

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



Simulátor natáčení družice CubeSat v magnetickém poli Země

Ing. Jakub Kopečný

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kopečný** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **466718**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Avionika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Simulátor natáčení družice CubeSat v magnetickém poli Země

Název diplomové práce anglicky:

Simulator of rotation of a CubeSat satellite in the Earth's magnetic field

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je spočítat a experimentálně ověřit možnosti natáčení družice kategorie CubeSat pomocí magnetických momentů. V rámci práce:

1. Vypracujte metodiku návrhu momentových cívek a vypočítejte rychlosti natáčení družice. Kromě momentů síly řešte i spotřebu.
 2. Vytvořte simulátor natáčené družice například ve vhodném softwarovém nástroji.
 3. Proveďte experimentální ověření na modelu 1U CubeSatu.
- Experimentální zařízení se bude skládat z průhledné skříně, ve které bude na vhodném vertikálním ložisku s nízkým třením zavěšen model družice opatřený momentovými cívkami a další elektronikou pro bezdrátové ovládání. Diplomant zváží nahradit vertikální ložisko levitací. Dále zváží možnost realizovat experiment ve vakuu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] CubeSat Design Specification Rev. 13, The CubeSat Program, Cal Poly SLO
[2] I. Indir, K. Sever, I. Vnučec and J. Lončar, 'Design and Optimization of Air Core Magnetorquers for Attitude Control of LEO Nanosatellites,' 2021 International Symposium ELMAR, 2021, pp. 135-138, doi: 10.1109/ELMAR52657.2021.9550888.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Pavel Kovář katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **14.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2023/2024

doc. Dr. Ing. Pavel Kovář
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Simulátor natáčení CubeSat v magnetickém poli Země“ vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Dr. Ing. Pavla Kováře s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Ing. Jakub Kopečný

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Dr. Ing. Pavlovi Kovářovi za vedení, rady a konzultace k mé diplomové práci.

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem simulátoru pro natáčení CubeSatu v magnetickém poli Země pomocí magnetické cívky. Byl proveden teoretický návrh vzduchové a solenoidní magnetické cívky a ověření funkčnosti cívky v programu Simulink. Sestrojen CubeSat a simulátor a ověření funkčnosti systému při experimentu.

Klíčová slova

Momentová cívka, CubeSat, Kosmonautika, Orientace a stabilizace, Družice

Abstract

The thesis deals with the design of a simulator for rotating a CubeSat in the Earth's magnetic field using a magnetic coil. The theoretical design of the air and solenoid magnetic coil, and the verification of the coil functionality in Simulink software was carried out. Constructed the CubeSat and simulator, and verified the functionality of the system in the experiment.

Keywords

Moment coil, CubeSat, Cosmonautics, Orientation & Stability, Satellites

Obsah

ÚVOD	12
1. DRUŽICE	13
1.1. ZDROJE ENERGIE	13
1.2. TELEKOMUNIKAČNÍ SYSTÉMY	14
1.3. REGULACE TEPLoty	14
1.4. DĚLENÍ DRUŽIC PODLE VELIKOSTI	15
1.5. DĚLENÍ DRUŽIC PODLE POUŽITÍ.....	16
1.5.1. <i>Telekomunikační družice</i>	16
1.5.2. <i>Navigační družice</i>	17
1.5.3. <i>Družice k pozorování Země</i>	18
2. ŘÍZENÍ ORIENTACE A STABILIZACE	18
2.1. SENZORY	18
2.2. PASIVNÍ AKTUÁTORY	19
2.3. AKTIVNÍ AKTUÁTORY.....	20
3. NÁVRH MAGNETICKÉHO ŘÍZENÍ	23
3.1. MAGNETICKÉ POLE ZEMĚ	24
3.2. KOMERČNÍ MAGNETICKÉ CÍVKY	25
3.3. FYZIKÁLNÍ PRINCIP MAGNETICKÉ CÍVKY	27
3.4. NÁVRH VZDUCHOVÉ CÍVKY	28
3.5. NÁVRH SOLENOIDNÍ CÍVKY	32
3.6. SIMULACE NAVRHNUTÉ SOLENOIDNÍ CÍVKY	36
4. KONSTRUKCE CUBESATU A EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ	38
4.1. ELEKTRONIKA	38
4.1.1. <i>Palubní počítač</i>	38
4.1.2. <i>Senzory</i>	40
4.2. CUBESAT	40
4.3. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	41
4.3.1. <i>Ložisko</i>	41
4.3.2. <i>Lanko</i>	42
4.3.3. <i>Plování</i>	43
4.4. OVLÁDACÍ PROGRAM	44
4.5. FINANČNÍ ZHODNOCENÍ.....	45
5. EXPERIMENT	46
VÝSLEDKY A DISKUSE.....	52
ZÁVĚR	54

Seznam obrázků

Obrázek 1 Princip komunikace satelitu s pozemní stanicí [3]	14
Obrázek 2 Typy konstelací CubeSatu [4].....	16
Obrázek 3 Znárodnění telekomunikačních družic [5]	17
Obrázek 4 Princip využití gravitačního gradientu [7].....	19
Obrázek 5 Složení družice pro stabilizaci rotací s dvojitým spinem [9].....	20
Obrázek 6 Reakční kola v družici [10].....	21
Obrázek 7 Stabilizace pomocí trysek [11]	22
Obrázek 8 Natáčení CubeSatu magnetickou cívkou v magnetickém poli Země [12].....	23
Obrázek 9 Deformace magnetického pole Země vlivem slunečního větru [13].....	24
Obrázek 10 Magnetická deklinace a inklinace [16]	24
Obrázek 11 Intenzita, inklinace a deklinace magnetického pole Země [17].....	25
Obrázek 12 Cívka iMTQ Magnetorquer Borad [19].....	26
Obrázek 13 Smyčka umístěná v homogenním magnetickém poli a magnetická síla působící na stranu 2 a 4; rotace proudové smyčky [10]	27
Obrázek 14 Model natáčení CubeSatu v prostředí Simulink	36
Obrázek 15 Raspberry Pi 3 model B+ se znázorněnými piny GPIO [27].....	38
Obrázek 16 Raspberry Pi model 3B+ společně se zdrojem napětí UPS HAT a chlazením PWM Fan Hat [29]	39
Obrázek 17 Model CubeSatu	40
Obrázek 18 Simulátor s CubeSatem.....	41
Obrázek 19 CubeSat zavěšený na lanku.....	43
Obrázek 20 Ručně opracované kruhové plováky.....	44
Obrázek 21 Schéma zapojení elektroniky do Raspberry Pi	45
Obrázek 22 Umístění CubeSatu na čtvercovém plováku.....	46
Obrázek 23 CubeSat na kruhovém plováku.....	48
Obrázek 24 Solenoidní cívka na kruhovém plováku.....	50
Obrázek 25 Solenoidní cívka na čtvercovém plováku	51

Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdělení družic dle velikosti	15
Tabulka 2 Srovnání komerčních cívek	27
Tabulka 3 Srovnání obdélníkové a solenoidní cívky	35
Tabulka 4 Ceny jednotlivých položek	45
Tabulka 5 Srovnání důležitých faktorů navrhnutých cívek	52
Tabulka 6 Srovnání výsledků experimentu	53

Seznam grafů

Graf 1 Závislost magnetického pole cívky na vzdálenosti od povrchu Země.....	25
Graf 2 Výsledný moment čtvercové cívky v závislosti natočení k severnímu magnetickému pólu.....	30
Graf 3 Výsledný moment solenoidní cívky v závislosti na natočené družice.....	34
Graf 4 Porovnání průběhu momentu síly čtvercové a solenoidní cívky	35
Graf 5 Závislost simulovaného průběhu momentu síly na úhlu.....	37
Graf 6 Závislost úhlu natočení a procházejícího proudu cívkou na čase	37
Graf 7 Test 1	46
Graf 8 Srovnání teoretického výsledku a výsledků z testu 1	47
Graf 9 Test 2.....	48
Graf 10 Srovnání úhlové rychlosti testu 1 a testu 2	49
Graf 11 Srovnání teoretického výpočtu s testem 2.....	49
Graf 12 Test 3.....	50
Graf 13 Test 4.....	51

Seznam použitých symbolů

B_Z	[T]	Indukce magnetického pole Země
M_Z	[Am ²]	Magnetický dipólový moment Země
R_Z	[m]	Výška od středu Země
F	[Nm]	Moment síly
B	[T]	Indukce čtvercové cívky
M	[Am ²]	Magnetický dipólový moment cívky
θ_r	[°]	Úhel, který svírá plošný vektor A s indukcí B
N	[-]	Počet závitů
I	[A]	Proud
μ_0	[-]	Permeabilita vakua
d	[m]	Délka namotané cívky
A	[m ²]	Plocha cívky
a	[m]	Délka strany cívky
l	[m]	Délka drátu
R	[Ω]	Odpor cívky
ρ	[Ωm]	Rezistivita mědi
S	[m ²]	Průřez drátu
U	[V]	Napětí
P	[W]	Výkon
V	[m ³]	Objem
M_s	[kgm ²]	Moment setrvačnosti
Ω_o	[rads ⁻¹]	Úhlová rychlost
S	[Ah]	Spotřeba
o_j	[m]	Průměr jádra
N_d	[-]	Demagnetizační faktor
l_c	[m]	Délka cívky
r_j	[m]	Poloměr jádra
G	[m ²]	Geometrická část magnetického dipólového momentu
μ_r	[-]	Permeabilita jádra

Seznam použitých zkratk

GEO	Geostacionární dráha
CO ₂	Oxid uhličitý
CCD	Charge-coupled device
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
GPS	Global Positioning System
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
WMG	World Magnetic Model
GPIO	General-purpose input/output
ESA	European Space Agency

Úvod

V dnešních dnech již každý má určitou představu o tom, co to družice či satelit a k čemu nám slouží. Především ve využívání meteorologických snímků, satelitní navigace nebo satelitní televize.

Dnešní životy lidí se už bez těchto technologií nedokážou obejít a jsou tak neoddelitelnou součástí celé společnosti. O konstrukci, způsobu řízení satelitu nebo sběru dat již populace lidstva příliš neví.

Na oběžných drahách není možnost měnit baterie nebo doplňovat palivo, tedy družice využívají k získávání energie solární panely. Solární panely musí být natočeny směrem ke Slunci, aby mohly získávat maximální množství energie. Ve vesmíru ale působí na družici mnoho sil, které družici vychylují ze své správné orientace. Je tedy nezbytné kontrolovat správnost orientace družice a v případě potřeby její orientaci korigovat.

První družice byla vypuštěna roku 1957, čímž odstartovala éra kosmonautiky. Od té doby byly právě kvůli vesmírnému výzkumu vyvinuty nové technologie, materiály, a především probíhá neustálá miniaturizace elektroniky. Fenoménem se stala družice typu CubeSat, což je v základním rozměru družice o velikosti 10 x 10 x 10 cm. Taková družice je především méně nákladná než standardní družice, a právě díky nižší ceně je dostupnější pro mnoho institucí.

1. Družice

Umělé kosmické těleso, též jinak označená družice, je vytvořené člověkem a pohybuje se na oběžné dráze kolem vesmírného tělesa. Pokud obíhá kolem jiného tělesa než Země, lze se také setkat s označením planetární sonda.

Jedná se o komplexní zařízení, na kterém se podílí mnoho odborníků a především kvůli vysoké ceně a následné správné funkci ve vesmíru je kladen veliký důraz na spolehlivost systémů. Čtyři základní stavební bloky každé družice se skládají z dodávky elektrické energie, udržování optimální teploty systému, spolehlivé komunikace na velké vzdálenosti a přesného určení orientace v prostoru.

Družici lze rozdělit na konstrukci a užitečný náklad. Konstrukce musí být odolná proti drsnému prostředí ve vesmíru, ale zároveň velice lehká, jelikož každý kilogram navíc, který se musí vynést do vesmíru, stojí velké peníze. Užitečný náklad jsou antény, vědecké přístroje, kamery a další věci, které jsou potřeba k účelu dané družice.

1.1. Zdroje energie

Solární panely jsou klíčovou součástí družice, protože slouží k získávání energie ze Slunce, která je potřebná pro napájení elektroniky a dalších systémů na palubě. Tyto panely jsou obvykle umístěny na povrchu družice a skládají se z mnoha spojených solárních článků vyrobených většinou z křemíku nebo jiných polovodičů. [1, 2]

Princip přeměny energie spočívá v tom, že fotony ze slunečního záření dopadají na P-N přechod solárního panelu a vyraží elektrony z valenčního pásu do pásu vodivostního. Tyto uvolněné elektrony se pomocí systému vodičů odvedou přímo ke spotřebiči nebo akumulátoru. Aby byla zajištěna maximální účinnost solárních panelů, jsou obvykle namířeny přímo na Slunce a jsou vybaveny mechanismy, které umožňují jejich otáčení nebo sklonění v závislosti na pozici družice vůči Slunci. [1, 2]

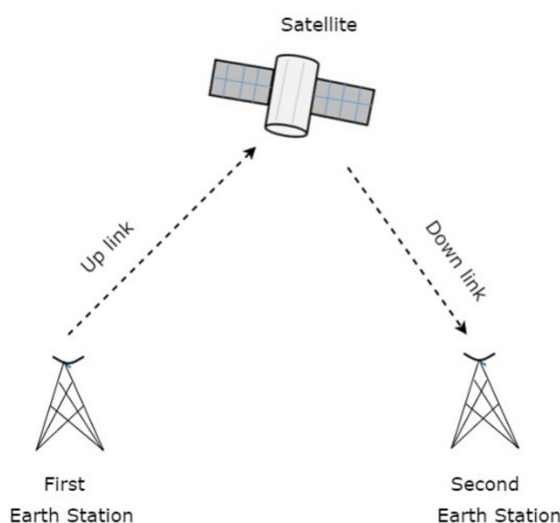
Solární panely jsou velice spolehlivý zdroj, ale potřebují přímý sluneční svit. V případě, že sluneční energie není dostatečná, lze využít například radioizotopové baterie, které využívají radioaktivní materiál jako je plutonium-238. [1, 2]

1.2. Telekomunikační systémy

Telekomunikační systémy v družicích jsou jedním z nejdůležitějších systémů, které se na družici nachází. Jsou využívány pro přenos dat, televizního vysílání, mobilních signálů a dalších komunikačních služeb. [2, 3]

Většina družicových telekomunikačních systémů využívá mikrovlnné a rádiové přenosy. Tyto signály jsou vysílány z družice na určité frekvenci a jsou zachyceny přijímači na Zemi. Signály jsou pak dekódovány a převedeny na zvuk, obraz nebo data. [2, 3]

Proces družicové komunikace začíná na pozemní stanici, kde je zařízení určeno k vysílání a příjmu signálů z družice na oběžné dráze kolem Země. Pozemské stanice posílají informace satelitům ve formě vysoce výkonných signálů o vysoké frekvenci (rozsah GHz). Družice přijímají a znovu vysílají signály zpět na Zemi, kde je přijímají další pozemské stanice v oblasti pokrytí družice. [2, 3]



Obrázek 1 Princip komunikace satelitu s pozemní stanicí [3]

1.3. Regulace teploty

Regulace teploty je velmi důležitá pro správnou funkci elektronických zařízení na palubě a také na životnost družice. Tepelná regulace pro kosmické aplikace pokrývá velmi široký teplotní rozsah, od kryogenní úrovně (až -270 °C) až po vysokoteplotní systémy tepelné ochrany (více než 2000 °C). Regulaci tepla lze rozdělit na pasivní a aktivní. [2]

Pasivní prvky jsou jednoduché a levnější než aktivní. Zahrnují například tepelné štíty, tepelné izolace nebo natočení družice vůči Slunci. Aktivní prvky zahrnují například tepelná čerpadla, ohřívače a chladiče. Aktivní prvky se používají k regulaci teploty v případě, že pasivní prvky nejsou dostatečné. [2]

1.4. Dělení družic podle velikosti

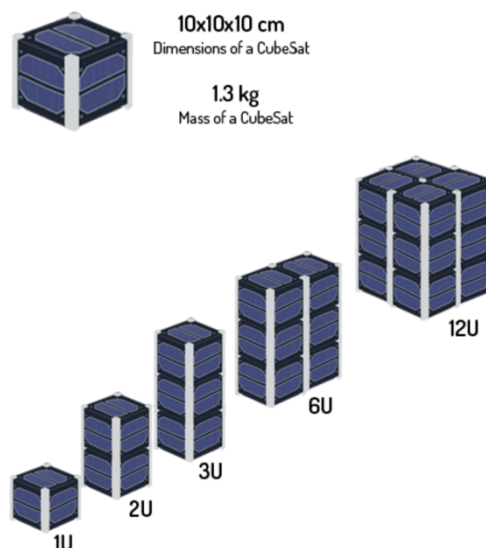
Požadavky na družici, tedy jaké funkce má splňovat a jaké vybavení obsahovat, určuje především cíl mise. Čím je náročnější cíl mise, tím musí být družice výkonnější a větší. Družice na vyšší oběžné dráze bude potřebovat mnohem výkonnější vysílače, více energie a mnoho dalších parametrů než družice na nízké oběžné dráze. Základní rozdělení družic je v tabulce 1.

[4]

Kategorie	Rozsah váhy (kg)
Velká družice	> 1000
Střední družice	500 – 1000
Minidružice	100 – 500
Mikrodružice	10 – 100
Nanodružice	1 – 10
Pikodružice	0,1 - 1

Tabulka 1 Rozdělení družic dle velikosti

Tato diplomová práce se zabývá CubeSatem, a proto bude dále rozebrána především kategorie nanodružic. Základním kamenem CubeSat je krychlová struktura o rozměrech 10 x 10 x 10 cm a hmotnosti mezi 1 a 1,33 kg, označované jako 1U. Dnes je standardní, že se CubeSaty skládají a vznikají větší konstelace typu 2U, 3U a více. Větší CubeSaty mohou tedy patřit i do kategorie mikrodružic. CubeSat o velikosti 1U patří do kategorie nanodružic. [4]



Obrázek 2 Typy konstelací CubeSatu [4]

Jedna z hlavních výhod kategorie nanodružic je mnohem kratší doba od vývoje k realizaci. U velkých družic trvá obvykle vývoj a realizace 5 až 15 let, zatímco u CubeSatu je možné dosáhnout vývoje a realizace za méně než 1 rok. V závislosti na specifikacích lze nanodružici postavit a umístit na oběžnou dráhu za 500 000 eur. Pro srovnání, náklady na klasickou družici mohou dosáhnout až 500 milionů eur. [4]

Vypuštění nanodružice jako součásti konstelace místo jedné velké družice umožňuje kromě vlastního vývoje každé družice rozdělit riziko spojené s poruchou systémů nebo nepředvídatelných jevů, jako je srážka s mikrometeoritem. V případě ztráty nanodružice nebo selhání jedné z jednotek je tak možné ji rychle nahradit v proveditelných lhůtách a za rozumnou cenu. [4]

1.5. Dělení družic podle použití

1.5.1. Telekomunikační družice

Telekomunikační družice jsou klíčovými prvky moderního světa a slouží k přenosu hlasu, dat a televizního signálu na celém světě. Jejich význam spočívá v tom, že umožňují překonávat geografické a vzdálenostní bariéry, a tak propojují lidi a organizace bez ohledu na jejich umístění. [5]

Jsou umístěny na geostacionární oběžné dráze, což znamená, že se pohybují ve stejném směru a rychlosti jako Země. Tímto způsobem zůstávají trvale umístěny nad jedním místem na

povrchu Země a poskytují nepřetržité pokrytí širokého geografického území. Signály jsou přijímány na Zemi pomocí parabolických antén, které směřují k družici ve vesmíru. Poté jsou signály přenášeny přes pozemní stanice a sítě, které zprostředkovávají jejich distribuci do cílových míst. [5]

Telekomunikační družice mají významný dopad na lidský život a globalizaci. Díky nim je možné provozovat telefonní hovory, posílat e-maily, surfovat po internetu a sledovat televizi na celém světě. [5]



Obrázek 3 Znárodnění telekomunikačních družic [5]

1.5.2. Navigační družice

Navigační družice poskytují přesné informace o poloze, času a rychlosti na zemi i na moři. Jejich význam spočívá v tom, že umožňují určovat polohu a navigovat ve složitých terénech a vzdálených oblastech. [2, 6]

Navigační družice pracují na základě systémů jako je GPS (Global Positioning System), GLONASS (Global Navigation Satellite System) a dalších regionálních systémů, jako je například Galileo. [2, 6]

Navigační družice jsou vybaveny přesnými atomovými hodinami, které slouží k synchronizaci času a zajištění přesnosti měření polohy. Vysílají signály, které obsahují informace o jejich poloze na oběžné dráze a čase vyslání signálu. Přijímače na zemi zachytávají tyto signály od více družic a na základě jejich rozdílných časových značek vypočítávají polohu uživatele triangulací. Tři signály se používají k určení zeměpisné délky, šířky a výšky, čtvrtý

signál se používá k určení časového posunu mezi satelitními hodinami a hodinami zabudovanými v přijímači. [2, 6]

1.5.3. Družice k pozorování Země

Družice pro pozorování Země se využívají pro špionážní účely a podobné účely určené pro nevojenské účely, jako je monitorování životního prostředí, meteorologie, kartografie a další. Nejběžnějším typem jsou družice, které pořizují družicové snímky, obdobu leteckých fotografií. [7]

2. Řízení orientace a stabilizace

Úkolem systémů orientace a stabilizace je, že družice bude správně zaměřena na cíl, bude efektivně využívat energii a bude mít optimální funkčnost. Ač je ve vesmíru vakuum, tak je přesto mnoho vlivů, které ovlivňují polohu družice. Může se jednat o gravitační gradient Země, Slunce nebo Měsíce, střet s mikrometeoritem, magnetické pole Země, zbytky atmosféry a další. [2]

Proces řízení orientace a stabilizace družice lze rozdělit do tří fází:

- 1) Zjišťování a měření polohy družice – pomocí senzorů
- 2) Úprava polohy – pomocí aktuátorů
- 3) Určování odchylky momentu hybnosti v důsledku působící rušivé síly – pomocí počítače nebo řídicí jednotky

2.1. Senzory

Sun sensor – Slunce je svítící těleso a lze ho aproximovat jako bodový zdroj, které lze snadno detekovat, jelikož jeho hvězdná velikost je mnohonásobně vyšší než u ostatních hvězd. V důsledku toho bylo v průběhu let vyrobeno mnoho senzorů Slunce, od základních technik, které jednoduše určují přítomnost/nepřítomnost Slunce, až po sofistikované technologie, které určují směr Slunce s přesností na několik desetin stupně. [2, 13]

Earth sensor – Na rozdíl od Slunce nelze Zemi aproximovat jako bodový zdroj, protože na nízké oběžné dráze Země je přibližně 40 % zorného pole družice vyplněno Zemí. Aby senzor

dokázal odlišit Zemi od chladného prostoru po celé dráze, mělo by mít vyzařované záření rovnoměrné rozložení energie v celém rozsahu spektra. Spektrální oblast, která nejlépe odpovídá požadavkům, je infračervená oblast, protože vyzařovaná energie má rovnoměrné rozložení energie bez ohledu na denní/noční dobu a odrazivý povrch Země v důsledku toho, že většina záření pochází z atmosféry nad zemským povrchem. [2, 13]

Star senzor – Hvězdné senzory mohou poskytnout přesné informace o poloze díky snímání hvězd a jejich porovnáváním s katalogovými polohami. Poskytují nejpřesnější informace o poloze ze všech družicových senzorů. Typická je odhadovaná přesnost 20 úhlových vteřin nebo méně. [2, 13]

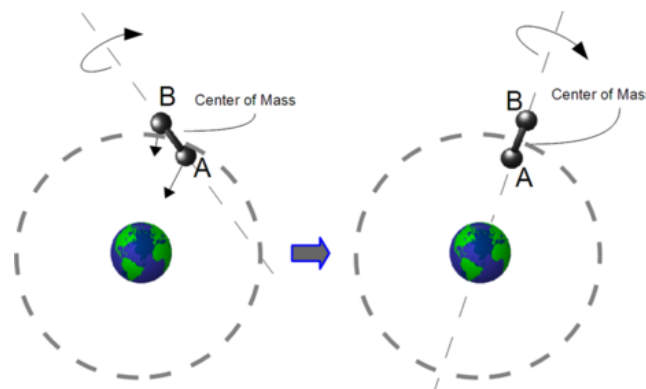
Gyroskop – Rotující gyroskopy jsou jedním z nejstarších a nejoblíbenějších senzorů používaných na palubách družic. Gyroskopy mohou měřit úhlové rychlosti kosmického prostředku, aniž by potřebovaly znalost vnější nebo absolutní reference. [2, 13]

2.2. Pasivní aktuátory

Pasivní způsoby řízení orientace a stabilizace družice jsou metody, které nevyžadují žádné aktivní zařízení, jinými slovy nevyužívají energii družice. Tyto pasivní metody jsou obvykle levnější a jednodušší na použití než aktivní metody. [2, 8]

Gravitační gradient

Gravitační gradientová stabilizace využívá Newtonův zákon obecné gravitace a pomocí gravitačních sil se snaží udržet družici v nadiru. Toho se dosahuje pomocí výsunu malé samostatné hmoty od kosmické lodi, která se stává druhou samostatnou hmotou, na vzdálenost 3-6 m. [8]

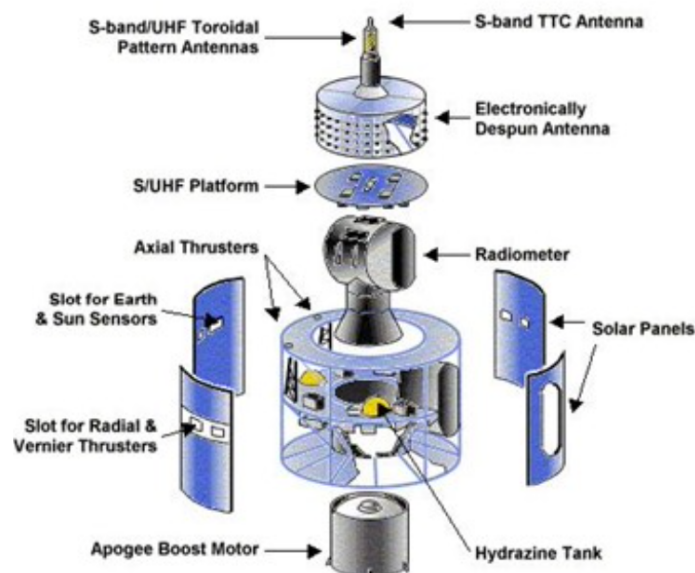


Obrázek 4 Princip využití gravitačního gradientu [7]

Na tyto dvě hmoty, které jsou spojeny tenkým a lehkým ramenem, působí nepatrně jiné gravitační síly v důsledku rozdílné vzdálenosti od Země. Tento malý rozdíl může být dostatečný k tomu, aby systém družice a přídatné hmoty byl po celou dobu vyrovnán s vektorem poloměru jako obíhající kyvadlo. [8]

Stabilizace rotací

Otáčením družice vzniká vektor momentu hybnosti, který zůstává v inerciálním prostoru téměř neměnný. Vytvořený úhlový moment poskytuje rotující družici gyroskopickou tuhost, díky níž je méně náchylná na vnější vlivy. Tato technika pasivní stabilizace byla populární v 70. letech u komunikačních družic na GEO a stále se používá během cestovní fáze meziplanetárních misí díky své jednoduchosti a systémovým výhodám pro tepelné a komunikační účely. [8, 9]



Obrázek 5 Složení družice pro stabilizaci rotací s dvojitým spinem [9]

Při stabilizaci rotací s dvojitým spinem se otáčí dvě části družice s různou úhlovou rychlostí. Jedna část družice se otáčí, aby poskytla úhlový moment, zatímco druhá část je roztočená a směřuje pevným směrem, například k Zemi. Nevýhodou tohoto principu je zvýšená složitost ložisek mezi rotujícími částmi družice. [9]

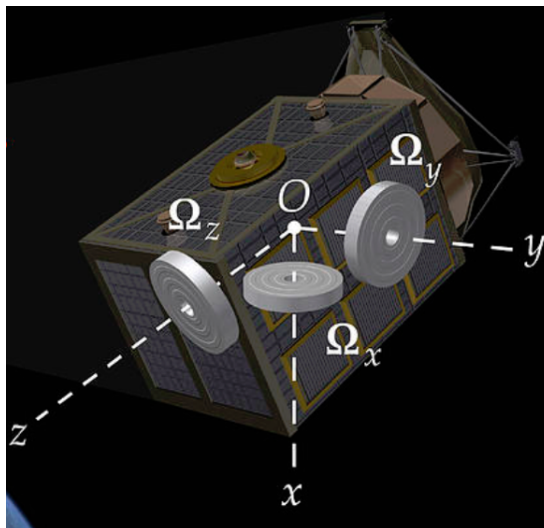
2.3. Aktivní aktuátory

Aktivní systémy řízení orientace a stabilizace družice využívají aktivních prvků k dosažení požadované orientace a stabilizace družice. Tyto metody jsou obvykle účinnější než

pasivní způsoby, ale jsou nákladnější, složitější na použití a spotřebovávají energii nebo palivo družice. [8]

Reakční kola

Většina kosmických lodí dnes používá tříosou stabilizaci, protože může zajistit vyšší přesnost. V těchto systémech se pro každou osu používají reakční kola, která slouží ke kompenzaci vnějších vlivů a k provedení různých příkázaných manévrů. Reakční kola zrychlují z počáteční nulové rychlosti v důsledku požadovaných manévrů a v důsledku sekundárních vlivů, čímž se dostanou na hranici saturace. To vyžaduje desaturaci, která využívá momentové cívky nebo trysky, aby umožnila snížení otáčení kol. [8]



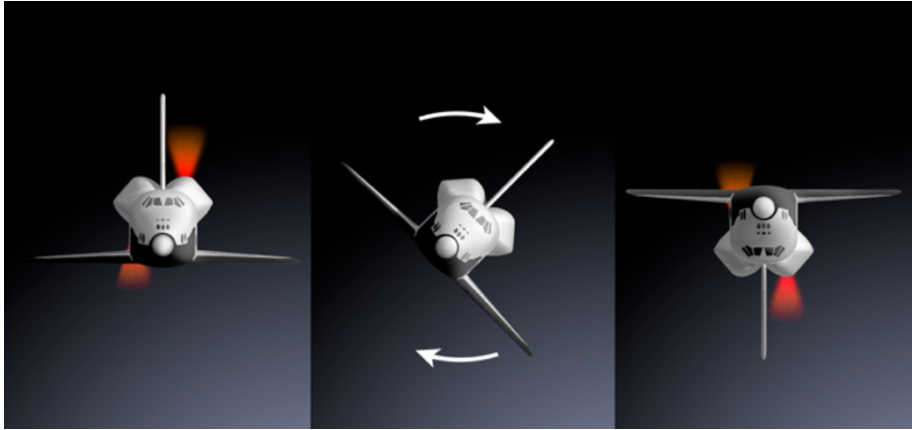
Obrázek 6 Reakční kola v družici [10]

Reakční kola fungují na principu zachování momentu hybnosti. Použití rotujících hmot v tělese družice umožňuje přenos úhlového momentu hybnosti mezi různými částmi, aniž by se změnil jeho celkový úhlový moment hybnosti. Jelikož je pro družici tento moment vnitřní, jeho zvýšení nemění celkový moment hybnosti soustavy, ale spíše přenáší moment hybnosti na zbytek družice. [8]

Skládají se z přesně konstruovaného setrvačníku, jehož většina hmotnosti je soustředěna na špičce/okraji disku, aby se dosáhlo maximální setrvačnosti kola při dané hmotnosti. Reakční kola se používají v případě, že je třeba provést přesné a časově optimální manévry, jelikož umožňují plynulé řízení točivého momentu. V důsledku tření však vykazují nelineární odezvu

při velmi nízkých rychlostech otáčení, což může způsobit nepravidelný pohyb kosmické lodi. [8]

Trysky



Obrázek 7 Stabilizace pomocí trysek [11]

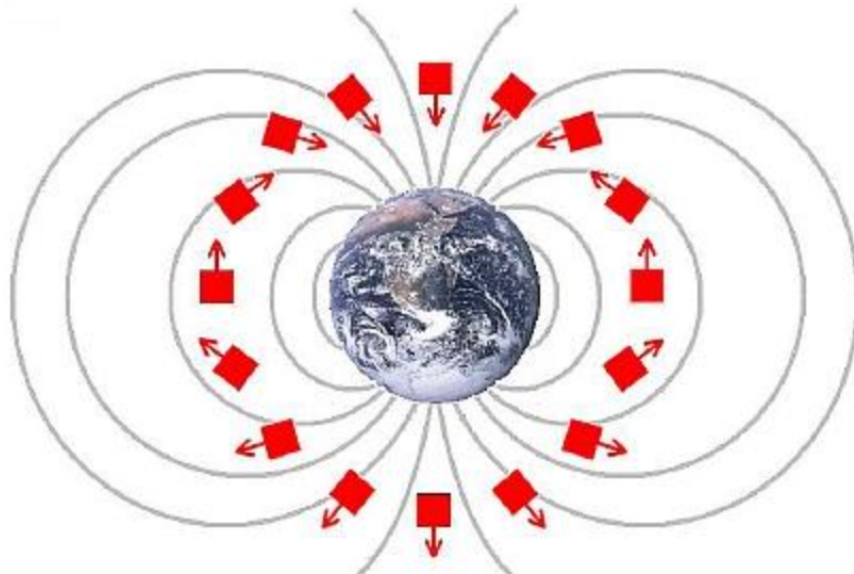
Správnou orientaci lze také získat pomocí malých trysek. Jsou namontovány ve skupinách na povrchu družice v různých konfiguracích tak, aby zajišťovaly požadovaný směr točivého momentu kolem každé osy. Nevýhodou použití trysek, zejména ve srovnání s magnetickými cívkami, je spotřeba pohonné látky, zvýšená hmotnost, složitost a cena. Použití trysek je však nezávislé na nadmořské výšce a magnetickém poli Země a lze je v mnoha případech použít pro přesné řízení polohy. [8]

Magnetické cívky

Díky jednoduchosti, levnému hardwaru a poměrně dobrému řízení polohy je magnetické řízení velmi atraktivní, zejména pro malé družice, především pro řízení polohy a desaturace momentu hybnosti reakčních kol. Interakce mezi magnetickým momentem generovaným družicí a magnetickým polem Země vytváří moment síly. [8]

Směr magnetického momentu lze v praxi řídit vhodnou posloupností spouštěním momentových cívek, protože vektor magnetického pole Země je závislý na poloze na oběžné

dráze. V důsledku toho výsledný moment nemusí být výhodný pro řízení polohy konkrétní osy kosmické lodi v určitých oblastech dráhy. [8]



Obrázek 8 Natáčení CubeSatu magnetickou cívkou v magnetickém poli Země [12]

Obvykle se na družici používají tři magnetické cívky, jedna na každou osu pro řízení polohy. Jejich účinnost klesá se vzrůstající výškou dráhy v důsledku klesající intenzity magnetického pole Země. Specifickou vlastností momentových cívek je, že nemohou vytvářet složku točivého momentu kolem směru místního pole. Například na polární dráze lze vždy v určitém bodě dráhy dosáhnout jakéhokoliv požadovaného směru, protože směr pole se mění po dráze, zatímco v rovině rovníku by to bylo problematické, protože siločáry pole jsou vždy ve směru sever-jih. [8]

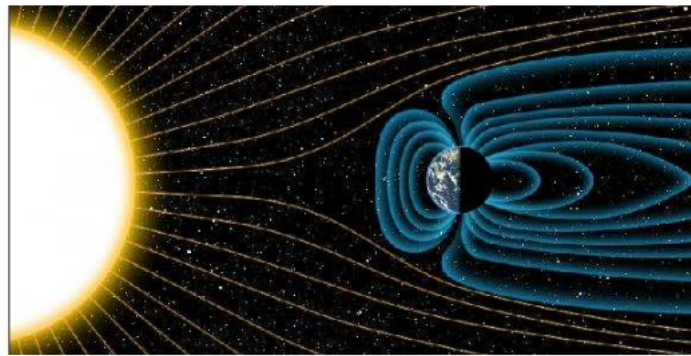
3. Návrh magnetického řízení

Jelikož magnetické cívky interagují s magnetickým polem Země, je před samotným návrhem magnetické cívky popsáno magnetické pole Země.

V této diplomové práci je proveden návrh vzduchové a solenoidní cívky, které budou řešeny postupně.

3.1. Magnetické pole Země

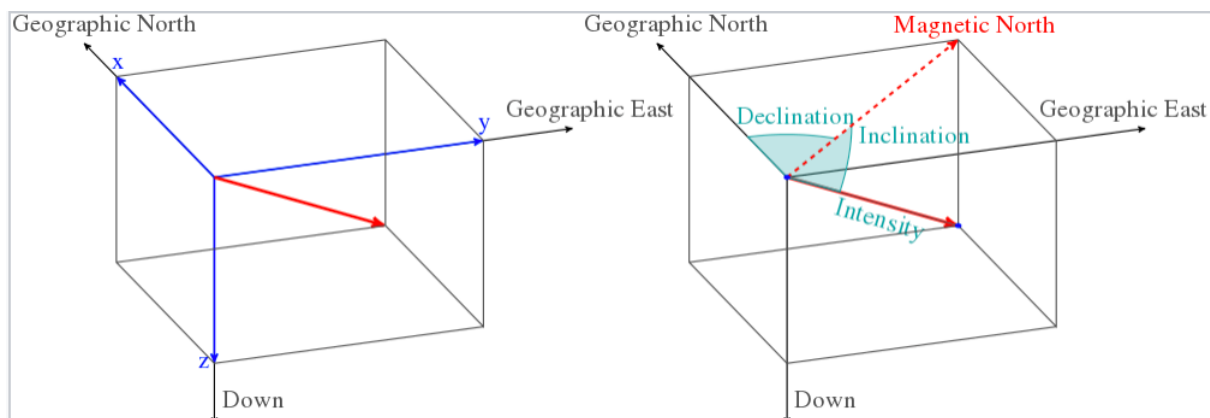
Magnetické pole Země, známé také jako geomagnetické pole, je magnetické pole, které působí z nitra Země do vesmíru, kde interaguje se slunečním větrem, proudem nabitých částic vycházejících ze Slunce. To způsobuje, že na sluneční straně je deformováno, a naopak na straně odvrácené od Slunce dosahuje desítky tisíc kilometrů daleko. [14, 15]



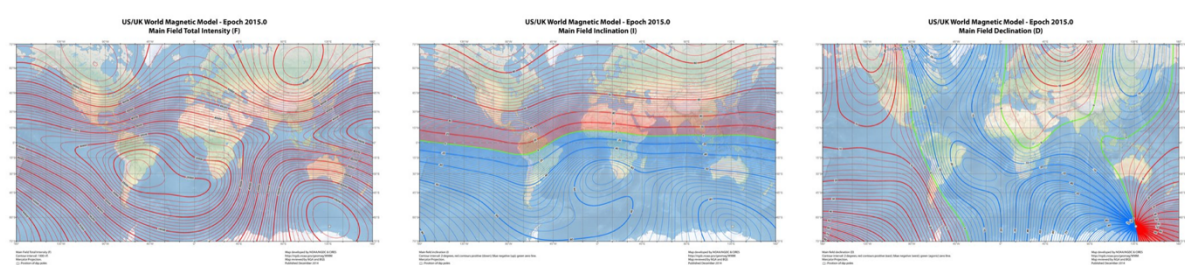
Obrázek 9 Deformace magnetického pole Země vlivem slunečního větru [13]

Magnetické pole je generováno elektrickými proudy v důsledku pohybu konvekčních proudů směsí roztaveného železa a niklu ve vnějším jádru Země. Tyto konvekční proudy jsou způsobeny teplem unikajícím z jádra, což je přirozený proces nazývaný geodynamo. [14, 15]

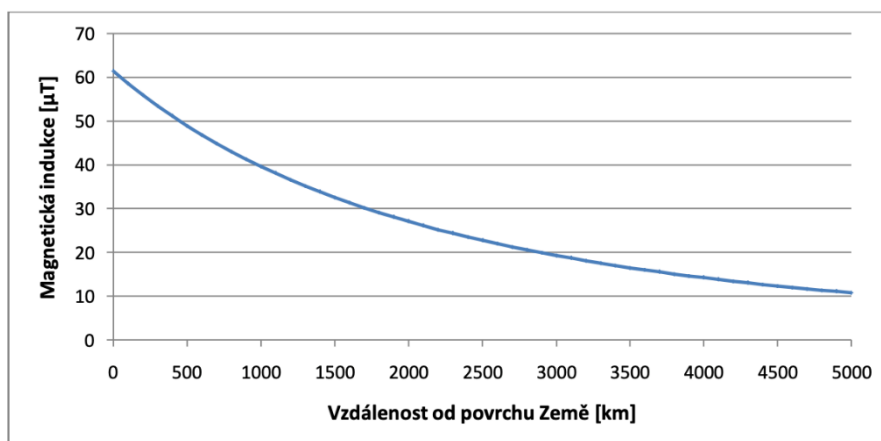
Magnetické pole Země lze v libovolném místě znázornit vektorem. Typickým postupem pro měření jeho směru je určení směru magnetického severu pomocí kompasu. Magnetický a geografický pól není totožný a vzniklá úhlová odchylka se nazývá deklinace. Směrem k magnetickému severu svírá pole s vodorovnou rovinou úhel, který se nazývá inklinace neboli magnetický spád. Intenzita magnetického pole je úměrná síle, kterou působí na magnet. [14, 15]



Obrázek 10 Magnetická deklinace a inklinace [16]



Obrázek 11 Intenzita, inklinace a deklinace magnetického pole Země [17]



Graf 1 Závislost magnetického pole cívky na vzdálenosti od povrchu Země

Vzorcem (3.1) se určuje intenzita magnetického pole v závislosti na výšce v blízkosti cívky a je založen na předpokladu ideálního vodiče a symetrie cívky

$$B_Z = \frac{2 \cdot M_Z}{R_Z^3}, \quad (3.1)$$

kde M_Z je magnetický moment cívky/Země a R_Z je výška od středu Země. [14]

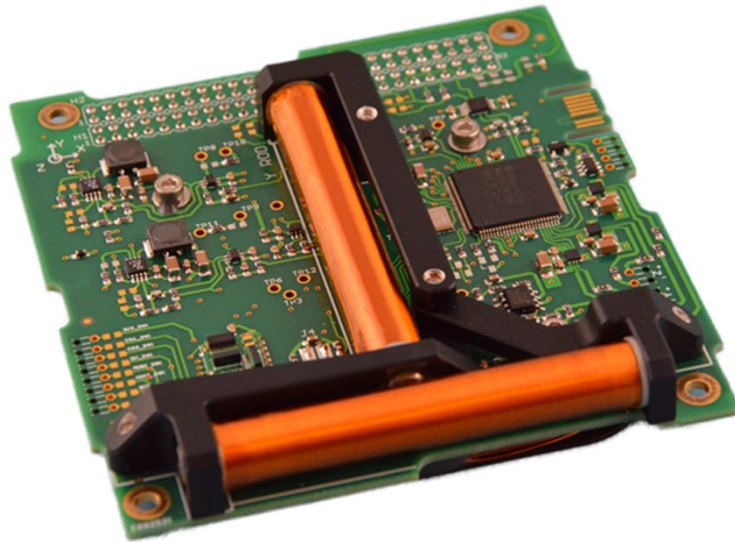
Graf 1 má především orientační charakter, jelikož popis intenzity magnetického pole se může lišit v závislosti na geografické poloze nebo jiných faktorech. Pro přesné modely se využívají magnetické modely jako je IGRF nebo WMG.

3.2. Komerční magnetické cívky

Existuje řada specializovaných obchodů, které nabízejí magnetické cívky pro ovládání orientace CubeSatů. Takové obchody jsou například satnow.com, isispace.nl nebo cubesat.market.

První magnetická cívka je od firmy NewSpace Systems. Jejich modelová řada NMTR-X je volitelná a zákazník si ji může navrhnout dle svých požadavků. Minimální délka této solenoidní cívky začíná na 12 cm a maximální délka je 80 cm, kdy při maximální délce dosahuje velikost magnetického momentu 400 Am^2 . [18]

Druhá cívka je od společnosti ISISPACE, konkrétně iMTQ Magnetorquer Board. Tato magnetická cívka nabízí tříosý stabilizační systém na bázi PCB. Její maximální rozměr je 9,59 cm, tedy lze využít i pro velikost 1U, ale výrobce udává, že lze použít až do velikosti 12U. Magnetický moment vytvořený jednou cívkou, tedy pro jednu osu, je $0,2 \text{ Am}^2$. [19]



Obrázek 12 Cívka iMTQ Magnetorquer Borad [19]

Třetí magnetická cívka Micro Magnetic Torque Rods od firmy StrassSpace nabízí tři konfigurace, které dokážou vytvořit moment 5 Am^2 , 10 Am^2 a 15 Am^2 . [20]

První magnetická cívka vzduchového typu NanoTorque Z-axis Internal je od společnosti GomSpace Group. Maximální napětí je 3,4 V a maximální moment je $0,139 \text{ Am}^2$. [21]

Poslední cívka je MT01 Compact Magnetorquer, která je také vzduchového typu a je vyvinuta konkrétně pro 1U CubeSat. Maximální magnetický moment je $0,39 \text{ Am}^2$. Dle údaje výrobce dokáže tato cívka otočit CubeSat o 90° za 60 sekund na oběžné dráze vysoké 500 km. [22]

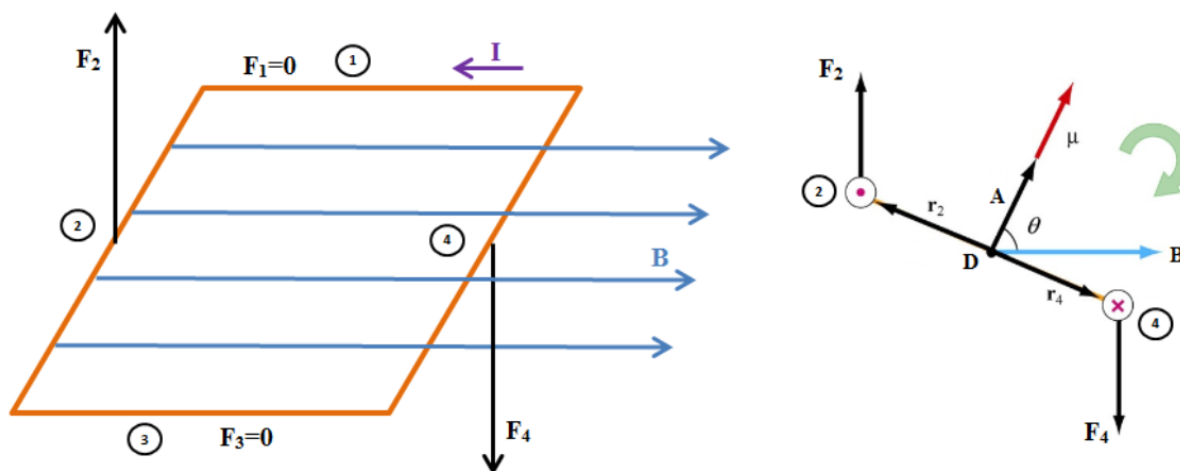
Tabulka 2 Srovnání komerčních cívek

Veličina	Jednotka	NanoTorque	MT01	NMRT-X	iMTQ	Micro
Napětí	V	3,3	5	5-28	5	5-28
MDM	Am^2	0,139	0,39	2 - 400	0,2	5-15
Výkon	W	-	0,2	1 W na 50 Am^2	1,75E-01	0,75-3,5

Při porovnání komerčních cívek bylo zjištěno, že dominují solenoidní cívky. Jelikož CubeSat je malé zařízení a solenoidní cívky jsou mnohem menší, než cívky vzduchové a také produkují kvůli magnetickému jádru větší magnetický moment.

3.3. Fyzikální princip magnetické cívky

Pro orientaci CubeSatu pomocí magnetických momentů se nejčastěji využívá pro ovládání orientace v ose z vzduchová cívka a pro ovládání orientace v ose x a y cívka solenoidní.



Obrázek 13 Smyčka umístěná v homogenním magnetickém poli a magnetická síla působící na stranu 2 a 4; rotace proudové smyčky [10]

Velikost moment síly působící na magnetickou cívku lze určit pomocí vztahu

$$F = B \cdot M \cdot \sin\theta, \quad (3.2)$$

kde B je indukce obdélníkové cívky, M je velikost magnetického dipólového momentu a θ je úhel, který svírá vektor A s indukcí B . [10]

Velikost indukce vzduchové cívky lze vypočítat

$$B = \frac{N \cdot I \cdot \mu_0}{d}, \quad (3.3)$$

kde N je počet závitů, I je proud protékající cívkou, μ_0 je permeabilita vakua a d je délka namotané cívky. [10]

Velikost magnetického dipólového momentu se určí pomocí vztahu

$$M = N \cdot I \cdot A, \quad (3.4)$$

kde N je počet závitů, I je proud protékající cívkou a A je plocha magnetické cívky. [10]

Na obrázku 6. lze vidět, že strany 1 a 3 jsou rovnoběžné s magnetickým polem B a nepůsobí na ně žádná síla, jejich skalární součin je tedy nulový. Magnetická síla, která působí na strany 2 a 4 je dána vztahem (3.2.).

Celková síla působící na smyčku

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 + \mathbf{F}_4 = 0, \quad (3.5)$$

je nulová. I když na smyčku nepůsobí žádná síla, tak přesto síly F_2 a F_4 vytvářejí moment kolem jedné osy. [15]

3.4. Návrh vzduchové cívky

Při porovnávání nabídky komerčních magnetických cívek bylo zjištěno, že nejčastěji jako zdroj napětí slouží samotný palubní počítač. Proto je pro návrh magnetické cívky v této

diplomové práci zvoleno napětí 5 V, které poskytuje palubní počítač Raspberry Pi. Pro cívku byl zvolen lakovaný měděný drát s průměrem drátu 0,3 mm v délce 100 m. [23]

Aktivně používaná plocha cívky je

$$A = a^2, \quad (3.6)$$

kde a je strana čtvercové cívky. Po dosazení získáme plochu cívky

$$A = 0,08^2 = 0,0064 \text{ m}^2.$$

Počet závitů lze určit pomocí

$$N = \frac{l}{2 \cdot a + 2 \cdot a'}, \quad (3.7)$$

kde l je délka drátu a a je délka jedné strany cívky. Výsledný počet závitů je

$$N = 312.$$

Odpor cívky lze zjistit přes vzorec

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (3.8)$$

kde ρ je rezistivita mědi, l je délka drátu a S průřez drátu. Navrhnutá cívka má výsledný odpor

$$R = \frac{0,0169 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{\pi \cdot 0,00015^2} = 23,78 \Omega.$$

Proud, který bude procházet cívkou lze určit pomocí

$$I = \frac{U}{R}, \quad (3.9)$$

kde U je napětí a R odpor cívky z rovnice (3.8). Proud procházející cívkou bude

$$I = \frac{5}{23,78} = 0,21 \text{ A.}$$

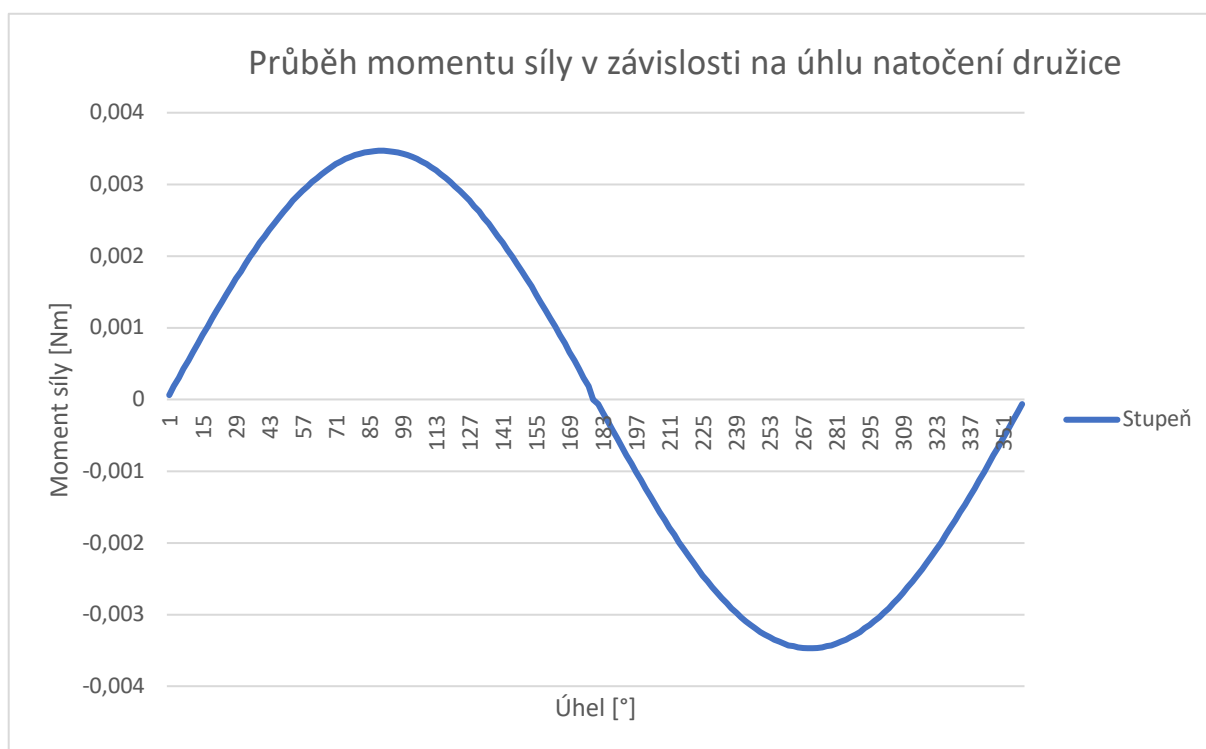
Ze vzorce (3.4) lze poté určit magnetický dipólový moment

$$M = 312 \cdot 0,21 \cdot 0,0064 = 0,42 \text{ Am}^2.$$

Magnetická indukce se určí ze vztahu (3.3)

$$B = \frac{312 \cdot 0,21 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{0,1} = 0,0082 \text{ T.}$$

Velikost moment síly působící na cívku se určí podle vztahu (3.2), výsledný průběh momentu je znázorněn v Grafu 2.



Graf 2 Výsledný moment čtvercové cívky v závislosti natočení k severnímu magnetickému pólu

Z Grafu 2 je vidět, že pro úhel natočení od 181° do 360° bude mít výsledný moment opačný směr než při natočení od 0° do 180° . Největší moment poté nastane při natočení 90°

a 270° , jelikož v této poloze je magnetické pole navrhnuté cívky kolmé na magnetické pole Země.

Práci, kterou vykoná magnetická cívka lze určit ze vztahu

$$P = \frac{1}{2} \cdot B^2 \cdot V \quad (3.10)$$

kde B je intenzita magnetického pole cívky, V je objem cívky.

Objem navinuté cívky se vypočítá pomocí

$$V = 4 \cdot a \cdot b \cdot d, \quad (3.11)$$

kde a je délka strany cívky, b je šířka strany cívky a d je výška vinutí. Po dosazení do vzorce (3.9.) získáme výkon

$$P = \frac{1}{2} \cdot (0,0082)^2 \cdot 0,00032 \cdot 312 = 33,57 \mu W.$$

Pro určení energetické spotřeby družice je třeba znát úhlovou rychlost otáčení družice.

Ta lze určit ze vztahu

$$\Omega_o = \frac{M \cdot B_z}{M_s}, \quad (3.12)$$

kde M je moment síly cívky, B_z je intenzita magnetického pole Země a M_s je moment setrvačnosti družice.

Moment setrvačnosti družice se zjistí pomocí zjednodušeného vzorce

$$M_s = \frac{1}{6} \cdot m \cdot a^2, \quad (3.13)$$

kde m je hmotnost družice a a je délka strany družice. Po dosazení hodnot je moment setrvačnosti.

$$M_s = \frac{1}{6} \cdot 0,5 \cdot 0,1^2 = 0,0025 \text{ kg m}^2.$$

Nyní lze určit úhlovou rychlost otáčení ze vzorce (3.12)

$$\Omega_o = \frac{0,042 \cdot 45 \cdot 10^{-6}}{0,0025} = 0,011 \text{ rad s}^{-1}.$$

Výsledný úhlový posun bude

$$\Omega_o = \frac{180}{\pi} \cdot 0,011 = 0,63 \text{ }^\circ\text{s}^{-1}.$$

Energetická spotřeba natočení CubeSatu se určí vztahem

$$S = P \cdot t, \tag{3.14}$$

kde P je výkon momentové cívky a t je čas otáčení. Výsledná hodnota je v joulech. [13, 24]

3.5. Návrh solenoidní cívky

Solenoidní cívka je cívka s magnetickým jádrem válcovitého tvaru, kolem kterého je namotané vinutí. Aby bylo možné porovnat obě navrhnuté cívky, zachovávají se parametry z kapitoly 3.2. jako je napětí 5 V a velikost momentu 0,42 Am^2 . Jádro cívky má průměr 13 mm a délku 70 mm.

Celková velikost momentu cívky lze vyjádřit jako dipólový moment vinutí a jádra

$$M = M_v + M_j = N \cdot I \cdot S + V_j \cdot m = N \cdot I \cdot \pi \cdot G, \tag{3.15}$$

kde N je počet závitů, I je procházející proud vinutím, S je obsah vnitřní plochy solenoidu, V_j je objem jádra, m je magnetizace jádra a G je geometrická část magnetického dipólového momentu.

Nejprve je potřeba určit demagnetizační faktor

$$N_d = \frac{4 \cdot [\ln(\frac{l_c}{r_j}) - 1]}{(\frac{l_c}{r_j})^2 - 4 \cdot \ln \frac{l_c}{r_j}}, \quad (3.16)$$

kde l_c je délka cívky a r_j je poloměr jádra. Po dosazení hodnot vychází demagnetizační faktor $N_d = 0,052$.

Geometrická část magnetického dipólového momentu zahrnuje rozměry jádra a vinutí cívky

$$G = r_c^2 + \frac{r_j^2 \cdot (\mu_r - 1)}{1 - N_d + N_d \cdot \mu_r}, \quad (3.17)$$

kde r_c je vnitřní poloměr cívky a μ_r je permeabilita jádra (300). Poloměr cívky má na celou hodnotu G zanedbatelný vliv a při výpočtu není uvažován. Po dosazení získáme hodnotu $G = 7,6 \text{ cm}^2$.

Nyní lze dosadit do rovnice (3.18) a z požadované velikosti momentu cívky lze určit potřebný počet závitů

$$0,42 = N \cdot 0,2 \cdot \pi \cdot 7,6 \cdot 10^{-4} \rightarrow N = \frac{0,42}{0,2 \cdot \pi \cdot 7,6 \cdot 10^{-4}}$$

výsledný počet závitů je 879.

Výška vinutí se určí

$$h = \frac{d \cdot N}{l_c} = 3,77 \text{ mm}. \quad (3.18)$$

Průměrný obvod vinutí lze zjistit vztahem

$$o = \pi \cdot (d + h) = 52,68 \text{ mm.} \quad (3.19)$$

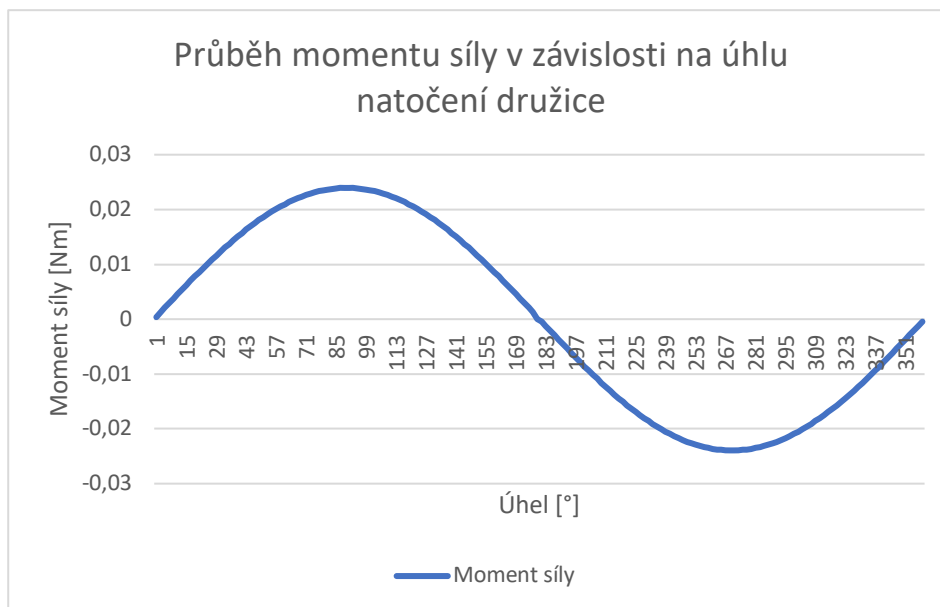
Jelikož je znám obvod cívky, tak celkovou délkou drátu lze určit pomocí

$$l = o \cdot N = 46 \text{ m.} \quad (3.20)$$

Magnetická indukce solenoidu se vypočítá pomocí vzorce

$$B = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot N \cdot I}{l_c \cdot (1 - N_d + N_d \cdot \mu_r)} \quad (3.21)$$

$$B = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 300 \cdot 879 \cdot 0,2}{70 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,052 + 0,052 \cdot 300)} = 0,057 \text{ T.} \quad [25,26]$$



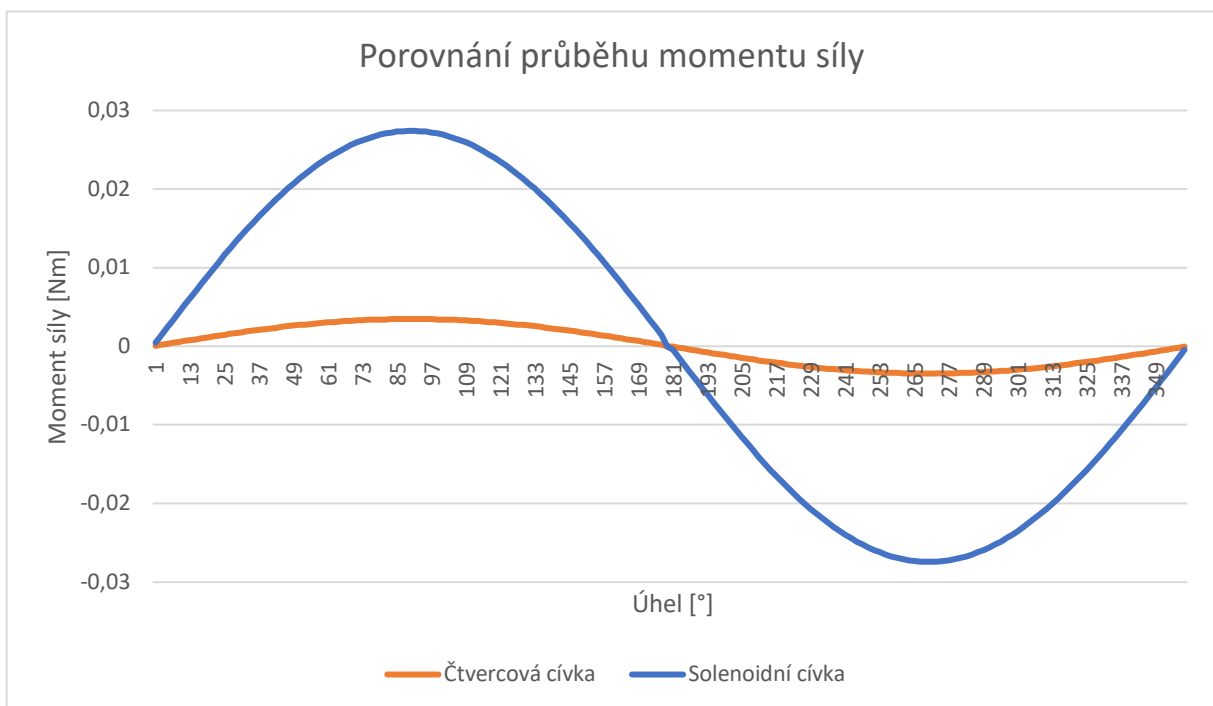
Graf 3 Výsledný moment solenoidní cívky v závislosti na natočené družice

Následující výpočty jsou totožné s kapitolou (3.2.) a jsou shrnuty v tabulce 3.

Tabulka 3 Srovnání obdélníkové a solenoidní cívky

Veličina	Jednotka	Vzduchová cívka	Solenoidní cívka
Napětí	V	5	5
Proud	A	0,2	0,2
Počet závitů	-	312	879
Odpor	Ohm	23,78	24
Magnetický dipólový moment	Am ²	0,42	0,42
Magnetická indukce	T	0,0082	0,057
Výkon	W	0,00031	1,9E-04
Úhlová rychlost otáčení	rad/s	0,011	0,017
Úhlový posun	°/s	0,63	0,96

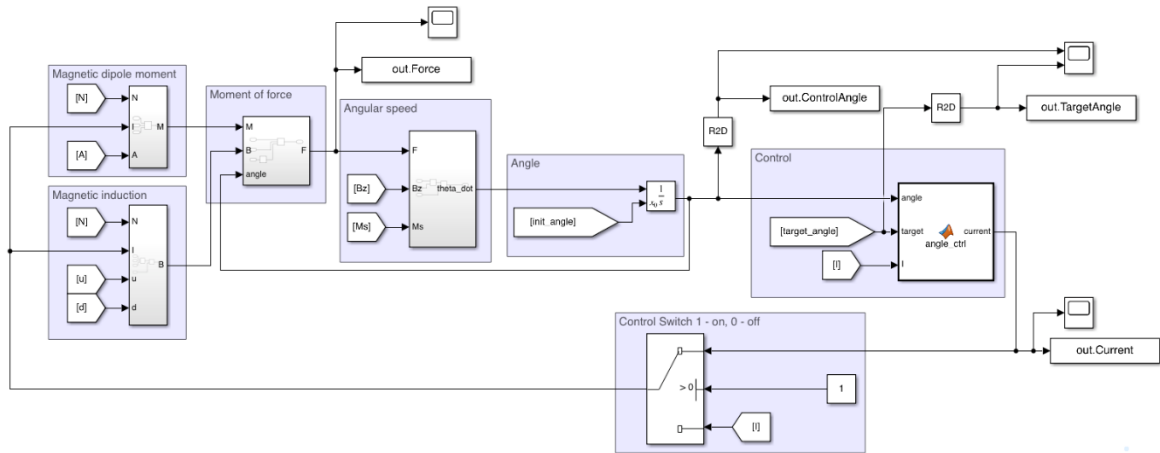
Ač mají obě cívky stejné základní parametry, tedy napětí a velikost výsledného magnetického momentu, tak v tabulce 3 si lze všimnout rozdílných výsledků. Při porovnání grafu 2 a 3 (graf 4) si lze všimnout, že solenoidní cívka má o řád vyšší výsledný moment síly. Na to má přímý vliv rozdíl ve velikosti magnetické indukce obou cívek, která je kvůli magnetickému jádru o řád vyšší u solenoidní cívky. Dle očekávání mají obě navržené cívky malý výkon. Je to především z důvodu, že magnetické pole Země je slabé a pokud by bylo potřeba zvětšit výkon, bylo by třeba vytvořit silnější magnetické pole.



Graf 4 Porovnání průběhu momentu síly čtvercové a solenoidní cívky

3.6. Simulace navrhnuté solenoidní cívky

Pro kontrolu teoretických výpočtů byla provedena simulace solenoidní cívky v programech Matlab a Simulink.



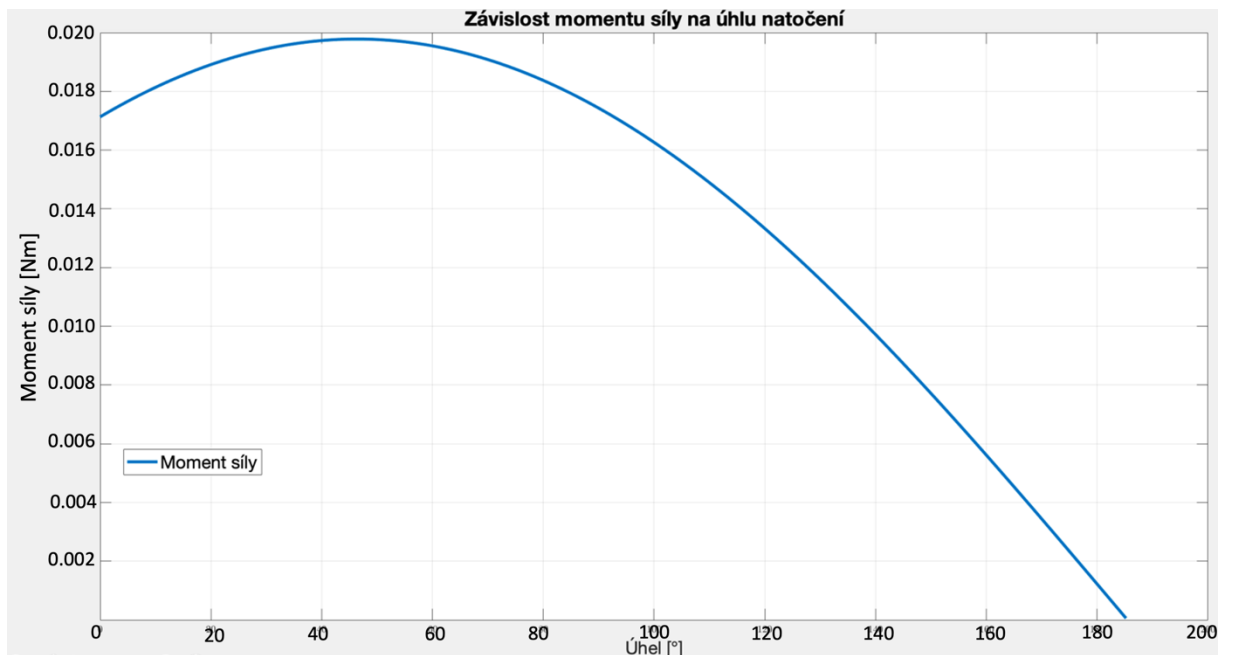
Obrázek 14 Model natáčení CubeSatu v prostředí Simulink

Simulace ovládání CubeSatu je rozdělena do 6 bloků, viz. obrázek 8. V prvním bloku je stanoven výpočet magnetické indukce cívky z rovnice (3.3.) a magnetický dipólový moment z rovnice (3.4.). V druhém bloku je určen průběh momentu síly z rovnice (3.2.). Následně je určena úhlová rychlost družice, která je poté integrována, aby byl získán úhel otočení.

Pátý blok je řídicí blok, který určuje proud procházející cívkou. Tento blok kontroluje, zda je úhel natočení v požadované poloze. Je také nastavená prahová hodnota natočení, aby bylo zabráněno neustálému zapínání a vypínání řídicího systému, když je úhel velmi blízko cílovému úhlu. Tím se zabrání nestabilitě systému a zbytečné spotřebě energie.

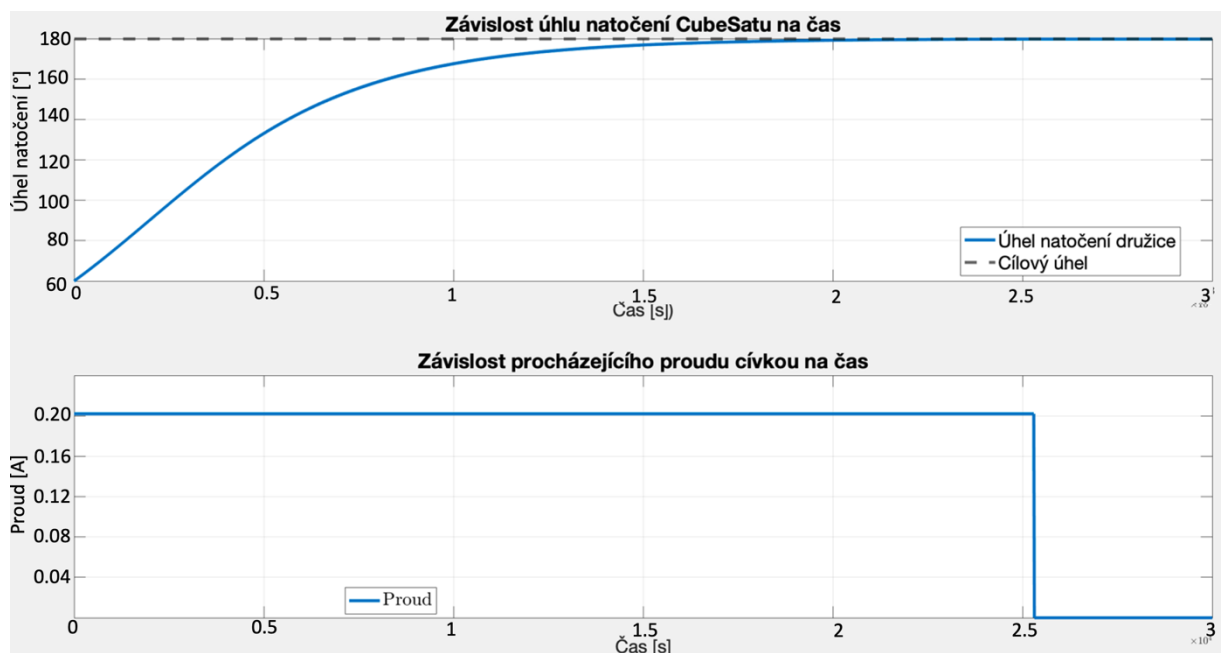
Posledním blokem je spínací blok, který umožňuje ovládat zapínání a vypínání řídicího systému. Celý systém pracuje ve zpětnovazební smyčce, kde úhel natočení je průběžně monitorován a upravován na základě rozdílu mezi aktuálním úhlem a cílovým úhlem.

Výsledky implementovaného řídicího systému pro simulaci byly vyhodnoceny nastavením cílového úhlu na 180° (programovaný střed magnetického pole Země) z počátečního úhlu 60° .



Graf 5 Závislost simulovaného průběhu momentu síly na úhlu

Graf 5 ukazuje výslednou závislost momentu síly na úhlu natočení CubeSatu. Výsledný moment v simulaci vychází největší při kolmém natočení na magnetické pole Země.



Graf 6 Závislost úhlu natočení a procházejícího proudu cívku na čase

V grafu 6 lze vidět, že při ustálení na požadovaném úhlu natočení se vypne proud procházející momentovou cívku a CubeSat zůstává na požadovaném úhlu, dokud ho okolní síla nevyvede z požadovaného úhlu.

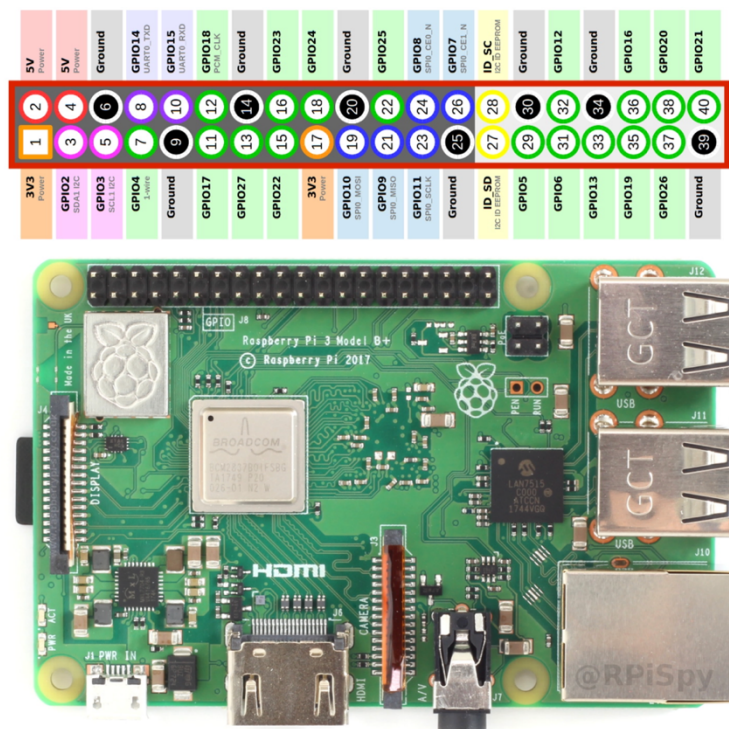
4. Konstrukce CubeSatu a experimentálního zařízení

Laboratorní CubeSat, který bude sloužit jako demonstrátor je hmotnostní a momentový ekvivalent ke skutečnému CubeSatu. Je vybaven vzduchovou a solenoidní cívku s potřebnou elektronikou pro provedení experimentu.

4.1. Elektronika

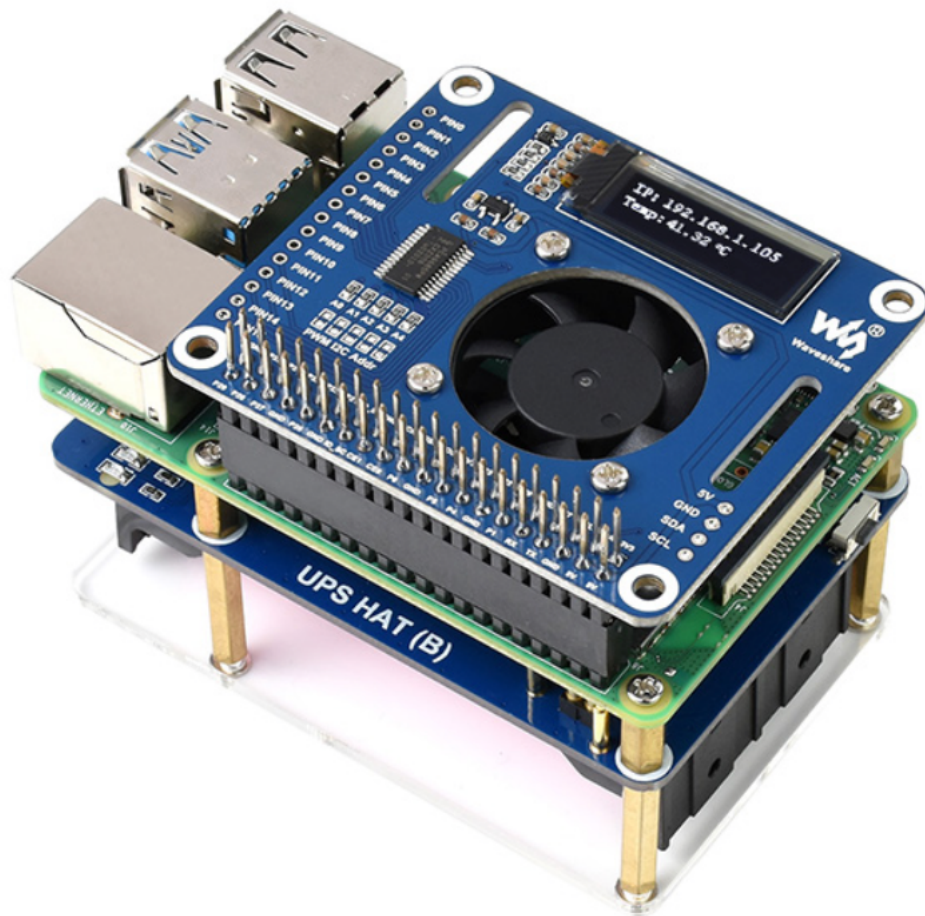
4.1.1. Palubní počítač

Jako palubní počítač je zvoleno Raspberry Pi 3 model B+. Raspberry Pi je jednodeskový počítač s deskou plošných spojů o velikosti platební karty, čímž se skvěle hodí pro využití v simulátoru CubeSatu. Tento model má integrovaný Wi-Fi a Bluetooth modul a je možné se k němu připojit dálkově. Raspberry Pi je možné použít k ovládání různých zařízení pomocí GPIO kontaktů, které obsahují také konektory pro sériovou sběrnici I2C. [27]



Obrázek 15 Raspberry Pi 3 model B+ se znázorněnými piny GPIO [27]

Raspberry Pi je napájeno napětím 5 V a proudem 3 A. Zvolený zdroj napětí UPS HAT lze využít jako primární nebo sekundární zdroj napájení. Do modulu lze vložit dvě Li-ionové baterie, které lze dobít z 230 V sítě nebo v případě využití v kosmu ze solárních panelů. Obsahuje také 5 V výstup pro napájení další elektroniky, ale bude využit pouze jako zdroj napětí pro Raspberry Pi. Prostřednictvím I2C lze monitorovat napětí, proud, výkon a zbývající kapacitu baterie. Další výhodou tohoto modulu je připojení ze spodní strany k Raspberry Pi, tedy všechny GPIO piny zůstávají volné pro využití potřebné elektroniky. [28]



Obrázek 16 Raspberry Pi model 3B+ společně se zdrojem napětí UPS HAT a chlazením PWM Fan Hat [29]

Jelikož Raspberry Pi je počítač, který bude vykonávat práci, je třeba zajistit jeho chlazení. K tomu je zvoleno pasivní hliníkové chlazení.

4.1.2. Senzory

Waveshare 10 DOF IMU

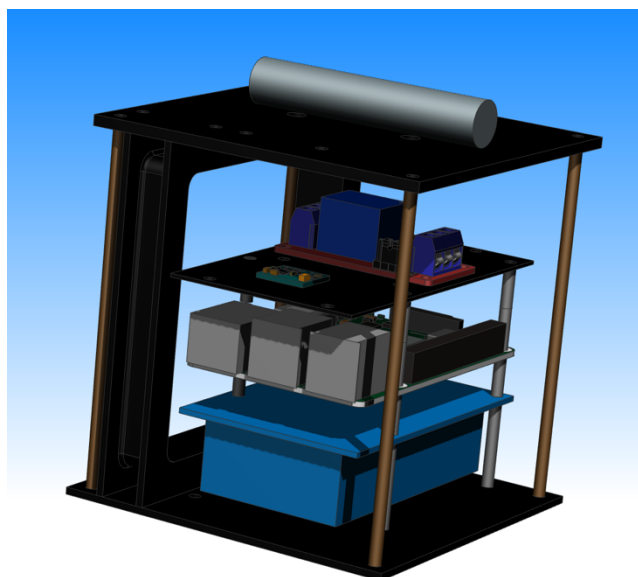
Tento senzor dokáže zastávat tři různé funkce, a to akcelerometr, gyroskop a magnetometr. Měří údaje ve třech osách a komunikuje s palubním počítačem přes I2C nebo SPI. Napájen je z Raspberry Pi pomocí 3,3 nebo 5 V. Senzor je zvolen, jelikož společnost Waveshare vyrábí komponenty přímo pro Raspberry Pi. Senzor bude využit především jako elektronický kompas, ale také pro zjišťování rychlosti otáčení CubeSatu.[30]

Relé

Pro on/off ovládání CubeSatu je použito jedno kanálové relé na 5 V, které má rychlou odezvu na signály z Raspberry Pi. [31]

4.2. CubeSat

Při návrhu samotného CubeSatu je dbáno především na funkčnost celého systému, ale také na nízké výrobní náklady a náročnost. Model CubeSatu je navržen v konstrukčním softwaru NX Siemens.



Obrázek 17 Model CubeSatu

CubeSat má tvar krychle o rozměrech 10 x 10 x 10 cm. Využity byly pouze dvě stěny ze šesti, aby byl zajištěn snadný přístup k veškeré elektronice a zároveň lehčí rozebíratelnost při úpravách elektroniky. Dolní stěna slouží jako podstava pro veškerou elektroniku a horní

stěna se využívá k uchycení k solenoidní cívky. Obě stěny mají tloušťku 3 mm a jsou vyrobeny pomocí 3D tisku z materiálu PLA tiskárnou REBEL II. Horní a dolní stěna jsou spojeny pomocí distančních sloupků.

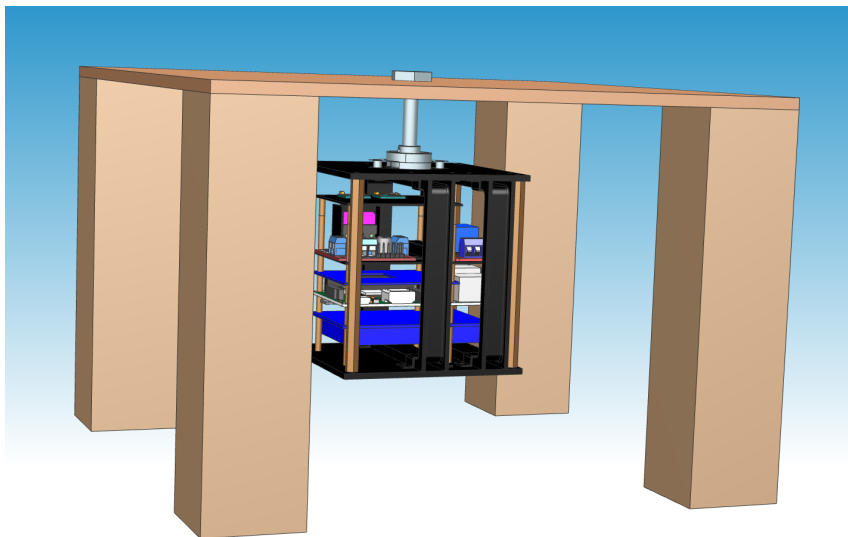
Na modelu CubeSatu jsou zobrazeny dvě momentové cívky, jedna uložená vně CubeSatu a jedná se o cívku vzduchovou. Druhá cívka je uložena na horní stěně a jedná se o cívku solenoidní.

Jednotlivé elektronické moduly jsou odděleny distančními sloupky. První modul od zdola CubeSatu je uložen modul UPS HAT, který obsahuje baterie pro Raspberry Pi. Následuje samotné Raspberry Pi, nad kterým je uloženo relé a senzor.

4.3. Experimentální zařízení

Také v případě návrhu simulátoru záleží na spolehlivosti systému, ale také na nízkých výrobních nákladech. Simulátory popsány níže byly experimentálně testovány.

4.3.1. Ložisko



Obrázek 18 Simulátor s CubeSatem

Na obrázku 18 je naznačeno, jak může vypadat simulátor s využitím ložiska. Pro správnou funkčnost ložiska je třeba zajistit, aby byla velikost rozběhového momentu ložiska maximálně stejně veliká jako je velikost momentu síly vytvořené CubeSatem, ale ideálně menší.

Rozběhový moment lze určit pomocí vztahu

$$M_{start} = M_{sl} + M_{seal}, \quad (4.1)$$

kde M_{sl} je moment smykového tření ložiska a M_{seal} je třecí moment těsnění.

Případně lze spočítat rozběhový moment jako

$$M_{start} = M_s \cdot a, \quad (4.2)$$

kde M_s moment setrvačnosti družice a a je zrychlení družice.

Největší výrobce ložisek SKF neuvádí údaje M_{sl} a M_{seal} u nabízených ložisek, ani neuvádí potřebný rozběhový moment M_{start} . Rozběhový moment je ale možné zjistit pomocí interní kalkulačky společnost SKF, která ve výpočtech potřebné parametry zná. [32]

V kalkulačce společnosti SKF je třeba zadat velikost momentové síly. Menší velikost momentové síly z navrhnutých cívek má vzduchová cívka, kdy při úhlu natočení 90° dosahuje velikosti 0,0035 Nm. Do kalkulačky je nutné zadat moment v kN, tedy moment síly 0,0035 Nm se rovná 0,0000035 kN. Minimální moment, s kterým lze v kalkulačce počítat, je 0,001 kN.

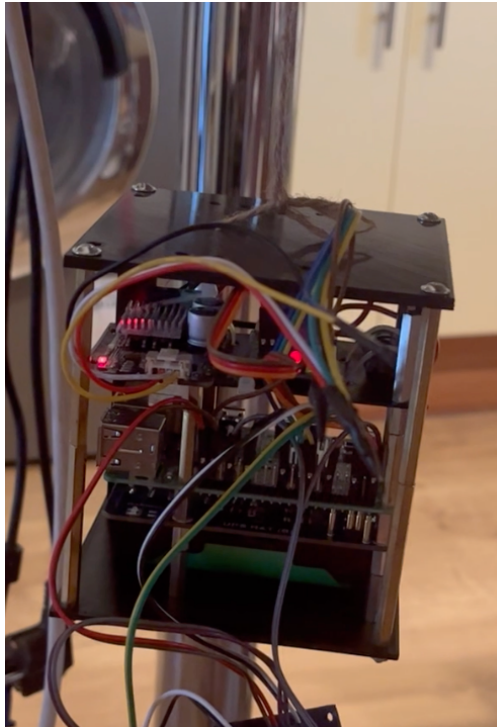
Vzhledem k tomu, že velikost momentové síly je mnohem menší než minimální velikost pro výpočet, bylo experimentální zařízení s ložiskem vyloučeno. Přesto bylo provedeno několik výpočtů u různých ložisek a předchozí rozhodnutí bylo potvrzeno nedostatečnou momentovou silou pro rozběh ložiska.

4.3.2. Lanko

Tento typ simulátoru je velice podobný simulátoru s ložiskem. Pouze se ložisko s uchycením ke CubeSatu vymění provázkem či lankem.

Při experimentu se CubeSat začal otáčet, ale jeho pohyb byl omezený, jelikož po malém namotání lanka se lanko začalo chovat jako zkrutná pružina, kdy se vracela do původního stavu.

Další nevýhodou bylo, že bylo třeba počkat několik minut, než dojde k úplnému ustálení CubeSatu, aby experiment mohl začít. Toto řešení bylo taktéž zamítnuto.



Obrázek 19 CubeSat zavěšený na lanku

4.3.3. Plování

Poslední variantou je zajištění plování CubeSatu na vodní hladině. Toto řešení je pro rotaci CubeSatu nejefektivnější, jelikož CubeSat roztáčí pouze svoji hmotnost a má minimální odpor prostředí. Případně jako kapalinu lze využít technický benzín, která má nižší viskozitu než voda.

Jelikož je CubeSat vyroben z materiálů, které mají větší hustotu než voda, je třeba zajistit plovák, který bude udržovat CubeSat nad hladinou. K tomuto účelu je zvolen polystyrénový plovák. Pro opracování polystyrenu byl využit odporový drát, ale kvůli ručnímu opracování není možné dosáhnout kruhového plováku.



Obrázek 20 Ručně opracované kruhové plováky

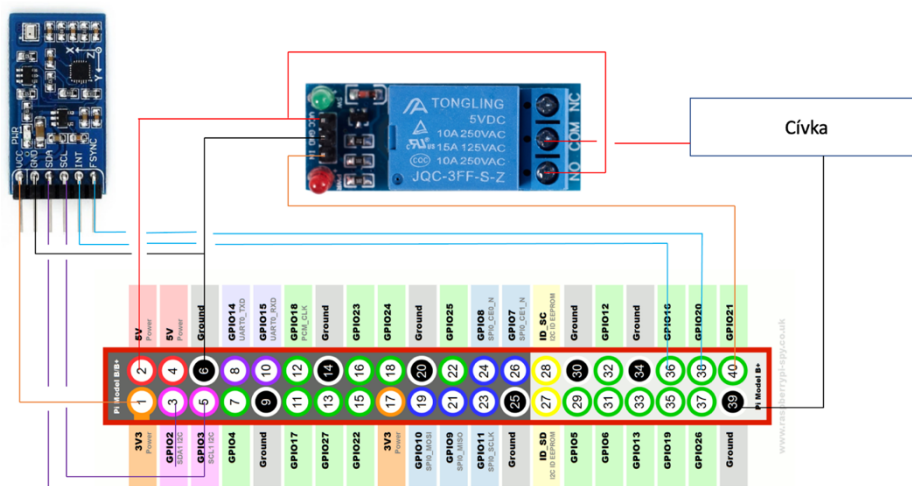
Proto byla zvolená podstava čtvercového typu o hraně 20 cm. Pokud by byla hrana 10 cm, tedy stejně veliká jako hrana CubeSatu, tak plovák nebude stabilní, jelikož CubeSat není symetrický vyvážený. Při hraně 15 cm byl ponor plováku veliký vzhledem ke své celkové tloušťce, což ovlivňuje vodní odpor při samotné rotaci. Experiment bude proveden také na polystyrenovém věnci, který má kruhový tvar o průměru 25 cm.

Obsah nádoby, který bude CubeSat dostatečně nadnášet byl hledán experimentálně. Při úspěšném otestování na 100 l sudu bylo hledáno řešení, se kterým bude mnohem lehčí manipulace. Po mnoho experimentech různých objemů byl jako dostačující možnost zvolena vanička o rozměrech 46 cm a 36 cm s hloubkou 5 cm.

4.4. Ovládací program

K ovládní CubeSatu je využito operačního systému Raspbian, který je primárním operačním systémem Raspberry Pi. Primárním programovacím jazykem Raspberry Pi je python, který je využit také v této diplomové práci.

CubeSat se ovládá pomocí on/off kontroly, které umožňuje relé. Relé je napájeno pomocí 5 V pinu z Raspberry Pi a ovládáno jedním pinem GPIO 21. Senzor Waveshare 10 DOF IMU je napájen z Raspberry Pi z 3,3 V pinu a piny SDA a SCL jsou připojeny na piny GPIO 2 a 3, které jsou sběrnice. Dále piny INT a FSYNC jsou zapojeny na GPIO 16 a 20. Celé schéma zapojení je na obrázku 21.



Obrázek 21 Schéma zapojení elektroniky do Raspberry Pi

Ovládací program je rozdělen na front end a back end část. Front end část zobrazuje aktuální úhel natočení CubeSatu vůči magnetickému středu Země a aktuální úhlovou rychlost v grafickém zobrazení. V back end části jsou všechny logické smyčky, které jsou třeba k provedení simulace.

4.5. Finanční zhodnocení

V celé diplomové práci je kladen důraz především na funkčnost systému, ale také na finanční stránku. Funkčnost systému je popsána v kapitole 5. při experimentu. V tabulce 4 jsou cenově rozepsány jednotlivé položky, které byly využity ve finální verzi. Celková cena 3 899,- Kč by byla pro nový CubeSat. V této diplomové práci byly pro některé položky využity domácí zdroje a výsledná cena je nižší.

Tabulka 4 Ceny jednotlivých položek

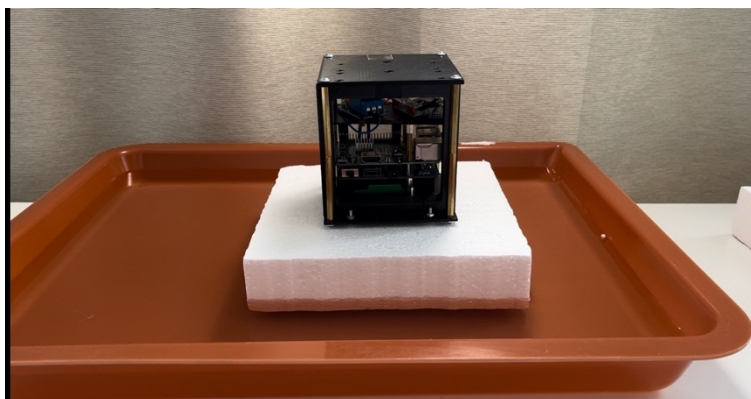
Díl	Cena [CZK]
Raspberry Pi	1199
Relé	32
Waveshare 10 DOF IMU	299
Zdroj pro Raspberry Pi	800
Měděný drát	369
3D tištěné díly	500
Drobný materiál	200
Doprava	400
Ostatní nezapočítané položky	100

5. Experiment

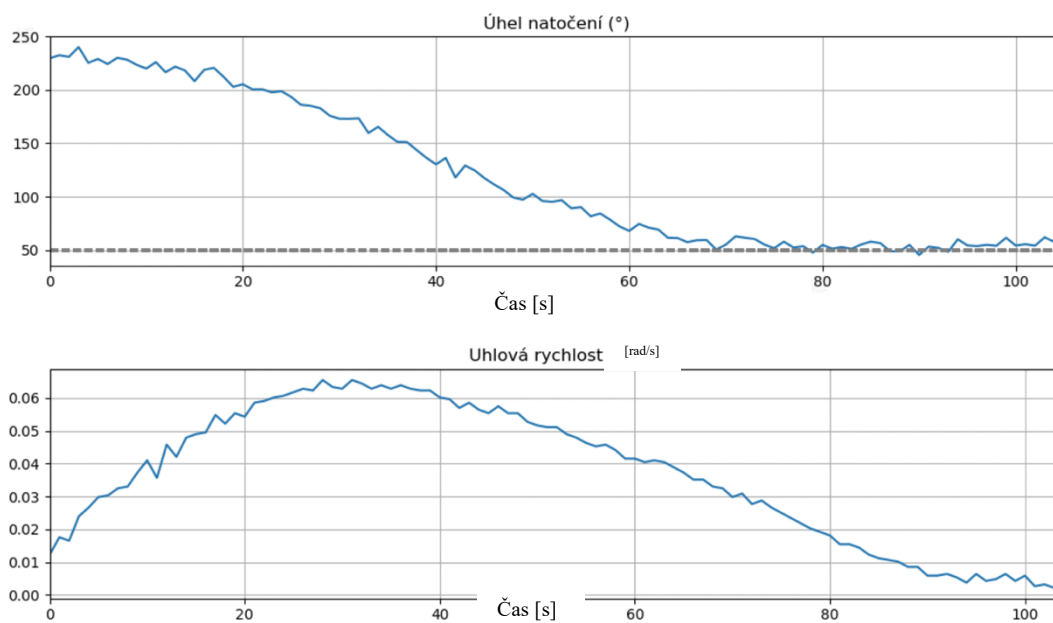
Při experimentu bylo provedeno několik testů, při kterých se demonstrovala schopnost navrhnuté cívky ovládat natočení CubeSatu do středu magnetického pole Země. Test byl proveden na simulátoru s vodní hladinou popsany v kapitole 4.3.4.

Před provedením jednotlivých testů bylo třeba zkalibrovat senzor tak, aby ukazoval správné natočení vůči magnetickému poli Země. Proto je při každém testu nastavený jiný cílový úhel, který odpovídá magnetickému středu Země. Výsledné správné natočení bylo také ověřeno pomocí mobilního kompasu.

Test 1 – vzduchová cívka se čtvercovým plovákem



Obrázek 22 Umístění CubeSatu na čtvercovém plováku

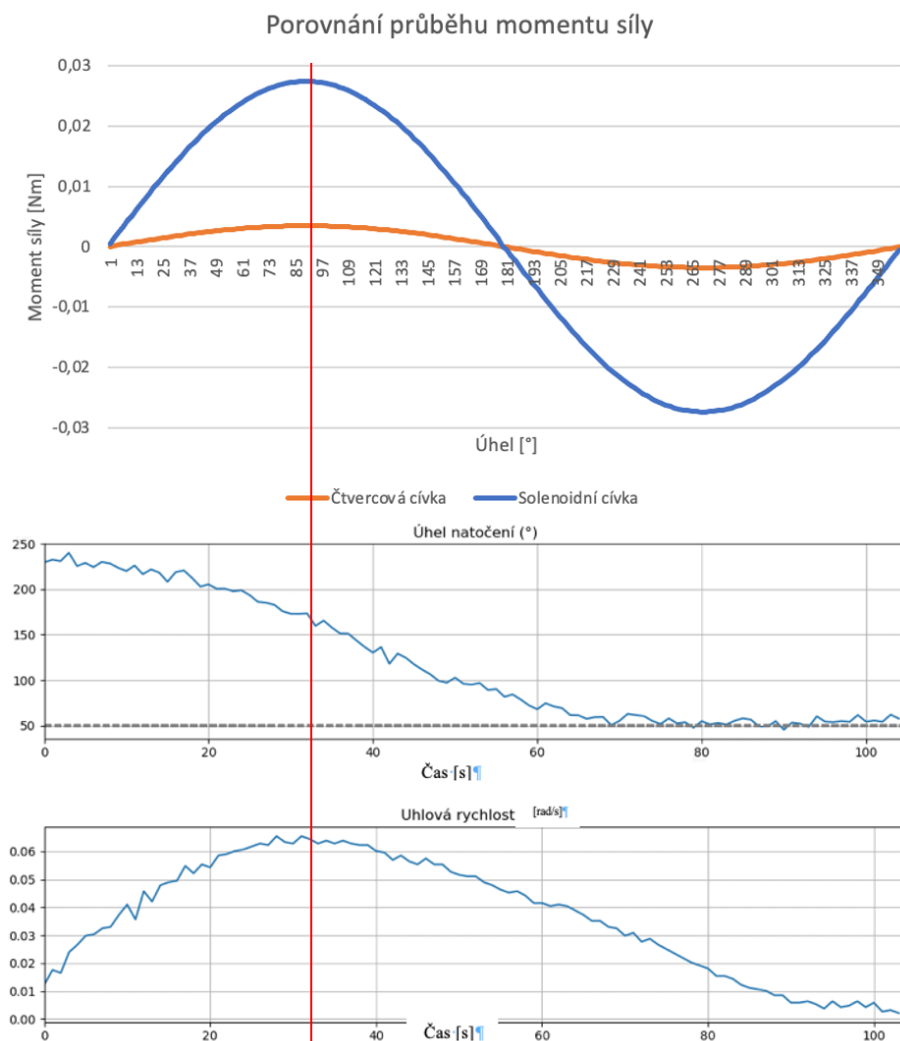


Graf 7 Test 1

První test byl proveden z natočení přibližně 180° vůči magnetickému středu Země. Z grafu 7 je vidět, že přibližně po 60 sekundách bylo dosaženo požadovaného natočení a CubeSat se ustálil.

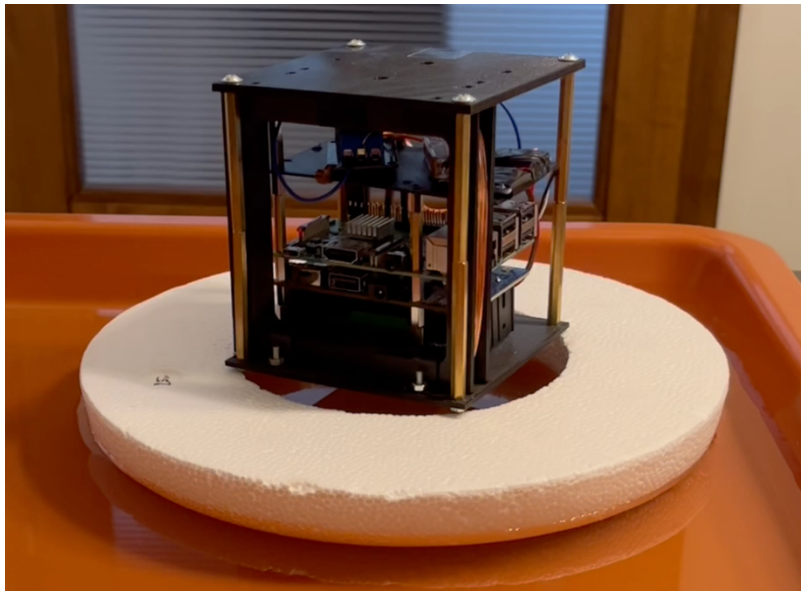
Z porovnání grafů z grafu 7 lze vidět, že po dosažení požadovaného natočení momentová cívka začala CubeSat brzdit, jelikož křivka se dlouho pohybuje na požadovaném úhlu, ale úhlová rychlost pomalu klesá. Nedošlo tedy k okamžitému zastavení, ale k postupnému brždění. V grafu s údaji o rychlosti otáčení se musí brát v úvahu, že CubeSat pluje na vodní hladině, přestože dosáhl požadovaného úhlu. Z toho důvodu rychlost otáčení nebude nikdy přesně nulová.

Nejvyšší rychlost otáčení byla dosažena přibližně při natočení 90° , tedy při kolmosti momentové cívky na magnetické pole Země. Na grafu 8 jsou srovnány teoretické výpočty s prvním experimentem. Z grafu lze pozorovat, že teoretický výpočet odpovídá experimentu.

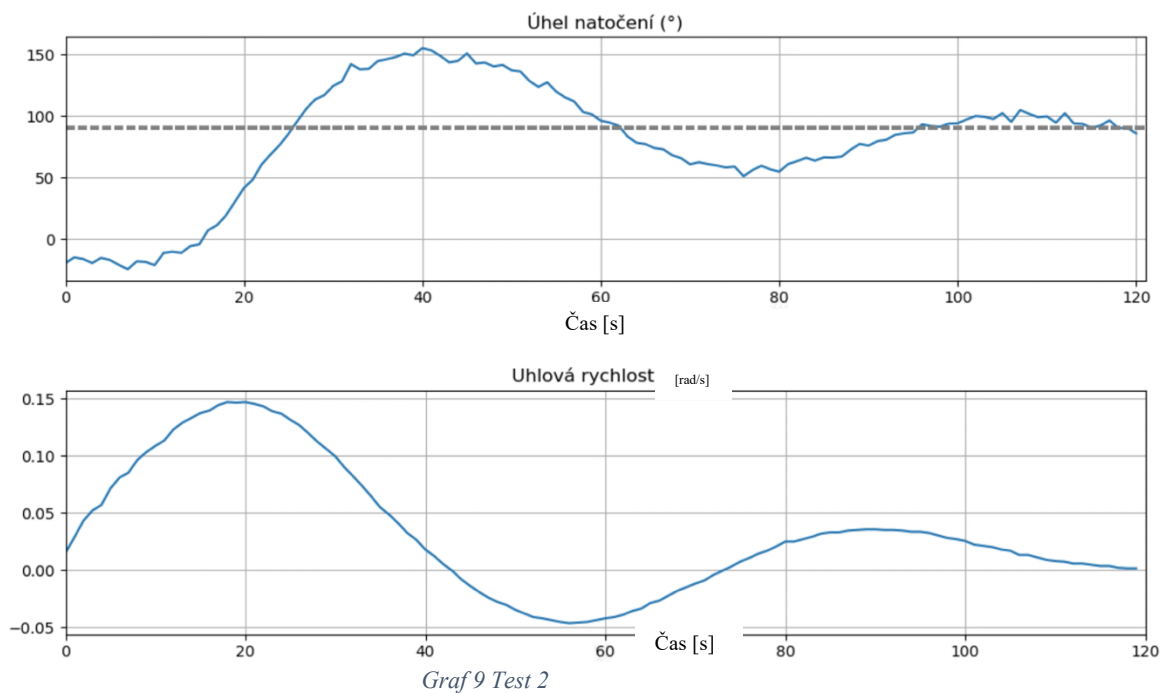


Graf 8 Srovnání teoretického výsledku a výsledků z testu 1

Test 2 – vzduchová cívka s kruhovým plovákem



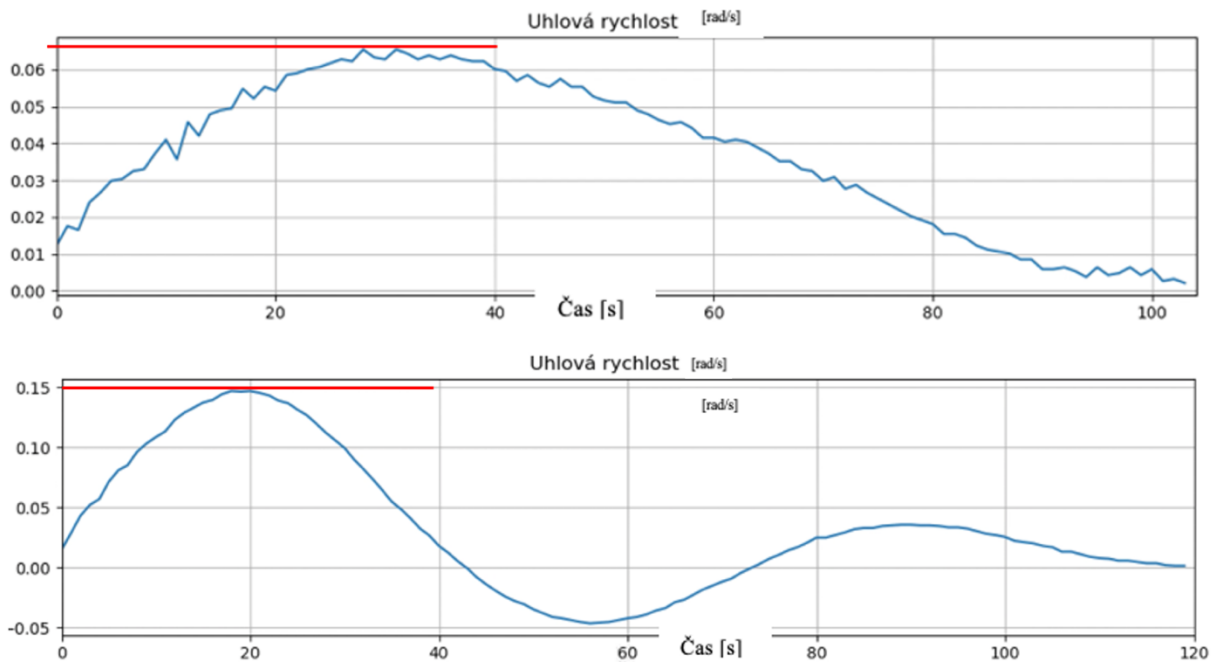
Obrázek 23 CubeSat na kruhovém plováku



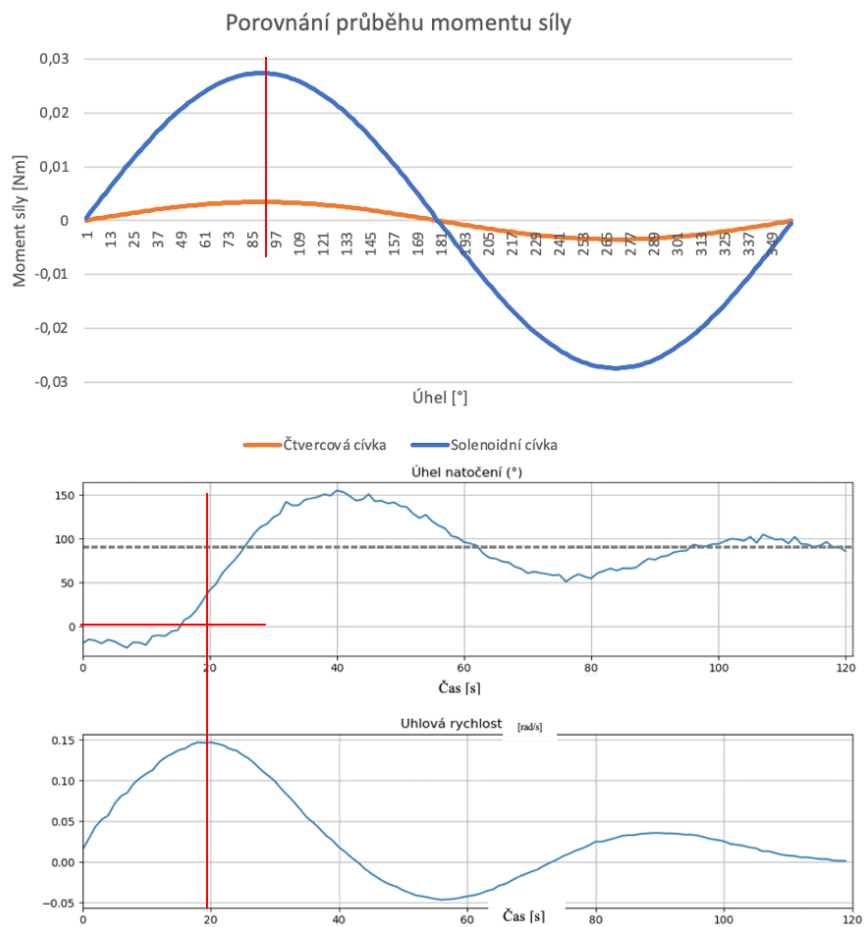
Zajímavé je pozorovat, že brždění a nabrání zpětného chodu probíhalo přibližně 40 vteřin, což je orientačně stejně dlouhá doba jako natočení z nulové rychlosti do magnetického středu Země.

Při testu s plovákem kruhového tvaru lze pozorovat, že plovák měl minimální odpor v porovnání se čtvercovým plovákem, jelikož úhlová rychlost dosahovala v největším bodě

zrychlení $6,3^\circ$ za sekundu. Z důvodu vyšší úhlové rychlosti měl CubeSat delší brzdovou dráhu než v testu 1 a došlo ke krátkodobému přetočení.



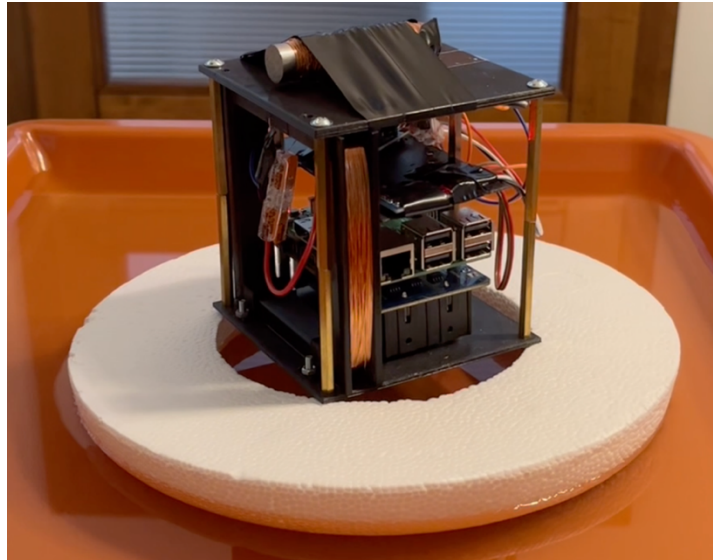
Graf 10 Srovnání úhlové rychlosti testu 1 a testu 2



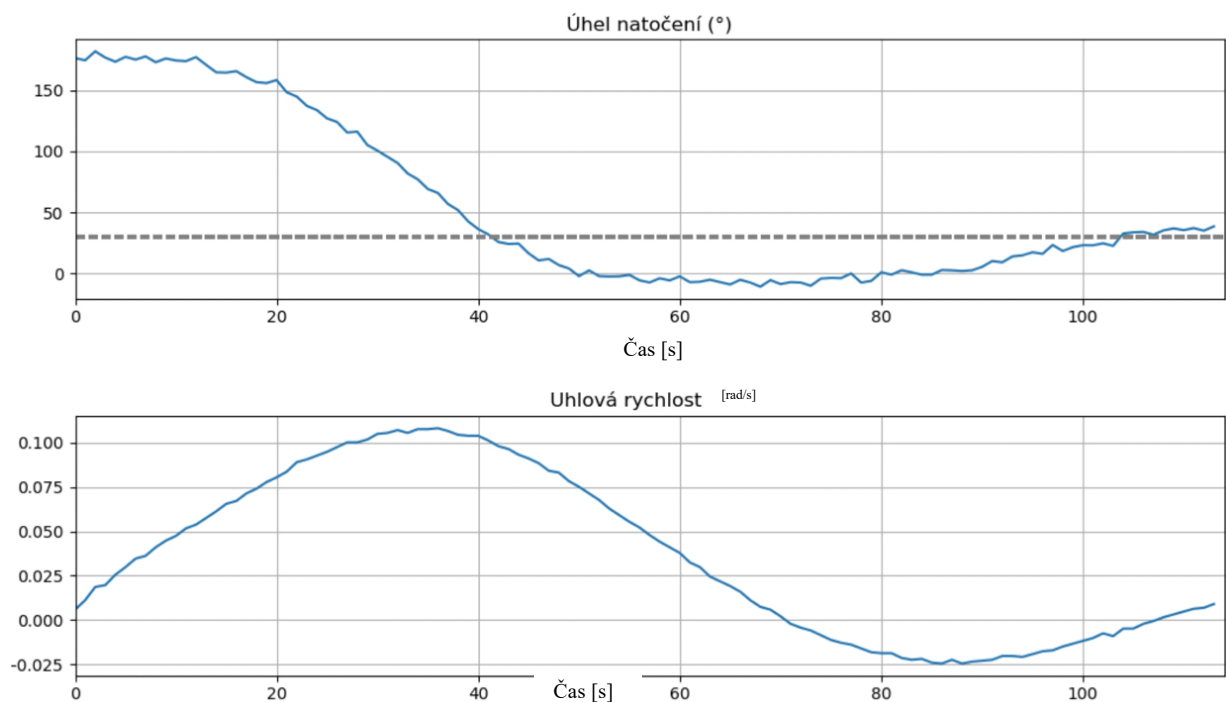
Graf 11 Srovnání teoretického výpočtu s testem 2

V grafu 11 je vidět, že maximální úhlová rychlost neodpovídá při kolmém natočení (protnuté červené čáry). Především z důvodu chybného měření senzoru, který má chybu $\pm 5^\circ$ na pevné podložce, a plování na hladině.

Test 3 – solenoidní cívka s kruhovým plovákem



Obrázek 24 Solenoidní cívka na kruhovém plováku



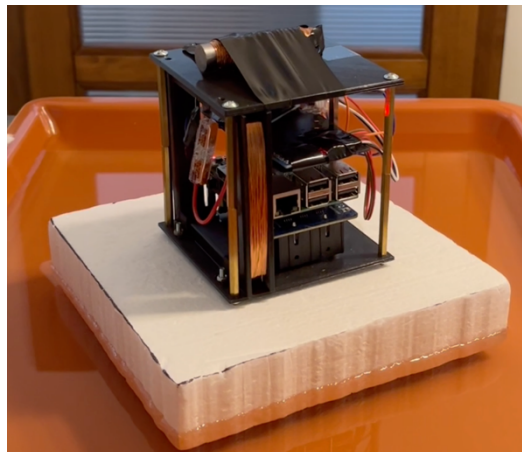
Graf 12 Test 3

Solenoidní cívka v teoretickém návrhu dosahovala mnohem lepšího výsledku než cívka vzduchová a ten lze také pozorovat při samotném experimentu. Maximální úhlová rychlost

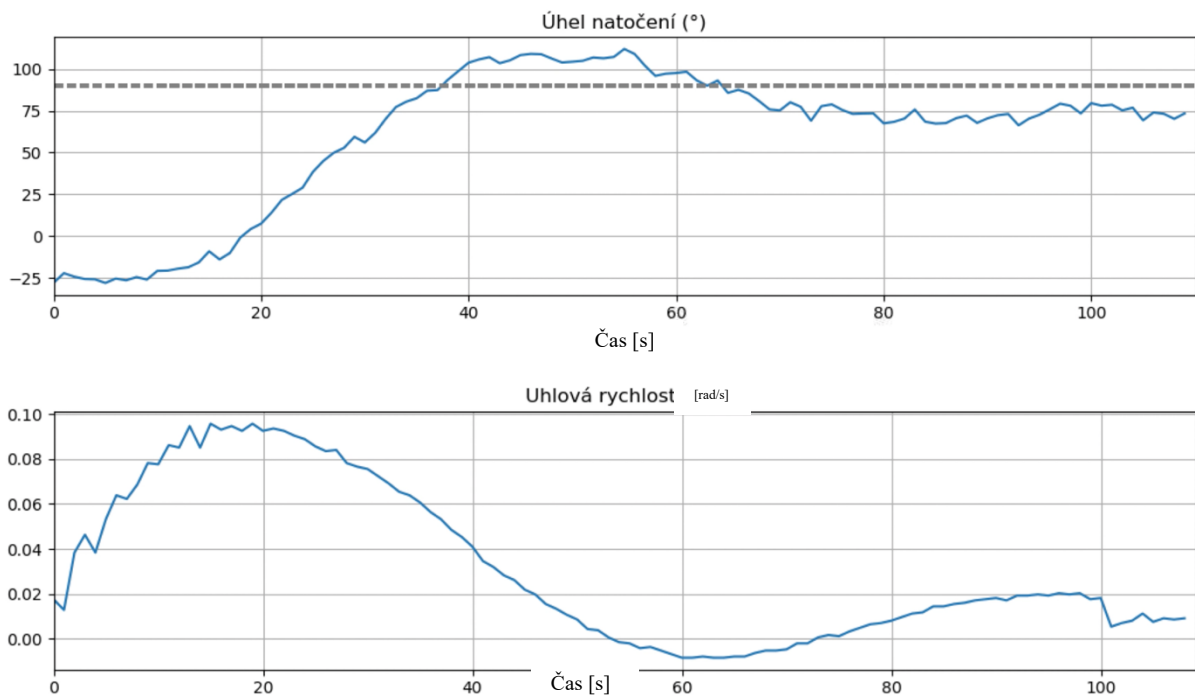
dosahovalo $8,6^\circ$ za sekundu. Celková doba pro dosažení požadovaného úhlu byla mnohem kratší, ale kvůli větším úhlovým rychlostem musel CubeSat vícekrát brzdit přetočení, než se ustálil v magnetickém středu Země.

Test 4 – solenoidní cívka se čtvercovým plovákem

V posledním testu lze opět pozorovat nižší úhlovou rychlost než v případě kruhového plováku. Chování CubeSat je podobné testu 3, ale ke konci testu lze pozorovat poruchu (náráz do stěny).



Obrázek 25 Solenoidní cívka na čtvercovém plováku



Graf 13 Test 4

Výsledky a diskuse

Tabulka 5 Srovnání důležitých faktorů navrhnutých cívek

Veličina	Jednotka	Vzduchová cívka	Solenoidní cívka
Úhlová rychlost otáčení	rad/s	0,011	0,017
Úhlový posun	°/s	0,63	0,96
Rychlost otáčení na 1 A proudu	°/s	3,15	4,87
Magnetická indukce	T	0,0082	0,057
Maximální moment síly	Nm	0,0034	0,24
Velikost momentu síly na 1 A	Nm	0,017	1,2

V tabulce 5 jsou uvedeny hlavní rozdílné faktory navrhnutých cívek, které nebyly totožné pro obě cívky. Z výsledků velikosti magnetické indukce lze pozorovat důležitost volby jádra, jelikož magnetická indukce je přibližně sedmkrát vyšší u solenoidní cívky než u cívky vzduchové. Přestože solenoidní cívka je menší a má také kratší vinutí, tak dosahuje lepších výsledných parametrů. Tento výsledek potvrzuje praxi a experiment.

Výsledné parametry navrhnutých cívek lze považovat za správné při srovnání s komerční nabídkou. Rozdíly jsou v rychlosti natočení, kdy se musí brát v úvahu rozdílnost intenzity magnetického pole Země. Výrobci udávají dobu natočení na nízké oběžné dráze, ale experiment byl proveden na zemském povrchu.

Simulace s návrhem solenoidní cívky se shoduje ve velikosti momentové síly, jelikož v teoretickém návrhu je uvažováno strojové navinutí a v simulaci je ruční vinutí. Pro ruční vinutí je třeba uvažovat faktor neuspořádaného vinutí, které má koeficient mezi 70 % až 80 %. O tento faktor je třeba ponížít teoretický návrh a tedy $0,24 \text{ Nm} \approx 0,2 \text{ Nm}$.

Při porovnání simulace s experimentem byl rozdíl při ustálení CubeSatu na požadovaném úhlu. Simulace byla nastavena s předpokladem, že bude docházet k postupnému brždění až do ustálení v magnetickém středu Země na první iteraci. Tento předpoklad při experimentu byl vyvrácen, jelikož výsledný moment setrvačnosti nebylo magnetické pole Země schopné v čas zpomalit a došlo ke krátkodobému vychýlení. Při experimentu ale byl přesto cíl diplomové práce splněn, pouze bylo použito více brzdících fází.

Předpoklad simulace ustálení CubeSatu na první iteraci odpovídá vzduchové cívce, která při experimentu dokázala dostatečně zpomalit na to, aby nemuselo být použito více brzdných fází.

V tabulce 6 jsou srovnány jednotlivé výsledky z experimentu. Nejvyšší rychlost otáčení má solenoidní cívka na kruhovém plováku. Zajímavé je, že vzduchová cívka na kruhovém plováku má vyšší maximální rychlost otáčení než solenoidní cívka na čtvercovém plováku, ale přesto je faktor doba do prvního protnutí magnetického středu Země vzhledem k počátečnímu úhlu menší.

Tabulka 6 Srovnání výsledků experimentu

	Jednotky	Vzduch-čtverec	Vzduch-kruh	Solenoid-kruh	Solenoid-čtverec
Maximální rychlost otáčení	[°/s]	3,6	6,3	8,6	5,7
Počáteční úhel	[°]	180	135	110	115
Doba do prvního protnutí úhlu	[s]	70	45	25	35
Doba do prvního protnutí vzhledem k počátečnímu úhlu	[-]	2,57	3	4,4	3,29
Počet brzdných fází	[-]	0	1	2	2
Celková doba k ustálení	[s]	100	110	120	-

Doba do prvního protnutí magnetického středu Země vzhledem k počátečnímu úhlu je porovnávací faktor autora diplomové práce. Pomocí tohoto faktoru lze zjistit schopnost cívky orientovat CubeSat bez vlivu počátečního úhlu, který má vliv na velikost momentové síly. Jedná se o podíl počátečního úhlu k době natočení do prvního protnutí magnetického středu Země. Čím je vyšší hodnota faktoru, tak tím rychleji lze CubeSat pomocí dané cívky orientovat.

Z provedených výsledků je patrné, že lepších výsledků dosahuje kruhový plovák a solenoidní cívka. Především z důvodů větší plochy čtvercového plováku a také většího faktor tření oproti kruhovému plováku. A také u čtvercového plováku mnoho experimentů skončilo poruchou (náraz do stěny), zatímco kruhový plovák měl poruchu zcela ojediněle. Čtvercový plovák během experimentu vykazoval mnohem menší samovolné plování po vodní hladině, což u kruhového plováku mělo místy vliv na měření úhlové rychlosti, ale velikost vlivu byla zanedbatelná.

ZÁVĚR

Podářilo se navrhnout vzduchovou cívku s maximální velikosti momentové síly 0,0035 Nm a solenoidní cívku s maximální velikosti momentové síly 0,024 Nm. Navrhnuté cívky prokázaly během experimentu schopnost orientovat CubeSat při experimentu a lze je použít pro vesmírné aplikace.

Simulace cívky byla správná, jediný rozdíl s experimentem je možné pozorovat v počtu zákmitů do doby ustálení v magnetickém středu Země pro solenoidní cívku.

Na vodní hladině je možné provést experiment orientace CubeSatu a lze ji považovat za správnou volbu při návrhu experimentu. Vzhledem k tomu, že při experimentu je používána voda, tak experiment ve vakuu nebyl proveden, jelikož vývěvy by mohly nasát kromě vzduchu také vodu a hladina by nemusela být ustálená po dobu experimentu. Navíc generovaná velikost momentu síly (rychlosti otáčení) je příliš malá na to, aby odpor vzduch oproti vakuu hrál významnou roli. Větší vliv na rychlost orientace bude mít slabší magnetické pole Země na nízké oběžné dráze oproti pozemskému experimentu.

Vzhledem k úspěšnému experimentu lze přikročit k experimentování s více cívkami, za použití řídicích algoritmů pro přesnou orientaci CubeSatu na požadovaný úhel, který nemusí být totožný s magnetickým středem Země

LITERATURA

- [1] Harold A. Zahl, Hans K. Ziegler (2001), Solar Energy, ScienceDirect
- [2] M. Macdonald and V. Badescu, Eds., *The International Handbook of Space Technology*. Berlin: Springer, 2014.
- [3] Satellite Communication - Introduction [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://www.tutorialspoint.com/satellite_communication/satellite_communication_introduction.htm
- [4] NANOSATELLITES [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://alen.space/basic-guide-nanosatellites/>
- [5] Communication Satellites [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://axessnet.com/en/communication-satellites/>
- [6] How satellite navigation works [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://www.esa.int/Applications/Navigation/How_satellite_navigation_works
- [7] Earth observation satellite [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Earth_observation_satellite
- [8] F. L. Markley and J. L. Crassidis, *Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control*. New York: Springer, 2014.
- [9] Attitude dynamics and control/stabilization of spacecraft and gyrostat-satellites [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/6271698/>
- [10] Reaction wheel [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://www.microcontrollertips.com/wp-content/uploads/2022/03/WTWH_reaction-wheel_Pt1_Fig1.png
- [11] Thruster stabilization [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://howthingsfly.si.edu/sites/default/files/image-large/721-12-shuttle-attitude_lg.jpg

- [12] Passive attitude stabilization with magnets [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://i.stack.imgur.com/oXgBR.jpg>
- [13] O. Neužil, “Řízení orientace družice - laboratorní úloha”, Diplomová práce, Brno, 2018.
- [14] Magnetismus Země. 1. Magnetické pole Země [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12046590-Magnetismus-zeme-1-magneticke-pole-zeme.html>
- [15] ELEKTRINA A MAGNETIZMUS [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/elmg/kurz_08_mgpl.pdf
- [16] Magnetic declination [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://www.geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/magdec-en.php
- [17] Magnetic Declination and Inclination of Earth [online]. [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://unacademy.com/content/neet-ug/study-material/physics/magnetic-declination-and-inclination-of-earth/>
- [18] NMTR-X (Custom) [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.satnow.com/products/magnetorquers/newspace-systems/41-1204-nmtr-x-custom->
- [19] iMTQ Magnetorquer Board [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.isispace.nl/product/isis-magnetorquer-board/>
- [20] Micro Magnetic Torque Rods [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.satnow.com/products/magnetorquers/strasspace/41-1231-micro-magnetic-torque-rods>
- [21] NanoTorque Z-axis Internal [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.satnow.com/products/magnetorquers/gomspace-group/41-1210-nanotorque-z-axis-internal>
- [22] MT01 Compact Magnetorquer [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.cubesat.market/mt01-compact-magnetorquer>

- [23] BELI-BECO měděný drát smaltovaný lakem Vnější Ø (vč. izolace)=0.30 mm 100 m [online]. [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/cs/p/beli-beco-medeny-drat-smaltovany-lakem-vnejsi-vc-izolace-0-30-mm-100-m-1437326.html>
- [24] I. Indir, K. Sever, I. Vnučec, and J. Lančar (2021), Research on Design and Optimization of Air Core Magnetorquers for Attitude Control of LEO Nanosatellites, IEEE Xplore
- [25] R. Lee, J. Li, M. Post, and T. Wright (2013), Research on Design of Attitude Control Systems for CubeSat-Class Nanosatellite, Journal of Control Science and Engineering
- [26] M. Sedlařík, “NÁVRH A KONSTRUKCE MAGNETORQUERU”, Diplomová práce, Brno, 2022.
- [27] Simple Guide to the Raspberry Pi GPIO Header [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi-spy.co.uk/2012/06/simple-guide-to-the-rpi-gpio-header-and-pins/>
- [28] Waveshare Nepřerušitelný zdroj napájení UPS HAT pro Raspberry Pi (B) [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://rpishop.cz/sprava-napajeni-a-ups/5415-waveshare-nepreusitelnyzdrojnapajeniupshatprorasberrypib.html?gclid=Cj0KCQjwxYOiBhC9ARIsANiEIfbTnqrFRPBb7MB4KABxjEehcoHonKaUwcPRZbyUFMjVOFwF8tkXDEaAtWDEALw_wcB
- [29] Waveshare PWM Fan HAT pro Raspberry Pi, I2C, monitor teploty [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/chladici-karty/2699-waveshare-pwm-fan-hat-pro-raspberry-pi-i2c-monitor-teploty.html>
- [30] Waveshare 10 DOF IMU Senzor (C) (gyroskop, akcelerometr, kompas/magnetometr) [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://rpishop.cz/orientace-v-prostoru/1404-waveshare10dofimusensorcgyroskopakcelerometrkompasmagnetometr.html?gclid=CjwKCAjwl6OiBhA2EiwAuUwWZctsY-L2Vbxp2EAAYGhCtZczP-JUe4PmLbW6_0RppKbPvq_3RSgAixoCqJIQAvD_BwE
- [31] Relé modul 1-kanálový 5V [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/122112relemodul1kanalovy5vproarduino.html?gclid=CjwKCAjwo7i>

iBhAEEiwAsIxQEQXA19urG92gEnpzRbJDVqtV_7g9uWov7zKIo0nolO0WC3zvPTICUBo
CrkQAvD_BwE

[32] Katalog valivých ložisek SKF [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z:
[https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968096351e/pdf_preview_medium/0901d
1968096351e_pdf_preview_medium.pdf#cid-121486](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968096351e/pdf_preview_medium/0901d1968096351e_pdf_preview_medium.pdf#cid-121486)