

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STROJNÍCKA FAKULTA**

**AEROSHIELD: MINIATÚRNY EXPERIMENTÁLNY MODUL
AEROKYVADLA**

Bakalárska práca

SjF-číslo b. práce

2022

Peter Tibenský

**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 navrhnúť, 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 podľakoval vedúcej mojej bakalárskej práce, Ing. Mgr. Anne Vargovej, za odbornú pomoc, ľudský prístup a cenné rady pri vypracovávaní práce. Ďalej chcem podľakovať aj konzultantom 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: Miniatúrny 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 consists 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	10
2.1.3 Doska plošných spojov	11
2.2 Software	14
3 Didaktické príklady	15
4 Záver	16
Literatúra	17

Zoznam obrázkov

1.1	dočasný obrázok pokial 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	meranie uhla kyvadla	6
2.3	buck converter	7
2.4	akčný člen	8
2.5	meranie prúdu	9
2.6	meranie uhla kyvadla	9
2.7	Schéma zapojenia AeroShieldu	10
2.8	Vedľajšia doska AeroShieldu- breakout board	11
2.9	(a) Vrchná strana AeroShieldu (b) Spodná strana AeroShieldu	12
2.10	Dosky plošných spojov AeroShieldu	13

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 sprístupnenia 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 pomocov, vytvára ideálnu platformu pre začínajúcich, ako aj pokročilých, programátorov, elektrotechnikov alebo hobby nadšencov.

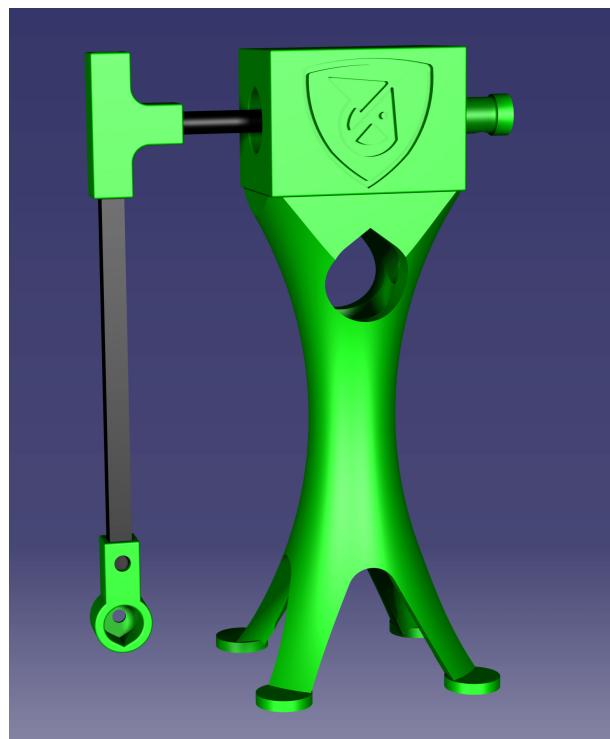
V bakalárskej práci je opísaný postup výroby a fungovania shieldu s dôrazom na zrozumiteľnosť jednotlivých aspektov aj čitateľom, ktorý o danej téme nie sú dokonale oboznámený. Na začiatku bakalárskej práce, v hardwarovej časti, je opísaný základný princíp fungovania shieldu a následne jeho jednotlivé 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 tohto zariadenia je motorček na jednosmerný prúd, ktorý má na rotor pripojené lopatky ktoré vďaka otáčaniu produkujú ťah. Motorček je zvyčajne upevnený na koniec ľahkej tyčku 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 kyvadla bolo cieľom tejto bakalárskej práce a jeho podobu môžete vidieť na obr. 1.1



Obr. 1.1: dočasný obrázok pokial 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) vyvýjaných 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 podrobnejšiu 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 ludí, čím sa častokrát mnohonásobne urýchluje proces tvorby a hľadania chýb.

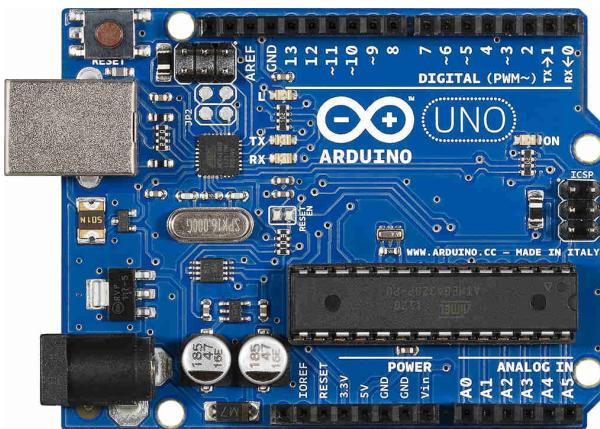
Ako už bolo spomenuté, hlavnou motiváciou tohto projektu je nízka dostupnosť a vysoká cena podobných učebných pomôcok. Výučba je preto častokrát až príliš zameraná na memorovanie faktov a teórie, namiesto praktických experimentov a skúseností typu pokus-omyl. Jediný podobný dostupný produkt na kúpu nie 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 vymeniteľný², 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.



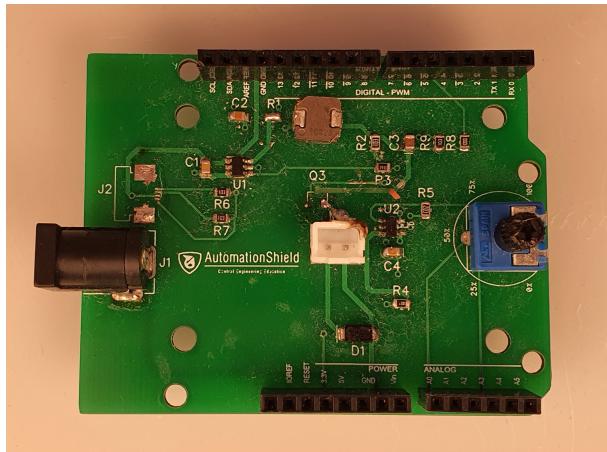
Obr. 1.3: Arduino UNO.

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

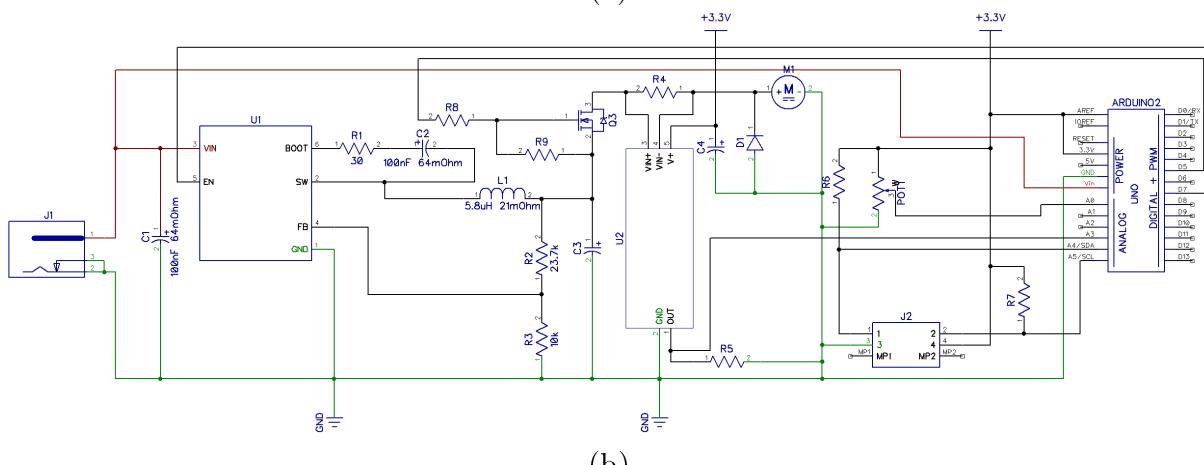
³Šírková modulácia impulzov alebo PWM je technika na dosiahnutie analógových výsledkov pomocou digitálnych prostriedkov a to, za pomoci striedania dĺžok medzi High a Low stavom resp. zapnutý a vypnutý stav.

2 AeroShield

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



(a)



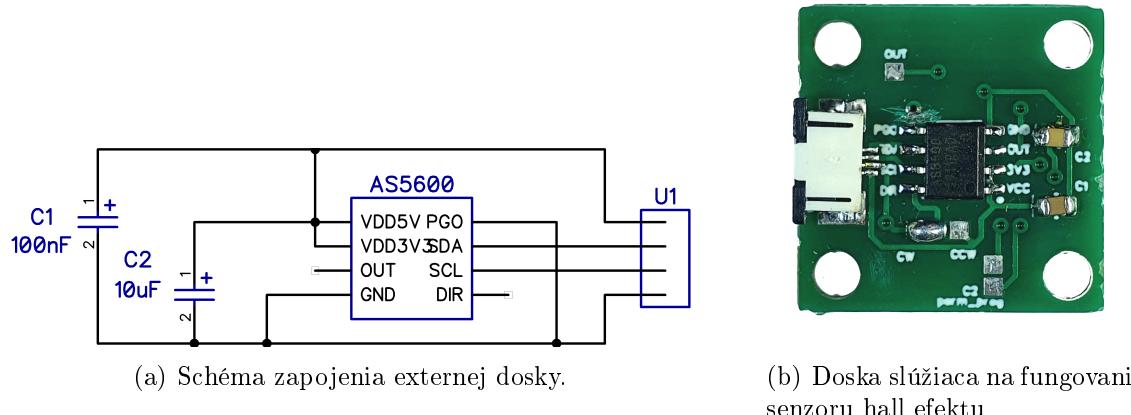
(b)

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 konektorm arduina.

Základom tejto bakalárskej práce teda bolo najskôr pochopiť jednotlivé časti zapojenia, analizovať 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 netrebalo nijakým spôsobom meniť jej schému zapojenia viditeľnú na obr.2.2.a. Tejto menšej doske sa budeme bližšie venovať v časti??, no jej podoba je viditeľná na obr.2.2.b.



Obr. 2.2: meranie uhla kyvadla

2.1 Hardware

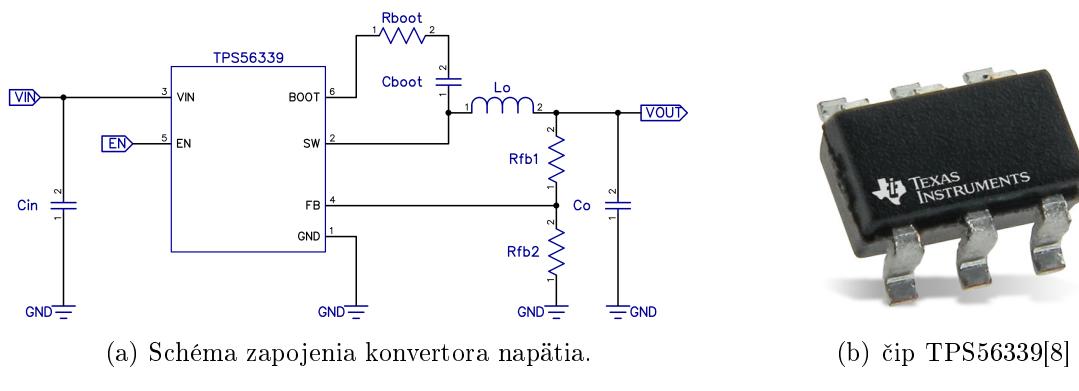
2.1.1 Popis súčiastok

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

- napájanie
- ovládanie akčného člena
- meranie uhla natočenia kyvadla
- meranie prúdu

Znižovanie napäťia

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



Obr. 2.3: buck converter

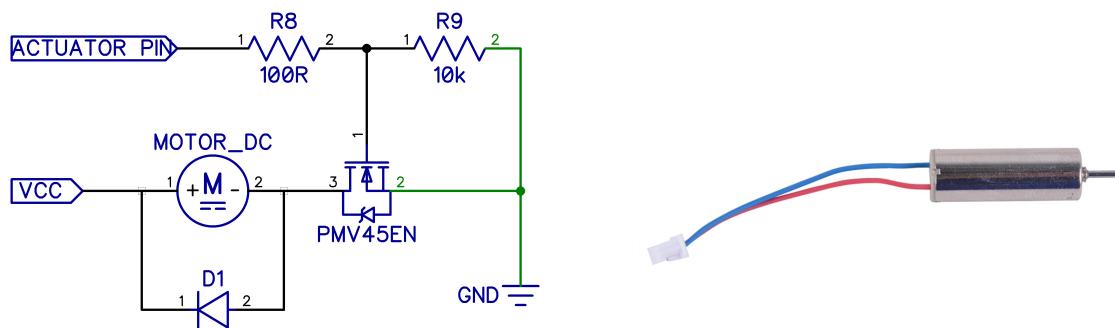
Na čip je privádzané napätie 12V ktoré sa pomocou zapojenia, vididelného na schéme obr.2.3.a., znižuje na napätie 3,7V. Napájanie motora musí byť realizované externe pomocou koaxiálneho napájacieho konektora, z dôvodu vysokého prúdu odoberaného motorom počas vysokého zataženia. Rovnaký konektor sa sice nachádza aj na doske Arduino UNO a pomocou VIN pinu sa dajú napájať napäťom 0-12V aj iné zariadenia, avšak tento pin je napojený na diódu obmedzujúcu prúd na 1A[9][10].

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

akčný člen

Ako akčný člen AeroShieldu je použitý 7mm, 3,7V motorček na jednosmerný prúd, 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 častokrát 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 resp. otáčky motora sú riadené pomocou impulzovej šírkovej modulácie(PWM) a tieto impulzy do motoru prechádzajú cez N-kanálový mosfet PMV45EN2 od výrobcu Nexperia[13].



(a) Schéma zapojenia motorčeka.

(b) Motorček[14]

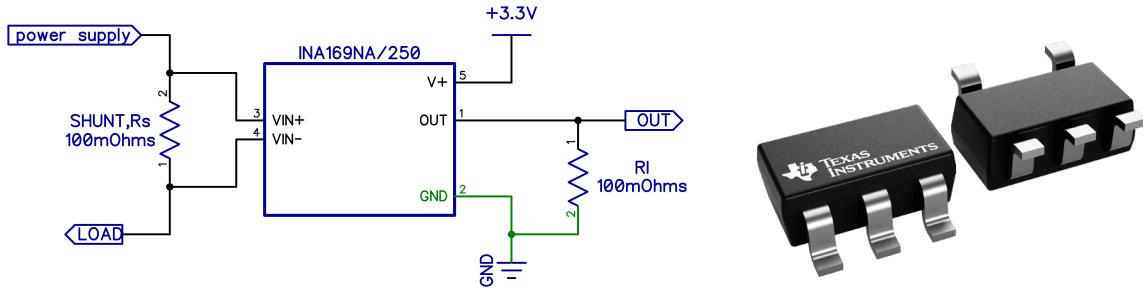
Obr. 2.4: akčný člen

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.2.7.b.

INA169 funguje na základe zaznamenávania zmien napäťia na stranách shunt rezistora obr.2.7.a. Na základe nameraného úbytku napäťia, vysiela senzor podľa nami zvoleného stupňa zosilnenia, prúd, ktorý je ďalej pomocou rezistoru R_l premenený na napätie s maximálnou hodnotou $V_{OUTMAX} = V_{IN-} - 0.5V$.

Prúd I_s odoberaný motorom, vypočítame pomocou vzorca $I_s = \frac{V_{OUT} \times 1k\Omega}{R_s \times R_l}$ kde V_{OUT} je napätie namerané na výstupe, $1k\Omega$ je konštanta vnútorných odporov senzoru, R_s je hodnota shunt rezistora v Ω a R_l je hodnota rezistora na výstupe, taktiež v Ω [15].



(a) Schéma zapojenia snímača prúdu.

(b) Senzor INA169NA/250[16]

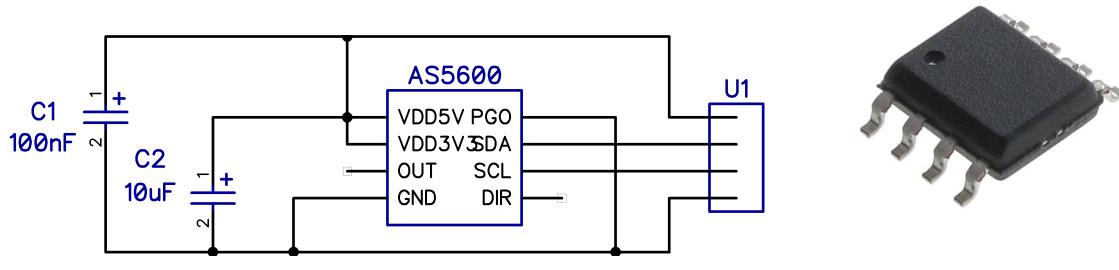
Obr. 2.5: meranie prúdu

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 opísť 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[17]. 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.2.6.b. Signály prichádzajúce zo snímača sa najprv zosilnia, následne sú filtrované a prechádzajú konverziou pomocou analógovo-digitálneho prevodníkom (ADC). Snímaná je aj intenzita magnetického poľa, ktorá sa ďalej používa na automatické riadenie zosilnenia(AGC), ktoré slúži na kompenzáciu teploty a veľkosti magnetického poľa.

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 umožnuje s vysokou presnosťou kontrolovať naklonenie kyvadla a na základe získaných informácií ovplyvňovať fungovanie akčného členu sústavy. Schéma zapojenia čipu na meranie uhlu môžeme vidieť na obr.2.6.a.



(a) Schéma zapojenia čipu na meranie uhlu.

(b) čip AS5600[18]

Obr. 2.6: meranie uhlu kyvadla

2.1.2 Schéma zapojenia

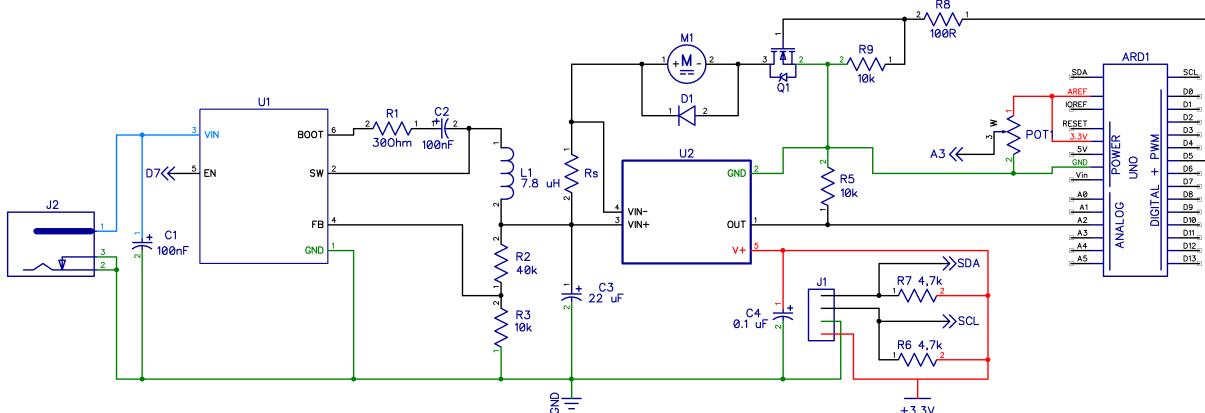
Všetky schémy zapojenia boli tvorené v bezplatnej verzii programu DipTrace. DipTrace slúži ako prostredie na tvorbu elektrotechnických schém, potrebných pre výrobu dosiek plošných spojov, ako aj pre účely prehľadnosti zapojenia komponentov na týchto doskách. Program v sebe zahŕňa časť pre tvorbu samotných komponentov, pokial sa tieto už nenachádzajú v niektornej z knižníc programu, časť kde sa tvoria schémy zapojenia a časť na tvorbu dosiek plošných spojov.

Nie všetky komponenty potrebné na tvorbu AeroShieldu boli zahrnuté v knižniciach DipTracu, avšak tieto komponenty sa nachádzali na stiahnutie na stránkach výrobcov odkiaľ boli importované do novej knižnice, slúžiacej na účely tvorby schémy AeroShieldu. Do programu bola taktiež vložená knižnica AutomationShieldu ktorá má v sebe najčastejšie používané komponenty. Pri tvorbe schémy zapojenia sa najskôr všetky potrebné komponenty umiestnia na štvorčekovú plochu a približne sa určí ich poloha. Jednotlivé komponenty majú podobu elektrotechnických značiek a každý komponent má ku sebe priradené reálne vlastnosti daného dielu (veľkosť, zapojenie, dĺžka pinov a iné).

Polohu volíme takú, aby schéma bola čo najprehľadnejšia a komponenty ktoré sú medzi sebou prepojené, boli čo najbližšie pri sebe. Akonáhle máme všetky komponenty uložené začneme s ich postupným prepájaním. Pri zapájaní jednotlivých komponentov sa riadime katalógovými listami jednotlivých komponentov, v ktorých býva zväčša aj návrh ich zapojenia.

Veľmi dobrú vlastnosťou programu DipTrace je možnosť zafarbovania jednotlivých elektrických spojení, rozličnými farbami a názvami. Tento fakt nám veľmi uľahčuje na prvý pohľad rozoznať napríklad elektrické spojenia zeme- 0V zelená, fázové spojenia- 3,3V červená obr.2.7. Na schéme zapojenia môžeme vidieť všetky komponenty, potrebné na správne fungovanie AeroShieldu. Názvy komponentov sú uvádzané základnými značkami

- R- Rezistor
- U- Mikročip
- M- Motor
- C- Kapacitor
- L- Cievka
- D- Dióda
- J- Konektor



Obr. 2.7: Schéma zapojenia AeroShieldu

2.1.3 Doska plošných spojov

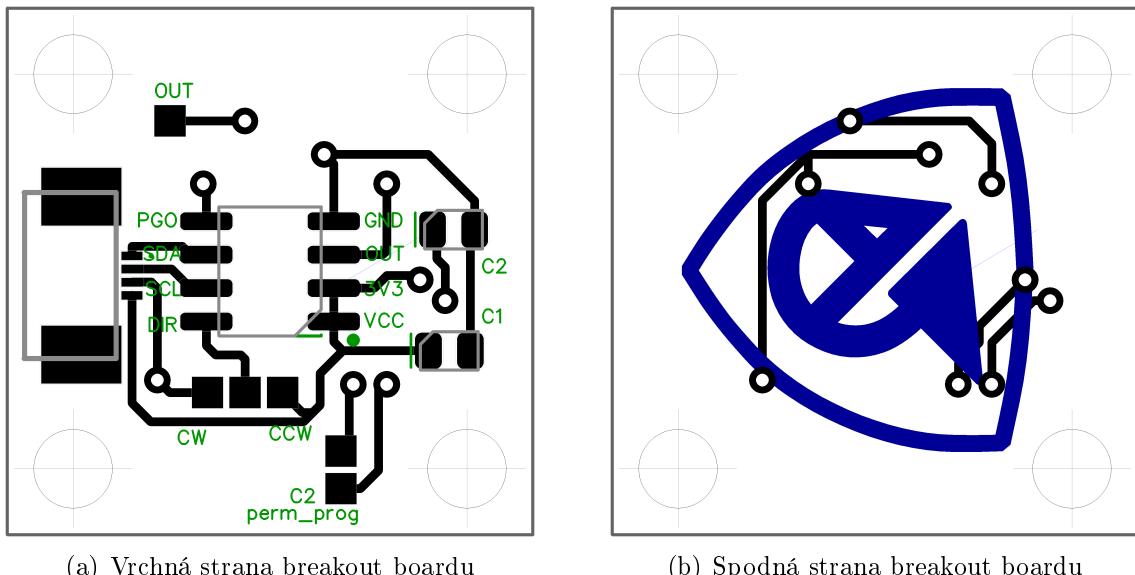
Po návrhu a kontrole schém zapojenia sa schémy dalej spracovávajú do podoby dosky plošných spojov. Schémy exportujeme do programu DipTrace PCB v ktorom máme následne niekoľko možností postupu. Jednotlivé komponenty sa nám už zobrazujú v reálnej podobe, takže vidíme ich veľkosť a rozmiestnenie pinov na pájkovanie.

Po prenesení schém do DipTrace PCB, sú jednotlivé komponenty rozhádzané a nemajú žiadne logické rozloženie. Program ponúka možnosť automatického zoradenia komponentov na vyhradenej ploche, avšak táto funkcia komponenty uložila nie podľa našich potrieb a teda, využili sme možnosť manuálneho umiestnenia jednotlivých komponentov. Pri pohybovaní jednotlivými komponentami môžeme vidieť čiary, ktoré symbolizujú prepojenia s ostatnými komponentami a vďaka tomu vieme komponenty logicky pouklať.

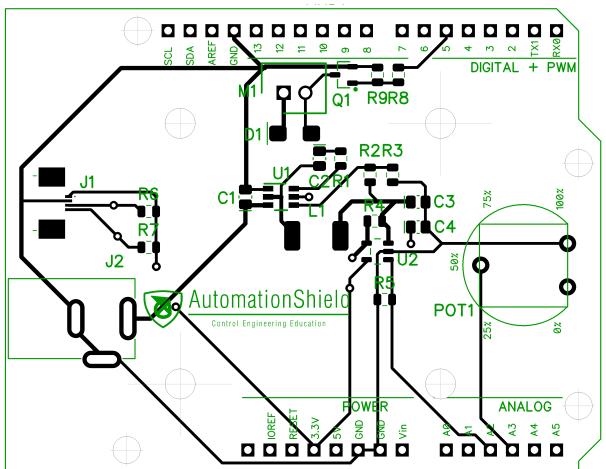
Po zvolení optimálneho rozmiestnenia komponentov treba jednotlivé piny poprepájať cestami, ktoré nám nahradzajú funkciu káblov. Máme možnosť zvoliť automatické rozmiestnenie ciest alebo ich manuálnu tvorbu. V našom prípade sme zvolili manuálnu tvorbu ciest, pretože ich vieme čo najlepšie optimalizovať.

Tvorba ciest má niekolko pravidiel, avšak najdôležitejšie z nich je že jednotlivé cesty ktoré v schéme zapojenia nie sú prepojené, sa nemôžu križovať inak dôjde k ich vzájomnému vyskratovaniu. Z toho dôvodu treba niekedy cestu priviesť na druhú stranu dosky plošných spojov kde v jej pokračovaní neprekáža iná cesta. Na tento účel sa používajú vodivé diery, takzvané via, spájajúce obe strany dosky.

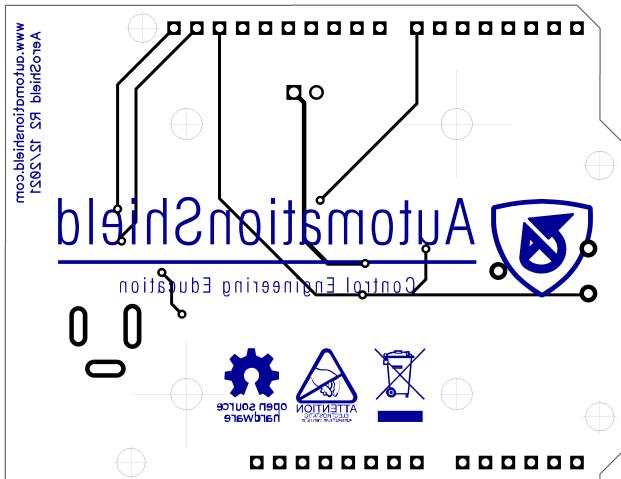
Pri výrobe dosky sa taktiež myšlelo na montáž držiaku kyvadla, pre ktoré boli vytvorené 4 diery na jeho následné prichytenie pomocou skrutiek. Finálna verzia hlavnej dosky je na obr.2.9. Zhotovená bola aj menšia doska tzv. breakout board, slúžiaca na meranie uhlu kyvadla, ktorá je na obr.2.8.



Obr. 2.8: Vedľajšia doska AeroShieldu- breakout board



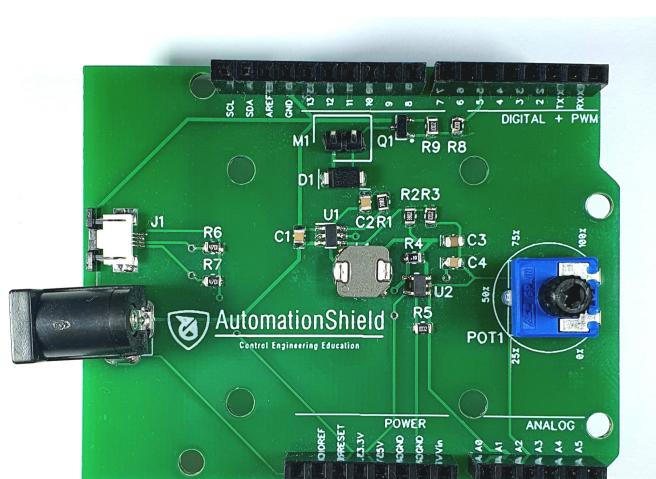
(a)



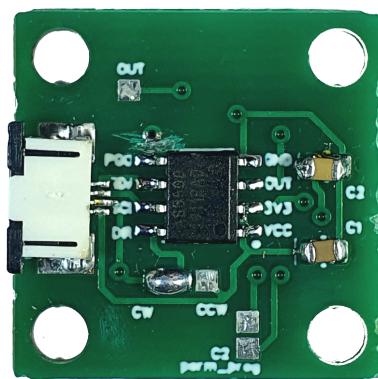
(b)

Obr. 2.9: (a) Vrchná strana AeroShieldu (b) Spodná strana AeroShieldu

Po finálnej kontrole zapojenia komponentov na doske plošných spojov môžeme tieto dosky uložiť do formátu gerber. Súbory typu gerber v sebe ukladajú presné zloženie finálnej dosky plošných spojov a to po jej jednotlivých vrstvách. Nachádza sa tu teda vrstva zobrazujúca vodivé cesty, vrstva pre konektory via, vrstva pre farebné popisy a mnoho ďalších. Pri tvorbe súboru máme veľa možností aké parametre jednotlivých vrstiev chceme zvoliť. Môžeme meniť hrúbky jednotlivých vrstiev, veľkosti dier a priestoru okolo dier, veľkosti konektorov via a iné. Gerber súbor ďalej posielame výrobcovi PCB dosiek kde si môžeme zvoliť ďalšie parametre dosky, ako jej farbu, možnosti pájkovacích doštičiek, dokonca nám môže výrobca poslať už napájkovanú dosku, ktorá je tak hneď pripravená na použitie. Podobu finálnej dosky AeroShieldu môžeme vidieť na obr.2.10.a a dosky breakout boardu na obr.2.10.b.



(a) Hlavná doska AeroShieldu



(b) Vedľajšia doska AeroShieldu

Obr. 2.10: Dosky plošných spojov AeroShieldu

2.2 Software

fgdfgbh

3 Didaktické príklady

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] Fanavarjan Sharif. Aero pendulum control system (pr22). Store. Online., 2021. 2021, <https://www.zoodel.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.motioncontrolltips.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] Pmv45en2. shop. Online., 2021. 2021, <https://www.nexperia.com/products/mosfets/small-signal-mosfets/PMV45EN2.html>.
- [14] 7mm diameter 720 coreless motor for quadcopter. shop. Online., 2021. 2021, <https://www.elecrow.com/7mm-diameter-720-coreless-motor-for-quadcopter.html>.
- [15] SHAWN HYMEL. Ina169 breakout board hookup guide. article. Online., 2021. 2021, <https://learn.sparkfun.com/tutorials/ina169-breakout-board-hookup-guide/all>.
- [16] Ina169na/250. store. Online., 2021. 2021, <https://www.ti.com/store/ti/en/product/?p=INA169NA/250>.
- [17] The Editors of Encyclopaedia Britannica. Hall effect. article. Online., 2021. 2021, <https://www.britannica.com/science/Hall-effect>.
- [18] Halluv 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>.