

Česká vysoká škola technická v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Model vzducholodi na elektrický solární pohon

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Jan Němeček
Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.
Rok: Praha, 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Němeček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457113**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Model vzducholodi na elektrický solární pohon

Název bakalářské práce anglicky:

Airship Model on Solar Drive

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se problematiky řízení modelů letadel lehčích vzduchu. Zaměřte se speciálně na řešení řídicího systému, sběr dat ze základních senzorů kontrolujících parametry letu a jejich využití pro vedení letu.
2. Na základě 1) navrhnete a realizujete řídicí systém umožňující řízení letu modelu letadla lehčího vzduchu.
3. Navrhnete postup vhodný pro ověření funkce přístroje.
4. Proveďte ověřovací měření na zařízení.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.
6. Publikování výsledků dosažených v této práci je možné pouze se svolením zadavatele.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Husák, M.: Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia, Praha 2008.
- [2] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I.-III. Ben, Praha 1996 a pozdější vydání.
- [3] Katalogové listy součástek a aplikační poznámky výrobců.
- [4] Předášky k předmětu Mikrokontroléry, ČVUT FEL, Praha 2017.
- [5] Literatura k předmětu Průmyslová elektronika. ČVUT FEL, Praha 2017.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.01.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 25. 5. 2018

.....
Jan Němeček

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky, především trpělivost a vedení při vzniku této práce. Poté bych také rád poděkoval své rodině za podporu při celém studiu a to především mému bratrovi a mé přítelkyni za pomoc při opravě chyb v této práci.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o návrhu a konstrukci modelu malé říditelné vzducholodě se solárním dobíjením akumulátoru a vodíkovým plněním balónu. Pro výrobu vodíku byl vytvořen elektrolyzátor vody s řídicí jednotkou. Dále bylo uskutečněno měření statického tahu a odebíraného proudu na přiloženém napětí za účelem zjištění chování pro výběr vhodného motoru a vrtule k pohonu vzducholodi. Hlavní část práce byla tvořena návrhem a konstrukcí řídicí jednotky pro vzducholodě, s aplikací určitých senzorů, možnosti solárního dobíjení akumulátoru, ovládání motorů a bezdrátového řízení. Poté bylo uskutečněno ověřovací měření důležitých částí zapojení. Měření bylo provedeno pro solární dobíjení, pro zjištění závislosti dobíjení na intenzitě osvětlení, dále stabilizační vlastnosti použitých měničů napětí, jako poslední bylo ověřeno fungování sériových sběrnic a ovládání H-můstků pomocí PWM signálů. Na závěr byla sestavena konstrukce pro upevnění balónu se solárním článkem, řídicí jednotkou a následně vyzkoušen let.

Klíčová slova

Vzducholodě, Elektrolyza vody, Solární nabíjení, Nosné plyny, Senzory, Vodík

Abstract

This Bachelor thesis deals with concept of design and creation of the controllable airship model with solar charging and hydrogen filling. Hydrogen was produced with homemade water electrolyzer with the control unit. Further on, the measurement of static thrust and current on supply voltage, was carried out to establish behavior and to select ideal motors and propellers for the airships drive. The main part of thesis deals with creation of design and construction of the airships control unit with application of sensors, the solar charging of the battery, control of motors and use of wireless communication for the unit control. Then, the measurement of verification of functionality was established for the main parts of the design. The measurement was conducted on the solar charging system to establish characteristic of intensity of light on charging current. Further on main characteristics of stabilization of used converters was measured. Then, functionality of serial communication and pwm control of H-bridges was verified. At last the final construction was made for attachment of the control unit and the balloon with solar cells so that flight could be tested.

Keywords

Airship, Electrolysis of water, Solar charging, Carrier gases, Sensors, Hydrogen

Obsah

Abstrakt	5
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Seznam symbolů	10
1 Úvod	11
1.1 Cíle práce	11
2 Vzducholod'	12
2.1 Historie	12
2.2 Princip letu	12
2.2.1 Nosnost plynů	12
2.3 Kartáčový stejnosměrný motor	14
2.3.1 Základní konstrukční uspořádání	14
2.3.2 Základní princip fungování	14
2.3.3 Způsoby řízení otáček	15
2.4 Vrtule	16
2.5 Solární články	17
2.6 Řídicí jednotka	18
2.6.1 Mikrokontrolér	18
2.6.2 Sběrnice pro sériový přenos dat	19
2.6.3 Senzory	20
2.6.4 Bluetooth	22
2.7 Tvar a konstrukce balónu vzducholodí	22
3 Výroba vodíku pomocí elektrolýzy vody	23
3.1 Alkalická elektrolýza vody	23
3.2 Vlastní konstrukce elektrolyzéro	24
3.3 Řídicí jednotka pro elektrolyzér	24
3.3.1 Blokové schéma a základní popis zapojení	25
3.3.2 Realizace zapojení	26
3.3.3 Řídicí program	26
3.3.4 Ověření funkčnosti zařízení	26
3.4 Zhodnocení	27

4	Výběr vhodného motoru a vrtulí	28
4.1	Měřené motory a vrtule	28
4.2	Měření parametrů motorů a vrtulí	29
4.2.1	Výsledky měření	30
5	Návrh řídicí jednotky pro vzducholod	33
5.1	Popis zapojení	33
5.1.1	Vstup solárních panelů a napájení pro dobíjení	33
5.1.2	Obvod nabíjení akumulátoru	34
5.1.3	Obvod akumulátoru	35
5.1.4	Zapojení spínaného 5 V stabilizátoru	35
5.1.5	Zapojení spínaného 3,3 V stabilizátoru	36
5.1.6	Zapojení Ultrazvukového senzoru vzdálenosti	36
5.1.7	Zapojení H-můstků	37
5.1.8	Zapojení I ² C sběrnice	37
5.1.9	Zapojení UART sběrnice	39
5.1.10	Zapojení infračervených senzorů	40
5.1.11	Zapojení mikrokontroléru	40
5.1.12	Realizace zapojení	41
5.2	Řídicí program	42
5.3	Ověření funkčnosti zařízení	42
5.4	Zhodnocení	46
6	Celková konstrukce vzducholodi	47
7	Závěr	48
	Literatura	49
	Přílohy	51
A	Návrh řídicí jednotky pro elektrolyzér	51
B	Výsledky měření motorů a vrtulí	57
B.1	Motory	57
B.2	Vrtule	59
C	Návrh řídicí jednotky pro vzducholod	61
D	Celková konstrukce	64

Seznam obrázků

2.1	Princip Archimédova zákona ve vzduchu	13
2.2	Vnitřní struktura kartáčového stejnosměrného motoru	15
2.3	Princip fungování stejnosměrného motoru	15
2.4	Princip pulzně šířkové modulace	16
2.5	Princip pohybu vrtule za letu	17
2.6	Základní struktura křemíkového fotovoltaického článku	18
2.7	Příklad voltampérové charakteristiky fotodiody	18
2.8	Příklad vnitřního blokového schématu mikrokontroléru	19
2.9	Zapojení sběrnice I ² C	19
2.10	I ² C přenos dat - zápis dat do SLAVE	20
2.11	Zapojení UART sběrnice	20
2.12	Struktura modelu absolutního akcelerometru	21
2.13	Princip ultrazvukového měření vzdálenosti	21
2.14	a) Typický tvar balonu vzducholodi b) Moderní tvar balonu - Vzducholod Lockheed Martin P-791	22
3.1	Model elektrolyzéry vody	23
3.2	Vlastní konstrukce elektrolyzéry	24
3.3	Blokové schéma řídicí jednotky pro elektrolyzér	25
3.4	Řídicí jednotka pro elektrolyzér	26
3.5	Ukázka výstupních dat z řídicí jednotky zobrazených a) na displeji řídicí jed- notky b) na počítači poslaných přes UART-USB	27
4.1	Testované motory	28
4.2	Testované vrtule	29
4.3	Použité zapojení pro měření konstanty motoru	30
4.4	Použité zapojení optické závory	30
4.5	Graf změřené závislosti pro motory a) statického tahu b) proudu na napětí .	31
4.6	Graf změřené závislosti pro vrtule a) statického tahu b) proudu na napětí . .	32
5.1	Blokové schéma zapojení řídicí jednotky pro vzducholod	33
5.2	Zapojení obvodu TS2940CW-5.0 pro stabilizaci napětí ze solárních panelů . .	34
5.3	Zapojení obvodu pro vstup napájecího napětí pro obvod nabíjení akumulátoru	34
5.4	Zapojení obvodu pro nabíjení akumulátoru MCP73833	35
5.5	Zapojení obvodu s akumulátorem	35
5.6	Zapojení obvodu spínaného měniče MCP1640BT stabilizujícího napětí na 5 V	36
5.7	Zapojení obvodu spínaného měniče NCP1529 stabilizujícího napětí na 3,3 V .	36

5.8	Zapojení ultrazvukového senzoru HC-SR04	37
5.9	Zapojení H-můstku DRV8833 do obvodu	38
5.10	Zapojení obvodů využívající I ² C sběrnici	38
5.11	Orientace os akcelerometru vzhledem k jeho pouzdru	39
5.12	Zapojení obvodů využívající UART sběrnici	39
5.13	Bluetooth modul HC-05	40
5.14	Zapojení infračervených senzorů do obvodu	40
5.15	Zapojení mikrokontroleru PIC18F45K22 do obvodu	41
5.16	Řídicí jednotka pro vzducholodě	42
5.17	Vývojový diagram řídicího programu pro ovládání vzducholodě	43
5.18	Závislost napětí a proudu dodané solárním panelem do obvodu v závislosti na intenzitě osvětlení	44
5.19	Ukázka změřeného průběhu sběrnice I ² C	44
5.20	Změřený průběh průběh PWM signálu na vstupu (žlutý) a výstupu (červený průběh) H-můstku	45
5.21	Příklad výstupu dat z řídicí jednotky zobrazených na ovládacím zařízení	45
6.1	Konstrukce varianty A a) za letu b) detail uchycení	47

Seznam tabulek

2.1	Hustoty a nosnosti nosných plynů	13
4.1	Základní parametry měřených motorů	28
4.2	Základní parametry měřených vrtulí	29
4.3	Naměřené parametry motorů	31
4.4	Naměřené parametry vrtulí	32
5.1	Režimy řízení polovičního H-můstku obvodu DRV8833	37
5.2	Naměřené parametry spínaných měničů v použitém zapojení	44
6.1	Hmotnostní bilance sestavování vzducholodě	47

Seznam symbolů

A	(kgC^{-1})	Elektrochemický ekvivalent
\mathbf{B}	(T)	Magnetická indukce
D	(m)	Průměr vrtule
d		Vzdálenost
E	(J)	Energie
\mathbf{F}	(N)	Síla
F_g		Gravitační síla
F_{vz}		Vztlaková síla
g	(ms^{-2})	Gravitační zrychlení
h	(Js)	Planckova konstanta
I	(A)	Elektrický proud
I_a		Elektrický proud vinutím
k	(Vs)	Konstanta motoru
l	(m)	Délka vodiče
m	(kg)	Hmotnost vyloučení látky
m_n		Hmotnost plynu
n_s	(Hz)	Otáčky vrtule
Q	(C)	Elektrický náboj
R	(Ω)	Elektrický odpor
R_a		Odpor vinutím
t	(s)	Doba letu
U	(V)	Elektrické napětí
U_i		Indukované napětí
V	(m^3)	Objem tělesa
v_s	(ms^{-1})	Rychlost vzduchu
ν	(Hz)	Frekvence
ρ_v	(kgm^{-3})	Hustota vzduchu
ρ_k		Hustota tekutiny
ρ_t		Nosného plynu
Ω	(ot./min)	Otáčky motoru
PWM		Pulzně šířková modulace
DPS		Deska plošných spojů
MPPT		Sledování maximálního bodu výkonu
I ² C		Sběrnice pro sériový přenos dat
UART		Sběrnice pro sériový přenos dat

1 Úvod

V dnešní době zažívají vzducholodě nový zrod. Hlavní myšlenkou budoucnosti je tvorba obřích vzducholodí k přepravě velkých nákladů na velké vzdálenosti s nízkou energetickou náročností, popřípadě úplnou soběstačností poskytnutou solárními panely. Jejich využití bylo převážně pro dopravování nákladů do těžce dosažitelných míst. Nosnost takových vzducholodí se v současnosti pohybuje kolem pěti set tun [1].

Tvorba těchto vzducholodí však může být velice komplikovaná i cenově náročná, a to také z důvodu vysoké ceny helia, která právě s plány vzniku nových vzducholodí roste. Čímž se obecně komplikuje i tvorba malých vzducholodí, například za účelem sběru dat ze senzorů. Proto vznikla myšlenka tvorby vodíkem plněné vzducholodi, která by byla co nejmenší, aby bylo riziko z možného výbuchu dostatečně malé. Obecně z vodíku u lidí panuje značná panika. Tato práce by však měla ukázat, že pro aplikaci dostatečně malého letadla lehčího než vzduch, je tato varianta značně levnější, dostatečně bezpečná, a i přesto umožňuje použití celé řady senzorů pro sběr dat, případně ji lze využít k přepravě malého nákladu nebo pro jiné aplikace.

1.1 Cíle práce

Cílem práce je sestavení modelu malé říditelné vzducholodě se solárním dobíjením akumulátoru a vodíkovým plněním balónu. Samotná práce se tedy musí dělit na několik dílčích částí, jež je nutné uskutečnit pro fungování celkového návrhu. Některým částem je pak věnováno více nebo méně prostoru podle samotného zadání práce, protože se obecně jedná o velice rozsáhlé téma. Nejdůležitější částí práce je tvorba řídicí jednotky pro vzducholod s dostatečně malou hmotností a možností dobíjení solárními panely, kterou se bude dát ovládat řízení letu a bude probíhat sběr dat ze senzorů. Další části práce se zabývají samotnou výrobou vodíku pro plnění balónu, výběru vhodných motorů a vrtulí. V neposlední řadě celkové konstrukci, kde je nutné vyřešit uchycení řídicí jednotky, solárních článků, balónu a motorů. Poté vyzkoušet s vytvořenou konstrukcí samotný let a funkčnost sestavené řídicí jednotky.

2 Vzducholod'

Tato kapitola se zabývá teoretickým popisem základních prvků a teorií jejich fungování pro potřeby sestavení modelu malé říditelné solární vzducholodi.

Obecně se vzducholodě dají definovat jako letadla lehčí než vzduch. Zpravidla se jedná o říditelný uzavřený balón plněný plynem s nižší hustotou než vzduch. Pro samotné udržení plavidla ve vzduchu by ideálně neměl být potřeba přídavný pohon, čímž se primárně liší od klasických letadel.

2.1 Historie

Vznik vzducholodí lze datovat do druhé poloviny 19. století. Jejich hlavní využití a největší rozvoj nastal na začátku 20. století, a to především za účelem přepravy osob a následně k vojenským účelům za 1. světové války. Poté byly hojně využívány až do roku 1937, kdy se stala nehoda dopravní vzducholodi Hindenburg. Důvod nehody spočíval v explozi vodíku, kterým byla vzducholod' naplněna. Ten se po nehodě nahradil podstatně dražším, ale bezpečnějším heliem, i přesto se však vývoj vzducholodí prakticky zastavil. Hlavní příčinou však byla ztráta uplatnění, vlivem rozvoje letadel a vrtulníků. Drobné využití v druhé polovině 20. a začátkem 21. století přeci jen nalézaly, a to především v armádních aplikacích jako hlídkové letouny, které dokázaly vydržet až několik desítek hodin ve vzduchu [1].

2.2 Princip letu

Aby bylo možné docílit letu vzducholodi je nutné užití plynu lehčího než vzduch. Plyny, které splňují tuto podmínku se nazývají nosná media. Vyznačují se nižší hustotou než má vzduch a z tohoto důvodu za normálních podmínek ve vzduchu stoupají vzhůru díky platnosti Archimédova zákona, jenž je popsán rovnicí

$$F_{vz} = V\rho_k g, \quad (2.1)$$

kde těleso ponořené do tekutiny, je nadlehčováno silou F_{vz} , která je přímo úměrná objemu V ponořené části tělesa, hustotě tekutiny ρ_k a gravitačnímu zrychlení g . Z toho vyplývá, že dochází k vytlačování nosného plynu uzavřeného v balónu vzhůru, a to až do místa, kde gravitační síla působící na balon je rovna síle vztlakové.

2.2.1 Nosnost plynů

Pro použití plynů pro vznášení objektů, bylo důležité znát nosnost plynu, kterou lze definovat jako hmotnost, jenž daný plyn uzavřený v daném objemu je schopný nadnášet.

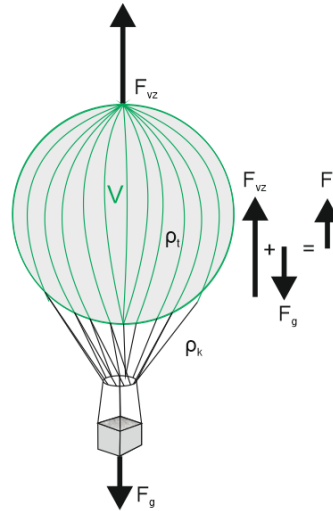
Tato veličina se dá vyjádřit upravením z rovnice

$$F = F_g - F_{vz}, \quad (2.2)$$

kde F je výsledná síla působící na soustavu, která je dána rozdílem síly gravitační F_g a vztlakové F_{vz} . Tento princip je ukázán na Obr. 2.1. Pro vyjádření nosné hmotnosti bylo nutné rovnici upravit na požadovaný tvar

$$m_n = V(\rho_v - \rho_t), \quad (2.3)$$

kde m_n je hmotnost, kterou daný plyn uzavřený v objemu V je schopen nadnášet. Ta je přímo úměrná rozdílu hustot vzduchu ρ_v a nosného plynu ρ_t . V menších nadmořských výškách lze považovat hustotu vzduchu za konstantní a to přibližně $\rho_v = 1,275 \text{ kgm}^{-3}$ [2].



Obrázek 2.1: Princip Archimédova zákona ve vzduchu [2]

Nejznámější používané nosné plyny jsou hélium, ohřátý vzduch a vodík. Další nosné plyny, které se však nepoužívají pro vzduchoplavbu jsou například svítiplyn či metan. V tabulce 2.1 jsou příklady jednotlivých plynů se svými hustotami za normálního tlaku a jejich nosností v kg při objemu 1 m^3 [3].

Tabulka 2.1: Hustoty a nosnosti nosných plynů

Plyn	Hustota (kg/m^3)	Nosnost (kg) při objemu 1 m^3
vodík	0,089	1,185
helium	0,179	1,096
svítiplyn	0,645	0,632
metan	0,717	0,557
ohřátý vzduch (100°C)	0,945	0,331

Vodík

Jedná se o nejlehčí a nejjednodušší prvek tvořící molekuly plynu H_2 . Vodík je velmi hořlavý, vznětlivý a ve směsi s kyslíkem za určitých podmínek exploduje. Je bezbarvý, bez chuti a zápachu. Způsobuje silnou korozi kovů. Průmyslově se vyrábí elektrolýzou vody. Vzhledem k malé velikosti jeho molekul se obtížně skladuje [3].

Helium

Jedná se o vzácný plyn, bez chuti a zápachu, který je zcela nehořlavý, tudíž bezpečný a vhodný pro vzduchoplavectví. Je přibližně o 8 % těžší než vodík. Hlavní nevýhodou proti vodíku je vyšší cena. Získává se frakční destilací zemního plynu [3].

2.3 Kartáčový stejnosměrný motor

Pro ovládání vzducholodě za letu je potřeba použít motory. Tato kapitola se zabývá popisem teorie stejnosměrných kartáčových motorů, které byly použity v modelu vzducholodě.

Stejnoseměrný kartáčový motor se skládá ze statoru, rotoru, komutátoru a u velkých provedení těchto motorů i budícího vinutí. Samotná konstrukce a chování těchto motorů se může různými provedeními mírně lišit, proto dále v textu bude hovořeno pouze o malém nízko výkonném provedení bez budícího vinutí.

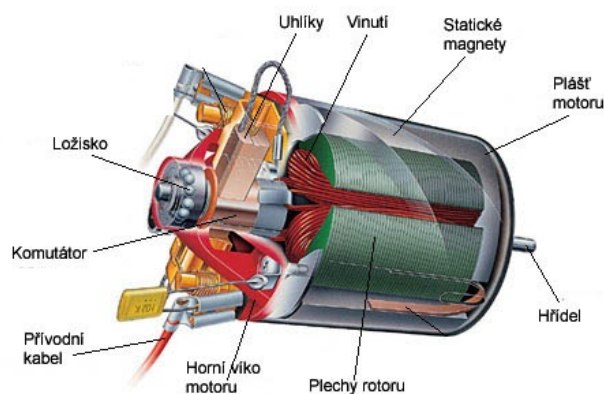
2.3.1 Základní konstrukční uspořádání

Základní vnitřní konstrukční uspořádání motoru můžeme pozorovat na Obr. 2.2, ze kterého je patrné rozdělení na dvě hlavní části. A to na stator a rotor. Stator, jak už jeho název napovídá, se nehýbe, tudíž je součástí kostry motoru, na kterou se zpravidla přidělají permanentní magnety se střídajícími se magnetickými póly. Rotor, tedy pohyblivá část, bývá konstruován z hřídele, z níž vystupují obvykle tři a více pólových nástavců, kolem kterých je navinut měděný vodič, jehož oba konce jsou přivedeny k zadní části hřídele, kde je přidělán komutátor. Ten je zpravidla tvořen vzorkem opakujících se vodivých destiček o stejném počtu, jako je pólových nástavců, k nimž jsou připojeny vodiče vinutí, kde každá ploška reprezentuje jeden pólový nástavec. Na komutátor pak doléhají dva uhlíky umístěné proti sobě. Ty jsou trvale umístěny ke kostře motoru a k jejich konci jsou přidělané přívodní vodiče pro napájení motoru. Na rotoru se navíc nachází, v přední a zadní části hřídele, ložiska minimalizující ztráty způsobené třením [5].

2.3.2 Základní princip fungování

Při připojení motoru ke zdroji napětí, začne vinutím protékat proud. Na vinutí tak začne působit magnetické pole silou v daném místě dle rovnice

$$F_v = BIl, \quad (2.4)$$

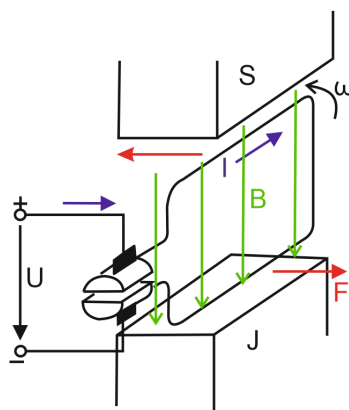


Obrázek 2.2: Vnitřní struktura kartáčového stejnosměrného motoru (převzato z [4])

kde B je magnetická indukce v místě, kde se vodič nachází, l je délka vodiče a I proud protékající vodičem. Směr síly se dá určit pomocí pravidla levé ruky. Směry působení jednotlivých veličin pak můžeme pozorovat na Obr. 2.3. Z obrázku lze vysledovat, že jednotlivé síly v daných místech vytvářejí moment, který ve stejném směru působení síly otáčí rotorem motoru. Při pohybu vinutí v magnetickém poli permanentních magnetů statoru se začne ve vinutí indukovat napětí, které působí proti příčině svého vzniku, tedy proti pohybu způsobeným napájecím napětím, vyvolaným protékajícím proudem. Pro výsledné napětí platí rovnice

$$U_i = U - R_a I_a = k I_a \Omega, \quad (2.5)$$

kde U_i je indukované napětí v motoru, U svorkové napětí, R_a odpor vinutí, I_a proud procházející vinutím, Ω otáčky a k konstanta motoru, která je dána konstrukcí a magnetickými vlastnostmi motoru [5].



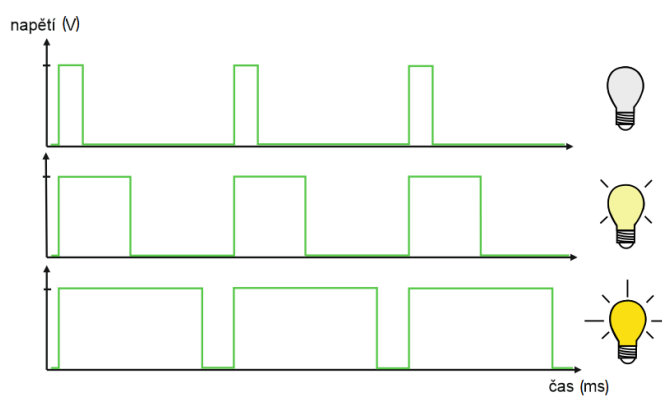
Obrázek 2.3: Princip fungování stejnosměrného motoru [5]

2.3.3 Způsoby řízení otáček

Řízení otáček malovýkonových kartáčových stejnosměrných motorů může být lineární nebo pulzní.

Lineární řízení spočívá v rozdělení napájecího napětí mezi motor a proměnný rezistor, popřípadě tranzistor nebo jiný regulační prvek. Hlavní nevýhody jsou velké ztráty i při nízkých otáčkách motoru, naopak výhody jsou jednoduchá elektronika, nízká cena nebo malé elektromagnetické rušení [6].

Pulzní regulace otáček spočívá v pulzním dodávání napájecího napětí. Frekvence je celou dobu konstantní, mění se pouze střída tedy šířka pulzu v logické jedna ku periodě celého pulzu. Zátěž pak pracuje se střední hodnotou signálu. Tomuto způsobu řízení se obecně říká pulzně šířková modulace PWM tedy Pulse Width Modulation. Princip ovládání výkonu do zátěže je ukázán na Obr. 2.4, ze kterého je patrná závislost, kdy s rostoucí střídou roste i výkon dodaný do zátěže. Obecnými výhodami jsou nízké ztráty výkonu a vysoká účinnost. Velká nevýhoda je generování značného elektromagnetického rušení [6].



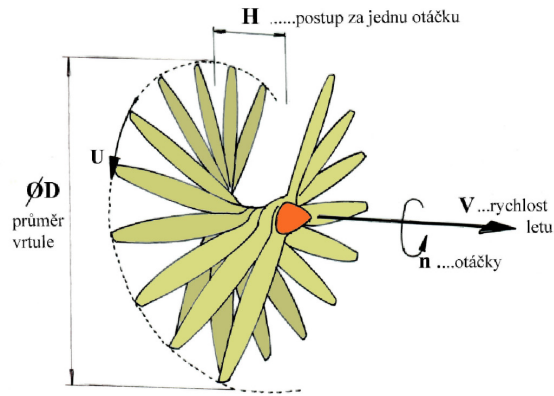
Obrázek 2.4: Princip pulzně šířkové modulace

2.4 Vrtule

Aby použité motory vyvolaly tah nutný pro řízení, je nezbytné použití vrtule. Ta lze definovat jako mechanický prvek sloužící k přeměně rotační energie dodané motorem na tah či naopak. Vrtule musí mít správný aerodynamický tvar a rozměry k co nejvyšší účinnosti, aby vytvářela co největší reakční síly. Během letu vykonává vrtule pohyb, který je vektorovým součtem rotačního a posuvného pohybu, kdy dochází k jejímu postupnému zavrtávání do vzduchu, což je ukázáno na Obr. 2.5 [7].

Velice důležitá veličina pro popis vrtule je dynamický tah, jehož je vrtule schopna dosáhnout s daným motorem. Dynamický tah popisuje celkové chování vrtule za letu. Jedná se o sílu, která je závislá na aerodynamických vlastnostech vrtule, rychlosti letu a větru, a tím i celkové účinnosti vrtule během letu. Hlavní nevýhoda spočívá v obtížnosti jejího měření. Na rozdíl od ní lépe měřitelná, ale také méně vypovídající veličina se nazývá statický tah. Ten popisuje maximální možný tah svisle vzhůru při nulové dopředné rychlosti motoru s vrtulí. Je tedy vyšší než tah dynamický vlivem neuplatnění odporu prostředí.

Mezi hlavní parametry vrtule patří její průměr, počet listů, profil listu a hmotnost. Tyto



Obrázek 2.5: Princip pohybu vrtule za letu (převzato z [7])

vlastnosti výrazně ovlivňují její chování, a tím jsou ovlivněny některé parametry, jako například součinitel výkonu C_p a tahu C_t , které jsou charakteristické pro jednotlivé vrtule. Pro tah T v závislosti na součiniteli tahu platí vztah

$$T = C_t \rho n_s^2 D^4, \quad (2.6)$$

kde D je průměr vrtule, n_s otáčky vrtule, ρ hustota vzduchu [8].

2.5 Solární články

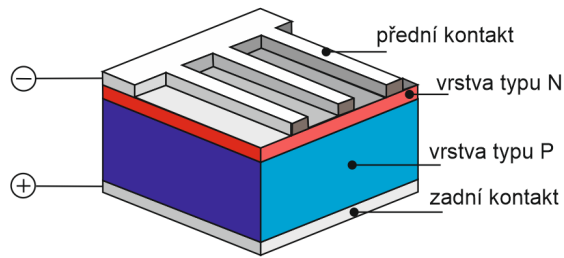
Solární či fotovoltaický článek lze charakterizovat jako elektrické zařízení, které převádí světelnou energii přímo na elektrickou energii pomocí vnitřního fotoelektrického jevu. Jedná se prakticky o fotodiodu zapojenou ve fotovoltaickém režimu.

K fotoelektrickému jevu dochází za předpokladu, že elektromagnetické záření považujeme jak za vlnění, tak i za částici tedy, že nevydává energii spojitě, ale po částech neboli po kvantech. Jedno kvantum se nazývá foton. Energie jednoho fotonu E je přímo úměrná frekvenci záření ν a Planckově konstantě h , což je popsáno rovnicí [9]

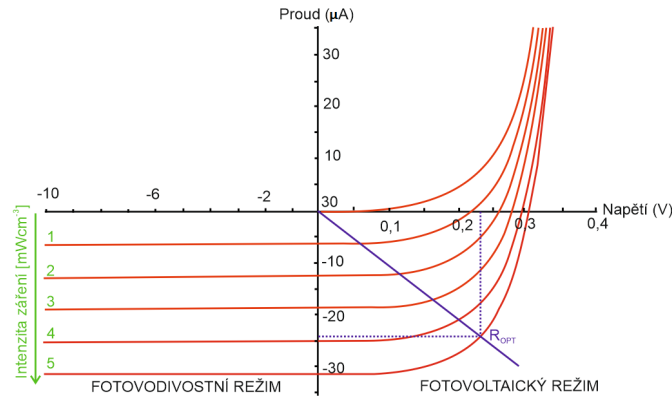
$$E = \nu h. \quad (2.7)$$

K vnitřnímu fotoelektrickému jevu pro fotodiodu dochází při dopadu kvanta záření do oblasti prostorového náboje PN přechodu, o dostatečné energii, která musí být větší než energie zakázaného pásu použitého polovodiče. Při dopadu dojde k absorbování energie v oblasti prostorového náboje diody, to způsobí přechod valenčních elektronů z valenčního pásu, které oblast prostorového náboje separuje, a tím dochází ke generaci fotoproudu nebo fotonapětí. Základní konstrukce fotovoltaického křemíkového článku je ukázána na Obr. 2.6 [10].

Pro použití fotodiody jako solárního článku je nutno ji provozovat ve 4. kvadrantu její voltampérové charakteristiky Obr. 2.7, tedy v tak zvaném fotovoltaickém režimu. Pro dosažení maximální využitelnosti výkonu dodaného solárním článkem se používají speciální měniče s funkcí sledování maximálního bodu výkonu MPPT. [9].



Obrázek 2.6: Základní struktura křemíkového fotovoltaického článku [9]



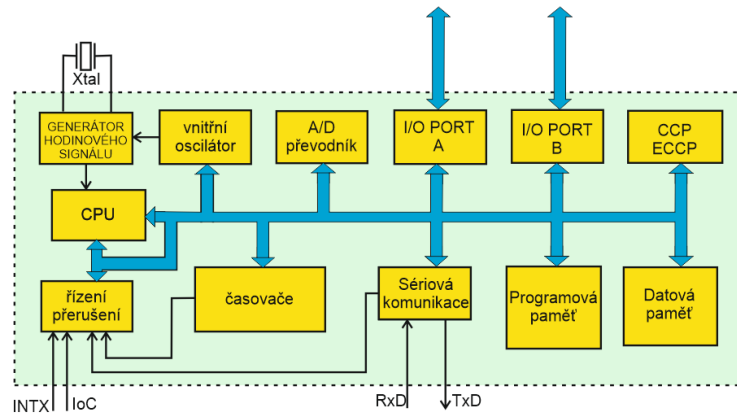
Obrázek 2.7: Příklad voltampérové charakteristiky fotodiody [9]

2.6 Řídicí jednotka

Pro kontrolu motoru a dorozumění modelu malé vzducholodi s okolním světem, potřebuje obsahovat nějakou formu řídicí jednotky. Zpravidla se bude jednat o jednotku řízenou mikrokontrolerem či mikroprocesorem s externími periferiemi, které tvoří například senzory či nějaký druh komunikačního zařízení.

2.6.1 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér neboli jednočipový počítač je samostatný integrovaný obvod obsahující veškeré potřebné periferie k vlastní činnosti jako například programovou paměť, případně vnitřní oscilátor. Jedná se tedy o velmi univerzální a jednoduše aplikovatelný obvod, jehož funkce je dána nahraným programem. Nevýhody jsou pomalejší rychlost a vyšší cena. Příklad vnitřního uspořádání ukazuje Obr. 2.8, kde lze pozorovat hlavní bloky tvořící mikrokontrolér jako procesorový blok tvořený aritmeticko-logickou jednotkou k vykonávání operací, dále paměti, oscilátor, vstupně výstupní porty, časovače atd. Dále obsahuje i specifické periferie například pro ovládání sběrnic pro sériový přenos dat, analogově digitální převodníky, případně i moduly pro generování pulzně šířkové modulace CCP. Samotné mikrokontroléry se mezi sebou liší především typem architektury. Ty se dělí na Harvardskou, von Neumannovu nebo modifikovanou Harvardskou. Dále se liší typem instrukční sady na CISC a RISC nebo velikostí sběrnice, počtem vstupně výstupních portů a rychlostí [6].



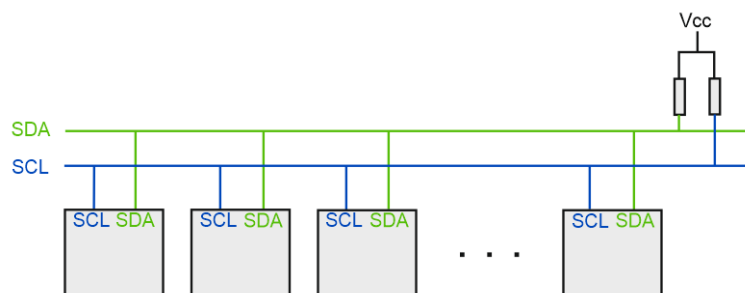
Obrázek 2.8: Příklad vnitřního blokového schématu mikrokontroléru [11]

2.6.2 Sběrnic pro sériový přenos dat

Slouží pro digitální komunikaci mezi senzory, periferiemi a mikrokontrolérem. Příkladem těchto sběrnic jsou SPI, I²C, 1-wire a USART.

I²C

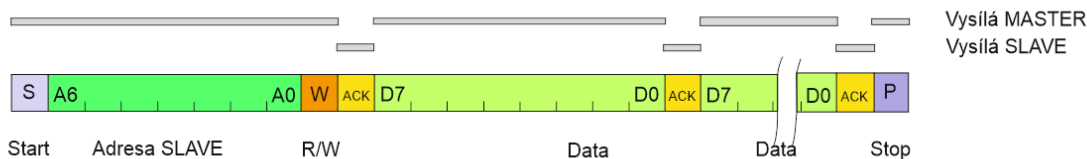
Jedná se o sériovou sběrnicí typu multimaster, lze ji tedy kontrolovat více než jedním řídicím zařízením. Ty se ve sběrnici dělí na MASTER, tedy řídicí obvody a SLAVE zařízení, ty jsou řízeny a samy neřídí sběrnicí. Každé připojené zařízení musí mít vlastní adresu o délce 7 nebo 10 bitů, aby bylo možné rozpoznat komu jsou odeslaná data určena. Zapojení sběrnic je ukázáno na Obr. 2.9, ze kterého je patrné spojení dvěma vodiči, tedy SDA, který slouží k vlastnímu přenosu dat a SCL, jenž se stará o hodinový signál. Tento typ obvodu je konstruován jako zapojení s otevřeným kolektorem a z toho důvodu bylo nutné oba vodiče připojit přes rezistor k napájení. Metodu detekce kolize spočívá v tom, že každé zařízení může zahájit vysílání pouze tehdy, je-li sběrnice předtím v klidovém stavu, to znamená oba vodiče v úrovni high, tedy log. 1 [6].



Obrázek 2.9: Zapojení sběrnic I²C [6]

Během každého přenosu dochází k vyslání podmínky start a následně k vyslání adresy příjemce. Poté následuje jeden bit R/W, tedy buď zápis nebo čtení. Následně musí přijímací stanice potvrdit ACK bitem, tedy potvrzovací bit. Poté jsou data přenášena podle předem určeného bitu R/W, po každém odeslaném bitu následuje potvrzení ACK bitem. Přenos se

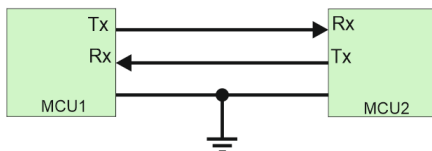
ukončuje podmínkou STOP. Příklad přenosu je ukázán na Obr. 2.10 [6].



Obrázek 2.10: I²C přenos dat- zápis dat do SLAVE [6]

USART

USART neboli synchronní/asynchronní sériové rozhraní sloužící především ke komunikaci mikrokontroleru s ostatními zařízeními. Komunikace může být provozována třemi různými způsoby, a to buď Asynchronní plně duplexní a nebo Synchronní polo duplexní v roli MASTER či SLAVE, tedy buď jako řídicí nebo řízený. Při synchronním režimu se užívá vodič hodinového signálu a datový vodič, kdežto asynchronní má jeden vodič jako přijímací a druhý jako vysílací. Asynchronní režim je nejčastěji používán z důvodu možné přímé komunikace s počítačem pomocí protokolu RS-232, v dnešní době, ale převážně přes převodník UART-USB. Typické zapojení USART v asynchronním režimu je ukázáno na Obr. 2.11, kde Tx je vysílací port a Rx přijímací port. Vlastní přenos začíná start bitem, následuje datový byte a poté ukončující stop bit [6].



Obrázek 2.11: Zapojení UART sběrnice

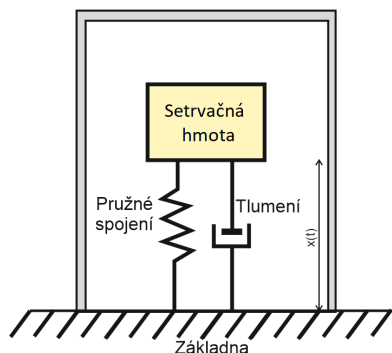
2.6.3 Senzory

Senzory jsou převodníky různých fyzikálních veličin na elektrické, díky nimž lze získávat informace o fyzikálním světě kolem nich, příkladem je snímání teploty, síly, či průtoku.

Akcelerometr

Jde o mikro-elektro-mechanický senzor schopný měřit jak dynamické, tak i statické zrychlení. Statickým zrychlením rozumíme zrychlení způsobené zemskou gravitací, kdežto dynamické je dáno změnou rychlosti pohybujícího se předmětu. Pro samotné měření dynamického zrychlení je nutné odfiltrovat statickou složku. Z toho plyne řada možných aplikací jako měření náklonu, otřesů, vibrací a setrvačných sil. Rozsah akcelerometrů se uvádí v g , kde jedno g , neboli gravitační zrychlení se rovná přibližně $9,82 \text{ ms}^{-2}$ [12].

Základní princip a vnitřní struktura je ukázána na Obr. 2.12, kde lze vidět tlumení a pružné spojení základny a setrvačné hmoty. Kdy během změny polohy objektu dochází ke změně polohy setrvačné hmoty vůči němu, to se dá popsat pohybovou rovnicí mechanické soustavy. Pro vyhodnocení polohy setrvačné hmoty vůči pouzdru se využívá řada principů, nejčastěji piezoelektrický, piezodporový, tepelný, kapacitní a magnetický [12].



Obrázek 2.12: Struktura modelu absolutního akcelerometru [12]

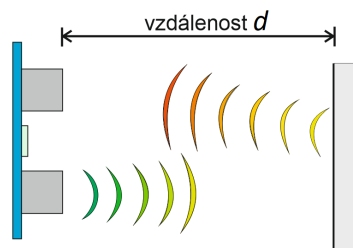
Ultrazvukové měření vzdálenosti

Využívá zpravidla jednoho či dvou ultrazvukových měničů a měření doby letu signálu. Jiné metody měření vzdálenosti využívají například úhlu mezi odeslaným a odraženým signálem.

Základní princip spočívá ve vyslání několika pulzů o frekvenci přibližně kolem 40 kHz ultrazvukovým vysílačem. Odeslaný signál se následně odrazí od překážky a jeho část se vrací zpět k vysílači, kde je zachycena přijímacím ultrazvukovým měničem. Následně lze pomocí doby, mezi vysláním a příjmem signálu a z rychlosti zvuku dopočítat vzdálenost jako

$$d = \frac{tv_s}{2}, \quad (2.8)$$

kde d je měřená vzdálenost, v_s rychlost vzduchu, t doba mezi odesláním a příjmem odraženého signálu. Tento princip je zobrazen na Obr. 2.13. Přesnost měření silně závisí na charakteru a naklonění odrazové plochy a samotné vzdálenosti. Při malých vzdálenostech jednotek centimetrů dochází k přílišným odrazům a velké nepřesnosti měření [13].



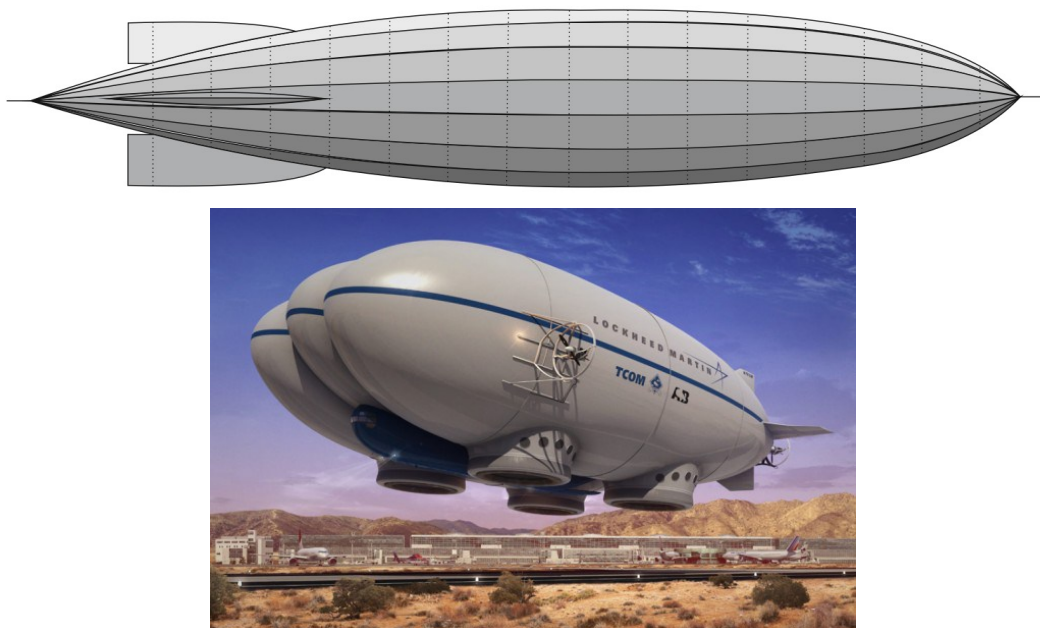
Obrázek 2.13: Princip ultrazvukového měření vzdálenosti [13]

2.6.4 Bluetooth

Je jedním ze standardů pro bezdrátovou komunikaci v ISM pásmu 2,4 GHz, přesněji je definována standardem IEEE 802.15. K vlastnímu přenosu využívá kmitočtového skákání neboli frequency hopping, kdy při vysílání zprávy dochází k rychlému pseudonáhodnému přeladování nosného kmitočtu, samotný vysílač generuje tu samou pseudonáhodnou posloupnost, aby mohl rozeznat, na které frekvenci vysílač právě vysílal. Ve volném prostoru se udává dosah komunikace mezi 1 až 100 m. V dnešní době je velice rozšířená verze 4.2 a to především díky své menší spotřebě než předešlé verze, a tudíž je používána především v aplikacích, kde je předpoklad menší spotřeby, jako například handsfree nebo pro potřeby moderní inteligentní domácnosti. Například pro komunikaci s chytrými žárovkami. Pro aplikace, kde je nutnost přenosu větších objemů dat, je však stále využívána 3. verze. Postupně jsou však nahrazovány nejnovější 5. verzí [14].

2.7 Tvar a konstrukce balónu vzducholodí

Konstrukčně se vzducholodě dají řadit do několika skupin, a to na ztužené, poloztužené a neztužené. Ztužené vzducholodě mají celý plášť pevný, uvnitř pláště se pak mohou nacházet separátní malé balóny. Tento typ byl užíván především ve zlaté éře vzducholodí. V dnešní době se přešlo na užívání neztužených nebo poloztužených konstrukcí, kde je tvar udržován tlakem plynu uvnitř balonu. Historicky nejpoužívanější tvar je doutníkový, který je ukázán na Obr. 2.14. Tento tvar, se až na menší úpravy jako je například větší zploštění apod., používá dodnes. Je výhodný především kvůli dobrému obtékání vzduchem [15].



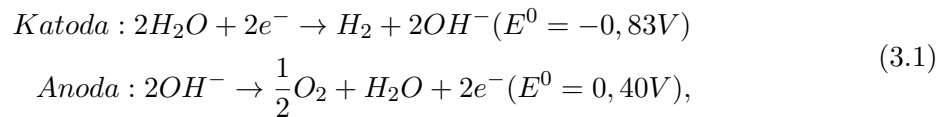
Obrázek 2.14: a) Typický tvar balonu vzducholodí b) Moderní tvar balonu - Vzducholodí Lockheed Martin P-791 (převzato z [26])

3 Výroba vodíku pomocí elektrolýzy vody

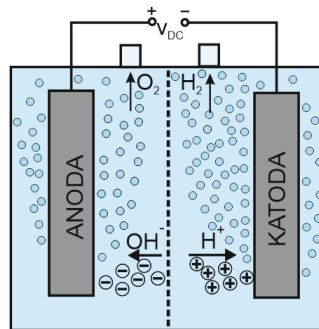
Aby bylo možné provést úplnou realizaci modelu vzducholodi bylo potřeba obstarat dostatek nosného plynu k jejímu naplnění. S ohledem na vysokou cenu helia bylo rozhodnuto o plnění vodíkem, který se dá lehce vyrobit.

3.1 Alkalická elektrolýza vody

Nejjednodušší model alkalické elektrolýzy se skládá ze dvou elektrod, anody a katody, ponořených ve vodivém roztoku neboli elektrolytu, který je tvořen silnou zásadou a vodou. Vodivost elektrolytu způsobují volné ionty uvolněné působením disociace. Disociace je děj, během něhož se látka vložená do vody samovolně bez elektrického proudu rozdělí na kladné a záporné ionty. Po připojení externího stejnosměrného napájecího napětí k jednotlivým elektrodám dochází k přitahování záporných hydroxidových iontů k anodě, na níž probíhá oxidace a dochází ke tvorbě kyslíku a vody. Na katodě dochází k redukci, kdy katoda poskytuje dva elektrony, které po dodání do vody umožní její rozklad na plyný vodík a dva hydroxidové anionty. Tyto procesy na jednotlivých elektrodách jsou popsány chemickými rovnicemi



kde E^0 je elektrický potenciál, který je potřeba dodat pro uskutečnění daných procesů. Kyslík i vodík se přes elektrolyt dále uvolňují do vzduchu. Základní model elektrolyzéry vody je ukázán na Obr. 3.1 [16].



Obrázek 3.1: Model elektrolyzéry vody [16]

Celkové množství plynu, který je schopna elektrolýza za daný čas vyprodukovat, se řídí Faradayovými zákony elektrolýzy. Ty říkají, že celková hmotnost vyloučené látky je přímo úměrná náboji, který projde elektrolytem. To lze vyjádřit jako

$$m = AQ = AIt, \quad (3.2)$$

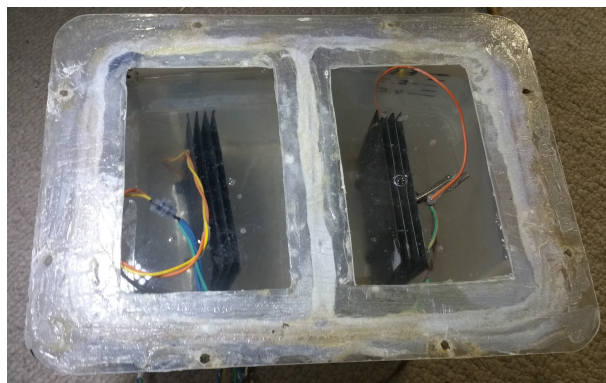
kde m je hmotnost vyloučené látky, Q je náboj, který prošel elektrolytem, A je elektrochemický ekvivalent, který je dán především charakterem elektrolytu a t je pak doba trvání elektrolýzy. Z rovnice je pak patrné, že čím větší proud, tím větší produkce plynu [17].

Pro potřeby alkalické elektrolýzy jsou nejčastěji používány zásady KOH a NaOH. Výhodou alkalických elektrolytů je především jejich vysoká vodivost v porovnání s neutrálními elektrolyty. Po vložení do vody pak vlivem disociace dojde k rozložení na ionty dle rovnice [17]



3.2 Vlastní konstrukce elektrolyzéro

Konstrukce elektrolyzéro byla realizována pouze základní se dvěma elektrodami, s oddělovací přepážkou s otvorem pro dostatečný průchod proudem, ale zároveň dostatečně malý pro samovolné míchání plynu vodíku a kyslíku. Samotné elektrody byly realizovány z ocelového pozinkovaného plechu, který není ideální pro použití na elektrody, ale byl použit díky své nízké pořizovací ceně v porovnání s jinými vhodnějšími materiály. Zároveň nabízel dostatečnou chemickou odolnost při použití v alkalickém elektrolytu. Pro vytvoření elektrolytu byl použit NaOH. Vlastní separace jednotlivých plynů, byla zajištěna výše zmíněnou oddělovací přepážkou, nad každou elektrodou ve víku se nacházel výstupní otvor pro odběr plynů. Aby bylo docíleno neunikání plynu víkem místo výstupního otvoru bylo víko utěsněno a přišroubováno. Vlastní konstrukce elektrolyzéro je ukázána na Obr. 3.2



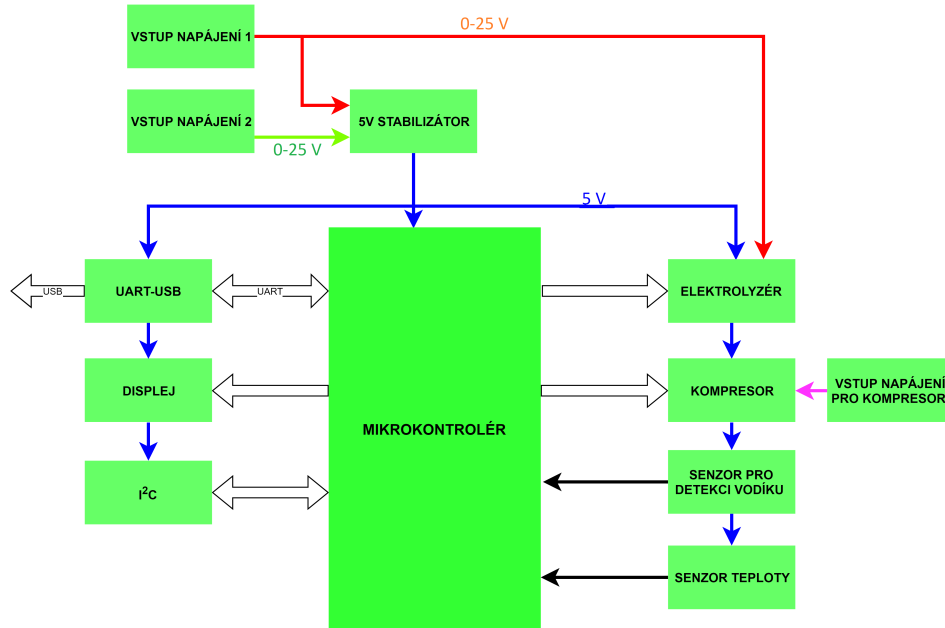
Obrázek 3.2: Vlastní konstrukce elektrolyzéro

3.3 Řídicí jednotka pro elektrolyzéro

Hlavní myšlenka pro tvorbu řídicí jednotky byla možnost základní kontroly zapínání a vypínání elektrolyzéro s kontrolou obsahu vodíku ve vzduchu. Dále ovládání kompresoru pro přečerpávání vyjímáného plynu.

3.3.1 Blokové schéma a základní popis zapojení

Blokové schéma zapojení je vyobrazeno na Obr. 3.3. Zapojení obsahuje tři vstupy pro napájení. První se stará o napájení elektrolyzéry a také se dá použít pro napájení stabilizátoru, který zajišťuje napětovou stabilizaci na 5 V pro napájení mikrokontroléru a jeho periférií. Pro stabilizaci byl použit lineární integrovaný obvod LM7805. Druhý napájecí vstup je pouze pro potřeby napájení stabilizátoru. Třetí vstup se stará pouze o napájení kompresoru.



Obrázek 3.3: Blokové schéma řídicí jednotky pro elektrolyzér

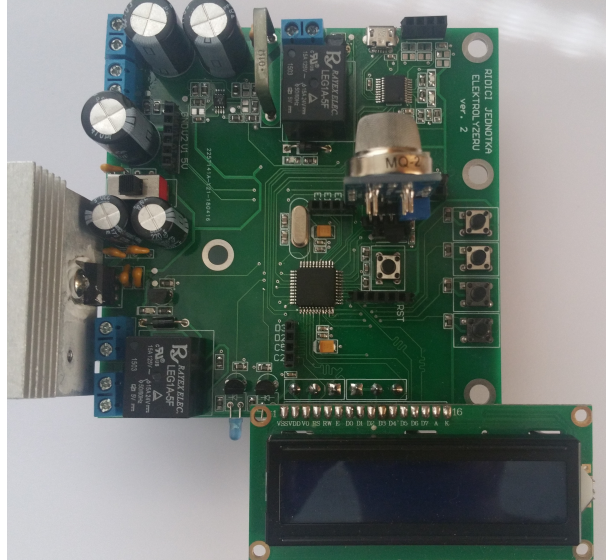
O veškeré ovládání řídicí jednotky se stará mikrokontroler PIC18F45K22, který je provozován na frekvenci 8 MHz. K němu jsou připojena čtyři tlačítka pro ovládání celé řídicí jednotky. Zapínání a vypínání kompresoru a elektrolyzéry, bylo realizováno pomocí relé, která jsou přes tranzistory spínané mikrokontrolerem. Pro zobrazování všech důležitých informací slouží připojený 16x2 LCD displej s řadičem HD44780. Sensory pro detekci vodíku a teploty byly připojeny k analogovému digitálnímu převodníku mikrokontroleru k jejich vyhodnocení. Jako možnost pro případné připojení například modulů se senzory, byla vyvedena sběrnice I²C. Dále byla vyvedena UART sběrnice na převodník na USB pro komunikace s počítačem. Celé schéma zapojení je uvedeno v přílohách.

Senzor pro detekci vodíku

Pro detekci plynného vodíku byl použit senzor MQ-2. Ten využívá oxid cínčitý jako aktivní měřicí materiál, jenž má nízkou vodivost za normálních podmínek. S rostoucím obsahem detekovatelného plynu ve vzduchu roste jeho vodivost. Tím roste výstupní napětí U_{rl} . Senzor je velice citlivý na LPG, propan a vodík. Uvedený rozsah při 20 °C a 65% vzdušné vlhkosti je od 300 ppm až po 10 000 ppm [18].

3.3.2 Realizace zapojení

Zapojení bylo realizováno na oboustrannou desku plošných spojů. Vyrobená a osazená řídicí jednotka je uvedena na Obr. 3.4. Osazovací nákres a seznam použitých součástek je uveden v přílohách.



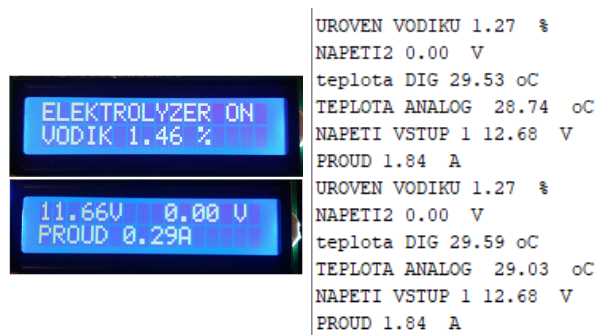
Obrázek 3.4: Řídicí jednotka pro elektrolyzér

3.3.3 Řídicí program

Samotný program je velice jednoduchý, dochází pouze ke čtení a zpracování dat z analogově digitálních převodníků, které jsou následně zobrazovány na displeji a odeslány přes UART. Jednotlivá tlačítka jsou nastavena k vypínání a zapínání elektrolyzéry a kompresoru nebo přepínání údajů na displeji. V samotném programu je přidána kontrola překročení určité hladiny úrovně vodíku ve vzduchu. Vývojový diagram řídicího programu bude uveden v přílohách.

3.3.4 Ověření funkčnosti zařízení

Při ověřování funkčnosti řídicí jednotky bylo nejdříve vyzkoušeno napájení z obou dvou vstupů pro napájení napětového stabilizátoru. Při použití napájecích 12 V vykazoval výstup stabilizátoru napětí 4,985 V. Dále byla ověřena funkčnost zapínání a vypínání elektrolyzéry a kompresoru, které fungovalo bez problémů. Poté byly změřeny důležité údaje, které jsou zobrazovány na displeji a následně s nimi byly srovnány a případně softwarově kalibrovány, aby co nejvíce odpovídaly naměřeným hodnotám. Vyzkoušený proud elektrolyzérem byl přibližně kolem 10 A, což je zhruba i maximální možný proud vlivem použitých konektorů. Příklad údajů zobrazených na LCD displeji řídicí jednotky je ukázán na Obr. 3.5.



Obrázek 3.5: Ukázka výstupních dat z řídicí jednotky zobrazených a) na displeji řídicí jednotky b) na počítači poslaných přes UART-USB

3.4 Zhodnocení

Samotné řídicí jednotce a elektrolyzáru nebylo věnováno tolik času a z tohoto důvodu obsahuje pouze jednoduchý program, který dostačoval pro základní použití. Program tedy neobsahuje žádné možnosti pokročilé kontroly nebo například detekci naplnění plnicí nádoby vodíkem a jeho následné automatické přečerpání popřípadě zastavení elektrolyzy. Momentální verze nahraného programu funguje bez problémů. Samotná řídicí jednotka a elektrolyzáry nejsou konstruovány na velký zatěžovací proud. Jde tedy spíše o model, který přímo nebyl naplněn zadání práce, ale byl do jisté míry nezbytný pro jeho splnění. Produkce vodíku pomocí elektrolyzy nebyla dostatečně rychlá při použití nižších proudů, kdy průměrná produkce během 12 hodin byla přibližně 50 l při proudu 8 A, což bylo dostačující pro naplnění balonu s nosností přibližně 40 g.

4 Výběr vhodného motoru a vrtulí

V této kapitole je popsáno chování a výběr vhodného motoru a vrtule pro použití v malé solární vzducholodi. Aby mohl být uskutečněn výběr, bylo nejdříve nutné provést měření. To bylo provedeno pro vybrané parametry, kdy hlavní ohled byl brán především na tah a proud v závislosti na přiloženém napájecím napětí a hmotnosti.

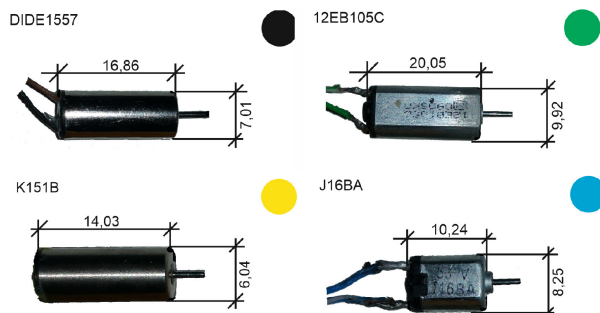
Před samotným měřením, koupí motorů a vrtulí, byla provedena úvaha o použití stejnosměrných kartáčkových motorů nebo stejnosměrných bezkartáčových motorů neboli BLDC. Obecně se dá říct, že výhody BLDC motorů převažují. Při stejných velikostech dokáží poskytnout lepší tah a mají i menší hmotnost. Jejich nevýhoda pro aplikaci, kde je potřeba více motorů, spočívá především v jejich ovládní, které je složitější. Zároveň pro relativně pomalu pohybující se vzducholod není potřeba tak velký výkon. Další problém tvořila nabídka motorů v daných rozměrech, kde výběr byl cílen na motory o hmotnostech mezi 2 až 4 g, kdy BLDC motory v těchto rozměrech byly znatelně dražší a hůře sehnatelné na rozdíl od kartáčkových stejnosměrných motorů, které jsou v těchto velikostech hojně aplikované v malých kvadrokoptérech, a proto byly znatelněji dostupnější a cenově přijatelnější.

4.1 Měření motorů a vrtule

Jednotlivým měřeným motorům byly přiděleny barvy pro pozdější lepší orientaci v grafech. Základní známé parametry motorů jsou popsány v tabulce 4.1, kde nejsou uvedeny například hodnoty provozních napětí, a to z důvodu nedostatku informací od výrobce. Všechny měřené motory jsou uvedeny na Obr. 4.1, rozměry na obrázku jsou uvedeny v milimetrech.

Tabulka 4.1: Základní parametry měřených motorů

MOTOR	Hmotnost (g)	Délka (mm)	Šířka (mm)	Průměr hřídelky (mm)
K151B	1,66	18,5	16,1	0,8
J16BA	1,78	16,0	18,2	1,0
DIDE1557	2,75	22,2	7,0	1,0
12EB105C	5,38	27,6	19,9	1,0

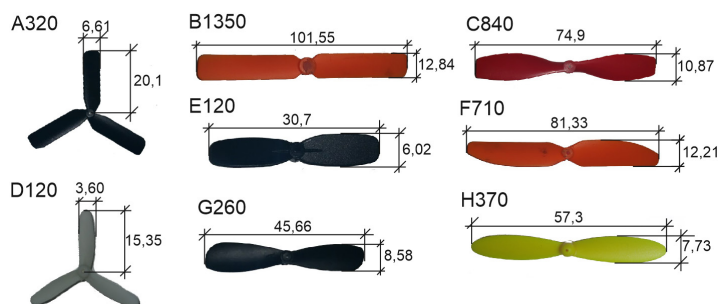


Obrázek 4.1: Testované motory

Vrtulí bylo měřeno celkem osm. Snahou bylo změřit co největší zastoupení typů vrtulí. Obecně při koupi vrtule neměly žádné výrobní jméno či číslo a byly označeny například pouze jejich průměrem, z toho důvodu jsou dále v textu označeny vlastním písmenem a následujícím číslem, které označuje jejich hmotnost v miligramech. Jejich základní známé parametry jsou uspořádány do tabulky 4.2. Samotné vrtule jsou vyobrazeny na Obr. 4.2, rozměry na obrázku jsou uvedeny v milimetrech.

Tabulka 4.2: Základní parametry měřených vrtulí

Vrtule	Počet listů (-)	Hmotnost (g)	Délka jednoho listu (mm)
A320	3	0,32	20,1
B1350	2	1,35	56,7
C840	2	0,84	37,7
D120	3	0,12	12,2
E120	2	0,12	15,35
F710	2	0,71	40,6
G260	2	0,26	23,2
H370	2	0,37	28,5



Obrázek 4.2: Testované vrtule

4.2 Měření parametrů motorů a vrtulí

Každý motor i vrtule byly měřeny vždy ve dvojici, tedy všechny motory s jednou stejnou vrtulí a veškeré vrtule s jedním motorem. Měřenými veličinami byly vždy napětí na motoru, odebírající proud, otáčky a statický tah. Všechny tyto veličiny byly měřeny v jeden moment. U samotných motorů byla měřena jejich konstanta motoru k .

Měření konstanty motoru

Pro vlastní měření byl použit vzorec

$$k = U_i / \Omega, \quad (4.1)$$

kde U_i je indukované napětí a Ω otáčky motoru. Při měření byl měřený motor využíván v režimu dynamu, tedy byl připevněn svou hřídelí k hřídeli druhého motoru, který ho roztáčel. Měřený motor se tedy po roztočení choval jako generátor stejnosměrného napětí. Během měření bylo odečítáno právě indukované napětí a otáčky motoru. Měřicí zapojení je ukázáno na Obr. 4.3 [19].



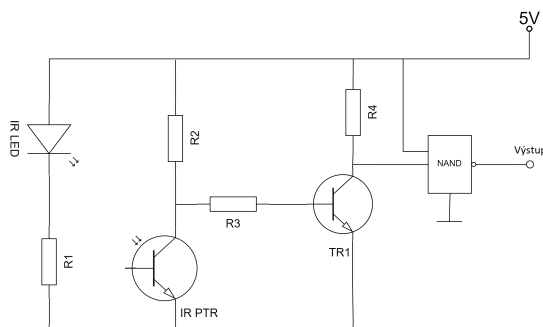
Obrázek 4.3: Použité zapojení pro měření konstanty motoru

Měření statického tahu

Pro měření statického tahu byl motor s vrtulí umístěn na vrchol lehké hliníkové tyčky do dostatečné výšky, aby se neuplatnil přízemní efekt vrtule. Samotná tyčka byla pevně umístěna na zlatnickou váhu s rozlišením 0,01 g. Při dostatečném roztočení motoru s vrtulí docházelo k nadlehčování, které se projevovalo na váze zápornými hodnotami.

Měření otáček

Pro měření otáček bylo sestaveno velmi jednoduché zapojení optické závory, jejíž přibližné použité zapojení je uvedeno na Obr. 4.4. Při měření docházelo k periodickému zastiňování, které se na výstupu logického hradla projevovalo jako obdélníkový průběh s frekvencí, která odpovídala té měřené. Naměřenou hodnotu bylo ještě nutné vydělit počtem listů vrtule.



Obrázek 4.4: Použité zapojení optické závory

4.2.1 Výsledky měření

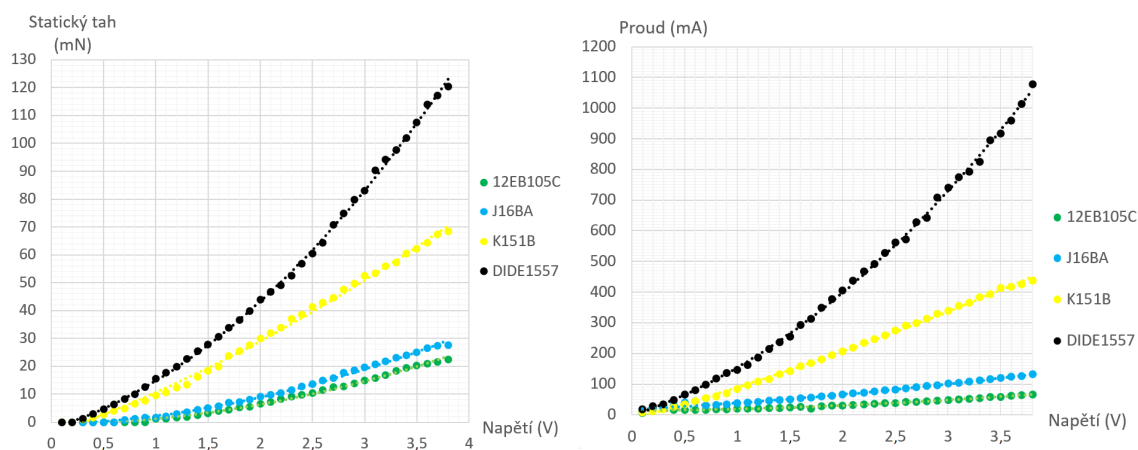
Pro porovnání naměřených hodnot bylo sestaveno několik tabulek a k nim příslušících grafů. V této kapitole je uvedeno pouze několik nejdůležitějších naměřených údajů, zbytek je uveden v přílohách. Všechny motory byly měřeny s vrtulí G260, zatímco vrtule s motorem DIDE1557.

Pro přehled chování jednotlivých motorů byla sestavena zkrácená tabulka 4.3, která ukazuje trend chování motoru na přiloženém napájecím napětí, tabulka dále obsahuje hodnotu konstanty motoru. Podrobnější závislosti jsou uvedeny na Obr. 4.5. Na němž jsou ukázány závislosti důležité především pro samotné řízení vzducholodě k odhadu jejího chování. Mezi motory byl vybrán DIDE1557, který vykazoval největší výkon s dostatečně malou hmotností,

nevýhoda může být jeho vysoká spotřeba v porovnání s ostatními motory.

Tabulka 4.3: Naměřené parametry motorů

DIDE1557						K151B				
Napětí (V)	Proud (mA)	Příkon (mW)	Statický tah (mN)	Otáčky (Hz)	Konstanta stroje (Vs)	Proud (mA)	Příkon (mW)	Statický tah (mN)	Otáčky (Hz)	Konstanta stroje (Vs)
0,5	66,10	33,05	4,61	75,10		33,79	16,90	2,75	69,90	
1	145,90	145,90	15,50	126,70		84,90	84,90	9,32	116,95	
1,5	254,50	381,75	27,86	175,45		142,90	214,35	18,44	156,35	
2	406,00	812,00	43,95	227,00		205,80	411,60	30,02	190,20	
2,5	561,40	1403,50	60,43	265,10		275,20	688,00	41,30	219,05	
3	741,00	2223,00	83,09	308,65		338,50	1015,50	52,48	247,85	
3,5	917,00	3209,50	107,32	346,60		413,20	1446,20	62,00	270,25	
					0,0039					0,0049
J16BA						12EB105C				
Napětí (V)	Proud (mA)	Příkon (mW)	Statický tah (mN)	Otáčky (Hz)	Konstanta stroje (Vs)	Proud (mA)	Příkon (mW)	Statický tah (mN)	Otáčky (Hz)	Konstanta stroje (Vs)
0,5	39,27	19,64	0,00	0,00		15,52	7,76	0,00	16,00	
1	37,35	37,35	1,67	56,70		18,83	18,83	0,88	44,85	
1,5	50,68	76,02	5,00	90,05		23,43	35,15	3,14	73,45	
2	65,80	131,60	8,93	120,35		30,20	60,40	6,28	100,15	
2,5	82,19	205,48	13,64	146,75		38,70	96,78	10,40	125,85	
3	101,15	303,45	19,62	171,35		47,37	142,11	14,81	149,35	
3,5	119,40	417,90	25,02	194,25		58,49	204,72	20,11	173,00	
					0,0093					0,0164

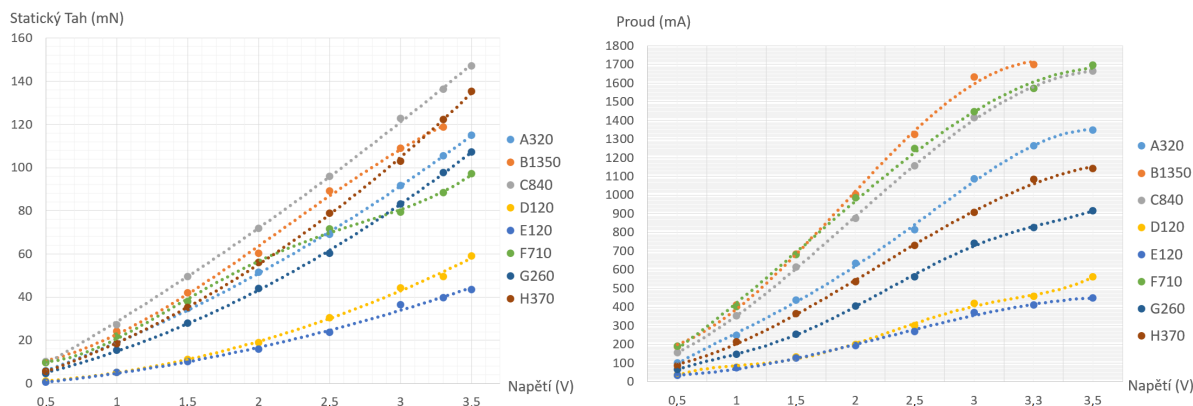


Obrázek 4.5: Graf změřené závislosti pro motory a) statického tahu b) proudu na napětí

Naměřené hodnoty jednotlivých vrtulí jsou uspořádány do zkrácené tabulky 4.4 s vybranými hodnotami ukazující důležité parametry. Dále je v tabulce uvedena hodnota součinitele tahu. Na obrázku Obr. 4.6 jsou zobrazeny, stejně jak u motorů, závislosti statického tahu a proudu na napětí. Závislost tahu na frekvenci otáčení vrtule je uvedena v přílohách. Z těchto závislostí pozorujeme, že nejlépe dopadly vrtule H370 a C840, které mají nejlepší tah v závislosti na napětí, ještě s ohledem na jejich hmotnost, nevýhoda je podobně jako u motorů ve vyšším příkonu, který je způsoben větším zatěžováním motoru.

Tabulka 4.4: Naměřené parametry vrtulí

Vrtule										
Napětí (V)	Proud (mA)	Příkon (mW)	Statický tah (mN)	Otáčky (Hz)	Součinitel tahu (-)	Proud (mA)	Příkon (mW)	Statický tah (mN)	Otáčky (Hz)	Součinitel tahu (-)
A320					B1350					
1	249,1	249,1	18,4	118,9	0,38	412,0	412,0	24,3	42,1	0,09
2	634,0	1268,0	51,6	190,7	0,41	1003,0	2006,0	60,2	66,1	0,10
3	1088,0	3264,0	91,6	249,3	0,43	1634,0	4902,0	108,8	91,5	0,11
3,5	1349,0	4721,5	114,9	280,6	0,43	1783,0	6201,0	131,2	102,3	0,13
C840					D120					
1	352,0	352,0	27,2	79,9	0,11	78,6	78,6	5,2	208,4	0,29
2	875,0	1750,0	72,0	127,1	0,12	200,3	400,6	19,0	374,7	0,29
3	1416,0	4248,0	122,8	162,7	0,12	420,1	1260,3	44,2	559,7	0,30
3,5	1666,0	5831,0	147,3	180,1	0,11	563,2	1971,2	59,2	644,3	0,31
E120					F710					
1	74,2	74,2	5,2	196,4	0,11	402,0	402,0	21,9	50,9	0,15
2	194,2	388,4	15,9	372,2	0,10	985,0	1970,0	56,1	79,5	0,16
3	372,1	1116,3	36,4	525,0	0,12	1446,0	4338,0	79,4	94,6	0,15
3,5	448,3	1568,4	43,6	600,0	0,11	1697,0	5999,0	97,2	102,4	0,15
G260					H370					
1	145,9	145,9	15,5	126,7	0,28	214,0	214,0	18,4	137,6	0,28
2	406,0	812,0	43,9	227,0	0,25	537,0	1074,0	56,1	234,8	0,30
3	741,0	2223,0	83,0	308,7	0,26	906,0	2718,0	103,0	310,8	0,31
3,5	917,0	3209,0	107,3	346,6	0,26	1143,0	4000,5	135,3	345,1	0,33

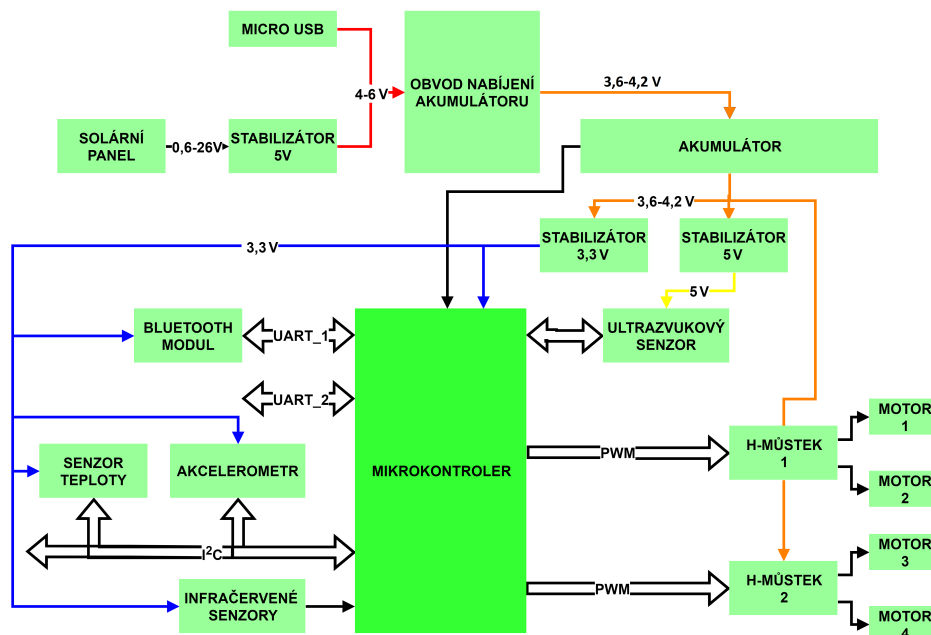


Obrázek 4.6: Graf změřené závislosti pro vrtule a) statického tahu b) proudu na napětí

5 Návrh řídicí jednotky pro vzducholod'

5.1 Popis zapojení

Hlavní uspořádání zapojení je zobrazeno na Obr. 5.1. Jde o jednoduchý obvod řízený mikrokontrolerem, který kontroluje veškerá řízení všech potřebných periférií. Nejdůležitější periférie tvoří H-můstky pro ovládání motorů, UART sběrnici pro ovládání Bluetooth modulu, řízení ultrazvukového modulu a přes sběrnici I²C shromažďování dat ze senzorů. O hlavní napájecí napětovou větev se stará snižující DC-DC měnič, který stabilizuje napětí na 3,3 V. Dále je k dispozici zvyšující měnič, který stabilizuje 5 V větev napájení. Ta je však potřebná pouze pro napájení ultrazvukového senzoru. Oba stabilizátory jsou napájeny Li-pol akumulátorem o nominálním napětí 3,7 V. O nabíjení akumulátoru se stará nabíjecí obvod s nastavitelným nabíjecím proudem. Solární panely jsou přivedeny na vstup 5 V lineárního stabilizátoru, který je přiveden přímo na vstup obvodu starajícího se o nabíjení akumulátoru. V následujících podkapitolách budou jednotlivá zapojení popsána podrobněji vždy s odpovídajícím schematickým zapojením, která budou v některých případech zkrácena o opakující se části.

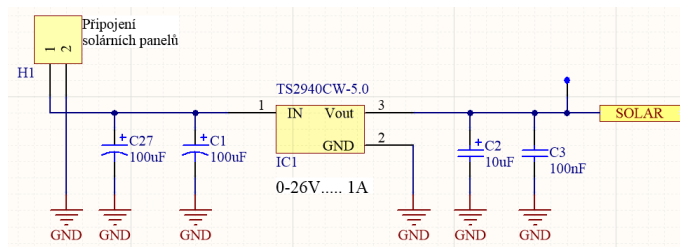


Obrázek 5.1: Blokové schéma zapojení řídicí jednotky pro vzducholod'

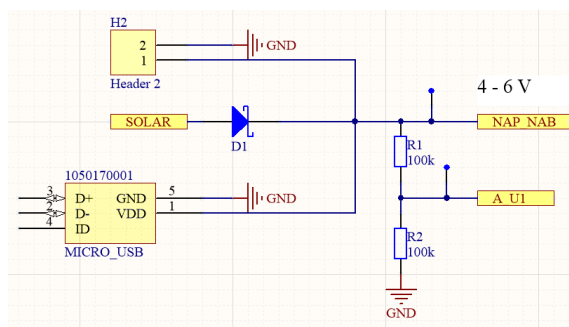
5.1.1 Vstup solárních panelů a napájení pro dobíjení

Připojené solární panely jsou napojeny na lineární stabilizátor napětí TS2940CW-5.0 od výrobce TAIWAN SEMICONDUCTOR, který stabilizuje napětí na 5 V, jenž je přivedeno na vstup obvodu pro nabíjení akumulátoru. Oba tyto obvody zajišťují kontinuální odběr, který je potřeba pro dostatečné využití solárního panelu. Rozsah pracovních napětí, která

lze použít je dán použitým stabilizátorem, který toleruje až 26 V na vstupu, a to především z důvodu, že návrh nebyl dělán pro konkrétní typ solárního panelu, kvůli problémům s jejich obstaráním, a proto se snaží být v tomto ohledu flexibilní. Samotné zapojení je zobrazeno na Obr. 5.2. Důvod použití 5 V stabilizátoru vyplývá z napětového rozsahu obvodu MCP73833-AMI/UN pro nabíjení akumulátoru, který je v rozmezí od 4 V až po 6 V. Zapojení vstupu jeho napájení je uvedeno na Obr. 5.3.



Obrázek 5.2: Zapojení obvodu TS2940CW-5.0 pro stabilizaci napětí ze solárních panelů



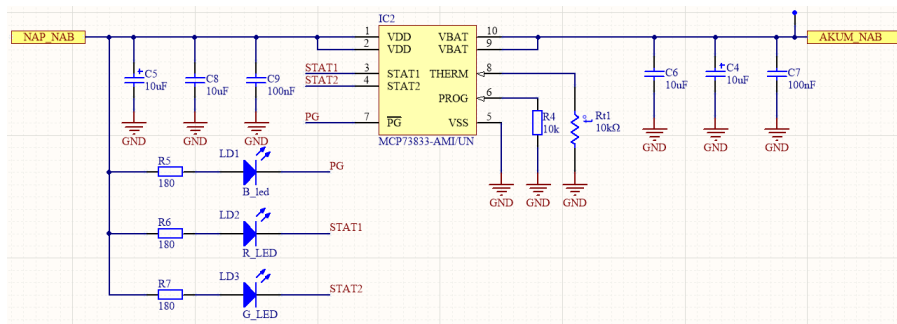
Obrázek 5.3: Zapojení obvodu pro vstup napájecího napětí pro obvod nabíjení akumulátoru

5.1.2 Obvod nabíjení akumulátoru

Pro nabíjení akumulátoru byl vybrán obvod MCP73833-AMI/UN od výrobce MICRO-CHIP TECHNOLOGY. Obvod dokáže dohlížet na jeden článek Li-pol či Li-ion akumulátoru o maximálním napětí v nabitém stavu 4,2 V. Zapojení je ukázáno na Obr. 5.4. Na kterém vidíme nastavovací rezistor, který je přiveden na vývod PROG. Ten se stará o zvolení maximálního nabíjecího proudu akumulátoru, výpočet jeho hodnoty lze popsat rovnicí

$$R = \frac{1000}{I}, \quad (5.1)$$

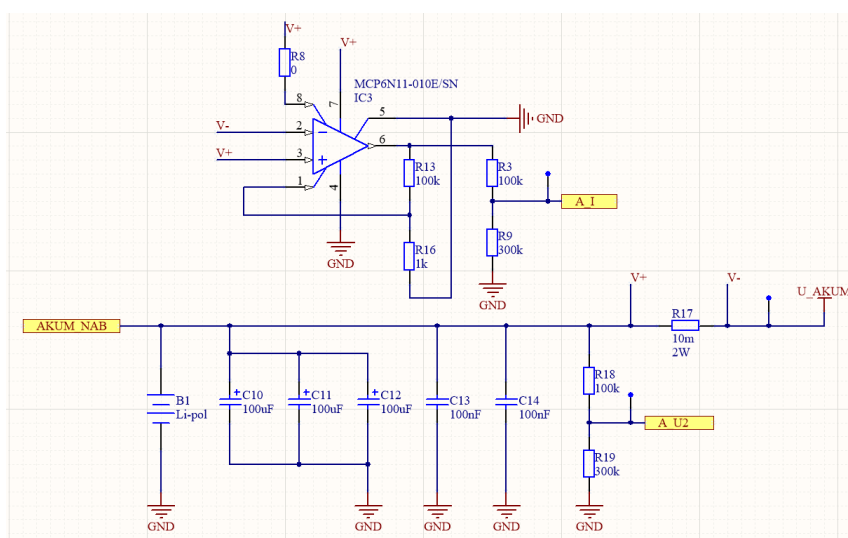
kde R je nastavovací odpor a I je nastavený dobíjecí proud. Samotné nabíjení probíhá ve dvou fázích. První fáze spočívá v dodávání konstantního proudu, podle nastavené hodnoty. V moment překročení napětí 4,2 V na akumulátoru dojde k přepnutí na mód konstantního napětí [19].



Obrázek 5.4: Zapojení obvodu pro nabíjení akumulátoru

5.1.3 Obvod akumulátoru

Pro napájení je použit jednočlánekový Li-pol akumulátor jehož napětí mezi vybitým a nabitým stavem se pohybuje přibližně mezi 3,3 V až 4,2 V. Tento typ akumulátoru byl vybrán především kvůli své nízké hmotnosti při stejné kapacitě na rozdíl od ostatních typů. Pro samotný výběr byla sestavena porovnávací tabulka různých typů akumulátorů, která bude uvedena v přílohách. Zapojení akumulátoru do obvodu je uvedeno na Obr. 5.5, ze kterého lze pozorovat zapojení operačního zesilovače MCP6N11-010E/SN pro měření proudu odebíraného zátěží a napěťový dělič pro měření napětí na akumulátoru. Oba výstupy jsou vyvedeny na vstup analogově digitálního převodníku mikrokontroleru.



Obrázek 5.5: Zapojení obvodu s akumulátorem

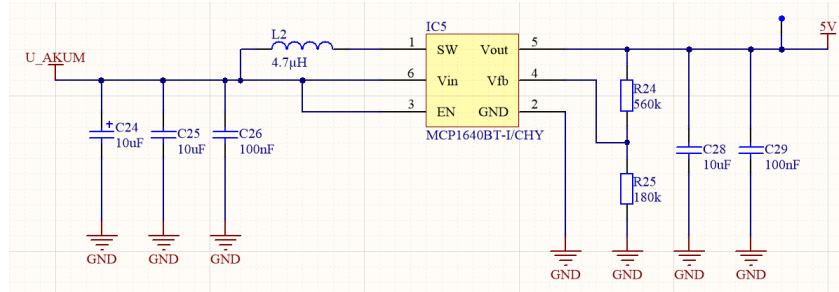
5.1.4 Zapojení spínaného 5 V stabilizátoru

Pro správné použití modulu ultrazvukového měření vzdálenosti bylo nutné vytvořit speciální zdroj 5 V napájecího napětí z napětí akumulátoru. Z tohoto důvodu byl vybrán zvyšující spínaný měnič MCP1640BT-I/CHY od výrobce MICROCHIP TECHNOLOG. Spínání uvnitř

obvodu probíhá při frekvenci 500 kHz. O nastavení výstupního napětí dle rovnice

$$R_{24} = R_{25} \left(\frac{V_{out}}{1,21} - 1 \right) \quad (5.2)$$

se starají rezistory R_{24} a R_{25} , což lze i pozorovat na zapojení, které je uvedeno na Obr. 5.6 [20].



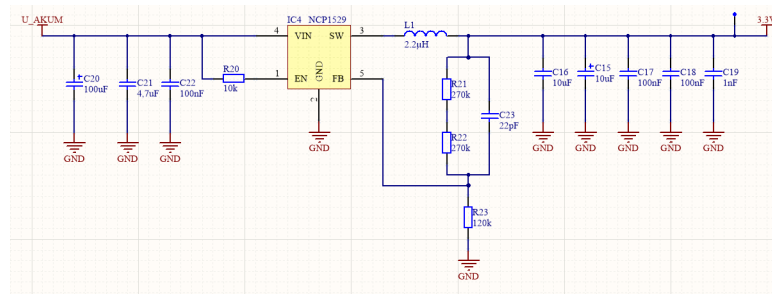
Obrázek 5.6: Zapojení obvodu spínaného měniče MCP1640BT stabilizujícího napětí na 5 V

5.1.5 Zapojení spínaného 3,3 V stabilizátoru

Pro napájení mikrokontroleru a většiny jeho okolních periférií bylo potřeba vytvořit stabilizované napětí 3,3 V. Z toho důvodu byl vybrán obvod NCP1529ASNT1G od výrobce ON SEMICONDUCTOR. Jedná se o snižující spínaný měnič, který spíná na frekvenci 1,7 MHz, díky tomu dodává náboj po dostatečně malém množství, což umožnilo použití adekvátně malé cívky. Maximální výstupní proud může dosahovat až 1 A. Obvod disponuje detekcí a ochranou proti zkratu. Jeho samotné zapojení do obvodu je zobrazeno na Obr. 5.7, na kterém můžeme pozorovat rezistory R_{21} , R_{22} a R_{23} , které se starají o nastavení výstupního napětí dle rovnice

$$U_{out} = 0,6 \left(1 + \frac{R_{21} + R_{22}}{R_{23}} \right), \quad (5.3)$$

kde U_{out} je nastavené výstupní napětí [21].

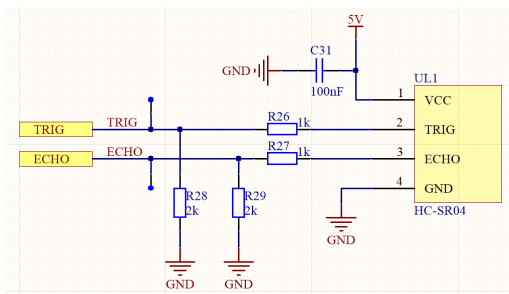


Obrázek 5.7: Zapojení obvodu spínaného měniče NCP1529 stabilizujícího napětí na 3,3 V

5.1.6 Zapojení Ultrazvukového senzoru vzdálenosti

Pro měření výšky bylo uvažováno mezi použitím laserového, nebo ultrazvukového senzoru. Nakonec bylo rozhodnuto pro ultrazvukové měření, a to především z důvodu vyšší hmotnosti

laserového senzoru způsobenou velikostí přijímací optiky, případně i větší náročnosti na vyhodnocení, celkové dostupnosti a ceny. Jako ultrazvukový senzor byl použit modul HC-SR04, jehož zapojení je vidět na Obr. 5.8. Modul vyžaduje 5 V napájení. Při použití nižších napětí roste výrazně nepřesnost měření. Oba signály TRIG a ECHO jsou přivedeny na vstupně výstupní porty mikrokontroleru.



Obrázek 5.8: Zapojení ultrazvukového senzoru HC-SR04

5.1.7 Zapojení H-můstků

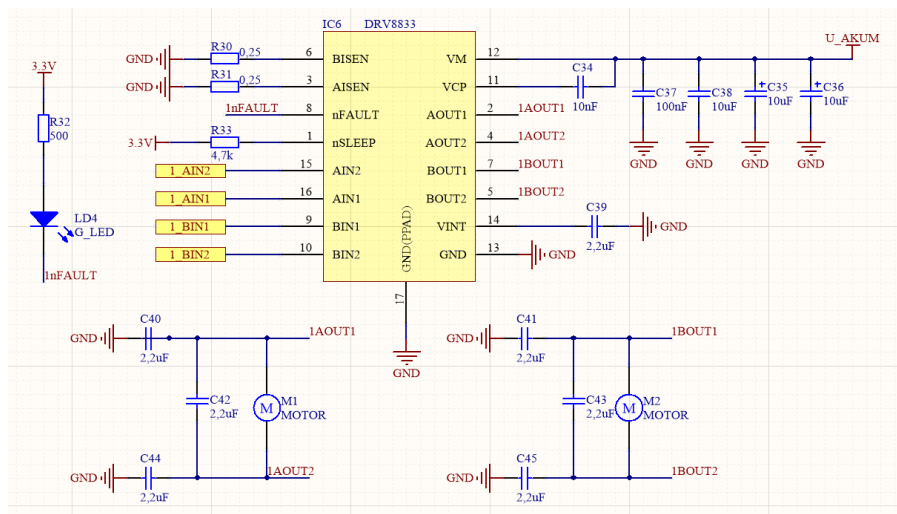
Pro kontrolu motorů bylo vybráno použití pulzně šířkové modulace, která může být generována pomocí mikrokontroleru. Proto bylo nezbytné použití H-můstku, který je tvořen čtveřicí tranzistorů zapojených do můstku. Pro vlastní zapojení byl vybrán obvod DRV8833, jehož zapojení do obvodu můžeme vidět na Obr. 5.9. Tento integrovaný můstek lze použít pro kontrolu dvou stejnosměrných motorů, nebo případně ke kontrole jednoho krokového motoru. Napájecí napětí je od 2,7 V až po 10,8 V, tudíž bylo možné napájet přímo z akumulátoru. Každým motorem za běhu může protékat maximální proud až 1,5 A, přičemž lze tento proud omezit přidáním rezistorů na vývody AISEN a BISEN. Můstek je zkonstruován ve stylu polovičního můstku, tudíž je ovládán pouze dvěma kontrolními signály, kdy jednotlivé režimy řízení ukazuje tabulka 5.1. Celkem bylo použito dvou obvodů, tedy byla možnost připojení až čtyř motorů [22].

Tabulka 5.1: Režimy řízení polovičního H-můstku obvodu DRV8833

Signál		Režim činnosti
IN1	IN2	
PWM	0	vpřed
0	PWM	vzad
PWM	1	vzad - brždění
1	PWM	vpřed - brždění

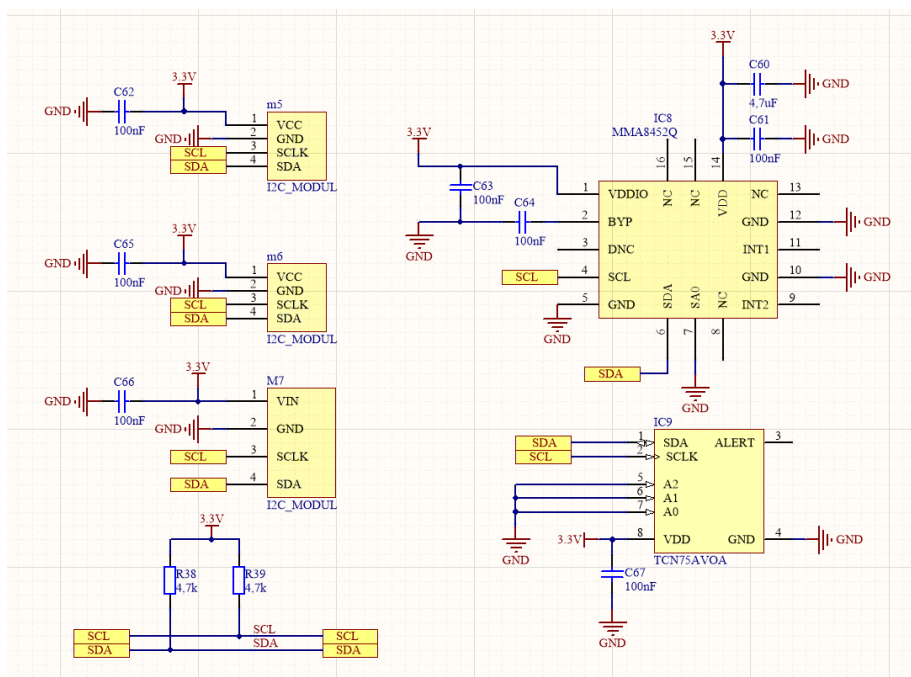
5.1.8 Zapojení I²C sběrnice

V tomto návrhu pro sběr dat ze senzorů byla použita sběrnice I²C. Přímo v zapojení byly použity obvody pro měření teploty a akcelerometr. Ostatní senzory byly aplikovány formou



Obrázek 5.9: Zapojení H-můstku DRV8833 do obvodu

levných, malých a dostupných modulů, z tohoto důvodu byly vyvedeny tři volné vývody pro jejich připojení. Samotné zapojení ukazuje Obr. 5.10.



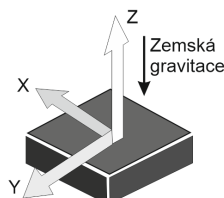
Obrázek 5.10: Zapojení obvodů využívající I²C sběrnici

Senzor pro měření teploty

Pro měření teploty byl vybrán obvod TCN75AVOA. Jedná se o obvod od MICROCHIP TECHNOLOGY s typickým teplotním rozsahem od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ s nastavitelným rozlišením až $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro použití ve sběrnici byla použita nastavená bitová adresa 1001000. Pro aktivování obvodu ze spánkového režimu nebo případné změny měřeného rozlišení, bylo nutné změnit hodnoty v interních registrech obvodu. Pro odečtení teploty byly použity dva osmi bitové registry [23].

Akcelerometr

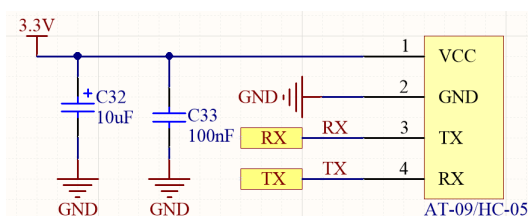
Výběr akcelerometru byl ovlivněn především dostupností v obchodech, a proto byl vybrán obvod MMA8452Q od firmy NXP. Jde o tříosý akcelerometr s nízkým odběrem proudu typicky $165 \mu\text{A}$ s nastavitelnými módy rozsahů měření a to $\pm 2 \text{ g}$, $\pm 4 \text{ g}$ nebo $\pm 8 \text{ g}$. Adresa zařízení v I²C sběrnici byla použita 0011100. Pro nastavení slouží celá řada registrů, kde bylo nutné nastavit jeden z režimů rozsahů a aktivovat obvod ze spánkového režimu. Orientace jednotlivých os vzhledem k pouzdru je uvedena na Obr. 5.11 [24].



Obrázek 5.11: Orientace os akcelerometru vzhledem k jeho pouzdru [24]

5.1.9 Zapojení UART sběrnice

Pro komunikaci řídicí jednotky s ovládacím zařízením bylo uvažováno mezi technologiemi Bluetooth či Wifi. Avšak z důvodu vyšší spotřeby, složitější samotné implementaci a nastavitelnosti nebyla Wifi vhodná pro použití, a tudíž byla vybrána technologie Bluetooth, která nabízela malou spotřebu a jednoduché ovládání. Z toho důvodu byly vybrány moduly HC-05 nebo AT-09, které pro komunikaci s mikrokontrolerem vyžadují použití UART sběrnice, jejíž zapojení je ukázáno na Obr. 5.12.



Obrázek 5.12: Zapojení obvodů využívající UART sběrnici

HC-05 a AT-09

Jde o bluetooth moduly, které se mezi sebou liší verzí, a tudíž i spotřebou a maximální silou signálu. To jsou však veškeré rozdíly a samotné ovládání a komunikace obou dvou je totožná. Nastavení modulů lze provádět pomocí AT příkazů. Nastavit lze například heslo pro párování nebo rychlost komunikace po UART, která je v základu nastavená na 9600 bps. Modul HC-05 je ukázán na Obr. 5.9.

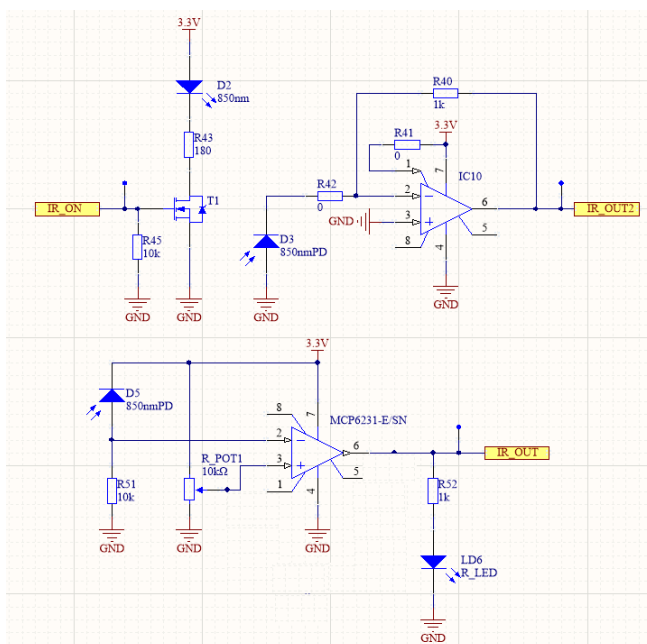


Obrázek 5.13: Bluetooth modul HC-05

5.1.10 Zapojení infračervených senzorů

Aplikace infračervených senzorů byla použita dvojího typu, a to pro měření blízké překážky a pro určení místa zdroje infračerveného záření. Měření blízké překážky je založeno na odrazu záření od překážky a zachycení pin diodou, signál z ní je vyhodnocován Schmittovým klopným obvodem.

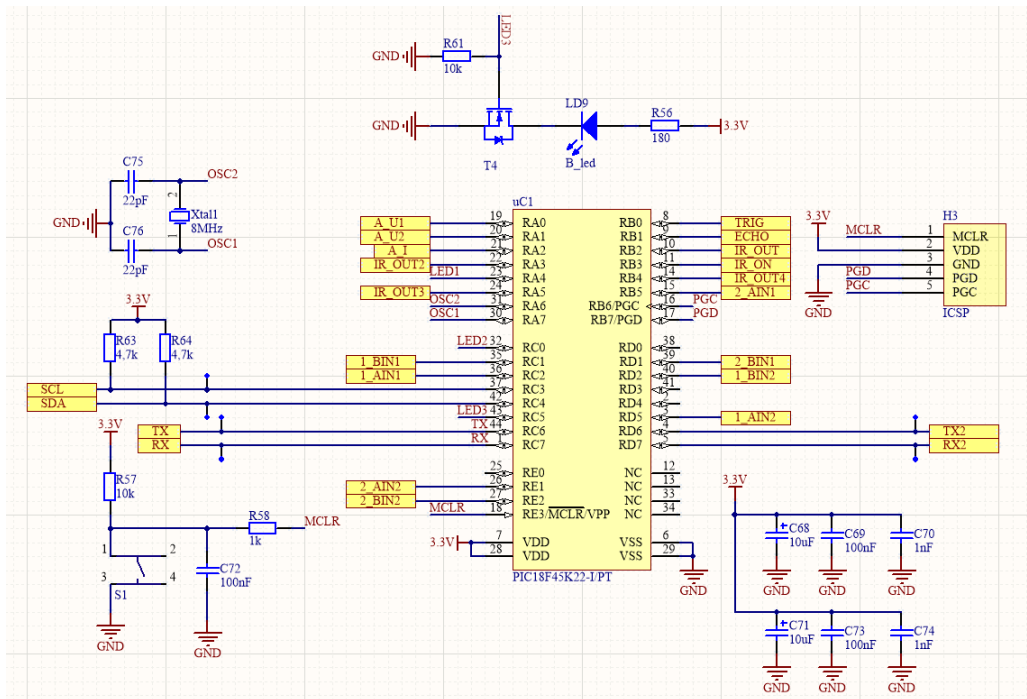
Měření umístění zdroje záření bylo přidáno z důvodu možné implementace vyhledávání domovské stanice, která by svítila infračerveným zářením a vzducholoď by pomocí tří různě umístěných infračervených pin diod vyhodnocovala přibližné místo odkud záření přichází. Celkové zapojení ukazuje Obr. 5.14.



Obrázek 5.14: Zapojení infračervených senzorů do obvodu

5.1.11 Zapojení mikrokontroléru

Při výběru mikrokontrolerů byla brána v potaz především jednoduchost a nenáročnost aplikace. Zároveň bylo potřeba, aby obsahoval dostatečný počet CCP modulů tedy vnitřních obvodů, které lze nastavit a použít pro generaci signálu s PWM tedy pulzně šířkovou modulací. Z tohoto důvodu byl vybrán PIC18F45K22. Jeho zapojení do obvodu je ukázáno Obr. 5.15, na němž je patrné připojení externí 8 MHz krystalu, resetovacího tlačítka, třech nastavitelných led diod a vyvedení vstupu pro naprogramování obvodu.



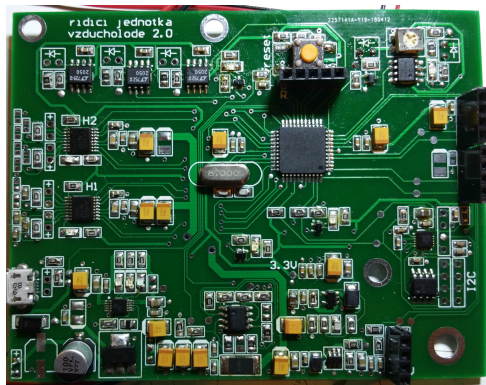
Obrázek 5.15: Zapojení mikrokontroleru PIC18F45K22 do obvodu

PIC18F45K22

Je osmi bitový mikrokontroler s RISC instrukční sadou. Je založený na Harvardské architektuře, tedy obsahuje oddělenou programovou paměť o velikosti 64 Kb a datovou paměť o 3896 B. Maximálně může operovat s frekvencí až 64 MHz. Potřebné napájecí napětí se pohybuje od 2,3 V až po 5,5 V. Pro připojení externích periférií má k dispozici až 35 vstupně výstupních portů, z toho 30 z nich jsou vstupy pro vnitřní 10-bit analogově digitální převodník. Pro generaci PWM signálu jsou zde dva klasické CCP moduly a tři ECCP moduly, které nabízejí kontrolu PWM signálu v režimu polovičního můstku či plného můstku, tedy lze generovat až pět nezávislých PWM signálů. Dále obsahuje dva ovládací moduly pro SPI nebo I²C a USART [25].

5.1.12 Realizace zapojení

Zapojení bylo realizováno na oboustrannou desku plošných spojů, jejíž návrh, osazovací náčrtek a seznam použitých součástek je uveden v přílohách. Osazená realizovaná řídicí jednotka je uvedena na Obr. 5.16



Obrázek 5.16: Řídicí jednotka pro vzducholod

5.2 Řídicí program

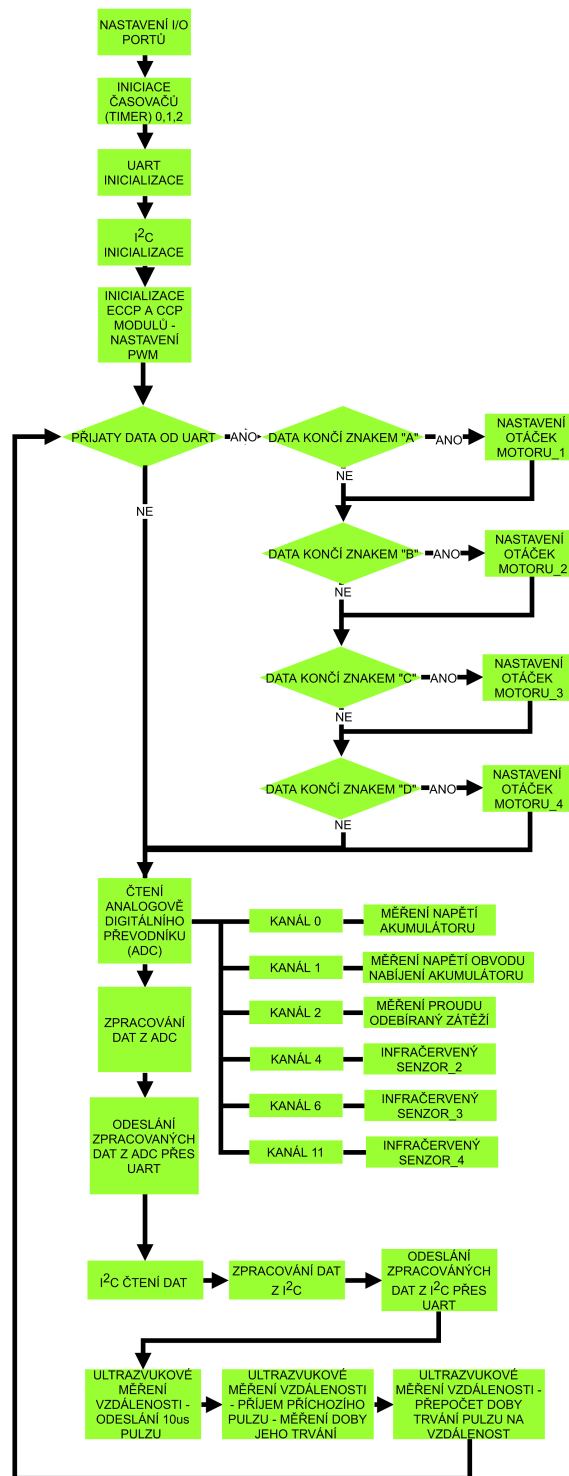
Základní fungování programu popisuje jeho vývojový diagram zobrazený na Obr. 5.17. Program funguje jako jednoduchý cyklus. Nejdříve zkoumá příchozí data na sběrnici UART, podle kterých nastaví střihu PWM signálů, které řídí motory. Poté se zpracovávají data z analogově digitálního převodníku a sběrnice I²C. Ta jsou následně odeslána přes UART do Bluetooth modulu a poté zobrazována na ovládacím zařízení. Data z akcelerometru jsou zpracována pro výpočet rychlosti. Dále program ověří, zda není detekována překážka infračerveným senzorem. Na závěr je změřena výška pomocí ultrazvukového senzoru. Jako ovládací zařízení komunikující přes Bluetooth je použit mobilní telefon nebo tablet.

5.3 Ověření funkčnosti zařízení

Ověřování funkčnosti modelu řídicí jednotky bylo rozděleno do několika kroků. Nejprve bylo nutné změřit nabíjecí a stabilizační obvody, jejichž fungování bylo nezbytné pro správné fungování zbytku obvodu. Dále byly změřeny jednotlivé komunikační signály externích periférií komunikujících s mikrokontrolerem. Nakonec bylo ověřeno správné odesílání dat shromážděných ze senzorů do ovládacího zařízení a příjem dat pro kontrolu ovládání vzducholodě.

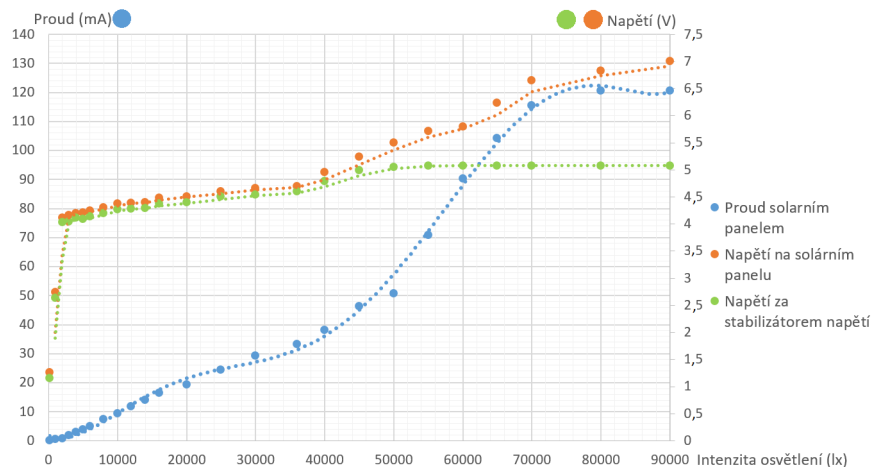
Nabíjecí a stabilizační obvody

Pro ověření funkčnosti nabíjení pomocí solárních panelů, byla změřena závislost napětí, proudu dodaných solárním panelem a napětí za lineárním stabilizátorem na intenzitě osvětlení. Pro měření byl použit solární panel se jmenovitými hodnotami 7,2 V a 150 mA. Vlastní naměřená závislost je ukázána na Obr. 5.18, kde v místě intenzity osvětlení přibližně 6000 lx došlo k zapnutí nabíjení akumulátoru nabíjecím obvodem. V momentu dosažení 120 mA už dále nemůže dojít ke zvýšení proudu vlivem nastavení maximálního dobíjecího proudu 100 mA, zbylých 20 mA spotřebovává samotný obvod vlivem indikačních led diod. Samotné nabíjení fungovalo dle předpokladů, tedy omezení nabíjecího proudu na 100 mA a při nabití udržování napětí 4,2 V s dodáváním proudu do zátěže za akumulátor.



Obrázek 5.17: Vývojový diagram řídicího programu pro ovládání vzducholodě

U spínaných regulátorů byla změřena jejich převodní charakteristika pro ověření, zda se koleno, kdy obvod nemá dost velké napájecí napětí pro zapnutí, se nenachází v rozmezí, ve kterém operuje použitý Li-pol akumulátor, tedy 3,3 V až 4,2 V. V tomto rozsahu byl pro oba stabilizátory změřen činitel stabilizace. Dále byl proměřen činitel zvlnění při nominální hodnotě akumulátoru 3,7 V. Zároveň byl zaznamenán odběr proudu obvodem, při vypnutých motorech, který činil kontinuálně 50 mA. Naměřené údaje jsou zaznamenány v tabulce 5.2.



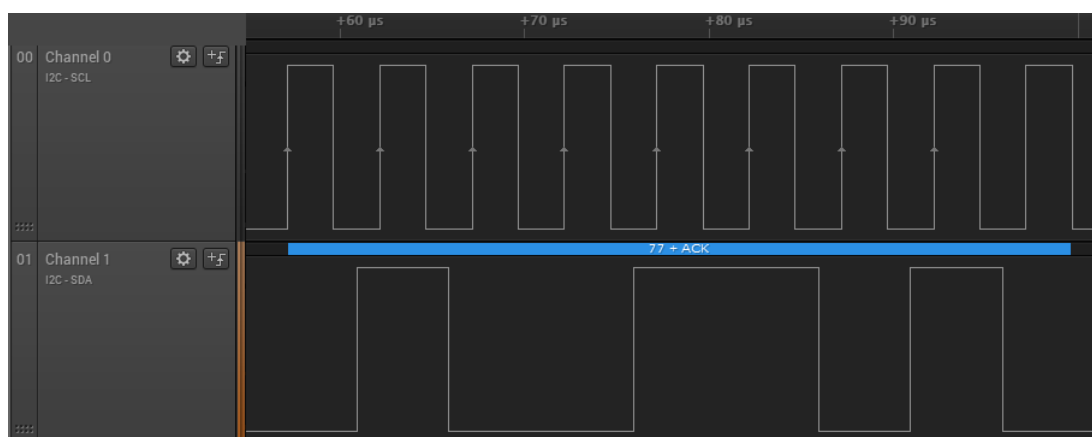
Obrázek 5.18: Závislost napětí a proudu dodané solárním panelem do obvodu v závislosti na intenzitě osvětlení

Tabulka 5.2: Naměřené parametry spínaných měničů v použitém zapojení

	Napětí akumulátoru 3,7 V při odběru 50 mA			
	Napětí na výstupu (V)	Činitel zvlnění (%)	Činitel stabilizace (-)	Přibližné napětí zapnutí obvodu (V)
Snižující měnič stabilizující na 3,3 V	3,281	0,104	180	0,7
Zvyšující měnič stabilizující na 5 V	4,992	0,218	100	2,3

Komunikační a kontrolní signály

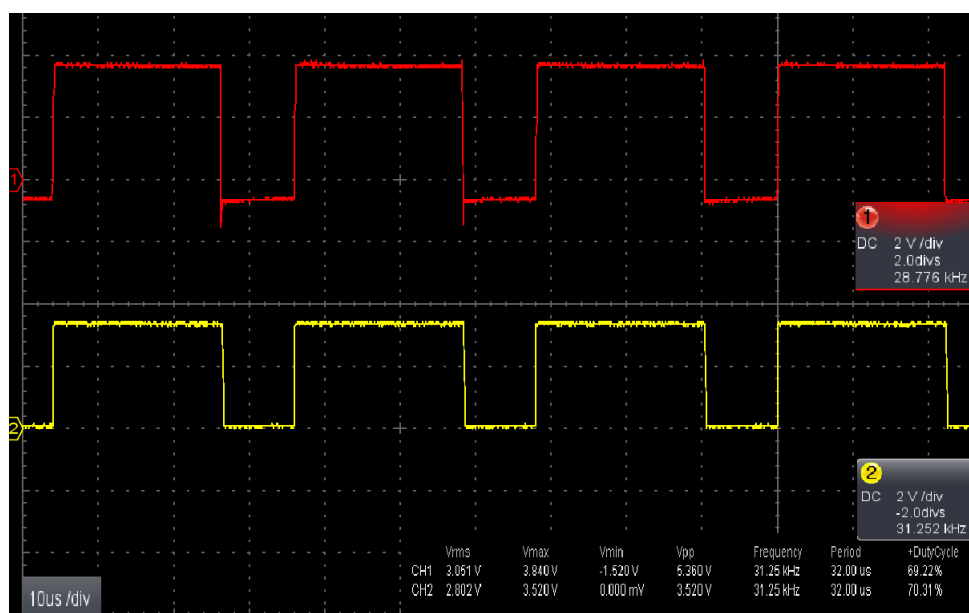
Na průběhy komunikace použitých sériových sběrnic bylo nahlédnuto logickým analyzáto-rem, který ukázal předpokládaný průběh bez chyb. Příklad části změřené komunikace I²C je ukázán na Obr. 5.19. Dále byl osciloskopem změřen příchozí a odchozí pulz z ultrazvukového senzoru.



Obrázek 5.19: Ukázka změřeného průběhu sběrnic I²C

Ovládání motorů pomocí pulzně šířkové modulace PWM, bylo změřeno osciloskopem, vyzkoušeno pro různé střídy signálu a všechny čtyři výstupy pro motory. Příklad měření s připojeným motorem je na Obr. 5.20, kde žlutý průběh je signál generovaný mikrokontro-

lérem a červený představuje napětí, kterým je napájen motor.



Obrázek 5.20: Změřený průběh průběh PWM signálu na vstupu (žlutý průběh) a výstupu (červený) H-můstku

Komunikace s ovládacím zařízením

Pro ověření komunikace bylo připojeno k řídicí jednotce přes Bluetooth ovládací zařízení-mobilní telefon. Po úspěšném spárování bylo nutné otevřít adekvátní ovládací aplikaci, ve které bylo nastaveno okno, kam přicházela veškerá poslaná data z řídicí jednotky. Příklad vyčtených dat je uveden na Obr. 5.21. Vyčtená data ze senzorů či čtené analogové hodnoty, byly následně v programu řídicí jednotky kalibrovány, aby co nejvíce odpovídaly skutečnosti. Celková přesnost dat ze senzorů byla adekvátní s ohledem na použité zapojení. Dále bylo ověřeno vysílání dat do řídicí jednotky ovládáním rychlosti otáčení motorů, které fungovalo dle předpokladů. Ve velice ojedinělých případech nedocházelo ke změně rychlosti motoru, což bylo způsobeno řídicím programem.

```
VYSKA 4.79 cm
teplota 24.80 oC
AKCELEROMETR
X...-0.12 Y...0.22 Z...1.07
Rychlost 0.42 m/s
VSTUP NAPETI 0.00 V
AKUMULATOR 3.77 V
PROUD 0.05 A
VYSKA 126.50 cm
teplota 24.70 oC
AKCELEROMETR
X...0.00 Y...0.15 Z...0.97
Rychlost 0.21 m/s
```

Obrázek 5.21: Příklad výstupu dat z řídicí jednotky zobrazených na ovládacím zařízením

5.4 Zhodnocení

Model řídicí jednotky funguje po stránce zapojení dle předpokladů, viz předchozí podkapitola. Ve které, byly ověřeny důležité prvky zapojení, jako například dobíjení solárním panelem, které začíná s nabíjením už při malých hodnotách intenzity osvětlení a maxima dosahuje přibližně na úrovni srovnatelné se slunečním zářením za běžného dne. Dále byly změřeny stabilizační obvody, které fungují bez problému v používaném napěťovém rozsahu s dostatečnou stabilizací a nízkým zvlněním pro použitou aplikaci. Na závěr byly nejprve změřeny průběhy komunikací sériových sběrnic, které vypadaly dle předpokladů, poté PWM signály na vstupu a výstupu H-můstků, které odpovídaly požadovaným průběhům. Avšak celkově je návrh pouze model, který měl odzkoušet různé principy, a tudíž má své nedokonalosti, jako například relativně velkou hmotnost přibližně kolem 20 g, i přes snahu výběru co nejlehčích a nejmenších součástek. Tomu nepomáhá ani modulární připojení některých senzorů. Dále zapojení neobsahuje systém pro sledování maximálního bodu výkonu MPPT, který by se staral o největší využitelnost solárních článků a však použité zapojení i přes to splňuje funkci.

Po stránce řídicího programu bylo především cíleno na řízení motorů a ověření fungování připojených senzorů a jejich následné využití při kontrole letu. V základu bez použitých modulů byly zpracovány, načteny a případně zužitkovány o informace momentální výšce, detekce překážky a přibližné rychlosti. Jako doplňkové informace byly poskytnuty teplota vzduchu, napětí na akumulátoru, a odebíraný proud. Tato základní verze programu fungovala bez problémů. Nabízí se však možnost rozšíření programu s ohledem na možnosti, které nabízí zkonstruovaná řídicí jednotka, jako například implementace hledání domovské stanice pomocí infračervených senzorů, nebo případné připojení GPS modulu k druhé vyvedené UART sběrnici.

6 Celková konstrukce vzducholodi

Na závěr práce byla sestavena základní konstrukce celé vzducholodi. To znamenalo, že bylo nutné upevnit řídicí jednotku k úchytné konstrukci, ke které byl připevněn nosný balón se solárními panely. Dále bylo nutné rozmístit motory. Samotná nosná konstrukce byla sestavena z lehkého dřeva. Jako balóny byly použity nafukovací balónky typu Torpédo o nosnosti v nafouknutém stavu přibližně 21 g a Zeppelin 43 g.

Pro vybrání balónu bylo nutné sestavit hmotnostní tabulku 6.1. Některé položky v tabulce jsou obměnitelné za jiný typ o jiné hmotnosti nebo volitelného charakteru, jako například použití solárních panelů, či počet motorů. Z tohoto důvodu je tato tabulka spíše orientační a nabízí různé varianty sestavení. Například pro variantu A vyznačenou v tabulce bylo potřeba použití balónu o nosnosti přibližně 80 g, a proto byly použity dva balonky Zeppelin. Celková realizace varianty A je ukázána na Obr. 6.1. Pro sestavení varianty se solárními články by musel být přidán další balón. Obecně nebyl k dispozici solární panel, který byl původně zamýšlen, tedy značně lehčí. Problémem bylo jeho obstarání, které bylo možné pouze komplikovaně ze zahraničí s vysokou daní.

Tabulka 6.1: Hmotnostní bilance sestavování vzducholodě

	Hmotnost (g)	Mezisoučet hmotnosti (g)	VARIANTA A	VARIANTA B
Řídicí jednotka	23,6	23,6	23,6	23,6
Úchytná konstrukce	9,8	33,4	33,4	33,4
Bluetooth HC-06	2,92	36,32	36,32	36,32
Ultrazukový senzor HC-SR04	8,4	44,72	44,72	44,72
Akumulátor Li-POL 590 mAh	19,82	64,54	64,54	64,54
Motor_1 DIDE1557 + vrtule HC370	3,12	67,66	67,66	67,66
Motor_2 DIDE1557 + vrtule HC370	3,12	70,78	70,78	70,78
Motor_3 DIDE1557 + vrtule HC370	3,12	73,9	73,9	73,9
Motor_4 DIDE1557 + vrtule HC370	3,12	77,02	77,02	77,02
Solární článek 7,2 V/150 mA/348 cm ²	29,5	106,52		106,52



Obrázek 6.1: Konstrukce varianty A a) za letu b) detail uchycení

Samotný let byl do jisté míry kontrolovatelný i přes neideální upevnění balónu. Celkově nebylo možné dosáhnout dlouhého letu z důvodu značného úniku nosného plynu z balónu. Samotný návrh by si zasluhoval lepší řešení balonů pro zmenšení úniku plynu.

7 Závěr

Tato práce měla za úkol realizovat model malé říditelné vzducholodě se solárním dobíjením akumulátoru a vodíkovým plněním balónu. S hlavním zaměřením na tvorbu řídicí jednotky, která měla obsahovat funkce řízení otáček motorů, sběru dat ze senzorů a bezdrátové komunikace s ovládacím zařízením.

Pro výrobu vodíku byl vytvořen elektrolyzátor vody s řídicí jednotkou, který však svou jednoduchou konstrukcí nebyl uzpůsoben na chod při velkých proudcích, a tudíž nebyla produkce vodíku dostatečně rychlá. Při této rychlosti výroby plynu by nafouknutí dvou balónů typu Zeppelin trvalo přibližně dva dny. V ohledu na bezpečnost byla práce s vodíkem bez problémů. Jediné riziko by hrozilo pouze v moment přímého zapálení. Realizovaná řídicí jednotka operovala dle očekávání.

Dále bylo provedeno měření chování a vlastností motorů s vrtulemi. Byl vybrán motor DIDE1557 a vrtule H370, kvůli svým vlastnostem poměru statického tahu ku hmotnosti. Výsledky dále ukázaly, jaký tah a odběr motorů lze očekávat při samotném použití pro pohon vzducholodě.

Hlavní částí byla konstrukce řídicí jednotky pro vzducholodě. Při návrhu zapojení byla snaha o výběr součástek s co nejmenší hmotností. Realizovaná jednotka obsahovala možnost řízení až čtyř motorů, dále senzory pro měření výšky, teploty a zrychlení s možností připojení dalších senzorů ve formě modulů. Pro komunikaci s ovládacím zařízením byla použita technologie Bluetooth. Navíc byla jednotka vybavena infračervenými senzory a druhou vyvedenou UART sběrnici pro možné budoucí použití. Po realizaci zapojení bylo provedeno kontrolní měření a vyzkoušení všech důležitých částí. To ukázalo, že vše pracuje dle předpokladů. Solární dobíjení, i přes jednoduchou realizaci, poskytovalo dostačující využití měřeného solárního článku. Data ze senzorů a informační údaje o řídicí jednotce po zpracování odpovídaly skutečnosti s ohledem na jejich rozlišení či limity rozsahu. Použitá komunikace přes Bluetooth probíhala bez přerušování či ztráty dat, odezva řízených motorů na změnu, byla dostatečně rychlá. Základní verze řídicího programu splnila požadavky fungování, avšak nabízí se možnost rozšíření funkcí, například o čtení dat z dalších senzorů či GPS modulu, nebo implementace hledání domovské stanice.

Na závěr byla sestavena celá konstrukce a odzkoušen let. Byla realizována pouze varianta bez solárního článku, z důvodů nedostupnosti požadovaného solárního panelu a problému s uskladněním dostatečného množství vodíku. Samotný let byl kontrolovatelný, ale značně krátký, z důvodu úniku vodíku z balónu.

Celý návrh a konstrukce jako model splnil účel funkčnosti, ale nabízí se celá řada vylepšení, jako například zlepšení a implementování funkcí do řídicího programu, výroba odolnější konstrukce elektrolyzátoru a vymyšlení efektivního systému uskladnění vodíku. Dále obstarání lehčích solárních článků a konstrukce, či koupě vhodnějších balónů.

Literatura

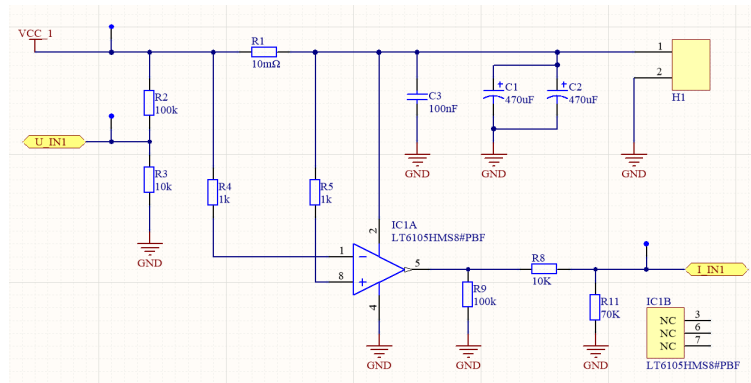
- [1] Polák, M. *Vzducholodě nabírají druhý dech*. vtm.e15., 2010 , [online], [cit. 2018-05-17].
Dostupné z:
<http://vtm.e15.cz/vzducholode-nabiraji-druhy-dech>.
- [2] Lněničkak, J. *Jak se vznášet ve vzduchu*. Akademie letectví, 2011, [online], [cit. 2018-05-17]. Dostupné z:
http://airspace.cz/akademie_letectvi/2011/12/jak-se-vznaset-ve-vzduchu/.
- [3] Linner, M. *Hydrogen and Helium* . ChemMatters, Lakehurst, 1985.
- [4] *Volba pohonu*. Offroad RC, 2007, [online], [cit. 2018-05-17]. Dostupné z:
http://offroad-rc.info/valasek_02_pohon.htm.
- [5] *Stejnoseměrné motory*. Přednáška PEL, ČVUT, Praha, 2012.
- [6] Teplý, T. *Mikrokontroléry*. Přednáška MIK, ČVUT, Praha, 2017.
- [7] Lněničkak, J. *Celkový, potřebný a ještě využitelný tah*. Akademie letectví, 2013, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z:
http://airspace.cz/akademie_letectvi/celkovy-potrebny-a-jete-vyuzitelny-tah/.
- [8] Vítek, M. *Optimalizace výběru aktuátoru pro vzdušný průzkumný prostředek*. Bakalářská práce, Brno, 2013.
- [9] Hazdra, P. *Optoelektronika*. Přednáška ELP, ČVUT, Praha, 2015.
- [10] Jeřábek, V. *Detektory optického záření*. Přednáška OFT, ČVUT, Praha, 2017.
- [11] Hankovec, D. *8051*. dhservis, 2002, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z:
<http://dhservis.cz/popis.htm/>.
- [12] Husák, M. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Academia, Praha, 2008.
- [13] Shrivastava, A., Verma, A. *Distance Measurement of an Object or Obstacle by Ultrasound Sensors*. International Journal of Computer Theory and Engineering, Vol. 2, 2010.
- [14] Aguilar, S. *Opportunistic Sensor Data Collection with Bluetooth Low Energy*. MDPI, 2017, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5298732/>.
- [15] Kasík, P. *Vzducholod flintou nesestřelíš*. Technet.cz, 2012, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z:
https://technet.idnes.cz/vzducholod-flintou-nesestrelis/tec_technika.aspx?c=A120221_111744_tec_technika_pka.

- [16] Diogo, M., César, A. *Hydrogen production by alkaline water electrolysis*. Quím. Nova, Sao Paulo 2013.
- [17] Reichl, J. *Faradayovy zákony elektrolýzy*. Encyklopedie fyziky, 2012, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z: <https://fyzika.jreichl.com/main.article/view/279-faradayovy-zakony-elektrolyzy>.
- [18] *MQ-2 Semiconductor Sensor for Combustible Gas*. Datasheet, Pololu, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z: <https://www.pololu.com/file/0J309/MQ2.pdf>.
- [19] *MCP73833/4 - Stand-Alone Linear Li-Ion / Li-Polymer Charge Management Controller*. Datasheet, Microchip, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22005a.pdf>.
- [20] *MCP1640/B/C/D - 0.65V Start-Up Synchronous Boost Regulator*. Datasheet, Microchip, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20002234D.pdf>.
- [21] *NCP1529 - Adjustable Output Voltage Step-down Converter*. Datasheet, ON Semiconductor, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/NCP1529-D-82884.pdf>.
- [22] *DRV8833 Dual H-Bridge Motor Driver*. Datasheet, Texas Instruments, 2015, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8833.pdf>.
- [23] *TCN75A Temperature Sensor*. Datasheet, Microchip, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21935D.pdf>.
- [24] *MMA8452Q, 3-axis, 12-bit/8-bit digital accelerometer*. Datasheet, NXP Semiconductors, 2016, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MMA8452Q.pdf>.
- [25] *PIC18(L)F2X/4XK22 - Low-Power, High-Performance Microcontrollers with XLP Technology*. Datasheet, Microchip, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z: http://www.microchip.com/stellent/groups/picmicro_sg/documents/devicedoc/cn547043.pdf.
- [26] Appl, F. *Historie vzducholodí: Rychlý vzestup, rychlý pád*. EpochaPlus, 2016, [online], [cit. 2018-05-17], Dostupné z: <https://epochaplus.cz/historie-vzducholodi-rychly-vzestup-rychly-pad/>.

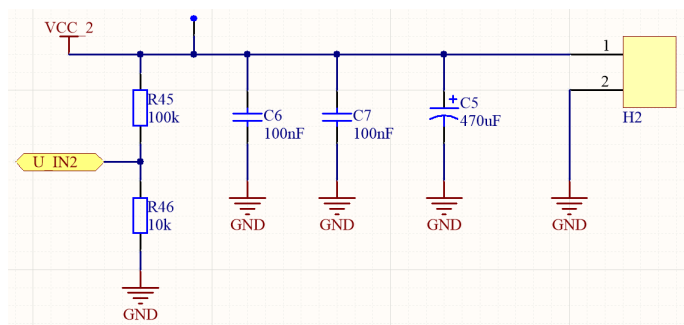
Použité programy:

Microsoft Office 365, MiKTeX 2.9, CorelDRAW X7, Altium CircuitMaker, mikroC PRO for PIC 7.1, Draw.io, Logic 1.2.18, Bluetooth Electronics v1.1

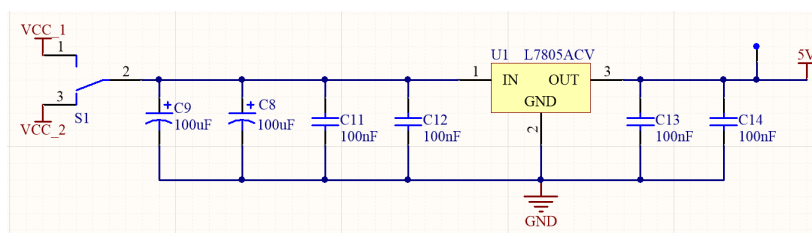
A Návrh řídicí jednotky pro elektrolyzér



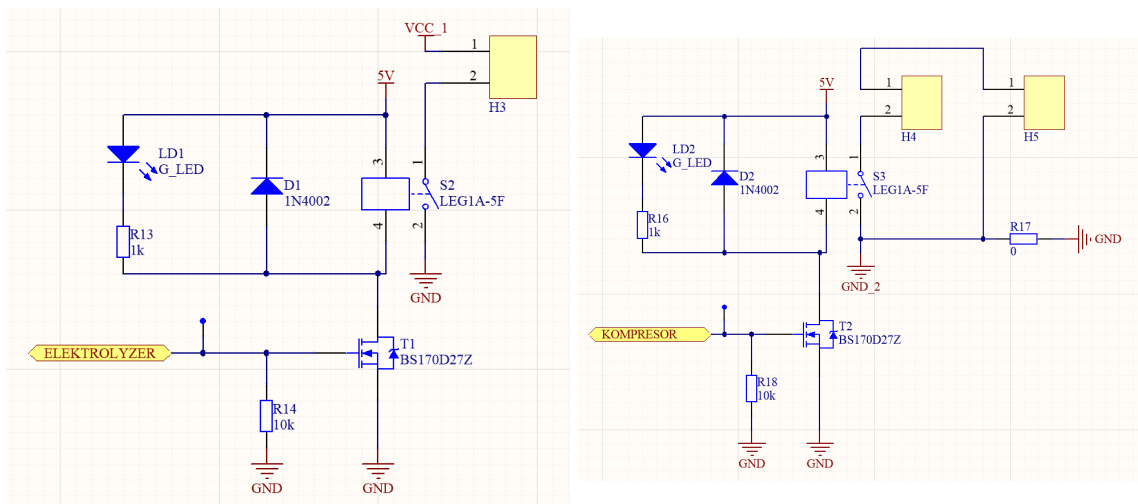
Obrázek A.1: Vstup napájení elektrolyzéro nebo řídicí jednotky



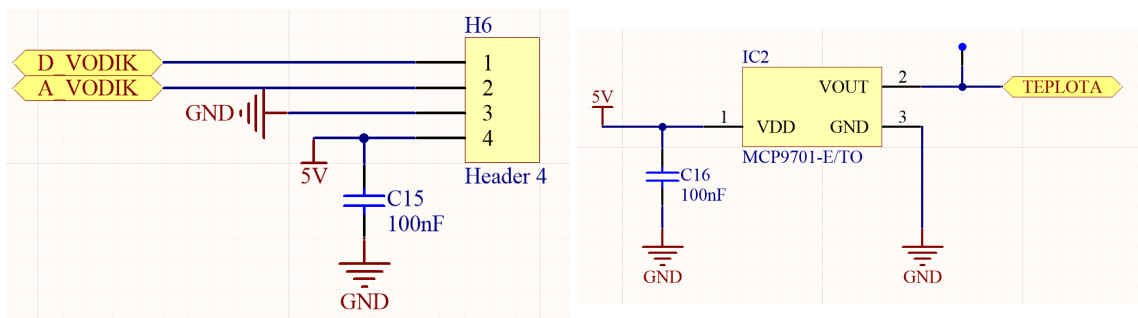
Obrázek A.2: Vstup napájení řídicí jednotky



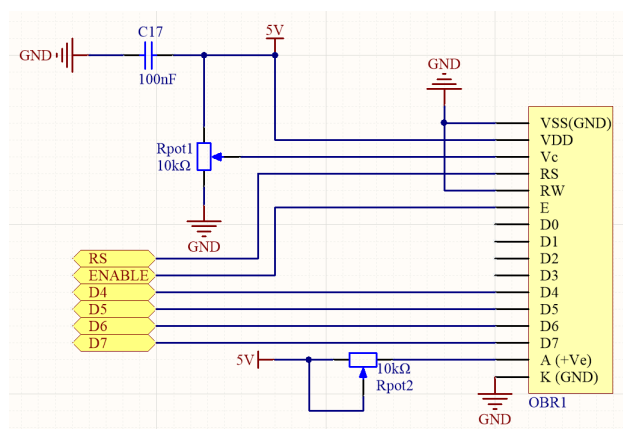
Obrázek A.3: Zapojení stabilizátoru napětí L7805ACV



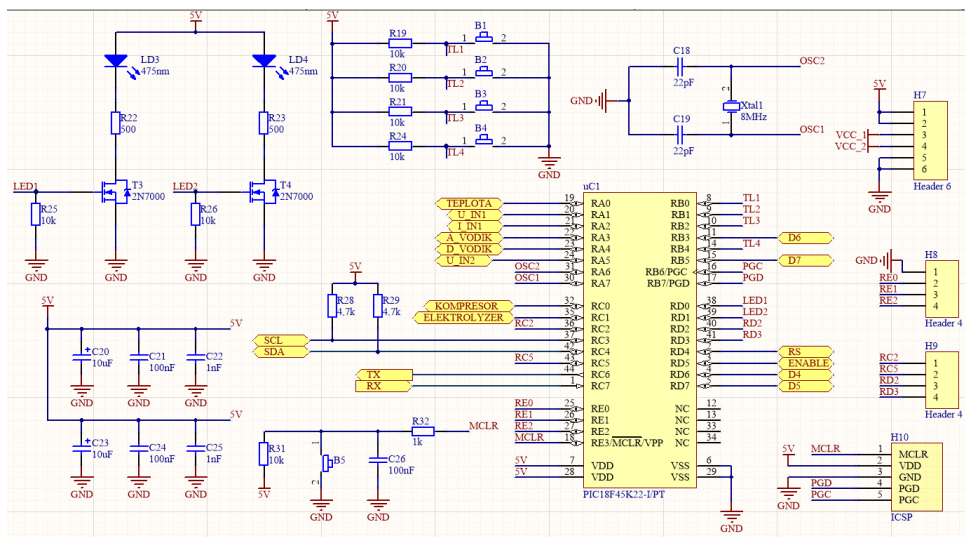
Obrázek A.4: Zapojení ovládání zapínání a) elektrolyzéro b) kompresoru



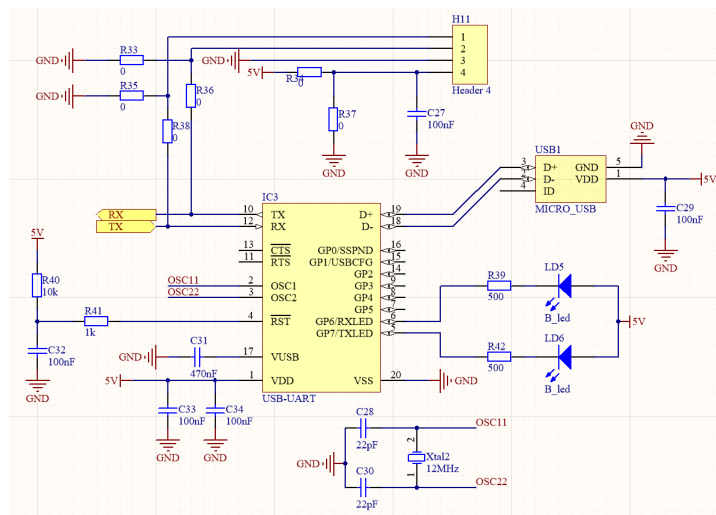
Obrázek A.5: Zapojení do obvodu senzor a) vodíku MQ-2 b) teploty MCP9701



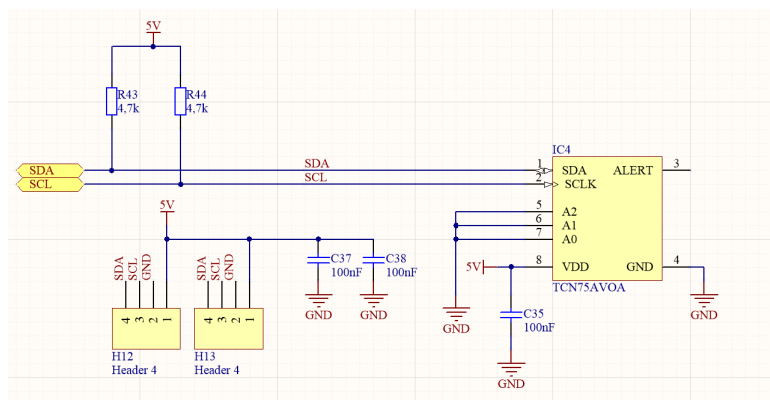
Obrázek A.6: Zapojení displeje s řadičem hd44780



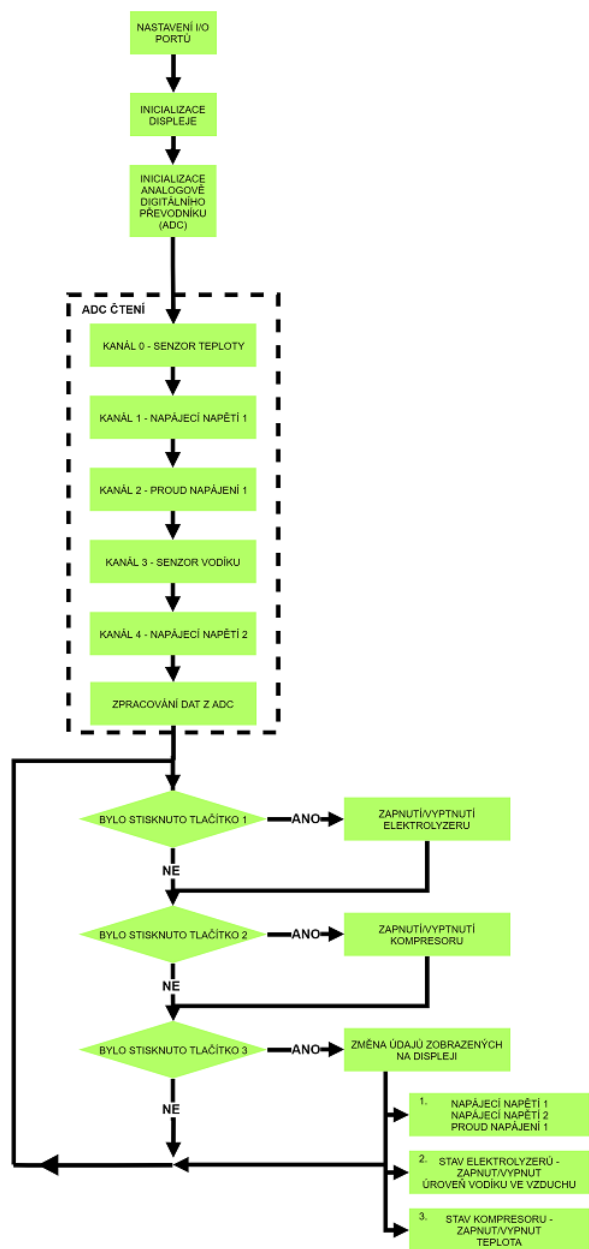
Obrázek A.7: Zapojení mikrokontroléru PIC18f45k22 do obvodu



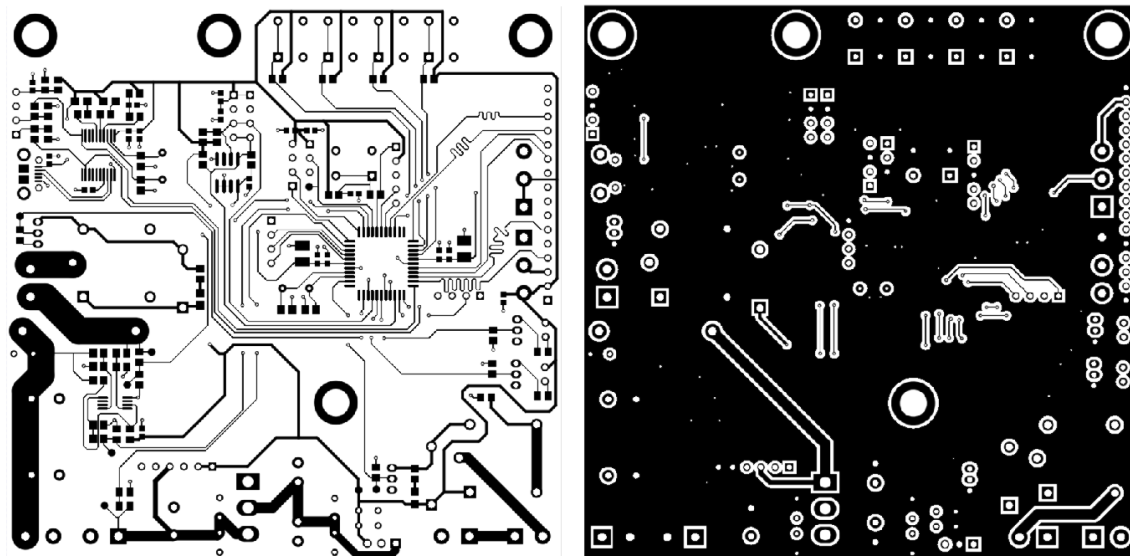
Obrázek A.8: Zapojení převodníku UART-USB



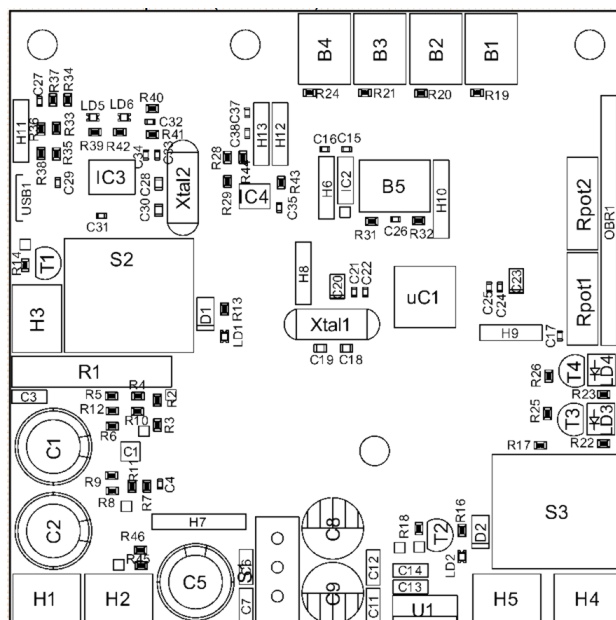
Obrázek A.9: Zapojení obvodu se sběrnici I²C



Obrázek A.10: Vývojový diagram řídicího programu



Obrázek A.11: Návrh DPS řídicí jednotky pro elektrolyzér pohled a) shora b) zdola



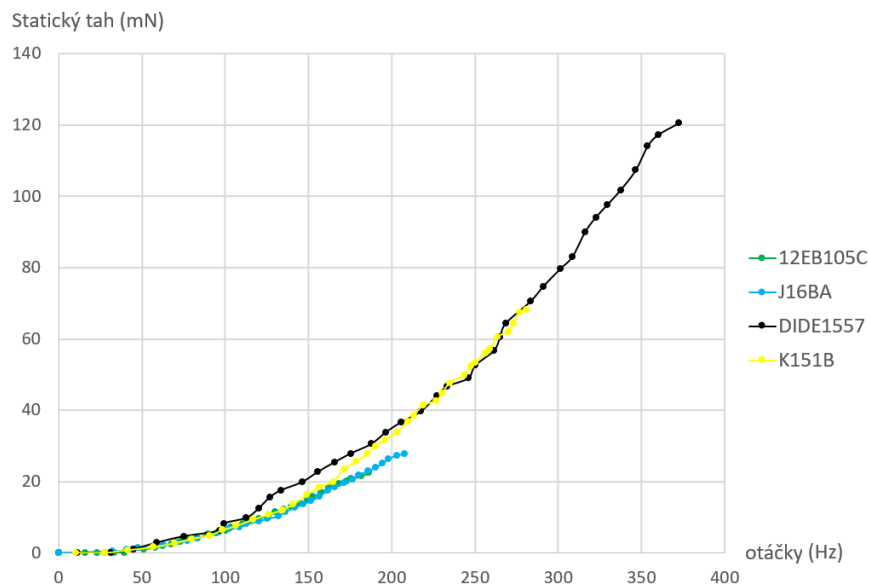
Obrázek A.12: Osazovací náčrt

Tabulka A.1: Seznam použitých součástek

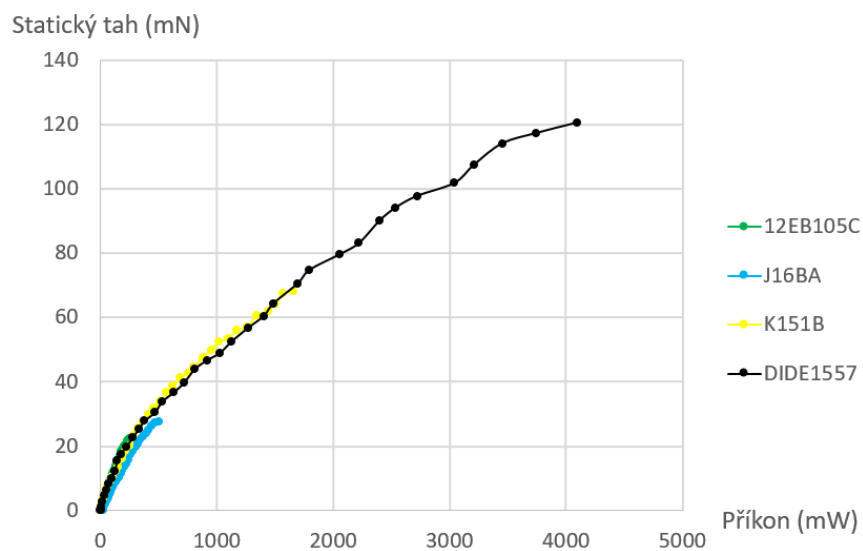
Název	Monžství	Popis	Označení v návrhu
TACT-67N-F	5	Mikrospínač TACT; SPST-NO; Polohy:2; 0,05A/12VDC; THT; není; 1,6N	B1, B2, B3, B4, B5
PF1H471MNN1220	3	Kondenzátor: elektrolytický; THT; 470uF; 50VDC; Ø12,5x20mm; ±20%	C1, C2, C5
CC-100N	7	Kondenzátor: keramický; 100nF; 50V; ±10%; THT; 2,54mm	C3, C6, C7, C11, C12, C13, C14
CL10F104ZA8NNNC	15	Kondenzátor: keramický; MLCC; 100nF; 25V; Y5V; -20÷+80%; SMD; 0603	C4, C15, C16, C17, C21, C24, C26, C27, C29, C32, C33, C34, C35, C37, C38
PF1H101MNN08B5	2	Kondenzátor: elektrolytický; THT; 100uF; 50VDC; Ø8x11,5mm; ±20%	C8, C9
CL21C220JBANNNC	4	Kondenzátor: keramický; MLCC; 22pF; 50V; COG; ±5%; SMD; 0805	C18, C19, C28, C30
TAJB106K006RNJ	2	Kondenzátor: tantalový; 10uF; 6,3VDC; SMD; Pouz B; 1210; ±10%	C20, C23
0603YC102KAT2A	2	Kondenzátor: keramický; MLCC; 1nF; 16V; X7R; ±10%; SMD; 0603	C22, C25
CL10F104ZA8NNNC	1	Kondenzátor: keramický; MLCC; 100nF; 25V; Y5V; -20÷+80%; SMD; 0603	C31
1N4002	2	Dioda: usměrňovací; THT; 100V; 1A; Balení: Ammo Pack; DO41; Ifsm:30A	D1, D2
LT6105HMS8#PBF	1	Single Channel, Precision, Rail-to-Rail Input Current Sense Amplifier, 0.1 MHz Typical GBW, 2.85 to 36 V, 8-Pin SOP (MS8-8), High Temperature / Automotive, Pb-Free	IC1
MCP9701-E/TO	1	Čidlo teploty; převodník teploty; -40÷125°C; TO92; THT; 3,1÷5,5V	IC2
MCP2200-I/SS	1	Kontrolér USB; UART; 3÷5,5VDC; SSOP20	IC3
TCN75AVOA	1	Čidlo teploty; serial output; -40÷125°C; SO8; SMD; 2,7÷5,5V; 0,5°C	IC4
LTST-C170KGKT	2	LED; SMD; 0805; zelená; 18-35mcd; 2x1,25x1,1mm; 130°; 2÷2,4V; 20mA	LD1, LD2
WW05A3SBQ4-B	2	LED; 5mm; modrá; 2800-3700mcd; 30°; Čelo: vypouklé	LD3, LD4
OSB50805C1E	2	LED; SMD; 0805; modrá; 42-80mcd; 2x1,25x0,8mm; 120°; 3,2÷3,6V; 20mA	LD5, LD6
OAR5R01FLF	1	Rezistor: drátový; měřicí, přesný; THT; 10mΩ; 5W; ±1%; -40÷125°C	R1
RC0805FR-07100KL	3	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 100kΩ; 0,125W; ±1%; -55÷155°C	R2, R9, R45
0805S8F1002T5E	12	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 10kΩ; 0,125W; ±1%; -55÷125°C	R3, R14, R18, R19, R20, R21, R24, R25, R26, R31, R40, R46
0805S8F1001T5E	10	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 1kΩ; 0,125W; ±1%; -55÷125°C	R4, R5, R13, R16, R32, R41, R22, R23, R39, R42
0805S8J0000T5E	13	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 0Ω; 0,125W; ±5%; -55÷125°C	R6, R7, R8, R10, R11, R12, R17, R33, R34, R35, R36, R37, R38
0805S8F4701T5E	4	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 4,7kΩ; 0,125W; ±1%; -55÷125°C	R28, R29, R43, R44
R16148-1A-2-B10K	2	Potenciometr: axiální; jednobodávkový; 10kΩ; 125mW; ±20%; THT; 6mm	Rpot1, Rpot2
5MS3S102AM2QE	1	Přepínač: posuvný; Polohy:3; SP3T; 2A/250VAC; 5A/28VDC; ON-OFF-ON	S1
LEG1A-5F	2	Relé: elektromagnetické; SPST-NO; Učivky:5VDC; 15A/120VAC; 360mW	S2, S3
BS170D27Z	2	Tranzistor: N-MOSFET; unipolární; 60V; 0,5A; 0,83W; TO92	T1, T2
2N7000	2	Tranzistor: N-MOSFET; unipolární; 60V; 0,2A; 0,4W; TO92	T3, T4
L7805ACV	1	Stabilizátor napětí; nenastavitelný; 5V; 1,5A; TO220; THT	U1
PIC18F45K22-I/PT	1	Mikrokontrolér PIC; Pamět:32kB; SRAM:1536B; EEPROM:256B; 64MH	uC1
1050170001	1	Zásuvka; USB B micro; na plošný spoj; SMT; PIN:5; vodorovné	USB1
8.00M-HC49-S	1	Rezonátor: krystalový; 8MHz; ±30ppm; 20pF; THT, xtal	Xtal1
12.00M-HC49-S	1	Rezonátor: krystalový; 12MHz; ±30ppm; 20pF; THT, xtal	Xtal2

B Výsledky měření motorů a vrtulí

B.1 Motory



Obrázek B.1: Změřená závislost statického tahu na otáčkách motoru

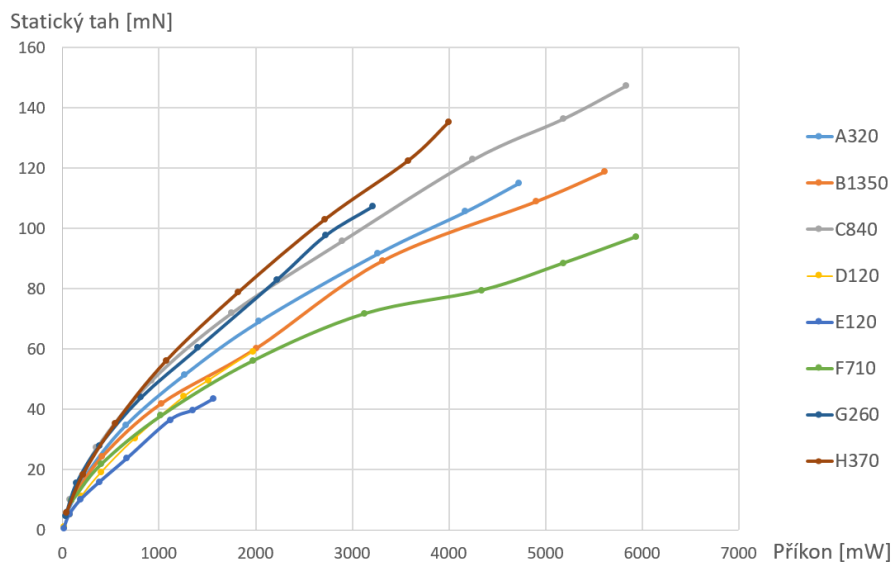


Obrázek B.2: Změřená závislost statického tahu na příkonu motoru

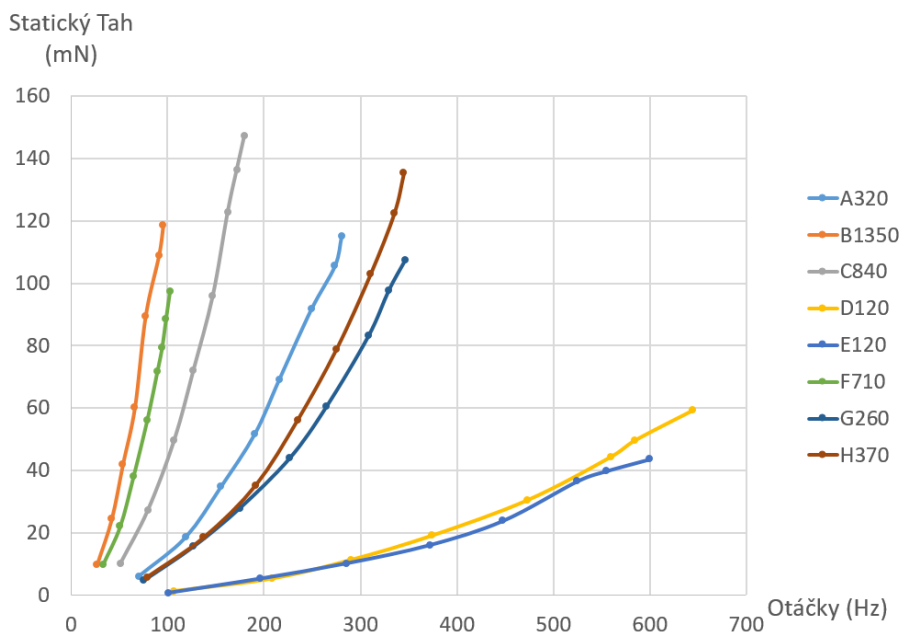
Tabulka B.1: Změřené parametry motorů

U(V)	1ZE100C			1ZE100C			1ZE100C			1ZE100C			1ZE100C			1ZE100C			1ZE100C		
	motor	otáčky (Hz)	hmotnost motoru [g]	otáčky (Hz)	hmotnost motoru [g]	otáčky (Hz)	hmotnost motoru [g]	otáčky (Hz)	hmotnost motoru [g]	otáčky (Hz)	hmotnost motoru [g]	otáčky (Hz)	hmotnost motoru [g]	otáčky (Hz)	hmotnost motoru [g]	otáčky (Hz)	hmotnost motoru [g]	otáčky (Hz)	hmotnost motoru [g]	otáčky (Hz)	hmotnost motoru [g]
0.1	3.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	3.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	15.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	15.52	16	0	6.28	30.99	0	0	12.396	26.15	56.8	1.5696	0.16	10.46	48.26	58.95	2.8449	0.29	19.304	0.29	19.304	0.29
0.6	15.9	27.95	0	7.76	39.27	0	0	19.635	33.79	69.9	2.7468	0.28	16.895	66.1	75.1	4.6107	0.47	33.05	0.47	33.05	0.47
0.7	16.1	31.48	0	9.44	44.84	0	0	28.904	43.33	79.65	4.8259	0.39	25.998	80.1	88.55	6.1893	0.63	48.06	0.63	48.06	0.63
0.8	17.13	33.48	0	11.08	52.76	0	0	38.173	52.76	99.9	6.5886	0.56	35.083	100.0	108.4	8.024	0.84	61.4	0.84	61.4	0.84
0.9	17.8	39.955	0	16.02	33.8	47.62	0	30.42	70.6	106.7	7.5537	0.77	63.54	112.85	9.81	1.26	123.03	1.26	123.03	1.26	123.03
1	18.83	44.845	0.8829	18.83	37.35	56.7	0	37.35	84.9	116.95	9.3195	0.95	84.9	145.9	176.7	1.58	145.9	1.58	145.9	1.58	145.9
1.1	19.94	51.5	0.9815	19.94	52.95	63.98	0	52.95	96.4	132.5	10.6929	1.19	106.93	161.3	184.7	2.09	161.3	2.09	161.3	2.09	161.3
1.2	21.04	62.75	1.0815	21.04	64.35	71.98	0	64.35	107.9	149.15	12.0679	1.38	120.68	172.7	197.1	2.79	172.7	2.79	172.7	2.79	172.7
1.3	21.64	67.5	1.1819	21.64	69.15	77.35	0	69.15	117	160.75	13.4475	1.57	134.44	184.1	210.5	3.21	184.1	3.21	184.1	3.21	184.1
1.4	22.63	67.5	1.2825	22.63	69.15	82.9	0	69.15	126.45	171.15	14.8271	1.76	148.24	195.5	226.9	3.63	195.5	3.63	195.5	3.63	195.5
1.5	23.43	73.45	1.3831	23.43	75.05	88.45	0	75.05	135.9	182.75	16.2067	1.95	162.06	206.9	243.3	4.05	206.9	4.05	206.9	4.05	206.9
1.6	24.23	79.35	1.4837	24.23	80.95	93.95	0	80.95	145.35	193.95	17.5863	2.14	175.85	218.3	254.7	4.45	218.3	4.45	218.3	4.45	218.3
1.7	25.02	85.25	1.5843	25.02	86.85	100.0	0	86.85	154.85	204.95	18.9659	2.33	189.75	229.7	266.1	4.85	229.7	4.85	229.7	4.85	229.7
1.8	28.22	89.6	1.6849	28.22	91.2	106.0	0	91.2	164.35	215.95	20.3455	2.52	203.65	241.1	277.5	5.25	241.1	5.25	241.1	5.25	241.1
1.9	29.32	94.8	1.7855	29.32	96.4	111.2	0	96.4	173.85	226.95	21.7251	2.71	212.55	252.5	288.9	5.65	252.5	5.65	252.5	5.65	252.5
2	30.2	100.15	1.8861	30.2	101.75	116.4	0	101.75	183.35	237.95	23.1047	2.9	223.95	263.9	300.3	6.05	263.9	6.05	263.9	6.05	263.9
2.1	31.1	105.4	1.9867	31.1	107.05	121.6	0	107.05	192.85	248.95	24.4843	3.09	235.35	275.3	311.7	6.45	275.3	6.45	275.3	6.45	275.3
2.2	31.83	110.6	2.0873	31.83	112.65	126.8	0	112.65	202.35	259.95	25.8639	3.28	246.75	286.7	323.1	6.85	286.7	6.85	286.7	6.85	286.7
2.3	35.2	114.5	2.1879	35.2	116.15	132.0	0	116.15	211.85	270.95	27.2435	3.47	258.15	298.1	334.5	7.25	298.1	7.25	298.1	7.25	298.1
2.4	37.3	120.05	2.2885	37.3	121.75	137.2	0	121.75	221.35	281.95	28.6231	3.66	269.55	309.5	345.9	7.65	309.5	7.65	309.5	7.65	309.5
2.5	38.71	125.85	2.3891	38.71	127.55	142.4	0	127.55	230.85	292.95	29.9927	3.85	280.95	320.9	357.3	8.05	320.9	8.05	320.9	8.05	320.9
2.6	40.1	131.75	2.4897	40.1	133.35	147.6	0	133.35	240.35	303.95	31.3623	4.04	292.35	332.3	368.7	8.45	332.3	8.45	332.3	8.45	332.3
2.7	42.23	135	2.5903	42.23	136.75	152.8	0	136.75	249.85	314.95	32.7319	4.23	303.75	343.7	380.1	8.85	343.7	8.85	343.7	8.85	343.7
2.8	44.59	139.8	2.6909	44.59	141.15	158.0	0	141.15	259.35	325.95	34.1015	4.42	315.15	355.1	391.5	9.25	355.1	9.25	355.1	9.25	355.1
2.9	46.16	145	2.7915	46.16	144.15	163.2	0	144.15	268.85	336.95	35.4711	4.61	326.55	366.5	402.9	9.65	366.5	9.65	366.5	9.65	366.5
3	47.73	150.95	2.8921	47.73	147.15	168.4	0	147.15	278.35	347.95	36.8407	4.8	337.95	377.9	414.3	10.05	377.9	10.05	377.9	10.05	377.9
3.1	50.21	157.25	2.9927	50.21	150.15	173.6	0	150.15	287.85	358.95	38.2103	5.0	349.35	389.3	425.7	10.45	389.3	10.45	389.3	10.45	389.3
3.2	52.31	157.6	3.0933	52.31	151.55	178.8	0	151.55	297.35	369.95	39.5799	5.19	360.75	400.7	437.1	10.85	400.7	10.85	400.7	10.85	400.7
3.3	54.5	162.15	3.1939	54.5	152.95	184.0	0	152.95	306.85	380.95	40.9495	5.38	372.15	412.1	448.5	11.25	412.1	11.25	412.1	11.25	412.1
3.4	57.95	168.15	3.2945	57.95	154.35	189.2	0	154.35	316.35	391.95	42.3191	5.57	383.55	423.5	459.9	11.65	423.5	11.65	423.5	11.65	423.5
3.5	61.4	174.65	3.3951	61.4	155.75	194.4	0	155.75	325.85	402.95	43.6887	5.76	394.95	434.9	471.3	12.05	434.9	12.05	434.9	12.05	434.9
3.6	61.9	175.65	3.4957	61.9	156.75	199.6	0	156.75	335.35	413.95	45.0583	5.95	406.35	446.3	482.7	12.45	446.3	12.45	446.3	12.45	446.3
3.7	63.5	181.6	3.5963	63.5	158.15	204.8	0	158.15	344.85	424.9	46.4279	6.14	417.75	457.7	494.1	12.85	457.7	12.85	457.7	12.85	457.7
3.8	65.7	186.35	3.6969	65.7	159.55	209.6	0	159.55	354.35	435.9	47.7975	6.33	429.15	469.1	505.5	13.25	469.1	13.25	469.1	13.25	469.1

B.2 Vrtule



Obrázek B.3: Změřená závislost statického tahu na příkonu vrtule

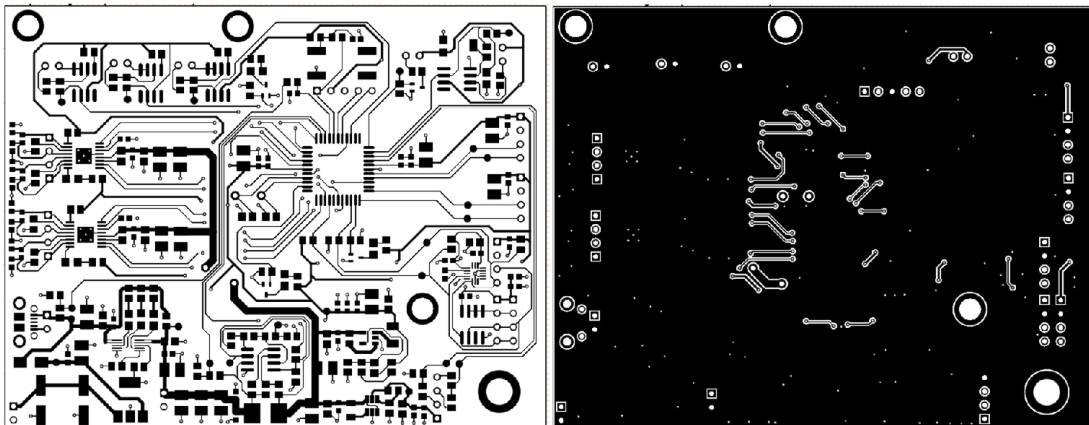


Obrázek B.4: Změřená závislost statického tahu na otáčkách vrtule

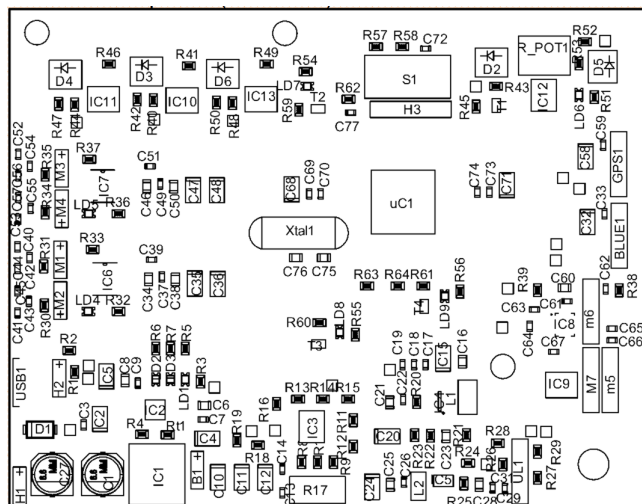
Tabulka B.2: Změřené parametry vrtulí

Napětí (V)	Proud (mA)	Otáčky (Hz)	Statický tah [m]	Statický tah (g)	Příkon (mW)	Statický tah - hmotnost vrtule (g)	Součinitel tahu (-)	Výkon vrtule (W)	Moment zátěže (Nm)
A320									
Počet listů (-)			3		hmotnost vrtule (g):		0.32	průměr vrtule(mm):	40.3
0.5	100.5	70.43	5.98	0.61	50.25	0.29	0.35	0.01	0.00002
1	249.1	118.90	18.44	1.88	249.10	1.56	0.38	0.04	0.00006
1.5	436.5	155.77	34.73	3.54	654.75	3.22	0.42	0.11	0.00011
2	694	190.70	51.60	5.26	1268.00	4.94	0.42	0.20	0.00017
2.5	815	216.17	69.16	7.05	2072.50	6.73	0.43	0.30	0.00022
3	1088	249.30	91.63	9.34	3264.00	9.02	0.43	0.46	0.00029
3.3	1264	273.80	105.56	10.76	4171.20	10.44	0.41	0.58	0.00034
3.5	1349	280.67	114.97	11.72	4721.50	11.40	0.43	0.65	0.00037
B1350									
Počet listů (-)			2		hmotnost vrtule (g):		1.35	průměr vrtule(mm):	101.55
0.5	189	26.96	9.81	1.00	94.50	-0.35	0.10	0.01	0.00008
1	412	42.06	24.33	2.48	412.00	1.13	0.10	0.00	0.00000
1.5	683	53.70	41.99	4.28	1024.50	2.93	0.11	0.00	0.00000
2	1003	66.10	60.23	6.14	2006.00	4.79	0.10	0.00	0.00000
2.5	1326	77.10	89.27	9.10	3315.00	7.75	0.11	0.00	0.00001
3	1634	91.05	108.89	11.10	4902.00	9.75	0.10	0.00	0.00001
3.3	1700	95.60	118.70	12.10	5610.00	10.75	0.09	0.01	0.00001
C840									
Počet listů (-)			2		hmotnost vrtule (g):		0.84	průměr vrtule(mm):	74.9
0.5	157	51.20	10.10	1.03	78.50	0.19	0.09	0.00	0.00000
1	352	79.90	27.27	2.78	352.00	1.94	0.11	0.00	0.00001
1.5	614	107.20	49.64	5.06	921.00	4.22	0.11	0.01	0.00001
2	875	127.10	72.01	7.34	1750.00	6.50	0.11	0.02	0.00002
2.5	1158	147.20	95.84	9.77	2895.00	8.93	0.11	0.02	0.00003
3	1416	162.70	122.82	12.52	4248.00	11.68	0.11	0.03	0.00003
3.3	1571	172.10	136.36	13.90	5184.30	13.06	0.11	0.04	0.00004
3.5	1666	180.00	147.25	15.01	5831.00	14.17	0.11	0.04	0.00004
D120									
Počet listů (-)			3		hmotnost vrtule (g):		0.12	průměr vrtule(mm):	24.42
0.5	36.11	107.17	1.18	0.12	18.06	0.00	0.22	0.02	0.00003
1	78.6	208.37	5.20	0.53	78.60	0.41	0.26	0.16	0.00012
1.5	133.7	290.40	11.18	1.14	200.55	1.02	0.29	0.49	0.00027
2	200.3	374.67	19.03	1.94	400.60	1.82	0.30	1.07	0.00045
2.5	301.1	473.67	30.41	3.10	752.75	2.98	0.30	2.15	0.00072
3	420.1	559.67	44.24	4.51	1260.30	4.39	0.31	3.70	0.00105
3.3	457.2	584.67	49.54	5.05	1508.76	4.93	0.32	4.33	0.00118
3.5	563.2	644.33	59.15	6.03	1971.20	5.91	0.31	5.70	0.00141
E120									
Počet listů (-)			2		hmotnost vrtule (g):		0.12	průměr vrtule(mm):	30.7
0.5	33.41	100.60	0.59	0.06	16.71	-0.06	0.05	0.00	0.00001
1	74.2	196.35	5.20	0.53	74.20	0.41	0.12	0.06	0.00005
1.5	127.7	285.90	10.10	1.03	191.55	0.91	0.11	0.17	0.00010
2	194.2	372.20	15.99	1.63	388.40	1.51	0.10	0.36	0.00015
2.5	267.9	447.70	23.74	2.42	669.75	2.30	0.10	0.64	0.00023
3	372.1	525.00	36.49	3.72	1116.30	3.60	0.12	1.15	0.00035
3.3	410.1	555.00	39.73	4.05	1353.33	3.93	0.11	1.32	0.00038
3.5	448.1	600.00	43.56	4.44	1568.35	4.32	0.11	1.56	0.00041
F710									
Počet listů (-)			2		hmotnost vrtule (g):		0.71	průměr vrtule(mm):	81.33
0.5	191	33.01	9.71	0.99	95.50	0.28	0.16	0.00	0.00000
1	402	50.90	21.97	2.24	402.00	1.53	0.15	0.00	0.00000
1.5	681	64.75	37.96	3.87	1021.50	3.16	0.16	0.00	0.00001
2	985	79.05	56.11	5.72	1970.00	5.01	0.16	0.01	0.00001
2.5	1250	89.60	71.71	7.31	3125.00	6.60	0.16	0.01	0.00001
3	1446	94.55	79.46	8.10	4338.00	7.39	0.16	0.01	0.00002
3.3	1571	98.55	88.49	9.02	5184.30	8.31	0.16	0.01	0.00002
3.5	1697	102.55	97.22	9.91	5939.50	9.20	0.16	0.01	0.00002
G260									
Počet listů (-)			2		hmotnost vrtule (g):		0.26	průměr vrtule(mm):	45.66
0.5	66.1	75.00	4.61	0.47	33.05	0.15	0.24	0.01	0.00001
1	145.9	126.70	15.50	1.58	145.90	1.26	0.28	0.04	0.00005
1.5	254.5	175.00	27.86	2.84	381.75	2.52	0.27	0.10	0.00009
2	406	227.00	43.95	4.48	812.00	4.16	0.25	0.20	0.00014
2.5	561.4	265.00	60.43	6.16	1403.50	5.84	0.25	0.32	0.00019
3	741	308.65	83.09	8.47	2223.00	8.15	0.26	0.52	0.00027
3.3	825	329.70	97.71	9.96	2722.50	9.64	0.26	0.65	0.00031
3.5	917	346.60	107.32	10.94	3209.50	10.62	0.26	0.75	0.00034
H370									
Počet listů (-)			2		hmotnost vrtule (g):		0.37	průměr vrtule(mm):	57.03
0.5	86	78.85	5.69	0.58	43.00	0.26	0.27	0.01	0.00002
1	214	137.65	18.44	1.88	214.00	1.56	0.29	0.05	0.00006
1.5	364	191.60	35.22	3.59	546.00	3.27	0.28	0.14	0.00011
2	537	234.95	56.11	5.72	1074.00	5.40	0.30	0.27	0.00018
2.5	729	275.35	78.87	8.04	1822.50	7.72	0.31	0.44	0.00025
3	906	310.75	103.01	10.50	2718.00	10.18	0.31	0.64	0.00033
3.3	1084	335.20	122.43	12.48	3577.20	12.16	0.32	0.83	0.00039
3.5	1143	345.10	135.28	13.79	4000.50	13.47	0.33	0.94	0.00043

C Návrh řídicí jednotky pro vzducholod'



Obrázek C.1: Návrh DPS řídicí jednotky pro vzducholod' - pohled a) shora b) zdola



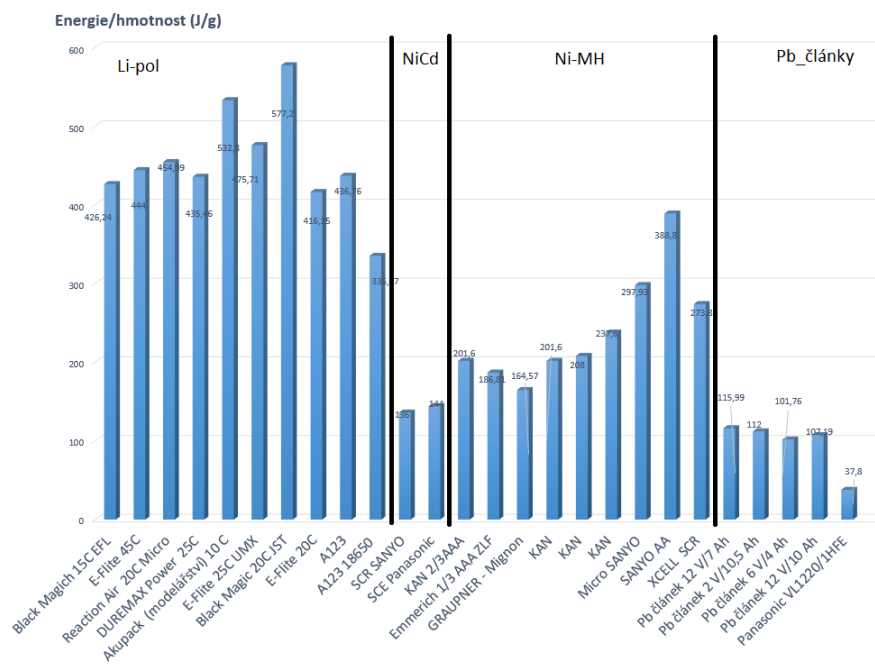
Obrázek C.2: Osazovací náčrnek

Tabulka C.1: Seznam použitých součástek

Název součástky	Množství	Popis	Označení v návrhu
1050170001	1	Zásuvka: USB B micro; na plošný spoj; SMT; PIN5; vodovorné	1050170001
EEFK1V101XP	2	Kondenzátor: elektrolytický; s nízkou impedancí; SMD; 100uF; ±20%	C1, C27
TA8106K006RNJ	13	Kondenzátor: tantalový; 10uF; 6,3VDC; SMD; Pouz: B; 1210; ±10%	C2, C4, C5, C15, C24, C32, C35, C36, C47, C48, C58, C68, C71
CL10F104ZA8NUNC	25	Kondenzátor: keramický; MLCC; 100nF; 25V; Y5V; -20+ +80%; SMD; 0603	C3, C7, C9, C13, C14, C17, C18, C22, C26, C29, C31, C33, C37, C49, C59, C61, C62, C63, C64, C65, C66, C67, C69, C72, C73
08053D106KAT2A	7	Kondenzátor: keramický; MLCC; 10uF; 25V; X5R; ±10%; SMD; 0805	C6, C8, C16, C25, C28, C38, C50
TA8107K006RNJ	4	Kondenzátor: tantalový; 100uF; 6,3VDC; SMD; Pouz: B; 1210; ±10%	C10, C11, C12, C20
0603YC102KAT2A	3	Kondenzátor: keramický; MLCC; 1nF; 16V; X7R; ±10%; SMD; 0603	C19, C70, C74
GRM21BR60J475KA11L	2	Kondenzátor: keramický; 4,7uF; 6,3V; X5R; ±10%; SMD; 0805; Rada: GRM	C21, C60
CL1C220JBA8NUNC	3	Kondenzátor: keramický; MLCC; 22pF; 50V; COG; ±5%; SMD; 0805	C23, C75, C76
VJ0805Y103KXACW18C	2	Kondenzátor: keramický; MLCC; 10nF; 50V; X7R; ±10%; SMD; 0805	C34, C46
GRM188R60J225KE19D	14	Kondenzátor: keramický; 2,2uF; 6,3V; X5R; ±10%; SMD; 0603; Rada: GRM	C39, C40, C41, C42, C43, C44, C45, C51, C52, C53, C54, C55, C56, C57
SK13-DIO	1	Dioda: usměrňovací Schottky; SMD; 30V; 1A; SMA; Balení: role, páska	D1
LL-5035IRC2V-18D	1	IR vysílač; 5mm; 850nm; průhledný; 15mW; 30°; THT; 20mA; 1+1,65V led dioda Ir	D2
SFH 213	2	Fotodioda IR PIN; 5mm; 850nm; 400-1100nm; 10°; Montáž: THT; 1nA	D3, D5
TS2940CW-SQ	1	Stabilizátor napětí; LDO; lineární, nenastavitelný; 5V; 1A; SOT223	IC1
MCP73833-AMJ/LUN	1	kontrolér nabíječky baterií; 3,75+6VDC; MSOP10	IC2
MCP6N11-010E/SN	1	Operační zesilovač; 5MHz; 1,8+5,5V; Kanály:1; SO8; 10V/V	IC3
NCP1529ASN-T1G	1	měníč DC-DC; Uvst:2,7+5,5V; Uvyst:0,9+3,9V; TSOP5	IC4
MCP1640BT-IC4Y	1	Měníč DC/DC; boost, step up; Uvst:0,65+5,5V; Uvyst:2+5,5V; 350mA	IC5
DRV8333PW-R	2	Budíč Motoru; Krokový; 2,7V až 10,8V napájení; 1,5A/2 Vystupy; HTSSOP-16	IC6, IC7
MMA8452Q	1	Čidlo: akcelerometr; Rozsah:2/4/8g; -40+85°C; 1,95+3,6V	IC8
TCN75AVOA	1	Čidlo teploty; serial output; -40+125°C; SO8; SMD; 2,7+5,5V; 0,5°C	IC9
LTC2050CS8#PBF	1	Operační zesilovač; 3MHz; Kanály:1; SO8; zero drift	IC10
MCP6231-E/SN	1	Operační zesilovač; 300kHz; 1,8+5,5V; Kanály:1; SO8	IC12
NLV10MTC2-R2	1	Tlumivka : vinutá; SMD; 1210; 2,2uH; 770mA; 130mΩ; frezon:68MHz; Q:10	L1
NLV08MTC4-R7	1	Tlumivka: vinutá; SMD; 1008; 4,7uH; 285mA; 800mΩ; ±20%; frezon:43MHz; INDUKTOR	L2
OS850805C1-E	2	LED; SMD; 0805; modrá; 42-80mcd; 2x1,25x0,8mm; 120°; 3,2+3,6V; 20mA	LD1, LD9
LL-S170PVC-V1-2B	2	LED; SMD; 0805; červená; 3-50mcd; 2x1,25x1mm; 120°; 1,6+2,4V; 20mA	LD2, LD6
LTST-C170GKGT	3	LED; SMD; 0805; zelená; 18-35mcd; 2x1,25x1,1mm; 130°; 2+2,4V; 20mA	LD3, LD4, LD5
RC0805FR-07100KL	5	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 100kΩ; 0,125W; ±1%; -55+155°C	R1, R2, R3, R13, R18
080558F1002TSE	6	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 10kΩ; 0,125W; ±1%; -55+125°C	R4, R20, R45, R51, R57, R61
080558F1800TSE	5	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 180Ω; 0,125W; ±1%; -55+125°C	R5, R6, R7, R43, R56
080558J0000TSE	4	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 0Ω; 0,125W; ±5%; -55+125°C	R8, R41, R42, R53
RC0805FR-07300KL	2	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 300kΩ; 0,125W; ±1%; -55+155°C	R9, R19
080558F1001TSE	6	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 1kΩ; 0,125W; ±1%; -55+125°C	R16, R26, R27, R40, R52, R58
WW25RR010FTL	1	Rezistor: power metal; měřicí; SMD; 2512; 10mΩ; 2W; ±1%; -55+155°C	R17
080558F0274TSE	2	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 270kΩ; 0,125W; ±1%; -55+125°C	R21, R22
080558F1203TSE	1	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 120kΩ; 0,125W; ±1%; -55+125°C	R23
CRCW0805560KFTABC	1	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 560kΩ; 0,125W; ±1%; -55+155°C	R24
CRCW0805180KFTABC	1	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 180kΩ; 0,125W; ±1%; -55+155°C	R25
080558F2001TSE	2	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 2kΩ; 0,125W; ±1%; -55+125°C	R28, R29
080558J0000TSE	4	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 0Ω; 0,125W; ±5%; -55+125°C	R30, R31, R34, R35
080558F1001TSE	2	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 1kΩ; 0,125W; ±1%; -55+125°C	R32, R36
080558F4701TSE	6	Rezistor: thick film; SMD; 0805; 4,7kΩ; 0,125W; ±1%; -55+125°C	R33, R37, R38, R39, R63, R64
NTCS0805E3103JHT	1	Termistor NTC; 10kΩ; SMD; 0805; 3940K; 210mW; ±5%; -40+150°C	Rt1
TS53YL103MR10	1	Potenciometr: montážní; jednodůžkový; 10kΩ; 250mW; SMD; ±20% RPOT	R_POT1
DTSM-615-V-9	1	Mikrospínač TACT; SPST-NO; Polohy:2; 0,05A/12VDC; SMT; není; 3,2N	S1
NX3020NAK-W115	2	Tranzistor: N-MOSFET; unipolární; 30V; 110mA; 300mW; SOT323	T1, T4
PIC18F45K22-I/PT	1	Mikrokontrolér PIC; Paměť:32kB; SRAM:1536B; EEPROM:256B; 64MH	uC1
8.00M-HC49-S	1	Rezonátor: krystalový; 8MHz; ±30ppm; 20pF; THT, xtal	Xtal1

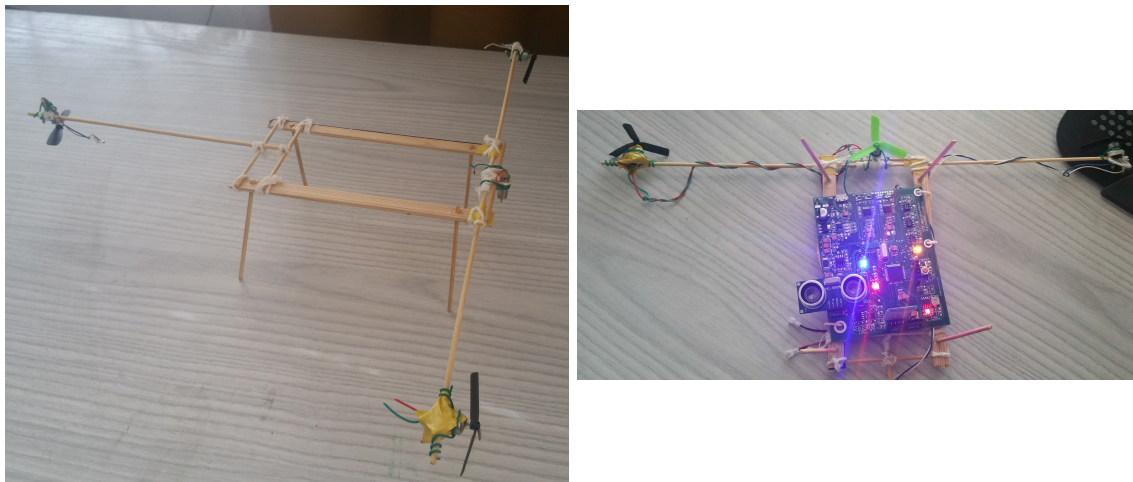
Tabulka C.2: Porovnání různých typů akumulátorů

Typ akumulátoru	Název	Kapacita (mAh)	Nominální napětí (V)	Hmotnost (g)
Li-pol	Black Magich 15C EFL	80	3,7	2,5
	E-Flite 45C	150	3,7	4,5
	Reaction Air 20C Micro	150	3,7	4,6
	DUREMAX Power 25C	85	3,7	2,6
	Akupack 10 C	400	3,7	10,0
	E-Flite 25C UMX	500	3,7	14,0
	Black Magic 20C JST	1300	3,7	30,0
	E-Flite 20C	250	3,7	8,0
Ni-MH	GRAUPNER - Mignon	800	1,2	21,0
	KAN	350	1,2	7,5
	Micro SANYO	800	1,2	11,6
	SANYO AA	2700	1,2	30,0
	XCELL SCR	4500	1,2	71,0
	KAN 2/3AAA	350	1,2	7,5
	Emmerich 1/3 AAA ZLF	160	1,2	3,7
Li-ion	Panasonic VL1220/1HFE	25	3,0	2,0
	Sanyo LI2500	2500	3,7	47,0
	TINKO ICR17335	700	3,6	18,0
LiFe	A123	2500	3,3	68,0
	A123 18650	1100	3,3	39,0
NiCd	SCR SANYO	1700	1,2	54,0
	SCE Panasonic	1800	1,2	54,0
Pb	Pb článěk 12 V/7 Ah	7000	12,0	2607,0
	Pb článěk 2 V/10,5 Ah	10500	2,0	675,0
	Pb článěk 6 V/4 Ah	4000	6,0	849,0
	Pb článěk 12 V/10 Ah	10000	12,0	4030,0



Obrázek C.3: Graf porovnání akumulátorů

D Celková konstrukce



Obrázek D.1: Úchytná konstrukce a) s motory b) s řídicí jednotkou a motory



Obrázek D.2: Realizace varianty A a) před vzletem b) za letu