TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

Řízení modelu vrtulníku pomocí PID regulátorů

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Autor práce: **Dominik Paulů**

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.

Liberec 2018

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies

Helicopter Control Using PID Regulators

Bachelor thesis

Study programme: B2612 – Electrotechnology and informatics

Study branch: 2612R011 – Electronic information and control systems

Author: **Dominik Paulů**

Supervisor: Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.

Liberec 2018

Technická univerzita v Liberci
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Akademický rok: **2017/2018**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Dominik Paulů**
Osobní číslo:	**M15000114**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu:	**Řízení modelu vrtulníku pomocí PID regulátorů**
Zadávající katedra:	**Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s modelem vrtulníku, jeho vlastnostmi a omezeními. Pokuste se o hardwarovou změnu charakteristiky buzení hlavního rotoru. Diskutujte a testujte další možnosti zlepšení dynamických a provozních vlastností modelu (jiná vrtule, změna těžiště, ...).
2. Vytvořte matematický model nebo popis přenosovými funkcemi založený na měření tak, aby bylo možné navrhovat řízení modelu vrtulníku.
3. Zrealizujte řízení vrtulníku pro každý z jeho motorů zvlášť. Demonstrujte schopnosti vhodným experimentem.
4. Pokuste se rozšířit řízení do komplexního stavu, kdy je zajištěna součinnost obou motorů a model vrtulníku je schopen sledovat zadanou trajektorii.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **30–40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] **Humusoft, CE 150 helicopter model: User's manual, Humusoft, Praha, 2002.**

[2] **Karer, G., Zupančič, B., Modelling and identification of a laboratory helicopter, Proc. 5th Mathmod conferency, 2006.**

[3] **Hoč, D. Helicopter in Virtual Space, ČVUT, Praha, 2008. Diplomová práce.**

[4] **Modrlák, O., Hubka, L., Automatické řízení, TUL, Liberec, 2012.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.**
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2018**

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 11.5.2018

Podpis: Pavlů

Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout řízení modelu vrtulníku pomocí PID regulátorů. V první části je přiblížen model vrtulníku a základní vlastnosti PID regulátorů a regulačního obvodu. Tyto poznatky jsou dále uplatněny v praktické části. Zde jsou popsány a otestovány návrhy na zlepšení vlastností hlavního rotoru. Následuje identifikace systémů a návrh regulátorů s využitím programu Matlab/Simulink. Následně se práce zabývá praktickou aplikací PID regulátorů pro model vrtulníku. Dosažené výsledky jsou demonstrovány na vhodných experimentech. Přínos této práce reprezentuje použitelnost PID regulátorů pro řízení vícerozměrných soustav.

Klíčová slova:

PID, regulace, vrtulník, identifikace, regulátor, model, obrazový přenos, seřízení regulátoru

Abstract

The main goal of this bachelor thesis is creating a control of helicopter model using PID regulators. In the first part of this thesis are clarified properties of the helicopter, basic behavior of PID regulators and closed loop control systems. This knowledge is used in practical part. Here are described and tested suggestions, which should improve properties of the main rotor. Then follows identification of systems and creation regulators in Matlab/Simulink. The last part is focused on testing and adjustment of regulators.

Key words:

PID, regulation, helicopter, indetification, regulator, model, transfer function, regulator adjusting

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Lukášovi Hubkovi Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Dále bych poděkoval své rodině a blízkým za podporu během studia.

Obsah

Seznam zkratek 9
Seznam obrázků 10
Seznam tabulek 12

Úvod **13**

1 Vrtulník HUMUSOFT CE 150 **14**

2 Popis a struktura regulačního obvodu s PID regulátorem **16**
2.1 Regulační obvod 16
2.2 Regulátor PID 16

3 Charakteristika buzení hlavního rotoru **18**
3.1 Statické vlastnosti 18
3.2 Dynamické vlastnosti 19

4 Návrhy na změnu buzení hlavního rotoru **20**
4.1 Výměna vrtulí 20
4.2 Změna těžiště modelu 21
4.3 Výměna hlavního motoru 24
4.4 Použití nelineárního převodníku vstupního napětí 24

5 Identifikace **25**
5.1 Identifikace a měření hlavní vrtule 26
5.2 Identifikace a měření zadní vrtule 27
5.3 Identifikace a měření křížových vazeb 31

6 Praktický návrh nastavení PID regulátorů **33**
6.1 Řízení hlavního motoru 34
6.2 Řízení zadního motoru 37
6.3 Komplexní řízení vrtulníku 41

Závěr **47**

Seznam použité literatury **50**

Dodatek A Obsah přiloženého CD **51**

Seznam zkratek

TUL	Technická univerzita v Liberci
FM	Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci
PID	Proporcionálně integračně derivační regulátor
PLC	Programovatelný logický automat
u(t)	Akční veličina
y(t)	Regulovaná veličina
w(t)	Požadovaná hodnota
e(t)	Reguláční odchylka
SISO	Systém s jedním vstupem a výstupem
MIMO	Systém s více vstupy a výstupy

Seznam obrázků

1.1 Humusoft CE 150 [1] . . . 14
1.2 MIMO systém . . . 15

2.1 Blokové schéma zpětnovazebního regulačního obvodu . . . 16

3.1 Statická charakteristika vrtule 20 × 10,30 mm . . . 18
3.2 Statická charakteristika vrtule 20 × 10,30 mm - výřez . . . 19
3.3 Dynamická charakteristka vrtule 20 × 10,30 mm . . . 19

4.1 Statická charakteristika vrtule 20 × 15,30 mm - výřez . . . 20
4.2 Dynamická charakteristka vrtule 20 × 15,30 mm . . . 21
4.3 Statická charakteristika vrtule 20 × 15,0 mm - výřez . . . 22
4.4 Statická charakteristika vrtule 20 × 15,5 mm - výřez . . . 22
4.5 Dynamická charakteristika vrtule 20 × 15,5 mm . . . 22
4.6 Statická charakteristika vrtule 24 × 15,5 mm - výřez . . . 23
4.7 Dynamická charakteristika vrtule 24 × 15,5 mm . . . 23

5.1 Odezva hlavní vrtule na skokový budící signál . . . 26
5.2 Porovnání simulované a měřené odezvy . . . 27
5.3 Odezva zadní vrtule na skokový budící signál . . . 28
5.4 Přechodová charakteristika zadní vrtule . . . 29
5.5 Porovnání simulované a naměřené odezvy . . . 30
5.6 Měření křížové vazby elevace - zadní motor . . . 31
5.7 Měření křížové vazby azimut - hlavní motor . . . 32

6.1 Průběh akčních zásahů - hlavní motor . . . 35
6.2 Regulační pochod hlavní vrtule . . . 35
6.3 Regulační pochod hlavní vrtule - vliv poruchy prostředí . . . 36
6.4 Průběh poruchy zadní vrtule . . . 37
6.5 Regulační pochod hlavní vrtule - vliv zadní vrtule . . . 37
6.6 Regulační pochod zadní vrtule . . . 39
6.7 Průběh poruchy hlavní vrtule . . . 40
6.8 Regulační pochod zadní vrtule - vliv hlavní vrtule . . . 40
6.9 Průběh akčních zásahů hlavního a zadního motoru . . . 41
6.10 Komplexní řízení - konstatní elevace a azimut . . . 41
6.11 Komplexní řízení - konstatní elevace . . . 42
6.12 Schéma zapojení regulátorů . . . 43

6.13 Komplexní řízení - konstatní elevace s interakcemi 44
6.14 Komplexní řízení - konstatní azimut s interakcemi 45
6.15 Komplexní řízení - elevace 46
6.16 Komplexní řízení - azimut 46

Seznam tabulek

5.1 Tabulka hodnot pro vyhodnocování astatických soustav [9] 30

6.1 Nalezené konstanty PID regulátoru hlavní vrtule 34
6.2 Tabulka parametrů Ziegler - Nichols[11] 38
6.3 Nalezené konstanty PID regulátoru zadní vrtule 38

Úvod

Postupným rozvojem automatizace a zrychlováním technologických výrobních procesů se zvyšovaly požadavky na řídicí činnost člověka. Ten přestal být schopný tyto procesy přesně a efektivně řídit, a proto se vyvinuly mechanismy, které působení lidského faktoru omezí či kompletně vyřadí. V technické praxi se nejčastěji setkáme s regulátory PID, jejichž algoritmus je dnes běžnou součástí PLC systémů. Výhodou těchto regulátorů je snadná implementace na vhodnou soustavu, problémy ovšem mohou nastat při řízení složitejších struktur.

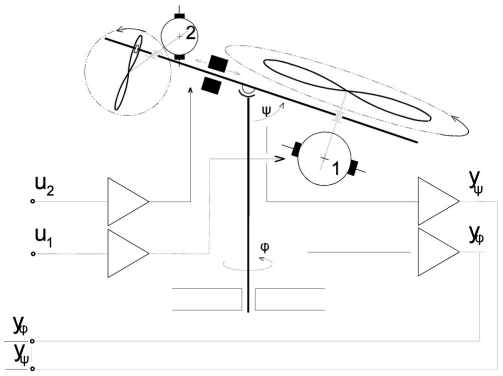
Téma mé bakalářské práce se věnuje řízení jedné takové složitější struktury. Jedná se o nelineární vícerozměrnou soustavu, kterou představuje laboratorní model vrtulníku. V práci jsou přiblíženy charakteristické vlastnosti modelu a návrhy na jejich zlepšení. Je zde podrobně popsán princip PID regulátorů a zároveň i struktura uzavřeného regulačního obvodu.

V další části jsou v prostředí Matlab nalezeny potřebné přenosové funkce, pomocí nichž lze navrhnout řízení. K ovládání vrtulníku jsou využity integrované funkce Matlabu či základní seřizovací techniky. Vše je důkladně otestováno na reálné soustavě.

1 Vrtulník HUMUSOFT CE 150

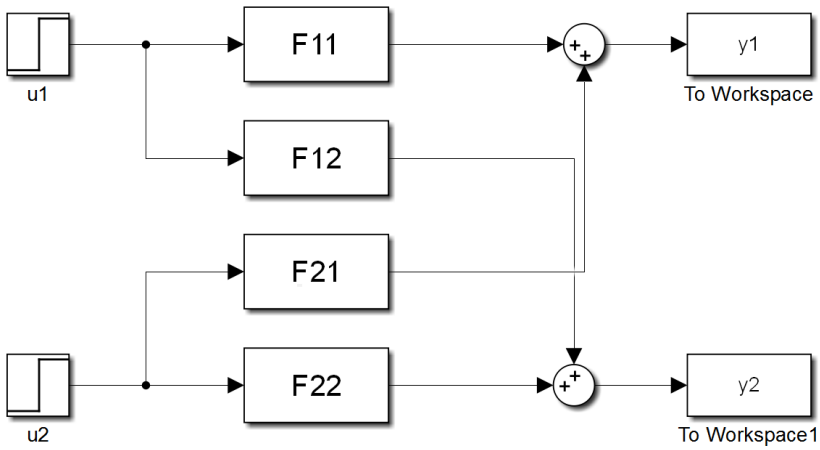
Model laboratorního vrtulníku CE 150 od firmy Humusoft je určený k teoretickému studiu dynamiky systémů a praktickému zkoumání základních a pokročilých principů regulační techniky. To zahrnuje modelování dynamiky systémů, indentifikaci a návrh různých regulačních schémat pomocí klasických či moderních metod.

Model se skládá z těla nesoucího dva stejnosměrné motory s permanentními magnety, které řídí vrtule. Elevaci vrtulníku zajišťuje hlavní motor, jenž je ovládán z řidící karty napětím 0 - 10 V. Výstup je snímán IRC senzorem, který genereje hodnoty 0 - 10 V. Vedlejší motor pro ovládání azimutu je charakteristický tím, že je v klidové poloze při napětí 5 V. Při zvýšení napětí nad 5 V se točí jedním směřem a při snížení pod 5 V opačným směrem. Je ovládán napětím 0 - 10 V a výstup je taktéž snímán IRC senzorem, který generuje hodnoty 0 - 10 V. Tělo vrtulníku má dva stupně volnosti. V azimutu se může pohybovat v rozsahu 270° a v elevaci 90°. Vrtulník je dále vybaven zátěží, díky které je možné měnit rozložení váhy modelu. Na Obr. 1.1 je zobrazeno schéma modelu [1, 2].



Obrázek 1.1: Humusoft CE 150 [1]

Vrtulník je nelineární MIMO systém se dvěma vstupy a dvěma výstupy. V ideálním případě by měl jeden vstup ovlivnit pouze jeden výstup. Ve skutečnosti se ale jedná o systém, kde kromě přímých vazeb existují i křížové, viz Obr. 1.2. Pokud tedy nastane změna jedné vstupní veličiny, tak se tato změna projeví na více výstupech. Tyto křížové vazby mohou výrazně ovlivnit chování systému a znesnadnit regulaci.

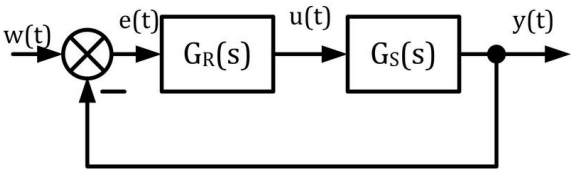


Obrázek 1.2: MIMO systém

2 Popis a struktura regulačního obvodu s PID regulátorem

2.1 Regulační obvod

Regulační obvod 2.1 je nejčastěji tvořen dvěma prvky, a to regulovanou soustavou s přenosem $G_s(s)$ a regulátorem s přenosem $G_r(s)$. Informace z čidla se nazývá regulovaná veličina $y(t)$. Tato hodnota je porovnávána se žádanou hodnotou $w(t)$. Rozdíl žádané hodnoty $w(t)$ a regulované veličiny $y(t)$ se nazývá regulační odchylka $e(t)$. Na základě regulační odchylky nastaví regulátor akční veličinu $u(t)$ tak, aby byly splněny požadavky regulace. Těmi mohou být nejen sledování změn w(t), ale i omezení působení nežadoucích vlivů prostředí tzv. poruchy [3].



Obrázek 2.1: Blokové schéma zpětnovazebního regulačního obvodu

2.2 Regulátor PID

Nejčastěji používáným regulátorem pro přesné řízení regulované veličiny je PID (proporcionálně integračně derivační) regulátor. Tento typ je vhodný zejména pro řízení jednorozměrných soustav (SISO). Další výhodou je jednoduchost řídicího algoritmu.

PID regulátory mají i své nedostatky, které jim nedovolí regulovat některé procesy. U vícerozměrných soustav (MIMO) nemusí být zaručena kvalitní regulace a v některých případech jsou nepoužitelné[4].

Vstupem do regulátoru je regulační odchylka a výstupem je vážený součet z regulační odchylky, jejího integrálu a derivace. Paralelní tvar PID regulátoru v časové oblasti je dán rovnicí (2.1).

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_1 \cdot \int_0^t e(\tau)d\tau + r_2 \cdot \frac{d}{dt} \cdot e(t) \tag{2.1}$$

- r_0
  - Proporcionální zesílení
- r_1
  - Integrační konstanta regulátoru
- r_2
  - Derivační konstanta regulátoru

Proporcionální zesílení je obvykle hlavní nosnou složkou regulačního obvodu. Integrační složka ovlivňuje statické chování obvodu a zajišťuje trvale nulovou regulační odchylku. Její působení je pomalejší a poněkud zhoršuje dynamiku obvodu. Opačný charakter má složka derivační. Její reakce je ze všech složek nejrychlejší. Zrychluje rozjezd regulačního pochodu a tlumí kmity. V ustáleném stavu se neuplatňuje. Správná kombinace konstant r_0, r_1 a r_2 je předpokladem ke kvalitnímu regulačnímu pochodu [5].

Obrazový přenos regulátoru $G_r(s)$ lze snadno získat pomocí Laplaceovy transformace. Jeho tvar je dán rovnicí (2.2).

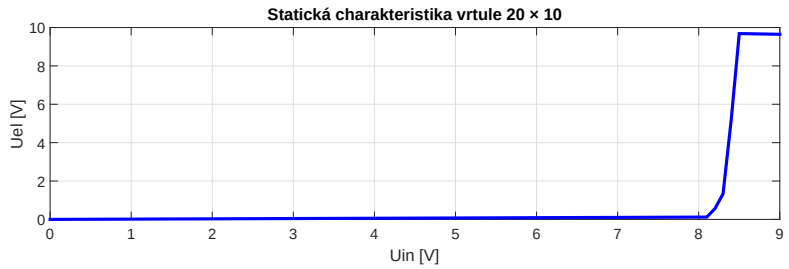
$$G_r(s) = r_0 + \frac{r_1}{s} + r_2 \cdot s \tag{2.2}$$

3 Charakteristika buzení hlavního rotoru

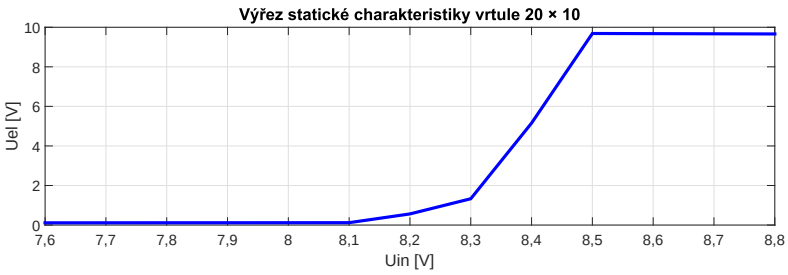
Vrtulník je vybaven hlavní vrtulí s rozměry 20 × 10, posuvné těžiště je umístěno ve vzdálenosti 30 mm od krajní polohy. První rozměr udává průměr vrtule v centimetrech, druhý její stoupavost. Stoupavost udává, jak hluboko se vrtule zavrtá za jednu otáčku [6] . Hlavním problémem této vrtule je to, že i při vysokých hodnotách napětí na hlavním motoru nevytvoří dostatečný točivý moment, který by překonal tíhovou sílu.

3.1 Statické vlastnosti

Statická charakteristika vyjadřuje závislost ustálené hodnoty výstupního signálu na ustálené hodnotě budícího signálu po odeznění přechodového děje. Má smysl pouze u stabilních systémů. U lineárních dynamických systémů se jedná o přímky jdoucí počátkem. V našem případě je statická charakteristika silně nelineární, pouze s úzkou lineární částí, která by šla využít k řízení. Z grafu 3.2 je patrné, že vrtulník se dostane do vzduchu při napětí 8,1 V. Při hodnotách vyšších než 8,3 V se model překlopí do maximální polohy.



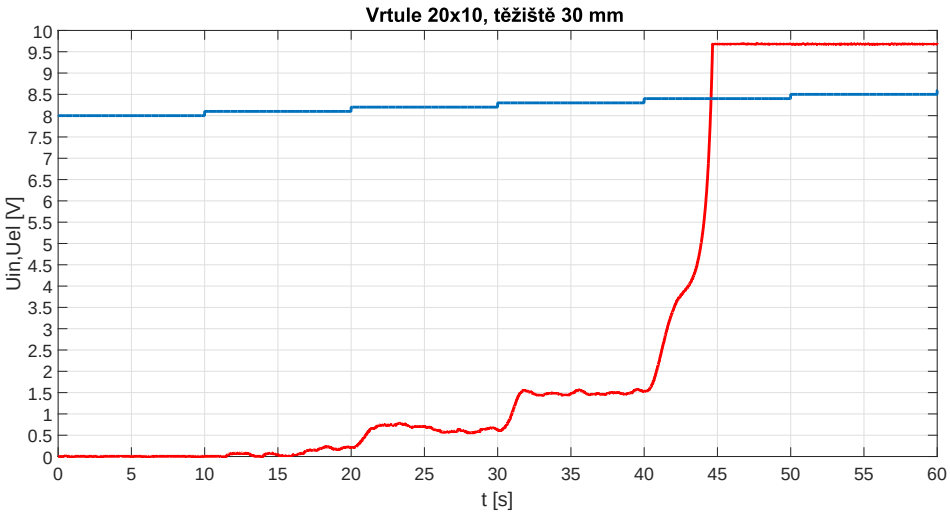
Obrázek 3.1: Statická charakteristika vrtule 20 × 10,30 mm



Obrázek 3.2: Statická charakteristika vrtule 20 × 10,30 mm - výřez

3.2 Dynamické vlastnosti

Dynamická (přechodová) charakteristika vyjadřuje závislost soustavy na čase. Dynamická charakteristika určuje reakci soustavy na skokovou změnu vstupní veličiny. Pomocí této charakteristiky můžeme identifikovat druh soustavy, posoudit její stabilitu a rozhodnout o způsobu řízení. Tuto soustavu můžeme následně popsat pomocí přenosové funkce, stavového popisu či matematického modelu. Při měření dynamické charakteristiky jsem postupně zvyšoval napětí na hlavním motoru o 0,1 V. Výsledkem byla odezva na Obr. 3.3.



Obrázek 3.3: Dynamická charakteristka vrtule 20 × 10,30 mm

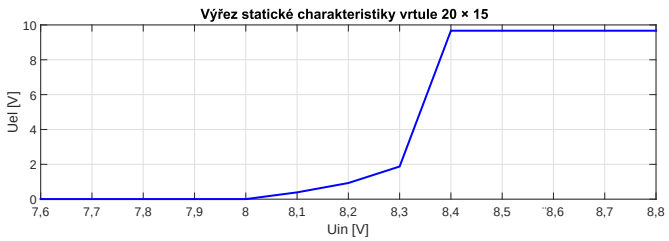
4 Návrhy na změnu buzení hlavního rotoru

4.1 Výměna vrtulí

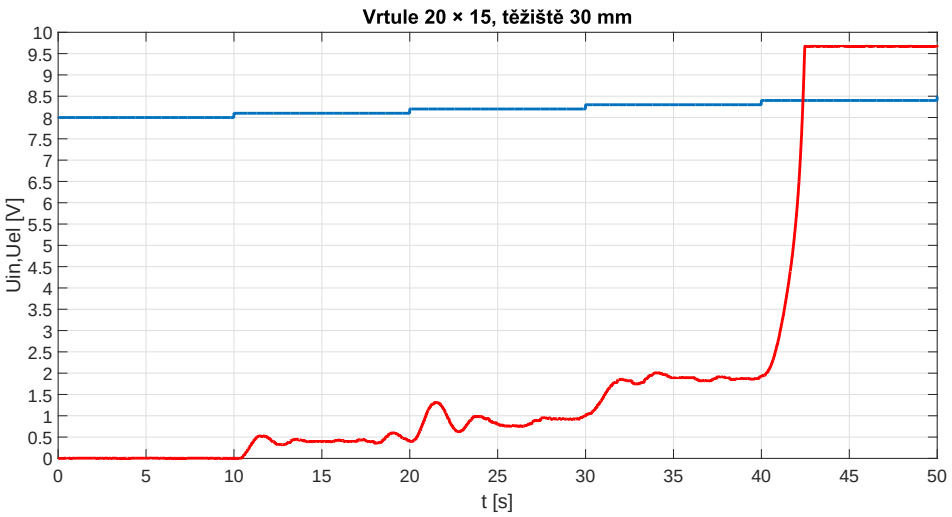
Jedním z nápadů, jak změnit charakteristiku buzení hlavního motoru, je použít vrtule, které budou mít větší průměr nebo stoupavost, či kombinace těchto parametrů. To by mělo mít za následek rozšíření lineární části statické charakteristiky. Z tohoho důvodu jsem vybral vrtule o rozměrech 20 × 12, 20 × 15, 23 × 10, 23 × 18 a 24 × 15 [7]. Těžiště zůstalo umístěno ve výchozí pozici 30 mm.

S každou vrtulí jsem podstoupil tři stejná měření. Tímto jsem získal sadu dat, ze které by bylo možné vybrat nejlepší charakteristiku každé vrtule, která nebyla znehodnocena působením různých parazitních vlivů. Tím může být například odraz proudění vzduchu o překážku, které vyvolá vrtule.

Nejvhodnější byla vrtule o rozměru 20 × 15. Na statické charakteristice 4.1 můžeme vidět, že se změnou vrtule se lineární část rozšířila oproti původní vrtuli 20 × 10 na charakteristice 3.2. Vrtule nyní vytvoří dostatečný točivý moment při napětí 8 V. Vrtulník dosáhne maximální hodnoty elevace při překročení 8,3 V. Dynamické a statické vlastnosti systému se mírně zlepšily, ale efekt nebyl dostatečný.



Obrázek 4.1: Statická charakteristika vrtule 20 × 15,30 mm - výřez

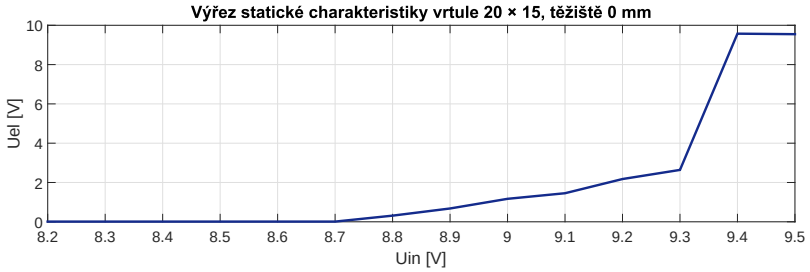


Obrázek 4.2: Dynamická charakteristka vrtule 20 × 15,30 mm

4.2 Změna těžiště modelu

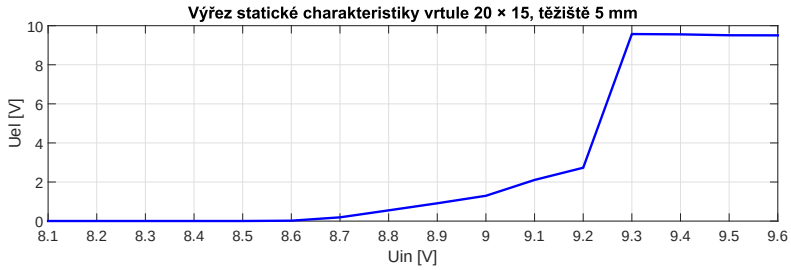
Výměna vrtule mírně zlepšila provozní podmínky vrtulníku, avšak při větších hodnotách elevace současné rozložení váhy překlopí vrtulník do nestabilní pozice. Návrhem bylo přemístit posuvné těžiště ze vzdálenosti 30 mm blíže směrem k nosu vrtulníku.

Při měření jsem použil všechny vrtule a změřil jejich vlastnosti při jiném rozložení hmotnosti. Posuvné těžiště jsem postupně umístil do vzdálenosti 0 mm, 3 mm, 5 mm a 10 mm. Každou vrtuli a zvolené těžiště jsem změřil třikrát. Z naměřených charakteristik jsem vybral ty, které nebyly znehodnoceny kmity. S posuntím těžiště do vzdálenosti 0 mm k nosu vrtulníku se zvětšila lineární oblast statické charakteristiky s použitím jakkékoliv vrtule. Na druhou stranu díky hmotnosti soustředěné blíže přední části, vrtulník vzlétne až při hodnotě 8,7 V při použití vrtule 20 × 15. Zde by mohl nastat problém při regulaci, jelikož velikost akčního zásahu je omezena řidicí kartou na 10 V.

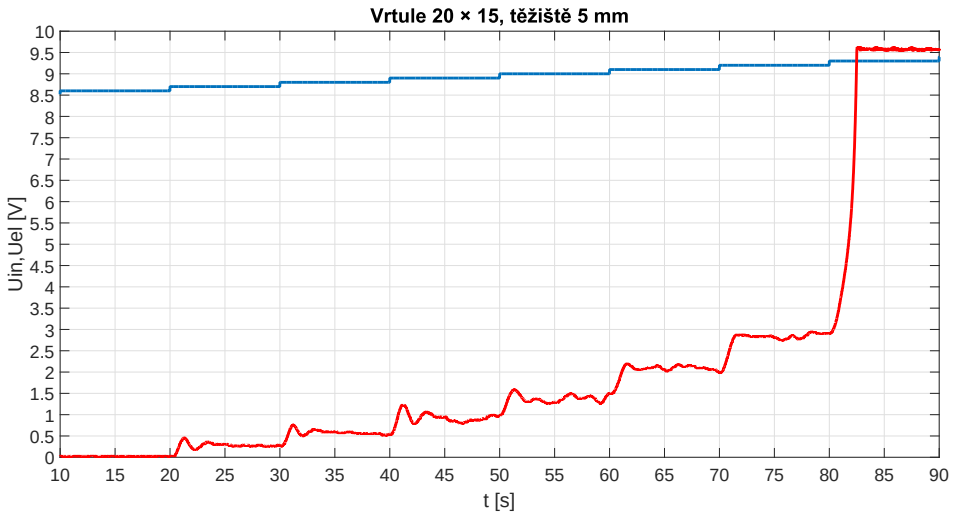


Obrázek 4.3: Statická charakteristika vrtule 20 × 15,0 mm - výřez

Nejvhodnějším řešením se ukázalo posunutí těžiště do vzdálenosti 5 mm. Vrtulník totiž vzlétne při nižším napětí, ale velikost lineární části charakteristiky tak zůstane nezměněna. Z pohledu dynamických účinků dochází k menšímu překmitu při změně budící veličiny.

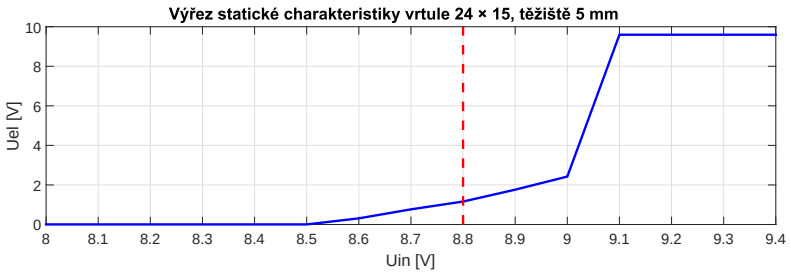


Obrázek 4.4: Statická charakteristika vrtule 20 × 15,5 mm - výřez

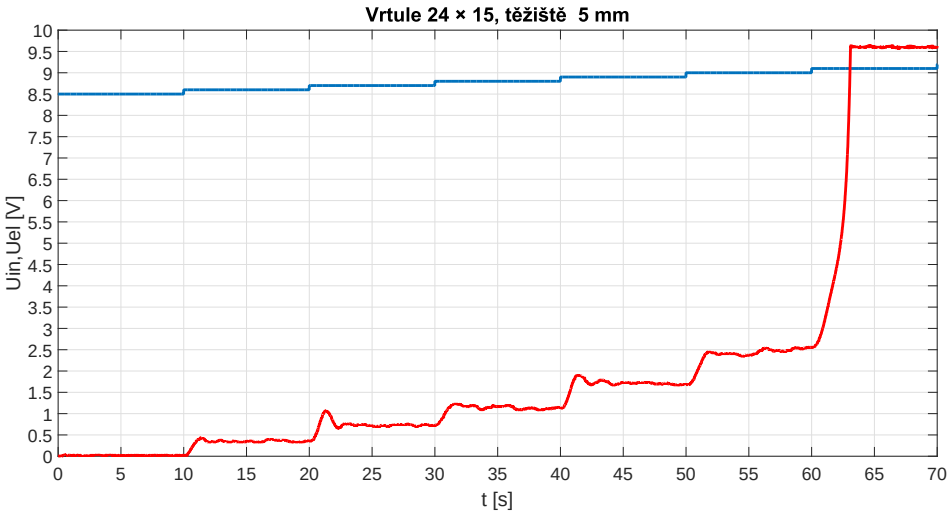


Obrázek 4.5: Dynamická charakteristika vrtule 20 × 15,5 mm

Zajímavou alternativou se stala vrtule 24 × 15. Tato vrtule totiž dosáhne větší hodnoty elevace při stejném napětí než vrtule 20 × 15. Nemusí tak dojít k problému s omezením velikosti akčního zásahu. Na charakteristíkách 4.4 a 4.6 můžeme tuto změnu pozorovat. Z tohoto důvodu byla vybrána vrtule 24 × 15. Na statické charakteristice 4.6 byl vybrán pracovní bod přibližně ve středu lineární části. Tento bod má hodnotu 8,8 V.



Obrázek 4.6: Statická charakteristika vrtule 24 × 15,5 mm - výřez



Obrázek 4.7: Dynamická charakteristika vrtule 24 × 15,5 mm

4.3 Výměna hlavního motoru

Další alternativou může být výměna hlavního motoru za jiný typ, který disponuje vyššími otáčkami. Díky této výměně by mohlo dojít ke vzlétnutí vrtulníku už při nízkých hodnotách napětí. Na druhou stranu by tento motor vytvořil větší točivý moment, který by znesnadnil regulaci azimutu.

Dalším problémem by mohla být životnost vrtulí. Ty jsou vyrobené z plastu a jsou dimenzované na určité maximální otáčky. V současné konfiguraci není možné vybrat motor, kteý by měl rapidně vyšší otáčky. Mohlo by totiž dojít ke zlomení vrtulí vlivem sil, které na list vrtule při vysokých otáčkách působí. Tím pádem by se muselo investovat do vrtulí, které jsou k těmto otáčkám přispůsobeny, například vyrobené z karbonu. Z výše uvedených důvodů jsem výměnu hlavního motoru vyloučil jako ideální návrh na zlepšení chování modelu.

4.4 Použití nelineárního převodníku vstupního napětí

S využitím tohoto převodníku by mohlo dojít k rozšíření statické charakteristiky. Pokud by převodní charakteristika měla logaritmický tvar, tak bychom při nižším napětí na výstupu řídicí karty dosáhli většího napětí na hlavním motoru. Tím by došlo k elevaci vrtulníku při nízkém napětí a nebyli bychom limitováni z hlediska akčního zásahu.

Tyto měniče nejčastěji využívají charakteristiku některého z polovodičových prvků, jako je dioda či tranzistor. Zapojuje se spolu s operačním zesilovačem. Toto zapojení má však podstatnou nevýhodu, jelikož výstupní napětí je ovlivňováno i se změnou teploty. Proto by bylo nutné použít obvody, které by tyto vlivy kompenzovaly.

5 Identifikace

Pro řízení soustav je nutné znát vlastnosti a chování systému. Pomocí identifikace je možné získat matematický model reálného systému. Tento model je vyjadření podstatných vlastností systému. Lze ho získat na základě matematicko-fyzikální analýzy nebo pomocí experimentální identifikace. Model vždy představuje zjednodušení reálné soustavy. Experimentální identifikace využívá parametrické nebo neparametrické modely.

„Parametrické modely mají danou strukturu. Strukturou se rozumí řád a zvolený typ diferenciální či diferenční rovnice (lineární, nelineární diferenciální rovnice, typ nelinearity atd.), nebo soustavu těchto rovnic, obrazový nebo diskrétní přenos se zvolenými stupni polynomů v čitateli a jmenovateli, nebo přenosovými maticemi zvoleného rozměru.“

„Neparametrické modely představují zpravidla funkční závislost mezi zvoleným vstupním a odpovídajícím výstupním signálem (např. y/u, y/d atd.). Tato závislost se vyjadřuje buď graficky pomocí záznamu z měření odezev systému, nebo pomocí tabulky hodnot, popisující číselně danou závislost. Neparametrické modely vyjadřují zpravidla přechodovou, váhovou nebo frekveční charakteristiku v grafické nebo tabulkové formě. Parametry modelu jsou pak obsaženy implicitně v těchto funkčních závislostech.“[5]

Vztah mezi vstupním a výstupním signálem lze vyjádřit pomocí přenosové funkce F(s). Cílem identifikace je nalézt takovou přenosovou funkci F(s), aby se co nejvíce blížila chování reálné soustavy. Díky této přenosové funkci je možné nalézt vhodný algortimus řízení a vytvořit řídicí systém bez rizika poškození reálného zařízení.

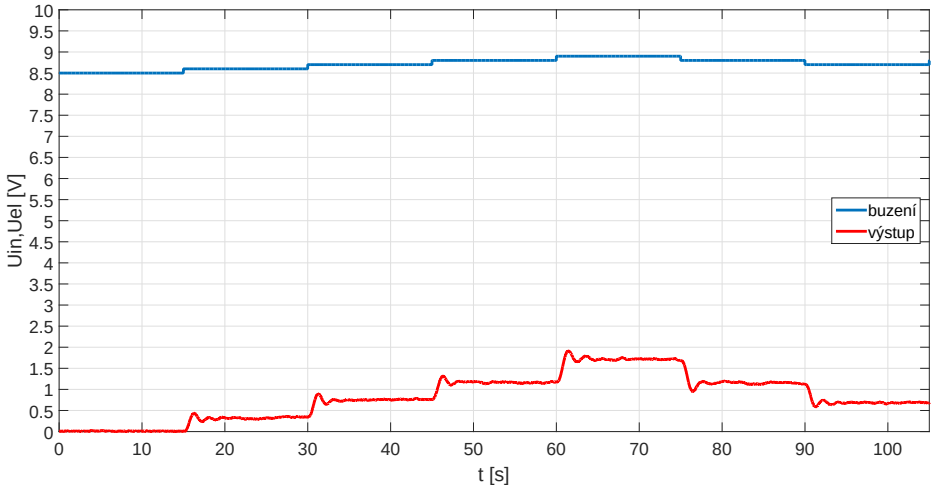
Simulacemi navržené regulátory a jejich struktury lze poté použít na reálné soustavy a zjistit případné odchylky mezi simulací a realitou. Ty jsou samozřejmostí, jelikož nikdy nedokážeme zajistit úplnou shodu mezi modelem a reálnou soustavou. Na reálnou soustavu totiž působí parazitní vlivy prostředí a poruch, které nelze věrně reprodukovat v simulaci. Dále také stárnutím jednotlivých komponent zařízení dochází ke změně vlastností systému [10, 14].

5.1 Identifikace a měření hlavní vrtule

K identifikaci hlavní vrtule jsem využil *System Identification Toolbox* Matlabu. Ten umožňuje návrh matematických modelů dynamických soustav z naměřených vstupních a výstupních dat. S využitím tohoto toolboxu lze najít popis systému, který by pouze matematicko-fyzikální analýzou nebyl možný.

K nalezení parametrů modelu můžeme využít data jak v časové, tak i frekveční oblasti. Vytvořené modely mohou být ve formě diskrétních či spojitých přenosových funkcí, nelineárních modelů nebo popsány pomocí stavových rovnic [8].

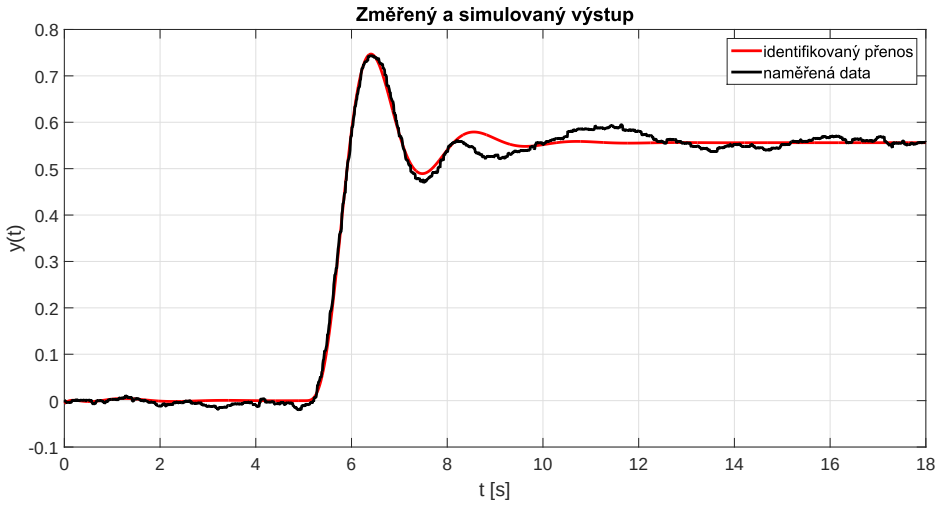
V okolí pracovního bodu jsem prováděl skokové změny budící veličiny 5.1. Skokové testovací signály mají takovou délku, aby došlo k ustálení výstupní veličiny.



Obrázek 5.1: Odezva hlavní vrtule na skokový budící signál

Naměřená data je nutno upravit do podoby, která by šla identifikovat pomocí výše uvedeného toolboxu. Z Obr. 5.1 je patrné, že žádná přechodová odezva není znehodnocena kmity. K identifikaci jsem použil odezvu na skok z pracovního bodu u_0 =8,8 V do hodnoty 8,9 V. Chování hlavní vrtule nejlépe popisuje přenos 4. řádu (5.1). Přesnost identifikace dosáhla hodnoty 94,33 %, viz Obr. 5.2.

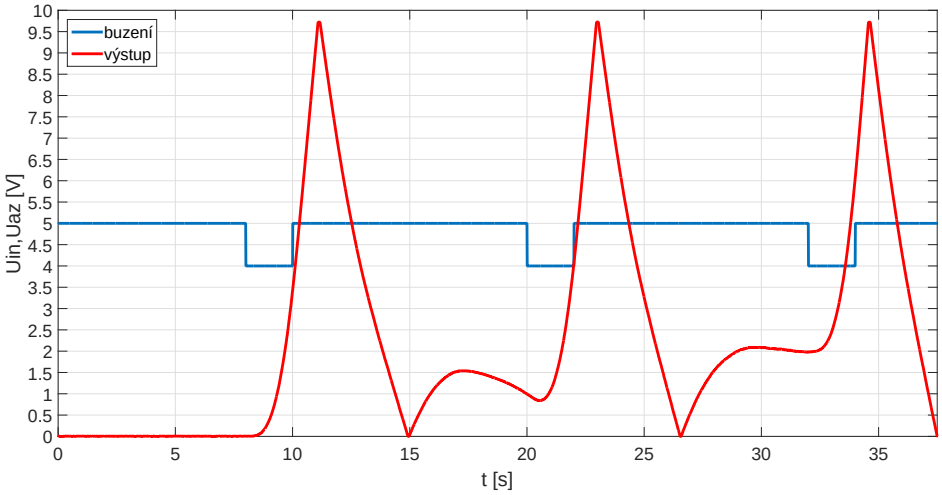
$$F(s) = \frac{1365}{s^4 + 9.083s^3 + 49.41s^2 + 118.6s + 245.5} \tag{5.1}$$



Obrázek 5.2: Porovnání simulované a měřené odezvy

5.2 Identifikace a měření zadní vrtule

Vedlejší motor, jenž ovládá zadní vrtuli, je soustavou astatickou. To znamená, že nemůžeme určit statické vlastnosti, ale pouze dynamické. U těchto soustav při změně akční veličiny regulovaná veličina trvale klesá nebo stoupá, dokud nedojde k technickému omezení růstu regulované veličiny konstrukčním provedením. Tyto soustavy se obecně řídí obtížněji než statické soustavy. Obtížnost regulace roste i s řádem soustavy, dalším problémem může být výskyt dopravního zpoždění. Pro komplexní posouzení jsem naměřil několik přechodových odezev systému. Z nich byly následně vybrány odezvy vhodné k identifikaci. Pro nalezení přenosu zadní vrtule jsem využil metodu aproximace pomocí přechodové odezvy [9].



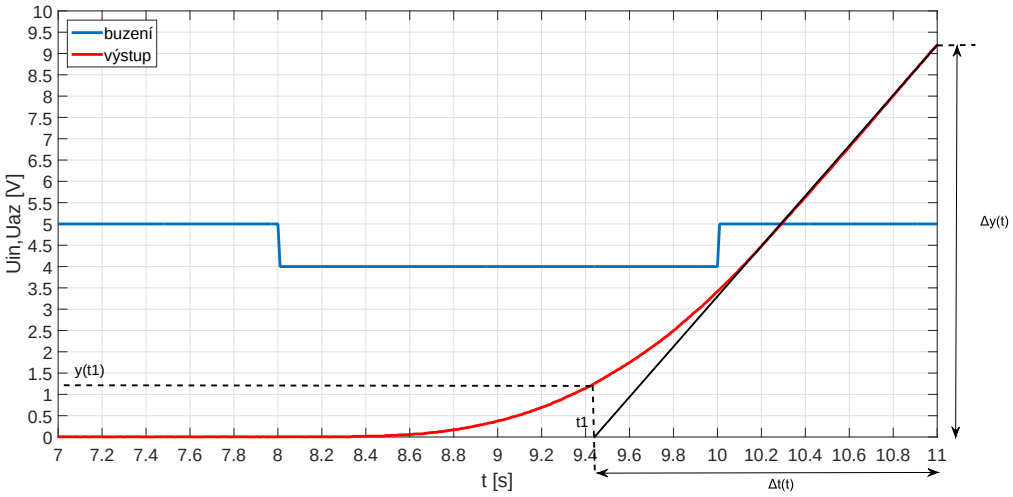
Obrázek 5.3: Odezva zadní vrtule na skokový budící signál

Astatické soustavy s astatismem 1. řádu můžeme aproximovat přenosem

$$F(s) = \frac{K_v}{s(Ts+1)^n} \tag{5.2}$$

- K_v
  - směrnice asymptoty k přechodové charakteristice
- n
  - řád systému
- T
  - n-násobná časová konstanta

Přechodová charakteristika využitá při identifikaci je zobrazena na Obr. 5.4.



Obrázek 5.4: Přechodová charakteristika zadní vrtule

Směrnice asymptoty k přechodové charakteristice protíná časovou osu v bodě t_1. Pořadnice přechodové charakteristiky v tomto bode je $y(t_1)$.

Dále platí:

$$\frac{y(t_1)}{k} = t_1 \cdot \frac{n^{(n-1)}}{(n-1)!} \cdot e^{-n} \tag{5.3}$$

$$K_v = \frac{\Delta y(t)}{\Delta t} \tag{5.4}$$

$$f(n) = \frac{y(t_1)}{K_v \cdot t_1} \tag{5.5}$$

$$T = \frac{t_1}{n} \tag{5.6}$$

Tabulka 5.1: Tabulka hodnot pro vyhodnocování astatických soustav [9]

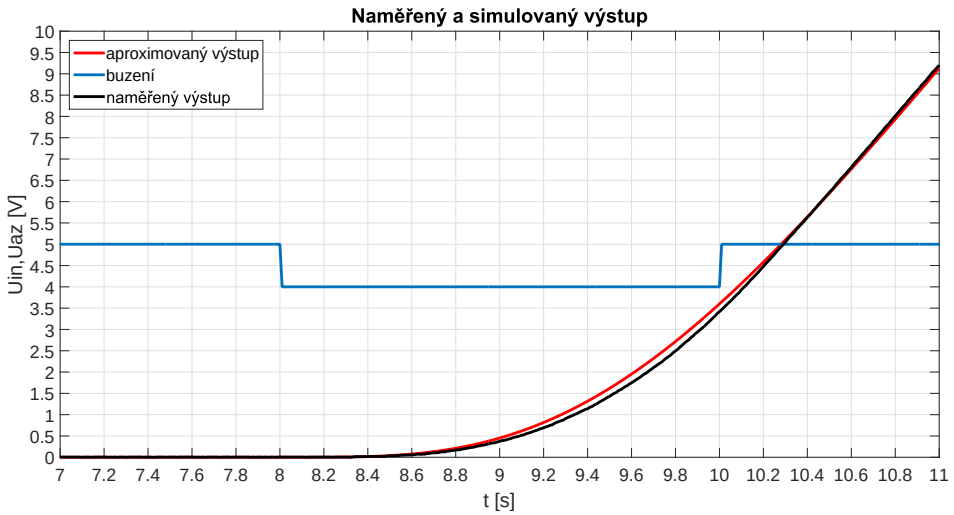
n	1	2	3	4	5	6
$y(t_1)$	0,368	0,271	0,224	0,195	0,175	0,16

Poměr f(n) je možné využít pro určení řádu soustavy z Tab. 5.1. V našem případě je možné na Obr. 5.4 vyčíst tyto parametry:

- $t1 = 1,46\ s$
- $y(t1) = 1,313\ V$
- $\Delta y(t) = 9,206\ V$
- $\Delta t = 1,54\ s$

Ze vztahu (5.4) plyne velikost zesílení $Kv = -5,9779$. Dále je možné z (5.5) určit poměr $f(n) = 0,15$. Z tabulky 5.1 lze snadno zjistit, že se jedná o soustavu 6. řádu. Časová konstanta lze dopočítat pomocí rovnice (5.6). Její velikost je $T = 0,243\ s$. Aproximovaný přenos systému je dán vztahem (5.7). Data se shodují na 97,15 %.

$$F(s) = \frac{-5.9779}{s \cdot (0,243s + 1)^6} \tag{5.7}$$



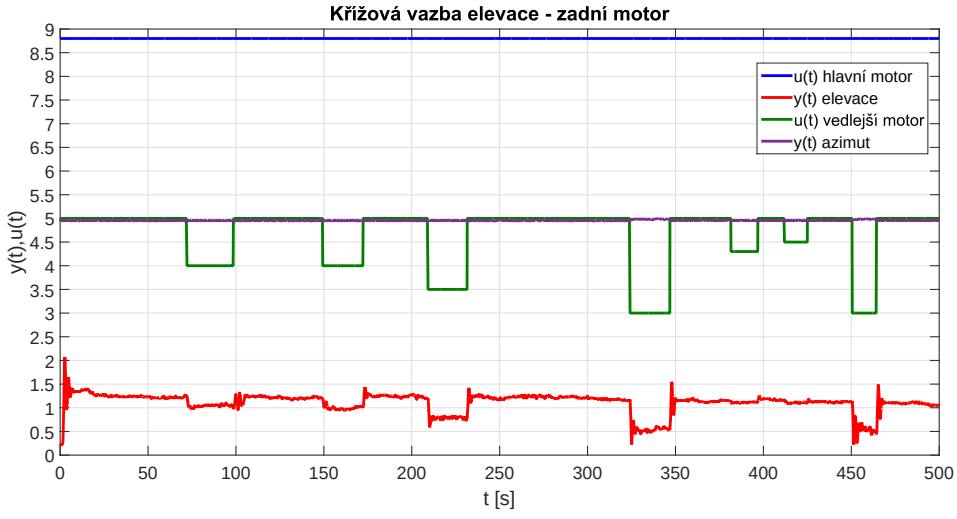
Obrázek 5.5: Porovnání simulované a naměřené odezvy

5.3 Identifikace a měření křížových vazeb

Dalšími subsystémy, které mají vliv na vlastnosti vrtulníku souvisí s křížovými vazbami. Jelikož je model vrtulníku MIMO systém se dvěma vstupy a výstupy, existují tudíž i dvě křížové vazby. První z nich je vazba mezi elevací vrtulníku a vedlejším motorem, druhou je vazba mezi azimutem těla modelu a hlavní vrtulí.

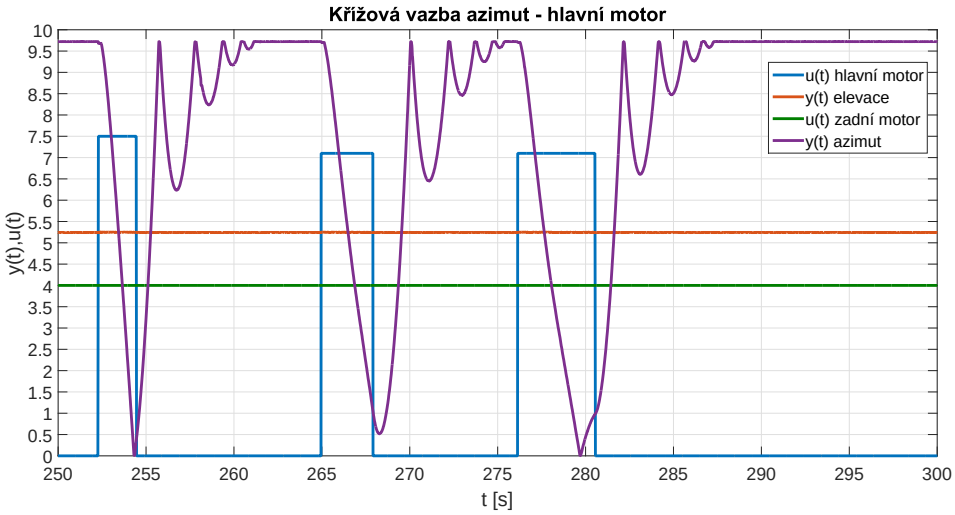
Předpokládám, že vazba mezi hlavní vrtulí a azimutem vrtulníku bude mít větší vliv na chování vrtulníku než vazba elevace a vedlejší motor. To je dáno tím, že hlavní vrtule vytvoří tak velký točivý moment, který snadno otočí tělem vrtulníku.

Měření vazby elevace - hlavní motor jsem provedl tak, že napětí na hlavním motoru jsem nastavil do pracovního bodu 8,8 V. Dále jsem pak prováděl skoky vstupního napětí na vedlejším motoru. Tyto skoky měly různou délku a velikost. Na Obr. 5.6 je možné vidět, že pokud je změna napětí na zadním motoru menší než 1 V, nedojde k ovlivnění elevace. Naopak, pokud je skok větší než 1 V, dojde ke snížení hodnoty elevace a následně po navrátu zadního motoru do klidového stavu dojde ke krátkému zákmitu a návratu do původní polohy.



Obrázek 5.6: Měření křížové vazby elevace - zadní motor

Měření druhé křížové vazby mezi azimutem a hlavní vrtulí jsem provedl tak, že jsem nastavil zadní motor na konstatní hodnotu. V tomto případě na 4 V. Pokud by toto napětí bylo vyšší než 5 V, tak by zadní vrtule vytvořila stejně orientovaný točivý moment jako hlavní vrtule. Proto je nutné se pohybovat pod hranicí 5 V, kdy se vrtule točí opačným směrem a tvoří tak opačný moment k hlavní vrtuli [14]. Dále jsem prováděl skoky na hlavním motoru. Z naměřené charakterstiky 5.7 je možné vidět, že křížová vazba mezi hlavním motorem a azimutem má astatický charakter.



Obrázek 5.7: Měření křížové vazby azimut - hlavní motor

Jelikož je tato soustava astatická, identifikaci jsem prováděl stejným způsobem jako u zadní vrtule [9]. Přenos je zobrazený na rovnici (5.8). Přesnost modelu dosáhla 89,45 %.

$$F(s) = \frac{-0,786}{s \cdot (0,04s^2 + 0,4s + 1)} \tag{5.8}$$

Vazbu mezi elevací a zadním motorem lze popsat systémem 4. řádu (5.9) s přesností 80,93 %.

$$F(s) = \frac{806,3}{s^4 + 28,07s^3 + 280,9s^2 + 846,5s + 3363} \tag{5.9}$$

6 Praktický návrh nastavení PID regulátorů

Matematické modely ve formě přenosových funkcí získané identifikací jsem použil pro návrh konstant PID regulátoru ve zpětovazebním zapojení. Při návrhu jsem využil nejstarší postup nastavování pomocí metody Zieglera a Nicholse či jeho modifikace, které z této metody vychází. Využita byla dále integrovaná aplikace Matlabu PID Tuner.

Nalezené koeficienty regulátoru jsem aplikoval na reálnou soustavu, zjistil kvalitu regulace a následně, pokud to bylo nutné, ručně korigoval nastavení. Při návrhu jsem se nejprve zabýval řízením každého motoru samostatně, následně komplexním řízením, kde jsem se pokusil zajistit vzájemnou součinnost motorů a vrtulník by tak mohl sledovat zadanou trajektorii.

Pro srozumitelnější posouzení regulace byly údaje ze senzorů snímajících azimut a elevaci převedeny na hodnoty úhlů. Hodnotě 0 V, kdy je nos vrtulníku opřen o podstavec, nyní odpovídá úhel -45°. Napětí 5 V, kdy je vrtulník ve vodorovné poloze, je roven nulovému úhlu. Maximální hodnota elevace je nyní reprezentována úhlem +45 °. Obdobně byl přepočten úhel pro azimut. Pracovní rozsah v azimutu je 270°. Hodnota azimutu reprezentována 0 V nyní odpovídá -135°, hodnota 10 V je rovna 135°.

6.1 Řízení hlavního motoru

Pro řízení elevace vrtulníku jsem využil blok PID regulátoru ve spojité formě, který je dostupný v Matlabu. U tohoto bloku je možné vybrat jak ideální tvar rovnice PID regulátoru, tak jeho paralelní ekvivalent. Pro regulaci elevace byl vybrán paralelní tvar s filtrovanou derivací a je dán rovnicí (6.1).

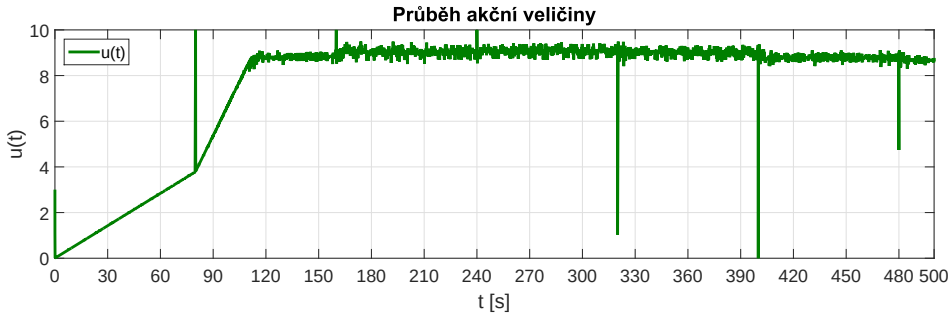
$$R(s) = P + I\frac{1}{s} + D\frac{N}{1 + N\frac{1}{s}} \tag{6.1}$$

Pomocí PID tuneru byly nalezeny následující konstanty regulátoru uvedené v Tab. 6.1. Parametry byly voleny s požadavkem na sledování zadané trajektorie. Dobu odezvy regulátoru jsem volil pomalejší, aby tak nedocházelo k velkým kmitům během změn žádané veličiny, které by mohly vrtulník překlopit do maximální výchylky. Dále bylo nutné omezit velikost akčního zásahu regulátoru na 0 a 10 V. To je dáno tím, že motor je řízen napětím 0 až 10 V z řídicí karty. Perioda vzorkování byla nastavena na 0,01 s.

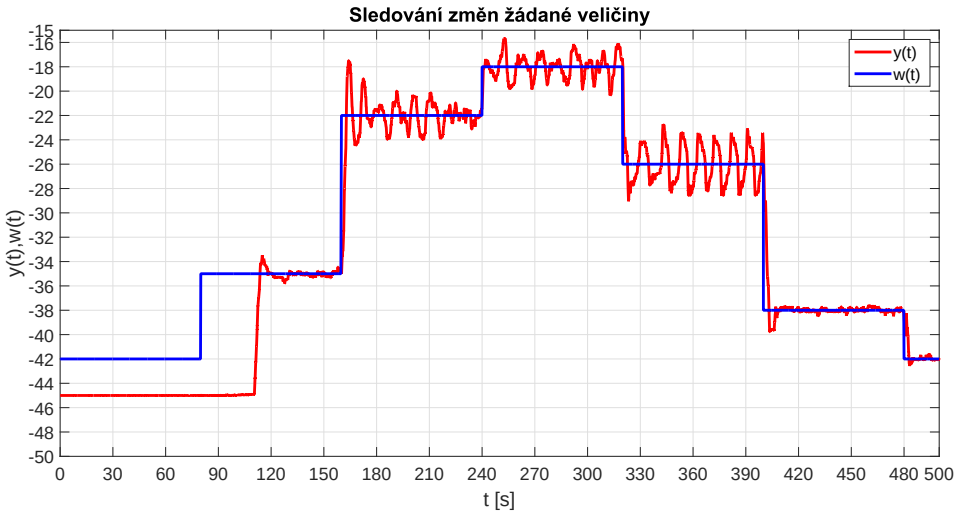
Tabulka 6.1: Nalezené konstanty PID regulátoru hlavní vrtule

N	P	I	D
100	0,012	0,142	0,07

Při měření jsem prováděl skoky požadované veličiny v okolí pracovního bodu, ale i na hranici lineární části. Na charakteristice 6.2 můžeme pozorovat, že pri nižších hodnotách elevace vrtulník dosáhne požadované veličiny s prvotním překmitem a následně se ustálí. Pokud je požadovaná hodnota elevace vyšší, dochází k drobným kmitům kolem této hodnoty. Kmity dosahují amplitudy přibližně 2°. To je dáno odchýlením z lineární části statické charakteristiky. Pracovní oblast, ve které je elevace vrtulníku dobře regulovatelná, je přibližně od -45° do -18°. Při vyšších hodnotách požadované veličiny dochází k úplnému překlopení. Výstupem měření jsou i akční zásahy regulátoru na Obr.6.1.



Obrázek 6.1: Průběh akčních zásahů - hlavní motor

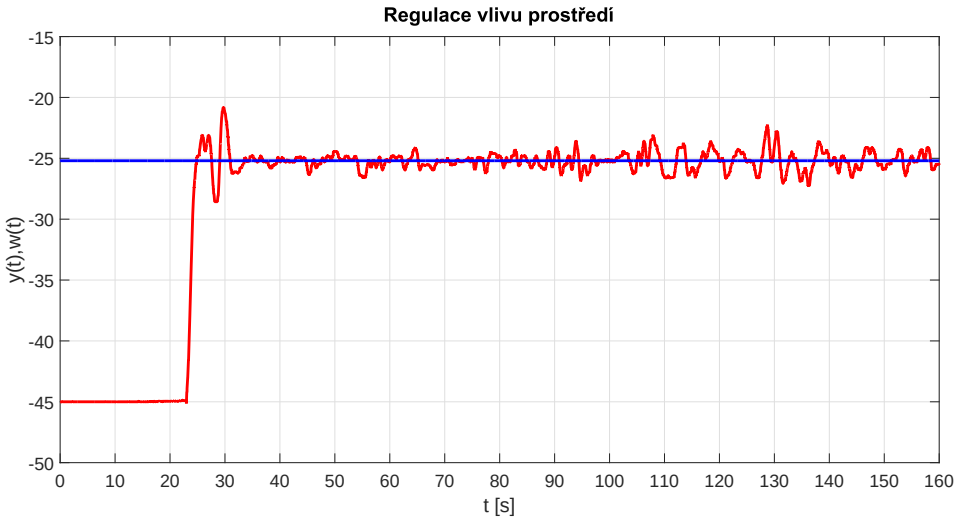


Obrázek 6.2: Regulační pochod hlavní vrtule

Během měření charakteristiky 6.2 na systém nepůsobily žádné výrazné poruchové jevy. Pro úspěšnou verifikaci nastavení PID regulátoru jsem proto systém hlavní vrtule otestoval, jak kvalitně dokáže vyregulovat poruchy.

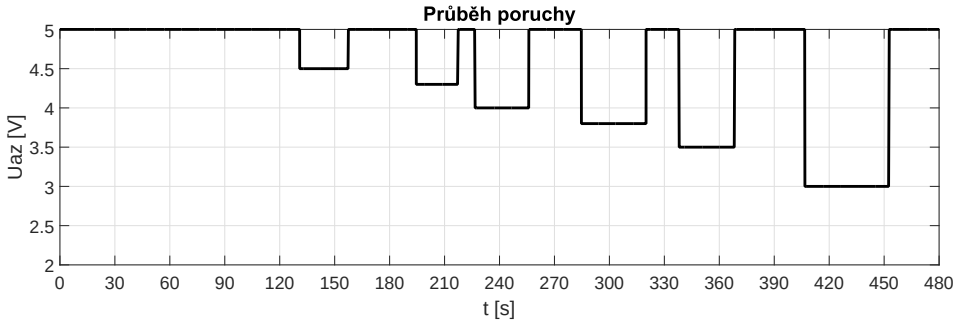
První poruchu, kterou jsem do systému zavedl byla ta, že jsem model vrtulníku umístil do prostor, kde byl zhoršený průtok vzduchu. Při tomto měření jsem požadovanou veličinu nastavil na úhel -25° a sledoval, jaký vliv bude mít odraz proudění od překážek na regulaci elevace.

Na charakteristice 6.3 je názorně vidět, že i tak náhodný vliv poruchy, jako je odraz proudění, které vyvolá hlavní vrtule, nemá zásadní vliv na kvalitu regulačního pochodu. V ustáleném stavu dochází k zákmitům kolem požadované hodnoty s amplitudou maximálně 2°.

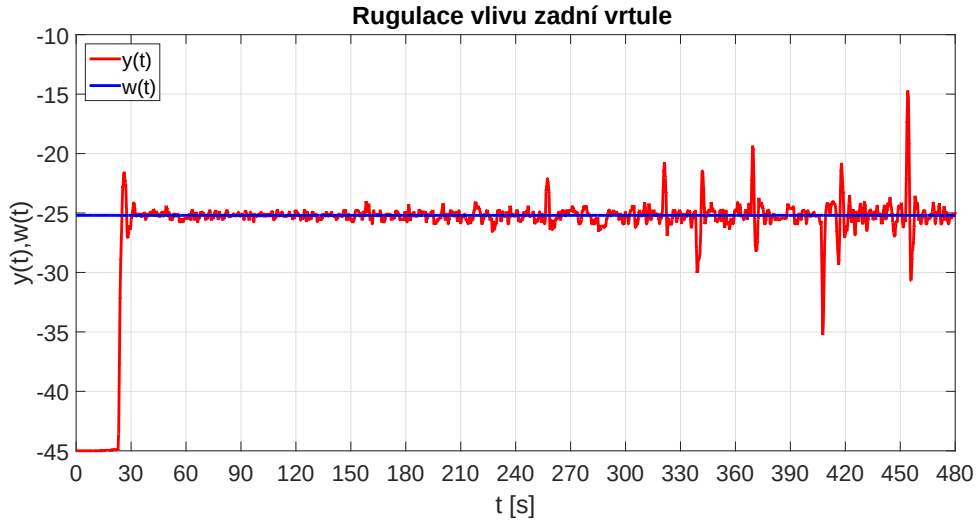


Obrázek 6.3: Regulační pochod hlavní vrtule - vliv poruchy prostředí

Druhá porucha, kterou jsem na soustavě ověřil, je odvozena od zadního motoru. Požadovaná hodnota elevace byla opět nastavena na konstatní hodnotu -25°. Během tohoto měření jsem různě velkými skoky měnil napětí na vedlejším motoru. Z charakteristiky 6.4 a 6.5 je patrné, že pokud změna napětí byla 1 V, neměl tento skok žadný vliv na celkovou elevaci vrtulníku. Pokud velikost tohoto skoku dosáhla hodnoty 1,5 V, došlo ke změně elevace přibližně o 5°. Tato změna byla však krátkodobá, do 2 sekund došlo k vyregulování působení poruchy. Podobně, pokud byl skok napětí z 5 V na 3 V, došlo ke změně elevace o 10°. Důležitým faktem je, že i takto silnou poruchu dokáže regulátor vcelku rychle potlačit a pracuje bez trvalé regulační odchylky.



Obrázek 6.4: Průběh poruchy zadní vrtule



Obrázek 6.5: Regulační pochod hlavní vrtule - vliv zadní vrtule

6.2 Řízení zadního motoru

Druhý PID regulátor řídí azimut vrtulníku. Nejprve byl regulátor seřízen pomocí PID tuneru, avšak výsledky nebyly dostačující. Pro první odhad parametrů jsem využil metodu Zieglera a Nicholse, jelikož jeho implementace je snadná a lze ji snadno aplikovat jak na modelu, tak na reálné soustavě.

$$R(s) = P + I\frac{1}{s} + Ds \tag{6.2}$$

K regulaci jsem použil paralení tvar regulátoru zobrazený na rovnici (6.2). Při nulové integrační a derivační složce jsem zvyšoval proporcionální zesílení až do okamžiku, kdy se obvod dostane na mez stability a objeví se netlumené kmity. Na základě tohoto stavu bylo možné určit periodu těchto netlumených kmitů T_k a kritické zesílení r_k [15]. Následně je nutné dopočítat konstanty proporcionální, integrační a derivační složky podle Tab. 6.2.

Tabulka 6.2: Tabulka parametrů Ziegler - Nichols[11]

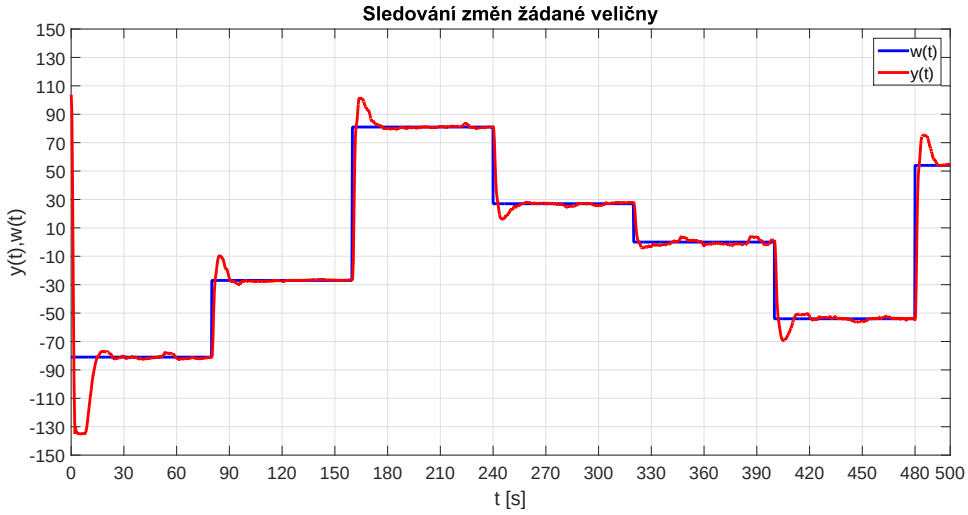
Control Type	P	I	D
P	0,5 r_k	-	-
PI	0,45 r_k	1,2 r_k/T_k	-
PD	0,8 r_k	-	$r_kT_k/8$
classic PID	0,6 r_k	2 r_k/T_k	$r_kT_k/8$
Pessen Integral Rule	0,7 r_k	2,5 r_k/T_k	3 $r_kT_k/20$
some overshoot	0,33 r_k	2 r_k/T_k	$r_kT_k/3$
no overshoot	0,2 r_k	2 r_k/T_k	$r_kT_k/3$

Klasické seřízení PID regulátoru meotdou Zieglera a Nicholse není příliš vhodné pro sledování změn žádané veličiny, jelikož reguláční pochod je silně kmitavý. Na druhou stranu tato pravidla jsou optimální z hlediska dobrého potlačení poruch [12]. Pro řízení azimutu jsem proto v tabulce vybral nastavení, kde by nemělo dojít k překmitu a regulační pochod by tak měl být aperiodický. Následně bylo nutné tyto konstanty otestovat na reálné soustavě. Ze znalosti působení jednotlivých složek PID regulátoru jsem pomocí ručního seřízení došel k hodnotám uvedeným v Tab. 6.3.

Tabulka 6.3: Nalezené konstanty PID regulátoru zadní vrtule

P	I	D
-0,32	-0,09	-0,47

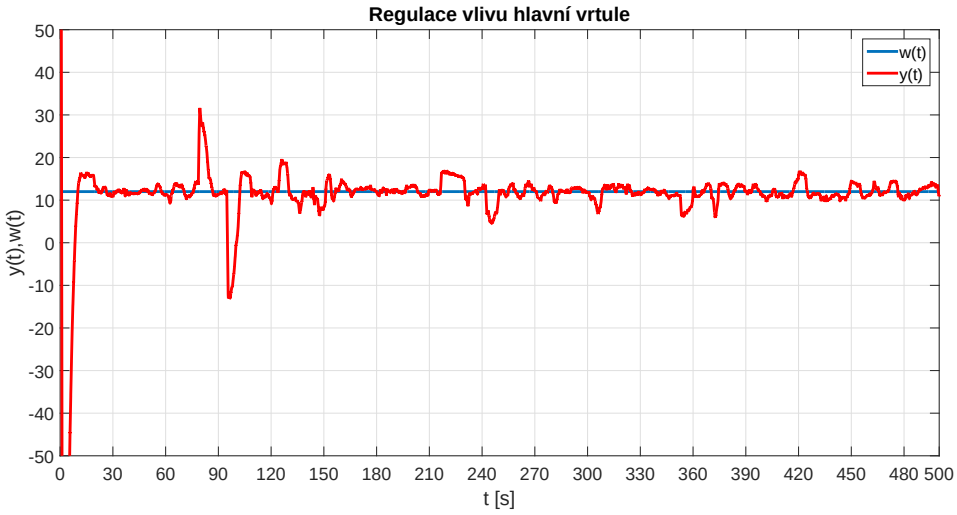
Při měření jsem prováděl skokovou změnu požadované veličiny v rozsahu přibližně 160°. Na charakteristice 6.6 je vidět, že i když byl regulátor seřízen s ohledem na aperiodický regulační pochod, tak k překmitu okolo požadované veličiny stejně dochází. Nastavení podle Zieglera a Nicholse vede zhruba k 10% až 60% překmitům, průměrně se uvádí hodnota 25 %. Pouze ručním seřízením jsem dosáhl toho, že při změně řídicí veličiny přibližně o 50° dochází ke krátkodobému překmitu o 20°. Následně dojde k ustálení regulačního pochodu a regulátor pracuje bez regulační odchylky. Během tohoto měření na systém působila statická porucha, která byla odvozena od hlavního motoru, který byl nastaven na konstatní napětí 7 V.



Obrázek 6.6: Regulační pochod zadní vrtule

Dále jsem na soustavě ověřil schopnost vyregulovat dynamickou poruchu 6.7. Ta byla vytvořena za pomoci hlavního motoru. Napětí na hlavním motoru jsem nastavil do pracovního bodu $u_0 = 8{,}8$ V a prováděl skoky napětí v jeho lineárním okolí, ale i mimo něj. Cílem bylo zjistit schopnost regulace na konstatní hodnotu při působení dynamické poruchy.

Obrázek 6.7: Průběh poruchy hlavní vrtule

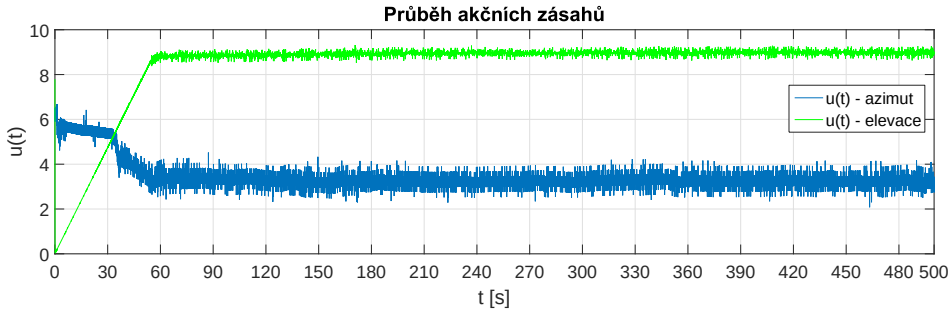


Obrázek 6.8: Regulační pochod zadní vrtule - vliv hlavní vrtule

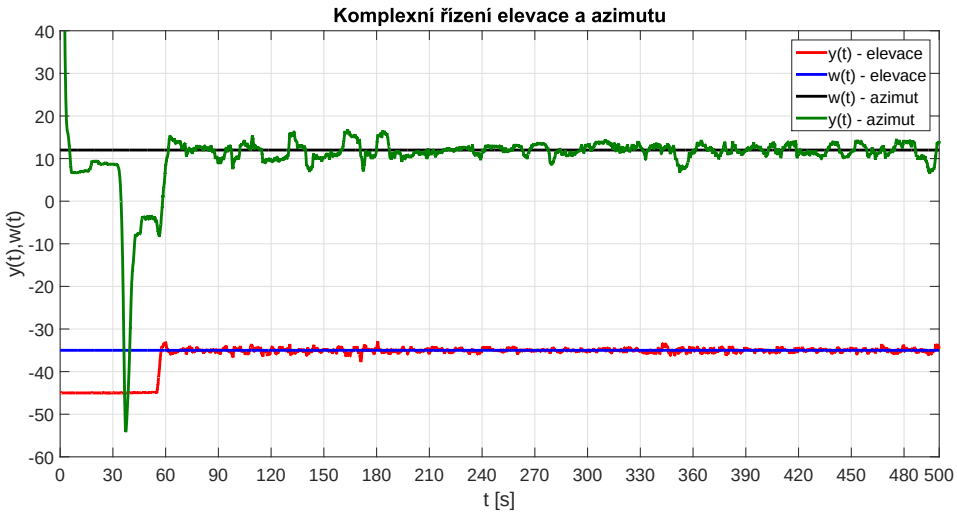
Na charakteristice 6.8 lze pozorovat prvotní zákmit, jelikož napětí na hlavním motoru bylo ihned nastavené do pracovního bodu. Regulátor na tuto změnu zareaguje a během 10 sekund dosáhne požadované hodnoty 12°. Při skoku napětí z 8,8 V na 8 V dojde k zákmitu okolo žádané hodnoty s amplitudou až 20°. K vyregulování tohoto děje opět postačí zhruba 10 sekund. Pokud jsou skoky menší a především v lineárním okolí pracovního bodu, nemají tak zasádní vliv na kvalitu regulačního pochodu.

6.3 Komplexní řízení vrtulníku

V této části jsem se pokusil zrealizovat řízení vrtulníku tak, aby byla zajištěna součinnost obou motorů a model by tak mohl sledovat zadanou trajektorii. Oba regulátory pracují ve vlastním regulačním obvodě a jejich konstanty zůstaly nezměněny. Nejprve jsem vyzkoušel regulaci na konstatní hodnotu elevace a zároveň azimutu. Požadovanou hodnotu azimutu jsem zvolil na 12° a elevace na -35°.



Obrázek 6.9: Průběh akčních zásahů hlavního a zadního motoru

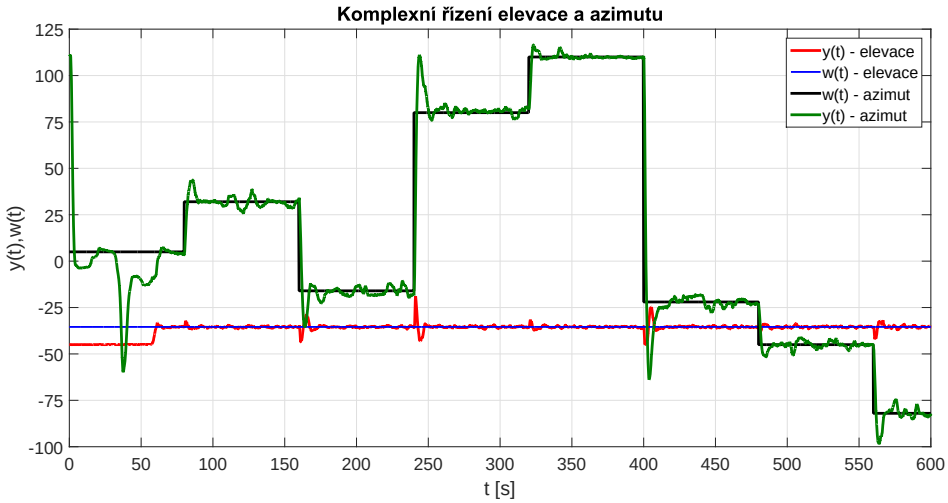


Obrázek 6.10: Komplexní řízení - konstatní elevace a azimut

Z charakterisitiky 6.10 lze vyčíst, že požadové elevace a azimutu vrtulník dosáhne po 60 sekundách. To je dáno z průběhů akčních veličin 6.9. Z nich je patrné, že při překročení hodnoty 5 V na hlavním motoru dochází k postupnému roztáčení vrtule. To má za následek odchýlení azimutu od požadované veličiny. Na tenhle stav zareaguje regulátor azimutu a zvýší velikost akčního zásahu.

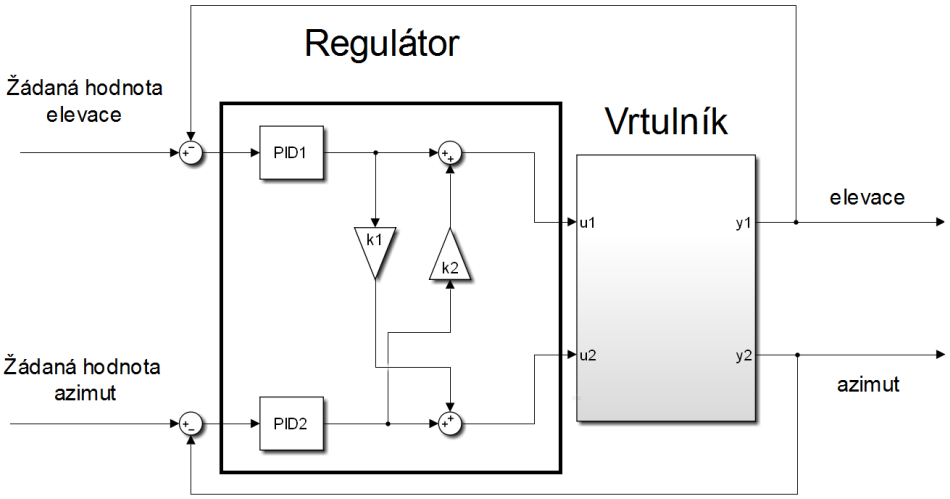
Po uplynutí této startovní procedury je hodnota elevace sledována téměř bez odchylek. U regulace azimutu dochází k lehkým zákmitům v jednotkách stupňů. To potvrzuje předpoklad, že křížová vazba mezi hlavní vrtulí a azimutem má výraznější vliv na chování vrtulníku než vazba mezi elevací a vedlejším motorem.

Dále jsem otestoval, jak se regulace vypořádá se stavem, kdy je požadovaná hodnota elevace nastavená na konstatní hodnotu -35° a zároveň se mění požadovaná hodnota azimutu v celém rozsahu. Z charakteristiky 6.11 je zřejmé, že start vrtulníku trvá opět přibližně 60 sekund. Odchylka elevace se při regulaci pohybuje maximálně v jednotkách stupňů. Ovšem pokud nastane požadavek na změnu hodnoty azimutu, dojde ke krátkodobému zákmitu elevace. Ten dosáhne maxima až 17°. U řízení azimutu jsou tyto překmity mnohem výraznější. To je dáno seřízením regulátoru podle Zieglera a Nicholse, pro které je regulační pochod se zákmity typický.



Obrázek 6.11: Komplexní řízení - konstatní elevace

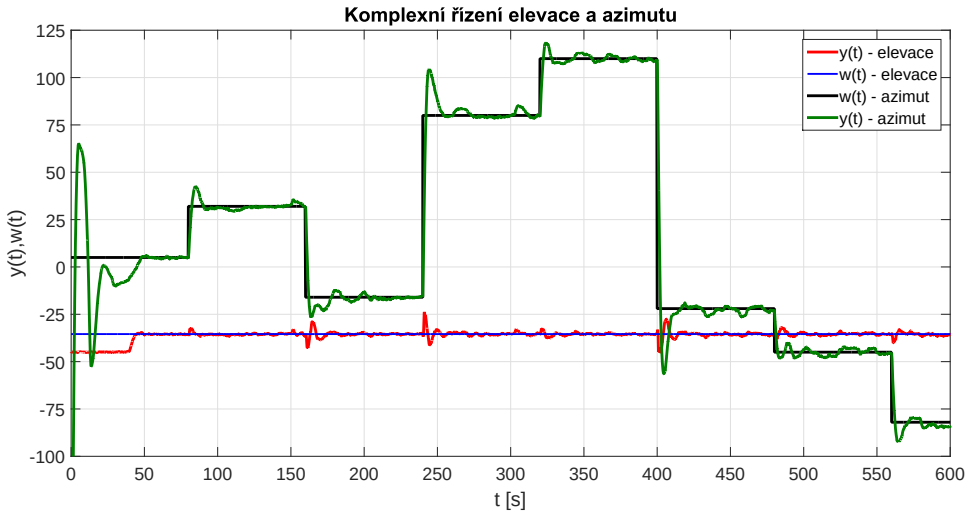
V předchozích měřeních regulátory pracovaly nezávisle na sobě. Ke zlepšení kvality regulace obou sledovaných veličin je proto nutné pokusit se eliminovat vliv křížových vazeb.



Obrázek 6.12: Schéma zapojení regulátorů

Za předpokladu, že dynamika stejnosměrných motorů je rychlejší než dynamika těla vrtulníku, tak napětí na hlavním motoru ovlivní azimut vrtulníku bez zpoždění. Totéž platí o souvislosti mezi vedlejším motorem a elevací. Tyto vazby lze vyloučit spojením jednotlivých výstupů regulátorů přes zesilovací bloky,viz Obr. 6.12. Zesílení těchto bloků je odvozeno z přenosů křížových vazeb. Nyní regulátory vzájemně interagují. To by mělo mít za následek snížení překmitů a celkové zklidnění regulačního pochodu.

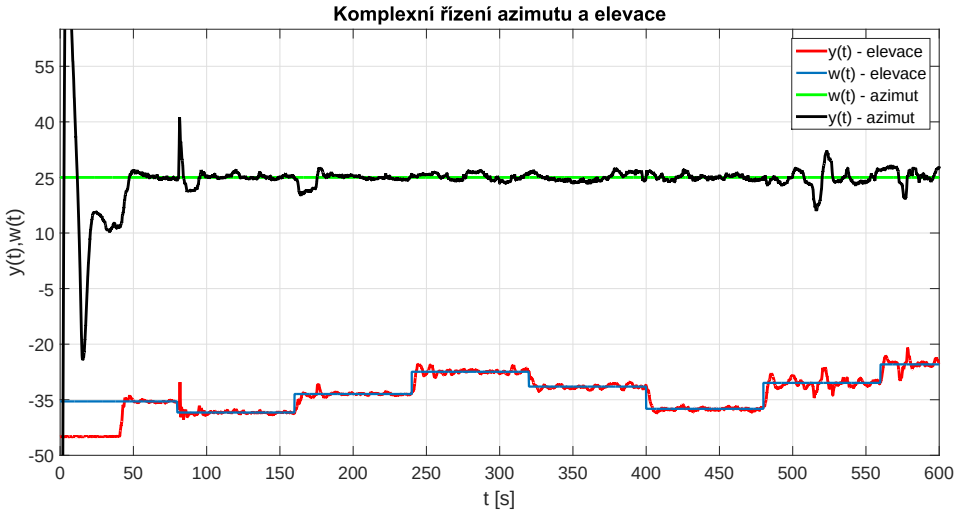
Vzájemným provázáním regulátorů jsem dosáhl snížení doby regulace. Z charakteristiky 6.13 je patrné, že se požadovaných hodnot dosáhne minimálně o 10 sekund dříve než v případě neinteragujících regulátorů. Zároveň se také snížily překmity. V případě elevace došlo k potlačení zákmitů přibližně na polovinu původní amplitudy. U řízení azimutu je regulační pochod klidnější a v ustáleném stavu přesněji sleduje zadanou trajektorii. Došlo i ke snížení překmitů azimutu přibližně o 10 %.



Obrázek 6.13: Komplexní řízení - konstatní elevace s interakcemi

Experimentálně jsem vyzkoušel jiné nastavení PID regulátorů, avšak to nevedlo ke zlepšení regulačního pochodu. Snížením integrační složky jsem sice dosáhl dalšího zmenšení prvotních překmitů, ale co se týče sledování zadané trajektorie, tak toto seřízení pracovalo s mnohem většími odchylkami od požadované hodnoty.

V další části jsem se zaměřil na situaci, kdy je požadovaná hodnota azimutu konstatní a skokově se mění požadavek na elevaci. V mém případě jsem zvolil azimut na 25°. Skoky žádané hodnoty elevace jsem prováděl v rozsahu, kde je vrtulník stabilní. I v tomto případě byly regulátory vzájemně propojeny pomocí zesilovacích členů.

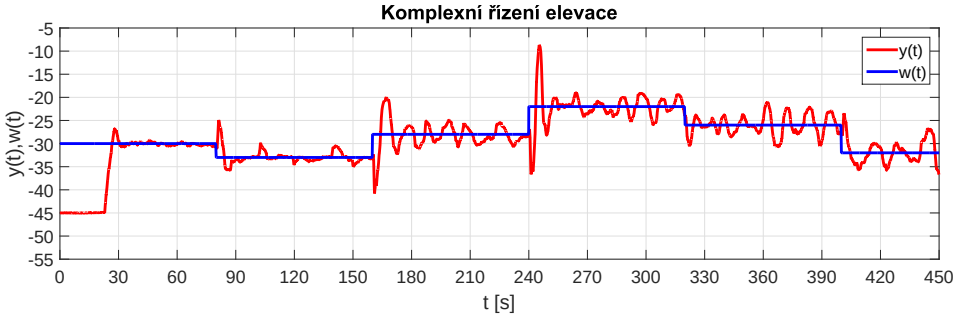


Obrázek 6.14: Komplexní řízení - konstatní azimut s interakcemi

Na charakteristice 6.14 je vidět, že rozdíly mezi požadovanou a regulovanou hodnotou byl u obou sledovaných veličin pouze v jednotkách stupňů. Změna elevace tak neměla žádný viditelný vliv na azimut vrtulníku. Z tohoto důvodu nebylo nutné upravit konstanty regulátorů a ani zesílení kompenzačních členů, které tyto regulátory vzájemně propojují.

Na konec přišel experiment, kdy se požadované hodnoty měnily ve stejný čas, viz charakteristiky 6.15 a 6.16. Změny žádané hodnoty elevace jsem provedl v oblasti, kde je vrtulník nejstabilnější. Na Obr. 6.15 lze pozorovat silné zákmity, pokud se elevace a azimut mění zároveň. Následně dochází k ustálení regulačního pochodu a vrtulník osciluje kolem žádané hodnoty s malou výchylkou. Přenastavením regulátoru nebo změnou zesílení bloků potlačujících křížové vazby jsem nedosáhl lepších výsledků. Docházelo k silnějším kmitům, které měly za následek celkovou destabilizaci řízení elevace a převržení vrtulníku. Z tohoto důvodu byly konstanty vráceny na původní hodnoty.

Při změně požadované hodnoty azimutu dochází k překmitu, avšak po uplynutí tohoto přechodového děje vrtulník dokáže sledovat zadané hodnoty bez větších odchylek.



Obrázek 6.15: Komplexní řízení - elevace

Obrázek 6.16: Komplexní řízení - azimut

Závěr

V bakalářské práci byly splněny všechny body zadání. V první řadě jsem se seznámil se základními vlastnostmi vrtulníku a jeho omezeními. Dále jsem provedl rozbor PID regulátorů, jakožto stěžejního prvku této práce. Tento regulátor není nejvhodnější řešení pro řízení vícerozměrných nelineárních soustav, jakou je i model vrtulníku. Ovšem vyniká snadnou implementací výpočetního algoritmu. Z tohoto důvodu patří mezi nejrozšířenější spojité regulátory. Výsledky dosažené v této práci demonstrují reálnou použitelnost těchto regulátorů při řízení soustav, které jsou vícerozměrové a zároveň nelineární.

Ke zlepšení vlastností hlavního rotoru jsem na základě měření vybral vrtuli o rozměru 24 × 15. Posunutí těžiště směrem k nosu vrtulníku mělo další pozitivní vliv na statické a dynamické vlastnosti vrtulníku. V tomto stavu bylo možné naměřit přechodové charakteristiky hlavní a vedlejší vrtule, které by šli identifikovat. Výsledkem byly přenosové funkce popisující vlastnosti jednotlivých systémů. Dále bylo nutné zjistit přenosy křížových vazeb, jelikož mají nezanedbatelný vliv na chování vrtulníku.

Po identifikaci jsem nejprve navrhl řízení každého motoru samostatně. U řízení elevace je stabilní oblast mezi úhly -45° a -18°. Pokud by byla požadovaná hodnota mimo lineární část statické charakteristiky, docházelo by k silným zákmitům soustavy, které by vedly až k překlopení modelu. I tento experiment ukazuje omezené možnosti PID regulátorů. Azimut je možné řídit v celém jeho rozsahu. Dále byly oba systémy otestovány na působení různých poruch.

Po úspěšném návrhu řízení pro jednotlivé motory jsem postoupil ke komplexnímu návrhu regulace, kde by měla být zajištěna součinnost obou motorů. Konstanty regulátorů zůstaly na původních hodnotách, jelikož dalším laděním docházelo spíše k destabilizaci regulačních pochodů. Regulátory bylo nutné vzájemně provázat. To mělo za následek alespoň částečné potlačení kmitů, které nastávají při změně jedné z požadovaných veličin. Ve výsledku vrtulník dokáže sledovat zadanou trajektorii, ovšem řízení elevace je možné pouze v omezeném rozsahu. Návrhem na pokračování této bakalářské práce pak může být další rozšíření oblasti, ve které jde regulovat elevaci. Jako výchozí bod lze využít dosažené výsledky v této práci. Dále by pak bylo možné pokusit se implementovat navržené regulátory do reálného zařízení.

Literatura

[1] HUMUSOFT. CE 150 helicopter model: Educational Manual. *Dipartimento di Ingegneria dell-informazione e scienze matematiche* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.dii.unisi.it/ control/cmr/altro/heli_ce150_manual.pdf

[2] HUSPEKA, Jan. Návrh řízení modelu vrtulníku. *MATEO - The European network of mechatronics centres and industrial controllers ...* Plzeň: Západočeská univerzita, 2006, s. 97-105. ISBN 80-704-3508-9.

[3] VORÁČEK, Rudolf, František ANDRÝSEK, Zdeněk BRÝDL, Luděk KOHOUT a Ladislav ŠMEJKAL. *Automatizace a automatizační technika*. Praha: Computer Press, 2000. ISBN 80-722-6247-5.

[4] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0148-9.

[5] MODRLÁK, Osvald a Lukáš HUBKA. *Automatické řízení: učební text*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-850-2.

[6] Jak se vyznat v označení vrtulí. *RC-zoom.cz - Váš modelářský svět* [online]. 2013 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.rc-zoom.cz/jak-se-vyznat-v-oznaceni-vrtuli/

[7] *WWW.RCSVET.CZ - RCsvět.cz* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.rcsvet.cz/235-prumer-8-10

[8] Create linear and nonlinear dynamic system models from measured input-output data. *MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/products/sysid.html

[9] Aproximace astatické soustavy vyššího řádu. *CAAC - počítačová podpora automatického řízení* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://195.178.94.43/CAAC_PHP/CAAC/cesky/identifikace/apr_asvr/apr_asvr.php

[10] VROŽINA, Milan, Zora JANČÍKOVÁ a Jiří DAVID. *Identifikace systémů: učební text* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012 [cit. 2018-05-06]. ISBN 978-80-248-2594-6. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/IS/Identifikace%20systemu.pdf

[11] Ziegler—Nichols method. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols_method

[12] KLÁN, Petr. Ziegler-Nicholsovo nastavení PID regulátoru — retrospektiva. *AUTOMA* [online]. **2000**(4) [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/ziegler-nicholsovo-nastaveni-pid-regulatoru-retrospektiva-2000_04_27697_3105/

[13] BOBÁL, Vladimír. *Identifikace systémů: Určeno pro posl. fak. technologické.* Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990. ISBN 978-802-1401-259.

[14] KOPAL, Martin. *Explicitní prediktivní řízení a jeho aplikace.* Liberec, 2014. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií.

[15] HLAVA, Jaroslav. *Prostředky automatického řízení II: analogové a číselné regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy.* Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-010-2221-8.

A Obsah přiloženého CD

- Text bakalářské práce
  - BPDominikPaulu2018.pdf
- Model vrtulníku
  - Statické a dynamické charakteristiky vrtulí ve formátu .fig, .mat, .eps
    * 20×10
    * 20×12
    * 20×15
    * 23×10
    * 23×18
    * 24×15
  - Komplexní regulační schéma
  - Charakteristiky naměřených regulačních pochodů ve formátu .fig, .mat, .eps
    * azimut
    * elevace
    * komplexní