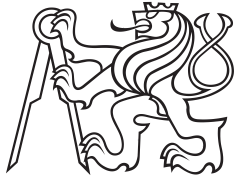


Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra řídicí techniky

## Automatické řízení tahu vrtule s proměnným úhlem nastavení

**Jakub Lorenc**

Vedoucí: Ing. Jan Belák  
Obor: Kybernetika a robotika  
Studijní program: Kybernetika a robotika  
Květen 2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lorenc** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **499016**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Automatické řízení tahu vrtule s proměnným úhlem nastavení**

Název bakalářské práce anglicky:

**Automatic thrust control for variable pitch propeller**

Pokyny pro vypracování:

Cílem této práce je vyvinout algoritmy pro automatické řízení tahu vrtule s proměnlivým úhlem nastavení a otáčkami. V rámci své práce student vytvoří:

1. Experimentální platformu umožňující řídit úhel nastavení, moment elektrického motoru a měřit otáčky a tah vrtule společně se vstupním proudem a napětím.
2. Adaptuje již existující matematické modely pro potřeby projektu tak, aby reflektovaly dynamiku experimentální platformy.
3. Pomocí matematického modelu nalezne vhodné nastavení úhlu a otáček vrtule pro různé rychlosti nabíhajícího vzduchu a požadavků na tah
4. Vytvoří zpětnovazební řídicí zákony pro řízení otáček a úhlu nastavení vrtule
5. Vytvořené algoritmy ověří pomocí simulací a experimentů na vyvinuté platformě

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mark Johnson Cutler - Design and Control of an Autonomous Variable-Pitch Quadrotor Helicopter - Massachusetts Institute of Technology 2012
- [2] Gebauer, J., Wagnerová, R., Smutný, P., & Podešva, P. - Controller design for variable pitch propeller propulsion drive - IFAC-PapersOnLine 2019
- [3] Franklin, Powell, Emami-Naeini - Feedback Control of Dynamics Systems - Prentice Hall, USA

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Belák katedra řídicí techniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.01.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce:

**do konce letního semestru 2023/2024**

Ing. Jan Belák  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
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



## Poděkování

Děkuji Ing. Janu Belákovi za vedení práce.

Děkuji Ústavu Mechaniky tekutin a termodynamiky FS ČVUT za umožnění měření v aerodynamickém tunelu, jmenovitě Ing. Jakobovi Suchému.

Děkuji své rodině za podporu.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 26. května 2023

## Abstrakt

Práce směřuje k návrhu řízení stavitelné vrtule poháněné elektrickým motorem. Práce se převážně zabývá konstrukcí experimentální platformy a tvorbou matematického modelu stavitelné vrtule poháněné BLDC motorem. V závěru práce je přistoupeno k návrhu jednoduchého řízení.

**Klíčová slova:** stavitelná vrtule, BLDC motor, řízení

**Vedoucí:** Ing. Jan Belák  
Katedra řídicí techniky

## Abstract

The thesis leads towards the control design of adjustable propeller driven by an electric motor. The thesis mainly deals with construction of experimental platform and a mathematical modeling of an adjustable propeller driven by a BLDC motor. At the end of the thesis, a simple control design has been done.

**Keywords:** variable pitch propeller, BLDC motor, control

**Title translation:** Automatic thrust control for variable pitch propeller

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	3.2 Model vrtule .....	18
1.1 Cíle práce .....	2	3.3 Identifikace modelu .....	19
<b>2 Experimentální platforma</b>	<b>3</b>	3.4 Ověření modelu .....	22
2.1 Konstrukce platformy .....	3	<b>4 Řízení</b>	<b>25</b>
2.1.1 Řízení přípusti motoru .....	5	4.1 Analýza účinnosti pohonu .....	25
2.1.2 Stavění úhlu vrtule .....	5	4.2 Návrh řízení .....	27
2.1.3 Měření otáček .....	6	4.3 Ověření .....	28
2.1.4 Měření elektrického proudu ...	7	<b>5 Závěr</b>	<b>29</b>
2.1.5 Měření tahu vrtule .....	7	<b>A Literatura</b>	<b>31</b>
2.1.6 Mikrokontrolér .....	8	<b>B Seznam použitých zkratk</b>	<b>33</b>
2.1.7 Komunikace platformy .....	9	<b>C Přílohy</b>	<b>35</b>
2.2 Kalibrace .....	9		
2.3 Demonstrace funkce .....	11		
2.4 Shrnutí .....	12		
<b>3 Matematický model platformy</b>	<b>13</b>		
3.1 Model motoru .....	13		

## Obrázky

2.1 Rozložení senzorů a akčních členů na platformě .....	4	3.5 Naměřená charakteristika koeficientu tahu .....	20
2.2 Blokové elektrické schéma platformy .....	4	3.6 Naměřená charakteristika koeficientu kroutivého momentu ..	20
2.3 Detail stavícího mechanismu ....	5	3.7 Model charakteristiky koeficientu tahu .....	21
2.4 Schéma elektrického obvodu pro měření rychlosti otáčení .....	6	3.8 Model charakteristiky koeficientu kroutivého momentu .....	22
2.5 Schéma elektrického obvodu pro měření proudu.....	7	3.9 Porovnání naměřených a simulovaných průběhů pro $\beta = 15^\circ, v = 5\text{m/s}$ .....	23
2.6 Schéma elektrického obvodu pro měření tahu .....	8	3.10 Porovnání naměřených a simulovaných průběhů pro $\beta = 20^\circ, v = 7\text{m/s}$ .....	24
2.7 Grafické znázornění kalibrace měření tahu a proudu .....	10	4.1 Závislosti příkonu pohonu na tahu pro $v = 0\text{m/s}$ .....	26
2.8 Naměřené průběhy pro $\beta = 10^\circ, v = 0\text{m/s}$ .....	11	4.2 Závislosti účinností pohonu ....	26
3.1 Náhradní zapojení BLDC motoru a jeho funkce, převzato z [1] .....	14	4.3 Simulace "letu po okruhu" .....	28
3.2 Průběhy fázových napětí vůči zemi regulátoru pro $\tau = 75\%$ .....	15		
3.3 Porovnání proudů zdroje podle plného a zjednodušeného modelu .	17		
3.4 Měření v aerodynamickém tunelu	19		



## Tabulky

2.1 Struktury zpráv .....	9
2.2 Rozsahy vstupů a výstupů vytvořené platformy .....	12



# Kapitola 1

## Úvod

Pevná vrtule se vyznačuje účinností významně závislou na letovém režimu, zejména na letové rychlosti. Vrtule zpravidla bývá navržena tak, že dosahuje optimální účinnosti při cestovním režimu. Z omezení rychlosti otáčení a kroutivého momentu motoru plynou omezení na dosažitelný tah.

Stavitelná vrtule obsahuje mechanismus natáčení vrtulových listů okolo jejich os. To zvětšuje rozsah letových rychlostí a požadavků na tah, při nichž lze vrtuli provozovat. Použití stavitelné vrtule umožňuje výrazně snížit pokles účinnosti s rostoucí odlišností režimu letu od cestovního režimu.

V praxi je možné se setkat se třemi přístupy řízení tahu stavitelné vrtule.

- Pilot dle letového režimu nastaví úhel vrtulových listů a následně nastaví příпуст motoru tak, aby bylo dosženo požadovaného tahu.
- Pilot nastaví dle letového režimu požadovanou rychlost otáčení, kterou regulátor udržuje změnou úhlu vrtulových listů. Následně pilot nastaví příпуст motoru tak, aby bylo dosženo požadovaného tahu.
- U letounů starší konstrukce je možné se setkat s mechanickým regulátorem konstrukce podobné odstředivému regulátoru. Pilot pak ovládá pouze příпуст motoru.

## ■ 1.1 Cíle práce

Práce směřuje k návrhu algoritmů pro automatické řízení přípusti motoru a úhlu nastavení vrtulových listů dle požadavku na tah tak, aby pohon pracoval s optimální účinností. Stěžejní částí práce je výroba experimentální platformy splňující následující požadavky.

- Měření rychlosti otáčení vrtule
- Měření tahu vrtule
- Měření proudu odebíraného motorem prostřednictvím regulátoru a tím nepřímé měření zetěžovacího momentu motoru.
- Řízení úhlu nastavení vrtule
- Řízení přípusti elektrického motoru a tím nepřímé řízení momentu

Platforma nebude vybavena funkcí měření elektrického napětí zdroje, neboť bude použit zdroj laboratorní. Platforma bude použita pro měření charakteristiky pohonu BLDC motoru se stavitelnou vrtulí. Naměřená data budou zohledněna při tvorbě matematického modelu pohonu a rovněž poslouží pro jeho identifikaci. S využitím identifikovaného matematického modelu bude vytvořen algoritmus pro výběr optimálního úhlu nastavení vrtule a přípusti dle letové rychlosti a požadavku na tah. Následně bude navrženo jednoduché řízení. Práce bude zakončena ověřením funkčnosti navrženého řízení.

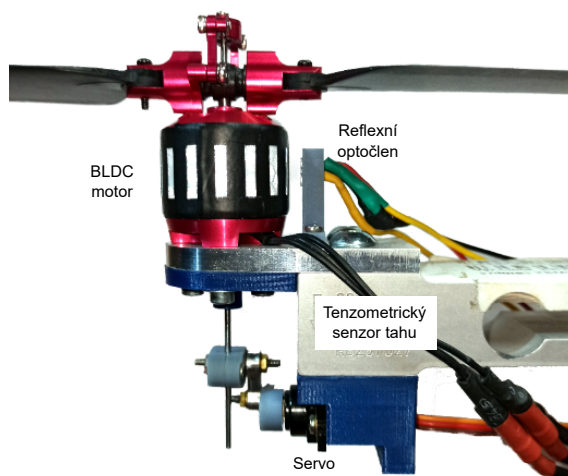
## Kapitola 2

### Experimentální platforma

Kapitola se zabývá návrhem experimentální platformy dle požadavků uvedených v předchozí části. V kapitole je popsán koncept konstrukce, následuje detailnější popis realizace se stručným komentářem výběru použitých komponentů. Kapitola je zakončena kalibrací platformy a ověřením její funkčnosti.

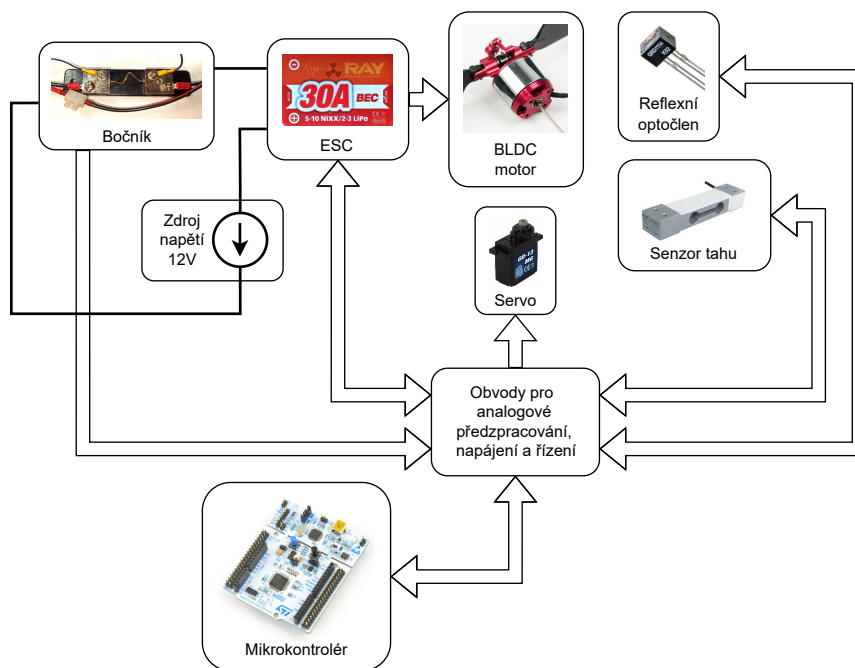
#### 2.1 Konstrukce platformy

Konstrukce platformy je založena na použití komponentu BLDC motoru se stavitelnou vrtulí, který byl poskytnut Katedrou řídicí techniky FEL ČVUT. Úhel nastavení vrtulových listů je nastavován táhlem, procházejícím dutou hřídelí motoru. Jako akční člen pro stavění vrtulových listů je použito servo s převodním mechanismem na lineární posuv táhla. BLDC motor je řízen prostřednictvím elektronického kontroléru rychlosti otáčení (ESC.) Měření rychlosti otáčení vrtule je založeno na použití reflexního optočlenu. Pro měření odběru proudu ESC je použit bočník. Tah vrtule je měřen tenzometrickým snímačem zatížení. Pro řízení akčních členů, vyhodnocování dat senzorů a komunikaci s nadřazeným zařízením je použit mikrokontrolér z rodiny STM32. Platforma je napájena zdrojem elektrického napětí 12 V. Součástí ESC je obvod pro eliminaci baterie (BEC,) který je zdrojem elektrického napětí 5 V. Toho je využito pro napájení senzorů, serva a elektrických obvodů pro analogové předzpracování výstupů senzorů. Detail platformy s popisem akčních členů a senzorů je zachycen na obrázku 2.1. Zjednodušené elektrické schéma platformy je znázorněno na obrázku 2.2.



**Obrázek 2.1:** Rozložení senzorů a akčních členů na platformě

Komponent BLDC motoru se stavitelnou vrtulí je připevněn na duralové destičce tloušťky 5 mm, ke které je rovněž připevněn držák reflexního optočlenu. K destičce je též připevněno vedení táhla s mosazným kluzným pouzdem. Duralová destička je připevněna na konec tenzometrického snímače zatížení šrouby M6x20. Na druhou stranu tenzometru je šrouby M6x8 přichycen držák serva.



**Obrázek 2.2:** Blokové elektrické schéma platformy

### 2.1.1 Řízení přípusti motoru

Pro řízení přípusti BLDC motoru byl zvolen regulátor otáček RAY R-30B, který byl k dispozici. Jedná se o regulátor pro bezsenzorový BLDC motor, jaký je v komponentu se stavitelnou vrtulí použit. Požadavek na výkon motoru je regulátoru předáván signálem s pulzní šířkovou modulací o periodě 20 ms a střídou v rozmezí 5 – 10 %. Funkce regulátoru a motoru bude popsána v kapitole Matematický model platformy, v části Model motoru 3.1.

### 2.1.2 Stavění úhlu vrtule

Úhel nastavení vrtulových listů je na komponentu BLDC motoru se stavitelnou vrtulí nastavován táhlem, procházejícím dutou osou motoru. Táhlo je uchyceno k servu přes klikový mechanismus, který kopíruje parametry stavícího mechanismu na motoru. Díky tomu není třeba řešit kinematickou úlohu, neboť úhel natočení serva odpovídá nastavenému úhlu vrtulových listů. Klikový mechanismus je složen z plastové páky serva, plastové objímky táhla, duralové kliky a ocelových os o průměru 2 mm. Pro eliminaci vůle způsobené pružností táhla je táhlo uloženo v mosazném kluzném pouzdře. Navržený mechanismus s popisem jednotlivých dílů je zobrazen na obrázku 2.3. Pro porovnání je obrázek doplněn o detail stavícího mechanismu na komponentu BLDC motoru se stavitelnou vrtulí.



Obrázek 2.3: Detail stavícího mechanismu

Jako akční člen je použito servo GO-13MG s kroutivým momentem 20 N cm při použitím napájení 5 V a rozsahem natočení 0 – 90°. Požadavek na nastavení úhlu je servu předáván signálem s pulzní šířkovou modulací o periodě 20 ms a střídou v rozmezí 5 – 10 %. Kroutivý moment serva lze požadovat za dostatečný podle následující úvahy.

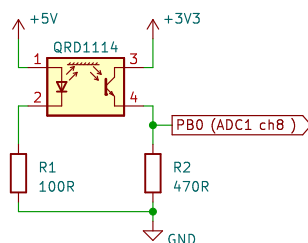
Moment serva je ekvivalentní klopivému momentu vrtulových listů. Vrtulový list má tenký profil, blízký profilu symetrickému s maximální tloušťkou profilu v blízkosti náběžné hrany. Osa naklápění vrtulového listu, vůči které nás

klopivý moment zajímá, je v blízkosti náběžné hrany vrtulového listu. Střední délku tětiny listu lze odhadnout na 2 cm a tah vrtule při experimentech nepřesáhl 10 N.

Rozložení tlaku podél symetrického profilu s maximální hloubkou profilu v blízkosti náběžné hrany je charakteristické s úhlem náběhu se zvýrazňujícím poklesem tlaků na horní straně profilu, v blízkosti náběžné hrany. Při nulovém úhlu náběhu je klopivý moment nulový. Tah vrtule lze pro tenký profil aproximovat plošným integrálem rozdílu tlaku na dolní a horní straně profilu přes vrtulové listy. Lze tedy očekávat, že součin tahu vrtule a střední délky tětiny vrtulového listu bude řádově menší než klopivý moment vrtulových listů vzhledem k ose jejich naklápění.

### 2.1.3 Měření otáček

Pro měření rychlosti otáčení vrtule byl použit reflexní optočlen QRD1114. Testován byl rovněž reflexní optočlen CNY70. Ten však oproti optočlenu QRD1114 projevil vyšší citlivost na okolní osvětlení a nižší citlivost na odražené světlo. Na plášť motoru byla nalepena reflexní páska, přes kterou byla nalepena matná, černá páska s vyřezanými obdélníky o šířce 2,5 mm, s rozestupy 3,5 mm. Na plášti motoru je vzor s třiceti přechody mezi materiály s rozdílnou odrazivostí, které je možné detekovat reflexním optočlenem. Plášť motoru pokrytý výše popsaným vzorem je zachycen na obrázku 2.1.



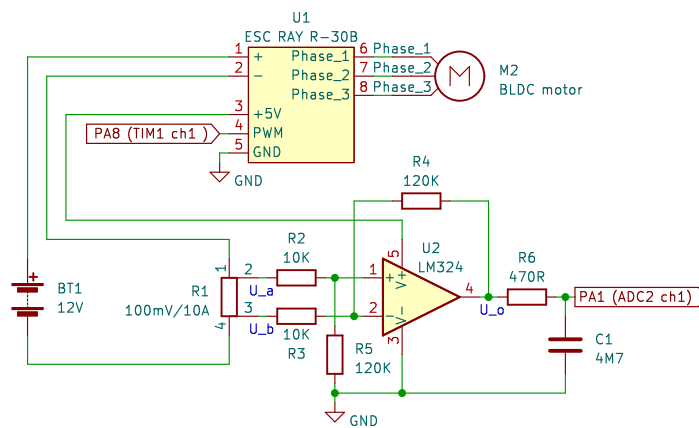
**Obrázek 2.4:** Schéma elektrického obvodu pro měření rychlosti otáčení

Zapojení reflexního optočlenu je znázorněno na schématu 2.4. Emitorový proud fototranzistoru je na rezistoru R2 převáděn na napětí, měřené AD převodníkem ADC1 (CH8), který je zapojen na pinu PB0 mikrokontroléru. Rezistory R1, R2 jsou fyzicky umístěny v blízkosti optočlenu. Výstup senzoru je tak přenášen napětovou smyčkou, která je pro přenos signálu s vyšší frekvencí (3 KHz při  $12000 \text{ ot min}^{-1}$ ) vhodnější než smyčka proudová. Hodnoty  $R_1$  a  $R_2$  byly voleny tak, aby byl reflexní optočlen provozován v podmínkách, pro které je v produktové dokumentaci [2] uváděna doba náběhu  $t_r = 10 \mu\text{s}$  a doba sestupu  $t_f = 50 \mu\text{s}$ . Vzhledem k vysoké vzorkovací frekvenci (18 KHz) bylo přistoupeno k napájení diody konstantním napětím.



### 2.1.4 Měření elektrického proudu

Pro měření elektrického proudu odebíraného motorem prostřednictvím regulátoru byl použit odporový bočník FL-2 o rezistivitě 10A/100mV. Bočník byl připojen na záporný přívod napájení regulátoru. Napětí na bočníku je přivedeno na vstup rozdílového zesilovače. Na výstup zesilovače je připojen R-C článek dolní propust s časovou konstantou 2,2 ms. Výstupní napětí dolní propusti je měřeno ADC2 (CH1), který je zapojen na pinu PA1 mikrokontroléru. Elektrický obvod pro měření proudu je znázorněn na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Schéma elektrického obvodu pro měření proudu

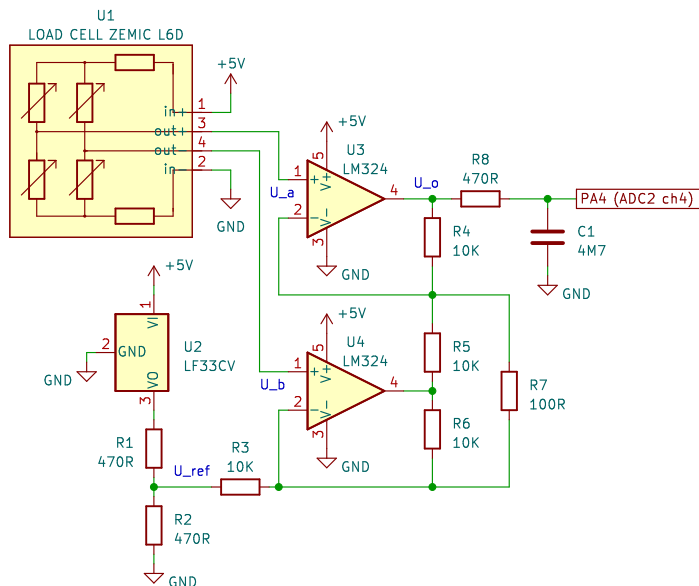
Za předpokladu rovností  $R_2 = R_3$ ,  $R_4 = R_5$  a ideálního operačního zesilovače je výstupní napětí zapojeného rozdílového zesilovače dáno vztahem 2.1.

$$U_o = (U_a - U_b) \frac{R_4}{R_2} \quad (2.1)$$

### 2.1.5 Měření tahu vrtule

Pro měření tahu vrtule byl použit tenzometrický senzor zatížení ZEMIC L6D třídy C3 pro maximální zatížení 3 kg. Citlivost Wheatstoneova můstku tenzometrického senzoru je při zvoleném napájení 5 V přibližně  $3,3 \text{ mV kg}^{-1}$  [3]. Výstupní napětí Wheatstoneova můstku je zesilováno nesymetrickým přístrojovým zesilovačem. Na výstup zesilovače je připojen R-C článek dolní propust s časovou konstantou 2,2 ms. Výstupní napětí dolní propusti je

měřeno ADC2 (CH4), který je zapojen na pinu PA2 mikrokontroléru. Schéma elektrického obvodu pro měření tahu je znázorněno na obrázku 2.6.



**Obrázek 2.6:** Schéma elektrického obvodu pro měření tahu

Za předpokladu rovnosti  $R_3 = R_4 = R_5 = R_6$  a ideálního operačního zesilovače je výstupní napětí zapojeného rozdílového zesilovače dáno vztahem 2.2.

$$U_o = 2 (U_a - U_b) \left( 1 + \frac{R_3}{R_7} \right) + U_{ref} \quad (2.2)$$

### 2.1.6 Mikrokontrolér

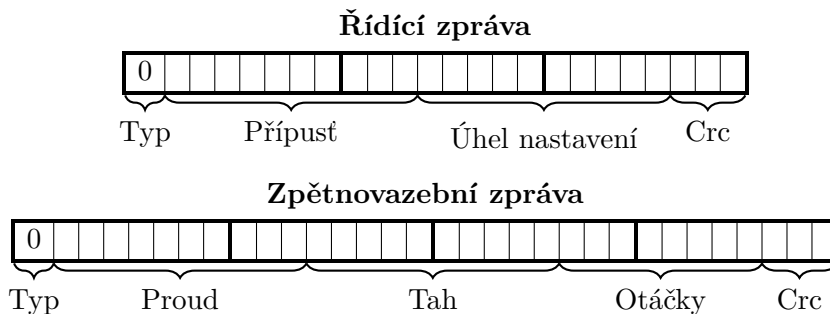
Pro řízení akčních členů, vyhodnocování dat senzorů a komunikaci s nadřazeným zařízením je použit mikrokontrolér STM32 NUCLEO-F446RE. Mikrokontrolér převádí výstupní napětí obvodů pro analogové zpracování výstupů senzorů tahu a proudu během komunikační periody opakovaně a odesílá průměry měření. Mikrokontrolér byl použit, jelikož byl k dispozici a pro požadovanou funkci je více než postačující. Mikrokontrolér byl naprogramován v prostředí STM32CubeIDE. Kód nahraný v mikrokontroléru je dodán v příloze.

### 2.1.7 Komunikace platformy

Mikrokontrolér komunikuje po sběrnici UART s modulační rychlostí 112500 Bd. Mikrokontrolér přijímá tři-bajtové zprávy a odesílá zprávy čtyř-bajtové. Komunikace je nespolehlivá (odesílatel není informován v případě, že při přenosu dojde k chybě.) Pro detekci chyb přenosu je použit algoritmus CRC s generujícím polynomem  $x^3 + x + 1$ .

Komunikace je založena na příjmu řídicích zpráv a odesílání zpráv zpětnovazebních. Řídicí zpráva slouží k přenosu dat o požadavku na úhel nastavení vrtule a přípuštění regulátoru. Obě veličiny jsou přenášeny s rozlišením 10 bitů v provozním rozsahu, viz. tabulku 2.2. Zpětnovazební zpráva slouží k přenosu dat o velikosti elektrického proudu zdroje, tahu a rychlosti otáčení vrtule. Zpětnovazební zprávy jsou pravidelně odesílány s komunikační periodou  $T_F = 10$  ms. Proud a tah jsou přenášeny s rozlišením 10 bitů v provozním rozsahu, viz. tabulku 2.2. Rychlost otáčení vrtule je přenášena coby počet přechodů mezi materiály s rozdílnou odrazivostí, detekovaných reflexním optočlenem během periody  $T_F$ .

První bit každé zprávy kóduje typ zprávy. Výše zmíněné zprávy začínají bitem 0. Typ zprávy byl zaveden z důvodu umožnění snadného rozšíření komunikačního protokolu. Poslední tři bity každé zprávy obsahují redundantní data, vypočtená algoritmem CRC. Struktury zpráv jsou znázorněny v tabulce 2.1.



Tabulka 2.1: Struktury zpráv

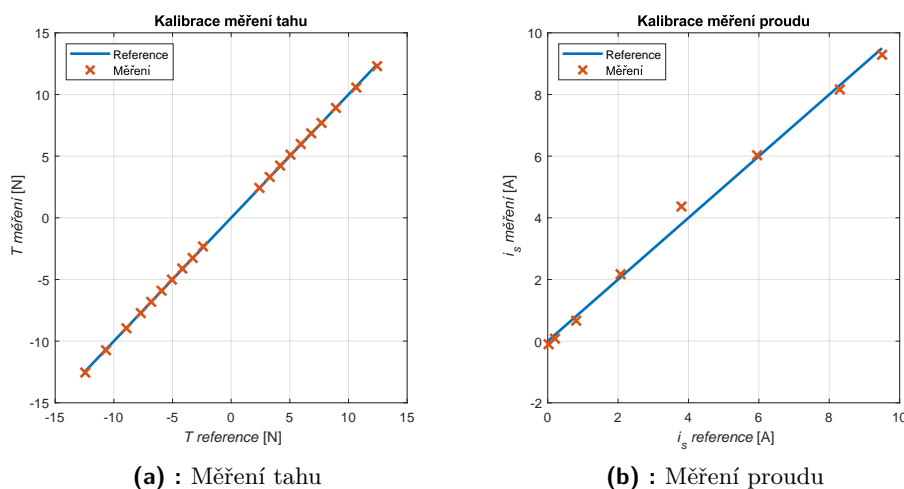
## 2.2 Kalibrace

Měření otáček bylo kalibrováno změřením napětí na emitoru fototranzistoru při snímání reflexní a černé části vzoru na plášti motoru. Jako rozhodovací

úroveň byla použita průměrná hodnota. Funkce měření rychlosti otáčení byla ověřena výpočtem rychlosti otáčení z periody komutace motoru, stanovené z naměřených fázových průběhů viz. obrázek 3.2. K takové metodě výpočtu rychlosti otáčení je třeba zmínit, že použitý BLDC motor má šest pól-párů. Frekvence otáčení motoru je dána frekvencí komutace podělenou počtem pól-párů.

Z naměřených napětí na výstupech obvodů pro analogové předzpracování výstupů senzorů lze vypočítat ze znalostí zesílení a parametrů senzorů hodnoty měřených veličin. Tenzometrický snímač zatížení i bočník mají lineární závislost výstupního napětí na měřené veličině.

Kalibrace měření tahu a proudu spočívala ve stanovení koeficientů afinního zobrazení hodnot vypočtených z měření na hodnoty referenční. Tato úloha byla řešena metodou nejmenších čtverců. Na obrázku 2.7 je znázorněno porovnání měřených a referenčních hodnot po provedení kalibrace.

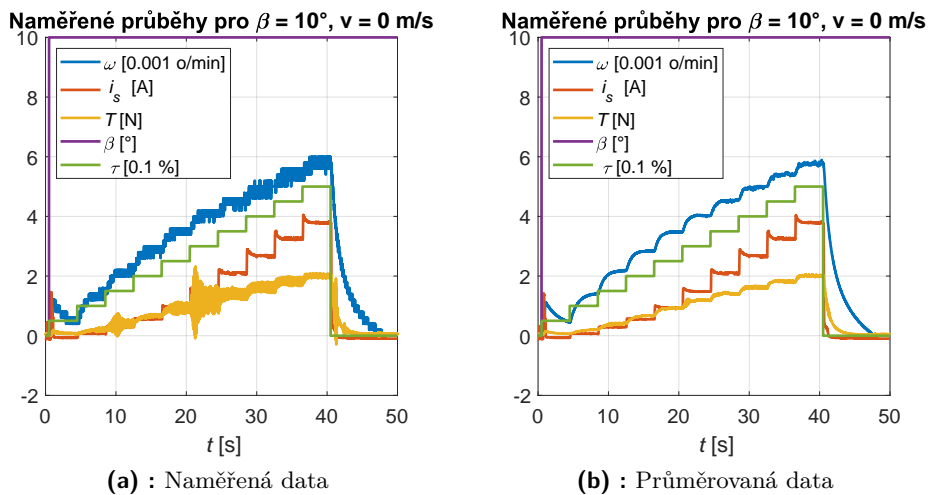


**Obrázek 2.7:** Grafické znázornění kalibrace měření tahu a proudu

Referenční hodnoty tahu byly vypočteny z vážení zavěšovaných závaží kuchyňskou vahou. Referenční hodnoty proudu byly odečteny z laboratorního zdroje při měření se zátěží způsobenou provozem platformy. Důsledkem nestálosti zátěže platformy jsou větší odchylky v měření patrné na obrázku 2.7b. Ke kalibraci bez zátěže, použitím zdroje jako proudového nebylo přistoupeno pro vysoké souhlasné rušení generované spínáním zdroje.

## 2.3 Demonstrace funkce

Na obrázku 2.8a jsou zobrazeny průběhy měření skokových odezev přípusti pro úhel nastavení  $\beta = 10^\circ$  při rychlosti nabíhajícího proudu  $v = 0 \text{ m/s}$ . Na obrázku 2.8b jsou pak zobrazeny průměrované průběhy téhož měření. Rychlost otáčení byla průměrována z měření po  $13 T_F$ , proud z měření po  $3 T_F$  a tah z měření po  $9 T_F$ . Zmíněné průměrování bude rovněž použito při porovnávání simulovaných a měřených průběhů při ověřování matematického modelu platformy.



**Obrázek 2.8:** Naměřené průběhy pro  $\beta = 10^\circ$ ,  $v = 0 \text{ m/s}$

V demonstrovaném měření se projevují dva jevy, které budou budou patrné ve většině naměřených průbězích. Při rozběhu motoru regulátor nastavuje vyšší přípust. Při rychlosti otáčení vrtule  $\omega \approx 4000 \text{ o/min}$  dochází k překryvu frekvence vibrací vrtule a vlastního kmitočtu tenzometrického snímače zatížení.

## 2.4 Shrnutí

Experimentální platforma byla úspěšně zkonstruována, navržené analogové obvody byly realizovány na pájivém poli. Je předpokládáno, že platforma bude napájena zdrojem elektrického napětí 12 V. Rozsahy vstupních a platformou měřených veličin jsou zaneseny v tabulce 2.2.

	Veličina	Rozsah	
$\beta$	Úhel nastavení	$\langle -45; 45 \rangle$	$^{\circ}$
$\tau$	Přípust	$\langle 0; 100 \rangle$	%
$\omega$	Otáčky motoru	$\langle 0; 12000 \rangle$	$\text{min}^{-1}$
$i_s$	Elektrický proud	$\langle 0; 14 \rangle$	A
$T$	Tah vrtule	$\langle -14; 14 \rangle$	N

**Tabulka 2.2:** Rozsahy vstupů a výstupů vytvořené platformy

## Kapitola 3

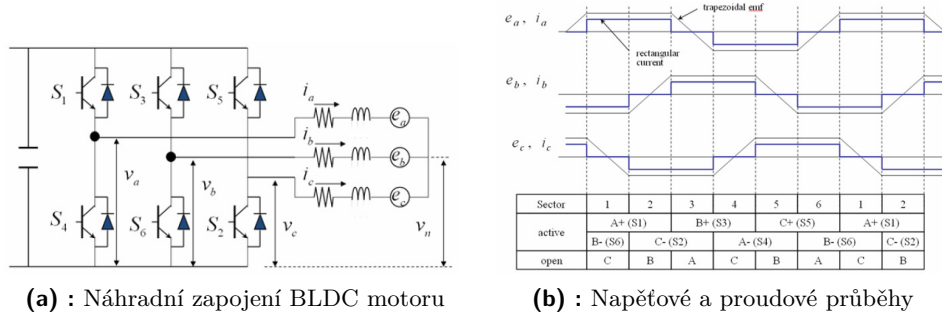
### Matematický model platformy

Cílem kapitoly je vytvořit matematický model zkonstruované platformy. Postupně jsou modelovány jednotlivé komponenty. Stavící mechanismus pro svoji rychlou odezvu modelován nebude, respektive bude uvažována shoda požadovaného a nastaveného úhlu vrtule. Kapitola je zakončena identifikací vytvořeného modelu a porovnáním simulovaných průběhů s naměřenými.

#### 3.1 Model motoru

Cílem je vytvořit model motoru s regulátorem mající vstupy napětí zdroje  $u_s$ , přípust regulátoru  $\tau$  a kroutivý moment vrtule  $Q$ . Výstupy modelu jsou aritmetická hodnota proudu odebíraného ze zdroje  $i_s$  a rychlost otáčení rotoru motoru  $\omega$ .

BLDC motor s připojeným regulátorem lze popsat náhradním zapojením na obrázku 3.1a. Na obrázku 3.1b jsou pak zanzorněny spínací sekvence pro zajištění komutace a teoretické průběhy fázových proudů a zpětných indukovaných napětí.



(a) : Náhradní zapojení BLDC motoru

(b) : Napětové a proudové průběhy

**Obrázek 3.1:** Náhradní zapojení BLDC motoru a jeho funkce, převzato z [1]

Podle náhradního zapojení platí napětové rovnice

$$V_a = R i_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a , \quad (3.1)$$

$$V_b = R i_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b , \quad (3.2)$$

$$V_c = R i_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c , \quad (3.3)$$

kde  $V_x$  jsou fázová napětí,  $i_x$  fázové proudy,  $e_x$  zpětná indukovaná napětí fáze,  $R$  rezistivita fáze a  $L$  indukčnost fáze.

Přeměna elektrické energie na mechanickou lze popsat rovnicí

$$T_e = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) , \quad (3.4)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost rotoru a  $T_e$  elektromagnetický moment. Je namístě zmínit, že jednotkou  $\omega$  je rad/s, ale pro lepší představu budou v textu její hodnoty uváděny v jednotkách o/min.

Zpětná elektromotorická napětí lze popsat rovnicemi

$$e_a = G \omega f(\theta) , \quad (3.5)$$

$$e_b = G \omega f\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) , \quad (3.6)$$

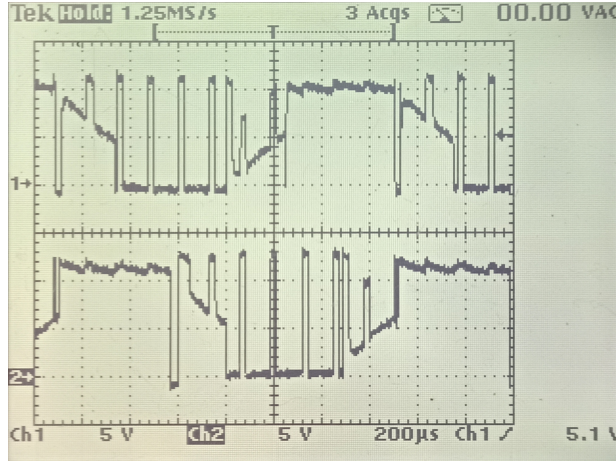
$$e_c = G \omega f\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) , \quad (3.7)$$

kde  $G$  je konstanta zpětného indukovaného napětí,  $\theta$  elektrický úhel natočení rotoru a  $f$  funkce tvaru zpětného indukovaného napětí viz. obrázek 3.1b.

Výše popsaný model BLDC motoru byl převzat ze zdrojů [4], [5], [1]. Uvedený model je pro simulaci a návrh řízení komplikovaný a bude zjednodušen.



Motor je řízen na základě spínací sekvence zachycené na obrázku 3.1b. Jedna fáze je odpojena a bude předpokládáno, že jí neteče elektrický proud. Proud tekoucí zbylými dvěma fázemi je regulován přepínáním záporné a kladné svorky napájení u jedné z fází. Druhá fáze je připojena na kladnou svorku napájení. Spínání probíhá s periodou  $T = 125 \mu\text{s}$  [6] a střídou rovnou přípusti regulátoru  $\tau \in (0; 1)$ . Rovnost střídou a přípusti byla zjištěna z naměřených fázových průběhů pro různé  $\tau$ .



**Obrázek 3.2:** Průběhy fázových napětí vůči zemi regulátoru pro  $\tau = 75\%$

Na obrázku 3.2 jsou zachyceny naměřené průběhy dvou fázových napětí, při přípusti regulátoru  $\tau = 75\%$ , rychlosti otáčení  $\omega = 6800 \text{ o/min}$ , při zatížení vrtulí s úhlem satevení  $\beta = 15^\circ$ . Průběhy byly naměřeny osciloskopem TEKTRONIX THS720.

Bude předpokládáno, že během periody spínání  $T$  jsou zpětná indukovaná napětí konstantní. Matematický model tak lze zjednodušit do tvaru

$$u = R i + L \frac{di}{dt} + e, \quad (3.8)$$

$$T_e = \frac{1}{\omega} e i, \quad (3.9)$$

$$e = G \omega, \quad (3.10)$$

přičemž značení veličin zůstává, ale nyní se nevztahuje k fázi nýbrž k obvodu tvořenému dvěma spínanými fázemi a zdrojem elektrického napětí  $u$  obdélníkového průběhu se střídou  $\tau$  a napětovými úrovněmi  $u_s$  a  $0 \text{ V}$ .

Nyní budou vyšetřeny závislosti středních hodnot proudu odebíraného zdrojem a proudu tekoucím spínanými fázemi. Řešením diferenciální rovnice 3.8 pro jednu spínací periodu je průběh proudu

$$i = \frac{u - e}{R} + \left( I_0 - \frac{u - e}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)}, \text{ kde} \quad (3.11)$$

$$u = \begin{cases} u_s & t < \tau T \\ 0 & \geq \tau T \end{cases}, \quad I_0 = \begin{cases} I_{0L} & t < \tau T \\ I_{0H} & \geq \tau T \end{cases}, \quad t_0 = \begin{cases} 0 & t < \tau T \\ \tau T & \geq \tau T \end{cases}$$

Řešením soustavy dvou rovnic 3.11 pro odezvy v časech  $t \in \langle 0; \tau T \rangle$  a  $t \in \langle \tau T; T \rangle$  s uvážením, že koncová hodnota proudu jednoho průběhu je počáteční hodnotou druhého a naopak lze určit hodnoty  $I_{0H}$  a  $I_{0L}$ . Pak lze určit střední hodnotu proudu dodávaného zdrojem  $i_s$  a střední hodnotu proudu tekoucího spínanými fázemi  $i_e$ . Hodnoty středních hodnot proudů byly zavedeny dle vztahů 3.12 a 3.13. Výsledky jejich řešení jsou vztahy 3.14 a 3.15.

$$i_s = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=\tau T} i \, dt \quad (3.12)$$

$$i_e = \frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} i \, dt \quad (3.13)$$

$$i_s = \frac{\tau (u_s - e)}{R} + \frac{L u_s \left( e^{\frac{RT}{L}} - e^{\frac{R\tau T}{L}} \right) \left( e^{-\frac{R\tau T}{L}} - 1 \right)}{R^2 T \left( e^{\frac{RT}{L}} - 1 \right)} \quad (3.14)$$

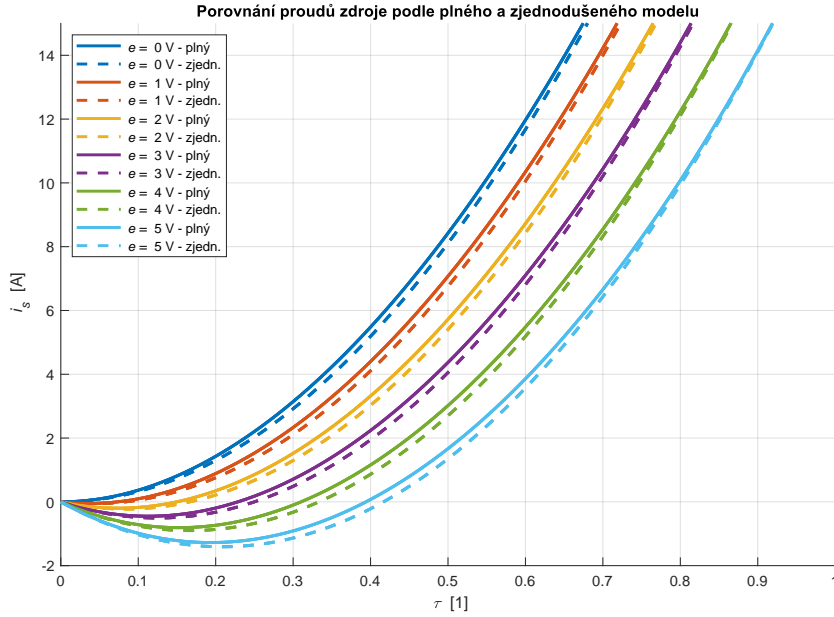
$$i_e = \frac{\tau u_s - e}{R} \quad (3.15)$$

$$i_s \approx \tau i_e \quad (3.16)$$

Výraz 3.14 je poměrně komplikovaný, lze ho však aproximovat výrazem 3.16. Tím bude zavedena chyba způsobená nelineární závislostí ztrátového výkonu na proudu. Způsobená chyba při  $u_s = 12V$ ,  $R = 370m\Omega$  a  $L = 33\mu H$  je graficky znázorněna na obrázku 3.3. Hodnoty  $R, L$  byly naměřeny přístrojem CEM DT-9935.

Elektromagnetický moment motoru a součet zatěžovacích momentů musí být v rovnosti

$$T_e = Q + m_0 + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.17)$$



**Obrázek 3.3:** Porovnání proudů zdroje podle plného a zjednodušeného modelu

kde  $Q$  je kroutivý moment vrtule,  $m_0$  třecí moment motoru působící proti směru otáčení,  $J$  moment setrvačnosti vrtule a rotoru motoru.

Dosazením za  $e$  z rovnice 3.10 do rovnice 3.15, zavedením substituce 3.21 vzniká rovnice 3.18. Dosazením vztahů 3.9, 3.10 do 3.17 vzniká rovnice 3.19.

$$u_e = R i_e + G \omega \quad (3.18)$$

$$G i_e = Q + m_0 + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.19)$$

$$i_s = \tau i_e \quad (3.20)$$

$$u_e = \tau u_s \quad (3.21)$$

Soustava rovnic 3.18 a 3.19 bude prohlášena výsledným matematickým modelem samotného motoru. Soustava rovnic 3.20 a 3.21 bude prohlášena výsledným matematickým modelem samotného regulátoru motoru. Model soustavy motoru s regulátorem pak lze popsat soustavou rovnic 3.22 a 3.23.

$$\tau^2 u_s = R i_s + \tau G \omega \quad (3.22)$$

$$\frac{G i_s}{\tau} = Q + m_0 + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.23)$$

Simulinkový model používaný pro simulace byl doplněn o pásmo necitlivosti regulátoru pro  $\tau \in \langle 0; 4, 5\% \rangle$ . Regulátor je nastaven v režimu vypnutého brždění, je-li vstup nulový, je nastaven proud  $i_e$  nulovým. Ve skutečnosti je nulovost  $i_e$  dána rozpojením všech spínacích tranzistorů. Při tvorbě simulinkového modelu bylo předpokládáno, že motor může být součtem momentů  $m_0 + Q$  pouze bržděn.

## 3.2 Model vrtule

Závislosti tahu  $T$  a točivého momentu  $Q$  vrtule lze popsat rovnicemi 3.24, 3.25. Rovnice byly odvozeny na základě rozměrové analýzy. [7], [8]

$$T = \frac{1}{2} \rho D^4 C_T n^2 \quad (3.24)$$

$$Q = \frac{1}{2} \rho D^5 C_Q n^2 \quad (3.25)$$

Ve výše uvedených rovnicích  $\rho$  značí hustotu vzduchu,  $D = 0,29$  m průměr vrtule,  $n$  rychlost otáčení vrtule v otáčkách za sekundu. Koefficienty  $C_T$  a  $C_Q$  jsou funkcemi posanými rovnicemi 3.26 a 3.27. Funkční předpisy  $C_T$  a  $C_Q$  byly stanoveny na základě naměřených průběhů  $C_T$  a  $C_Q$ , znázorněných na obrázcích 3.5 a 3.6.

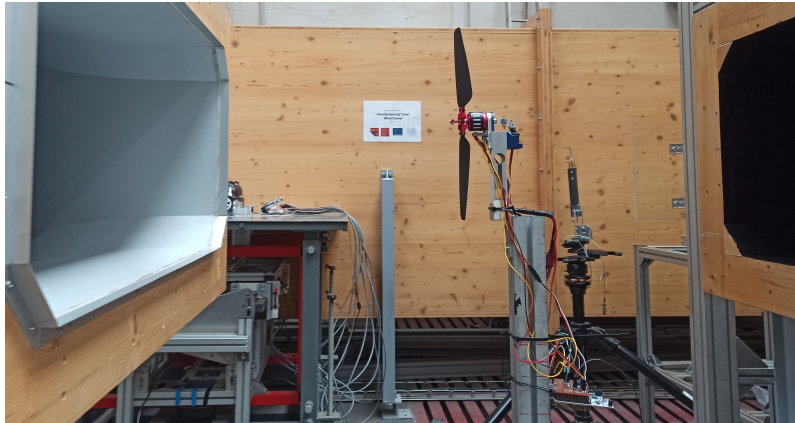
$$C_T = C_{TJ} J + C_{TB} \beta + C_{T0} \quad (3.26)$$

$$C_Q = C_{QJ} J + C_{QJV} J v + C_{QV} v + C_{QVB} v \beta + C_{QB} \beta^2 + C_{Q0} \quad (3.27)$$

$$J = \frac{v}{nD} \quad (3.28)$$

### 3.3 Identifikace modelu

S vytvořenou platformou byla provedena měření v aerodynamickém tunelu ČVUT v Dejvicích. Umístění platformy v komoře aerodynamického tunelu je zachyceno na obrázku 3.4. Měření byla provedena pro letové rychlosti  $v = \{0, 3, 5, 7, 9\}$  m/s s úhly nastavení v rozmezí  $\beta \in \langle 0, 30 \rangle^\circ$  s krokem  $5^\circ$ . Pro jednotlivé kombinace  $v$  a  $\beta$  byla naměřena data pro přípusti  $\tau$  s krokem 5 %.



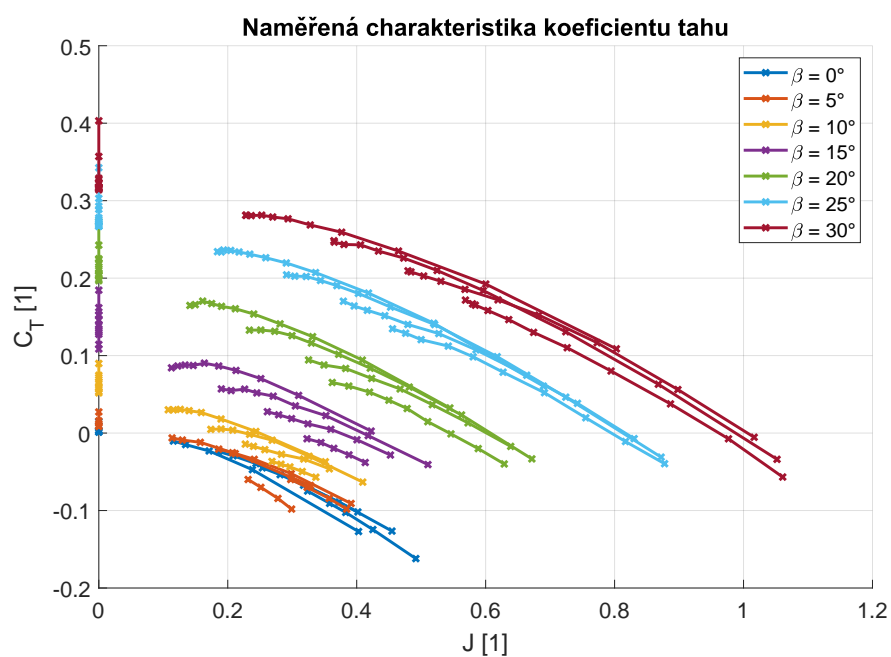
Obrázek 3.4: Měření v aerodynamickém tunelu

Prvním krokem identifikace je výběr dat, na kterých bude model identifikován. S ohledem na výběr provozních konfigurací popsany v kapitole Řízení, části Analýza účinnosti pohonu 4.1 bude model identifikován na měřených datech pro úhly nastavení  $\beta = \{10; 15; 20\}^\circ$ .

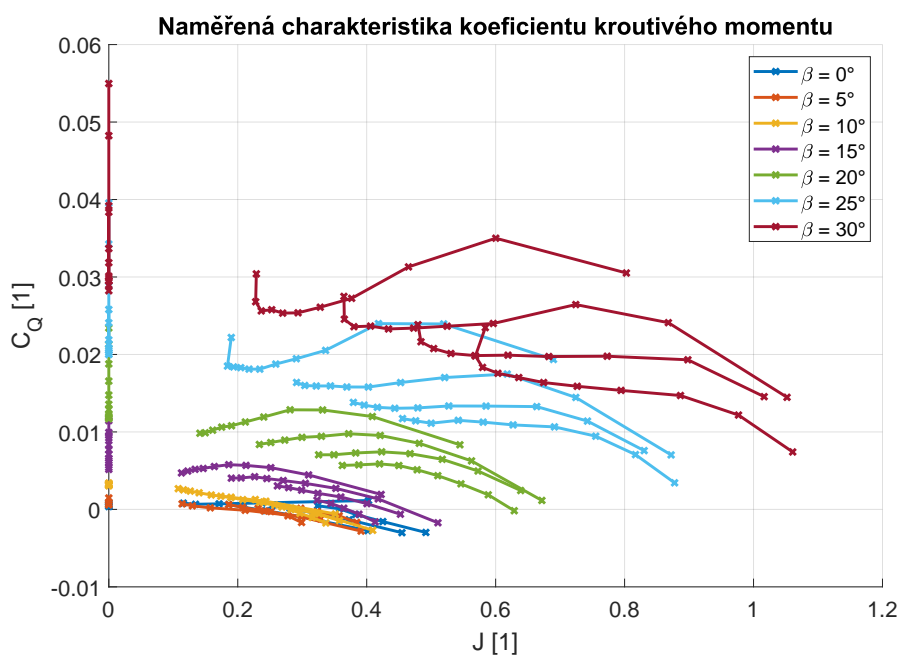
Identifikace parametrů  $G = 4,7 \text{ mV s rad}^{-1}$  a  $R = 0,35 \Omega$  byla provedena řešením přeúčnené soustavy rovnic 3.22 a 3.23 metodou nejmenších čtverců. Velikost zatěžovacího momentu v ustáleném stavu lze na základě modelu motoru určit podle vztahu 3.29.

$$Q + m_0 = \frac{G (\tau u_s - G \omega)}{R} \quad (3.29)$$

Řešením přeúčnené soustavy rovnic 3.29 pro data naměřená bez vrtule byla určena velikost třecího momentu motoru  $m_0 = 5,1 \text{ mN m}$ . Při znalosti  $G$ ,  $R$  a  $m_0$  lze naměřená data interpretovat jako závislosti parametrů  $C_T$  a  $C_Q$  na rychlostním poměru vrtule  $J$  viz. rovnici 3.28. Závislost  $C_T$  je znázorněna na obrázku 3.5, závislost  $C_Q$  na obrázku 3.6. Body spojené lomenou čarou náležejí měření pro tutéž letovou rychlost.



Obrázek 3.5: Naměřená charakteristika koeficientu tahu

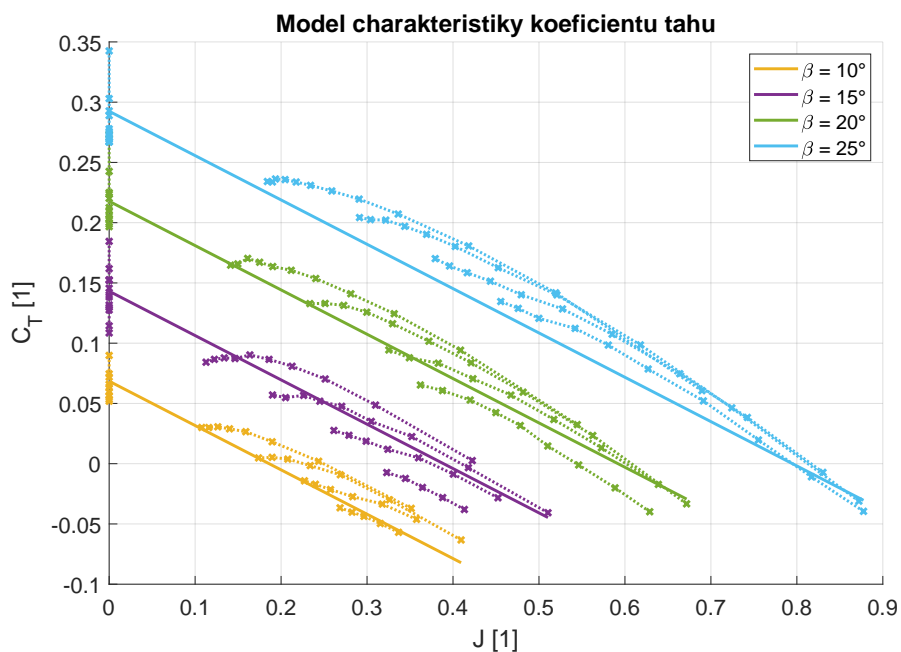


Obrázek 3.6: Naměřená charakteristika koeficientu krouživého momentu

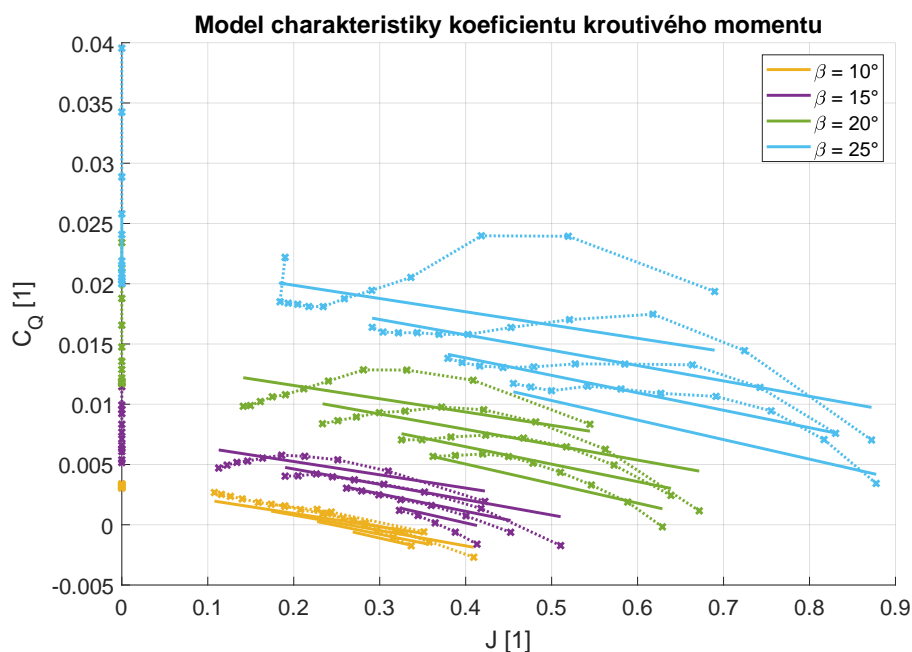
Parametry koeficientů  $C_T$  a  $C_Q$  byly stanoveny řešením přeúřčených soustav rovnic 3.24 a 3.25 po dosazení za  $C_T$  a  $C_Q$  z rovnic 3.26 a 3.27. Data z měření pro

Model byl identifikován na měřených datech pro úhly nastavení  $\beta = \{10; 15; 20\}^\circ$ . Data pro  $\beta = 15^\circ$  byla zahrnuta dvakrát. Uvážením rozdílné velikosti  $C_T$  a  $C_Q$  pro rozdílné  $\beta$ , dostaneme poměr váh dat pro  $\beta$  10:15:20° přibližně 1:4:4. Velikosti kroutivého momentu vrtule byly vypočteny dle vztahu 3.25. Modelovaná závislost  $C_T$  je znázorněna na obrázku 3.5, závislost  $C_Q$  na obrázku 3.6. Body spojené tečkovanou lomenou čarou náležejí měření pro tutéž letovou rychlost a představují naměřenou závislost.

Moment setrvačnosti vrtule a rotoru motru byl stanoven iteračně porovnáváním měřených a simulovaných odezev na skoky v přípusti.



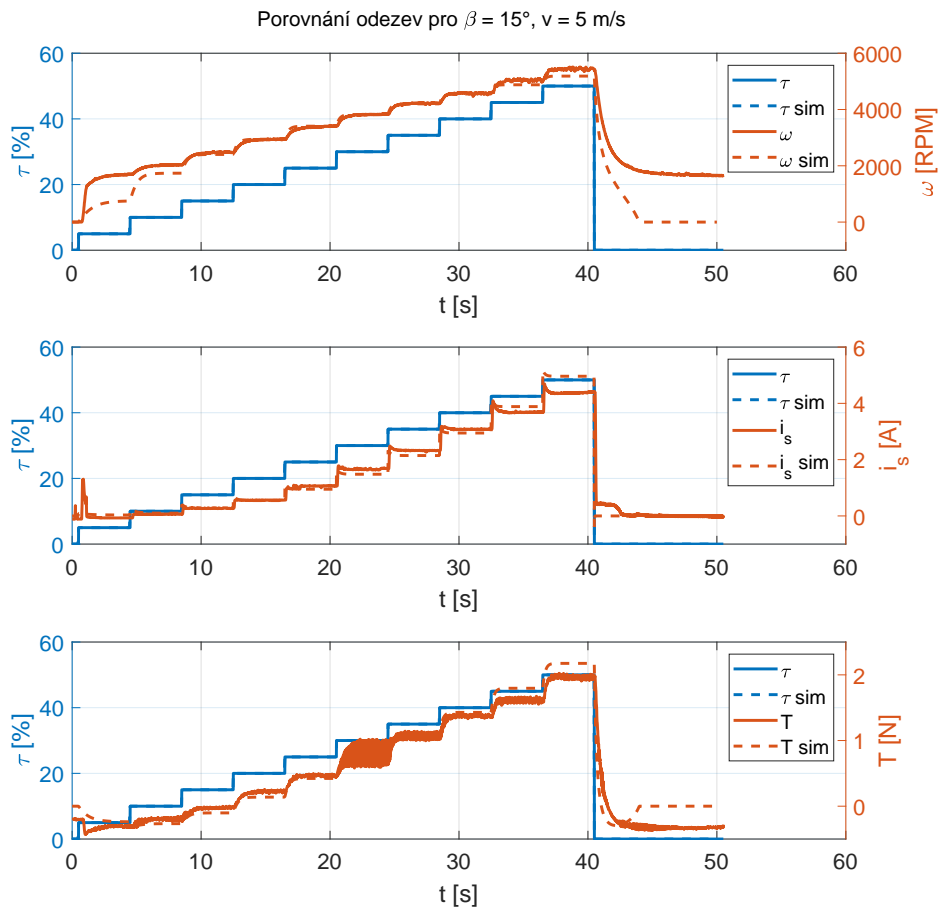
Obrázek 3.7: Model charakteristiky koeficientu tahu



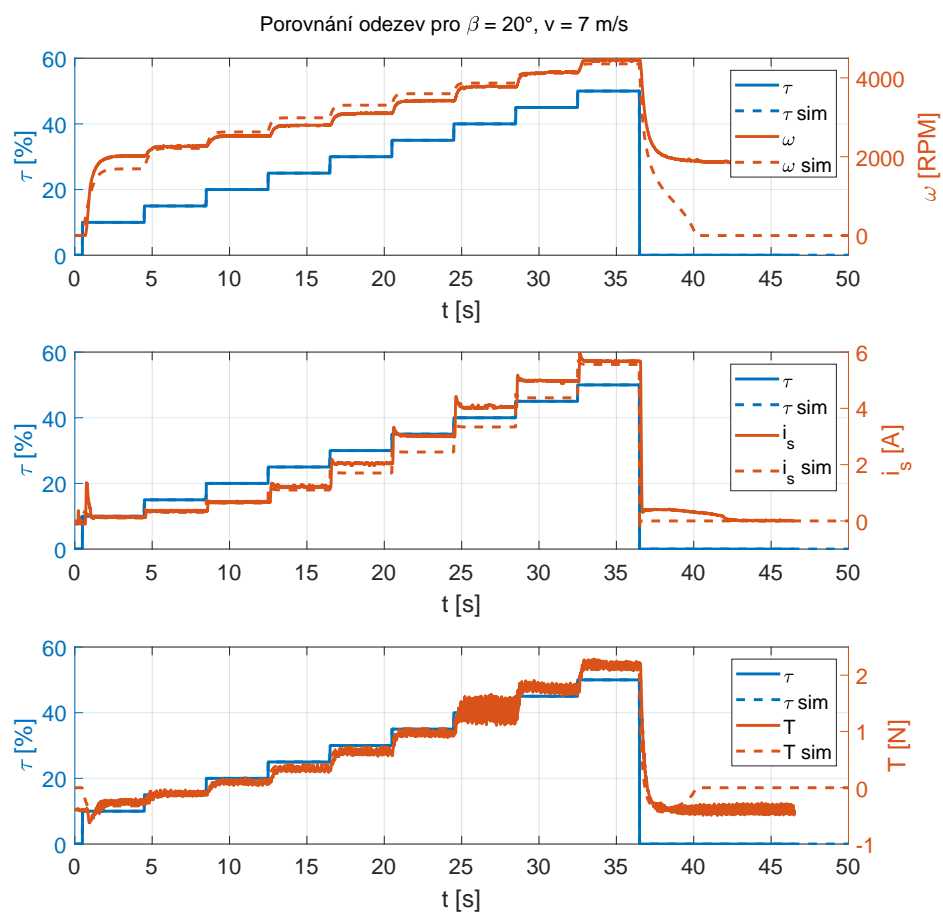
### 3.4 Ověření modelu

Model byl ověřen porovnáním simulovaných a měřených odezev. Porovnání pro  $\beta = 15^\circ, v = 5\text{m/s}$  je znázorněno na obrázku 3.9. Porovnání pro  $\beta = 20^\circ, v = 7\text{m/s}$  je znázorněno na obrázku 3.10. Simulace modelu se ve velkém rozsahu dobře shoduje s měřením. Simulované průběhy se s měřenými rozcházejí při nízkých rychlostech otáčení vrtule. Neshoda je způsobena chybou modelování závislosti  $C_Q$  při nízkých rychlostech otáčení.





**Obrázek 3.9:** Porovnání naměřených a simulovaných průběhů pro  $\beta = 15^\circ$ ,  $v = 5$  m/s



**Obrázek 3.10:** Porovnání naměřených a simulovaných průběhů pro  $\beta = 20^\circ$ ,  $v = 7$  m/s

## Kapitola 4

### Řízení

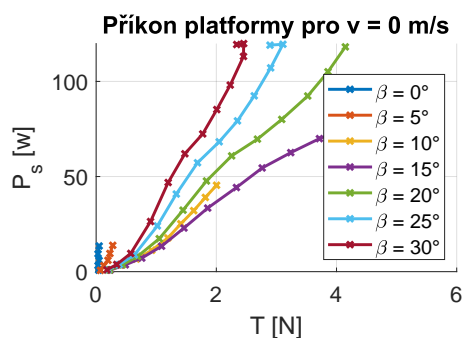
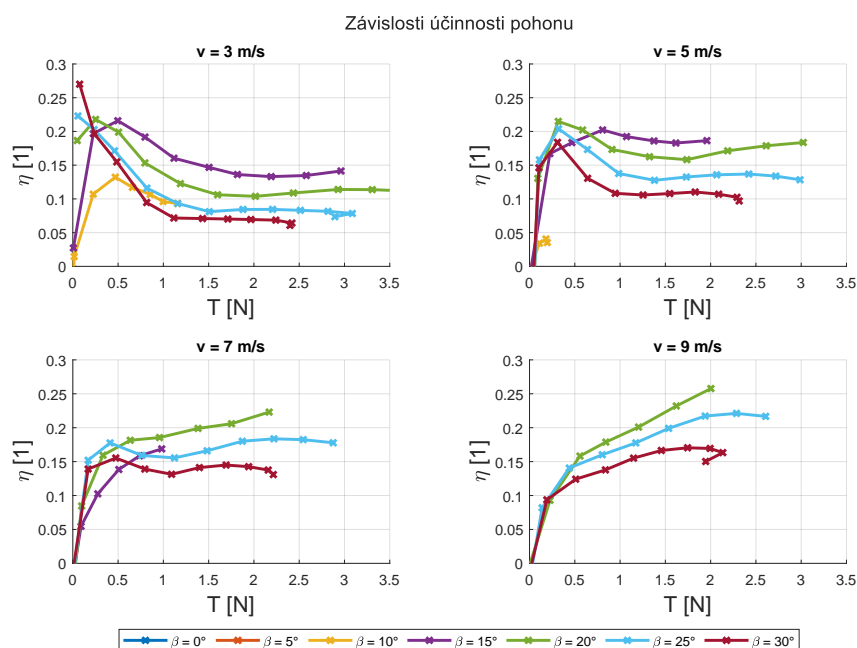
V kapitole je provedena analýza účinnosti pohonu, na základě které je navržena funkce pro výpočet rychlosti otáčení a úhlu nastavení vrtule podle letové rychlosti a požadovaného tahu, s ohledem na dosažení optimální účinnosti pohonu. Následně je navržen PI regulátor rychlosti otáčení vrtule s výstupem přípusti motoru. Na závěr je navržené řízení ověřeno simulací.

#### 4.1 Analýza účinnosti pohonu

Pro nulovou letovou rychlost byla vykreslena závislost příkonu pohonu na tahu a úhlu nastavení vrtule, která je znázorněna na obrázku 4.1. V případě, že je letová rychlost nenulová, je výstižnější úlohu formulovat jako nastavení konfigurace pro optimální účinnost pohonu, kterou lze definovat vztahem 4.1.

$$\eta = \frac{vT}{u_s i_s} \quad (4.1)$$

Z naměřených dat byly pro nenulové letové rychlosti vykresleny závislosti účinnosti pohonu na úhlu nastavení vrtule a generovaném tahu. Závislosti účinnosti pohonu jsou znázorněny na obrázku 4.2.

Obrázek 4.1: Závislosti příkonu pohonu na tahu pro  $v = 0$  m/s

Obrázek 4.2: Závislosti účinností pohonu

Z vykreslených závislostí je patrné že, pro letové rychlosti do  $v = 5$  m/s je z nastavených úhlů nejvhodnější  $\beta = 15^\circ$ . Pro vyšší proměřené letové rychlosti pak  $\beta = 20^\circ$ . Na základě charakteristik 4.2, 4.1 bylo přistoupeno k modelování závislosti optimálního úhlu nastavení podle afinní funkce letové rychlosti 4.2.

$$\beta = k_v v + \beta_0 \quad (4.2)$$

Koeficienty  $\beta_0$  a  $k_v$  byly stanoveny řešením přeuročené soustavy pro  $v = [0; 3; 5; 7; 9]$  m s<sup>-1</sup> a  $\beta = [15; 15; 15; 20; 20]^\circ$ . Aplikací metody nejmenších byly vypočteny koeficienty  $\beta_0 = 13.9^\circ$  a  $k_v = 0.656^\circ$  s<sup>-1</sup>.

## 4.2 Návrh řízení

Při znalosti rychlosti letu lze dle vztahu 4.2 stanovit optimální úhel nastavení vrtulových listů. Z rovnice 3.24 po substituci za  $C_T$  z rovnice 3.26 lze při znalosti  $v$  a  $\beta$  určit rychlost otáčení vrtule

$$n = \frac{\sqrt{(C_{TJ} \frac{v}{D})^2 + \frac{8T}{\rho D^4} (C_{TB} \beta + C_{T0})} - C_{TJ} \frac{v}{D}}{2 (C_{TB} \beta + C_{T0})}. \quad (4.3)$$

Snad je vhodné připomenout, že veličiny  $n$  a  $\omega$  popisují totéž, jen mají jiné jednotky,  $[n] = 1/s$ ,  $[\omega] = \text{rad/s}$ . Pro lepší představu jsou v textu však hodnoty  $\omega$  uváděny v jednotce o/min. Nyní tedy zbývá navrhnout regulátor rychlosti otáčení vrtule. S použitím Simulinkové aplikace Model linearizer byl model platformy, tj. propojené modely motoru a vrtule, linearizován v pracovním bodě  $\tau = 40\%$ ,  $\omega = 4500$  o/min,  $\beta = 15^\circ$ ,  $v = 5$  m/s. Výsledkem je systém s přenosem

$$\frac{\omega}{\tau} = \frac{K_2}{s - K_1} \approx \frac{38,71}{s + 5,4}. \quad (4.4)$$

Navrhován bude PI regulátor. Charakteristický polynom přenosu uzavřené smyčky lze napsat ve tvarech

$$s (s - K_1) + K_2 (s K_P + K_I) = s^2 + 2 s \xi \omega_n + \omega_n^2, \text{ kde} \quad (4.5)$$

$K_P$  je proporcionální konstanta regulátoru,  $K_I$  integrační konstanta regulátoru,  $\xi$  relativní tlumení a  $\omega_n$  přirozená frekvence systému. Pro kritický útlum bylo zvoleno  $\xi = 1$ ,  $\omega_n$  byla odhadnuta dle vztahu

$$T_s \approx \frac{4}{\xi \omega_n}, \text{ kde} \quad (4.6)$$

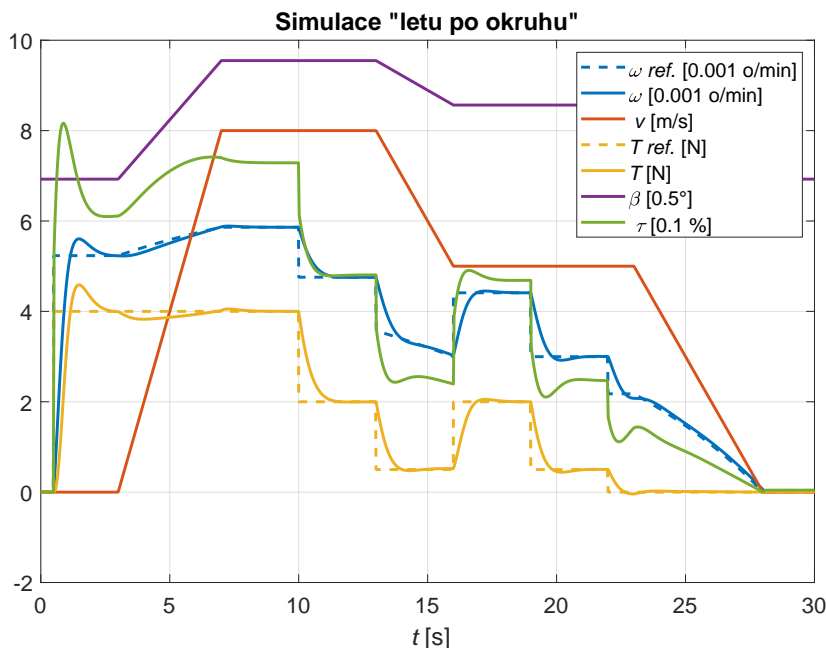
$T_s$  je doba ustálení, která byla zvolena 1 s. Po prvním návrhu regulátoru byla provedena úprava  $\omega_n = 4,5$  rad/s. Výsledný navržený regulátor tak má nastaveny proporcionální a integrační složky

$$K_P = \frac{2 \xi \omega_n + K_1}{K_2} \approx 0,093, \quad (4.7)$$

$$K_I = \frac{\omega_n^2}{K_2} \approx 0,523. \quad (4.8)$$

### 4.3 Ověření

Funkce regulátoru byla ověřena simulací "letu po okruhu." Simulovaná situace má sice od průběhu skutečného letu po okruhu daleko, ale měla by obsáhnout podobné přechody mezi letovými režimy. Výsledek simulace je znázorněn na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Simulace "letu po okruhu"

V čase  $t = 0,5$  s je letoun zabrzděn a je mu předán požadavek na velký tah. V čase  $t = 3$  s je letoun odbrzděn a začíná vzlet. V čase  $t = 7$  s letoun přestává zrychlovat, stoupá. V čase  $t = 10$  s letoun přechází do horizontálního letu, je snížen požadavek na tah. V čase  $t = 13$  s letoun zpomaluje, je snížen požadavek na tah. V čase  $t = 16$  s letoun zpomalil na požadovanou rychlost, je zvýšen požadavek na tah. V čase  $t = 19$  s letoun začíná klesat na přistání, je snížen požadavek na tah. V čase  $t = 22$  s letoun přistává, je nastaven nulový požadavek na tah.

Ze simulace "letu po okruhu" se navržené řízení jeví funkčním. V simulaci se však neprojeví nedokonalé modelování charakteristiky vrtule. K ověření na experimentální platformě bohužel z důvodu časové tísně už nedošlo.



## Kapitola 5

### Závěr

Byla vytvořena experimentální platforma se stavitelnou vrtulí poháněnou BLDC motorem. Platforma umožňuje řídit úhel nastavení vrtulových listů a přípustí motoru. Řízením přípusti motoru lze nepřímo řídit jeho moment, potažmo příkon. Platforma je vybavena senzory pro měření tahu a rychlosti otáčení vrtule. Platforma je vybavena funkcí měření proudu odebíraného z napájecího zdroje elektrického napětí, to umožňuje nepřímé měření zatěžovacího momentu motoru.

Byl vytvořen matematický model platformy, který byl identifikován a ověřen na datech naměřených v aerodynamickém tunelu. Model byl využit při návrhu funkce pro výběr rychlosti otáčení a úhlu nastavení vrtule podle letové rychlosti a požadovaného tahu, s ohledem na dosažení optimální účinnosti pohonu.

Bylo navrženo jednoduché zpětnovazební řízení založené na použití výše zmíněné funkce a PI regulátoru rychlosti otáčení vrtule s výstupem přípusti motoru. Regulátor byl navržen polynomiální metodou pro linearizovaný model platformy. Navržené řízení bylo ověřeno simulací.

Práce naplnila cíle předsevzaté v části 1.1 s výjimkou ověření vytvořeného řízení na vyvinuté platformě. Z důvodu časové tísně bylo řízení ověřeno pouze simulací.





## Příloha A

### Literatura

- [1] H.-W. Kim, H.-K. Shin, H.-S. Mok, Y.-K. Lee, and K.-Y. Cho, “Novel pwm method with low ripple current for position control applications of bldc motors,” *Journal of Power Electronics*, vol. 11, 09 2011.
- [2] *Reflective Object Sensor QRD1113, QRD1114*, ON Semiconductor, October 2019, rev. 3.
- [3] *Type L6D Load Cell*, Zemic Europe B.V., 12 2022, rev12.
- [4] Y. Obulesh, S. B. Ch, and A. Rao, “Mathematical modeling of bldc motor with closed loop speed control using pid controller under various loading conditions,” *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7, pp. 1321–1328, 10 2012.
- [5] S. Mondal, A. Mitra, and M. Chattopadhyay, “Mathematical modeling and simulation of brushless dc motor with ideal back emf for a precision speed control,” in *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, 2015, pp. 1–5.
- [6] *RAY R-12B...R-70SB Programmable Electronic Controllers for Brushless Motors*, RAY BY PELIKAN DANIEL, 2013.
- [7] B. W. McCORMICK, *AERODYNAMICS, AERONAUTICS, AND FLIGHT MECHANICS*. JOHN WILEY & SONS, 1979.
- [8] I. A. W. E. M. Greitzer, Z. S. Spakovszky, “Performance of propellers,” <https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node86.html>, 2023-05-08.





## Příloha B

### Seznam použitých zkratk

<b>PWM</b>	Pulse width modulation
<b>ESC</b>	Electric speed controller
<b>BEC</b>	Battery eliminator circuit
<b>BLDC</b>	Brushless direct current
<b>PI</b>	Proporcionálně-integrační
<b>AD</b>	Analogově-digitální
<b>ADC</b>	Analog to digital converter





## Příloha C

### Přílohy

mikrokontroler	Složka obsahující kód pro mikrokontrolér
tunel_mereni	Složka obsahující data naměřená v aerodynamickém tunelu
platform_log.slx	Komunikace matlabu s mikrokontrolérem
plot_out.m	Funkce pro vykreslení naměřených dat
platform_sim.slx	Simulace odezvy platformy
compare_plot.m	Skript pro porovnání naměřených dat se simulací
platform_control_sim.slx	Simulace navrženého řízení
plot_control_out.m	Funkce pro vykreslení simulace řízení
identification.m	Skript pro určení parametrů potřebných pro simulace