

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STROJNÍCKA FAKULTA**

**AEROSHIELD: MINIATÚRNY EXPERIMENTÁLNY MODUL
AEROKYVADLA**

Bakalárska práca

SjF-číslo b. práce

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STROJNÍCKA FAKULTA**

**AEROSHIELD: MINIATÚRNY EXPERIMENTÁLNY MODUL
AEROKYVADLA**

Bakalárska práca

SjF-12345-67890

Študijný odbor:	Automatizácia a informatizácia strojov a procesov
Študijný program:	5.2.14 automatizácia
Školiace pracovisko:	Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky
Vedúci záverečnej práce:	Ing. Mgr. Anna Vargová.
Konzultant:	Ing. Erik Mikuláš

Bratislava, 2022

Peter Tibenský

Úlohou študenta je navrhnuť, realizovať a sériovo vyrobiť rozširovací modul pre prototypizačnú platformu Arduino v rámci open-source projektu „AutomationShield“. Jedná sa o návrh miniaturizovaného laboratórneho experimentu so spätnoväzobným riadením tzv. aerokyvadla, spolu s ovládacím softvérom a inštruktážnymi príkladmi. Študent navrhne plošný spoj v CAD prostredí DipTrace, vytvorí programátorské rozhranie (API) v jazyku C/C++ pre Arduino IDE, ďalej pre MATLAB a Simulink. Študent manažuje verzie projektu v Git pre GitHub a píše úplnú dokumentáciu v Markdown.

Čestné prehlásenie

Vyhlasujem, že predloženú záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce, s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú citované v práci a uvedené v zozname použitej literatúry. Ako autor záverečnej práce ďalej prehlasujem, že som v súvislosti s jej vytvorením neporušil autorské práva tretích osôb.

Bratislava, 23. máj 2022

.....
Vlastnoručný podpis

V prvom rade by som rád poďakoval vedúcej mojej bakalárskej práce, Ing. Mgr. Anne Vargovej, za odbornú pomoc, ľudský prístup a cenné rady pri vypracovávaní práce. Ďalej chcem poďakovať aj konzultantovi bakalárskej práce, Ing. Erikovi Mikulášovi, za pomoc a pripomienky pri tvorbe dosky plošných spojov a návrhu 3D modelov.

Bratislava, 20. mája 2018

Peter Tibenský

Názov práce: AeroShield: Miniaturný experimentálny modul aerokyvadla

Kľúčové slová: Arduino, AutomationShield, PID, AeroShield, AeroPendulum

Abstrakt: Cieľom bakalárskej práce je návrh experimentálneho modulu pre platformu Arduino. Tento modul má podobu externého shieldu, ktorý sa dá jednoducho pripojiť ku doskám Arduino a slúži na výučbu základov riadenia. Ich súčasťou je hardwareova a softwareova časť. V rámci bakalárskej práce bol navrhnutý jeden modul s názvom AeroShield.

Title: AeroShield: Miniature experimental module of aeropendulum

Keywords: Arduino, AutomationShield, PID, AeroShield, AeroPendulum

Abstract: The aim of the bachelor's thesis is to design an experimental module for the Arduino platform. This module takes the form of an external shield that can be easily connected to Arduino boards and is used to teach the basics of control. Each module consist of hardware and a software part. As a part of this bachelor thesis, one module was designed, the AeroShield.

Obsah

Úvod	1
1 Motivácia	2
2 AeroShield	5
2.1 Hardware	7
2.1.1 Popis súčiastok	7
2.1.2 Schéma zapojenia	9
2.1.3 Doska plošných spojov	10
2.2 Software	10
3 Didaktické príklady	11
4 Záver	12
Literatúra	13

Zoznam obrázkov

1.1	dočasný obrázok pokiaľ nebude hotovec final.	2
1.2	Aeropendulum značky Real Sim[1].	3
1.3	Arduino UNO.	4
2.1	(a) Prvá verzia AeroShieldu. (b) Schéma zapojenia prvej verzie AeroShieldu.	5
2.2	Doska slúžiaca na fungovanie senzoru hall efektu.	6
2.3	buck converter	7
2.4	meranie prúdu	8
2.5	meranie uhla kyvadla	9

Úvod

Cieľom tejto bakalárskej práce je návrh, výroba a naprogramovanie modernej učebnej pomôcky AeroShieldu (ďalej len „shield”), ktorý slúži na výuku základov teórie riadenia a elektrotechniky.

Učebné pomôcky sú nevyhnutnou, no často zanedbávanou súčasťou výuky. Študenti si vďaka nim môžu lepšie predstaviť a pochopiť problematiku daného učiva. Kombinujú tak príjemne s užitočným, kedy sa študent môže lepšie zoznámiť s hardwarom, softwarom a celkovým fungovaním učebnej pomôcky. Avšak, takéto pomôcky bývajú častokrát príliš zložité a drahé [2]. Z toho dôvodu, je ich použitie pri výučbe nepraktické.

Za cieľom prístupnosti experimentálnych modulov širokej verejnosti prišli na ústave Automatizácie, merania a aplikovanej informatiky Strojníckej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave s projektom AutomationShield, ktorý ponúka pomerne jednoduché a cenovo dostupné experimentálne moduly ako Open-source¹ študentské projekty.

Vhodnou platformou na implementáciu týchto modulov sú napríklad prototypizačné dosky Arduino ktoré sú taktiež open-source. Ich nízka cena a celosvetová popularita, spojená s obrovským množstvom návodov, informácií a pomôcok, vytvára ideálnu platformu pre začínajúcich, ako aj pokročilých, programátorov, elektrotechnikov alebo hobby nadšencov.

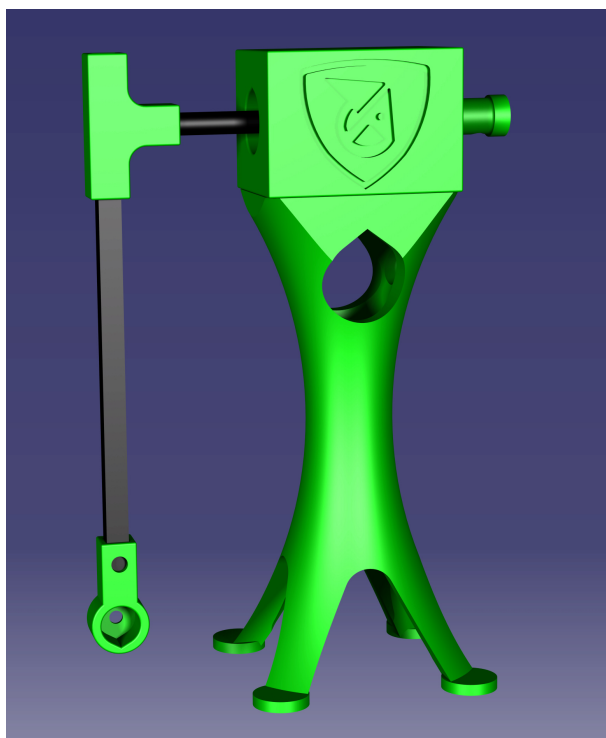
V bakalárskej práci je opísaný postup výroby a fungovania shieldu s dôrazom na zrozumiteľnosť jednotlivých aspektov aj čitateľom, ktorý o danej téme nie sú dokonale oboznámený. Na začiatku bakalárskej práce, v hardwarovej časti, je opísaný základný princíp fungovania shieldu a následne jeho jednotlivé súčiastky. Pochopenie fungovania jednotlivých súčiastok shieldu je kritické pre správnu manipuláciu užívateľa s jeho jednotlivými časťami. Poslednú časť tvorí tvorba dosky plošných spojov pre shield v programe Dip-Trace.

V softwarovej časti sú bližšie predstavené jednotlivé charakteristické funkcie shieldu. Funkcie sú usporiadané do logických celkov pre ľahšiu prácu užívateľa s kódom.

¹Open-source je zo všeobecného pohľadu akákoľvek informácia ktorá je dostupná verejnosti bez poplatku(s voľným prístupom), s ohľadom na fakt, že jej voľné šírenie zostane zachované.

1 Motivácia

Cieľom tejto bakalárskej práce je návrh učebnej pomôcky AeroShield, vo svete známej pod názvom Aeropendulum, čo v doslovnom preklade znamená vzdušné kyvadlo. Jedná sa o pomerne jednoduché zariadenie pozostávajúce z niekoľkých častí. Akčným členom tohoto zariadenia je motorček na jednosmerný prúd, ktorý má na rotor pripojené lopatky ktoré vďaka otáčaniu produkujú ťah. Motorček je zvyčajne upevnený na koniec ľahkej tyčky ktorá je v mieste otáčania pripevnená k zariadeniu na meranie uhlu pootočenia tyčky. Zariadenie na meranie pootočenia môže byť potenciometer, senzor hall efektu alebo iné [3]. V našom prípade budeme používať senzor hall efektu ktorého fungovanie je opísané v časti hardware 2.1.1. Zariadenie na meranie uhlu je následne upevnené na podstavec aby sa motor mohol voľne pohybovať. Zostavenie takéhoto kyvadlo bolo cieľom tejto bakalárskej práce a jeho podobu môžete vidieť na obr. 1.1



Obr. 1.1: dočasný obrázok pokiaľ nebude hotovec final.

Open-source projekt AutomationShield vyvíjaný na ústave Automatizácie, merania a aplikovanej informatiky SJF STU, je zameraný na vývoj hardwarových a softwarových nástrojov určených na vzdelávanie a doplnenie vzdelávacieho procesu. Jadrom celého pro-

jektu je tvorba rozširujúcich dosiek(shieldov) vyvíjaných pre populárny typ prototypizačných dosiek s mikrokontrolérmi Arduino, ktoré majú za cieľ lepšiu výučbu strojného inžinierstva, mechatroniky a riadenia [4].

Zdrojový kód k AeroShieldu, ako aj ku všetkým modulom AutomationShield, nájdeme na platforme GitHub [5], ktorá slúži ako obrovská knižnica kódov, návodov a postupov pre kohokoľvek. Na samostatnej stránke AutomationShield nájdeme zoznam jednotlivých shieldov a to v akom procese výroby sa nachádzajú. Ku každému shieldu nájdeme jeho podrobnú dokumentáciu, knižnice, zdrojové kódy ako aj predprogramované ukážky fungovania. Tým že GitHub je open-source platforma, dokumenty na stránke môže ktokoľvek upravovať alebo vylepšovať čo tvorí ideálny priestor pre rozvoj myšlienok a tvorivý proces. Na dokumentoch môže naraz pracovať niekoľko desiatok ľudí, čím sa častokrát mnohonásobne urýchluje proces tvorby a hľadania chýb.

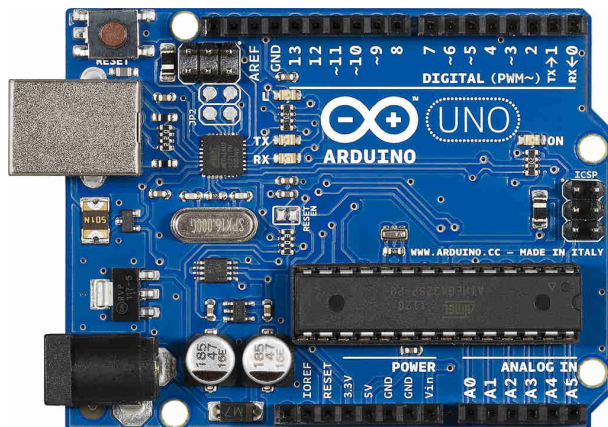
Ako už bolo spomenuté, hlavnou motiváciou tohoto projektu je nízka dostupnosť a vysoká cena podobných učebných pomôcok. Výučba je preto častokrát až príliš zameraná na memorovanie faktov a teórie, namiesto praktických experimentov a skúseností typu pokus-omyl. Jediný podobný dostupný produkt na kúpu nie ako kit, je Aeropendulum od neznámej perzskej značky Real Sim ktoré je na obr. 1.2. Študenti si omnoho rýchlejšie osvoja metódy programovania a automatizácie, pokiaľ majú možnosť experimenty sami tvoriť a skúmať vplyv reálnych výstupov na zvolené vstupy. S úmyslom priniesť širokej verejnosti lacnejšiu a výkonnejšiu alternatívu vtedajším mnohonásobne drahším a menej výkonným prototypizačným doskám [6], prišla na trh v roku 2005 prototypizačná doska Arduino. Projekt vznikol v Taliansku ako kolaborácia medzi viacerými nadšencami elektrotechniky a programovania, na ktorých čele bol Massimo Banzi.



Obr. 1.2: Aeropendulum značky Real Sim[1].

Veľkou výhodou dosiek Arduino a ich nadstavbových shieldov je fakt, že sú pomerne lacné a majú malé rozmery (Arduino UNO: 68.6*53.4mm [7]). Tieto fakty umožňujú študentom pracovať na experimentoch nielen na pôde školy, ale experimenty si môžu zobrať domov a pracovať na nich aj mimo vyučovacieho procesu. Na správne fungovanie a

programovanie dosky nám postačuje len USB kábel a samotná doska. Vzhľadom na nízky počet potrebných súčiastok a fakt, že mikročip arduina je v prípade poruchy jednoducho vymeniteľný ², je ich používanie na školách príjemné a jednoduché. Pre naše účely je vhodná doska Arduino UNO ktorú môžeme vidieť na obr. 1.3. Na doske sa nachádza 14 digitálnych a 6 analógových pinov. Niektoré piny sú označené špeciálnym symbolom , tieto piny sú schopné produkovať PWM³ signál ktorý potrebujeme na správne ovládanie motoru kyvadla.



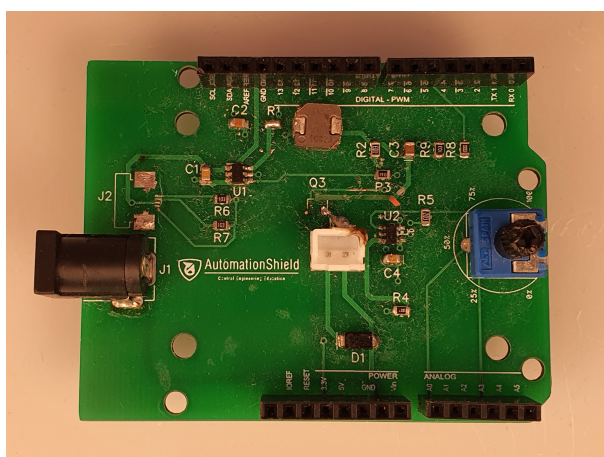
Obr. 1.3: Arduino UNO.

²Tento fakt platí pri mikročipoch typu DIP(Dual in-line package) ktoré stačí jednoducho vytiahnuť z konektora bez použitia spájkovania.

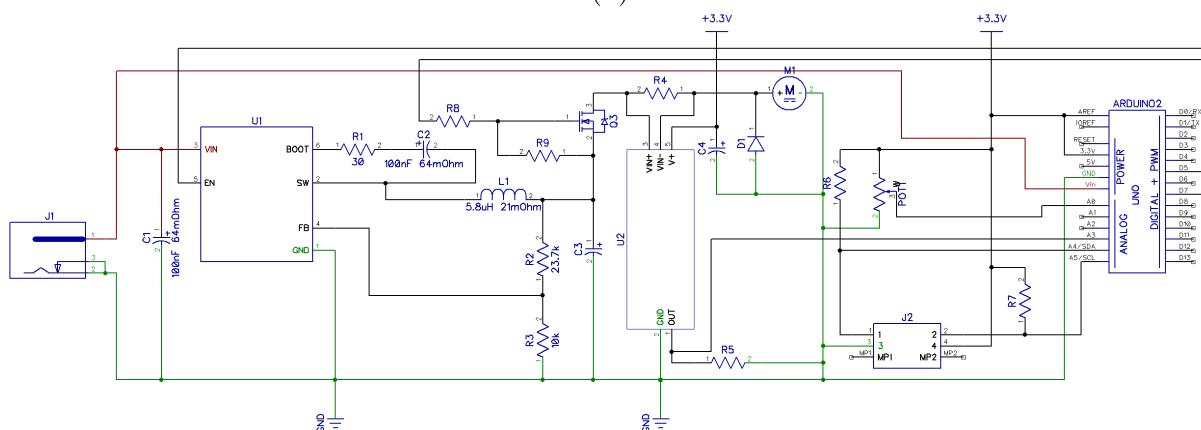
³Šírková modulácia impulzov alebo PWM je technika na dosiahnutie analógových výsledkov pomocou digitálnych prostriedkov a to, za pomoci striedania dĺžok medzi High a Low stavom resp. zapnutý a vypnutý stav.

2 AeroShield

Téma tejto bakalárskej práce vznikla ako pokračovanie, na už započatom projekte aero kyvadla. Prvá verzia dosky a samotného kyvadla vznikla ako záverečný projekt na predmet Mikroprocesorová technika. Na projekte pracovala päťica študentov: . Schému zapojenia hlavnej dosky, ako aj fotografiu napájkovanej verzie môžeme vidieť na obr.2.1.



(a)



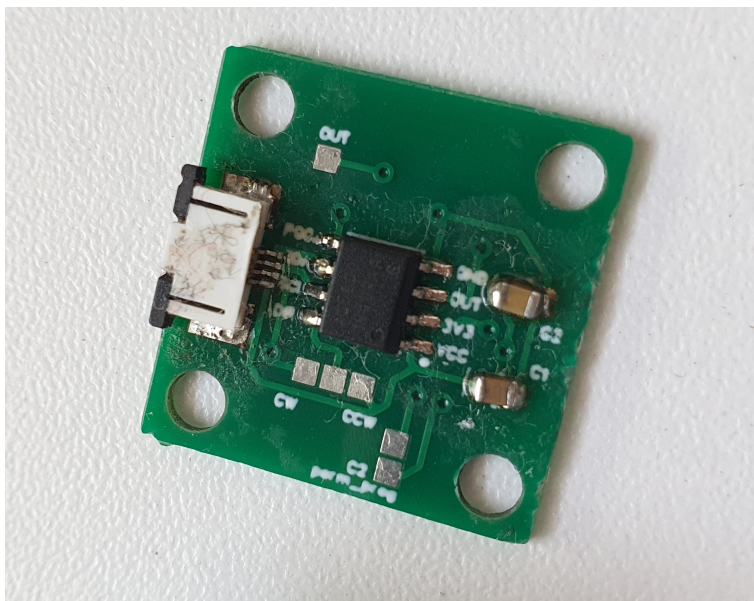
(b)

Obr. 2.1: (a) Prvá verzia AeroShieldu. (b) Schéma zapojenia prvej verzie AeroShieldu.

Prvá verzia dosky mala niekoľko nedostatkov, vďaka ktorým bola prakticky nepoužiteľná. Hlavnými nedostatkami boli:

- neprepojenie pinov komunikácie I2C tj. piny SDA a SCL senzoru hall efektu, ktorý slúži na meranie uhlu natočenia kyvadla,
- nesprávne zapojenie mosfetu PMW45EN, ktorý ovláda PWM signál idúci do akčného člena,
- nesprávne umiestnená ochranná dióda na konektoroch akčného člena,
- nesprávne zapojený obvod s čipom INA169, ktorý slúži na meranie prúdu,
- neprepojenie nulového konektora shieldu s nulovým konektorom arduina.

Základom tejto bakalárskej práce teda bolo najskôr pochopiť jednotlivé časti zapojenia, analyzovať chyby a ich následná oprava. V rámci školského projektu bola vytvorená hlavná doska na ktorej sa nachádza väčšina elektroniky, avšak bola vytvorená aj verzia menšej dosky ktorá slúži na fungovanie senzoru hall efektu. Táto doska fungovala bezproblémovo a teda netreba nijakým spôsobom meniť jej schému zapojenia. Tejto menšej doske sa budeme bližšie venovať v časti??, no jej podoba je viditeľná na obr.2.2.



Obr. 2.2: Doska slúžiaca na fungovanie senzoru hall efektu.

2.1 Hardware

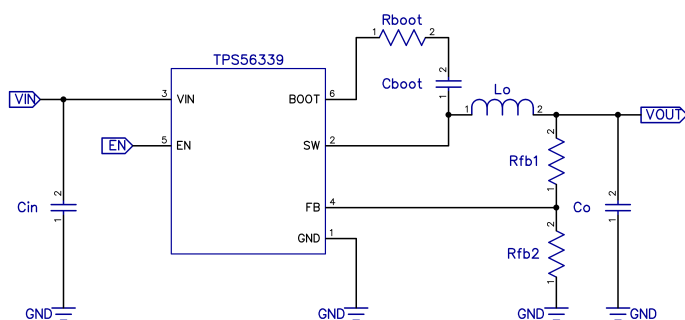
2.1.1 Popis súčiastok

V tejto časti sa bližšie pozrieme na jednotlivé nevyhnutné súčasti zapojenia AeroS-hieldu. Konkrétne sa jedná o tieto prvky:

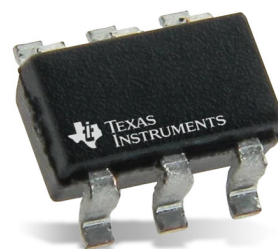
- napájanie,
- ovládanie akčného člena,
- meranie prúdu,
- meranie uhla natočenia kyvadla,
- iné.

Znižovanie napätia

Na správne napájanie akčného člena, motorčeka, potrebujeme napätie v rozmedzí 0-3,7V. Na shield je však privádzané, pomocou koaxiálneho napájacieho konektora, napätie 12V ktoré by motor v priebehu chvíle zničilo. Potrebujeme preto spôsob ako znížiť privádzané napätie, no súčasne neznižovať privádzaný prúd potrebný na pohon motorčeka. Na tieto účely slúži takzvaný buck converter alebo konvertor na zníženie napätia. Hlavnou časťou konvertora je čip TPS56339 od výrobcu Texas Instruments obr.2.3.b. Znižovanie napätia funguje za pomoci dvoch integrovaných N-kanálových 70-m Ω a 35-m Ω high-side mosfetov⁴ a ďalších komponentov. Celkový prevádzkový prúd zariadenia je približne 98 μ A, keď funguje bez spínania a bez záťaže. Keď je zariadenie vypnuté, napájací prúd je približne 3 μ A a zariadenie umožňuje nepretržitý výstupný prúd do 3 A[8].



(a) Schéma zapojenia konvertora napätia.



(b) čip TPS56339[8]

Obr. 2.3: buck converter

Na čip je privádzané napätie 12V ktoré sa pomocou zapojenia, viditeľného na schéme obr.2.3.a, znižuje na napätie 3,7V. Napájanie motora musí byť realizované externe pomocou koaxiálneho napájacieho konektora, z dôvodu vysokého prúdu odoberaného motorom počas vysokého zaťaženia. Rovnaký konektor sa síce nachádza aj na doske Arduino UNO

⁴N-kanálový mosfet je typ mosfetu, v ktorom tok prúdu nastáva kvôli pohybujúcim sa, záporne nabitým elektrónom. "High-side" znamená, že prúd prechádza z napájania, cez mosfet do záťaže a potom do zeme

a pomocou VIN pinu sa dajú napájať napätím 0-12V aj iné zariadenia, avšak tento pin je napojený na diódu obmedzujúcu prúd na 1A[9][10].

akčný člen

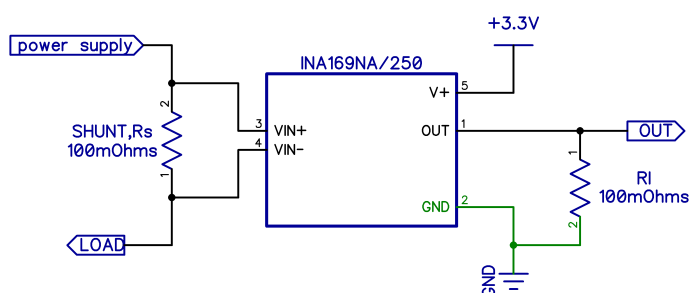
Ako akčný člen AeroShieldu je použitý 7mm, 3,7V jednosmerný motorček bez jadra. “coreless motor“ alebo motor bez jadra je motor s cievkou navinutou samou na sebe a nie na železe[11]. Takéto jadro ale samé o sebe nie je veľmi pevné a nedrží dobre tvar, preto sa často krát zalieva epoxidom. Stator je vyrobený z magnetov na báze vzácnych zemín, ako je neodým alebo SmCo (samárium-kobalt), ktoré sa nachádzajú vo vnútri bezjadrového rotora.

Takýto motor ponúka mnoho výhod oproti motoru so železným jadrom. Tým že jadro v sebe nemá železo, výrazne sa znižuje hmotnosť a tým aj zotrvačnosť rotora, čo je dôležité pre naše použitie kedy potrebujeme dosahovať vysokú akceleráciu a rýchle spomalenie rotora. Ďalšou výhodou je fakt že nedochádza k stratám na železe a tým pádom sa účinnosť takýchto motorov blíži až ku 90%-[12]. Motor je ovládaný pomocou impulzovej šírkovej modulácie (PWM).

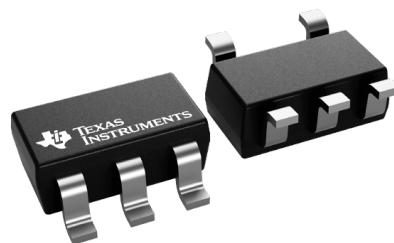
meranie prúdu

Pre čo najpresnejšie ovládanie akčného člena sústavy, motora, je dobré vedieť nie len napätie, ktorým je motor ovládaný, ale aj prúd, ktorý motor odoberá. Na tieto účely sa používajú monitory prúdu, takzvané ("current shunt monitors"). V AeroShielde je použitý snímač INA169NA/250 od výrobcu Texas Instruments obr.2.4.b.

INA169 je "high-side current monitor", čo znamená, že na kladnú stranu je umiestnený špeciálny rezistor ("shunt resistor") a INA169 meria úbytok napätia na tomto rezistore obr.2.4.a. Na základe nameraného úbytku napätia vysiela senzor určité napätie ktoré sa následne znásobuje a toto napätie môžeme zaznamenávať. Pomocou základnej matematiky udáva výstupné napätie prúd pretekajúci cez shunt rezistor[13].



(a) Schéma zapojenia snímača prúdu.



(b) Senzor INA169NA/250[14]

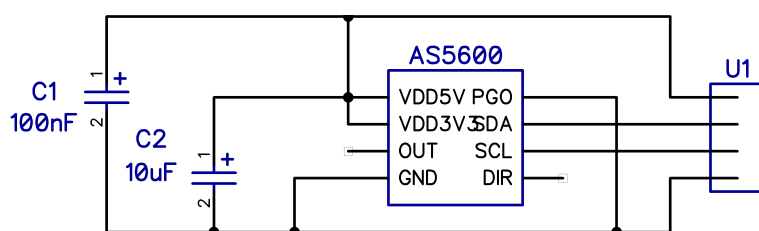
Obr. 2.4: meranie prúdu

meranie uhla kyvadla

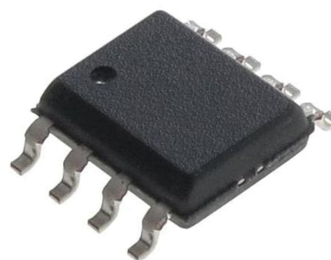
Na správne fungovanie AeroShieldu je dôležité vedieť s vysokou presnosťou merať uhol naklonenia kyvadla. Na tento účel sme si zvolili meranie uhlu bezkontaktnou formou, pomocou snímača na princípe hallovho javu. Hallov jav vieme opísať ako vznik priečného elektrického poľa v pevnom materiáli, keď ním preteká elektrický prúd a tento materiál je umiestnený v magnetickom poli, ktoré je kolmé na prúd[15]. Toto elektrické pole resp. vznik elektrického potenciálu vieme detegovať a na základe jeho zmeny vieme určiť rotáciu kyvadla. V kyvadle je na konci horizontálneho ramena umiestnený špeciálny magnet kruhového tvaru ktorý je polarizovaný naprieč prierezom magnetu.

Ako senzor na meranie hallovho efektu je použitý AS5600 od výrobcu OSRAM obr.2.5.b. Signály prichádzajúce zo snímača sa najprv zosilnia, následne sú filtrované a prechádzajú konverziou pomocou analógovo-digitálneho prevodníkom (ADC). Výstup ADC je spracovaný pomocou bloku CORDIC (Coordinate Rotation Digital computer) ktorý slúži na výpočet uhla a veľkosti otáčok vektora magnetického poľa. Snímaná je aj intenzita magnetického poľa ktorá sa ďalej používa na automatické riadenie zosilnenia (AGC) ktoré slúži na kompenzáciu teploty a veľkosti magnetického poľa, ktoré sa mení na základe vzdialenosti magnetu od senzoru.

Na výber sú dva typy výstupu a to analógový výstup alebo digitálny výstup s kódovaním PWM. Senzor má taktiež aj možnosti interného programovania pomocou rozhrania I2C. V našom prípade používame 12-bitový analógový výstup s rozlíšením $0^{\circ}5'16''$. Toto rozlíšenie nám umožňuje s vysokou presnosťou kontrolovať naklonenie kyvadla a na základe získaných informácií ovplyvňovať fungovanie akčného člena sústavy. Schéma zapojenia čipu na meranie uhlu môžeme vidieť na obr.2.5.a.



(a) Schéma zapojenia čipu na meranie uhlu.



(b) čip AS5600[16]

Obr. 2.5: meranie uhla kyvadla

ďalšie dôležité súčasti obvodu

potenciometer a mosfet spomeň

2.1.2 Schéma zapojenia

ZAPOJENIE HOVOR O DIPTRACE!

2.1.3 Doska plošných spojov

ZAPOJENIE HOVOR O PLOŠÁKOCH !
AJ BREAKOUT BOARD!

2.2 Software

fgdfgbh

3 Didaktické příklady

4 Záver

Táto časť diplomovej práce je povinná. Autor práce uvedie zhodnotenie riešenia, jeho výhody resp. nevýhody, použitie výsledkov, ďalšie možnosti a podobne. Môže aj načrtnúť iný spôsob riešenia úloh, resp. uvedie, prečo postupoval uvedeným spôsobom.

Literatúra

- [1] Fanavaran Sharif. Aero pendulum control system (pr22). Store. Online., 2021. 2021, <https://www.zodel.com/en/product/ZP22344/Aero-Pendulum-Control-System-PR22>.
- [2] Petr Horáček. Laboratory experiments for control theory courses: A survey. *Annual Reviews in Control*, 24:151–162, 2000.
- [3] Ed Edwards. All about position sensors. article. Online. 2021, <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/all-about-position-sensors>.
- [4] Gergely Takacs. Automationshield. Wiki. Online., 2021. 13.7.2021, <https://github.com/gergelytakacs/AutomationShield/wiki>.
- [5] Gergely Takacs. Automationshield. Code. Online., 2021. 23.12.2021, <https://github.com/gergelytakacs/AutomationShield>.
- [6] Harry Baggen. The javelin stamp. *Elector Electronics*, 1(1):0, 2003.
- [7] Arduino uno rev3. Info. Online., 2021. 2021, <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>.
- [8] Texas instruments tps56339 buck converters. store. Online., 2021. 2021, <https://www.mouser.ee/new/texas-instruments/ti-tps56339-buck-converters/>.
- [9] Arduino. Overview of the arduino uno components. article. Online., 2021. 2021, <https://docs.arduino.cc/tutorials/uno-rev3/intro-to-board>.
- [10] Arduino uno r3 - schematic with ch340. article. Online., 2021. 2021, http://electronoobs.com/eng_arduino_tut31_sch3.php.
- [11] DANIELLE COLLINS. What are coreless dc motors? article. Online., 2018. 09.10.2021, <https://www.motioncontroltips.com/what-are-coreless-dc-motors/>.
- [12] Komatsu Yasuhiro, Tur-Amgalan Amarsanaa, Yoshihiko Araki, Syed Abdul Kadir Zawawi, and Takamura Keita. Design of the unidirectional current type coreless dc brushless motor for electrical vehicle with low cost and high efficiency. In *SPEEDAM 2010*, pages 1036–1039, 2010.

- [13] SHAWN HYMEL. Ina169 breakout board hookup guide. article. Online., 2021. 2021, <https://learn.sparkfun.com/tutorials/ina169-breakout-board-hookup-guide/all>.
- [14] Ina169na/250. store. Online., 2021. 2021, <https://www.ti.com/store/ti/en/p/product/?p=INA169NA/250>.
- [15] The Editors of Encyclopaedia Britannica. Hall effect. article. Online., 2021. 2021, <https://www.britannica.com/science/Hall-effect>.
- [16] Hallův snímač as5600-asom. store. Online., 2021. 2021, <https://sk.rsdelivers.com/product/ams/as5600-asom/halluv-snimac-as5600-asom-pocet-koliku-8-soic-typ/2006337>.