

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní - Ústav přístrojové a řídicí techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Experimentální zařízení pro měření
tahu vrtulí UAV**

Experimental equipment to measure a propeller thrust of UAV

Autor: Josef Kašpar

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Bušek, Ph.D.

Akademický rok: 2020/2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kašpar** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **483271**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Experimentální zařízení pro měření tahu vrtulí UAV

Název bakalářské práce anglicky:

Experimental equipment to measure a propeller thrust of UAV

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši o problematice generovaného tahu vrtulí používaných u bezpilotního prostředků.
- 2) Navrhněte a realizujte experimentální měřicí zařízení pro současné měření tahu a otáček.
- 3) Proveďte praktické měření několika typů vrtulí.
- 4) Zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MUZAR, Dominic; LANTEIGNE, Eric. Experimental characterization of brushless DC motors and propellers for flight application. 2016.
- [2] JAKUBOWSKI, Arkadiusz, et al. Analysis thrust for different kind of propellers. In: International Conference on Automation. Springer, Cham, 2015. p. 85-90.
- [3] YOON, Myunggon. Experimental identification of thrust dynamics for a multicopter helicopter. International Journal of Engineering Research and Technology, 2015, 4.11: 206-209.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jaroslav Bušek, Ph.D., U12110.3

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jaroslav Bušek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Datum:

.....
podpis

Poděkování

Děkuji Ing. Jaroslavu Buškovi, Ph.D. za rady a vedení mé bakalářské práce, za věcné připomínky a za čas, který mi byl ochoten věnovat. Dále mé díky patří chápající rodině a přátelům, kteří mi byli velkou oporou během studia.

Abstrakt

Cílem této práce je navrhnutí a zprovoznění experimentálního zařízení pro měření otáček a tahu různých vrtulí za statických podmínek. Úvodní část má čtenáře seznámit s problematikou generovaného tahu a vysvětlit motivaci pro sestavení malého experimentálního zařízení. Následuje stručné popsání různých metod pro měření jak otáček, tak tahu využívaných v technické praxi. Před samotným závěrem je část práce věnována použitým komponentám a jejich využitím v měřicí stanici. Práce končí uskutečněním samotného měření a vyhodnocením naměřených dat.

Klíčová slova

Vrtule, experiment, tenzometr, statické měření, tah vrtule, arduino uno

Abstract

The goal of this thesis is the development and commissioning of experimental device designed for measuring revolutions and thrust of different kinds of propellers under static conditions. The initial part is intended to acquaint the reader with problematics of generated thrust and explain the motivation of building small experimental device. The following describes different methods for measuring revolutions and thrust used in technical practice. Before the conclusion the theses is devoted to the used components and their purposes. The last chapter is about measuring itself and about results.

Keywords

Propeller, experiment, strain gauge, static measure, propeller thrust, arduino uno

Obsah

1 Úvod	7
2 Problematika generovaného tahu	8
2.1 Popis principu fungování vrtule	8
2.1.1 Materiál vrtulí	8
2.1.2 Geometrie vrtule	9
2.1.3 Síly na vrtuli	9
2.2 Tah vrtule s pevným úhlem náběhové hrany	10
3 Popis měřených veličin	12
3.1 Měřicí snímače	12
3.1.1 Měření otáček	12
3.1.1.1 Kontaktní snímače otáček	12
3.1.1.2 Bezkontaktní měření otáček	14
3.1.2 Měření síly	17
3.1.2.1 Odporové tenzometry	17
3.2 Zpracování dat	19
4 Měřicí zařízení	20
4.1 Návrh řešení experimentálního zařízení	20
4.1.1 Základní specifikace součástí	20
4.1.1.1 Arduino	21
4.1.1.2 Snímač otáček	21
4.1.1.3 Tenzometr	22
4.1.1.4 Převodník HX711	23
4.1.1.5 Motor	23
4.1.1.6 Regulátor motoru	23
4.1.1.7 Měřené vrtule	24
4.1.1.8 DC/DC měnič	25
4.1.1.9 Funkce programu	25
5 Měření a závěr	26
Seznam použité literatury	28
Seznam použitého SW	30
Seznam použitých symbolů	31
Seznam použitých zkratk	32
Přílohy	32

1 Úvod

První drobné bezpilotní letouny, které začala využívat neodborná široká veřejnost, se na trhu objevily s příchodem malých kamer s nízkou hmotností, které bylo možné připevnit na letoun s bezpilotním řízením. Mezi roky 2010 až 2015 zažil trh s těmito zařízeními masivní nárůst poptávky, což vedlo k zaplavení trhu kvalitními a méně kvalitními součástmi. Až do příchodu komerčních dronů si lidé, modeláři, stavěli vlastní bezpilotní letouny z jednotlivých součástí sami. Komerční drony, v dnešní době, dosahují kvalitou stavby, množstvím vyrobených kusů, spolehlivostí a v neposlední řadě i cenou, takové pohodlnosti, že v posledních letech je vlastní stavba bezpilotního letadla UAV pro rekreační účely na ústupu. Avšak vlastní realizace je nenahraditelná u zařízení se specializací pro daný účel, kupříkladu bezpilotní letouny pro využití v průmyslu, zemědělství, mapové aplikace či filmové produkce.

Při návrhu nového stroje je jedním ze stěžejních parametrů hmotnost, kterou bude muset UAV při své práci nést. To znamená, jaký tah budou muset vrtule aparátu generovat. Správná volba vrtulí je tedy nezbytná, jelikož právě průměr, tvar, plocha listu a její stoupání určuje, jaký tah bude daná vrtule schopna vyvinout. Z čehož plyne hlavní záměr této práce, a tím je návrh a realizace měřicího zařízení tahu a otáček. Je klíčové zvolit správný motor a vrtule, pokud má daný stroj plnit svoji práci s maximálním využitím energie.

První část této práce popisuje teoreticky problematiku generovaného tahu vrtulí. Popisuje, jaký vliv má geometrie vrtulového listu vliv na schopnost vyvinout aerodynamický vztlak. Zaměřuje se na výhody a nevýhody různých materiálů, ze kterých je vrtule vyrobena, a na nezbytný matematický popis problematiky.

Druhá část práce se věnuje různým způsobům měření fyzikálních veličin, které jsou pro tuto práci stěžejní.

Třetí část ukazuje a popisuje použité součásti při návrhu a sestavení experimentálního stanoviště pro měření tahu a otáček vrtulí.

Poslední část je zaměřena na funkčnost měřicího zařízení, měření několika typů vrtulí menšího průměru a zhodnocení naměřených hodnot.

2 Problematika generovaného tahu

Tato kapitola je věnována členu, jenž vyvíjí tah, tedy vrtulím. Avšak vědní obor zabývající se problematikou vrtulí je natolik obsáhlý, že by bylo nad rámec této práce vše obsáhnout v jedné kapitole. Právě proto budou popsány pouze ty vztahy, které jsou pro pochopení této práce nezbytné.

2.1 Popis principu fungování vrtule

„Vrtule zrychluje částice vzduchu a odsunuje je za sebe, čímž vznikne síla přímo působící na lopatce vrtule“ [1]. Tato síla nese název tah T . Vrtule přeměňuje mechanickou energii motoru právě na tah. Velikost a tvar vrtule přímo ovlivňuje letový výkon stroje. Standardně se používají vrtule s dvěma listy, avšak u menších bezpilotních letounů jsou k vidění i vícelisté.

2.1.1 Materiál vrtulí

Obvykle se vrtule vyrábí z uhlíkového vlákna, nylonu nebo dubového dřeva. Každý ze jmenovaných materiálů má své výhody i zápory.

Uhlíkové vrtule:

- mají vyšší pevnost než vrtule z nylonu
- jejich hmotnost je nižší
- tlumí vibrace a jejich provoz není příliš hlučný
- nevýhodou je vyšší cena

Dřevěné vrtule:

- vysoká pořizovací cena
- využití nalézá u velkých vícerotorových UAV s velkou nosností

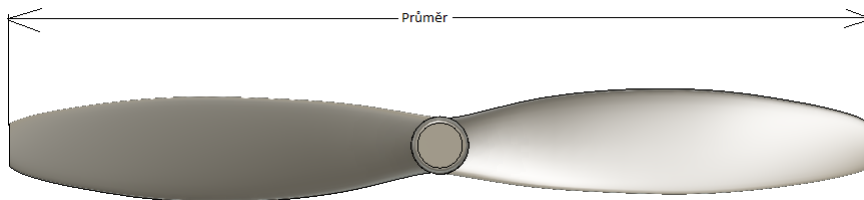
Vrtule z plastu (nylonu):

- nespornou výhodou je jejich cena a dostupnost
- snadná vyrobitelnost (v drtivé většině vstříkovaním)
- vyšší poddajnost za provozu

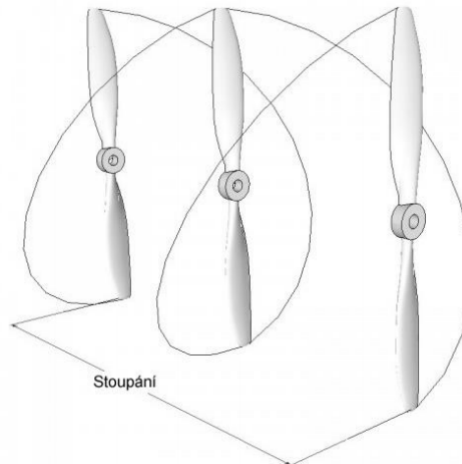
2.1.2 Geometrie vrtule

Při otáčení vrtule její každý bod koná rotační a translační pohyb, výslednou trajektorií je tedy šroubovice. Tvar vrtule je definován jejím průměrem a stoupáním. Jako průměr vrtule se chápe průměr kružnice, který opisuje koncový bod při rotaci. obr. 2.1.

Stoupání je axiální vzdálenost stejnohlých bodů vrtule, které urazí za jednu otáčku. obr. 2.2



Obr. 2.1: Průměr vrtule

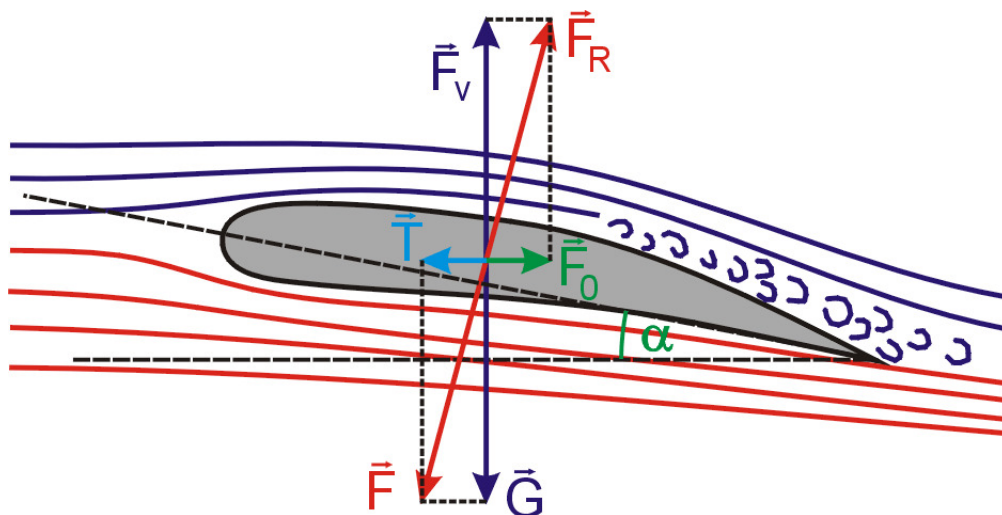


Obr. 2.2: Stoupání. Převzato z [2]

2.1.3 Síly na vrtuli

Svým tvarem vrtule při otáčení mají vlastnost křídla letadla. Na horní ploše listu obtéká vzduch rychleji, a to vede k nižšímu tlaku, než je na spodní straně listu, což vytváří odpor a aerodynamickou vztlakovou sílu F_v . [3].

Aby letoun byl schopný pohybu, pak zjednodušeně lze říci, že síly T a F_v musí překonat síly, které jeho pohyb zpomalují. Jsou to síly tíhová F_G a síla odporová F_o . Hnací sílu lze vyvodit reakcí vzdušného proudu právě vrtulí. Využitím energie motoru se roztáčí vrtule, která se „opírá“ o vzduch, čímž generuje hnací sílu tah.



Obr. 2.3: Průměr vrtule. Převzato z [4]

2.2 Tah vrtule s pevným úhlem náběhové hrany

Tah vrtule je proměnný s hustotou prostředí ρ , nadmořskou výškou a rychlostí v_0 , kterou se vrtule v prostředí pohybuje. Tuto závislost popsal Theodore Theodorsen. [5]

$$T = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \left(v_0 + \frac{\Delta v}{2} \right) \cdot \rho \cdot \Delta v \quad (1)$$

Vstupující rychlost média je označena v_0 , ρ představuje hustotu média a D je průměr vrtule. Z rovnice je patrné, že se tah T bude zvyšovat se zvětšujícím se průměrem D , či pokud se zvýší hustota média ρ . Zrychlení vrtule závisí na rychlosti v_0 , přičemž není zcela pravdou, že zvýšením rychlosti v dojde ke zvýšení tahu. Pro vrtuli s pevným průměrem, otáčející se danými otáčkami, pracující v určitém médiu, je tah závislý pouze na přírůstku rychlosti Δv [6]

Následující matematické vztahy stručně popisují možnosti generovaného tahu [6].

Nejprve je potřeba si zavést výkon vrtule, což lze definovat jako práci za jednotku času. Použitím tahu T a rychlosti v_0 lze vyjádřit „potřebný výkon“ jako:

$$P_p = T \cdot v_0 \quad (2)$$

Dále je nutné zavést obecně účinnost vrtule η , která je definována jako poměr potřebného výkonu P_p ku výkonu motoru.

$$\eta = \frac{P_p}{P_{motor}} = \frac{T \cdot v_0}{P_{motor}} \quad (3)$$

Avšak tato rovnice není použitelná, pokud bude rychlost v_0 nulová. Což je ovšem pro visení letounu s kolmým startem běžné. Pokud zanedbáme ztráty vířením vzduchu za vrtulí,

můžeme vyjádřit výkon vrtule jako:

$$P_{motor} = T \cdot \left(v_0 + \frac{\Delta v}{2} \right) \quad (4)$$

Poté lze z rovnice (4) určit výraz:

$$A = \frac{T \cdot (v_0 + v_1)}{P_{motor}} \quad (5)$$

kde z principu fungování vrtule je:

$$v_1 = \frac{\Delta v}{2} \quad (6)$$

Pro vyřešení A se vychází z analogie $F = m \cdot a$

$$T = \rho \cdot S \cdot v_0 \cdot \Delta v \quad (7)$$

kde S představuje plochu, kterou pokryjí listy vrtule. Po několika úpravách dostaneme vztah, který vyjadřuje tah i při nulové rychlosti v_0

$$T = \left(\frac{A \cdot P_{motor}}{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\rho \cdot S}}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

Tento předvedený postup podle [6] nevede k přesnému výsledku, protože zanedbává důležité parametry, jakými jsou profil vrtulového listu nebo vlastnosti pohonu, elektromotoru. Právě proto je z praktického hlediska výhodnější měřit veličiny jako jsou tah, otáčky, proud či napětí experimentálně, což je hlavní motivací této práce.

3 Popis měřených veličin

Pro měření výkonových parametrů vrtule byla zvolena statická metoda, u níž je základním předpokladem nulová rychlost vzduchu nabíhajícího na vrtuli. Při této metodě je motor pevně uchycen k nehybnému rámu. V technické praxi existuje několik způsobů měření jak otáček, tak tahu generovaného vrtulí, v následující kapitole budou některé způsoby měření popsány podrobněji na základě čehož vyplyne, který způsob je pro potřeby této práce nejvíce výhodný.

3.1 Měřicí snímače

Jak již bylo zmíněno, bude probíhat měření pouze otáček vrtule a generovaného tahu, proto se následující kapitola bude zabývat právě těmito měřeními.

3.1.1 Měření otáček

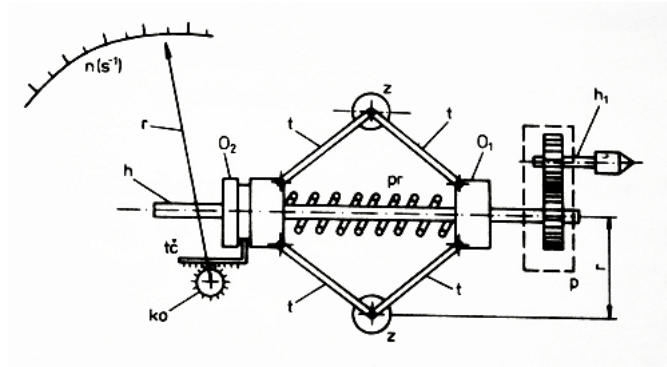
Otáčky se měří na mnoha strojních součástech, což z měření dělá nedílnou součást velkého množství strojních zařízení. Díky tomu lze některé procesy optimalizovat, či jinak zdokonalovat. Ve strojírenství lze najít snímače otáček mnoha druhů, kde každý druh má své specifikace, podle kterých se určuje vhodné použití. Základní technické parametry snímačů pro měření otáček jsou přesnost snímání, rozsah rychlostí, rychlost snímání a dosah. Otáčkoměry lze rozdělit na snímače otáček kontaktní, které lze dále rozdělit na mechanické a elektromechanické snímače, a na bezkontaktní snímače otáček, jež je možné rozdělit na magnetické, indukční, optoelektrické a optické snímače.

3.1.1.1 Kontaktní snímače otáček

Tyto snímače jsou mechanicky propojeny s měřenou součástí. Je to jedna z prvních metod měření, či regulace otáček zařízení. Snímají rotační pohyb buď v ose, nebo častěji pomocí obvodové rychlosti přiložením snímacího kolečka k obvodu měřené součásti. U snímacích koleček je potřeba, aby se neprokluzovalo, z toho důvodu jsou zhotoveny s gumovým povrchem přizpůsobeným pro jednotlivé měření. Pro měření rotačních součástí o malém poloměru se jedná o výhodnější, ne-li jediný způsob měření otáček.

Mechanický otáčkoměr

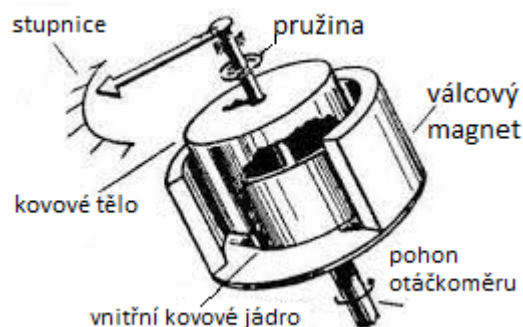
Nejběžnější je odstředivý otáčkoměr, který si lze představit jako Wattův odstředivý regulátor. Skládá se ze dvou závaží, která rotují kolem osy měřeného předmětu. Čím rychleji se tato závaží otáčejí kolem svislé osy, tím dále vlivem odstředivé síly budou od osy otáčení. Odstředivá síla je úměrná okamžité rychlosti, výchylka je vzhledem k setrvačné hmotě systému úměrná střední hmotnosti.[7]



Obr. 3.1: Odstředivý regulátor/otáčkoměr. Převzato z [8]

Magnetický otáčkoměr

Jednoduché magnetické otáčkoměry se používají pro kontrolní měření otáček, a také u automobilů. Otočný magnet je hřídelí spojený s rotující součástí. Okolo magnetu je kovový hrníček, který je druhou hřídelí spojen s ručičkou ukazující na stupnici. Mezi magnetem a hrníčkem je vůle. Jak magnet rotuje, tak se v hrníčku indukuje elektromotorické napětí a vzniká elektrický proud, který vytváří vlastní magnetické pole. To se snaží ustálit s magnetickým polem.[7]

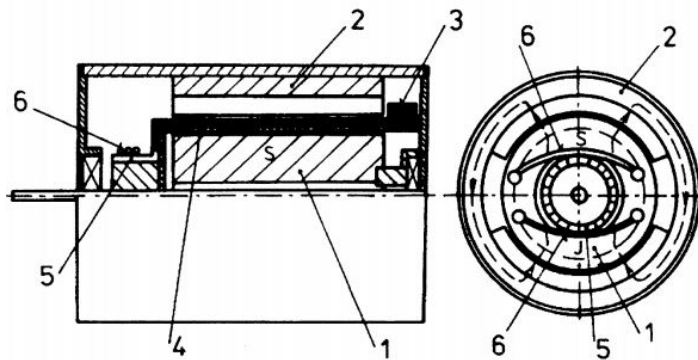


Obr. 3.2: Magnetický otáčkoměr. Převzato z [9]

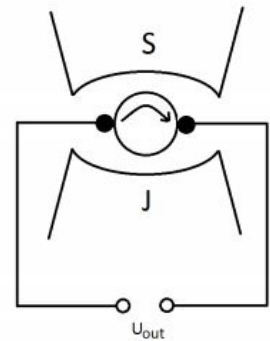
Elektromechanický snímač

Elektromechanický snímač lze jinými slovy nazvat jako tachodynamo. Jedná se o stejnosměrný stroj s konstrukcí totožnou se stejnosměrným motorem. Jeho částmi jsou

rotor, obsahující vinutí s komutátorem, a stator, na němž jsou permanentními magnety. Z konstrukce obr. 3.3 je patrná vzduchová mezera, ve které vzniká magnetická indukce. Ze sběračů komutátoru lze pak odebrat výstupní napětí, jehož hodnota se lineárně mění s otáčkami rotoru. Toho je možné využít při měření otáček. Optimalizací konstrukce lze dosáhnout velké citlivosti zařízení. Tachodynamy tak patří mezi nejpoužívanější analogové snímače otáček. [7]



Obr. 3.3: Konstrukce tachodynamy. Převzato z [7]



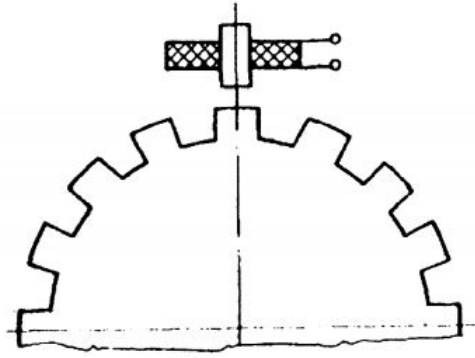
Obr. 3.4: Schéma tachodynamy. Převzato z [10]

3.1.1.2 Bezkontaktní měření otáček

Bezkontaktní snímače otáček lze výhodně aplikovat tam, kde není možný přímý dotyk s měřenou rotující součástí. Absence dotyku přispívá k vyšší míře jednoduchosti, rychlosti a praktičnosti měření. Neznamena to však, že tato metoda je ve všech případech nejvhodnějším řešením. Jsou určité situace, kdy je nutné použít měření otáček kontaktní, například u měření obvodové rychlosti hřídele s malým průměrem. Kontaktní a bezkontaktní měření se vzájemně nenahrazují, nýbrž doplňují. Při reálné aplikaci jsou vhodné kombinované otáčkoměry, které měří mechanicky a zároveň bezdotykově opticky. [11]

Indukční snímač otáček

Indukční snímač vychází z indukčního zákona, tedy že v cívce vystavené proměnnému magnetickému poli se indukuje střídavé napětí. Toto indukované napětí je úměrné časové změně magnetického toku. Indukční snímač je rozdělen na dvě hlavní části. První část je umístěna mimo sledovanou součást a obsahuje cívku, kde se měří změna indukovaného napětí. Druhou částí je permanentní magnet uchycený na měřené součásti. Důležité je, aby magnet byl v minimální vzdálenosti od měřicí cívky. Ke změně magnetického toku dojde přiblížením permanentního magnetu. Dále dojde k indukování střídavého napětí a tato změna je přímo úměrná otáčkám měřené součásti. V praxi lze využít konstrukčního řešení, kdy se k změně magnetického toku využívá ozubené kolo z feromagnetického materiálu. Při přiblížení zubu k snímači, cívce, se přes zub uzavírají magnetické siločáry. Při oddálení zubu se před snímačem vytvoří velká vzduchová mezera, ve které je znemožněno uzavření siločar. [7], [12]



Obr. 3.5: Indukční snímač. Převzato z [7]

Kapacitní snímač otáček

Tyto snímače fungují na principu změny permitivity prostředí. Součástí snímače jsou dvě nebo tři elektrody. Minimálně jedna musí být pohyblivá. Vniknutím předmětu, jak vodivého, tak nevodivého, reagují snímače na změnu mezi elektrodami. Výhodou oproti indukčním snímačům je větší spínací vzdálenost. Nevýhodou těchto snímačů je vliv vlhkosti měřené plochy, které může vést k nechtěnému sepnutí. [13]

Magnetoelektrický otáčkoměr

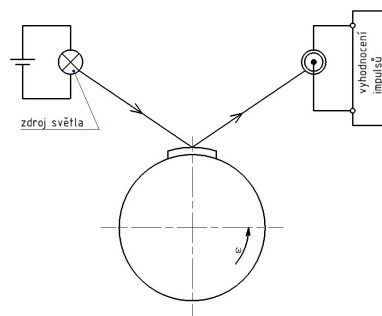
Magnetoelektrický otáčkoměr (Hallův) je aktivní magnetický snímač využívající Hallova jevu. Hallův jev se uplatňuje v polovodiči, kterým protéká proud za přítomnosti magnetického pole. Když magnetické pole má kolmou složku na rychlost nosič náboje, pak na ně působí Lorentzova síla a na bočních stěnách polovodiče se objeví Hallovo napětí [14]. Pokud by se na indukčním otáčkoměru nahradily zuby snímacího kotouče permanentními magnety, pak by jako snímač šla použít Hallova sonda s dvoustavovým výstupem. Zpracování impulsů je stejné jako u indukčního snímače. [7]

Stroboskopické měření otáček

Měřicím přístrojem je stroboskop. Jeho funkcí je vytvářet stroboskopickou lampou záblesky libovolného kmitočtu. Na rotující součást se značkou jsou vysílány záblesky z lampy dokud se jejich frekvence nevyrovná. V ten moment dochází ke stroboskopickému jevu, kdy se lidskému oku zdá rotující předmět nehybný. Pakliže kmitočet záblesků je vyšší než kmitočet rotující součásti, tak se bude zdát, že značka předbíhá ve směru otáčení. Naopak pokud bude kmitočet rotující součásti vyšší nežli kmitočet záblesků, pak se bude značka jevit jako pohybující se proti směru otáčení. Dále je potřeba si uvědomit, že ke stroboskopickému jevu bude docházet s každým násobkem frekvence. Jedná se o velmi přesnou metodu měření otáček. [11]

Fototachometry

Tyto otáčkoměry vysílají trvalý nepřerušovaný světelný paprsek. Paprsek je buď ve viditelném spektru, nebo v infračerveném světelném spektru. Pro měření je nezbytné na měřenou součást umístit jeden, či více reflexních znaků, na které tento paprsek dopadá. Odrazový materiál vždy při otáčce měřené součásti odrazí paprsek zpět do snímače a tam je snímán optikou. Jako přijímač se obvykle používá fototranzistor či fotodioda. Světelné impulsy jsou následně převedeny na impulsy elektrické, které čítá čítač řízený krystalem. Následně je vyhodnocena frekvence otáčení. Měření jako takové pak není závislé na lidském faktoru, na rozdíl od stroboskopu, čímž má značný měřicí rozsah a měření je jednoznačné a přesné [7].



Obr. 3.6: Schema fototachomer

Při měření s jedním odrazovým znakem, jak je naznačeno na obr. 3.6, není známá informace o smyslu otáčení. Pro zjištění by bylo nutné připojit ještě jeden snímač pootočený o úhel jiný než 180°. Pokud by na sledovaný předmět bylo umístěno po jeho obvodu více reflexních značek, pak by bylo dosaženo větší citlivosti na změnu rychlosti.

3.1.2 Měření síly

Síla, jakožto fyzikální veličina, je měřena nepřímou. Vlivem působení síly na snímač vznikají deformace podle Hookova zákona (9). Ty jsou měřeny nejčastěji zařízeními zvanými tenzometry. Obecně můžeme snímače sil rozdělit na dvě hlavní kategorie.

1. měřením deformací pružného členu, vyhodnocením ohybu, tahu, tlaku smyku či krutu.
2. sledováním změny parametrů vlivem deformace, změny náboje, či magnetických vlastností. [7]

3.1.2.1 Odporové tenzometry

Odporové tenzometry pracují se změnou ohmického odporu, jsou-li vystaveny mechanické deformaci. Vyrábí se ve dvou základních provedeních, a to jako kovové a polovodičové. [15]

Kovové tenzometry

Principem kovových tenzometrů je změna ohmického odporu způsobená pružnou deformací tenkého drátku v platnosti Hookova zákona. Změna odporu je dle vztahu (9). Tato změna velikostí odporu lze zaznamenat a analyzovat. Pro snazší přepočty odporu na deformace a popis daného tenzometru se zavedla konstanta K , což je takzvaná deformační citlivost. Ta se liší podle materiálu ze kterého je tenzometr vyroben. Z rovnice (11) vyplývá, že u kovových tenzometrů je změna odporu na deformaci lineární. Vyrábějí se ze slitin kovů jako je měď, mangan, nikl, chrom, popřípadě z čisté platiny či z čistého niklu.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta l}{l} \quad (9)$$

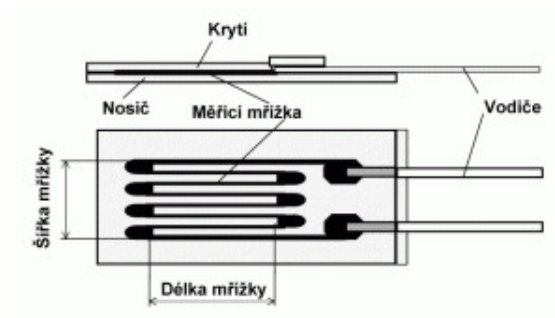
Kde ε značí poměrnou deformaci, E modul pružnosti v tahu, l původní délku objektu, Δl prodloužení objektu a σ napětí v tahu.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (10)$$

Kde R označuje elektrický odpor, ρ objemovou hustotu drátku, l délku vodiče a A plochu příčného řezu drátku.

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} = K \cdot \varepsilon \quad (11)$$

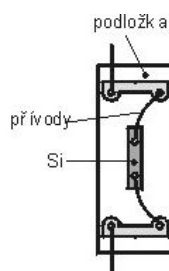
Kde K značí deformační citlivost tenzometru.



Obr. 3.7: Fóliový tenzometr. Převzato z [16]

Polovodičové tenzometry

Tyto tenzometry fungují na stejném principu jako ty kovové, avšak závislost elektrického odporu na deformacích není lineární. Odpor je funkcí deformace $R = f(\varepsilon)$. Tato závislost je pro každý tenzometr jedinečná a uvádí ji výrobce. Oproti kovovým mají vyšší citlivost. Vyráběny jsou z křemíku ve tvaru tyčinek. Krystalograficky jsou vhodně orientovány podél jejich měřící osy. [15]



Obr. 3.8: Polovodičový tenzometr. Převzato z [17]

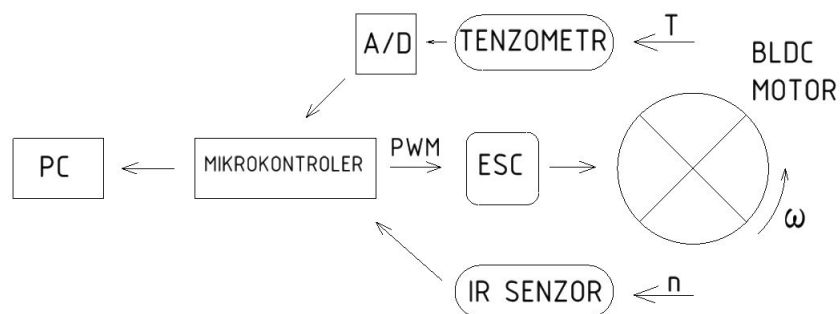
Aby bylo tenzometr vůbec možné použít k měření, je velmi důležité umístění. Záleží na tom, zdali je znám směr hlavního napětí. Pokud by se jednalo o jednoosou deformaci a byl by znám i směr hlavního napětí, pak by bylo možné použít jednoosého tenzometru. Pakliže by se měly měřit víceosé deformace, pak by bylo zapotřebí užití tenzometrického kříže. Pokud by nebylo známé hlavní napětí, pak by bylo potřeba tenzometrické růžice. Následně síly dle rozšířeného Hookova zákona dopočítat.

Problémem při měření napětí pomocí tenzometru je tepelná roztažnost materiálu. Tu je nutné kompenzovat. Kompenzovat je možné pomocí samokompenzačního tenzometru, který má na stejné podložce v sérii s měřicím vinutím zapojené vinutí s opačnou teplotní charakteristikou [7]. Avšak nejčastěji se pro kompenzaci teploty používá tzv. můsteků. Jsou to 1/4 můstek, 1/2 můstek a plný můstek. Rozdíl mezi jednotlivými můstky je v zapojení. U každého je zapojený jiný počet tenzometrů. Vedle nechtěné teplotní roztažnosti, která může znehodnocovat výsledky měření, také nechtěně ovlivňuje výsledek vlhkost, elektromagnetické pole a hystereze.

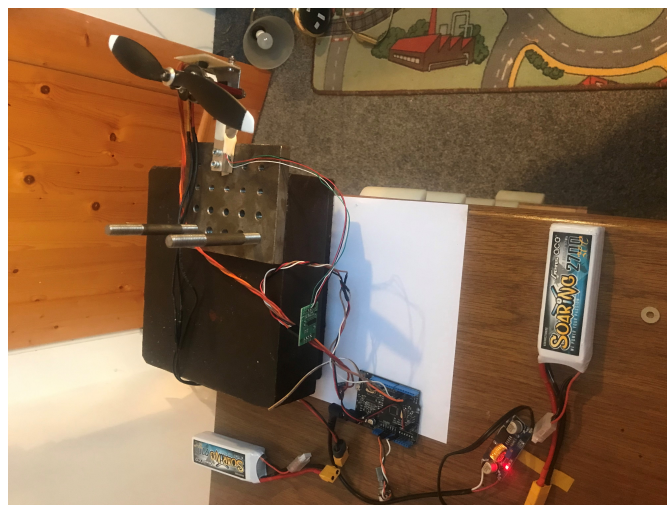
Pro specifické účely se využívají tzv. tenzometrické snímače. Tyto snímače mají svůj speciální tvar pro danou aplikaci. Jsou v nich již zabudovány kompenzační tenzometry a obvykle obsahují plný můstek.

3.2 Zpracování dat

Zpracování a sběr dat, jinými slovy DAQ je proces převodu analogového signálu na digitální. Převádí měřené fyzikální jevy do číselných hodnot. Pro představu jsou takto zpracovávána data ze světa kolem nás, jako jsou teplota, napětí, proud, otáčky či hmotnost. DAQ se skládá ze tří základních komponent. Jsou jimi měřící senzory, které převádí měřené fyzikální jevy na elektrické signály. Druhým komponentem je zařízení pro úpravu signálů. Úprava signálů je mnohdy nezbytná, jelikož signály mohou obsahovat různé druhy nečistot a rušení. Výstupem jsou takové signály, které svým formátem lze snadno a přesně měřit. Zde dochází k zesílení signálu, převodu A/D a D/A (Analog/Digital). Vedle úpravy a konverze dat tato zařízení dále obsahují sběrnice pro přenos dat do počítače, například přes USB. Třetí částí je počítačový software schopný tato data analyzovat, shromažďovat a prezentovat. [18]



Obr. 3.9: Blokový diagram připojených součástí



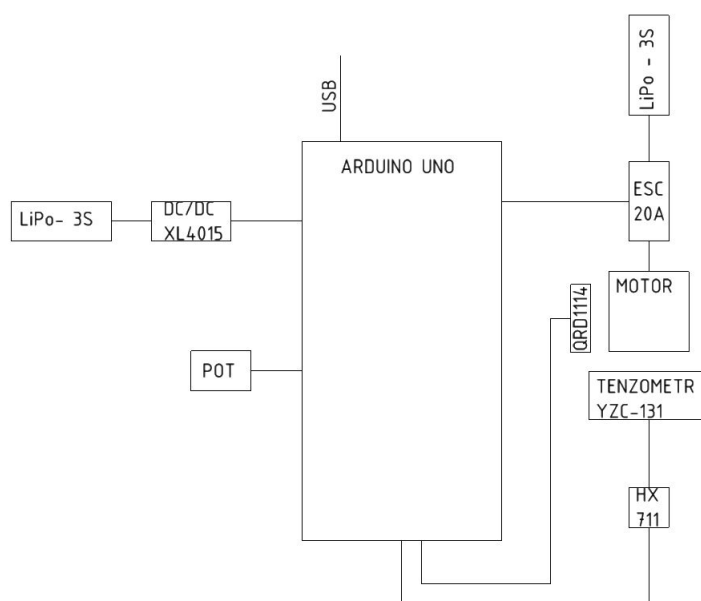
Obr. 3.10: Reálné zapojení

4 Měřicí zařízení

Jak bylo zmíněno na začátku této práce, cílem je návrh a realizace experimentálního měřicího zařízení. Experimentální z toho důvodu, že matematický popis problematiky neobsahuje všechny možné okolní vlivy, či například nevhodnou kombinaci motor/vrtule, kdy by motor nebyl schopný roztočit vrtule na teoreticky možné otáčky. Tato část obsahuje detailní popis použitých komponent a jejich výsledné zapojení do měření, sběru, či vyhodnocení dat. Kláden byl důraz na jednoduchost a malou velikost a univerzálnost tohoto zařízení.

4.1 Návrh řešení experimentálního zařízení

Statické měření tahu je spíše orientačního charakteru, které poví uživateli hrubší odhad vhodnosti kombinace daného motoru a vrtule pro daný účel. Není potřeba nikterak aerodynamického tunelu. Schematická sestava použitých součástí je k vidění na obrázku 4.1 a jednotlivé komponenty jsou popsány níže.



Obr. 4.1: Schema zapojení

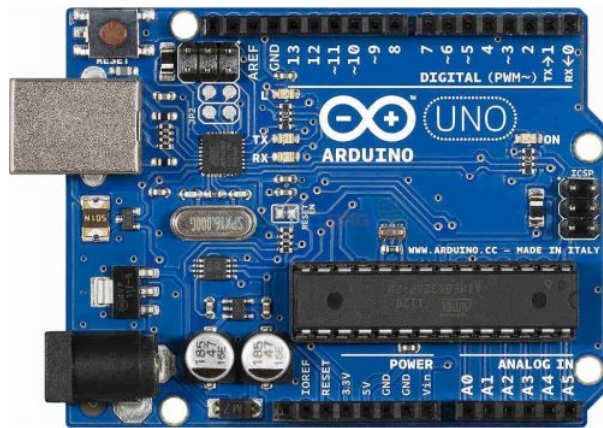
4.1.1 Základní specifikace součástek

Tato podkapitola je zaměřena na popis použitých komponent, jak těch měřených, tak měřících. Je potřeba zdůraznit, že volba padla na takové elektronické součástky a měřící senzory, které je možné použít i mimo laboratorní podmínky. Při jejich výběru hrála důležitou roli možnost instalace v domácích podmínkách za využití jednoduchého náčiní.

4.1.1.1 Arduino

K řízení tohoto projektu bylo využito jednoduché počítačové desky Arduino Uno. Dala by se popsat jako Open-Hardware platforma k jednoduchému vývoji a návrhu elektronicky programovatelných zařízení. Právě díky jeho jednoduchosti nejsou potřeba k jeho používání hlubší znalosti principů elektroniky. Aby Arduino deska pracovala jak potřebujeme, je třeba vytvořit program pro mikrontrolér. K tomu se využívá programovací jazyk Arduino a Arduino software.

Řídící jednotkou Arduina je mikrokontrolér ATmega328. Tato deska má 14 digitálních vstupně/výstupních pinů z čehož jich 6 ze použít jako výstupy PWM (4.1.1.6), dalších 6 pinů slouží pro analogové vstupy. Lze ho napájet přes USB, adaptérem, nebo z akumulátoru. Deska pracuje s napětím v rozsahu 6-20V.



Obr. 4.2: Arduino uno. Převzato z [19]

4.1.1.2 Snímač otáček

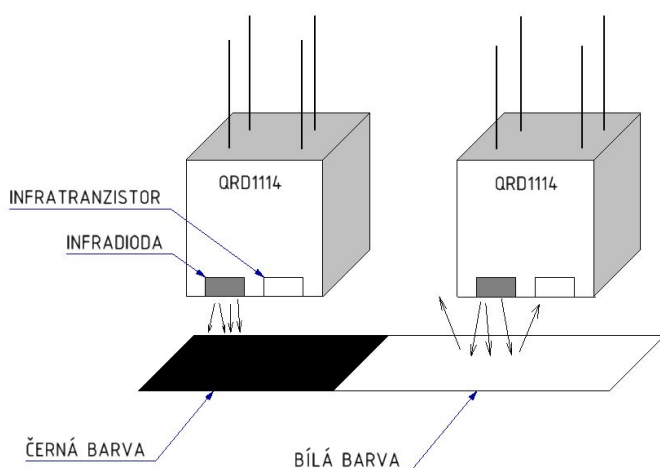
Pro snímání otáček vrtule byl použit reflexní IR senzor QRD1114, který pracuje v infračervené oblasti spektra. Senzor je složen z IR-LED diody, ta emituje světlo pro tranzistorový detektor. Z toho důvodu lze říci, že se jedná o aktivní senzor, který zahrnuje zdroj světla. Přijímačem je vlastně báze transmittoru. Ten sepne právě pokud na bázi tranzistoru dopadá světlo.

Pro měření otáček pomocí tohoto senzoru byly na rotor použitého BLDC motoru umístěny 2 reflexní pásy. Od nich se infračervený paprsek odráží, zatímco černé tělo rotoru paprsek pohlcuje. Podle množství světelného toku, které se odráží do snímacího tranzistoru je možné vyhodnocení. Pokud se nachází nad černou plochou, tak do báze tranzistoru nedopadá infračervené světlo a stav je vyhodnocen jako $\log 1$. Pokud je nad reflexní páskou bílé barvy, pak na bázi dopadá světlo a stav je vyhodnocen jako $\log 0$. Tyto stavy nakonec

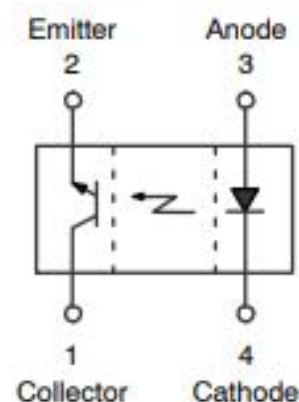
vyhodnocuje mikrokontrolér.

Senzor byl umístěn do vzdálenosti 2 mm od odrazek. Jeho snímací frekvence je kolem 20 Hz. Pokusné měření voltmetrem při zapojování tohoto snímače ukázalo, že výstupní napětí je 4,6 V, pokud snímač je namířen na černou plochu. Pokud je snímač namířen na reflexní pásku, pak výstupní napětí činí 0,26 V.

Kompletní specifikace je uvedena v příloze.



Obr. 4.3: Princip rozpoznání barev

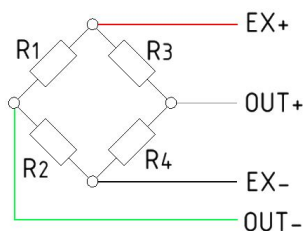


Obr. 4.4: Schéma senzoru QRD114. Převzato z [20]

4.1.1.3 Tenzometr

Použitý tenzometr nese označení YZC-131. Jeho maximální zatížení činí 3 kg, což pro účely této práce bylo dostačující. Použitý tenzometr je zapojen pomocí Wheatstoneova můstku. Principem takového můstku je porovnání známých a neznámých odporů. Celkový počet rezistorů je 4, jak je vidět na obrázku 4.5. Na jednu úhlopříčku je připojen zdroj elektrického napětí a na druhé se provádí měření. Změna odporu v tenzometru způsobuje rozvážení můstku, čímž dochází ke změně měřeného napětí.

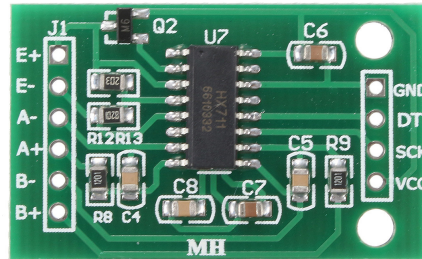
Při prvním zapojení bylo potřeba nalézt kalibrační faktor, jenž je zapsán v programu uvedeném v příloze, aby výstupní hodnoty byly odpovídající skutečnosti. Pro konverzi dat A/D a kalibraci senzoru je potřeba převodník 4.1.1.4.



Obr. 4.5: Wheatstonův můstek

4.1.1.4 Převodník HX711

Je 24bitový A/D převodník primárně určený pro měření hmotnosti. Převodník může být napájen napětím v rozsahu 2,6 - 5,5 V. Převodník nepotřebuje žádný další externí zdroj napětí, jelikož může být napájen přímo z regulátoru na čipu. V momentě, kdy je zajištěno napájení, může převodník převádět spojitý analogový signál z deformačního členu na impulzy, které pak vývojová deska umí určit. [21]



Obr. 4.6: HX711. Převzato z [22]

4.1.1.5 Motor

Pro měření byl vybrán klasický BLDC motor. Takové motory se pro pohon vrtulí UAV používají výhradně. Obecně jsou tyto motory složeny z rotujícího pláště s permanentními magnety a z statoru s vinutím. Na rozdíl od běžných stejnosměrných motorů s mechanickými komutátory a kartáči, tyto motory používají elektronickou komutaci. Komutátor je nahrazen takovým elektronickým obvodem, jež neustále přepíná napětí mezi fázemi, čímž udržuje motor v chodu. Eliminací potřeby komutátoru je motor nenáročný na údržbu mechanických částí a jeho životnost je pak omezena pouze trvanlivostí ložisek. Jeho parametry jsou k vidění v příloze.

4.1.1.6 Regulátor motoru

Jinými slovy ESC. Jde o elektronickou součástku pro regulaci otáček motoru. Na vstupu do regulátoru je přiváděn stejnosměrný proud z akumulátoru. Na výstupu je trojice kabelů, které vedou do motoru třífázový proud. Regulátor přijímá PWM signál vysílaný z řídicí jednotky, v našem případě z Arduina, na jehož základě reguluje otáčky motoru.

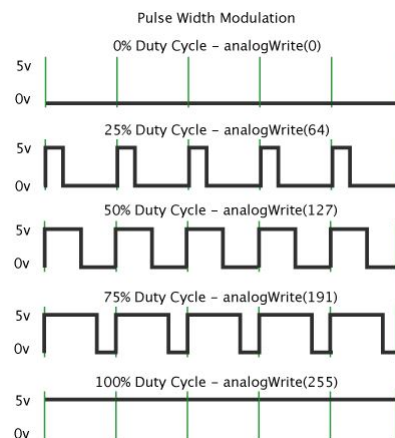


Obr. 4.7: Regulátor otáček motoru. Převzato z [23]

Použitý regulátor má označení AfroSLim ESC 20A.

PWM

Pod zkratkou PWM se skrývá anglický termín pulse width modulation, česky pulzně šířková modulace. Principem této metody ovládání regulátoru je řízení šířky pulzu. Šířku pulzu si lze představit jako dobu, po kterou je obvod připojen k napětí zdroje. Princip ovládání šířky pulzu spočívá ve spínání a rozepínání napájecího napětí. Při použití našeho mikrokontroléru Arduino Uno je PWM frekvence 500 Hz. Šířkou pulzu lze lineárně nastavovat otáčky motoru. Příklad výstupního PWM je na obrázku 4.8. Regulátor vnímá pulz dlouhý 1 ms jako pokyn k zastavení motoru, zatímco šířka pulzu 2 ms znamená povel pro maximální otáčky. Výhodou pulzně šířkové modulace jsou její nízké ztráty. [24]



Obr. 4.8: Pulzně šířková modulace. Převzato z [25]

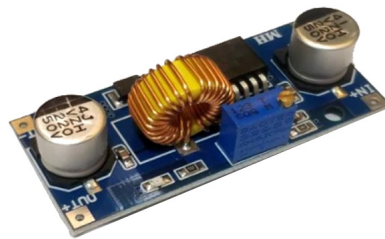
4.1.1.7 Měřené vrtule

Pro experiment byly vybrány tři vrtule lišící se průměrem a stoupáním šroubovice. První měřená vrtule nese označení 8×3,8, což značí, že vrtule má největší průměr 8 palců a stoupání šroubovice 3,8 palce. Další dvě vrtule mají shodný průměr, avšak liší se stoupáním šroubovice a počtem listů. Nesou označení 5×4,6 a 5×4,8×3. Výběr těchto vrtulí má ukázat, na jakém parametru z geometrie vrtule záleží nejvíce při generování tahu. Všechny vrtule jsou ze stejného materiálu, z nylonu. Rozdíl v jejich hmotnosti je nepatrný, liší se pouze v řádu několika gramů.

4.1.1.8 DC/DC měnič

Pro snížení napětí z tříčlánkového akumulátoru bylo využito DC/DC měniče s označením XL4015.

Obecně DC/DC měniče umožňují měnit stejnosměrné napětí. Využití v této práci našlo při změně stejnosměrného napětí zdroje z 11,1 V na 5 V. Použitý DC/DC měnič leží v rozsahu povolených hodnot napětí udávaných výrobcem, jelikož napětí zdroje činí 11,1 V, přičemž samotný měnič snese maximální vstupní napětí 36 V. Změna na 5,5 V taktéž leží v povoleném rozsahu, jelikož nejmenší možné výstupní napětí činí 1,25 V.

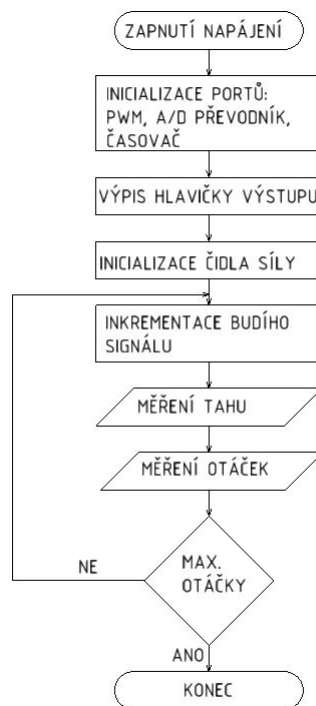


Obr. 4.9: DC/DC měnič. Převzato z [26]

4.1.1.9 Funkce programu

Samotný program byl napsán ve vývojovém prostředí Arduino Software (IDE).

Pro fungování samotného programu bylo využito několika volně dostupných knihoven. Jednalo se o knihovny pro regulátor motoru, převodníku HX711. Při prvním spuštění bylo potřeba experimentálně provést kalibraci tenzometru pro získání konstanty příslušného senzoru. Po získání této konstanty ji bylo možné vepsat do kódu pro měření tahu vrtule. Vedle kalibrace tenzometru bylo provedeno několik pokusů fungování potenciometru, aby bylo možné využít jeho plný rozsah s co největší plynulostí. Součástí programu je i kód, který umožňuje číst otáčky rotoru/vrtule. V němž bylo využito funkce interrupt, bez níž snímané otáčky neodpovídaly realitě.

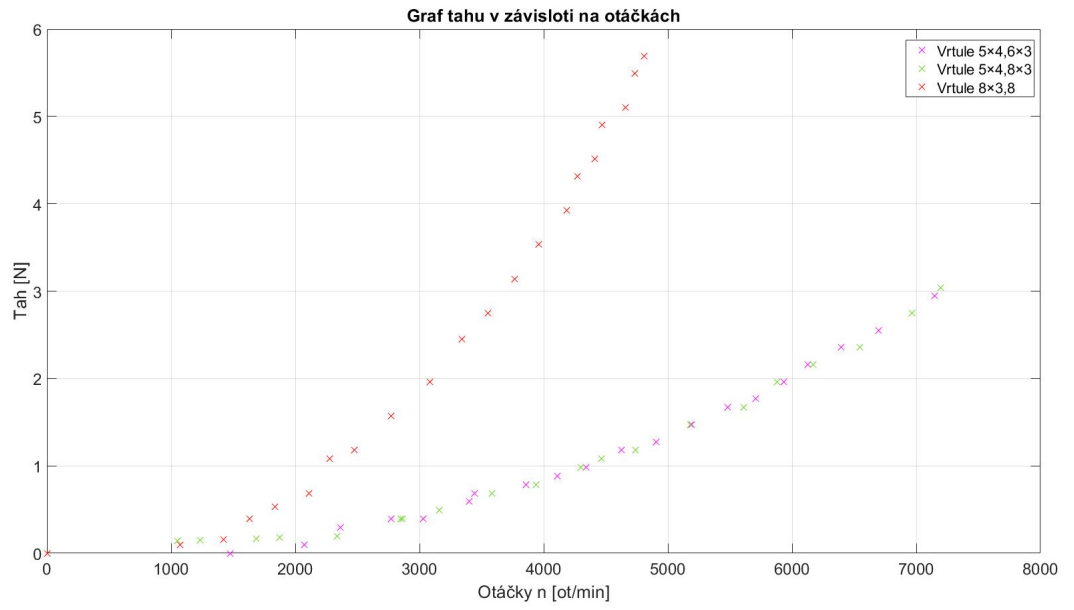


Obr. 4.10: Zjednodušený vývojový diagram

5 Měření a závěr

Po zapojení a kalibraci jednotlivých součástí došlo na výsledné měření. Pro plynulou regulaci otáček bylo využito potenciometru, který ovládala ruka obsluhy. Po zapojení zdroje pro napájení Arduina a zdroje pro napájení motoru se postupným otáčením potenciometru plynule zvyšovaly otáčky. Při tom probíhalo snímání měřených veličin. Avšak jak experiment ukázal, snímkovací frekvence A/D převodníku HX711 byla pouze 2,5 Hz.

Ze získaných dat je patrné, že generovaný tah je úměrný průměru vrtule. Počet listů, či stoupání nehrálo podstatnou roli, jak je vidět na grafu 5.1. Měření odhalilo nesprávnou kombinaci motoru a vrtule, jelikož u vrtule Vrtule 8×3,8 bylo možné motor roztočit pouze na nižší otáčky, při nichž se motor začal zahřívat a pálit. U vrtulí s menším průměrem tento problém nenastal. Experiment ukázal, že je použitelný pro měření menších vrtulí. Takovéto experimentální zařízení v této fázi stavby dokáže uživateli pomoci zvolit správný typ vrtule při stavbě UAV, avšak do budoucna by bylo vhodné implementovat zařízení pro měření okamžité hodnoty proudu, která protéká vodičem a zároveň zařízení pro měření zbývajících kapacity akumulátoru, na základě čeho by se dal odhadnout přibližný čas letu při zvolené konfiguraci. Cílem práce bylo navržení, uvedení do provozu a naměření dat experimentálním zařízením, což bylo splněno.



Obr. 5.1: Experimentální tahu v závislosti na otáčkách

Seznam použité literatury

1. J, LEISHMAN G. *Principles of helicopter aerodynamics*. Cambridge university press, 2000. ISBN 0-5216606-0-2. Dostupné také z: www.google.com/books.
2. [Online] [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://dronomania.ru/faq/dron-svoimi-rukami-urok-3-silovaya-ustanovka.html>.
3. CURTISS-WRIGHT-CORPORATION. *Propeller Theory*. Curtiss-Wright corporation, Propeller division, 1944. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=NnU0AAAAIAAJ>.
4. *Vztlak křídla* [online] [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_6.
5. THEODORSEN, Theodore; REGIER, Arthur. Experiments on drag of revolving disks, cylinders, and streamline rods at high speeds. *Nat. Advisory Comm. Aeronaut., Report*. 1944, č. 793, s. 367.
6. GEBAUER, Jan. *Optimalizace poměru tah-příkon vrtulové pohonné jednotky* [online]. 2017 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/u2g15j/>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní Ostrava. Vedoucí práce Renata WAGNEROVÁ.
7. JENČÍK, Josef; VOLF, Jaromír. *Technická měření*. Praha: ČVUT, 2003. Dotisk 2, ISBN 80-01-02138-6.
8. *Odstředivý regulátor/otáčkoměr* [online] [cit. 2021-05-25]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/historicke-snimace-jde-i-bez-elektriny-a-integrovaných-obvodu>.
9. *Magnetický otáčkoměr* [online] [cit. 2021-05-26]. Dostupné z: <http://www.palba.cz/viewtopic.php?t=3344>.
10. *Tachodynamo schéma* [online] [cit. 2021-05-27]. Dostupné z: <http://www.snimace.xf.cz>.
11. HUŠEK, M. *Měření otáček* [online] [cit. 2021-05-27]. Dostupné z: <https://www.qtest.cz/mereni-otacek>.
12. MARTÍNEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-114-4.
13. VYLEGALA, Pavel. *Senzory a snímače. sse-najizdarne* [online] [cit. 2021-05-28]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/u_text_ss.pdf.
14. *Hallův jev* [online] [cit. 2021-05-28]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=1172>.

15. *SENZORY SÍLY, TLAKU A HMOTNOSTI* [online] [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: https://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-mn-s-12_senzory_sily_tlaku_hmotnosti.pdf.
16. *Foliový tenzometr* [online] [cit. 2021-06-02]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>.
17. *Měření neelických veličin* [online]. Praha: ZČU v Plzni - Fakulta strojní [cit. 2021-06-05]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvvyuka/Data/silaazareni/tenzo.gif>.
18. *Data Acquisition* [online] [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/data-acquisition.html>.
19. *Arduino uno* [online] [cit. 2021-06-13]. Dostupné z: <https://blog.laskarduino.cz/nelze-nahrat-program-do-arduino-uno-r3-precizni-klon/>.
20. *Reflective Object Sensor* [online]. Dostupné také z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/qrd1114-d.pdf>.
21. LUBOŠ, M. *Reflective Object Sensor* [online] [cit. 2021-06-12]. Dostupné z: <https://navody.drateg.cz/navody-k-produktum/ad-prevodnik-24-bit-s-2-kanaly.html>.
22. *HX711 ADC* [online] [cit. 2021-08-20]. Dostupné z: <https://community.hiveeyes.org/t/hx711-adc/1711>.
23. *Afro 20A Slim Multi-rotor ESC (SimonK Firmware)* [online] [cit. 2021-08-20]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/afro-20a-slim-multi-rotor-esc-simonk-firmware.html.
24. *Pulse Width Modulation* [online] [cit. 2021-06-15]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/pulse-width-modulation.html>.
25. *PWM* [online] [cit. 2021-06-17]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Foundations/PWM>.
26. *XL4015 DC-DC Step Down Module* [online] [cit. 2021-08-20]. Dostupné z: <https://components101.com/modules/xl4015-dc-dc-converter-module>.

Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 2.1	Průměr vrtule	9
Obrázek 2.2	Stoupání. Převzato z [2]	9
Obrázek 2.3	Průměr vrtule. Převzato z [4]	10
Obrázek 3.1	Odstředivý regulátor/otáčkoměr. Převzato z [8]	13
Obrázek 3.2	Magnetický otáčkoměr. Převzato z [9]	13
Obrázek 3.3	Konstrukce tachodynamu. Převzato z [7]	14
Obrázek 3.4	Schéma tacho. Převzato z [10]	14
Obrázek 3.5	Indukční snímač. Převzato z [7]	15
Obrázek 3.6	Schema fototachomer	16
Obrázek 3.7	Fóliový tenzometr. Převzato z [16]	18
Obrázek 3.8	Polovodičový tenzometr. Převzato z [17]	18
Obrázek 3.9	Blokový diagram připojených součástí	19
Obrázek 3.10	Reálné zapojení	19
Obrázek 4.1	Schema zapojení	20
Obrázek 4.2	Arduino uno. Převzato z [19]	21
Obrázek 4.3	Princip rozpoznání barev	22
Obrázek 4.4	Schéma senzoru QRD1114. Převzato z [20]	22
Obrázek 4.5	Wheatstonův můstek	22
Obrázek 4.6	HX711. Převzato z [22]	23
Obrázek 4.7	Regulátor otáček motoru. Převzato z [23]	23
Obrázek 4.8	Pulzně šířková modulace. Převzato z [25]	24
Obrázek 4.9	DC/DC měnič. Převzato z [26]	25
Obrázek 4.10	Zjednodušený vývojový diagram	26
Obrázek 5.1	Experimentální tah v závislosti na otáčkách	27

Seznam použitého SW

- Matlab 2020a
- Autodesk inventor professional 2020
- Autodesk Fusion 360
- Arduino IDE 1.8.13
- Overleaf (\LaTeX)

Seznam použitých veličin

T	Tah generový vrtulí	N
F_v	Vztlaková síla	N
F_G	Tíhová síla	N
F_o	Odporová síla	N
D	Průměr vrtule	m
v_o	Rychlost vzduchu nabíhající na vrtuli	$m \cdot s^{-1}$
ρ	Objemová hustota	$kg \cdot m^{-3}$
v	Obvodová rychlost vrtule	$m \cdot s^{-1}$
P_p	Potřebný výkon	W
P_{motor}	Výkon motoru	W
m	Hmotnost	kg
a	Zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
S	Plocha pod vrtulí	m^2
ϵ	Poměrná deformace	—
E	Modul pružnosti v tahu	Pa
l	Počáteční délka	m
σ	Napětí v tahu	Pa
R	Elektrický odpor	Ω
U	Elektrické napětí	V

Seznam použitých zkratk

UAV Unmanned aerial vehicle, bezpilotní letadlo

DAQ Data Acquisition, sběr a zpracování dat

USB Universal serial bus, univerzální sériová sběrnice

PWM Pulse-width modulation, pulzně šířková modulace

ESC Electronic stability control, elektronický regulátor otáček

BLDC Brush-less direct current, bezkartáčový stejnosměrný

Přílohy

Všechny přílohy jsou k bakalářské práci přiloženy na CD

- Příloha č.1: Naměřená data
- Příloha č.2: Datové listy použitých elektronických součástek
- Příloha č.3: Program pro řízení mikrokontroléru