



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ HMOTNOSTI PACIENTA LEŽÍCÍHO NA LŮŽKU

MEASURING THE WEIGHT OF A BEDRIDDEN PATIENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Major

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Václav Kaczmarczyk, Ph.D.

BRNO 2025



Diplomová práce

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

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Martin Major

ID: 221002

Ročník: 2

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Měření hmotnosti pacienta ležícího na lůžku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s konstrukcí rámu lůžka a snímači, které budou sloužit pro měření.
2. Navrhnete vyhodnocovací člen pro vybrané snímače a elektroniku pro digitalizaci informace.
3. Realizujete měřicí řetězec po HW i SW stránce
4. Ověřte funkčnost řešení.
5. Celé řešení zadokumentujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Ďaďo, S., Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody, Monografie, ČVUT Praha, 1996

Pavel Herout: Učebnice jazyka C, KOPP, 2004, IV. přepracované vydání, ISBN 80-7232-220-6

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 21.5.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Kaczmarczyk, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací systému pro měření hmotnosti pacienta ležícího na lůžku. Práce analyzuje různé typy snímačů vhodných pro tuto aplikaci a experimentálně ověřuje vlastnosti odporových tenzometrických snímačů FX1901 a FMXD. Pro testování byly navrženy přípravky vytištěné 3D tiskárnou, umožňující přesné měření charakteristik snímačů se zaměřením na dlouhodobou stabilitu, posun nulového bodu a teplotní závislost. Pro finální systém byl navržen vyhodnocovací člen založený na mikrokontroléru SAMD21G17A-A včetně kompletního elektrického schématu a desky plošných spojů. Softwarová koncepce využívá knihovnu ASF a předpokládá implementaci algoritmů pro kalibraci, filtraci signálu a komunikaci přes rozhraní RS485. Výsledný systém nabízí přesné a stabilní měření hmotnosti s potenciálem významně zlepšit péči o imobilní pacienty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření hmotnosti, tenzometrické snímače, FX1901, FMXD, teplotní závislost, dlouhodobá stabilita, Wheatstoneův můstek

ABSTRACT

This thesis deals with the design and implementation of a system for measuring the weight of a bedridden patient. The thesis analyses different types of sensors suitable for this application and experimentally verifies the properties of the FX1901 and FMXD resistive strain gauge sensors. 3D printed fixtures have been designed for testing, enabling accurate measurement of the sensor characteristics with a focus on long-term stability, zero-point shift and temperature dependence. For the final system, a SAMD21G17A-A microcontroller-based evaluation unit was designed, including a complete electrical schematic and circuit board. The software design uses the ASF library and assumes the implementation of algorithms for calibration, signal filtering and communication via RS485 interface. The resulting system offers accurate and stable weight measurement with the potential to significantly improve the care of immobile patients.

KEYWORDS

Weight measurement, strain gauges, FX1901, FMXD, temperature dependence, long-term stability, Wheatstone bridge

MAJOR, Martin. *Měření hmotnosti pacienta ležícího na lůžku*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2024. Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Kaczmarczyk, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Martin Major
VUT ID autora: 221002
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: Měření hmotnosti pacienta ležícího na lůžku

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Václavovi Kaczmarczykovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Ondřeji Baštánovi za poskytnutí referenčního schématu a za ochotnou pomoc a rady při návrhu DPS.

Obsah

Úvod	12
1 Měření hmotnosti ve zdravotnictví	13
1.1 Váhy pacientů dostupné na trhu	14
2 Měření hmotnosti pomocí snímačů	16
2.1 Měřicí řetězec	16
2.2 Typy snímačů hmotnosti	16
2.2.1 Kapacitní tenzometrické snímače	17
2.2.2 Piezoelektrické snímače síly	17
2.2.3 Odporové tenzometrické snímače	18
2.2.4 Zapojení tenzometrů	20
3 Měřicí přípravek	22
3.1 Blokové schéma měřicí stanice	22
3.2 Mechanická konstrukce	23
3.2.1 1. Verze modelu pro snímač FX1901	23
3.2.2 Finální model přípravku pro snímač FX1901	24
3.2.3 Model přípravku pro snímač FMXD	25
3.3 Elektrické komponenty	26
3.3.1 Snímače	27
3.3.2 AD převodníky	30
3.3.3 Mikrokontroléry	33
3.4 Využitý software	34
3.4.1 Firmware pro Arduino	34
3.4.2 Firmware pro ESP32	35
3.4.3 Zpracování dat v PC	36
3.4.4 Kalibrace snímačů zatížení	39
4 Měření charakteristik snímačů	41
4.1 Úvod	41
4.1.1 Posun nuly po dlouhodobém zatížení	41
4.1.2 Posun nulového bodu vlivem teploty	42
4.2 Metodika měření	42
4.3 Výsledky	43
4.3.1 Průběhy snímače FMXD	43
4.3.2 Průběhy snímače FX1901	47
4.4 Porovnání vlastností snímačů	50

4.4.1	Srovnání dlouhodobé stability	50
4.4.2	Srovnání návratu k nulové hodnotě	51
4.4.3	Srovnání teplotní závislosti	51
5	Komponenty vyhodnocovacího členu	52
5.1	Požadavky na vyhodnocovací elektroniku	52
5.2	Výběr komponent pro vyhodnocovací člen	52
5.2.1	Napájení	53
5.2.2	Mikrokontrolér	54
5.2.3	Komunikace	54
5.2.4	AD převodník	54
6	Návrh obvodu vyhodnocovacího členu	56
6.1	Blokové schéma	56
6.2	Zapojení napájecích obvodů	56
6.2.1	Digitální napájecí větev U3	56
6.2.2	Analogová napájecí větev U4	57
6.2.3	Vstupní ochrana napájení	57
6.2.4	EMR filtrace	57
6.3	Zapojení mikrokontroléru	57
6.4	Zapojení Transceiveru SP3485EN-L/TR	58
6.5	Zapojení AD převodníku	58
7	Návrh plošného spoje	60
8	Návrh firmware řešení pro vyhodnocovací člen	62
8.1	Vývojové prostředí a použité knihovny	62
	Závěr	64
	Literatura	65
	Seznam symbolů a zkratk	68
	Seznam příloh	69
A	Elektronický systém pro vyhodnocovací člen	70
A.1	Elektronické schéma	70
A.2	Deska plošných spojů	77

B	Obsah přiloženého CD	81
B.1	Vytvořené modely přípravků v prostředí Siemens NX	81
B.2	Výpracované Matlab programy pro analýzu měření	81
B.3	Kompletní soubory vypracované v programu KiCad	81
B.4	Využití kódy	81

Seznam obrázků

1.1	Postelová váha M-950	14
1.2	Lůžková váha Radwag	15
2.1	Kapacitní tenzometrický snímač a jeho charakteristika	17
2.2	Piezelektrický senzory síly	18
2.3	Typy odporových tenzometrů	19
2.4	Polovodičový tenzometr	20
2.5	Čtvrtinový Wheatstoneův můstek	21
2.6	Poloviční Wheatstoneův můstek	21
2.7	Plný Wheatstoneův můstek	21
3.1	Blokové schéma komunikace v měřicí stanici	22
3.2	Model přípravku pro snímač FX1901, typ 1	24
3.3	Finální model přípravku pro snímač FX1901	25
3.4	Model přípravku pro snímač FMXD	26
3.5	Hotový přípravek pro snímač FMXD	26
3.6	Snímač FX1901 [9]	28
3.7	Schema snímače FX1901	28
3.8	Snímač FMXD 1kn[11]	29
3.9	Schema snímače FMXD 1kn	29
3.10	Modul se snímačem teploty SHT31	30
3.11	AD převodník HX711	31
3.12	AD převodník NAU7802	32
3.13	Arduino Nano	33
3.14	ESP32 Devkit V1	34
3.15	Aplikace pro ukládání dat	38
4.1	Průběh dlouhodobého zatížení snímače FMXD	44
4.2	Průběh ustálení výstupu snímače FMXD	45
4.3	Teplotní závislost snímače FMXD	46
4.4	Průběh dlouhodobého zatížení snímače FX1901	47
4.5	Průběh ustálení výstupu snímače FX1901	48
4.6	Teplotní závislost snímače FX1901	50
6.1	Blokové schéma obvodu vyhodnocovacího členu	56
7.1	3D zobrazení DPS verze 2	61
7.2	3D zobrazení DPS verze 3	61
8.1	Vývojový diagram Firmwaru vyhodnocovacího členu	63

Seznam tabulek

3.1	Důležité parametry snímače FX1901 [9]	27
3.2	Důležité parametry snímače FMXD [10]	28
3.3	Parametry snímače SHT31 [12]	29
3.4	Důležité parametry AD převodníku HX711 [14]	30
3.5	Důležité parametry AD převodníku NAU7802 [16]	32
4.1	Vyhodnocení driftu snímače FMXD při dlouhodobém zatížení	44
4.2	Průběh ustálení nulové hodnoty snímače FMXD	45
4.3	Vyhodnocení driftu snímače FX1901 při dlouhodobém zatížení	48
4.4	Průběh ustálení nulové hodnoty snímače FX1901	49
4.5	Srovnání driftu při dlouhodobém zatížení	50
4.6	Srovnání návratu k nulové hodnotě	51
4.7	Srovnání teplotní závislosti výstupního signálu	51

Úvod

Měření hmotnosti pacienta je velice důležitý aspekt v oblasti aplikace léčby, dávkování léků a správného procesu léčby. V dnešní době je vážení pacientů, zejména pak pacientů upoutaných na lůžko, stále obtížné. Ve většině případů se musí pacient přesunout na váhu. Tato práce se zabývá vytvořením systému, který by bylo možné lehce aplikovat ve zdravotnictví.

Systém měření hmotnosti na lůžku je navržen jako modulární, zahrnující snímače hmotnosti integrované do lůžka a jednotku pro zpracování dat s mikrokontrolerem pro ukládání a vyhodnocování dat. Výsledný systém musí být stabilní a přesný, aby minimalizoval nutnost manipulace s pacientem a umožnil automatizované monitorování.

Práce je rozdělena do několika klíčových částí. První kapitola je zaměřena na významem měření hmotnosti pacientů a analýzou dostupných zdravotnických vah na trhu, které poskytují kontext pro potřebu vývoje nového řešení.

Druhá kapitola popisuje teoretické principy měření hmotnosti pomocí různých typů snímačů a jejich využitelnosti pro tuto specifickou aplikaci. Jsou zde podrobně rozebrány vlastnosti kapacitních, piezoelektrických a odporových tenzometrických snímačů včetně jejich výhod a omezení.

Ve třetí kapitole jsou detailně představeny dva vybrané typy snímačů (FX1901 a FMXD), u kterých byla posouzena jejich vhodnost pro využití v navrhovaném systému. Pro tyto snímače jsem navrhl a vyrobil speciální přípravky umožňující jejich přesné testování. Čtvrtá kapitola představuje výsledky měření charakteristik vybraných snímačů, včetně jejich dlouhodobé stability, teplotní závislosti a posunu nulového bodu po zatížení. Tato experimentální data jsou klíčová pro zhodnocení vhodnosti snímačů pro praktické nasazení v této práci.

Pátá a šestá kapitola se věnují návrhu komponent vyhodnocovacího členu a kompletního elektrického obvodu pro zpracování signálů ze snímačů. V sedmé kapitole je pak prezentován návrh plošného spoje pro realizaci vyhodnocovacího členu.

Osmá kapitola se zaměřuje na návrh softwarového řešení pro vyhodnocovací člen. Obsahuje koncepci řídicího algoritmu. Součástí je i vývojový diagram zobrazující klíčové funkční bloky a tok řízení programu.

Cílem této diplomové práce je vytvořit komplexní řešení pro přesné měření hmotnosti pacientů upoutaných na lůžko, které bude prakticky využitelné ve zdravotnických zařízeních. Výstupem by měl být funkční systém měření, který přispěje k inovaci zdravotnického vybavení a zlepší efektivitu péče o pacienty.

1 Měření hmotnosti ve zdravotnictví

Měření hmotnosti pacienta na lůžku je klíčovým bodem ve zdravotnictví, zejména při péči o pacienty se sníženou mobilitou. Hmotnost pacienta představuje jeden z nejdůležitějších parametrů pro komplexní monitorování zdravotního stavu a řízení léčebného procesu. Význam přesného měření hmotnosti má několik zásadních klinických aspektů. V oblasti farmakologie je přesná znalost hmotnosti kritická pro správné dávkování léčiv. Mnoho moderních léků, včetně chemoterapeutik, antibiotik a anesteziologických přípravků, se dává striktně podle tělesné hmotnosti. Nepřesné měření může vést k nedostatečnému léčebnému účinku, nebo naopak k předávkování s rizikem toxických reakcí.

Pravidelné sledování hmotnosti je rovněž nezbytné pro monitorování nutričního stavu a hydratace pacientů. Ať už pokles, nebo nárůst hmotnosti v jednotkách kilogramů může být příznakem závažného onemocnění či nežádoucím projevem aplikované terapie. U dlouhodobě hospitalizovaných pacientů slouží trend vývoje hmotnosti jako jeden z hlavních indikátorů účinnosti léčby. Například v onkologii je udržení nebo nárůst hmotnosti během terapie pozitivním faktorem, zatímco při léčbě obezity je naopak žádoucí kontrolovaný pokles hmotnosti. V minulosti bylo vážení imobilních pacientů prováděno jejich přesunutím na standardní váhu nebo pomocí závěsné váhy. Tyto metody jsou však časově náročné, nepohodlné a pro pacienta potenciálně rizikové. Manipulace s pacientem může vést k bolesti, diskomfortu nebo dokonce k poranění, a to jak pacienta, tak zdravotnického personálu.

S rozvojem moderních technologií se stále více prosazuje zabudované měření hmotnosti přímo v lůžku pacienta. První generace těchto systémů představovaly elektrické váhy, které se vkládaly pod kolečka postele pacienta. V současné době jsou na trhu dostupné komplexní elektrické postele s integrovaným systémem pro měření hmotnosti, které zároveň nabízejí možnosti polohování a další funkce pro komfort pacienta i personálu. Data o hmotnosti jsou sbírána v reálném čase, ukládána a vyhodnocována pomocí počítačových systémů, což umožňuje sledovat časové trendy a včas identifikovat potenciálně rizikové změny. Připojení vah je realizováno v provedení drátovém (typicky přes USB (*Universal serial bus*)) i bezdrátovém (Bluetooth/Wi-Fi (*Wireless fidelity*)), přičemž současný trend jednoznačně směřuje k bezdrátovým a plně automatizovaným řešením. Tento přístup minimalizuje nutnost manuálních zásahů a umožňuje zdravotnickému personálu získávat údaje v reálném čase i na dálku, což je zásadní především pro nepřetržité monitorování pacientů v kritickém stavu.

V následujících podkapitolách jsou stručně popsána konkrétní technologická řešení pro vážení pacientů, která jsou dostupná na současném trhu.

1.1 Váhy pacientů dostupné na trhu

Postelová váha Marsden M-950

Jedná se o přenosnou váhu, která se skládá ze 4 železných vážících podložek a vozíku s ovládacím panelem. Vážící podložky se položí pod kolečka postele, kdy mají velmi jednoduchou instalaci, protože obsahují rampy pro pohodlný nájezd koleček postele na podložku. Váha má přehledný panel umístěný na vozíku. Panel obsahuje dva displeje, numerickou klávesnici a několik funkčních tlačítek pro speciální funkce. Váha dokáže také například vypočítat index tělesné hmotnosti. Podložky jsou dostupné ve dvou variantách, maximální nosnost 600 kg s citlivostí 200 g, a maximální nosnost 1000 kg s citlivostí 500 g. Váha je napájena 12 V bateriemi, které vydrží 55 hodin v nepřetržitém provozu. Možnost rozšíření o Bluetooth a Wi-Fi připojení. Cena této přenosné postelové váhy se pohybuje kolem 100 000 Kč. [1]



Obr. 1.1: Postelová váha M-950 [1]

Lůžková váha RADWAG C315.8B.300.C-3

Firma Radwag vyrábí dva typy lůžkových vah, rampové nebo ližinové. Rampové váhy jsou podobné jako od firmy Marsden, proto je popsán ližinový typ. Jedná se opět o přenosnou váhu, která se skládá pouze z dvou ližin, umístěných vždy pod dvěma kolečky postele, ovládacího panelu s podsvíceným LCD a funkčních tlačítek. Váha umožňuje použití pro různé typy lůžek, ližiny mají nastavitelný rozvor až do 2,5 m. Ližiny jsou dostupné ve dvou variantách, maximální nosnost 300 kg s citlivostí 100 g, a maximální nosnost 500 kg s citlivostí 200 g. Váha je napájena 12 V baterií, která vydrží až 8 hodin v nepřetržitém provozu. Komunikace probíhá přes RS232 nebo přes Wi-Fi. Cena této přenosné postelové váhy se pohybuje kolem 75 000 Kč. [2]



Obr. 1.2: Lůžková váha Radwag [2]

Nemocniční postel NANO ICU – s váhou

Jedná se o moderní zdravotnické lůžko. Je vybaveno integrovaným vážicím systémem, který umožňuje přesné sledování hmotnosti pacienta přímo na lůžku. Lůžko nabízí elektrické nastavení polohy, včetně úpravy výšky, sklonu zádové a nožní části. Napájení je 230 V střídavých, nebo je možné napájet baterií. Maximální zatížitelnost je 250 kg. Lůžko je možné objednat i s USB připojením. Cena této postele přesahuje 182 000 Kč. [3]

2 Měření hmotnosti pomocí snímačů

Měření hmotnosti se provádí pomocí různých snímačů, které převádějí mechanickou fyzikální veličinu na lépe zpracovatelný elektrický signál. Jedná se o snímače síly, které působí nejčastěji na principu tenzometrie a piezoelektriky. Síla je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje vzájemné působení těles nebo polí. Hodnoty síly zahrnují směr i velikost. Naopak hmotnost je skalární fyzikální veličina, která udává míru působení gravitačních účinků na těleso. Hmotnost nemá směr ani záporné hodnoty. V této kapitole jsou popsány základní principy snímání hmotnosti, obecné typy snímačů síly (hmotnosti) a jako poslední vybrané snímače použité v této práci.

2.1 Měřicí řetězec

Měřicí řetězec je pojmenování pro proces převodu fyzikální veličiny na elektrickou. Vstupem je právě fyzikální veličina, výstupem už je elektrická veličina. Výstupní signál je často nutno zesílit a filtrovat od šumu a parazitních vlivů, jako je elektrické, magnetické a elektromagnetické pole. Toho je docíleno například zesílením, frekvenčním omezením signálu či modulací signálu a převodem analogové hodnoty na digitální. Měřicí řetězec se skládá ze senzoru, zesilovače, obvodů pro zpracování signálu, A/D převodníku a mikrokontroléru či výpočetního systému. Velká výhoda zpracování digitálních signálů je právě převod analogového signálu na digitální, neboť lze na signál použít základní matematické operace pro úpravu a signálové operace, jako je filtrace a frekvenční analýza. [4]

V současné době existují inteligentní snímače, které obsahují integrovaný měřicí řetězec v kompaktním provedení. Výstup těchto snímačů je standardizován na analogové hodnoty, například 0–10 V, 4–20 mA, nebo digitální komunikační protokoly jako HART, Profibus, Modbus či IO-Link. Tato standardizovaná rozhraní usnadňují integraci snímačů do průmyslových systémů měření a řízení a zvyšují odolnost přenosu signálu proti rušení.

2.2 Typy snímačů hmotnosti

Měření hmotnosti lze dělit na přímé a nepřímé. Přímé měření hmotnosti pomocí mechanických vah je nevyužitelné v rámci digitálního zpracování. Jedná se o porovnávání měřené hmotnosti se známou hmotností, například pákové a pružinové váhy, jako je stará kuchyňská váha či mincíř. Přímé měření pomocí elektrických vah už není možné bez elektrických snímačů. Nepřímé měření využívá vlivu síly na těleso a generování signálu. Nejčastěji se používají tenzometry, které převádějí mechanické napětí na elektrickou veličinu. Nejčastější měřené elektrické veličiny jsou: napětí

díky piezoelektrickému jevu, změna kapacity vlivem síly, a odpor v odporových tenzometrech.

2.2.1 Kapacitní tenzometrické snímače

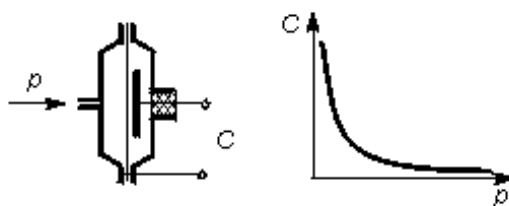
Tyto snímače využívají změnu kapacity proměnného kondenzátoru v závislosti na mechanickém napětí či posunutí. Kapacitní tenzometry sledují změny vzdálenosti nebo geometrie mezi elektrodami kondenzátoru. Změna kapacity může nastat změnou mezery mezi elektrodami, změnou tloušťky dielektrika, vzájemným posunem elektrod či jejich překrytím. Základní vztah pro kapacitní snímače hmotnosti je vztah pro kapacitu rovinného deskového kondenzátoru.

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (2.1)$$

kde ε_0 je permitivita vakua, ε_r je relativní permitivita dielektrika, S je plocha elektrod a d je vzdálenost elektrod.

Tento typ tenzometru je tvořen oblouky ze speciální slitiny, přivařené na povrch měřeného objektu, které obsahují elektrody kapacitního senzoru. Při ohybu či deformaci objektu se vzduchová mezera mezi elektrodami mění a tím se mění kapacita senzoru. Velmi podstatná věc u takovýchto snímačů je kompenzace chyb vznikajících teplotní dilatací. Cena těchto snímačů je vyšší, z důvodu nutnosti citlivějších obvodů pro zpracování malých změn kapacit. [4]

Na obrázku níže je zobrazeno možné složení snímače, jedná se o snímač s jednou pevnou elektrodou a druhou upevněnou na membráně. Působením tlaku (hmotnosti) mění membrána svoji polohu a tím se mění kapacita snímače.



Obr. 2.1: Kapacitní tenzometrický snímač a jeho charakteristika [5]

2.2.2 Piezoelektrické snímače síly

Tyto snímače využívají přímý piezoelektrický jev k měření mechanického namáhání, tedy síly působící na snímač, měřený objekt. Přímý piezoelektrický jev spočívá v tom, že piezoelektrické materiály jako krystal a piezokeramika vytvářejí elektrický náboj

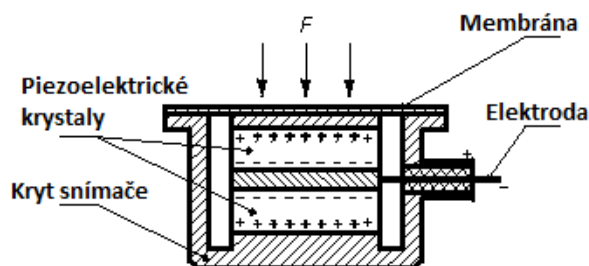
při své deformaci. Náboj, vznikající při působení měřené veličiny, v tomto případě hmotnosti, se převádí na napětí podle vztahu:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{K_p \cdot F_x}{C} \quad (2.2)$$

kde U je výstupní napětí snímače, C kapacita čidla včetně přívodů, K_p je piezoelektrická konstanta a F_x je síla působící na snímač. Výstupní napětí je přímo úměrné velikosti mechanického namáhání.

Tyto snímače jsou určeny pro dynamické síly, jako například měření vibrací. Výhodou je lineární statická charakteristika, malá teplotní závislost piezoelektrické konstanty a velký měřicí rozsah, dán mechanickou pevností krystalu. [4]

Na obrázku 2.2 je zobrazeno složení snímače.



Obr. 2.2: Piezoelektrický senzor síly [5]

2.2.3 Odporové tenzometrické snímače

Základem těchto snímačů je piezorezistivní jev. Ten popisuje změnu elektrické rezistivity materiálu vlivem mechanického namáhání. Změna odporu vodiče při deformaci byla zjištěna panem Wheatstonem již v roce 1843. Při deformaci vodiče či polovodiče nedochází pouze ke změně jeho délky a průřezu, ale také ke změně struktury materiálu, což ovlivňuje rezistivitu ρ . Změna elektrického odporu je měřena, a převáděna na využitelný elektrický signál, většinou se jedná o signál v desítkách mV/V. Pro vodič o průřezu S , délce l , s měrným odporem ρ platí, že jeho odpor R je:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.3)$$

Tento odpor se v důsledku namáhání změní o ΔR :

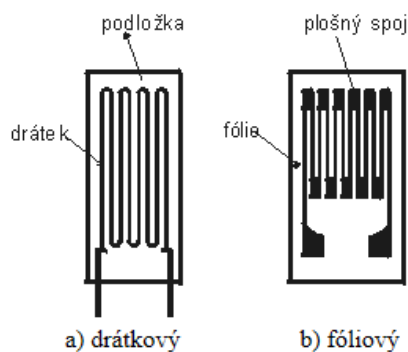
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.5)$$

kde ε je poměrné prodloužení povrchu senzoru a k je konstanta citlivosti tenzometru, pro kovové tenzometry typicky $k = 2$.

Kovové tenzometry

Původní kovové tenzometry se vyráběly z tenkých drátků, maximálně 0,05 mm, složených do harmoniky, které byly nalepeny na papírový podklad. Celý tento drátkový tenzometr je přilepen na měřený objekt speciálním lepidlem. Druhý typ kovových tenzometrů je fóliový, který se díky moderním technologiím vyrábí odleptáváním tenké odporové fólie. Jako materiál pro výrobu se využívá konstantan, slitina chrom-nikl, či platina-wolfram. Posledním typem jsou vrstvé tenzometry, které se vyrábí nanášením vrstev přímo na membránu snímače. Tento typ má lepší teplotní stálost oproti fóliovým. Nejčastější typy kovových tenzometrů jsou zobrazeny na obrázku níže. [4]



Obr. 2.3: Typy odporových tenzometrů[5]

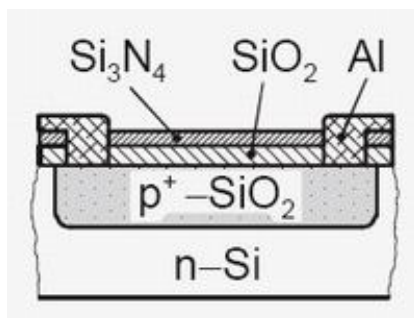
Polovodičové tenzometry

U polovodičových tenzometrů dochází vlivem mechanického namáhání k změně vnitřní struktury, mění se pohyblivost nosičů proudu a tím se mění odpor. Tento typ má oproti kovovým tenzometrům mnohokrát vyšší citlivost, ale také větší teplotní závislost. Vyznačuje se nelineární závislostí odporu na deformaci. Materiály používané pro výrobu jsou nejčastěji křemík a germanium. Vyrábí se ve formě pásek, získaných broušením monokrystalu. Pásek je pak nalepen speciálním lepidlem na plochu, která podléhá deformaci.

Změna odporu polovodičových tenzometrů závisí na typu vodivosti, pro typ polovodiče P při napětí v tahu odpor roste a pro typy polovodiče N pro tahové napětí klesá. Závislost relativní změny odporu na relativní deformaci se vyjadřuje vztahem:

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \varepsilon + C_2 \varepsilon^2 \quad (2.6)$$

kde C_1 a C_2 jsou konstanty tenzometru, ovlivněné přidáním příměsí do základního polovodiče. Polovodičové tenzometry jsou využívány v zařízeních s velkými požadavky na přesnost. Na obrázku níže je zobrazen nejčastější polovodičový tenzometr, jedná se o monokrystalický vytvořený difuzní technologií na křemíkovém substrátu, kdy současně vytváří pružnou membránu snímače.



Obr. 2.4: Polovodičový tenzometr [4]

Odporové hodnoty obou typů tenzometrů v nezatíženém stavu jsou typicky 120, 350 a 1000 Ω . Odporové tenzometrické snímače jsou považovány za jedny z nejlepších, co se týče poměru cena/výkon, avšak podléhají řadě parazitních vlivů, nejhlavněji teplotě, která ovlivňuje přesnost. To je nutno kompenzovat pomocí obvodů pro tenzometry. [4] [5]

Poměrná změna odporu $\frac{\Delta R}{R}$ odporových tenzometrů je velice malá, proto se využívá zapojení tenzometrů do můstku, čímž se docílí zesílení. Nejčastěji využívané bývá zapojení do tzv. Wheatstoneova můstku. Správným umístěním tenzometrů na sledované zařízení, v tomto případě správné navrhnutí snímače hmotnosti, lze zvýšit citlivost a potlačit nežádoucí vlivy, jako je nelinearita snímače a vliv teploty.

2.2.4 Zapojení tenzometrů

Wheatstoneův můstek

Wheatstoneův můstek je pojmenován po svém vynálezci, anglickém fyzikovi Charlesi Wheatstonovi, který v roce 1833 započal pokusy s odporovými můstkami. Základní princip můstku je spočívá v porovnávání odporů čtyř rezistorů mezi sebou. Neznámá hodnota může být pouze pro jeden odpor, ostatní tři jsou pevně dané. Odporů jsou zapojeny do dvou větví a platí pro ně vztah:

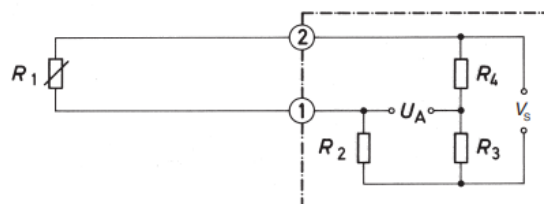
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \quad (2.7)$$

Výstupní napětí je pak dáno vztahem:

$$V_{výst} = V_{vst} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (2.8)$$

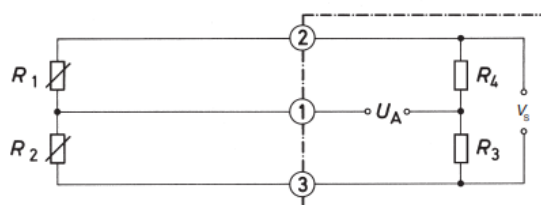
Typy Wheatstoneova můstku

- **Čtvrtinový můstek:** Zde je použit pouze jeden tenzometrický odpor, a zbylé tři jsou z pevných přesných odporů. Tento můstek vykazuje nejmenší citlivost a žádnou teplotní kompenzaci.



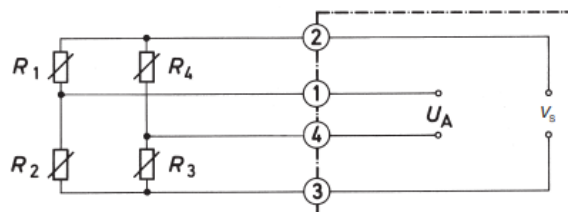
Obr. 2.5: Čtvrtinový Wheatstoneův můstek [6]

- **Poloviční můstek:** Obsahuje dva tenzometrické odpory a dva pevné odpory. Umístění tenzometrů vedle sebe zajistí teplotní kompenzaci.



Obr. 2.6: Poloviční Wheatstoneův můstek [6]

- **Plný můstek:** Je složen z čtyř tenzometrů se stejnou hodnotou odporu. Toto zapojení je nejvhodnější, díky 4 tenzometrům je citlivost čtyřnásobná. Při umístění tenzometrů velmi blízko sobe mají stejnou teplotu, a tím se anulují chyby vlivem teploty. Lze zanedbat i chybu přívodů. Zapojením tenzometrů opačně, tedy dva tenzometry do tlaku, a dva do tahu, se docílí zredukování nelinearity. [6]

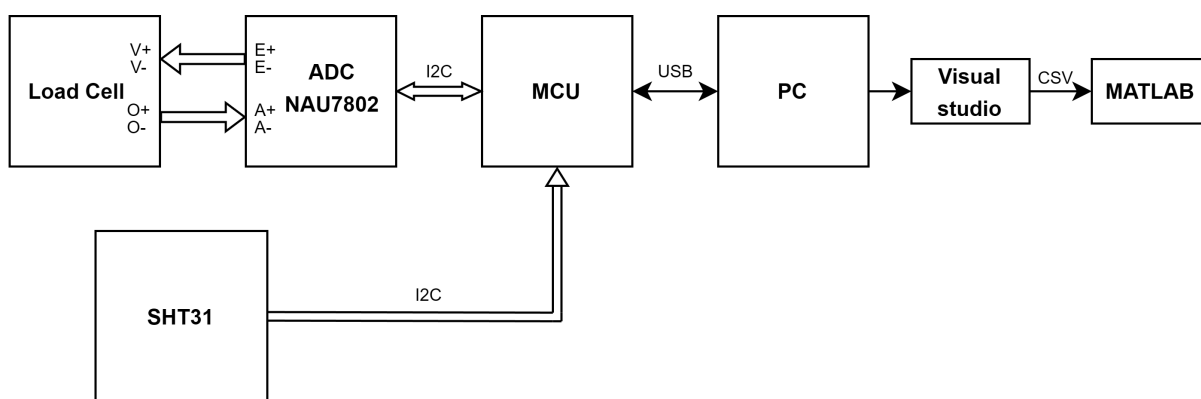


Obr. 2.7: Plný Wheatstoneův můstek [6]

3 Měřicí přípravek

V této kapitole je popsána konstrukce a složení měřicí stanice, která byla vyvinuta pro experimentální výběr a testování snímačů. Měřicí soustava zahrnuje mechanický přípravek pro přesné umístění snímačů, řídicí elektroniku, AD (*Analog-Digital*) převodník, teplotní senzor pro zaznamenávání teploty a snímač pro měření hmotnosti. Následující podkapitoly detailně popisují jednotlivé komponenty systému, implementovaný software pro Arduino a ESP32. Obsahuje i popis aplikace vyvinuté ve Visual Studiu pro PC (*osobní počítač*) a metody zpracování naměřených dat v prostředí MATLAB.

3.1 Blokové schéma měřicí stanice



Obr. 3.1: Blokové schéma komunikace v měřicí stanici

Tenzometrický snímač (*Load Cell*) představuje vstupní část systému, která převádí mechanické zatížení na elektrický signál. Snímač poskytuje diferenciální výstup se signály V+/V- pro buzení a O+/O- pro analogový výstup.

AD převodník NAU780 zajišťuje přesnou digitalizaci analogového signálu z tenzometrického snímače. Tento analogově-digitální převodník je určen pro vysoce přesné váhové aplikace a poskytuje digitalizovaná data prostřednictvím I2C rozhraní (*Inter-Integrated Circuit*).

Senzor SHT31 slouží k měření environmentálních parametrů - teploty. Komunikace s hlavním MCU probíhá rovněž přes I2C sběrnici, což umožňuje jednoduché připojení více zařízení na stejnou sběrnici.

MCU (*Mikrokontrolér*) je řídicí jednotka celého systému. Zajišťuje komunikaci s AD převodníkem a senzorem SHT31 přes I2C rozhraní, zpracovává naměřená data a poskytuje je nadřazenému systému PC přes USB rozhraní.

PC s Visual Studio slouží jako uživatelské rozhraní pro sledování, ukládání a analýzu naměřených dat. Software vyvinutý ve Visual Studiu umožňuje zobrazení dat v reálném čase a jejich ukládání do souboru CSV (*Comma-Separated Values*).

MATLAB představuje platformu pro pokročilou analýzu naměřených dat. Data jsou exportována z Visual Studia ve formátu CSV a následně zpracována v Matlabu, což umožňuje podrobnou analýzu, vizualizaci a matematické zpracování naměřených hodnot.

3.2 Mechanická konstrukce

Měřicí stanice se skládá ze dvou PVC desek o rozměrech 40×40×8 mm, které zabraňují překlopení přípravku. Tyto desky byly získány z vyřazených materiálů, což přispělo k udržení nízkých nákladů na měřicí stanici určenou primárně pro výběr vhodných snímačů. Mezi těmito deskami je umístěn přípravek, který se skládá ze dvou částí: základny a pístku. Přípravek je k deskám připevněn pomocí šroubů, které jsou zapuštěny ve středových otvorech desek tak, aby jejich hlavy nepřekážely při umístování zátěže na měřicí sestavu. Z důvodu požadavku na minimalizaci nákladů měřicího přípravku byly pro uchycení použity šrouby nalezené ve sdílených zásobách dostupných na Ústavu automatizace a měřicí techniky. Samotné přípravky byly navrženy v 3D modelovacím softwaru a následně vyrobeny na 3D tiskárně, která je rovněž součástí vybavení Ústavu automatizace a měřicí techniky.

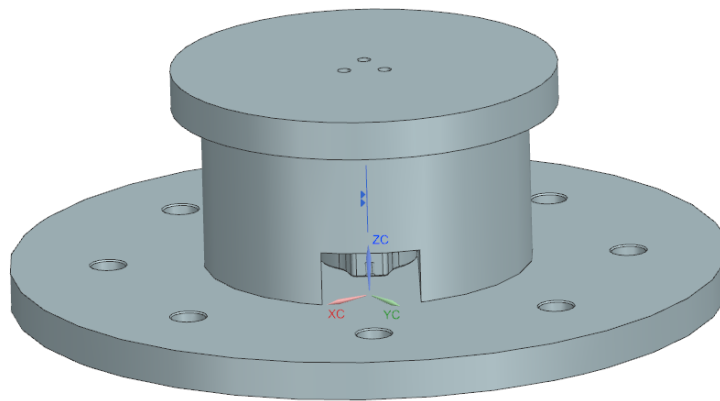
3.2.1 1. Verze modelu pro snímač FX1901

První vytvořený model představuje přípravek pro snímač FX1901, zkonstruovaný v prostředí Siemens NX.

Při tomto modelování jsem se seznamoval s prostředím Siemens NX, neboť šlo o moji první interakci s tímto softwarem. Postupoval jsem podle návodů dostupných na stránkách Siemens nebo podle tutoriálů. Tento model vyžadoval nejvíce času a zahrnoval mnoho kroků, z nichž některé byly zbytečné. Díky konzultaci s vedoucím práce, jeho poznatkům k modelům a tvorbě v programu Siemens NX jsem vytvořil model s minimálním počtem kroků.

Přípravek se skládá ze dvou hlavních částí: základny a pístu. Základna obsahuje podstavec, s výškou 50 mm a průměrem 185 mm s osmi symetricky rozmístěnými montážními otvory po obvodu, které umožňují pevné uchycení k podkladové desce, čímž je vyřazeno riziko převrácení během měření. Centrální část základny tvoří válcová komora pro uložení snímače (dále jen "šachta"). Na dně šachty jsou vytvořeny přesné zářezy odpovídající pouzdru snímače FX1901, které zajišťují jeho fixaci proti nežádoucímu pohybu během měření. Tyto fixační prvky byly vytvořeny na základě

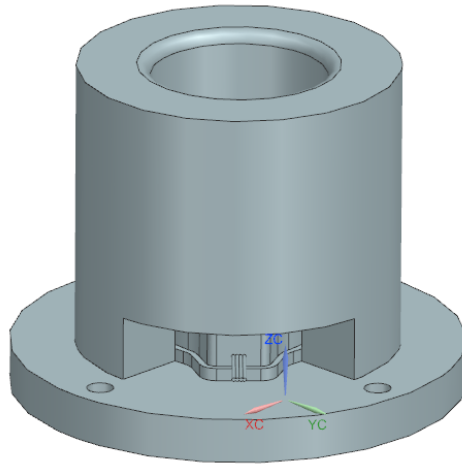
přesného měření reálného snímače pomocí posuvného měřítka. Boční stěna šachty je opatřena průchozím otvorem pro vyvedení kabeláže snímače. Pístem označujeme horní pohyblivou část přípravku, která přenáší silové působení na snímač. Tento díl je navržen tak, aby se pohyboval s minimálním třením ve válcové šachtě základny a současně zajišťoval rovnoměrné rozložení zatížení na měřicí element snímače. U snímače FX1901 se měřicí element nachází v jeho středu. Pro návrh modelu byl využit referenční 3D model snímače FX1901 nalezený ve volně přístupné databázi modelů. [7]



Obr. 3.2: Model přípravku pro snímač FX1901, 1. typ

3.2.2 Finální model přípravku pro snímač FX1901

Finální model přípravku pro snímač FX1901 představuje optimalizovanou verzi zkonstruovanou v prostředí Siemens NX. Oproti původnímu návrhu došlo k významné redukci rozměrů – podstavec má průměr 70 mm a výšku 40 mm, což přináší materiálovou úsporu při zachování všech funkčních vlastností. Základna je opatřena čtyřmi symetricky rozmístěnými montážními otvory namísto původních osmi. Hlavní inovací ve vnitřní šachtě je nahrazení tří samostatných výstupků komplexní ohradou, která přesně kopíruje celý obvod snímače FX1901. Toto řešení poskytuje dokonalou fixaci snímače během měření. Stejně jako základna, i pístek byl zjednodušen a obsahuje čtyři montážní otvory. Celková konstrukce byla optimalizována pro výrobu metodou 3D tisku s důrazem na přesnost a funkčnost přípravku při experimentálním měření.



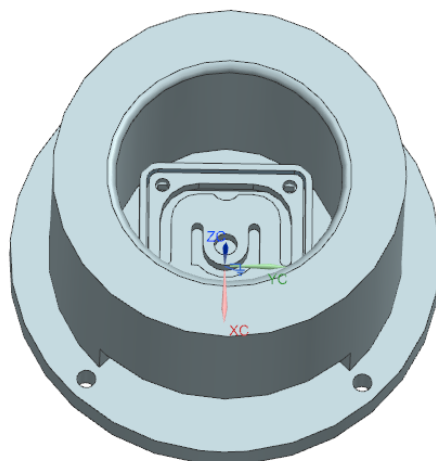
Obr. 3.3: Finální model přípravku pro snímač FX1901

3.2.3 Model přípravku pro snímač FMXD

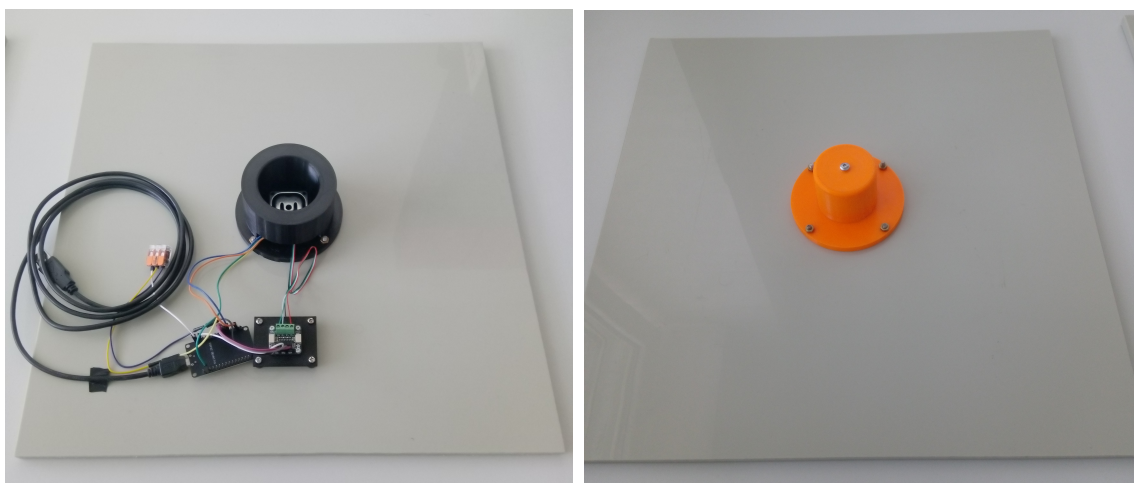
Druhý model přípravku byl navržen pro snímač typu FMXD. Jedná se o model velmi podobný modelu pro předchozí snímač, avšak s odlišnou vnitřní geometrií přizpůsobenou specifickým rozměrům a tvaru tohoto snímače. Přípravek je taktéž tvořen dvěma hlavními částmi: základnou a horním dílem (pístkem). Výška přípravku je včetně zasunutého pístku 60 mm, průměr podstavce základny je 95 mm. Základna má kruhový tvar s montážními otvory v rozích pro stabilní uchycení k podkladové desce.

Významnou změnou tohoto modelu je speciálně tvarovaná vnitřní dutina v základně, která si zachovává válcovitý tvar, ale obsahuje přesné ohraničení kopírující obdélníkový tvar snímače FMXD včetně jeho montážních otvorů a funkčních prvků. Tato ohrádka neslouží pouze k fixaci snímače na místě, ale plní také klíčovou funkční roli – obsahuje po obvodu malý stupínek, o který se snímač opírá svým okrajem. Toto konstrukční řešení je zásadní vzhledem k principu fungování snímače FMXD, u něhož se při zatížení prohýbá jeho středová část. Stupínek tedy zajišťuje oporu po obvodu snímače, zatímco jeho střed zůstává volný a může se při zatížení deformovat směrem dolů, čímž dochází k měření aplikované síly.

Na rozdíl od modelu pro snímač FX1901, tento přípravek obsahuje obdélníkové ohraničení pro snímač, ale šachta, a tedy i pístek je stále válcovitého tvaru. Kontaktní část pístku je upravena tak, aby přesně dosedala na střed snímače a zajišťovala optimální rozložení zatížení na měřicí element uvnitř snímače. V modelu je stejně jako v předchozím otvor pro průchod kabeláže. Celková konstrukce byla optimalizována pro výrobu metodou 3D tisku s ohledem na minimalizaci spotřeby materiálu při zachování všech požadovaných mechanických vlastností. Pro návrh modelu byl využit referenční 3D model snímače FX1901 nalezený na komunitním fóru. [8]



Obr. 3.4: Model přípravku pro snímač FMXD



Obr. 3.5: Hotový přípravek pro snímač FMXD

Finální realizace přípravku pro měření hmotnosti je zobrazena na obrázcích 3.5. Na vrchní straně pístku je umístěn šroub s půlkulatou hlavou, který slouží jako styčná plocha se snímačem. Geometrické uspořádání šachty a pístku zajišťuje, že šroub je umístěn v ose válce, což zaručuje přímý a rovnoměrný přenos síly do středu tenzometrického snímače. Soubory obou modelů z programu NX jsou přiloženy v elektronické příloze B.

3.3 Elektrické komponenty

V rámci experimentálního měření byly využity dva typy kompresních snímačů zatížení, které byly dostupné ve skladových zásobách Ústavu automatizace a měřicí techniky. Při budoucím rozšiřování testovací sady bude výběr dalších snímačů proveden s ohledem na jejich cenu, dostupnost a přesnost měření. Pro zpracování signálu ze

snímačů byl zpočátku použit AD převodník HX711, který byl však v průběhu testování nahrazen převodníkem NAU7802 z důvodu nedostatečného vstupního rozsahu původního řešení. Převodník NAU7802 je vhodný pro měření malých napěťových změn díky vysoké přesnosti a jednoduché integraci. Digitalizovaná data z převodníku byla dále zpracovávána mikrokontrolérem Arduino Nano, který zajišťoval jak zpracování naměřených hodnot, tak komunikaci s vývojovým prostředím na počítači.

3.3.1 Snímače

Snímač zatížení FX1901-0001-0200-L

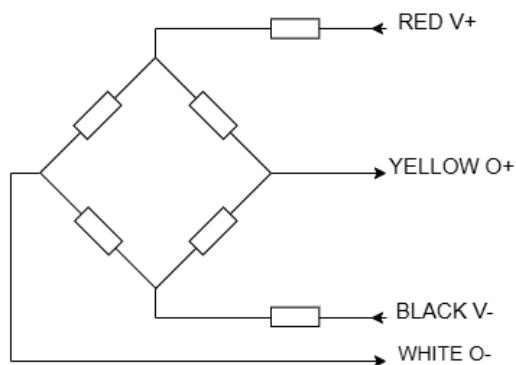
Kompresní snímač zatížení od firmy TE Connectivity představuje malou zatěžovací buňku určenou k použití v laboratorních, nemocničních nebo spotřebitelských aplikacích. Snímač se vyrábí pro měření v rozsahu od 10 do 200 lbf (*liber síly*). V tomto případě byl využit typ s maximálním zatížením 200 lbf, což odpovídá přibližně 90 kg. Technologie Microfused™, využitá při výrobě tohoto snímače, minimalizuje použití stárnoucích epoxidů, což zajišťuje téměř neomezenou životnost cyklů, vyšší odolnost proti překročení rozsahu a rozpětí výstupního signálu 20 mV/V. FX1901 pracuje na principu tenzometrického jevu – snímá deformaci materiálu a pomocí odporového můstku zabudovaného ve snímači převádí mechanickou deformaci na velmi malé výstupní napětí (v řádu milivoltů). Uvnitř snímače se nachází Wheatstoneův můstek. [9]

Tab. 3.1: Důležité parametry snímače FX1901 [9]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	5 V
Měřicí rozsah	0 - 90 kg
Maximální přetížení	150% z rozsahu
Rozpětí výstupu	34,2–37,8 mV/V
Nelinearita	-1 až 1 %
Hystereze	-0,8 až 0,8 %
Teplotní nulový posun	< ±0,05 % z rozsahu/°C
Teplotní posun citlivosti	< ±0,05 % z rozsahu/°C
Operační teplota	0 až 50 °C
Skladovací teplota	-45 až 85 °C
Drift nulového bodu	0,5% z rozsahu
Nulová rovnováha	0,5% z rozsahu



Obr. 3.6: Snímač FX1901 [9]



Obr. 3.7: Schema snímače FX1901

Nízkoprofilový kompresní snímač FMXD 1kN

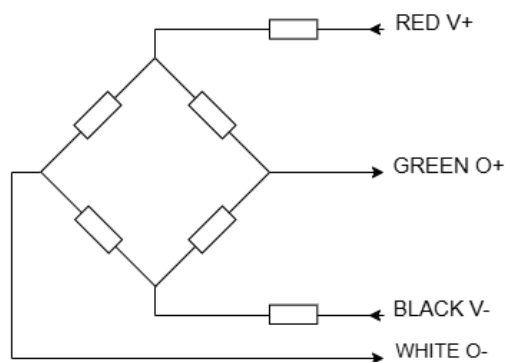
Druhým testovaným snímačem je nízko profilový kompresní snímač FMXD od firmy Forsentek. Tento snímač využívá technologii tenzometrických snímačů, které jsou aplikovány na tělese z legované oceli. Princip měření je založen na detekci změny elektrického odporu v tenzometrech, která vzniká při mechanické deformaci těla snímače. Tato změna odporu je převedena na výstupní napěťový signál, který lze následně kalibrovat pro přesné měření hmotnosti. Snímač FMXD se vyrábí pro měřicí rozsahy od 10 do 100 kg. Charakteristickým konstrukčním prvkem je centrální otvor, umožňující montáž různých nástavců pro využití ve specifických aplikacích. Na základě údajů v technické dokumentaci a hodnoty odporu 1000Ω lze určit, že snímač využívá konfiguraci plného můstku (Full bridge), což znamená, že všechny čtyři odpory Wheatstoneova můstku jsou aktivní a reagují na aplikované zatížení. Tato konfigurace poskytuje maximální citlivost a kompenzaci teplotních vlivů. [10]

Tab. 3.2: Důležité parametry snímače FMXD [10]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	3 - 12 V
Měřicí rozsah	0 - 100 kg
Maximální přetížení	150% z rozsahu
Rozpětí výstupu	1 - 2 mV/V
Nelinearita	$\pm 0,1\%$
Hystereze	$\pm 0,1\%$
Opakovatelnost	$\pm 0,05\%$
Teplotní nulový posun	$< \pm 0,03 \%$ z rozsahu/ $^{\circ}\text{C}$
Teplotní posun citlivosti	$< \pm 0,03 \%$ z rozsahu/ $^{\circ}\text{C}$
Operační teplota	-10 až $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Nulová rovnováha	$\pm 0,3 \text{ mV/V}$



Obr. 3.8: Snímač FMXD 1kn[11]



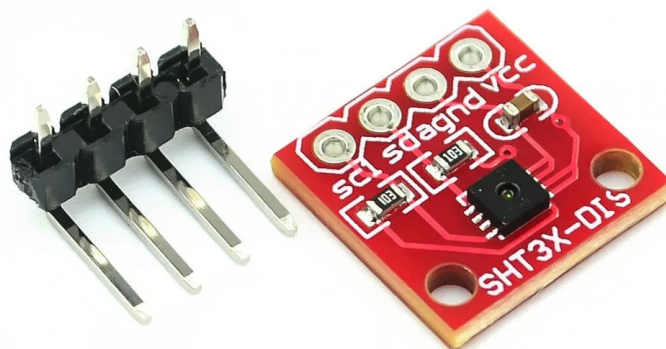
Obr. 3.9: Schema snímače FMXD 1kn

Snímač teploty SHT31

Pro přesné měření teploty byl v rámci projektu využit snímač SHT31 od firmy Sensirion. Tento snímač je součástí novější řady SHT3x, která představuje další generaci vysoce přesných snímačů teploty a vlhkosti s digitálním výstupem. V rámci stanice byl využit vývojový modul od Laskakit, který integruje SHT31 senzor společně s podpůrnými obvody na desce plošných spojů s vyvedenými konektory pro snadné připojení k mikrokontroléru. Modul poskytuje standardizované rozhraní I2C. Výstupem snímače jsou 16-bitové hodnoty pro teplotu a relativní vlhkost, které jsou již z výroby kalibrovány, linearizovány a teplotně kompenzovány. Pro převod těchto hodnot na fyzikální veličiny se používají standardní převodní vzorce díky knihovně Adafruit_SHT31.h. Hlavní důvod využití byla opět jeho dostupnost přímo na Ústavu, ale také velmi přesné měření teploty. [12]

Tab. 3.3: Parametry snímače SHT31 [12]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	2,4 - 5,5 V
Měřicí rozsah	-40 - 125 °C
Rozlišení měření teploty	± 0,015 °C
Přesnost měření teploty	± 0,3 °C
Rozsah měření vlhkosti	0 - 100 %RH
Rozlišení měření vlhkosti	0,01 %RH
Přesnost měření vlhkost	± 2 %RH
Komunikační rozhraní	I2C



Obr. 3.10: Modul se snímačem teploty SHT31[13]

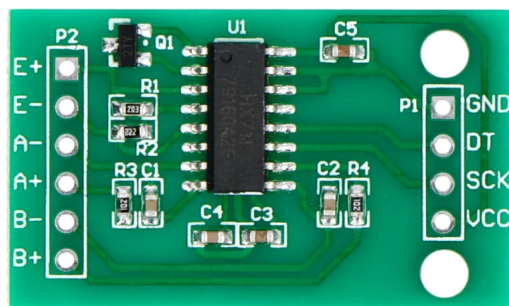
3.3.2 AD převodníky

AD převodník HX711 – prvotní řešení

Pro počáteční fázi experimentů byl využit dvoukanálový 24bitový AD převodník HX711, který byl dostupný ve skladových zásobách Ústavu automatizace a měřicí techniky. Tento převodník je navržen specificky pro aplikace s tenzometrickými snímači a obsahuje kanál A s volitelným zesílením $128\times$ nebo $64\times$ a kanál B s fixním zesílením $32\times$. Výběr zesílení se řídí pomocí počtu vstupních impulsů na pinu PD_SCK, přičemž minimální počet hodinových impulsů je 25. V použité konfiguraci bylo posíláno 26 bitů pro nastavení zesílení $32\times$. Převodník využívá metodu sigma-delta modulace, která je založena na principu vzorkování s vysokou frekvencí a následné integraci odchylek signálu. Výstupem převodníku je digitální signál, který je vyčítán mikrokontrolérem bit po bitu, synchronně s hodinovým signálem přivezeným na pin SCK. [14]

Tab. 3.4: Důležité parametry AD převodníku HX711 [14]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	5 V
Počet bitů	24
Počet kanálů	2
Zesílení (Kanál A)	$64\times$ / $128\times$
Zesílení (Kanál B)	$32\times$
Referenční napětí	1,25 V
Komunikační rozhraní	Sériové
Teplotní drift	$<\pm 6$ nV/°C
Pracovní teplota	-40 až 80 °C
Offset (vstup)	$<0,4$ mV



Obr. 3.11: AD převodník HX711 [15]

Omezení převodníku HX711

Během prvních měření bylo zjištěno, že systém vykazuje saturaci při hodnotách měřené hmotnosti mezi 20-30 kg. Při opětovném spuštění měřicího programu docházelo k saturaci na různých hodnotách, což indikovalo systematický problém v měřicím řetězci. Analýzou technických parametrů bylo identifikováno zásadní omezení: snímač FX1901 má dle datového listu rozsah výstupního signálu 36 mV/V, což při napájecím napětí 5 V generuje maximální výstupní napětí 180 mV. Z dokumentace převodníku HX711 však vyplývá, že je schopen zpracovat maximální vstupní diferenciální napětí pouze ± 80 mV při zesílení $32\times$, ± 40 mV při zesílení $64\times$ a ± 20 mV při zesílení $128\times$. Toto omezení znamenalo, že převodník HX711 nemohl správně zpracovávat signál v celém měřicím rozsahu snímače FX1901-0001-0200-L (0-90 kg). Pro pokračování experimentů bylo proto nutné hledat alternativní řešení – buď úpravu vstupního signálu, nebo nahrazení převodníku jiným, vhodnějším typem s odpovídajícím vstupním rozsahem.

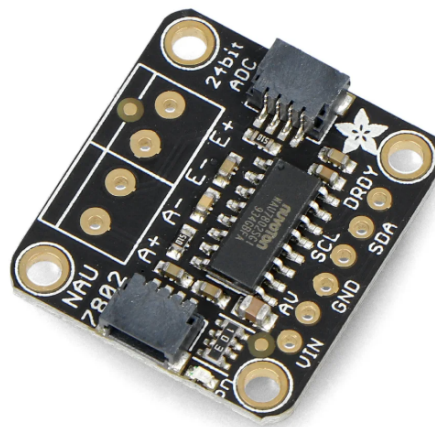
AD převodník NAU7802

Po vyřešení problému saturace hodnot byl původní převodník HX711 nahrazen AD převodníkem NAU7802 od firmy Nuvoton, implementovaným jako modul od společnosti Adafruit. Jedná se o podobný typ 24bitového převodníku, který však disponuje výrazně širším rozsahem vstupního signálu, což ho činí vhodnějším pro aplikaci se snímačem FX1901, jehož výstupní signál dosahuje až 190 mV. Přestože samotný čip NAU7802 je dvoukanálový, použitý Adafruit modul má na svorkovnici vyveden pouze jeden kanál (A+, A-) pro připojení snímače a napájecí piny (E+, E-) pro jeho buzení. Po stranách modulu jsou umístěny STEMMA QT konektory, které umožňují snadné připojení k dalším kompatibilním zařízením bez nutnosti pájení, pouze pomocí propojovacích kabelů. Tyto konektory poskytují stejné I2C rozhraní jako hlavní piny modulu. Modul nabízí několik klíčových komponent včetně vestavěného PGA (*Programmable Gain Amplifier*), volitelného RC nebo krystalového oscilátoru a převodníku typu sigma-delta. Nabízí také možnost volby mezi interním referenč-

ním napětím 1,2 V nebo externím napětím připojeným na odpovídající piny, což zvyšuje flexibilitu při připojování různých typů snímačů. Programovatelný zesilovač poskytuje široký rozsah nastavitelného zesílení od $1\times$ do $128\times$, což umožňuje optimální přizpůsobení různým rozsahům vstupních signálů. Další významnou vlastností je nastavitelný vstupní offset, který umožňuje přesnou kalibraci nulového bodu a kompenzaci systematických chyb snímačů. Komunikace s mikrokontrolérem probíhá prostřednictvím standardního dvou vodičového rozhraní kompatibilního s protokolem I2C, což zjednodušuje implementaci a obsluhu. [16]

Tab. 3.5: Důležité parametry AD převodníku NAU7802 [16]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	3,3 V
Počet bitů	24
Počet kanálů	1
Zesílení	Nastavitelné 1 - 128
Referenční napětí	Interní (nastavitelné) / externí
Analogové vstupní napětí	-0,3 - 3,6 V
Diferenční vstupní napětí	\pm (VREF/PGA)
Komunikační rozhraní	I2C
Teplotní drift	± 10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
Pracovní teplota	-40 až 85 $^{\circ}\text{C}$
Skladovací teplota	-55 až 150 $^{\circ}\text{C}$
Offset (vstup)	Nastavitelné

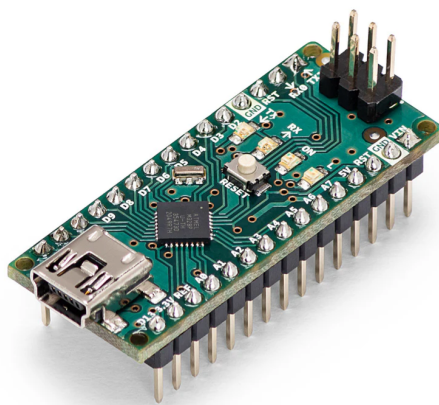


Obr. 3.12: AD převodník NAU7802 [17]

3.3.3 Mikrokontroléry

Arduino Nano

Arduino® Nano je mikroprocesorová deska vytvořena firmou Arduino, která je odvozena z řady UNO, avšak s výrazně menšími rozměry a omezenějším vybavením. Tato vývojová deska je osazena mikrokontrolérem ATmega328 taktovaným na frekvenci 16 MHz, který poskytuje dostatečný výpočetní výkon pro široké spektrum jednodušších aplikací. Z hlediska konektivity nabízí Arduino Nano 14 digitálních vstupně-výstupních pinů, 8 analogových vstupních pinů s 10-bitovým rozlišením a komunikační rozhraní zprostředkované přes mini-USB port. Systémové prostředky mikrokontroléru zahrnují 32 kB flash paměti pro program (z toho 2 kB využívá bootloader), 2 kB SRAM (*Static Random Access Memory*) a 1 kB EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) pro trvalé uložení dat. Deska integruje několik standardních komunikačních rozhraní: programovatelný sériový USART, rozhraní SPI (*Serial Peripheral Interface*) v režimu Master/Slave a sběrnici I2C, což umožňuje snadné propojení s širokou škálou externích komponent a senzorů. Napájení může být realizováno několika způsoby: prostřednictvím USB konektoru (5 V), přímým připojením 3,3 V na příslušný pin nebo externím zdrojem 7-12 V na vstup Vin. Platforma je podporována rozsáhlou komunitou vývojářů a uživatelů, což se odráží v dostupnosti bohaté kolekce knihoven. Arduino Nano bylo v rámci měřené stanice zvoleno jako řídicí jednotka měřicího systému díky své spolehlivosti, dostatečnému výpočetnímu výkonu a nízké energetické náročnosti zajišťující dlouhodobý provoz. Významným faktorem při výběru byla rovněž okamžitá dostupnost této platformy ve skladových zásobách Ústavu automatizace a měřicí techniky. [18]

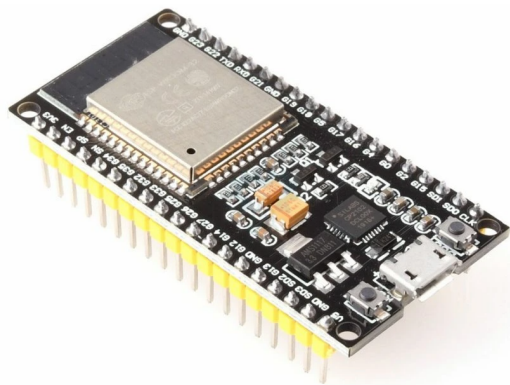


Obr. 3.13: Arduino Nano [19]

ESP32-DevkitC

Druhým zvoleným mikrokontrolérem je ESP32-DevkitC od společnosti Espressif Systems. Tento kit je oficiálně označován jako ESP32-DevkitC V1 a je osazen modulem

ESP-WROOM-32, který integruje Wi-Fi a Bluetooth technologie. Základem modulu je dvoujádrový 32-bitový mikrokontrolér ESP32, taktovaný na frekvenci až 240 MHz. DevkitC disponuje 520 KB SRAM, 4 MB flash paměti a nabízí široké spektrum periférií včetně podpory pro až 30 GPIO pinů. Platforma podporuje standardní komunikační rozhraní jako SPI, I2C a UART. ESP32-DevkitC lze programovat prostřednictvím mikro-USB portu, který slouží zároveň jako napájecí konektor. Vývojový kit je plně kompatibilní s prostředím Arduino IDE. Espressif Systems vytvořilo i vlastní vývojový framework ESP-IDF (IoT Development Framework). V rámci měřicí stanice byl ESP32-DevkitC využit jako alternativa k Arduino Nano pro umožnění paralelního měření teplotní závislosti i dlouhodobého zatížení snímačů. Tato volba poskytla příležitost k otestování moderního vývojového prostředí PlatformIO jako rozšíření pro Visual Studio Code, které oproti standardnímu Arduino IDE nabízí pokročilé možnosti správy projektů, integraci s různými vývojovými nástroji a lepší podporu pro komplexnější aplikace. Volba ESP32-DevkitC byla podpořena okamžitou dostupností této platformy ve vybavení Ústavu automatizace a měřicí techniky. [20]



Obr. 3.14: ESP32 DevkitC [20]

3.4 Využitý software

Tato kapitola se zabývá softwarem využitým pro vytvoření a využití měřicí stanice a následné vyhodnocení naměřených dat.

3.4.1 Firmware pro Arduino

Program je vyvíjen v programovacím prostředí pro kontroléry Arduino. V prostředí Arduino IDE lze programovat v jazyce C nebo C++, nebo jazyce Wiring. Pro tento program byl zvolen jazyk Wiring, který je odvozen z jazyka C++ přidáním zjednodušené syntaxe, aby usnadnil psaní kódu pro ovládání hardwaru. Obsahuje zjedno-

dušené příkazy pro ovládání vstupů a výstupů, jako například `digitalWrite()` a `analogRead()`.

Arduino IDE program 1. verze

Tento Arduino kód byl tvořen pro zapojení s převodníkem HX711. Byl vytvořen tak, aby po startu mikrokontroler zachytil 10 hodnot naměřených snímačem, a odeslal je přes sériovou linku. To je možné kontrolovat pomocí zabudované funkce Serial Monitor. Při programování a testování kódu se zjistilo, že nezatížený snímač zobrazoval záporné hodnoty, a se zátěží se hodnota měnila k nule. Proto bylo nutné nastavit offset, který dokázal programově ošetřit správně měření hodnot. Předpokládá se, že je to způsobeno prohozením zapojení E+ a E- na AD převodníku. Byl také nastaven kalibrační faktor, který zajišťuje přepočítání digitální hodnoty na kilogramy. Čtení digitálního vstupu probíhá pomocí překlápění signálu na pinu SCK, kdy při každém impulzu je vyčten jeden bit. Právě zde bylo zjištěno saturování převodníku, kdy nedokázal vyčíst vyšší hodnoty než zhruba 30 kilogramů, ani při změně zesílení na 32.

Arduino IDE program 2. verze

Zde je již připojen převodník NAU7802. V této verzi byl kód upraven, aby posílal hodnoty přes sériovou linku neustále. Také bylo přepájeno připojení E- a E+ na správné zapojení podle datového listu snímače, červený drát V+ a černý V-. Z toho důvodu byl opět upraven i kód. Kód nyní posílá neustále data získaná z převodníku přes sériovou linku přepočtená na kilogramy. Při zesílení 16 se měřená hodnota nedostala přes 80 kilogramů, je tedy nastaveno zesílení 8, kdy je docíleno měření celého rozsahu 0 až 90 kilogramů. Tento kód je také doplněn o posílání hodnoty teploty, obě hodnoty jsou posílány v řádku odděleny čárkou. Tento kód je také doplněn o posílání hodnoty teploty, přičemž obě hodnoty (hmotnost a teplota) jsou posílány na sériovou linku v jednom řádku oddělené čárkou. Kód je vložen v elektronické příloze B.

3.4.2 Firmware pro ESP32

Pro vývoj aplikace na platformě ESP32 bylo využito vývojové prostředí PlatformIO jako rozšíření pro Visual Studio Code. PlatformIO představuje modernější alternativu k Arduino IDE a nabízí pokročilé možnosti, jako je správa závislostí, multiplatformní podpora a integrovaný debugger. Toto prostředí bylo zvoleno především kvůli lepší podpoře ESP32 a možnosti efektivnější správy knihoven.

PlatformIO program

Implementovaný firmware pro ESP32 zajišťuje snímání dat ze senzoru zatížení s využitím AD převodníku NAU7802 a současně měření teploty pomocí senzoru SHT31. Program využívá standardní Arduino architekturu, ale s výhodami, které nabízí ESP32, zejména možnost definovat více I2C sběrnic. V úvodní části kódu jsou definovány použité knihovny a nastaveny základní parametry pro měření, včetně kalibračního faktoru. V tomto kódu jsou možnosti nastavení jak kalibračního faktoru pro snímače FX1901, tak i FMXD. Kód lze tedy využít pro měření obou typů snímačů. Funkce `setup()` inicializuje obě I2C sběrnice (primární a sekundární na pinech 18 a 19), nastavuje AD převodník a načítá kalibrační offset z EEPROM paměti. Zajímavým aspektem kódu je rozdílný způsob inicializace obou I2C zařízení: převodník NAU7802 je inicializován pomocí `"Vaha.begin(Wire1)"`, kde se předává instance alternativní I2C sběrnice, zatímco teplotní senzor SHT31 je inicializován pomocí `"Teplomer.begin(0x44)"`, kde parametrem je pouze I2C adresa zařízení. Tento rozdíl je způsoben omezením knihovny `Adafruit_SHT31`, která nepodporuje specifikaci alternativní I2C sběrnice. Z tohoto důvodu je primární I2C sběrnice využita pro komunikaci s teplotním senzorem, zatímco sekundární zajišťuje komunikaci s AD převodníkem. Hlavní smyčka programu kontinuálně sleduje příjem příkazů ze sériové linky pro možnost manuálního tárování váhy. Program rozpoznává dva příkazy: `'t'` pro dočasné tárování bez zápisu do paměti a `'s'` pro trvalé uložení offsetu do EEPROM. V každém cyklu je dále provedeno odečtení hmotnosti ze snímače zatížení, její přepočtení na kilogramy, měření teploty z SHT31 a odeslání hodnot ve formátu CSV přes sériovou linku s periodou 500 ms. Oproti Arduino verzi firmware je tato implementace robustnější díky využití dvou separátních I2C sběrnic, což eliminuje potenciální konflikty mezi zařízeními, a možnosti trvalého ukládání kalibračních hodnot do EEPROM paměti ESP32. Program pro ESP32 je stejně jako program z Arduina vložen v elektronické příloze B.

3.4.3 Zpracování dat v PC

V počáteční fázi vývoje měřicího systému bylo zvažováno několik možností pro ukládání naměřených dat. Mikrokontrolér Arduino sám o sobě nemá přístup k souborovému systému počítače a komunikuje pouze přes sériovou linku. Teoreticky bylo možné implementovat ukládání dat na SD kartu přímo připojenou k Arduino s využitím knihovny `SD.h`. Vzhledem k absenci SD modulu v dostupném vybavení a s ohledem na potřebu přímého přenosu dat do počítače pro další analýzu byl pro zpracování dat zvolen externí program v PC. Pro prvotní testování komunikace a základní sběr dat byl vytvořen jednoduchý program v prostředí Processing. Tento program

umožňoval uživateli zadat měřenou hmotnost, přijal 10 naměřených hodnot ze sériové linky a uložil je do CSV souboru. Přestože toto řešení bylo funkční pro prvotní testy, jeho omezená funkcionalita vedla k rychlému nahrazení pokročilejší aplikací vyvinutou v prostředí Visual Studio, která je popsána v následující části. Všechny vytvořené kódy, modely a matlab skripty jsou vloženy v elektronické příloze B.

Visual studio kód

Program ve Visual Studiu byl vyvinut jako náhrada za omezený Processing skript, který vyžadoval otevření vývojového prostředí, spuštění a zadání parametrů. Tato C# konzolová aplikace může být spuštěna přímo přes EXE soubor na ploše a je ovládána prostřednictvím příkazového řádku, čímž eliminuje potřebu znalosti prostředí Visual Studio. Z hlediska architektury je program navržen jako jednoduchá konzolová aplikace s lineárním tokem řízení. Využívá objektově orientovaný přístup jazyka C# a je strukturován do jediné třídy Program, obsahující hlavní metodu Main a pomocnou metodu eraseBuffer.

Aplikace využívá několik klíčových knihoven a jmenných prostorů: - System.IO.Ports pro přístup k sériovému portu a komunikaci s mikrokontrolérem - System.Globalization pro správné formátování čísel nezávisle na regionálním nastavení Tok programu začíná výzvou k uživateli, aby vybral dostupný COM port ze seznamu, což vede k otevření komunikace na zvoleném portu. Následuje dotaz, zda si uživatel přeje provést tárování snímače či nikoliv. Po této volbě je uživatel vyzván zadat referenční hmotnost, která se má měřit. Tato hodnota je následně vypisována spolu s aktuálně měřenou hodnotou hmotnosti a teplotou. Mikrokontrolér kontinuálně posílá hodnoty hmotnosti a teploty přes sériovou linku. Program je navržen tak, aby zachytával a ukládal tyto hodnoty každou sekundu. Přijaté údaje jsou časově orazítkovány a uloženy do CSV souboru s názvem measurement obsahujícím aktuální datum a čas. V souboru jsou hodnoty odděleny středníkem, zatímco ve výstupu na konzoli jsou odděleny čárkou pro lepší čitelnost. Každý řádek přijatý z mikrokontroléru je okamžitě zpracován a uložen. Pro zlepšení uživatelského ovládání program po každých 20 přijatých řádcích zobrazí připomínku "Esc pro přerušování a změnu hmotnosti", což umožňuje uživateli stisknutím klávesy Esc vrátit se na začátek procesu měření a nastavit novou referenční hmotnost. Program zahrnuje také základní ošetření chyb, které zachycuje výjimky při komunikaci se sériovým portem nebo při zpracování přijatých dat, čímž zvyšuje robustnost aplikace i při nestandardních situacích.

```
LoadCell - Shortcut
LoadCell Reader, usage example: Loadcell.exe destination_file.csv
Vyber port: COM5
COM5
Port COM5 otevren. Cekám na data..
Chcete provést manuální tárování? (y/n): y
Odesílám příkaz pro manuální tárování...

Zadej skutecnou hmotnost: 18
1, 14.5.2025 15:03:53, 0.000, 18.000, 25.150
2, 14.5.2025 15:03:55, 0.000, 18.000, 25.160
3, 14.5.2025 15:03:56, 0.000, 18.000, 25.160
4, 14.5.2025 15:03:58, 0.000, 18.000, 25.160
5, 14.5.2025 15:03:59, -0.010, 18.000, 25.160
6, 14.5.2025 15:04:01, -0.010, 18.000, 25.160
7, 14.5.2025 15:04:02, 1.800, 18.000, 25.150
8, 14.5.2025 15:04:03, 19.850, 18.000, 25.150
9, 14.5.2025 15:04:04, 18.770, 18.000, 25.160
10, 14.5.2025 15:04:06, 18.840, 18.000, 25.180
11, 14.5.2025 15:04:07, 18.790, 18.000, 25.150
12, 14.5.2025 15:04:08, 18.790, 18.000, 25.150
13, 14.5.2025 15:04:09, 18.800, 18.000, 25.180
14, 14.5.2025 15:04:11, 18.900, 18.000, 25.150
15, 14.5.2025 15:04:12, 18.850, 18.000, 25.160
16, 14.5.2025 15:04:14, 18.870, 18.000, 25.150
17, 14.5.2025 15:04:15, 18.870, 18.000, 25.160
18, 14.5.2025 15:04:16, 18.890, 18.000, 25.140
19, 14.5.2025 15:04:17, 18.820, 18.000, 25.150
20, 14.5.2025 15:04:18, 18.840, 18.000, 25.180
Esc pro prerusení a zmenu hmotnosti
21, 14.5.2025 15:04:20, 18.830, 18.000, 25.150
```

Obr. 3.15: Konzolová aplikace pro sběr dat z tenzometrického snímače

MATLAB pro analýzu dat

Pro zpracování, analýzu a vizualizaci naměřených dat byl využit software MATLAB, který představuje standardní nástroj pro vědeckotechnické výpočty a práci s daty. Byly vytvořeny tři základní skripty pro zpracování různých typů měření: dlouhodobého zatížení, ustálení nuly a teplotní závislosti. Všechny skripty mají podobnou základní strukturu - načtení dat z CSV souboru, zpracování pomocí klouzavých průměrů a vizualizaci výsledků v grafech. CSV soubory generované konzolovou aplikací byly načítány pomocí funkcí `detectImportOptions` a `readtable`, které umožňují korektní zpracování datových souborů včetně správné interpretace oddělovačů.

Pro skript dlouhodobého zatížení snímače FX1901 byla implementována filtrace naměřených dat pomocí klouzavého průměru s velikostí okna 50 hodnot. Tento přístup umožnil odstranění náhodného šumu a zvýraznění dlouhodobého trendu. Data jsou zobrazena v grafu s osou X reprezentující datum a čas měření, což umožňuje sledovat vývoj zatížení v průběhu několika dní.

Skript pro analýzu ustálení nuly snímače využívá podobné filtrování dat pomocí klouzavého průměru, ale zaměřuje se na kratší časové období po odstranění zatížení. Zobrazení časové osy bylo přizpůsobeno pomocí funkce `xtickformat` s dvanácti-hodinovými intervaly, což umožňuje přehledné sledování průběhu ustálení výstupní hodnoty snímače. Pro analýzu teplotní závislosti byl vytvořen specializovaný skript, který vykresluje závislost naměřené hmotnosti na teplotě. Tento skript umožňuje zpracování dat z dvou různých experimentů s odlišnými teplotními rozsahy (20-9 °C a 23-5 °C). Závislost je zobrazena jak pro surová data, tak pro filtrovaná data s využitím klouzavého průměru, což umožňuje lépe pozorovat skutečný trend vztahu mezi

teplotou a výstupní hodnotou snímače. Všechny skripty obsahují také nastavení pro formátování grafů, jako jsou popisky os, mřížky a rotace popisků časové osy, což zajišťuje přehlednou vizualizaci naměřených dat. Tyto grafy jsou pak využity jako podklad pro analýzu a interpretaci výsledků měření v následující kapitole.

Siemens NX pro modelování

Pro návrh a modelování mechanických částí měřicího přípravku byl využit software Siemens NX. Siemens NX byl zvolen z důvodu jeho dostupnosti na Ústavu automatizace a měřicí techniky a pro jeho pokročilé možnosti v oblasti modelování.

NX patří mezi nejpokročilejší produkty CAD/CAM/CAE na světě. Zkratka CAD označuje počítačem podporované navrhování (Computer-Aided Design), CAM počítačem podporovanou výrobu (Computer-Aided Manufacturing) a CAE počítačem podporované inženýrské analýzy (Computer-Aided Engineering). Celkově je Siemens NX využíván v oblastech koncepčního návrhu, 3D modelování, technické dokumentace, inženýrské analýzy a grafické simulace. V průmyslu se také využívá pro tvorbu digitálních dvojčat, protože dokáže nejen vytvořit každou část stroje, ale i simulovat chování při kolizi a analyzovat kinematické i dynamické vlastnosti.

Při modelování byly uplatněny principy parametrického designu, který umožňuje flexibilní úpravy modelu na základě změn vstupních parametrů. To umožnilo snadnější modifikace modelů během vývoje – například úpravou rozměrů komponent bez nutnosti model kompletně překreslovat, což významně urychlilo iterační proces návrhu.

Práce v Siemens NX probíhala v několika krocích: nejprve byla vytvořena základní geometrie přípravků pomocí skicování, následně byly pomocí operací jako extruze, odebrání, zaoblení a zkosení vytvořeny 3D modely. Finální modely byly exportovány do formátu STL, který byl následně zpracován v programu PrusaSlicer pro přípravu G-code souborů pro 3D tisk. Tento proces umožnil rychlou a přesnou výrobu měřicích přípravků bez nutnosti využití konvenčních výrobních technologií.

Použití systému Siemens NX pro návrh měřicích přípravků se ukázalo jako efektivní volba, která umožnila vytvořit přesně přizpůsobené komponenty pro testování snímačů FX1901 a FMXD, jak bylo podrobněji popsáno v kapitole 3.2 věnované mechanické konstrukci měřicího přípravku. [21]

3.4.4 Kalibrace snímačů zatížení

Kalibrace tenzometrických snímačů je klíčovým krokem pro zajištění přesnosti měření. V reálných podmínkách snímač po zapojení nevykazuje nulovou hodnotu při nulovém zatížení. Tato odchylka je způsobena několika faktory - teplotními vlivy,

vlastnostmi přírodních kabelů, počátečním mechanickým napětím v materiálu snímače a dalšími parametry. Přestože oba použité snímače využívají plný Wheatstoneův můstek, který částečně kompenzuje tyto vlivy, je kalibrace nezbytná pro dosažení přesných výsledků. Proces kalibrace implementovaný v tomto projektu se skládá ze dvou hlavních kroků:

Stanovení offsetu

První krok kalibrace představuje zjištění offsetu, tedy hodnoty, kterou snímač vykazuje při nulovém zatížení. Tato hodnota je odečítána od každé naměřené hodnoty z AD převodníku. Offset je stanoven při inicializaci systému a může být aktualizován příkazem "t" (dočasné tárování) nebo "s" (trvalé uložení do EEPROM) odeslaným do mikrokontroléru přes sériovou konzoli. Trvalé uložení offsetu zajišťuje, že kalibrace zůstane zachována i po restartu zařízení. Příkaz "t" je také vždy odeslán do mikrokontroléru po zadání "y" do sériové konzole pro souhlas s manuálním tárováním.

Stanovení kalibračního faktoru

Druhým krokem je stanovení kalibračního faktoru pro převod digitálních hodnot z AD převodníku na fyzikální jednotky (kilogramy). Kalibrační faktor byl určen dle následujícího postupu:

1. Na snímač bylo umístěno referenční závaží o známé hmotnosti (9 kg pro snímač FX1901).
2. Z AD převodníku byla odečtena odpovídající digitální hodnota (707350 pro snímač FX1901).
3. Kalibrační faktor byl vypočten dle vztahu:

$$\text{Kalibrační faktor} = \frac{\text{hodnota z ADC}}{\text{měřená váha}} = \frac{707350}{9 \text{ kg}} = 78594 \quad (3.1)$$

Tento kalibrační faktor je uložen jako konstanta v programu mikrokontroléru. Výsledná hmotnost v kilogramech je pak při každém měření vypočítána dle vztahu:

$$\text{hmotnost v kilogramech} = \frac{\text{hodnota z ADC} - \text{offset}}{\text{kalibrační faktor}} \quad (3.2)$$

Pro snímač FMXD byl stanoven kalibrační faktor obdobným způsobem.

Použitá metoda kalibrace je dvoubodová (nula a jedno referenční závaží), což je kompromis mezi jednoduchostí implementace a přesností měření. Pro aplikace vyžadující vyšší přesnost by bylo možné implementovat vícebodovou kalibraci, která by lépe kompenzovala případné nelinearity snímače v různých částech měřícího rozsahu.

4 Měření charakteristik snímačů

4.1 Úvod

Tato kapitola se zabývá chováním snímačů FX1901 a FMXD při dlouhodobém statickém zatížení a teplotní závislostí. Cílem je experimentálně ověřit, jak se mění výstupní signál po odstranění zátěže, jak dlouhodobě stabilní je výstupní hodnota, a jak se hodnota mění vlivem teploty. Snímače, měřící přípravek a využitý software byly popsány v kapitole 3. V tomto měření byly sledovány dva hlavní parametry:

- **Posun nuly po dlouhodobém zatížení (*Zero drift*)** – Jedná se o změnu hodnoty výstupního signálu po odebrání zátěže, která byla ponechána na snímači po dobu několika dní. Tento jev souvisí s tzv. *creepem* (plíživou deformací) materiálu a má významný vliv na dlouhodobou stabilitu měření.
- **Teplotní posun nuly (*Thermal zero shift*)** – Změna výstupního signálu v závislosti na okolní teplotě při nezatíženém snímači. Teplotní závislost je jedním z klíčových parametrů každého snímače, zejména v prostředí, kde se okolní teplota může výrazně měnit.
- **S těmito parametry velice souvisí i Návrat na nulovou hodnotu (*Zero return*)**, který se projevil i v tomto měření. Tento parametr popisuje chování snímače při návratu k nule po odstranění zátěže. Tedy jak přesně snímač vrátí svůj výstup k nule po odstranění zatížení.

Nominální hodnoty parametrů Posun nuly a Teplotní posun nuly jsou uvedeny v technické dokumentaci snímače, vyjádřené v procentech z celkového měřicího rozsahu. Teplotní posun nuly je vyjádřen v procentech z rozsahu na stupeň Celsia.

Měření bylo provedeno kontinuálně v časovém rozpětí několika dní, přičemž signály ze snímače byly zaznamenávány nepřetržitě v reálném čase a dále vyhodnoceny.

4.1.1 Posun nuly po dlouhodobém zatížení

Měření posunutí nulového bodu snímače bylo prováděno ve skladu SE 2.130 v budově T12 na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií. Tento sklad byl vybrán z důvodu minimálního rušení vibracemi způsobenými pohybem osob a díky stabilní a konstantní teplotě.

Samotné měření začínalo záznamem stability nulové hodnoty, kdy byla po dobu jednoho týdne monitorována nulová výstupní hodnota snímače, tedy jeho výstup při nulové zátěži. Poté byl snímač zatížen dostupným závažím – skříňkou s nářadím o hmotnosti přibližně odpovídající polovině jeho měřicího rozsahu. Tato hmotnost byla zanechána na snímači po dobu jednoho týdne, a opět zaznamenávány výstupní

hodnoty. Po odebrání hmotnosti bylo zkoumáno ustálení nulového bodu neboli Zero return, a také posun nulového bodu, tedy Zero drift.

Tento experiment byl proveden pro oba zkoumané snímače.

4.1.2 Posun nulového bodu vlivem teploty

Experiment byl zahájen v uzavřené místnosti, kde byl snímač bez zatížení ponechán v klidových podmínkách při pokojové teplotě (přibližně 23 °C). Po úvodní stabilizaci byl přípravek přesunut k otevřenému oknu, kde zůstal po celou noc. V tomto prostředí se teplota postupně snižovala až na hodnoty okolo 5–8 °C. Následující den došlo k pozvolnému ohřevu snímače vlivem okolního prostředí a přípravek byl nakonec opět umístěn zpět do místnosti se zavřeným oknem.

Měření bylo ukončeno po dosažení původní pokojové teploty. Během celého průběhu experimentu byly každou sekundu zaznamenávány hodnoty teploty a výstupního signálu snímače. Data byla opět ukládána do CSV souboru a následně zpracována v prostředí MATLAB. Pomocí filtru klouzavého průměru byly datové řady vyhlazeny a výsledky byly graficky interpretovány. Tímto způsobem byla získána závislost výstupního signálu snímače na teplotě v reálných podmínkách. Pro oba snímače byla uskutečněna dvě měření.

4.2 Metodika měření

Dlouhodobé statické zatížení

- **Cíl:** Sledování driftu výstupního signálu při konstantním zatížení
- Snímač byl zatížen přibližně na 45-50 % hodnoty rozsahu
- Doba měření: 7-14 dní
- Vzorkovací perioda: 1 s
- Místo měření: Sklad SE 2.130 v budově T12 s minimálními vibracemi a stabilní teplotou

Ustálení nulové hodnoty po odlehčení

- **Cíl:** Měření návratu výstupního signálu k nulové hodnotě
- Měření zahájeno bezprostředně po odstranění dlouhodobého zatížení
- Doba měření: 2-4 dny
- Vzorkovací perioda: 1 s

Teplotní závislost výstupního signálu

- **Cíl:** Zjištění vlivu teploty na výstupní hodnotu nezatíženého snímače

- Teplotní rozsah: 5-23 °C (přirozené změny teploty)
- Způsob změny teploty: Přemístění měřicí soustavy k otevřenému oknu
- Provedena dvě nezávislá měření pro každý snímač
- Měřeno pomocí ESP32 a digitálního senzoru SHT31

4.3 Výsledky

Zpracované výsledky měření jsou vykresleny pomocí grafů v obrázcích 1-6. V grafu pro teplotní závislost jsou uvedeny jednotky stupňů a výstupní signál snímače v kilogramech. Pro dlouhodobé zatížení a ustálení jsou použity datum a čas měření na vodorovné ose a na svislé ose výstup snímače v kilogramech. Měření ustálení nulové hodnoty snímače FX1901 bylo přerušeno od 13. 4. 2025 do 25. 4. 2025.

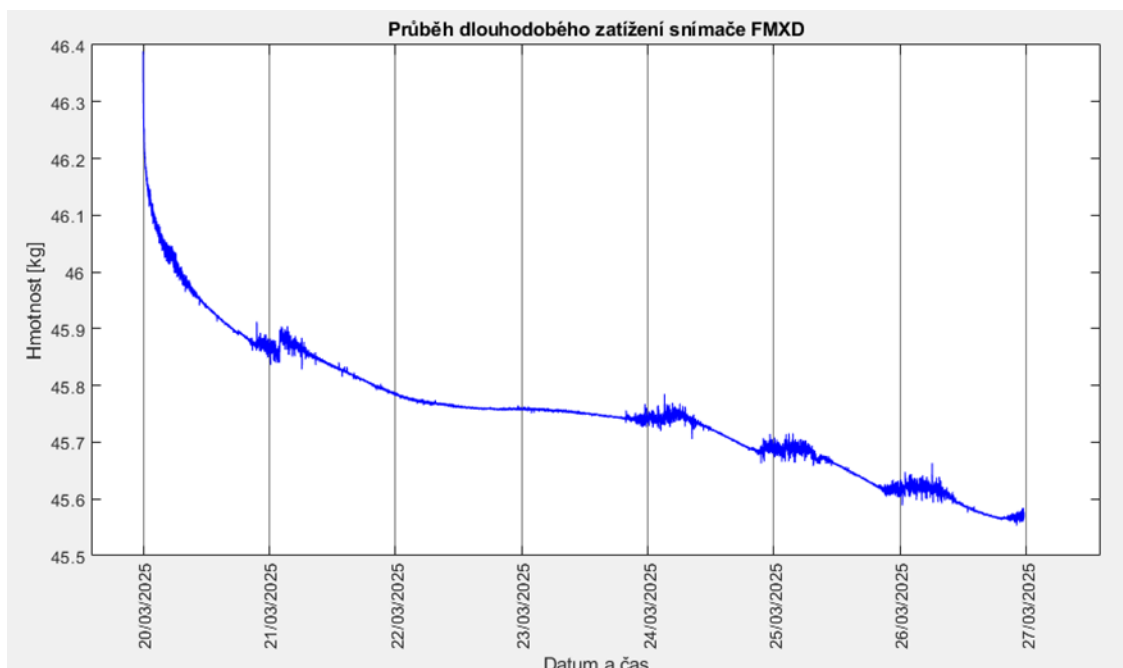
4.3.1 Průběhy snímače FMXD

Dlouhodobé zatížení

Obrázek 4.1 ukazuje průběh naměřené hmotnosti snímačem FMXD při konstantním zatížení po dobu 7 dnů. Z grafu je patrný postupný pokles naměřené hodnoty v čase, přestože skutečná hmotnost zatížení zůstává konstantní. Pokles má charakteristický exponenciální průběh, který je zvláště výrazný v prvních 24 hodinách měření, kdy hmotnost klesla z přibližně 46,4 kg na 45,9 kg. V dalších dnech se rychlost poklesu postupně snižuje a v závěrečné fázi měření již vykazuje téměř lineární charakter.

V průběhu měření jsou patrné periodické oblasti zvýšeného šumu, zejména kolem 21.3., 24.3. a 26.3. Tyto oblasti mohou být způsobeny vnějšími faktory, jako jsou denní cykly změn teploty, vibrace v okolí měřicího stanoviště nebo elektromagnetické rušení. Amplituda těchto šumových složek dosahuje přibližně $\pm 0,02$ kg, což odpovídá přibližně 0,04 % měřené hodnoty. Celkový drift snímače za 7 dní činí 0,84 kg, což představuje 1,80 % měřené hodnoty. V přepočtu na relativní drift vzhledem k celkovému rozsahu snímače 90 kg to odpovídá 0,133 % z rozsahu/den.

Pozorovaný pokles hodnot je typickým projevem creepu (tečení materiálu), což je deformace materiálu snímače pod konstantním zatížením. Tento jev je běžný u tenzometrických snímačů a projevuje se charakteristickou exponenciální křivkou s postupným přechodem do lineárního režimu. Pro přesná dlouhodobá měření je vhodné nechat snímač stabilizovat alespoň 2-3 dny před zahájením kritických měření, kdy již bude většina exponenciální složky creepu odezněna a zbývající drift bude mít předvídatelnější lineární průběh. Pro omezení vlivu periodických šumových složek by bylo vhodné zajistit stabilnější prostředí z hlediska teploty a okolního zdroje vibrací.



Obr. 4.1: Průběh dlouhodobého zatížení snímače FXMD

Tab. 4.1: Vyhodnocení driftu snímače FXMD při dlouhodobém zatížení

Časový interval	Počáteční hodnota [kg]	Konečná hodnota [kg]	Drift [kg]	Drift [%]	Rychlost driftu [kg/den]
1. den	46,38	45,88	0,50	1,08	0,500
2.-7. den	45,88	45,56	0,32	0,70	0,064
Celé období	46,38	45,56	0,82	1,77	0,117

Ustálení nulové hodnoty snímače

Na obrázku 4.2 je zachycen vývoj výstupního signálu snímače FXMD po odstranění dlouhodobého zatížení. Měření probíhalo ve dnech 27. až 28. března 2025. Bezprostředně po odlehčení (počátek grafu) je patrný rychlý nárůst výstupní hodnoty směrem k méně záporné hodnotě, který postupně zpomaluje. Tento jev představuje typický projev reverzního creepu - postupného návratu deformovaného materiálu po uvolnění zátěže. V průběhu měření lze pozorovat také drobný skokový výkyv hodnoty, který lze přisoudit buď teplotním změnám v okolí, nebo přeskupení mechanického napětí v konstrukci snímače.

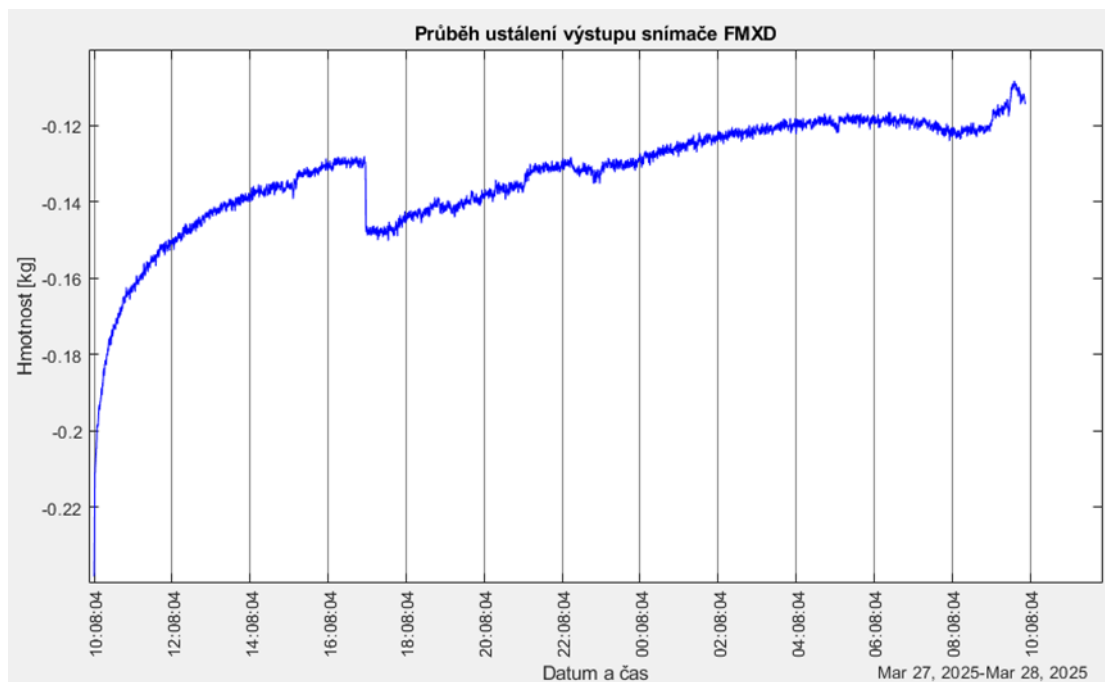
Z naměřených dat lze vyčíst, že počáteční hodnota po odlehčení činila -0,22 kg. Na konci měření se výstupní hodnota ustálila přibližně na -0,12 kg, což znamená celkovou změnu během sledovaného období o 0,1 kg. Za posledních 12 hodin měření se výstup změnil pouze o 0,02 kg, což naznačuje postupné zpomalování procesu ustálení.

Po týdenním zatížení vykazuje snímač trvalý posun od skutečné nuly o přibližně 0,12 kg, což představuje 0,12 % z celkového měřicího rozsahu 100 kg. Tento parametr odpovídá charakteristice označované v technických specifikacích jako nulová rovnováha ($\pm 0,3 \text{ mV/V}$, viz Tabulka 3.2). Přepočtem zjištěné odchylky na jednotky používané výrobcem získáme:

$$\text{Nulová rovnováha} = \frac{0,12 \text{ kg}}{100 \text{ kg}} \times 1,5 \text{ mV/V} = 0,0018 \text{ mV/V} \quad (4.1)$$

Tato hodnota je plně v souladu s údaji udávanými výrobcem a potvrzuje, že snímač splňuje deklarované specifikace.

Z celkové analýzy vyplývá, že snímač FMXD charakterizuje velmi dlouhý proces ustálení po odlehčení, který může trvat i několik dnů.



Obr. 4.2: Průběh ustálení výstupu snímače FMXD

Tab. 4.2: Průběh ustálení nulové hodnoty snímače FMXD

Čas po odlehčení	Výstupní hodnota [kg]	Změna od počáteční hodnoty [kg]
0 hodin	-0,22	0,00
4 hodiny	-0,17	0,05
14 hodin	-0,15	0,07
24 hodin	-0,14	0,08
36 hodin	-0,12	0,10

Teplotní závislost

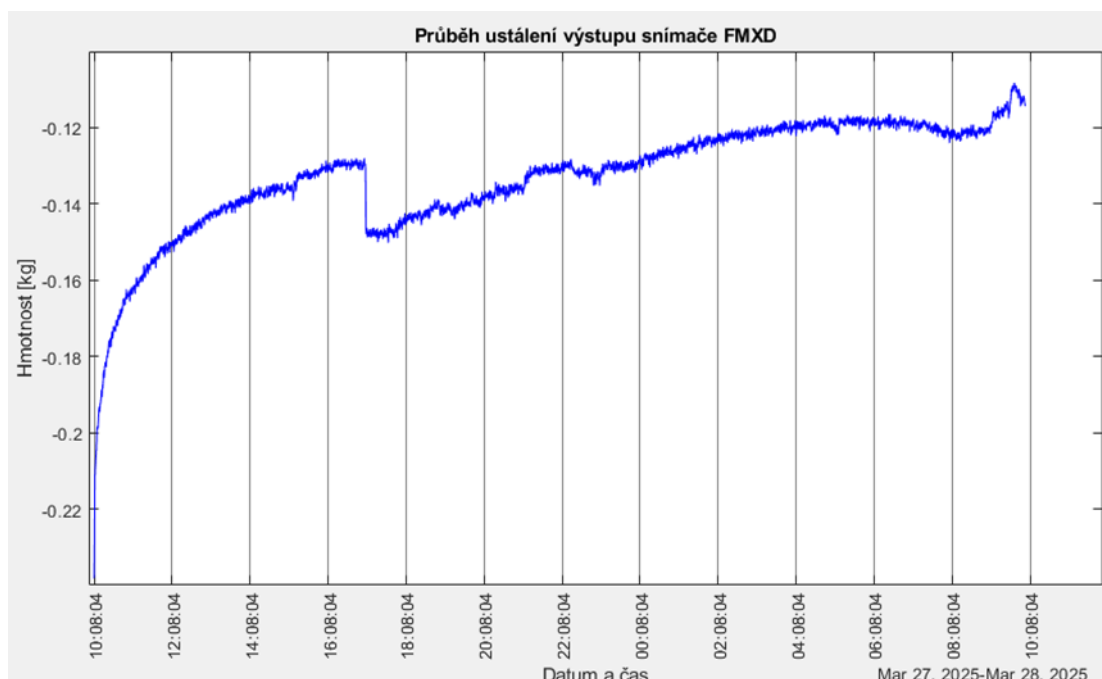
Obrázek 4.3 ukazuje teplotní závislost výstupu senzoru FMXD ve dvou samostatných pokusech. Z grafu je patrná výrazná nelineární negativní závislost mezi teplotou a naměřenou hmotností. Na rozdíl od snímače FX1901, který vykazoval lineární průběh, snímač FMXD má komplexní charakteristiku, která je aproximována polynomem 4. řádu:

$$y = -1,042 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 8,834 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 - 2,936 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 4,770 \cdot 10^{-1} \cdot x + 3,784 \cdot 10^0 \quad (4.2)$$

V oblasti nízkých teplot (8-12 °C) lze pozorovat nejvýraznější změnu, kde snímač zaznamenal hodnoty od 0,17 kg do 0,02 kg. V tomto rozsahu lze odhadnout přibližný teplotní koeficient kolem -0,038 kg/°C (nebo -38 g/°C), což při přepočtu na relativní vyjádření vzhledem ke jmenovitému rozsahu snímače 100 kg odpovídá přibližně -0,038% z rozsahu/°C. Tato hodnota je výrazně vyšší než u snímače FX1901 a překračuje údaje z datového listu, kde je uváděno $<\pm 0,03$ % z rozsahu/°C.

Oba pokusy začínají na pokojové teplotě 23 °C. Při této teplotě byl snímač kalibrován na nulovou hodnotu. Oba pokusy vykazují podobný průběh, pouze s rozdíly v rychlosti poklesu.

Z tohoto grafu lze soudit, že snímač FMXD je méně vhodný pro aplikace s proměnlivou teplotou.



Obr. 4.3: Teplotní závislost snímače FMXD

4.3.2 Průběhy snímače FX1901

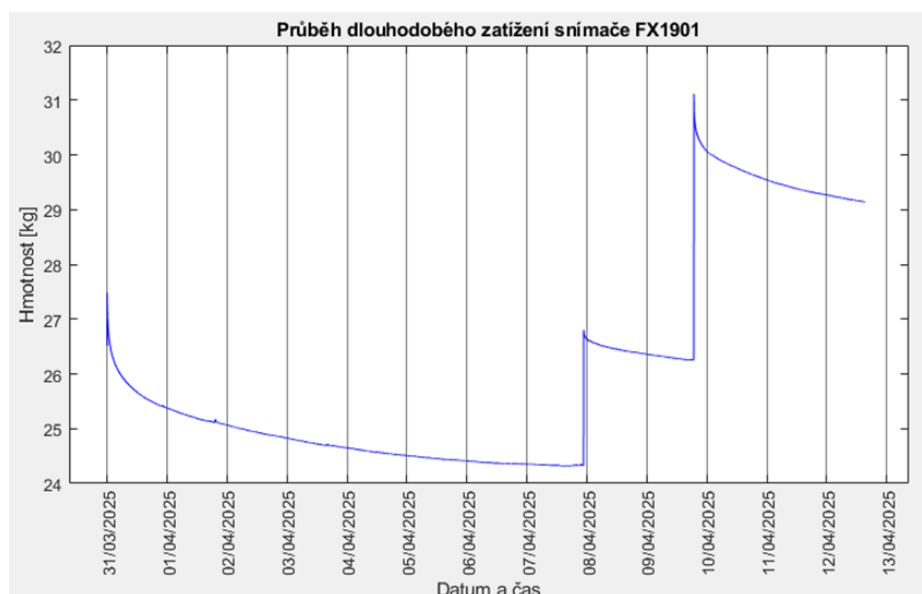
Dlouhodobé zatížení

Snímač FX1901 byl vystaven dvoutýdennímu testu zatížení za účelem vyhodnocení jeho dlouhodobé stability. V průběhu experimentu byla zatěžovací hmotnost dvakrát cíleně navýšena, což umožnilo ověřit konzistentnost chování snímače při různých úrovních zátěže. Kompletní průběh měření je graficky zachycen na obrázku 4.4.

Z analýzy naměřených dat vyplývají následující klíčové poznatky:

- Počáteční hodnota zatížení činila 26,7 kg.
- Po sedmi dnech kontinuálního měření (před prvním navýšením zátěže) klesla indikovaná hodnota na 24,2 kg.
- Během prvního týdne testování byl zaznamenán celkový drift 2,5 kg, což představuje 9,36 % z původní hodnoty.
- Průměrná rychlost poklesu měřené hodnoty v prvním týdnu dosahovala 0,357 kg/den.

Po prvním navýšení zátěže (přibližně na 26,7 kg) a následně po druhém navýšení (přibližně na 31,0 kg) vykazoval snímač konzistentní chování exponenciálního klesání výstupního signálu. Významné je zjištění, že tento postupný pokles hodnot byl pozorovatelný ve všech třech fázích měření s různými úrovněmi zatížení. Tento fakt naznačuje, že pozorovaný drift představuje vlastnost snímače FX1901, která se projevuje nezávisle na měřené hmotnosti. Celková míra driftu během prvního týdne (2,5 kg) představuje v tomto využití značně vysokou hodnotu. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že snímač FX1901 není vhodným řešením pro aplikace vyžadující vysokou míru dlouhodobé stability měření hmotnosti.



Obr. 4.4: Průběh dlouhodobého zatížení snímače FX1901

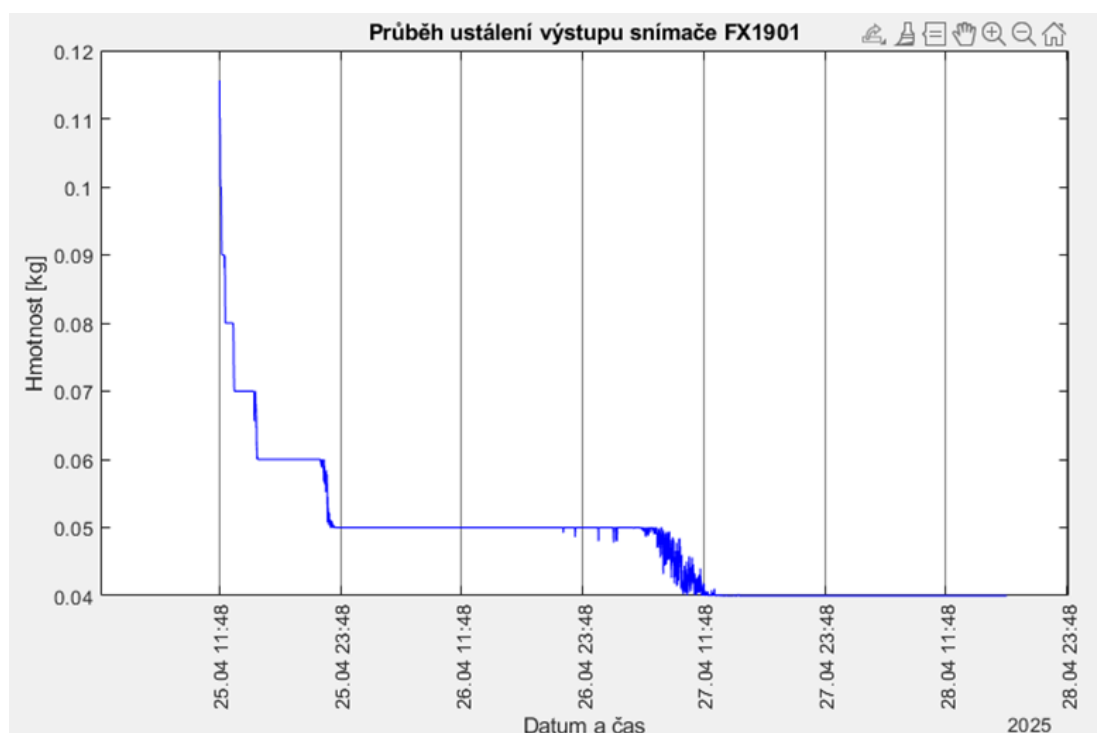
Tab. 4.3: Vyhodnocení driftu snímače FX1901 při dlouhodobém zatížení

Úroveň zatížení	Počáteční hodnota [kg]	Konečná hodnota [kg]	Drift [kg]	Drift [%]	Rychlost driftu [kg/den]
První zatížení	26,7	24,2	2,5	9,36	0,357
Po 1. navýšení	26,7	26,3	0,4	1,50	0,400
Po 2. navýšení	31,0	29,2	1,8	5,81	0,600

Ustálení nulové hodnoty snímače

Obrázek 4.5 znázorňuje stabilitu nulového návratu senzoru FX1901 po dobu čtyř dnů (25.-28. dubna 2025) po odstranění zatížení. Graf vykresluje chování senzoru při odlehčení a ukazuje postupný pokles naměřené hmotnosti z počáteční hodnoty přibližně 0,12 kg.

K nejvýraznějším změnám dochází během prvních 12 hodin, kdy dochází k výraznému skokovému poklesu až na 0,05 kg. Na této hodnotě nastává ustálení, kdy se tato hodnota dá považovat za ustálený nulový bod senzoru po deformaci. Po dlouhou dobu nedojde ke změně výstupu, až více než po 24 hodinách klesne výstup na hodnotu 0,04 kg. Toto chování naznačuje, že senzor FX1901 potřebuje přibližně 1,5-2 dny, aby se po odstranění zátěže plně stabilizoval. Po dlouhodobém zatížení činí posun od skutečné nuly přibližně 0,04 kg (0,044 % z celkového rozsahu 90 kg).



Obr. 4.5: Průběh ustálení výstupu snímače FX1901

Tab. 4.4: Průběh ustálení nulové hodnoty snímače FX1901

Čas po odlehčení	Výstupní hodnota [kg]	Změna od počáteční hodnoty [kg]
0 hodin	0,12	0,00
6 hodin	0,08	0,04
12 hodin	0,05	0,07
48 hodin	0,04	0,08

Teplotní závislost

Obrázek 4.6 znázorňuje teplotní závislost výstupu senzoru FX1901 ve dvou samostatných pokusech. Z grafu je zřejmá lineární negativní závislost mezi teplotou a naměřenou hmotností v rozsahu teplot přibližně 5 °C až 23 °C. Tuto závislost lze matematicky popsat lineární funkcí ve tvaru:

$$y = k \times x + q \quad (4.3)$$

kde y představuje naměřenou hmotnost [kg], x je teplota [°C], k je teplotní koeficient [g/°C] a q je konstanta [kg] představující teoretickou hodnotu výstupu senzoru při teplotě 0 °C (průsečík s osou y).

$$y = -0,00559 \times x + 0,11442 \quad (4.4)$$

Pro druhý pokus (červená křivka) byla stanovena rovnice:

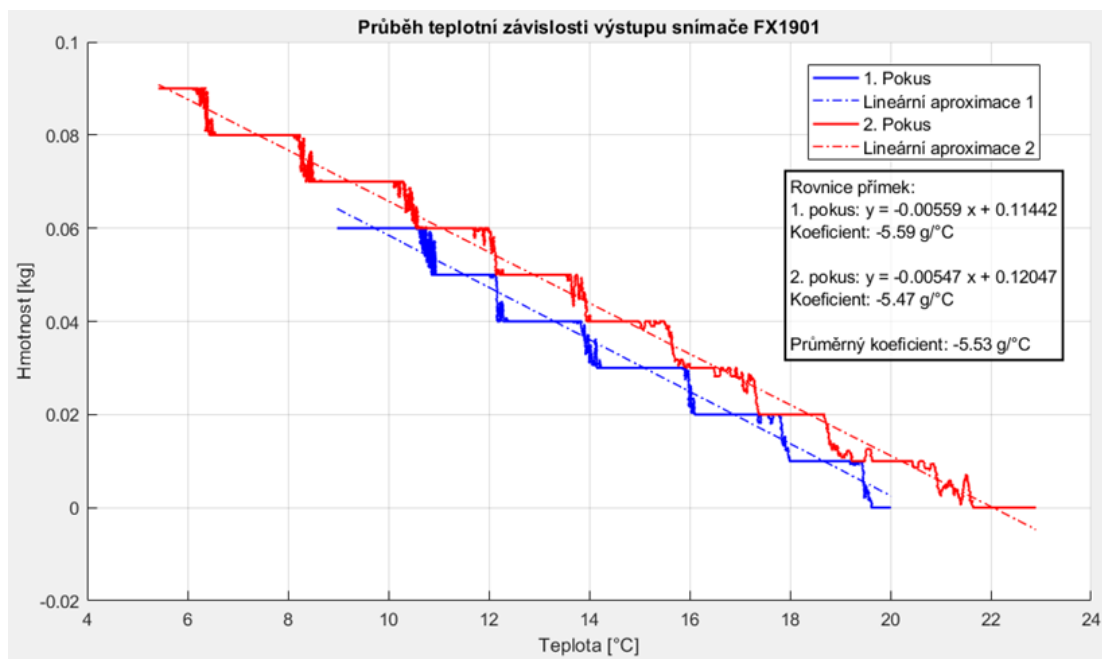
$$y = -0,00547 \times x + 0,12047 \quad (4.5)$$

Obě rovnice byly vypočítány pomocí programu MATLAB, využití skripty jsou přiloženy v příloze A.1

Teplotní koeficienty činí -5,59 g/°C pro první pokus a -5,47 g/°C pro druhý pokus, s průměrnou hodnotou -5,53 g/°C. Tato hodnota udává velikost změny měřené hmotnosti v závislosti na změně teploty. Při přepočtu na relativní vyjádření vzhledem k jmenovitému rozsahu snímače 90 kg to odpovídá přibližně 0,00614 % z rozsahu/°C. Což je hodnota, která odpovídá údajům z datového listu, kde je udáváno $<\pm 5$ % z rozsahu/°C.

První pokus začíná při teplotě přibližně 20 °C a končí při teplotě 9 °C, kdy výstup dosahuje hodnoty 0,06 kg. Druhý pokus začíná při teplotě přibližně 23 °C a pokračuje až k 5 °C, kde výstup dosahuje hodnoty 0,09 kg. Při teplotách 20 °C a 23 °C byl snímač zkalibrován na nulovou hodnotu.

Z lineární aproximace je patrné, že při zvýšení teploty o přibližně 2 °C dochází ke snížení naměřené hmotnosti o přibližně 0,01 kg. Tato lineární závislost je důsledkem fyzikálních vlastností senzoru.



Obr. 4.6: Teplotní závislost snímače FX1901

4.4 Porovnání vlastností snímačů

Na základě provedených měření bylo možné porovnat vlastnosti obou testovaných snímačů z hlediska jejich dlouhodobé stability, návratu k nulové hodnotě a teplotní závislosti.

4.4.1 Srovnání dlouhodobé stability

Tab. 4.5: Srovnání driftu při dlouhodobém zatížení

Parametr	FMXD	FX1901
Celkový drift za týden	0,82 kg	2,50 kg
Rychlost driftu	0,117 kg/den	0,357 kg/den
Drift během 1. dne	0,50 kg	1,10 kg
Linearita driftu	Vyšší	Nižší

Snímač FMXD vykazuje výrazně lepší dlouhodobou stabilitu s přibližně 3× nižším driftem než snímač FX1901. Tento rozdíl je významný zejména pro aplikace, kde je požadováno dlouhodobé kontinuální měření hmotnosti, jako je monitorování pacientů v nemocničním prostředí.

4.4.2 Srovnání návratu k nulové hodnotě

Tab. 4.6: Srovnání návratu k nulové hodnotě

Parametr	FMXD	FX1901
Posun od nuly po ustálení	-0,12 kg	0,04 kg
Charakter ustálení	Plynulý, exponenciální	Lineární
Celkový posun během ustálení	0,10 kg	0,08 kg

Oba snímače vykazují měřitelný posun nulové hodnoty po dlouhodobém zatížení. Snímač FX1901 dosahuje nižšího posunu nulového bodu po ustálení, a to 0,04 kg oproti 0,12 kg u FMXD.

4.4.3 Srovnání teplotní závislosti

Tab. 4.7: Srovnání teplotní závislosti výstupního signálu

Parametr	FMXD	FX1901
Průměrný teplotní koeficient	-0,011 kg/°C	-0,005 kg/°C
Maximální teplotní drift (5-23 °C)	0,17 kg	0,09 kg
Charakter teplotní závislosti	Nelineární	Lineární

Snímač FX1901 vykazuje přibližně poloviční teplotní závislost ve srovnání s FMXD, což odpovídá hodnotám deklarovaným v technické dokumentaci obou snímačů ($<\pm 0,05$ % rozsahu/°C pro FX1901 a $<\pm 0,03$ % rozsahu/°C pro FMXD). Zajímavým rozdílem je charakter teplotní závislosti – zatímco u FMXD je závislost plynulejší s výraznější změnou při nižších teplotách, FX1901 vykazuje zdárný lineární průběh.

5 Komponenty vyhodnocovacího členu

Tato kapitola se zabývá komponenty použitými ve vyhodnocovacím členu pro měření hmotnosti pacienta ležícího na lůžku pomocí tenzometrického snímače. Na základě referenčního schématu poskytnutého během konzultací byly vybrány klíčové komponenty pro zajištění optimální funkčnosti systému. Jsou zde popsány jak původní komponenty zachované z referenčního návrhu, tak i nové komponenty zaměřené na zlepšení přesnosti měření a stability napájení analogové části. U každé komponenty jsou uvedeny její technické parametry a popsán její výběr vzhledem k požadavkům na přesnost, spolehlivost a kompatibilitu s ostatními prvky systému.

5.1 Požadavky na vyhodnocovací elektroniku

Pro přesné měření hmotnosti pacientů ležících na lůžku bylo nutné navrhnout vyhodnocovací elektroniku, která bude splňovat specifické požadavky dané charakterem aplikace. Mezi hlavní požadavky patří:

- Vysoká přesnost měření signálu z tenzometrických snímačů v rozsahu jednotek milivoltů.
- Dostatečná rychlost vzorkování pro sledování změn hmotnosti v reálném čase.
- Odolnost proti elektromagnetickému rušení.
- Možnost snadné kalibrace a nastavení offsetu.
- Spolehlivé komunikační rozhraní pro přenos dat do nadřazeného systému.
- Nízká spotřeba energie či provoz z baterie.
- Kompaktní rozměry pro snadnou integraci do nemocničního lůžka.
- Galvanické oddělení signálových a napájecích částí z důvodu rušení a bezpečnosti.

Na základě těchto požadavků byl navržen vyhodnocovací člen, jehož schéma je rozděleno do několika funkčních bloků: mikrokontrolér (MCU), AD převodník (ADC), napájecí část (PowerSupplies) a komunikační rozhraní (RS485 Interface).

5.2 Výběr komponent pro vyhodnocovací člen

Při návrhu vyhodnocovacího členu bylo využito konzultací s panem Ing. Ondřejem Baštánem, který poskytl referenční schéma podobného řešení. Toto schéma posloužilo jako osvědčený základ pro návrh, který byl následně upraven dle požadavků této aplikace. Většina komponent byla zachována z původního návrhu vzhledem k jejich ověřené funkčnosti a jednoduché dostupnosti. Z důvodu využití a zajištění kompatibility s ostatními projekty realizovanými na fakultě byl kladen důraz na zachování komponentů, zejména transceiveru SP3485EN-L/TR pro komunikaci po rozhraní

RS485. Tento přístup umožní snadnější integraci vyhodnocovacího členu do širšího projektu vyvíjeného na Ústavu automatizace a měřicí techniky. Blokové uspořádání bylo zachováno, kdy byl přidán blok pro AD převodník.

Hlavní modifikace oproti referenčnímu návrhu spočívá v implementaci nového AD převodníku označeném U5 a napěťového regulátoru označeném U4. Tyto změny byly motivovány potřebou vyšší přesnosti analogového signálu a stabilnějšího napájecího zdroje pro analogovou část obvodu. AD převodník byl vybrán s ohledem na jeho vyšší rozlišení a nižší vlastní šum, což jsou klíčové parametry pro přesné měření malých změn hmotnosti. Regulátor napětí pak poskytuje kvalitnější napájení s nižším šumem, což dále přispívá k celkové přesnosti měření.

Kompletní schéma bylo překresleno v prostředí KiCad s důrazem na přehlednost a modularitu, což umožňuje snadnou orientaci v návrhu a případné budoucí modifikace jednotlivých funkčních bloků. Při překreslování byl kladen důraz na správné propojení jednotlivých komponent a optimalizaci signálových cest, zejména v analogové části obvodu.

5.2.1 Napájení

Hlavní napájení vyhodnocovacího členu je přivedeno prostřednictvím signálu VBUS, který je součástí komunikačních konektorů J2 a J3. Tento konektor zajišťuje jak napájení, tak přenos dat mezi vyhodnocovacím členem a nadřazeným systémem. Napájecí část vyhodnocovacího členu byla navržena s ohledem na požadavky jednotlivých komponent a potřebu stabilního napájení s nízkým šumem. Skládá se z těchto hlavních komponent:

Low Dropout (LDO) regulátor AMS1117-3.3

Primárním regulátorem napětí pro digitální část obvodů je lineární stabilizátor AMS1117-3.3 (U3) od společnosti Advanced Monolithic Systems. Tento obvod byl zvolen díky své spolehlivosti, dostupnosti a vhodným parametrům pro napájení digitálních obvodů. AMS1117-3.3 poskytuje stabilní výstupní napětí 3,3 V při vstupním napětí v rozsahu 4,75-12 V a výstupní proud až 1 A. [22]

Napěťová reference MCP1501-33xCH

Pro napájení analogové části, především AD převodníku, byl zvolen precizní napěťový regulátor MCP1501-33xCH (U4) od společnosti Microchip. Tento komponent byl vybrán s ohledem na potřebu velmi stabilního a nízkošumového napájecího napětí pro přesné analogové měření. Hlavní výhody tohoto regulátoru zahrnují vysokou počáteční přesnost výstupního napětí $\pm 0,1$ %, extrémně nízký šum typicky

6 μ VRMS, vynikající teplotní stabilitu a nízkou spotřebu, maximálních 140 μ A. Na výstupu je tento regulátor schopen zajistit až 20 mA, což s velkou rezervou vyhovuje typické spotřebě využitého AD převodníku. [23]

5.2.2 Mikrokontrolér

Pro řízení vyhodnocovacího členu byl použit mikrokontrolér ATSAM21G17A-A od společnosti Microchip. Tento mikrokontrolér je součástí rodiny SAM21, která je založena na architektuře ARM Cortex-M0+. Volba tohoto mikrokontroléru byla ovlivněna několika praktickými faktory, zejména jeho dostupností ve skladových zásobách Ústavu automatizace a měřicí techniky a předchozími zkušenostmi s touto platformou. ATSAM21G17 nabízí jádro taktované na frekvenci až 48 MHz, 128 KB flash paměti pro program a 16 KB SRAM, což vytváří dostatečný prostor pro implementaci řídicích algoritmů a zpracování dat, širokou škálu periférií včetně SERCOM (*Serial Communication*) rozhraní, které lze konfigurovat jako I2C, SPI nebo UART podle potřeby aplikace a provozní napětí 1,62-3,63 V, což je kompatibilní s 3,3 V logikou používanou v návrhu. [24]

5.2.3 Komunikace

Komunikace mezi mikrokontrolérem a AD převodníkem probíhá prostřednictvím rozhraní I2C, které je integrováno v použitém AD převodníku. Toto dvoudrátové rozhraní poskytuje spolehlivý přenos dat na krátké vzdálenosti v rámci DPS (deska plošných spojů). Pro komunikaci s nadřazeným systémem bylo dle požadavků na následné využívání vyhodnocovacího členu zachováno rozhraní RS485, realizované pomocí transceiveru SP3485EN-L/TR. Tento komponent představuje 3,3V poloduplexní transceiver, který plně splňuje specifikace protokolů RS-485 a RS-422 a podporuje přenosovou rychlost až 10 Mbps. Klíčovou výhodou rozhraní RS485 je jeho diferenciální způsob přenosu dat, který poskytuje vynikající odolnost proti elektromagnetickému rušení. Tato vlastnost je zásadní pro zajištění spolehlivého přenosu dat v průmyslovém prostředí, kde se může vyskytovat značné množství elektromagnetického rušení. [25]

5.2.4 AD převodník

Zvolený převodník ADS122C04IPWR je 24bitový, nízkopříkonový delta-sigma AD převodník od společnosti Texas Instruments. Tento převodník nabízí čtyři analogové single-ended kanály, které mohou být využity jako dva diferenciální vstupy. Dominuje jednoduchým I2C rozhraním pro komunikaci s nadřazeným systémem, které podporuje rychlost až 1 Mbps. Široký rozsah napájecího napětí 2,3 V až 5,5 V

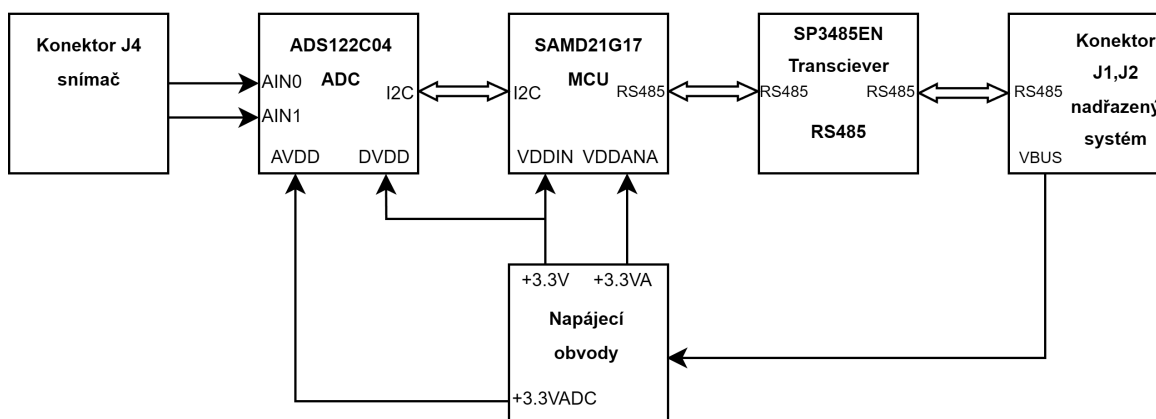
vyhovuje napájení z nízko šumového regulátoru napětí U4. Převodník také nabízí PGA s nastavitelným zesílením od 1 do 128, je tedy možné nastavit zesílení 8, které bylo použito pro snímače využívané v měřicí stanici. Převodník disponuje interní napěťovou referencí, ale umožňuje také připojení externí reference pro aplikace s vyššími nároky na přesnost měření. Tento 24bitový převodník je ideálním řešením pro tenzometrické snímače, které mají na výstupu velmi malou změnu napětí, typicky v jednotkách milivoltů, což vyžaduje vysoké rozlišení pro dosažení přesných výsledků měření. Proudová spotřeba převodníku je typicky 315 μA . [26]

6 Návrh obvodu vyhodnocovacího členu

Následující kapitola se zabývá návrhem elektrického obvodu systému pro vyhodnocování signálu z tenzometrických snímačů. Na rozdíl od předchozí kapitoly, která se věnovala popisu jednotlivých komponent, zde se zaměřuji na způsob propojení těchto komponent do funkčního celku a specifická zapojení jednotlivých funkčních bloků. Kompletní schéma zapojení bylo vytvořeno v programu KiCad 9.0.1 a je uvedeno v příloze A.1.

6.1 Blokové schéma

Obvod je rozdělen do čtyř hlavních funkčních bloků, jak je znázorněno na blokovém schématu na obrázku 6.1. Toto rozdělení umožňuje přehlednou organizaci návrhu, rychlou orientaci v jednotlivých listech schématu a jasnou separaci analogové a digitální části systému, což je klíčové pro minimalizaci vzájemného rušení.



Obr. 6.1: Blokové schéma obvodu vyhodnocovacího členu

6.2 Zapojení napájecích obvodů

Napájecí část byla navržena s oddělením analogových a digitálních zemí, což minimalizuje vliv digitálního rušení na citlivé analogové obvody.

6.2.1 Digitální napájecí větev U3

LDO regulátor AMS1117-3.3 je zapojen v konfiguraci doporučené výrobcem, avšak s rozšířenou filtrací a ochranou proti rušení. Stabilizátor je doplněn filtračními kondenzátory – na vstupu je umístěn kondenzátor C9 (10 μ F), který slouží jako filtrační kapacita, vyhlazující vstupní napětí. Kondenzátor C10 (10 μ F) na výstupu regulátoru slouží pro vyhlazení a zlepšení transientní odezvy, tedy vyrovnává napětí při

náhlé změně zatížení. Dodatečnou ochranu proti přepětovým špičkám zajišťuje dioda D5 (SD03).

6.2.2 Analogová napájecí větev U4

Velmi přesný napěťový regulátor MCP1501-33xCH je v obvodu implementován přesně dle typického zapojení pro AD převodníky uvedeném v datovém listě výrobce. Vstupní část regulátoru tvoří kondenzátor C16 (2,2 μF) pro filtraci vstupního napětí, a na výstupu jsou umístěny dva kondenzátory C17 (2,2 μF) a C18 (1 μF) pro optimální filtraci v širokém frekvenčním pásmu.

6.2.3 Vstupní ochrana napájení

První stupeň ochrany napájecího vstupu tvoří feritová cívka FL2 (ACMD520-901-2P), která funguje jako vysokofrekvenční tlumič společně s filtračními kondenzátory C7 a C8 (oba 1 μF). Tato LC kombinace efektivně potlačuje vysokofrekvenční složky přicházející po napájecím vedení VBUS. Druhý stupeň ochrany je tvořen polovodičovými prvky - Schottkyho diodou D3 (SS14), která omezuje kladné napěťové špičky, a diodou D4 (SMB), která chrání obvod proti případnému přepólování napájecího napětí.

6.2.4 EMR filtrace

Pro potlačení vysokofrekvenčního rušení jsou v napájecí cestě použity feritové korálky FB1 a FB2 (GZ2012D1011TF), které fungují jako dolní propust s vysokou impedancí pro vysokofrekvenční složky. Tyto komponenty byly zvoleny pro jejich schopnost efektivně tlumit vysokofrekvenční rušení v rozsahu stovek MHz až jednotek GHz.

6.3 Zapojení mikrokontroléru

Mikrokontrolér je v návrhu zapojen podle doporučení výrobce. Napájen je stabilizovaným napětím 3,3 V, které je přivedeno na vývody VDD, VDDIO a VDDANA. Pro zajištění stabilního napájení je u mikrokontroléru umístěn blokovací kondenzátor C1 (10 μF) na pinu VDDcore. Analogové napájecí napětí (VDDANA) je z nízkošumového regulátoru U4, čímž se docílilo oddělení od digitálního napájecího napětí a snížení přenosu šumu do analogových obvodů. Pro programování a ladění je využito rozhraní SWD (Serial Wire Debug) prostřednictvím pinů SWCLK a SWDIO, které umožňuje nahrávání firmware a diagnostiku. Reset obvod s pull-up rezistorem

R6 (100 k Ω) a kondenzátorem C5 (100 nF) zajišťuje spolehlivé resetování mikrokontroléru při spuštění nebo při výskytu napěťových špiček.

Pro komunikaci s AD převodníkem je využito rozhraní I2C, realizované pomocí signálů I2CSCL a I2CSDA, které jsou vyvedeny z pinů PA12 a PA13 jako SERCOM2 mikrokontroléru. Toto rozhraní je opatřeno pull-up rezistory R3 a R4 (oba 100 k Ω) připojenými k napájecímu napětí 3,3 V, které zajišťují definovanou logickou úroveň na sběrnici v klidovém stavu. Použité hodnoty rezistorů jsou kompromisem mezi nízkou spotřebou a dostatečně strmými hranami signálu.

Pro komunikaci s nadřazeným systémem je implementováno rozhraní RS485. Transceiver je připojen k mikrokontroléru pomocí signálů RS485rx a RS485tx, které jsou vyvedeny z vývodů PB22 a PB23 jako SERCOM5. Tyto signály zajišťují asynchronní sériovou komunikaci mezi mikrokontrolérem a transceiverem. Směr komunikace (příjem/vysílání) je řízen signálem RS485DIR, který je připojen k pinu PA27 mikrokontroléru.

6.4 Zapojení Transceiveru SP3485EN-L/TR

Zapojení transceiveru vychází z referenčního schématu a je doplněno o ochranné prvky proti elektrostatickým výbojům a přepětovým špičkám v podobě diod PSM712 a EMI filtru ACMD520-501-2P. Toto řešení poskytuje dodatečnou ochranu komunikačního rozhraní proti nepříznivým vlivům průmyslového prostředí.

6.5 Zapojení AD převodníku

Napájení převodníku je realizováno ze dvou zdrojů - pin DVDD (digitální napájení) je připojen ke standardnímu napětí 3,3 V, zatímco pin AVDD (analogové napájení) je napájen z precizní napěťové reference 3,3 V poskytované regulátorem MCP1501-33xCH. Pro filtraci napájecích napětí jsou použity kondenzátory C23 a C24 (oba 100 nF), které účinně potlačují vysokofrekvenční rušení. Zvláštní pozornost byla věnována propojení analogové (AVSS) a digitální (DGND) země převodníku, které je realizováno prostřednictvím feritové perly FB3 (GZ2012D1101TF) a dvojice kondenzátorů C25 a C26 (oba 100 nF). Toto řešení zajišťuje stejný potenciál obou zemí při současném potlačení přenosu vysokofrekvenčního rušení mezi analogovou a digitální částí.

Komunikace s mikrokontrolérem probíhá prostřednictvím rozhraní I2C, kde piny SDA (15) a SCL (16) jsou připojeny k odpovídajícím signálům z mikrokontroléru. Pin RESET (3) umožňuje softwarový reset převodníku a je řízen signálem

I2CRst z mikrokontroléru. Pro připojení tenzometrického snímače slouží diferenciální vstupní pár tvořený piny AIN0 a AIN1. Tyto vstupy jsou připojeny k výstupnímu konektoru J1, který slouží k připojení tenzometrického snímače. Dokončení AD převodu je signalizováno pinem DRDY (14), který je vyveden do mikrokontroléru pro efektivní řízení komunikace.

Obvod umožňuje použití jak interní, tak externí napěťové reference. Reference je konfigurována pomocí pájecích propojek JP1 a JP2.

Dosažení maximální přesnosti a minimalizace šumu je díky přídavnému pasivnímu RC filtru na vstupu analogových signálů do AD převodníku. Odpory R11 a R12 (1 k Ω) fungují jako proudové omezení. Tyto rezistory omezují proud do analogových vstupů (AIN0 a AIN1) na bezpečnou úroveň, pokud dojde k přepětí na vstupech. Hodnoty využití v RC filtru jsou doporučeny výrobcem v datovém listu převodníku.

Celkové zapojení AD převodníku respektuje doporučení výrobce pro dosažení maximální přesnosti a minimalizaci šumu, což je kritické pro přesné měření malých změn napětí z tenzometrických snímačů v rozsahu jednotek milivoltů.

7 Návrh plošného spoje

Tato kapitola se zaměřuje na návrh DPS (*desky plošných spojů*) vyhodnocovacího členu. Návrh byl realizován v programu KiCad verze 9.0.1, který disponuje rozsáhlou knihovnou symbolů, pouzder i 3D modelů součástek. Software umožňuje komplexní řešení od tvorby schématu až po finální návrh DPS. V příloze jsou obsaženy exporty jednotlivých vrstev ve formátu PDF.

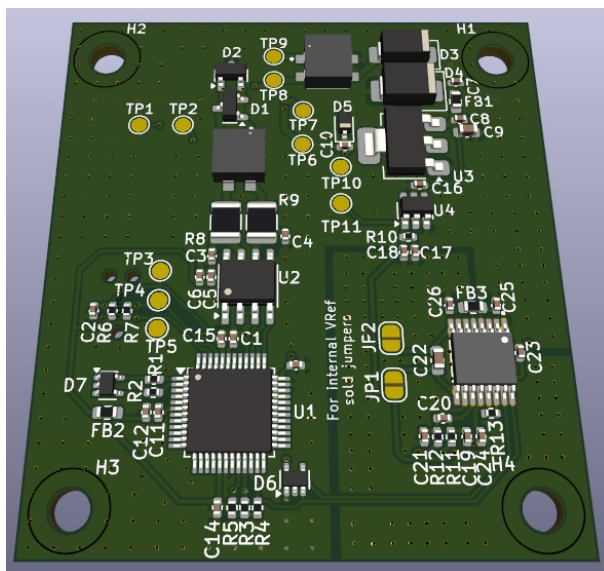
Koncepce DPS je založena na dvouvrstvé desce, kde na jedné straně jsou soustředěny všechny elektronické součástky, zatímco druhá strana obsahuje pouze konektory pro propojení s nadřazeným systémem a tenzometrickým snímačem. Všechny použité konektory jsou typu S4B-ZR-SMXA-TF, což odpovídá definovaným požadavkům na připojení. Konektory J1 a J2, umístěné na jedné straně desky, slouží pro připojení nadřazeného systému prostřednictvím rozhraní RS485. Tyto konektory zprostředkovávají signály RS485-A, RS485-B, VBUS (napájecí napětí) a GND. Pro zjednodušení správného zapojení v komunikačním řetězci RS485 jsou konektory doplněny směrovými šipkami s označením IN a OUT. Horní strana desky obsahuje výhradně součástky v provedení SMD (*Surface Mount Device*). Součástí návrhu jsou také testovací body realizované jako měděné plošky připojené k napájecím větvím a klíčovým signálovým cestám, které slouží pro diagnostické měření a testování funkčnosti DPS. Pasivní komponenty (rezistory, kondenzátory a cívky) byly zvoleny v pouzdrech 0603 a 0402. Velikost těchto pouzder není z hlediska montáže kritická, jelikož většina součástek s výjimkou větších integrovaných obvodů (převodník, mikroprocesor a transceiver) je osazována již při výrobě firmou JCLPCB, která nabízí osazení základních součástek za minimální poplatek. Pro účely programování a ladění je na desce vyhrazena oblast s šesti měděnými ploškami, ke kterým se připojuje debugger prostřednictvím pružných pinů.

Při rozmístování součástek byl kladen důraz na dodržení doporučených návrhových vzorů z datových listů jednotlivých komponent. Zapojení všech prvků respektuje layout specifikovaný výrobcem. Vzhledem k přítomnosti AD převodníku v obvodu byla věnována zvláštní pozornost jeho zapojení, aby byla zajištěna optimální citlivost měření a minimalizováno vzájemné rušení mezi analogovou a digitální částí obvodu.

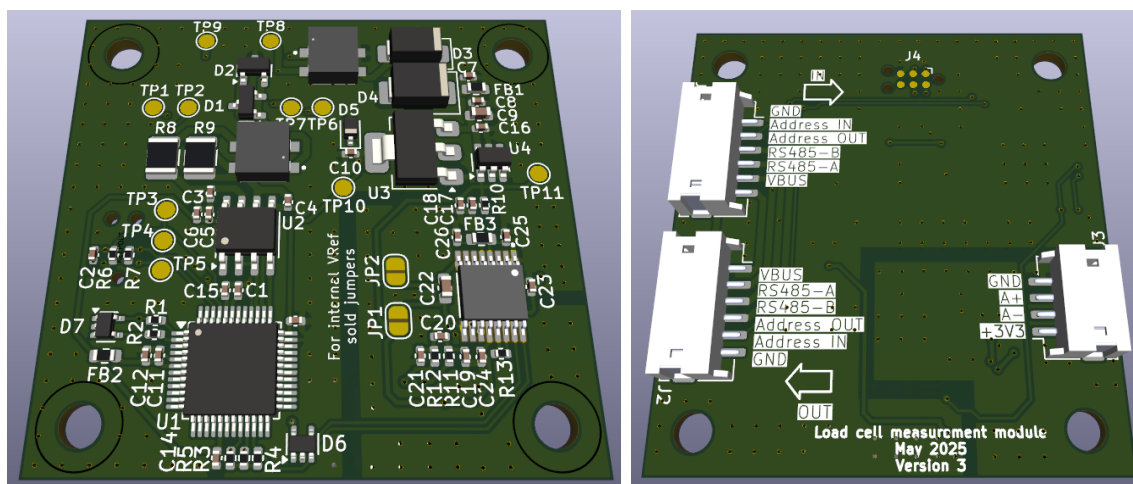
Návrh prošel třemi vývojovými verzemi. První verze měla rozměry 45×50 mm. Druhá verze byla vytvořena z důvodu optimalizace propojení analogové a digitální země. V původním návrhu byl použit tzv. Net tie z knihovny součástek KiCadu, realizující jednobodové spojení zemí přímo pod převodníkem. Pro zvýšení přesnosti byl ve druhé verzi Net tie nahrazen feritovým korálkem s kondenzátory, což zajistilo efektivnější potlačení šumu a rušení. V ostatních aspektech se první a druhá verze shodují. Na obrázku 7.1 je zobrazen 3D model horní strany 2. verze DPS, dolní strana

je zobrazena až k finální verzi, protože dolní strana zůstala ve většině neměnná. 3D vizualizace byla vytvořena v programu KiCad. Vzhledem k nevyužitému prostoru na desce o rozměrech 45×50 mm byla navržena třetí verze s optimalizovaným rozmístěním součástek, což vedlo ke zmenšení rozměrů na 43×40 mm.

Třetí verze je zobrazena na obrázku 7.2. Export DPS do PDF je příložen v příloze A.2. Kompletní projektové soubory obou verzí desek vytvořené v programu KiCad a schémata zapojení jsou přílohy v elektronické příloze B.



Obr. 7.1: 3D zobrazení DPS verze 2



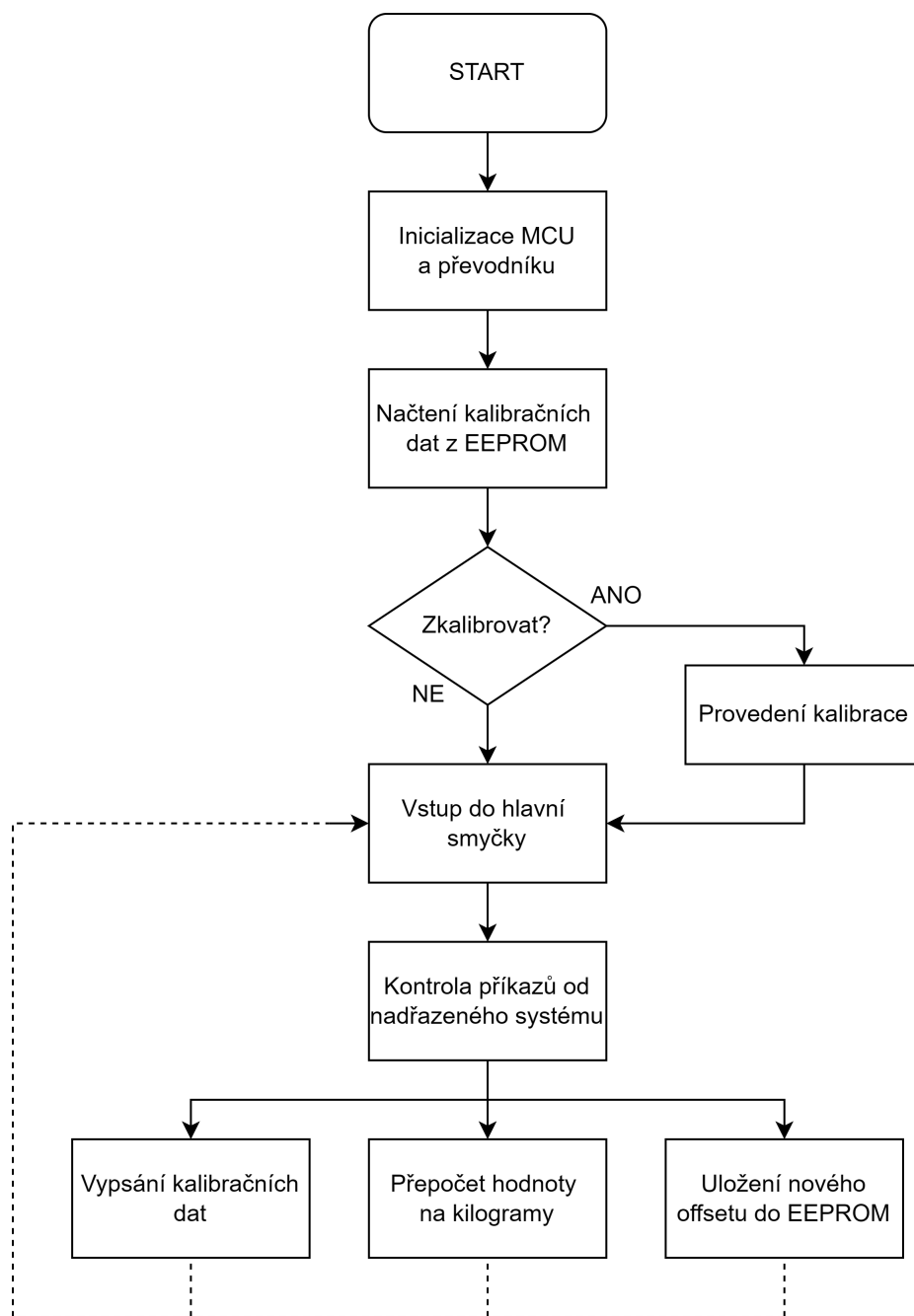
Obr. 7.2: 3D zobrazení DPS verze 3

8 Návrh firmware řešení pro vyhodnocovací člen

8.1 Vývojové prostředí a použité knihovny

Pro vývoj firmware bude zvolen Microchip Studio, což je integrované vývojové prostředí optimalizované pro vývoj aplikací na mikrokontrolérech Microchip. Vývojové prostředí nabízí kompletní sadu nástrojů pro programování, ladění a testování firmware pro SAMD21G17A-A. K implementaci firmware jsou využity následující knihovny a komponenty:

- ASF (*Advanced Software Framework*) - základní knihovna pro mikrokontroléry SAMD21, poskytující abstrakci hardwarových periférií a jednoduché API pro jejich ovládání
- SERCOM I2C - knihovna pro komunikaci s AD převodníkem ADS122C04 přes rozhraní I2C
- SERCOM UART - knihovna pro implementaci rozhraní RS485 pro komunikaci s nadřazeným systémem
- Vlastní knihovna pro obsluhu tenzometrického snímače a AD převodníku



Obr. 8.1: Vývojový diagram Firmware vyhodnocovacího členu

Závěr

V rámci této diplomové práce byl navržen systém pro měření hmotnosti pacienta ležícího na lůžku. Práce začala analýzou dostupných váhových systémů ve zdravotnictví a teoretickým rozbořením principů měření hmotnosti pomocí různých typů snímačů. Pro experimentální testování byly vybrány dva typy odporových tenzometrických snímačů – FX1901 a FMXD, které reprezentují různé konstrukční vypracování.

Pro testování snímačů byly navrženy a pomocí 3D tisku vyrobeny specializované mechanické přípravky. Experimentální měření se zaměřilo na klíčové parametry ovlivňující přesnost a dlouhodobou stabilitu měření hmotnosti – posun nulového bodu po zatížení, ustálení nulové hodnoty po odlehčení a teplotní závislost výstupního signálu.

Výsledky měření ukázaly, že snímač FMXD vykazuje lepší dlouhodobou stabilitu s přibližně $3\times$ nižším driftem než snímač FX1901, zatímco FX1901 má nižší teplotní závislost. Oba snímače splňovaly parametry deklarované výrobcem a prokázaly potenciál pro využití v navrhovaném systému.

Na základě získaných poznatků byl navržen vyhodnocovací člen založený na mikrokontroléru SAMD21G17A-A. Návrh zahrnoval kompletní elektrické schéma a desku plošných spojů s důrazem na přesnost měření, minimalizaci šumu a odolnost proti elektromagnetickému rušení.

Pro softwarovou část byla připravena koncepce řešení v prostředí Microchip Studio, která předpokládá vytvoření knihoven pro komunikaci s AD převodníkem, algoritmů pro kalibraci a filtraci signálu, a implementaci komunikačního protokolu pro rozhraní RS485. Navržená softwarová architektura počítá s modularitou pro snadnou rozšiřitelnost a adaptabilitu systému. V rámci práce byl sestaven detailní plán implementace zahrnující ovladače pro hardwarové periferie, zajištění přesného měření a komunikaci s nadřazeným systémem.

Navržený systém má potenciál poskytovat měření hmotnosti s přesností dostatečnou pro klinické účely a splňovat požadavky na stabilitu a spolehlivost pro kontinuální monitorování pacientů. Představuje inovativní řešení, které může významně usnadnit péči o imobilní pacienty a zlepšit efektivitu zdravotnického personálu.

V budoucím rozšíření projektu by bylo vhodné provést dlouhodobé testování v reálném klinickém prostředí a implementovat pokročilejší metody zpracování signálu pro eliminaci vlivu pohybu pacienta. Dále pak rozšířit funkcionalitu o bezdrátové přenosy dat pro snadnější integraci do nemocničních informačních systémů. Dokončení implementace navržené softwarové části bude klíčovým krokem k plné funkčnosti celého systému.

Literatura

- [1] ZDRAVOTNICKÝ DŮM. Postelová váha M 950. online. Dostupné z: <<https://www.zdravotnickydum.cz/postelova-vaha-m-950/>>. [cit. 2025-01-02].
- [2] ELEKTRONICKÉ VÁHY RADWAG. Lůžková váha C315.8B.300.C-1. Online. Dostupné z: <<https://www.radwag.cz/luzkova-vaha-c315-8b-300-c-1>>. [cit. 2025-01-02].
- [3] IMEDICAL. Nemocniční postel NANO ICU – s váhou. Online. Dostupné z:<<https://imedical.cz/produkt/nemocnicni-postel-nano-icu-s-vahou/>>. [cit. 2025-01-02].
- [4] ĎAĎO, S.; KREIDL, M. Senzory a měřící obvody. Praha 6 : ČVUT, 1999. 315 s. ISBN 80-01-02057-6
- [5] Měření tlaku. Online. UPRT.VSCHT.CZ. Ústav počítačové a řídicí techniky. 2013. Dostupné z: <<https://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/f4/f4k42-tlak.htm#k4243>>. [cit. 2025-01-02].
- [6] HOFFMANN, Karl. An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges. Online. Dostupné z: <https://www.kk-group.ru/help/Strain_Gauge_Measurements_Book_2012_01.pdf>. [cit. 2025-01-02].
- [7] FX1901-0001-0200-L Footprints and Models. Online. DigiKey. Dostupné z: <<https://www.digikey.cz/en/models/5277314>>. [cit. 2025-01-07].
- [8] KABEER, Ahmed. Low profile compression load cell 1kN Ultra thin weight sensor 100kg. Online. GrabCAD. 2022. Dostupné z: <<https://grabcad.com/library/low-profile-compression-load-cell-1kn-ultra-thin-weight-sensor-100kg-1>>. [cit. 2025-05-12].
- [9] TE CONNECTIVITY. FX1901-0001-0200-L. Online. Dostupné z:<<https://www.te.com/en/product-FX1901-0001-0200-L.html>>. [cit. 2025-01-02].
- [10] FORSENTEK. Low profile compression load cell 100N 300N 500N Ultra thin force sensor. Online. Dostupné z:<<https://www.forsensor.com/sale-13222804-low-profile-compression-load-cell-100n-300n-500n-ultra-thin-force-sensor.html>>. [cit. 2025-01-02].
- [11] 5 to 50KG full bridge pressure sensor. Online. Alibaba. Dostupné z: <https://www.alibaba.com/product-detail/5-to-50KG-full-bridge-pressure_1600461315643.html>. [cit. 2025-05-18].

- [12] SENSIRION. Senzor teploty a vlhkosti vzduchu SHT31. Online. Laskakit. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/user/related_files/sht3x.pdf> [cit. 2025-05-12].
- [13] Senzor teploty a vlhkosti vzduchu SHT31. Online. Laskakit. Dostupné z: <<https://www.laskakit.cz/senzor-teploty-a-vlhkosti-vzduchu-sht31/>>. [cit. 2025-05-18].
- [14] ECLIPSE S.R.O. AD převodník 24-bit 2 kanály HX711. Online. In: Drátek.cz. 2016. Dostupné z:<<https://dratek.cz/docs/produkty/0/31/1427807780.pdf>>. [cit. 2025-01-02].
- [15] HX711 - zesilovač pro tenzometrický paprsek. Online. Botland. 2025. Dostupné z:<<https://botland.cz/senzory-tlaku/12479-hx711-zesilovac-pro-tenzometricky-paprsek-5904422319366.html>>. [cit. 2025-01-02].
- [16] NUVOTON CONFIDENTIAL. Data Sheet NAU780x. Online. Nuvoton. Dostupné z:<<https://www.nuvoton.com/resource-files/NAU7802%20Data%20Sheet%20V1.7.pdf>>. [cit. 2025-01-02].
- [17] Modul snímače zatížení. Online. Botland. Dostupné z: <<https://botland.cz/senzory-tlaku/21578-modul-snimace-zatizeni-s-adc-24bitovym-prevodnikem-nau7802-stemma-qt-qwiic-adafruit-4538.html>>. [cit. 2025-01-02].
- [18] ARDUINO. Arduino® Nano. Online. Arduino Documentation. 2025-01-02. Dostupné z:<<https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>>. [cit. 2025-01-02].
- [19] ARDUINO. Arduino Nano. Online. Arduino store. Dostupné z:<<https://store.arduino.cc/en-cz/products/arduino-nano>>. [cit. 2025-01-05].
- [20] IoT ESP-WROOM-32 2.4GHz Dual-Mode WiFi+Bluetooth rev.1, CP2102. Online. Laskakit. Dostupné z: <<https://www.laskakit.cz/iot-esp-32s-2-4ghz-dual-mode-wifi-bluetooth-rev-1--cp2102/>>. [cit. 2025-05-12].
- [21] Software NX CAD. Online. Siemens. Dostupné z:<<https://plm.sw.siemens.com/cs-CZ/nx/cad-online/>>. [cit. 2025-01-05].
- [22] AMS1117 1A LOW DROPOUT VOLTAGE REGULATOR. Online. Advanced Monolithic Systems, Inc. Dostupné z: <<http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>>. [cit. 2025-05-19].

- [23] MCP1501 High-Precision Buffered Voltage Reference. Online. Microchip. 2024. Dostupné z: <<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/MCP1501-Data-Sheet-DS20005474.pdf>>. [cit. 2025-05-19].
- [24] SAM D21/DA1 Family Low-Power, 32-bit Cortex-M0+ MCU with Advanced Analog and PWM. Online. Microchip. 2021. Dostupné z: <<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU32/ProductDocuments/DataSheets/SAM-D21-DA1-Family-Data-Sheet-DS40001882H.pdf>>. [cit. 2025-05-19].
- [25] SP3485 3.3V Low Power Half-Duplex RS-485 Transceiver with 10Mbps Data Rate. Online. MaxLinear. 2021. Dostupné z: <<https://www.maxlinear.com/product/interface/serial-transceivers/rs-485-rs-422/sp3485>>. [cit. 2025-05-19].
- [26] ADS122C04 24-Bit, 4-Channel, 2-kSPS, Delta-Sigma ADC With I²C Interface. Online. Texas Instruments. 2017, 2018. Dostupné z: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads122c04.pdf>>. [cit. 2025-05-19].

Seznam symbolů a zkratek

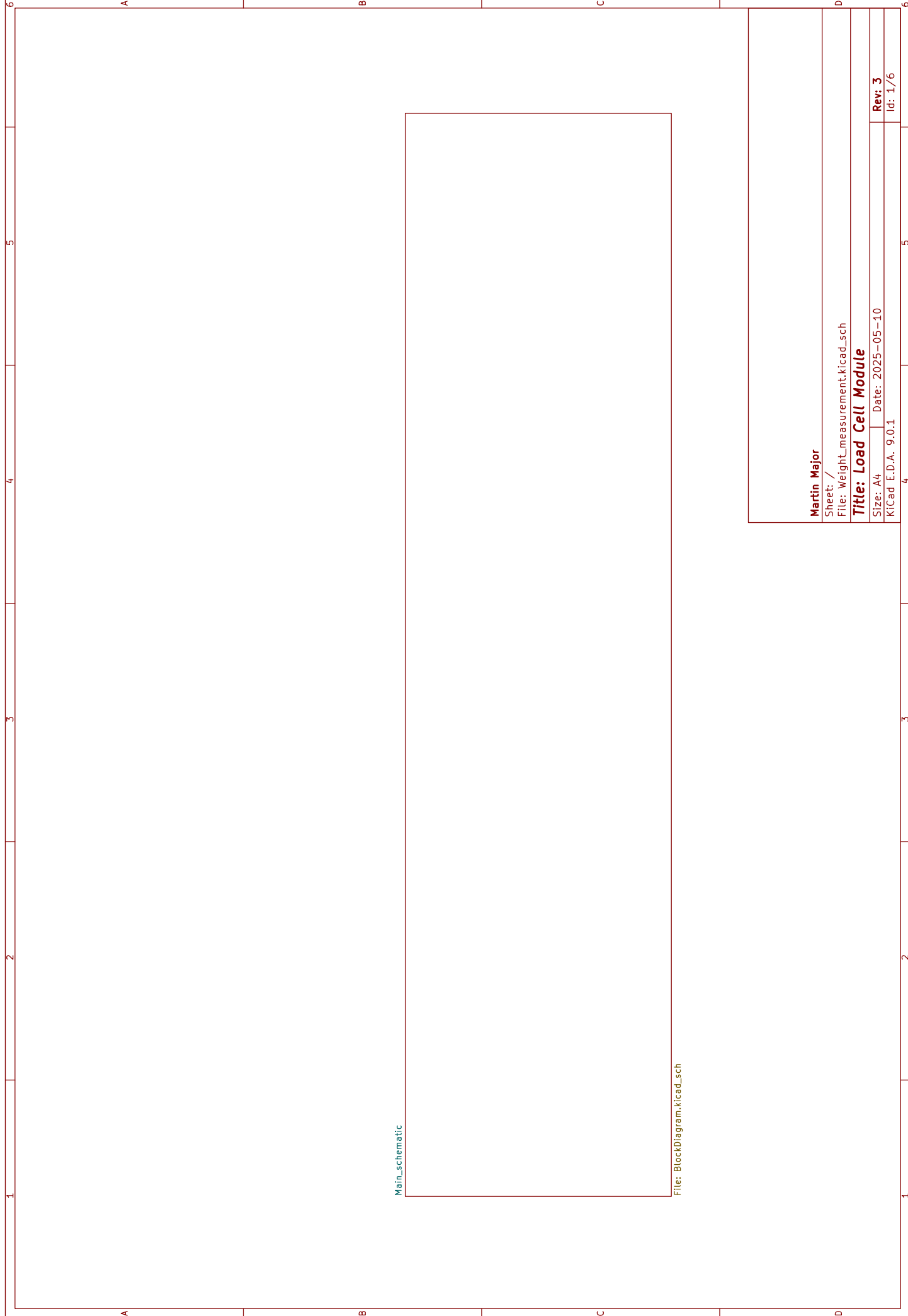
USB	Universal serial bus - komunikační rozhraní
Wi-Fi	Wireless fidelity
AD	Analog-Digital
PC	Personal computer - osobní počítač
I2C	Inter-Integrated Circuit - komunikační sběrnice
CSV	(Comma-Separated Values) - soubor typu excel
MCU	Microcontroller unit - Mikrokontrolér
lbf	pound-force - liber síly
PGA	Programmable Gain Amplifier - Programovatelný zesilovač
SRAM	Static Random Access Memory - typ počítačové paměti
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory - typ počítačové paměti
SPI	Serial Peripheral Interface - synchronní sériové komunikační rozhraní
DPS	Deska plošných spojů
SERCOM	Serial Communication

Seznam příloh

A Elektronický systém pro vyhodnocovací člen	70
A.1 Elektronické schéma	70
A.2 Deska plošných spojů	77
B Obsah přiloženého CD	81
B.1 Vytvořené modely přípravků v prostředí Siemens NX	81
B.2 Vypracované Matlab programy pro analýzu měření	81
B.3 Kompletní soubory vypracované v programu KiCad	81
B.4 Využité kódy	81

A Elektronický systém pro vyhodnocovací člen

A.1 Elektronické schéma



Main_schematic

File: BlockDiagram.kicad_sch

Martin Major

Sheet: /

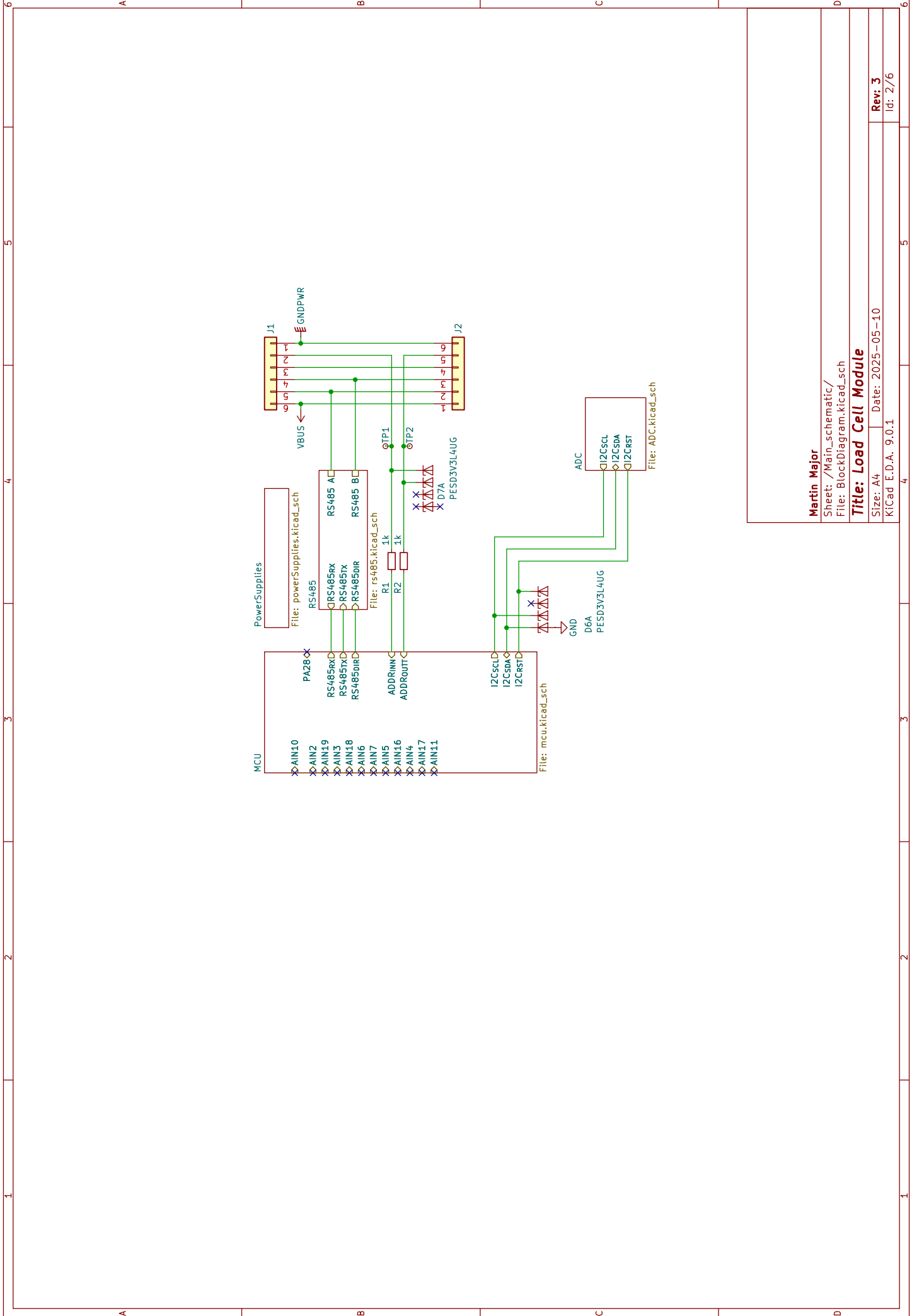
File: Weight_measurement.kicad_sch

Title: Load Cell Module

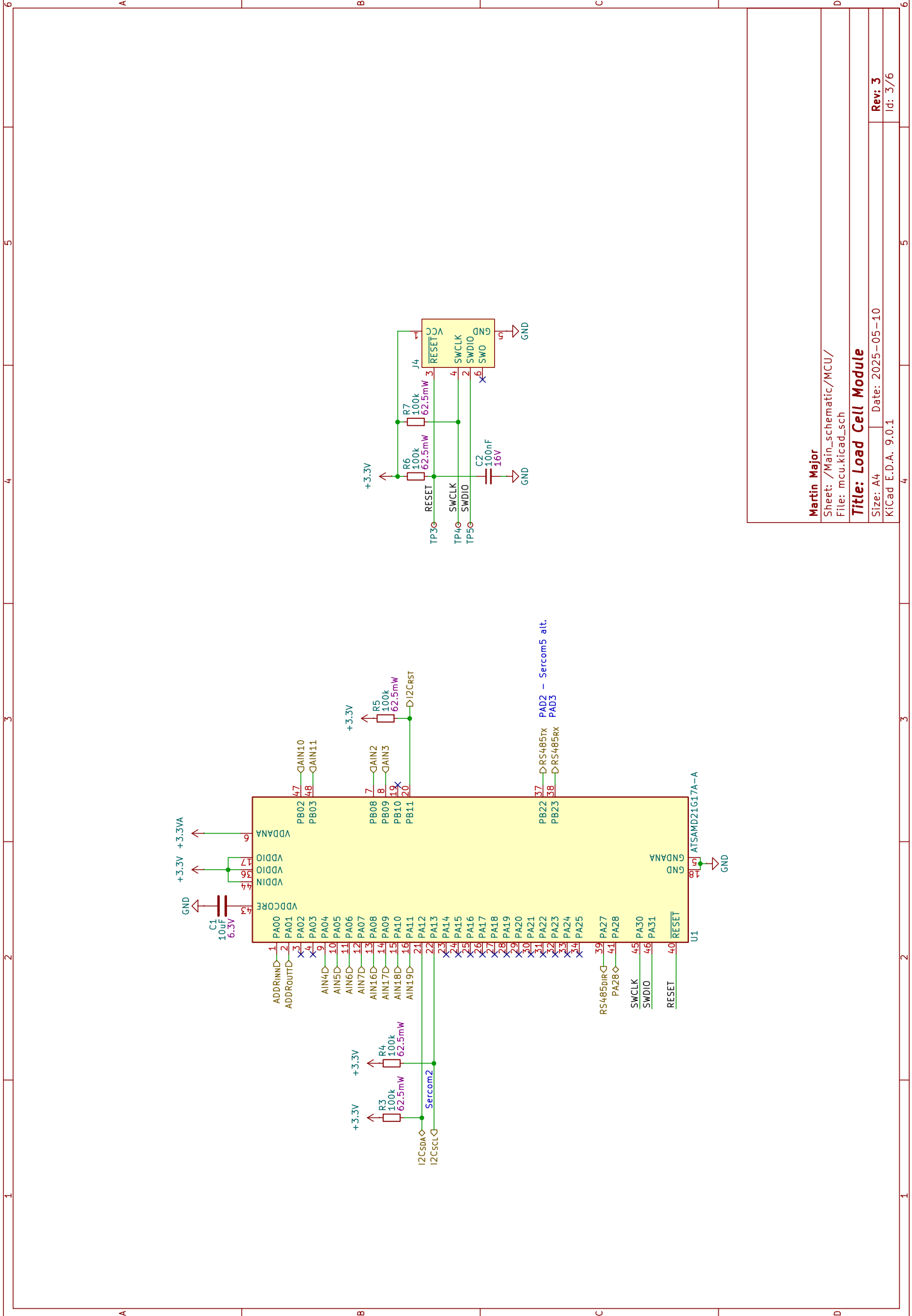
Size: A4 | Date: 2025-05-10

KiCad: E.D.A. 9.0.1

Rev: 3 | Id: 1/6



Martin Major
 Sheet: /Main_schematic/
 File: BlockDiagram.kicad_sch
Title: Load Cell Module
 Size: A4 | Date: 2025-05-10
 KICad: E.D.A. 9.0.1



Martin Major

Sheet: /Main_schematic/MCU/
File: mcu.kicad_sch

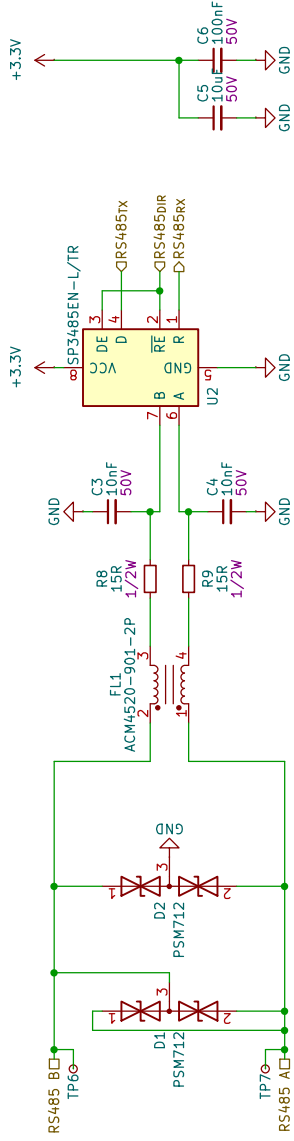
Title: Load Cell Module

Size: A4 | Date: 2025-05-10
KiCad: E.D.A. 9.0.1

Rev: 3
Id: 3/6

RS485 Interface

Input EMC & ESD
Input signal filter
 $F_{3dB} = 1 \text{ MHz}$
Fast transient = 2kV, 5/50ns, 40 A via TVS



Martin Major

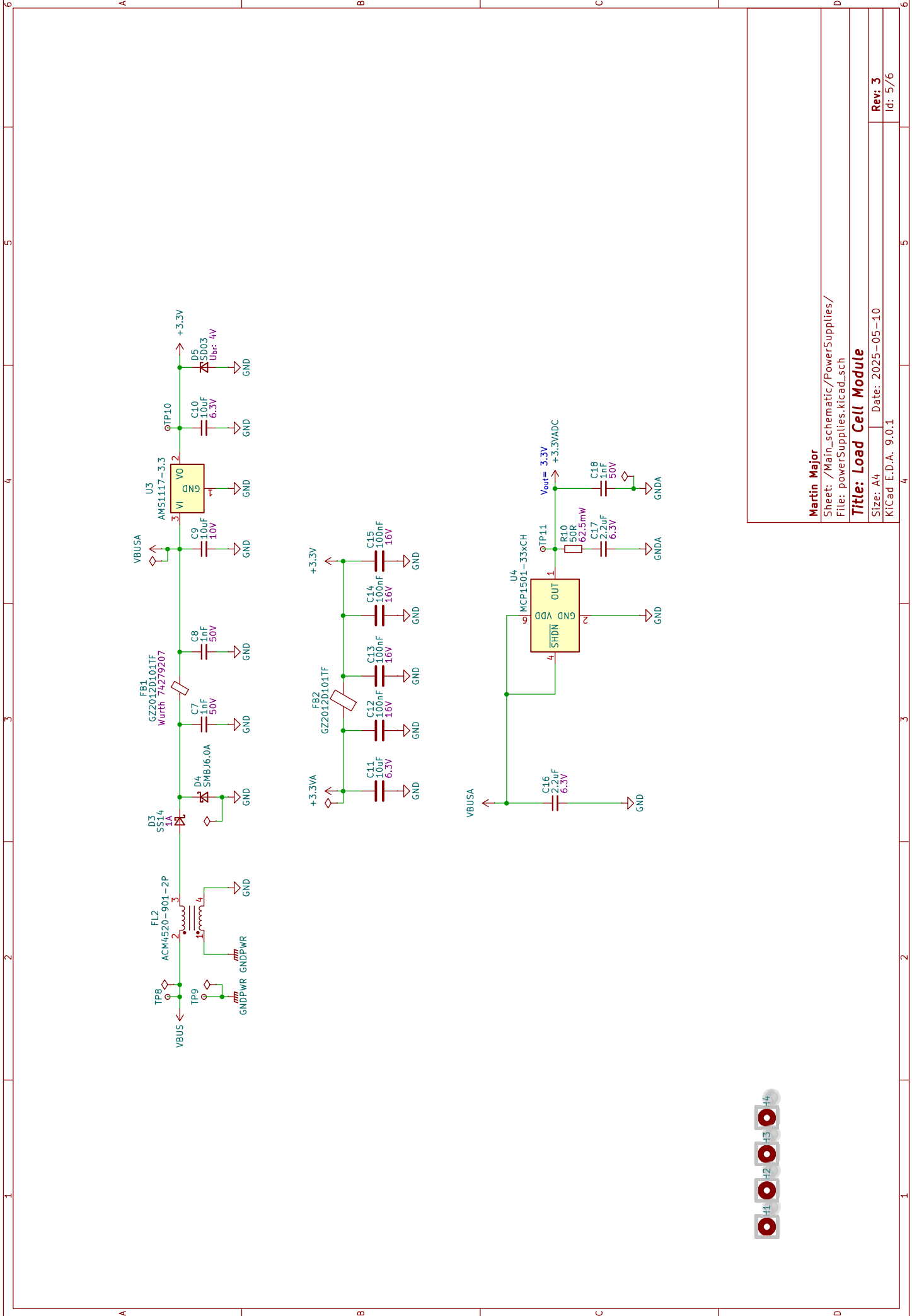
Sheet: /Main_schematic/RS485/
File: rs485.kicad_sch

Title: Load Cell Module

Size: A4 Date: 2025-05-10

KiCad E.D.A. 9.0.1

Rev: 3
Id: 4/6



Martin Major

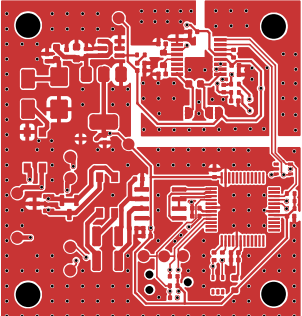
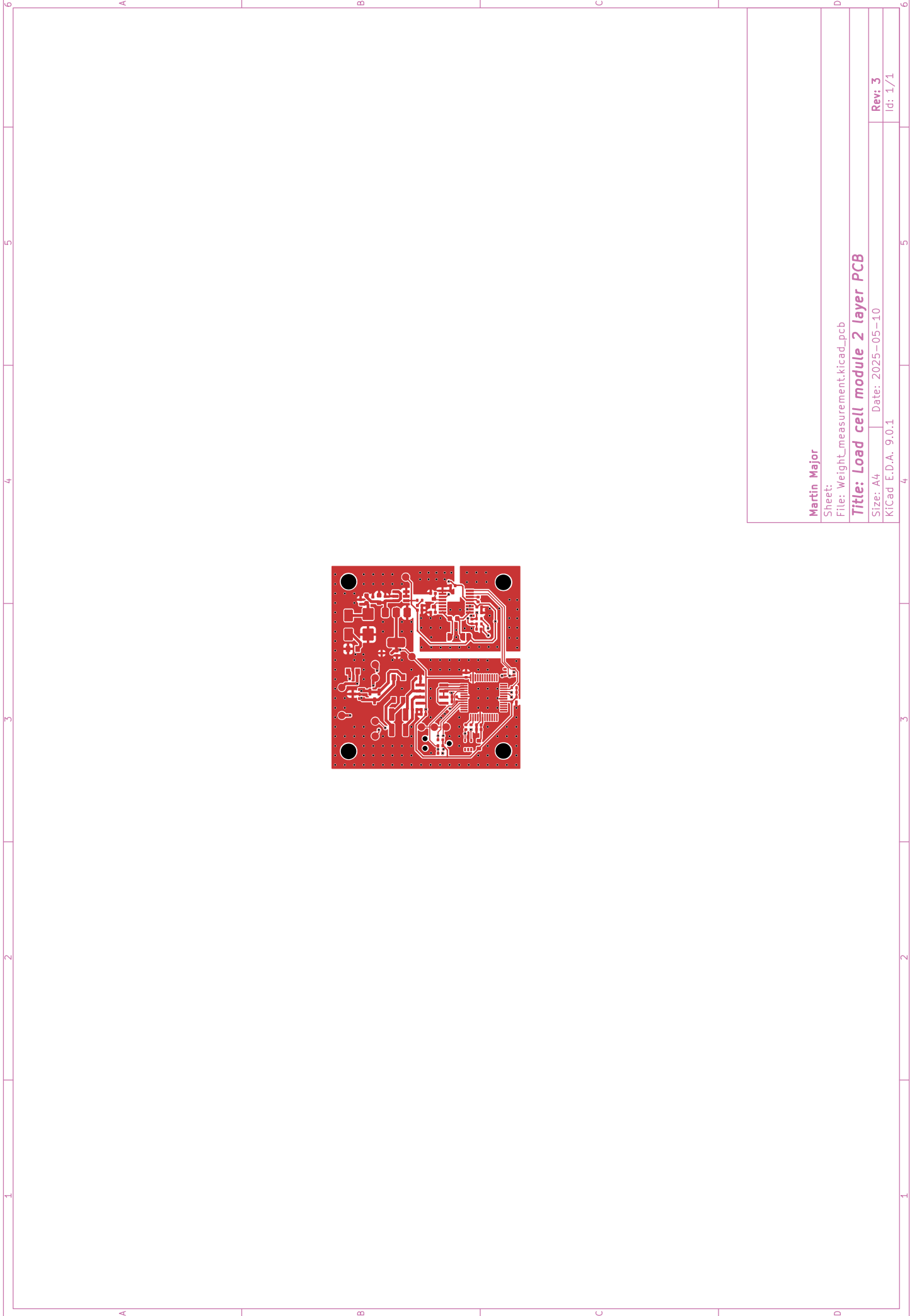
Sheet: /Main_schematic/PowerSupplies/
File: powerSupplies.kicad_sch

Title: Load Cell Module

Size: A4 | Date: 2025-05-10
KiCad: E.D.A. 9.0.1

Rev: 3
Id: 5/6

A.2 Deska plošných spojů



Martin Major

Sheet:

File: Weight_measurement.kicad_pcb

Title: Load cell module 2 layer PCB

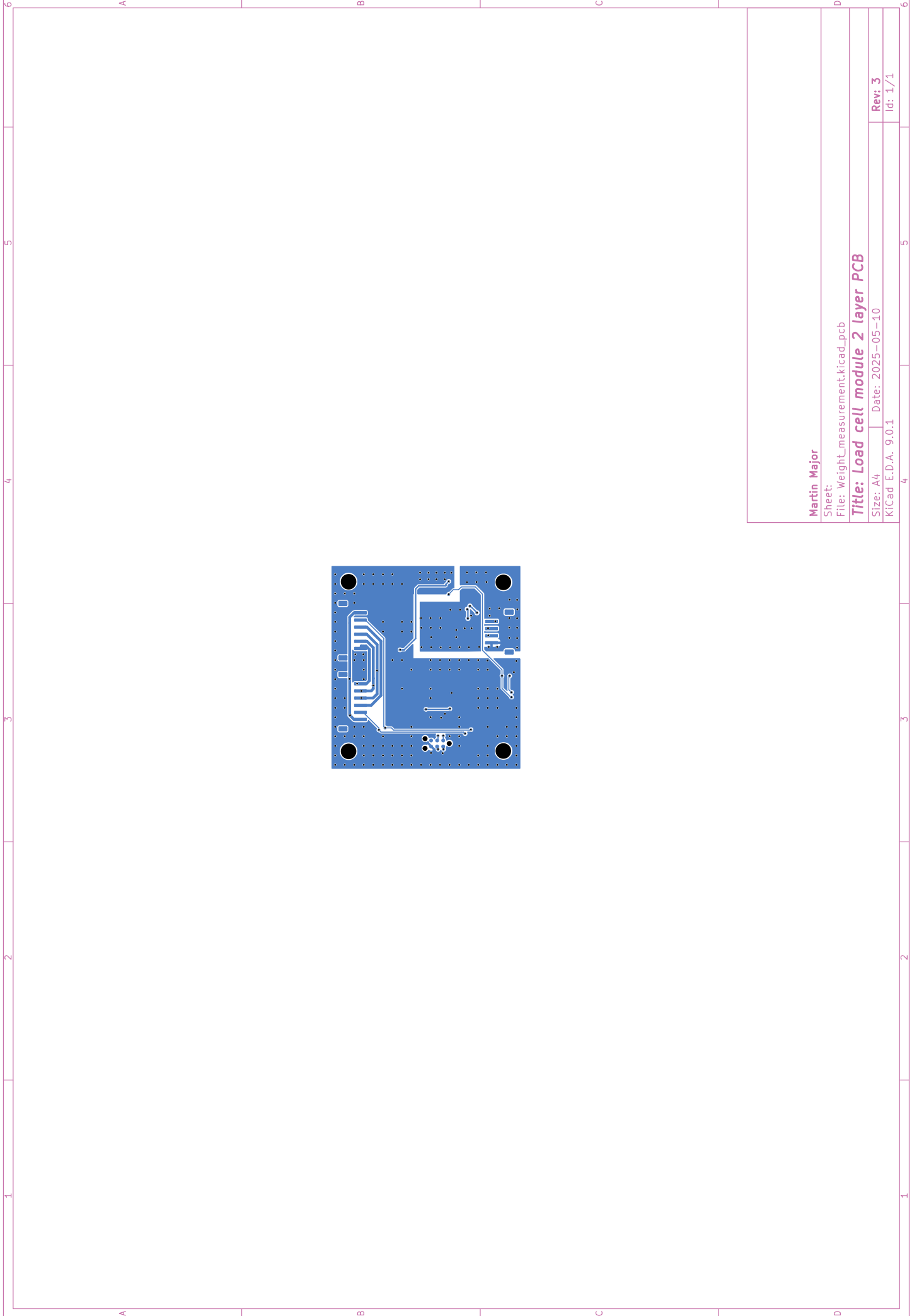
Size: A4

Date: 2025-05-10

KiCad: E.D.A. 9.0.1

Rev: 3

Id: 1/1



Martin Major

Sheet:

File: Weight_measurement.kicad_pcb

Title: Load cell module 2 layer PCB

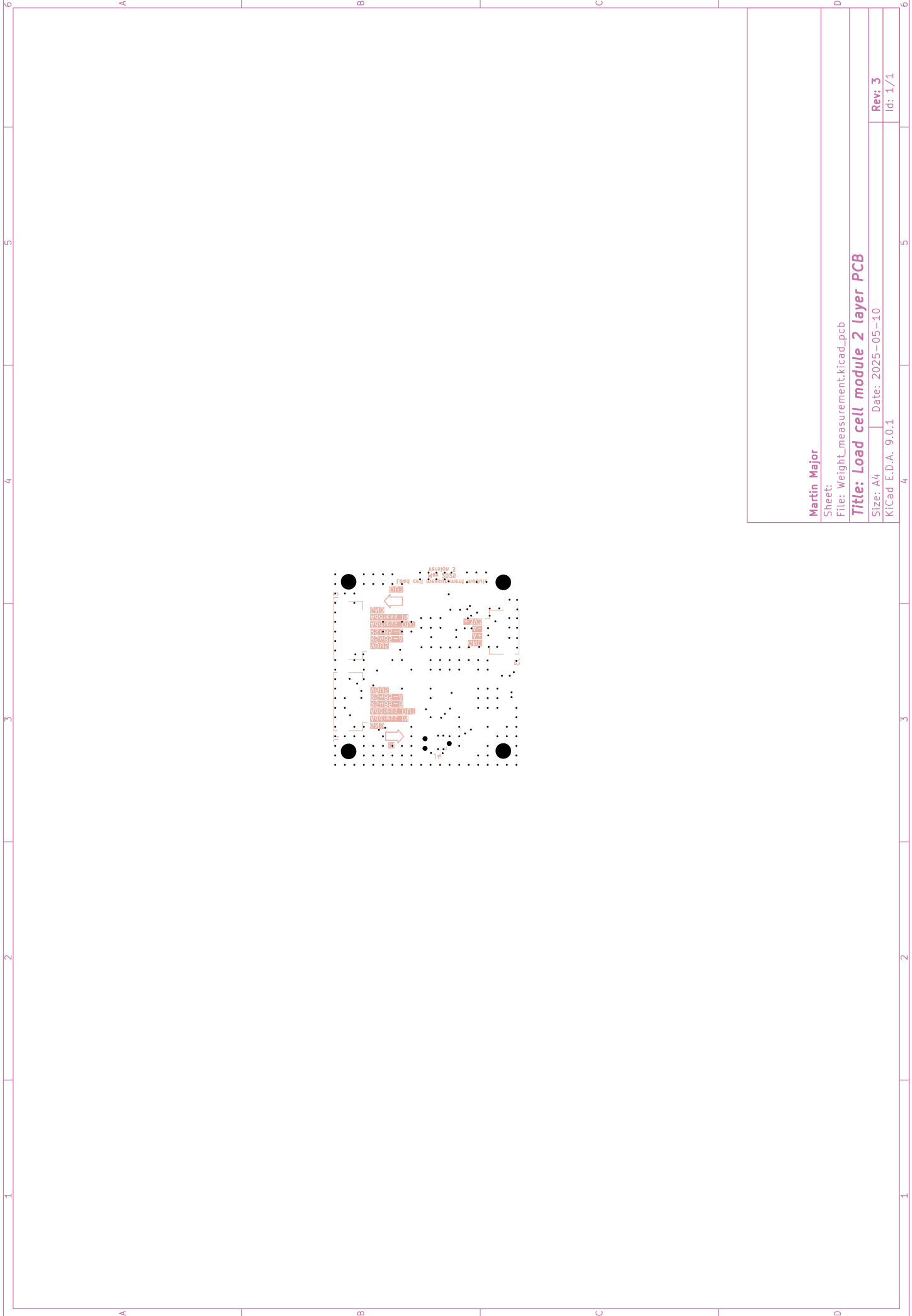
Size: A4

Date: 2025-05-10

Rev: 3

Id: 1/1

KiCad: E.D.A. 9.0.1



Martin Major

Sheet:

File: Weight_measurement.kicad_pcb

Title: Load cell module 2 layer PCB

Size: A4

Date: 2025-05-10

KiCad: E.D.A. 9.0.1

Rev: 3

Id: 1/1

B Obsah příloženého CD

Na příloženém CD se nachází složky s obsahem popsaným níže, ale také datasheety použitých součástek a elektronická verze práce.

B.1 Vytvořené modely přípravků v prostředí Siemens NX

Zde jsou přiloženy soubory modelů pro oba přípravky využité pro měřicí stanici. Modely byly vytvořeny v programu Siemens NX, a jsou uloženy ve složce NX_modely

B.2 Vypracované Matlab programy pro analýzu měření

Zde se nachází vypracované Matlab skripty pro vykreslování potřebných průběhů a uložená naměřená data. Skripty byly vypracovány ve verzi 2023b, a jsou uloženy ve složce Matlab.

B.3 Kompletní soubory vypracované v programu KiCad

Obsahuje kompletní elektrické zapojení a desky plošných spojů pro obě verze DPS. Soubory se nacházejí ve složce KiCad_SCHEMA_PCB. Schéma a DPS jsou vytvořeny v programu KiCad verze 9.0.1.

B.4 Využité kódy

Využité a vytvořené kódy pro ESP32, Arduino NANO a Visual Studio se nacházejí ve složce Kódy.