru a zesilovače, který snímá signál z můstkového zapojení. Obvod disponuje dalšími zapojeními, která zmiňuji při rozboru schémat.

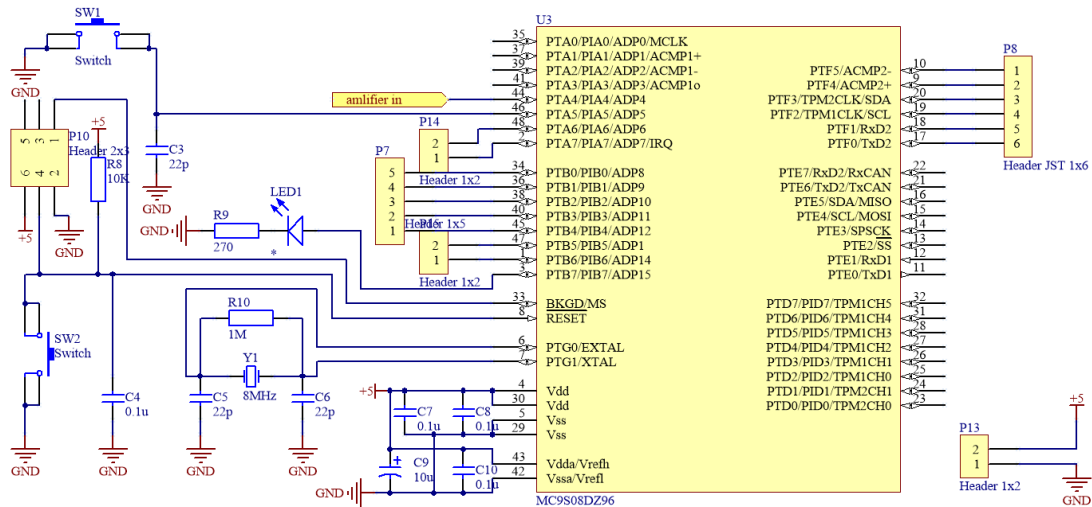


Obr. 3.1.2: Blokové schéma (DPS V1)

Základním prvkem obvodu je procesor MC9S08DZ60, který jsem použil na základě zkušeností z předmětů VPP1/2. Vyhovuje mi zejména z důvodu programovacího prostředí CodeWarrior, které jsem si velmi rychle osvojil a velice dobře se mi s ním pracovalo.

Zesilovací člen jsem sestavil z diskretních součástek a jejich celek tvoří přístrojový zesilovač. Výběr tohoto typu zesilovače jsem zvolil z důvodu vhodných vlastností tohoto zapojení, zejména velkého vstupního odporu, vysokým činitelem potlačení souhlasného signálu, či malou vstupní nesymetrií. Obvodová řešení jsem dále doplnil o prvky, které zjednodušují kontrolu funkce či diagnostiku problému.

3.1.2 Zapojení microcontrolleru



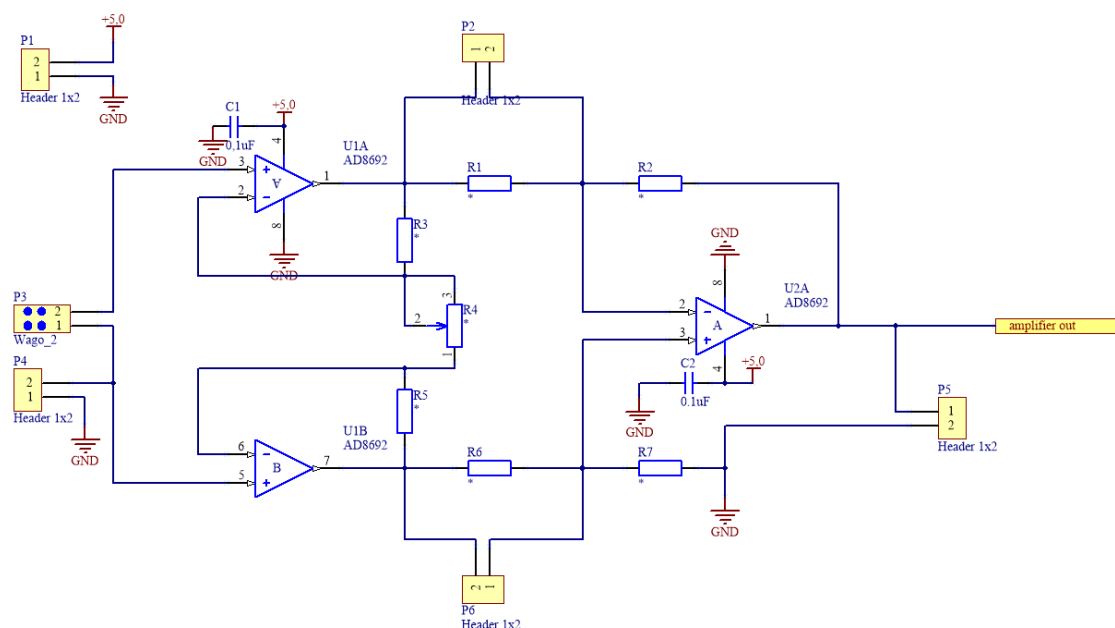
Obr. 3.1.3: Schéma zapojení microcontrolleru (DPS V1)

Ve schématu je vidět základní zapojení procesoru, které zahrnuje blokovací a filtrační kondenzátory na přívodu napájení (C7,C8,C9,C10), které mají vliv na stabilitu napětí. Dále je zde obvod krystalického oscilátoru (Y1,R10,C5,C6), ze kterého si microcontroller odvozuje frekvenci vnitřní sběrnice. Hodnoty těchto součástek jsem volil dle doporučení katalogového listu daného procesoru, abych zajistil jeho stabilní funkčnost. Programování je zde zajištěno přes konektor P10. Ten je dovybaven o resetovací spínač (SW2), který je v zapojení s odporem R8 v režimu pull-up. Kondenzátor C4 zde má blokovací funkci, což je žádoucí pro správnou funkci mikrospínače.

Dodatečně jsem zde zapojil led diodu (LED1), která slouží k rychlé vizuální kontrole, zda je měření aktivní. Tento způsob kontroly se mi osvědčil jako velmi užitečný. Spínač SW1 a konektory P7,P14,P15 jsem zde vyvedl pro případné další měření. Konektor P8 zde zajišťuje komunikaci, zejména Rx/D2 a Tx/D2, které slouží pro komunikaci s PC přes rozhraní UART – USB.

Přívod napájení pro microcontroller zajišťuje konektor P13. Toto napájení jsem oddělil od samotného zesilovače z důvodu možnosti lepší a rychlejší diagnostiky problému v případě nutnosti na již zhotovené desce. Signál ze zesilovače jsem přivedl na ADP4 (Pin 44 microcontrolleru), na jehož vstupu jsem si předem ověřil, že se zde nachází vstup A/D převodníku.

3.1.3 Zapojení zesilovacího prvku

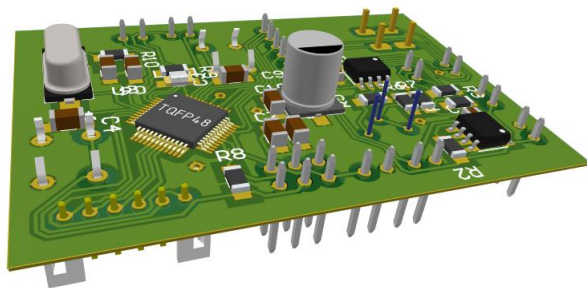


Obr. 3.1.4: Schéma zapojení přístrojového zesilovače (DPS V1)

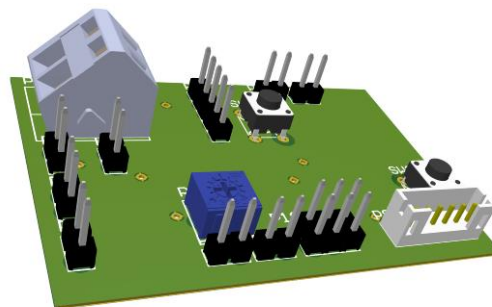
Pro realizaci obvodového řešení jsem zvolil operační zesilovač AD8692, který vzhledem k vlastnostem dostupnosti a ceně se jevil jako přijatelné řešení. Výhodou je zde také integrita dvou zesilovačů v jednom pouzdře. Obvodové zapojení je charakteristické pro přístrojový zesilovač s možností regulace jeho zisku pomocí trimru R4. Hodnoty jednotlivých odporů jsem zvolil dle požadovaných vlastností a následně jsem provedl simulaci v programu LTspice.

Obvod jsem doplnil o konektory (P2, P3, P5, P6), které slouží ke kontrole správné funkce. Na přívody napájení zesilovačů jsem umístil blokové kondenzátory (C1, C2). Měřený signál z můstku je zde přiveden na konektor P3 typu WAGO 236, ten jsem zvolil z důvodu velké přitlačné síly. Chtěl jsem tím co nejvíce zamezit nárůstu velikosti přechodového odporu na konektoru. Konektor P1 zde slouží k oddělenému napájení zesilovače, jak jsem již zmínil v kapitole (3.1.2). Výstup užitečného signálu do microcontrolleru je zde naznačen amplifier out.

3.2 Výroba DPS V1

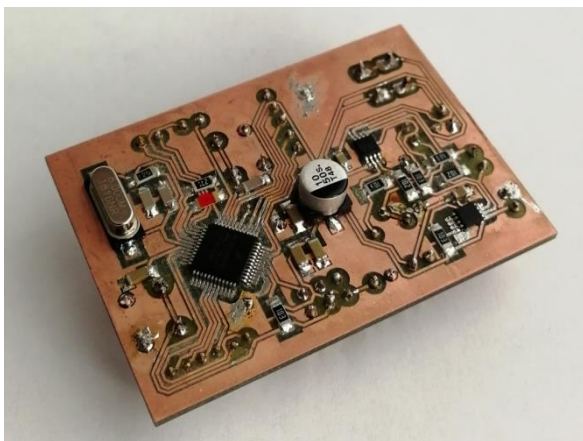


Obr. 3.2.1: 3D návrh (DPS V1)

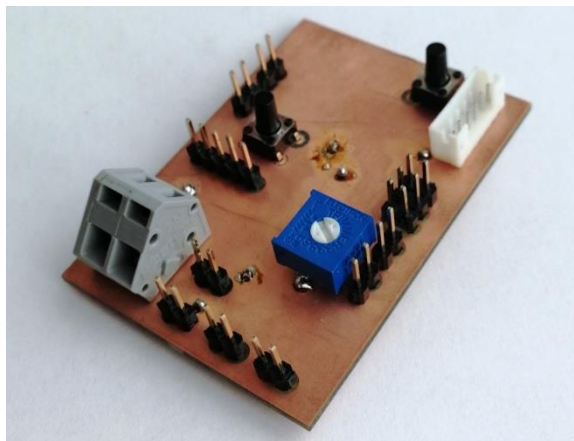


Obr. 3.2.2: 3D návrh (DPS V1)

Desku plošného spoje jsem zvolil oboustrannou, z důvodu efektivněji využitého prostoru plochy. Rozmístění jednotlivých součástek je vidět na 3D vizualizaci z programu Altium designer. V první řadě po obdržení desky z frézy jsem měděnou plochu očistil a prošel na zkratky, poté jsem osadil pasivní součástky následně zbylé smd komponenty. Konektory jsem pro jednodušší zapojení umístil z jedné strany, to mi značně usnadnilo osazování DPS. WAGO konektor jsem osazoval až jako poslední součástku, poněvadž její výška by omezovala dostupnost k ostatním konektorům. K tomuto postupu osazení jsem dospěl právě na základě 3D návrhu, z kterého tato komplikace byla viditelná a mohl jsem se jí vyvarovat. Na obrázku (3.2.3) a (3.2.4) je vidět reálně vyhotovená a osazená deska.



Obr. 3.2.3: Osazená DPS V1



Obr. 3.2.4: Osazená DPS V1

3.3 Zprovoznění DPS V1

Po kompletním osazení DPS jsem ještě jednou zkontroloval, zda není zkrat na napájení, a pokračoval jsem připojením napájecích obvodů microcontrolleru. Jako zdroj jsem zvolil laboratorní zdroj s proudovým omezením. Chtěl jsem se tímto způsobem vyvarovat případnému poškození součástek. Odzkoušení proběhlo úspěšně, funkčnost jsem si ověřil inicializací procesoru přes programovací převodník.

Následně jsem začal s kontrolou funkce obvodu zesilovače. Při připojení laboratorního zdroje jsem upozoroval indikaci proudového omezení. Obvod jsem odpojil a začal jsem pátrat po příčině problému. Měření za pomoci multimetru nevykázalo žádný zkrat či jiné pochybení. Příčinu jsem našel až po opětovné kontrole zapojení.

Závada byla způsobena otočeným napájením operačních zesilovačů. Bohužel, i přes proudové omezení došlo k poškození zesilovačů a musel jsem je vyměnit. Napájení jsem opravil pomocí drátových propojek. Zde se mi velmi osvědčilo oddělené napájení microcontrolleru a zesilovače, kdy jsem byl schopen rychleji odhalit příčinu problému.

Následný test po připojení napájení prokázal, že zapojení je již v pořádku a příčina byla odstraněna. Pokračoval jsem tedy ověřením funkce přístrojového zesilovače. Zde se vyskytl problém s výstupním signálem, jehož hodnota dosahovala saturačního napětí.

Přes veškeré snažení jsem tento problém na zhotovené desce již nebyl schopen vyřešit. Příčinou nefunkčnosti měření bylo zřejmě použití asymetrických součástek, které vedly k rozvážení celého zařízení. Po konzultaci s panem Ing. Jindřichem Křivkou jsem došel k závěru, že realizace tímto způsobem není vhodná a z tohoto důvodu jsem od daného způsobu řešení upustil.

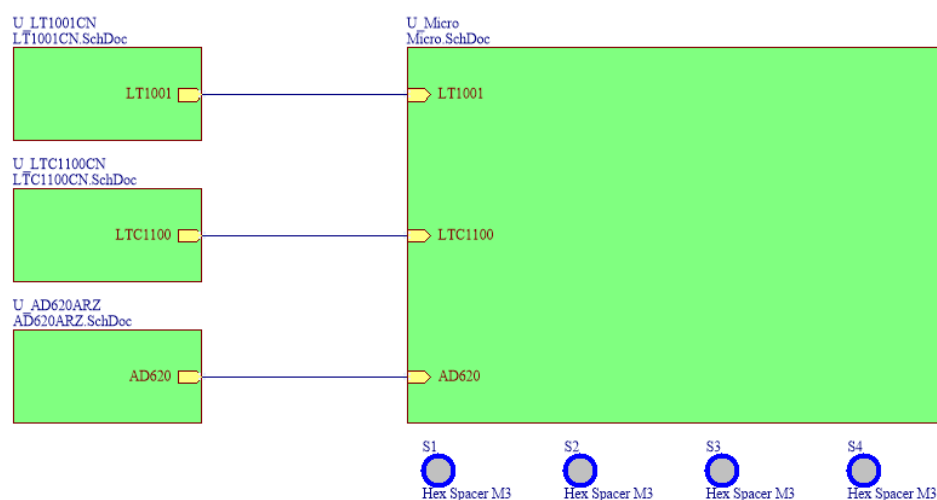
3.4 Návrh DPS V2

K tvorbě nového zařízení mě vedl zejména neúspěch při realizaci DPS V1. Během jejího vývoje jsem narazil na chyby, kterých jsem se snažil již vyvarovat. Po pečlivém prostudování různých zapojení jsem se rozhodl pro realizaci tří možných vyhodnocení na jedné DPS s možností připojení dodatečného měření externě.

Velkou výhodou pro mě byl přechod na novější verzi Altium designer (ver.19.0.12), který mi umožnil hledání vyhotovených součástek od jednotlivých výrobců přímo v programu. Ocenil jsem to zejména z důvodu rozsahu knihovny pro předmět VPP1/2, který již většinu součástek, které jsem použil, pro mou realizaci DPS V2 nezahrnoval.

3.4.1 Blokové uspořádání

Oproti předchozímu zařízení se způsob vyhodnocení rozrostl o další dvě varianty a původní přístrojový zesilovač sestavený z operačních zesilovačů jsem nahradil přístrojovým zesilovačem v jednom integrovaném pouzdře reprezentovaným AD620ARZ. Poté jsem použil přístrojový zesilovač LTC1100 s pevným zesílením a jako poslední variantu jsem zvolil zapojení s operačními zesilovači LT1001, které jsem zmodifikoval pro účely mého měření. Microcontroller jsem použil totožný jako na předchozí desce, vzhledem k dostačujícímu počtu vstupů A/D převodníku. S nárůstem jednotlivých měření se mi zde vyskytla komplikace v podobě různých napěťových hladin, které jsem musel zajistit pro správnou funkci jednotlivých zařízení.



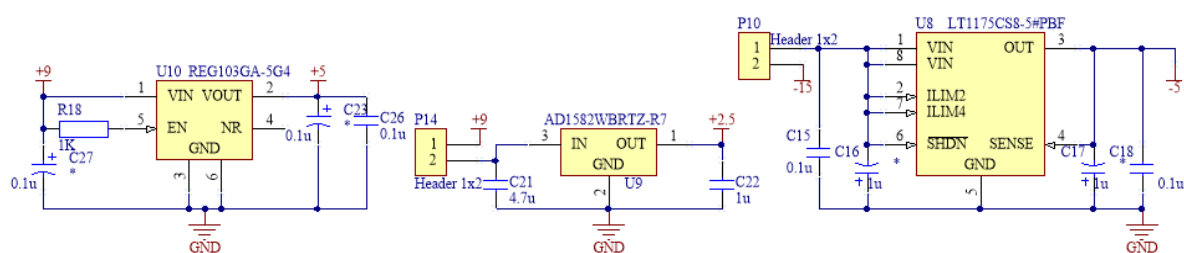
Obr. 3.4.1: Blokové schéma (DPS V2)

3.4.2 Zapojení napájecích obvodů

Jak jsem již zmínil, bylo nutné pro každý měřicí obvod zajistit napájení. Obvody přístrojových zesilovačů jsou napájeny symetrickým napájením +5V -5V, kdežto obvod se zesilovači LT1001 +15V -15V. Vzhledem k výstupnímu signálu z můstku, jehož napěťová hladina se pohybuje okolo nulových hodnot, bylo nutné zavést referenční napětí 2,5V pro přístrojové zesilovače, aby bylo zajištěno, že výstupní signál pro A/D převodník nedosáhne záporných hodnot napětí.

Z důvodu ovlivňování výstupního signálu můstku rušením, kterému jsem chtěl zamezit, bylo zapotřebí zajistit oddělený zdroj napájení. Z tohoto důvodu jsem zvolil chemický zdroj 9V baterii, ze které bylo zapotřebí dodávat +5V napájení pro můstek a microcontroller, tento požadavek baterie zajistila zcela dostatečně.

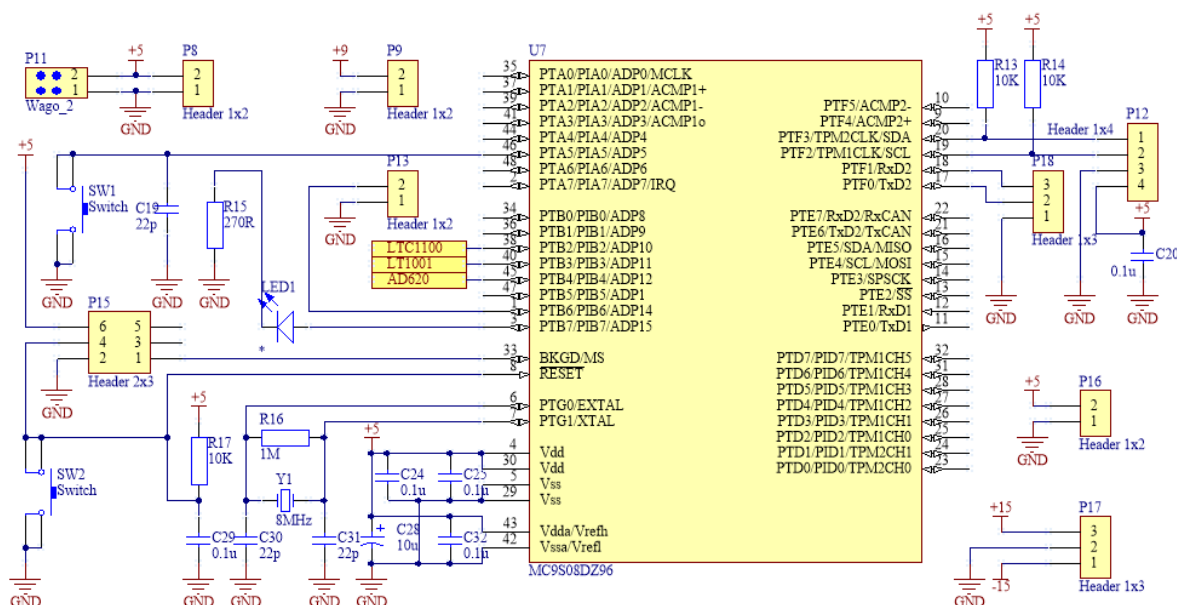
Vzhledem k počtu odlišných napěťových hladin jsem vyloučil řešení s laboratorními zdroji pro každé napětí. Realizaci jsem provedl za pomoci tří lineárních stabilizátorů. Jejich zapojení jsem zrealizoval dle katalogových doporučení jednotlivých výrobců. Tím jsem zredukoval počet potřebných napájecích napěťových hladin na +15V -15V a 9V. Napájení 9V je zajištěno pomocí baterie, ostatní napětí zajišťují stabilizátory, jak je naznačeno ve schématu (3.4.2).



Obr. 3.4.2: Schéma zapojení napájení (DPS V2)

3.4.3 Zapojení Microcontrolleru

Zapojení microcontrolleru je obdobné jako v případě DPS V1, vzhledem k použití stejného typu procesoru, proto bych rád zmínil zejména komponenty, o které jsem původní zapojení doplnil.



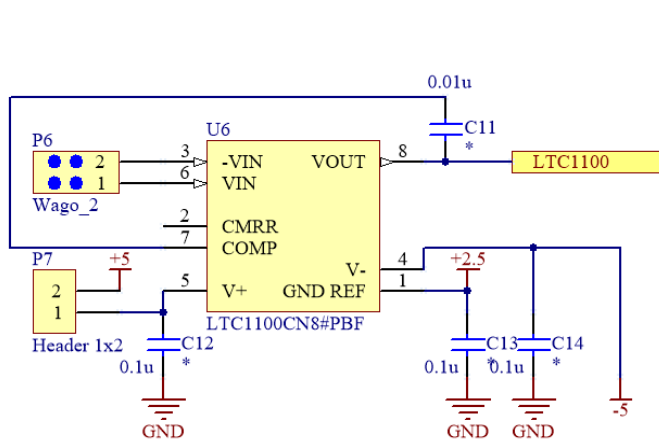
Obr. 3.4.3: Schéma zapojení microcontrolleru (DPS V2)

Konektor P11 typu WAGO 236 jsem zde umístil pro napájení můstku, kterým jsem chtěl zajistit stabilitu připojení napájení při drobných otřesech. Konektory P8 a P16 jsou zde pro připojení dodatečných zařízení a také mi posloužily při postupném zprovoznění měřicího přípravku. Konektor P9 je zde pro připojení baterie. Konektor P12 je zde jako příprava pro komunikaci přes sběrnici I²C v případě potřeby. Rozhraní UART-USB je zde obdobné s rozdílem v tří-pinovém konektoru s přivedenou zemí, což se ukázalo jako velmi praktické vzhledem k požadavku převodníku na tuto svorku.

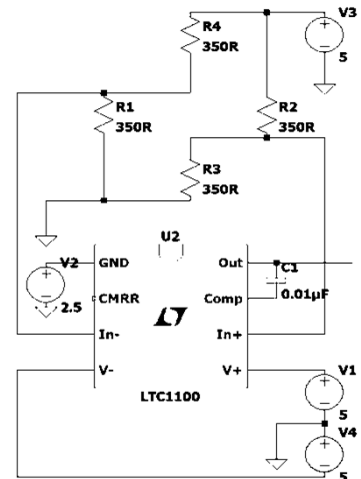
3.4.4 Zapojení zesilovacích obvodů

- **LTC1100**

Zesílení signálu zde zajišťuje přístrojový zesilovač LTC1100. Jedná se o precizní zesilovač s pevným zesílením $G = 100$. Jeho předností je zejména napěťový drift $5\text{nV}/^\circ\text{C}$. Na obrázku (3.4.4) je vidět zapojení zesilovače dle katalogového listu. Zařízení jsem nejdříve prověřil v programu LTspice, zda je vhodné vzhledem k jeho vyšší ceně.



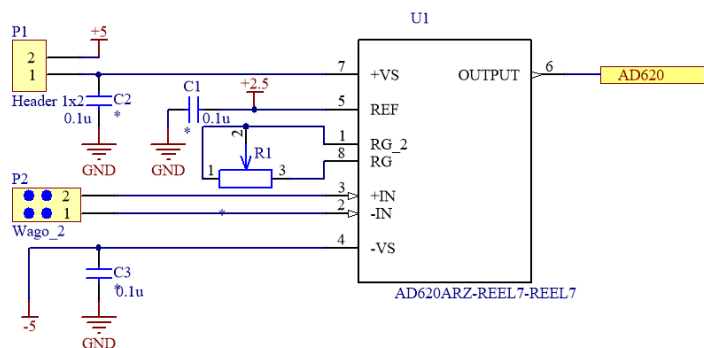
Obr. 3.4.4: Schéma zapojení LTC1100 (DPS V2)



Obr. 3.4.5: Sch. simulace LTC1100

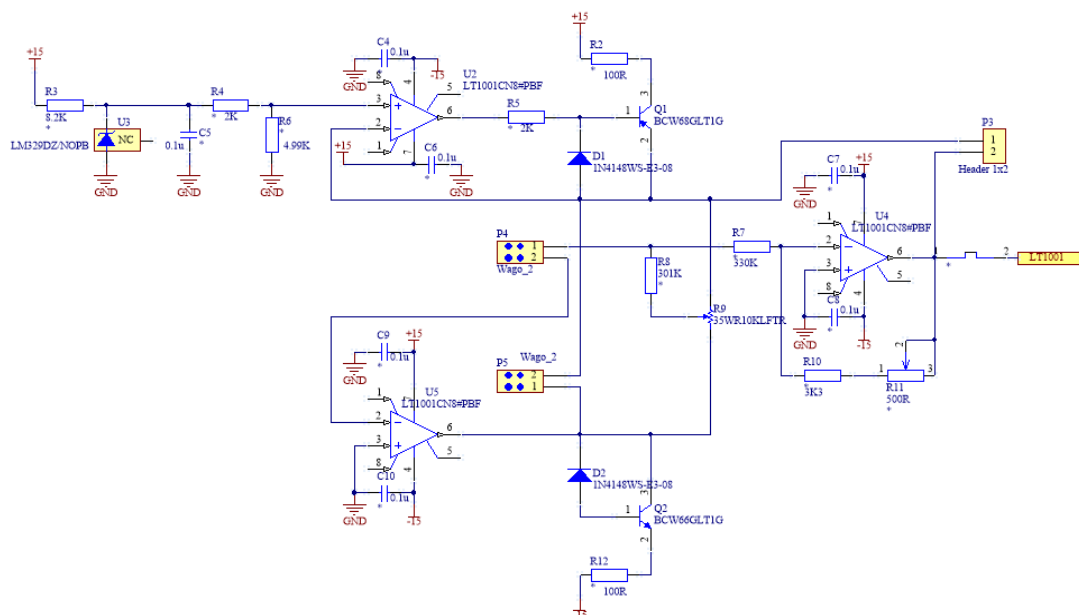
- **AD620**

Jako druhou variantu jsem zvolil přístrojový zesilovač v nižší cenové třídě AD620 s regulovaným ziskem, který mi zajistil přizpůsobení zesílení tak, aby bylo daná měření možno porovnat. Tento zesilovač disponuje napěťovým driftem $0,6\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Z obrázku (3.4.5) je patrné zapojení, které se liší pouze v trimru R1, který zde slouží pro přizpůsobení zisku. Dle katalogového listu jsem ověřil, že tento zesilovač je vhodný pro měření výstupního signálu z Wheatstoneova můstku.



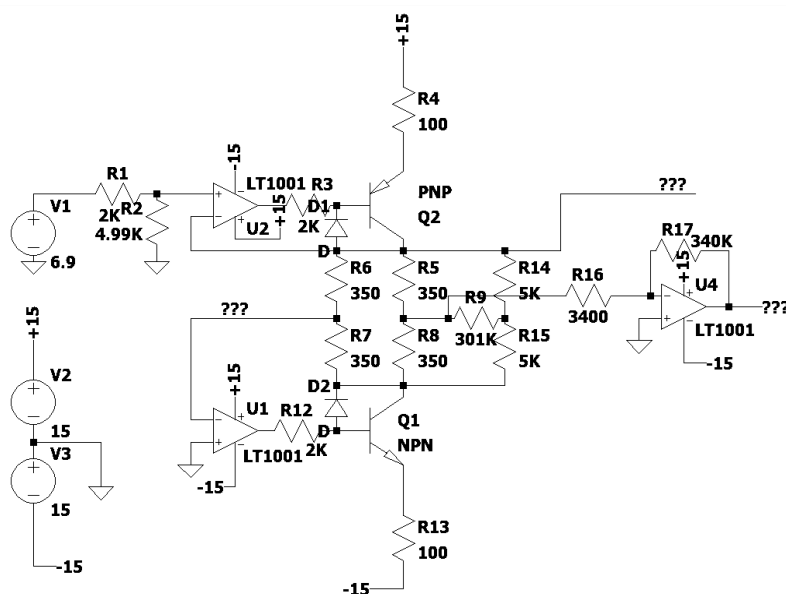
Obr. 3.4.5: Schéma zapojení AD620 (DPS V2)

- **LT1001**



Obr. 3.4.6: Schéma zapojení LT1001 (DPS V2)

Při návrhu měřicího zařízení s operačními zesilovači typu LT1001 jsem vycházel ze zapojení uvedeném v katalogovém listu. Bohužel toto zapojení neumožňovalo přímé připojení Wheatstoneova můstku. Vzhledem k tomu jsem obvod upravil vhodným způsobem, který mi tuto možnost zajistil. Provedl jsem simulaci pro ověření správné funkce obvodu. Výstup zařízení se pohyboval v záporných hodnotách napětí, což bylo nevhodné pro zpracování. Tento problém jsem vyřešil záměnou zapojení neinvertujícího zesilovače za invertující. Dle simulace jsem předpokládal správnou funkčnost zařízení. Na základě měření vyplynulo, že obvod LT1001 má vadu a nijak nereaguje na změny na výstupu můstku.



Obr. 3.4.7: Schéma simulace LT1001

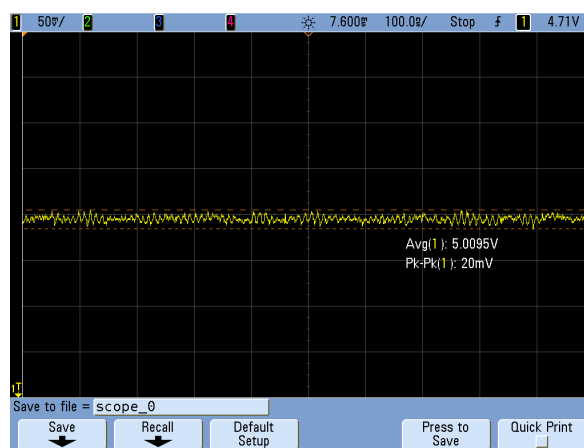
3.6 Zprovoznění DPS V2

Při osazování DPS jsem průběžně kontroloval, zda nedochází ke zkratům. Postup byl velmi obdobný jako v případě DPS V1. Ověřoval jsem napěťové hladiny získané na výstupech lineárních stabilizátorů, poté jsem připojoval napájení jednotlivých měřících obvodů. Zařízení po této kontrole nevykazovalo žádné problémy. Inicializace microcontrolleru proběhla úspěšně.

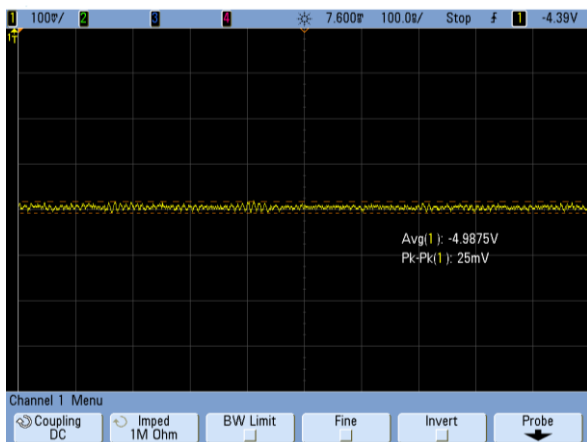
3.7 Kontrola napájení

Jak jsem již zmínil, vzhledem k možnosti ovlivnění užitečného signálu z můstku rušením napájecí soustavy jsem použil 9V baterii, která zamezila tomuto vlivu. Pro ověření jejího efektu použití v této aplikaci jsem provedl kontrolu napájecích obvodů za pomoci osciloskopu.

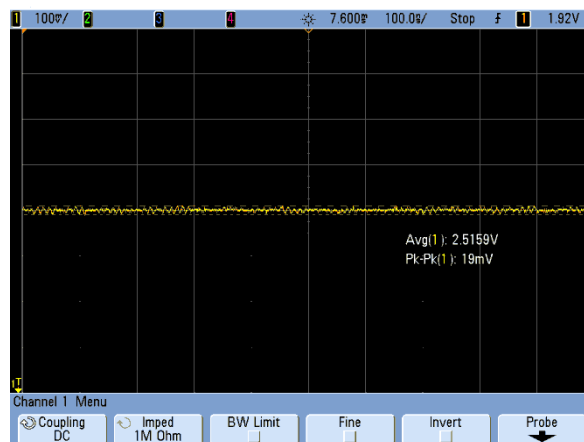
Na základě grafů lze říci, že napájení dodané z baterie je stabilní v mezi 20mV, což je hranice šumu vlastního osciloskopu a jeho připojení k měřícím přípravkům. Stabilita -5V hladiny napětí dodané lineárním stabilizátorem je vzhledem k +5V hladině přijatelná. Referenční napětí +2,5V vykazuje velmi dobrou stabilitu.



Obr. 3.7.1: Napěťová hladina napájení +5V



Obr. 3.7.2: Napěťová hladina napájení -5V



Obr. 3.7.3: Napěťová hladina napájení +2,5V

4 Programové řešení

Bylo nutné zajistit přenos dat z jednotlivých vstupů A/D převodníku do PC, aby je bylo možné zobrazit a dále zpracovat. V prostředí Codewarrioru jsem nastavil základní parametry pro správnou funkci procesoru, poté periférii pro A/D převodník, a pro komunikaci s PC jsem zvolil externě připojený převodník USB – UART. Pro zobrazení hodnot jsem zvolil Software PuTTY.

Program jsem strukturoval tak, aby bylo možné jednotlivá měření administrovat pomocí terminálu z počítače. Parametry vzorkování ADC převodníku je možné jednoduše měnit pomocí parametrických proměnných přímo v programu. Výstupní data jsou logována ve čtyřmístném formátu přepočteném na hodnotu v milivoltech. Zápis jednotlivých vzorků jsem pro oddělení provedl do sloupce.

5 Vyhodnocování užitečného signálu

Měření s analogovým zpracováním jsem realizoval pro čtvrt můstkové zapojení a pro celý můstek. Poloviční můstkové zapojení jsem nerealizoval, poněvadž nebylo dostupné na katedře, nicméně zapojení zesilovačů tuto možnost umožňuje. Měření jsem prováděl pro různé frekvence vzorkování a realizoval jsem měření za změněných klimatických podmínek.

Pro potřeby měření jsem realizoval provizorní Wheatstoneův můstek sestavený z odporů a trimru, který reprezentoval čtvrt můstkové zapojení tenzometru pro kontrolu funkce jednotlivých zapojení zesilovacích obvodů.

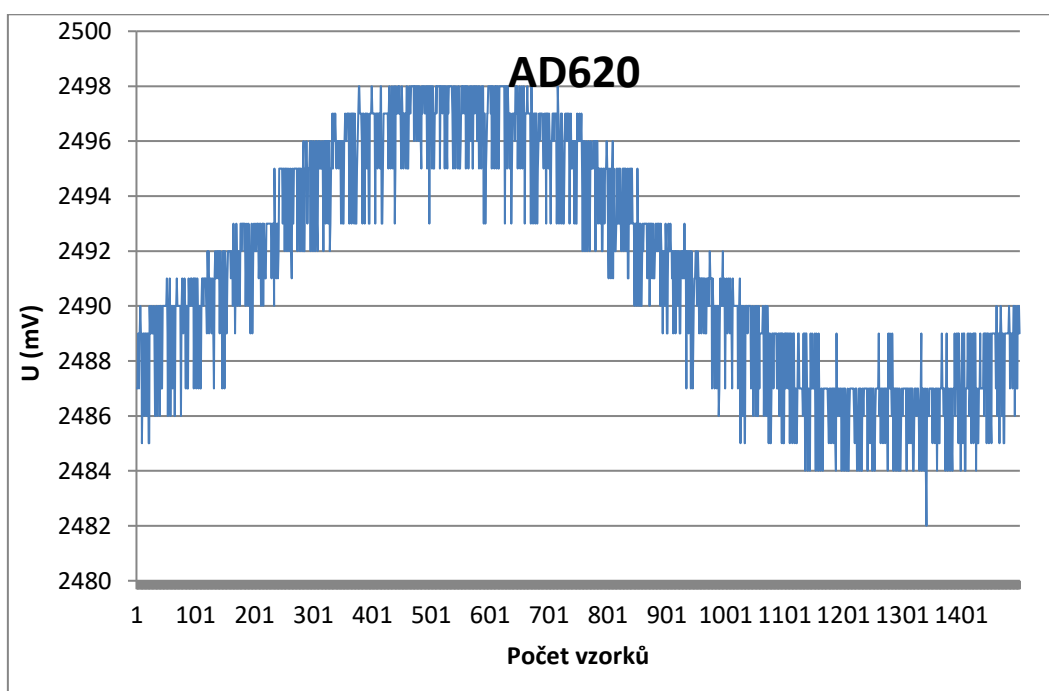
Měření vyhodnocování užitečného signálu za pomoci přístrojových zesilovačů jsem doplnil o digitální způsob vyhodnocení a to zařízením poskytnutým katedrou KAE. Jedná se o zařízení založené na obvodech ZSC31050 viz přílohy obrázek (5.1) s možností připojení všech variant můstku a vyčítání hodnot přes ethernetového rozhraní. Zde jsem realizoval měření pro čtvrt-můstkové zapojení vzhledem k tomu, že program, který vyvíjí katedra, ještě nebyl zcela doladěn pro celý můstek.

5.1 Jednotlivá měření

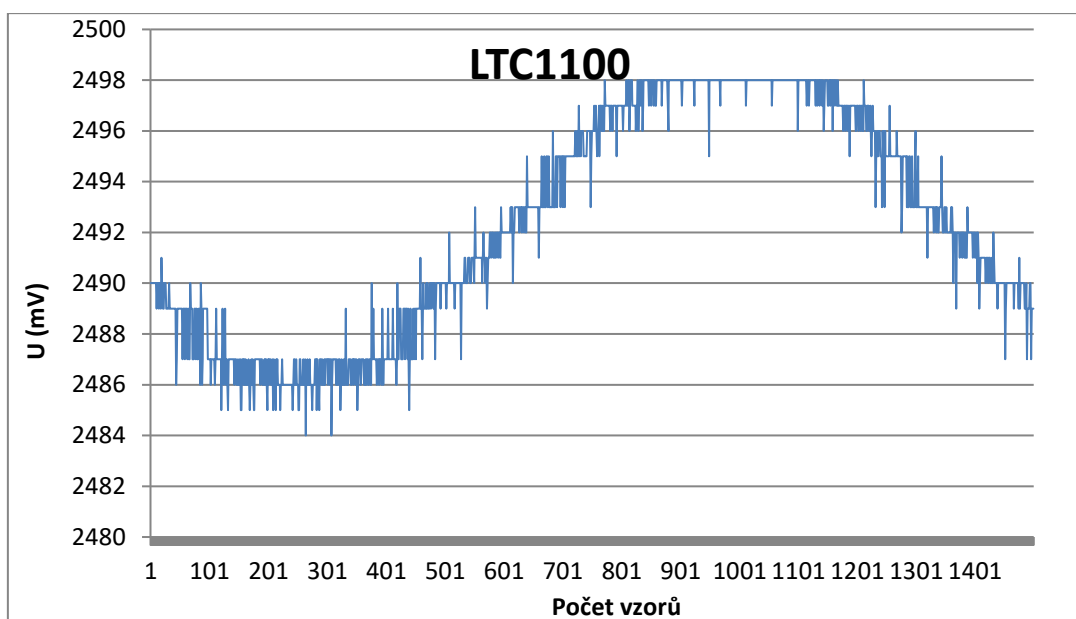
V této kapitole se budu zabývat realizací jednotlivých měření, která jsem prováděl pod dohledem vedoucího své práce Ing. Jindřicha Křivky v prostorách laboratoří fakulty elektrotechnické. Realizovaná měření jsem prováděl za účelem získání statických i dynamických parametrů. Vzhledem k velkému množství získaných dat jsem se rozhodl pro jejich reprezentaci pomocí grafů. To umožňuje intuitivní porovnání jednotlivých principů měření.

5.1.1 Měření celý můstek

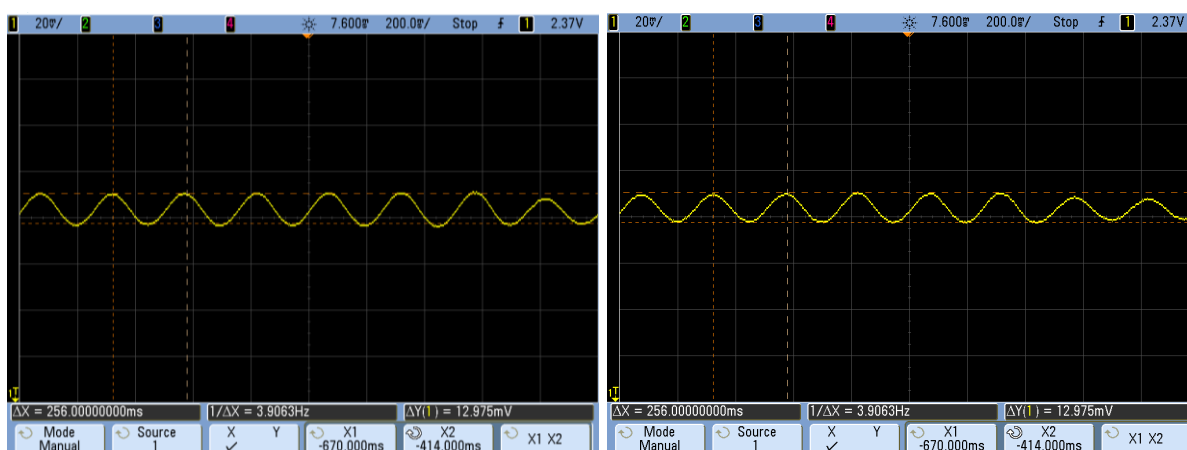
Měření celého můstku jsem realizoval za pomoci přístrojových zesilovačů AD620 a LTC1100. Pro tento pokus měření jsem zvolil snímač zatížení Z04 s maximálním zatížením 2KN a odporem 350 Ω od firmy F-W-B HAMMER. Ten byl uchycen vertikálně k pevnému podkladu a na něm byla v horizontálním směru připevněna 100 cm dlouhá tyč, kterou jsem rozkmitával. Pro porovnání jednotlivých měření jsem volil jednotnou frekvenci vzorkování 30 khz. Z grafu je viditelný periodický kmitavý signál.



Obr. 5.1.1: Měření celý můstek AD620



Obr. 5.1.2: Měření celý můstek LTC1100

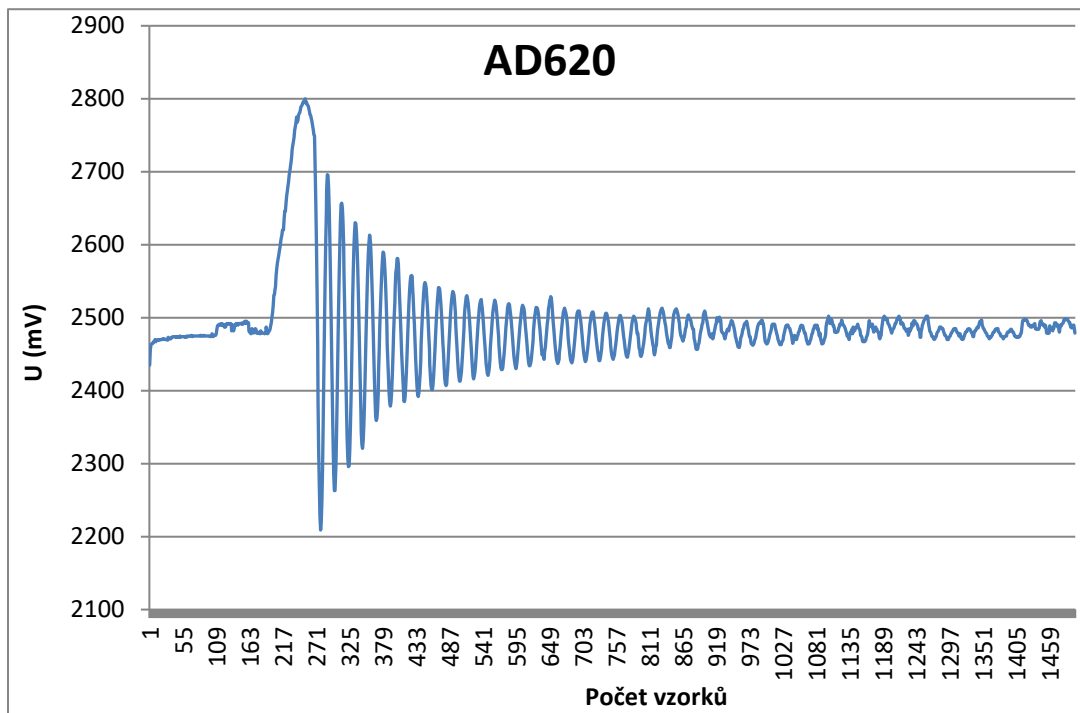


Obr. 5.1.3: Signál porovnání Osc. – AD620

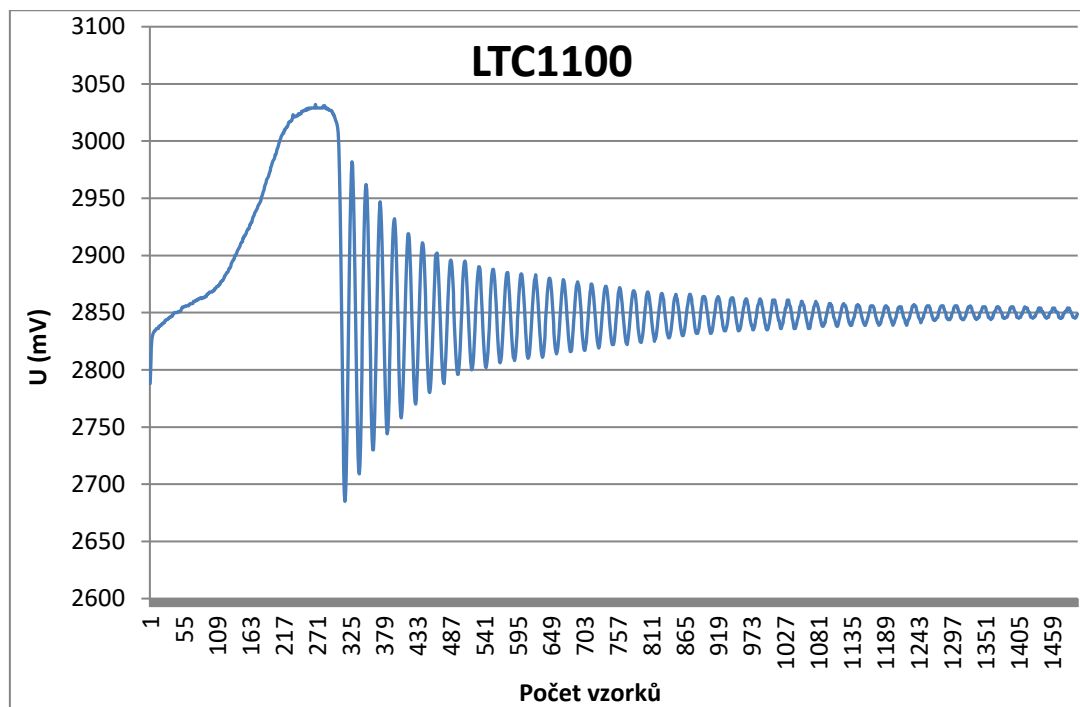
Obr. 5.1.4: Signál porovnání Osc. – LTC1100

5.1.2 Měření čtvrt můstek

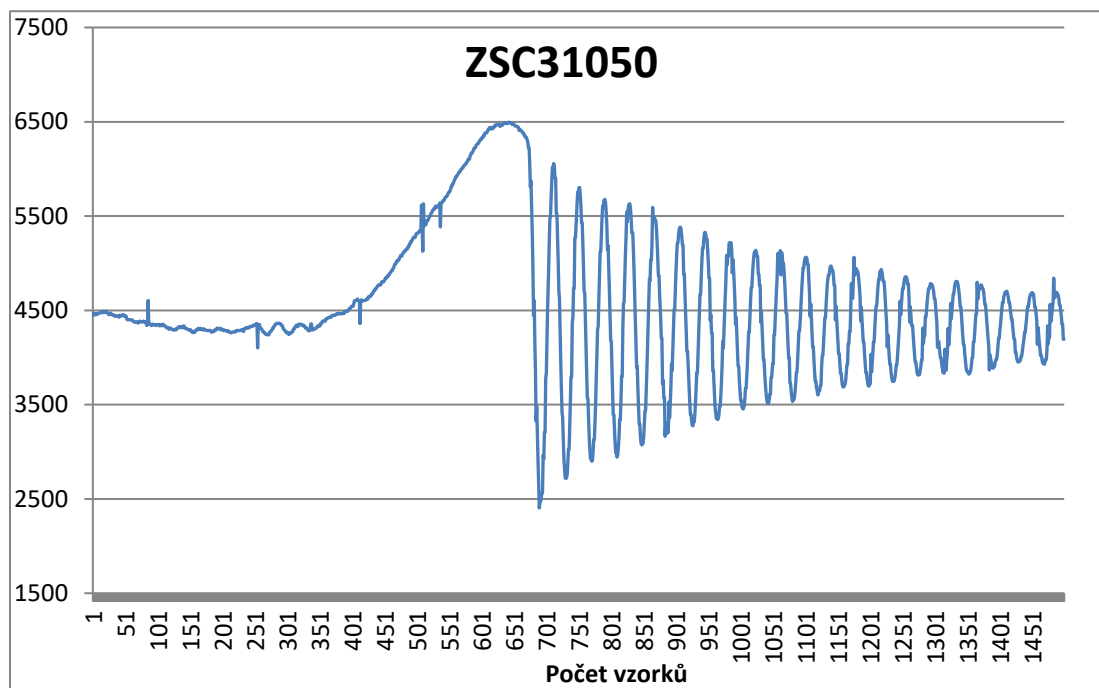
Měření čtvrt můstku jsem realizoval jak analogově za pomoci přístrojových zesilovačů, tak digitálně pomocí ZSC31050. Zpracoval jsem velké množství dat z jednotlivých měření. Analogové měření jsem provedl pro frekvence 30kHz, 10kHz, 1kHz testované při rozkmitání. V tomto případě byl testován foliový tenzometr nalepený na nerezové pásovině dlouhé 30cm, ta byla připevněná na opačném konci ke stabilnímu podkladu. Z grafů je viditelné chování jednotlivých zařízení, v reakci na signál z můstku od rozkmitání k postupnému ustálení.



Obr. 5.1.5: Měření čtvrt můstek AD620



Obr. 5.1.6: Měření čtvrt můstek LTC1100



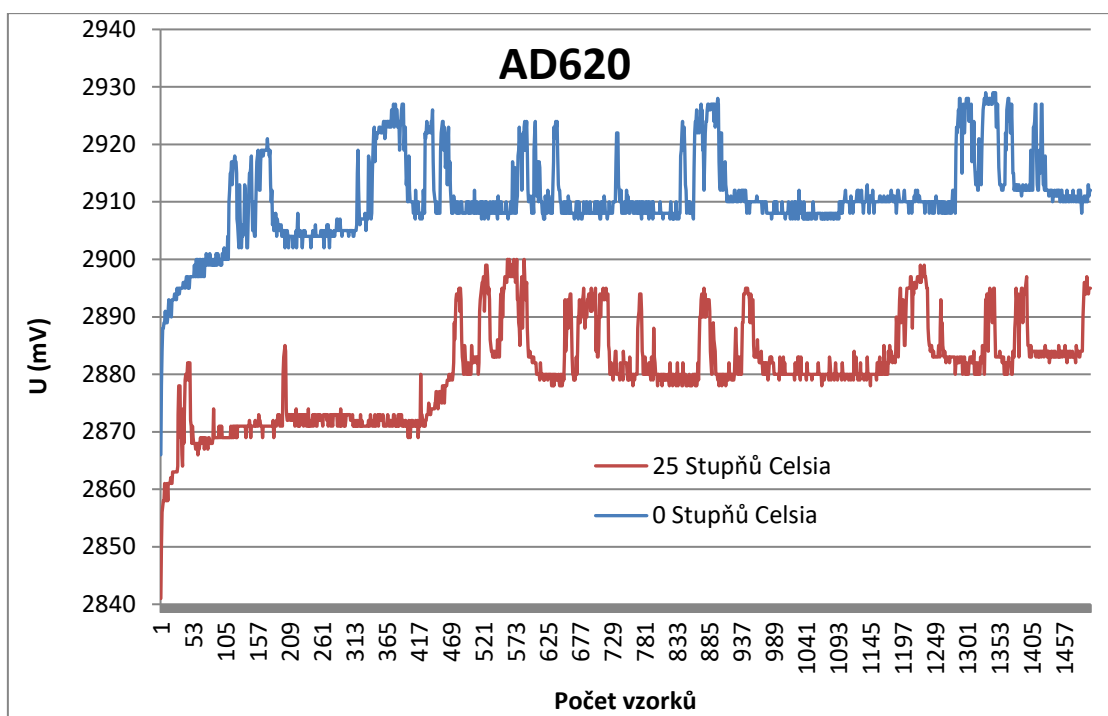
Obr. 5.1.7: Měření celý můstek ZSC31050

5.2 Zpracování za různých klimatických podmínek

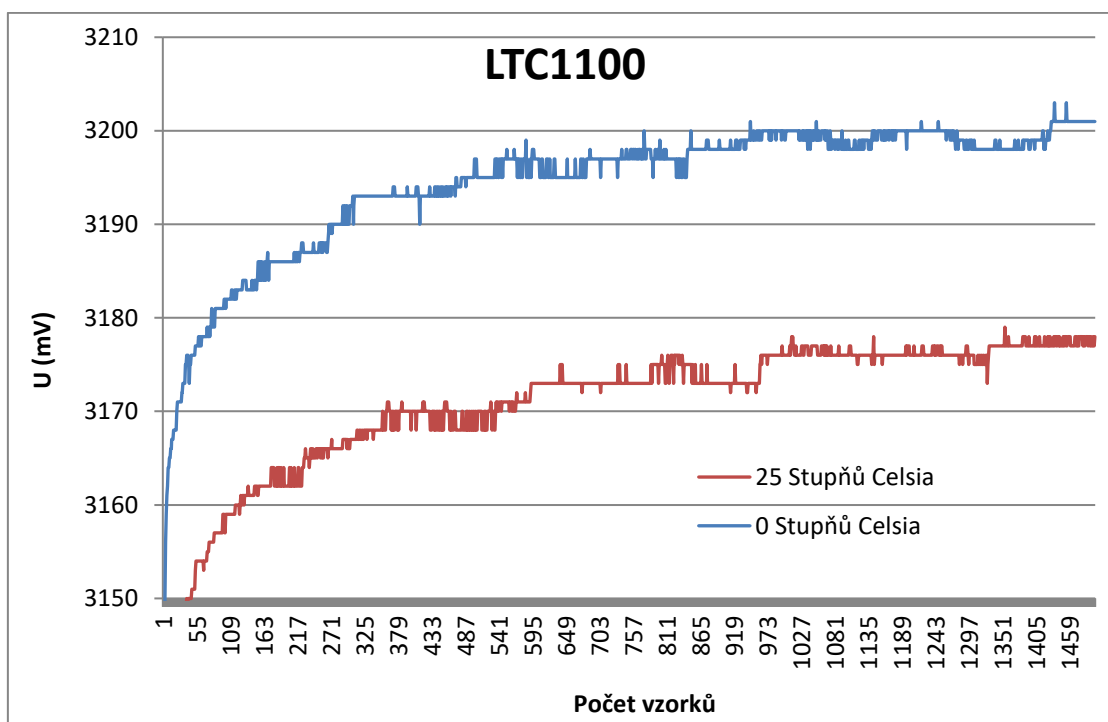
Pro ověření citlivosti chování jednotlivých zařízení na změny klimatických podmínek jsem volil zkoušku při změně teploty okolí a také zkoušku chování zařízení při změně vlhkosti ovzduší.

5.2.1 Chování při změně teploty

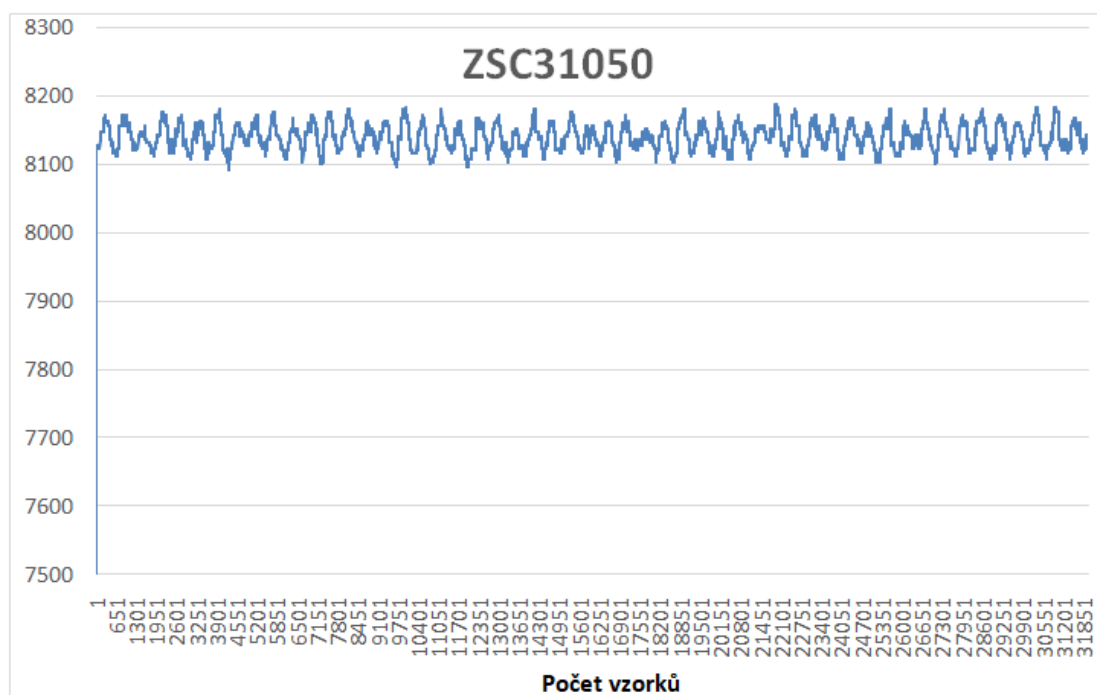
Funkci jednotlivých měřících zařízení jsem prověřoval za teploty 25°C a také při uměle vytvořených 0°C. Vlastnosti chování při ovlivnění změnou teploty jsem realizoval na všech třech zařízeních.



Obr. 5.2.1: Teplotní stabilita AD620



Obr. 5.2.2: Teplotní stabilita LTC1100



Obr. 5.2.3: Teplotní stabilita ZSC31050

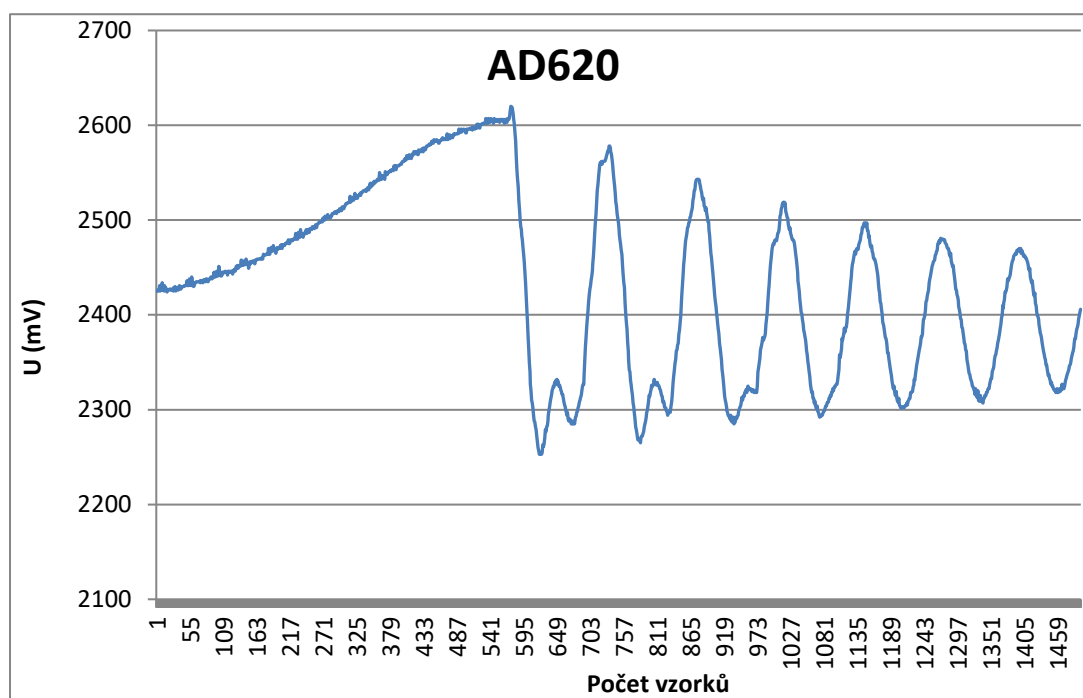
5.2.2 Chování při změně vlhkosti ovzduší

Zkoušku jsem prováděl za pomoci zvýšení vlhkosti ovzduší v okolí měřících zařízení AD620 a LTC1100. Délku pokusu jsem realizoval po dobu deseti minut. Zkoušku jsem prováděl jak při statickém, tak při dynamickém měření. Z výstupních grafů nebyly nijak patrné změny v chování jednotlivých zařízení.

5.2.3 Chyby měření

V průběhu měření docházelo k různým chybám, které komplikovaly jednotlivá měření. Zde bych chtěl přiblížit jeden případ jako příklad.

V grafu (5.2.4) je vidět výstupní signál zařízení AD620 při měření kmitání čtvrt můstku, ve srovnání s grafem (5.1.5) je zde viditelný projev vyšších harmonických, zejména při prvních třech periodách kmitů. V tomto případě byla chyba v nedokonalosti uchycení zařízení k pevnému podkladu.



Obr. 5.2.4: Chyba měření AD620

6 Porovnání jednotlivých řešení

V této kapitole se budu zabývat porovnáním jednotlivých řešení měření.

6.1 Obecné porovnání

Vzhledem k odlišné topologii analogového a digitálního zpracování je obtížné zhodnotit zařízení. V případě analogového zpracování bych mezi výhody zařadil jednoduchost zapojení a rychlost měření, která je limitována pouze rychlostí převodu ADC (je možné zajistit vyšší rychlost než při vyčítání dat přes sběrnici I²C). Mezi nevýhody bych zařadil nemožnost softwarové konfigurace zesílení či kompenzace. Jako další nedostatek lze podotknout potřebu přivedení analogového signálu až k microcontrolleru. To klade vyšší nároky na preciznost provedení návrhu PCB.

V případě digitálního řešení za pomoci zařízení ZSC31050 bych mezi výhody zařadil možnost připojení mnoha kanálů na jednu sběrnici s možností selektivního měření. Dále možnost změny sekundární adresy I²C sběrnice u každého měřicího čipu, či možnost měření teploty a tenzometru pomocí jednoho čipu. Mezi nevýhody lze zařadit složitou inicializaci a softwarovou obsluhu nebo menší vzorkovací frekvenci limitovanou maximální frekvencí sběrnice I²C (400kHz).

6.2 Zabraná plocha DPS

V porovnání analogových a digitálního řešení z hlediska zabrané plochy na DPS nelze vzít v potaz pouze integrovaná zařízení, ale je nutno také započítat pasivní součástky, které slouží ke správné funkci jednotlivých zařízení. Do zabrané plochy jsem nezapočítával přípojné konektory či referenci pro přístrojové zesilovače.

V případě přístrojového zesilovače AD620 tato plocha zabírá prostor o velikost 1,3 cm². Velikost této plochy do velké míry ovlivňuje trimr pro regulaci zisku, který zabírá přibližně 1/3 plochy. Obvodové řešení s přístrojovým zesilovačem LTC1100 zabírá plochu o rozloze 1,5 cm². Pro minimalizaci zabrané plochy by bylo vhodné umístění pasivní součástek z druhé strany DPS pod integrovaný obvod. Obvodové řešení se zařízením ZSC31050 pro svou funkci vyžaduje nejmenší počet pasivních součástek. Celková zabraná plocha v tomto případě činí 2 cm².

6.3 Teplotní stabilita

Teplotní stabilitu jednotlivých zařízení lze vidět již z grafů v kapitole 5.1.2, Nejstabilněji se zachovává zařízení ZSC31050, které na změnu teploty nevykazuje žádnou reakci.

V případě přístrojových zesilovačů AD620 a LTC1100 je zde vidět nestabilita v podobě napěťového driftu. Ten se u obou zařízení projevuje mnohem výrazněji, než jsem předpokládal. V případě přístrojového zesilovače LTC1100 byla hodnota napěťového driftu 25 mV a v případě AD620 ještě o 5 mV vyšší. Výraznější ovlivnění bylo zřejmě způsobeno ochlazením větší části DPS včetně microcontrolleru a výsledný drift byl způsoben jejich součtem.

6.4 Cena měřicího komponentu

Dle cenového srovnání vychází nejvýhodněji zařízení ZSC31050 za cenu 204 Kč. Následně pak přístrojový zesilovač AD620 s cenou 259 Kč. Nejdražší varianta je Přístrojový zesilovač LTC1100, který vychází na částku 314 Kč. Do cen jsou zahrnuty pasivní součástky nutné pro správnou funkci zařízení. Ceny jsou porovnány dle prodejce Mouser Electronics.

Závěr

Hlavním cílem mé práce bylo navrhnout obvodová řešení pro měřicí přípravky s odlišnými topologiemi zapojení Wheatstoneova můstku a ověřit jednotlivé principy vyhodnocení tenzometrických senzorů. Tohoto cíle se mi nakonec podařilo dosáhnout, i když jsem se během mého snažení potýkal s mnohými problémy a ne všechny varianty byly plně funkční.

Nejprve jsem zrealizoval měřicí zařízení DPS V1, jehož měřícím prvkem byl přístrojový zesilovač, sestavený z diskretních součástek. Výsledkem tohoto způsobu vyhodnocení i přes veškerou snahu o odstranění vad bylo zařízení nefunkční. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl realizovat další zařízení DPS V2.

Zařízení zahrnuje tři možnosti analogového zpracování signálu. Obvodová řešení v tomto zařízení se skládají ze dvou přístrojových zesilovačů integrovaných v samostatných pouzdrech (AD620 a LTC1100) a z jednoho řešení zesílení signálu, které zesiluje signál za pomoci tří operačních zesilovačů (LT1001). Jak v případě zařízení DPS V1 tak zařízení DPS V2 se ukázalo sestavování zesilovacích obvodů z diskretních součástek jako nevhodné. A to nejen z ekonomického hlediska, ale i z důvodu složitého způsobu realizace, jejíž výsledek koliduje se simulacemi daných obvodů. Vzhledem k možnostem porovnání zpracování signálu, jsem měření doplnil o digitální způsob vyhodnocení užitečného signálu, zařízením založeném na obvodech ZSC31050.

Realizoval jsem měření statických a dynamických parametrů tenzometrických senzorů pro čtvrt a celé můstkové Wheatstoneovo zapojení. Dále jsem provedl měření chování jednotlivých zařízení při změně klimatických podmínek. Získaná data jsem zpracoval a jejich výsledek jsem vynesl do grafů, které slouží k lepší možnosti vyhodnocení jednotlivých metod měření signálu. Jednotlivé metody měření jsem dále porovnal dle různých parametrů: zabrané plochy DPS, teplotní stability či dle ceny jednotlivých zařízení. Na základě získaných dat lze říci, že jak zařízení AD620 a zařízení LTC1100, tak digitální způsob vyhodnocení signálu za pomoci obvodů založených na ZSC31050 jsou vhodné k použití při zpracování signálů z Wheatstoneova můstku při měření tenzometrických senzorů.

Tato práce se mi velmi líbila, získal jsem velké množství zkušeností, jak z realizace funkčního zařízení, tak i z obvodových řešení, které ne vždy vedly ke zdárnému závěru. Přínosem pro mě bylo také zrealizovat a zorganizovat měření takovým způsobem, jehož výsledek bylo možno převést na použitelná data. Pevně věřím, že své zkušenost uplatním i v budoucnu.

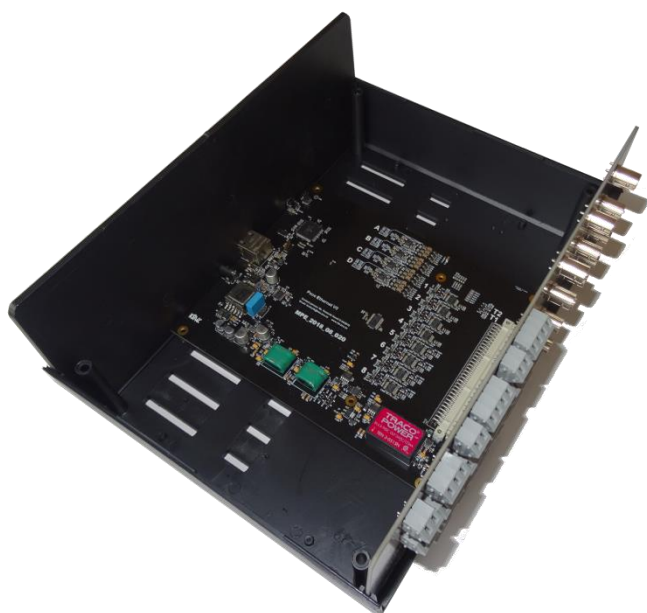
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HOFFMANN, Karl. *An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: http://www.kk-group.ru/help/Strain_Gauge_Measurements_Book_2012_01.pdf
- [2] VOJÁČEK, Antonín. *Odporové tenzometry: princip, provedení, použití, historie* [online]. 19. Březen 2017 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [3] PINKER, Jiří a Václav KOUTSKÝ. *Analogové elektronické systémy. 1. část.* 2004. Plzeň. ISBN 80-7082-506-5.
- [4] *MC9S08DZ60 Data Sheet: HCS08 Microcontrollers* [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MC9S08DZ60.pdf>
- [5] *Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier: AD620* [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>
- [6] *Precision, Zero-Drift Instrumentation Amplifier: LTC1100* [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1100fc.pdf>
- [7] *Precision Operational Amplifier: LT1001* [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LT1001.pdf>
- [8] *Low Cost, Low Noise, CMOS, RRO Operational Amplifiers: AD8692* [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8691_8692_8694.pdf
- [9] *Advanced Differential Sensor Signal Conditioner: ZSC31050 Datasheet* [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://www.idt.com/document/dst/zsc31050-datasheet>

Přílohy

Název materiálu	Přibližné složení	Průměrná hodnota K
konstantan	57 % Cu, 43 % Ni	2.05
karma	73 % Ni, 20 % Cr (příp. Fe+Al)	2.1
nichrome V	80 % Ni, 20 % Cr	2.2
platina-wolfram	92 % Pt, 8 % W	4.0

Obr. 1.2.5: Parametry slitin používaných pro kovové tenzometry (převzato z [2])



Obr. 5.1: Zařízení založené na obvodech ZSC31050