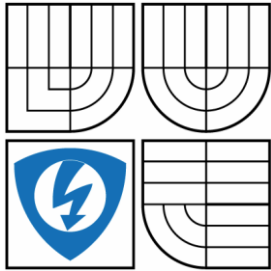


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

OPTIMALIZACE VÝBĚRU AKTUÁTORŮ PRO VZDUŠNÝ PRŮZKUMNÝ PROSTŘEDEK

OPTIMIZING THE SELECTION OF ACTUATORS FOR RECONNAISSANCE FLYING ROBOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MILAN VÍTEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VLASTIMIL KRÍŽ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Milan Vítek

ID: 140269

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace výběru aktuátorů pro vzdušný průzkumný prostředek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem je vytvořit doporučení pro výběr motorů, vrtulí a baterií pro vícerotorové létající prostředky, jež budou při dané konfiguraci optimální s ohledem na předpokládanou délku letu a dosažitelnou dynamiku.

Prostudujte a změřte typické charakteristiky motorů a vrtulí a jejich společný vliv na odběr proudu a dynamiku letu. Ověřte vliv aerodynamických úprav vrtulí. Navrhněte optimální pracovní bod rotorů. Zvažte pro něj nejvhodnější konfiguraci baterie. Navrhněte proces pro výběr těchto komponent podle zadaných kritérií.

V rámci práce vytvořte přípravek pro měření hlavních charakteristik vrtulí a motorů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Skalický, J.: Elektrické regulované pohony, FEKT VUT v Brně, 2007

Webové stránky projektu Mikrokopter <mikrokopter.de>

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 27.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Kříž

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této práce je vytvoření doporučení pro výběr motorů, vrtulí a baterií pro vícemotorové létající prostředky, jež budou při dané konfiguraci optimální s ohledem na předpokládanou délku letu a dosažitelnou dynamiku. V práci jsou prostudovány parametry a charakteristiky motorů, vrtulí i baterií a jejich vzájemné závislosti. Na základě zjištění je pak navržen postup pro výběr komponent a optimální nastavení pracovního bodu. Rovněž je v práci popsán návrh a realizace prostředku k měření hlavních charakteristik motorů a vrtulí.

Klíčová slova

Vrtule, elektromotory, teorie vrtulí, teorie motorů, konstrukce přípravku, měření parametrů, výběr aktuátorů, pomůcky výběru

Abstract

Purpose of this semestral thesis is to create a set of recommendations for choosing optimal motors, propellers and batteries for multi rotor flying vehicles with respect to flight time and flight dynamics. In this thesis you can find analysis of motor, propeller and battery properties and characteristics and their dependencies. Based on these findings there is a set of rules to choose optimal components and set optimal working point. This thesis also describes the design and implementation of a device used to measure the main characteristics of motors and propellers.

Keywords

Propellers, motors, propeller theory, motors theory, device design, measurement of parameters, selection of actuators, guide for selection

Bibliografická citace:

VÍTEK, M. *Optimalizace výběru aktuátorů pro vzdušný průzkumný prostředek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 64s. Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Vlastimil Kříž

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *výběru aktuátorů pro vzdušný průzkumný prostředek* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Vlastimilu Kříži za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval prof. Ing. Karolu Filákovskému, CSc. za poskytnutí jinak nedostupných studijních materiálů a výborné a srozumitelné osvětlení problematiky leteckých vrtulí, které mi významně pomohlo se zpracováním teoretické části mé práce.

Také děkuji svému spolužákovi Tomáši Vítovi za poskytnutí mnoha rad a doporučení při konstrukci dps a vytváření programu pro obsluhu měřícího přípravku.

V Brně dne:

podpis autora

Obsah

1	Úvod	10
2	Teorie aktuátorů	11
	2.1 Pohon, motory	11
	2.1.1 Parametry a teorie použitých motorů	12
	2.2 Letecké vrtule	19
	2.2.1 Parametry a teorie použitých vrtulí	19
	2.3 Baterie a délka letu.....	30
	2.3.1 Parametry baterie a vliv na délku letu	30
3	Závěr teoretické části	33
4	Praktické vypracování.....	34
	4.1 Pomůcka pro výběr na základě teoretického rozboru	34
	4.1.1 Použití pomůcky.....	34
	4.2 Přípravek pro měření hlavních charakteristik aktuátorů	36
	4.2.1 Použité součástky	36
	4.2.2 Návrh desky plošných spojů	40
	4.2.3 Program obsluhující měřicí přípravek	42
	4.2.4 Mechanická konstrukce měřícího přípravku.....	44
	4.3 Měření provedená s pomocí přípravku.....	46
	4.3.1 Kalibrace senzoru síly	46
	4.3.2 Měření charakteristik.....	48
	4.3.3 Měření vrtulí s úpravami aerodynamiky	51
5	Závěr	58
6	Literatura.....	59
7	Přílohy.....	60
	7.1 Příloha 1: DPS	60

Seznam obrázků

Obrázek 1: Konstrukce motoru: vlevo rotor s magnety, vpravo stator s vinutím.	11
Obrázek 2: Příklad posloupnosti napájení jednotlivých vinutí. Změnami směru proudu dochází k otáčení magnetického pole a tudíž i roztočení rotoru.	12
Obrázek 3: Skutečný tvar průběhů budícího napětí na cívce L1 a L2. Je vidět, že budící napětí má lichoběžníkový tvar a jsou zde patrné výrazné zákmity napětí.	13
Obrázek 4: Průběh indukovaných napětí při otáčení rotorem pomocí dalšího motoru	13
Obrázek 5: Náhradní schéma motoru	14
Obrázek 6: Improvizovaný měřicí prostředek skládající se z hnacího motoru, hnaného motoru a optické závory	15
Obrázek 7: Naměřené hodnoty. Světle modrá zobrazuje průběh indukovaného napětí, tmavě modrá zobrazuje přerušení optické závory	16
Obrázek 8: Statická zatěžovací charakteristika dle vztahu (4).....	17
Obrázek 9: Závislost CT (zde α) na rychlostním poměru λ a úhlu nastavení listu (zde φ) [9].....	23
Obrázek 10: Závislost CP (zde β) na rychlostním poměru λ a úhlu nastavení listu (zde φ) [10]	24
Obrázek 11: Ilustrace vlivu hodnoty Reynoldsova čísla na odpor a vztlak působících na profil. Od podkritického Re po nadkritické Re. [12]	28
Obrázek 12: Titulní strana pomůcky. Uživatel musí vyplnit oranžová pole. Po provedení výpočtu se níže zobrazí výsledky hledání.	34
Obrázek 13: LTS 24-NP zapojený do obvodu baterie a budiče motoru	36
Obrázek 14: FSG-15N1A umístěný pod zatíženým ramenem. Nalevo je vidět zářívka, která drží rameno na místě a brání mu sklouznutí ze senzoru.	37
Obrázek 15: Signál z fototranzistoru (nahore) a signál z komparátoru (dole)	38
Obrázek 16: Optická závora umístěná u vrtule a jednoduché uchycení motoru.	38
Obrázek 17: Blokové schéma měřícího přípravku	40
Obrázek 18: Finální podoba osazené desky plošných spojů.	41
Obrázek 19: Zjednodušený vývojový diagram programu obsluhujícího měřicí přípravek.....	42
Obrázek 20: Schéma přípravku. Napravo je umístěn motor s vrtulí a snímačem otáček. Nalevo zátěž a senzor síly pod ramenem.....	44
Obrázek 21: Fotografie přípravku. Zde při měření s prstencem upravujícím aerodynamiku.....	45
Obrázek 22: Schéma případné modifikace přípravku. Napravo je umístěn motor s vrtulí a snímačem otáček. Tenzometr je umístěn přímo na rameni, ke kterému je motor připevněn.	46
Obrázek 23: Úprava měřidla při kalibraci senzoru síly	47
Obrázek 24: Závislost napětí měřeného pomocí MCU a hmotnosti měřené s pomocí kuchyňské váhy.....	47

Obrázek 25: Vrtule použité při zkušebním měření. Na levé straně vrtule č. 2. Na pravé straně vrtule č. 1.....	48
Obrázek 26: Závislost tahu na příkonu pohonu. Vrtule č.1	49
Obrázek 27: Závislost tahu na příkonu pohonu. Vrtule č.2	50
Obrázek 28: Prstenec číslo 1. Jedná se o jednoduchý válcový tvar se zaoblením na vnitřní náběžné hraně	52
Obrázek 29: Graf závislosti tahu na příkonu při použití prstence č. 1 u vrtule č. 1 ..	52
Obrázek 30: Graf závislosti tahu na příkonu při použití prstence č. 1 u vrtule č. 2 ..	53
Obrázek 31: Prstenec číslo 2, tvar průřezu prstence se blíží spíše tvaru profilu křídla	54
Obrázek 32: Graf závislosti tahu na příkonu při použití prstence č. 2 u vrtule č. 1 ..	54
Obrázek 33: Graf závislosti tahu na příkonu při použití prstence č. 2 u vrtule č. 2 ..	55
Obrázek 34: Graf závislosti tahu na příkonu při použití prstence č. 2 u vrtule č. 2 ..	56
Obrázek 35: Vrtule č.1 modifikovaná jednoduchým turbulátorem.....	56

1 ÚVOD

V této práci bude řešena problematika výběru optimálních aktuátorů a baterií pro vícerotorové létající prostředky, jež budou při dané konfiguraci optimální s ohledem na předpokládanou délku letu a dosažitelnou dynamiku.

Protože na trhu se nachází široké spektrum dostupných motorů a vrtulí, u nichž mnohé postrádají řádnou dokumentaci, není výběr té pravé kombinace zcela prostý a jednoznačný. Tato práce si klade za cíl prostudovat a eventuálně změřit typické charakteristiky motorů a vrtulí a jejich společný vliv na odběr proudu a dynamiku letu. Na základě poznatků bude navržen optimální pracovní bod rotoru a zvážena, pro něj nejvhodnější, konfigurace baterie. Dále bude navržen proces pro výběr těchto komponent podle zadaných kritérií.

V praktické části pak bude popsán návrh a konstrukce přípravku sloužícího k měření hlavních charakteristik motorů a vrtulí včetně návrhů pro budoucí vylepšení. Také budou provedena měření se snahou potvrdit či vyvrátit užitečnost aerodynamických úprav vrtulí a to konkrétně použití prstenců obklopujících vrtuli a turbulátoru přilepeného na listy vrtule.

2 TEORIE AKTUÁTORŮ

2.1 Pohon, motory

Pro pohon vrtule vzdušného prostředku budou použity elektricky komutované motory (BLDC) menších rozměrů, běžně dostupné v modelářských obchodech. Tyto motory jsou druhem synchronních motorů v nejběžnějším třífázovém provedení. Většina těchto motorů, a také námi použité, mají tři vinutí (konstrukčně se mohou skládat z většího množství cívek navzájem spojených, tvořících póly), která jsou spojena do hvězdy, ovšem bez vyvedeného středu.

Námi použité modelářské motory se vyrábí v provedení, které indukuje sinusové napětí při otáčení motorem (Obrázek 4). Oproti motorům s trapézovým indukovaným napětím se sice jedná o nákladnější verzi, která ale má hladší průběh momentu a to díky složitějšímu vinutí.

Konstrukčně se pak tyto motory také dělí na motory, kde je cívka na statoru a otáčí se vnější plášť s permanentními magnety (tzv. outrunner: Obrázek 1) a na ty, které mají vinutí na statoru v plášti a otáčí se vnitřní rotor, tvořený permanentními magnety (tzv. inrunner). Pro získání maximálního momentu se většinou jedná o magnety v podobě slitin neodymia a jiných vzácných kovů. Tyto motory se oproti běžným DC motorům vyznačují především větší účinností (protože nedochází ke ztrátám na komutátoru), nižší hmotností při větším točivém momentu a zároveň prakticky nulovou nutností údržby. Tyto výhody jsou spojeny s výše popsanou konstrukcí motoru, kde především typ outrunner vyniká také lepším chlazením. Nevýhodou je pak větší cena a nutnost použití složitějšího budiče. Vzhledem k daleko lepším parametrům, které jsou v tomto případě klíčové, jsou však jasnou volbou.

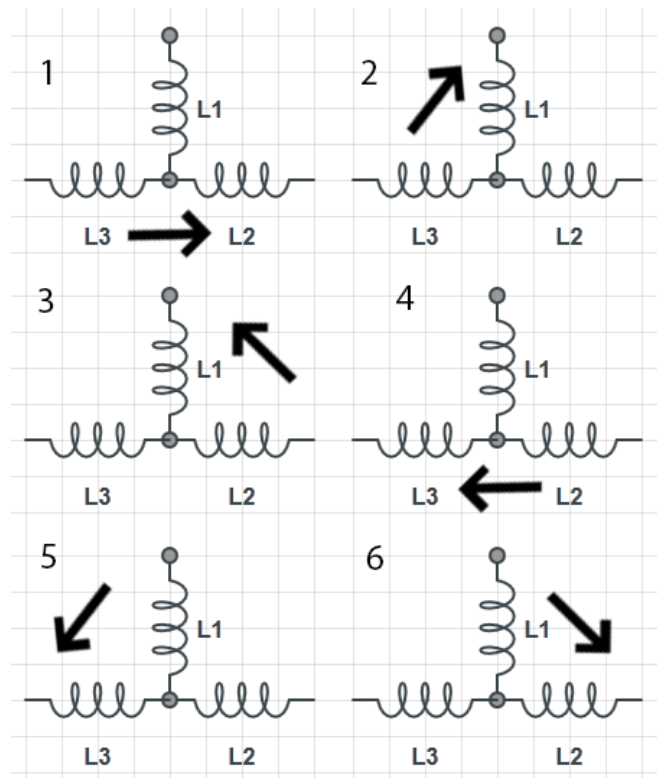


Obrázek 1: Konstrukce motoru: vlevo rotor s magnety, vpravo stator s vinutím.

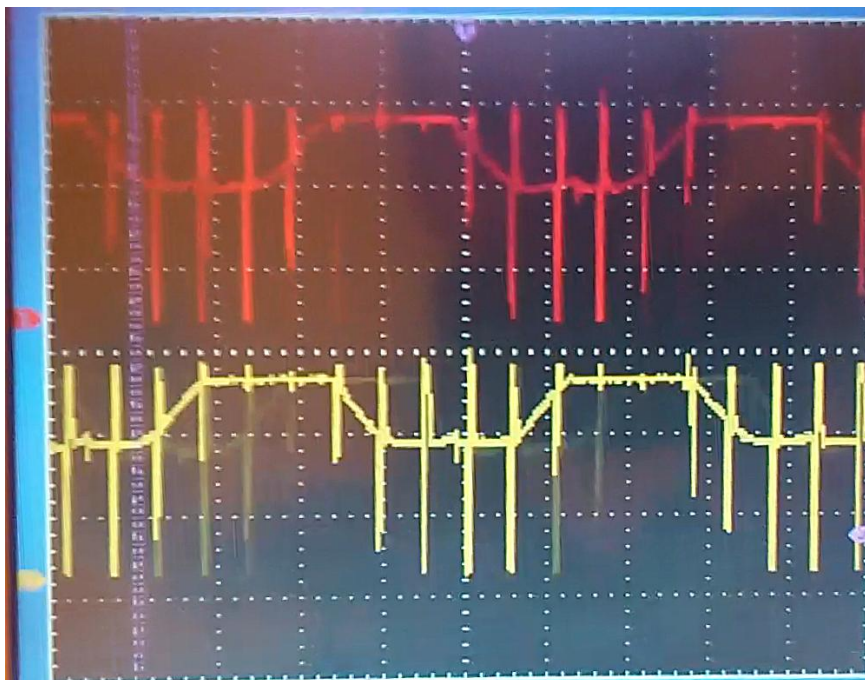
2.1.1 Parametry a teorie použitých motorů

2.1.1.1 Buzení motoru

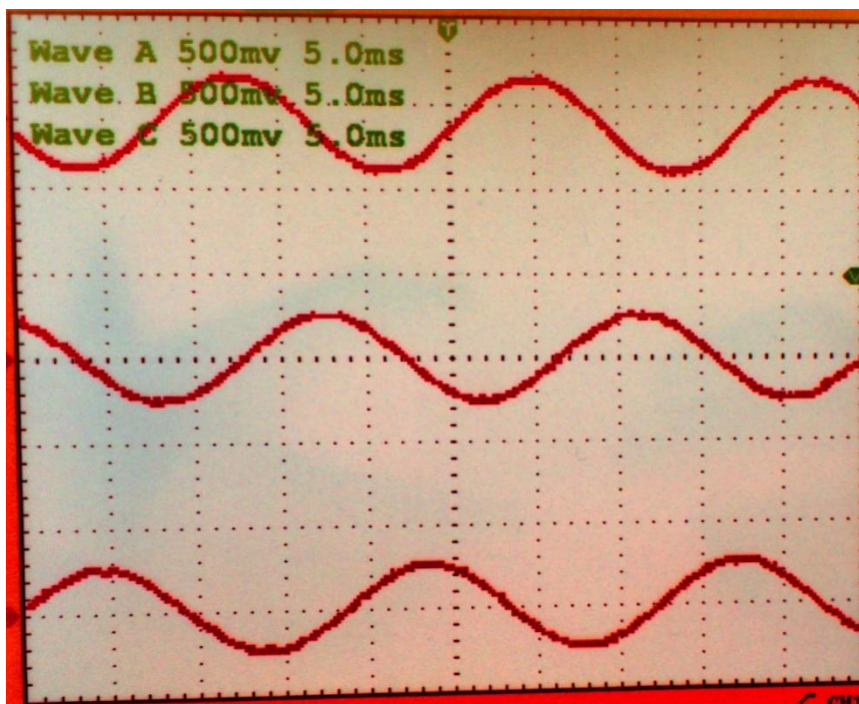
Motory jsou buzeny trapézovým napětím a to tak, že jsou připojeny k napětí vždy dvě cívky a třetí je v daný moment bez napětí. Po pootočení rotoru je připojena k napětí další posloupnost cívek. Tyto cykly se navzájem překrývají, viz Obrázek 2 a Obrázek 3. Právě v nutnosti buzení motoru tímto způsobem spočívá větší technická náročnost jeho řízení. Obrázek 1 pro ilustraci ukazuje průběh budicího napětí z neznačkového modelářského regulátoru.



Obrázek 2: Příklad posloupnosti napájení jednotlivých vinutí. Změnami směru proudu dochází k otáčení magnetického pole a tudíž i roztočení rotoru.



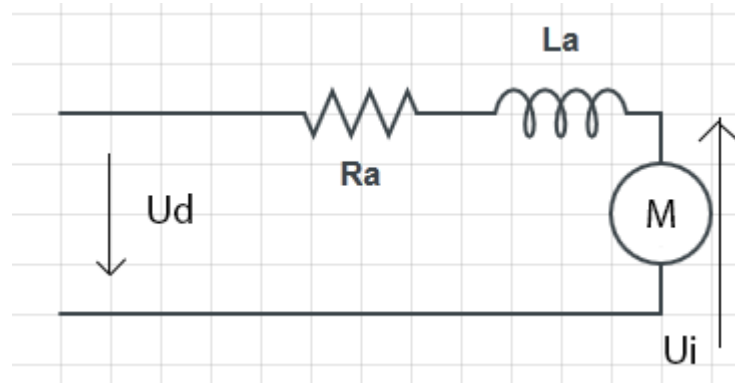
Obrázek 3: Skutečný tvar průběhů budicího napětí na cívce L1 a L2. Je vidět, že budicí napětí má lichoběžníkový tvar a jsou zde patrné výrazné zákmity napětí.



Obrázek 4: Průběh indukovaných napětí při otáčení rotorem pomocí dalšího motoru

2.1.1.2 Matematický model motoru

Matematický model je stejný, jako pro běžné stejnosměrné motory. Budeme proto vycházet ze schématu viz Obrázek 5. Z těchto parametrů je uživatelsky změnitelné pouze budící napětí U_d , které bude závislé na použité baterii. Odpor R_a a indukčnost L_a vinutí jsou pak dány konstrukcí. Další zásadní parametry jsou pak konstanta motoru C a magnetický tok φ , který je produkován magnety. Bohužel tyto dvě konstanty často nejsou u běžných modelářských motorů udávány a bude je proto nutné změřit prakticky. Problematika určení této konstanty bude hlouběji popsána v praktické části.



Obrázek 5: Náhradní schéma motoru

2.1.1.3 Vztahy pro výpočet parametrů a charakteristik

U pohonu nás v tomto případě zajímají především parametry jako moment hnací (M), který je vytvářen motorem a moment zátěže (M_z), kterým bude motor zatěžován, v našem případě vrtulí. Pro velikost momentu produkovaného motorem platí vztah:

$$M = C * \varphi * I \quad (1)$$

kde M = moment produkovaný motorem [$N \cdot m$]

$C \cdot \varphi$ = konstanta motoru, za jejíž součást uvažujeme také mag. tok φ [$V \cdot s \cdot rad^{-1}$]

I = proud protékající motorem [A]

Konstanta se pak spočítá dle vztahu:

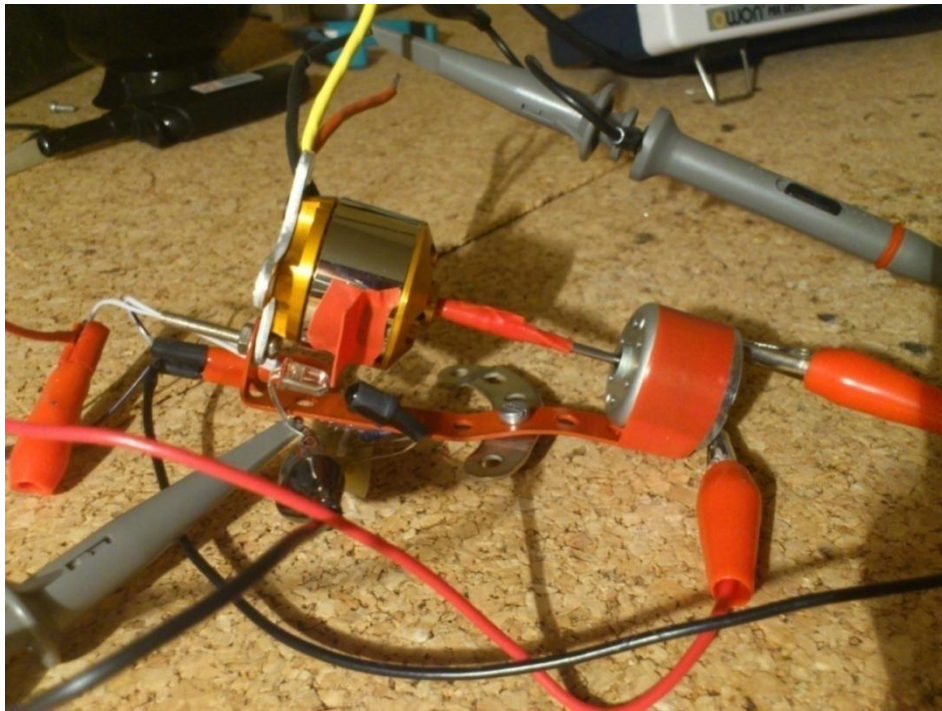
$$C * \varphi = U_i / \omega \quad (2)$$

kde U_i = napětí indukované na hnaném motoru [V]

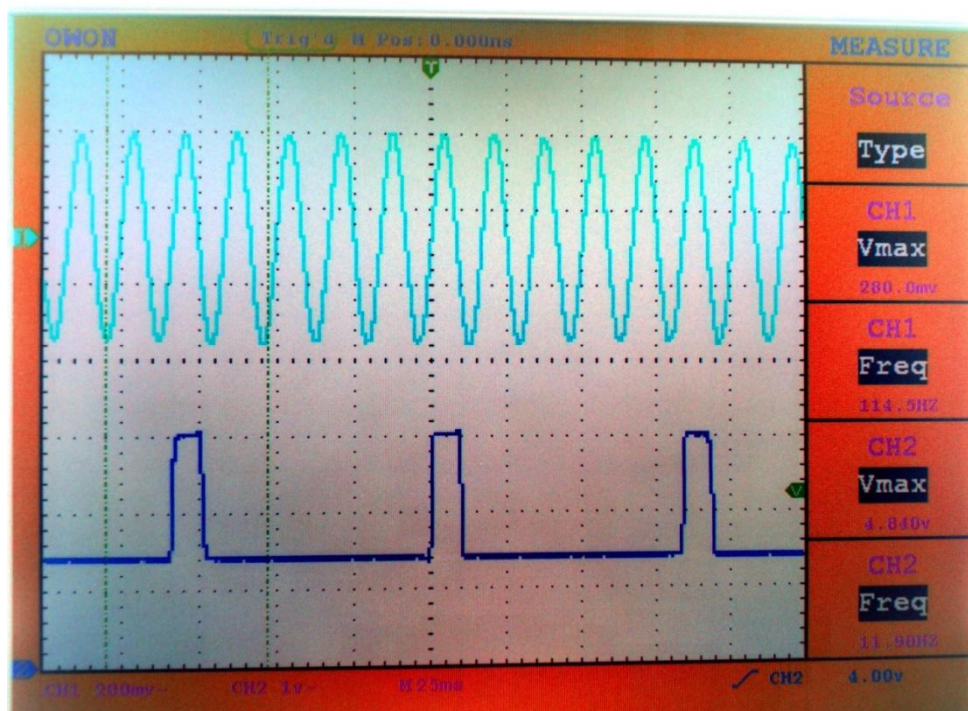
ω = otáčky hnaného motoru [ot./s]

$C * \varphi$ = konstanta motoru [$V * s * rad^{-1}$]

Napětí U_i je možné určit experimentálně a to roztočením motoru a měřením indukovaného napětí při známých otáčkách motoru. Na obrázcích níže je vidět improvizované měření, které poskytne potřebné hodnoty. Pro napětí ve vztahu (2) uvažujeme amplitudu měřeného napětí.



Obrázek 6: Improvizovaný měřicí prostředek skládající se z hnacího motoru, hnaného motoru a optické závory



Obrázek 7: Naměřené hodnoty. Světle modrá zobrazuje průběh indukovaného napětí, tmavě modrá zobrazuje přerušení optické závory

Pro moment zátěže M_z platí v tomto případě ventilátorová charakteristika, protože náš motor bude připojen k vrtuli. Tato charakteristika popisuje závislost M_z na rychlosti otáčení:

$$M_z = a + \text{sgn}(\omega) * b_2 * |\omega|^2 \quad (3)$$

kde a, b = konstanty popisující zátěž [-]

ω = otáčky vrtule vytvářející zátěž [ot./s]

M_z = moment zátěže [N*m]

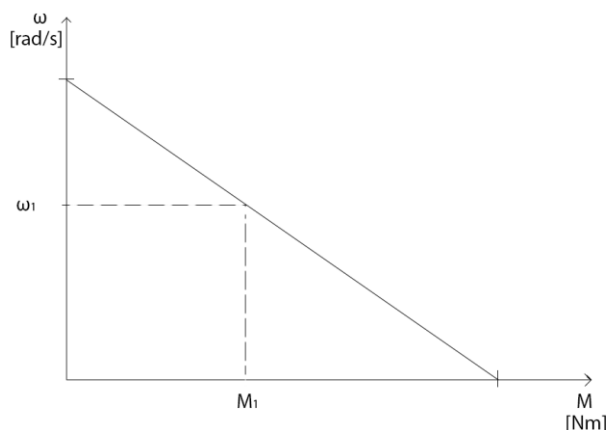
Již z tohoto vztahu vyplývá, že pro rostoucí otáčky vrtule kvadraticky stoupá také potřebný výkon motoru. Aktuální otáčky motoru jsou závislé na napětí, kterým je motor buzen. Jedná se o lineární závislost v rozsahu stovek až tisíců otáček za minutu na volt. Dále závisí otáčky na zatěžovacím momentu, kterým působí vrtule a to dle vztahu:

$$\omega = (U_a / C\varphi) - (R_a / (C\varphi)^2) * M_z \quad (4)$$

kde U_a = napájecí napětí motoru [V]

R_a = odpor vinutí motoru [Ω]

Z tohoto vztahu vychází také statická zatěžovací charakteristika. Při zatížení motoru, momentem M_1 , se jeho otáčky sníží na hodnotu ω_1 , viz Obrázek 8.



Obrázek 8: Statická zatěžovací charakteristika dle vztahu (4)

2.1.1.4 Uvážení parametrů a doporučení

Pro otáčky, při kterých má motor maximální účinnost, je určen M_z , kterým má vrtule na motor v daných otáčkách působit. Dle této hodnoty je pak potřeba přizpůsobit výběr vrtule. V našem případě bude postupováno opačně. Podle žádané dynamiky bude vybrána vrtule a k ní hledán motor s maximální účinností v daném pracovním bodě. Jak již bylo řečeno výše, budeme se dle vztahu (3) snažit držet otáčky na minimu, čímž dosáhneme minimálního zatěžovacího momentu. Toto minimum bude samozřejmě kompromisem vzhledem k nutnosti otáčet vrtulí dostatečnou rychlostí.

Jisté parametry vrtule jsou omezeny, z toho důvodu je zde nutné pohon přizpůsobit a najít nejvhodnější kompromis. Aby byl motor schopen vyrovnat moment zátěže, který vrtule vytváří, je nutné do něj dodávat dostatečný proud dle vztahu (1). Musíme si uvědomit konstrukční omezení motoru a maximální proud, který jím může protékat. Tato hodnota je určena výrobcem a je potřeba myslet na to, aby byla dostatečně dimenzována i budící část pro všechny případy, které mohou nastat. Například, když při havárii dojde k zablokování motoru a odebíraný proud bude enormní.

Současně jedním z požadavků na pohon je jeho minimální spotřeba vzhledem k určité dynamice letu. Při zachování produkovaného momentu můžeme jeho spotřebu snížit výběrem motoru s co největší konstantou $C*\varphi$. Dále je důležité brát v potaz účinnost motoru při daných otáčkách. Pro modelářské motory je ve většině případů

uveden proud a napětí, při kterém je dosaženo optimální účinnosti, která dosahuje zhruba 70%. Ve výpočtech je však doporučeno počítat s účinností nižší a pohon raději naddimenzovat. Návrh pohonu i vrtule je tudíž nutno vnímat jako komplexní problematiku s řadou na sebe navazujících kompromisů.

Jelikož se většina parametrů bude podřizovat vrtuli, je souhrn doporučení k optimálnímu výběru následující:

- maximální účinnost motoru v otáčkách stanovených pracovním bodem
- maximální hodnota motorové konstanty
- dostatečný výkon vzhledem k použité vrtuli a žádané dynamice

2.2 Letecké vrtule

Budou používány a testovány běžně dostupné, modelářské vrtule. Naneštěstí jsou takovéto vrtule od výrobců velice málo popsány. Uvedené údaje většinou obsahují pouze průměr vrtule a její stoupání. Tyto parametry jsou naprosto nevypovídající o dalších vlastnostech jako je profil, zkroucení listu a změna plochy listu v závislosti na vzdálenosti od středu vrtule.

Pro náš případ quadcopteru, jehož hlavním módem letu bude vznášení, je nejdůležitější parametr statický tah. Vzhledem k chybějícím specifikacím běžných vrtulí bude stěžejní částí vlastní měření a určení statického tahu pomocí vyrobeného přípravku. Případně je možné se orientovat podle databáze nalezené na internetu [6], ve které je již poměrně velké množství proměřených vrtulí.

Vrtule je dále omezena konstrukcí quadcopteru, zejména její maximální průměr. Bude navrženo umístění vrtule do prstence resp. různých tvarů prstence. Díky změně aerodynamiky by to mělo mít příznivý vliv na zvýšení tahu. Je ale nutné ověřit, zda nárůst tahu překoná nevýhodu zvýšené hmotnosti.

2.2.1 Parametry a teorie použitých vrtulí

2.2.1.1 Stoupání vrtule

U stoupání je standardně udávána hodnota vzdálenosti, kterou by vrtule urazila během jedné otáčky, pokud by se pohybovala v tuhém prostředí. U většiny vrtulí však hodnota stoupání není konstantní na celém listu a udává se tedy pro vzdálenost $0,75 * \text{poloměr vrtule od středu}$. Občas je použita hodnota ve stupních ($^{\circ}$) vyjadřující úhel nastavení listu vrtule. Přepočítání je možné pomocí vztahu:

$$\alpha = (180/\pi) * \arctg(p / (0,75 * \pi * D)) \quad (5)$$

kde α = úhel nastavení listu [$^{\circ}$]

p = stoupání vrtule [m]

D = průměr vrtule [m]

2.2.1.2 Průměr vrtule

Průměr vrtule je udáván včetně středu vrtule, který slouží k uchycení, a ve výpočtech je v našem případě tato prakticky neaktivní část zanedbávána. Vliv průměru středu vrtule má významný vliv až pro velké vrtule a vysoké rychlosti letu, což v našem případě nastat nemůže. Na průměru je závislé velké množství vztahů, především tah a výkon jsou na něm silně exponenciálně závislé. Průměr vrtule proto budeme volit maximální konstrukčně možný.

2.2.1.3 Počet listů

Pokud je nutné dosáhnout větších výkonů a tahu, ale není již možné zvětšovat průměr vrtule, pak je možné přistoupit k volbě vícečetých vrtulí. Toto řešení má však své nevýhody, především v nárůstu hmotnosti a snížené účinnosti (hlavně v malých rychlostech, kdy se vrtule pohybuje v rozvířeném prostředí).

2.2.1.4 Profil listu

Jedná se o obrys v řezu vrtule. Mezi velice rozšířené profily patří například Clark Y. Prof. Ing. Karol Fil'akovský, CSc. pak doporučil několik profilů. Všeobecně se však tvary profilů liší vcelku málo a u kupovaných vrtulí v našem rozměru 11“ bude velice těžké určit, o jaký profil se jedná. Pokud tedy výrobce tento údaj neuvede, bude jeho zjištění velmi obtížné (při řezu vrtulí je možné provést měření, ale za cenu zničení vrtule). Pro profil pak platí, že hodnota poměru součinitele odporu a vztlaku profilu by měla být co nejmenší. Tím je dosaženo největší účinnosti vrtule.

2.2.1.5 Tloušťka listu

Tloušťku listu určuje délka kolmice na tětivu profilu v místě, kde je tloušťka největší. Tenké listy mají větší účinnost, především ve velkých rychlostech. Současně je tloušťka určena potřebnou pevností vrtule a materiálem, ze kterého je vyrobena.

2.2.1.6 Tvar listu

Běžným tvarem pro listy v námi používané oblasti je list, který se zužuje jak ke špici, tak ke kořenu. Zúžení ke konci listu je důležité především proto, aby nedocházelo k ohybu listu vzhledem k silám na něj působícím. To by mohlo vést až ke zlomení listu nebo přinejmenším kolísání účinnosti vrtule vlivem deformací listu. Pro námi uvažované nízké rychlosti není nutné používat složitější tvary.

2.2.1.7 Zkroucení listu

Tato hodnota se vztahuje k úhlu nastavení listu, který je udán v 75% poloměru vrtule. Vyjadřuje změnu úhlu nastavení se vzrůstající vzdáleností od středu vrtule. Důvod tohoto zkroucení je snaha o dosažení ideálního úhlu náběhu, podél celého poloměru listu, z hlediska aerodynamiky. Zkroucení u vrtulových listů může dosahovat poměrně velkých hodnot a to až 25° až 35°.

2.2.1.8 Rychlostní poměr

Jedná se o poměr dopředné rychlosti k rychlosti obvodové a je vyjádřen vztahem:

$$\lambda = \frac{V_0}{n_s * D} \quad (6)$$

kde λ = poměr dopředné rychlosti k rychlosti obvodové [-]

V_0 = rychlost pohybu vrtule [m/s]

D = průměr vrtule [m]

n_s = počet otáček vrtule za sekundu

V našem případě, kdy je uvažováno visení jako hlavní režim letu ($V_0 = 0$), je nutné hodnotu λ aproximovat a to tak, že V_0 nahradíme hodnotami blížíícími se nule. Rychlostní poměr figuruje ve většině grafů v použité literatuře, jako hodnota, ke které se vztahují závislosti parametrů vrtule (např. Obrázek 9 a Obrázek 10).

2.2.1.9 Reynoldsovo číslo vrtule

Jeho hodnota pomáhá určit, zda je proudění laminární, nebo turbulentní. Kritické Reynoldsovo číslo je poté hranicí, při jejímž překročení se prudce mění parametry proudění. Výpočet je možný podle vztahu:

$$Re = \frac{c * V}{\mu} * \rho \quad (7)$$

kde V = rychlost proudění na profil [m/s]

C = šířka listu [m]

ρ = hustota vzduchu [kg/m³]

μ = poměr součinitelů odporu a vztlaku [-]

Při podkritickém Reynoldsově čísle bude proudění laminární a prudce vzroste odpor vrtule. Zároveň s tím prudce klesá účinnost. V tomto stavu se proudnice odtrhává od profilu už v jeho počátku a klesá tedy vztlak.

Při nadkritické hodnotě Reynoldsova čísla se proudnice odtrhávají až na konci profilu a vztlak i účinnost je tedy největší. Zároveň je v tomto režimu i minimální odpor.

Hodnoty kritického Reynoldsova čísla se v praxi budou pohybovat v rozmezí 25 000 až 150 000 (malé hodnoty pro tenké a neprohnuté listy, velké hodnoty pro profily s tloušťkou nad 17%). Doporučená hodnota Reynoldsova čísla je tedy, s určitou rezervou, 200 000.

2.2.1.10 Tah vrtule

Pro nás stěžejní parametr. Podle žádané dynamiky letu a hmotnosti průzkumného prostředku je nutné tuto hodnotu mít vhodně dimenzovanou. Je důležité si uvědomit všechny požadavky a zvolit vhodný kompromis. Pokud požadujeme především dlouhou výdrž baterie, a stačí nám pomalý let při převážném visení, je vhodnější volit vrtuli s menším tahem a potřebným výkonem. Pro velkou dynamiku letu je naopak potřeba počítat s dostatečnou rezervou tahu a větší spotřebou proudu.

Například pokud pro celkovou hmotnost, včetně baterie, 1,5 kg uvažujeme jako hlavní režim letu visení, je potřeba vyvinout sílu přibližně 14,72 N. Pro jednu vrtuli je to tedy zhruba 3,7 N. Podle této síly budeme hledat vrtuli s vhodným tahem při minimálních otáčkách.

Pokud by byl požadavek na dynamiku odlišný, například hlavním režimem letu bude prudké manévrování a zrychlování, je vhodné volit pracovní bod pro tah větší.

Tah vrtule určíme dle vztahu:

$$T = C_T * \rho * n_s^2 * D^4 \quad (8)$$

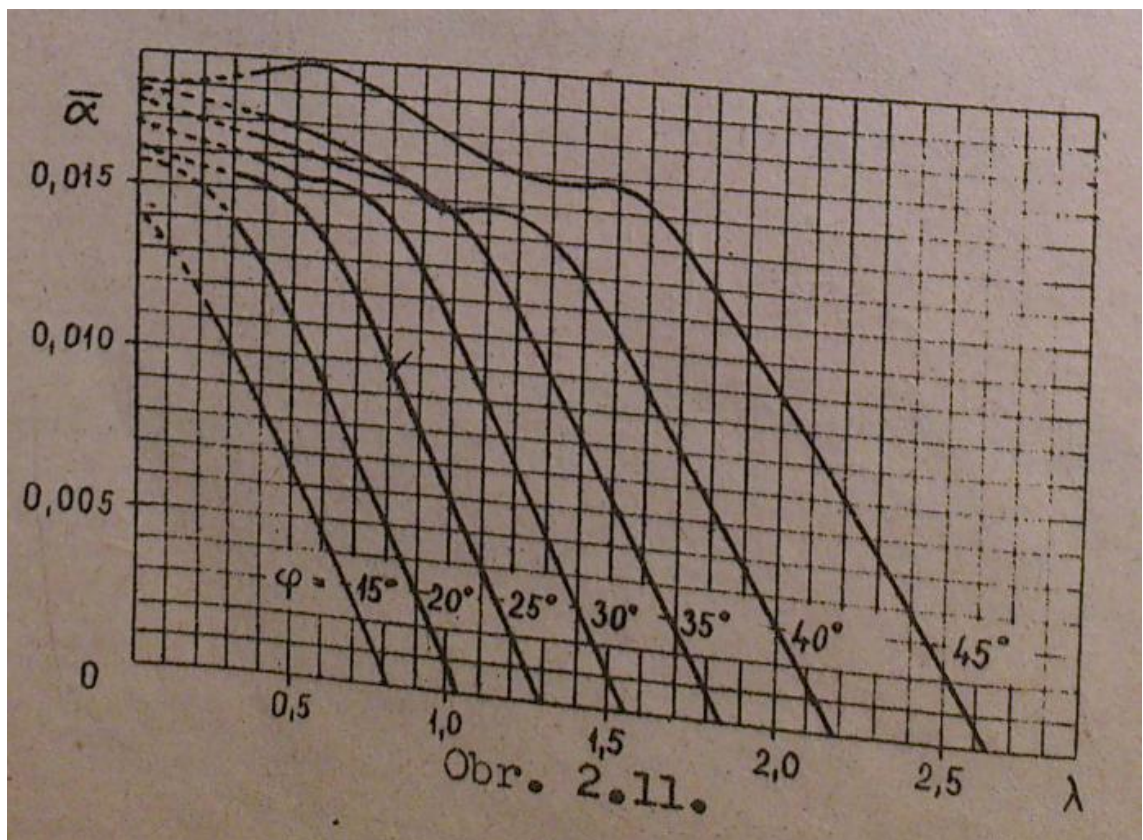
kde T = tah [N]

C_T = součinitel tahu [-]

ρ = hustota vzduchu [kg/m^3]

n_s = otáčky vrtule [ot/s]

D = průměr vrtule [m]



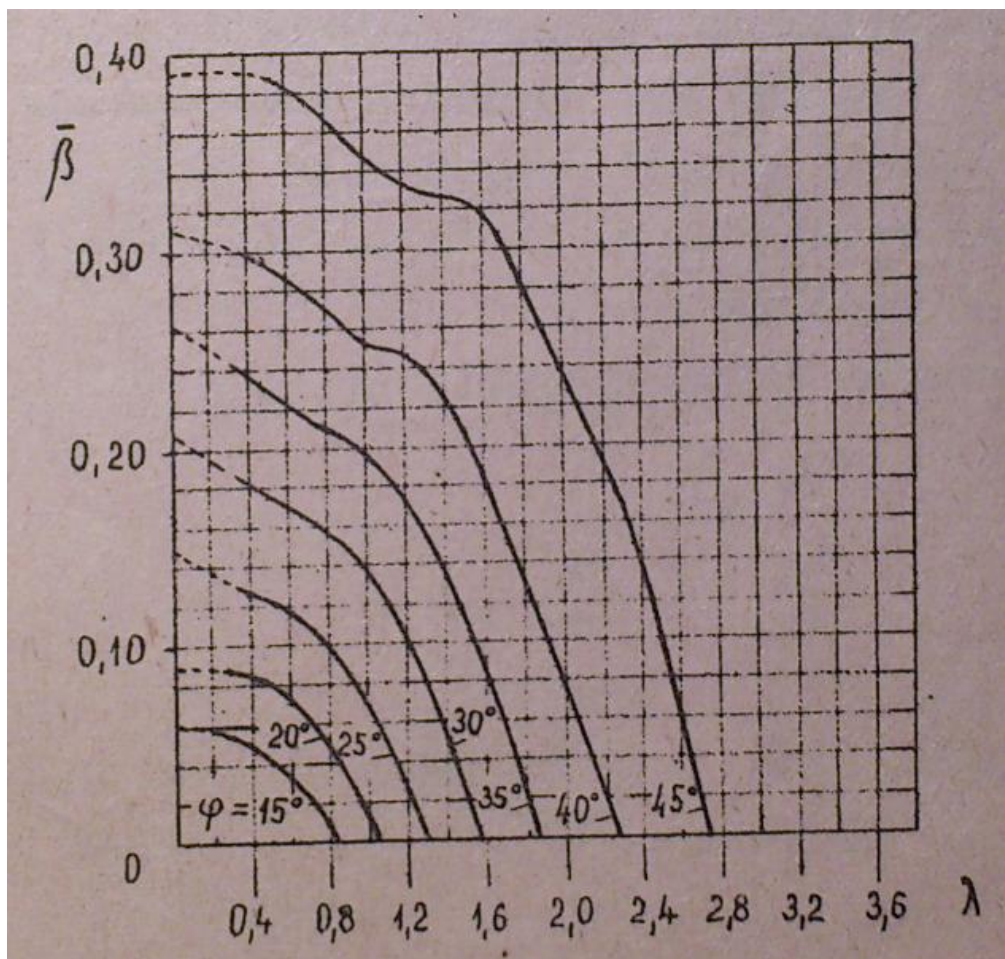
Obrázek 9: Závislost C_T (zde α) na rychlostním poměru λ a úhlu nastavení listu (zde φ) [9]

2.2.1.11 Výkon vrtule

Pomocí výkonu vrtule budeme určovat pracovní bod pro motor. V první řadě tedy určíme výkon vrtule a to podle vztahu:

$$P = C_p * \rho * n_s^3 * D^5 \quad (9)$$

kde P = výkon [W]
 C_p = součinitel výkonu [-]
 ρ = hustota vzduchu [kg/m^3]
 n_s = otáčky vrtule [ot/s]
 D = průměr vrtule [m]



Obrázek 10: Závislost C_p (zde $\bar{\beta}$) na rychlostním poměru λ a úhlu nastavení listu (zde ϕ) [10]

Ze známého výkonu můžeme určit moment zátěže, kterým bude vrtule v daných otáčkách působit na motor a to dle vztahu:

$$M_Z = P/n_\omega \quad (10)$$

kde M_Z = moment zátěže [N*m]

P = výkon [W]

n_ω = otáčky [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

Pro tento moment a otáčky budeme volit nejvhodnější motor s dostatečným výkonem a maximem účinnosti právě v tomto pracovním bodě.

2.2.1.12 Maximální rychlost otáčení vrtule

Vzhledem k aerodynamickým vlastnostem vrtule musíme omezit maximální rychlost jejího otáčení. V případě, že by kterýkoliv bod na vrtuli překročil rychlost zvuku, došlo by k prudkým změnám vlastností proudu obtékajícího list vrtule (skokové změny tlaku na malém prostoru).

Tyto změny mají velmi negativní dopad na účinnost vrtule a to proto, že značná část energie je přeměňována na neúčinný hluk. Aby bylo tomuto zabráněno, je vhodné držet rychlost otáčení vrtule pod určitou mezí. V praxi je volena hodnota Machova čísla 0,6. Tato hodnota představuje dostatečnou rezervu, bránící dosažení rychlosti zvuku kterýmkoliv bodem na vrtuli. Pro toto Machovo číslo vypočteme maximální otáčky vrtule o daném průměru podle vztahu:

$$OT_{m,MAX} = \frac{0,6 * C}{\pi * D} * 60 \quad (11)$$

kde $OT_{m,MAX}$ = maximální otáčky za minutu [ot./min]

C = rychlost zvuku, (346,3 m/s pro suchý vzduch, 25°C) [m/s]

D = průměr vrtule [m]

Pro účel výběru motoru s ohledem na výše stanovenou maximální rychlost jsou níže zpracovány tabulky (Tabulka 1 a Tabulka 2). V těch je možné vidět maximální hodnoty otáček za minutu na volt zvažovaného motoru. Toto vypracování se mi zdá nejjednodušší pro rychlou kontrolu kompatibility baterie, motoru a vrtule z hlediska maximální rychlosti otáčení vrtule. Hodnoty jsou uvedeny pro případ vrtule s průměrem 11“ (přibližně 0,28m). $OT_{m,MAX}$ jsem pro tento průměr stanovil přibližně na 14173 otáček za minutu.

U_{bat} [V]	max ot./V
3,7	3831
7,4	1915
11,1	1277
14,8	958
18,5	766
22,2	638
25,9	547
29,6	479

Tabulka 1: Maximální hodnoty otáček na volt motoru pro různá napětí (počet článků) baterií LiPo (3,7V/článek)

U_{bat} [V]	max ot./V
4,8	2953
6	2362
7,2	1968
8,4	1687
9,6	1476
10,8	1312
12	1181
13,2	1074
14,4	984
15,6	909
16,8	844
18	787
19,2	738
20,4	695
21,6	656
22,8	622
24	591

Tabulka 2: Maximální hodnoty otáček na volt motoru pro různá napětí (počet článků) baterií NiMH/NiCd (1,2 V/článek)

2.2.1.13 Uvážení parametrů a doporučení

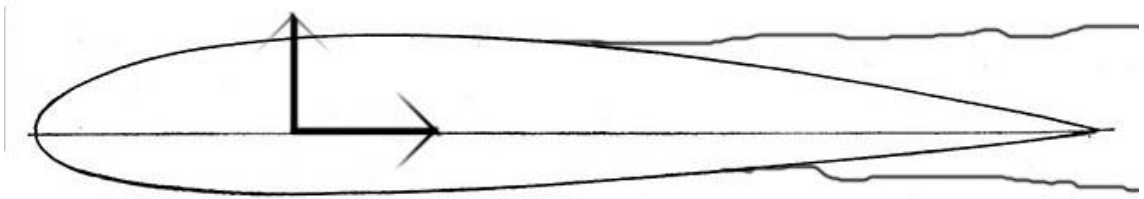
V případě vrtulí se dostáváme do těžké situace se zjišťováním parametrů. U použitých modelářských vrtulí nejsou totiž udány skoro žádné vypovídající údaje. Nejdůležitějším krokem k optimalizaci výběru je tudíž spíše nalezení výrobce schopného tyto údaje dodat.

Velkou pomocí mohou být různé databáze jako například [6]. Zde nalezneme právě koeficienty C_T a C_P a to v kolonce: Performance – Static, C_{T0} a C_{P0} . V grafech je zaneseno i Reynoldsovo číslo. Zde si můžeme všimnout, že oproti doporučované hodnotě 200 000 jde

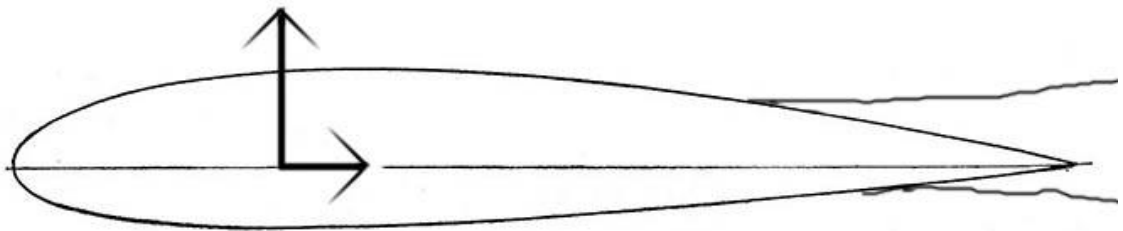
o značně menší hodnoty. Tyto vrtule se tedy podle teoretických hranic Re_{krit} k této hranici velmi blíží. Možná by proto bylo vhodné otestovat i použití turbulátorů, které rozestup Re vrtule a Re_{krit} zvětší.

Pokud se Re vrtule blíží Re_{krit} dochází k odtrhávání laminárního proudění (a jeho nestabilní změnu na proudění turbulentní) od profilu ve velké vzdálenosti od konce (Obrázek 11). To má negativní vliv na vztlak a prudce narůstá odpor. Umístěním turbulátoru k hraně profilu docílíme přechodu laminárního proudění na turbulentní v daném místě. Toto proudění daleko lépe sleduje profil a odtrhává se blíže ke konci profilu. Touto změnou sice dojde k jistému nárůstu odporu, ale pokud je turbulátor vhodně dimenzován a umístěn, nárůst vztlaku tuto nevýhodu překonává. Použití by bylo vhodné otestovat v praxi, protože teoretický výpočet je dalece nad rámec této práce.

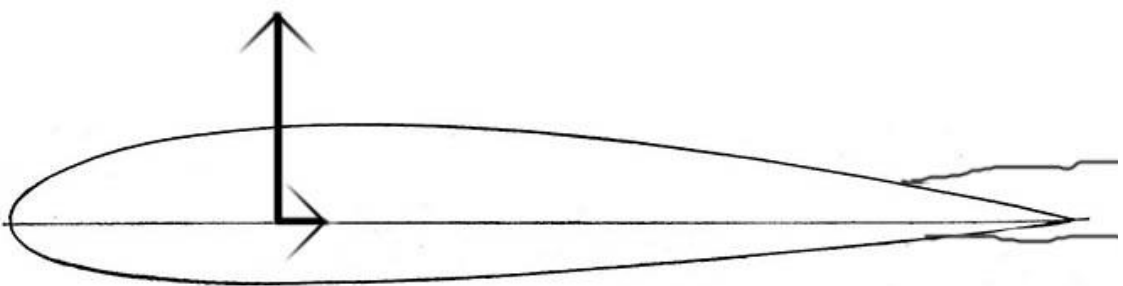
Nejmenší Reynoldsovo číslo: podkritický tok, velký odpor a minimální vztlak



Větší Reynoldsovo číslo: kritický tok, menší odpor a větší vztlak



Něrvětší Reynoldsovo číslo: nejlepší tok, minimální odpor a maximální vztlak



Obrázek 11: Ilustrace vlivu hodnoty Reynoldsova čísla na odpor a vztlak působících na profil.
Od podkritického Re po nadkritické Re . [12]

	C_{T0} (3000 r.p.m.)	C_{P0} (3000 r.p.m.)	T [N]	P [W]	M_z [Nm]
APC 11" x 8"	0,100	0,051	1,98	14,15	0,045
APC 11" x 10"	0,101	0,079	2,00	21,90	0,070

Tabulka 3: Srovnání vypočtených hodnot pro dvě vrtule APC při 3000 otáčkách za minutu

V tabulce 3 můžeme vidět jeden příklad výsledků srovnání dvou vrtulí, které se liší pouze hodnotou stoupání. Pro výpočet bylo použito vztahů (8), (9) a (10). Dosazené hodnoty: $\rho = 1,29$; $n_s = 50$; $D = 0,28$ a $n_\omega = 314,16$. Můžeme vidět, že při naprosto minimálním nárůstu tahu u druhé vrtule, došlo k výraznému zvětšení výkonu a momentu zátěže, kterým bude působeno na motor. V tomto příkladě by tedy bylo optimálnější zvolit vrtuli 11" x 8".

Z charakteristik C_T a C_P lze také vyčíst, že zatímco C_T ve většině případů s otáčkami roste, C_P naopak většinou klesá. Tato změna je však vzhledem k vlivu otáček samotných (ve vztazích (8) a (9) vystupují otáčky s exponenty 2 a 3) naprosto zanedbatelná.

Přístup pro optimální výběr tedy je následující:

- výpočet potřebného tahu pro žádanou dynamiku letu
- nalezení vrtule s žádaným tahem při minimálním výkonu pomocí [6], nebo vlastních měření

2.3 Baterie a délka letu

Pro vzdušný průzkumný prostředek je nutné zvolit také ideální baterie. Z běžně dostupných a nejčastěji používaných se jedná například o Ni/Cd, Ni/Mh, Li-ion a LiPo.

Protože je pro nás velmi důležitý poměr váhy a kapacity baterie, nabízí se pouze baterie

Li-ion a LiPo. S ohledem na poměrně velkou váhu a nutnost výkonu motorů budeme od baterie požadovat minimální vnitřní odpor a tudíž schopnost dodání velkých proudů (především u větších hmotností létajícího průzkumného prostředku).

Se všemi těmito požadavky tedy prakticky jediné pro nás užitečné baterie budou LiPo, které mají výborný poměr kapacita/hmotnost a dokáží dodat i velké proudy.

U těchto baterií se na druhou stranu oproti jiným článkům setkáme s nutností poměrně náročného nabíjení (a tudíž dražšího vybavení) a velká míra potřebné opatrnosti.

Opatrnost je na místě vzhledem ke standardnímu umístění článků do měkkých a tenkých obalů. To má sice pozitivní vliv na hmotnost, ale baterie se lehce poškodí a v krajních případech může proražení baterie vést až ke vznícení. S ohledem na poměrně velkou pravděpodobnost havárií létajících prostředků je tedy vhodné je umístit na dobře chráněné místo, nebo do zpevněného obalu.

2.3.1 Parametry baterie a vliv na délku letu

2.3.1.1 Kapacita a váha baterie

S rostoucí kapacitou baterií roste také jejich váha. Velkokapacitní baterie trpí velkým nárůstem hmotnosti především, protože jsou skládány z většího množství článků.

Z dat nalezených na webech mikrokopter [8] (kde uživatelé provádí vlastní měření) vyplývá, že navyšování kapacity je vhodné přibližně k hranici 14 Ah. Nad touto kapacitou už narůstající hmotnost negativně ovlivňuje poměr kapacita/hmotnost a nejedná se tudíž o optimální řešení.

2.3.1.2 Počet článků a napětí

Modelářské baterie se často skládají z většího počtu jednotlivých základních článků. Nejčastěji používané Ni/Mh a Ni/Cd baterie mají napětí 1,2V na článek, LiPo pak 3,7V na článek. Pro dosažení větší kapacity je možné články spojovat paralelně, pro navýšení napětí pak sériově.

Napětí bude mít největší vliv na otáčky motoru, které jsou právě na napětí závislé a to většinou lineárně. Pro snížení proudu protékajícího obvodu je tedy možné volit motor s větším počtem otáček na volt a větší napětí baterie.

2.3.1.3 Vybíjecí proud

Tento parametr udává proud, který je baterie schopna dodávat. Typicky se udává vybíjecí proud pomocí konstanty C, jenž udává proud násobkem kapacity baterie. Například pro baterii s kapacitou 5 Ah a C = 10 je možné odebírat proud: $5 * 10 = 50$ A.

2.3.1.4 Doba letu

Pro výpočet doby letu potřebujeme znát následující parametry:

- kapacita baterie
- celková váha létajícího průzkumného prostředku
- spotřeba proudu motory při dané konfiguraci
- dynamika letu

S návrhem aktuátorů budeme začínat přibližným výběrem kapacity baterie a zjištěním její hmotnosti. Pro celkovou hmotnost a žádanou dynamiku letu vybereme vhodnou vrtuli, k vhodné vrtuli vybereme motor s optimální účinností v daných otáčkách a zjistíme jeho proudový odběr. Se znalostí těchto parametrů vypočteme přibližnou dobu letu podle vztahu:

$$t = \eta * 60 * C_{bat} / I_{sum} \quad (12)$$

kde η = účinnost (zahrnuje pokles napětí baterie, elektrické ztráty mechanické ztráty atd.) [-]

C_{bat} = kapacita baterie [Ah]

I_{sum} = celkový proud odebíraný z baterie [A]

t = odhadovaný čas letu [min]

Pokud vypočtená doba letu neodpovídá našim požadavkům, zvolíme jinou kapacitu směrem k naplnění našich požadavků a proces opakujeme. Tím dosáhneme optimální kombinace všech parametrů.

Co se týče účinnosti v použitém vztahu (12), zde uvažujeme jak elektrické ztráty, tak odhadnuté změny čerpaného proudu vzhledem k okolnostem, jako je například charakter letu nebo povětrnostní podmínky. Pro režim klidného vznášení jsou dle REF odhadované ztráty 10%. Pro klidný let pak 25% a pro dynamický let zhruba 40%. Výpočtem pro všechny možnosti pak získáme jistý rozsah délky letu.

3 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI

V příslušných kapitolách teoretické části je možné vidět výsledky studování parametrů a charakteristik motorů, vrtulí i baterií. Hlavním problémem pro teoretické výpočty a modelování praktických situací je pak naprostá absence kvalitních datasheetů. Většina výrobců modelářských vrtulí a motorů neudává převážnou část pro nás důležitých parametrů.

U motorů jsou udány alespoň přibližné údaje o proudu a napětí, při kterých motor dosahuje optimální účinnosti. Se znalostí těchto hodnot už je možné optimalizovat výběr, ale bylo vhodné najít výrobce, který je schopen dodat kompletní popis svého produktu včetně charakteristik.

U vrtulí jsem se setkal s podobným problémem. Naštěstí na internetu existuje již poměrně rozsáhlá a stále rostoucí databáze [6]. V této databázi se nachází měření, která vyhovují naší situaci a obsahují všechny důležité konstanty.

U baterií je popis parametrů dostatečný a jako nejvhodnější se jeví baterie LiPo, které mají nejlepší parametry odpovídající našim potřebám. Nejdůležitějším zjištěním je pak to, že při zvyšování kapacity baterie nad 14Ah již dochází k přílišnému nárůstu hmotnosti a klesá poměr kapacita/hmotnost.

Proces pro optimální výběr komponent a nastavení pracovního bodu vyhází ze zjištěných závislostí a je následující:

1. Odhadneme kapacitu baterie a zjistíme celkovou hmotnost létajícího prostředku
2. Podle hmotnosti a požadované dynamiky letu spočteme potřebný tah
3. S pomocí dat z databáze [6] a vztahu (8) vybereme vhodnou vrtuli a vypočteme potřebné otáčky pro dosažení tahu. Tím získáváme pracovní bod aktuátorů.
4. S pomocí dat z databáze [6], vztahů (9), (10) a znalostí potřebných otáček vybereme motor s maximální účinností v těchto otáčkách. Následně zjistíme přibližnou spotřebu všech čtyř motorů (na základě přibližných údajů výrobce).
5. Dle vztahu (12) určíme přibližnou dobu letu. Pokud není vyhovující, zvolíme jinou kapacitu baterie a opakujeme postup od bodu 2.

4 PRAKTICKÉ VYPRACOVÁNÍ

4.1 Pomůcka pro výběr na základě teoretického rozboru

V souladu se zadáním byla vytvořena pomůcka s jednoduchou obsluhou ve formátu tabulky excel. Tento soubor umožňuje vybrat optimální kombinaci vrtule, motoru a baterie. Také je zobrazen optimální pracovní bod při použití těch komponent.

Funkce pomůcky vychází ze všech výše uvedených závěrů a vztahů, které jsou navzájem provázány a umožňují tak v konečné fázi jednoduchým a uživatelsky přívětivým způsobem vybrat všechny komponenty z databáze existujících a snadno dosažitelných produktů. Pro vrtule byla použita již dříve zmíněná databáze vrtulí. Databáze motorů pak byla vytvořena s pomocí dat poskytovaných výrobcem MODEL MOTORS s.r.o. [13]

Dále doporučuji jistou opatrnost. Doporučení se zakládají čistě na základě teoretických vztahů a v praxi tudíž může, a nejspíše také bude, docházet k odchylkám.

4.1.1 Použití pomůcky

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				
25																				
26																				
27																				
28																				
29																				
30																				
31																				

Obrázek 12: Titulní strana pomůcky. Uživatel musí vyplnit oranžová pole. Po provedení výpočtu se níže zobrazí výsledky hledání.

Při používání pomůcky je nutné brát na vědomí několik faktů:

- Není vyhledáváno v tabulce spojitych hodnot a proto se vybírá nejbližší vhodný (větší) výsledek.
- Vyhledávání upřednostňuje výsledek s maximální hodnotou poměru tah / výkon.
- Data v tomto souboru jsou měřeními pouze pro statické podmínky. Nejsou tedy vodítkem pro dynamický let ("rychle" letící letadla).

- Pro dosažení maximální účinnosti zadávejte hmotnost s ohledem na žádanou dynamiku letu. Pokud požaduje větší dynamiku, zadejte větší hodnotu základní hmotnosti.
- Při vysokém požadovaném tahu je možné, že nebude nalezen žádný výsledek. V tomto případě doporučuji zvážit změnu konstrukce a použít více vrtulí nebo i vrtule většího průměru. Konečný celkový výkon bude pravděpodobně menší při zachování požadovaného tahu.
- Při velmi nízkém žádaném tahu a velkém maximu průměru může dojít k tomu, že nebude vybrána přiměřená vrtule. Sice se vybere vrtule s maximální účinností, ale její tah v tomto režimu (velmi nízké otáčky) bude daleko nad požadovaným tahem. Doporučuji snížit maximální velikost vrtule.
- Pro správnou funkci výpočtu je nutné povolit iterativní výpočty. To provedeme v nastavení "možnosti aplikace excel - vzorce - povolit iterativní přepočítání". Testováno bylo s hodnotami: počet iterací 100, max změna 0,001.
- Pozor na proud tekoucí z baterie! V některých případech může být opravdu velký. Je maximálně vhodné nepodceňovat dostatečné dimenzování vedení a nepřeceňovat schopnost baterie tento proud dodávat.

Nejvíce volnosti je u výběru baterie. Nebyla použita žádná databáze výrobků od jednoho výrobce, ale prostý přepočítání podle zadaných parametrů. Je tedy možné ověřit si vlastnosti i při použití vlastních skládaných baterií. Pro ověření parametrů s kupovanou baterií stačí přepočítat hmotnost a kapacitu článku na zadaný počet článků.

Pole „Potřebný počet článků Li-Po v sérii“ udává, kolik článků baterie musí být zapojeno do série, aby bylo dosaženo dostatečného napětí k nastavení vybraného pracovního bodu.

Vrtule jsou vybírány s ohledem na nejlepší poměr tah/výkon. Při testování je možné pozorovat, že je vždy vybírána vrtule s největším možným průměrem, což je v souladu s teoretickým rozбором problematiky vrtulí.

Motory jsou vybírány s ohledem na hmotnost a proud na článek baterie potřebný pro dosažení pracovního bodu. Omezení hmotnosti spočívá v prostém kritériu, kdy hmotnost motorů musí být menší, než polovina hmotnosti prostředku s baterií. S touto podmínkou je možné experimentovat. Jako vizuální pomůcka je v listu motorů také graf zobrazující hmotnosti a odběry jednotlivých motorů v aktuálních podmínkách.

Výpočty probíhají iteračně v cyklu, je proto možné, že při každém spuštění bude výsledek mírně odlišný. Doporučuji proto trochu experimentovat s nastavením a pozorovat chování a výsledky brát s rezervou.

Výpočet doby letu slouží spíše pro porovnání mezi jednotlivými výsledky. Jedná se o čistě teoretický výpočet a v praktických podmínkách bude docházet k poměrně velkým odchylkám.

4.2 Přípravek pro měření hlavních charakteristik aktuátorů

V rámci zadání práce byl navržen a zkonstruován také přípravek pro měření hlavních charakteristik vrtulí a motorů. Ten slouží k praktickému ověření teoretických poznatků a také k reálnému srovnání různých vrtulí a motorů. Byl také použit k měření vrtulí s použitím úprav aerodynamiky.

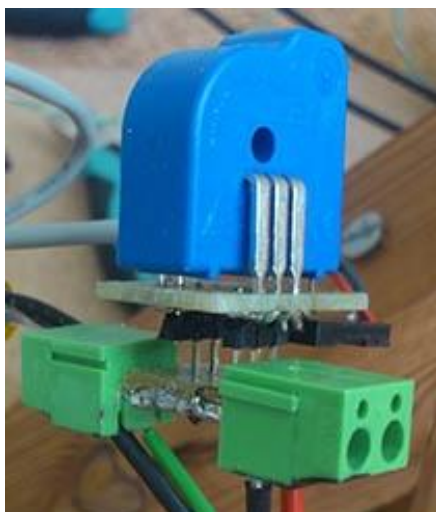
Přípravek je nutné napájet stabilizovaným zdrojem napětí +5 V a +12 V. Výstup do PC je pak řešen pomocí zasílání znaků skrze rozhraní RS-232. Budič motoru je ovládán pomocí PWM signálu s charakteristikou obdobnou řízení analogového serva.

4.2.1 Použité součástky

4.2.1.1 Snímač proudu LTS 24-NP

Tento snímač byl vybrán především na základě dobrých zkušeností s jeho použitím v dalších projektech předmětu robotika. Jedná se o snímač využívající Hallova jevu. Snímač je schopný měřit i střídavý proud, v našem případě si však vystačíme s měřením proudu stejnosměrného. Nominální povolený proud rms tohoto snímače je 25 A. To je dostatečná hodnota pro měření odběru většiny motorů, které je možné měřit pomocí přípravku. Špičkový proud pak může dosahovat až 80 A.

Je použito zapojení s využitím pouze jednoho závitu snímače. Tím je dosaženo minimálního ovlivnění měřeného obvodu díky vnitřnímu odporu vinutí pouze 0,18 mOhm. Citlivost snímače je 25 mV/A a jeho přesnost při teplotě 25 °C je +/- 0,2 %. Chyba linearity je pak menší, než 0,1 %.



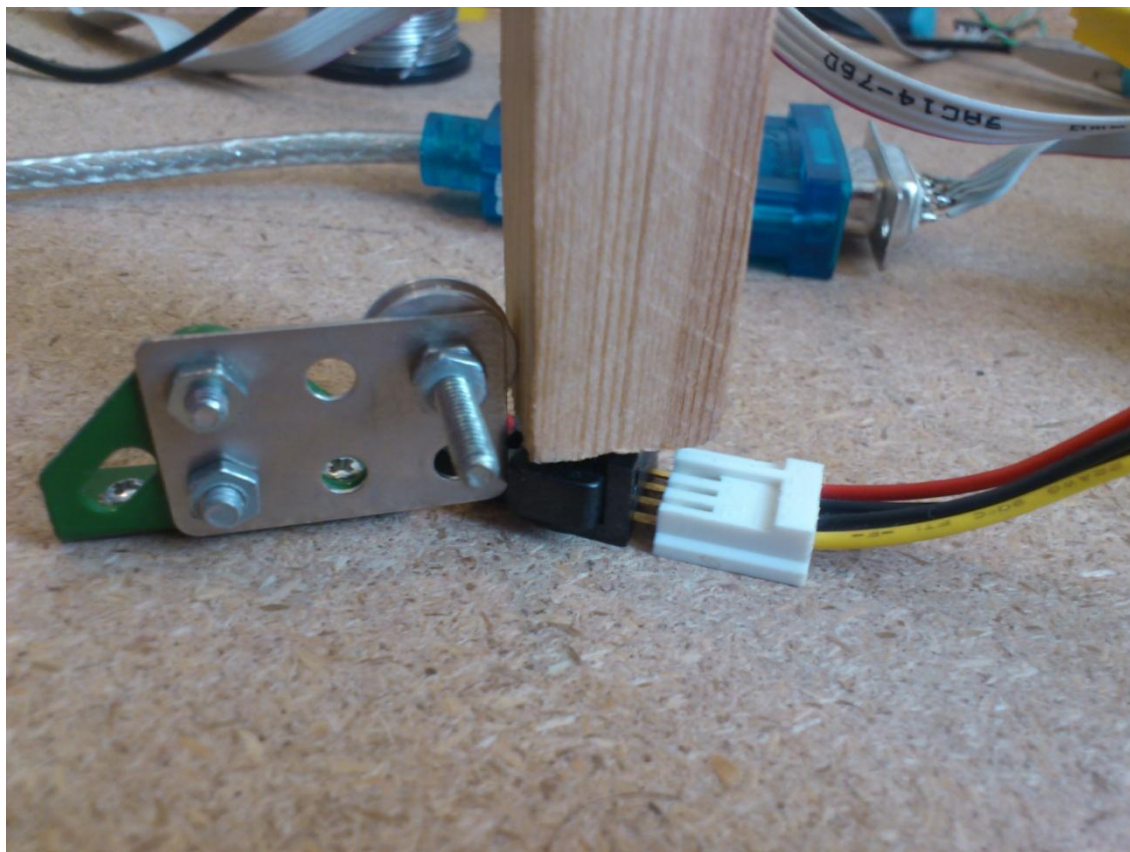
Obrázek 13: LTS 24-NP zapojený do obvodu baterie a budiče motoru

4.2.1.2 Snímač síly FSG-15N1A

Snímač síly zapůjčený od doc. Ing. Petra Beneše, Ph.D. je polovodičovým snímačem na bázi Wheatstonova můstku.

Snímač má rozsah 1500 gramů a měření je prováděno odlehčováním zátěže, která na senzor působí. Tento postup je volen dle pokynů v datasheetu. Zátěž aplikovaná na senzor v přípravku pak činí přibližně 1200 gramů. To je také zároveň maximum pro odlehčení motorem. Pokud je potřeba měřit výkonnější kombinaci vrtule a motoru, je možné posunout ukotvení motoru na páce přípravku a tím efektivně změnit převodní poměr. Citlivost snímače je 0,24 mV/g při napájecím napětí 10 V. Linearita je +/- 0,5%.

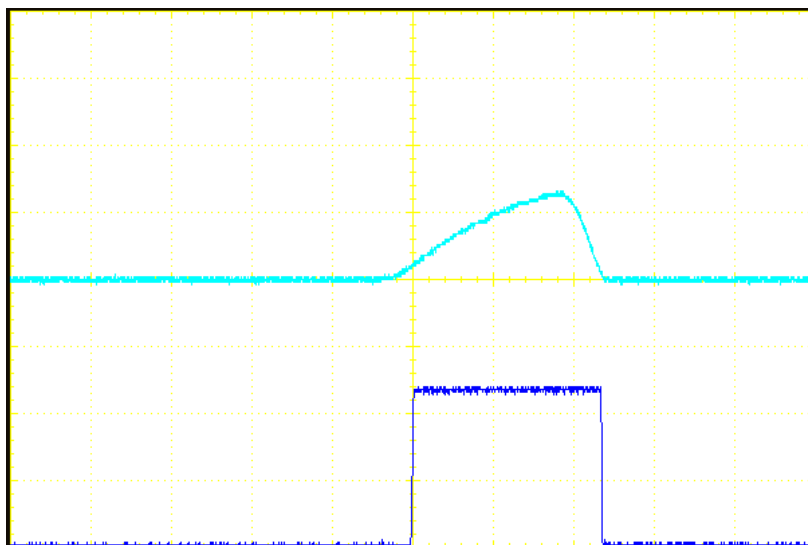
Dle datasheetu nemá na měření vliv působení síly mimo střed pístku. Avšak v praxi se ukázalo, že když vlivem vibrací dochází k posunu tyče tlačící na senzor, může nastat naprosté zkreslení měřené hodnoty. Také je senzor velice citlivý na odlehčování a zatěžování. Pro platné měření je potřeba senzor pouze odlehčovat z jeho zatíženého stavu. Vlivem manipulací s vrtulí mezi měřeními pak dochází k tomu, že první měření je většinou neplatné z důvodu velkého zkreslení. Tento jev bude níže ukázán v měřených hodnotách.



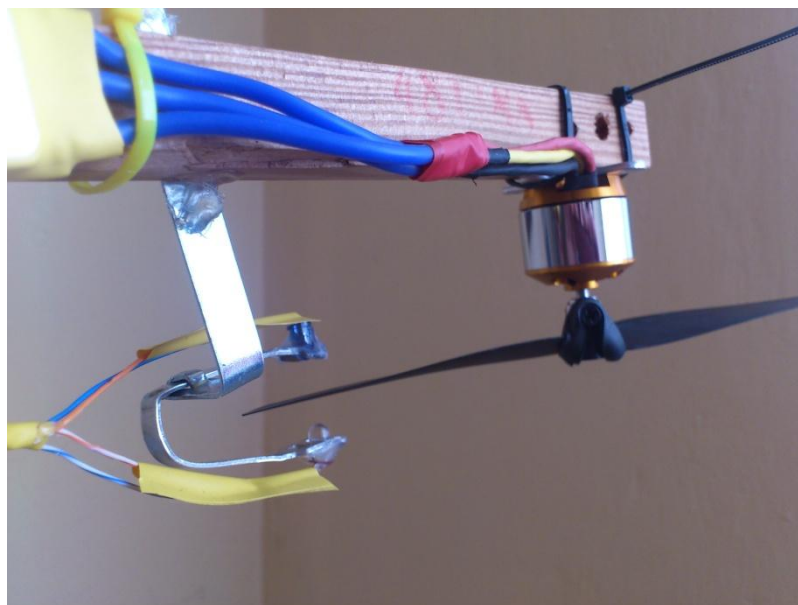
Obrázek 14: FSG-15N1A umístěný pod zatíženým ramenem. Nalevo je vidět zarážka, která drží rameno na místě a brání mu sklouznutí ze senzoru.

4.2.1.3 Optická závora

Optická závora pro snímání otáček (Obrázek 16) byla vyrobena z běžně dostupných součástek. Jedná se o IR diodu a IR fototranzistor. Úbytek napětí na tranzistoru při jeho zastínění je upraven pomocí komparátoru na obdélníkový impulz (Obrázek 15) a ten je vyhodnocen pomocí MCU. Operační zesilovač, který je použitý jako komparátor má frekvenční rozsah, při daném napájení, zhruba 300 kHz. Rozsah pro měření otáček vrtule je tedy více než dostatečný.



Obrázek 15: Signál z fototranzistoru (nahore) a signál z komparátoru (dole)



Obrázek 16: Optická závora umístěná u vrtule a jednoduché uchycení motoru.

4.2.1.4 ATmega8A

Jako MCU je použit mikroprocesor firmy Atmel. Tento mikroprocesor byl vybrán vzhledem k vlastním dobrým zkušenostem, nízkou cenou a dostatečnou kvalitou. V mé aplikaci je taktován pomocí krystalu na frekvenci 14,7456 MHz.

Výstup všech snímačů je přiveden na integrovaný 10 bitový A/D převodník. Ten má při nastavení referenčního napětí 5 V citlivost 4,88 mV. Chyba převodu je +/- 2 LSB.

Jako rozhraní pro komunikaci s PC je použit USART. Pro ovládání budiče motoru je použito PWM (50 Hz, šířka impulzu 1 mS až 2 mS). Na dps je také připraven vývod pro použití I2C, které je snadno možné imputovat také do kódu.

4.2.1.5 ST232CD

Jedná se o jednoduchý přijímač/vysílač pro RS-232. Je použit opět primárně kvůli dobré dostupnosti a nízké ceně. Ze dvou kanálů Transmit / Receive je použit pouze jeden. V současném programu není implementováno přijímání povelů z PC, ale opět je možné toto snadno doplnit do kódu.

4.2.1.6 TLC272

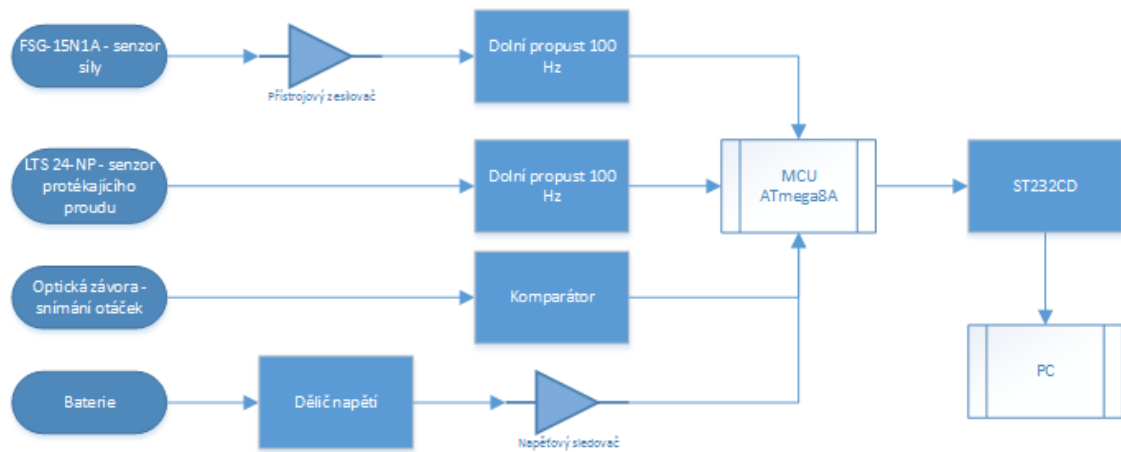
Tyto operační zesilovače jsou použity dva. Jeden slouží jako dolní propust pro signály snímaného proudu a síly, druhý pak jako komparátor pro optickou závorku a napěťový sledovač pro oddělení baterie od obvodu. Jako u všech ostatních součástí se jedná o levnou a snadno dostupnou variantu. Tento operační zesilovač je navíc schopný pracovat i pouze při kladném napájecím napětí. Není tedy nutné zabývat se zdrojem záporného napětí.

4.2.1.7 AD8220ARMZ

Přístrojový zesilovač firmy Analog Devices. Byl mi doporučen k použití se zapůjčeným snímačem síly. Jedná se o diferenciální zesilovač s nastavitelným zesílením. Díky tomu bylo možné ho snadno nastavit pro tuto konkrétní aplikaci. Jako u předchozího operačního zesilovače jej není nutné napájet s pomocí záporných napětí. Zesílení bylo nastaveno přibližně na hodnotu 34. Tím je dosaženo maximálního využití rozsahu snímače i A/D převodníku.

4.2.2 Návrh desky plošných spojů

4.2.2.1 Blokové schéma

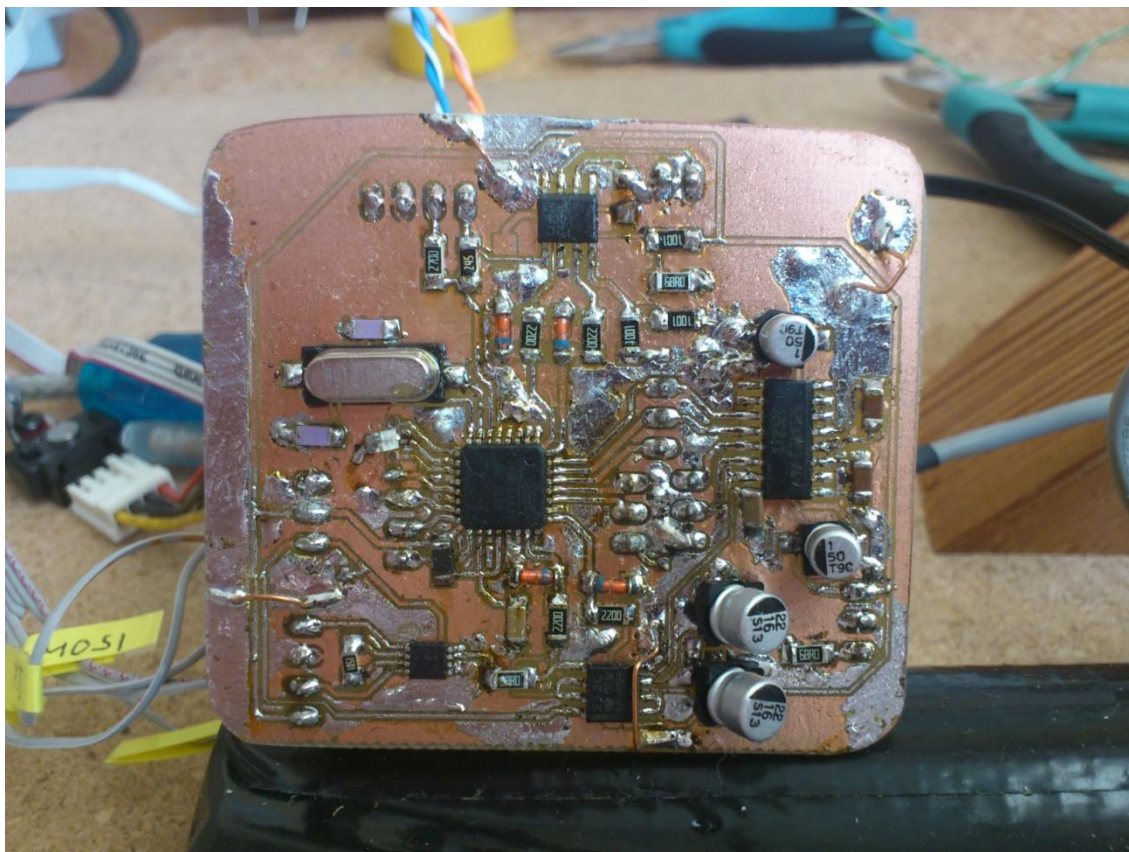


Obrázek 17: Blokové schéma měřícího přípravku

4.2.2.2 Postup návrhu dps

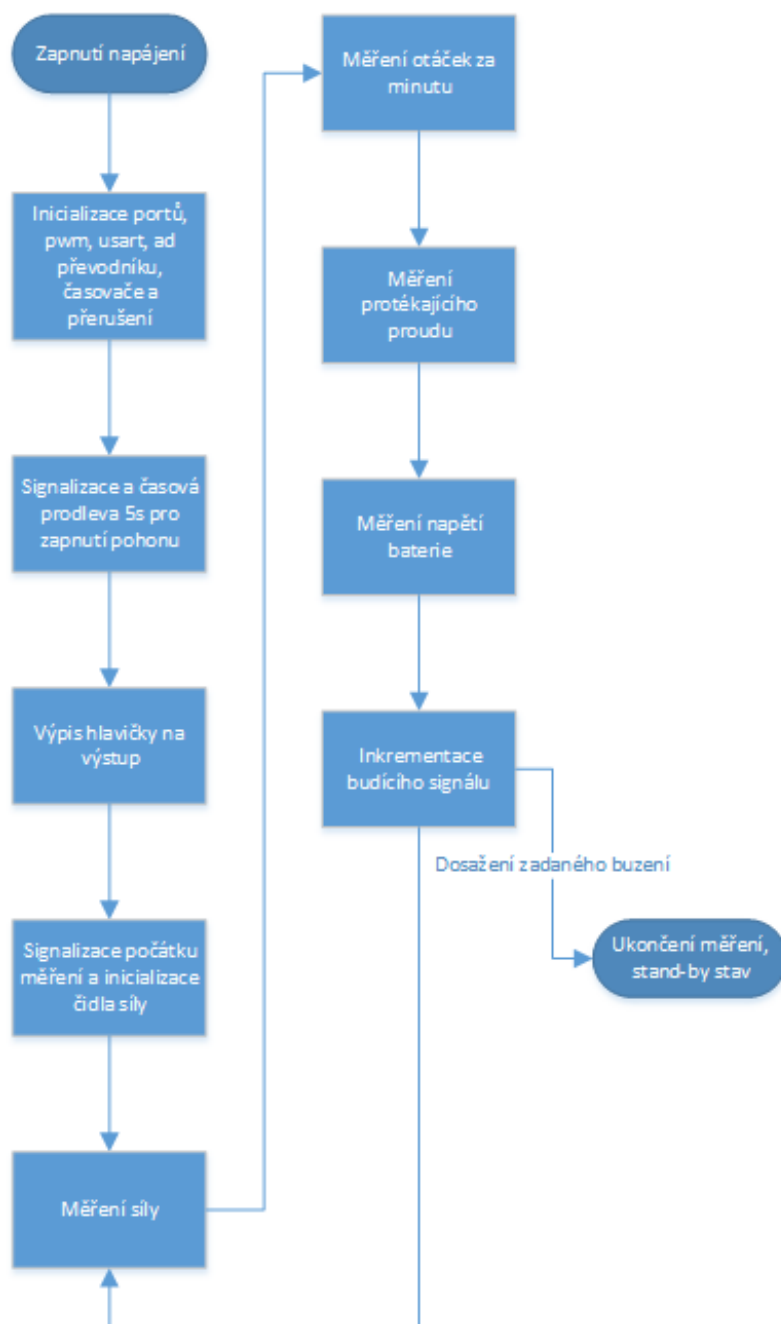
Deska plošných spojů byla navrhována v programu Eagle. Vzhledem k mému nedostatku zkušeností a znalostí v tomto oboru jsem se snažil co nejvíce dodržovat obecná pravidla návrhu dps. Ani tak jsem se však nevyhnul četným chybám a nutným opravám již hotové desky (například umístění dalšího kondenzátoru mezi napájecí piny integrovaného obvodu st232). Na fotkách hotové desky je tedy možné vidět rozdíly oproti navrhované desce. Kompletní schéma zapojení a desky je v příloze (Příloha č. 1).

Při návrhu jsem umístil operační zesilovače a zdroje signálů co nejblíže k MCU. Na desce je také rozlitá měď, která je spojena se zemí. Tato opatření by měla bránit rušení ostatních signálů. Napájení MCU je +5 V. Zesilovače jsou pak napájeny z větve +12 V. Referenční napětí i napájení A/D převodníku je připojeno na napájecí napětí +5 V skrze dolní propust, aby nedocházelo k zavlečení nežádoucího šumu z digitální části obvodu. Vstupy A/D převodníků jsou chráněny proti přepětí pomocí zenerových diod. U všech součástek je snaha dosáhnout co nejkratších vzdáleností vodičů. Napájecí větve jsou sice značně dlouhé a vedou podél celého obvodu, ale jsou skoro v celé své délce obklopeny rozlitou mědí napojenou na zem (GND).



Obrázek 18: Finální podoba osazené desky plošných spojů.

4.2.3 Program obsluhující měřicí přípravek



Obrázek 19: Zjednodušený vývojový diagram programu obsluhujícího měřicího přípravku

Mikrokontrolér ATmega8A byl programován v jazyce C za pomoci programu Atmel AVR Studio verze 5. K nahrání programu, který byl kompilován pomocí `avr-gcc` pak sloužil vyrobený programátor USBasp.

Při vytváření programu jsem se snažil o maximální přehlednost a jednoduchost. Po spuštění se provede jednoduchá inicializace všech součástí, jako je PWM, usart, časovače, přerušeni a a/d převodníku. Po inicializaci je pěti bliknutími led vyzván uživatel k zapojení napájení budiče motoru. Toto bylo nutné při konfiguraci, která byla použita k měřením v mém případě. Je samozřejmě možné tuto část přeskočit při budoucích úpravách. Po dalších pěti bliknutích je na výstup vypsána hlavička pro tabulku měřených hodnot a následují již samotná měření voláním funkce `measure()`. Po dokončení funkce program přejde do nekonečné smyčky, kde je jedním bliknutím led za vteřinu signalizován konec měření. Pro opakovaná měření je možné opakovaně volat funkci `measure()`.

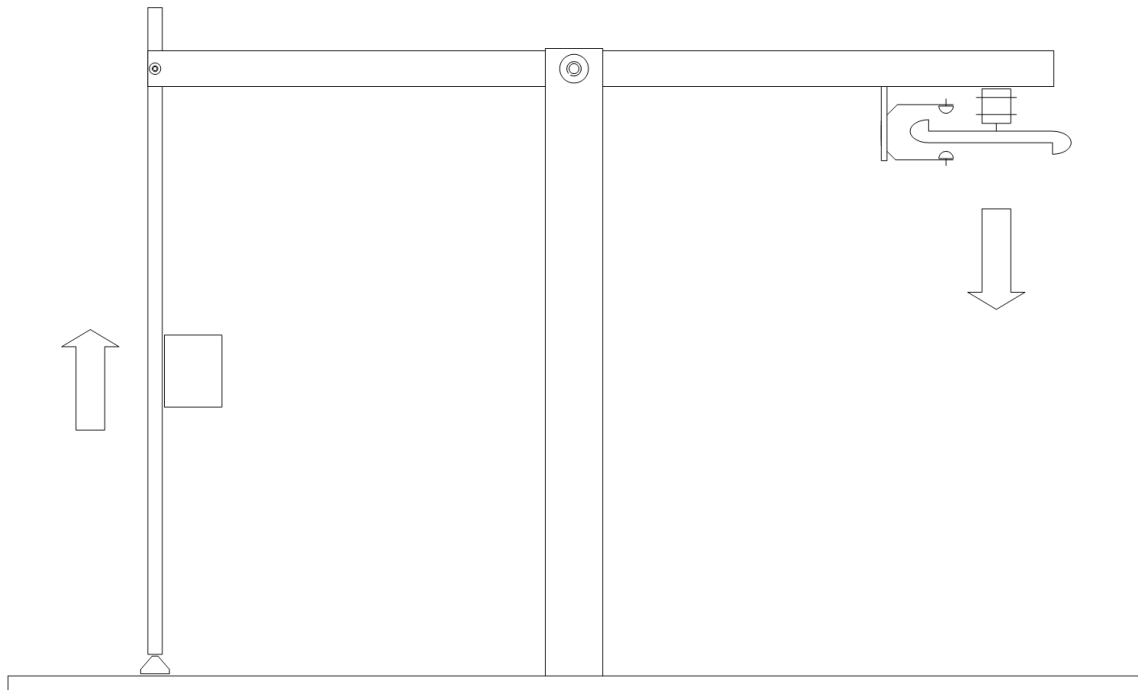
Samotná funkce `measure()` se pak po spuštění chová tak, že počká 500 mS. Poté provede načtení hodnoty z čidla síly a hodnotu uloží jako nulovou, ke které se budou další měření vztahovat. Po dalších 500 mS dojde k samotnému měření. Každý průchod smyčkou je signalizován dvěma bliknutími led. Tato smyčka je spouštěna jednou za vteřinu a jsou v ní volány funkce, které načtou průměr ze 100 hodnot a/d převodníku a následně provedou přepočet. Výsledek je pak okamžitě tištěn na výstup. Součástí smyčky je zvyšující se hodnota OCR1A, která určuje šířku pudícího PWM signálu (udáno v mikrosekundách). Po dosažení zadané hodnoty je toto měření ukončeno za současného výpisu „konec“ na výstup.

4.2.3.1 Možná vylepšení programu

Schopnosti MCU poskytují velkou škálu možností budoucích vylepšení programu. Například pro použití školního budiče motoru je možné naprogramovat jednoduchou komunikaci s použitím I2C. Pro tuto možnost jsou i na DPS nachystané vývody pro konektor. USART také umožňuje implementovat oboustrannou komunikaci s PC, která momentálně není využita. S touto úpravou by pak bylo možné zasílat přípravku povely bez nutnosti přípravek stále přeprogramovávat. Při použití této možnosti by bylo vhodné naprogramovat také vlastní rozhraní pro komunikaci a příjem dat. Co se týče samotných měření, je možné si naprogramovat libovolný průběh budícího signálu a měřit tak například i impulzní a přechodové charakteristiky. Je však nutné uvažovat přitom hardwarové omezení a to především v podobě dolnoproústních filtrů s mezní frekvencí zhruba 100 Hz. Pokud by bylo žádáno měření rychlých průběhů, bylo by nutné tyto filtry upravit.

4.2.4 Mechanická konstrukce měřícího přípravku

4.2.4.1 Schéma přípravku



Obrázek 20: Schéma přípravku. Napravo je umístěn motor s vrtulí a snímačem otáček. Nalevo zátěž a senzor síly pod ramenem.

Mechanická konstrukce přípravku je provedena ze dřeva (Obrázek 20, Obrázek 21). Tato konstrukce mi byla zapůjčena a její úpravy spočívají v přidání senzorů a potřebné zátěže na rameni u senzoru síly. Pokud by bylo potřeba změnit rozsah měření síly, stačí jednoduše posunout motor po rameni doleva. Tím dojde ke změně poměru sil na obou stranách páky.

Motor s vrtulí napravo je umístěn tak, aby síla působila ve směru šipky. Toto nastavení má dvě výhody. Zaprvé je takto jednoduše dosaženo nadlehčování zátěže nalevo a zadruhé není proud vzduchu od vrtule ovlivněn podložkou, což by mělo za následek zkreslení měření. Pokud si přejeme simulovat podmínky při stratu, nebo letu u země, je možné nad vrtuli umístit desku.

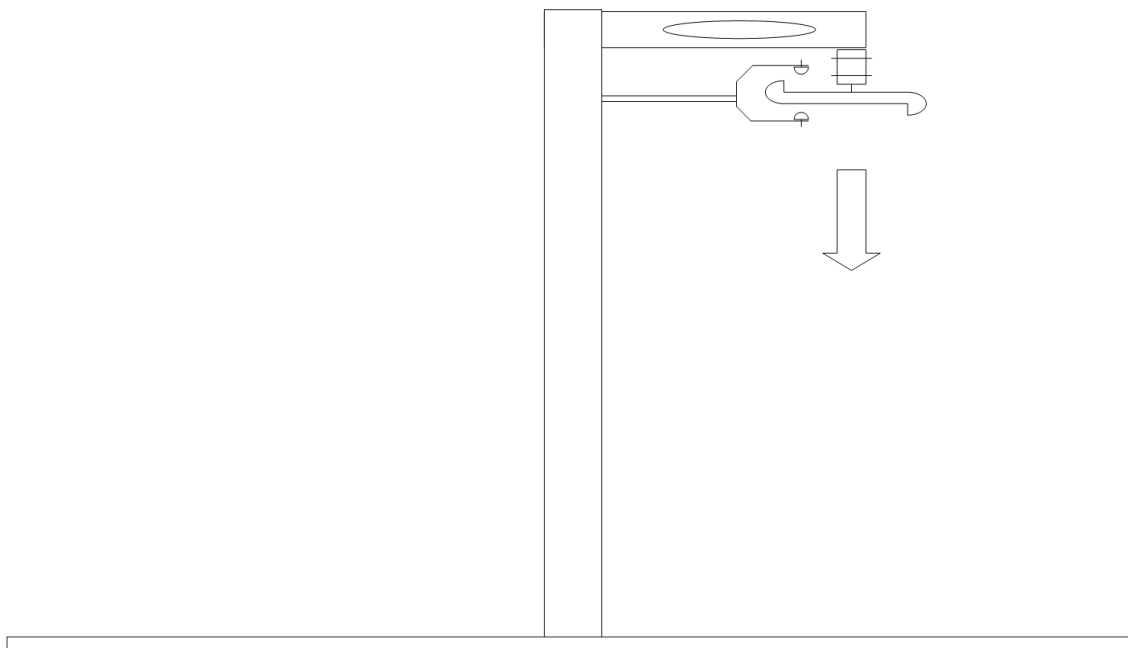
Tato konstrukce má ovšem i nevýhody spočívající především v malé pevnosti konstrukce a faktu, že na všechny pohyblivá spojení působí tření.



Obrázek 21: Fotografie přípravku. Zde při měření s prstencem upravujícím aerodynamiku.

4.2.4.2 Možné vylepšení přípravku

Celou tuto konstrukci by bylo možné zjednodušit a vylepšit použitím jiných komponent. Například čidlo síly se ukázalo být poměrně slabým článkem celé soustavy. Pro budoucí úpravy bych navrhoval použití tenzometru na pružném rameni, například z levné kuchyňské váhy (Obrázek 22). Elektronická část by mohla být zachována, pouze by se nastavilo odpovídající zesílení u přístrojového zesilovače. Parametry většiny kuchyňských vah poskytují naprosto dostačující přesnost ± 1 gram a navíc mají daleko větší rozsah a to až 5 kg. Navíc by bylo možné značně zjednodušit celou konstrukci a eliminovat vliv tření a také zvýšit pevnost přípravku. Návrh konstrukce je možné vidět na obrázku níže. Motor by bylo možné umístit přímo na rameno v místě, kde původně působila silou miska váhy. V případě použití velké vrtule by bylo možné rameno snadno nastavit a prodloužit.



Obrázek 22: Schéma případné modifikace přípravku. Napravo je umístěn motor s vrtulí a snímačem otáček. Tenzometr je umístěn přímo na rameni, ke kterému je motor připevněn.

4.3 Měření provedená s pomocí přípravku

S pomocí přípravku byla provedena sada měření k prozkoumání charakteristik aktuátoru a také ke zjištění vlivu aerodynamických úprav. Ty spočívaly v použití dvou prstenců. Jeden prstenc měl prostý válcový tvar se zaoblenou náběžnou hranou (Obrázek 28) a druhý se měl tvarem přiblížit profilu křídla (Obrázek 31). Poslední úpravou pak bylo použití turbulátoru na vrtuli. Ten byl realizován nalepením tenkého provázku za náběžnou hranu vrtule. Jako první krok však bylo nutné kalibrovat senzor síly.

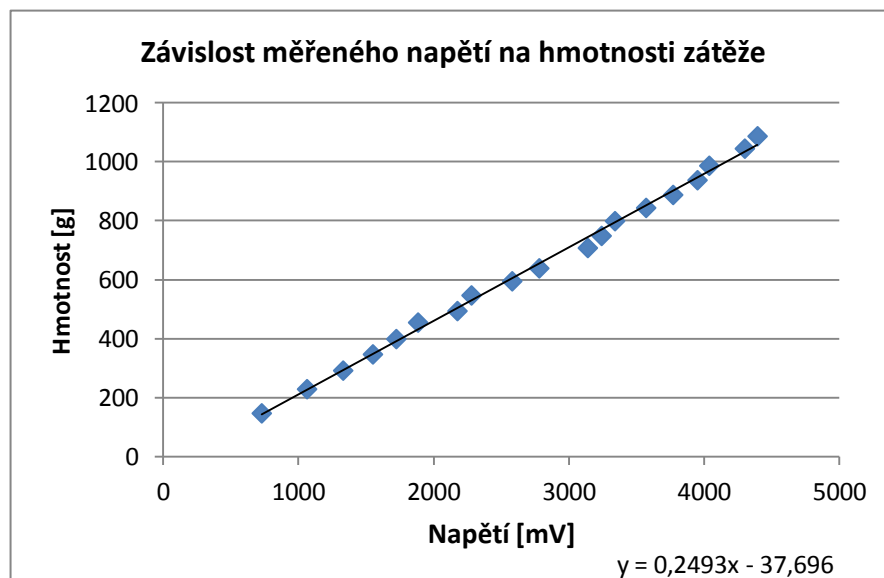
4.3.1 Kalibrace senzoru síly

Pro kalibraci bylo použito měření za statických podmínek a naměřené hodnoty byly porovnány s měřením kuchyňské váhy, která má udávanou přesnost ± 1 gram. Na místo motoru byla umístěna nádoba, která byla postupně plněna vodou. Senzor síly byl umístěn na kuchyňskou váhu a s rostoucí zátěží bylo zaznamenáváno napětí měřené MCU a hmotnost měřená váhou (Obrázek 25). Z naměřených dat byla určena rovnice regrese, podle které se následně vypočítává hmotnost umístěná na senzoru.



Obrázek 23: Úprava měřidla při kalibraci senzoru síly

Obrázek 24 ukazuje poměrně dobrou linearitu. Senzor však byl velice citlivý na zacházení. Vzhledem k tomu, že při reálném měření je pod vlivem značných vibrací bych doporučil použití jiného senzoru a konstrukce měřidla, viz výše.



Obrázek 24: Závislost napětí měřeného pomocí MCU a hmotnosti měřené s pomocí kuchyňské váhy.

4.3.2 Měření charakteristik

Měřicí přípravek umožňuje sledovat proud tekoucí z baterie a její napětí, otáčky vrtule za minutu a sílu, kterou vrtule působí na rameno. Z těchto měření je následně vypočítán příkon motoru a tah vrtule. Měření v této práci byla prováděna na motorech a vrtulích, které nemají uvedeny prakticky žádné parametry.

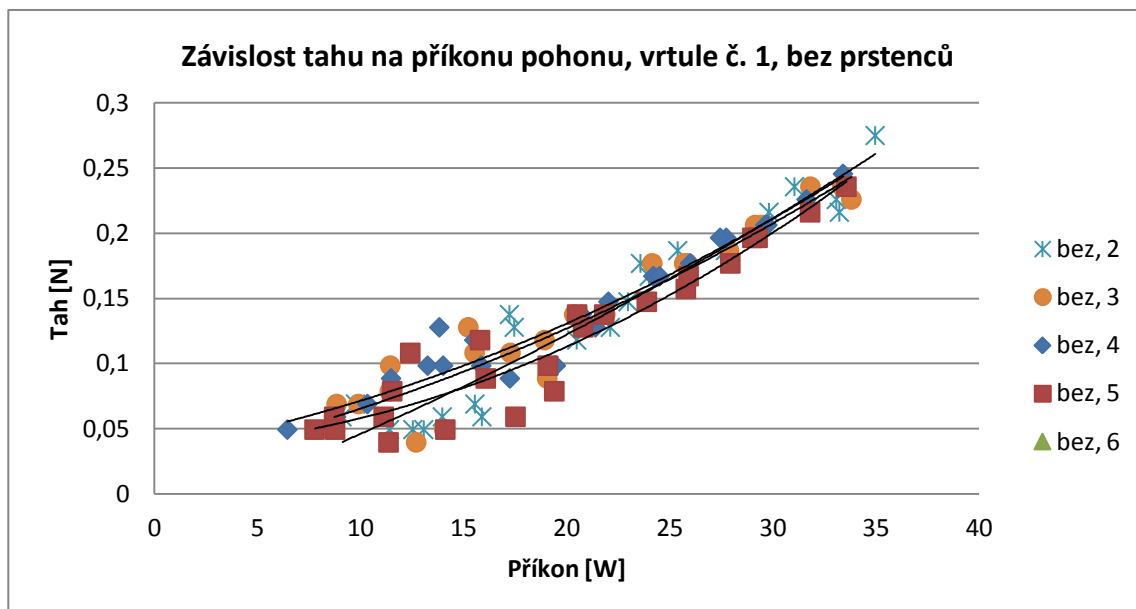
V případě použití vrtule se změřenými parametry (například z [6]), je možné určit parametry neznámého motoru s pomocí rovnic výše uvedených v teoretické části. To je dle mého názoru také nejjednodušší způsob měření parametrů motorů. Není při něm nutné nijak měnit nastavení měřidla ani rozsahy měřidel.



Obrázek 25: Vrtule použité při zkušebním měření. Na levé straně vrtule č. 2. Na pravé straně vrtule č. 1.

4.3.2.1 Vrtule č. 1

Jedná se o vrtuli od neznámého výrobce pocházející z Číny. Uvedené parametry vrtule jsou 7“ x 3,5“. Jak již bylo shrnuto v teoretické části, nejde o příliš vypovídající údaje. Jde o opravdu levnou vrtuli, což je znát na první pohled. Vzhledem k nepřilíh kvalitní konstrukci nebylo možné provozovat vrtuli na vysokých otáčkách.

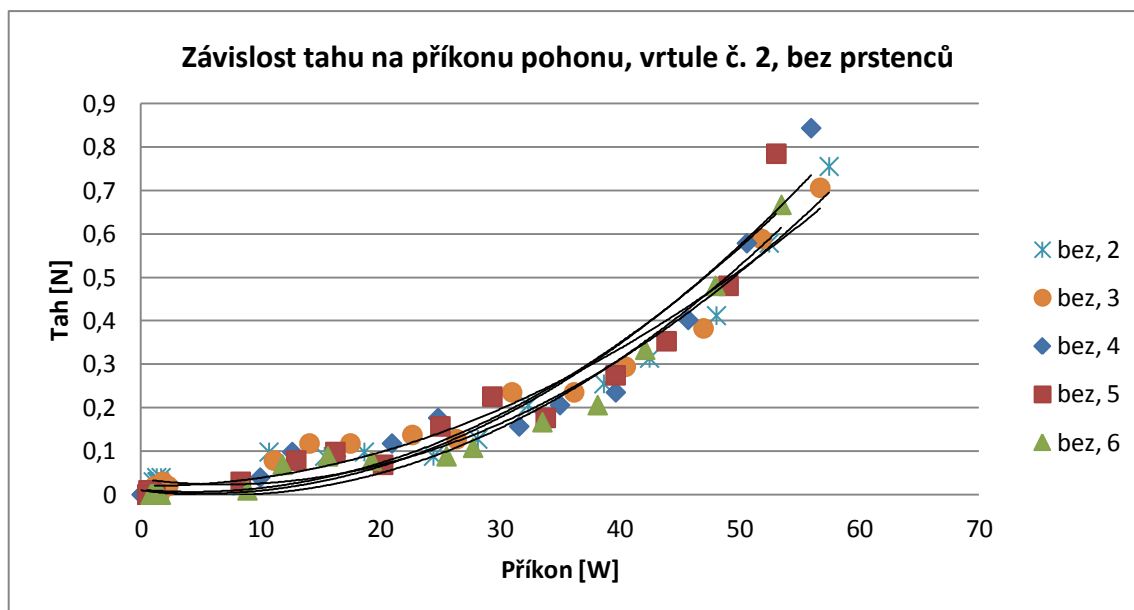


Obrázek 26: Závislost tahu na příkonu pohonu. Vrtule č.1

Obrázek 26 ukazuje, že byla provedená měření poměrně konzistentní s výjimkou provozu na nízkých otáčkách. Při těchto otáčkách doprovázely provoz vrtule velmi silné vibrace. Při dosažení vyšších otáček již silnější vibrace ustaly. Otáčky dosažené vrtulí byly průměrně 9200 otáček za minutu. Detailní výsledky měření je možné si prohlédnout v příloze. Závislost tahu na příkonu se pak zdá být poměrně lineární.

4.3.2.2 Vrtule č.2

Pro druhý pokus byla vybrána vrtule značky Kovozávody opp Prostějov. Na vrtuli je uvedeno 180/100. Přepočteno na palce se jedná o 7“ x 3,4“. Podle parametrů se tedy jedná o velice podobné vrtule. Na první pohled jsou však patrné rozdíly. Listy vrtule č.2 jsou širší a jiného tvaru. Také jsou daleko více zkrouceny a tvrdší. Provoz vrtule se obešel bez silných vibrací a také výsledky měření jsou mnohem zajímavější. Maximální průměrně dosahované otáčky byly v tomto případě pouze 7600 otáček za minutu. Při těchto otáčkách však vrtule dosahovala znatelně většího tahu, avšak byl zapotřebí větší příkon motoru. Závislost tahu na příkonu byla v tomto případě spíše exponenciální.



Obrázek 27: Závislost tahu na příkonu pohonu. Vrtule č.2

4.3.2.3 Zhodnocení měření z hlediska charakteristik vrtulí

V obou případech byly vrtule buzeny stejným způsobem. Lineárně byla navyšována šířka impulzu řídicího buzení motoru. V obou případech je však možné pozorovat rozdílné reakce na tuto změnu. Vrtule č. 2 dosahuje v menších otáčkách mnohem většího maximálního tahu. Tomu také odpovídá zvýšená spotřeba. S vrtulí číslo 1 se takového tahu nepodařilo vůbec dosáhnout.

Pro srovnání, vrtule č. 1 dosáhla maximálního tahu 0,25 N při otáčkách 9120 ot./min a příkonu motoru 33 W. Vrtule č. 2 dosáhla stejného tahu na otáčkách 6720 ot./min při příkonu motoru 39 W. Z tohoto měření je patrné, že při tomto tahu je efektivnější použití vrtule č. 1. Na druhou stranu s vrtulí č. 2 je možné dosáhnout daleko většího maximálního tahu a závislost tahu na příkonu motoru je exponenciální. Efektivita se tedy zvyšuje. Vrtule č. 2 se tedy při výběru z těchto dvou vrtulí jeví jako vhodnější pro těžší multicoptery.

4.3.2.4 Zhodnocení měření z hlediska kvality získaných dat

Jako nejméně přesné se ukazuje být měření síly, kterou aktuátor působí na rameno. Tato nepřesnost byla předpokládána a největší podíl na ní mají vibrace přenášené na senzor. Zvláště u vrtule č. 1 docházelo v nízkých a extrémně vysokých otáčkách k velice silným vibracím. V některých případech došlo až k posunutí ramene na senzoru síly, což mělo za následek naprosté znehodnocení měření. Toto zjištění je v rozporu s informacemi udanými v datasheetu, podle kterého by zatěžování mimo střed kontaktní plochy nemělo mít žádný vliv.

Měření otáček se ukázalo být jako velice přesné. Pomocí optické závory jsou generovány impulzy, které jsou dále tvarovány pomocí komparátoru. Komparátor je dostatečně rychlý a bez problémů stihá bez zkreslení generovat impulzy pro otáčky reálně dosahované vrtulemi. Tyto impulzy jsou následně sčítány v MCU a to za pomoci generování externích přerušení, které je spuštěno na nástupné hraně signálu.

Napětí baterie je měřeno pomocí jednoduchého děliče napětí se zesílením $\frac{1}{4}$, za který je umístěn napěťový sledovač. Toto zapojení umožňuje měřit napětí až 20 V. S měřením napětí nebyl žádný problém a toto zapojení se ukázalo být jako více než postačující.

U měření proudu byl menší rozdíl v offsetu signálu. Zatímco datasheet uvádí hodnotu 2,5 V, mnou měřená hodnota byla 2,55 V. S tímto měřeným offsetem pak bylo počítáno i v programu. Toto je způsobeno tím, že senzor nebyl napájen přesně 5 V, ale 5.1 V. Další měření proudu pak vykazovalo skvělou linearitu.

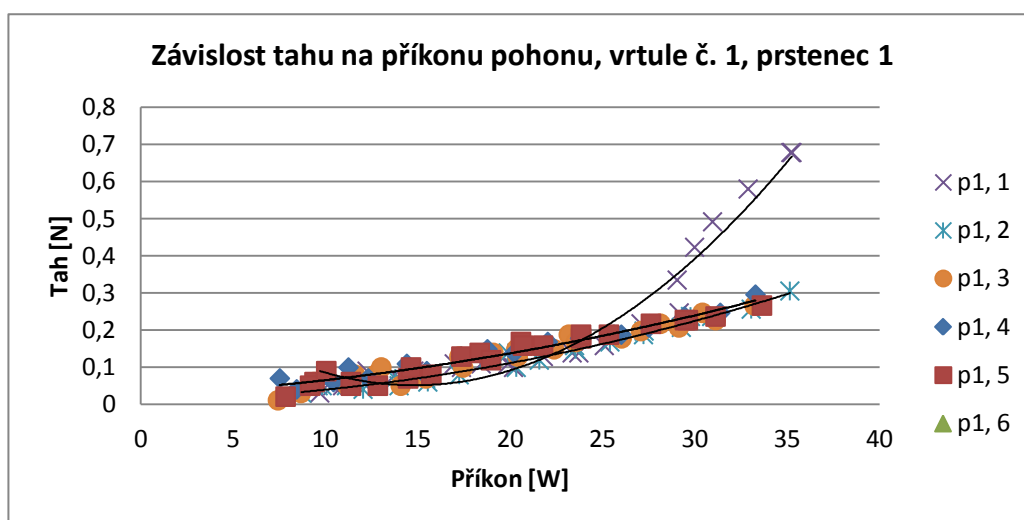
4.3.3 Měření vrtulí s úpravami aerodynamiky

U obou vrtulí byla provedena stejná sada měření, jako v předchozím případě. Tentokrát však byly k vrtuli umístěny polystyrenové prstence dvou různých tvarů. S vrtulí č.1 pak bylo navíc provedeno měření s turbulátorem. Pro vrtuli č. 2 jsem toto měření neprováděl, protože se jednalo o vrtuli zapůjčenou a aplikace turbulátoru by znamenala její zničení.

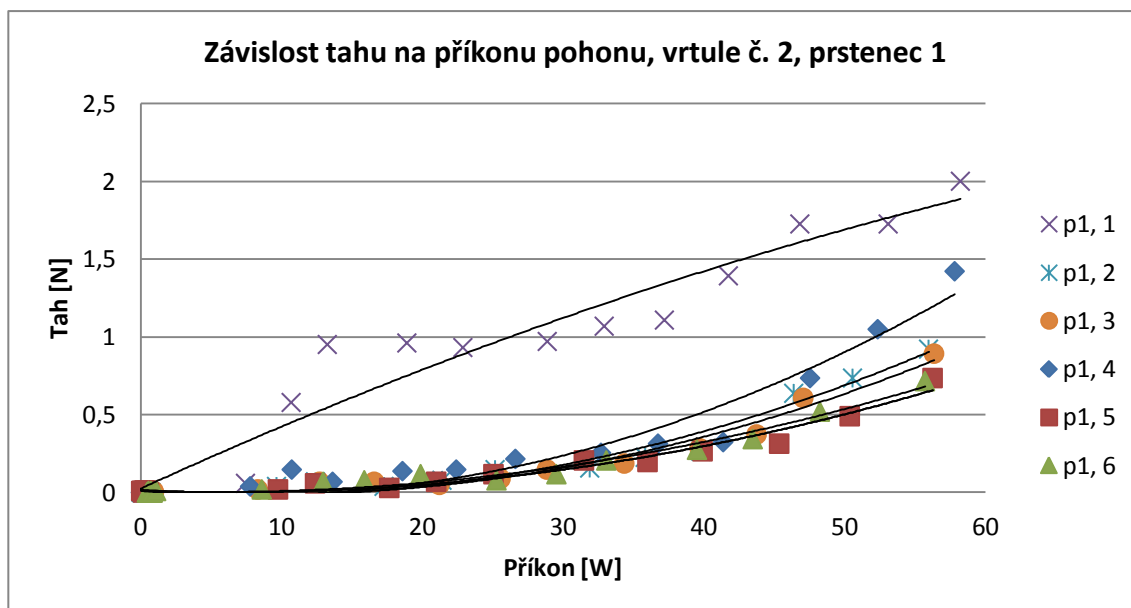
4.3.3.1 Vrtule s prstencem č. 1



Obrázek 28: Prstenec číslo 1. Jedná se o jednoduchý válcový tvar se zaoblením na vnitřní náběžné hraně



Obrázek 29: Graf závislosti tahu na příkonu při použití prstence č. 1 u vrtule č. 1



Obrázek 30: Graf závislosti tahu na příkonu při použití prstence č. 1 u vrtule č. 2

Obrázek 28 ukazuje použitý prsteneček a tvar jeho průřezu. Jeho umístění na přípravku bylo možné vidět již výše viz Obrázek 21.

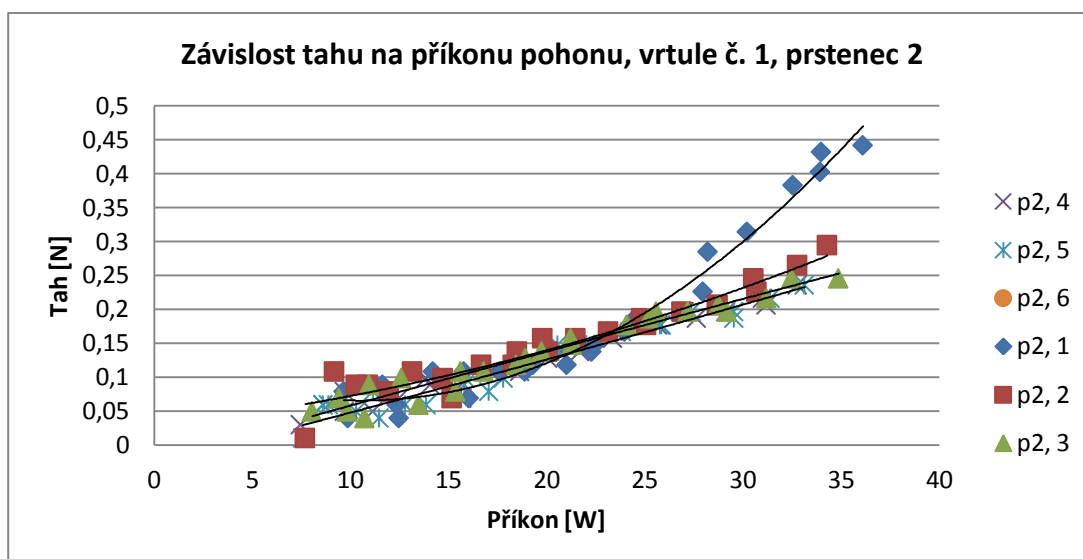
Výsledky měření ukazují na naprosto minimální vliv na průběh měřených veličin. Průměrný nárůst poměru tahu k příkonu byl velice malý a nepovažují ho za průkazný vzhledem k nepřesnostem měření.

Obrázek 29 a Obrázek 30 také ukazuje, že jedno měření se značně vychyluje. Jedná se o první měření provedené po instalaci prstence a toto zkreslení je s největší pravděpodobností způsobeno citlivostí snímače síly na manipulaci. Pro další měření jsou již hodnoty velice sourodé a ukazují na validní průběh. Takovýto průběh bude patrný i u dalších měření s prstenci. V jednom případě (Obrázek 30) se pak podobná odchylka, ale v menším měřítku, opakuje u průběhu označeného p1, 4. Tento průběh byl naměřen po manipulaci s měřicím prostředkem.

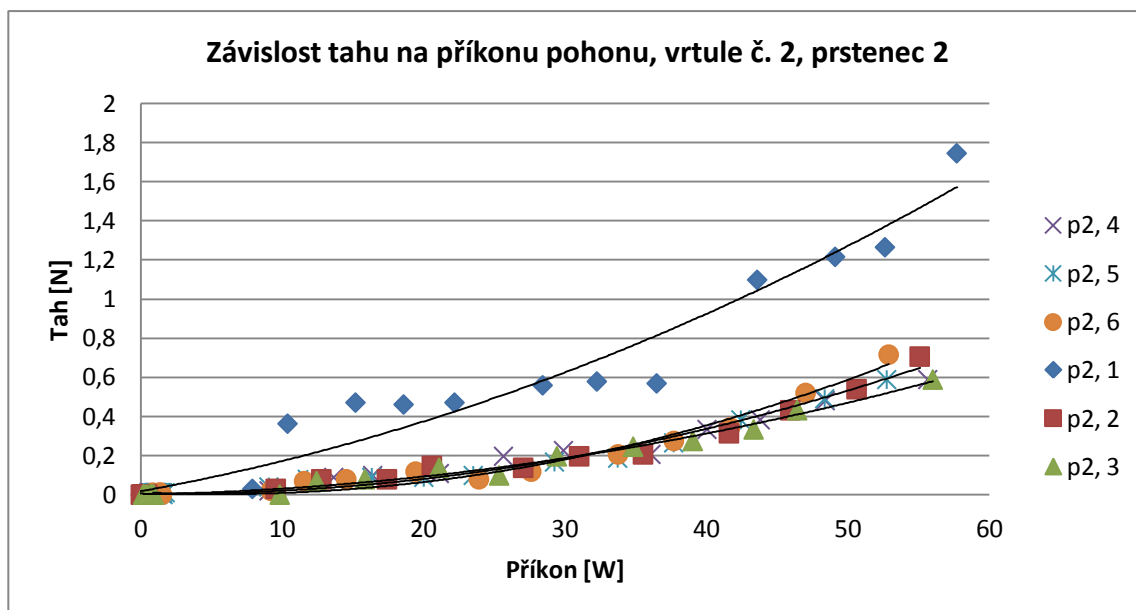
4.3.3.2 Vrtule s prstencem č. 2



Obrázek 31: Prsteneček číslo 2, tvar průřezu prstenečku se blíží spíše tvaru profilu křídla



Obrázek 32: Graf závislosti tahu na příkonu při použití prstenečku č. 2 u vrtule č. 1

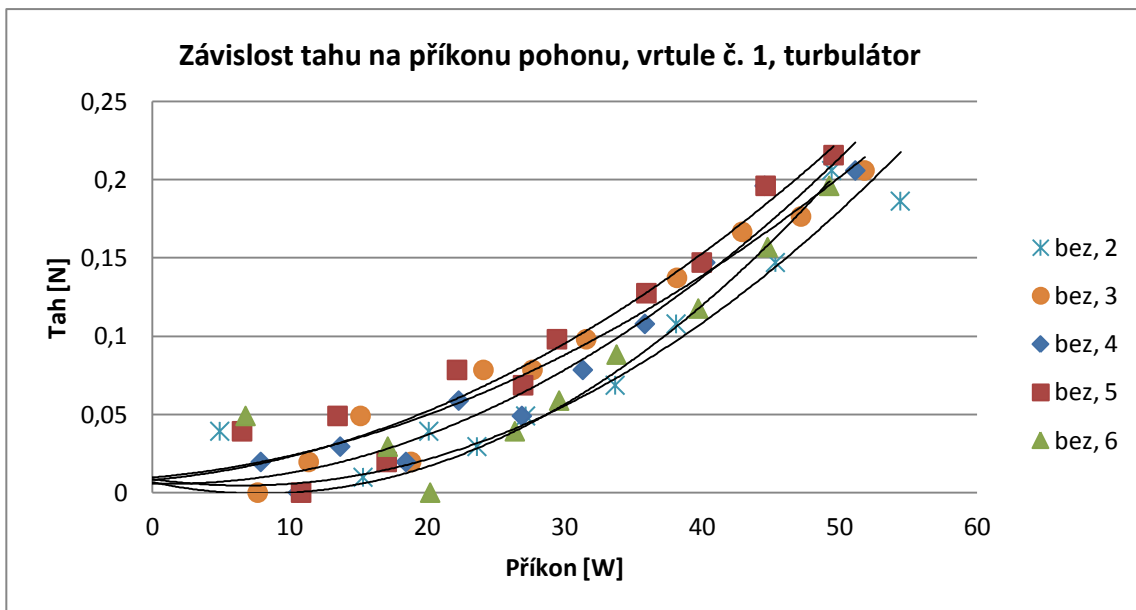


Obrázek 33: Graf závislosti tahu na příkonu při použití prstence č. 2 u vrtule č. 2

Výsledky těchto měření jsou téměř totožné s výsledky při použití prvního prstence. Jakékoliv změny jsou naprosto zanedbatelné. Dle teoretického předpokladu mělo dojít k poměrně markantním změnám, to se však při praktickém měření nepotvrdilo. Možným důvodem je příliš malá velikost prstenců. Doporučil bych proto do budoucna opakovat měření s použitím větších (především delších) prstenců.

4.3.3.3 Vrtule č. 1 upravená turbulátorem

Jako poslední bylo provedeno měření na upravené vrtuli. Provedení turbulátoru je velice jednoduché. Na hrany listů byl přilepen tenký provázek pomocí sekundového lepidla. S takto upravenou vrtulí pak byla provedena stejná sada měření jako s vrtulí bez úprav. Měření s použitím prstenců jsem u této upravené vrtule již neprováděl, protože výsledky byly dostatečně vypovídající k vyloučení vhodnosti této úpravy. Vzhledem k měřeným průběhům je jasné, že tato úprava vrtuli pouze uškodila. V grafu (Obrázek 34) je možné vidět jak pokles tahu, tak nárůst příkonu motoru potřebný k jeho dosažení.



Obrázek 34: Graf závislosti tahu na příkonu při použití prstence č. 2 u vrtule č. 2



Obrázek 35: Vrtule č.1 modifikovaná jednoduchým turbulátorem

4.3.3.4 Zhodnocení použití aerodynamických úprav vrtulí

Na základě měření se nepotvrdilo, že by bylo užitečné umístit vrtuli do prstence. Měření však proběhlo pouze na dvou tvarech prstenců stejné velikosti. Je možné, že pro prstence delší by byl vliv na vrtuli znatelnější, doporučoval bych proto provést další měření v budoucnu s několika odlišnými konstrukcemi prstenců. Na druhou stranu prstence ani nijak neuškodily a je proto možné je použít k ochraně vrtulí v případě havárie prostředku. Při použití tvrzených polystyrenů je možné dosáhnout velmi nízké hmotnosti, při vysoké pevnosti. Záchrana drahé vrtule před rozbitím je pak rozhodně výborným obchodem za pár gramů hmotnosti navíc. Pro představu mnou použité prstence z obyčejného polystyrenu váží 7 gramů. Obdobná konstrukce z tvrzeného polystyrenu bude vážit přibližně 20 až 30 gramů, podle druhu použitého materiálu.

Co se týče použití turbulátoru (Obrázek 35), tak zde byla užitečnosti této úpravy naprosto vyvrácena. Je ovšem možné, že použití sofistikovanější úpravy by tak špatné výsledky nepřineslo. Nicméně dle mého názoru je tak náročné řešení s pochybným výsledkem za hranicí užitečnosti.

5 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit doporučení pro výběr motorů, vrtulí a baterií pro vícemotorové létající prostředky, jež budou při dané konfiguraci optimální s ohledem na předpokládanou délku letu a dosažitelnou dynamiku.

V teoretické části byla rozebrána problematika motorů, vrtulí i baterií a jejich vzájemné propojení i charakteristiky. Na základě těchto zjištění byl poté navržen postup pro optimální výběr komponent na základě požadavků.

Poznatky získané v teoretické části byly následně využité v části praktické, kde byl navržen a vyroben měřicí přípravek pro měření hlavních charakteristik. Přípravek je schopen měřit proud tekoucí z baterie, rychlost otáčení vrtule, tah vrtule a také napětí baterie. Součástí těchto měření bylo také ověření vlivu aerodynamických úprav – prstenců a turbulátoru.

Z provedených měření bylo zjištěno, že použití prstenců testovaných tvarů nemá zásadní vliv na parametry. I když nedošlo k očekávanému zlepšení, nenastalo ani žádné zhoršení. Z výsledků vyplývá, že použití prstenců k ochraně drahé vrtule nepřinese větší nežádoucí účinky (vzhledem k velice nízké váze těchto konstrukcí). Doporučuji proto jejich použití. Do budoucna by bylo vhodné otestovat i další tvary a velikosti prstenců.

Na druhou stranu použití turbulátoru se ukázalo jako naprosto nevhodné a zásadně zhoršující parametry vrtule. S ohledem na případnou náročnost provedení složitějšího turbulátoru toto řešení nedoporučuji.

V praktické části byla vytvořena pomůcka pro výběr komponent, pomocí které byla také vybrána kombinace komponent a pracovní bod pro školní multicopter. Jako optimální kombinace s ohledem na požadavky jsou následující výsledky:

- Motor: AXI 2212/34 SILVER LINE
- Vrtule: apcsf_11x4,7
- Baterie: Li-Po, 3 články do série a 6 článků paralelně (dohromady tedy 18 článků)

Při této kombinaci je optimální pracovní bod 4853 otáček za minutu. Spotřeba proudu všemi čtyřmi motory je přibližně 31 A a celková váha prostředku 2284 gramů (za předpokladu, že jeden článek baterie váží 85 gramů). V tomto bodě se odběr motoru stále nachází v oblasti maximální účinnosti. Při zvýšení počtu článků sice dojde k zvýšení kapacity a prodloužení doby letu, ale již dochází k poklesu účinnosti a tudíž se nejedná o zcela optimální řešení. Záleží však na konkrétních požadavcích. Pokud je žádána výdrž na úkor hmotnosti, není problém takové řešení použít.

6 LITERATURA

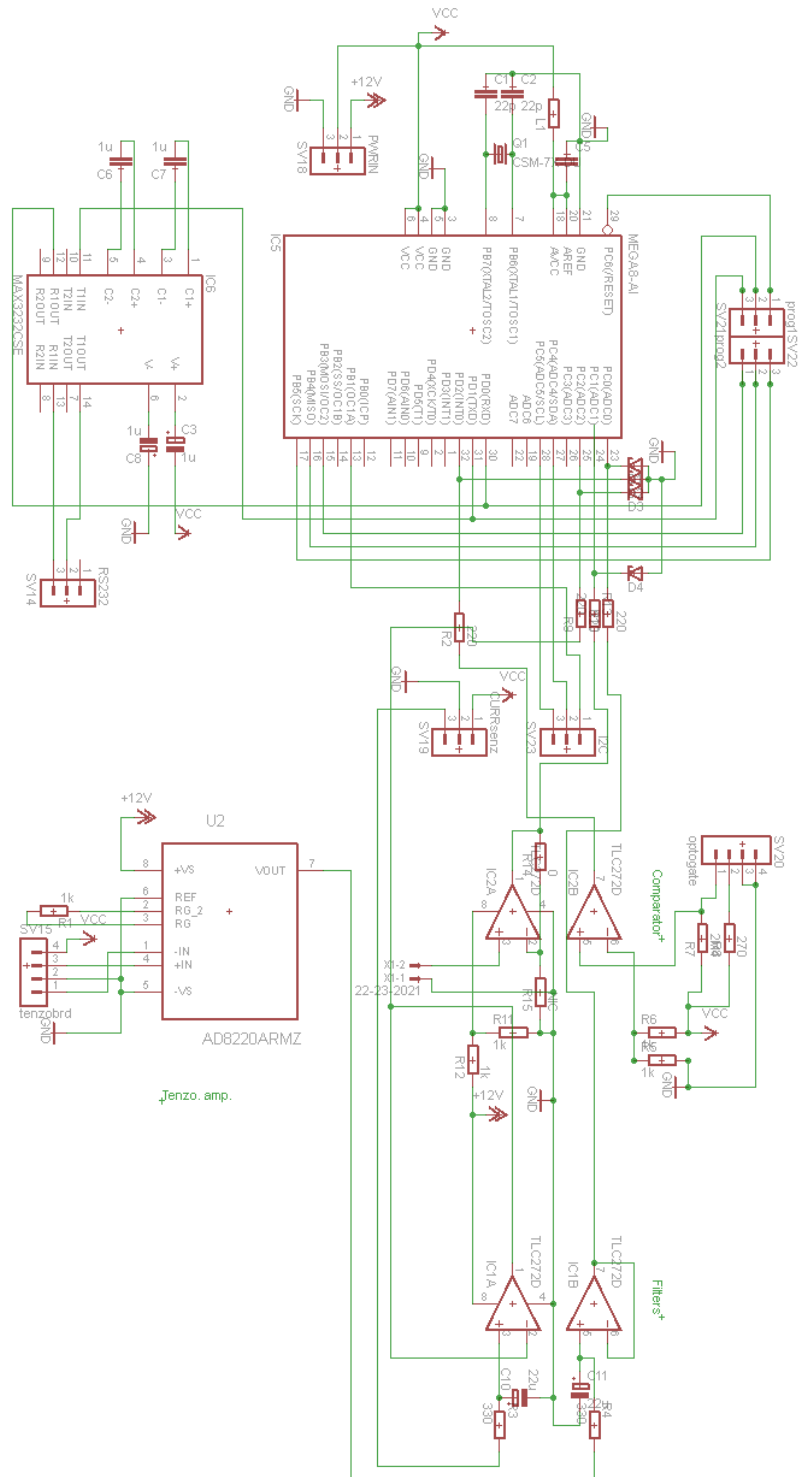
- [1] KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické pohony* [online]. Brno [cit. 2013-01-02]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=194057>
- [2] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické regulované pohony* [online]. Brno, 2007 [cit. 2013-01-02]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=199064>
- [3] YEDAMALE, Padmaraja. MICROCHIP TECHNOLOGY INC. AN885: *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals* [online]. 11/11/03 [cit. 2013-01-02]. DS00885A. Dostupné z: http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1824&appnote=en012127
- [4] HARTMAN, Edwin P. Working charts for the determination of propeller thrust at various air speeds. In: *NASA Technical Reports Server* [online]. 1935, s. 19 [cit. 2013-01-02]. 19930091555. Dostupné z: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930091555_1993091555.pdf
- [5] ŠVÉDA, Jiří. VOJENSKÁ AKADEMIE ANTONÍNA ZÁPOTOCKÉHO. *Teorie vrtulí a vrtulníků*.
- [6] UIUC Propeller Database. *UIUC Propeller Data Site* [online]. [cit. 2013-01-02]. Dostupné z: <http://www.ae.illinois.edu/m-selig/props/propDB.html>
- [7] Understanding RC LiPo Batteries. *Rchelicopterfun* [online]. [cit. 2013-01-02]. Dostupné z: <http://www.rchelicopterfun.com/rc-lipo-batteries.html>
- [8] Flight time of MikroKopters. *MikroKopter* [online]. 2012-01-11 [cit. 2013-01-02]. Dostupné z: <http://www.mikrokopter.de/ucwiki/en/FlightTime>
- [9] ŠVÉDA, Jiří. VOJENSKÁ AKADEMIE ANTONÍNA ZÁPOTOCKÉHO. *Teorie vrtulí a vrtulníků*. s. 20.
- [10] ŠVÉDA, Jiří. VOJENSKÁ AKADEMIE ANTONÍNA ZÁPOTOCKÉHO. *Teorie vrtulí a vrtulníků*. s. 21.
- [11] Doplnky nosných (i ocasních) ploch pro zlepšení jejich obtékání a účinnosti. LNĚNIČKA, Jaroslav. AKADEMIE LETECTVÍ. *E-magazín Akademie letectví* [online]. 2009-11-30 [cit. 2013-01-03]. Dostupné z: <http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2010/01/dopluky.php>
- [12] Airfoil characteristics: Charakteristiky profilů. LNĚNIČKA, Jaroslav. AKADEMIE LETECTVÍ. *E-magazín Akademie letectví* [online]. 2009-10-01 [cit. 2013-01-03]. Dostupné z: <http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2009/12/airfoils.php>
- [13] MODEL MOTORS S.R.O. *Axi model motors* [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.modelmotors.cz/cz/index.php>

Ostatní obrázky, vyjma citovaných, jsou vlastní tvorbou autora.

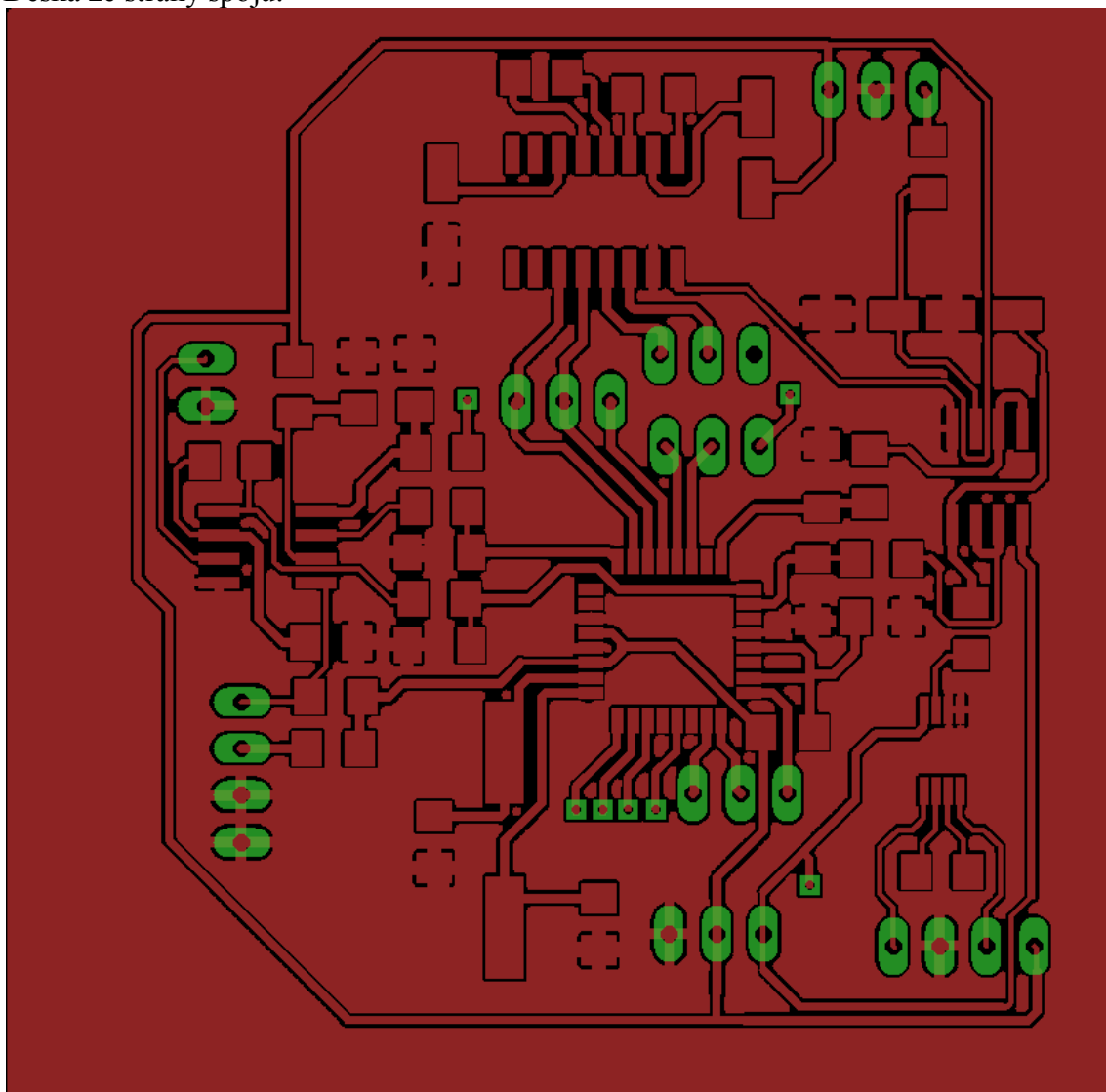
7 PŘÍLOHY

7.1 Příloha 1: DPS

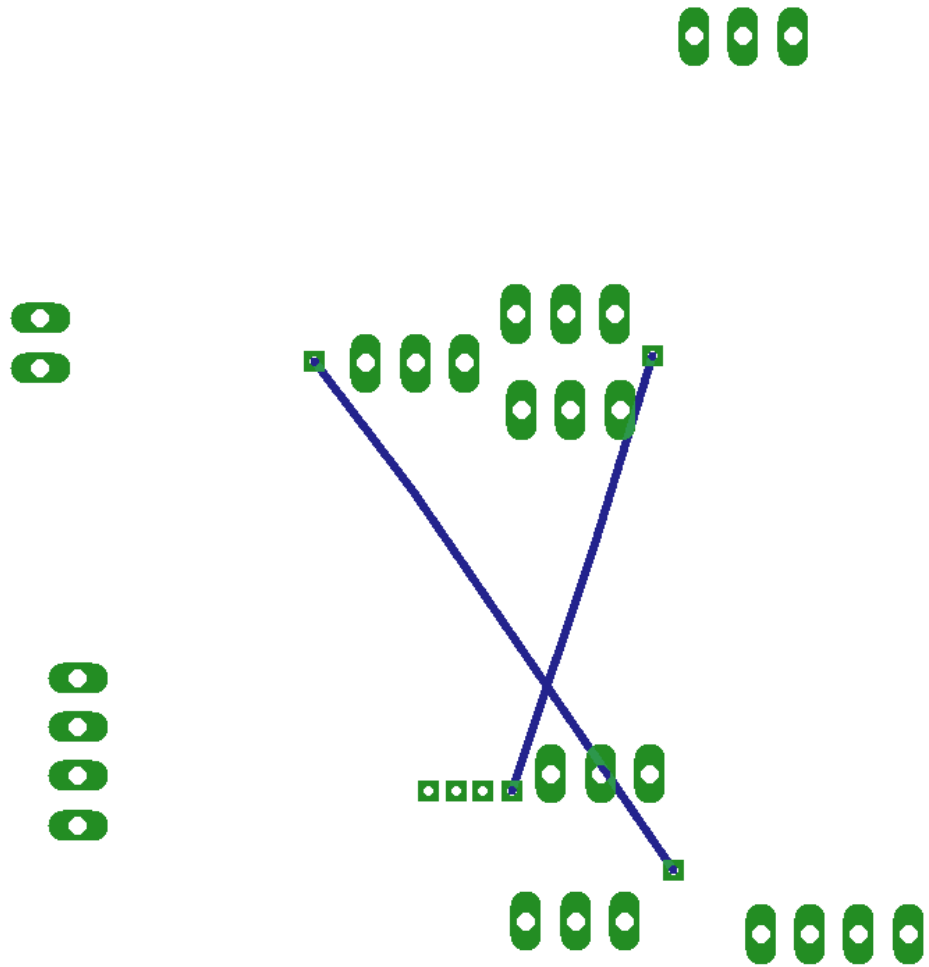
Schéma:



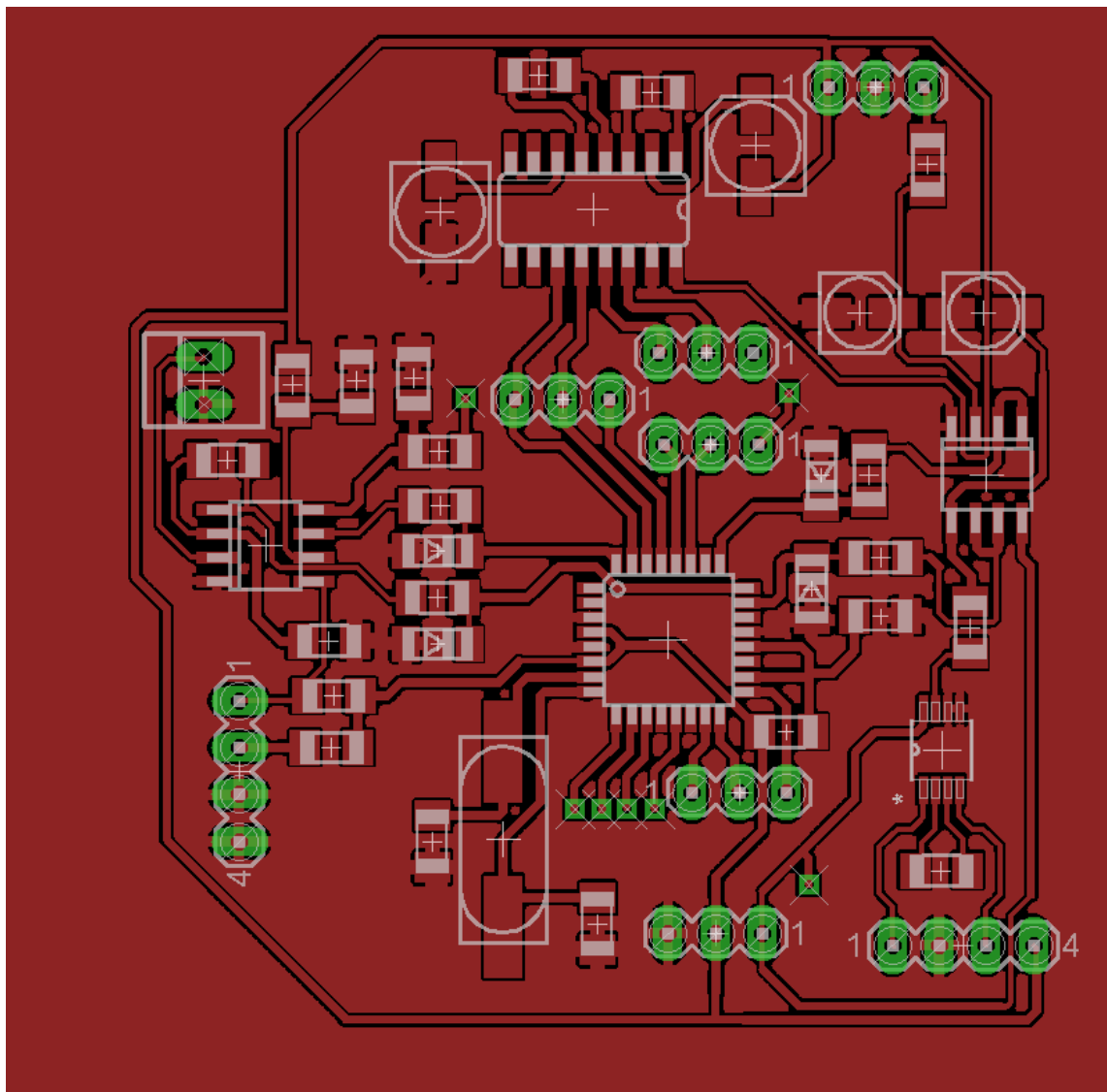
Deska ze strany spojů:



Propojky ze strany součástek:



Deska se součástkami



Deska s popisky součástek

