

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra řídicí techniky

## Kolmo startující UAV samokřídlo

Platforma pro experimentální řízení

Daniel Bukovský

Vedoucí: doc. Ing. Martin Hromčík, Ph.D.

Obor: Kybernetika a robotika

Studijní program: Systémy a řízení

Květen 2017



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
katedra řídicí techniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Bukovský Daniel**

Studijní program: Kybernetika a robotika  
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Kolmo startující UAV samokřídlo**

Pokyny pro vypracování:

1. Cílem práce je zhotovit funkční model kolmo startujícího samokřídla pro další zkoumání řídicích algoritmů.
2. Popis stavby samokřídla z bakalářské práce [1], vybrání vhodných komponent pro řízení modelu a změření reálných dynamických parametrů vybraných serv.
3. Zprovoznění celého modelu k letu a základní nastavení regulátorů řídicí jednotky.

Seznam odborné literatury:

- [1] Návrh UAV s koncepcí bikoptyry umožňující svislý vzlet a přistání, bakalářská práce, Lukáš Matušek, 2016  
[2] Design and Implementation of an Unmanned Tail-sitter, Roman Bapst, Robin Ritz, Lorenz Meier, Marc Pollefeys, 2015

Vedoucí: doc. Ing. Martin Hromčík, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 10. 2. 2017





## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce za velkou podporu v práci, dále panu Janu Klesovi z Ústavu letadlové techniky ČVUT a Pavlu Hospodáři z VZLU.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze, 25. května 2017

Podpis:

## Abstrakt

Práce se zabývá stavbou modelu letounu s kolmým startem, a dále výběrem a zapojením řídicí elektroniky pro experimenty v oblasti řízení letu. Posledním tématem probíraným v práci je zprovoznění modelu a změření charakteristiky serva křídélka.

Model letounu je zhotoven převážně z balsy. Elektronika byla vybrána s ohledem na snadné testování různých řídicích algoritmů. Pro měření charakteristiky serv byl zhotoven přípravek umožňující toto měření. Při zprovoznění letounu byly zároveň prověřeny metody pro bezpečné testování.

Výsledkem práce je experimentální platforma pro testování řídicích algoritmů včetně metod pro bezpečné testování a změřené charakteristiky ovládacích serv.

**Klíčová slova:** kolmý start, samokřídlo, UAV

**Vedoucí:** doc. Ing. Martin Hromčík,  
Ph.D.  
Katedra řídicí techniky,  
Karlovo náměstí 13  
Praha 2

## Abstract

This Bachelor's thesis deals with the construction of a vertical take-off landing (VTOL) aircraft model as well as with the selection and connection of control electronics for the purpose of experiments in flight control. The last topic of this thesis is putting the model into operation and measuring dynamic characteristics of aileron servo.

The model is made prevalently from balsa wood. The electronics were chosen with regard to easy testing of various control algorithms. It was necessary to make a machinery jig to enable the measurement of dynamic characteristics. Methods for safety testing were examined when putting the model into operation.

The outcome of this Bachelor's thesis is an experimental platform for testing of different control algorithms including methods for safe testing and servo motors characteristics.

**Keywords:** UAV, tailsitter, flying wing

**Title translation:** Vertical takeoff UAV flying wing — Platform for experimental control

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	4.3 Další senzory Pixhawku . . . . .	19
<b>2 Cíle práce</b>	<b>5</b>	4.3.1 Napájecí modul . . . . .	19
2.1 Mechanika . . . . .	5	4.3.2 Senzor rychlosti . . . . .	19
2.2 Elektronika . . . . .	5	4.3.3 GPS . . . . .	19
2.3 Letové testy . . . . .	6	4.4 Serva . . . . .	20
2.4 Měření . . . . .	6	4.5 Schéma zapojení . . . . .	20
<b>3 Mechanická stavba</b>	<b>7</b>	<b>5 Letové testy</b>	<b>21</b>
3.1 Popis konstrukce . . . . .	7	5.1 První letový test . . . . .	21
3.2 Popis stavby . . . . .	7	5.2 Druhý letový test . . . . .	21
3.3 Parametry letounu . . . . .	12	<b>6 Dynamické parametry serva</b>	<b>25</b>
<b>4 Výběr, zapojení a nastavení řídicí jednotky</b>	<b>15</b>	6.1 Účel měření . . . . .	25
4.1 Řídicí jednotka . . . . .	15	6.2 Přípravek na měření . . . . .	25
4.1.1 Požadavky na jednotku . . . . .	15	6.3 Měření . . . . .	26
4.1.2 Srovnání autopilotů . . . . .	16	6.3.1 Nezatížené servo . . . . .	27
4.1.3 Popis vybrané jednotky . . . . .	17	6.3.2 Zatížené servo . . . . .	27
4.2 Regulátory otáček motorů . . . . .	17	6.4 Závěry měření . . . . .	27

<b>7 Výsledky práce</b>	<b>31</b>
7.1 Mechanika .....	31
7.2 Elektronika .....	31
7.3 Letové testy .....	31
7.4 Měření .....	32
<b>8 Závěr</b>	<b>33</b>
<b>A Rejstřík</b>	<b>35</b>
<b>B Literatura</b>	<b>37</b>

## Obrázky

1.1 Brus z VTUL. ....	1	3.11 Vylepšené uchycení akumulátoru. ....	12
1.2 eBee od SenseFly. ....	2	3.12 Kryt elektroniky. ....	12
1.3 Letoun společnosti Amazon. ....	2	4.1 Blokové schéma zapojení elektroniky. ....	20
1.4 Letoun společnosti Wingtra. ....	3	5.1 První letový test. ....	22
1.5 Testování letounu ETH Zurich. ...	4	5.2 Druhý letový test. ....	22
1.6 Vnitřní konstrukce letounu z ETH Zurich. ....	4	5.3 Graf náklonů při třetím letu. ...	23
3.1 3D model křídla. ....	7	5.4 Graf odběru při třetím letu. ....	24
3.2 Boční pohled na křídlo. ....	8	6.1 Schéma zapojení přípravku. ....	26
3.3 Výřezy v žebrech. ....	8	6.2 Potenciometr pro měření polohy. ....	26
3.4 Pohled na vnitřní konstrukci křídla. ....	9	6.3 Graf výchylky. ....	27
3.5 Kabeláž v křídle. ....	9	6.4 Graf výchylky s motorem na 40%. ....	28
3.6 Boční trojúhelníky s výztuhou. .	10	6.5 Graf výchylky s motorem na 80%. ....	28
3.7 Vylepšení konstrukce trojúhelníků. ....	10	6.6 Graf výchylek. ....	29
3.8 Sestavené samokřídlo. ....	11		
3.9 Táhl servo. ....	11		
3.10 Uchycení akumulátorů. ....	11		

## Tabulky

3.1 Fyzické parametry letounu. ....	13
4.1 Porovnání autopilotů. ....	16
4.2 Parametry Pixhawků. ....	18
4.3 Porovnání firmware. ....	18
4.4 Parametry senzoru rychlosti. ...	19
4.5 Parametry GPS přijímače. ....	19

# Kapitola 1

## Úvod

V současné době jsou malé UAV využívány pro mnoho nejrůznějších účelů. K jejich velkému rozšíření přispěla z hlavní části jejich nízká cena a provozní náklady. Nejrozšířenějším typem UAV jsou různé multikoptéry. Jejich největší výhodou je možnost kolmého startu a setrvání na místě, a dále jsou mechanicky mnohem jednodušší než klasické vrtulníky. Nevýhodou multikoptér je malý dolet, který je potřebný například při využití pro focení podkladů pro tvorbu map. Jako příklad můžeme uvést například český stroj VTUL Brus/Flydeo Y6 (obrázek 1.1). Je to špičkový stroj který je zkonstruován speciálně za účelem dlouhé výdrže ve vzduchu. I tak je u něj udávaná doba letu maximálně 40 minut. U konkurenčních strojů jsou udávané doby letu zpravidla menší.



**Obrázek 1.1:** Brus z VTUL. Převzato z [5]

Tento nedostatek nemají letouny s klasickým křídlem. Jejich dolet je podstatně větší díky větší dopředné rychlosti a efektivitě letu. Naopak nevýhodou je nutnost vzletové a přistávací dráhy, nehledě na obtížné automatizování

tohoto manévru. Pro úlohy mapování je velmi rozšířen eBee od firmy SenseFly (obrázek 1.2). Tento letoun s rozpětím 1 metr zkonstruovaný z pěnové hmoty má udávanou výdrž ve vzduchu 50 minut. Při své rychlosti která se pohybuje v rozmezí 11-25 m/s dokáže obsáhnout plochu až 12 km<sup>2</sup>. Z českých strojů lze zmínit další stroje z VTUL, například velký Mamok s maximální vzletovou hmotností 62 kg a tříhodinovou výdrží ve vzduchu, nebo menší Optoelektron s maximální vzletovou hmotností 5 kg a hodinovou výdrží.



**Obrázek 1.2:** eBee od SenseFly. Převzato z [3]

Kolmo startující letoun s klasickými nosnými plochami by kombinoval výhody obou koncepcí. Díky možnosti rychlého dopředného letu by měl velký dolet a zároveň by umožňoval kolmý start a přistání s minimálním nárokem na okolní prostor.

Existuje několik koncepcí kolmo startujících letounů. Prvním z nich je letoun, který má pro kolmý start další motory. Toto řešení je mechanicky poměrně jednoduché, ale letoun má mnoho motorů, z nichž všechny nejsou využívány po celou dobu letu. S letouny tohoto typu experimentuje například společnost Amazon pro doručování balíčků. Jejich stroj je na obrázku 1.3.



**Obrázek 1.3:** Letoun společnosti Amazon. Převzato z [1]

Další možností je motory překloupat pro klasický vodorovný let. Tím se



zbavíme neúčinných motorů, ale potřebujeme poměrně složitou mechanickou konstrukci na jejich překlopení, která musí být dostatečně tuhá na zvládnutí gyroskopických sil.

Jednou z možností je koncepce letounu, které se věnuji v této práci. Letoun je při vzletu postaven na ocas a během přechodu do vodorovného letu se překlopí celý, což podstatně zjednoduší mechanickou konstrukci. Tento typ letounu je z uvedených důvodů zajímavý pro praktické využití. Není problém s ním kdekoli vzlétnout a přistát, jeho výdrž a rychlost je srovnatelná s klasickými letouny a je mechanicky jednoduchý - tudíž levný.

Komerčních projektů s touto koncepcí je pomálu. Za zmínku stojí dobře vypadající stroj od společnosti Wingtra (obrázek 1.4).

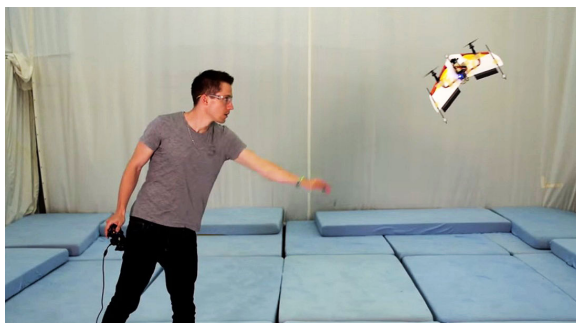


**Obrázek 1.4:** Letoun společnosti Wingtra. Převzato z [6]

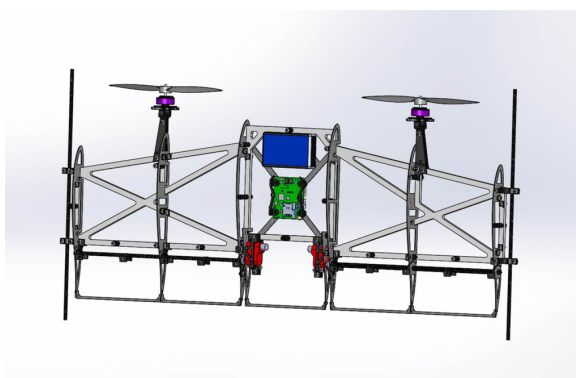
Z výzkumných projektů je zapotřebí zmínit Project Wing od společnosti Google. Jejich letoun měl, podobně jako stroje od Amazonu, doručovat balíkové zásilky. Google ovšem tento projekt zastavil, důvodem měla být špatná říditelnost a malá odolnost proti silnému větru.

V projektu z ETH Zurich popsaném v [9] se zaměřili na robustní řízení letounu ve visu. Použili takové algoritmy, že letoun je schopen zotavit se z jakékoliv pozice, včetně směru dolů, zpět do visu. Jejich letoun má rozpětí 50 cm a je zhotoven z EPP. Foto z testování je na obrázku 1.5.

Další projekt z ETH Zurich popsaný v [10] je zaměřený na vlastní konstrukci. Letoun má systém vnitřních výztuh z uhlíkových laminátů, rozpětí křídla je 48 cm a celý stroj váží 150 gramů. Pohled na vnitřní konstrukci můžeme vidět na obrázku 1.6. Letoun má stejné schopnosti jako předchozí, avšak veškeré řídicí výpočty jsou prováděny v letounu. Výpočty v letounu probíhají na řídicí jednotce vlastního návrhu.



**Obrázek 1.5:** Testování letounu ETH Zurich. Převzato z [4]



**Obrázek 1.6:** Vnitřní konstrukce letounu z ETH Zurich. Převzato z [2]



## Kapitola 2

### Cíle práce

Cílem práce je sestavit funkční experimentální platformu pro testování různých řídicích algoritmů.



#### 2.1 Mechanika

V bakalářské práci [8] byl zhotoven návrh mechanické konstrukce křídla. Tento návrh je nutné realizovat a lehce upravit pro umístění elektroniky, dále případně upravit konstrukci na základě poznatků z letových testů.



#### 2.2 Elektronika

Letoun je potřeba osadit elektronikou. Tu je nutné nejdříve vybrat s ohledem na účel použití, následně osadit a nakonec tuto elektroniku oživit a nastavit.

## ■ 2.3 Letové testy

S hotovým letounem je zapotřebí provést několik letových testů, aby se odhalily případné nedostatky konstrukce. Také je třeba vymyslet takové metody pro letecké testy aby se letoun během nich nerozbil.

## ■ 2.4 Měření

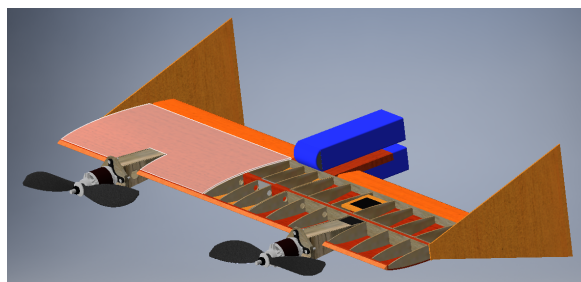
Posledním cílem je měření charakteristiky serva. To je potřebné z důvodu ověření linearity, aby bylo případně možno zahrnout jejich nelinearitu do modelu.

## Kapitola 3

### Mechanická stavba

#### 3.1 Popis konstrukce

Z [8] jsem obdržel model letounu. Náhled je na obrázku 3.1. Letoun je žebrové konstrukce s dvěma nosníky vyztuženými stojinami. Křídlo má celodřevěný potah. V křídle jsou dále umístěny držáky motorů a baterií. Na koncích jsou trojúhelníky na které letoun přistává.



Obrázek 3.1: 3D model křídla.

#### 3.2 Popis stavby

Prvním krokem stavby bylo vygenerování výkresů z modelu a výroba žeber, která tvoří profil křídla, z 2 mm balsy. Ty jsou dobře vidět na obrázku 3.2.



**Obrázek 3.2:** Boční pohled na křídlo.

Na obrázku 3.3 jsou vidět výřezy ve střední části křídla pro umístění elektroniky.



**Obrázek 3.3:** Výřezy v žebrech.

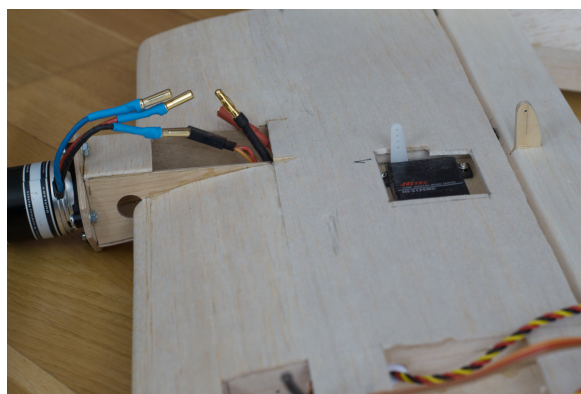
Nejdříve jsem slepil žebra pomocí smrkových nosníků 3x5 mm a vlepil balsové výztuhy nosníků. Poté jsem na žebra přilepil zadní lištu z 6 mm balsy. V této fázi jsem do konstrukce také vlepil bočnice držáků motorů, které jsem vyřezal z 2 mm smrkové překližky. Následně jsem nalepil spodní potah křídla z 2 mm balsy, část vrchního potahu a náběžnou lištu. Pohled na vnitřní konstrukci křídla najdeme na obrázku 3.4.

Vrchní a spodní část držáků motorů je zhotovena z 2 mm balsy a v rozích jsou vlepny trojúhelníkové lišty. Čelo držáku motoru je z 3 mm překližky a jeho uchycení je zevnitř posíleno smrkovými výztuhami. Také jsem vlepil držáky serv z 4 mm balsy.



**Obrázek 3.4:** Pohled na vnitřní konstrukci křídla.

V této fázi jsem musel začít řešit kabeláž. Je nutnou podmínkou, aby elektronické komponenty byly snadno demontovatelné. Pro serva jsem instaloval do křídla papírové trubky, kterými jdou protáhnout kabely i s konektory. Pro regulátory jsou v křídle (obrázek 3.5) napevno vestavěné prodlužovací kabely, a to jak silové, tak signálové.



**Obrázek 3.5:** Kabeláž v křídle.

Na obrázku 3.5 můžeme vidět i řídicí plochy letounu. Ty jsou vybroušeny do požadovaného tvaru z 10 mm balsy. Jejich páky jsem zhotovil z 3 mm překližky. Ke křídlu jsou uchyceny pomocí třech plastových pantů 11x28 mm. Do konstrukce byl také vlepen držák baterií z 10 mm balsy. Dále jsem na křídle dokončil balsový potah, včetně výřezů pro přístup k elektronice.

Na obrázku 3.6 jsou přistávací trojúhelníky na koncích křídel. Jsou z několika kusů 2 mm balsy, ale ani při slepení z více kusů se nepodařilo dosáhnout potřebné tuhosti na stabilní přistání, takže bylo nutné přidat výztuhy z 6 mm balsy.

Po prvním letovém testu se ukázalo že ani tato vylepšení nebudou dostatečná, proto byly celé stojany nahrazeny konstrukcí ze smrkových lišt 6x6



**Obrázek 3.6:** Boční trojúhelníky s výztuhou.

mm vyztužených 1 mm smrkovou překližkou. Toto řešení je na obrázku 3.7.



**Obrázek 3.7:** Vylepšení konstrukce trojúhelníků.

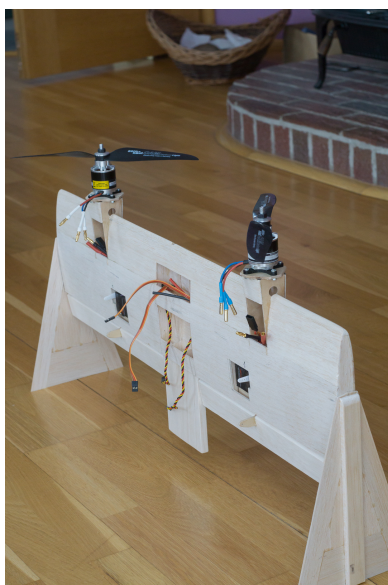
Na obrázku 3.8 je sestavené samokřídlo před povrchovou úpravou. Jako povrchovou úpravu jsem zvolil lakování čirým lakem.

Táhla serv (obrázek 3.9) jsou vyřešena pomocí plastových vidliček s 2 mm závitem a drátem 1,8 mm se Z zakončením v páce kormidla.

Akumulátory (obrázek 3.10) jsou zajištěny proti posunu suchým zipem a připoutány gumou.

Toto uchycení akumulátorů se po prvním testu také ukázalo jako nevhodné, a to z důvodu špatné možnosti měnit těžiště letounu. Tudíž jsem uchycení





**Obrázek 3.8:** Sestavené samokřídlo.



**Obrázek 3.9:** Táhlo serva.



**Obrázek 3.10:** Uchycení akumulátorů.

upravil tak, aby bylo možné snadno měnit polohu těžiště. Foto provedení je

na obrázku 3.11.



**Obrázek 3.11:** Vylepšené uchycení akumulátoru.

Posledním vylepšením, provedeným před testovacím letem v síti, byl kryt elektroniky bránící jejímu poškození v případě pádu do sítě. Je zhotoven z 1 mm smrkové překližky a boky jsou z 4 mm balsy. Jeho řešení můžeme vidět na obrázku 3.12. Je důležité aby zavírání krytu nebylo na magnet, ten by totiž ovlivňoval elektronický kompas uvnitř Pixhawk.



**Obrázek 3.12:** Kryt elektroniky.

### ■ 3.3 Parametry letounu

Fyzické parametry letounu jsem shrnul v tabulce 3.1.

Rozpětí:	0,74 m
Vzletová hmotnost:	1,492 kg
Plocha:	0,148 m <sup>2</sup>
Plošné zatížení:	0,403 kg/m <sup>2</sup>

**Tabulka 3.1:** Fyzické parametry letounu.



## Kapitola 4

### Výběr, zapojení a nastavení řídicí jednotky

#### 4.1 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka je zařízení, které přejímá povely z přijímače a podle nich ovládá letoun. Tyto povely směšuje a upravuje na výstupní signály ovládacích prvků letounu a pomocí svých senzorů může do řízení zavádět zpětnou vazbu. Dále jednotka umožňuje různé ovládací režimy a také, pro nás potřebné, různé letové režimy.

##### 4.1.1 Požadavky na jednotku

Při výběru řídicí jednotky jsem nejdříve potřeboval stanovit požadavky na jednotku.

Jedním z hlavních požadavků je snadná upravitelnost řídicích algoritmů - pro experimenty v oblasti řízení je toto nutné. To znamená, že veškerý software pro jednotku musí být open-source.

Dále je třeba zaznamenávat data z experimentů, takže jako další požadavek byla možnost data zaznamenávat a pohodlně je zpracovávat.

	Ardupilot	LibrePilot	PX4 autopilot
Podporované HW:	Pixhawk, RPi atd.	OpenPilot atd.	Pixhawk, RPi atd.
Licence:	GNU-GPL	GNU-GPL	BSD
Záznam dat:	dle HW	max. 4 MiB	dle HW
Telemetrie:	UART - MAVLink	UART - MAVLink	UART - MAVLink
Tailsitter koncepce:	experimentální	ne	ano

**Tabulka 4.1:** Porovnání autopilotů.

Pro snadné otestování funkčnosti modelu a elektroniky by se rovněž hodilo, aby řídicí jednotka již měla nějakou podporu pro tento typ letounu.

### 4.1.2 Srovnání autopilotů

Open-source řešení je na trhu poměrně dost, avšak většina je poměrně jednoduchých a málo rozvíjených. V této části bych se tedy zaměřil pouze na projekty udržované, vyvíjené a tudíž poměrně rozšířené.

Prvním je Ardupilot. Původně vznikl na platformě Arduino a využíval vlastní desku s Arduino kompatibilním HW (APM - ArduPilot Mega). V současné době je to jeden z nejpokročilejších projektů podporující různé HW platformy. Projekt je velmi aktivně vyvíjen velkým množstvím vývojářů na základě požadavků uživatelů. Projekt na GitHub obsahuje přes 25000 záplat od více než 300 vývojářů. V současné době se velmi intenzivně pracuje na přidávání podpory různých strojů s kolmým startem a přistáním.

Druhým je OpenPilot/LibrePilot. Tento software začal vznikat v roce 2009 jako volně šiřitelný software pro řízení modelů. V roce 2015 byl projekt převeden na LibrePilot kde stále probíhá vývoj. Podporuje různé multikoptéry, letadla a vozidla.

Posledním porovnávaným bude PX4 autopilot. Jeho popis je v [7]. Začal vznikat v roce 2009 na Computer Vision and Geometry Lab na ETH Zurich. Podporuje různé HW platformy a je stále aktivně vyvíjen. Tento software podporuje poměrně velké množství různých VTOL koncepcí letounů, ale i tradiční letouny a multikoptéry.

Porovnání parametrů jednotek je v tabulce 4.1.

Poslední požadavek nás omezil pouze na PX4. V současné době není podpora této koncepce letounu moc rozšířená. Ve výzkumném projektu [10] je použit vlastní design řídicí jednotky, a v [11] a [9] je použit Pixhawk.

### 4.1.3 Popis vybrané jednotky

Pixhawk je open-source hardware autopilota pro řízení modelů. Pochází z projektu na ETH Zurich. Byl vytvořen jako fúze dvou modulů předchozího modulárního systému, konkrétně PX4FMU (Flight Management Unit - hlavní jednotka) a PX4IO (Input/Output module - vstupně-výstupní modul).

Pixhawk může ovládat až 14 serv/motorů pomocí PWM výstupů, z nichž 8 je možné v případě problémů s autopilotem ovládat přímo. Pomocí dalších rozhraní (UART, I2C, CAN, SPI) je možné připojit mnoho dalšího příslušenství. Systém obsahuje záložní procesor, který umožňuje manuální ovládání letounu v případě výpadku hlavního systému a obnovení jeho funkce.

Jednotka dále podporuje napájení až ze 3 nezávislých zdrojů, mezi kterými v případě výpadku dokáže přepnout. Z dalších bezpečnostních opatření můžeme jmenovat také bezpečnostní tlačítko, kterým je možné letoun uvést do stavu, ve kterém není možné roztočit vrtule. To je nutné pro manipulaci s letounem, aby nehrozilo posekání vrtulemi.

Pro ovládání letounu je možné připojit modelářské přijímače přes standardní rozhraní (PPMsum, S.BUS, Spektrum DSM...). Stav jednotky je signalizován výkonnou RGB LED a hlasitým piezo reproduktorem. Pro možnost záznamu parametrů letu je k dispozici slot na microSD kartu, na kterou je možné zaznamenávat i data o velkých frekvencích po dlouhý čas. Stahovat tato data a provádět nastavení jednotky je možné přes microUSB konektor, který lze pro lepší přístup vyvést ven z jednotky.

Parametry jsou shrnuty v tabulce 4.2.

## 4.2 Regulátory otáček motorů

Pro ovládání motorů řídicí jednotkou jsou nezbytné regulátory otáček motorů. Pro potřeby automatického řízení je nejdůležitější rychlost odezvy. Stejně

Procesor:	168 MHz Cortex-M4F
Počet PWM výstupů:	14
Paměť:	256 KB RAM / 2 MB Flash / SD karta
Senzory:	2x tříosý akcelerometr/gyroskop, magnetometr, barometr
Rozhraní ext. senzorů:	UART, I2C, CAN, SPI, analog
Napájení:	5 V, možnost zálohování více zdroji

**Tabulka 4.2:** Parametry Pixhawku.

	Simonk	BLHeli
Vstupní signál:	PPM min. 5 $\mu$ s mezera	PWM, PPM, Oneshot
Vstupní filtr:	žádný	žádný
Brzděný doběh motoru:	ne	ano
Ochrany podpětí a přehřátí:	ne	ne
Nastavení přes PC:	ne	ano

**Tabulka 4.3:** Porovnání firmware.

požadavky mají i uživatelé multikoptér. Pro jejich potřeby jsou asi nejrozšířenější dva projekty - SimonK a BLHeli. Tyto projekty vznikly původně jako alternativní firmware pro regulátory různých výrobců a postupem času začali výrobci spolupracovat s vývojáři a produkovat regulátory optimalizované pro tyto firmware. Mnou vybrané regulátory jsou vybrané právě z takovéto série. Porovnání obou firmware jsem zpracoval do tabulky 4.3.

Pixhawk generuje PPM signál s periodou 2,5 ms. Běžná je perioda 20 ms, ale pro použití zpětnovazebního regulátoru je dobré zkrátit odezvu na minimum. S tímto zrychleným signálem tudíž nemusí být některé starší regulátory kompatibilní. Také se dříve kvůli zvýšení odolnosti proti rušení průměrovalo několik period vstupního signálu. To vše prodlužovalo pro nás nežádoucí odezvu, která v tradičně řízených modelech nebyla tak kritická, hlavně kvůli reakčním dobám pilota. Pro maximální zrychlení odezvy se také začíná rozšiřovat aktivní brzdění při potřebě snížit výkon. Dále by nebylo vhodné, aby se regulátor vypínal při podpětí baterie nebo přehřátí, vzhledem k tomu, že výpadek jednoho z motorů by způsobil pád letounu.

Z porovnání klíčových parametrů jsem vybral BLHeli firmware. Vzhledem k maximálnímu odběru motorů změřených v [8] bylo nutné aby regulátory byly dimenzovány na proud minimálně 60 A. Vybral jsem tedy regulátory od výrobce EMAX ze série BLHeli na proud 60 A.



Měřicí rozsah:	1 Psi ( 100 m/s)
Rozlišení:	0.84 Pa
Rozhraní:	I2C

**Tabulka 4.4:** Parametry senzoru rychlosti.

Typ přijímače:	56 kanálů, GPS L1 C/A, GLONASS L1 FDMA, QZSS L1 C/A SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS
Frekvence měření:	až 10 Hz
Přesnost:	až 2 m
Rozhraní:	UART

**Tabulka 4.5:** Parametry GPS přijímače.

## ■ 4.3 Další senzory Pixhawku

### ■ 4.3.1 Napájecí modul

Další modul v letounu je napájecí modul pro Pixhawk. Tento modul napájí Pixhawk a jeho periferie. Zároveň měří proud odebíraný z baterií a také jejich napětí. Pixhawk pak tyto data zaznamenává. Tyto data můžeme použít pro určení výkonu motorů.

### ■ 4.3.2 Senzor rychlosti

Senzor rychlosti sestává z diferenčního tlakového snímače a pitotovy trubice. Senzor se používá pro řízení rychlosti při horizontálním letu, jeho parametry jsem zanesl do tabulky 4.4.

### ■ 4.3.3 GPS

Posledním senzorem, který je k Pixhawku připojen externě, je GPS. Jedná se o GPS modul dodávaný k Pixhawku, obsahující přijímač U-Blox NEO-7N. Parametry GPS jsem shrnul v tabulce 4.5.

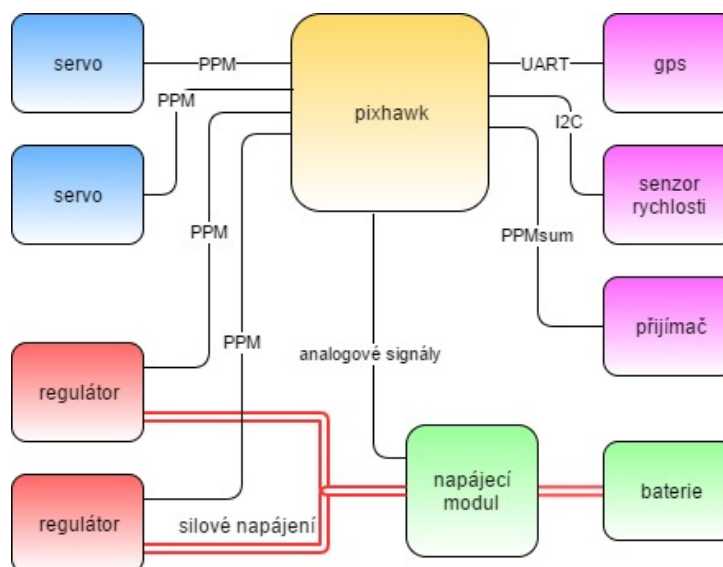
## 4.4 Serva

K Pixhawk jsou dále připojena serva křidélek. Ty jsou napájena z regulátorů, tedy ne pomocí napájecího modulu Pixhawk. To nám zajistí, že náhlé odběrové špičky a rušení způsobené servy nemohou způsobit výpadek napájení pro řídicí jednotku.

Serva byla vybrána Hitec HS-5125MG. Jsou to digitální programovatelná serva pro plochou montáž s kovovými převody a kuličkovými ložisky. Jeho hmotnost je 24 gramů a vestavná výška je 10 mm. Výrobce udává krouticí moment je 3-3,5 kg/cm dle napájecího napětí, které může být v rozsahu 4,8-6 V. Udávaná rychlost je 0,13-0,17 s@60°. Parametry serva dále ověřuji v kapitole 6.

## 4.5 Schéma zapojení

Pro úplnost je schéma zapojení na obrázku 4.1.



**Obrázek 4.1:** Blokové schéma zapojení elektroniky.

## Kapitola 5

### Letové testy

#### 5.1 První letový test

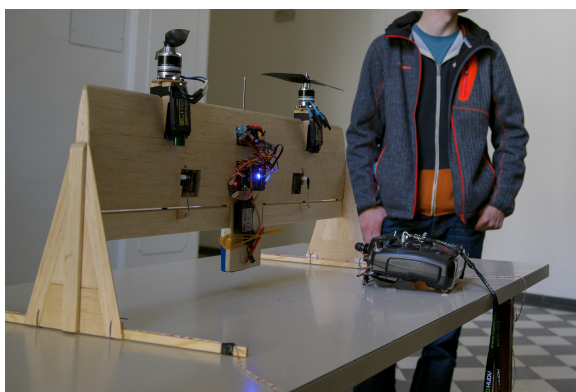
První letový test byl uskutečněn na chodbě katedry. Ke stojanům křídla byly připevněny lišty pro zvýšení stability a celé křídlo bylo přivázáno ke stolu, aby se nemohlo rozbít. Foto z testování je na obrázku 5.1. Video z testování je na youtube<sup>1</sup>.

Kvůli upevnění ke stolu a omezeným možnostem manévrování jsme nedokázali ověřit, zda jsou řídicí plochy dostatečně velké pro stabilní let. Hlavním poznatkem bylo zjištění, že musím ověřit a případně upravit polohu těžiště letounu a zpevnit konstrukci stojanů křídla.

#### 5.2 Druhý letový test

Druhý letový test se uskutečnil v síti pro testování UAV umístěné za budovou E na Karlově náměstí. Chtěl bych zde poděkovat panu doktoru Martinu Saskovi za zapůjčení této sítě. Síť se jevila pro naše testy jako ideální. Letoun v ní má dostatečný manévrovací prostor pro volný let a při nárazu nebo pádu by se křídlu nemělo co stát.

<sup>1</sup><https://youtu.be/MumHcA-njB4>



**Obrázek 5.1:** První letový test.

Pro vzlet letounu jsme do sítě umístili stůl. Pro zabránění destrukce křídla v případě pádu na stůl jsme na něj umístili molitan. Letoun připravený ke startu můžeme vidět na obrázku 5.2.



**Obrázek 5.2:** Druhý letový test.

První let je na videu na youtube<sup>2</sup>. Letoun se vznesl do vzduchu a okamžitě začal klopit směrem dopředu. Ani přes zásah do řízení se nepodařilo let stabilizovat. Letoun se zamotal do sítě asi metr a půl daleko od místa startu.

Druhý let je na videu na youtube<sup>3</sup>. Před letem jsme posunuli těžiště letounu vpřed posunutím baterií v držáku. Z videa je zřejmé, že letoun o poznání lépe reagoval na povely a let byl mnohem stabilnější.

Třetí let je na videu na youtube<sup>4</sup>. Tento let proběhl za stejné konfigurace letounu jako v druhém případě. Jediná změna byl pokus o zlepšení ovladatelnosti výkonu motorů nastavením křivky ve vysílači. Letoun odstartoval

<sup>2</sup><https://youtu.be/s3PzFuIQApw>

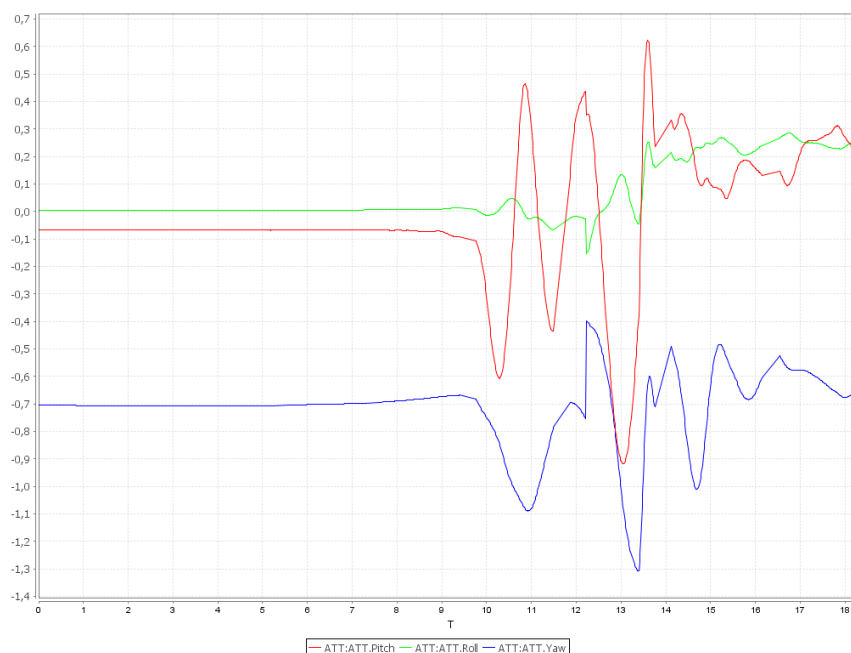
<sup>3</sup><https://youtu.be/ewK2F0oRf0o>

<sup>4</sup><https://youtu.be/rFVNrvyJwfA>

s velkou razancí dopředu a nepodařilo se mi ho stabilizovat. Skončil tedy zavěšen za zamotané vrtule.

Z třetího letu jsem se rozhodl zjistit jaký výkon motorů je potřebný pro vis. Ze záznamů v Pixhawku jsem nejdříve určil jednotlivé letové fáze a poté z nich vyčetl proud a napětí tekoucí z baterie.

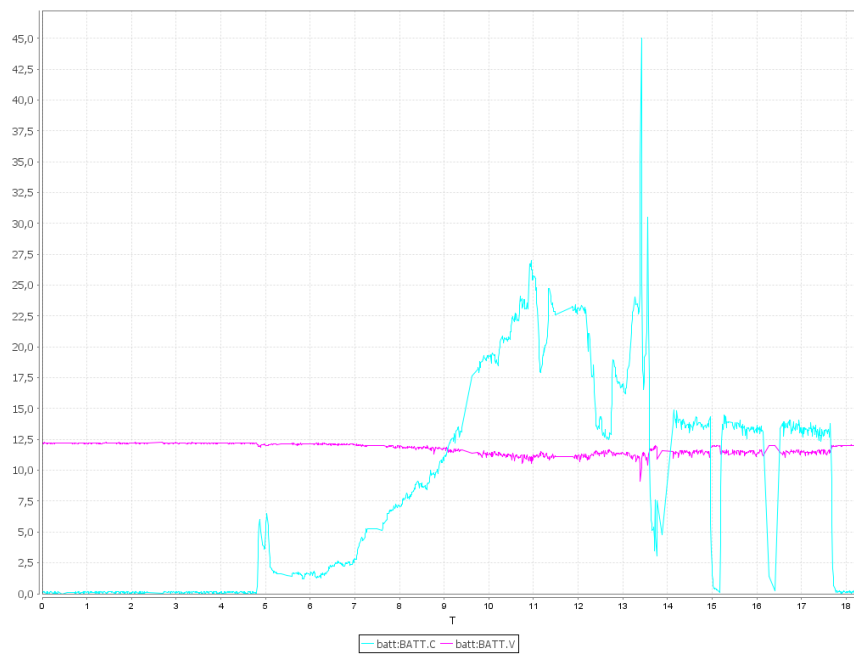
Z grafu 5.3 je možné odečítat náklon letounu v jednotlivých osách. Z počátku grafu letoun stojí na zemi, tudíž jsou náklony nulové. Po vzletu, přibližně v čase 10 jsou vidět střídající se náklony, hlavně v ose klopení (pitch). Let byl zakončen nárazem do sítě a zavěšením v ní, to se stalo přibližně v čase 14.



**Obrázek 5.3:** Graf náklonů při třetím letu.

Z grafu 5.4 je možné odečíst proud a napětí. Na začátku je pozorovatelné pozvolné přidávání výkonu před vzletem. Při samotném letu se proud pohybuje mezi 20 a 30 ampéry a náraz motorů do sítě a jejich zastavení vyvolalo proudovou špičku o velikosti 45 A. Napětí na baterii pokleslo oproti klidovému stavu o 1,1 V na 11,3 V. Z těchto údajů jsem pro vis letounu stanovil potřebný výkon na 226-339 W.

První a hlavní poznatek z testování byl, že tato síť je pro naše účely velmi vhodná. I přes tři nárazy s roztočenými vrtulemi se křídlo nic nestalo. Navíc se vrtule do sítě zamotávaly a křídlo za ně zůstalo zavěšeno, takže nenásledoval pád. Druhý poznatek bylo znatelné zlepšení ovladatelnosti letounu při posunu



**Obrázek 5.4:** Graf odběru při třetím letu.

těžiště dopředu.

## Kapitola 6

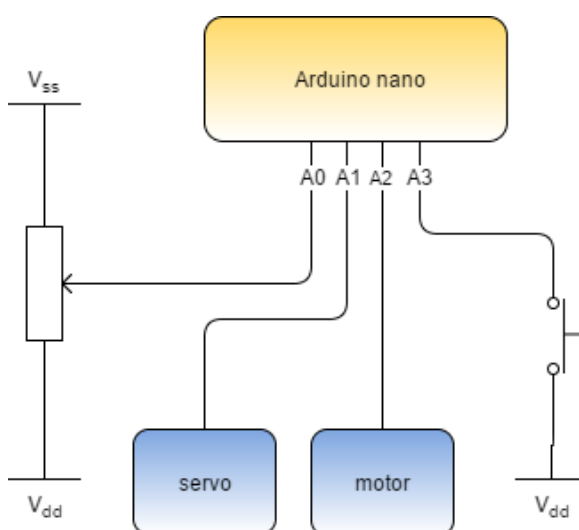
### Dynamické parametry serva

#### 6.1 Účel měření

Pro automatické řízení letounu je třeba, aby serva prováděla rychlé a přesné zásahy. V našem letounu se síla, kterou servo musí působit na kormidlo, aby ho dokázalo udržet v určené poloze, mění v závislosti na rychlosti obtékání kormidla. Tato rychlost je ovlivňována rychlostí letu a také výkonem motoru, jak bylo změřeno v [11]. V tomto měření se tedy snažím ověřit, zda je servo dostatečně silné a pohybuje se se stejnou rychlostí při různém zatížení.

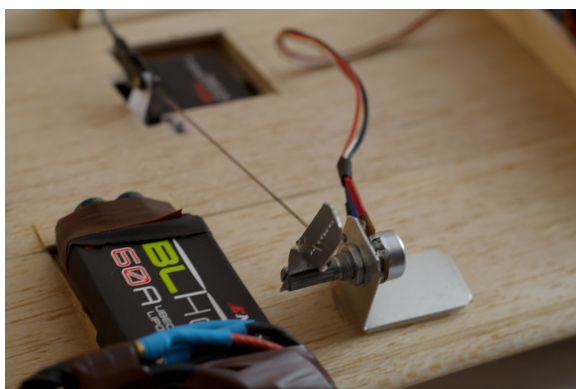
#### 6.2 Přípravek na měření

Při experimentu bylo třeba generovat řídicí signál serva a skoky v jeho hodnotě. Také pro měření se zapnutým motorem jsme potřebovali generovat signál pro něj. Pro tento účel jsem zhotovil jednoduchý přípravek s deskou Arduino nano. Přípravek vygeneruje skok signálu na základě stisknutí tlačítka a poté začne zaznamenávat polohu. Jako senzor polohy jsem zvolil potenciometr. Pro naše měření má dostatečný rozsah, přesnost a linearitu. V Arduinu se analogový signál z potenciometru převádí desetibitovým AD-čítačem. Z Arduina jsou měřená data přenášena do počítače přes virtuální sériový port, kde jsou poté zaznamenávána pro další zpracování. Schéma přípravku je na obrázku 6.1.



**Obrázek 6.1:** Schéma zapojení přípravku.

Dále bylo nutné mechanicky spojit potenciometr se servem. Toto řešení je na obrázku 6.2.



**Obrázek 6.2:** Potenciometr pro měření polohy.

### 6.3 Měření

Měření bylo prováděno z nulové počáteční výchylky kormidla a koncovým bodem byla horní krajní poloha kormidla. V experimentu jsem se nezabýval přepočtem na jednotky SI, protože to pro ověření hypotézy, že servo je pod zátěží pomalejší, není nutné. Hodnotu polohy udávám jako nefiltrovaná a nepřepočítávaná data z AD převodníku.

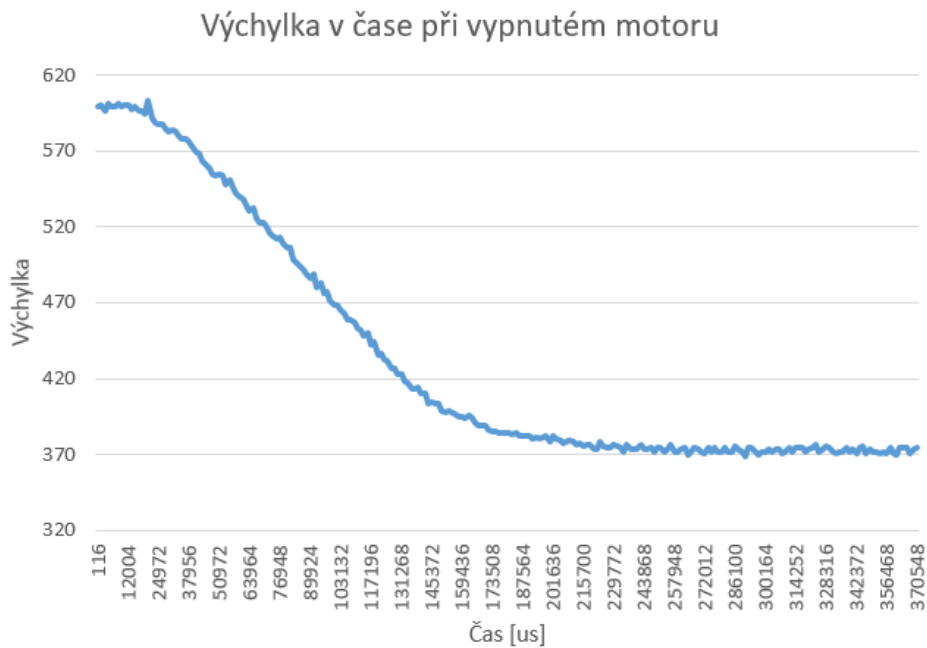
Servo je pro nulovou výchylku buzeno PWM signálem s délkou 1500 us a



pro koncovou polohu 2000 us. Motor je buzen v klidovém stavu signálem o délce 1000 us a plný výkon má při 2000 us.

### 6.3.1 Nezatížené servo

Charakteristika nezatíženého serva je v grafu 6.3. Tyto parametry nelze porovnávat s údaji výrobce, jelikož nejsou převedeny do jednotek SI.



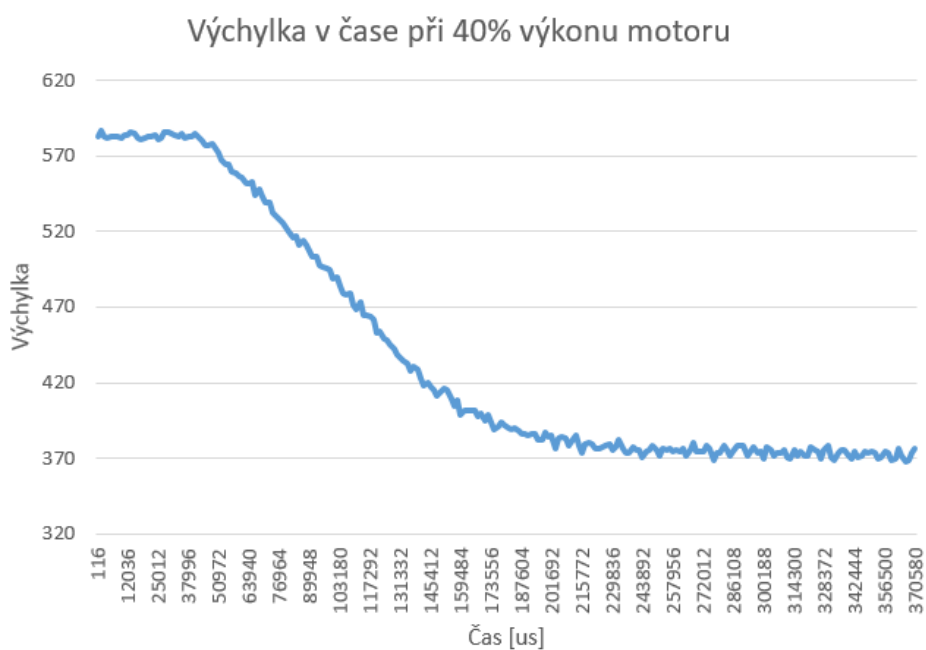
**Obrázek 6.3:** Graf výchylky.

### 6.3.2 Zatížené servo

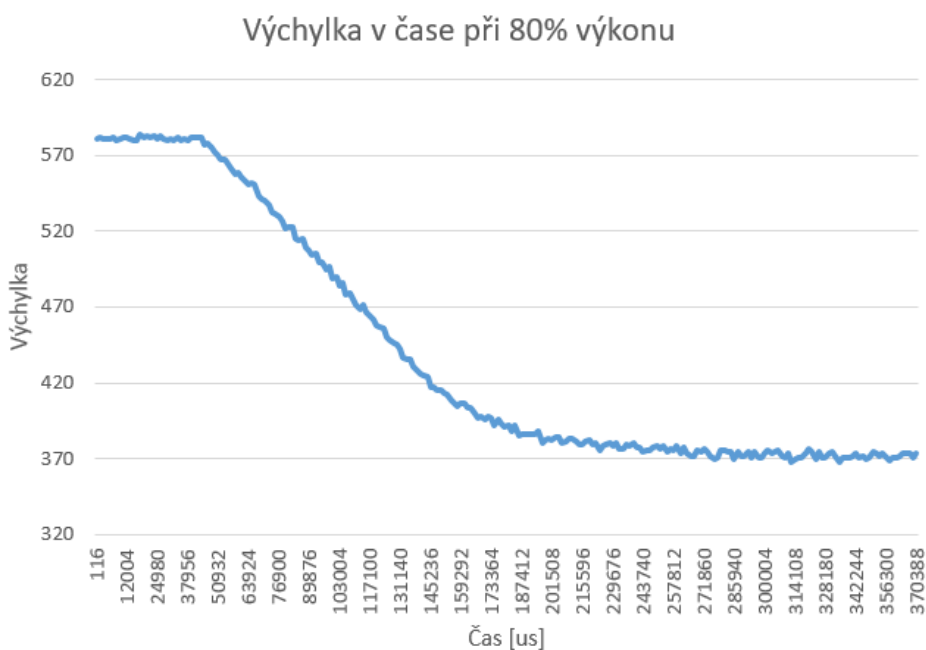
Charakteristiky zatíženého serva jsou na obrázcích 6.4 a 6.5.

## 6.4 Závěry měření

Z měření shrnutém v grafu 6.6 lze velmi dobře pozorovat, že doba přeběhu serva je ovlivněná počátečním zpožděním. To je způsobeno tím, že řídicí puls

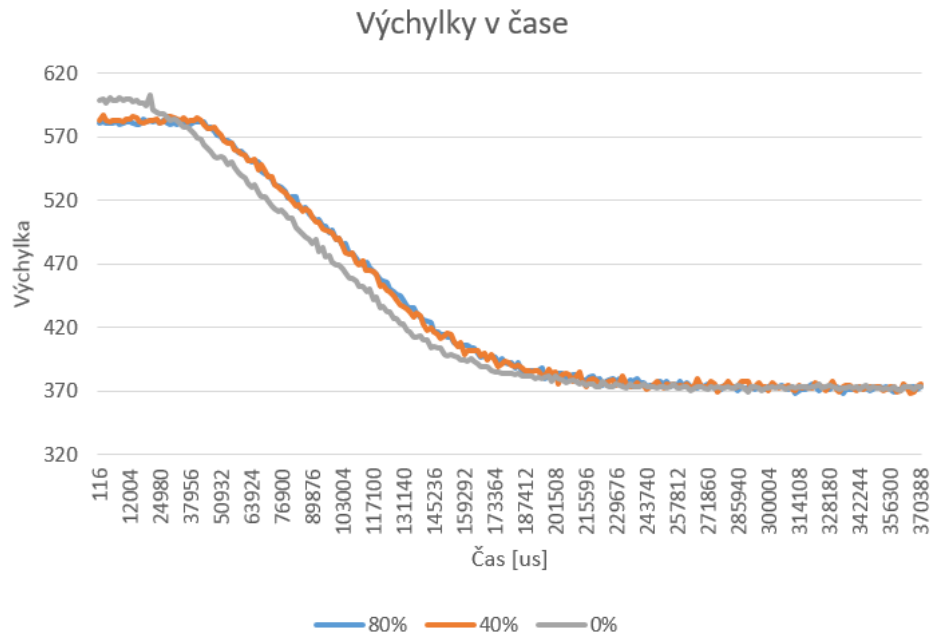


**Obrázek 6.4:** Graf výchylky s motorem na 40%.



**Obrázek 6.5:** Graf výchylky s motorem na 80%.

pro serva je generován s frekvencí 50 Hz. To se na době reakce může projevit až 19 ms dlouhým zpožděním reakce. Další prodloužení doby reakce je zřejmě výsledkem vnitřního zpracování signálu servem a jeho regulátorem polohy.



**Obrázek 6.6:** Graf výchylek.

Těmto problémům a jejich řešení se věnuji v kapitole 4.2.

Dále je z měření vidět, že při měření vyšších zatížení je charakteristika ve fázi rozběhu plochá. To je způsobeno vůlí mechanického řešení přípravku. Také se na datech objevuje drobný šum, který je způsobený elektrickým rušením analogového signálu a kvantizační chybou AD převodníku.

Z měření jsem vyvodil výsledek, že zátěž rychlost serva nijak dramaticky neovlivňuje. Pro dobu reakce je mnohem podstatnější řídicí signál.





## Kapitola 7

### Výsledky práce



#### 7.1 Mechanika

V mechanické části jsem dosáhl všech cílů, které jsem stanovil. Křídlo jsem vyrobil a lehce upravil. Provedené úpravy spočívaly především ve zpevnění konstrukce přistávacích trojúhelníků na koncích křídla a úpravě držáku baterií. Dále jsem oproti návrhu do křídla umístil elektroniku a tu jsem zakrytoval.



#### 7.2 Elektronika

V elektronické části jsem také splnil všechny stanovené cíle. Pro letoun jsem vybral elektroniku, která umožňuje snadno zasahovat do řídicích algoritmů. Elektroniku jsem také zprovoznil a nastavil pro počáteční letové testy.



#### 7.3 Letové testy

S letounem jsem provedl tři letové testy. Na základě těchto testů jsem upravil mechanickou konstrukci, která se ukázala v několika bodech jako nedostačující.

Také jsem vymyslel a otestoval metody pro bezpečné testování. Na základě letových testů jsme navíc získali mnoho poznatků pro další experimenty s letouny s touto koncepcí.

## ■ 7.4 Měření

Charakteristiku serv jsem změřil. Z měření se nepotvrdily naše obavy, že serva budou pod zátěží pomalejší. To je dobře pro další postup v systematickém návrhu řízení.



## Kapitola 8

### Závěr

Cílem této práce bylo sestrojít experimentální platformu pro řízení letounu s kolmým startem. To jsem udělal jak z mechanické části, tak i elektronické. Také jsem vyvinul metody pro bezpečné testování letounu.

V této práci jsem mimo jiné shrnul zkušenosti z mých dřívějších hobby projektů, které by se mohly stát inspirací pro případné další zájemce o podobné téma.

Moje pokusy ukázaly, že tato koncepce letounu může být funkční. Vzhledem k tomu, že se mi letoun dařilo řídit i manuálně, se ukázalo, že je poměrně stabilní a snadno ovladatelný.

Díky této práci máme na katedře model letounu, na kterém můžeme provádět experimenty a ověřovat různé koncepce řízení a stabilizace letu. Také nám poslouží jako dobrý odrazový můstek pro další vývoj konstrukce, na které spolupracujeme s Ústavem letadlové techniky Fakulty strojní ČVUT.

Na projektu se plánuji dále podílet v rámci studentských a případně diplomových projektů.







# Příloha A

## Rejstřík

Arduino, 25

Ardupilot, 16

BLHeli, 18

LibrePilot, 16

OpenPilot, 16

Pixhawk, 17

PX4, 16

SimonK, 18



## Příloha B

### Literatura

- [1] Amazon Prime Air. <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?node=8037720011>.
- [2] ‘IDSC Tailsitter’ flying robot performs vertical loops and easily transitions between hover and forward flight. <http://robohub.org/wp-content/uploads/2016/07/cad-1024x660.png>.
- [3] SenseFly - eBee plus. <https://www.sensefly.com/uploads/contentElements/ebec-plus-responsive.jpg>.
- [4] ‘Tailsitter’ flying robot hovers and recovers easily thanks to new algorithm. <http://robohub.org/wpcontent/uploads/2015/06/Robust-Hover-Control-of-a-Tailsitter-Flying-Machine-YouTube.jpg>.
- [5] VTUL - Bezpilotní létající prostředek BRUS. <http://www.vtusp.cz/a/bezpilotniletajici-prostredek-brus>.
- [6] WingtraOne. <https://wingtra.com/wpcontent/uploads/2016/11/wingtra-wingtraone-product-top-view-xs.jpg>.
- [7] Dominik Honegger Lorenz Meier and Marc Pollefeys. PX4: A Node-Based Multithreaded Open Source Robotics Framework for Deeply Embedded Platforms. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 6235–6240, 2015.
- [8] Lukáš Matušek. Návrh UAV s koncepcí bikoptyéry umožňující svislý vzlet a přistání. Master’s thesis, ČVUT, 2016.
- [9] Robin Ritz. ‘Tailsitter’ flying robot hovers and recovers easily thanks to new algorithm. Technical report, ETH Zurich, 6 2015.

- [10] Robin Ritz. ‘IDSC Tailsitter’ flying robot performs vertical loops and easily transitions between hover and forward flight. Technical report, ETH Zurich, 7 2016.
- [11] Lorenz Meier Roman Bapst, Robin Ritz and Marc Pollefeys. Design and implementation of an unmanned tail-sitter. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1885–1890, 2015.