

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Modul pro precizní měření s tenzometry

Vít Vlasák

Vedoucí: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
Obor: Kybernetika a robotika
Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vlasák** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **492049**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Modul pro precizní měření s tenzometry

Název bakalářské práce anglicky:

Module for precise measurements with Strain Gauges

Pokyny pro vypracování:

- navrhnete zapojení pro excitaci a zpracování signálu z tenzometru umožňující šestivodičové připojení
- modul bude naměřená data zobrazovat na displeji s možností odeslání do PC přes rozhraní USB
- zapojení realizujete, naprogramujete firmware pro řídicí mikrokontrolér z řady STM32 a ověříte dosažené parametry (ověřte vliv čtyř/šesti-vodičového připojení a komutovaného respektive statického napájení můstku)
- volitelně realizujete aplikaci na PC (LabView nebo Qt) pro vizualizaci dat nebo modul hlasového výstupu

Seznam doporučené literatury:

- [1] R. B. Northrop, Introduction to Instrumentation and Measurements, CRC 2018, ISBN 9781315275239
- [2] Ahmet Bindal, Electronics for Embedded Systems, Springer International Publishing, Switzerland 2017
- [3] Mark I. Montrose: EMC and the Printed Circuit Board: Design, Theory, and Layout Made Simple, IEEE 1999
- [4] Vít Záhlava: Návrh a konstrukce DPS, Ben 2010
- [5] Jacob Fraden: Handbook of Modern Sensors, Springer 2004

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D., 13138

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **03.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce zimního semestru 2022/2023

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji panu Ing. Vojtěchu Petruchovi, Ph. D., za aktivní a cílevědomé vedení práce a spoustu cenných rad. Dále děkuji laboratoři MAGLAB za poskytnutí zázemí a samozřejmě rodině za podporu v průběhu celého studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 20. května 2022

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem modulu pro excitaci tenzometrického snímače zatížení a zpracování jeho výstupního signálu za účelem vážení zavěšeného závaží. Modul je realizován jako deska plošných spojů s možností připojení k senzoru a k počítači. Je umožněno uživatelské ovládání modulu pomocí tlačítek nebo přes sériový terminál.

V práci jsou zhodnoceny dosažené parametry, dále je ověřen vliv čtyřvodičového/šestivodičového zapojení a statického/komutovaného excitačního napětí.

Klíčová slova: tenzometr, snímač zatížení, vážení

Vedoucí: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
Katedra měření,
Technická 2,
Praha 6

Abstract

The thesis deals with the design of a module for excitation of a strain gauge load cell and processing of its output signal in order to weigh a suspended weight. The module is implemented as a printed circuit board with connectors for a load cell and a computer connection. It is possible to change the measurement settings via user buttons or via a serial terminal.

The achieved parameters are evaluated in the thesis, the influence of four-wire/six-wire connection and static/commutated excitation voltage is verified.

Keywords: strain gauge, load cell, weighing

Title translation: Module for precise measurements with Strain Gauges

Obsah

| | | | |
|--|-----------|--|-----------|
| 1 Úvod | 1 | 5 Základní idea realizace a blokový diagram | 17 |
| 2 State of the art | 3 | 6 Návrh zapojení | 19 |
| 2.1 Prototyp kilogramu | 3 | 6.1 Excitace senzoru | 19 |
| 2.2 Wattové váhy | 3 | 6.1.1 Komutace napájecího napětí senzoru | 21 |
| 2.2.1 NIST-4 | 4 | 6.2 Zpracování výstupního signálu . . | 22 |
| 3 Tenzometry | 7 | 6.2.1 Přístrojový zesilovač | 22 |
| 3.1 Mechanická konstrukce | 7 | 6.2.2 AD převodník | 23 |
| 3.2 Tenzometrické snímače zatížení . . | 8 | 6.3 Napájení | 25 |
| 3.2.1 Plný Wheatstoneův můstek . . | 9 | 6.3.1 Lineární regulátory | 25 |
| 3.3 Porovnání dostupných snímačů . | 11 | 6.3.2 Spínané regulátory | 26 |
| 3.3.1 Integrované váhy | 11 | 6.3.3 Diagnostika | 26 |
| 3.3.2 Snímače s externí jednotkou . | 12 | 6.4 Displej | 27 |
| 4 Metody minimalizace chyb měření | 13 | 6.5 Řídicí mikrokontrolér | 27 |
| 4.1 Sense/Force metoda | 13 | 6.5.1 Uživatelské ovládání modulu | 28 |
| 4.2 Komutace napájecího napětí . . . | 14 | 6.5.2 Možnosti dalšího rozšíření . . . | 29 |
| | | 7 Návrh a oživení DPS | 31 |
| | | 7.1 Vrchní signálová vrstva | 31 |

| | | | |
|---|-----------|--|-----------|
| 7.2 Zemnicí vrstva | 32 | 11 Závěr | 49 |
| 7.3 Napájecí vrstva | 33 | A Seznam použitých pojmů a zkratk | 51 |
| 7.4 Spodní signálová vrstva | 33 | B Literatura | 53 |
| 7.5 Osazení a oživení DPS | 33 | | |
| 8 Firmware | 35 | | |
| 8.1 Použité vývojové prostředí | 35 | | |
| 8.1.1 HAL | 36 | | |
| 8.2 Průběh hlavní smyčky programu | 36 | | |
| 8.3 Uživatelské ovládání modulu . . . | 37 | | |
| 8.3.1 Uživatelská tlačítka | 38 | | |
| 8.3.2 Sériový terminál | 39 | | |
| 9 Mechanická ochrana DPS a celkový vzhled | 41 | | |
| 10 Dosažené parametry | 43 | | |
| 10.1 Vliv čtyř/šestivodičového připojení | 46 | | |
| 10.2 Vliv komutovaného/statického napájení můstku | 47 | | |

Obrázky

| | | | |
|--|----|---|----|
| 2.1 Podoba bývalého mezinárodního prototypu kilogramu [3]..... | 4 | 6.3 Schéma zapojení spínače CD4066 | 21 |
| 2.2 Grafické znázornění principu wattových vah [2] | 5 | 6.4 Schéma zapojení přístrojového zesilovače AD8429 | 22 |
| 2.3 Zařízení NIST-4 [4] | 6 | 6.5 Blokový diagram převodníku AD7177-2 [16] | 23 |
| 3.1 Drátkový tenzometr [6] | 8 | 6.6 Ukázka vyčtení datového slova z A/D převodníku | 24 |
| 3.2 Tenzometrická růžice [7] | 8 | 6.7 Průběh komunikace v Single Conversion módu [16] | 24 |
| 3.3 Tenzometrické snímače [8] | 9 | 6.8 Schéma zapojení ochranných prvků a diagnostiky proudového odběru . | 25 |
| 3.4 Plný Wheatstoneův můstek [9] . | 10 | 6.9 Výpis diagnostiky modulu | 27 |
| 3.5 Závěsná váha IHS 1 [11] | 11 | 6.10 Ukázka zobrazení dat na displeji | 27 |
| 3.6 Panelový měřicí přístroj Omega [12] | 12 | 6.11 Schéma zapojení USB konektoru | 29 |
| 3.7 Specifikace modulu Red Lion [13] | 12 | 6.12 Schéma vývodů pro budoucí rozšíření | 29 |
| 4.1 Šestivodičové připojení u senzoru Tedeá 614 [14] | 14 | 7.1 Vrchní signálová vrstva DPS ... | 32 |
| 5.1 Blokový diagram modulu | 18 | 7.2 Zemnicí vrstva DPS | 32 |
| 6.1 Sledovač napětí se dvěma OZ... | 20 | 7.3 Napájecí vrstva DPS | 33 |
| 6.2 Napěťová reference s LED | 20 | 7.4 Spodní signálová vrstva DPS ... | 34 |
| | | 9.1 Vizualizace finální podoby modulu (bez displeje) v prostředí Fusion 360 | 42 |

| | |
|---|----|
| 9.2 Finální podoba modulu (s displejem) | 42 |
| 10.1 Převodní charakteristika pro senzor Tedeo 614 | 44 |
| 10.2 Časový průběh měřené veličiny | 45 |
| 10.3 Šumová spektrální charakteristika měření | 45 |
| 10.4 Převodní charakteristika pro senzor TAS501N | 46 |
| 10.5 Schéma měření v 6vodičovém zapojení | 46 |
| 10.6 Schéma měření v 4vodičovém zapojení | 47 |
| 10.7 Převodní charakteristika senzoru Tedeo 614 pro statické napájení ... | 48 |
| 10.8 Převodní charakteristika senzoru TAS501N pro statické napájení ... | 48 |

Tabulky

| | |
|--|----|
| 3.1 Přehled parametrů vybraných závěsných vah | 11 |
| 8.1 Přehled konfiguračních příkazů . | 39 |
| 10.1 Výsledky měření vlivu 6vodičového připojení | 47 |
| A.1 Seznam pojmů a zkratk | 51 |

Kapitola 1

Úvod

Vážení (neboli určování hmotnosti tělesa) je jednou z nejstarších disciplín měření. Od starověku vycházelo z čistě praktické potřeby kvantitativně porovnávat zboží a jiné předměty obchodu, v průběhu času se stalo nezbytným pro průmyslové a výzkumné procesy. Existuje mnoho různých druhů vah založených na různých fyzikálních principech - od klasických rovnoramenných vah (známých už od starověku) až po moderní tenzometrické váhy, kterým se věnuje tato práce.

Tenzometrické váhy fungují na principu převodu působící (tíhové) síly na elektrickou veličinu - napětí. Naším cílem je navrhnout a zprovoznit modul, který bude budit použitý senzor, měřit jeho výstupní signál a ten následně zpracovávat. Budeme se tedy zabývat zesílením signálu, jeho analogově-digitálním převodem a zpracováním dat v mikrokontroléru. Dále budeme řešit zobrazení naměřených dat uživateli pomocí displeje a odeslání dat přes USB do počítače, kde může dojít k jejich dalšímu zpracování. Rovněž se zaměříme na zprovoznění uživatelského rozhraní, aby bylo možné modul intuitivně ovládat pomocí tlačítek. Kromě zmíněného bude modul schopen diagnostiky napájecích napětí a proudového odběru.

Modul bude univerzální a bude umožňovat připojení libovolného tenzometrického snímače splňujícího požadavky na excitační a výstupní napětí. Rozsah vážení tedy není přesně definován, závisí na použitém senzoru. Modul by měl najít uplatnění jak při vážení v laboratoři, tak ve výuce předmětu Sensory a měření. Studenti budou moci ověřit linearitu, vliv čtyřvodičového/šestivodičového zapojení a statického/komutovaného excitačního napětí, což je i předmětem této práce.

Kapitola 2

State of the art

2.1 Prototyp kilogramu

Jednotkou hmotnosti je kilogram, který je zároveň základní jednotkou soustavy SI. Do roku 2019 byl definován jako hmotnost mezinárodního prototypu kilogramu (viz obrázek 2.1), který byl uložen v Mezinárodním úřadě pro míry a váhy v Sèvres (Francie). Tato definice byla však nepraktická, neboť bylo změřeno, že hmotnost velmi přesných kopií etalonu se v čase mění, tudíž to samé lze předpokládat i o samotném prototypu (byť ho samozřejmě nešlo s ničím porovnat).

2.2 Wattové váhy

Od roku 2019 je kilogram definován zafixováním hodnoty Planckovy konstanty. Toto bylo umožněno díky pokroku v měření hmotnosti na principu tzv. wattových vah [1] (také možno najít pod názvem Kibblovy váhy). Zvážením bývalého prototypu kilogramu bylo možné určit hodnotu Planckovy konstanty s nejistotou 34 ppb (parts per bilion) [2]. Tato hodnota byla následně zafixována a proces probíhá obráceně - pomocí Planckovy konstanty se určuje hmotnost neznámého závaží.

Základní ideou přístroje je rovnost výkonů (jednotkou výkonu je watt, proto



Obrázek 2.1: Podoba bývalého mezinárodního prototypu kilogramu [3]

název wattové váhy). Při měření jsou využity dva módy - rychlostní a silový. V rychlostním módu se pohybuje cívka konstantní rychlostí v magnetickém poli permanentního magnetu. Pro indukované napětí na cínce U platí $U = BLv$, kde B je magnetická indukce, L je délka závitu a v je rychlost pohybu. V silovém módu je platforma zatížena měřeným závažím o hmotnosti m a proud cívkou I je nastaven tak, aby došlo k rovnováze tíhové a magnetické síly. Potom platí, že $mg = BLI$, kde g je tíhové zrychlení a B, L mají stejný význam jako v minulém případě. Vhodnou úpravou obou rovnic dostáváme vztah

$$UI = mgv, \quad (2.1)$$

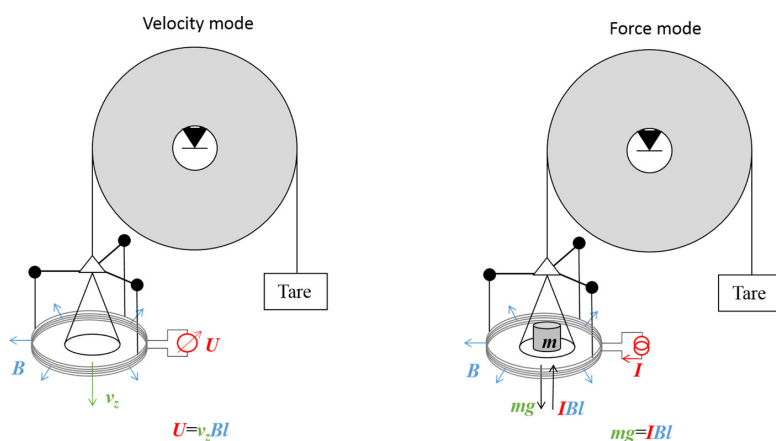
kde na levé straně rovnice je elektrický výkon a na pravé straně mechanický. Vztah pro hmotnost m lze snadno dovodit jako

$$m = \frac{UI}{gv}, \quad (2.2)$$

přičemž všechny potřebné veličiny lze přesně měřit (na rozdíl třeba od magnetické indukce B nebo délky závitů L). Princip je graficky znázorněn na obrázku 2.2. K velmi přesnému měření napětí a proudu se využívá Josephsonův jev a kvantový Hallův jev, které svazují výše uvedené rovnice s kvantovým světem a Planckovou konstantou. Jejich přesné vysvětlení však není triviální a přesahuje rámec této práce, čtenář jej může prostudovat samostatně [2].

■ 2.2.1 NIST-4

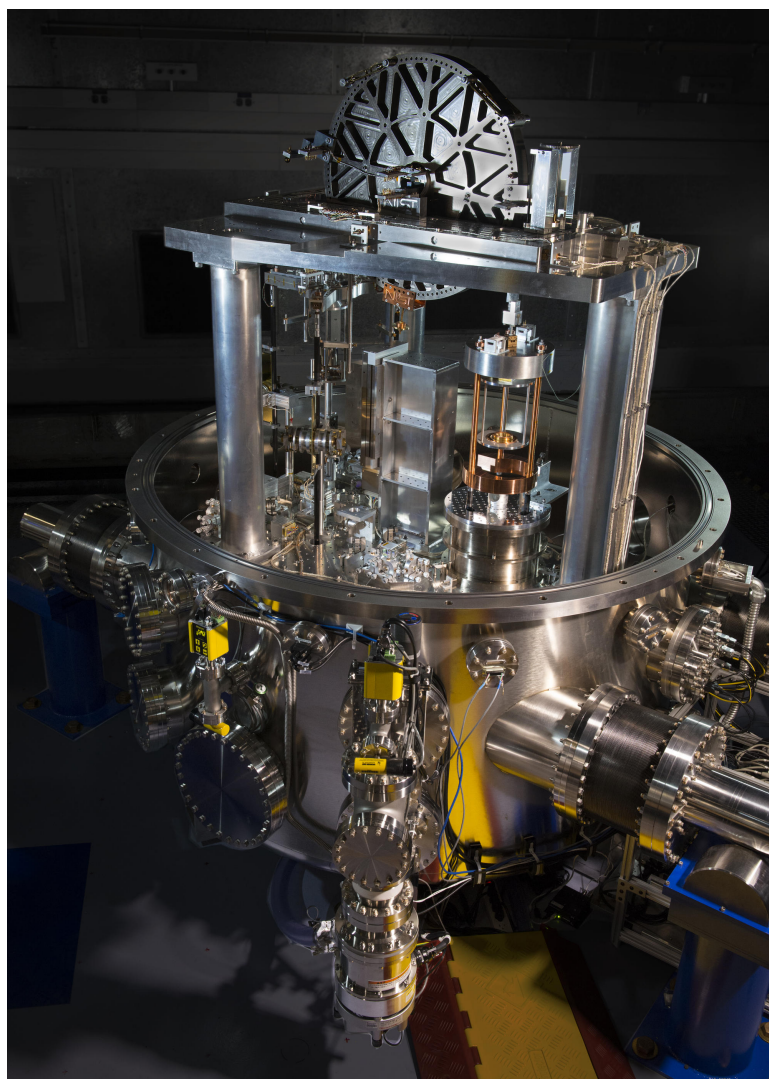
Nejpokročilejší realizací tohoto principu je zařízení NIST-4 [4] (na obrázku 2.3) z amerického Národního institutu standardů a technologie. Jde o čtvrtou



Obrázek 2.2: Grafické znázornění principu wattových vah [2]

generaci wattových vah. Ty se nachází ve zcela odstíněném kontrolovaném prostředí - váhy pracují ve vakuu, aby se předešlo ovlivnění měření proudícím vzduchem, rovněž je eliminován i vliv vnějšího magnetického pole.

Použitá pohyblivá cívka váží přibližně 4 kg, vinutí je dlouhé 1,4 km. Magnetické pole je vytvářeno soustavou permanentních magnetů, hodnota magnetické indukce se pohybuje okolo 0,55 Tesla (což je přibližně 10000krát více než hodnota magnetické indukce zemského magnetického pole). Poloha (a z ní odvozená rychlost) je měřena laserovým interferometrem, tíhové zrychlení gravimetrem.



Obrázek 2.3: Zařízení NIST-4 [4]

Kapitola 3

Tenzometry

Nejrozšířenějším senzorem pro měření síly (resp. hmotnosti) jsou tenzometry [5]. Tenzometr je pasivní elektronická součástka, jejíž princip činnosti spočívá ve změně odporu R v důsledku působícího mechanického napětí σ . Při mechanickém namáhání dochází k relativnímu prodloužení vodiče ϵ , což ovlivňuje výsledný odpor. Pro „malé“ deformace pak platí

$$\frac{dR}{R} = g\epsilon, \quad (3.1)$$

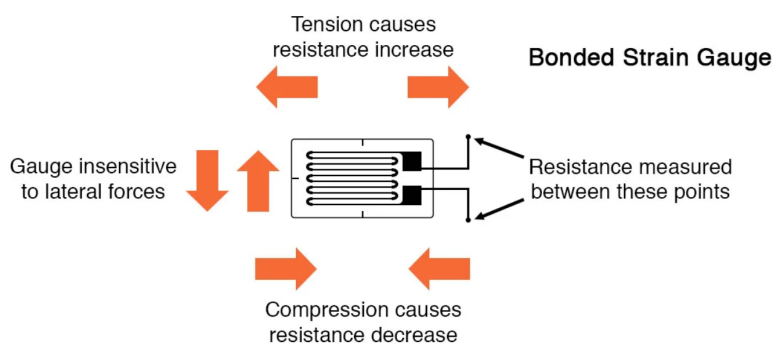
kde g je citlivost tenzometru (anglicky gauge factor), tudíž odpor se mění lineárně s relativním prodloužením. Hodnota g se typicky pohybuje v intervalu 2 až 6 pro kovové tenzometry a v intervalu 40 až 200 pro polovodičové tenzometry. Z Hookova zákona (pro malá napětí a malé deformace) víme, že relativní prodloužení ϵ je přímo úměrné působícímu mechanickému napětí σ přes převrácenou hodnotu Youngova modulu E . Kombinací výše uvedených rovnic dostáváme

$$\frac{dR}{R} = g \frac{\sigma}{E}, \quad (3.2)$$

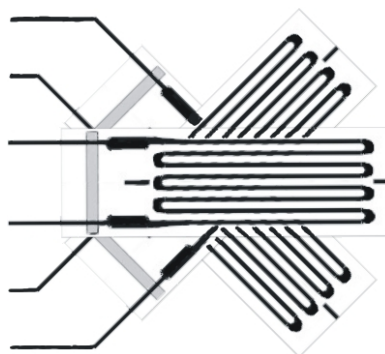
tudíž změna odporu je přímo úměrná působícímu mechanickému napětí.

3.1 Mechanická konstrukce

Tenzometr lze vyrobit v mnoha provedeních a z mnoha materiálů, některá provedení se však ukazují jako vhodnější. Jedním z typických designů je ten, kde je dlouhý tenký vodivý drátek (obvykle z konstantanu) veden „klikatě“



Obrázek 3.1: Drátkový tenzometr [6]



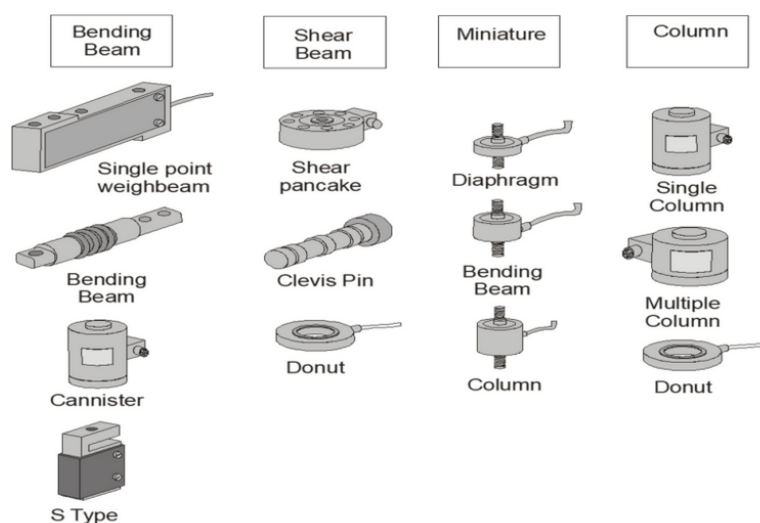
Obrázek 3.2: Tenzometrická růžice [7]

po nevodivém materiálu (plast, keramika), viz obrázek 3.1. Taková konstrukce zajišťuje, že tenzometr je citlivý pouze na namáhání v jedné ose. Pokud chceme měřit mechanické napětí ve více osách, je třeba zapojit více tenzometrů do tzv. tenzometrické růžice (3.2), kde jsou jednotlivé tenzometry vůči sobě otočeny.

Drátek může být nahrazen velmi tenkou kovovou fólií, v tom případě mluvíme o tzv. fóliovém tenzometru. Fóliový tenzometr se v současnosti řadí mezi nejpoužívanější. Tenzometr se přilepí silným lepidlem na objekt, jehož namáhání chceme měřit. Zatížení (deformace) nesmí překročit mez danou výrobcem, jinak hrozí, že změny odporu nebudou plně vratné.

3.2 Tenzometrické snímače zatížení

Tenzometrický snímač zatížení (anglicky load cell) je robustní mechanická konstrukce s (často čtyřmi) integrovanými tenzometry. Existuje opět celá řada konstrukcí pro různé aplikace, viz obrázek 3.3. V této práci jsou využity univerzální snímače typu **S-člen**. Ze snímače jsou vyvedeny vodiče (typicky



Obrázek 3.3: Tenzometrické snímače [8]

4 nebo 6) pro excitaci senzoru a měření výstupního napětí.

Výstupní napětí se udává v jednotkách mV/V, je vztaženo k excitačnímu stejnosměrnému napětí, nebo střídavému napětí o stejné efektivní hodnotě. Pro typickou hodnotu 2 mV/V. můžeme při budicím napětí 10 V očekávat na výstupu 20 mV při plném zatížení.

■ 3.2.1 Plný Wheatstoneův můstek

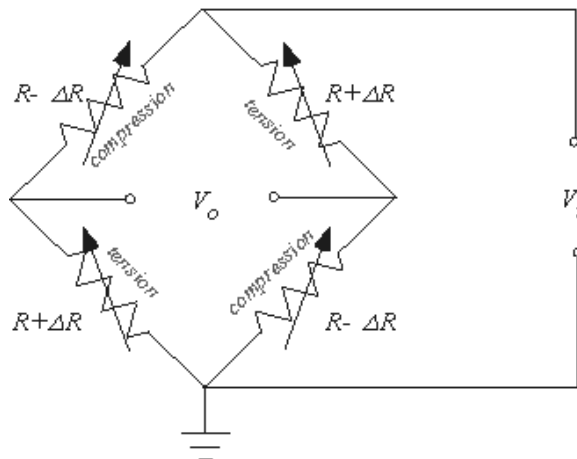
Pokud jsou v zařízení integrovány 4 tenzometry, jsou obvykle zapojeny do tzv. plného Wheatstoneova můstku (obrázek 3.4). Dva tenzometry jsou zapojeny (umístěny) tak, aby se při namáhání (např. tahem) jejich odpor zvětšoval, zbylé dva obráceně, tj. aby se jejich odpor při stejném namáhání zmenšoval.

Všechny odpory v zapojení mají obvykle stejnou nominální hodnotu (typicky 100 Ω - 1000 Ω), tudíž při absenci zátěže je výstupní napětí na diagonále můstku ideálně nulové.

Výstupní napětí můstku V_{out} (napětí na diagonále) je dáno vztahem

$$V_{out} = \left(\frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R - \Delta R}{2R} \right) V_i, \quad (3.3)$$

kde R je jmenovitý odpor tenzometru, ΔR je změna odporu, V_i je excitační napětí na vstupních svorkách tenzometrického můstku.



Obrázek 3.4: Plný Wheatstoneův můstek [9]

Po úpravě dostáváme vztah

$$V_{out} = \frac{\Delta R}{R} V_i. \quad (3.4)$$

Vidíme, že závislost výstupního napětí na změně odporu je lineární, a tudíž je dle rovnice 3.2 **lineární i závislost výstupního signálu na působící síle.**

■ Výhody zapojení

Použití plného Wheatstoneova můstku s sebou přináší několik výhod [10]:

- Nelinearita (typická pro čtvrtinový nebo poloviční můstek) je anulována.
- Citlivost je ve srovnání s čtvrtinovým můstkem čtyřnásobná.
- Chyba vlivem teploty je nulová, pokud jsou všechny tenzometry identické a na stejné teplotě.
- Měříme pouze „užitečné“ rozdílové napětí (kdybychom měřili vůči zemi, bude se nám informace (v řádu milivoltů) ztrácet v souhlasné složce (v řádu jednotek voltů).

Vliv odporu přívodních napájecích vodičů lze potlačit buď napájením ze zdroje proudu, nebo využitím šestivodičového připojení (více v kapitole Sense/Force metoda). To se jeví jako vhodnější, neboť výrobci často udávají citlivost pro napájení ze zdroje napětí.

3.3 Porovnání dostupných snímačů

V následující sekci jsou představeny produkty dostupné na trhu vhodné pro vážení zavěšeného závaží. Ideově se jedná o dva směry - integrované váhy a tenzometrické snímače s externí excitační a vyhodnocovací jednotkou.

3.3.1 Integrované váhy

Integrované závěsné váhy (obr 3.5) mají výhodu ve své kompaktnosti. Senzor, jednotka pro zpracování signálu i rozhraní pro komunikaci s uživatelem (displej, tlačítka) jsou v jednom robustním obalu, který je chrání před mechanickým poškozením, čemuž přispívá i to, že z modulu nejsou vyvedeny žádné kabely. Napájení je bateriové, což zjednodušuje instalaci. Tyto váhy najdou uplatnění především v průmyslu, čemuž odpovídá jejich rozlišovací schopnost pohybuující se zpravidla kolem 100 - 1000 ppm.



Obrázek 3.5: Závěsná váha IHS 1 [11]

Parametry vybraných vah jsou k nalezení v tabulce 3.1 .

| Název | Rozsah | Rozlišitelnost | Nelinearita | Cena |
|-------------|---------|----------------|-------------|-----------|
| IHS 1 | 1000 kg | 0.2 kg | 0.2 kg | 23 519 Kč |
| HCB 200K100 | 200 kg | 0.1 kg | - | 3 461 Kč |
| HCD60K-2 | 60 kg | 20 g | 40 g | 4 889 Kč |

Tabulka 3.1: Přehled parametrů vybraných závěsných vah



Obrázek 3.6: Panelový měřicí přístroj Omega [12]

SENSOR INPUTS:

| INPUT RANGE | ACCURACY* (18 to 28 °C) | ACCURACY* (0 to 50 °C) | IMPEDANCE | MAX CONTINUOUS OVERLOAD | RESOLUTION |
|-------------|----------------------------|----------------------------|-----------|-------------------------------|------------|
| ±24 mVDC | 0.02% of reading +3 μV | 0.07% of reading +4 μV | 100 Mohm | 30 V | 1 μV |
| ±240 mVDC | 0.02% of reading +30 μV | 0.07% of reading +40 μV | 100 Mohm | 30 V | 10 μV |

* After 20 minute warm-up. Accuracy is specified in two ways: Accuracy over an 18 to 28 °C and 10 to 75% RH environment; and accuracy over a 0 to 50 °C and 0 to 85% RH (non-condensing environment). Accuracy over the 0 to 50 °C range includes the temperature coefficient effect of the meter.

Obrázek 3.7: Specifikace modulu Red Lion [13]

3.3.2 Snímače s externí jednotkou

Druhá metoda měření zavěšeného závaží odpovídá tomu, o co se snaží tato práce. Senzor ve formě tenzometrického snímače má vyvedené napájecí a signálové vodiče, které se zapojí do externí jednotky (viz obrázek 3.6). Tato zajišťuje excitaci senzoru, zpracování výstupního signálu, komunikaci s uživatelem a komunikaci po sériové lince. Přístroje tohoto typu jsou obvykle modulární a umožňují řadu uživatelských nastavení. Příkladem je modul analogového výstupu (0 - 10 Vdc, 4-20 mA a další typické hodnoty), aby mohly být začleněny do rozsáhlejších měřicích systémů.

Tyto přístroje umožňují přesnější měření, než tomu bylo u integrovaných vah. Například pro pětidekadový přístroj PAXS0010 udává výrobce Red Lion parametry uvedené na obrázku 3.7. Výsledné vlastnosti jsou samozřejmě ovlivněny vlastnostmi použitého tenzometrického snímače. V případě připojení senzoru Tedeia 614 s výstupem ± 20 mV byla rozlišitelnost 25 ppm.

Kapitola 4

Metody minimalizace chyb měření

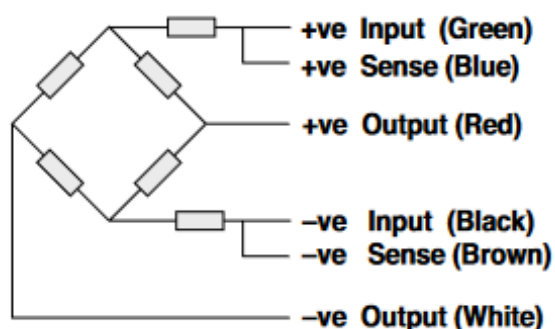
Vzhledem ke snaze vytvořit precizní měřicí zařízení jsou v následující kapitole přiblíženy přístupy, které mohou eliminovat některé chyby měření způsobené např. napětovým úbytkem na odporu přívodních vodičů nebo nenulovým offsetem použitých součástek.

4.1 Sense/Force metoda

Cílem Sense/Force metody je potlačit vliv odporů přívodních kabelů. Problematická by byla především změna těchto odporů, např. vlivem teploty nebo prodloužením/zkrácením kabelu. K tomu slouží šestivodičové připojení, viz obrázek 4.1.

Dva vodiče jsou vyhrazeny pro výstupní rozdílový signál, další dva vodiče slouží k napájení (Force, na obrázku 4.1 značeno jako Input). Poslední pár (Sense) slouží jako zpětná vazba k excitačnímu obvodu. Je důležité si uvědomit, že na Sense vodičích nedochází k úbytku napětí vlivem odporu kabelu, neboť těmito vodiči neprotéká proud. Hodnota „změřená“ pomocí Sense vodičů je v excitačním obvodu porovnána s požadovanou hodnotou a následně je upraveno excitační napětí.

V případě této práce je tato funkcionality řešena analogově pomocí zavedení záporné zpětné vazby operačního zesilovače.



Obrázek 4.1: Šestivodičové připojení u senzoru Tedeia 614 [14]

4.2 Komutace napájecího napětí

Komutace napájecího napětí, neboli flipování, slouží k eliminaci některých offsetů (chyb nuly), které se vyskytují v měřicím řetězci. V případě zapojení dle blokového diagramu na obrázku 5.1 můžeme rozlišit:

- offset tenzometrického můstku O_{im} způsobený nevyvážeností můstku (hodnoty jednotlivých odporů se mohou lišit od těch jmenovitých),
- offset přístrojového zesilovače O_{amp} ,
- offset A/D převodníku O_{AD} .

Při klasickém režimu měření (napájecí napětí není komutováno) se uplatní všechny zmíněné offsety a pro symbolicky zapsaný výsledek měření R bude platit

$$R = (DATA + O_{im}) + O_{amp} + O_{AD}, \quad (4.1)$$

kde DATA představují užitečný výstupní signál. Chybu nuly způsobenou součtem těchto offsetů je nutné kompenzovat softwarově při zpracování signálu v mikrokontroléru.

V režimu flipování se periodicky střídá kladné a záporné napájecí napětí (např. +10 V, -10 V). Z rovnice 3.4 víme, že při připojení záporného napájecího napětí bude mít výstupní signál opačnou polaritu, než tomu bylo pro kladné napájecí napětí. To však platí i pro offset O_{im} . Znaménko offsetů zesilovače a převodníku se nemění. Při symbolickém zápisu výsledku měření R_+ pro kladné napájení a R_- pro záporné napájení dostáváme rovnice

$$R_{\pm} = (DATA + O_{im}) + O_{amp} + O_{AD}, \quad (4.2)$$

$$R_- = -(DATA + O_{im}) + O_{amp} + O_{AD}. \quad (4.3)$$

Pokud od sebe rovnice odečteme a vyjádříme užitečný signál DATA, dostáváme

$$DATA = \frac{R_+ - R_-}{2} - O_{im}. \quad (4.4)$$

Vidíme, že se povedlo zcela eliminovat vliv offsetů přístrojového zesilovače O_{amp} a A/D převodníku O_{AD} na výsledná data. To je důležité zejména v případě, že by se tyto offsety v čase měnily. Naopak chyba nuly způsobená nevyvážeností můstku O_{im} nebyla tímto způsobem odstraněna a bude třeba ji kompenzovat softwarově při zpracování dat.

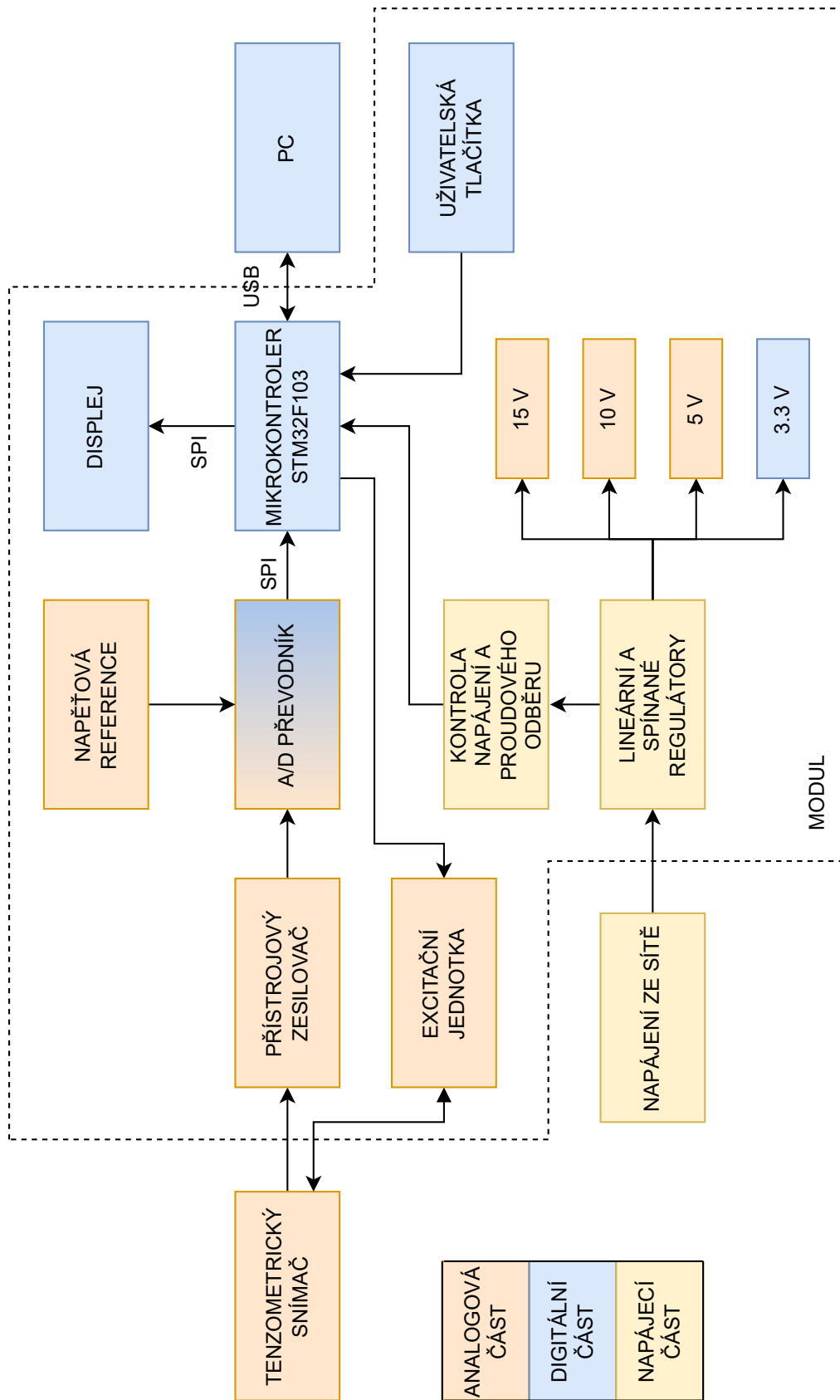
Kapitola 5

Základní idea realizace a blokový diagram

Cílem bakalářské práce je navrhnout a zprovoznit modul pro excitaci a zpracování dat z tenzometrického snímače. Měření probíhá tak, že na senzor ve formě kovového S-členu je zavěšeno závaží, jehož hmotnost je třeba určit. Modul bude realizován jako deska plošných spojů (dále DPS) s displejem, ke které se pomocí konektorů bude připojovat senzor, napájecí síťový adaptér, počítač a případné další periferie.

Celý návrh lze ideově rozdělit na tři základní části: analogová, digitální a napájecí. Analogová část zajišťuje buzení senzoru a zesílení jeho výstupního napětí, a to s důrazem na preciznost a nízký šum. Na pomyslném rozhraní analogové a digitální části je analogově-digitální převodník. Digitální část potom slouží ke zpracování naměřených dat, jejich zobrazení uživateli a umožňuje ovládání modulu uživatelskými tlačítky či přes terminál PC. Základním prvkem digitální části je mikrokontrolér STM32F103. Napájecí část pomocí kaskády lineárních a spínaných regulátorů vytváří potřebná napájecí napětí pro různé aktivní součástky - operační zesilovače, zdroje referenčního napětí, AD převodník, mikrokontrolér, displej. Modul je schopen diagnostiky napájecích napětí a proudového odběru.

Na obrázku 5.1 je zachycen blokový diagram zapojení. Oranžová barva v něm značí analogovou část, modrá barva digitální část a žlutá barva část napájecí.



Obrázek 5.1: Blokový diagram modulu

Kapitola 6

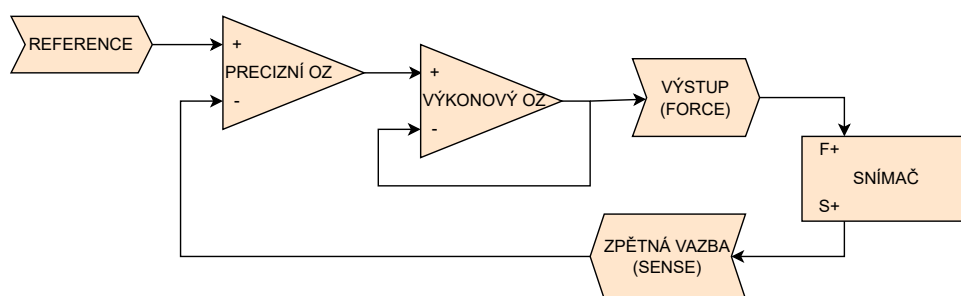
Návrh zapojení

V následující kapitole budou do větších detailů rozebrány jednotlivé části návrhu zapojení. Při návrhu se počítá s excitačním napětím senzoru 10 V a výstupním napětím senzoru v rozsahu ± 20 mV.

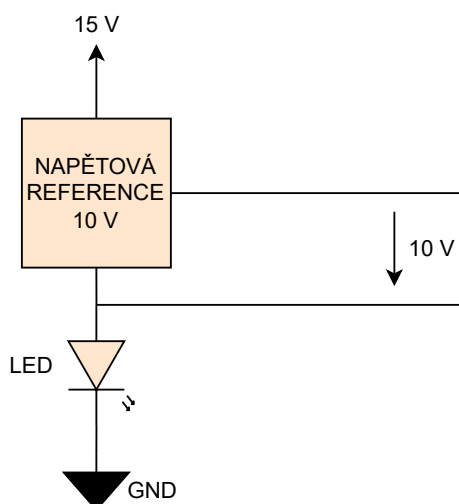
6.1 Excitace senzoru

Použitý senzor TedeA 614 má jmenovité excitační napětí 10 V stejnosměrných, při vstupním odporu 415 Ω jím bude protékat proud cca 24 mA. Požadovanou vlastností budicího napětí je především přesnost a neměnnost, neboť výstupní napětí senzoru je přímo úměrné tomu budicímu, viz rovnice 3.4. K zajištění těchto vlastností využijeme napěťovou referenci s výstupním napětím 10 V ADR01 v kombinaci s operačními zesilovači.

Protože senzorem bude protékat nezanedbatelný proud cca 24 mA, zařadíme za 10V referenci sledovač napětí složený z dvou operačních zesilovačů - precizního ADA4522 (výstupní proud max 22 mA) a výkonového OPA172 (výstupní proud až 75 mA), viz obrázek 6.1. Toto zapojení dokáže dodat potřebný proud při zachování DC parametrů precizního zesilovače [15]. Důležité pro nás je, že se neuplatní drift napěťové nesymetrie výkonového zesilovače OPA172 (1,5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$). To v kombinaci s faktem, že precizní zesilovač ADA4522 spadá do kategorie „zero-drift“ (22 nV/ $^\circ\text{C}$), zaručí, že výstupní napětí tohoto zapojení bude v čase stabilní. Vidíme ale, že výsledné parametry tohoto zapojení převyšují naše požadavky, neboť pro použitou napěťovou referenci ADR01 v



Obrázek 6.1: Sledovač napětí se dvěma OZ



Obrázek 6.2: Napěťová reference s LED

pouzdrě TSOT udává výrobce drift výstupního napětí až 9 ppm/°C. Tato reference byla zvolena z důvodu dostupnosti v době čipové krize (např. stejná reference v pouzdrě SOIC by měla drift pouze 3 ppm/°C).

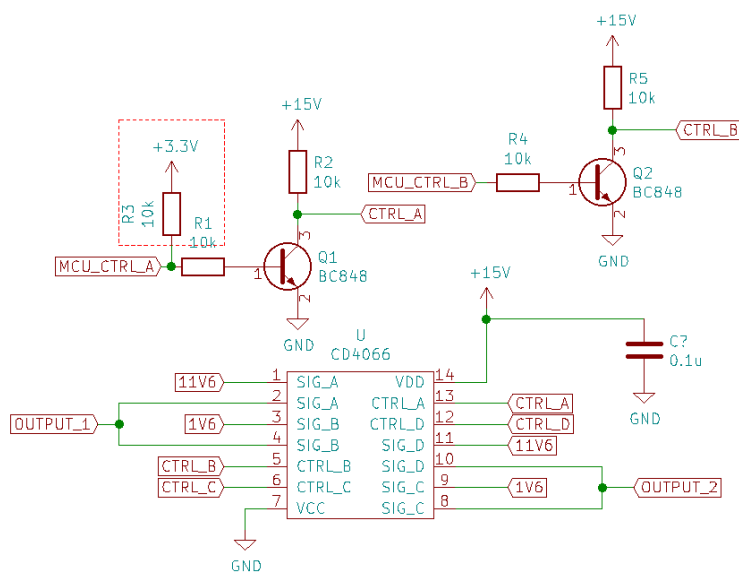
Vzhledem k tomu, že oba operační zesilovače jsou napájeny z 15 V a ze země (GND), bylo nutné vyřešit následující problém. Na svorkách senzoru potřebujeme napětí 10 V, ale protože výkonový zesilovač OPA172 nepatří do kategorie „rail-to-rail“, nemůže být na jeho výstupu hodnota blízká napájecímu napětí, v našem případě 0 V. Proto bylo nutné stejnosměrně posunout výstupní napětí 10V reference, k čemuž posloužilo zapojení s LED na obrázku 6.2. Při tomto řešení měříme na jedné vstupní svorce senzoru napětí cca 11,65 V vůči zemi, na druhé cca 1,65 V vůči zemi, a tudíž požadované rozdílové napětí je 10 V. Tento přístup byl zvolen z důvodu jednoduchosti oproti zapojení další aktivní součástky poskytující záporné napájecí napětí.

6.1.1 Komutace napájecího napětí senzoru

Abychom mohli využít tzv. flipování, neboli komutaci napájecího napětí senzoru (teorie viz kapitola Komutace napájecího napětí), zařadili jsme do zapojení integrovaný obvod se spínači CD4066 a čtyři spínací tranzistory. Toto zapojení umožňuje pomocí mikrokontroléru nastavit napětí na vstupních svorkách senzoru: 0 V (základní nastavení, senzorem neprotéká proud); +10 V (kladná polarita); -10 V (záporná polarita).

V tomto bodě bylo třeba ručně opravit chybu v návrhu DPS, která způsobovala zkrat zmíněného rozdílového napětí 10 V přes odpor sepnutého spínače CD4066. Tato situace nastávala při resetu mikrokontroléru, kdy byly výstupní piny ve stavu vysoké impedance, tudíž na bázi spínacích tranzistorů nebyla definovaná logická úroveň. Řešením bylo připájení pull-up rezistorů, aby při resetu mikrokontroléru nedocházelo ke zkratu a senzorem neprotékal žádný proud.

Schéma popsaného zapojení je na obrázku 6.3. Zapojení má dva výstupy, které nastavují napětí na svorkách senzoru. Tranzistory pro spínání signálů „C“ a „D“ ve schématu nejsou uvedeny, ale nijak se neliší dvojice tranzistorů pro signály „A“ a „B“. Červeným obdélníkem je ohraničena část, která chyběla v návrhu DPS a bylo nutné ji dodělat manuálně.



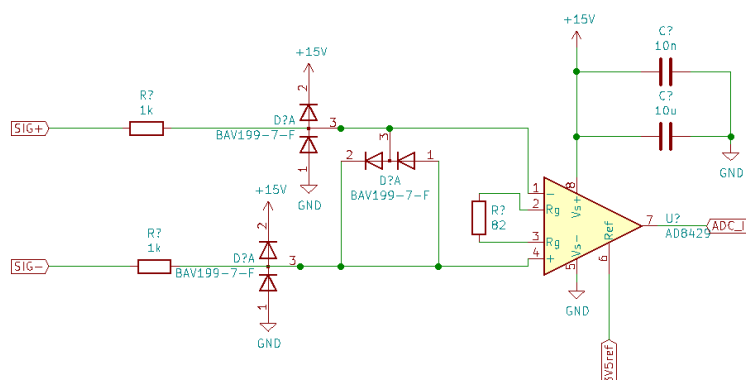
Obrázek 6.3: Schéma zapojení spínače CD4066

6.2 Zpracování výstupního signálu

Výstupní rozdílový signál senzoru se bude pohybovat v rozmezí ± 20 mV. Tento signál je třeba vhodně zesílit a stejnosměrně posunout tak, aby ho následně mohl zpracovat A/D převodník.

6.2.1 Přístrojový zesilovač

Nízkošumový přístrojový zesilovač AD8429 (schéma na obrázku 6.4) slouží k zesílení malého rozdílového napětí (± 20 mV) a jeho následnému stejnosměrnému posunu, a to tak, aby výstupní napětí leželo v rozsahu 2-5 V. Horní hranice tohoto intervalu je dána AD převodníkem, který využívá 5V napěťovou referenci, spodní hranice pak vlastností použitého zesilovače, který nepracuje „rail-to-rail“ (je napájen opět z 15 V a ze země). V našem případě jsme zvolili zesílení cca 74 a stejnosměrný posun cca 3,5 V.



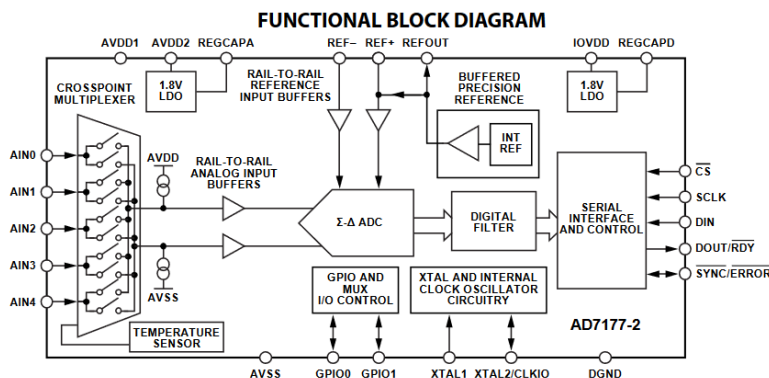
Obrázek 6.4: Schéma zapojení přístrojového zesilovače AD8429

Výhodou použití přístrojového zesilovače je vysoký činitel potlačení souhlasné složky (CMRR), který dosahuje dle informací výrobce pro dané zesílení minimálně 100 dB. Vzhledem k tomu, že je souhlasná složka napětí neměnná, nehraje tento parametr klíčovou roli, neboť případný průnik souhlasného signálu na výstup by bylo možné eliminovat kalibrací, nicméně by se mohl uplatnit při přítomnosti externího rušení.

Dalším pozitivem použití přístrojového zesilovače je vysoká vstupní impedance v řádech gigaohmů (pro AD8429 3 GΩ), tudíž výstup senzoru není použitým obvodem zatěžován.

6.2.2 AD převodník

V zapojení byl využit 32bitový převodník AD7177-2, který pracuje na principu sigma-delta modulace. Jedná se o komplexní zařízení umožňující řadu uživatelských konfigurací - nastavení filtrů, počtu vzorků za sekundu, aktivace vstupních a referenčních bufferů. Blokový diagram převodníku je na obrázku 6.5.



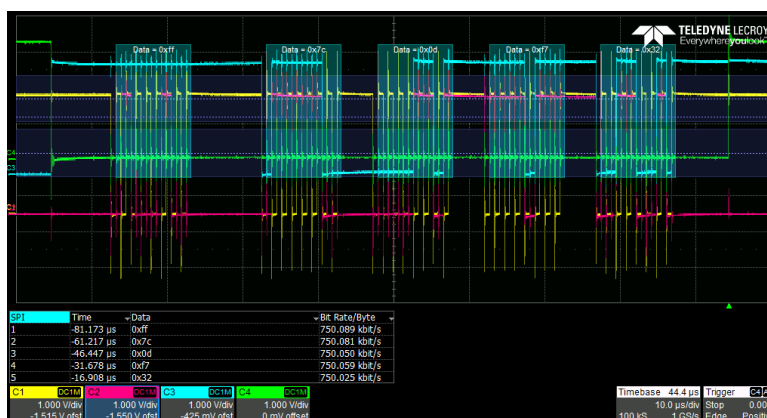
Obrázek 6.5: Blokový diagram převodníku AD7177-2 [16]

Převodník má pět vstupních kanálů, které umožňují měření napětí vůči zemi i diferenciální měření pro dvojici vstupů. V naší aplikaci využijeme právě diferenciální měření, kdy na jeden vstup přivedeme výstupní napětí přístrojového zesilovače a na druhý vstup stejnosměrné napětí 3,5 V (stejně napětí, které bylo využito ke stejnosměrnému posunu výstupu přístrojového zesilovače).

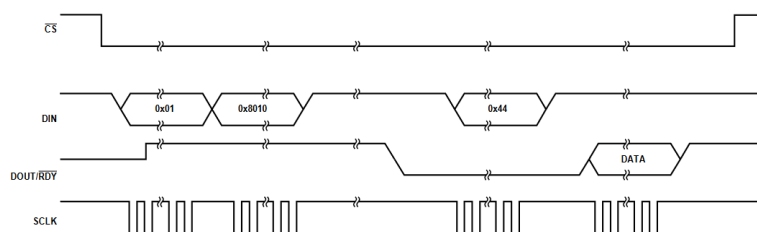
Převodník využívá interní hodinový signál o frekvenci 16 MHz. V zapojení je i možnost přivést na vstup A/D převodníku externí hodinový signál z mikrokontroléru, ale tato možnost zůstala nevyužita. Bylo ověřeno, že měření s interními hodinami funguje spolehlivě, a proto nebyl důvod používat externí hodiny, které by navíc mohly způsobovat rušení v obvodu.

Místo interní 2.5V napětové reference je využita externí reference LTC6655 s výstupním napětím 5 V. Od vstupu převodníku je impedančně oddělena napětovým sledovačem (ADA4522).

Výstupem převodníku je datové slovo o délce 24 bitů (lze zvolit i 32 bitů, ale přidané bity jsou zatíženy šumem). Komunikace s převodníkem probíhá přes čtyřvodičové rozhraní SPI (MOSI/DIN, MISO/DOUT, SCLK, CS). Přes toto rozhraní jsou nejprve nastaveny konfigurační registry převodníku, následně jsou z datového registru vyčítána data. Zařízení funguje jako slave s možností



Obrázek 6.6: Ukázka vyčtení datového slova z A/D převodníku

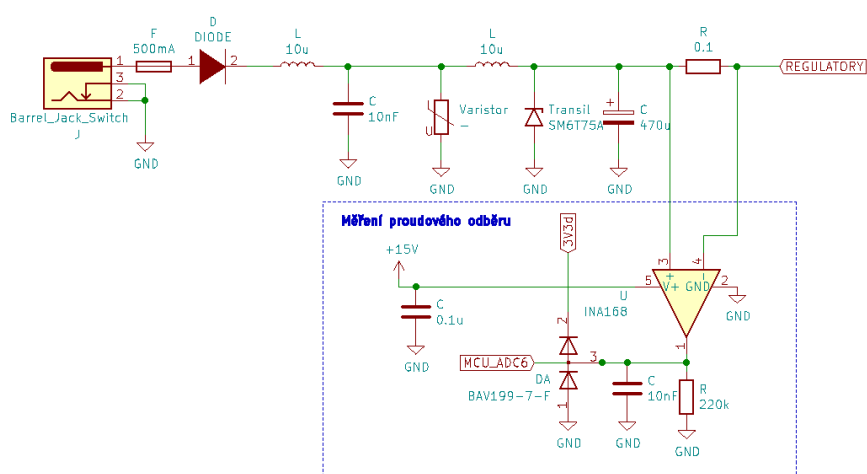


Obrázek 6.7: Průběh komunikace v Single Conversion módu [16]

vyvolat v řídicím kontroléru přerušení, pokud jsou v datovém registru nová platná data.

Ukázka základního vyčtení dat z datového registru je zachycená pomocí osciloskopu na obrázku 6.6. Převodník využívá tzv. SPI mód 3, což znamená, že hodiny jsou neaktivním stavu ve vysoké úrovni a data jsou platná na náběžnou hranu hodinového signálu. Průběh komunikace je následující: nejprve je signál CS (zelená) nastaven na logickou nulu, následně jsou aktivovány hodiny SCLK (žlutá) a signálem MOSI/DIN (červená) je vyslána hodnota 0x44, která značí čtení z datového registru. Následně se čeká na sestupnou hranu na signálu MISO/DOU (modrá). Poté, co sestupná hrana přijde, se opět aktivují hodiny a jsou přijmuty 4 byty dat (resp. 3 byty v závislosti na konfiguraci převodníku). Následně je hodnota signálu CS nastavena opět na logickou jedničku, čímž komunikace končí.

Převodník umožňuje několik režimů měření (kromě toho základního, který byl popsán výše). V našem řešení je využit „Single Conversion Mode“, neboli jednorázové měření, a to kvůli nutnosti měřit v přesně definovaných okamžicích, kdy je stabilní excitační napětí. Výstup nesmí být ovlivněn předchozími měřeními (např. skrze interní digitální filtr). Průběh komunikace převzatý z materiálů výrobce je na obrázku 6.7.



Obrázek 6.8: Schéma zapojení ochranných prvků a diagnostiky proudového odběru

V naší aplikaci využijeme následující konfigurace převodníku: digitální filtr sinc3, který je dle výrobce vhodný pro nízké rychlosti vzorkování, rychlost vzorkování bude volena uživatelem - 5/10/20 SPS (samples per second). Interní buffery můžeme ponechat vypnuté, neboť v návrhu jsou externí buffery s lepšími vlastnostmi.

6.3 Napájení

Celý modul je napájen pomocí externího síťového adaptéru s výstupním napětím 18 V. Dále jsou do napájecí části zařazeny ochranné prvky - pojistka, usměrňovací dioda, varistor, transil, dále tlumivky a blokovací kondenzátor. Kromě toho se v napájecí části nachází měření proudového odběru. Schéma zapojení je na obrázku 6.8.

6.3.1 Lineární regulátory

Vzhledem k nutnosti použít v obvodu několik napájecích úrovní byly do série zařazeny lineární regulátory s výstupním napětím 15 V (LT3066), 10 V (LT3042), 5 V (TPS7A). Tato napětí jsou použita pro napájení aktivních prvků v analogové části zapojení (napěťové reference, operační zesilovače, AD převodník). Lineární regulátory jsme zvolili z důvodu nízkého šumu na jejich

výstupu v porovnání se spínanými zdroji. Tento šum v napájení by totiž mohl negativně ovlivnit činnost precizních analogových obvodů.

■ 6.3.2 Spínané regulátory

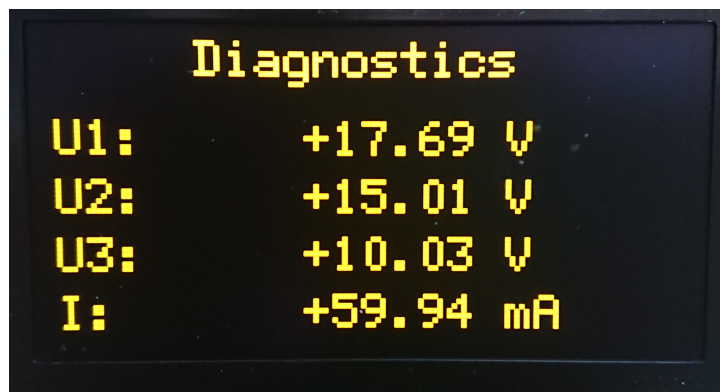
Pro napájení digitální části modulu (mikrokontrolér, displej) byl využit spínaný regulátor LM2674-N s pevným výstupní napětím 3,3 V. Spínaný zdroj byl zvolen kvůli nižšímu odběru proudu, než by měl zdroj lineární. Případný šum napájecího napětí pro „digitální“ prvky nijak negativně neovlivní činnost obvodu.

■ 6.3.3 Diagnostika

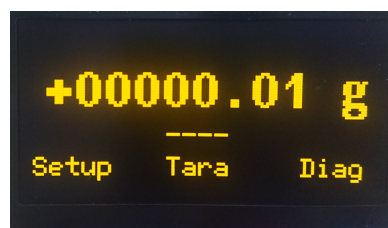
Vzhledem k množství napájecích úrovní byla do obvodu zakomponována funkcionální uživatelského ověření činnosti lineárních regulátorů (na 15 V a 10 V). Nejprve je hodnota měřeného napětí snížena odporovým děličem tak, aby ležela v intervalu od 0 V do 3,3 V. Toto napětí už může být změřeno interním A/D převodníkem mikrokontroléru STM32F103.

Dalším užitečným diagnostickým ukazatelem je proudový odběr, jehož nárůst může indikovat nesprávnou činnost obvodu. Za tímto účelem byl do obvodu zařazen proudový senzor INA168. Tento měří úbytek napětí na 0.1Ω bočníku, jeho výstupem je opět napětí měřitelné interním A/D převodníkem mikrokontroléru, které je přímo úměrné protékajícímu proudu. Při nepřipojeném senzoru se pohybuje proudový odběr řádově kolem 60 mA, připojení tenzometru odběr o dalších 24 mA zvýší (pro senzor se vstupním odporem 415Ω).

Na obrázku 6.9 je ukázka výpisu změřených veličin na displej. U1 značí vstupní napětí za ochrannou diodou, U2 výstup 15V regulátoru, U3 výstupní napětí 10V regulátoru, I proudový odběr modulu.



Obrázek 6.9: Výpis diagnostiky modulu



Obrázek 6.10: Ukázka zobrazení dat na displeji

6.4 Displej

Pro zobrazení naměřených dat uživateli je využit displej NHD-2.7-12864WDY3 s rozlišením 128x64 pixelů. Jedná se o jednobarevný displej s řadičem SSD1322, který podporuje sériovou i paralelní komunikaci. V našem zapojení využijeme sériovou komunikaci po rozhraní SPI. Tento způsob komunikace využívá 4 vodiče - MOSI, SCK, CS, D/C. Signál D/C není u SPI komunikace obvyklý, v tomto případě slouží k rozlišení, zda jsou obsahem komunikace data, či příkaz (command).

Ukázka základního zobrazení dat na displeji je na obrázku 6.10.

6.5 Řídicí mikrokontrolér

K řízení činnosti modulu byl zvolen mikrokontrolér STM32F103RE s jádrem ARM Cortex-M3 pracující s frekvencí až 72 MHz. Je vybaven flash pamětí o velikosti 512 kB a RAM pamětí o velikosti 64 kB. Dále disponuje třemi A/D převodníky a dvěma D/A převodníky. Podporuje komunikační rozhraní SPI,

I2C, I2C, UART, USART, USB, CAN. Dále obsahuje 8 časovačů (timerů) a RTC (hodiny reálného času). Programování probíhá pomocí SWD (serial wire debug). Parametry tohoto mikrokontroléru převyšují požadavky aplikace, v jeho prospěch hrála dostupnost v době čipové krize.

Napájecí napětí musí ležet v rozsahu od 2 V do 3,6 V, v našem případě se jedná o 3,3 V. V zapojení byla použita řada blokovacích kondenzátorů a také byla do přívodu napájení umístěna tlumivka s feritovým jádrem dle pokynu výrobce. Na analogové vstupy MCU byly umístěny ochranné diody BAV199, které chrání MCU před příliš vysokým nebo záporným napětím na těchto pinech. Takové napětí by totiž mohlo poškodit polovodičové struktury uvnitř MCU.

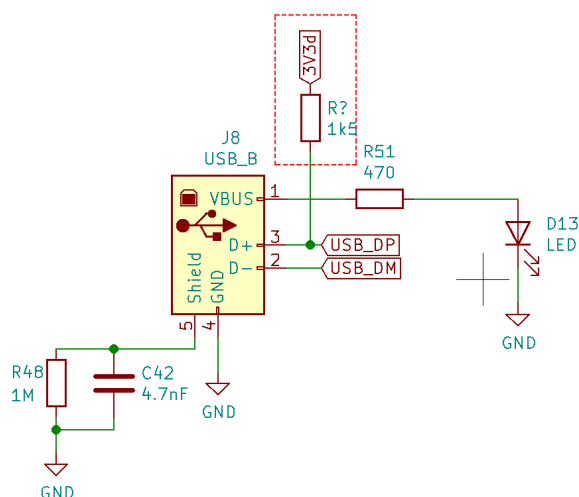
K mikrokontroléru je připojen externí krystal, který je zdrojem hodinového signálu o frekvenci 8 MHz. Tato frekvence je následně znásobena pomocí fázového závěsu na 48 MHz, což je frekvence potřebná pro USB komunikaci.

6.5.1 Uživatelské ovládání modulu

Za účelem zprostředkování komunikace člověk-počítač byly do zapojení implementovány následující funkcionality. Jednak jde o rozhraní USB, které slouží (mimo jiné) k ovládání modulu příkazy zaslanými přes sériový terminál, dále jsou to 3 uživatelská tlačítka. Ta jsou na desce viditelně označena jako F1, resp. F2, F3.

USB

Rozhraní USB (universal serial bus) je v současnosti jedním z nejpoužívanějších pro připojení periférií. Jedná se celkem o pět vodičů - dva datové (D+, D-), napájení 5 V (VCC), zem (GND) a stínění. Existuje celá řada konektorů pro toto rozhraní, na modulu je využit typ USB-B. Do zapojení bylo třeba u signálu D+ doplnit externí $1,5k\Omega$ pull-up rezistor, ve schématu zapojení na obrázku 6.11 je zvýrazněn červeně. Některé mikrokontroléry podporující USB komunikaci mají tento rezistor již integrovaný, pro použitý STM32F103 to ale neplatí.



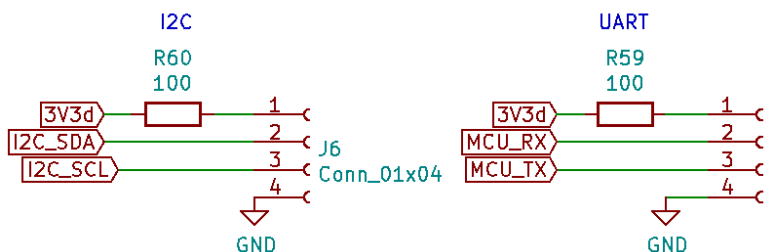
Obrázek 6.11: Schéma zapojení USB konektoru

Uživatelská tlačítka

Uživatelská tlačítka slouží k výběru požadovaného nastavení modulu. Jsou připojena na vstupní pin procesoru. Pokud tlačítko není stisknuté, je logická úroveň na vstupu definována externím pull-up rezistorem. Odskoky tlačítka jsou řešeny softwarově.

6.5.2 Možnosti dalšího rozšíření

Z mikrokontroléru jsou vyvedeny sběrnice UART a I2C pro případné budoucí rozšíření funkcionality. Jsou přístupné pomocí klasických kolíkových konektorů na DPS. Schéma vývodů je na obrázku 6.12. Jedná se vždy o dva napájecí vodiče (3,3 V; GND) a dva signálové (SDA, SCL pro I2C; RX, TX pro UART).



Obrázek 6.12: Schéma vývodů pro budoucí rozšíření

Dále je do návrhu zakomponována externí EEPROM paměť AT24CSW020 o velikosti 2048 bitů. Interně je rozdělena na 32 stránek (pages) o velikosti 8 bytů.

K paměti je přístupováno pomocí sběrnice I2C. Může posloužit například k uložení kalibračních konstant. V současném návrhu není využita, protože bylo usouzeno, že uživatel nebude samostatně provádět kalibraci, nicméně byla otestována její funkčnost.

Kapitola 7

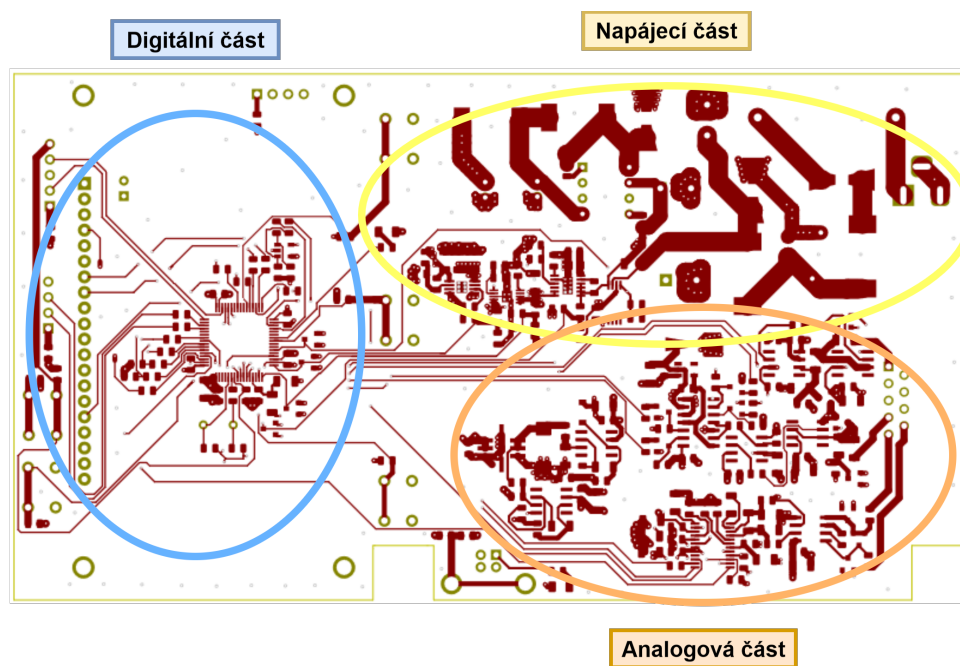
Návrh a oživení DPS

V následující kapitole je popis návrhu čtyřvrstvé DPS. Ta se skládá ze dvou signálových vrstev, zemnicí vrstvy a napájecí vrstvy. Návrh probíhal ve volně dostupném prostředí KiCAD.

7.1 Vrchní signálová vrstva

Ve svrchní vrstvě (obrázek 7.1) byla vedena většina potřebných signálů. Součástky byly uspořádány tak, aby součástky z jednotlivých částí návrhu (analogová, digitální a napájecí) byly fyzicky pospolu a spoje mezi nimi byly co nejkratší. Zároveň bylo dbáno na to, aby analogovou částí nevedly číslicové signály s ostrými hranami, které by mohly způsobovat rušení - samozřejmě až na nezbytné signály pro SPI komunikaci s A/D převodníkem.

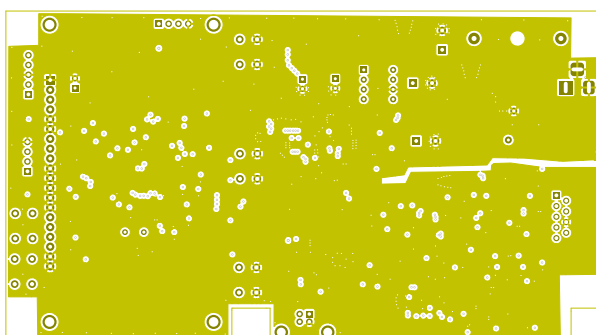
V napájecí části byly vedeny co nejširší spoje (až 3,2 mm), aby na jejich ohmickém odporu vznikaly co nejmenší tepelné ztráty. Pro digitální signály naopak byly použity spoje o šířce 0,25 mm.



Obrázek 7.1: Vrchní signálová vrstva DPS

7.2 Zemnicí vrstva

Zemnicí vrstva není jednoduší, je v ní izolační mezera mezi napájecí a analogovou částí (viz obrázek 7.2). Bylo tak učiněno z důvodu, aby „analogovou zemí“ netekl rušivý proud (proudové pulzy), jehož zdrojem může být např. spínaný regulátor na 3,3 V.



Obrázek 7.2: Zemnicí vrstva DPS

7.3 Napájecí vrstva

Napájecí vrstva je rozdělena na několik oblastí s různými napájecími napětími - 15 V, 10 V, 5 V, 3,3 V. Jedna oblast s napětím cca 3,5 V neslouží k napájení, ale přivádí potřebné napětí na vstup přístrojového zesilovače a AD převodníku (více viz kapitola Zpracování výstupního signálu). Rozložení napájecích oblastí je vidět na obrázku 7.3).



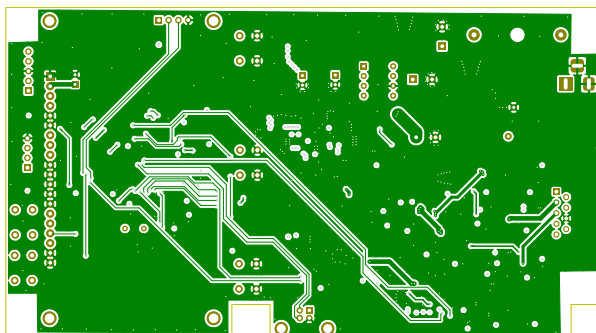
Obrázek 7.3: Napájecí vrstva DPS

7.4 Spodní signálová vrstva

Spodní signálová vrstva byla využita méně než ta vrchní, byly v ní vedeny spoje, které nešly realizovat ve vrchní vrstvě. V této vrstvě se nachází například diferenciální pár vodičů D+, D- pro USB komunikaci. Bylo dbáno na to, že jsou tyto vodiče vedeny blízko u sebe, aby netvořily smyčku, do které by se mohlo indukovat rušivé napětí. Spodní signálová vrstva je zachycena na obrázku 7.4 .

7.5 Osazení a oživení DPS

Deska byla postupně osazována autorem práce. Toto probíhalo systematicky po blocích - nejprve byla osazena napájecí část za účelem kontroly napájecích napětí. Zde se vyskytl první problém, zapojení mělo vysoký proudový odběr.



Obrázek 7.4: Spodní signálová vrstva DPS

Pomocí termovizní kamery bylo vypořádováno, že problémem je zapojení proudového senzoru INA168. Po bližším prozkoumání bylo zjištěno, že ve schématu jsou špatně očíslované vývody této součástky. Tento problém se podařilo odstranit otočením součástky „na záda“ a připájením pinů na správné vývody DPS pomocí tenkého drátu. Následně byla multimetrem ověřena funkčnost lineárních a spínaných regulátorů.

Dále byl osazen mikrokontrolér s nezbytnými součástkami a pomocí jednoduchého programu na rozblikání kontrolní LED byla ověřena jeho funkčnost. Rovněž byla otestována USB komunikace, byl zjištěn problém zmíněný v sekci USB a vyřešen přidáním externího pull-up rezistoru.

Dále bylo zprovozněna část zajišťující excitaci senzoru včetně komutace napájecího napětí. Jak již bylo zmíněno v sekci Komutace napájecího napětí senzoru, ke dvěma ze čtyřech spínacích tranzistorů bylo nutné přidat pull-up rezistor, aby nedocházelo ke zkratu při resetu mikrokontroléru. Opět bylo ověřeno, že na výstupních svorkách modulu měříme požadované napětí, tj. +10 V, příp. -10 V.

Posléze byl osazen AD převodník a pomocí osciloskopu byla otestována a odladěna SPI komunikace. Nakonec byl připojen displej a demo-programem byla otestována jeho správná funkčnost.



Kapitola 8

Firmware

Firmware pro řídicí mikrokontrolér STM32F103 byl psán v jazyce C s využitím vývojového prostředí STM32CubeIDE [18]. V následující kapitole je kromě tohoto prostředí popsána funkčnost firmwaru a nastíněn průběh hlavní smyčky v programu.



8.1 Použité vývojové prostředí

Prostředí STM32CubeIDE je komplexní nástroj pro programování mikrokontrolérů/mikroprocesorů STM32 v jazyce C/C++. Funguje pro Windows, Linux i macOS. Umožňuje uživateli volit základní konfiguraci periférií či hodin v intuitivním grafickém rozhraní, na jehož základě je následně vygenerován kód v jazyce C.

Prostředí umožňuje kompilaci kódu a jeho následné nahrání (v našem případě pomocí ST-LINKu) do mikrokontroléru. V režimu debugování lze program krokovat či živě číst hodnoty registrů nebo proměnných.

8.1.1 HAL

Prostředí přímo nabízí využití knihovny HAL (hardware abstraction layer). Tato knihovna obsahuje řadu předdefinovaných často používaných funkcí, které výrazně zjednodušují tvorbu kódu a zpřehledňují jeho čitelnost.

HAL knihovna poskytla autorovi práce dostatečnou funkcionalitu při řešení naprosté většiny problémů - ovládání GPIO pinů, vytvoření zpoždění v programu, implementace SPI a I2C komunikace. Pouze v jednom případě bylo třeba programovat na úrovni registrů mikrokontroléru, a to když pin sloužící k SPI komunikaci s A/D převodníkem (MOSI/DOUT) měl zároveň spouštět přerušování na sestupnou hranu. Zde bylo třeba podrobně prostudovat referenční manuál a vhodně modifikovat hodnoty v registrech příslušných externím přerušováním [17].

8.2 Průběh hlavní smyčky programu

Po počáteční inicializaci periférií a proměnných pracuje program v nekonečné „while“ smyčce, kde periodicky vykonává několik úkonů.

Nejprve je z globálních proměnných přečteno, jakou konfiguraci (režim měření, nastavení průměrování, počet vzorků za sekundu, senzor) si uživatel navolil (více o možných konfiguracích v sekci Uživatelské ovládání modulu). Na základě těchto dat je spuštěno měření s navolenými parametry. Měření zahrnuje excitaci senzoru, vyčtení hodnoty z A/D převodníku a její zpracování (přepočítání z 24bitového integeru na hodnotu v gramech). Pokud je zvolen režim „flipování“ (více viz Komutace napájecího napětí senzoru), je třeba vyčíst data pro kladnou i zápornou polaritu napájecího napětí, proces měření je tedy dvakrát delší než u klasického režimu. Platí tedy, že každý průchod hlavní smyčkou poskytuje uživateli novou hodnotu měřené veličiny.

K vyčítání dat z převodníku je použita metoda aktivního čekání (polling). Je tomu tak z důvodu, že měření je potřeba provádět v přesně definovaných okamžicích, kdy je excitační napětí známé a stabilní. Při použití časově efektivnějšího přístupu s DMA (direct memory access) by bylo obtížné zaručit, že při konverzi nedošlo ke změně excitačního napětí, a že měřené data jsou tudíž platná. Průběh měření je tedy následující:

1. Je nastaveno excitační napětí senzoru, následně se 10 ms čeká, než se napětí ustálí.
2. Do A/D převodníku je odeslána zpráva, aby bylo spuštěno měření.
3. Mikrokontrolér povolí vyvolání externího přerušení na pinu pro signál MISO (pro SPI komunikaci s A/D převodníkem) na spádovou hranu.
4. Dále se čeká, než v A/D převodníku proběhne konverze. Mikrokontrolér čeká ve „while“ smyčce, vyčítá opakovaně stav uživatelských tlačítek, aby bylo čekání využito efektivně.
5. Po dokončení konverze se objeví na signálu MISO spádová hrana. To vyvolá v mikrokontroléru přerušení a program opustí čekací smyčku.
6. Do A/D převodníku je vyslána zpráva s pokynem vyčtení datového registru. Je zakázáno další vyvolání přerušení na signálu MISO, aby na něm mohl proběhnout příjem dat.
7. Z datového registru jsou vyčteny 3 bajty dat a uloženy do zásobníku (datový typ *uint8_t*). Následně je provedena konverze na datový typ *int*.
8. Pokud jde o měření v klasickém režimu, je celočíselná hodnota přepočítána na hodnotu v gramech a měření je u konce. Pokud se jedná o „flipovací“ režim, je celý postup zopakován i pro opačnou polaritu napájecího napětí. V tom případě je následně ze dvou integerů vypočítána jedna hodnota měřené veličiny v gramech.

Měřená hodnota je následně vypsána na displej a současně odeslána přes USB do počítače. V hlavní smyčce je dále zkontrolován stav uživatelských tlačítek a to, zdali nebyla přijata zpráva z počítače přes USB. Pokud ano, opustí program hlavní smyčku a zpracuje tyto uživatelské požadavky. Po dokončení se vrátí zpět do hlavní smyčky a proces se opakuje.

8.3 Uživatelské ovládání modulu

Uživatel má dvě základní možnosti, jak nastavovat konfiguraci modulu:

1. Pomocí třech uživatelských tlačítek, která jsou na desce označena jako F1, F2, F3.
2. Pomocí definovaných příkazů poslaných ze sériového terminálu přes rozhraní USB.

Oba způsoby ovládání jsou ekvivalentní a poskytují stejné možnosti. Ovládání přes USB je pro uživatele rychlejší, neboť může změnit pouze jeden konkrétní parametr a nemusí se „proklikávat“ celým menu. Oba způsoby jsou podrobněji popsány níže.

Možnosti konfigurace jsou následující:

- Režim měření
 - Klasický - napájecí napětí je statické
 - S flipováním - napájecí napětí je pravidelně komutováno
- Průměrování
 - Bez průměrování - po každém měření je vypsána nová hodnota na displej
 - Klasické - po n měřeních je vypsána nová hodnota na displej
 - Klouzavý průměr z n vzorků, po každém měření je vypsána nová hodnota na displej
- Počet vzorků za sekundu - ADC SPS
 - 5 SPS, $n = 5$ pro potřeby průměrování
 - 10 SPS, $n = 10$ pro potřeby průměrování
 - 20 SPS, $n = 20$ pro potřeby průměrování
 - Pozn.: Jedná se o hodnotu interního registru A/D převodníku, skutečná obnovovací frekvence je nižší kvůli zpožděním v programu a internímu průměrování ADC.
- Senzor
 - TAS501N - rozsah 10 kg
 - TEDEA 614 - rozsah 100 kg

8.3.1 Uživatelská tlačítka

Uživatelská tlačítka se nacházejí pod displejem a jsou označena nápisy F1, F2, F3. Hlavní obrazovka (viz obrázek 6.10) je navržena tak, aby ovládání pomocí tlačítek bylo intuitivní.

Tlačítko F1 slouží ke vstupu do menu, kde uživatel postupně projde všechny body konfigurace ze sekce výše. Tlačítko F2 zajišťuje funkci nulování (tara), která je pro vážení nezbytná. Opakovaným stiskem je funkce tara vypnuta a jsou zobrazována „surová“ data, do kterých se mohou promítnout offsety součástek a nesymetrie tenzometrického můstku. Tlačítko F3 slouží k vyžádání výpisu diagnostických dat (napájecích napětí, proudového odběru) na displej.

8.3.2 Sériový terminál

Pokud připojíme modul k počítači pomocí USB rozhraní, můžeme s využitím sériového terminálu posílat mikrokontroléru konfigurační zprávy. Platné příkazy jsou popsány v tabulce 8.1. Tento způsob konfigurace umožňuje změnit pouze jeden parametr při zachování ostatních. Poslání znaku konce řádku (CR,LF) není třeba.

| Funkcionalita | Příkaz |
|----------------------|--------|
| Nápověda | '?' |
| Klasický režim | 'MC' |
| Režim s flipováním | 'MF' |
| Bez průměrování | 'AN' |
| Klasické průměrování | 'AC' |
| Klouzavý průměr | 'AS' |
| 5 SPS | 'S1' |
| 10 SPS | 'S2' |
| 20 SPS | 'S3' |
| TAS501N - 10 kg | 'R1' |
| TEDEA 614 - 100 kg | 'R2' |

Tabulka 8.1: Přehled konfiguračních příkazů

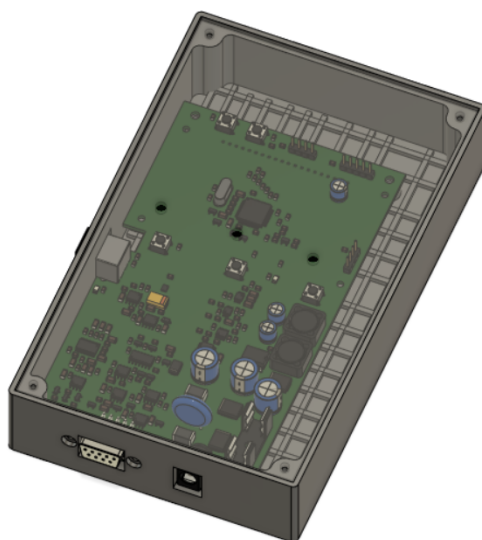
Kapitola 9

Mechanická ochrana DPS a celkový vzhled

V posledním kroku návrhu byl autorem vytvořen 3D model krabičky s plexisklem, do které je možné DPS umístit a ochránit ji tak před mechanickým poškozením. Návrh modelu probíhal v prostředí Fusion 360.

V bočních stěnách krabice jsou mezery pro použité konektory - napájení, připojení senzoru, USB. V plexisklu jsou vyříznuty 3 otvory, aby byl zachován přístup na uživatelská tlačítka (s využitím navržených hmatníků).

Finální vizualizace (bez displeje) je na obrázku 9.1. Reálný vzhled fungujícího modulu je na obrázku 9.2.



Obrázek 9.1: Vizualizace finální podoby modulu (bez displeje) v prostředí Fusion 360



Obrázek 9.2: Finální podoba modulu (s displejem)

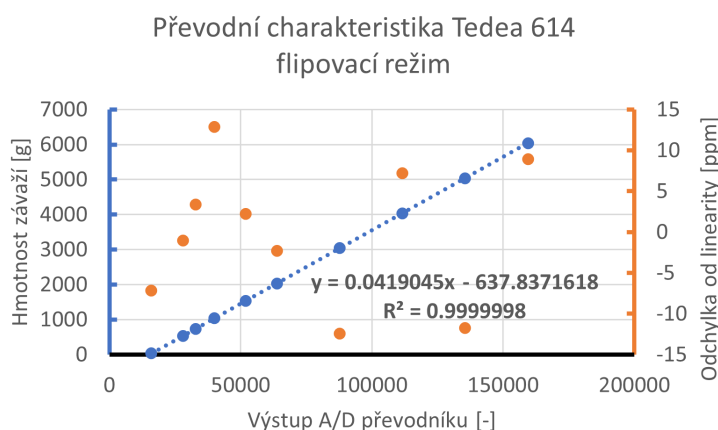
Kapitola 10

Dosažené parametry

Modul byl testován na dvou tenzometrických snímačích (Tedeá 614 - rozsah 100 kg, šestivodičové připojení, dražší; TAS501N - rozsah 10 kg, čtyřvodičové připojení, levnější). K dispozici měl autor sadu závaží o hmotnosti 200 g až 2 kg, jejichž hmotnost byla určena s přesností 0,1 g na laboratorních vahách. Z tohoto důvodu bylo testování provedeno na rozsahu cca 0-6 kg, využití těžších závaží by bylo v laboratorních podmínkách nepraktické (nelze určit hmotnost na dostupných vahách s omezeným rozsahem; špatně se s nimi manipuluje; dochází k namáhání materiálu, na kterém je snímač upevněn).

Měření pro daný snímač a daný režim měření (statické/komutované napájení) probíhalo následovně:

1. Na snímač byl zavěšeno závaží známé hmotnosti.
2. Byla zjištěna hodnota datového slova na výstupu A/D převodníku (průměr z 20 odběrů).
3. Hodnota byla zaznamenána do tabulky.
4. Po 10 měřeních s různými závažími (hmotnost se postupně zvyšovala) byly hodnoty proloženy přímkou ve smyslu nejmenších čtverců. Byla získána závislost hmotnosti na výstupním slově A/D převodníku.
5. Pro každé měření byla stanovena odchylka od linearity vzhledem k rozsahu (v ppm).



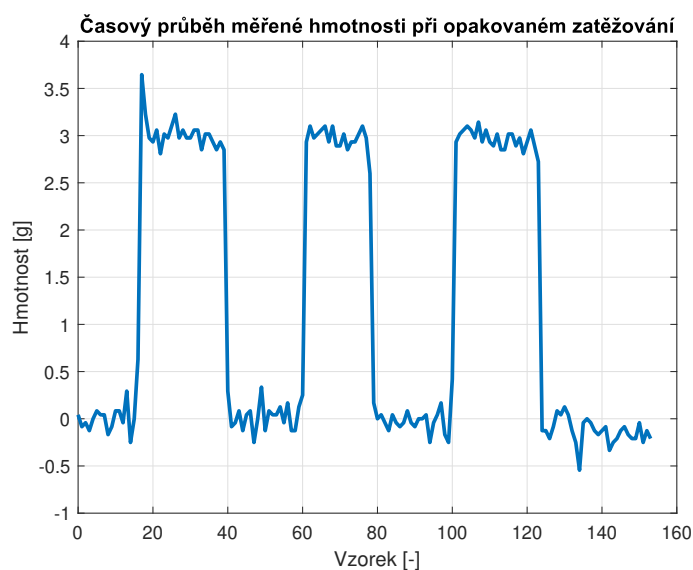
Obrázek 10.1: Převodní charakteristika pro senzor Tedeia 614

Hodnoty pro snímač Tedeia 614 s rozsahem 100 kg v režimu komutovaného napájecího napětí jsou vyneseny do grafu na obrázku 10.1. Vidíme, že charakteristika je lineární, jak jsme na základě rovnice 3.4 předpokládali. Důležitým parametrem je **odchylka od linearity**, jejíž maximální hodnota při postupném zatěžování byla změřena jako **13 ppm** (v absolutních číslech 1,3 g). Výrobce snímače odchylku od linearity neudává, pouze uvádí celkovou chybu 200 ppm (20 g). Vidíme, že dosažený výsledek je výrazně lepší, nicméně je třeba brát v potaz, že senzor nebyl testován v plném rozsahu (při větším zatížení se může více projevit nelinearita v důsledku hystereze).

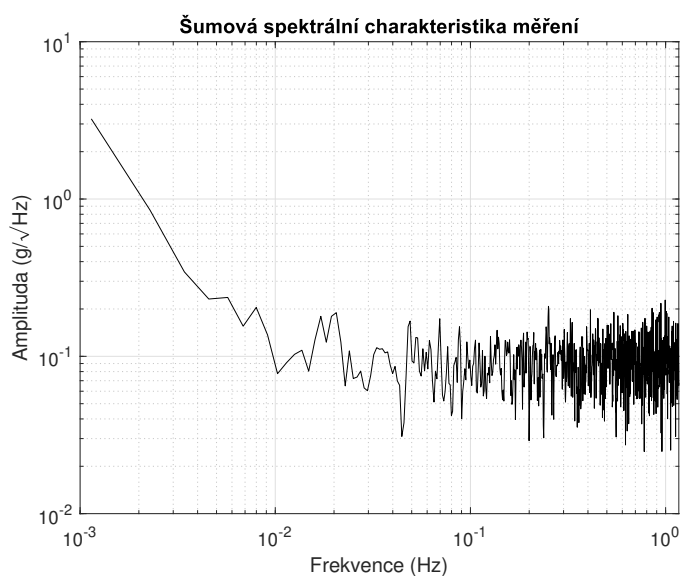
Hysterezi jsme se pokusili určit vynulováním váhy a následným zatížením senzoru cca 6 kg. Po odebrání závaží by se měla měřená hodnota vrátit zpět na nulu, byla pozorována „zbytková“ hodnota 1,6 g. Ta řádově odpovídá změřené nelinearitě a nemusí nám tedy výrazně vadit.

Pro snímač Tedeia 614 jsme do grafu 10.2 sejmuli časový průběh měřené veličiny při opakovaném zatěžování závažím o hmotnosti cca 3 g. Pro zobrazení dat byl využit program Data Plotter [19], parametry měření byly následující: komutované buzení, bez průměrování, nejrychlejší měření (20 SPS ADC). Pro stejnou konfiguraci jsme se pokusili zachytit šumovou spektrální charakteristiku měření, je zobrazena v obrázku 10.3. Záznam dat trval 30 minut, bylo naměřeno 4207 vzorků, reálná vzorkovací frekvence tedy byla 2,34 Hz. V pásmu od 0,05 Hz do 1 Hz pozorujeme bílý šum o velikosti 0,7 g p-p. Menšího šumu můžeme dosáhnout průměrováním při zpracování dat i delší dobou odběru vzorku v A/D převodníku (méně SPS).

Levnější snímač TAS501N s rozsahem 10 kg nedosáhl tak dobrých výsledků, odchylka od linearity byla změřena jako **134 ppm**, což odpovídá 1,34 g. Těchto

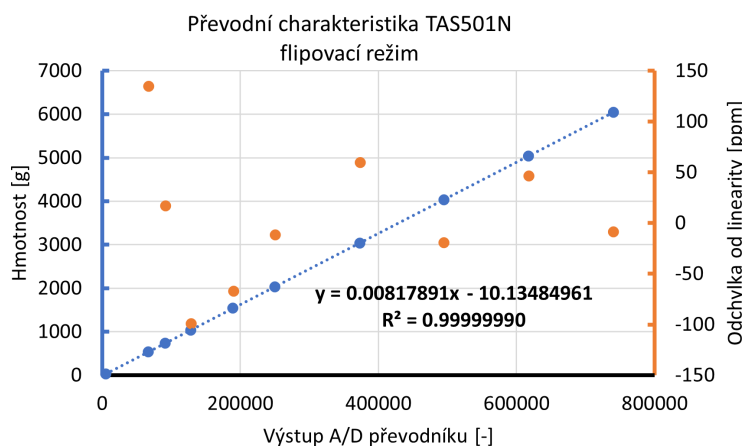


Obrázek 10.2: Časový průběh měřené veličiny



Obrázek 10.3: Šumová spektrální charakteristika měření

výsledků bylo dosaženo při stálých vnějších podmínkách a při postupném zatěžování. Opakovaným testováním bylo zjištěno, že opakovatelnost odpovídá hodnotám udávaným výrobcem, tj. ± 5 g. Předpokládanou příčinou je projevíající se hystereze a chybějící kompenzace změny odporu přívodních vodičů při změně teploty (laboratoř nebyla klimatizována). **Snímač TAS501N tak nelze pro precizní měření doporučit.** Převodník charakteristika senzoru TAS501N při komutovaném napájení a postupném zatěžování je na grafu na obrázku 10.4.

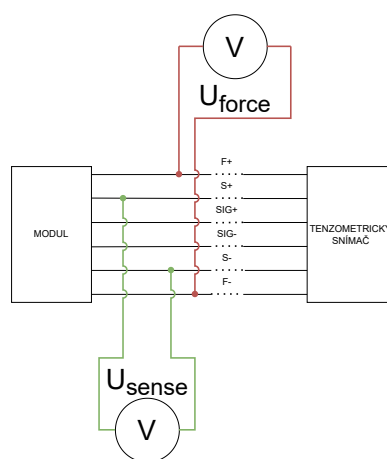


Obrázek 10.4: Převodní charakteristika pro senzor TAS501N

10.1 Vliv čtyř/šestivodičového připojení

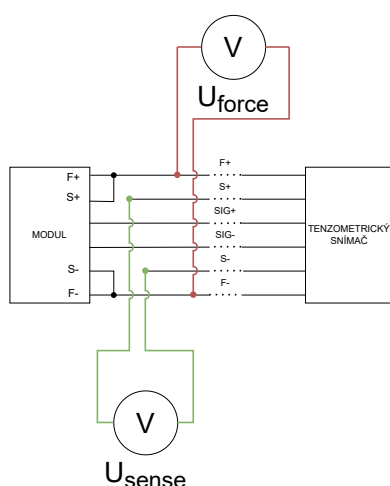
Z teoretického rozboru v sekci Sense/Force metoda víme, že šestivodičové připojení by mělo zajistit eliminaci vlivu odporů přívodních vodičů.

K ověření této vlastnosti jsme provedli dvě měření, nejprve se šestivodičovým, posléze čtyřvodičovým připojením. Měření bylo provedeno pomocí přesného multimetru s vnitřním odporem $10\text{ G}\Omega$. U šestivodičového připojení jsme měřili napětí U_{sense} a U_{force} dle schématu na obrázku 10.5. U čtyřvodičového připojení jsme spojili (zkratovali) příslušné „force“ a „sense“ vodiče před vstupem do modulu, měřili jsme napětí dle schématu na obrázku 10.6.



Obrázek 10.5: Schéma měření v 6vodičovém zapojení

Změřená napětí jsou zaznamenána v tabulce 10.1. Vidíme, že na přívodních



Obrázek 10.6: Schéma měření v 4vodičovém zapojení

kabelech dochází k úbytku napětí cca 18 mV, z rovnice 3.4 víme, že tento rozdíl v napájecím napětí se projeví jako chyba zesílení. Tato chyba by šla jednoduše vyřešit kalibrací, problém by nastal při změně tohoto odporu vlivem teploty nebo prodloužením přívodního kabelu. **Šestivodičové zapojení je tedy odolnější vůči vnějším vlivům než čtyřvodičové zapojení a přispívá ke stabilitě a přesnosti měření.**

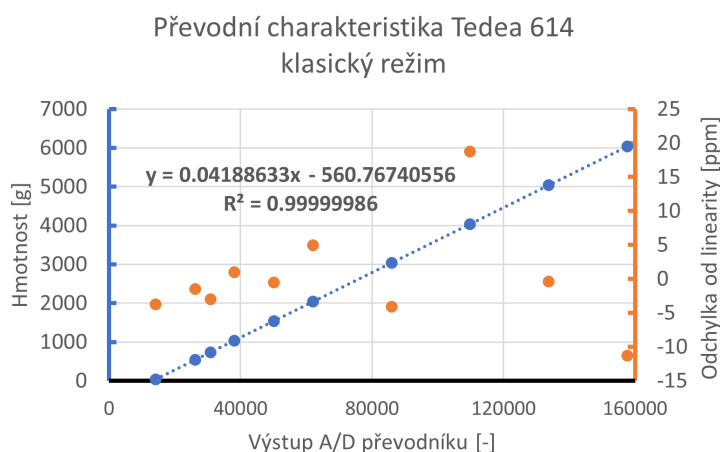
| Zapojení | U_{sense} [V] | U_{force} [V] | $U_{force} - U_{sense}$ [V] |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| 6vodičové | 9,9997 | 10,0185 | 0,0188 |
| 4vodičové | 9,9814 | 9,9997 | 0,0183 |

Tabulka 10.1: Výsledky měření vlivu 6vodičového připojení

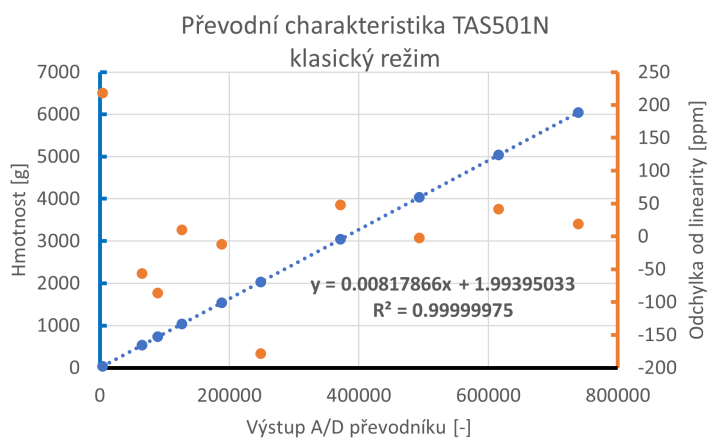
10.2 Vliv komutovaného/statického napájení můstku

Komutované napájecí napětí můstku by mělo eliminovat vliv některých offsetů v měřicím řetězci (více v sekci Komutace napájecího napětí). Pokud by se tyto offsety v čase měnily, byla by metoda klíčová pro přesnost měření. Na obrázcích 10.7 a 10.8 je převodní charakteristika senzorů v „klasickém“ režimu, tj. se statickým napájecím napětím. Pozorujeme, že odchylky od linearity (18 ppm pro Tede 614, 217 ppm pro TAS501N) se řádově podobají těm získaným pro komutované napájení, nelze usuzovat, že by došlo ke zlepšení vlastností.

Není důvod předpokládat, že by se měl offset přístrojového zesilovače nebo



Obrázek 10.7: Převodní charakteristika senzoru Tedeia 614 pro statické napájení



Obrázek 10.8: Převodní charakteristika senzoru TAS501N pro statické napájení

A/D převodníku v čase výrazně měnit, pokud uvažujeme čas od vynulování váhy do konce měření. Teplotní drift výstupního napěťového offsetu je u přístrojového zesilovače AD8429 typicky $3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, u převodníku udává výrobce drift vstupního napěťového offsetu $80 \text{ nV}/^\circ\text{C}$. To v součtu odpovídá (při přepočtu na rozsah měření) přibližně hodnotě $2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, drobné změny teploty by se tedy neměly projevit. **Komutace napájecího napětí můstku tedy nemá na tento druh měření zásadní vliv, ke stejné funkcionalitě poslouží funkce nulování (tara).**

Kapitola 11

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a zprovoznit modul pro excitaci tenzometrického snímače zátěže a zpracování jeho výstupního signálu. Bylo navrženo schéma zapojení a deska plošných spojů, která byla následně autorem osazena a úspěšně oživena. Modul vypisuje naměřená data na displej a odesílá je přes USB do počítače. Uživateli je umožněno nastavení režimu měření (statické/komutované napájení, průměrování, počet vzorků za sekundu, použitý senzor), a to jak pomocí uživatelských tlačítek, tak přes sériový terminál.

Modul byl testován na dvou snímačích - Tedeo 614 a TASN501N. Snímače byly porovnány z hlediska linearity, lepší vlastnosti vykazoval dle očekávání snímač Tedeo 614 umožňující šestivodičové připojení. Je ale nutné vzít v úvahu, že snímač nebyl testován v celém rozsahu (100 kg), takže lze předpokládat, že výsledná nelinearita bude vyšší.

Dále bylo srovnáno měření čtyřvodičovou a šestivodičovou metodou z pohledu kompenzace vlivů způsobených změnou odporu přírodních vodičů, šestivodičové připojení můžeme pro precizní měření doporučit. Vliv statického/komutovaného napájecího napětí na výsledek měření nebyl prokázán, lze předpokládat, že eliminované offsety se výrazně neměnily v čase (potřebném pro vážení).

Modul poslouží k vážení v laboratoři a jako demonstrační pomůcka ve výuce předmětu Senzory a měření. Případné další rozšíření (např. o modul hlasového výstupu) je umožněno díky vyvedeným konektorům I2C a UART, je možné navázat i vytvořením uživatelského rozhraní pro ovládání z počítače a vykreslování naměřených hodnot.

Příloha A

Seznam použitých pojmů a zkratk

| Zkratka/pojem | Vysvětlení | Překlad |
|---------------|------------------------------|---------------------------------|
| A/D (ADC) | analog-digital (converter) | analogově-digitální (převodník) |
| DPS | deska plošných spojů | - |
| offset | chyba nuly | - |
| ppm | parts per milion | počet částí z miliónu |
| ppb | parts per bilion | počet částí z miliardy |
| USB | universal serial bus | univerzální sériová sběrnice |
| SPS | samples per second | počet vzorků za sekundu |
| MISO | master input, slave output | - |
| MOSI | master output, slave input | - |
| CS | chip select | výběr zařízení |
| DMA | direct memory access | přímý přístup do paměti |
| HAL | hardware abstraction layer | vrstva abstrakce hardwaru |
| SPI | serial peripheral interface | sériové periferní rozhraní |
| GPIO | general purpose input-output | vstupně-výstupní (pin) |
| MCU | microcontroller unit | mikrokontrolér |

Tabulka A.1: Seznam pojmů a zkratk

Příloha B

Literatura

- [1] CHAO, L. S., S. SCHLAMMINGER, D. B. NEWELL, et al. A LEGO Watt balance: An apparatus to determine a mass based on the new SI. *American Journal of Physics* [online]. 2015, **83**(11), 913-922 [cit. 2022-05-01]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: doi:10.1119/1.4929898
- [2] HADDAD, D., F. SEIFERT, L. S. CHAO, S. LI, D. B. NEWELL, J. R. PRATT, C. WILLIAMS a S. SCHLAMMINGER. Invited Article: A precise instrument to determine the Planck constant, and the future kilogram. *Review of Scientific Instruments* [online]. 2016, **87**(6), 3-12 [cit. 2022-05-01]. ISSN 0034-6748. Dostupné z: doi:10.1063/1.4953825
- [3] International Prototype of the Kilogram. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Prototype_of_the_Kilogram
- [4] Kilogram: The Kibble Balance. *National Institute of Standard and Technology* [online]. Gaithersburg, May 14, 2018 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/si-redefinition/kilogram-kibble-balance>
- [5] IDA, Nathan. Force sensors. *Sensors, Actuators, and Their Interfaces: A Multidisciplinary Introduction* [online]. 2. Institution of Engineering & Technology: ProQuest Ebook Central, 2020, s. 332-344 [cit. 2022-05-02]. ISBN 9781785618369. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=6423120>
- [6] Strain Gauges: Chapter 9 - Electrical Instrumentation Signals. *All About Circuits* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-9/strain-gauges/>

