

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

PŘÍPRAVEK ZÁSOBNÍKU REGOLITU PRO MARSOVSKÝ ROVER

MARS REGOLIT STORAGE KIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vilém Strachoň

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Adam Ligocki, Ph.D.

BRNO 2025



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Vilém Strachon

ID: 247472

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Přípravek zásobníku regolitu pro marsovský rover

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit zařízení pro uložení a vážení odvrtných vzorků horniny na marsovském roveru pro soutěž European Rover Challenge (ERC).

- Nastudujte problematiku soutěžní úlohy uložení a vážení vzorků.
- Navrhněte konstrukci a elektrické zapojení přípravku a fyzicky jej realizujte.
- Navrhněte protokol pro komunikaci s nadřazeným systémem.
- Vytvořte program pro mikroprocesor, který na základě příkazů z nadřazeného systému bude ovládat testovací soustavu.
- Přípravek v praxi otestujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Twomey, J., 2023. Applied Embedded Electronics (2023). O'Reilly Media, Inc. 500s. ISBN: 9781098144791.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 28.5.2025

Vedoucí práce: Ing. Adam Ligocki, Ph.D.

Ing. Miroslav Jirgl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací zásobníku pro uskladnění a vážení sypkého regolitu pro Mars rover. Práce se po analýze požadavků soutěže ERC zabývá návrhem vlastního zásobníku, od návrhu jednotlivých součástí z 3D tiskárny přes volbu elektrických součástí (jako krokový motor nebo váhový senzor), k jejich zapojení a následnému návrhu desky plošného spoje. Následuje popis kódu se způsobem komunikace s nadřazeným mikropočítačem roveru a komunikace s uživatelem, poslední část je věnována měření komponent přípravku

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, zásobník sypkého materiálu, vážení, tenzometr, váhový senzor, krokový motor, DPS, Arduino, Mars rover

ABSTRACT

The semester thesis deals with the design and implementation of a storage and weighing tank for bulk regolith for the Mars rover. The thesis, after analyzing the requirements of the ERC competition, deals with the design of the tray itself, from the design of the individual components from the 3D printer to the choice of electrical components (such as stepper motor or strain gauge), to their wiring and subsequent design of the circuit board. This is followed by a description of the code with the way it communicates with the rover's parent microcomputer and the communication with the user, and the last part is devoted to the measurement of the products's components.

KEYWORDS

3D printing, bulk material container, weighing, strain gauge, weight sensor, stepper motor, PCB, Arduino, Mars rover

STRACHOŇ, Vilém. *Přípravek zásobníku regolitu pro Marsovský rover*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2025. Vedoucí práce: Ing. Adam Ligocki, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Vilém Strachoň
VUT ID autora: 247472
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: Přípravek zásobníku regolitu pro Marsovský rover

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 bakalářské práce panu Ing. Adamu Ligockému, Ph.D. za odborné vedení a konzultace, dále bych chtěl poděkovat členům Brno Mars Rover týmu, za rady a trpělivé testování inovací.

Obsah

Úvod	12
1 Problematika soutěžní úlohy	13
1.1 Analýza skladování vzorků	13
1.1.1 Zadání	13
1.1.2 Analýza vážení vzorků	14
1.1.3 Konstrukce zásobníku	14
2 Konstrukce a elektrické zapojení	16
2.1 Návrh mechanických součástí	16
2.2 Volba elektrických součástí	19
2.2.1 Krokový motor	19
2.2.2 Driver krokového motoru	21
2.2.3 Váhový senzor	21
2.2.4 Váhový snímač typu Single Point	22
2.2.5 Hallův senzor	27
2.2.6 Mikroprocesor	28
2.3 Návrh elektrického zapojení	28
2.3.1 Schéma zapojení	28
2.3.2 Deska plošného spoje	31
3 Komunikace s nadřazeným systémem	34
3.1 I2C	34
3.2 Přijímané a odesílané zprávy	34
3.2.1 I2C - Weight	35
3.2.2 I2C - Message	35
4 Program pro mikroprocesor	37
4.1 Způsoby ovládání	37
4.1.1 Manuální ovládání	37
4.1.2 Ovládání po komunikaci	37
4.2 Implementované funkce	37
4.2.1 Vážení	38
4.2.2 Pohyb motoru a zpětná vazba	38
4.2.3 Způsob komunikace	39
4.3 Stavový automat	40

5 Testování a měření výrobku	41
5.1 Vážení	41
5.1.1 Verze s dvěma váhovými senzory	41
5.1.2 Verze s jedním váhovým senzorem	43
5.2 Měření motoru	46
5.3 Manuální ovládání	47
5.4 Spotřeba komponent výrobku	47
Závěr	49
Literatura	51
Seznam příloh	54
A Schémata elektrického zapojení	55
A.1 Deska plošného spoje	55
A.1.1 Schéma	55
A.1.2 Deska Plošného Spoje	58
A.2 Pozice těla zásobníku	59
A.3 Vážení	59
A.4 Měření	63
B Obsah elektronické přílohy	65

Seznam obrázků

1.1	Zapojení dvou tenzometrů k desce HX711	14
2.1	Tělo zásobníku regolitu	16
2.2	Kalíšek na uskladnění regolitu	17
2.3	Držák motoru a Hallova senzoru, pro dva váhové senzory	18
2.4	Držák motoru a Hallova senzoru, pro jeden váhový senzor	18
2.5	Model kompletního vrtacího přípravku zepředu a z boku [15]	18
2.6	Navinutí cívek krokového motoru [8]	20
2.7	Průběhy napětí při řízení Full step a Half step [8]	20
2.8	Rozložení pinů driveru A4988 [10]	21
2.9	Základní princip tenzometrického snímače [11]	22
2.10	Konstrukce a rozložení tenzometrů na váhovém senzoru [19]	24
2.11	Polarizace použitého magnetu [12]	27
2.12	Funkce Transilu při špičce napájecího napětí [13]	29
2.13	Zapojení tlačítek	30
2.14	Vstupní piny do Hallova senzoru	31
2.15	Osazená deska plošného spoje	32
2.16	Vzhled zásobníku během testování	33
2.17	Vzhled finálního zásobníku	33
4.1	Obrázek stavového automatu	40
5.1	Zatížení měřených kanálů v závislosti na otočení	42
5.2	Změřená hmotnost 100 g pomocí váhového senzoru YZC-131 3 kg	43
5.3	Změřená hmotnost 100 g pomocí váhového senzoru Tedeo-Huntleigh 1042 3 kg	44
5.4	Změřená hmotnost 400 g pomocí váhového senzoru Tedeo-Huntleigh 1042 3 kg	45
5.5	Změřená analogová hladina hallového snímače při otočení o 90°	47
5.6	Simulace odstrčitelného objektu v cestě pro otáčení motoru	47
5.7	Pokles o 70,7 % maximální hodnoty na vstupu digitálního pinu	48
A.1	Schéma zapojení arduina	55
A.2	Schéma zapojení driveru	56
A.3	Schéma zapojení převodníku	56
A.4	Schéma zapojení napájení a ochran	57
A.5	Deska plošného spoje Front	58
A.6	Deska plošného spoje Back	58
A.7	Vyznačení pozic zásobníku	59
A.8	Relativní odchylka měření dvou váhových senzorů YZC-131 3 kg	59
A.9	Odchylka senzoru Tedeo-Huntleigh vůči aproximující přímce	60

A.10 Změřená analogová hladina Hallového snímače při otočení o 360°, konstantní rychlost	63
A.11 Simulace objektu v cestě pro otáčení motoru, konstantní rychlost . . .	63
A.12 Změřená analogová hladina hallového snímače při otočení o 360° . . .	64
A.13 Simulace nepřekročitelného objektu v cestě otáčení motoru s návra- tem na původní pozici	64

Seznam tabulek

2.1	Přehled měření ADC a odchylek	26
3.1	Tabulka přijímaných příkazů	35
3.2	Tabulka odesílatelných informací	35
5.1	Hmotnosti jednotlivých komponent	41
5.2	Spotřeby komponent	48
A.1	Naměřené hodnoty z převodníku s přepočtem na váhu při měření dvou váhových senzorů	60
A.2	Přehled měření hmotnosti při různém natočení zásobníku	61
A.3	Přehled měření hmotnosti váhy A při různém natočení zásobníku . . .	62

Úvod

Zásobník regolitu je navrhován na soutěž European Rover Challenge, jde mezinárodní soutěž vysokých škol ve stavbě roveru. Na soutěž je přihlášena skupina na VUT Brno Mars Rover, ve které je zásobník navrhován. Soutěž má několik částí, jednou z nich je Science Task, která se týká odběru vzorků z povrchu Marsu a jejich následného uskladnění v roveru. Na tento Task je zásobník navrhován.

Regolit do něj musí být vysypán v místě za torzem Roveru pod půdním vrtákem, následně musí být zásobník se vzorkem schován na bezpečné místo kvůli kontaminaci vzorku, a také aby nepřekážel v konání dalších úkolů soutěže. Celý zásobník lze zvážit pro zjištění objemu uloženého písku. Veškerá komunikace s roverem je provedena přes I2C sběrnici, po které přichází příkazy a na vyžádání odcházejí informace o stavu zásobníku, jako váha uložených vzorků, aktivní slot nebo chybové hlášky.

Výrobek je navržen pro potřeby studentského spolku VUT Brno Mars Rover, návrh je součástí vrtacího přípravku spolu se subsystémem lineárního pojezdu, subsystémem vrtáku a subsystémem nadřazeného mikroprocesoru, který řídí algoritmus vrtání.

První kapitola je věnována konceptům vzhledu - způsobu funkce zásobníku, dále je kapitola o mechanické konstrukci a pro ni navržených součástkách. Součástí je i rozbor použitých elektrických součástek (senzorů, akčních členů a mikročipu). Neméně důležitou částí byla analýza potřebných funkcí zásobníku tzn. otáčení, vážení atd.

Druhá část je o návrhu jednotlivých součástek v programu Fusion 360 a volby jejich vzhledu. Následuje pojednání o využitých elektrických součástkách jako krokový motor a jeho teoretický popis s využitými funkcemi. Je zde vysvětlen způsob měření hmotnosti váhovými senzory a konverze čtených hodnot z ADC na gramy. Dále kapitola vysvětluje návrh zapojení a desku plošného spoje pro uchycení všech zvolených komponentů (např. driver motoru, mikrokontroléru atd.)

Třetí kapitola patří komunikaci s nadřazenou jednotkou Roveru, Je zde popsán způsob předávání všech použitelných informací, ke kterým patří i popis důležitých stavů, mezi které patří aktuální poloha zásobníku nebo změřená váha.

V další kapitole je stručně popsán program pro mikroprocesor s jednotlivými implementovanými funkcemi a tudíž i způsob jakým se získávají z jednotlivých senzorů data. Je ze popsána funkce stavového automatu, který řídí funkce přípravku.

Poslední kapitola náleží měření funkčnosti výrobku. Jsou zde popsána měřená zapojení a zkráceně zhodnocené výsledky měření. Jsou zde popsány výsledky z obou probíraných a konstruovaných způsobů zapojení s jedním a dvěma váhovými senzory, a další měření ověřující funkci navrženého programu.

1 Problematika soutěžní úlohy

1.1 Analýza skladování vzorků

1.1.1 Zadání

a) "Deep sample"regolitu musí být odebrán Roverem, o hmotnosti minimálně 100 g z hloubky až 300 mm

Plné znění v originálu. „Deep sample must be collected by the rover. Both mass (at least 100 g) and depth (>300 mm as a goal) requirements are applicable to assure that scientifically valid samples and enough material are transported back to Earth.“ [2].

Zásobník musí být schopen pojmout 100 g regolitu. Objemová hmotnost regolitu je pohybuje podle lokace od 1000 kg/m³ do 1800 kg/m³ [4] [3], pro výpočet byly zvoleny horší krajní vlastnosti. Z toho lze spočítat, že potřebný celkový prostor zásobníku musí být minimální objem:

$$objem = \frac{\text{hmotnost}}{\text{objemová hustota}} = \frac{100 \text{ g}}{1 \text{ g/cm}^3} = 100 \text{ cm}^3 \quad (1.1)$$

Takto vypočtenou hodnotu nadkoncepěji, pro možnost volby nabrání celého objemu do jednoho slotu zásobníku, nebo pro rozdělení vzorků podle jejich odebrané hloubky. tzn. každý slot zásobníku bude schopný pojmout 100 cm³ regolitu.

b) Sebraný materiál musí být uskladněn ve vozidle a dovezen za cílovou linku.

Plné znění v originálu. „The collected material must be further disposed in the onboard container and transported to the finish line“[2].

Je nutné navrhnout a vytvořit zásobník pro sypký regolit, kdy pro nabrání materiálu se musí slot zásobníku dostat pod nabraný regolit ve vrtáku.

Takto nabraný regolit musí být uskladněn tak, aby nepřekážel dalšímu vrtání a zároveň aby nebylo možné ho omylem (najatím na kámen nebo prudký kopec) vysypat. Jednotlivé sloty zásobníku budou obsazeny odnímatelnými kontejnery pro praktičnost.

c) Váha vzorků musí být změřena systémem v Roveru

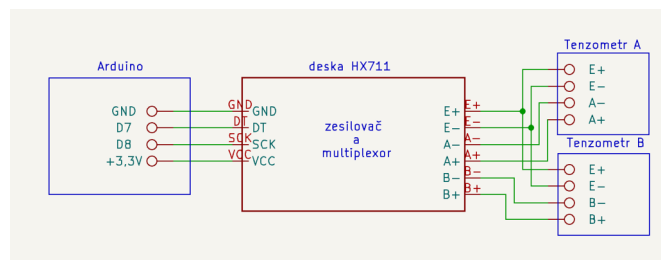
Plné znění v originálu „Weight of the sample must be measured by the onboard system of the rover.“[2]

Další součástí práce je návrh vážícího systému, přesnost měření jsem zvolil podle soutěže na jednotky gramů, celková maximální měřená váha se bude odvíjet od konstrukce zásobníku a místa vložení váhového senzoru.

Pro svou robustnost a stálost za různých podmínek jsem zvolil tenzometrický váhový senzor na hliníkovém profilu.

1.1.2 Analýza vážení vzorků

Protože vážené vzorky budou o hmotnosti od 100 do 400 g, volil jsem nejdříve vážení pomocí dvou váhových senzorů (které obsahují tenzometry) o maximálním zatížením 1 kg každý, to je z důvodu většího rozsahu čtených hodnot a pro robustnost mechanické konstrukce. Tenzometr měří velice malé změny, a i jeho výstup je v řádech milivoltů, je nutné ho zesílit pro snímání mikroprocesorem ATmega. Pro zesílení obou kanálů byla zvolena deska HX711, z důvodu zabudovaných dvou zesilovacích kanálů A a B a jejich jednoduchým přepínáním přes upravenou I2C komunikaci knihovnou HX711.h. Zapojení desky ve verzi dvou váhových senzorů je vidět na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Zapojení dvou tenzometrů k desce HX711

Deska disponuje dvěma kanály, s maximálním zesílením kanálu A 128 a maximálním zesílením kanálu B 32, to vede k nutné úpravě změřených hodnot v programu, i tak byla zvolena možnost ovládat oba zabudované tenzometry přes jednu desku plošného spoje a jednu komunikační linku.

Následně proběhla změna způsobu měření na jediný váhový senzor, ve finálním výrobku je tedy využit pouze kanál A desky HX711.

1.1.3 Konstrukce zásobníku

Sloty zásobníku je nutné schovat před vlivy okolí a zamezit jejich ztracení, proto byl navrhnout zásobník zavěšený na motor, který otáčí zásobníkem na zadanou pozici z mikrokontroléru. Motor se nachází pod torsem roveru. Jednotlivé sloty jsou odnímatelné pomocí bajonetového mechanismu pro zamezení vysypání vzorku v extrémních terénních podmínkách, které se na soutěži ERC mohou vyskytnout.

Slot zásobníku se musí nalézat při nakládání materiálu přímo v ose vrtačky z vrtajícího přípravku, viz obrázek 2.1. Zároveň je nutné příliš neomezit pohybovatelnost Roveru i přes to že se zásobník nachází v oblasti podvozku roveru. Z toho důvodu jsem voleny nízké rozměry zásobníku (podle možností využitých součástek) a následně jsem problém kontaktu zásobníku s kameny nebo jinými předměty na zemi řešil softwarově. Motorem lze volně pohybovat (ustoupit překážce z cesty) a následně po časové prodlevě se vrátí na žádanou pozici když překážka zmizí.

Mechanická konstrukce

Byl navržen tvar zásobníku obr.2.1 do kterého lze umístit 4 kalíšky, s tím že každý jednotlivě je schopný pojmout množství regolitu nutné pro splnění úlohy. Tělo zásobníku je přírubou přichyceno k ose Krokového motoru, ten je přes patici obr.2.4 přichycen k hliníkové jednotce tenzometru. Ten je přichycen k hliníkovému rámu vrtajícího přípravku. Tělo Mars Roveru zamezuje vniku náhodného materiálu ke vzorkům svrchu. Jediný stav kdy je kelímek 2.2 vystaven vnějšímu prostředí je když je mu vydán příkaz pohybu na pozici pod vrtačku. Sestavený zásobník lze vidět na obrázku 2.16.

Volba součástek

Pro otáčení zásobníkem na pozici byl zvolen krokový motor NEMA17 pro své malé rozměry, pro možnost krokování (přesného pohybu na pozici) a pro možnost držení aktuální (absolutní) pozice otočení. K motoru byl zvolen adekvátní budič [9], pro první prototyp byl zvolen A4998 pro svou cenovou dostupnost.

Požadavky na driver byly proud nad 500 mA pro zajištění otočení motoru, pokud mu vstoupí do cesty malá překážka, dalším požadavkem bylo mikrokrokování v poměru 1/8 nebo menším, pro dobrou čitelnost dat přesným Hallovým senzorem [6]. Posledním požadavkem bylo na drivery poměrně nízké napájecí napětí 12 V, z důvodu jednoduchého rozvodu na desce plošného spoje, která přístup k napětí 12 V má.

Z důvodu nutnosti zpětné vazby otáčení motoru byl zvolen Hallův senzor [6] (AS5600). Hlavním důvodem jeho volby, oproti například jednoduše aplikovatelným mechanickým enkodérům, je absolutní charakter jeho měření, přesnost a časová stálost (neopotřebovatelnost). Konkrétní DPS AS5600 byla zvolena z důvodu rychlé implementace a jeho napěťovým výstupem, který jde bez úprav měřit na mikrokontroléru. Jiné desky nebylo možné testovat z důvodu okupace I2C komunikace [7] MASTER programem Mars Roveru, který neustále řídí operace vrtání, skladování, vážení a dalších a čte jejich aktuální stavy.

2 Konstrukce a elektrické zapojení

Kapitola o konceptech a realizaci přípravku, návrhy elektrického zapojení, obsahují popis a volbu jednotlivých součástí. Návrhy mechanického zapojení slouží pro pochopení systému ukládání vzorků. Návrhy původně obsahovaly konstrukci s dvěma váhovými senzory, tyto části jsou zde z důvodu jejich měření a testování vlastností, i když ve finálním výrobku bylo řešení změněno na jediný váhový senzor. Kompletní konstrukci spolu s přichycením k ostatním částem vrtacího přípravku lze vidět na obrázku 2.1.

2.1 Návrh mechanických součástí

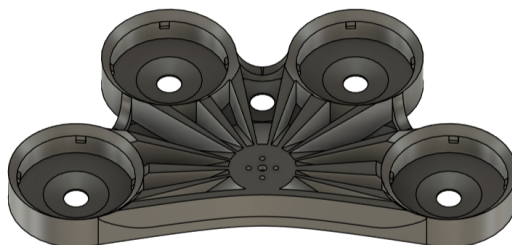
Pro realizaci součástí zásobníku byl vybrán 3D tisk pro svou rychlou uskutečnitelnost a přístupnost i studentům bakalářských oborů. Mars Rover má realizované dvojče v programu Fusion 360. Z důvodu jednotvárnosti dokumentace a jednoduchosti modelování zásobníku ke zbytku roveru, byl zvolen stejný program pro návrh součástí zásobníku.

Tělo zásobníku, 2.1

Tělo zásobníku spojuje krokový motor ve středu těla a pěti slotů na krajích. Čtyři sloty jsou pro kalíšky na uskladnění materiálu a poslední slot je pro umožnění vrtáče získat nový regolit, tento slot je v práci označován jako nultý (z důvodu že je výchozí). Rozdělení slotů lze vidět na obrázku z přílohy A.7.

Sloty byly označeny čísly 0, 1, 2, 3, 4 ve směru hodinových ručiček od slotu 0, který je prázdný. Na místě slotů 1 až 4 byl vymyšlen bajonetový uzávěr pro uchycení kalíšků na regolit 2.2. Pod každým kalíškem je vytvořen otvor pro vysypání písku který se tam může dostat.

Ve středu těla zásobníku jsou otvory pro zapuštěné šrouby k přírubě krokového motoru, ta byla instalována v kovovém provedení, lze ji vidět na obrázku 2.17



Obr. 2.1: Tělo zásobníku regolitu

Kalíšek na regolit, 2.2

Průměr kalíšku každého slotu byl zvolen po výpočtu jeho nutné plochy pro parametry soutěže (minimální objem kalíšku viz. vzorec 1.1), vzhled bajonetového uchycení jednotlivých kalíšků lze vidět na zmíněném obrázku

Výpočet orientačního objemu kalíšku (bez zkosených ploch kalíšek je nahrazen modelem ze dvou válců):

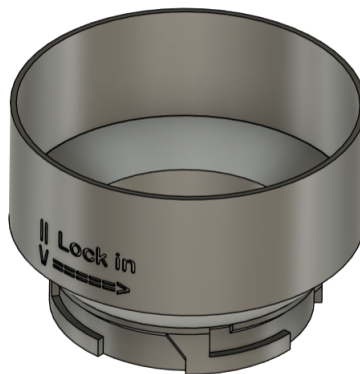
$$V_{\text{kalíšek}} = \pi \cdot r_1^2 \cdot v_1 + \pi \cdot r_2^2 \cdot v_2 = \pi \cdot 30,5^2 \cdot 15 + \pi \cdot 43,5^2 \cdot 39 = 275,7 \text{ cm}^3 \quad (2.1)$$

Objem jednoho kalíšku bude nadále počítáno jako 250 cm^3 (což pro orientaci odpovídá 250 ml tekutiny) z důvodu, že kalíšky se nebudou plnit na maximum (soutěž ERC není dovoleno odebranými vzorky kontaminovat povrch, odebrané vzorky se nesmí vysypat). S tímto uvážením dojdeme k maximální odebranému objemu a to sice 1000 cm^3 což dopovídá odebrané hmotnosti regolitu 1000 g až 1800 g. K výsledku se došlo výpočtem minimální a maximální hmotnosti (objemová hmotnost regolitu se liší podle dokumentů [4], [3]):

$$m_{\text{vzorků MIN}} = \rho \cdot V = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,001 \text{ m}^3 = 1 \text{ kg} = 1000 \text{ g} \quad (2.2)$$

$$m_{\text{vzorků MAX}} = \rho \cdot V = 1800 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,001 \text{ m}^3 = 1 \text{ kg} = 1800 \text{ g} \quad (2.3)$$

Odebrání kalíšku ze zásobníku probíhá tažením kalíšku nahoru, následně rotací v ose válce kalíšku o 35° a vytažením nahoru. Bajonetové uchycení je implementováno pro zamezení vysypání / upadnutí kalíšku ve chvíli, kdy Mars rover překonává náročný terén.



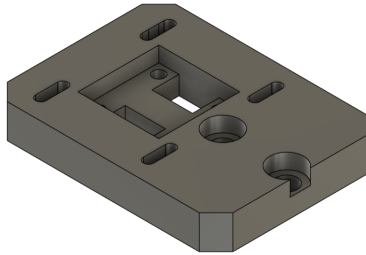
Obr. 2.2: Kalíšek na uskladnění regolitu

Patice motoru k tenzometrům, 2.42.3

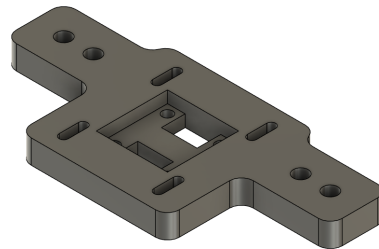
Patice motoru byla navržena s nutností uchytit Hallův senzor (desku plošného spoje AS5048) v ose motoru, na který byl uchycený magnet s polarizací viz obr.2.11

Druhým kritériem návrhu bylo uchycení šrouby M3 do závitu váhového senzoru s tenzometry pro verzi s dvěma váhovými senzory a závitu M6 pro verzi s jediným váhovým senzorem.

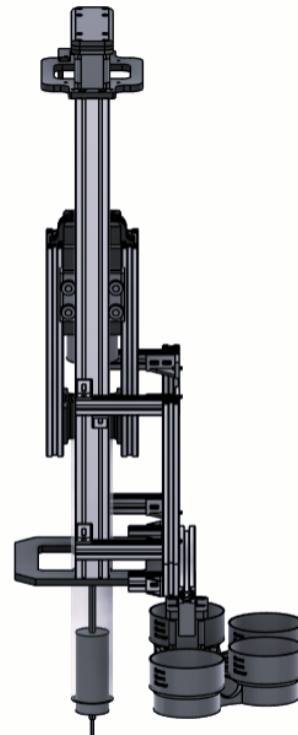
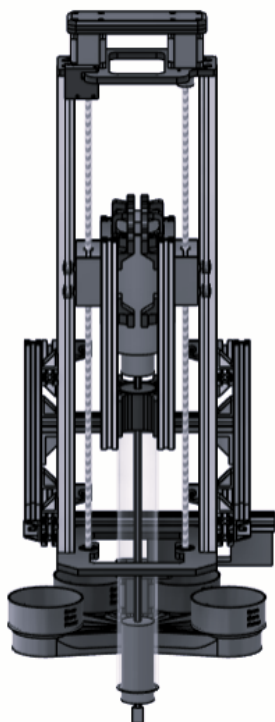
Posledním kritériem je offset od lišty roveru, ke které jsou váhové senzory přichyceny, pro správnou vzdálenost od konce roveru a k vrtačce, která nesmí se zásobníkem interferovat. Z toho důvodu byly navrženy součástky tak, aby bylo možné vzdálenost následně upravit.



Obr. 2.3: Držák motoru a Hallova senzoru, pro dva váhové senzory



Obr. 2.4: Držák motoru a Hallova senzoru, pro jeden váhový senzor



Obr. 2.5: Model kompletního vrtacího přípravku zepředu a z boku [15]

2.2 Volba elektrických součástí

Obsahuje součástky, které často spojují navržené mechanické součástky dohromady, tzn. je využit krokový motor, spojovací patiči motoru a tělo zásobníku, váhové senzory, které spojují profil vrtacího přípravku spolu s patiči motoru a další součástky umístěné na navržené DPS.

2.2.1 Krokový motor

Jde o Stejnoseměrný bezkartáčový typ motoru, který se pohybuje po krocích v závislosti mechanického počtu navinutí cívek. Tímto "krokováním" jím lze pohybovat na zadanou pozici (ovládání skrz otevřenou smyčku)

Rotorem krokového motoru jsou většinou permanentní magnety a stator tvoří navinuté cívky umístěné kruhově kolem osy rotoru 2.6. Ve chvíli, kdy je napětí přivedeno na dvě cívky, permanentní magnet rotoru se otočí tak, aby vyrovnal vzniklé magnetické pole. Správnou sekvencí těchto pulzů je možné osou krokového motoru otáčet.[8]

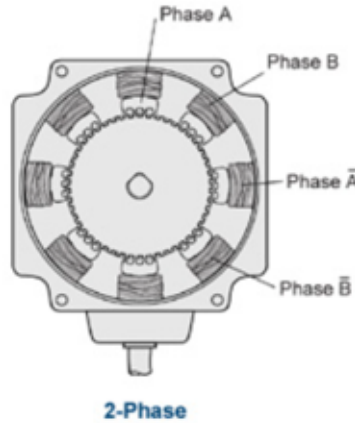
Hybridní dvojfázový krokový motor kombinuje výhody obou svých předchůdců (Krokového motoru s permanentním magnetem i reluktančního krokového motoru). Jeho rotor je z vnější části pokryt zuby, které přes malou vzdálenost vzduchem navazují na zuby statoru 2.6. Počet fází motoru odpovídá způsobu navinutí cívek a jejich počtu v rotoru tzn. cívka začíná vodičem "Phase A" a končí vodičem "Phase \bar{A} ". Podle počtu zubů, a na nich navinutých cívkách, je odvozen počet kroků na jednu otáčku. Pro využitý motor NEMA17 je to 200 kroků na otáčku, z tohoto čísla lze odvolit úhel, o který se motor otočí po 1 kroku. [8]

$$\text{úhel} = \frac{\text{počet stupňů}}{\text{počet stavů}} = \frac{360^\circ}{200} = 1,8^\circ \quad (2.4)$$

Krokování motoru je možné způsobem FULL STEP, HALF STEP nebo mikrokrokováním.

Full Step ovládání probíhá připojením napětí k jednomu pólu cívky (například Phase A), kdy se magnet rotoru přizpůsobí vzniklému magnetickému poli. Následně se v jednu chvíli odpojí napájení pólu cívky Phase A a k napájení se připne pól cívky Phase B, tímto se rotor motoru otočí o $1,8^\circ$. Sekvenci připínání a odpínání napětí lze vidět na grafu 2.7

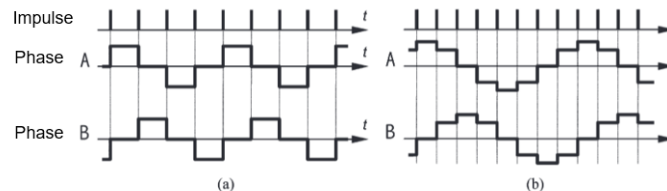
Half Step ovládání probíhá vložením mezikroku mezi čisté napájení Phase A a následně čisté Phase B. Mezikrok je stav, kdy je napětí připojeno k oběma cívkám, v tuto chvíli se rotor otočí do pozice mezi obě vinuté cívky. Tím pádem se počet pozic motoru zvýší a zmenší se stupeň otočení při jednom "Half Step" kroku.



Obr. 2.6: Navinutí cívek krokového motoru [8]

$$\text{úhel} = \frac{\text{počet stupňů}}{\text{počet stavů motoru}} = \frac{360^\circ}{2 \cdot 200} = 0,9^\circ \quad (2.5)$$

Mikrokrokování, které je využito ve finálním řešení, rozděluje krok na několik menších kroků, podle zvoleného poměru, Half step je poměr 1/2 tzn. jeden standardní krok rozdělen na dva. Poměr 1/4 je elektricky umožněn tak, že mezi kroky Napájení čistě Phase A a napájení obou fází polovičním napětím, je vložen krok kdy je Phase A napájena 3/4 U_{max} a Phase B 1/3 U_{max} . Tím se dosáhne otočení rotoru o jednu čtvrtinu kroku. Tímto způsobem lze krok rozdělit podle potřeby.



Obr. 2.7: Průběhy napětí při řízení Full step a Half step [8]

Při konstrukci zásobníku byl pro jeho funkci zvolen nejjemnější poměr mikrokrokování, který zvolený driver umožňoval, tzn. poměr 1/16. Touto volbou je se rotor pohne o 0.1125° za jeden krok.

$$\text{úhel} = \frac{\text{počet stupňů}}{\text{počet stavů motoru}} = \frac{360^\circ}{16 \cdot 200} = 0.1125^\circ \quad (2.6)$$

Motory se dále dělí podle vyvedených vodičů cívek na bipolární a unipolární.

Bipolární motor má typicky vyvedené 4 vodiče, vlastnostmi se vyznačuje vyšším točivým momentem, ale za to složitějším ovládním, driver krokového motoru je náročnější navrhnout.

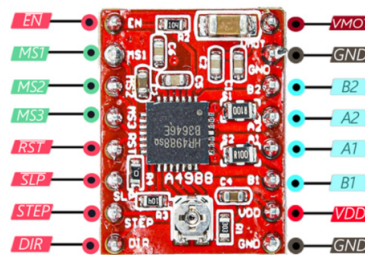
Unipolární motor má vyvedených 6 nebo 8 vodičů jeho výhodou je jednoduchost ovládání, proud teče do cívek motoru jen jedním směrem, ale je to za cenu nižšího točivého momentu.

2.2.2 Driver krokového motoru

Driver (Budič) krokového motoru slouží jako oddělovač signálové části obvodů z mikrokontroléru a silové části proudů do krokového motoru.

Typickými vstupy driveru jsou impulzy kroků (u zvoleného driveru je to pin STEP), proud tekoucí fázemi (u zvoleného driveru je proud nastavován mechanicky trimrem), povolení krokování vstupem Enable (pin \overline{EN}), směr otáčení krokového motoru (pin DIR), napájecí napětí silové části (zvoleno 11,3V) a signálové části driveru (3,3V)

Dalšími vstupy u zvoleného driveru jsou \overline{SLP} , přivedením logické "0" na tento pin přestane Driver snímat vstupy a pouštět proud do motoru. \overline{RST} aktivací pinu dojde k necitlivosti vůči ostatním vstupům, tento jediný pin nebyl v řešení zásobníku využit. Poslední sadou pinů jsou MS1, MS2, MS3, tyto piny řídí způsob mikrokrokování, sepnutím všech pinů na logickou "1" dojde k poměru mikrokrokování 1/16.



Obr. 2.8: Rozložení pinů driveru A4988 [10]

2.2.3 Váhový senzor

Vážení vzorků odebrané horniny vyžaduje zjistit přesný výsledek celkové hmotnosti zásobníku, bez ohledu na místo zatížení (zaplněný slot zásobníku), a protože nelze zaručit centrované zatížení hmotnosti přesně na bod váhového senzoru, byl zvolen typ váhového senzoru "single point", který bude schopný měřit konstantní zatížení pouze v jednom směru.

Takový senzor je vytvořený ze čtyřech tenzometrů, tenzometr samotný má příliš malý rozdíl odporu na svém výstupu na detekci zvoleným mikrokontrolérem, z toho důvodu je třeba výstup zesílit samostatným obvodem.

Na zesilovač jsou v aplikaci kladeny další požadavky a to dva zabudované kanály. Aktivní kanál je tedy volen softwarově z mikrokontroléru a pro zjištění hmotnosti se hodnoty z obou kanálů sečtou. Toto zapojení umožňuje i zpětně určit, který slot zásobníku je zaplněný, z hodnot aktuálního otočení zásobníku a z dvou různých hodnot zatížení tenzometrů.

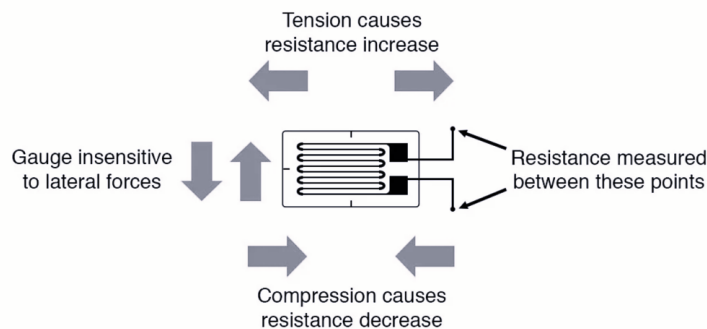
Tenzometr

Elektronická součástka, která je v základní podstatě vodič (o průměru okolo 20 μ m) přichycený k ohebnému materiálu (plast nebo papír), kterému se ohýbáním mění elektrický odpor, natahováním a stahováním vodiče. a to ideálně pouze v jednom směru viz. obr.2.9.[11]

Z Důvodu malých změn odporu je při měření jednoho tenzometru využít Wheatsonův můstek, kde je možné měřit i malé změny odporu díky vyváženosti můstku.

Parazitním vlivem jediného tenzometru je teplota, která ovlivňuje odpor snímačů, a nedalo by se tudíž rozeznat, kdy se Tenzometr ohýbá a kdy je změněna teplota. Z toho důvodu se využívá zapojení dvou nebo čtyř tenzometrů pro jediný snímač. V tomto typu zapojení se teoreticky ohřejí všechny tenzometrické snímače na stejnou teplotu a lze opět měřit změny odporu způsobené pouze mechanickým ohybem. [11]

Pro úlohu vážení vzorků regolitu byl zvolen váhový senzor se čtyřmi přichycenými tenzometry ke kovovému tělesu. Váhový senzor je předem výrobou nastavený na maximální váhu, a to 2x 1 kg (následně proběhla změna na 1 senzor o maximálním zatížení 3 kg). Při překročení se Tenzometr může nenávratně poškodit.



Obr. 2.9: Základní princip tenzometrického snímače [11]

2.2.4 Váhový snímač typu Single Point

Single point váhový snímač (load cell) se vyznačuje vysokou přesností měření zatížení, bez odchylky výsledku ku nevyváženému zatížení (offcenter load), tento pa-

parametr "platform dimensions" označuje kam až jde zatížit váhový senzor od středu senzoru, než dojde ke zkreslení měření. Tento parametr je pro přípravek důležitý, protože tělo zásobníku je voleno o velikosti až 350 mm, z tohoto důvodu byl zvolen váhový senzor přesný až pro platformy 400 x 400 mm, a to "Tedeo-Huntleigh 1042 - 3 kg".[17].

Dalšími parametry senzoru je jeho stupeň krytí IP66, což zabraňuje zejména přístupu prachu / písku z regolitu k senzoru. Vlastnost opakovatelnosti váhového senzoru zajišťuje jeho přesnost bez nutnosti ho v budoucnu vyměnit. Jeho odchylka ze stálého zatížení, která se v průběhu času vyskytne, bude negována pokaždé, když se váha vynuluje, tento problém je tedy řešen softwarově. Ochrana proti přetížení je další výhodou těchto váhových senzorů, ta ovšem instalována nebyla (fyzická zábrana bránící ohnutí kovového těla senzoru), tento problém je řešen softwarovým limitem a sekundárně návrhem velikosti kalíšků, které nejsou schopné dohromady pojmout hmotnost regolitu 2248 g, aby byla dosažena hranice maximální hmotnosti (hmotnosti komponent viz tabulka 5.1). [17][18]

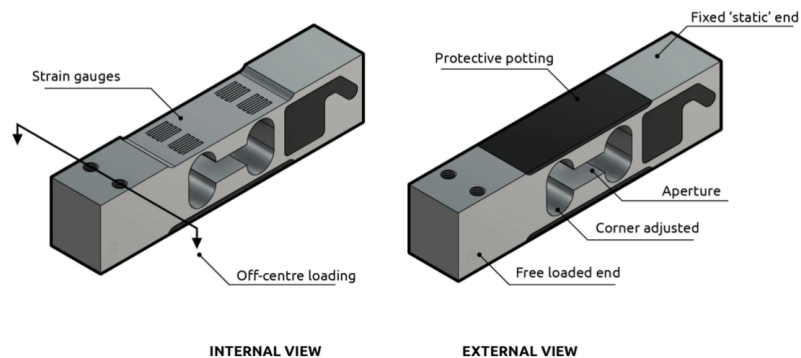
$$m_{\text{MAX}} = \text{hmotnost na váhovém senzoru} - 3000 = 752 - 3000 = 2248 \text{ g} \quad (2.7)$$

Původním zapojením váhového senzoru bylo využití dvou váhových senzorů viz obr. 2.1. Toto zapojení bylo navrženo a testováno pro možnost zjištění o naplnění jednotlivých slotů, tzn. zpětná vazba pro případ, kdy by rover potřeboval informaci o naplnění jednotlivých slotů. Výsledky z měření a důvody nevyužití konstrukce jsou popsány v kapitole 5

Druhým a finálním zapojením je využití pouze jednoho Single point váhového senzoru, dojde tak ke ztrátě zpětné vazby o naplnění slotů, ovšem s benefitem zvýšení přesnosti a možnosti použít konvenční metody měření a výrobcem dané parametry, jako například plné využití dimenzí vážící platformy, tento parametr byl využitím dvou váhových senzorů značně omezen a nebylo možné zajistit kompletně přesné měření, tato finální konstrukce je vidět na obr. 2.16

Zesilovač HX711, pro dva váhové snímače

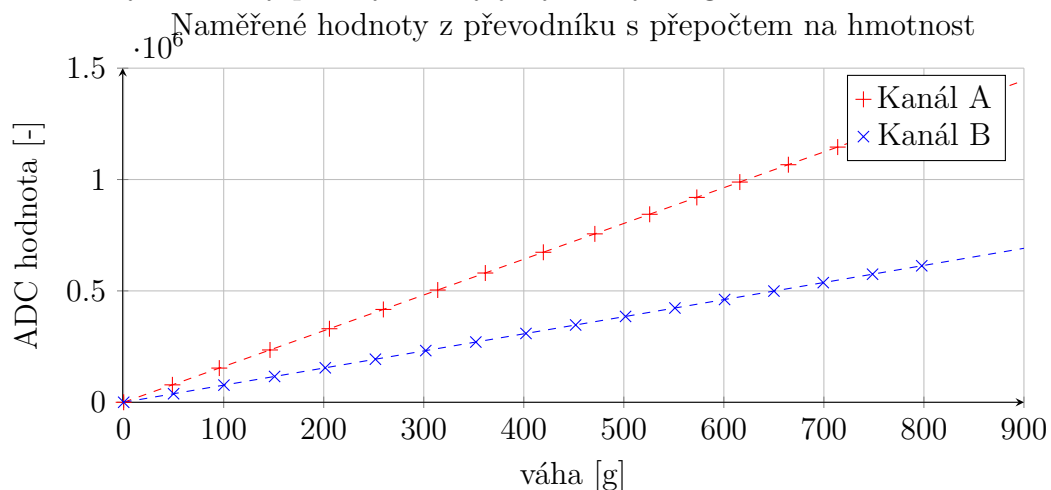
Analogová změna odporu tenzometrů je nedetekovatelná pro mikrokontrolér, proto je využita deska HX711 (zapojena podle obr. č. 1.1). Jde o Analogově digitální dvoukanálový převodník. Obsahuje dva kanály A a B (každý kanál konstruovaný s jiným zesílením), na každý kanál je přiveden jeden váhový senzor s tenzometry o maximálním zatížení 1 kg. Dva váhové senzory byly zvoleny pro větší robustnost zásobníku (odolnost proti vnějším fyzickým vlivům), z toho vychází maximální nosnost váhy 2 kg. Od této hmotnosti je nutné odečíst hmotnost krokového motoru, těla zásobníku



Obr. 2.10: Konstrukce a rozložení tenzometrů na váhovém senzoru [19]

a všech dílů s ním spojených, tyto díly byly zváženy, mají hmotnost 752 g. Z toho vychází, že maximální uložený objem může být 1248 g.

Pro výpočet přesné váhy jsem se z důvodu netradičnosti konstrukce (a tudíž i zapojení) rozhodl změřit změnu hodnoty ADC převodníku, s narůstající hmotností. Tyto hodnoty z tabulky přílohy A.1 byly vyneseny do grafu č. 2.2.4



Z těchto naměřených dat jsem pomocí metody nejmenších čtverců [14] vypočítal funkci lineární rovnice ($y = ax + b$), pro následné zjištění kterékoli váhy vzorku, který bude do zásobníku uložen

$$a = \frac{N \cdot \sum(\text{Kanál A} \cdot \text{ADC A}) - \sum \text{kanál A} \cdot \sum \text{ADC A}}{N \cdot \sum(\text{kanál A}^2) - (\sum \text{kanál A})^2} \quad (2.8)$$

; kde N je počet změřených vzorků, Kanál A je váha v [g], ADC A je měřená hodnota převodníku

$$b = \frac{\sum \text{ADC A} - a \cdot (\sum \text{kanál A})}{N} \quad (2.9)$$

Pro kanál A vycházím z rovnice:

$$y = ax + b = 1604,99602 \cdot x + 1,786 \quad (2.10)$$

Pro kanál B vycházím z rovnice:

$$y = ax + b = 768,00273 \cdot x - 1,392 \quad (2.11)$$

; kde y je hodnota číslicově digitálního převodníku a x je hmotnost zatěžující daný tenzometr.

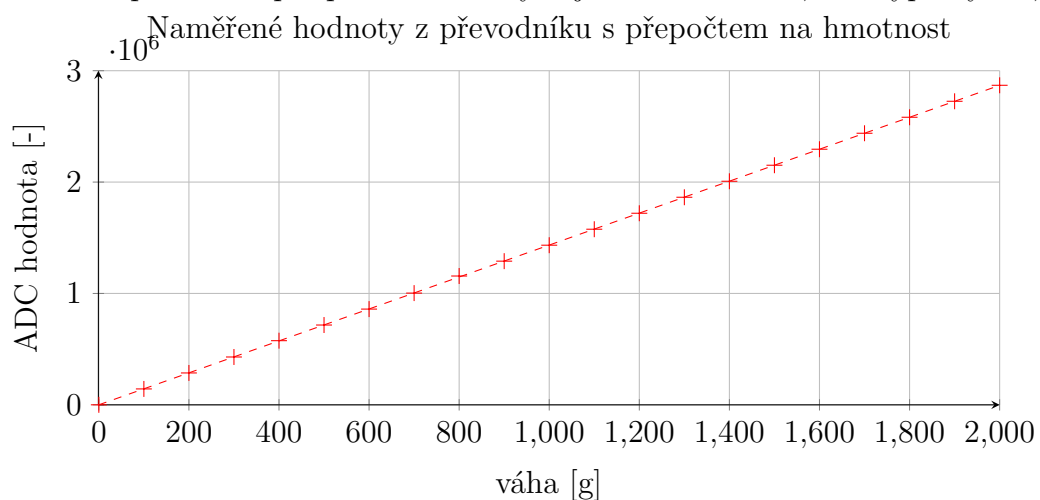
Přesnost výsledků, lineární průběh a minimální odchylky aproximující přímky od měřených bodů, lze vidět v grafu č. 2.2.4. Tyto výsledky jsou následně zpracovány v kapitole I2C - Weight 3.2.1, kde lze vidět i implementace do programu.

Měření probíhalo s vycentrovaným zatížením, na tento stav (kdy budou naplněny sloty na pozicích 1 a 4, viz pozice zásobníku A.7, stejnou hmotností regolitu) se nezálehat a bylo nutné otestovat a změřit reakci na excentrické zatížení hmotností, výsledky jsou probrány v kapitole 5.

Zesilovač HX711, jeden váhový snímač

Z důvodu vysvětlených v kapitole měření 5 byla konstrukce změněna na jediný váhový senzor Tedeo-Huntleigh 1042, pro ten jsou zde uvedeny nové výpočty a grafy. Jeho maximální nosnost je 3 kg, od toho je odvozena hranice 2 kg pro měření vzorků, rezerva 1 kg byla zvolena podle hmotnosti komponentů (viz tabulka hmotností 5.1) a z rezervy 248 g. Tato rezerva slouží pro případ náhodného nárazu do objektu pod roverem, případně pro eliminaci poškození z nevhodné manipulace.

Na grafu 2.2.4 lze vidět měřené body s aproximací pomocí čárkované přímky (aproximace proběhla opět pomocí metody nejmenších čtverců, viz. výpočty 2.8,2.9.



K aproximující přímce se došlo totožným způsobem jako v zapojení s dvěma tenzometry (rovnice 2.8, 2.9). Výsledná přímka pro jediný kanál s váhovým senzorem

Tedea-Huntleigh:

$$y = ax + b = 1434,4524 \cdot x - 143,5758 \quad (2.12)$$

Z aproximující přímky bylo možné zjistit odchylku v gramech od reálné hodnoty hmotnosti. Výsledky lze vidět v tabulce 2.1. Kde si lze všimnout, že aproximující přímka dodržuje limit odchylky 1 g v měřeném rozsahu do 2000 g (hodnoty odchylky v gramech byly vyneseny do grafu v příloze A.9), zároveň lze vidět, že odchylka se ze záporných hodnot dostane do kladných při zatížení více než 1700 g. Posledním vyčteným efektem měření je nepřesnost kolem bodu 0 g. Těto nepřesnosti není kladena velká pozornost z důvodu, že minimální odebraná hmotnost vzorku musí být 100 g, z tohoto důvodu jsem nepokračoval v měření zmíněné nepřesnosti a vyšších odchylek. Konstruovaná váha odpovídá požadavkům na zásobník na European Rover Challenge.

Tab. 2.1: Přehled měření ADC a odchylek

Hmotnost [g]	Měřená ADC [-]	Teoretická ADC [-]	Abs. odchylka ADC [-]	Rel. odchylka ADC [%]	Odchylka hmotnosti [g]
0	133	-143,576	276,576	207,952	0,000
100	142847	143301,663	-454,663	-0,318	-0,318
200	286251	286746,902	-495,902	-0,173	-0,346
300	429536	430192,141	-656,141	-0,153	-0,458
400	573004	573637,380	-633,380	-0,111	-0,444
500	716542	717082,619	-540,619	-0,075	-0,377
600	859606	860527,858	-921,858	-0,107	-0,643
700	1003159	1003973,097	-814,097	-0,081	-0,568
800	1146575	1147418,336	-843,336	-0,074	-0,588
900	1289951	1290863,575	-912,575	-0,071	-0,637
1000	1433233	1434308,814	-1075,814	-0,075	-0,751
1100	1576681	1577754,053	-1073,053	-0,068	-0,749
1200	1720120	1721199,292	-1079,292	-0,063	-0,753
1300	1863752	1864644,531	-892,531	-0,048	-0,623
1400	2007345	2008089,770	-744,770	-0,037	-0,519
1500	2151212	2151535,009	-323,009	-0,015	-0,225
1600	2294975	2294980,248	-5,248	0,000	-0,004
1700	2438448	2438425,487	22,513	0,001	0,016
1800	2582033	2581870,726	162,274	0,006	0,113
1900	2725464	2725315,965	148,035	0,005	0,103
2000	2869024	2868761,203	262,797	0,009	0,183

Kde se výpočet teoretické hodnoty opírá o aproximující rovnici přímky 2.12. Příklad výpočtu byl proveden pro hmotnost 400 g:

$$\text{Teoretická ADC} = \text{Hmotnost} \cdot A + B = 400 \cdot 1434,4524 - 143,5758 = 573637,38 \quad (2.13)$$

Z toho spočítány odchylky relativní, absolutní a odchylka v gramech ku vážené hmotnosti:

$$\text{Abs. odchylka ADC} = \text{Měřená} - \text{Vypočtená} = 573004 - 573637,38 = -633,38 \quad (2.14)$$

$$\text{Rel. odchylka ADC} = \frac{\text{Abs. odchylka ADC}}{\text{Měřená}} \cdot 100 = \frac{-633,38}{573004} \cdot 100 = -0,111\% \quad (2.15)$$

$$\text{Odchylka hmotnosti} = \text{Rel. odchylka ADC} \cdot \text{Hmotnost} = -0,111 \cdot 400 = -0,444 \text{ g} \quad (2.16)$$

Vliv otáčení na vážení je popsán v kapitole měření 5. Jsou tam popsány i důvody zvolení konstrukce s jediným váhovým senzorem.

2.2.5 Hallův senzor

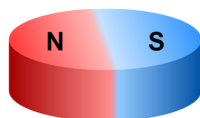
Deska AS5600 má čip s integrovanými Hallovými senzory, ty dokážou podle natočení diagonálně polarizovaného magnetu 2.11 určit jeho otočení. Deska AS5600 má analogový výstup, který byl jedním z důvodů jejího zvolení, ten je čten analogovým pinem mikrokontroléru. Průběh napětí závisí na napájecím napětí Hallova senzoru, pro napájení zmíněné desky byla vytvořena hladina 3,35 V, z důvodu nestálosti hladiny napětí poskytované arduinem.

Analogový vstup arduina má 1024 bitů pro maximální hodnotu 5 V, v mém zapojení je maximální napětí 3,35 V, tudíž maximální číslo na analogovém vstupu zjistím výpočtem.

$$\text{max hodnota} = \frac{\text{Vstupní napětí}}{\text{Referenční napětí}} \cdot \text{počet bitů} = \frac{3,35}{5} \cdot 1024 = 686,08 \quad (2.17)$$

Pro jistotu najití úhlu i při nestálých okolních podmínkách (tlak / teplota / časové opotřebení) byla pro algoritmus stanovena maximální hodnota 675. Tudíž maximální hodnoty dosáhne deska AS5600 už při napětí 3,296 V.

$$U_{\text{hall max}} = \frac{\text{max hodnota}}{\text{počet bitů}} \cdot \text{Referenční napětí} = \frac{675}{1024} \cdot 5 = 3,296 \text{ V} \quad (2.18)$$



Obr. 2.11: Polarizace použitého magnetu [12]

2.2.6 Mikroprocesor

Pro konjunkci dat ze všech snímačů, jejich analýzu a vyhodnocení byl zvolen Mikrokontrolér Arduino Nano v3. Zapojení s výstupy k perifériím lze vidět na obrázku č. A.1. Při návrhu se zohlednily požadavky na vysoký počet digitálních pinů, nutnost pinů analogových a nutnost komunikace I2C s nadřazeným mikropočítačem. Arduino Nano bylo zvoleno pro své malé rozměry, kdy zároveň plní všechny požadavky i normy dalších periférií Mars Roveru.

2.3 Návrh elektrického zapojení

Napájecí napětí z desky bylo zvoleno 11.3 V (snížené napětí 12 V) z důvodu dostatečnosti pro sub-task zásobníku a existence této hladiny na rozvodové desce Roveru. Další využitou hladinou napětí jsou 3,3 V z regulátoru arduina (součástka A1). Během testování chodu všech součástí zásobníku byla zjištěna nestálost této hladiny a její šum, z toho důvodu byla navržena hladina třetí 3,35 V (pro Hallův senzor), tato hladina je řízena stabilizátorem (součástka U1)

Schéma je navrženo s pamětí na ochranu zvenčí, hladina 12 V má základní ochranu proti přepólování napájecího napětí diodou (součástka D4) viz schéma v příloze č. A.4, jde o standardní diodu 1N4007 s poklesem napětí o 0,7 V.

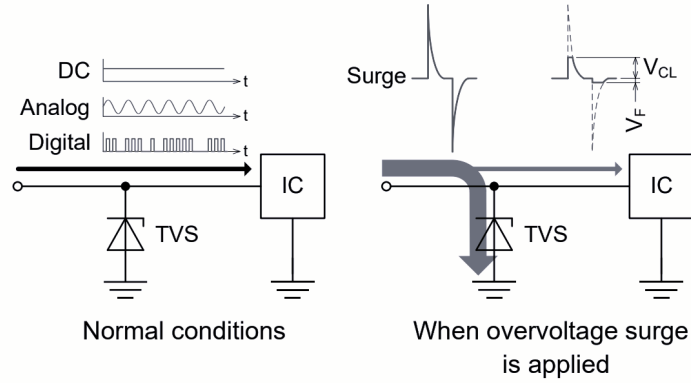
Další ochrany jako například ochrana obvodu proti přepětí pomocí Transilu byly testovány, ovšem na finálním výrobku se nevyskytují, hladina napětí byla testována a vrtací přípravek ani svým vysokým odběrem při zapnutí vypnutí vrtačky hladinu příliš neovlivňuje. Z těchto testů ovšem na desce zůstal footprint a součástka diody D5.

Transil se vyznačuje vysokým odporem, ve chvíli, kdy není překročeno jeho hraniční napětí, se chová jako rozpojený obvod, aby nemohl zatěžovat zbytek chráněného obvodu. Ve chvíli, kdy dojde ke špičce napětí, Transil svůj odpor sníží tak aby udržel limit napětí na jaký je navrženo (jak lze vidět na obrázku č. 2.12). Po odeznění špičky dojde k regeneraci Transilu. Pokud by vysoké napětí neodeznělo, Transil se spálí a zkratuje, chráněný obvod bude neporušený. [13]

2.3.1 Schéma zapojení

Ve schématu se nachází 3 tlačítka pro manuální ovládání zásobníku, bez potřeby interakce s mikropočítačem roveru, a zároveň pro redundanci způsobu ovládání základních funkcí zásobníku.

Tlačítka jsou následující. Rotace zásobníku o jednu pozici, zavážení aktuální váhy zásobníku a zastavení pohybu zásobníku spolu s funkcí vynulování váhy. Veškeré



Obr. 2.12: Funkce Transilu při špičce napájecího napětí [13]

nutné informace jsou vypisovány na Sériový monitor, při jeho připojení. Jednotlivá tlačítka jsou zapojená následovně.

Piny Arduina BTN YEL, BTN RED, BTN GRN jsou nastaveny na vnitřní pull up rezistor, tudíž kondenzátor je tímto v základním stavu nabitý a katoda diody je na stejné hladině napětí jako anoda. Sepnutím tlačítka SW(1-3) se dostane ke katodě diody zem (GND), tím se umožní průchod proudu diodou a ta se rozsvítí, kdy je zároveň přechod z vysoké hodnoty pinu BTN do nízké zpomalen vybitím kondenzátoru. Limitní stavy úbytku napětí je difúzním napětím červené Led diody $U_d = 2V$ a difúzní napětí zelené LED diody $U_d = 2,5 V$. Z vyššího napětí můžeme spočítat ideální úbytek napětí na rezistoru a z toho hodnotu rezistoru, kdy volím proud diodou na 3 mA.

$$U_R = U_{cc} - U_d = 3,3 - 2,2 = 1,1 V \quad (2.19)$$

$$R_{LED} = \frac{U_R}{I_{LED}} = \frac{1,1 V}{3 \cdot 4 mA} = 91,6 \Omega \quad (2.20)$$

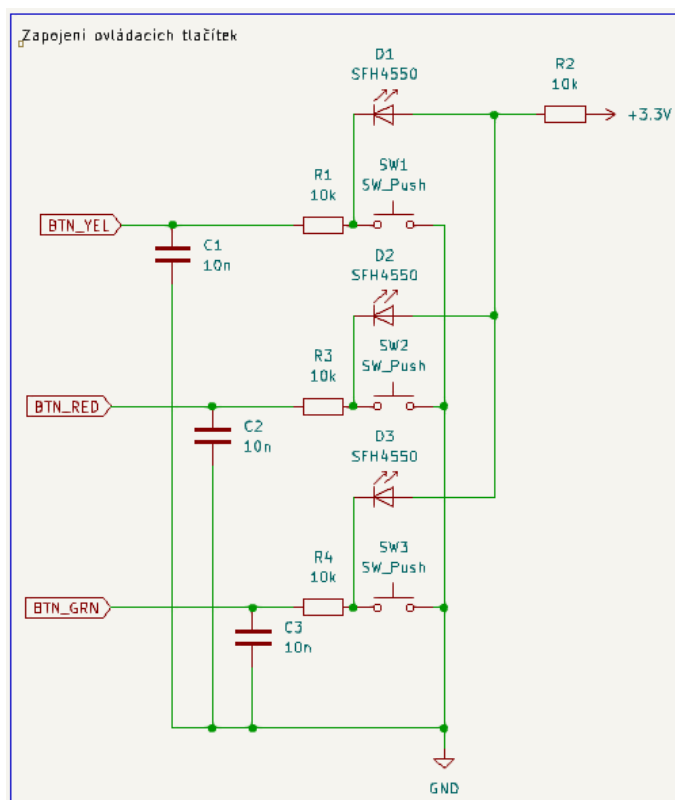
Byl zvolen rezistor s hodnotou $R_{LED} = 75\Omega$. Z toho vychází, že maximální proud tekoucí do diod je

$$I_{LED \text{ green}} = \frac{U_R}{R_{LED}} = \frac{1,1}{75} = 14,6 mA \quad (2.21)$$

Pro případ sepnutí pouze červené diody (hranice nejnižšího difúzního napětí), je proud protékající diodou roven

$$I_{LED \text{ red}} = \frac{U_R}{R_{LED}} = \frac{1,3}{75} = 17,3 mA \quad (2.22)$$

Proud je volen schválně blízko hranice maximálního proudu jednotlivých LED diod ($I_{LED \text{ max}} = 20 mA$), kvůli možnosti rozsvítit všechny diody zároveň (při



Obr. 2.13: Zapojení tlačítek

sepnutí všech tlačítek), v tu chvíli se proud jednotlivých diod pohybuje kolem 4 mA.

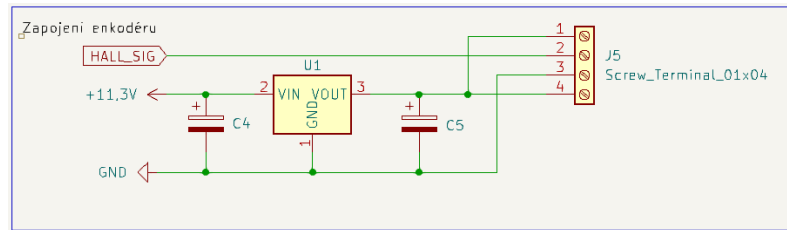
Úbytky napětí na rezistoru byly změřeny na osazené DPS, úbytek na zelené diodě je 1,064 V, na červené je 1,226 V a na žluté 1,123 V. Úbytek napětí na rezistoru R_{LED} při sepnutí všech 3 tlačítek byl změřen na 1,348 V. Z tohoto napětí vypočítám reálný proud rezistorem, který se následně rozdělí mezi diody

$$I_{LED\ red} = \frac{U_R}{R_{LED}} = \frac{1,348}{75} = 17,97\ mA \quad (2.23)$$

Dále je ve schématu implementován debouncing, pro plynulou změnu napětí, z důvodu, že bylo experimentem ověřeno kmitání signálu při sepnutí tlačítka. Pro tuto funkci byl do obvodu vložen RC článek viditelný na obrázku č. 2.13 (rezistor $R_{RC} = 10\ k\Omega$ a kondenzátor $C_{RC} = 100\ nF$, účinek této implementace je změřen v kapitole Měření 5.

Všechny části schématu lze vidět v příloze A.1.1. Většina obvodů je zapojena tradičně, za zmínění stojí zapojení enkodéru pro snímání absolutního natočení osy motoru. Finální zapojení lze vidět na obrázku 2.14. Z důvodu nestálosti hladiny napětí 3,3 V vnitřním regulátorem mikrokontroléru arduina byl vložen externí stabilizátor, s konstantním výstupním napětím 3,35 V. Tato hladina již nekmitala a

nedocházelo tak k odečtení chybného úhlu, to se bez stabilizátoru mohlo stát z důvodu čtení analogové hladiny napětí z Hallova snímače, napájeného stabilizátorem arduina.



Obr. 2.14: Vstupní piny do Hallova senzoru

2.3.2 Deska plošného spoje

Šířka cest byla rozdělena na dvě úrovně, silová (0,8 mm) a signálová (0,2 mm), kde do silové části patří pouze napájení driveru a všechny cesty s ním spojené. Proud tekoucí do driveru byl nastaven trimrem na 500 mA, proud byl zvolen testováním fyzické odolnosti zásobníku tak, aby se zásobník nezastavil při kolizi s malým kamenem, ale aby zároveň nevyvinul destruktivní sílu vůči roveru, při tlaku do horniny, protože zásobník bude umístěn pod torsem roveru, musí se s těmito možnými stavu počítat z důvodu, že nelze zaručit ideální povrch.

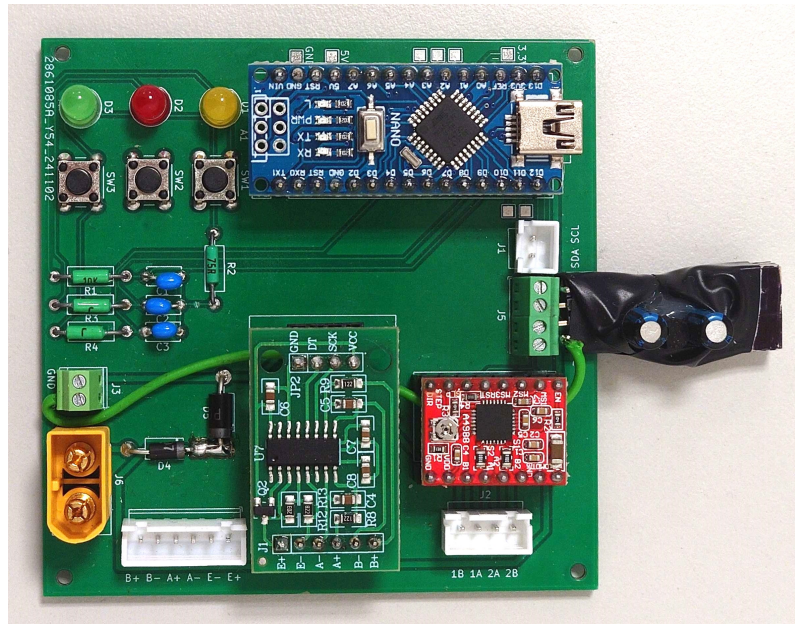
Části desky nezaplňené cestami byly vylité plovoucí mědí, pro zamezení rušení a pro kvalitnější teplotní vlastnosti, tyto plochy lze vidět na obrázku mědi a silkscreenu z vrchní vrstvy A.5 a se spodní vrstvy A.6.

Na desce plošného spoje lze dále vidět test pointy pro jednoduché troubleshooting a měření za běhu, zároveň je vyvedeno napájecí napětí desky do svorkovnice, pro možné další použití viz. obrázek přílohy A.4 svorkovnice J3. Druhá svorkovnice J6 je přiřazena ke konektoru XT60. Navrženou a osazenou desku plošného spoje lze vidět na obrázku 2.15

Deska je rozšířena o stabilizátor s dvěma kondenzátory z důvodů popsanych v kapitole 2.2.5. Na schématech lze vidět tyto součástky na desce plošného spoje, ta ovšem vyrobena nebyla. Dalším krokem ve skupině Brno Mars Rover je spojit subsystémy vrtacího přípravku do jednoho, v této verzi je vnější komponenta stabilizátoru považována za dostatečnou.

Vstupy a výstupy DPS

Pro napájení desky byl zvolen primární konektor XT60 (J6), z důvodu zavedené normy využití tohoto konektoru ve skupině Brno Mars Rover pro napěťovou hla-



Obr. 2.15: Osazená deska plošného spoje

dinu 12 V, pro potřeby testování větší redundanci byla zvolena sekundární možnost napájení přes svorkovnici (J3).

Dalším vstupem jsou konektory senzorů enkodéru (J5) 2.14 a číslicově digitálního konvertoru (J4) A.3, zde byl využit konektor šestipinový pro možné využití obou kanálů převodníku HX711. Ve finálním zapojení jsou používány pouze 4 piny (kanálu A).

Výstupem desky A.2 je konektor J2, který ovládá krokový motor. Vstupně výstupním konektorem je konektor J1 který je připojen na komunikační piny arduina pro I2C, viz obrázek přílohy A.1.

Všechny konektory, až na napájecí, byly instalované typu JST-XH z důvodu zavedené normy využití konektoru ve drilling přípravku roveru.

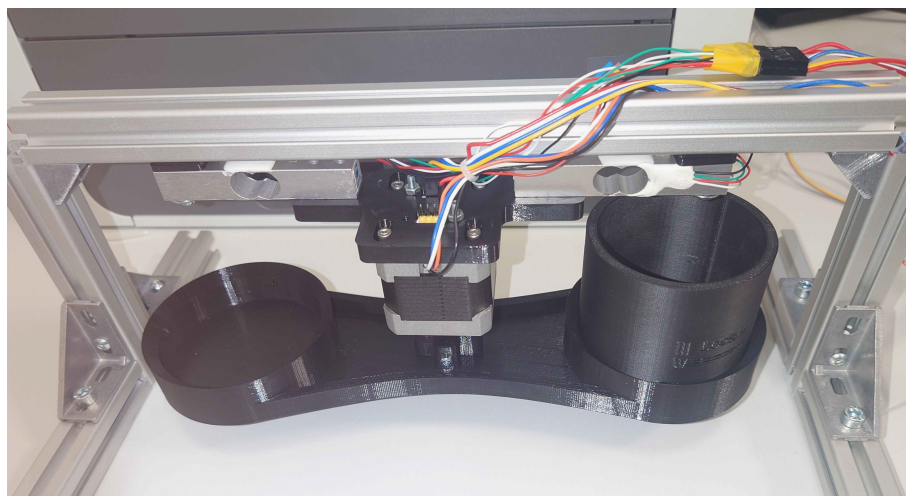
Pro potřeby stálosti napájecího napětí Hallova senzoru byla vytvořena hladina napětí 3,35 V, jak je popsáno v kapitole 2.2.5, tato hladina byla vytvořena stabilizátorem HT7533-1, který byl podle vzorového zapojení v datasheetu osazen s elektrolytickými kondenzátory o kapacitě $C = 100 \text{ nF}$.

Test pointy TP3, TP10 a TP11 slouží k volbě mikrokrokování driveru (ve schématu s číslem A2), vytvořením/odstraněním cínového mostu mohou volit hladinu napětí na ovládacích pinech driveru pro mikrokrokování.

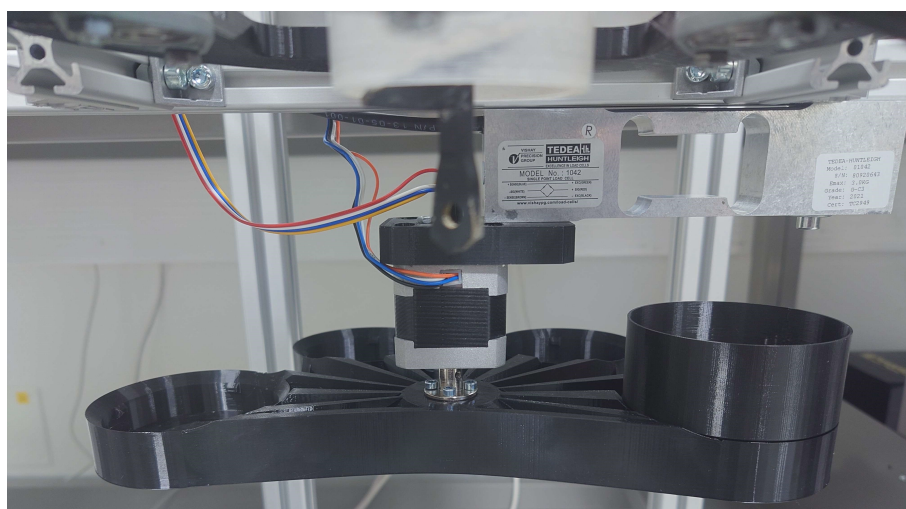
Zbýlé Test Pointy ve schématu A.1 byly implementované pro potřeby testování nebo budoucího využití při implementaci dalších částí obvodu, z toho důvodu byly vyvedeny piny arduina GND, +5 V, +3,3 V, přebývajících digitální a analogové piny.

Na obrázku 2.16 lze vidět první konstrukci zásobníku, který je připevněný k

rámu z hliníkových profilů k testování, Hliníkový rám zde simuluje torso roveru. Toto zapojení dvou váhových senzorů je v práci testováno a následně nahrazeno konstrukcí na obrázku 2.17.



Obr. 2.16: Vzhled zásobníku během testování



Obr. 2.17: Vzhled finálního zásobníku

3 Komunikace s nadřazeným systémem

Primární způsob ovládání zásobníku je řešen elektronicky přes komunikační protokol. Příkazy a požadavky musí být možné vyměňovat s nadřazeným mikropočítačem. Sekundární způsob ovládání pomocí tlačítka, je vysvětlen v kapitole 2.3.1

Nadřazený systém [16] je vyvíjen ve skupině roveru pro zajištění běhu algoritmu vrtacího přípravku a pro komunikaci dat do Roveru. Tento systém komunikuje s mikrokontroléry vrtáku, lineárního pojezdu a zásobníku, a kombinuje jejich funkce. Např. pro uskladnění vzorku z vrtáku do zásobníku, se zavolá příkaz na otočení zásobníku, následně sjede s lineárním pojezdem do kelímku a nakonec je spuštěn zpětný chod vrtačky pro vysypání regolitu

3.1 I2C

Komunikační protokol byl zvolen I2C, umožňuje dvou vodičové spojení (se společnou zemí) na krátkou vzdálenost, tato vzdálenost mezi deskou plošného spoje zásobníku a deskou nadřazeného mikropočítače je do 15 cm, což podmínku splňuje.

Do komunikace je možné se připojit jako Master / Slave, kdy Slave pouze odpovídá na požadavky Masteru, je možná komunikace i více Masterů v jedné komunikaci. Pro potřeby zásobníku je arduino definováno pouze jako Slave. Každý účastník komunikace má unikátní adresu, která se používá pro volání konkrétního Slave - účastníka.[7]

3.2 Přijímané a odesílané zprávy

Pro komunikaci informací byly zvoleny pouze ty nezbytné, z důvodu co nejkratší doby komunikace s Masterem, který musí řešit další součásti vrtacího přípravku, jako například motor vrtáku.

Vysílané zprávy jsou reprezentovány čísly viz. tabulka příkazů č. 3.1. Tato čísla jsou na roveru vysílána nadřazeným mikropočítačem, ve chvíli kdy do mikrokontroléru arduina přijde jiné číslo než z tabulky 3.1, do registru "message" zásobníku se zaznamená error "neznámý příkaz"

Odesílané zprávy jsou posílány na vyžádání z vnitřního registru, který je 3 bytový. Skládá se z poslední změřené váhy - Weight (2 Byte) a ze zprávy o stavu zásobníku - Message (1 Byte), ty jsou popsány v následujících kapitolách. Struktura zprávy je znázorněna v tabulce 3.2.

Číslo příkazu	Význam
10	vynulování váhy (funkce "tare")
20	měření aktuální váhy zásobníku
30 - 34	pohyb na pozici 0 - 4, podle jednotkového digitu příkazu
40	držení aktuální pozice zásobníku
50	vymazání chyb a stavů registru

Tab. 3.1: Tabulka přijímaných příkazů

Počet bytů	Číslo bitu	Význam
2	0–15	poslední změřená váha
1	0–2	poloha zásobníku
	3	vynulování váhy
	4	zásobník aktivní
	5–7	chybový výstup

Tab. 3.2: Tabulka odesílatelných informací

3.2.1 I2C - Weight

Hmotnost je ukládána do dvou Bytů (velikost short integeru) pro lepší rozlišení, ale stále se zachovává kompaktnost zprávy. Dalším důvodem je přebytečnost využití většího počtu bytů pro uložení zašuměného čísla. Hmotnost je posílána s jedním desetinným místem, to je dostatečná přesnost vzhledem k požadavku přesnosti na 1 gram.

V kódu je hmotnost před odesláním vynásobena deseti, tudíž při přečtení je nutné deseti získané číslo vydělit. Toto řešení bylo zvoleno vzhledem k nejvyššímu možné hodnotě dvou-bytového unsigned čísla (65 536, viz. výpočet 3.1), vzhledem k maximální váze 2000 g bude číslo před odesláním vynásobeno 10 na hodnotu 20 000 g, která maximální unsigned číslo nepřekročí a umožní přenést jedno desetinné číslo skrz komunikaci.

$$\text{Max value} = 2^N = 2^{16} = 65536 \quad ; \text{ kde } N \text{ je počet bitů BIN. čísla} \quad (3.1)$$

3.2.2 I2C - Message

Message je zpráva o aktuálních vnitřních stavech zásobníku, jak lze vidět v tabulce č. 3.2. Zpráva je komprimovaná způsobem, že se stav mění v závislosti zapsání 1 nebo 0 na patřičný digit. Tento způsob předávání informací pomocí komprimované

zprávy byl zvolen pro omezení doby používání I2C komunikace na nejnižší nutnou dobu.

První 3 bity (počítáno zleva) jsou rezervované pro aktivní slot (aktivní slot je ten nad kterým se nachází vrták přípravku, viz obrázek přílohy č.A.7). Stav je zakódovaný do tří bitů. Všechny množnosti jsou vypsány zde:

- 000 - nedefinovaný stav, aktivní ve chvíli otáčení zásobníku mezi sloty
- 001 - slot 0 aktivní (vrtací přípravek může vrtat)
- 010 - slot 1 aktivní (uskładnění vzorku)
- 011 - slot 2 aktivní (uskładnění vzorku)
- 100 - slot 3 aktivní (uskładnění vzorku)
- 101 - slot 4 aktivní (uskładnění vzorku)

Následující bit Message reprezentuje aktivitu zásobníku, ve chvíli kdy ten provádí zadaný úkon, stav "tray active" je v hodnotě 1. Do neaktivního stavu je bit překlopen sám, ve chvíli kdy se kterákoli akce dokončí (úspěšně i neúspěšně).

Další bit Message reprezentuje vynulování váhy, po dokončení funkce *tare bases()* se stav překloupí do "1" a zůstane tam do doby než dojde k vynulování příkazem z tabulky 3.1(příkaz 50).

Poslední 3 bity jsou vyhrazeny pro chybové hlášky, zakódované jsou do binárního čísla tímto způsobem:

- 000 - žádná detekovaná chyba nenastala
- 001 - neznámý příkaz (ten který se nenachází v tabulce 3.1, může nastat i náhodou při zašumění komunikace).
- 010 - Přetížení váhy, detekována hmotnost > 2000 g. Zatížení nemusí být nutně destruktivní pro váhový senzor, je ovšem nutné hmotnost odebrat.
- 011 - Žádaná pozice nenalezena, chyba hlášena ve chvíli, kdy zásobníku brání objekt k dokončení žádaného pohybu, ten se tudíž vrátí do poslední známé polohy.

4 Program pro mikroprocesor

Program je navržen jako stavový automat, základní stav probíhá ve smyčce *loop()*, ze které se vnějšími akcemi může dostat do ostatních činných stavů

4.1 Způsoby ovládání

Ovládání výrobku je umožněno dvěma způsoby.

Prvním je ovládání manuální pomocí tlačítek na výrobku, toto ovládání je omezené na otáčení a vážení, kdy pro přečtení váhy je nutné připojit vnější monitor. Tento způsob ovládání má přednost pro možnost ovládání "on-site" bez nutnosti mít připojený řídicí (funkční) program roveru

Druhým způsobem ovládání je přes nadřazený mikropočítač k Roveru, tento způsob komunikace umožňuje přístup k chybovým hláškám, aktuálním informacím o zásobníku a samotné měřené váze odebraných vzorků.

4.1.1 Manuální ovládání

Probíhá při stisknutí jednoho ze tří tlačítek, které mají funkce Otočení o jednu pozici, změření váhy a Tare váhy, elektronický popis zapojení tlačítek je popsán v sekci 2.3.1. Ve zkratce se sepnutím tlačítka objeví GND na vstupním pinu mikropočítače, indikace sepnutí je pomocí LED diod (může nastat stav, kdy je tlačítko sepnuto, ovšem zásobník vykonává aktuálně jinou činnost. Paměť u sepnutých tlačítek implementována není, je nutné tedy sepnout tlačítko znovu, kdy je zásobník v klidu)

4.1.2 Ovládání po komunikaci

Využívá knihovni funkce *Wire.onReceive()* a *Wire.onRequest()*, ty reagují na příkaz vyslaný z nadřazeného mikropočítače zavoláním funkce, tyto funkce jsou popsány v této kapitole níže (*send data()*, *receive data()*). [20]

4.2 Implementované funkce

Jednotlivé funkce jsou volanými stavy automatu, mají funkci měření nebo komunikace s mikropočítačem Roveru. Hlavní smyčka *loop()* kontroluje stisknutí tlačítek a změnu aktuálního úhlu, v tomto případě pošle po časové prodlevě příkaz k otočení na původní zadanou pozici. Následně proběhne kontrola přijatých zpráv z mikrokontroléru. Nakonec je průběh loopu zpomalen o 100 ms, z důvodu, že nejrychlejší odezva mikrokontroléru není nutností.

4.2.1 Vážení

Váha je inicializována při zapnutí mikrokontroléru, kdy je zároveň uložena referenční hodnota převodníku pro 0 g hmotnosti na váze, z toho důvodu je nutné inicializovat zásobník bez vzorků, pouze s vloženými kalíšky

Funkce *measure()* řeší samotné měření aktuální váhy. S použitím knihovny [21] je vypočten průměr pěti po sobě naměřených hodnot převodníku a následně se pomocí rovnice aproximující přímkou spočte váha v gramech (rovnice vychází z rovnice přímkou 2.12)

$$m_g = \frac{m_{ADC} - m_{base\ ADC} - 204,757}{1434.219} \quad (4.1)$$

Následně nastane kontrola přetížení váhy (se součtem předchozích hmotností)

Funkce *tare bases()* nastaví novou referenční hmotnost báze. To umožní například se 100 gramy vzorků ve slotu 1 a následně zavolání funkce *tare bases()* zvážit nově hmotnost nově odebraných vzorků, například 100 gramů ve slotu zásobníku 2.

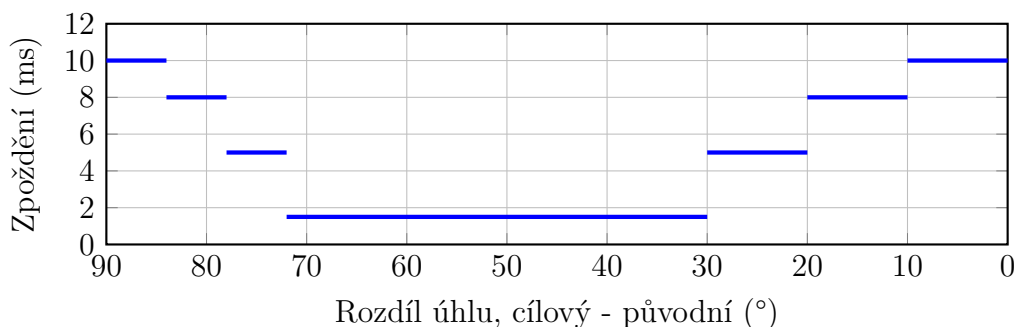
4.2.2 Pohyb motoru a zpětná vazba

move(int, int) je funkce volaná se dvěma parametry, prvním je žádaný úhel, na který se má zásobník otočit (úhly všech pěti finitních úhlů jsou uloženy v poli), a druhým parametrem je počet kroků do uplynutí timeoutu pro otočení do dané pozice.

Pohyb probíhá do doby, než absolutní rozdíl aktuálního úhlu a úhlu cíle otočení je menší než 1°. Ve chvíli, kdy tato podmínka není splněna ani nedojde k vypršení timeoutu, dojde k pohybu. Rychlost otáčení je regulována dobou držení aktivní hodnoty pinu STEP podle rozdílu aktuálního a konečného úhlu, tato doba je vynesena do grafu 4.2.2 (graf zobrazuje velikost doby zpoždění v simulovaném příkladu otočení ze slotu 0 do slotu 1, čím vyšší je hodnota zpoždění, tím pomaleji se motor otáčí). Lze vidět nejdříve pomalý rozjezd a poté skokový nárůst rychlosti. V blízkosti konečného úhlu dojde opět k prodloužení času prodlevy sepnutí pinu STEP, tudíž ke zpomalení otáčení.

Hodnoty byly experimentálně navrženy, z důvodu plynulého rozjezdu a zastavení bez překmitů. Řešení v kódu proběhlo bez nadbytečných knihoven.

Průběh zrychlení a zpomalení otáčení v závislosti na rozdílu úhlů natočení



Aktuální úhel je ověřován po každém odeslaném příkazu kroku pomocí rovnice 4.2, kde maximální hodnota převodníku byla určena z rovnice 2.17.

$$\text{Aktuální úhel} = \frac{\text{ADC hodnota senzoru}}{\text{ADC max hodnota}} \cdot 360^\circ = \frac{\text{ADC hodnota senzoru}}{375} \cdot 360^\circ \quad (4.2)$$

4.2.3 Způsob komunikace

Každá funkce při svém zavolání zapisuje do stavového registru aktivitu zásobníku, tu lze následně vidět po přečtení registru, zároveň tento aktivní stav zamezuje aktivaci částí kódu, kde by mohlo dojít ke kolizi aktivovaných funkcí (např. otočení a zároveň zastavení zásobníku).

Vykonání funkcí jako *move(int, int)* nebo *deal w comm()* je kontrolováno pro možnou chybu v průběhu vykonávání, například v případě, kdy dojde k chybě při otáčení a není dosaženo cílového úhlu. Je detekována chyba, která oznámí, že slot dosažen nebyl, a dojde k pohybu na poslední dosaženou pozici. Tímto způsobem se zásobník autonomně snaží zachovat svou funkčnost i ve chvíli, kdy například pohyb na žádanou pozici není terénem možný.

Funkce *recieve data()* přečte zprávu z I2C kanálu jen pokud není zásobník aktivní. Následně je zpráva uložena a ve smyčce *loop()* se po kontrole aktuální pozice a možných sepnutých tlačítek provede „vyhodnocení“ zprávy funkcí *deal w comm()*. Tato kontrola je implementována z důvodu, aby zásobníku nepřišla například zpráva „stůj na místě“ ve chvíli, kdy by zrovna narazil na kámen a nebyl ve své zadané poloze.

Funkce *send data()* se zavolá při žádosti o odpověď z nadřazeného mikropočítače funkcí *Wire.OnRequest()*, funkce se stará o zakódování aktuálních informací o stavech zásobníku do zprávy popsané v kapitole 3.2.

Při měření rychlosti odpovědi bylo zjištěno, že rychlost dosahuje 5 ms [16], což je oproti zbylým dvěma sub-komponentům vrtacího přípravku o dva řády pomalejší [16]. Řešení tohoto problému by bylo mít informace připravené dopředu (například řešením této operace ve smyčce *loop*, to by ovšem znamenalo používat data se zpožděním okolo 100 ms (doba zpoždění běhu smyčky). Zároveň zásobník není funkčně ani bezpečnostně kritický, proto jsem zůstal u kódování aktuálních informací až ve chvíli vznesení požadavku od nadřazeného mikropočítače

Funkce *deal w comm()* vyhodnotí podmínkou v switch-case struktuře, který z požadavků přišel:

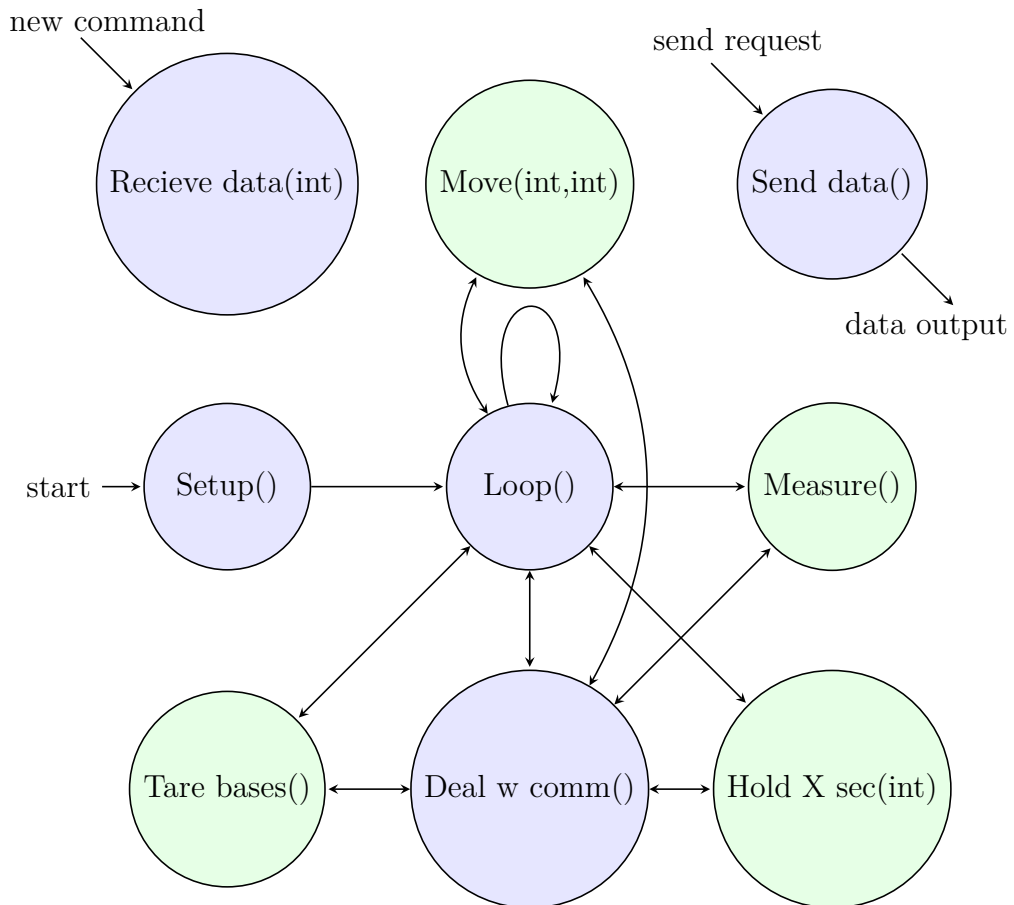
- tare váhy
- měření váhy
- pohyb na pozici 0 až 4
- vynulování chyb a stavů zásobníku

Po úspěšném i neúspěšném vyhodnocení je číslo příchozího příkazu vymazáno a zásobník je schopný vykonat další úkony.

4.3 Stavový automat

Změnu stavů v kódu lze vidět na obrázku stavového automatu 4.1, zeleně vybarvené jsou uzavřené funkce, které konají viditelnou činnost jako pohyb nebo měření, modře vybarvené jsou stavy volající zmíněné funkce, tyto stavy zároveň zaručují běh kódu, kontrolují provedení funkcí podle hodnot které funkce vracejí.

Modré stavy Recieve data(int) a Send data() nejsou s ostatními stavy spojeny, jsou volány z nadřazeného mikropočítače, a jen zapisují data do registru mikrokontroléru, nebo z něj data čtou.



Obr. 4.1: Obrázek stavového automatu

5 Testování a měření výrobku

Testování probíhalo na druhé verzi osazené základové desky, byla změřena funkčnost implementovaných komponentů a jejich přesnost k teoretickým výpočtům a konceptům.

5.1 Vážení

Původní koncept počítal s dvěma váhovými senzory, pro možnost zpětné vazby o vzorkem obsazeném slotu, to bylo následně zavrhnuto z níže uvedených důvodů. Koncepte s jediným váhovým senzorem byla následně implementována, otestována a je využita na finálním výrobku.

Pro zjištění maximální hmotnosti bylo nutné změřit hmotnost jednotlivých komponent zásobníku, ty jsou zde vypsány do tabulky 5.1. Součet "mrtvé" hmotnosti zavěšené na váhovém senzoru je 752 g, k této hmotnosti byla připočtena rezerva 248 g, z důvodu možnosti rozkmitání zásobníku jízdou roveru, či nárazu do objektu pod ním. Maximální hmotnost byla určena na 2000 g, při jejichž překročení hlásí zásobník chybu (varování) o přetížení.

Měření hmotnosti probíhalo na váze Soehnle Art.-No.:65105, max load 5000 g.

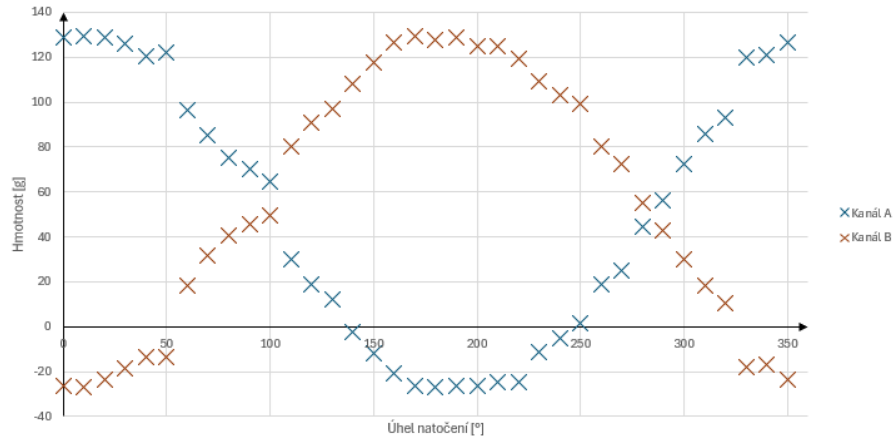
Objekt	Hmotnost [g]
Kalíšek	55
Váhový senzor Vishay 1024	300
Krokový motor	302
Tělo zásobníku	166
Spojovací materiál	64
Celková hmotnost	1052
Hmotnost na váhovém senzoru	752

Tab. 5.1: Hmotnosti jednotlivých komponent

5.1.1 Verze s dvěma váhovými senzory

Konstrukce verze se dvěma váhovými senzory lze vidět na obrázku 2.1, bylo zde využito dvou levných váhových senzorů "YZC-131 3 kg" kdy se výsledná hmotnost počítala ze součtu zatížení jednotlivých senzorů. Zde se projevila nevhodná volba těchto levných senzorů, kdy se odchylka i vyváženého systému (byl naplněný slot 1 a slot 4 viz. obrázek A.7) byla až 10 g, zde se projevily chyby jednotlivých senzorů i následné sčítání jednotlivých excentricky zatížení váhových senzorů. Projevení těchto

vlastností lze vidět v grafu č. 5.3 zde bylo do jednoho slotu zásobníku umístěno závaží o hmotnosti 100 g a jednotlivé křivky zobrazují zatížení váhového senzoru A a B v závislosti na natočení zásobníku (0 ° až 350 °). Jejich součet se ale málokdy blížil cílené hodnotě 100 g, což lze vidět v grafu č. 5.2. Z těchto důvodů a byla zvolena změna zapojení na jediný váhový senzor s méně netradičním způsobem zapojení.

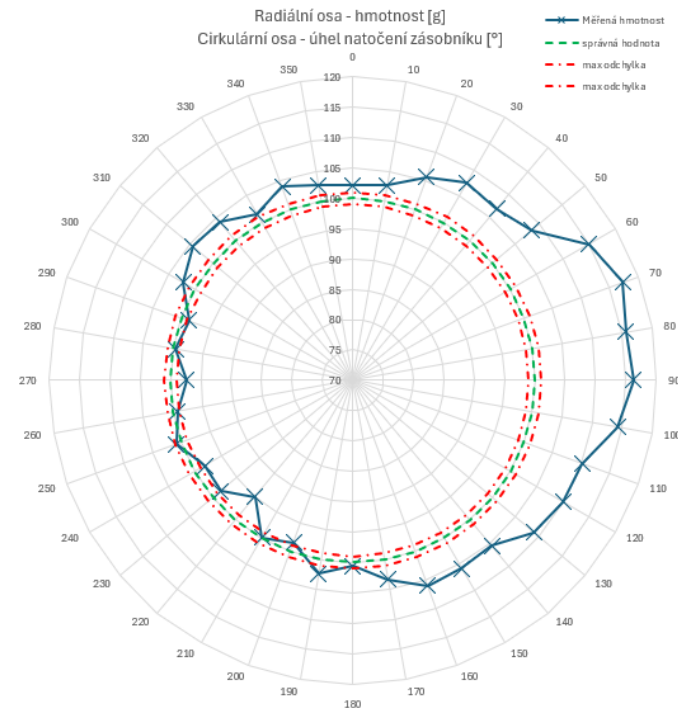


Obr. 5.1: Zatížení měřených kanálů v závislosti na otočení

Součtem vah z obou snímačů bylo zamýšleno zjistit finální váhu, zároveň bylo zamýšleno zjistit, který ze slotů je zatížený. Tento způsob se ovšem ukázal jako nevhodný kvůli příliš vysokým odchylkám v řádu desítek procent, skutečný součet měřených hodnot váhy podle úhlu natočení lze vidět s porovnáním ke správné hodnotě viz graf 5.2.

Při měření byl slot 4, slot pod váhovým senzorem, viz obrázek A.7. S Takto vyoseným zatížením zásobníku bylo prováděno měření, jde o nejhorší možný způsob, kdy je testován parametr váhového senzoru "platform size", při rovnoměrnějším zatížení zásobníku dochází k nižším odchylkám. Ovšem pro všestrannost použitelnosti zásobníku nelze tento měřený stav zatížení opominout. Na grafu lze vidět modře změřený průběh odečtené váhy ku referenčnímu (ideálu), zelený průběh s hodnotou 100,007 g (změřených váhou RADWAG Wagi Elektroniczne, Model AS 310.R2, S/N 488162) a k němu vztážené červeně čerchované hranice odpovídající maximální odchylce (tzn. 1 %). Následně v grafu 5.4 měřená hmotnost byla ověřena opět na váze RADWAG na 200,058 g.

Ze změřených dat lze vidět, že konstrukci a zároveň způsob měření pomocí dvou váhových senzorů nelze využít, odchylka se blíží 20 % žádané hodnoty, viz. graf přílohy A.8, z těchto důvodů nebylo pokračováno v měření a byl zvolen klasičtější způsob měření, pomocí jediného váhového senzoru "YZC-131 3 kg".



Obr. 5.2: Změřená hmotnost 100 g pomocí váhového senzoru YZC-131 3 kg

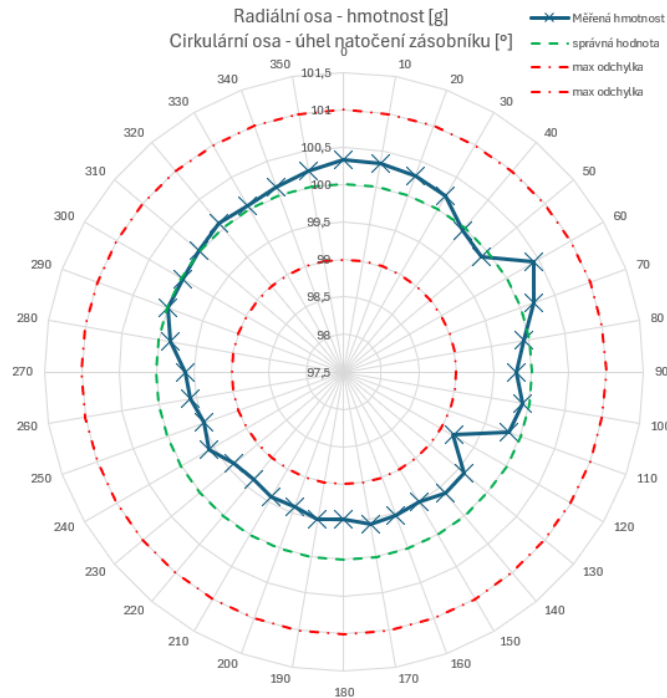
5.1.2 Verze s jedním váhovým senzorem

Pro zapojení jediného váhového senzoru byl nejdříve také zvolen snímač "YZC-131 3 kg" se kterým se následně znatelně projevily jeho nedostatečnosti v oblasti velikosti měřené platformy, která z mých měření nedosahuje ani hodnot 120 x 120 mm. Z tohoto důvodu byl zvolen přesnější snímač.

Následující průběhy byly měřeny podle konstrukce 2.17 s využitím kanálu A digitálně číslicového převodníku (kanál A má vyšší rozlišení). Využitý senzor Tedeo-Huntleigh 1042, s rozměry měřicí platformy 400 mm x 400 mm byl následně testován ve stejných podmínkách, kdy charakteristika odchylky v závislosti na natočení pro hmotnost 100 g vypadá následovně - viz graf 5.3. Opět zde vkládám referenční červené průběhy, za které by se hmotnost neměla dostat (v rozmezí 1 g) a průběh zelený, představující ideální hmotnost (v tomto případě 100 g)

Následně byla změřena charakteristika pro předpokládanou nejvyšší váhu odebraných vzorků, stanovenou na čtyřnásobek minimální hodnoty. Měření bylo provedeno na stejné konstrukci jako vážení hmotnosti 100g (2.17). Změřenou směrovou charakteristiku váhy lze vidět na grafu 5.4. Modrý průběh znázorňuje měřená data, dva červené průběhy ohraničují limit přesnosti na 1 g, zelený průběh znázorňuje ideální (konstantní) hmotnost pro každý úhel natočení.

Ze změřených průběhů byly stanoveny odchylky absolutní a relativní, které lze vidět v příloze 2.1. Příklad výpočtu vypadal následovně:



Obr. 5.3: Změřená hmotnost 100 g pomocí váhového senzoru Tedeo-Huntleigh 1042 3 kg

Výpočet absolutní odchylky pro hmotnost 100,007 g, při natočení 180°:

$$Abs. odchylka = hmotnost - m_{ref} = 99,46 - 100,007 = -0,54 \text{ g} \quad (5.1)$$

Výpočet relativní odchylky pro hmotnost 100,007 g, při natočení 180°:

$$Rel. odchylka = \frac{Abs. odchylka}{m_{ref}} \cdot 100 = \frac{-0,54}{100,007} \cdot 100 = -0,54 \% \quad (5.2)$$

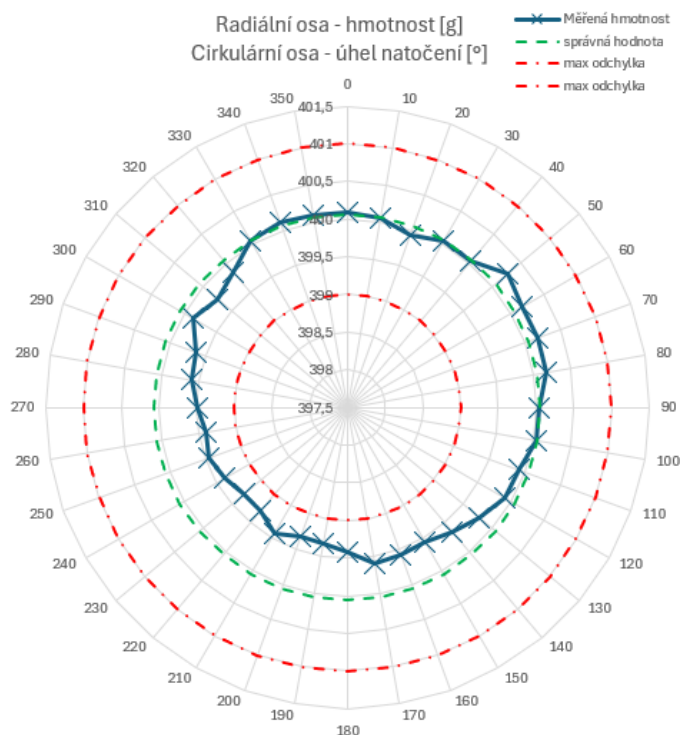
Průměrná hodnota relativní odchylky pro měření 100 g:

$$\overline{Rel. odchylka} = \frac{\sum Rel. odchylka}{36} = -0,1845 \% \quad (5.3)$$

Průměrná hodnota relativní odchylky pro měření 400 g:

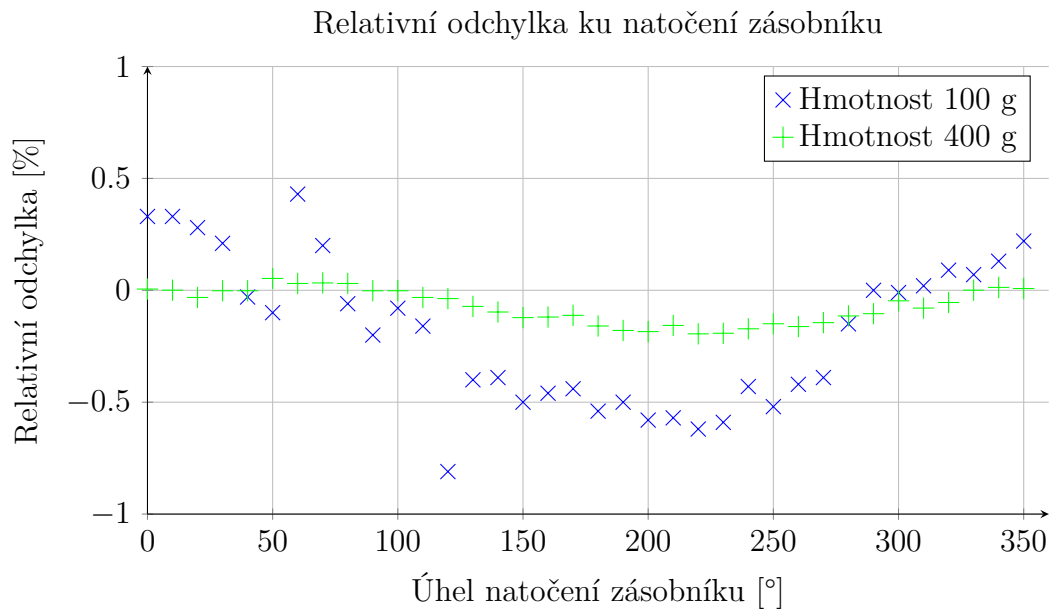
$$\overline{Rel. odchylka} = \frac{\sum Rel. odchylka}{36} = -0,0709 \% \quad (5.4)$$

Na následujícím grafu 5.1.2 lze vidět změnu relativní odchylky pro jednotlivé měřené zatížení zásobníku. K nejvyšším odchylkám, jak lze vidět i z polárních grafů, dochází při natočení zásobníku o $200^\circ \pm 50^\circ$. V tomto stavu se měřené závaží nachází nejdále od středu váhového senzoru, tzn se nejvíce blíží okraji výrobcem definované plochy platform size. Závaží se při natočení o 200° nachází 170 mm daleko od středu váhového senzoru, blíží se tedy k limitu, ovšem nepřekračuje ho.



Obr. 5.4: Změřená hmotnost 400 g pomocí váhového senzoru Tedeia-Huntleigh 1042 3 kg

Dalším postřehem z měření je menší relativní (a náhodná) odchylka pro vyšší měřené hmotnosti viz graf 5.1.2. V případě, že by bylo nutné měřit přesně i nižší hmotnosti (10 g až 50 g), bylo by nutné pokračovat ve zdokonalování měření. Hmotnostní limit odebraných vzorků soutěže je ovšem stanoven na 100 g, a podle potřeb testování různých hornin lze předpokládat, že spodní hranice hmotnosti se při misi na polygonu přípravků držet nebude. Z těchto důvodů jsem nepokračoval v dalším vývoji vážící části práce.



5.2 Měření motoru

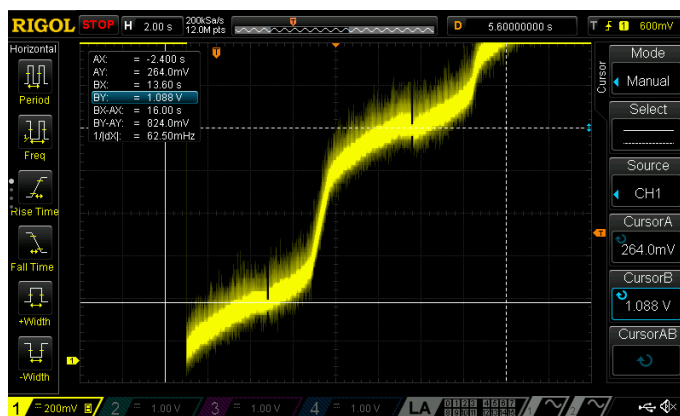
Měření rotace motoru probíhalo na analogovém výstupu rotačního magnetického enkodéru, kdy hladina napětí na následujících grafech odpovídá úhlu natočení těla zásobníku.

Nejdříve byl změřen průběh hladiny napětí pro lineární rychlost motoru při otáčení, tyto průběhy jsou vloženy do přílohy pro porovnání s aktuálním řešením a také pro svou jednodušší rozlišitelnost poloh, viz. graf kompletní rotace A.10, graf se simulací překážky v cestě A.11.

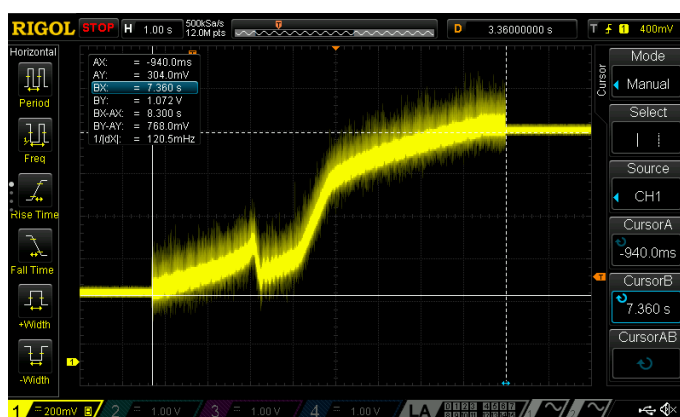
Následující průběh 5.5 byl změřen při pohybu z aktivní polohy 0 do polohy 1, tudíž jde o rotaci 90° , jak lze vidět na obrázku A.7, pohyb zde na obrázku odpovídá změně hladiny z 264 mV do 1,088 V (viz kurzory AY a BY). Pohyb se skládá ze 3 lineárních částí pro zrychlení a 3 lineárních částí pro zpomalení, které kombinací vytvářejí plynulý pohyb. Změřen byl i průběh hladiny napětí pro kompletní otočení o 360° , ten lze vidět v příloze A.12.

Kód byl navržen tak, aby se zásobník byl schopný dostat přes slabou překážku, tento průběh byl simulován na průběhu 5.6. Graf byl změřen na pinu analogového výstupu Hallova senzoru, lze tedy vidět, že zásobník nárazem do překážky poskočí a následně se znovu pokusí ji překonat a dostane se do žádané polohy. V případě že překážka nezmizí, kód zásobníku je navržen tak, aby se tělo vrátilo do poslední známé pozice, tento průběh byl simulován a jde vidět v příloze A.13.

Měření spotřeby motoru při rotaci bylo změřeno - viz tabulka 5.2. Spotřeba motoru je odečtena z celkové spotřeby desky při otáčení. Spotřeba desky v takovou chvíli je 555 mA, což odpovídá 6,2715 Wh.



Obr. 5.5: Změřená analogová hladina hallového snímače při otočení o 90°



Obr. 5.6: Simulace odstrčitelného objektu v cestě pro otáčení motoru

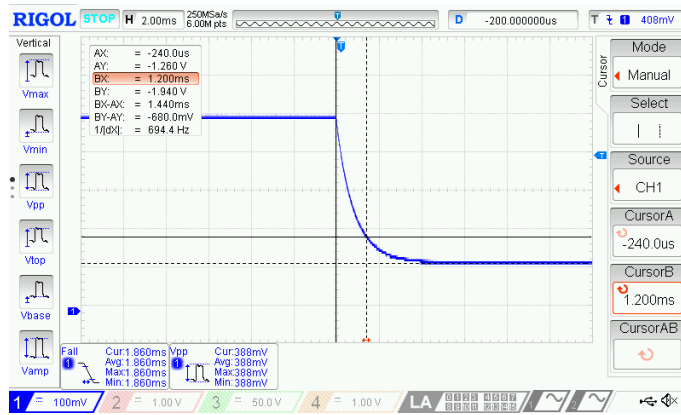
5.3 Manuální ovládání

Efekt dolní propusti implementované u každého z tlačítek (zapojení viz. 2.13) byl změřen - na grafu 5.7 lze vidět, že ke kmitání u tlačítek nedochází, k poklesu o 70,7 % dojde plynule za 1,44 ms. (což odpovídá době vybití kondenzátoru)

Proudy do LED diody byly měřeny (nepřímo přes úbytky napětí na rezistoru) a již započítány při výpočtech komponent v kapitole 2.3.1

5.4 Spotřeba komponent výrobku

Z důvodu omezeného zdroje napětí na roveru (baterie musí vystačit na nejméně "sub-task"soutěže ERC) byla změřena spotřeba, která byla přepočtena na spotřebu za hodinu pro lepší představu. Měření proudu pobíhalo na Multimetru ProsKit MT-1710; S/N 091045116, na rozsahu 10 A. Spotřeba je brána vzhledem ke vstupu energie do desky plošného spoje, z toho důvodu je napětí výpočtů spotřeby stejné



Obr. 5.7: Pokles o 70,7 % maximální hodnoty na vstupu digitálního pinu

(11,3 V) a byl odečítán proud při spínání a vypínání jednotlivých funkcí.

Vzorový výpočet spotřeby pro aktivní motor:

$$E = U \cdot I \cdot t = 11,3 \cdot 0,555 \cdot 1 = 6,2715 \text{ Wh} \quad (5.5)$$

Komponent	Spotřeba [mA]	Spotřeba [Wh]
Driver a krokový motor	555	6,2715
Převodník hx711	14	0,1582
Hall senzor	7	0,0791
Arduino a motherboard	17	0,1921
LED dioda	17	0,2034
Spotřeba v klidovém stavu	38	0,4294
Spotřeba při otáčení	593	6,7009
Maximální spotřeba	610	6,893

Tab. 5.2: Spotřeby komponent

Závěr

Cílem bakalářské práce byl návrh zásobníku pro potřeby Brno Mars Rover spolku tak, aby splňoval požadavky na soutěž ERC. Pro návrhu Sub-modulu zásobníku byly vytvořeny prototypy konstrukce a zapojení, po otestování funkcí se zbylými moduly vrtacího přípravku proběhly úpravy a zásobník je nyní schopný plnit všechny na něj dané požadavky.

Vrtací úloha European Rover Challenge, pro kterou je zásobník vytvořený, obsahuje úkol na odebrání vzorku z vrtáku roveru (vysypáním do kelímku), na to byl navržený rotační zásobník s kelímky na jednotlivé vzorky. Zásobník je navržen tak, že nijak nepřekáží během vrtání, kdy je schovaný pod torzem roveru (tím zároveň chrání vzorky již odebrané proti vniknutí objektu shora). Dalším požadavkem je zvážení odebraných vzorků, to je řešeno váhovým senzorem Tedeo-Huntleigh 1042 s tím, že program umožňuje měřit celkovou váhu, nebo pouze váhu jednotlivých vzorků, podle příchozích příkazů do mikrokontroléru zásobníku.

Jednotlivé komponenty byly propojené navrženými součástmi vytištěnými na 3D tiskárně. Konstrukce zásobníku je zavěšena na váhovém senzoru s tenzometry, který váží změnu hmotnosti celého zásobníku s motorem vůči předem změřené referenci. Zásobník obsahuje 4 sloty na vzorky, pátý slot je volný pro možnost sjetí vrtačky k půdě. Zásobníkem otáčí krokový motor, který bere zpětnou vazbu z otočení magnetu na ose motoru, snímaného Hallovým senzorem. Tímto způsobem bylo možné zásobník naprogramovat pro například volbu kratší trasy otočení, nebo detekci překážek v cestě zásobníku.

Sub-modul zásobníku byl realizován na desce plošného spoje, po připojení k napájecímu napětí je mikrokontrolér schopný řídit zásobník pomocí povelů z tlačítek. Pro podrobné informace lze s deskou komunikovat přes I2C. Tento způsob komunikace bude využíván přednostně, kdy mikrokontrolér zásobníku bude přijímat příkazy z mikropočítače roveru, a odpovídat mu jeho aktuálními stavy jako je poslední zvážená hmotnost nebo aktuální chybové hlášky.

V aktuální konfiguraci zásobník plní všechny požadavky soutěže a je schopný vyřešit jednoduché chyby na které při svém fungování narazí, a ty které nevyřeší, oznámí nadřazenému mikropočítači. Přípravek uskladní poskytnutý vzorek, zváží ho, odklídí se z cesty vrtáku a umožní tak další vrtání, po kterém lze uložit a zvážit vzorek odebraný z jiného místa.

Návrh původně počítal s využitím dvou váhových senzorů, pro možnost zpětné vazby o plném slotu zásobníku. Během měření dvou váhových senzorů byla ovšem zjištěna jejich nepřesnost v závislosti na excentrickém zatížení hmotnosti. Tyto nedostatky byly diskutovány v kapitole měření a z důvodů odchylek až 17 % bylo rozhodnuto využít jediný robustnější váhový senzor, ten již vyhovoval požadavkům

na přesnost i při zatížení mimo centrum senzoru. Při tomto měření (hmotnosti 100 g) vyšla nejvyšší odchylka 0,7 % což odpovídá požadované přesnosti měření na 1 g.

Při konstrukci a měření byly opakovaně nalezeny nedostatky levných senzorů, které byly použity z důvodu okupace sběrnice I2C komunikací s mikropočítačem. Pro další možné iterace bych volil jinou komunikaci s nadřazeným mikropočítačem (UART nebo SPI) pro možnost využití širšího spektra senzorů na trhu. Nedostatky senzorů s jiným než I2C výstupem se projevily při volbě převodníku i hallova senzoru, kdy jeho analogová hodnota šuměla a bylo nutné zvolit přesnější hladinu referenčního napětí z důvodu závislosti senzoru na ní.

Práce na subsystému zásobníku je dokončená, jedinou další plánovanou iterací je obsáhnout navrženou desku k ostatním schémátům vrtacího přípravku do jediného PCB, které bude následně instalováno k přípravku a na samotný Mars Rover.

Literatura

- [1] Mezinárodní evropská soutěž vysokých škol v realizaci Mars roverů. [online] <https://roverchallenge.eu/>. [cit. 2024-12-13] Krakow, 2024
- [2] European Rover Challenge [online] *Dokumentace pravidel pro 10. ročník soutěže Evropských mars roverů*. Dostupné z:<https://drive.google.com/file/d/1HreJgDplzvvgiU1uJKm9kM7ThbswRlnF/view> [cit. 2024-11-03] Krakow, 2024
- [3] THERMAL CONDUCTIVITY OF THE MARTIAN REGOLITH AT THE INSIGHT LANDING SITE FROM HP³ ACTIVE HEATING EXPERIMENTS. M. Grott, T. Spohn, J. Knollenberg, C. Krause, S. Nagihara, P. Morgan, S. Piqueux, N. Müller, M. Golombek, J. Murphy, M. Siegler, S. King, T.L. Hudson, C. Vrettos, S.E. Smrekar, W.B. Banerdt, German Aerospace Center (DLR), Berlin, Germany. [online] Dostupné z:<https://elib.dlr.de/141826/1/1237.pdf>. [cit. 2024-12-30]
- [4] Space and Planetary Environment Criteria Guidelines for Use in Space Vehicle Development, 1982 Revision Volume 1. Robert E. Smith and George S. West, Compilers George C. Marshall Space Flight Center, Alabama. [online] Dostupné z:<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19830010545/downloads/19830010545.pdf>. [cit. 2024-12-30]
- [5] Oriental Motor USA corp. [online], Výrobce krokových motorů *Typy konstrukce a stavů krokového motoru* Dostupné z:<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-basics.html>. [cit. 2024-11-09].
- [6] AISUWARYA, Ratna; AZMI RIYAN, Muhammad a EKA PUTRI, Rahmi. Design of Bicycle's Speed Measurement System Using Hall Effect Sensor. Online. Journal of Physics: Conference Series. 2019, roč. 1339, č. 1, s. 12018. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1339/1/012018>. [cit. 2024-11-03].
- [7] PRAX, Jakub. Využití sběrnice I2C pro komunikaci s externím zařízením. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. Dostupné z:<http://hdl.handle.net/11012/25416>. [cit. 2024-11.03]
- [8] Bellini, Alberto & Concari, Carlo & Franceschini, Giovanni & Toscani, Andrea. (2008). Mixed-Mode PWM for High-Performance Stepping Motors. Industrial Electronics, IEEE Transactions on. 54. 3167 - 3177. 10.1109/TIE.2007.905929. https://www.researchgate.net/publication/3219650_Mixed-Mode_PWM_for_High-Performance_Stepping_Motors. [cit. 2024-11-9].

- [9] NEPIVODA, Tomáš. Driver krokového motoru s podporou průmyslové komunikace. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2021. <https://dspace.vut.cz/items/f8939cdb-1d13-477c-9ba1-0f5c7d4f84c3>. [cit. 2024-11-12]
- [10] LastMinuteEngineers [online], využitý driver s popisem funkce Dostupné z:<https://lastminuteengineers.com/a4988-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/>. [cit.2024-12-13]
- [11] All about circuits [online] Dostupné z:<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-9/strain-gauges/>. [cit. 2024-12-13].
- [12] Texas Instruments [online] Dallas. Dostupné z:https://www.ti.com/lit/ab/slya034a/slya034a.pdf?ts=1731445219324&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F [cit. 2024-12-13]
- [13] Rohm Semiconductor [online] Kyoto, popis transilu pro ochranu obvodů Dostupné z:https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/applinote/discrete/diodes/selection_method_and_usage_of_tvs_diodes_an-e.pdf. [cit. 2024-12-13].
- [14] CUEMATH [online], popis metody nejmeních čtverců. Dostupné z:<https://www.cuemath.com/data/least-squares/>. [cit. 2024-12-22].
- [15] ŠLÍMA, Filip. Přípravek lineárního pohonu pro marsovský rover. Online, bakalářská práce. Adam LIGOCKI (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z:<https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168013>. [cit. 2025-05-08].
- [16] KŘÍŽ, Martin. Řídicí systém vrtné soustavy pro marsovský rover. Online, bakalářská práce. Adam LIGOCKI (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z:<https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168010>. [cit. 2025-05-08].
- [17] CUBLIFT china [online], Lifting & Weighing Expert *Typy a parametry váhových senzorů* Dostupné z:<https://www.cublifit.com/the-evolution-of-single-point-load-cells/>. [cit.2025-4-18].
- [18] Electricity and Magnetism [online], populárně naučné webové stránky *parametry a instalace váhových senzorů* Dostupné z:<https://www.electricity-magnetism.org/single-point-load-cell/>. [cit.2025-4.18].

- [19] Flintec Inc. [online], výrobce vah a inovátor jejich technologií *popis konstrukce single point váhových senzorů* Dostupné z:<https://www.flintec.com/learn/weight-sensor/load-cell/single-point>. [cit. 2025-4-18].
- [20] Arduino [online], Wire knihovna, Dostupné z:<https://docs.arduino.cc/language-reference/en/functions/communication/wire/>. [cit. 2025-4-21].
- [21] Arduino [online], knihovna pro modul HX711, Dostupné z:<https://docs.arduino.cc/libraries/hx711-arduino-library/>. [cit. 2025-5-6].

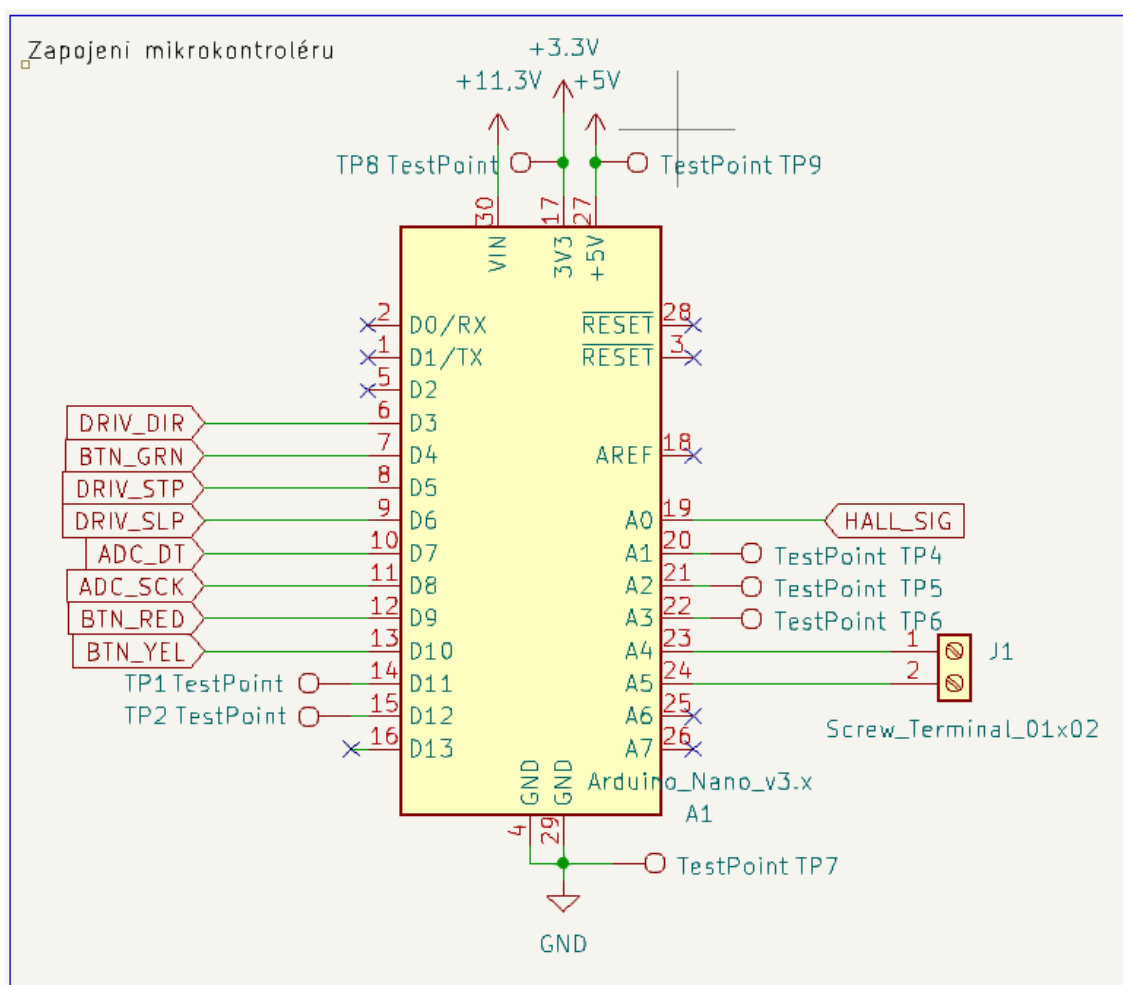
Seznam příloh

A	Schémata elektrického zapojení	55
A.1	Deska plošného spoje	55
A.1.1	Schéma	55
A.1.2	Deska Plošného Spoje	58
A.2	Pozice těla zásobníku	59
A.3	Vážení	59
A.4	Měření	63
B	Obsah elektronické přílohy	65

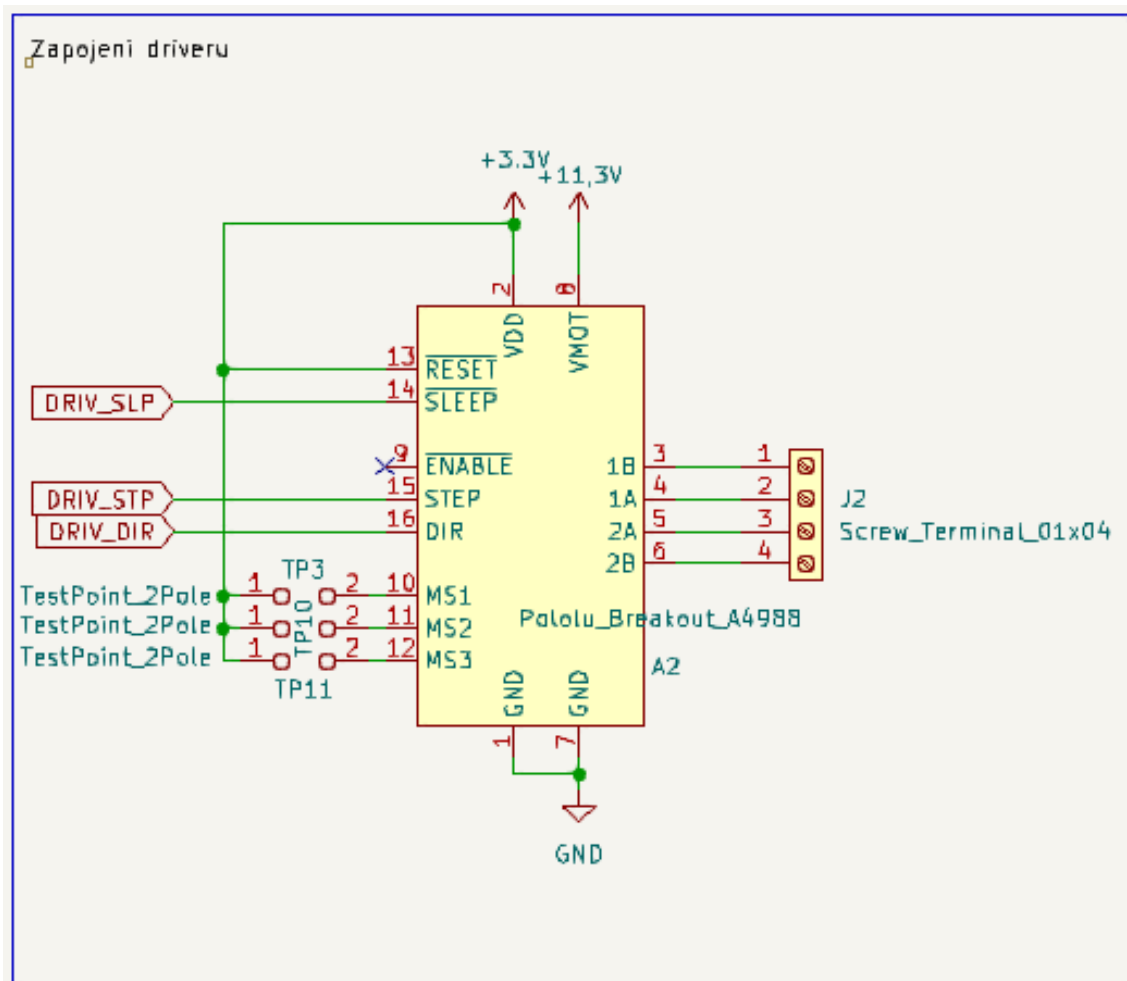
A Schémata elektrického zapojení

A.1 Deska plošného spoje

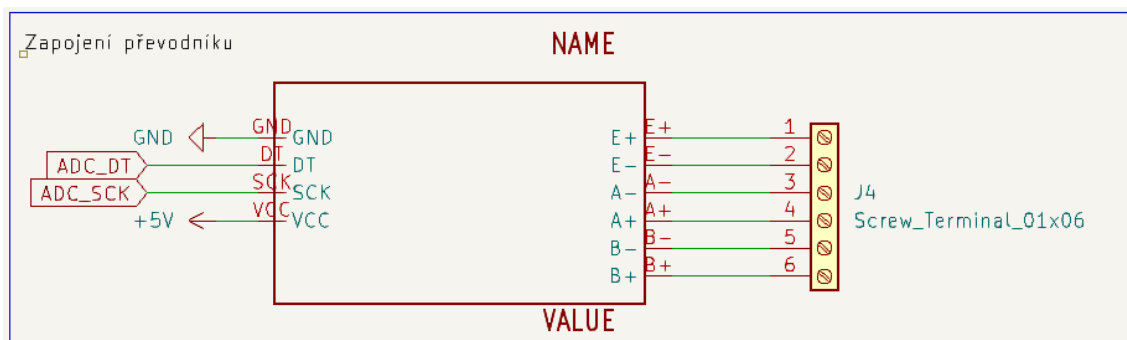
A.1.1 Schéma



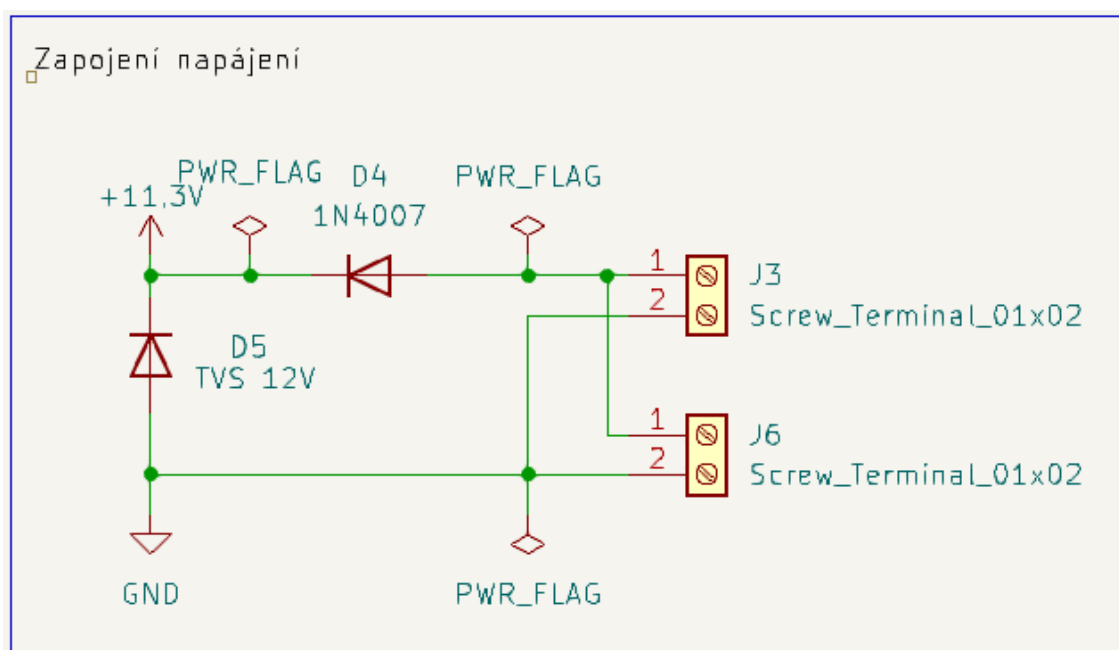
Obr. A.1: Schéma zapojení arduina



Obr. A.2: Schéma zapojení driveru

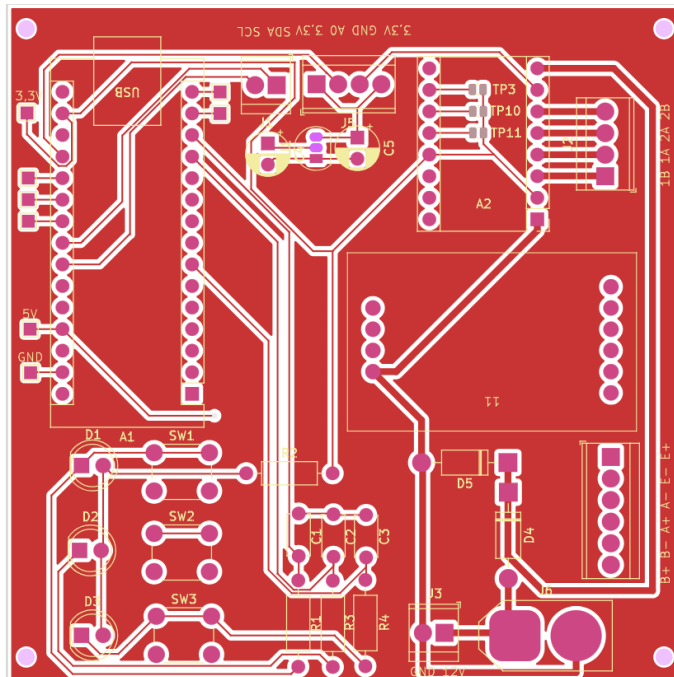


Obr. A.3: Schéma zapojení převodníku

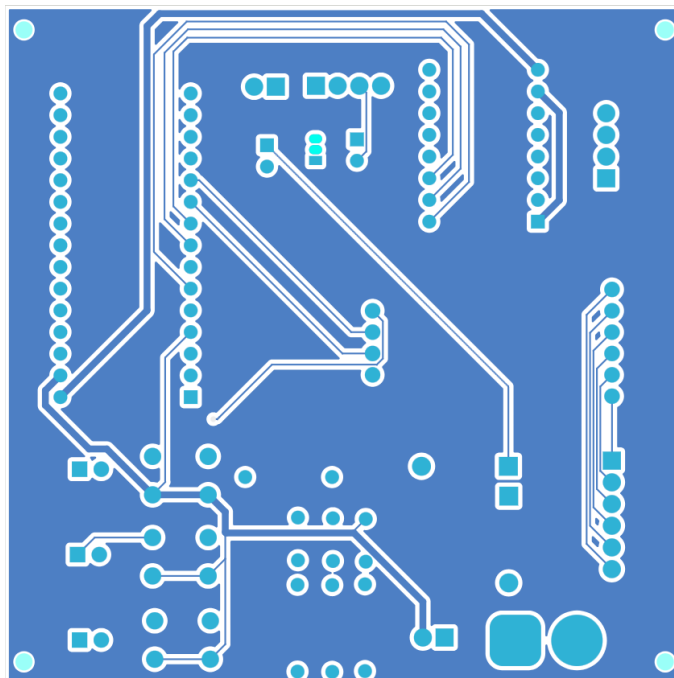


Obr. A.4: Schéma zapojení napájení a ochran

A.1.2 Deska Plošného Spoje

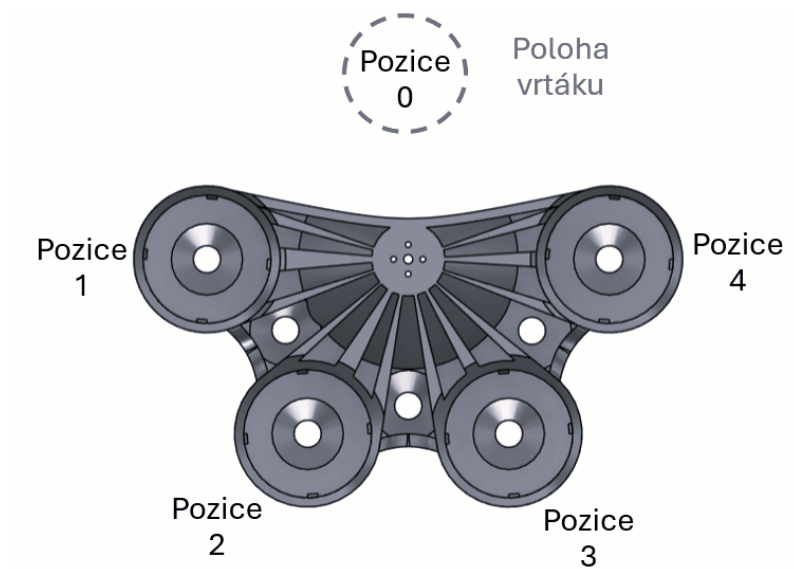


Obr. A.5: Deska plošného spoje Front



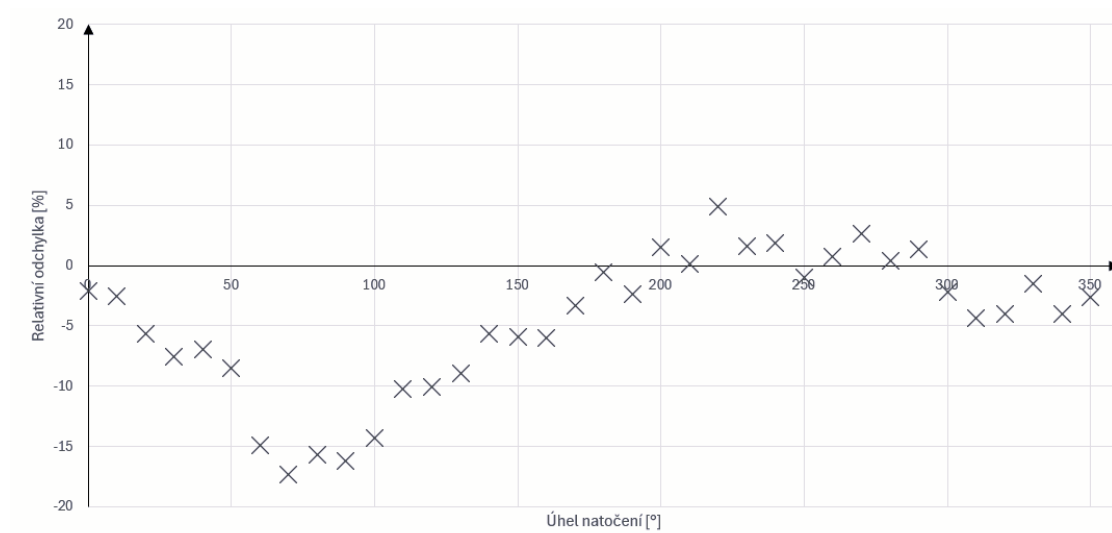
Obr. A.6: Deska plošného spoje Back

A.2 Pozice těla zásobníku



Obr. A.7: Vyznačení pozic zásobníku

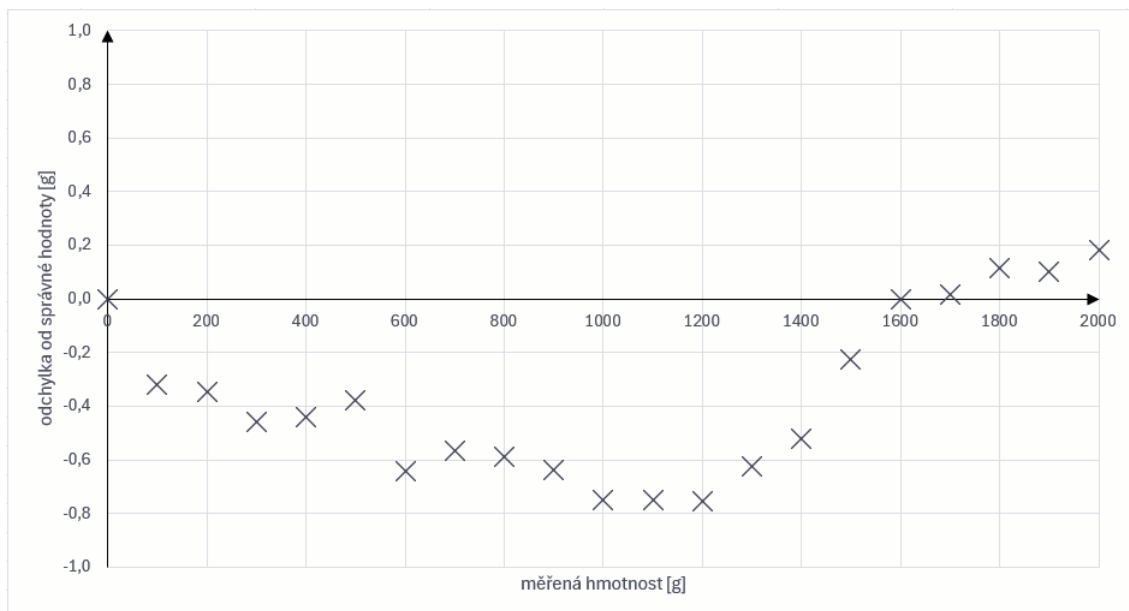
A.3 Vážení



Obr. A.8: Relativní odchylka měření dvou váhových senzorů YZC-131 3 kg

váha [g]	ADC A [-]	ADC B [-]	kanál A [g]	Kanál B [g]
0	-25	15	-0.02	0.02
100	78197	38321	48.72	49.90
200	153443	76992	95.60	100.25
300	234809	115867	146.30	150.87
400	330160	154795	205.71	201.56
500	416701	193273	259.63	251.66
600	503913	231953	313.96	302.02
700	580284	270381	372.13	356.81
800	673396	308880	421.03	406.74
900	756006	347023	471.03	456.02
1000	843985	385334	525.85	501.75
1100	919363	422339	572.95	551.09
1200	988609	459123	616.65	600.74
1300	1066546	499250	664.51	650.07

Tab. A.1: Naměřené hodnoty z převodníku s přepočtem na váhu při měření dvou váhových senzorů



Obr. A.9: Odchylka senzoru Tedeo-Huntleigh vůči aproximující přímce

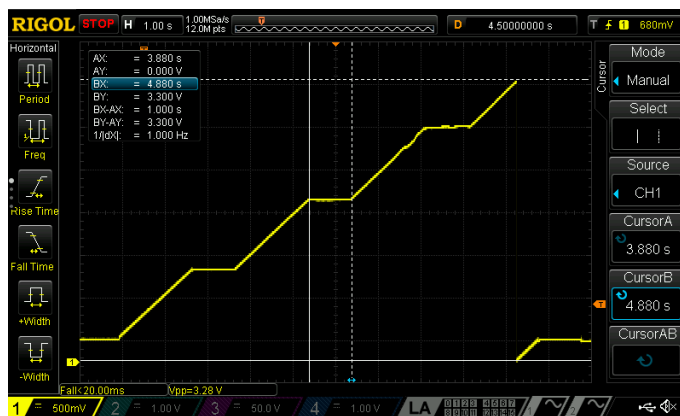
Tab. A.2: Přehled měření hmotnosti při různém natočení zásobníku

Úhel [°]	Hmotnost [g]	Abs. odchylka [g]	Rel. odchylka [%]
0	400,08	0,022	0,0055
10	400,06	0,002	0,0005
20	399,93	-0,128	-0,0320
30	400,05	-0,008	-0,0020
40	400,05	-0,008	-0,0020
50	400,27	0,212	0,0530
60	400,18	0,122	0,0305
70	400,19	0,132	0,0330
80	400,18	0,122	0,0305
90	400,05	-0,008	-0,0020
100	400,05	-0,008	-0,0020
110	399,93	-0,128	-0,0320
120	399,91	-0,148	-0,0370
130	399,77	-0,288	-0,0720
140	399,67	-0,388	-0,0970
150	399,57	-0,488	-0,1220
160	399,58	-0,478	-0,1195
170	399,61	-0,448	-0,1120
180	399,42	-0,638	-0,1595
190	399,34	-0,718	-0,1795
200	399,32	-0,738	-0,1845
210	399,43	-0,628	-0,1570
220	399,28	-0,778	-0,1945
230	399,29	-0,768	-0,1920
240	399,37	-0,688	-0,1720
250	399,46	-0,598	-0,1495
260	399,41	-0,648	-0,1620
270	399,48	-0,578	-0,1445
280	399,60	-0,458	-0,1145
290	399,64	-0,418	-0,1045
300	399,87	-0,188	-0,0470
310	399,74	-0,318	-0,0795
320	399,84	-0,218	-0,0545
330	400,06	0,002	0,0005
340	400,11	0,052	0,0130
350	400,09	0,032	0,0080

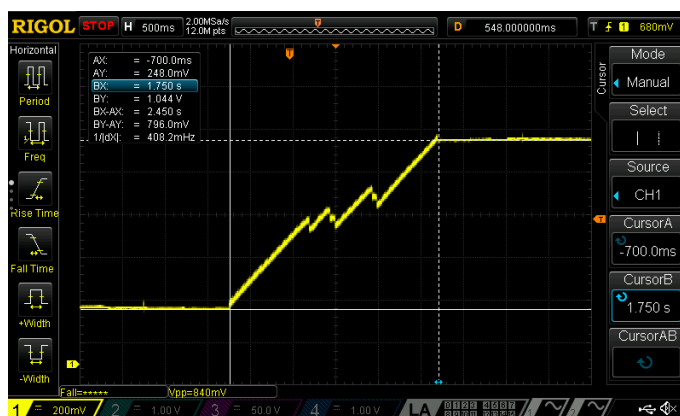
Tab. A.3: Přehled měření hmotnosti váhy A při různém natočení zásobníku

Úhel [°]	Hmotnost [g]	Abs. odchylka [g]	Rel. odchylka [%]
0	100,33	0,33	0,3300
10	100,33	0,33	0,3300
20	100,28	0,28	0,2800
30	100,21	0,21	0,2100
40	99,97	-0,03	-0,0300
50	99,90	-0,10	-0,1000
60	100,43	0,43	0,4300
70	100,20	0,20	0,2000
80	99,94	-0,06	-0,0600
90	99,80	-0,20	-0,2000
100	99,92	-0,08	-0,0800
110	99,84	-0,16	-0,1600
120	99,19	-0,81	-0,8101
130	99,60	-0,40	-0,4000
140	99,61	-0,39	-0,3900
150	99,50	-0,50	-0,5000
160	99,54	-0,46	-0,4600
170	99,56	-0,44	-0,4400
180	99,46	-0,54	-0,5400
190	99,50	-0,50	-0,5000
200	99,42	-0,58	-0,5800
210	99,43	-0,57	-0,5700
220	99,38	-0,62	-0,6200
230	99,41	-0,59	-0,5900
240	99,57	-0,43	-0,4300
250	99,48	-0,52	-0,5200
260	99,58	-0,42	-0,4200
270	99,61	-0,39	-0,3900
280	99,85	-0,15	-0,1500
290	100,00	0,00	0,0000
300	99,99	-0,01	-0,0100
310	100,02	0,02	0,0200
320	100,09	0,09	0,0900
330	100,07	0,07	0,0700
340	100,13	0,13	0,1300
350	100,22	0,22	0,2200

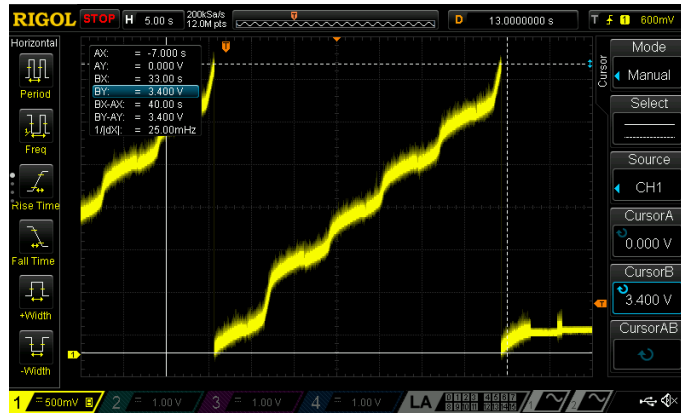
A.4 Měření



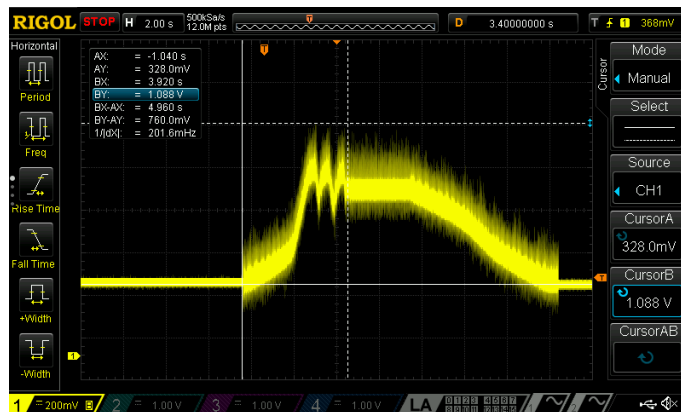
Obr. A.10: Změřená analogová hladina Hallového snímače při otočení o 360°, konstantní rychlost



Obr. A.11: Simulace objektu v cestě pro otáčení motoru, konstantní rychlost



Obr. A.12: Změřená analogová hladina hallového snímače při otočení o 360°



Obr. A.13: Simulace nepřekročitelného objektu v cestě otáčení motoru s návratem na původní pozici

B Obsah elektronické přílohy

Zde je struktura souborů na přiloženém FLASH disku, který je součástí fyzického výtisku práce.

Video_ukazka1.mp4 je video s demonstrací volání příkazů k zásobníku z nadřazeného mikropočítače s reakcí zásobníku na zmíněné příkazy (pohyb a vážení hmotnosti 100 g). Video_ukazka2.mp4 demonstruje reakci zásobníku při kolizi s objektem pod roverem, spolu s extrakcí kelímku se vzorky.

```
/. .....kořenový adresář přiloženého archivu
├── pcb ..... soubory DPS v programu KiCad 8.0
│   ├── libs ..... vytvořené soubory footprintů
│   ├── dps.kicad_pro
│   ├── dps.kicad_sch
│   └── dps.kicad_pcb
├── software ..... program mikrokontroléru pro Arduino IDE 2.3.2
│   └── storage_weighin
│       └── storage_weighin.ino
├── LaTeX ..... zdrojové textové soubory
│   ├── literatura.tex
│   ├── prilohy.tex
│   ├── reseni.tex
│   ├── uvod.tex
│   └── zaver.tex
├── 3D_tisk ..... adresář s navrženými modely por 3D tisk
│   ├── tělo_zásobníku.stl
│   ├── kalíšek.stl
│   ├── kryt_kabelu.stl
│   └── motor_mount.stl
├── BP_Vilém_Strachoň.pdf .....elektronická kopie práce
├── Video_ukazka1.mp4 .....video s odebráním vzorku a jeho vážením
└── Video_ukazka2.mp4 ..... video dalších funkcí zásobníku
```