



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH A KONSTRUKCE MAGNETORQUERU

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MAGNETORQUER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Sedlařík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Marek Sedlařík

ID: 203338

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a konstrukce magnetorqueru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti současných řešení magnetorquerů podle fyzikálního i elektrotechnického kontextu. Na základě získaných poznatků, navrhnete a zkonstruuje zařízení, které by simulovalo 2D řízení magnetorqueru v pozemských podmínkách. Zařízení naprogramujete a otestujete. Zadejintuje parametry magnetorqueru tak, aby bylo možné jej použít pro 3U CubeSat o maximální hmotnosti 4,5 kg. Systém je pouze testovací a není určen do vesmíru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

Konzultant: Ing. Václav Havlíček

doc. Ing. Lukáš Fucík, 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 problematikou řízení družice pomocí magnetického pole. Popisuje fyzikální princip magnetorqueru a jeho interakci s magnetickým polem Země. Obsahuje souhrn výhod a nevýhod jednotlivých řešení a jejich porovnání s alternativními řídicími systémy. Zahrnuje rešerši aktuálně dostupných zařízení. Seznamuje se standardizovanými nanosatelity CubeSat, jejich subsystemy a normami ECSS, jenž definují parametry zařízení pro vesmírné aplikace. Zabývá se problematikou geomagnetického pole, jeho fluktuací a popisuje vybrané oběžné dráhy planety Země. Hlavní část práce obsahuje popis a realizaci testovacího systému, který spočívá v návrhu testovací desky plošných spojů, programové části testovací desky a uživatelského rozhraní. Tato část zahrnuje také podrobný návrh a realizaci dvouosého magnetorqueru, včetně simulací.

Klíčová slova

Magnetorquer, CubeSat, stabilizační systém, ECSS, geomagnetické pole, magnetický moment

Abstract

This diploma thesis deals with the issue of satellite control using a magnetic field. Describes the physical principle of the magnetorquer and its interaction with the Earth's magnetic field. It contains a summary of advantages and disadvantages of individual solutions and their comparison with alternative control systems. Includes a search of currently available devices. It introduces the standardized CubeSat nanosatellites, their subsystems and ECSS standards, which define the parameters of equipment for space applications. It deals with the issue of the geomagnetic field, its fluctuations and describes selected orbits of the planet Earth. The main part of the work contains a description and implementation of the test system, which consists in the design of the printed circuit board, the program part of the test board and the user interface. This part also includes a detailed design and implementation of a two-axis magnetorquer, including simulations.

Keywords

Magnetorquer, CubeSat, stabilization system, ECSS, geomagnetic field, magnetic moment

Bibliografická citace

SEDLAŘÍK, Marek. Návrh a konstrukce magnetorqueru. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142454>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Petr Vyroubal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Marek Sedlařík
VUT ID studenta:	203338
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	Návrh a konstrukce magnetorqueru

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 jsem si 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.

V Brně dne 24. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 24. května 2022

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. MAGNETORQUER	11
1.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP FUNKCE.....	12
1.2 ROZDĚLENÍ MAGNETORQUERŮ.....	16
1.3 POROVNÁNÍ S ALTERNATIVNÍMI ŘÍDÍCÍMI SYSTÉMY	17
1.4 REŠERŠE DOSTUPNÝCH PRODUKTŮ.....	18
2. CUBESAT.....	20
2.1 SUBSYSTÉMY CUBESATU.....	22
2.2 GEOMAGNETICKÉ POLE.....	23
2.2.1 <i>Oběžné dráhy</i>	25
2.3 NORMY ECSS	27
2.3.1 <i>Úrovně technologické připravenosti (TRL)</i>	28
3. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	30
4. NÁVRH KONCEPTU.....	31
4.1 BLOKOVÉ SCHÉMA	31
4.2 NÁVRH TESTOVACÍ DPS	32
4.3 POUŽITÉ KOMPONENTY	33
4.4 PROGRAMOVÁ ČÁST ŘÍDÍCÍ DESKY	39
4.5 UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ.....	42
4.6 NÁVRH MOMENTOVÝCH CÍVEK	44
4.6.1 <i>Výpočet obvodové cívky bez jádra</i>	44
4.6.2 <i>Výpočet solenoidu</i>	52
4.6.3 <i>Simulace</i>	60
4.6.4 <i>Magnetorquery vhodné pro vesmírné aplikace</i>	63
4.7 TESTOVÁNÍ MOMENTOVÝCH CÍVEK.....	66
4.8 POROVNÁNÍ MOMENTOVÝCH CÍVEK S DOSTUPNÝMI PRODUKTY.....	67
4.9 FINANČNÍ ZHODNOCENÍ.....	68
5. ZÁVĚR.....	69
LITERATURA.....	71
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	74
SEZNAM PŘÍLOH.....	76

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: ISIS Magnetorquer Board (iMTQ). [2]	11
Obrázek 1.2: Hysterézní smyčka. [3].....	14
Obrázek 1.3: Závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole u jádra tvořeného feromagnetikem a paramagnetikem (cívka bez jádra).....	15
Obrázek 1.4: Ilustrace jednotlivých magnetorquerů.	17
Obrázek 2.1: Rozměry Cubesatu. [11].....	20
Obrázek 2.2: Graf závislosti vzdálenosti vynesného tělesa od povrchu Země na jeho životnosti. [13]....	21
Obrázek 2.3: Interakce Slunečního větru s magnetickým polem Země. [15]	24
Obrázek 2.4: Mapa celkové intenzity magnetického pole Země. [16].....	25
Obrázek 2.5: Oběžné dráhy.....	27
Obrázek 4.1: Blokové schéma řídicí desky magnetorqueru.....	32
Obrázek 4.2: Testovací DPS s osazenými součástky, moduly a momentovými cívkami.	33
Obrázek 4.3: Vývojová deska STM32F103C8T6 Bluepill.....	34
Obrázek 4.4: Magnetometr HMC5883L.....	34
Obrázek 4.5: Akcelerometr MPU6050.	35
Obrázek 4.6: Bezdrátový modul nRF24L01.....	35
Obrázek 4.7: H-můstek L298.....	36
Obrázek 4.8: Step-up měnič DIO6605B.....	37
Obrázek 4.9: Nabíječka Li-ion baterie XC6802.....	38
Obrázek 4.10: Stabilizátor napětí LD117AS33TR.	38
Obrázek 4.11: Uživatelské prostředí.....	42
Obrázek 4.12: Ovládání a konfigurace testovací desky.....	43
Obrázek 4.13: Graf závislosti plochy čtvercové cívky na magnetickém dipólovém momentu.	45
Obrázek 4.14: Graf závislosti magnetického dipólového momentu na průměru vinutého vodiče (Obvodová cívka).....	46
Obrázek 4.15: Graf závislosti spotřeby obvodové cívky při maximálním zatížení P na počtu závitů N.	46
Obrázek 4.16: Graf závislosti hmotnosti obvodové cívky na počtu závitů N.	47
Obrázek 4.17: Vnitřní plocha obvodové cívky.	48
Obrázek 4.18: Neuspořádané vinutí.....	49
Obrázek 4.19: Graf závislosti délky vodiče na počtu závitů obvodové cívky.	50
Obrázek 4.20: Závislost proudu I, spotřeby P a magnetického dipólového momentu m na přiloženém napětí U (obvodová cívka).....	52
Obrázek 4.21: Graf závislosti plochy solenoidu na magnetickém dipólovém momentu.	53
Obrázek 4.22: Graf závislosti magnetického dipólového momentu na průměru vinutého vodiče (solenoid).....	53
Obrázek 4.23: Graf závislosti spotřeby solenoidu při maximálním zatížení P na počtu závitů N.	54
Obrázek 4.24: Graf závislosti hmotnosti solenoidu na počtu závitů N.	54
Obrázek 4.25: Graf závislosti délky vodiče na počtu závitů solenoidu.	56
Obrázek 4.26: Závislost proudu I, spotřeby P a magnetického dipólového momentu m na přiloženém napětí U (solenoid).....	59
Obrázek 4.27: Simulace intenzity magnetického pole H_s a magnetické indukce B_s solenoidu bez jádra.	60
Obrázek 4.28: Simulace intenzity magnetického pole H_s a magnetické indukce B_s solenoidu s jádrem ($\mu_r = 300$).	61
Obrázek 4.29: Simulace intenzity magnetického pole a magnetické indukce obvodové cívky.....	61
Obrázek 4.30: Závislost proudu I, spotřeby P a magnetického dipólového momentu m na přiloženém napětí U (Obvodová cívka s délkou vnitřní strany 75 mm).....	64

Obrázek 4.31: Závislost proudu I, spotřeby P a magnetického dipólového momentu m na přiloženém napětí U (Obvodová cívka s délkou vnitřní strany 70 mm).....	65
Obrázek 4.32: Závislost proudu I, spotřeby P a magnetického dipólového momentu m na přiloženém napětí U (Solenoid s vnitřním průměrem jádra 4 mm).....	65
Obrázek 4.33: Testovací konstrukce.....	66

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1: Porovnání permeability a koercitivní síly magneticky měkkých materiálů. [4] [5].....	16
Tabulka 1.2: Vybrané produkty pro rešerši magnetorquerů.	18
Tabulka 1.3: Porovnání magnetorquerů solenoidového typu pro stabilizaci v ose x,y s feromagnetickým jádrem. [8] [9] [10].....	18
Tabulka 1.4: Porovnání obvodových magnetorquerů pro stabilizaci v ose z bez jádra. [8] [9] [10].....	19
Tabulka 2.1: Popis úrovní technologické připravenosti (TRL). [19].....	29
Tabulka 4.1: Funkce hlavní smyčky programu.....	40
Tabulka 4.2: Zvolené hodnoty pro obvodovou cívku.	47
Tabulka 4.3: Zvolené hodnoty pro solenoid.....	55
Tabulka 4.4: Porovnání naměřených, vypočítaných a simulovaných hodnot.....	62
Tabulka 4.5: Návrh magnetorquerů určených pro 3U CubeSat o hmotnosti 4,5 kg.	64
Tabulka 4.6: Porovnání momentových cívek s feromagnetickým jádrem.....	67
Tabulka 4.7: Porovnání momentových cívek bez jádra.....	67
Tabulka 4.8: Váha komerčně dostupných produktů.	67
Tabulka 4.9: Cenový souhrn použitých komponent, prvků a sestav.....	68

ÚVOD

Umělá kosmická tělesa jsou nedílnou součástí telekomunikačních a monitorovacích systémů naší planety. Tato tělesa jsou dle jejich účelu vynášena na specifické oběžné dráhy. V případě úspěšného vynesení však mají nežádoucí rotaci, kterou je nutno stabilizovat. Vzhledem k nedostatku elektrické energie po celou dobu vesmírné mise je potřeba využít takového systému, jenž je energeticky úsporným a zajistí spolehlivou stabilizaci.

Družice disponuje vlastním řídicím systémem, který obsahuje řadu senzorů pro určení jejich polohy, pohybu a rotace. Na základě těchto informací jsou spínány řídicí jednotkou aktuátory, jenž mají za úkol kosmické těleso stabilizovat. Magnetorquer je jedním z akčních členů stabilizačního systému družice. Je tvořen soustavou elektromagnetických cívek, jejichž generované magnetické pole interaguje s geomagnetickým polem Země. Síla magnetického pole následně udává rotaci kosmického tělesa. Výhodou ovládní magnetickým polem je absence mechanicky pohyblivých prvků, což zajišťuje daleko větší spolehlivost řízení oproti ostatním akčním členům. Při vhodném nízkoenergetickém návrhu může tento řídicí prvek sloužit k prvotní stabilizaci tělesa, než bude družice schopna vygenerovat prostřednictvím fotovoltaických panelů dostatečné množství energie pro další prvky řídicího systému.

Návrh magnetorqueru je inspirován společností TRL Space Systems s.r.o., jenž podala námět na realizaci magnetorqueru, který bude schopen pomocí magnetického pole ovládat CubeSat o velikosti 3U.

1. MAGNETORQUER

Magnetorquer je akčním členem pro stabilizaci a řízení orientace kosmických těles. Princip ovládání spočívá v produkci regulovatelného magnetického dipólového momentu, jenž interaguje s magnetickým polem Země. Takové působení vytváří točivý moment pro ovládání orientace tělesa. Část magnetorqueru, jenž generuje magnetické pole, je elektromagnetická cívka, kde množství protékajícího proudu reguluje sílu magnetického dipólového momentu. Magnetický moment může být ovlivněn také tvarem nebo typem cívky či implementací feromagnetického jádra do solenoidu.

Magnetorquer je součástí polohovacího modulu družicových systémů ADCS. Tento systém shromažďuje data z veškerých polohovacích a stabilizačních sensorů, aby byla určena aktuální poloha a rotace daného kosmického tělesa, které je následně stabilizováno a orientováno do požadované polohy. Systém tedy obsahuje část kontroly aktuální pozice, jimiž jsou sluneční a gyroskopické senzory, magnetometry, akcelerometry, senzory horizontu a hvězd. Další částí je oblast ovládání a řízení, kde se nachází akční členy, jenž jsou magnetorquery, momentové setrvačníky nebo trysky. Veškerá data z ADCS modulu jsou vyhodnocena v on-board computeru, na kterém je provozován software, jimž jsou ovládány veškeré funkce družice. OBC se skládá z mikropočítače, paměti a propojovacím rozhraním, jenž zajistí komunikaci s dalšími moduly. [1]

Momentové cívky se primárně používají při počáteční stabilizaci kosmického tělesa, kdy je družice uvolněna z nosné rakety na oběžnou dráhu. Magnetorquery mají nízkou spotřebu elektrické energie, které není dostatek po celou dobu vesmírné mise. Ovládání pomocí magnetorqueru je možné využít pouze na nízkých oběžných drahách (LEO), kde je intenzita magnetického pole Země optimální k řízení daného kosmického tělesa za použití generovaného magnetického pole. Při nižší hodnotě magnetického pole by momentová cívka již neměla takový účinek. [2]



Obrázek 1.1: ISIS Magnetorquer Board (iMTQ). [2]

1.1 Základní princip funkce

Magnetorquer je sestaven z elektromagnetických cívek, které vytváří anizotropní magnetické pole, jenž interaguje s polem geomagnetickým a vytváří tak mechanický točivý moment kolem těžiště kosmického tělesa. Magnetické pole je řízeno regulovatelným průchodem proudu cívkou a zpětnovazební kontrolou programu řídicího systému a polohovacích senzorů. Magnetorquer tedy umožňuje orientovat kosmické těleso pouze za využití elektrické energie. Proud, jenž cívkou prochází je přímo úměrný počtu závitům dané cívky a plochou jí ohraničenou.

$$m = NIA \quad (1.1)$$

kde m je magnetickým dipólovým momentem (měřeným v Am^2), N je počet závitů cívky, která ohraničuje plochu A a prochází jí proud I .

Vektor magnetického momentu \vec{m} vytvořeného cívkou bude působit na vektor geomagnetického pole \vec{B} dle vztahu

$$\vec{T} = \vec{m} \times \vec{B} \quad (1.2)$$

Výsledkem bude vytvoření vektoru mechanického točivého momentu \vec{T} . [1]

Magnetická indukce B , jenž vyjadřuje míru silových účinků magnetického pole generovaným cívkou a jádrem, je dána přímou úměrou permeability feromagnetického materiálu μ a intenzitou magnetického pole cívky H .

$$B = \mu \cdot H \quad (1.3)$$

Vlastní indukčnost cívky L je jedním ze základních parametrů cívky. Udává sílu magnetického pole cívky, jenž vybudí působením elektrického proudu. Délka cívky je označena l .

$$L = \mu \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l} \quad (1.4)$$

Hlavní parametry

Hlavní parametry momentové cívky jsou totožné s cívkou, která se nachází ve stejnosměrném obvodu. V případě, že je na cívku přiloženo napětí, prochází jí elektrický proud, který je úměrný odporu dané cívky. Průchodem stejnosměrného proudu se kolem cívky generuje magnetické pole. Magnetický indukční tok takového zapojení je přímo úměrný indukčnosti cívky a velikosti proudu, který cívkou prochází.

Oproti klasickým cívkám je třeba se zabývat také hmotností a rozměrem momentových cívek, jelikož jsou omezeny standardizovanými parametry dané družice.

Základní elektrické a magnetické parametry cívky ve stejnosměrném obvodu.

- Maximální dipólový moment – Magnetický moment generovaný cívkou.

- Napětí přiložené na cívce
- Maximální výkon – Výkonové zatížení, jenž je limitní, aby cívka nebyla poškozena.
- Maximální proud cívkou – Maximální hodnota proudu cívkou, která je určena odporem cívky a napětím na ní přiloženém.
- Indukčnost cívky – Udává schopnost tělesa, jímž protéká elektrický proud, vytvářet magnetické pole.
- Intenzita magnetického pole – Vektor popisující míru silového účinku magnetického pole bez vlivu prostředí.
- Magnetická indukce – Vektor popisující míru celkového silového účinku magnetického pole s vlivem prostředí.
- Radiofrekvenční rušení
- Tepelné vyzařování

Parametry z hlediska geometrických vlastností

- Celková hmotnost
- Počet závitů
- Vnitřní průměr cívky
- Vnější průměr cívky – Celkový průměr cívky s vinutým vodičem. Tento parametr je udáván vnitřním průměrem cívky, průřezem vodiče, počtem závitů a koeficientem plnění.
- Délka cívky

Parametry vinutého vodiče

- Průřez vodiče
- Odpor vodiče
- Rezistivita vodiče
- Délka vodiče

Parametry z hlediska vybraného typu jádra cívky

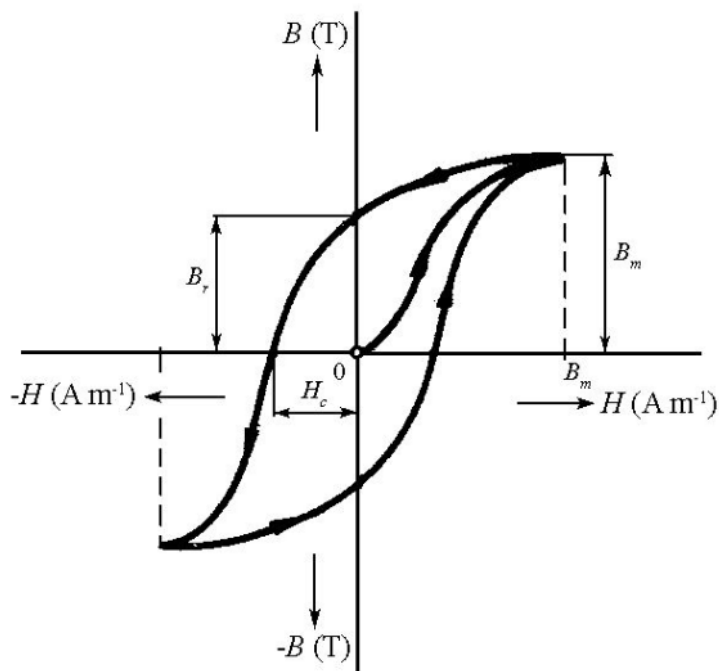
- Geometrické rozměry jádra
- Průřez
- Délka
- Hmotnost
- Permeabilita – Konstanta daného materiálu, jenž udává jeho chování v magnetickém poli.

Jádro cívky

Jádro cívky umožňuje vytvořit silnější magnetické pole při stejném proudu procházejícím cívkou. Jádro bývá zhotoveno s feromagnetickým materiálem, jenž má typické doménové uspořádání. Tyto domény jsou makroskopickými prostorovými oblastmi, v nichž spinové momenty atomů jsou orientovány stejným směrem. Mezi doménami je hraniční vrstva, ve které se postupně mění směr spinových magnetických momentů. Domény se uskupují do energeticky výhodných formací. [3]

Pokud je feromagnetický materiál vystaven vnějšímu magnetickému poli, jeho domény, jež jsou v souladu s orientací vnějšího magnetického pole, se zvětšují. V případě, že se intenzita vnějšího magnetického pole zvyšuje, začnou se spinové momenty atomů v doménách natáčet ve směru vnějšího magnetického pole a dochází k magnetickému nasycení materiálu. Takový feromagnetický materiál má nyní vlastní vnější magnetické pole, jenž zesiluje pole budící. Polem budícím může být pole generované procházejícím proudem cívky, která je navinutá na feromagnetický materiál.

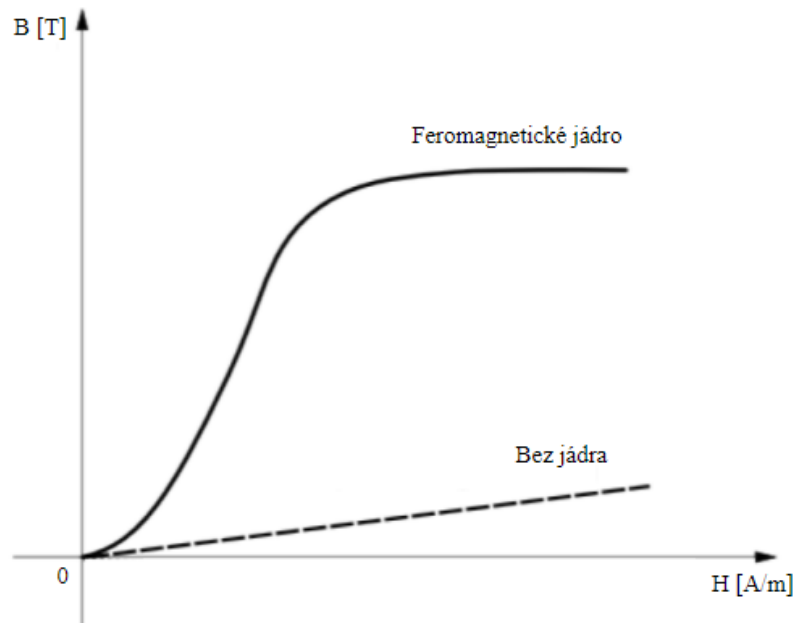
Při zmenšování proudu se hodnota magnetické indukce B nevrátí na nulovou hodnotu, ale na hodnotu remanence B_r neboli zbytkové magnetizace ve feromagnetickém materiálu, která vzniká při energeticky nejvýhodnějším uspořádání domén dané látky. Tento jev je ovlivněn příměsemi feromagnetického materiálu, které ovlivňují stabilitu polohy doménových hranic, jenž může zapříčinit větší hodnotu remanence. Z obrázku 2.2 je patrné, že hodnota magnetické indukce materiálu nezáleží pouze na změně intenzity magnetického pole cívky, ale také na polaritě magnetizace.



Obrázek 1.2: Hysterézní smyčka. [3]

Demagnetizace feromagnetického materiálu je dosaženo, když se spinové momenty atomů uspořádají v dané látce náhodně. Takového jevu může být dosaženo působením vnějšího magnetického pole, nárazem nebo zahřátím nad Curieho teplotu.

Cívka bez jádra má lineární závislost intenzity magnetického pole na magnetické indukci. Z obrázku Obrázek 1.3 je patrné, že cívka s feromagnetickým jádrem může dosáhnout mnohonásobně větší magnetické indukce, jenž je limitována hodnotou nasycení indukce daného materiálu.



Obrázek 1.3: Závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole u jádra tvořeného feromagnetikem a paramagnetikem (cívka bez jádra).

Pro výrobu jádra cívky se využívají magneticky měkké materiály, jenž vykazují úzkou hysterezní smyčku, mají vysokou relativní permeabilitu a lze je snadno zmagnetizovat a demagnetizovat. Rozdělení magneticky měkkých materiálů dle použití v elektrotechnice. [4]

- Čisté železo a nízkouhlíkové oceli – stejnosměrné stroje.
- Křemíková ocel – transformátorové a dynamové plechy.
- Slitiny Fe-Ni – sdělovací technika, jádra transformátorů a tlumivek.
- Slitiny Fe-Co – sluchátkové membrány a rotory elektrických strojů.
- Magneticky měkké ferity – vysokofrekvenční technika
- Kovové prášky – pro oblasti vysokých frekvencí (Permalloy, Sendust).
- Kovová skla – transformátory, zesilovače, spínače, záznamové hlavy.

Magneticky měkké ferity se vyznačují nižšími ztrátami vířivými proudy v důsledku jejich vyšší rezistivity, a tedy jejich využití je spíše při vyšších frekvencích. Mají však

nižší hodnotu indukce nasycení (do 0,3 T) oproti feromagnetickým materiálům (až 2,4 T). [3]

Tabulka 1.1: Porovnání permeability a koercitivní síly magneticky měkkých materiálů. [4] [5]

Materiál	μ_{r_max} [-]	H_c [A/m]
Feromagnetické materiály		
Železo (čistota 99,99 %)	100 000	7,95 – 32
Železo (čistota 99,96 %)	5 000	
Křemíková ocel (97Fe-3Si)	15 000 – 80 000	4 – 15
Permendur 49 (49Fe-49Co-2V)	4 000 – 8 000	398
Supermendur (49Fe-49Co-2V)	92 500	15,9
78 Permalloy (78.5Ni-21.5Fe)	87 000	4
Supermalloy (79Ni-16Fe-5Mo)	1 000 000	0,16
Mumetal (77Ni-16Fe-5Cu-2Cr)	100 000	4
Sendust (85Fe-9,5Si-5,5Al)	50 000	5 – 10
Magneticky měkké ferity		
Mn-Zn	1 200 – 15 000	2,5 – 60
Ni-Zn	100 – 2 200	20 – 200

1.2 Rozdělení magnetorquerů

Magnetorquery se z konstrukčního hlediska dělí na tři typy: planární, kompaktní neboli obvodové a tyčové. Z nichž tyčové se dělí dle typu použitého jádra.

Planární Magnetorquer

Vestavěná cívka je natištěna nebo vnořena ve tvaru spirály do desky plošných spojů, a tedy nevyžaduje žádné další místo uvnitř kosmického tělesa. Planární magnetorquer nemusí být součástí desky s řídicím systémem ADCS, ale může být umístěn do stěn CubeSatu či zabudován v solárních panelech. Cívku lze navrhnout z hlediska vnějších a vnitřních rozměrů, šířky cest a výsledných generovaných magnetických momentů. Vzhledem k limitům, které udává deska plošných spojů a rozměry družice či prvků, jenž obsahuje, není možné dosáhnout vysoké hodnoty magnetického dipólového momentu u planárních cívek. [6] [7]

Obvodový Magnetorquer

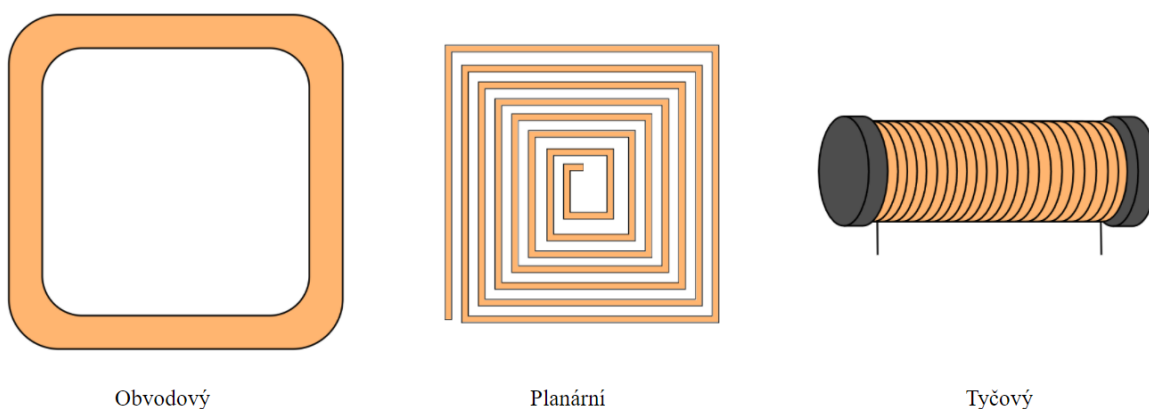
Obvodový Magnetorquer se vzduchovým jádrem je cívkou samonosnou, případně umístěnou na izolační nosné kostře neboli rámu, který je upevněn na povrchu desky plošných spojů. Tato konfigurace umožňuje využít velkou plochu cívky, a tedy

i vytvoření většího magnetického momentu oproti planární cívkám. Tento typ se nejvíce využívá pro stabilizaci v ose z. Výhodou je také nižší hmotnost cívky díky absenci jádra. [6]

Tyčový Magnetorquer

Momentová tyč se skládá z válcové jednovrstvé nebo vícevrstvé cívky s jádrem, jenž může být tvořeno vzduchem nebo je zhotoveno z feromagnetického materiálu. Tyčové magnetorquery bývají umístěny na desce plošných spojů a využívají se pro orientaci kosmického tělesa v ose x a v ose y.

Solenoid s feromagnetickým jádrem se jeví jako nejefektivnější konstrukcí ze zmiňovaných možností, jelikož generuje nejsilnější magnetický dipól. Nevýhodou této konstrukce je nutnost více prostoru pro montáž tohoto typu magnetorqueru, vyšší hmotnost a přítomnost zbytkového magnetického momentu v jádře vlivem magnetické hystereze. Jádro je tedy nutné odmagnetizovat adekvátním demagnetizačním procesem. [6]



Obrázek 1.4: Ilustrace jednotlivých magnetorquerů.

1.3 Porovnání s alternativními řídicími systémy

Využití magnetorqueru poskytuje řadu výhod oproti alternativním řídicím systémům. Jedná se o lehký, spolehlivý a energetický účinný prvek ovládacího systému.

Výhody

- Nevyžadují žádný spotřební materiál.
- V případě dostatečného množství elektrické energie mohou být v provozu neomezenou dobu.
- Spotřebovávají pouze malou část elektrické energie.
- Zabírají menší objem než alternativní řídicí systémy.
- Absence pohyblivých částí z nich činí spolehlivý ovládací prvek družice. [2]

Nevýhody

- Generovaný točivý moment je velmi malý a slouží pouze k urychlení nebo zpomalení změny polohy daného kosmického tělesa. V případě většího magnetického momentu by bylo nutné dodat vyšší proud, což by zapříčinilo větší spotřebu celého řídicího systému.
- Jsou závislé na okolním magnetickém poli, a tedy jejich uplatnění je pouze na nízké oběžné dráze Země. Magnetorquetry nejsou vhodnou alternativou pro mise ve vzdáleném vesmíru.
- Točivý moment může být generován pouze kolmo na vektor magnetického pole Země. Je tedy problematické řídit kosmické těleso pouze za pomoci magnetorquerů. [2]
- Při delším provozu a vyšším výkonu může docházet k tepelnému vyzařování.
- V případě nevhodného návrhu může docházet k radiofrekvenčnímu rušení.

1.4 Rešerše dostupných produktů

V dnešní době je řada výrobců magnetorquerů a celých ADCS systémů. Z dostupných produktů však byly vybrány typy pro vícesou stabilizaci, jenž jsou kompatibilní s velikostí CubeSatu 3U a větší.

Tabulka 1.2: Vybrané produkty pro rešerši magnetorquerů.

Název produktu	Společnost	Velikost CubeSatu	Hmotnost celku [g]
iMTQ Magnetorquer Board	ISISPACE	6U	194
Magnetorquer SatBus MTQ3X	NanoAvionics	-	205
NanoTorque GST-600	GomSpace	12U	156

Tyto typy magnetorquerů poskytují 3-osou stabilizaci, přičemž obsahují 2 solenoidové cívky s feromagnetickým jádrem a obvodovou cívku, jejíž jádro je tvořeno vzduchem. Všechny zmíněné typy disponují cívkami, jenž generují magnetický moment větší nebo rovný $0,2 \text{ Am}^2$. U vesmírných aplikací je také nutné brát ohled na výkon a hmotnost celého systému, jelikož tyto parametry mohou hrát klíčovou roli na účinnosti výsledného řešení. [8] [9] [10]

Tabulka 1.3: Porovnání magnetorquerů solenoidového typu pro stabilizaci v ose x,y s feromagnetickým jádrem. [8] [9] [10]

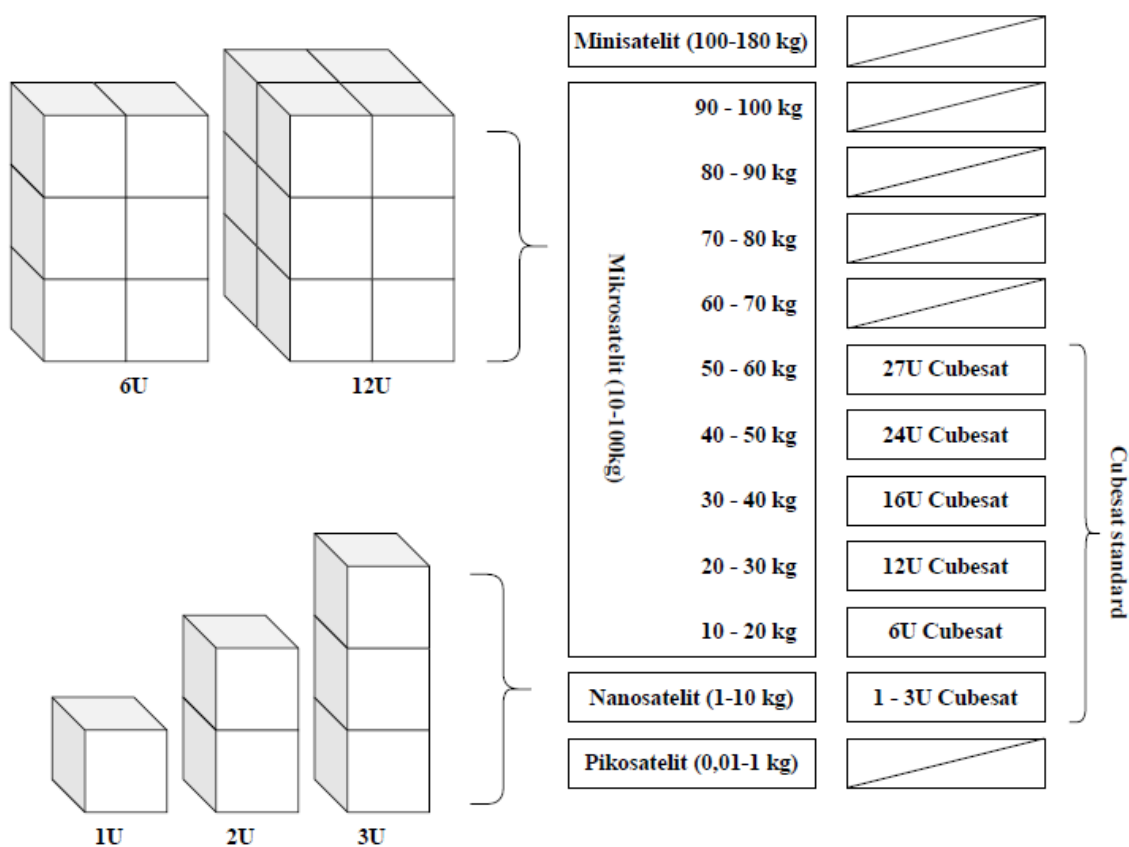
	U [V]	I [mA]	P [mW]	R [Ω]	L [mH]	m [Am^2]
iMTQ Magnetorquer Board	5,0	40	200	125	-	0,20
Magnetorquer SatBus MTQ3X	3,3	120	397	27,4	78	0,30
NanoTorque GST-600	3,3	116	382	28,5	-	0,31

Tabulka 1.4: Porovnání obvodových magnetorquerů pro stabilizaci v ose z bez jádra. [8] [9] [10]

	U [V]	I [mA]	P [mW]	R [Ω]	L [mH]	m [Am²]
iMTQ Magnetorquer Board	5,0	136	680	36,76	-	0,24
Magnetorquer SatBus MTQ3X	3,3	133	439	24,78	12	0,34
NanoTorque GST-600	3,3	129	427	25,50	-	0,34

2. CUBESAT

Cubesat je družicí, která se skládá z jedné nebo celé soustavy krychlových jednotek (Unit), jež mají definované parametry. Každá jednotka soustavy má vnější rozměry 10x10x11,35 cm a je omezena váhou 1,33 kilogramů. Velikost celé sestavy může nabývat od jedné (1U) až po 27 jednotek (27U). Dle typu sestavy se Cubesaty dělí do kategorie nanosatelitů, jež nabývají hmotnosti od 1 do 10 kg, což odpovídá sestavě od 1U do 3U. V případě větší sestavy, která nabývá větší hmotnosti, hovoříme již o mikrosatelitech. Příkladem sestavy může být Cubesat složený ze tří jednotek (3U) o rozměrech 10x10x30 cm. [1] [11]



Obrázek 2.1: Rozměry Cubesatu. [11]

Mise, v nichž se vyskytují Cubesaty, jsou určeny primárně pro nízké oběžné dráhy Země (LEO), a tedy jsou vystaveny nižší radiační zátěži než družice na vyšších orbitech. Vzhledem k nízké ceně CubeSatu lze však riziko této radiační zátěže přijmout. Zároveň díky vysokému stupni modularity a rozsáhlému využití komerčních subsystémů, mohou být projekty Cubesat připraveny k letu mnohem rychleji, ve srovnání s jinými vesmírnými projekty, obvykle během jednoho až dvou let. [12]

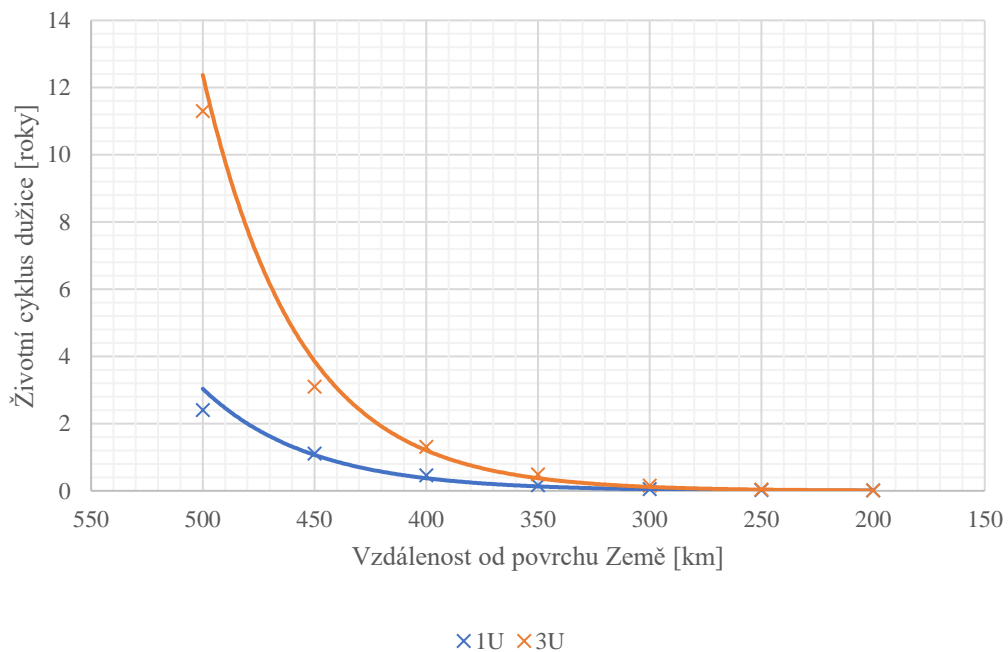
Tyto nanosatelity lze, díky jejich malým rozměrům, vynést na oběžnou dráhu jako sekundární objekt na nosné raketě, což sníží celkové náklady výsledného projektu. Na oběžnou dráhu je vysazen z kontejneru, který odpovídá velikosti a hmotnosti daného CubeSatu.

Životnost CubeSatu

CubeSaty působí primárně na nízké oběžné dráze. V takové vzdálenosti družice interaguje s mnohem vyšší atmosférickou hustotou než na jiných oběžných drahách vzdálenějších od povrchu Země. Vysoká hustota atmosféry má však negativní dopad na životnost družice v důsledku zvyšující se třecí síly a působení atomárního kyslíku, jenž zvyšuje korozi tělesa. Třecí sílu F_d působící na kosmické těleso lze vypočítat následovně:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \frac{A}{m} \rho v^2 \quad (2.1)$$

kde ρ je hustota atmosféry, v je orbitální rychlost družice, A je plocha družice kolmá ke směru pohybu, m označuje hmotnost tělesa a C_d je koeficientem odporu vzduchu. Tento koeficient je bezrozměrnou veličinou, jenž se udává pro odpor objektu v tekutém prostředí. Nižší koeficient odporu udává menší aerodynamický odpor, který působí na daný objekt. Životnost družice je tedy předem určena výškou, do níž je těleso vyneseno, jeho hmotností, plochou, koeficientem odporu a modelem atmosféry.



Obrázek 2.2: Graf závislosti vzdálenosti vynesení tělesa od povrchu Země na jeho životnosti. [13]

Obrázek 2.2 znázorňuje simulaci vynesení CubeSatu o velikosti 1U a 3U na oběžnou dráhu do specifických vzdáleností v závislosti na jejich životním cyklu. S rostoucí

orbitální výškou se prodlužuje doba života družice, rovněž i s jeho hmotností. Plocha družice však bude zvyšovat jeho třecí sílu, a tedy bude mít negativní dopad na jeho životnost.

Pro CubeSaty vynesené do vzdálenosti menší než 300 km se doba života pohybuje mezi 0 až 100 dny. Ve vzdálenosti 300 až 400 km vzniká nebezpečí kolize družice s Mezinárodní vesmírnou stanicí. Družice v této vzdálenosti mohou mít životnost 0,5 až 2 roky. Životnost ve vyšších nadmořských výškách nad 600 km může přesáhnout i 25 let. Návrháři však musí splnit požadavek, který zaručí životnost rozpadu CubeSatu na oběžné dráze do 25 let. [13]

2.1 Subsystemy CubeSatu

Systém řízení a orientace

Orientační a řídicí systém je jedním z nejdůležitějších částí CubeSatu. Pozemní stanice musí přesně zamířit družici na oběžné dráze, aby bylo dosaženo přesných a reprodukovatelných výsledků, což vyžaduje i přesné natočení řízeného tělesa. Kromě natáčení kosmického tělesa tento systém slouží také k jeho stabilizaci při prvotním vynesení na oběžnou dráhu. Systém obsahuje různé senzory, mezi něž se řadí magnetometr, sluneční a polohovací senzor. Dalšími částmi toho systému je řídicí obvod a aktuátory, jenž udávají řízenému objektu rotaci. [14]

Napájecí systém

Na oběžné dráze je využíván zisk elektrické energie pomocí solárních článků. Jedná se o velkoplošné polovodičové diody, jenž využívají fotovoltaického jevu, který popisuje přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Energie je uchovávána v dobíjecích lithium-iontových bateriích. Tato energie je následně využita v době, kdy družice nemá možnost využít energii slunečního záření. Fotovoltaické články jsou orientovány do takové polohy, aby bylo možné generovat maximální množství elektrické energie. V této části je také umístěn řídicí systém napájení (EPS), jenž zajišťuje správu nabíjení a vybíjení baterie a kontrolu jejího stavu.

CubeSaty musí být deaktivovány do momentu, než jsou vyneseny na oběžnou dráhu, aby se zabránilo jakémukoli elektrickému nebo vysokofrekvenčnímu rušení nosné rakety. Jestliže není možné CubeSat deaktivovat, je vyneseno s vybitými bateriemi. [14]

Komunikační systém

Komunikační systém, jenž je nezbytnou součástí družice, umožňuje CubeSatu přenášet data a telemetrii na pozemní stanici a následně z této stanice přijímat příkazy k provedení specifického programu nebo funkce. Tento systém se skládá z pozemního segmentu, který obsahuje jednu nebo více pozemních stanic a vesmírného segmentu neboli družic, jenž disponují zmíněným komunikačním systémem. Komunikace má 3 funkce:

- Uplink – Příjem příkazů ze Země.

- Downlink – Přenos dat na Zemi, informace o družici, naměřené hodnoty apod.
- Crosslink nebo inter-satellite link – Přenos nebo příjem informací z jiné družice.

Existují dva typy komunikačních systémů: radiofrekvenční (RF) a optický (FSO), označovaný také jako laserová komunikace.

Většina komunikačních systémů je založena na rádiové frekvenci, které se nachází v IEEE pásmech 300 MHz až 40 GHz. RF systém komunikuje odesláním dat přes elektromagnetické vlny pomocí vhodných antén. Přenášené informace jsou zakódovány pomocí modulace ve vysokofrekvenčních elektromagnetických vlnách a odeslány do přijímacího systému, kde jsou demodulovány a dekodovány.

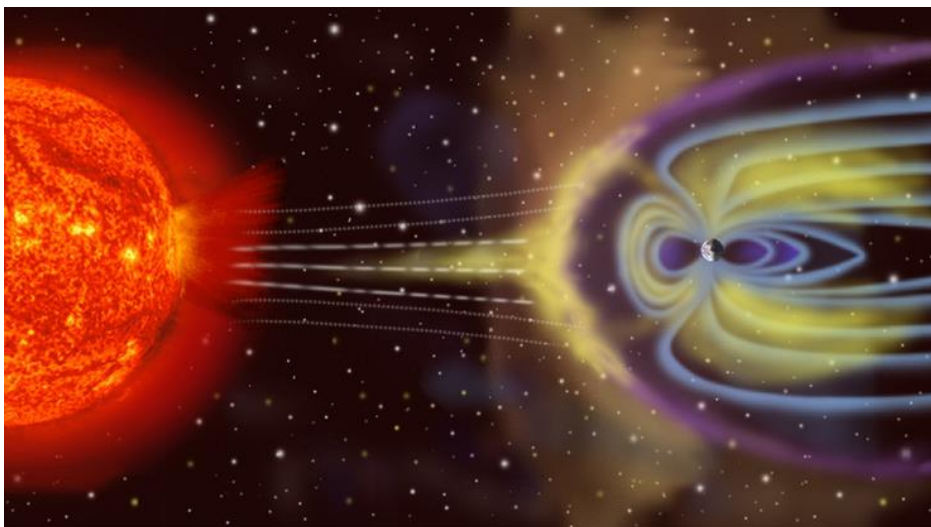
Laserová komunikace je alternativou radiofrekvenční komunikace. Spoje FSO pracují na mnohem vyšší frekvenci než spoje RF, obecně v infračervených nebo viditelných pásmech. Vyšší frekvence vedou ke mnohem vyšší přenosové rychlosti. [11]

Systém řízení teploty

Veškeré části Cubesatu mají určitý rozsah přípustných teplot, které musí být udržovány, aby byly splněny podmínky, při nichž nemohou být součástky poškozeny či ovlivněny během vesmírné mise. Teploty uvnitř družice jsou určeny tím, kolik tepla kosmické těleso absorbuje solárním ohřevem, kolik jej ukládá a následně odvádí. Teploty jsou regulovány pomocí pasivní nebo aktivní technologie tepelného managementu a konstrukčních metod. [11]

2.2 Geomagnetické pole

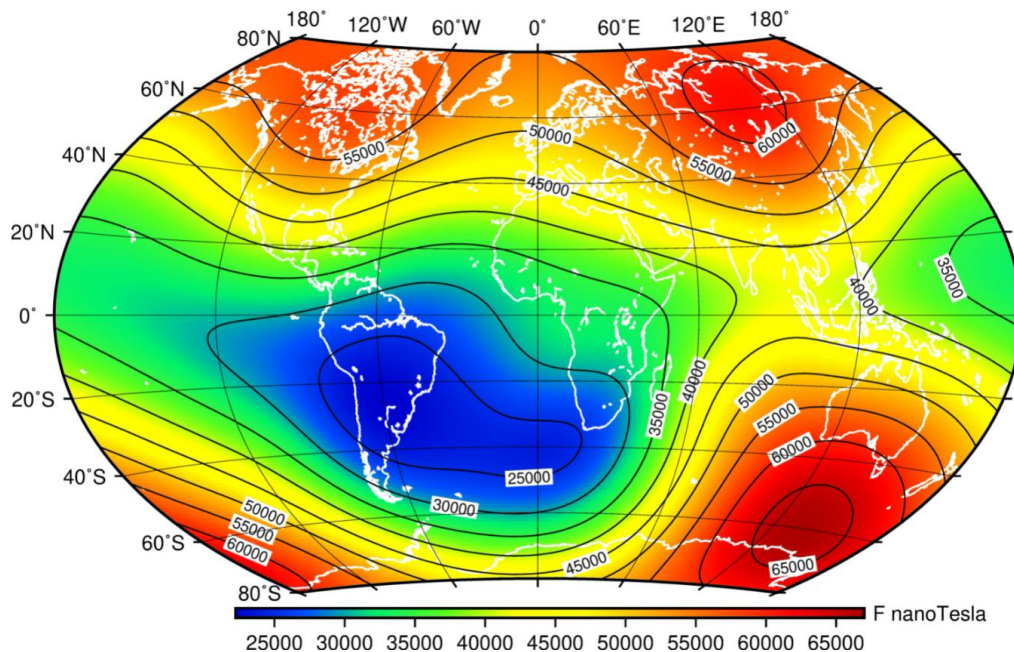
Geomagnetické pole je magnetické pole generované Zemí, která působí jako velký tyčový magnet, jenž má dipólový charakter. Magnetické pole vzniká v horké, tekuté vrstvě vnějšího jádra Země. Jádro je z velké části tvořeno roztaveným železem, které při pohybu ve slabém magnetickém poli indukuje elektrický proud a způsobuje vznik silnějšího magnetického pole. Generované pole je indukované v určitém prostoru okolo Země, kde působí magnetická síla a je vyobrazováno pomocí magnetických siločar. Místa, kde se sbíhají magnetické siločáry, jsou označovány jako magnetické póly. Severní magnetický pól se nachází v oblasti jižního zeměpisného pólu a naopak. Poloha magnetických pólů se v průběhu času mění a jsou tak odkloněny od osy zeměpisných pólů. Poloha pólů se během dne může změnit až o 80 km, což je způsobeno interakcí magnetického pole Země se slunečním větrem. Sluneční vítr je proudem nabitých částic, zejména jde o protony, elektrony a alfa částice, které jsou uvolňovány ze Slunce a směřují dále do prostoru Sluneční soustavy. Před zářením a proudem nabitých částic je Země chráněna zmíněným magnetickým polem neboli magnetosférou. Interakcí magnetického pole Země se slunečním větrem je také udána velikost a tvar geomagnetického pole, jenž na straně přivrácené ke Slunci má tvar rázové vlny a na odvrácené straně se rozprostírá až sta tisíce kilometrů. [15]



Obrázek 2.3: Interakce Slunečního větru s magnetickým polem Země. [15]

Magnetické pole Země má nestabilní charakter, jelikož je ovlivňováno nestálým tokem hmoty uvnitř vnějšího jádra a nabitými částicemi přicházejícími ze Slunce, jež mohou vyvolávat magnetické bouře.

Hodnota geomagnetického pole na povrchu Země nebo blízko něj, je v rozsahu 25 – 65 μT . Toto pole může být proměnlivé v řádu jednotek μT , v závislosti na jiných zdrojích magnetického pole, jimiž jsou magnetické bouře. Měření probíhá ve stacionárních magnetických observatořích, jenž shromažďují data fluktuací geomagnetického pole na jednom místě. Globální neboli celoplošné měření jsou pak poskytována družicovým systémem na nízké oběžné dráze Země (LEO). [16]



Obrázek 2.4: Mapa celkové intenzity magnetického pole Země. [16]

Van Allenovy pásy

Součástí magnetosféry Země je plazmosféra, která tvoří její vnitřní část. Tato oblast obsahuje nízkoenergeticky nabitě částice, jež jsou soustředěné kolem rovníku planety. Plazmosféra má toroidní tvar, který je určen magnetickým polem Země. Vnitřní hranice této oblasti začíná nad horní ionosférou, vnější hranice má proměnlivý charakter v závislosti na geomagnetických podmínkách a nachází se ve vzdálenosti od 4,5 do 8 násobku zemského poloměru (RE). V plazmosféře se nachází také místa s vysoce nabitými částicemi, které se nazývají Van Allenovy pásy.

Van Allenovy neboli radiační pásy jsou místa v geomagnetickém poli, v nichž jsou zachyceny vysoce nabitě elektrony a protony (0,1 – 10 MeV), jež pocházejí převážně ze slunečního větru. Vnitřní radiační pás se nachází ve vzdálenosti 6 000 až 12 000 km (1 až 2 RE), vnější pás pokrývá oblast 25 000 – 45 000 km (4 až 7 RE). Oba pásy jsou odděleny mezerou, ve které byl v roce 2013 objeven třetí Van Allenův pás. Tyto radiační pásy mohou mít negativní dopad na družice umístěné na orbity Země. [17]

2.2.1 Oběžné dráhy

Oběžná dráha je zakřivená dráha, po které se pohybuje kosmické těleso kolem jiného blízkého objektu ve vesmíru, jímž je přitahováno vlivem gravitační síly. Gravitace způsobí pohyb dvou těles po určité dráze kolem sebe za předpokladu, že nabývají určité hmotnosti a hybnosti. Objekty shodné hmotnosti obíhají kolem sebe navzájem, z nichž žádný netvoří střed oběžné dráhy, zatímco menší tělesa obíhají objekty nabývající větší hmotnosti. Větší tělesa jsou však vlivem gravitace mírně přitahována i menšími tělesy. Tělesa, jež se pohybují po oběžných drahách, mohou být planety, hvězdy, asteroidy nebo družice. [17]

Vynesení objektu na geocentrickou dráhu neboli dráhu, jejíž střed tvoří Země, je zajištěno pomocí rakety, která danému objektu udělí hybnost na oběžné dráze, kde je těleso zároveň přitahováno pomocí gravitační síly. Níže jsou vyjmenované významné geocentrické oběžné dráhy.

Geostacionární oběžná dráha (GEO)

Satelity, umístěné na této dráze, obíhají Zemi nad rovníkem odpovídající rychlostí jako je rotace Země, tedy pro pozorovatele se tyto objekty jeví jako nehybné. Synchronní rychlost s rotací Země je zajištěna pohybem družice rychlostí ~3 km/s ve výšce 35 786 km. Tato dráha je využívána telekomunikačními družicemi či satelity, jež monitorují počasí. Tyto satelity pokrývají velký rozsah povrchu Země, a tedy stačí tři satelity pro téměř globální pokrytí. [17]

Výhody

- Tři geostacionární družice zajistí globální pokrytí.
- Přijímače a vysílače mohou využít pevné polohy antén.

Nevýhody

- Potřeba většího výkonu pro vysílání.
- Vysoká latence přenosu.
- Vynesení na geostacionární oběžnou dráhu je nákladné oproti bližším.
- Špatné pokrytí severních a jižních oblastí Země.
- Vysoká radiace

Střední oběžná dráha (MEO)

Zahrnuje široké pásmo oběžných drah, které se nachází mezi geostacionární a nízkou oběžnou dráhou. Objekty na střední oběžné dráze se nemusí pohybovat po dané dráze jako u geostacionární oběžné dráhy. Tato dráha se využívá zejména pro navigační satelity. [17]

Výhody

- Při umístění do vzdálenosti 10 000 km, je pro globální pokrytí potřeba přibližně 10 družic.
- Větší pokrytí než družice, jež se nacházejí na nízké oběžné dráze.
- Menší náklady na vynesení na oběžnou dráhu než u geostacionární oběžné dráhy.

Nevýhody

- Větší zpoždění oproti LEO.
- Menší intenzita signálu.

Nízká oběžná dráha (LEO)

Nízká dráha zahrnuje oblast ve vzdálenosti 160 – 1000 km nad Zemským povrchem. Družice se nemusí pohybovat v jedné dráze, jejich rovina může být vychýlena, což zajistí větší počet dostupných tras, stejně jako u střední oběžné dráhy. Rychlost objektů na této

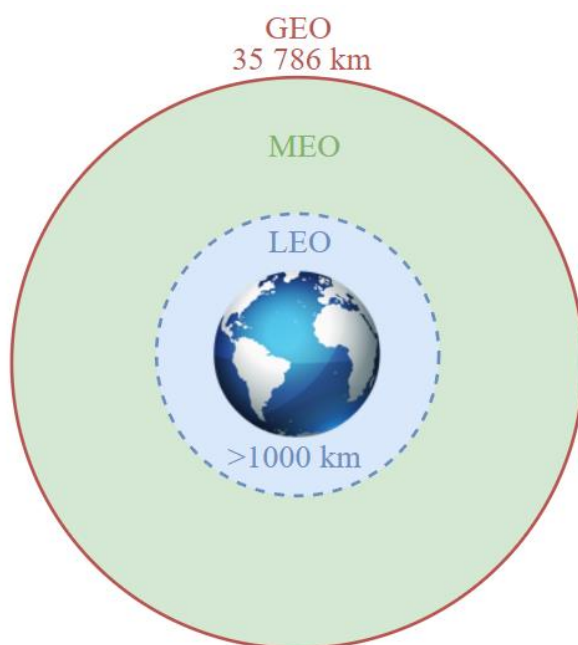
dráze je přibližně rovna 7,8 km/s, při této rychlosti družice obletí Zemi zhruba za 90 minut. Tato oběžná dráha se využívá pro satelitní snímky Země, jelikož v této vzdálenosti je možné pořizovat snímky s daleko vyšším rozlišením. Nachází se zde také Mezinárodní vesmírná stanice (ISS). Komunikační satelity v LEO pracují ve velkých skupinách satelitů, aby bylo dosaženo konstantního pokrytí povrchu Země. [17]

Výhody

- Větší intenzita signálu.
- Menší časové zpoždění přenosu.
- Vyšší přenosová rychlost.

Nevýhody

- Potřeba velkého počtu satelitů pro globální pokrytí.
- V důsledku počtu satelitů a jejich omezené se zvyšuje složitost celého systému. Nutnost komunikace mezi družicemi na vyšších orbitálních drahách.
- Krátká doba viditelnosti.



Obrázek 2.5: Oběžné dráhy.

2.3 Normy ECSS

Standardy ECSS (European Cooperation for Space Standardization) vznikly v roce 1993. Cílem jejich zavedení bylo vytvořit soudružnou a jednotnou sadu uživatelsky přívětivých standardů. Vlivem těchto norem lze dosáhnout cenově efektivnějších kosmických projektů, a tedy i zvýšení konkurenceschopnosti evropského kosmického průmyslu. V zájmu ECSS je také zvyšování kvality a spolehlivosti kosmických produktů, usnadnění komunikace mezi zapojenými společnostmi, snížení rizika a zajištění kompatibility

jednotlivých rozhraní. Normy jsou závazné až v rámci smluvních podmínek jednotlivých společností.

ECSS normy se dělí na čtyři základní oblasti:

Management – Zavádí řídicí procesy, jenž mají za cíl přispět k úspěšnému projektu s ohledem na náklady, harmonogram a technické parametry výsledného produktu.

Zajištění produktů (Product assurance) – Zajišťuje kontrolu kvality kosmických produktů.

Inženýrství (Engineering) – Pokrývá všechny technické aspekty kosmických systémů a produktů, zahrnuje samotný inženýrský proces a také vlastnosti výsledných kosmických produktů.

Udržitelnost (Sustainability) – Zaměřuje se na zmírňování tvorby kosmické tříště, planetární ochranu a vlivy kosmického prostředí.

Součástí ECSS standardů jsou tři typy dokumentů. Standardy (Standards), jenž obsahují ověřené požadavky a minimum popisného textu. Tento dokument slouží pro přímé použití, obsahují minimum popisného textu a ověřené požadavky. Zbylé dva dokumenty nejsou normativní, a tedy poskytují jen další užitečné informace vývojářům. Jedná se o příručky (Handbooks) a technickou memorandu (Technical memoranda). [18] [19]

Společnosti zapojené do ECSS standardizace:

- Agenzia Spaziale Italiana (ASI)
- UK Space Agency (UKSA)
- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
- European Space Agency (ESA)
- Netherlands Space Office (NSO)
- Norwegian Space Centre (NOSA)

2.3.1 Úroveň technologické připravenosti (TRL)

Úroveň technologické připravenosti je metoda k posouzení technologické zralosti daného výrobku. Jedná se o body na stupnici k měření vyspělosti technologie. Stupnice má devět úrovní, přičemž TRL 1 je má nejnižší hodnotu připravenosti a TRL9 značí nejvyšší technologickou úroveň, jenž prokazuje plně funkční vývoj daného produktu, který obstál na vesmírné misi. Při hodnocení se kontrolují programové koncepty, technologické požadavky a demonstrováné funkcionality. Poté je technologickému projektu udělena adekvátní úroveň vyspělosti dle splněných požadavků. [19]

Tabulka 2.1: Popis úrovní technologické připravenosti (TRL). [19]

TRL	Popis	Příklad
1	Jsou pozorovány základní principy.	Úroveň představuje čistý výzkum a studie základních vlastností technologie.
2	Formulovaný technologický koncept.	Předpokládané aplikace jsou v této fázi spekulativní.
3	Experimentální ověření koncepce.	Spočívá v zahájení efektivního výzkumu a vývoje. Příklady zahrnují studie a laboratorní měření k ověření analytických předpovědí.
4	Technologie ověřena v laboratoři, která je ověřena předešlým výzkumem.	Příklady zahrnují analýzu provozního rozsahu technologických parametrů.
5	Technologie ověřena v relevantním prostředí.	Zvýšení spolehlivosti technologie. Příklady zahrnují ověření technologie v simulovaném prostředí.
6	Technologie demonstrována v relevantním prostředí.	Ověření prototypového systému. Příklady zahrnují prototyp modelu, který je demonstrován v simulovaném prostředí.
7	Demonstrace modelu systému nebo prototypu v provozním prostředí.	Prototypový model ověřen v provozním prostředí.
8	Kompletní a kvalifikovaný systém/model.	Ve většině případů tato TRL úroveň představuje konec vývoje.
9	Aktuální systém osvědčený v provozním prostředí.	Systém/model osvědčený a připravený pro plné komerční nasazení.

Systematické řešení TRL umožní, aby se technologie vyvíjela od koncepce po výzkum, vývoj a nasazení. Univerzity se zaměřují převážně na úrovně TRL 1-4, zatímco soukromý sektor je zaměřen na TRL 7-9.

Příručka ECSS-E-HB-11A, jež využívá Evropská kosmická agentura ESA, popisuje, jak organizovat a provádět přidělení úrovně technologické připravenosti (TRL) prostřednictvím posouzení technologické připravenosti (TRA) a podávání zpráv prostřednictvím seznamu stavu připravenosti technologií (TRSL). [19]

3. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem je kompletace celého systému, jímž bude dvouosý magnetorquer a jeho úspěšné zprovoznění, což zahrnuje realizaci návrhu dle vytvořeného blokového schématu a objednání zbylých komponentů pro vytvoření testovací koncepce.

Dalším plánovaným krokem je realizace softwarové části, jež bude simulovat řízení kosmického tělesa, jímž bude otestována funkce magnetorquerů. Tedy systém, který bude uživatele informovat za pomoci bezdrátové sítě o orientaci a rotaci zařízení. V případě, že uživatel zadá příkaz na reorientaci zařízení nebo ke stabilizaci, systém aktivuje akční členy, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku co nejefektivněji.

Dále je nutné vytvořit momentovou cívku, jež zajistí stabilizaci v ose y. Tato cívka bude navinuta na feromagnetickém jádře, které zajistí generaci silnějšího magnetického pole. Jelikož feromagnetické jádro zůstane zmagnetizované i po deaktivaci akčního členu, je nutné vytvořit program, jež zajistí demagnetizaci jádra cívky.

V rámci realizace zařízení bude brán ohled na vytvoření co nejefektivnějšího řešení, tedy i možnost zakomponování pomocných planárních momentových cívek.

Celý výrobek bude následně vytvořen jako jeden celek, což zahrnuje návrh desky plošných spojů, která bude osazena veškerými komponenty, potřebnými k realizaci testovacího systému magnetorqueru. Na DPS budou rovněž mechanické úchyty pro veškeré momentové cívky.

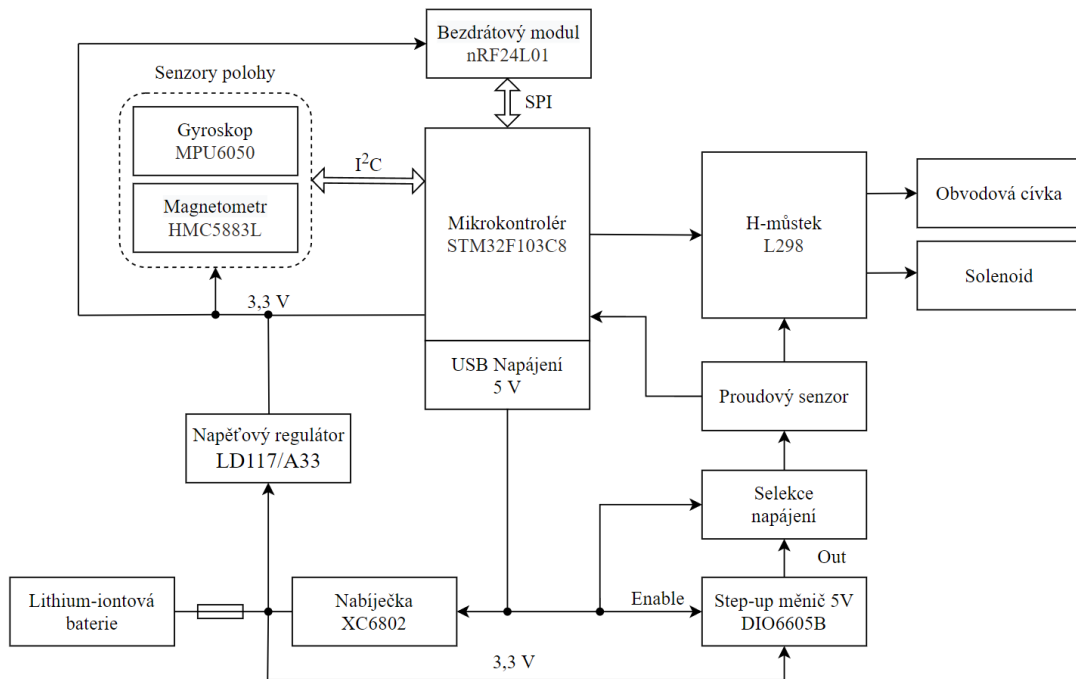
4. NÁVRH KONCEPTU

Koncept se skládá ze samotného magnetorqueru a řídicího systému, na kterém je otestována funkce výsledného řešení. U dnešních dostupných produktů se magnetorquery vyrábějí v jednoosé konfiguraci jako doplněk k řídicímu systému nebo ve víceosé konfiguraci jako součást ADCS systému. V rámci přesnosti polohovacího systému je zvolen návrh dvouosé stabilizace, vzhledem k omezeným možnostem testování výrobku ve třech osách. Stabilizace v jedné ose je zajištěna pomocí obvodové cívky bez jádra. Ve druhé ose je objekt řízen válcovou cívkou s jádrem. V rámci řízení může být cívka, jež obsahuje jádro s vyšší koercitivní silou, komplikovanější na softwarovou část systému. Po aktivaci cívky je nutné jádro demagnetizovat generováním postupně tlumících se pulsů s danou frekvencí, jejichž počáteční nejvyšší hodnota musí vytvořit na cívce takové magnetické pole, jaká je hodnota koercitivní síly jádra. Demagnetizace však může být zanedbána v případě zvolení vhodného materiálu jádra, tedy při malé koercitivní síle, které nijak neovlivňuje ovládání tělesa, či nezkrusuje výslednou hodnotu magnetometru.

Řídicí systém je schopen zajistit požadovanou orientaci v daném směru, jež si uživatel zvolí za pomoci ovládacího programu, kde jsou zobrazeny veškeré informace z přístupných senzorů. V programu lze dále vybudit jednotlivé cívky pomocí PWM regulace v rozsahu 0 % až 100 % nebo nastavit přímo požadovanou orientaci tělesa, která má být dosažena. S uživatelským prostředím komunikuje řídicí deska pomocí bezdrátové komunikace.

4.1 Blokové schéma

Základem řídicího systému je mikrokontrolér STM32F103C8, který zpracovává veškeré informace o dané poloze a rotaci řízeného objektu. Na základě těchto informací je dále vyhodnoceno, jaký proud prochází cívkou, jež generuje magnetické pole. Proudový senzor poskytuje informace o průchodu proudu, který H-můstek propouští v závislosti na PWM regulaci napětí, jež si uživatel zvolí či program vyhodnotí. Senzor proudu slouží jako kalibrační prvek systému. Zvolené polohovací senzory poskytují informace přes I²C sběrnici o aktuální orientaci, úhlové rychlosti a síle geomagnetického pole. Vnější bezdrátová komunikace je zajištěna pomocí nRF24L01 modulu, který předává data mikrokontroléru za pomoci SPI sběrnice. Celý systém je napájen pomocí lithium-iontové baterie, která je opatřena nabíječkou XC6802. Napájecí systém obsahuje Step-up měnič DIO6605B, jež poskytuje napájecí napětí 5 V pro momentové cívky. Zařízení je možno napájet za pomoci USB napájení 5 V na vývojové desce s mikrokontrolérem, V tom případě dojde k deaktivaci step-up měniče a H-můstek je napájen přímo z USB napájení. Mikrokontrolér následně poskytne napájení pro senzory a bezdrátový modul.



Obrázek 4.1: Blokové schéma řídicí desky magnetorqueru.

4.2 Návrh testovací DPS

Návrh desky plošných spojů spočíval v umístění všech potřebných komponentů na testovací desku. Jedná se částečně o modulové řešení. Napájecí část je osazena přímo na desce. Tato část je nabíječkou XC6802, napěťovým regulátorem LD117/A33, step-up měničem DIO6605B. Na desce je umístěn i senzor proudu tvořený měřením úbytku napětí na bočnicku. V této části se také nachází H-můstek L298, který v modulovém řešení zabíral příliš velkou plochu.

Na DPS jsou také vytvořené konektory pro senzory pohybu a orientace, které tvoří akcelerometr MPU6050 a magnetometr HMC5883L. Konektory jsou dále vytvořeny pro bezdrátový modul nRF24L01, který komunikuje s přijímací deskou a konektor pro vývojovou desku s mikrokontrolérem STM32F103C8. Řídicí deska má rozměr 100 x 100 mm. Napájecí vodivé cesty mají šířku 36 mils a signálové cesty 12 mils. V každém rohu jsou vyvrtány montážní otvory pro metrické šrouby M3 ve vzdálenosti 5 mm od okraje desky. Dále jsou vytvořeny čtyři montážní otvory ve vzdálenosti 18,5 mm od okraje desky pro uchycení kostry obvodové cívky. Dva z těchto otvorů jsou využity pro uchycení solenoidu. Schéma řídicí desky se nachází v příloze A.1, motiv plošného spoje v příloze A.3 a osazovací plán v příloze A.4.

U návrhu přijímací desky bylo nutné propojit pouze vývodovou desku s USB/UART převodníkem a bezdrátovým modulem nRF24L01. Tedy v tomto případě se jednalo o plně modulové řešení. Přijímací deska má rozměry 30 x 80 mm. Schéma přijímací desky se nachází v příloze A.2, motiv plošného spoje v příloze A.5 a osazovací plán v příloze A.6.

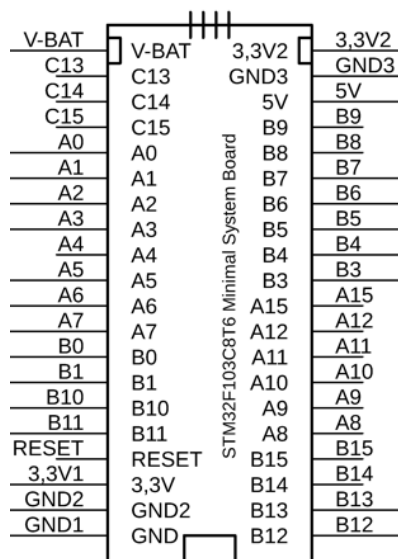


Obrázek 4.2: Testovací DPS s osazenými součástky, moduly a momentovými cívkami.

4.3 Použité komponenty

Vývojová deska STM32 BluePill s STM32F103C8T6

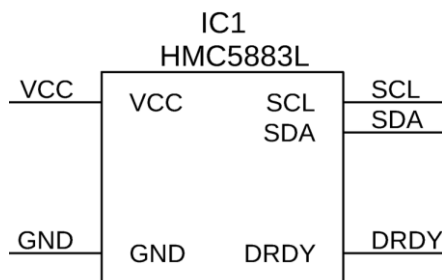
Vývojová deska disponuje mikrokotrolérem z rodiny ARM-Cortex-M3 STM32F103C8 pracující na frekvenci až 72 MHz. Rozměry vývojové desky jsou 53mm x 22mm a rozteč pinů odpovídá 40 DIP pouzdru. Obsahuje vestavěnou paměť Flash o velikosti 64 kB, dva 12bitové ADC převodníky (16 kanálů) a 7 časovačů. STM32 Bluepill umožňuje komunikaci pomocí následujících rozraní: dvou I2C a SPI sběrnice, tří UART, USB a CAN.



Obrázek 4.3: Vývojová deska STM32F103C8T6 Bluepill.

Magnetometr HMC5883L

Modul obsahuje integrovaný obvod HMC5883L, který slouží pro měření síly magnetického pole ve třech osách. Jelikož senzor disponuje 12bitovým ADC převodníkem, lze určit orientaci tělesa s přesností na 1 až 2 stupně a je tedy možné jej využít jako elektronický kompas. Orientace tělesa je dopočítávána z naměřených hodnot geomagnetického pole v ose x a v ose y. Čipová součástka komunikuje s dalšími periferiemi pomocí I2C rozhraní. Tento modul lze napájet 3,3 nebo 5 V. Integrovaný obvod HMC5883L je uložen v 16 pinovém pouzdře LPCC. [20]

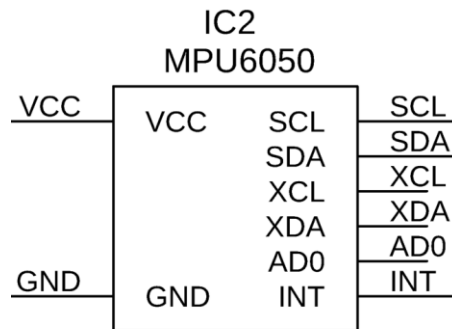


Obrázek 4.4: Magnetometr HMC5883L.

Akcelerometr MPU6050

Tento modul obsahuje integrovaný obvod MPU6050, jenž má funkci gyroskopu a akcelerometru. Integrovaný obvod obsahuje tři 16bitové ADC převodníky pro digitalizaci výstupů gyroskopu a tři 16bitové ADC převodníky pro digitalizaci výstupů akcelerometru. Pro přesné sledování rychlých i pomalých pohybů je integrovaný obvod vybaven uživatelsky programovatelným gyroskopem v rozsahu ± 250 , ± 500 , ± 1000 a $\pm 2000^\circ/s$ a uživatelsky programovatelným akcelerometrem v rozsahu $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ a $\pm 16g$. Vyrovňovací paměť FIFO o velikosti 1024 bytů pomáhá snížit spotřebu

energie systému tím, že umožňuje systémovému procesoru číst data senzoru po dávkách a poté přejít do úsporného režimu. Modul komunikuje s ostatními zařízeními za pomoci I2C rozhraní a lze jej napájet 3,3 nebo 5 V. [21]

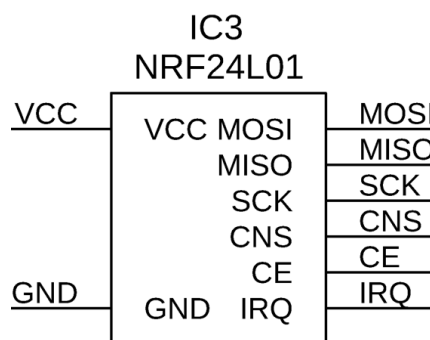


Obrázek 4.5: Akcelerometr MPU6050.

Bezdrátový modul nRF24L01

Modul nRF24L01 umožňuje bezdrátovou komunikaci na frekvenci 2,4 GHz. Integrovaný obvod je konfigurován a provozován pomocí sériového periferního rozhraní SPI rozhraní. Rychlost přenosu dat dosahuje až 2 Mbps. Díky pokročilým algoritmům bezdrátové komunikace omezuje vlivy rušení. Bezdrátový modul má velmi malou spotřebu, což umožňuje dlouhodobý provoz pouze z baterie.

Bezdrátový modul vysílá z testovací desky informace ze senzorů. Tyto data jsou přijata na přijímači a vypsána do uživatelské aplikace, kde je zobrazena hodnota magnetického pole v ose x a v ose y, rotace tělesa, gravitační zrychlení a hodnoty proudů, které procházejí jednotlivými cívkami. Přijímač odesílá zpět data, jež nesou informaci o procentuálním nastavení PWM na H-můstky či přímo nastavení orientace tělesa. Na obou stranách je tedy bezdrátový modul nastaven do fáze vysílací i přijímací. [22]



Obrázek 4.6: Bezdrátový modul nRF24L01.

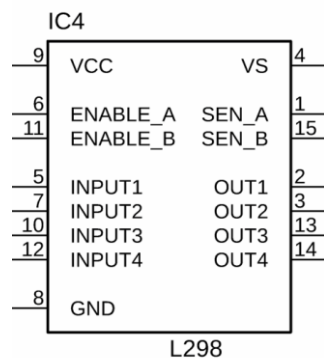
H-můstek L298

Ovládání elektromagnetických cívek je řešeno za pomoci H-můstku L298, který je pouzdřen v 15pinovém obalu PowerSO20. Jedná se o vysokonapěťový duální můstkový řadič(driver), kterým lze řídit krokové motory či indukční zátěže s využitím logických

úrovni. Obsahuje také dva aktivační vstupy Enable, jimiž lze povolit řízení pomocí logických úrovní. Tento obvod je limitován pracovním kmitočtem 40 kHz, a tedy pro spínání pomocí PWM regulace je využit kmitočet 32 kHz. Napájení H-můstku Vcc je 5 V a stejnou hodnotu má i pracovní napětí Vs, jenž je maximálním napětím přiloženým na jedné z cívek v případě plně otevřeného H-můstku. Na každém z můstků je vyveden pin SEN_A a SEN_B pro snímání proudu.

Na piny ENABLE_A a ENABLE_B je přivedena aktivní logická úroveň v případě, že PWM dané cívky se nerovná 0 a umožní ovládat h-můstek pomocí logických úrovní neboli pomocí PWM regulace. Vstupní piny INPUT1 a INPUT3 slouží pro připojení PWM regulačních signálů. INPUT2 a INPUT3 je určen pro volbu polaroty napětí na výstupu.

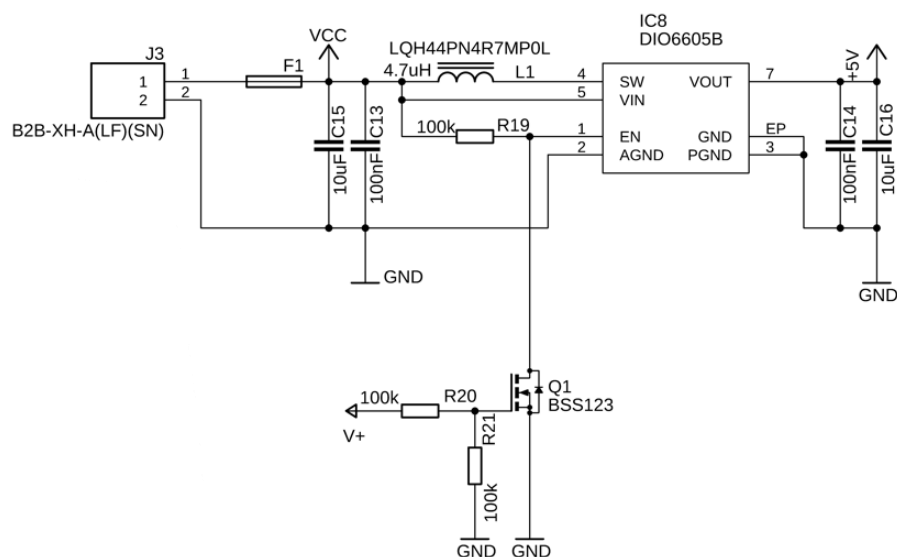
Tento H-můstek lze využít s maximálním pracovním napětím 46 V a dokáže poskytnout až 2 A na jeden kanál. Minimální napětí pro aktivní logickou úroveň je 2,3 V. [23]



Obrázek 4.7: H-můstek L298.

Step-up měnič

Integrovaný obvod DIO6605B je vysoce účinný regulátor napětí určený pro step-up aplikace. Na výstupu generuje napěťovou hladinu 5 V a maximální proud 600 mA při napájení z baterie 3,3 V. Při nízké zátěži přechází do úsporného režimu, což zvyšuje jeho účinnost. V nespojitém režimu je schopen utlumit elektromagnetické rušení. Pracovní teplota DIO6605B se pohybuje mezi 40 °C až +85°C a v případě překročení teploty dojde k odpojení obvodu. [24]



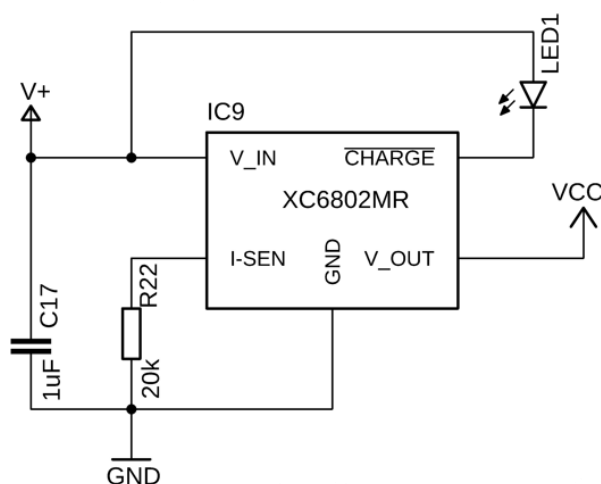
Obrázek 4.8: Step-up měnič DIO6605B.

Nabíječka Li-ion baterie

Integrovaný obvod XC6802 poskytuje lineární nabíjení konstantním proudem jedno článkových lithium iontových nebo lithium-polymerových baterií. Nabíjecí proud je nastaven externím rezistorem R22, tento proud může nabývat až 800 mA. Baterie je však doporučena nabíjet proudem o maximální velikosti 0,1 C, kde C je jmenovitá kapacita článku baterie. V případě nabití baterie na hodnotu 4,2 V zhasne externí zelená LED dioda, která indikuje nabíjení baterie a článek se již dál nenabíjí do doby, než hodnota napětí na baterce poklesne na 4,05 V. Obvod XC6802 obsahuje zdroj referenčního napětí, monitor napětí baterie, budící tranzistor, obvod nabíjení konstantním proudem a ochranu proti přehřátí. [25]

$$U_{\text{bat}} = \frac{V_{\text{isen}}}{R_{\text{sen}}} \cdot 1000 = \frac{1}{20000} \cdot 1000 = 50 \text{ mA} \quad (4.1)$$

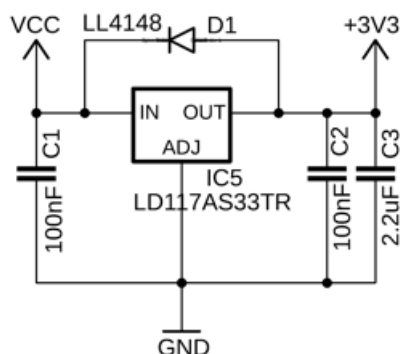
Nabíjecí proud byl původně plánován pro baterku s kapacitou 500mAh. Později však byla využita baterie s kapacitou 2200mAh, což má za následek pouze delší nabíjení baterie.



Obrázek 4.9: Nabíječka Li-ion baterie XC6802.

Stabilizátor napětí

LD117AS33TR je regulátor nízkého napětí 3,3 V, který je schopný poskytovat až 1 A výstupního proudu. Regulátor má typ pouzdra SOT-223. Při provozní teplotě 25 °C může chyba dosahovat maximálně $\pm 2\%$. [26]



Obrázek 4.10: Stabilizátor napětí LD117AS33TR.

Měření proudu pomocí bočnicku

Z můstku L298 jsou vyvedeny piny SEN_A a SEN_B pro snímání proudu jednotlivých můstků. Tento proud je detekován na principu měření úbytku napětí na bočnicku, který má hodnotu odporu 0,1 Ω . Úbytek napětí je snímán operačním zesilovačem OPA330 a jeho výstup je přiveden na vstupní piny B0 a B1 vývojové desky s mikrokontrolérem STM32, kde je nastaven ADC převod. Zesílení operačního zesilovače je nastaveno poměrem rezistorů $(R_9=R_{11})/(R_{10}=R_{12})$ na hodnotu 100. Stejným způsobem je nastavena detekce proudu i na druhém můstku.

$$V_{\text{ADC}} = V_{\text{bočník}} \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (4.2)$$

Napětí na výstupu operačního zesilovače V_{ADC} , jenž snímá napětí na bočníku $V_{bočník}$, je dále přepočítáno na proud v mA za pomoci následujícího vztahu.

$$I = (V_{ADC} \cdot 330) \cdot 4096 \quad (4.3)$$

4.4 Programová část řídicí desky

Jádrem celého systému je mikrokontrolér STM32F103C8, který zajišťuje veškerou funkci testovací desky magnetorquerů. Komunikace s magnetometrem a akcelerometrem je zajištěna pomocí I²C sběrnice. Data z magnetometru nejsou však za provozu cívek validní, a proto je využito přerušení pro vypnutí cívek a odečtu dat o dané poloze. Akcelerometr data aktualizuje s každým průběhem nekonečné smyčky, jenž je na testovací desce nastavena. Bezdrátový modul data neustále odesílá data ze senzorů pomocí radiofrekvenční komunikace na frekvenci 2,4 GHz a přijímá data z uživatelské aplikace z přijímače. Data jsou uložena v potvrzovacím řetězci, bez kterého by komunikace mezi zařízeními neproběhla. Bezdrátový modul je s mikrokontrolérem propojen za pomoci SPI sběrnice.

Přijímací smyčka

Z přijímací desky jsou odeslaná data o dané orientaci nebo nastavení PWM pro ovládání přiloženého napětí na obvodové cívky nebo solenoidu. Testovací deska obdrží tři hodnoty, z nichž první dvě mohou být záporné. Celý rámec začíná řetězcem "tx", čímž je ověřena detekce korektního řetězce. Následuje rozdělení tří hodnot a zakončení rámce znaky "\r" a "\n". Znaménko u hodnoty konfigurace PWM určuje směr generace magnetického pole cívky. V případě že je nastavena nula, je přivedena logická nula na vstupní piny ENABLE A a ENABLE B H-můstku L298. Jiná hodnota PWM aktivuje signál ENABLE do logické jedničky a je procentuálně nastavena napěťová hladina na požadované cívce.

Hodnoty z magnetometru

Magnetometr musí snímat hodnoty pouze v době kdy cívky nejsou aktivní, aby nebyly hodnoty zkresleny magnetickým polem, jenž generují cívky. V programu je tedy nastavené přerušení, které se vyvolá každých 5 vteřin. V tomto okamžiku jsou cívky vypnuty a je zavedeno zpoždění 0,5 vteřiny, což se osvědčilo jako dostačující doba pro vypnutí magnetického pole cívek. Následně je odečtena aktuální hodnota z magnetometru a cívky jsou opět aktivní, pokud nejsou vypnuty. Vypínání cívek je provedeno za pomoci nastavení logické nuly na vstupní piny ENABLE A a ENABLE B H-můstku L298.

Nastavení PWM

H-můstek L298 může pracovat s maximální frekvencí 40 kHz. Tudíž frekvence PWM byla s rezervou nastavena na 35,6 kHz. PWM je možno nastavit v uživatelské programu od 0 % po 100 % s krokem 1 %.

$$F_{\text{PWM}} = \frac{F_{\text{CLK}}}{(\text{ARR} + 1) \cdot (\text{PSC} + 1)} = \frac{36 \cdot 10^6}{(100 + 1) \cdot (9 + 1)} \quad (4.4)$$
$$= 35,6 \text{ kHz}$$

Hlavní smyčka programu

Hlavní smyčka začíná načtením dat ze senzorů a jejich odesláním. Následně přijme data z uživatelské aplikace a provede požadovanou funkci dle obdržných informací. V programu se kontroluje z příchozích dat zejména hodnota "set_current1", která je kromě nastavení požadovaného PWM na obvodové cívice také využita pro volbu dalších funkcí programu. V případě, že je hodnota "set_current1" a "set_current2" menší nebo rovna rozsahu -100 až 100, tak je nastaveno požadované PWM na odpovídající cívice. Znaménko určuje směr buzení cívky. Toto nastavení se nachází v sekci "Nastavení PWM" (viz Uživatelské prostředí). V případě, že je z uživatelské aplikace nastavena hodnota proměnné "set_current1" větší než 100, tak se nastaví adekvátní program, jež má probíhat. Nastavení této proměnné probíhá automaticky při volbě ovládání.

Tabulka 4.1: Funkce hlavní smyčky programu.

Hodnota proměnné "set_current1"	Funkce
> ±100	Konfigurace za pomoci PWM na jednotlivých cívkách.
101	Rotace doleva.
102	Rotace doprava.
103	Konfigurace za pomoci nastavení úhlu.
104	Konfigurace úhlu.

Funkce "Rotation" otáčí těleso požadovaným směrem. První proměnou je požadované PWM, které je nastaveno na maximum, druhá proměnná určuje směr rotace. Znak "-1" označuje rotaci doleva, znak "1" interpretuje otáčení doprava.

Konfigurace za pomoci nastavení úhlu "Orientation_config" rotuje těleso směrem, jež je bližší nastavenému úhlu ku aktuálnímu úhlu. V případě, že těleso je vzdáleno více než 40° od požadovaného, tak je hodnota PWM nastavena na maximální hodnotu. V případě

menší vzdálenosti je PWM nastaveno na 80 %. Jestliže je těleso vzdálené méně než 20°, PWM se nastaví pouze na 60 % a v rozmezí $\pm 5^\circ$ jsou cívky neaktivní.

Konfigurace úhlu "Angle_config" aktivuje obvodovou cívku v záporném směru a odečte úhel, čímž se vytvoří nových 0°. Tuto funkci si uživatel může zvolit v sekci Konfigurace (viz Uživatelské prostředí), v případě nesprávné funkce otáčení tělesa. Při použití funkce se nastaví proměnná "config_enable" do log. 1 a využívá se algoritmus pro natáčení tělesa s novými hodnotami "Rotation_config".

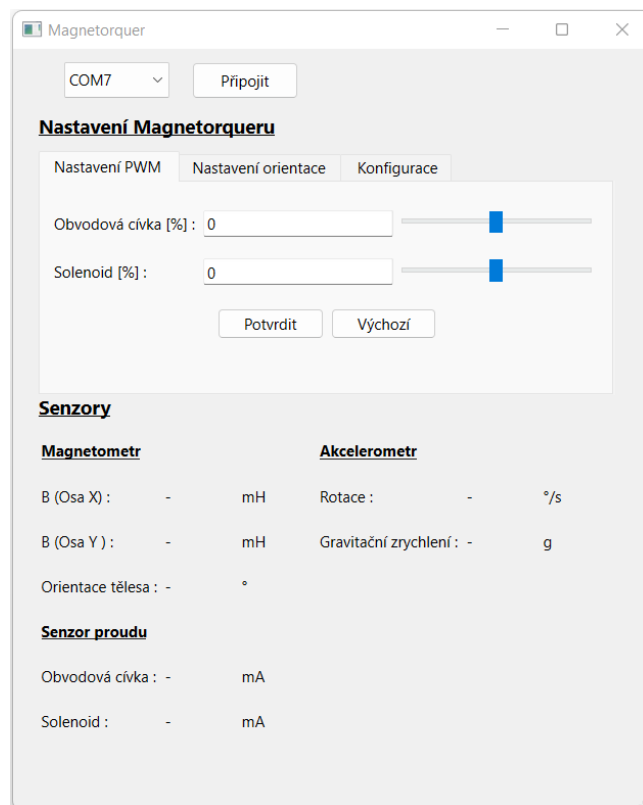
```
while (1)
{
    Sensor_Data();
    //Tx
    Transmit_Data();

    //Rx (Transmitter)
    Read_Data();

    if ((set_current1 > 100) || (set_current2 > 100))
    {
        //Left rotation
        if (set_current1 == 101)
        {
            if (config_enable == 1)
                Rotation_config(100, -1);
            else
                Rotation(100, -1);
        }
        //Right rotation
        else if (set_current1 == 102)
        {
            if (config_enable == 1)
                Rotation_config(100, 1);
            else
                Rotation(100, 1);
        }
        //Set orientation
        else if (set_current1 == 103)
        {
            Orientation_config();
        }
        //Angle configuration
        else if (set_current1 == 104)
        {
            Angle_config();
        }
    }
    //PWM configuration
    else
    {
        PWM_config();
    }
}
```

4.5 Uživatelské prostředí

Tato část práce se zabývá vytvořením uživatelského programu, v němž je možné zobrazit aktuální data ze senzorů, jenž se na testovací desce magnetorqueru nachází. V uživatelském prostředí je dále možné nastavit procentuální buzení cívky neboli nastavení požadované střídy PWM signálu, který je přiveden na vstupní piny H-můstku L298. Vedle nastavení procentuálního buzení cívek je možné nastavit i požadovanou orientaci tělesa. V tom případě je vypnuto manuální buzení cívek a program testovací desky vyhodnotí, zda je těleso orientováno správným směrem nebo zda musí vybudit cívky pro nastavení požadované orientace. Před zahájením však musí uživatel nastavit správný COM port ve kterém je zapojena přijímací deska, jelikož s počítačem komunikuje pomocí UART rozhraní.



Obrázek 4.11: Uživatelské prostředí.

Informace ze senzorů

Testovací deska odesílá v nekonečné smyčce data o dané poloze, rotaci, gravitačním zrychlení a proudu procházejícím jednotlivými cívkami. Celkem tedy přijímač obdrží pět hodnot, přičemž magnetické pole ve dvou osách a rotace může být záporným číslem. Tento rámec začíná řetězcem "rd" za pomoci něhož je vyhodnoceno, zda jsou přijatá data korektní. Následuje pět hodnot jdoucích po sobě oddělených čárkami, které jsou v uživatelském programu roztrženy a zapsány do požadovaných polí. Celý řetězec je ukončen znaky "\r" a "\n", jenž označují konec příjmu dat a přeruší rozdělovací smyčku

v uživatelském programu.

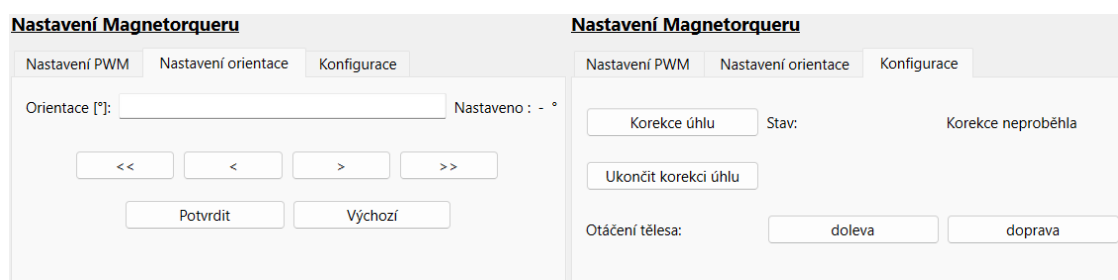
Výpočet orientace tělesa je realizován na základě dat získaných z magnetometru a je proveden v uživatelském programu.

Ovládání

Po nastavení správného COM portu pro příjem a odesílání dat přes UART rozhraní a následném stisknutí tlačítka "Připojit", může uživatel v případě volby "Nastavení PWM" zvolit požadovanou procentuální hodnotu PWM signálu na jednotlivých cívkách. Konfiguraci je možné provést pomocí posuvníku, jenž nastaví jeho aktuální číselnou polohu do editovatelného pole nebo je možné přímo zapsat hodnotu do zmíněného pole, která v závislosti na zvolené hodnotě opět nastaví posuvník do odpovídající polohy. Hodnoty jdou nastavit v rozmezí -100 až 100 %. Zvolené hodnoty jsou odeslané až v případě stisknutí tlačítka "Potvrdit". Pokud je stisknuto tlačítko "Výchozí", nastaví se hodnoty do nuly a data jsou hned odeslaná na testovací desku. V takovém případě dojde k vypnutí momentových cívek.

V případě volby "Nastavení orientace" může uživatel zvolit požadovanou orientaci tělesa. Aktuální orientaci tělesa je zobrazena v části "Senzory". Úhel natočení lze zvolit od 0° po hodnotu 359°. Úhel lze volit pomocí editovatelného pole a následně odeslat pomocí tlačítka "Potvrdit". V tom případě je nastavena požadovaná orientace tělesa v části "Nastaveno" a je zahájeno automatické natočení. V případě stisknutí tlačítka "Výchozí" dojde k vynulování hodnot požadované orientace a odeslání dat. V této části ovládání je možné těleso orientovat za pomoci šipek, kde dvojitá šipka znamená posun o 10° a obyčejná o 1°. Po stisknutí šipky dojde k okamžitému odeslání dat, které jsou hned zpracovány.

Pokud dojde k překročení rozsahu, tak se v obou případech konfigurace nastaví se hodnota na nejbližší krajní rozsah.



Obrázek 4.12: Ovládání a konfigurace testovací desky.

V sekci konfigurace lze provést korekci úhlu magnetometru. V případě, že těleso má problémy s nastavením požadované orientace, je nutné změnit výchozí nastavení orientace na konfigurované. Korekce spočívá v odečtení úhlu při natočení tělesa do polohy, kdy je obvodová cívka aktivní v záporném směru a solenoid je vypnutý. Korekce probíhá automaticky po stisknutí tlačítka "Korekce úhlu". V tom případě se vytvoří nová

hodnota konfiguračního úhlu, která se bude rovnat aktuální hodnotě úhlu, dokud nebude korekce ukončena. Těleso se natáčí automaticky, tedy uživatel vyčkává, než bude těleso ve stabilní poloze. V momentě stisknutí tlačítka "Ukončit korekci úhlu", bude aktuální hodnota úhlu zapsána do konfigurované hodnoty úhlu, která je odečtena od nové. Změna úhlu je provedena pouze v programu testovací desky, a tedy v uživatelském rozhraní se úhel nemění. Program testovací desky následně začne využívat algoritmus pro natáčení při korigovaném úhlu místo výchozího. Tímto způsobem bylo konfigurováno nových 0° .

V případě, že se těleso nehýbe po stisknutí tlačítka "Korekce úhlu" je možné těleso otočit do jiné pozice za pomoci PWM regulace. Ověření konfigurace lze provést za pomoci otáčení tělesa doprava nebo doleva, které se nachází také v sekci konfigurace.

Stav konfigurace zobrazuje tři možnosti:

- Korekce neproběhla – Výchozí nastavení.
- Korekce probíhá – Těleso je konfigurováno. Dokud těleso není ve stabilní poloze a není stisknuto tlačítko "Ukončit korekci úhlu" může způsobit nesprávné nastavení programu a pro správnou funkci musí být testovací deska opět nakonfigurována.
- Korekce proběhla – Konfigurace je ukončena. Informuje uživatele, že program testovací desky již není ve výchozím nastavení a využívá nově nastavený úhel.

4.6 Návrh momentových cívek

Návrh momentových cívek je rozdělen do dvou částí. První část se zabývá návrhem cívek pro model, jenž je určen pro testování v pozemských podmínkách, kde na testované těleso působí tření okolního prostředí. Ve druhé části jsou navrženy cívky, které jsou vhodné pro CubeSat, jenž je umístěn na oběžné dráze. Magnetorquer zde pracuje v součinnosti s dalšími akčními členy, a tudíž nepotřebuje generovat tak silný magnetický dipólový moment. Na oběžné dráze není také CubeSat vystaven tak velkému tření okolí jako v pozemských podmínkách. Cívky navržené pro testovací model nejsou zase vhodné pro vesmírné mise, z důvodu větší spotřeby elektrické energie a mnohem větší hmotnosti.

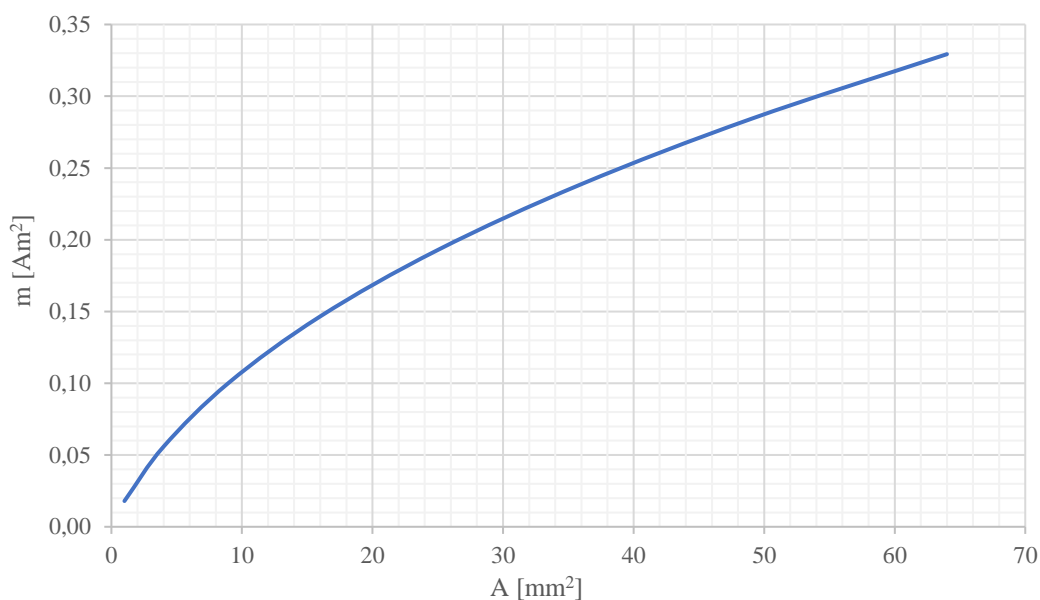
Návrh magnetorquerů pro pozemské testování generuje zhruba dvakrát větší magnetický dipólový moment než cívky určené pro vesmírné aplikace. Řídící systém napájení (EPS) poskytuje převážně tři napěťové hladiny a to 3,3; 5 a 12 V. Pro řízení magnetorqueru byla vybrána napěťová hladina 5 V, ostatní prvky testovací desky jsou však napájeny 3,3 V.

4.6.1 Výpočet obvodové cívky bez jádra

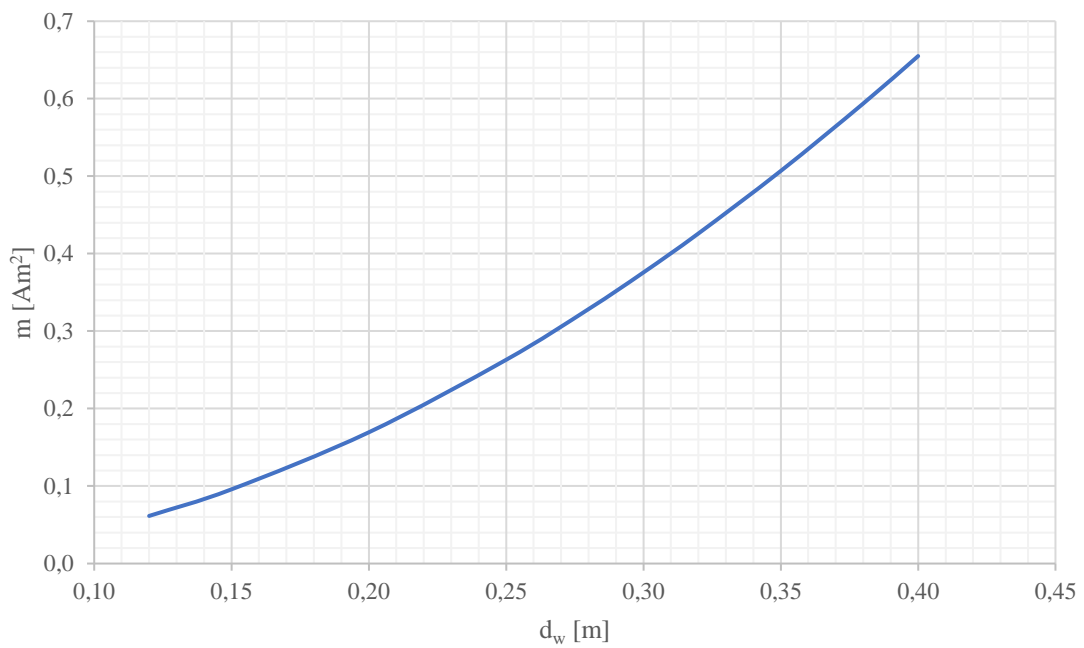
Návrh obvodové cívky pro pozemské testování vychází ze zvolené hodnoty napěťové hladiny pro napájení cívek 5 V, stanoveného maximálního proudu cívkou 250 mA a následných experimentálních výpočtů, jejichž výsledky jsou vyhodnoceny na následujících grafických závislostí.

Obrázek 4.13 poukazuje na skutečnost, že obvodová cívka neboli cívka bez jádra využívá k dosažení požadovaného magnetického dipólového momentu primárně velikost své plochy. Jedná se o graf závislosti čtvercových cívce, kde je vinutý vodič o průměru $d_w = 0,28$ mm a prochází jím proud $I = 100$ mA, čímž byla stanovena přesná délka vodiče. Počet závitů je vždy adekvátní k délce vodiče, obvodu cívky a nárůstu vinutí.

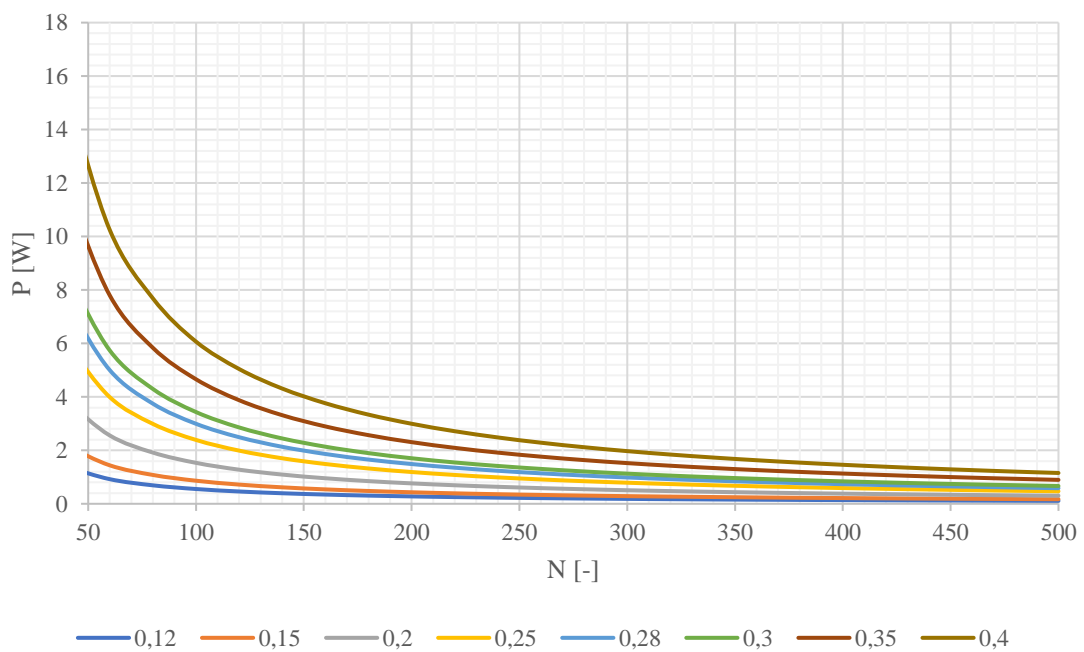
Obrázek 4.14 zobrazuje závislost průměru vinutého vodiče a výsledného magnetického dipólového momentu m . Vypočítané hodnoty mají stanovený přesný počet závitů $N = 350$, plochu cívky $55,77$ cm² a napětí přiložené na vinutí 5 V. Z grafické závislosti je patrné, že magnetický moment cívky se exponenciálně zvyšuje s nárůstem průměru vodiče. Zvětšení průměru vodiče zapříčiní zvýšení spotřeby elektrické energie, kterou lze snížit větším počtem závitů (Obrázek 4.15), avšak to se opět negativně projeví na zvětšení délky vodiče, nárůstu výšky vinutí a celkové hmotnosti momentové cívky (Obrázek 4.16).



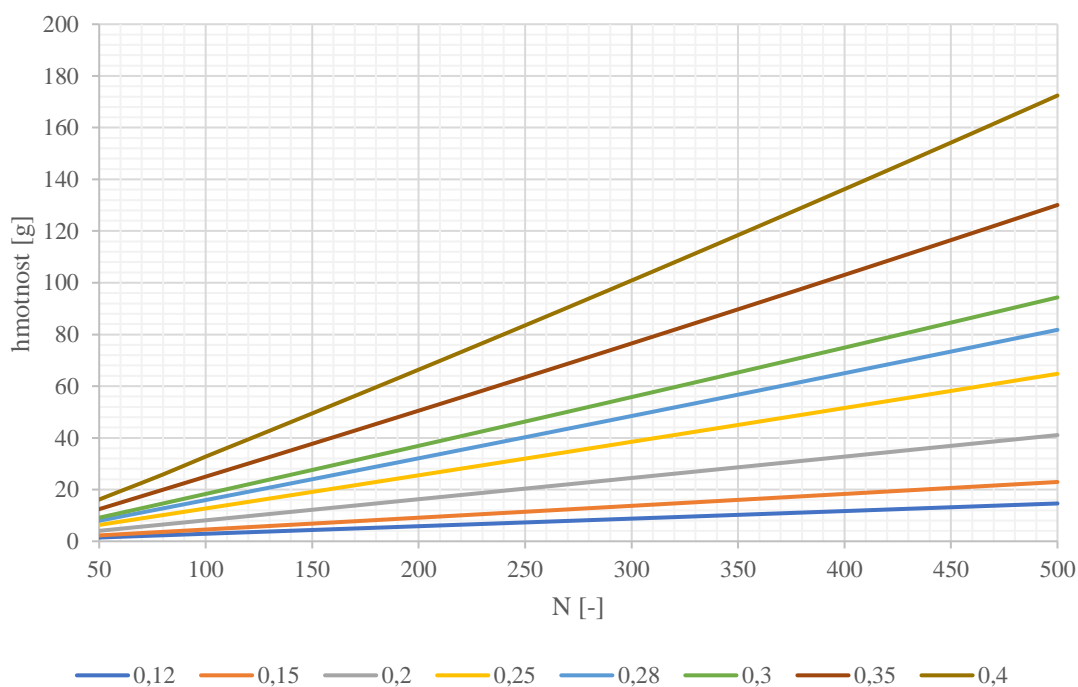
Obrázek 4.13: Graf závislosti plochy čtvercové cívky na magnetickém dipólovém momentu.



Obrázek 4.14: Graf závislosti magnetického dipólového momentu na průměru vinutého vodiče (Obvodová cívka).



Obrázek 4.15: Graf závislosti spotřeby obvodové cívky při maximálním zatížení P na počtu závitů N.



Obrázek 4.16: Graf závislosti hmotnosti obvodové cívky na počtu závitů N.

V následující tabulce jsou zobrazeny zvolené hodnoty, jež byly stanoveny pomocí grafických závislostí vypracovaných na základě experimentálních výpočtů. Minimální magnetický moment byl stanoven dvakrát větší než u řešení pro vesmírné aplikace a rozměry byly určeny tak, aby bylo možné momentovou cívku umístit do CubeSatu o rozměrech 10x10x11,35 cm.

Tabulka 4.2: Zvolené hodnoty pro obvodovou cívku.

m [Am²]	U [V]	I [mA]	d_w [mm]	d_i [mm]	d_o [mm]	l_c [mm]
> 0,4	5	250	0,4	75	> 90	16

m – magnetický dipólový moment cívky

U – napětí na cívce

I – proud tekoucí cívku

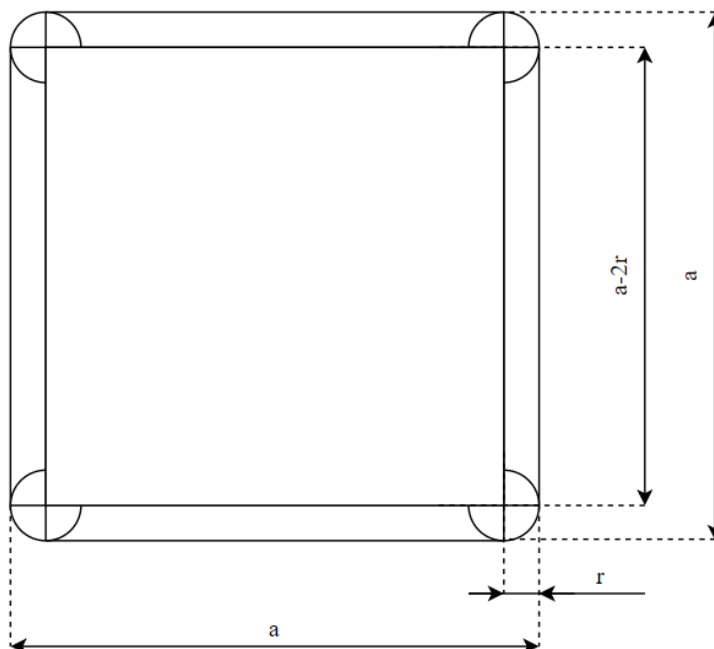
d_w – průměr vodiče

d_i – vnitřní průměr cívky

d_o – vnější průměr cívky

l_c – délka cívky

Obvodová cívka je vinuta na kostře, která je tvořena zaobleným čtvercem, aby bylo možné využít co největší plochy po řídicí desce. Obrázek 4.17 popisuje vnitřní plochu obvodové cívky.



Obrázek 4.17: Vnitřní plocha obvodové cívky.

a – délka vnitřní strany obvodové cívky

r – rádius zaoblení rohů čtvercové cívky

Teoretický výpočet vnitřní plochy cívky.

$$\begin{aligned}
 A &= S_{\square} + 4 \cdot S_{\square} + S_{\circ} = \\
 &= (a - 2r)^2 + 4 \cdot (a - 2r) \cdot r + \pi \cdot r^2 = \\
 &= a^2 - 4ar + 4r^2 + 4ar - 8r^2 + \pi \cdot r^2 = \\
 &= a^2 - 4r^2 + \pi \cdot r^2
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

A – celková vnitřní plocha cívky

S_{\square} – obsah čtvercové části obvodové cívky (o straně " $a-2r$ ")

S_{\square} – obsah obdélníkové části obvodové cívky (o stranách " r " a " $a-2r$ ")

S_{\circ} – obsah kruhové části obvodové cívky (o poloměru " r ")

Stanovení minimálního odporu pro maximální zatížení obvodové cívky při 5 V.

$$R_{\min} = \frac{U}{I} = \frac{5}{0,25} = 20 \, \Omega
 \tag{4.6}$$

R_{\min} – minimální odpor obvodové cívky

Výpočet délky vodiče, jenž je adekvátní minimálnímu odporu vinutí R_{\min} .

$$\rho = \frac{R_{\min} \cdot S_w}{l_w} \Rightarrow l_w = \frac{R_{\min} \cdot \pi \cdot r_w^2}{\rho} =$$

$$= \frac{20 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2}{0,0178 \cdot 10^{-6}} = 141,2 \text{ m} \quad (4.7)$$

ρ – rezistivita vodiče ($0,0178 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ pro měděný vodič)

S_w – průřez vodiče

l_w – délka vodiče

r_w – poloměr vodiče

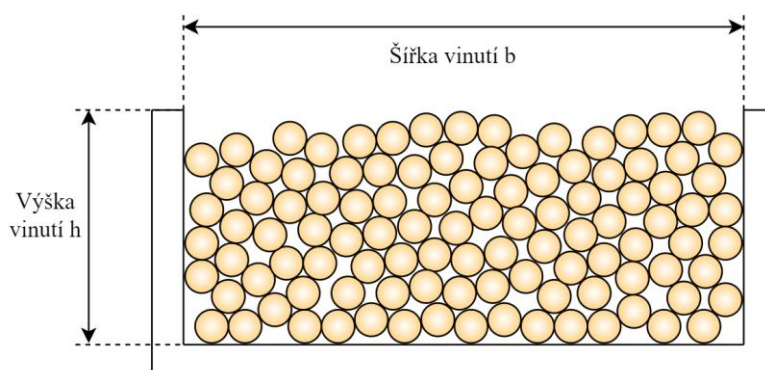
Kostra cívky je navržena tak, aby vodič nebyl namáhán na hraně kostry. Čtvercová cívka má tedy zaoblené rohy, jenž mají rádius 10 % z délky stěny čtvercové cívky. Výsledná vnitřní plocha cívky A je vypočítána následovně.

$$A = a^2 - 4 \cdot (0,1 \cdot a)^2 + \pi \cdot (0,1 \cdot a)^2 =$$

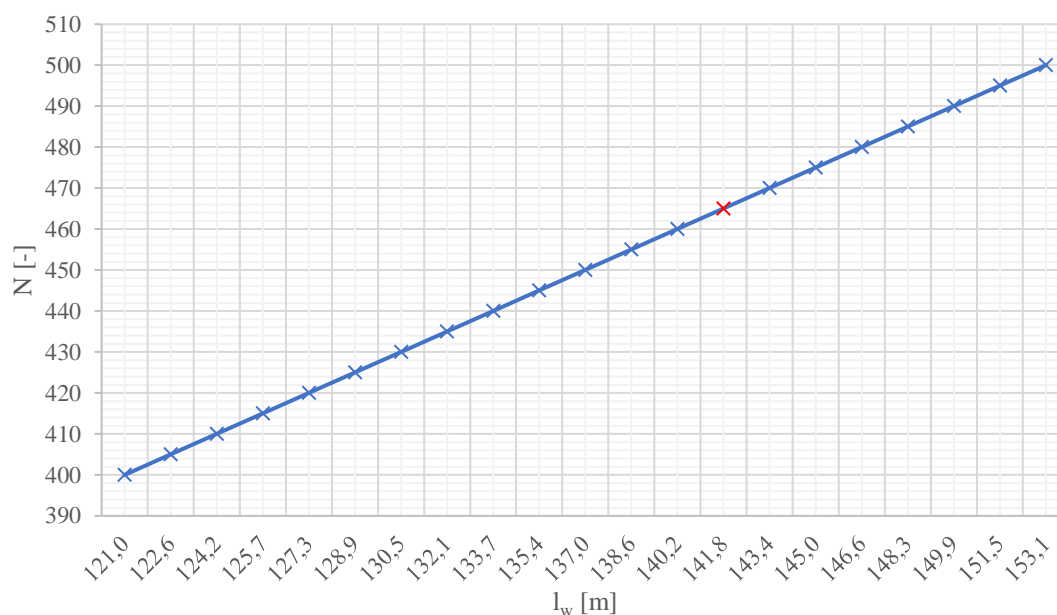
$$= (0,075)^2 - 4 \cdot (0,1 \cdot 0,075)^2 + \pi \cdot (0,1 \cdot 0,075)^2 = \quad (4.8)$$

$$= 55,77 \text{ cm}^2$$

Obrázek 4.19 poukazuje na závislost mezi délkou vodiče a počtem závitů. Tato závislost se odvíjí od navyšující se výšky vinutí s každou vrstvou závitů. Pro výpočet výšky vinutí je využita rovnice pro neuspořádané vinutí vodiče, která má koeficient plnění mezi 70 % až 80 %.



Obrázek 4.18: Neuspořádané vinutí.



Obrázek 4.19: Graf závislosti délky vodiče na počtu závitů obvodové cívky.

Z grafu je patrné, že 465 závitů na obvodové cívce odpovídá délce vodiče 141,8 m, což je nejbližší vyšší hodnota délky vodiče pro stanovený maximální zatížení obvodové cívky. Následující výpočty jsou vzorovými příklady ke zvolené hodnotě počtu závitů cívky.

Výpočet výšky vinutí při neuspořádaném vinutí.

$$h = \frac{d_w^2 \cdot N}{l_c} = \frac{0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 465}{16 \cdot 10^{-3}} = 4,65 \text{ mm} \quad (4.9)$$

h – výška vinutí

N – počet závitů

Stanovení průměrné délky strany s vinutím.

$$\begin{aligned} a_{\text{avg}} &= 2 \cdot \frac{h}{2} + a = h + a = 4,69 \cdot 10^{-3} + 75 \cdot 10^{-3} = \\ &= 79,65 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.10)$$

a_{avg} – průměrná délka strany vinutí

Výpočet průměrného obvodu cívky, z něhož je následně stanovená nová délka vodiče, jenž musí být stejná nebo větší než původně stanovená pro maximální výkon.

$$o_{\text{avg}} = 4 \cdot (a_{\text{avg}} - 2 \cdot a_{\text{avg}} \cdot 0,1) + 2 \cdot \pi \cdot a_{\text{avg}} \cdot 0,1 = \quad (4.11)$$

$$= (4 \cdot 79,65 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 79,65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1) + 2 \cdot \pi \cdot 79,65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1) = 304,9 \text{ mm}$$

o_{avg} – průměrný obvod vinutí

Stanovení délky vodiče pro zvolený počet závitů.

$$l_w = N \cdot o_{\text{avg}} = 465 \cdot 304,9 \cdot 10^{-3} = 141,8 \text{ m} \quad (4.12)$$

Po zvolení počtu závitů a výpočtu délky vodiče se jeho odpor zvýší na 20,08 Ω . Výsledný magnetický moment cívky je roven:

$$m = NIA = 465 \cdot 0,249 \cdot 55,77 \cdot 10^{-4} = 0,646 \text{ Am}^2 \quad (4.13)$$

Následující výpočet je určen pro porovnání hodnot obvodové cívky v simulačním prostředí Ansys Maxwell.

Vzorec pro výpočet indukčnosti obvodové cívky, vychází ze vzorce pro výpočet indukčnosti vícevrstvého solenoidu (4.29). Vzorec je upraven na vztah, kde lze využít průměrnou plochu cívky S_{avg} . Veškeré hodnoty parametrů jsou udány v cm a výsledek je dán v μH .

$$L_r = \frac{0,1 \cdot S_{\text{avg}} \cdot N^2}{3,385 \cdot \sqrt{S_{\text{avg}}} + 9 \cdot l_s + 10 \cdot h} =$$

$$= \frac{0,1 \cdot 59,28 \cdot 465^2}{3,385 \cdot \sqrt{59,28} + 9 \cdot 1,6 + 10 \cdot 0,465} = 28413 \mu\text{H} \quad (4.14)$$

L_r – indukčnost cívky

S_{avg} – průměrný obsah cívky s vinutím

Stanovení celkové hmotnosti obvodové cívky, které vychází pouze z hmotnosti vinutí cívky.

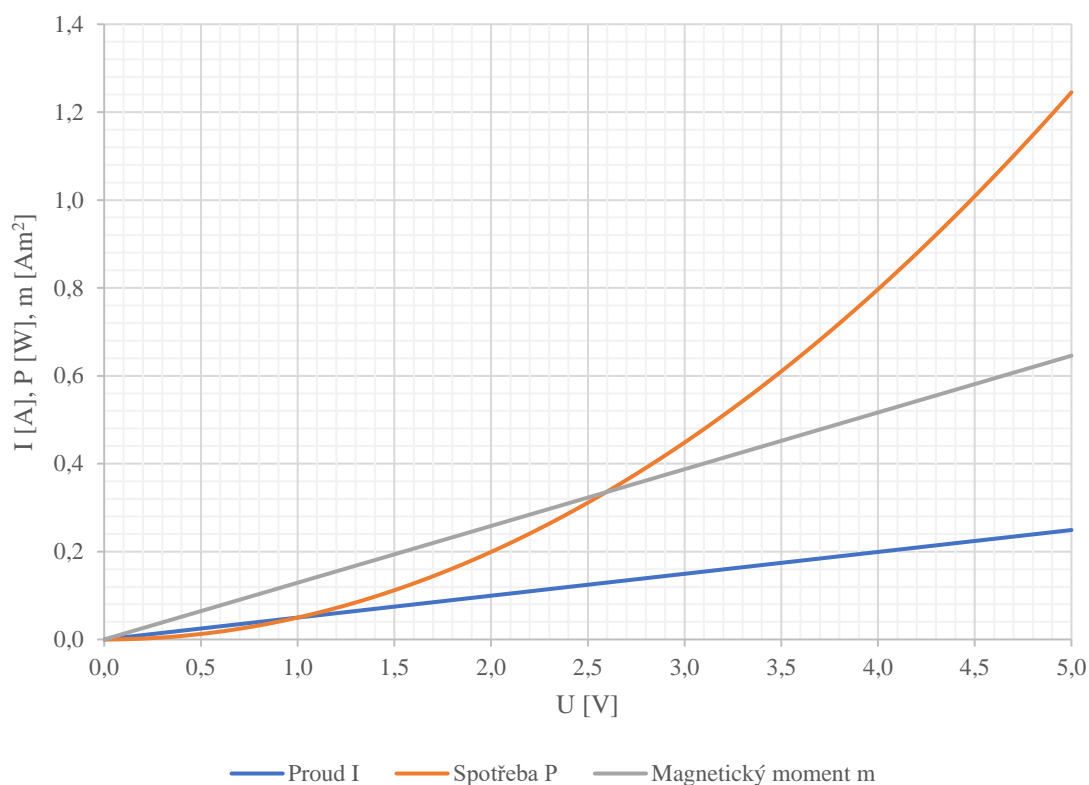
$$m_m = \rho_{\text{cu}} \cdot V = 8960 \cdot (\pi \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 141,2) = 159 \text{ g} \quad (4.15)$$

m_m – hmotnost cívky

ρ_{cu} – hustota mědi (8960 kg/m³)

V – celkový objem měděného vodiče

Obrázek 4.20 znázorňuje závislost proudu I , spotřeby P a magnetického momentu m na napětí U přiloženém na obvodové cívce. Maximální magnetický moment je roven 0,646 Am² při maximálním proudu 249 mA a spotřebě 1,245 W. Cívka má celkovou hmotnost 159,7 g.



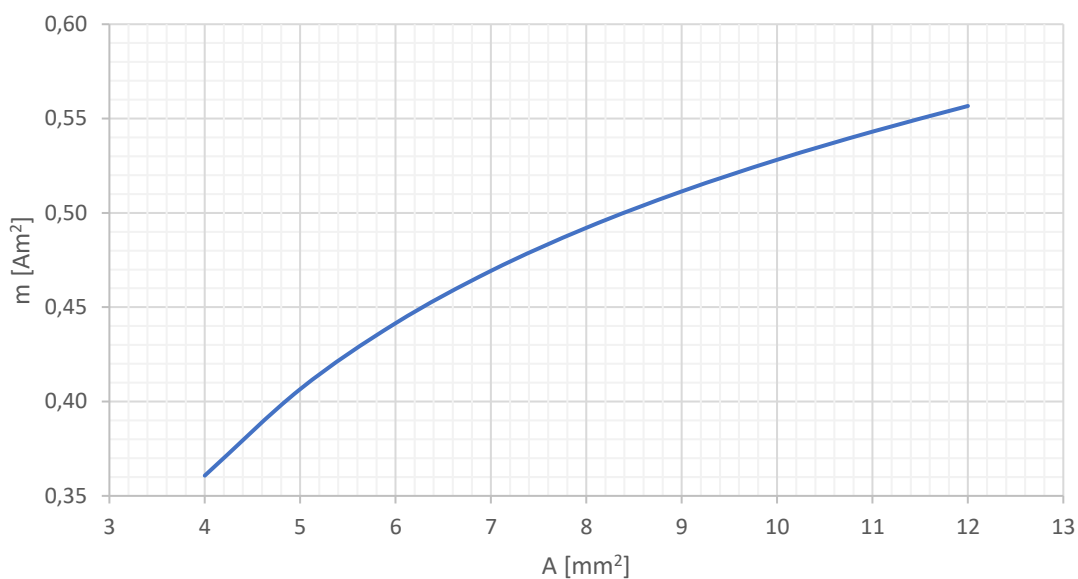
Obrázek 4.20: Závislost proudu I, spotřeby P a magnetického dipólového momentu m na přiloženém napětí U (obvodová cívka).

U výpočtů je zanedbána vnější izolace vinutého vodiče, která se odvíjí od daného materiálu a počtu vrstev naneseného laku. V případě započtení izolace vodiče v první třídě má průměr 0,439 mm, což při stejné délce vodiče sníží na nejbližší vyšší počet závitů 460. Délka vodiče bude 141,8 metru, odpor 20,08 Ω , výška vinutí 5,54 mm a výsledný magnetický moment 0,638 Am².

4.6.2 Výpočet solenoidu

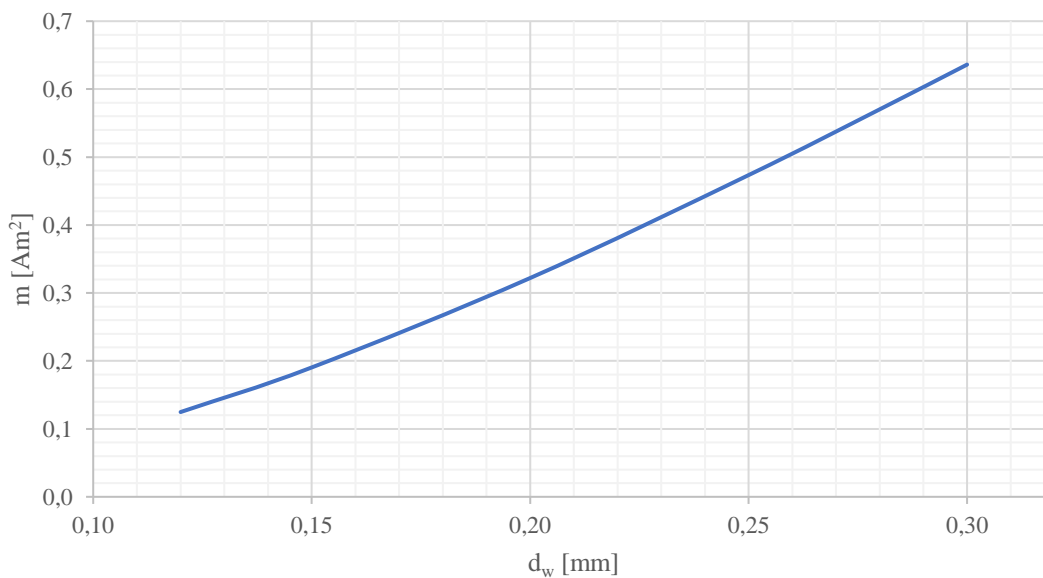
Solenoid využívá stejného principu jako obvodová cívka s rozdílem, že vodič je navinutý kolem jádra, které je tvořeno magneticky měkkým materiálem. Takový materiál je citlivý na magnetické pole vytvořené cívkou a má tendenci se zmagnetizovat, čímž zesiluje celkový magnetický moment solenoidu. Výhodou tohoto řešení je možnost zesílení magnetického pole o několik řádů při menší spotřebě elektrické energie v porovnání s cívkou bez jádra. Nevýhodou je však nárůst hmotnosti této cívky a přítomnost zbytkového magnetického pole v jádře solenoidu.

Stejně jako obvodová cívka, hodnota magnetického dipólového momentu je závislá na vnitřní ploše cívky, a tedy i průřezu jádra (Obrázek 4.21). Pro tuto závislost je stanoven průřez vodiče $d_w = 0,28$ mm, napětí na solenoidu $U = 5$ V, proud procházející cívkou $I = 80$ mA a délku vodiče odpovídající jeho odporu při zmíněných parametrech 216,2 m. Počet závitů je pro každý průměr roven adekvátní délce vodiče.

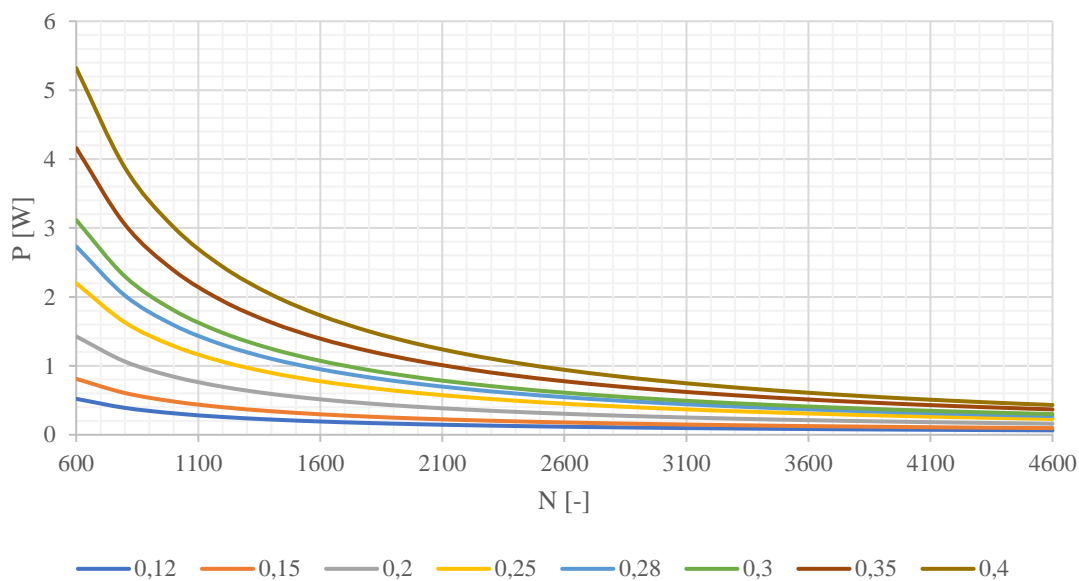


Obrázek 4.21: Graf závislosti plochy solenoidu na magnetickém dipólovém momentu.

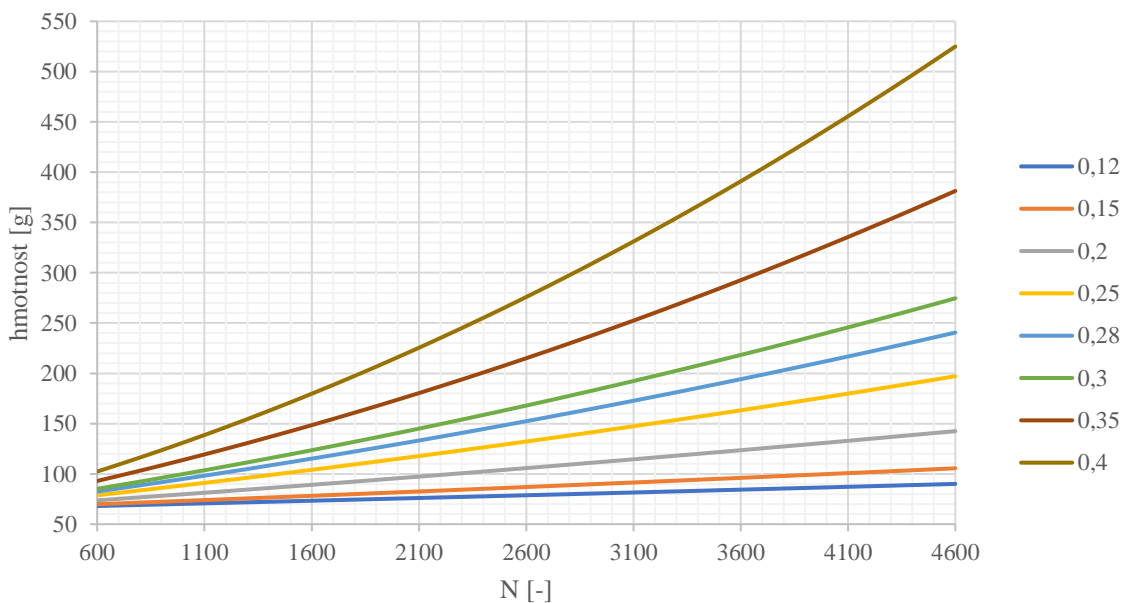
Obrázek 4.22 popisuje závislost průměru vinutého vodiče na magnetickém dipólovém momentu m . Vnitřní průměr cívky byl zvolen 16 mm, přičemž 2 mm z každé strany tvoří stěna kostry, jádro má tedy průměr 12 mm. Pro experimentální výpočet byl zvolen počet závitů $N = 3000$.



Obrázek 4.22: Graf závislosti magnetického dipólového momentu na průměru vinutého vodiče (solenoid).



Obrázek 4.23: Graf závislosti spotřeby solenoidu při maximálním zatížení P na počtu závitů N.



Obrázek 4.24: Graf závislosti hmotnosti solenoidu na počtu závitů N.

V následující tabulce jsou zobrazeny zvolené hodnoty, jež byly stanoveny pomocí grafických závislostí. Minimální magnetický moment byl stanoven dvakrát větší než u řešení pro vesmírné aplikace. Rozměry momentové cívky byly stanoveny dle vnitřních rozměrů CubeSatu o velikosti 10x10x11,35 cm. Jádru solenoidu bylo vybráno z běžně dostupných materiálů. Je tvořeno ocelovou kulatinou o průměru 12 mm. Relativní

permeabilita takového jádra se pohybuje od 300 po hodnotu 10 000, přičemž hodnota pro výpočet a simulaci magnetického momentu byla zvolena nejnižší z rozsahu.

Solenoid je navinutý na plastové kostře vytisknuté za pomoci 3D tisku z materiálu PLA. Vnitřní průměr cívky má 16 mm a šířka stěny má 2 mm v důsledku dostatečné pevnosti kostry při navíjení vodiče.

Tabulka 4.3: Zvolené hodnoty pro solenoid

m [Am²]	U [V]	I [mA]	d_w [mm]	d_i [mm]	d_c [mm]	l_s [mm]	μ_r [-]
> 0,3	5	< 100	0,28	16	12	60	> 300

m – magnetický dipólový moment cívky

U – napětí na cívce

I – proud tekoucí cívkou

d_w – průměr vodiče

d_i – vnitřní průměr cívky

d_c – průměr jádra

l_s – délka solenoidu

μ_r – relativní permeabilita jádra

Výpočet minimálního odporu vinutí R_{min} při stanoveném proudu solenoidem I = 80 mA.

$$R_{\min} = \frac{U}{I} = \frac{5}{0,08} = 62,5 \Omega \quad (4.16)$$

R_{min} – minimální odpor solenoidu

Stanovení délky vodiče l_w pro maximální zatížení cívky při 5 V.

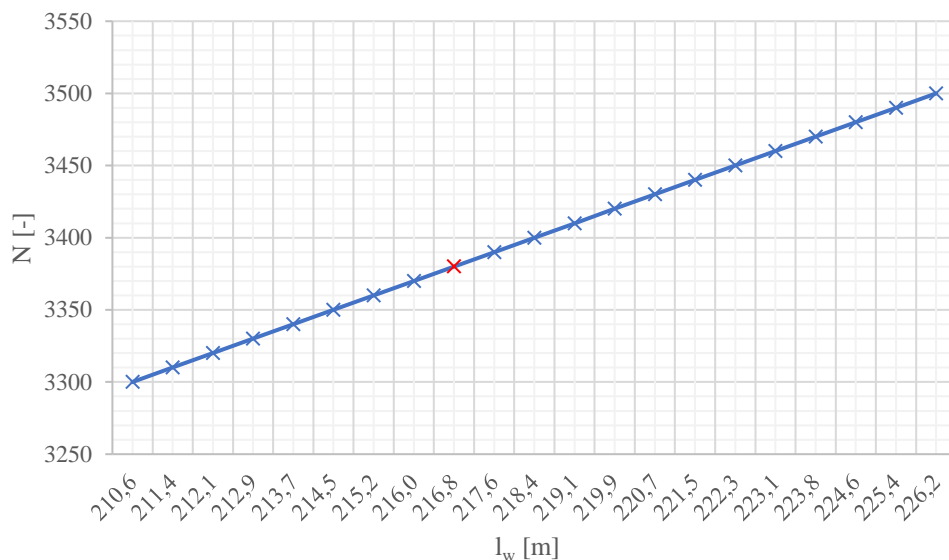
$$l_w = \frac{R_{\min} \cdot \pi \cdot r_w^2}{\rho} = \frac{62,5 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,28 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2}{0,0178 \cdot 10^{-6}} = 216,2 \text{ m} \quad (4.17)$$

ρ – rezistivita vodiče (0.0178·10⁻⁶ Ωm pro měděný vodič)

S_w – průřez vodiče

l_w – délka vodiče

r_w – poloměr vodiče



Obrázek 4.25: Graf závislosti délky vodiče na počtu závitů solenoidu.

Pomocí grafické závislosti bylo zvoleno 3380 závitů, což odpovídá délce vodiče 216,8 m. Při této délce vodiče se jeho hodnota odporu zvýší na 62,67 Ω . Následující výpočty jsou vzorovými příklady ke zvolené hodnotě počtu závitů cívky.

Výpočet výšky vinutí při neuspořádaném vinutí s koeficientem plnění 70 % až 80 %.

$$h = \frac{d_w^2 \cdot N}{l_s} = \frac{0,28 \cdot 10^{-3} \cdot 3380}{60 \cdot 10^{-3}} = 4,42 \text{ mm} \quad (4.18)$$

h – výška vinutí

N – počet závitů

Stanovení průměrného obvodu solenoidu o_{avg} pro výpočet délky vodiče l_w .

$$o_{\text{avg}} = \pi \cdot (d_i + h) = \pi \cdot (16 + 4,42) \cdot 10^{-3} = 64,15 \text{ mm} \quad (4.19)$$

o_{avg} – průměrný obvod vinutí

Výpočet délky vodiče pro zvolený počet závitů.

$$l_w = N \cdot o_{\text{avg}} = 3380 \cdot 64,15 \cdot 10^{-3} = 216,8 \text{ m} \quad (4.20)$$

Celkový magnetický dipólový moment lze vyjádřit jako součet dipólového momentu vinutí solenoidu a dipólového momentu feromagnetického jádra. Tato veličina je však závislá na konstrukčních parametrech a vnitřních vlastnostech jádra.

$$m = m_s + m_c = N I S + V_c M = N I \pi G \quad (4.21)$$

m – celkový magnetický dipólový moment cívky
 m_s – magnetický dipólový moment solenoidu (vinutí)
 m_c – magnetický dipólový moment jádra
 S – obsah vnitřní plochy solenoidu
 V_c – objem jádra
 M – magnetizace jádra
 G – geometrická část výpočtu magnetického dipólového momentu

Pro stanovení geometrické části výpočtu magnetického dipólového momentu je třeba určit demagnetizační faktor N_d . Pro jádro válcového tvaru platí následující vztah. [27]

$$\begin{aligned}
 N_d &= \frac{4 \left[\ln \left(\frac{l_s}{r_c} \right) - 1 \right]}{\left(\frac{l_s}{r_c} \right)^2 - 4 \ln \left(\frac{l_s}{r_c} \right)} = \frac{4 \left[\ln \left(\frac{0,06}{0,006} \right) - 1 \right]}{\left(\frac{0,06}{0,006} \right)^2 - 4 \ln \left(\frac{0,06}{0,006} \right)} \\
 &= 0,057
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

N_d – demagnetizační faktor jádra cívky
 r_c – poloměr jádra

Geometrická část G výpočtu magnetického dipólového momentu m zahrnuje rozměry jádra i samotného vinutí solenoidu. [27]

$$\begin{aligned}
 G &= r_s^2 + \frac{r_c^2 (\mu_r - 1)}{(1 - N_d + \mu_r N_d)} = \\
 &= 0,008^2 + \frac{0,006^2 \cdot (300 - 1)}{(1 - 0,057 + 300 \cdot 0,057)} = 6,57 \text{ cm}^2
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

G – geometrická část výpočtu magnetického dipólového momentu
 r_s – vnitřní poloměr cívky
 μ_r – relativní permeabilita jádra

Následně je možné dosadit do vzorce pro výpočet celkového magnetického dipólového momentu m . Po zvolení počtu závitů a výpočtu délky vodiče se jeho odpor zvýší na hodnotu $62,67 \Omega$, a tedy výsledný proud cívkou při 5 V je roven $79,78 \text{ mA}$. Vinutí má hmotnost $119,6 \text{ g}$ a použité jádro 66 g .

$$\begin{aligned}
 m &= NI\pi G = 3380 \cdot 79,78 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot 6,23 \cdot 10^{-4} = \\
 &= 0,533 \text{ Am}^2
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

Následující výpočty jsou určeny pro porovnání hodnot solenoidu v simulačním prostředí Ansys Maxwell.

Výpočet intenzity magnetického pole generovaného vinutím solenoidu H_s .

$$H_s = \frac{N \cdot I}{l_s} = \frac{3380 \cdot 79,78 \cdot 10^{-3}}{0,06} = 4494,2 \text{ A/m} \quad (4.25)$$

H_s – intenzita magnetického pole solenoidu

Výpočet celkové magnetické indukce solenoidu B_s .

$$\begin{aligned} B_s &= \frac{\mu_0 \mu_r N I}{l_s (1 - N_d + \mu_r N_d)} = \\ &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 300 \cdot 3380 \cdot 79,78 \cdot 10^{-3}}{0,06 \cdot (1 - 0,057 + 300 \cdot 0,057)} = \\ &= 93,3 \text{ mT} \end{aligned} \quad (4.26)$$

B_s – magnetická indukce solenoidu

Výpočet intenzity magnetického pole generovaného jádrem H_c .

$$H_c = \frac{B_s}{\mu_0 \mu_r} = \frac{93,3 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 300} = 247,49 \text{ A/m} \quad (4.27)$$

H_c – magnetické pole generované jádrem

μ_0 – permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$)

Výpočet celkové magnetizace solenoidu M_s .

$$\begin{aligned} M_s &= \frac{N I (\mu_r - 1)}{l_s (1 - N_d + \mu_r N_d)} = \\ &= \frac{3380 \cdot 79,78 \cdot 10^{-3} \cdot (300 - 1)}{0,06 \cdot (1 - 0,057 + 300 \cdot 0,057)} = 74 \text{ kA/m} \end{aligned} \quad (4.28)$$

M_s – magnetizace solenoidu

Výpočet indukčnosti vícevrstvého solenoidu L_s . Pro následující vzorec platí, že veškeré hodnoty parametrů jsou udány v cm a výsledek je dán v μH .

$$L_s = \frac{0,315 \cdot r_{\text{avg}}^2 \cdot N^2}{6 \cdot r_{\text{avg}} + 9 \cdot l_s + 10 \cdot h} =$$

$$= \frac{0,315 \cdot 1,021^2 \cdot 3380^2}{6 \cdot 1,021 + 9 \cdot 6 + 10 \cdot 0,442} = 58100 \mu\text{H}$$
(4.29)

Stanovení celkové hmotnosti solenoidu.

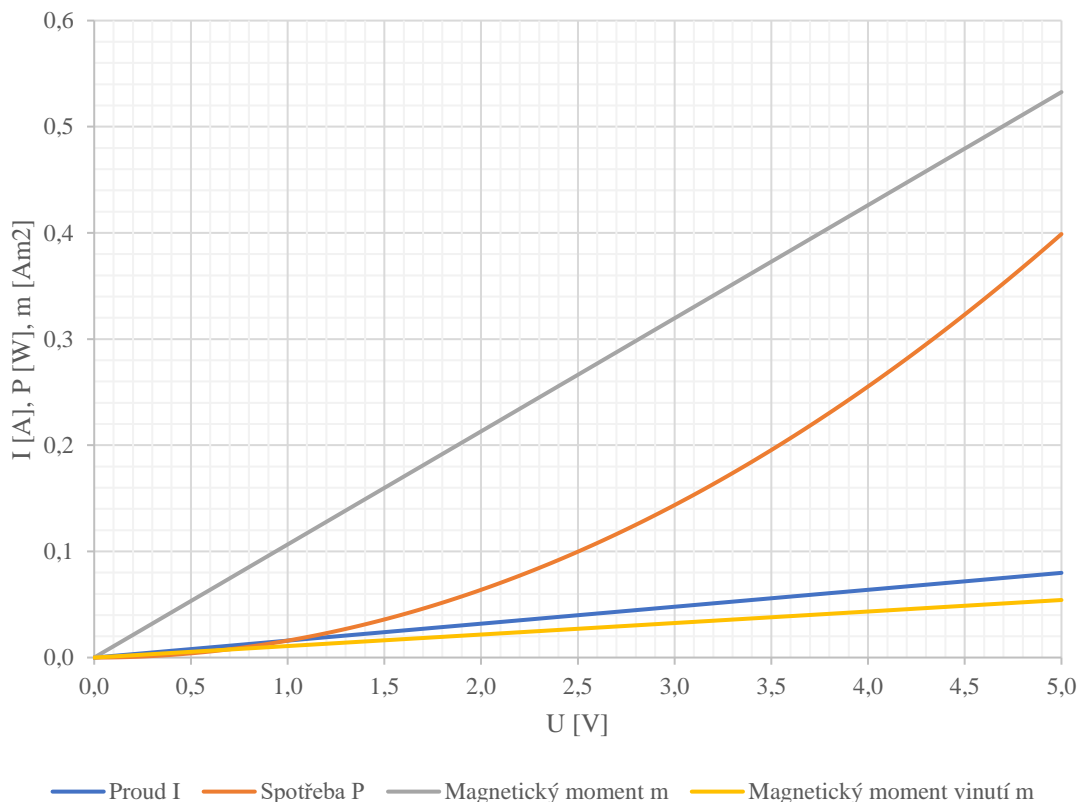
$$m_m = \rho_{\text{cu}} \cdot V = 8960 \cdot (\pi \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 216,2) = 119,3 \text{ g}$$
(4.30)

m_m – hmotnost cívky (vinutí)

ρ_{cu} – hustota mědi (8960 kg/m^3)

V – celkový objem měděného vodiče

Ke hmotnosti vinutí je ještě nutné přičíst hmotnost jádra, které váží 65 g. Celková hmotnost solenoidu je 184,3 g.



Obrázek 4.26: Závislost proudu I, spotřeby P a magnetického dipólového momentu m na přiloženém napětí U (solenoid).

U výpočtů je zanedbána vnější izolace vinutého vodiče. V případě započtení izolace vodiče v první třídě má průměr 0,312 mm. Pro zachování odporu vodiče je počet závitů

snížen na 3240 při délce vodiče 216,4 m a odporu 62,54 Ω . Výška vinutí je rovna 5,48 mm a výsledný magnetický moment 0,511 Am². Vypočítané parametry pro simulaci:

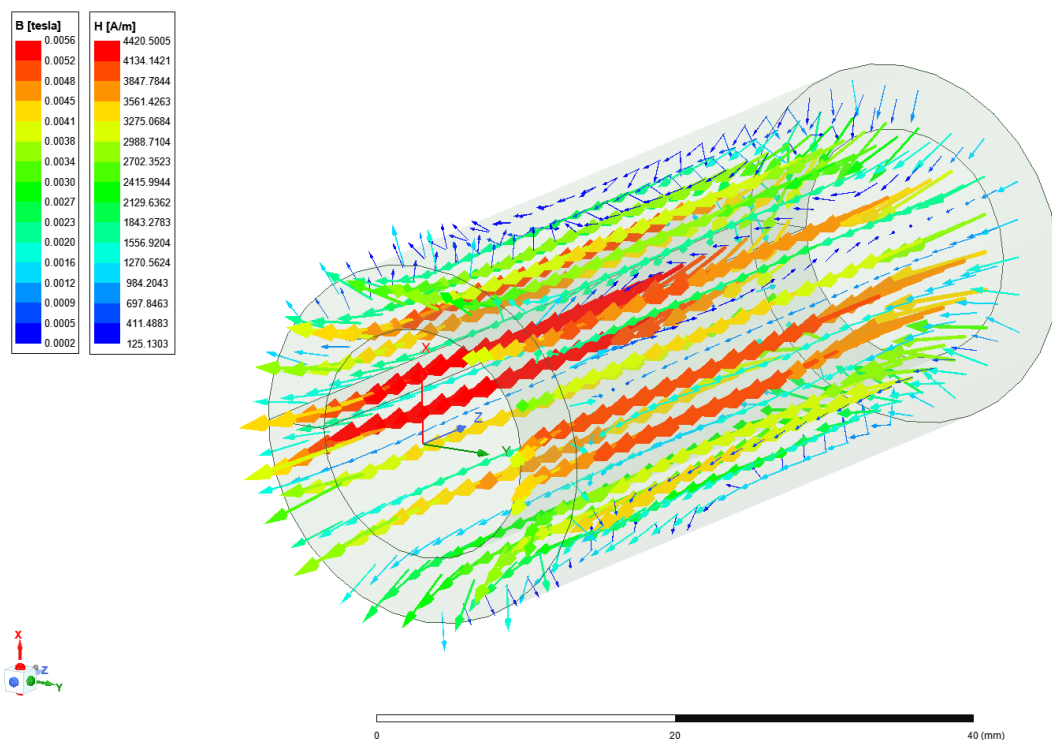
$$B_s = 89,4 \text{ mT}$$

$$H_c = 237,24 \text{ A/m}$$

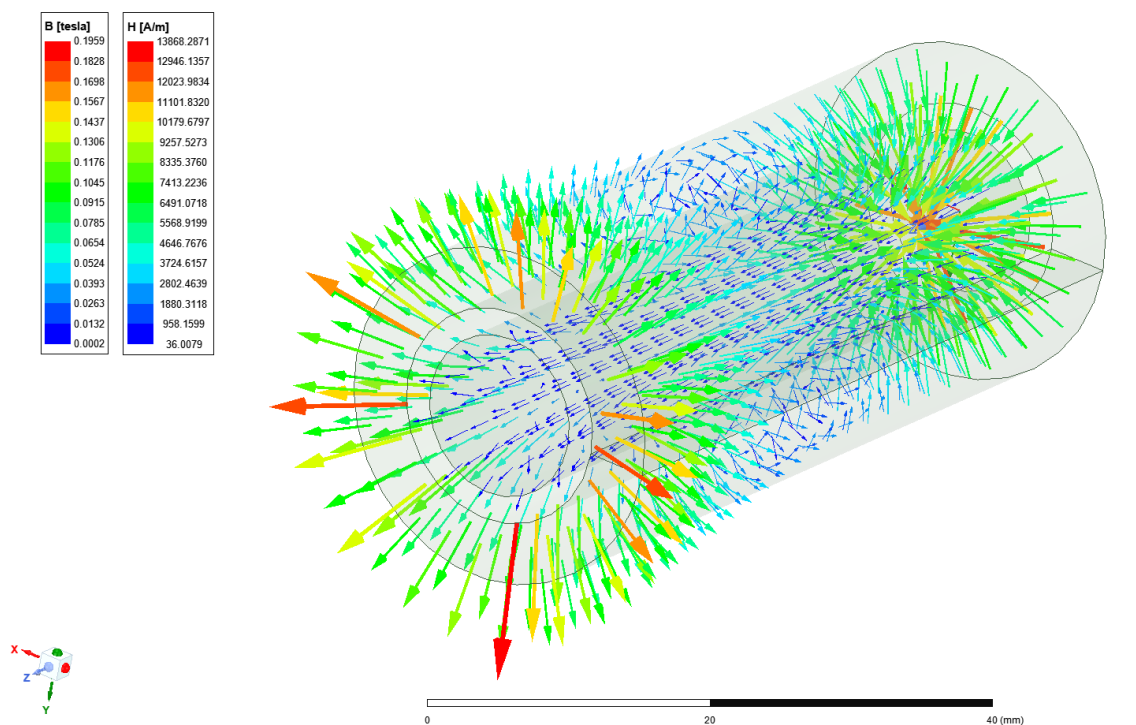
$$M_s = 70,9 \text{ kA/m}$$

4.6.3 Simulace

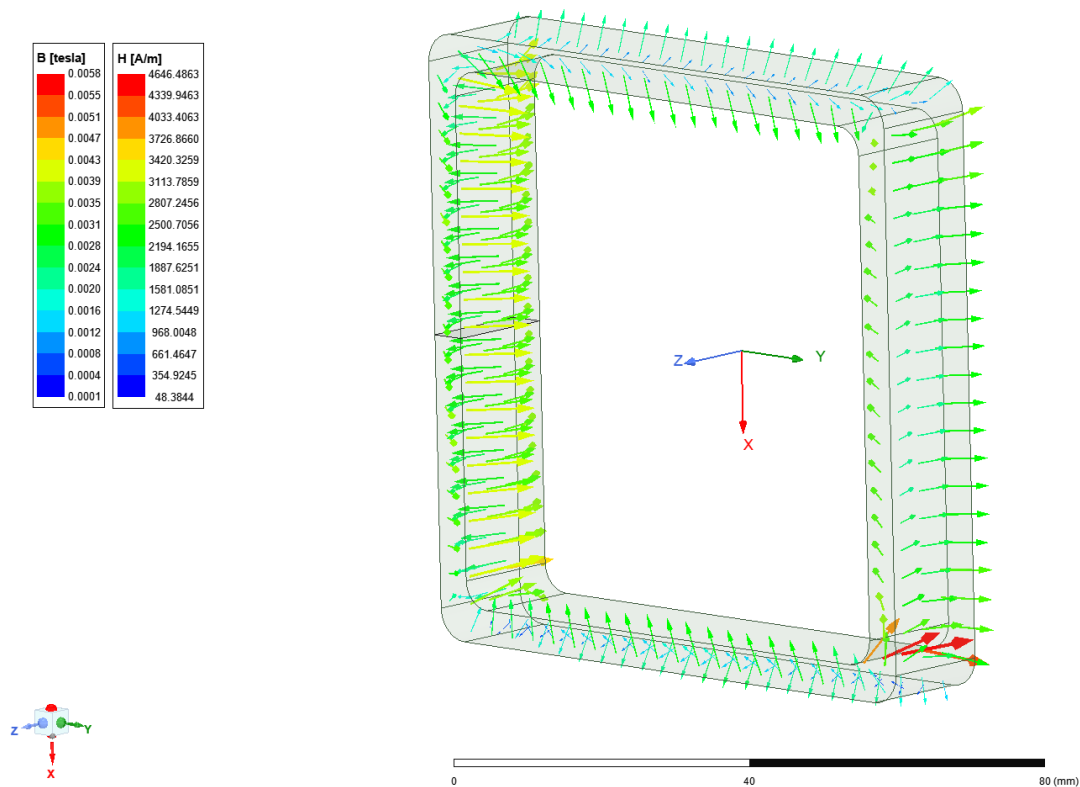
Simulace byla provedena z důvodu ověření vypočítaných a reálných parametrů cívky. Simulační modely odpovídají vypočítaným modelům s rozdílem, že v simulaci je počítáno s řadovým vinutím, tedy vodiče jsou naskládány přímo na sebe. Simulovaný počet vinutí, procházející proud a rozměry odpovídají předešlým výpočtům.



Obrázek 4.27: Simulace intenzity magnetické pole H_s a magnetické indukce B_s solenoidu bez jádra.



Obrázek 4.28: Simulace intenzity magnetické pole H_s a magnetické indukce B_s solenoidu s jádrem ($\mu_r = 300$).



Obrázek 4.29: Simulace intenzity magnetického pole a magnetické indukce obvodové cívky.

Tabulka 4.4: Porovnání naměřených, vypočítaných a simulovaných hodnot.

		L [mH]
Solenoid (vinutí)	Výpočet	58,1
	Simulace	58,42
	Měření (DT-9931)	66,7
	Měření (ELC-3133A) 1kHz	62,91
Solenoid (s jádrem)	Výpočet	-
	Simulace	448,9
	Měření (DT-9931)	390
	Měření (ELC-3133A) 1kHz	236,2
Obvodová cívka	Výpočet	28,6
	Simulace	29,5
	Měření (DT-9931)	32,3
	Měření (ELC-3133A) 1kHz	30,62

Simulovaná intenzita magnetického pole vinutí solenoidu je rovna 4420,2 A/m a hodnota magnetické indukce 5,6 mT (viz Obrázek 4.27). Tyto simulace jsou podloženy teoretickými výpočty, kde hodnota intenzity magnetického pole je rovna 4494,2 A/m a hodnota magnetické indukce vyšla 5,65 mT.

Obrázek 4.28 vyhodnocuje simulaci solenoidu, jenž obsahuje železné jádro s relativní permeabilitou 300. Výsledky simulace zobrazují maximální hodnotu intenzity magnetického pole 13,9 kA/m a hodnotu magnetické indukce 196 mT. Teoretický výpočet magnetické indukce je roven 93,3 mT, taková odchylka mohla vzniknout při využití vzorce (4.26), který obsahuje demagnetizační koeficient jádra N_D , jenž je určen geometrickými vlastnosti samotného jádra. Tento vztah však nepočítá se vzduchovou mezerou mezi jádrem a vinutím, která je simulována. Chyba indukčnosti solenoidu s jádrem je způsobena neznámou relativní permeabilitou materiálu použitého jádra. Tato permeabilita se může pohybovat od 300 do 10 000.

Poslední simulace byla provedena u obvodové cívky (viz Obrázek 4.29). Maximální intenzita magnetického pole je rovna 4646 A/m. Simulovaná hodnota magnetické indukce se rovná 5,8 mT.

Vypočítané a simulované hodnoty indukčnosti jsou podloženy měřeními vytvořených cívek na LCR metrech. Prvním je multimetr CEM DT-9913, na kterém bylo provedeno orientační měření indukčnosti pro kontrolu správných výsledků. Druhým měřicím přístrojem je LCR metr ESCORT ELC-3133A, který byl využit pro přesnější měření indukčnosti. U druhého přístroje byla možnost volby kmitočtu, při kterém probíhalo měření. U cívek bez jádra byla indukčnost měřena při 100 Hz a 1 kHz, přičemž hodnota indukčnosti byla konstantní. U cívky s jádrem byla jako výchozí hodnota použita pro 1 kHz.

4.6.4 Magnetorquery vhodné pro vesmírné aplikace

Návrh momentových cívek se zabývá mnoha parametry, které je nutné dodržet. U návrhu momentových cívek je třeba dbát na veškeré parametry z hlediska úspory místa, váhy a spotřeby energie. Kromě těchto parametrů je nutné si stanovit minimální hodnotu generovaného magnetického momentu, jenž bude působit na magnetické pole Země. Generovaný magnetický moment cívky má ovládat Cubesat o velikosti 3U a váze 4,5 kg. Z důvodu proměnlivosti a nestálosti geomagnetického pole, je minimální hodnota magnetického momentu určena z rešerše dostupných komerčních produktů v kapitole 1.4. Všechny zmíněné řešení v této kapitole jsou navrženy pro konfiguraci Cubesatu 6U a více. Minimální hodnota magnetického momentu je tedy zvolena $0,2 \text{ Am}^2$ z řešení iMTQ Magnetorquer Board (ISISPACE).

Jak již bylo zmíněno, řídicí systém napájení poskytuje převážně tři napěťové hladiny 3,3; 5 a 12 V. Pro napájení momentových cívek byla zvoleno 5 V. Jelikož je družice omezena dodávkou elektrické energie v průběhu mise, je třeba brát ohled na spotřebu energie každého prvku řídicího systému. U komerčních řešení se výkon magnetorqueru pohybuje od 0,2 po 0,7 W. Výsledný výkon je však stanoven s ohledem na použitý vodič daného řešení i z hlediska úspory energie.

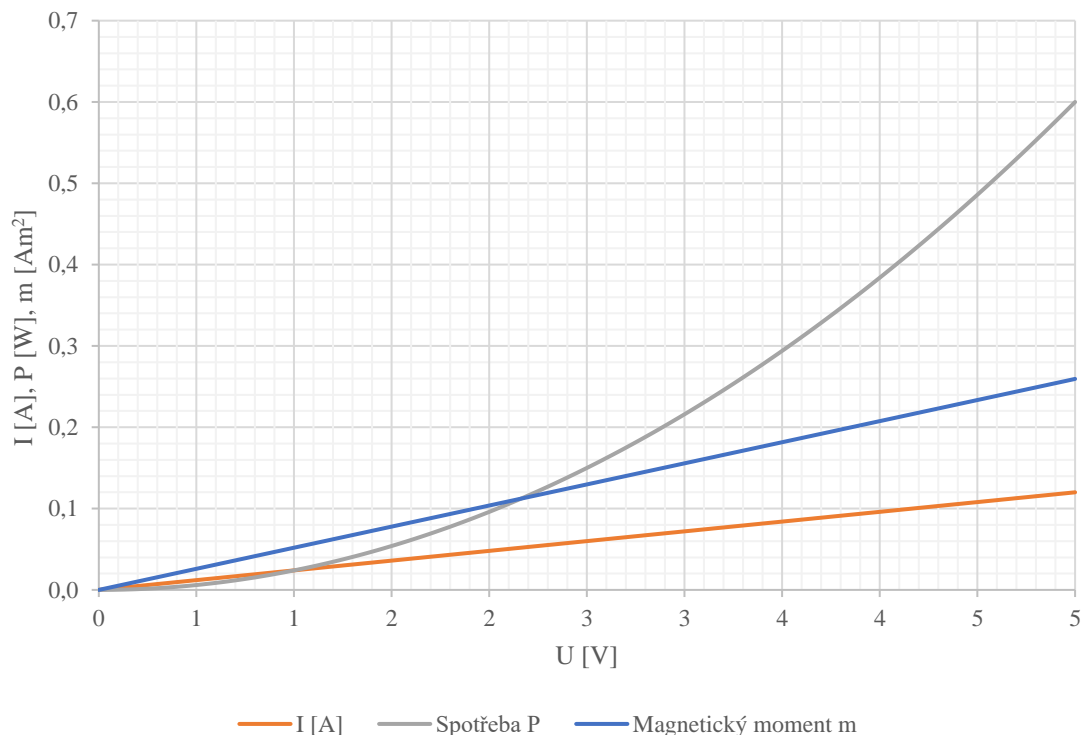
Celkem byly navrženy čtyři druhy momentových cívek, kde první dvě jsou obvodovými cívkami bez jádra s rozdílnou plochou. Další dvě jsou momentové tyče, jenž mají stejné rozměry, avšak mají jádra s jiného materiálu. Cívka, která má délku vnitřní strany 75 mm a výšku vinutí při 2,42 mm, což vnější délku strany prodlouží zhruba na 80 mm. Pokud by řídicí deska obsahovala konektor, mohlo by být již problematické ji umístit na DPS. Desky řídicího systému však nejsou vždy opatřeny konektory z obou stran. Nicméně byla navržena obvodová cívka menších rozměrů o délce strany 70 mm, které se na desku s konektorem již vejde bez sebemenšího problému, ovšem bylo nutné zvýšit výkon pro dosažení podobného výsledku jako u cívky předešlé. Je nutno brát v potaz, že se u cívek počítá s náhodným vinutím a jeho koeficient plnění se pohybuje mezi 70 % až 80 %. V případě, že by bylo využito ortocyklického vinutí, jenž má koeficient plnění 90,7 %, pak by bylo možné výslednou výšku vinutí redukovat.

Návrh solenoidu byl pojat z hlediska úspory místa, aby bylo možné ve tříosé konfiguraci tyto cívky umístit na desku kolmo na sebe. Přítomnost jádra a vysokého počtu závitů zajistila malou celkovou spotřebu této cívky, avšak za cenu vysokého počtu závitů. Pokud tedy vodič není vinut přímo na jádro je nutné, aby kostra měla tloušťku stěny minimálně 2 mm pro dostatečnou mechanickou pevnost při vinutí vodiče. Obrázek 4.32 zobrazuje závislost napětí na proudu, spotřebě a magnetickém momentu dvou materiálů. Materiál s relativní permeabilitou $\mu_r = 300$ je železná kulatina, jenž byla využita pro návrh modelových cívek, druhý materiál s relativní permeabilitou $\mu_r = 100\,000$ je permalloy, jenž má větší potenciál pro využití ve vesmírných aplikacích.

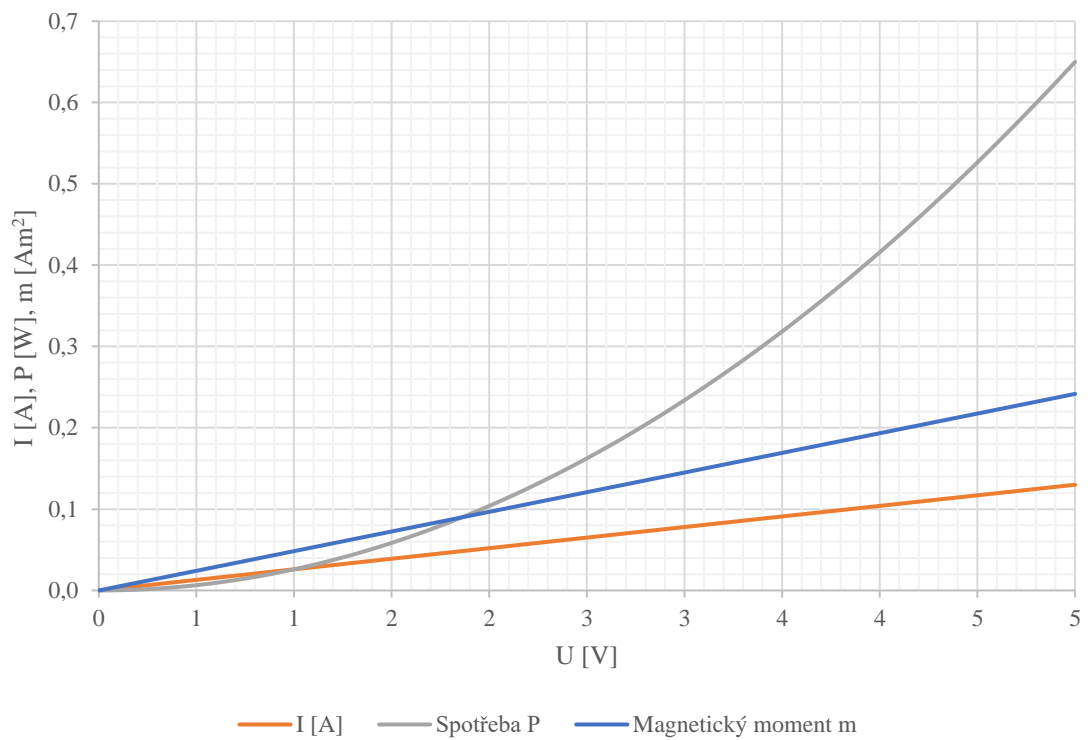
Veškeré parametry navržených cívek pro 3U CubeSat o hmotnosti 4,5kg jsou zobrazeny v následující tabulce a v grafických závislostech.

Tabulka 4.5: Návrh magnetorquerů určených pro 3U CubeSat o hmotnosti 4,5 kg.

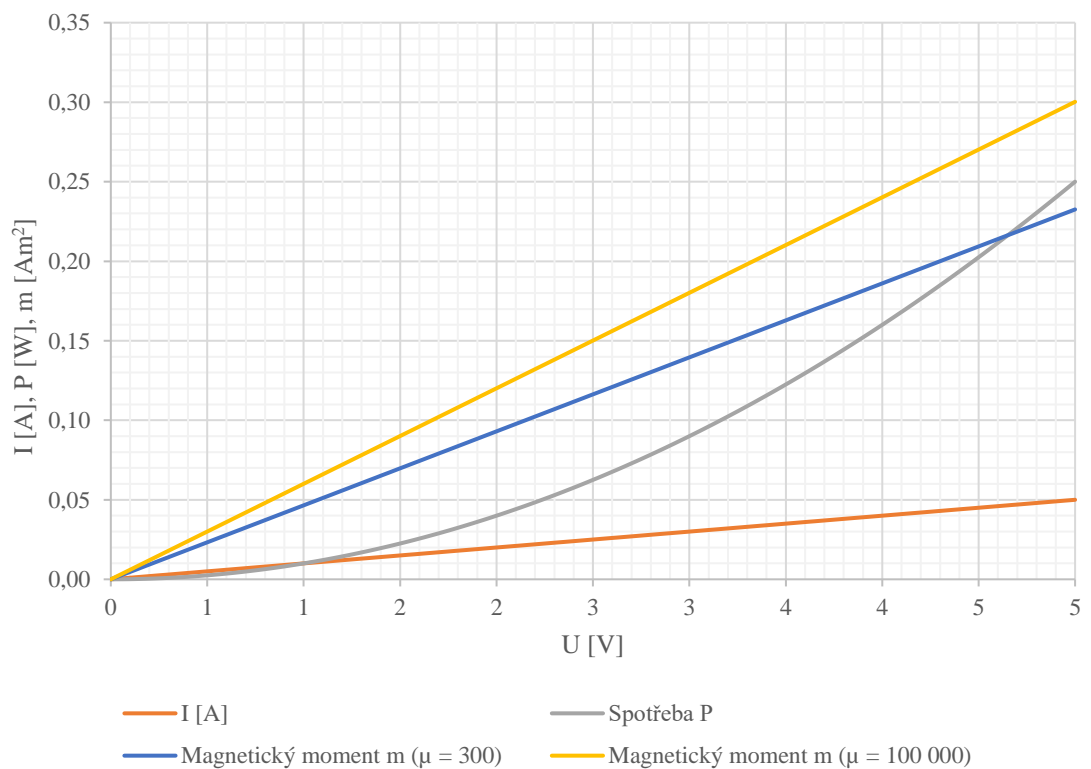
	Bez jádra (75x75 mm)	Bez jádra (70x70 mm)	Solenoid ($\mu_r = 300$)	Solenoid ($\mu_r = 100\ 000$)
S [cm²]	55,77	48,58	0,5	
d_c [mm]	-	-	4	
d_i [mm]	-	-	8	
I_{max} [mA]	120	130	50	
R [Ω]	41,67	38,46	100	
P_{max} [mW]	600	650	250	
d_w [mm]	0,25	0,25	0,2	
l_w [m]	114,9	106,1	176,5	
l_c [mm]	10	10	60	
N [-]	388	383	4967	
N_d [-]	-	-	0,0108	
m_{max} [Am²]	0,26	0,24	0,23	0,3
Hmotnost vinutí [g]	50,5	46,7	49,7	



Obrázek 4.30: Závislost proudu I, spotřeby P a magnetického dipólového momentu m na přiloženém napětí U (Obvodová cívka s délkou vnitřní strany 75 mm).



Obrázek 4.31: Závislost proudu I, spotřeby P a magnetického dipólového momentu m na přiloženém napětí U (Obvodová cívka s délkou vnitřní strany 70 mm).



Obrázek 4.32: Závislost proudu I, spotřeby P a magnetického dipólového momentu m na přiloženém napětí U (Solenoid s vnitřním průměrem jádra 4 mm).

4.7 Testování momentových cívek

Pro testování magnetorquerů byla vytvořena železná konstrukce, na níž je zavěšen plovák, na kterém je umístěna testovací deska s momentovými cívkami. Samotné testování proběhlo na vodní hladině z důvodu redukce odporu okolí.

Nejprve bylo otestováno samotné buzení jednotlivých cívek a natočení tělesa do úhlů, kdy je aktivní jenom jedna cívka v daném směru. Následně byla ověřena rychlost rotace cívky, což zahrnuje aktivaci obou cívek ve čtyřech segmentech rozsahu. Aktivuje se vždy cívka ve směru rotace a cívka v opačném směru oproti aktuální poloze. Průměrná rychlost otáčení tělesa vychází zhruba 5 °/s. Přičemž maximální hodnota dle akcelerometru byla naměřena 6,8 °/s.

Ověřena byla i samotná funkce magnetorqueru, tedy natočení tělesa do požadovaných úhlů a následná stabilizace, aby těleso bylo orientováno vždy požadovaným směrem bez větších fluktuací. Stabilizace v požadovaném směru je zajištěna pomocí algoritmu, kdy těleso orientováno ve vzdálenějším úhlu než 40° vyše požadavek na rotaci při maximální hodnotě PWM. Čím blíže je těleso směřováno požadovaným úhlem, tím jemnější je stabilizace, aby nedošlo k rozkmitu tělesu u požadovaného úhlu. Z důvodu nepřesnosti magnetometru HMC5883L bylo těleso stabilizováno na požadovaném úhlu s chybou $\pm 5^\circ$.



Obrázek 4.33: Testovací konstrukce.

4.8 Porovnání momentových cívek s dostupnými produkty

V následujících tabulkách je shrnuto porovnání navržených momentových cívek a komerčně dostupných produktů. Tabulky jsou rozděleny na porovnání solenoidů s feromagnetickým jádrem a cívek bez jádra, jež využívá ke generaci vysoké hodnoty magnetického momentu velký vnitřní obsah cívky.

Tabulka 4.6: Porovnání momentových cívek s feromagnetickým jádrem.

	U [V]	I [mA]	P [mW]	R [Ω]	L [mH]	m [Am^2]	m _m [g]
iMTQ Magnetorquer Board	5,0	40	200	125	-	0,20	-
Magnetorquer SatBus MTQ3X	3,3	120	397	27,4	78,0	0,30	-
NanoTorque GST-600	3,3	116	382	28,5	-	0,31	-
Solenoid ($\mu_r = 300$) (Vesmírné aplikace)	5,0	50	250	100	40,94	0,23	49,7
Solenoid ($\mu_r = 100\ 000$) (Vesmírné aplikace)						0,30	
Solenoid ($\mu_r = 300$) (Pozemní testování)	5,0	80	400	62,67	58,1	0,53	119,3

Indukčnost cívky je vypočítána pouze pro vinutí momentové cívky bez jádra. Hmotnost m_m udává pouze váhu vinutí. V případě využití železného jádra má solenoid pro pozemní testování 184,3 g.

Tabulka 4.7: Porovnání momentových cívek bez jádra.

	U [V]	I [mA]	P [mW]	R [Ω]	L [mH]	m [Am^2]	m _m [g]
iMTQ Magnetorquer Board	5,0	136	680	36,76	-	0,24	-
Magnetorquer SatBus MTQ3X	3,3	133	439	24,78	12,0	0,34	-
NanoTorque GST-600	3,3	129	427	25,50	-	0,34	-
Bez jádra (75x75 mm) (Vesmírné aplikace)	5,0	120	600	41,67	23,4	0,26	50,5
Bez jádra (70x70 mm) (Vesmírné aplikace)	5,0	130	650	38,46	20,8	0,24	46,7
Bez jádra (75x75 mm) (Pozemní testování)	5,0	249	1245	20,08	28,4	0,646	159

Tabulka 4.8: Váha komerčně dostupných produktů.

	Hmotnost celku [g]
iMTQ Magnetorquer Board	194
Magnetorquer SatBus MTQ3X	205
NanoTorque GST-600	156

Komerčně dostupné produkty udávají pouze hmotnost celku i s ADCS deskou (viz Tabulka 4.8). Hmotnost dvou solenoidů a cívky bez jádra o rozměrech 70 x 70 mm vychází 146,1 g a 149,9 g při využití obvodové cívky o rozměrech 75 x 75 mm, přičemž není počítáno s váhou jader solenoidů a váhou řídicí desky.

Momentové cívky pro vesmírné aplikace byly navrženy tak, aby nejvíce odpovídaly produktům, jež byly rozebrány v rešerši. Tyto cívky jsou vhodné pro CubeSat o velikosti 3U a větší. Cívky pro pozemní testování byly navrženy pro názornou demonstraci řízení kosmického tělesa za běžných podmínek. Cívky disponují tedy větší vahou, spotřebou, ale i generací většího magnetického momentu, jež je potřeba za předpokladu, že pro pozemní testování není uměle vytvořeno homogenní magnetické pole, například za pomoci Helmholtzových cívek.

4.9 Finanční zhodnocení

Při návrhu zařízení byl brán ohled i na výslednou cenu. Komponenty a součástky byly nakupovány jak na českých internetových obchodech, tak v zahraničí kvůli dostupnosti součástek. Desky plošných spojů byly zhotoveny zahraničním výrobcem, díky nízké ceně výsledné desky oproti tuzemským výrobcům. V následující tabulce jsou vypsány jednotlivé prvky a komponenty u nichž je stanovena cena za kus. Celé sestavy, u kterých není uveden počet kusů je zmíněná cena za celou sestavu, případně i za energii a doprava.

Tabulka 4.9: Cenový souhrn použitých komponent, prvků a sestav.

Název komponenty	Počet	Obchod	Cena/ks [Kč]	Poznámka
STM32 BluePill 2x	2x	Pájeničko.cz	239	-
UART převodník	1x	Pájeničko.cz	39	-
Magnetometr HMC5883L	1x	Dratek.cz	149	-
Akcelerometru MPU6050	1x	Dratek.cz	78	-
nRF24L01	2x	Dratek.cz	34	-
H-můstek L298N	1x	Dratek.cz	55	-
Součástky	-	Mouser	656	Doprava v ceně
DPS (2 návrhy)	-	JLCPCB	484	Doprava v ceně
Baterie 2200mAh	1x	GM electronic	346	-
Cívky vinutí	-	-	450	Energie v ceně
Šasi	1x	-	306	Energie v ceně
Kostry cívek	-	-	40	Energie v ceně
Ostatní montážní prvky	-	-	60	-
Testovací konstrukce	-	-	500	-
Další náklady na dopravu	-	-	180	-
Celková cena			3889	

5. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá návrhem koncepce modelu dvouosého magnetorqueru, jenž je aktuátorem ovládacího a stabilizačního systému kosmických těles. Dále vytvořením testovacího systému, na němž bude ověřena funkčnost momentových cívek.

Úvod práce popisuje základní princip magnetorqueru z fyzikálního i elektrotechnického hlediska a zmiňuje hlavní parametry akčního členu, jež jsou nezbytné pro jeho návrh. Dále jsou vypsány jednotlivé varianty momentových cívek, přičemž u každého řešení jsou zmíněny výhody a nedostatky dané konfigurace. Magnetorquer je následně porovnán s alternativními akčními členy, jež mohou být součástí ovládacího systému družice. V rámci této kapitoly je také provedena rešerše dostupných komerčních zařízení.

V další kapitole je uveden družicový standard CubeSat, pro něž je ovládací systém vyvíjen. Je zde popsáno, do jakých soustav se CubeSaty sestavují a do které kategorie satelitů patří. Uvedeny jsou také jeho subsystémy, jež jsou rozebrány z hlediska základních funkcí a klíčových parametrů, které jsou významné pro systém řízení a orientace družice. Část této kapitoly je věnována geomagnetickému poli, v němž se CubeSaty nachází. Zmíněny jsou některé anomálie, které se v magnetickém poli Země vyskytují. Jsou zde uvedeny jednotlivé oběžné dráhy, u kterých je proveden rozbor z hlediska umístění kosmických těles. Zmíněny jsou také normy ECSS, jež definují parametry zařízení pro vesmírné aplikace. V rámci norem jsou také uvedeny úrovně technologické vyspělosti výrobku, který je vyvíjen pro vesmírné aplikace.

Následující část již stanovuje cíle pro návrh konceptu, jímž je vývoj testovací desky, řídicího programu, uživatelského prostředí a návrh momentových cívek. Testovací zařízení je koncipováno pro dvouosou stabilizaci, která je zajištěna pomocí dvou druhů momentových cívek. Obvodová cívka využívá pro generaci magnetického pole velké plochy pod deskou plošných spojů. Tato konfigurace však spotřebovává více energie než solenoid, který je druhou momentovou cívkou. Nevýhody solenoidu zase spočívají v nabývající hmotnosti s použitým jádrem solenoidu. Momentové cívky jsou navrženy tak, aby je bylo možné otestovat v pozemských podmínkách. Závěr této kapitoly obsahuje návrh cívek, jež jsou vhodné pro CubeSat o velikosti 3U a váze maximálně 4,5 kg. Návrh takových cívek vychází z rešerše dostupných komerčních produktů. Výpočty momentových cívek jsou podloženy simulací a měřením reálných cívek pomocí dvou LCR metrů.

Testování momentových cívek proběhlo na vodní hladině. Pro uchycení plováku, na němž je testované zařízení, byla vyrobena kovová konstrukce. Testovací desky, na níž jsou uchyceny momentové cívky je umístěna v šasi, jež bylo vytisknuto za pomoci 3D tisku, rovněž i kostry cívek. Zařízení bylo testováno z hlediska rychlosti rotace a stabilizace na požadovaném úhlu, kterou zajistí program testovací desky. Veškeré

ovládání při testování bylo provedeno za pomoci vytvořené uživatelské aplikace, kde je možné zařízení ovládat a konfigurovat.

Navržené momentové cívky byly nakonec porovnány s komerčně dostupnými produkty. Cívky určené pro vesmírné aplikace mají obdobné parametry jako produkty, jež byly rozebrány v rešerši. U solenoidu i cívky bez jádra jsou navrženy dva typy, které jsou z hlediska velikosti, váhy a generace maximálního magnetického momentu vhodné pro CubeSat o velikosti 3U. Kromě cívek určených pro vesmírné aplikace jsou v tabulce vyhodnoceny i cívky, které byly navrženy pro pozemní testování. Tyto cívky disponují zhruba dvojnásobnou spotřebou, větší vahou a generací většího magnetického dipólového momentu. Cívky pro pozemní testování jsou určeny pro názornou demonstraci řízení magnetorquerů za běžných podmínek.

LITERATURA

- [1] MAHDI, M. C. *Attitude stabilization for CubeSat: concepts and technology*. Cambridge Scholars Publishing, 2018. ISBN 978-1-5275-0651-0.
- [2] CURTIS, Hywel. Magnetorquers: an overview of magnetic torquer products available on the global marketplace for space. In: *Satsearch* [online]. 2019 [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <https://blog.satsearch.co/2019-08-21-magnetorquers-an-overview-of-magnetic-torquer-products-available-on-the-global-marketplace-for-space>
- [3] JIRÁK, J., R. AUTRATA, K. LIEDERMANN, Z. ROZSÍVALOVÁ a M. SEDLAŘÍKOVÁ. *Materiály a technická dokumentace: Materiály v elektrotechnice* [online]. Brno [cit. 2021-11-21]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.
- [4] *Elektrotechnické materiály: Magnetické materiály* [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>
- [5] FIORILLO, F., G. BERTOTTI, C. APPINO a M. PASQUALE. Soft magnetic materials. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* [online]. 1999 [cit. 2021-12-01].
- [6] ALI, H., M. MUGHAL a J. PRAKS. *Analysis and Design of Integrated Magnetorquer Coils for Attitude Control of Nanosatellites*. [online]. 2018, 7 [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4152&context=smallsat>
- [7] DILDAR, M., A. ALI a H. ALI. *Embedded Magnetorquer Coil Design for Micro-Satellite* [online]. 3rd International Conference on Engineering & Emerging Technologists (ICEET), 2016 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/341100030_Embedded_Magnetorquer_Coil_Design_for_Micro-Satellite
- [8] *CRITICAL DESIGN REVIEW: Attitude Determination and Control System* [online]. Warsaw University of Technology, 2016 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://pw-sat.pl/wp-content/uploads/2014/07/PW-Sat2-C-01.00-ADCS-CDR.pdf>
- [9] NANOAVIONICS. *Magnetorquers MTQ3X* [online]. 2020 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://satsearch.co/products/nanoavionics-magnetorquers-mtq3x>

- [10] GOMSPACE. *NanoTorque: GST-600* [online]. 2018 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://gomspace.com/shop/subsystems/attitude-orbit-control-systems/nanotorque-gst-600.aspx>
- [11] *State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology* [online]. NASA Ames Research Center, Small Spacecraft Systems Virtual Institute October 2021, 2021 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa>
- [12] CubeSat information. In: *ISISPACE* [online]. [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <https://www.isispace.nl/cubesat-information/>
- [13] QIAO, Li, Chris RIZOS a Andrew G. DEMPSTER. *Analysis and Comparison of CubeSat Lifetime* [online]. 12 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.588.3019&rep=rep1&type=pdf>
- [14] CHAHAT, Nacer. *CubeSat Antenna Design* [online]. 1. Wiley-IEEE Press, 2021, 331 s. [cit. 2021-11-03]. ISBN 9781119692584. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=7CMPEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=CubeSat+Antenna+Design&ots=RBSK3izoKi&sig=-5oXVHQuaFFu61qo2c6yYjbNAfU&redir_esc=y#v=onepage&q=CubeSat%20Antenna%20Design&f=false
- [15] KRÁLOVÁ, M. Geofyzika: Magnetické pole Země. *Techmania Science Center* [online]. 2007 [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/geofyzika/magneticke-pole-zeme>
- [16] The Earth's Magnetic Field: An Overview. In: *British Geological Survey* [online]. [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html#top>
- [17] *European Space Agency: Types of orbits* [online]. 2020 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits
- [18] Standardy ECSS. In: *CZECH SPACE OFFICE* [online]. [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://www.czechspace.cz/cs/standardy-ecss>
- [19] *ECSS* [online]. European Space Agency, 2021 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://ecss.nl/>
- [20] *HONEYWELL: HMC5883L 3-Axis Digital Compass* [online]. 20 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf

- [21] *InvenSense: MPU-6000 and MPU-6050* [online]. 52 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- [22] *Nordic Semiconductor: nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver* [online]. 75 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://www.mouser.com/datasheet/2/297/nRF24L01_Product_Specification_v2_0-9199.pdf
- [23] *STMicroelectronics: L298 DUAL FULL-BRIDGE DRIVER* [online]. 13 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf
- [24] *DIOO: DIO6605B Step-Up Converter* [online]. 12 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/802/dioo_06292016_DIO6605B%20V0%20-1217633.pdf
- [25] *TOREX: XC6802* [online]. 22 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/760/TOSL_S_A0004511254_1-2575022.pdf
- [26] *STMicroelectronics: LD1117A* [online]. 24 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/a5/c3/3f/c9/2b/15/40/49/CD00002116.pdf/files/CD00002116.pdf/jcr:content/translations/en-CD00002116.pdf>
- [27] M. F. MEHRJARDI. *Design and Manufacturing of a Research Magnetic Torquer Rod* [online]. Contemporary Engineering Sciences, 10 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://www.m-hikari.com/ces/ces2010/ces5-8-2010/fakhariCES5-8-2010.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

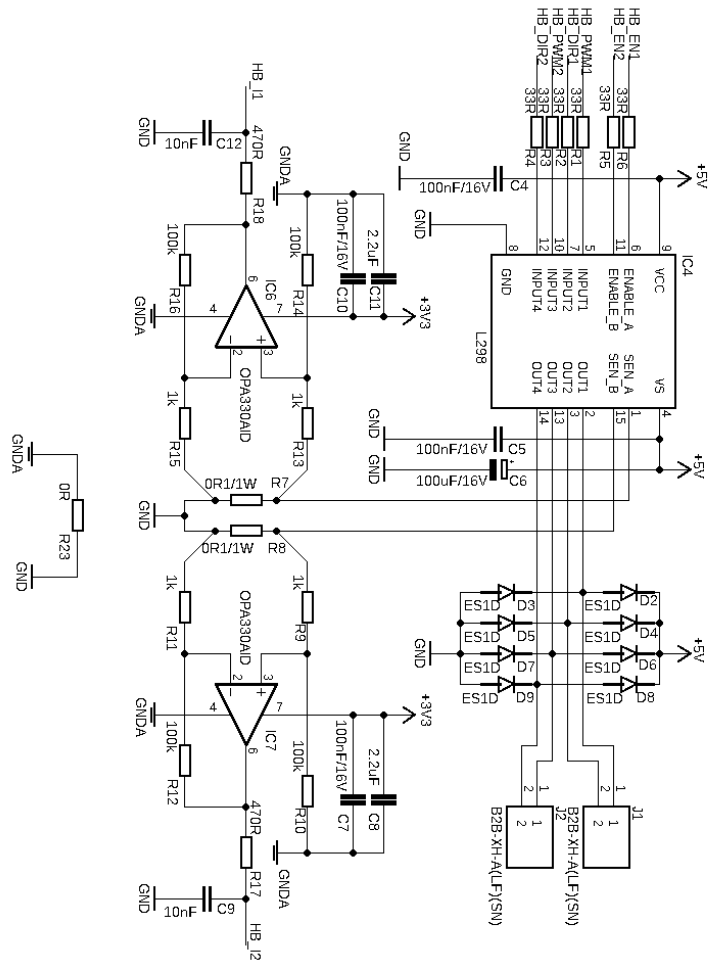
ADCS	Attitude Determination & Control Systém
ADCS	Systém řízení orientace a stabilizace
OBC	On-board Computer
OBC	Palubní počítač
U	Unit
U	Jednotka
ESA	European Space Agency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
TRL	Technology Readiness Level
TRL	Technologická úroveň připravenosti
TRA	Technology Readiness Assessment
TRA	Posouzení připravenosti technologie
TRSL	Technology Readiness Status List
TRSL	Seznam stavu připravenosti technologie
RF	Radio Frequency
RF	Radiofrekvenční
FSO	Free-Space Optics
FSO	Optická komunikace ve volném prostoru
ISS	International Space Station
ISS	Mezinárodní vesmírná stanice
GEO	Geostationary Earth Orbit
GEO	Geostacionární oběžná dráha
MEO	Medium Earth Orbit
MEO	Střední oběžná dráha
LEO	Low Earth Orbit
LEO	Nízká oběžná dráha
RE	Earth radius
RE	Poloměr Země
PLA	Polylactic Acid
PLA	Kyselina polyléčná
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symbols:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
R	odpor	(Ω)
P	výkon	(W)
ρ	rezistivita	(Ωm^2)
m	magnetický moment	(Am^2)
N	počet závitů cívky	(-)
A	plocha (cívky)	(m^2)
S	průřez	(m^2)
l	délka	(m)
H	intenzita magnetického pole	(A/m)
H_c	koercitivní síla	(A/m)
B_r	magnetická remanence	(T)
B	magnetická indukce	(T)
L	vlastní indukčnost cívky	(H)
μ	permeabilita	(H/m)
μ_r	relativní permeabilita	(-)
μ_0	permeabilita vakua	(H/m)
h	výška vinutí	(m)

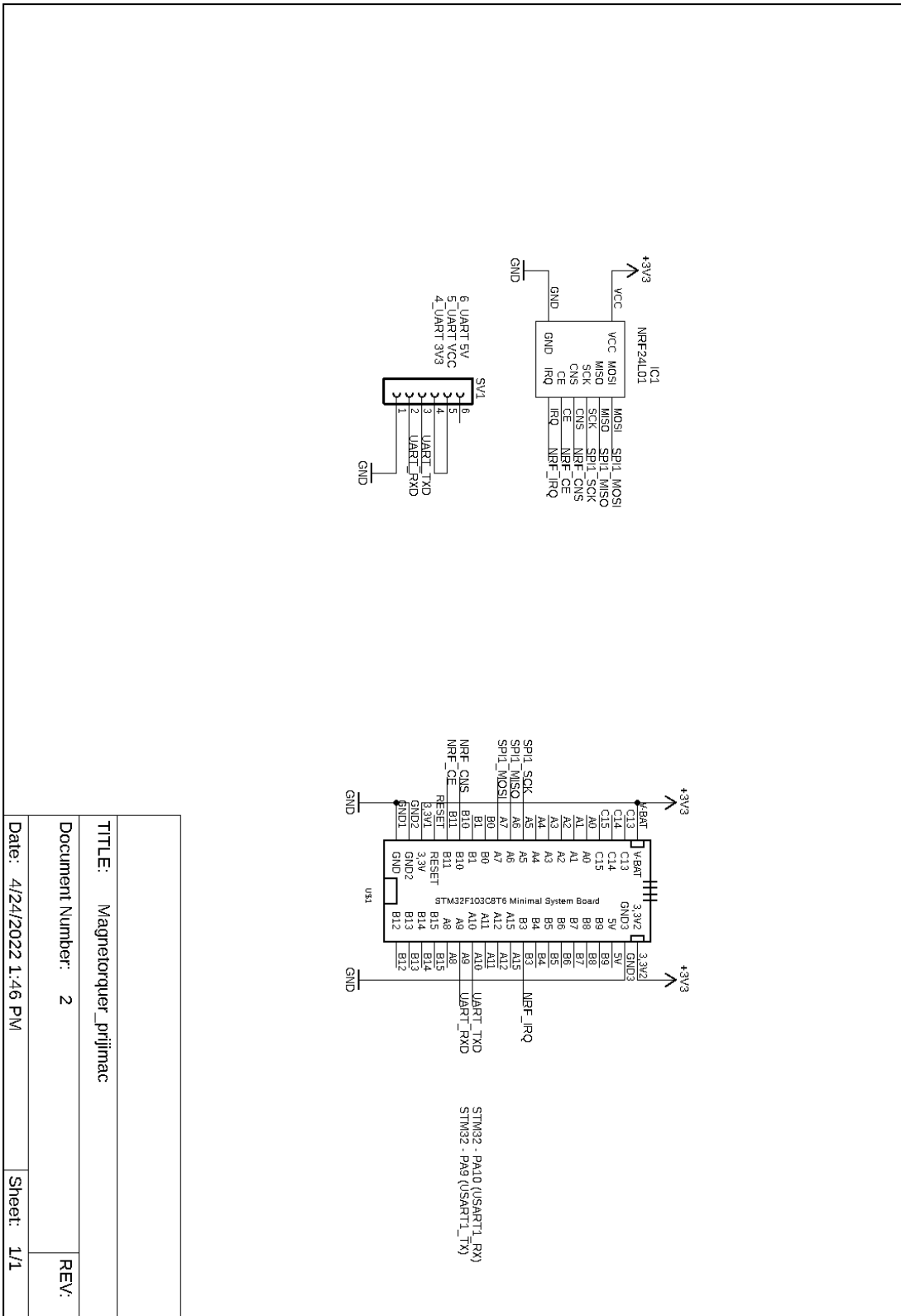
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - NÁVRH ZAŘÍZENÍ	77
A.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ ŘÍDÍČÍ DESKY	77
A.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY PŘIJÍMAČE	79
A.3 ŘÍDÍČÍ DESKA – MOTIV PLOŠNÉHO SPOJE	80
A.4 ŘÍDÍČÍ DESKA – OSAZOVACÍ PLÁN A POTISK.....	81
A.5 DESKA PŘIJÍMAČE – MOTIV PLOŠNÉHO SPOJE.....	82
A.6 DESKA PŘIJÍMAČE – OSAZOVACÍ PLÁN A POTISK.....	82
PŘÍLOHA B - SEZNAM SOUČÁSTEK	83
PŘÍLOHA C – VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE	



TITLE: Magnetorquer_ridici_deska	
Document Number: 1	
Date: 4/24/2022 1:46 PM	Sheet: 2/2
REV:	

A.2 Schéma zapojení desky přijímače



TITLE: Magnetorquer_prijimac

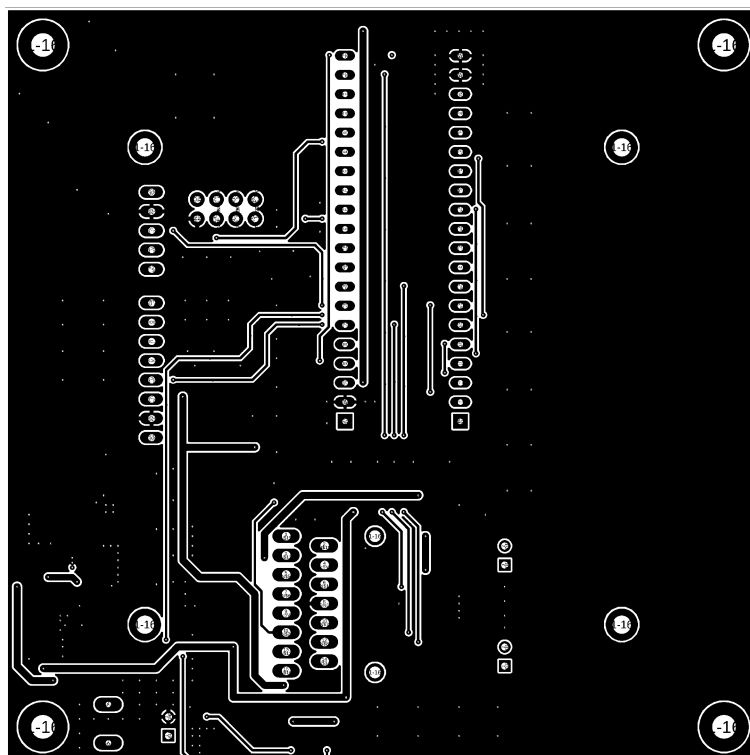
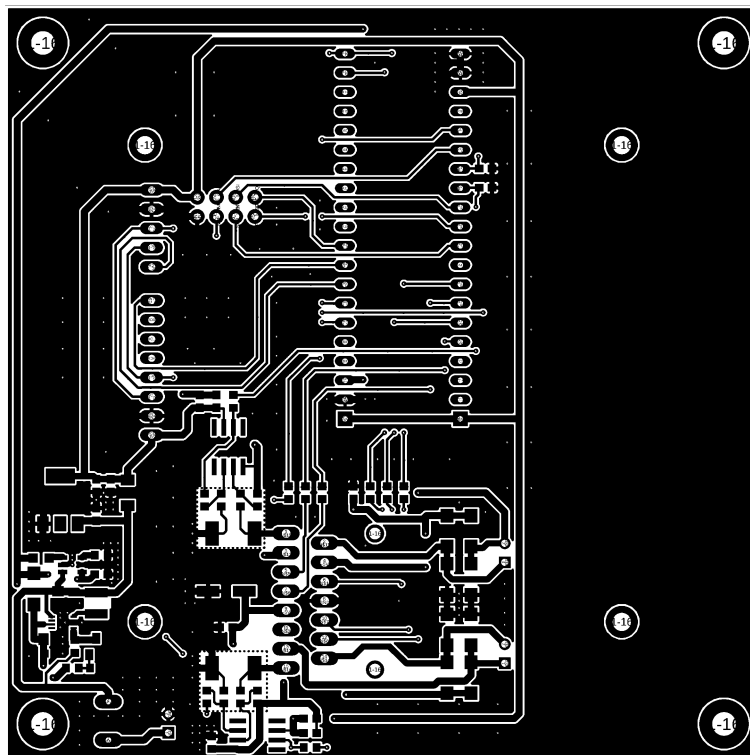
Document Number: 2

REV:

Date: 4/24/2022 1:46 PM

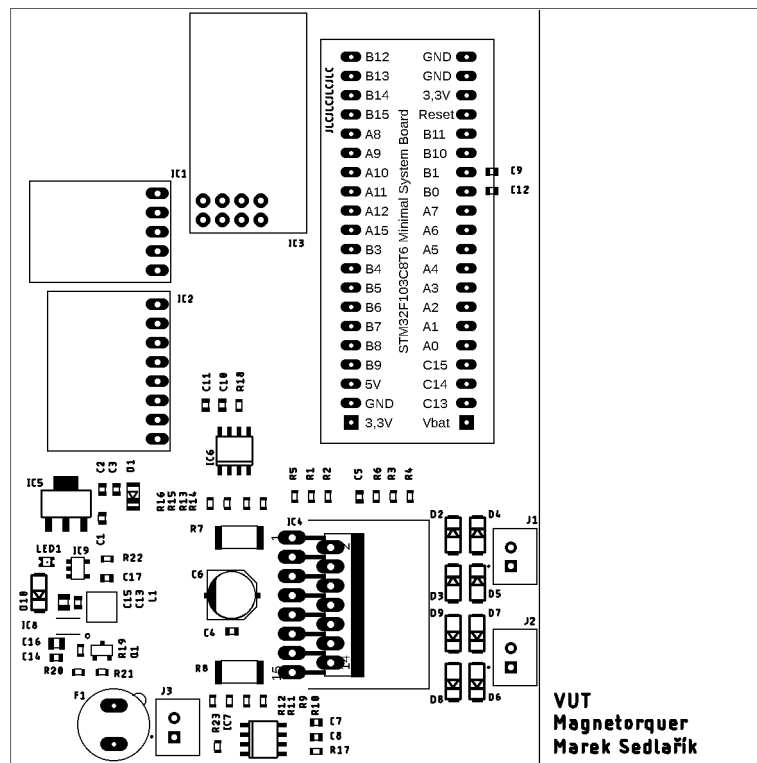
Sheet: 1/1

A.3 Řídicí deska – motiv plošného spoje



Velikost desky: 100 x 100 mm (měřítko 1:1)

A.4 Řídicí deska – osazovací plán a potisk



Příloha B - Seznam součástek

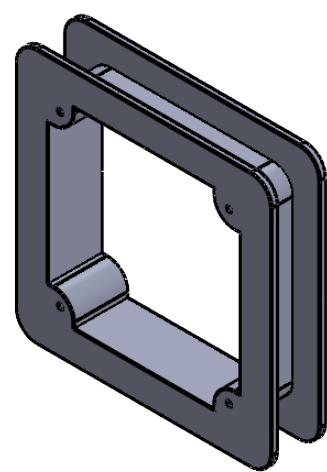
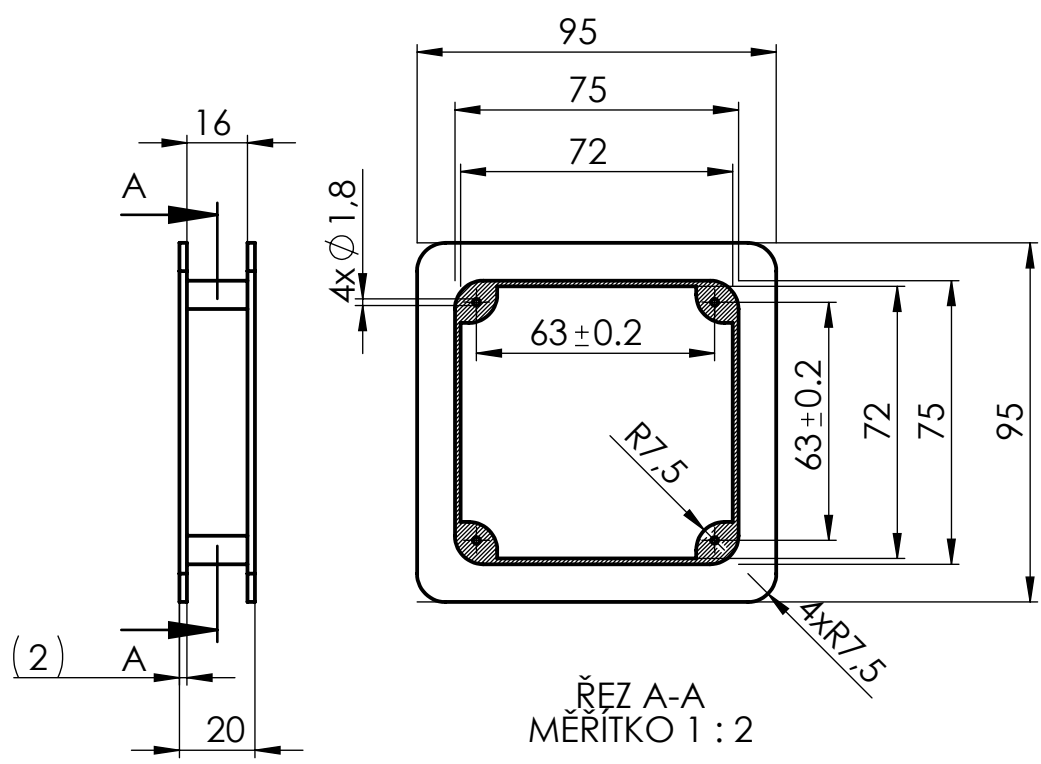
Řídící deska				
Označení	Počet	Hodnota	Pouzdro	Popis
F1	1		19560	Pojistka
LED1	1		CHIPLED_0805	LED dioda
R23	1	0R	R0603	Rezistor
R7, R8	2	0R1/1W	R2512	Rezistor
R10, R12, R14, R16, R19, R20, R21	7	100k	R0603	Rezistor
C1, C2, C13, C14	4	100nF	C0603	Kondenzátor
C4, C5, C7, C10	4	100nF/16V	C0603	Kondenzátor
C6	1	100uF/16V	PANASONIC_D	Kondenzátor elektrolytický
C9, C12	2	10nF	C0603	Kondenzátor
C15, C16	2	10uF	C0805	Kondenzátor
R9, R11, R13, R15	4	1k	R0603	Rezistor
C17	1	1uF	C0603	Kondenzátor
C3, C8, C11	3	2.2uF	C0603	Kondenzátor
R22	1	20k	R0603	Rezistor
R1, R2, R3, R4, R5, R6	6	33R	R0603	Rezistor
L1	1	4.7uH	L5	Tlumivka
R17, R18	2	470R	R0603	Rezistor
J1, J2, J3	3	B2B-XH- A(LF)(SN)	JST_B2B-XH- A(LF)(SN)	Konktor
Q1	1	BSS123	SOT23	Tranzistor
IC8	1	DIO6605B	DFN-8	Step-up měnič
D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10	9	ES1D	DO214AC	Dioda
IC1	1	HMC5883L	HMC5883L	Integrovaný obvod
IC4	1	L298	MULTIWATT-15	Integrovaný obvod
IC5	1	LD117AS33TR	SOT223	Integrovaný obvod
D1	1	LL4148	SOD80C	Dioda
IC2	1	MPU6050	MPU6050	Integrovaný Obvod

Řídící deska				
Označení	Počet	Hodnota	Pouzdro	Popis
IC3	1	NRF24L01	NRF24L01	Integrovaný obvod
IC6, IC7	2	OPA330AID	SO08	Integrovaný obvod
	1	STM32F103_BOA RD	STM32F103_BOA RD	Integrovaný obvod
IC9	1	XC6802MR	SOT5	Integrovaný obvod

Deska přijímače				
Označení	Počet	Hodnota	Pouzdro	Popis
	1	STM32F103_BOARD	STM32F103_BOARD	Integrovaný obvod
IC3	1	NRF24L01	NRF24L01	Integrovaný obvod
SV1	1		FE06-1	Konektor

4 3 2 1

3.2



B NETOLEROVANÉ ROZMĚRY ISO 2768 - mK

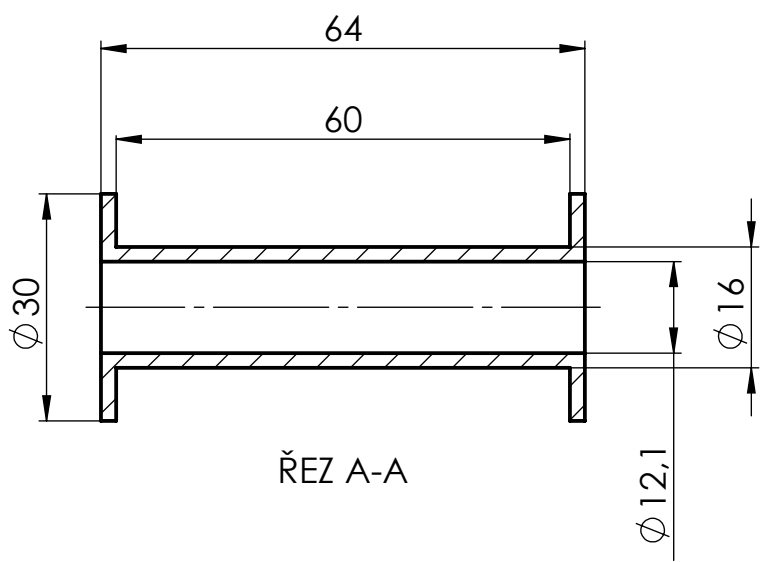
POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:	OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU	ZMĚNA

A NAVRHL PŘEZKOUSĚL SCHVÁLIL VÝROBA Z. JAKOSTI	JMÉNO	PODPIS	DATUM	NÁZEV: Č. VÝKRESU Obvodova_civka A4
			MATERIÁL:	MĚŘITKO: 1:1 LIST 1 Z 1 LISTŮ
			HMOTNOST:	

4 3 2 1

4 3 2 1

3.2



ŘEZ A-A

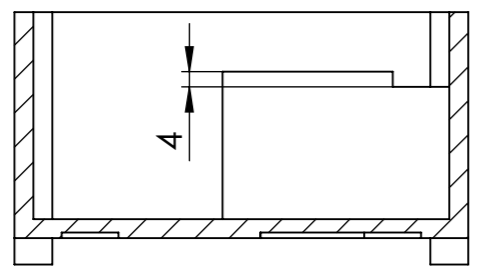
NETOLEROVANÉ ROZMĚRY ISO 2768 - mK

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:	OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA

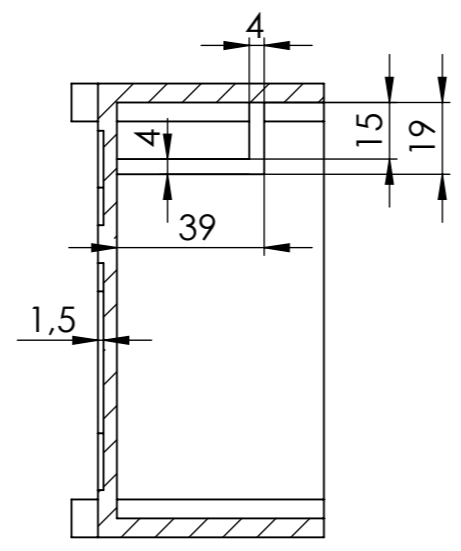
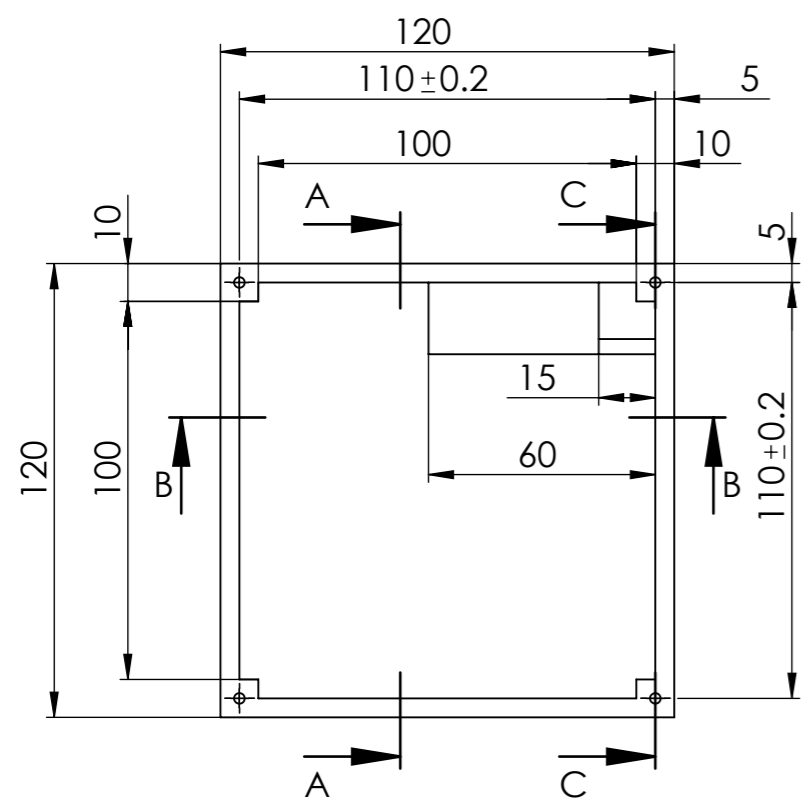
A	JMÉNO	PODPIS	DATUM	NÁZEV:	Solenoid	A4
	NAVRHL					
	PŘEZKOUSĚL					
	SCHVÁLIL					
	VÝROBA					
Z. JAKOSTI			MATERIÁL:	MĚŘÍTKO: 1:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ	
			HMOTNOST:			

4 3 2 1

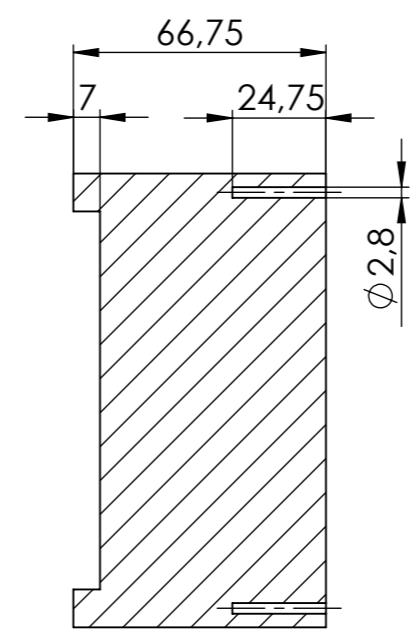
3.2



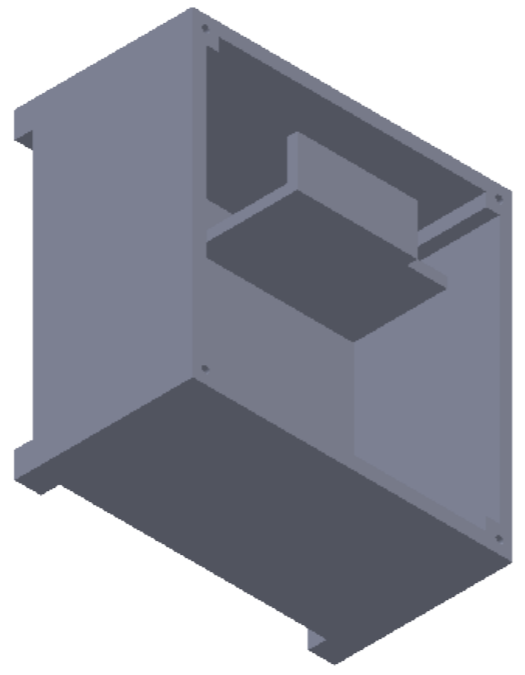
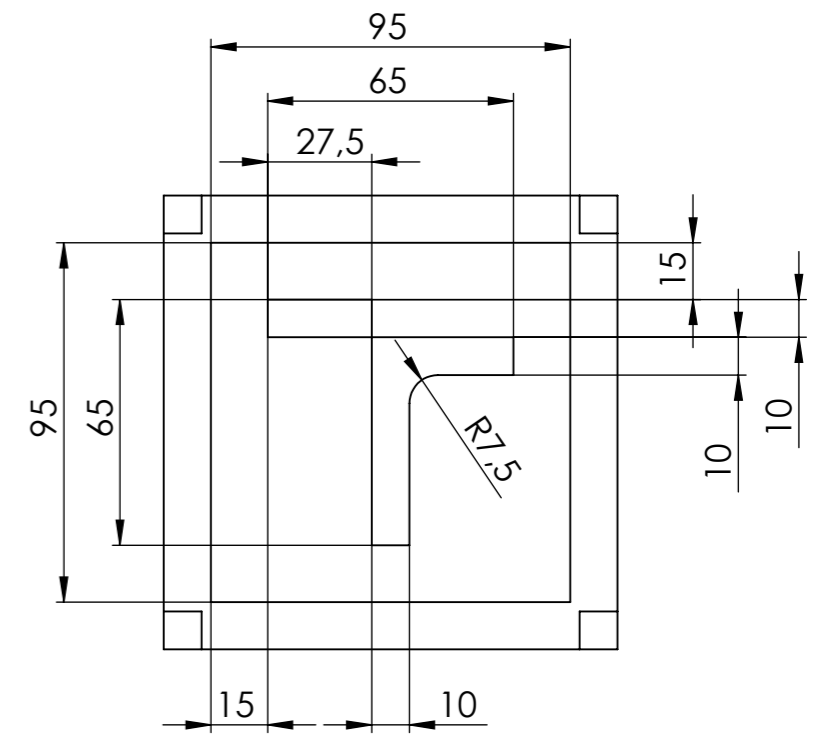
ŘEZ B-B



ŘEZ A-A



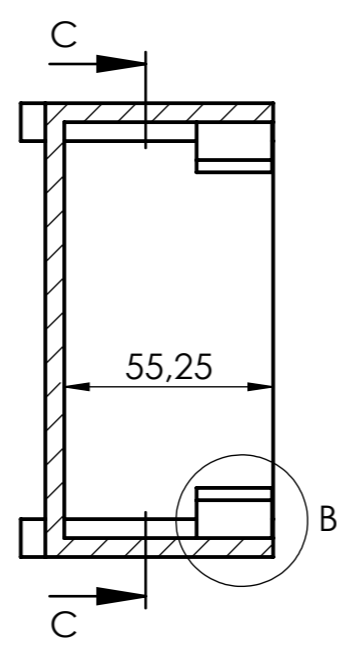
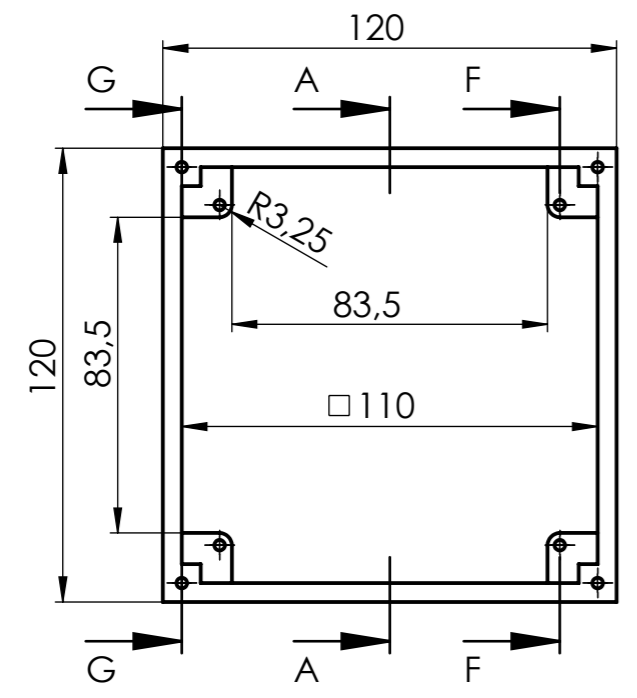
ŘEZ C-C



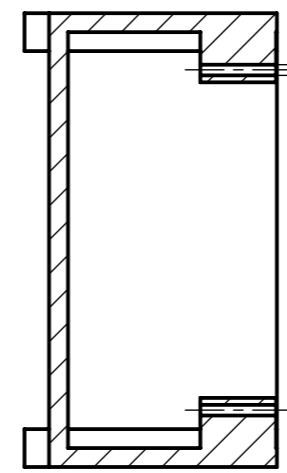
NETOLEROVANÉ ROZMĚRY ISO 2768 - mK

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:	OPRACOVÁNÍ:			ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
	JMÉNO	PODPIS	DATUM		NÁZEV:	
NAVRHL					CubeSat	
PŘEZKOUŠEL						
SCHVÁLIL						
VÝROBA						
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:	Č. VÝKRESU	A3
				HMOTNOST:	MĚŘÍTKO:1:2	LIST 1 Z 1 LISTŮ

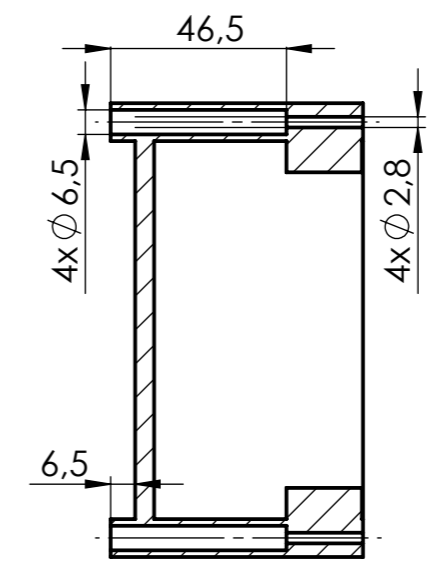
3.2



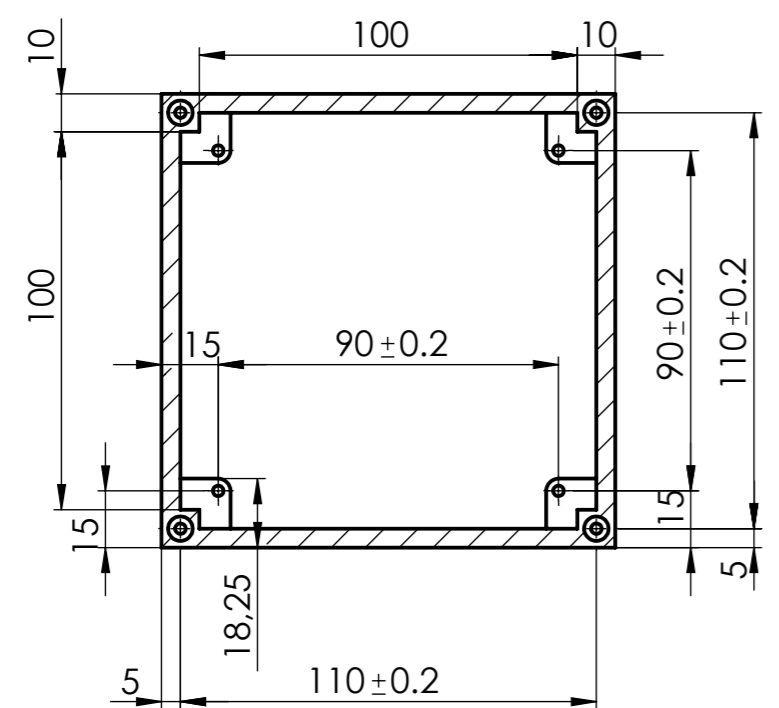
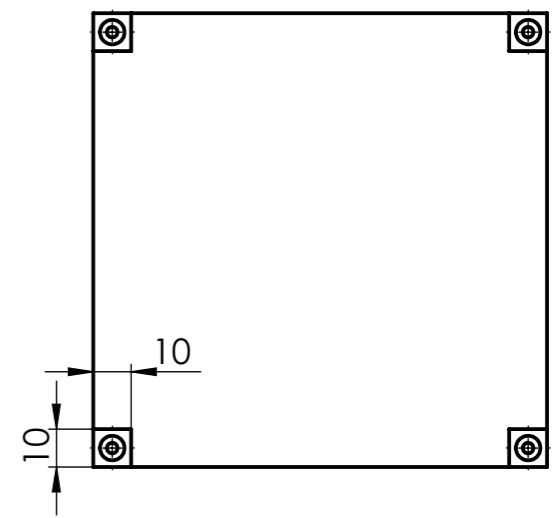
ŘEZ A-A



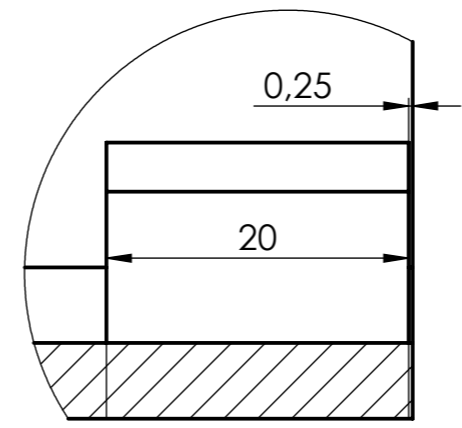
ŘEZ F-F



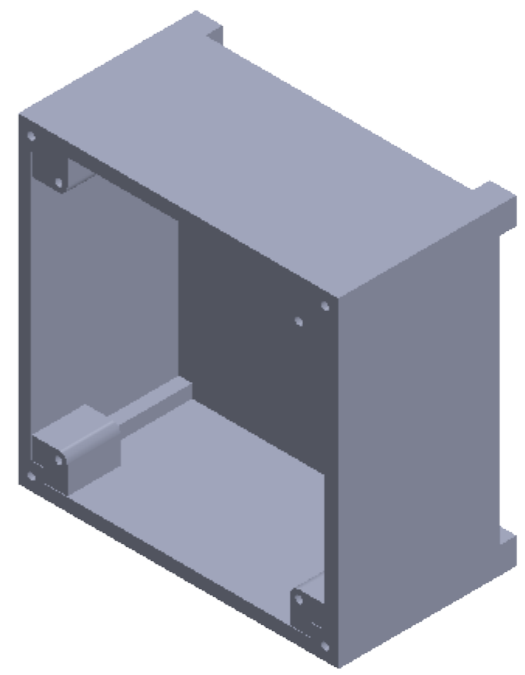
ŘEZ G-G



ŘEZ C-C



DETAIL B
MĚŘITKO 2 : 1



NETOLEROVANÉ ROZMĚRY ISO 2768 - mK

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:	OPRACOVÁNÍ:			ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU	ZMĚNA
	NAVRHL	PODPIS	DATUM		NÁZEV:	
PŘEZKOUŠEL					Č. VÝKRESU	
SCHVÁLIL					MĚŘITKO: 1:2	
VÝROBA				MATERIÁL:	LIST 1 Z 1 LISTŮ	
Z. JAKOSTI				HMOTNOST:	A3	

CubeSat 2