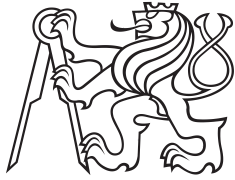


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Systemy stabilizace eVTOL prostředků pomocí trysek

Vladimír Šnejd

Vedoucí: doc. Ing. Martin Hromčík, Ph.D.
Studijní program: Kybernetika a robotika
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šnejd** Jméno: **Vladimír** Osobní číslo: **499217**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Systémy stabilizace eVTOL prostředků pomocí trysek

Název bakalářské práce anglicky:

Stabilization of eVTOL aircraft using jets

Pokyny pro vypracování:

Projekt pojednává o možnosti systému stabilizace eVTOL prostředků pomocí trysek. Cílem projektu je analýza problematiky rychlých změn tahu potřebných ke stabilizaci stroje při rychlých změnách orientace vlivem poruch a prozkoumání možnosti kombinace stávajícího řízení, regulace otáček pevných vrtulí, s reakčními tryskami. Trysky by poskytovaly okamžitý tah v případě potřeby rychlé reakce.

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou řízení eVTOL jako dronu. Navrhněte způsob využití trysek k řízení.
2. Připravte zjednodušený model využívající trysky k řízení. Zkoumejte na něm chování, připravte vhodný způsob využití trysek na laboratorním modelu/skutečném dronu.
3. Zprovozněte laboratorní model vrtulí nebo dron a realizujte přidání trysek pro kombinované řízení.
4. Proveďte experimentální vyhodnocení přínosů kombinovaného řízení s tryskami ve srovnání s řízením čistě pomocí regulace otáček vrtulí.

Seznam doporučené literatury:

- [1] B. L. Stevens, F. L. Lewis. N. Johnson Aircraft Control and simulation . Third edition, John Wiley & Sons, Inc. 2016
[2] Roger W. Pratt Johnson Flight Control Systems: Practical Issues in Design and Implementation. Institution of Engineering and Technology, 2000

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Martin Hromčík, Ph.D. katedra řídicí techniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **26.01.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2023/2024

doc. Ing. Martin Hromčík, Ph.D.
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

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Martinovi Hromčíkovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 21. května 2023

Vladimír Šnejd

Malé drony využívají ke své stabilizaci změnu otáček vrtulí. Tyto změny musí být rychlé, což by u eVTOL, kde se počítá s využitím více velikých vrtulí, byl problém. Rychlými změnami rychlosti by docházelo u velkých vrtulí, z důvodu setrvačných sil, k velkému namáhání. Pokud by bylo takové vrtule, které by namáhání vydržely, možné vyrobit, muselo by dojít i ke zvětšení výkonu motorů oproti potřebnému výkonu v klidném stavu a příslušných dílů s tím spojených. To vede k myšlence využití řízení pomocí trysek pro rychlé změny v kombinaci s řízením rychlosti jednotlivých rotorů.

Jako aktuátory by bylo možno využít reakční trysky. Podobný způsob řízení náklonu se využívá u už existujících letadel s kolmým vzletem a přistáním, kde je odváděn plyn z proudového motoru a pouštěn do trysek na konci křídel. Pokud by se zdroj plynu nahradil zásobníkem, dal by se tento princip využít i u eVTOL.

Regulace samotného tahu trysek by byla komplikovaná a neefektivní, proto samotné trysky mají pouze dva stavy on-off. Z toho důvodu musí být regulace realizovaná on-off řízením.

Jako nejvhodnější se ukazuje použít BANG-OFF-BANG řízení, které je robustní, dostatečně rychlé a snadné na implementaci z pohledu senzoriky. Naproti tomu, PWM řízení se ukazuje jako nevhodné.

Klíčová slova: řízení, on-off regulace, eVTOL, reakční řízení

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

Abstract

Title translation: Stabilization of eVTOL aircraft using jets

Small drones use change in a propeller speed to stabilise themselves. These changes need to be fast, which would be a problem for eVTOL, where multiple large propellers are expected to be used. Rapid changes in speed would put a lot of stress on the large propellers, due to inertial forces, and if such propellers that could withstand the stresses could be produced, there must also be an increase in the power of the motors and the associated parts, compared to the power required for flight. This leads to the idea of using reaction nozzle control for rapid changes in combination with rotor speed control.

Reaction jets could be used as actuators. A similar method of pitch control is used on existing vertical take-off and landing aircraft, where the gas is drawn off the jet engine and released into nozzles at the wingtips. If the gas source were replaced by a reservoir, this principle could also be applied to eVTOL.

Controlling the thrust of the jets themselves would be complicated and inefficient, so the jets themselves have only two on-off states. For this reason, the regulation must be implemented by on-off control.

The BANG-OFF-BANG control appears to be the most suitable, as it is robust, fast enough and with easy to implement sensorics. On the other hand, PWM control proves to be unsuitable.

Keywords: control, on-off control, eVTOL, reaction control

Obsah

1 Úvod	1		
1.1 Historický vývoj VTOL prostředků	1		
1.2 Elektromotory místo konvenčních pohonů	3		
1.3 Využití trysek místo konvenčních principů	3		
1.4 Perspektiva zkřížení principů	4		
1.5 Řízení trysek	5		
2 Model	7		
2.1 Experimentální model	7		
2.1.1 Návrh modelu	7		
2.1.2 Návrh trysek	8		
2.1.3 Řídící elektronika	9		
2.1.4 Sestavení experimentálního modelu	10		
2.1.5 Implementace řídicího kódu	14		
2.2 Simulační model	15		
2.2.1 Simulinkové zapojení	16		
2.2.2 Stavový model a přenos	16		
2.2.3 Ověření modelu simulací	17		
3 Regulace	19		
3.1 ON-OFF regulace	19		
3.1.1 Signum	20		
3.1.2 Signum s pásmem necitlivosti	20		
3.1.3 BANG-OFF-BANG s lineární funkcí	22		
3.1.4 Minimum time BANG-BANG	25		
3.2 PWM regulace	30		
3.2.1 Regulace s konstantní dobou OFF stavu	30		
3.2.2 PWM regulace s PID	31		
4 Závěr	35		
4.1 PWM	35		
4.2 BANG-BANG	35		
A Literatura	37		
B Seznam příloh	39		

B.1 3D model experimentálního modelu	39
B.2 Simulinkový modely a MATLAB	39
B.3 Kód regulátorů	40

Obrázky

1.1 Campbellova kategorizace VTOL prostředků v roce 1962 [1].	2	2.4 75 psi, $t_0 = 1.55$ s	8
1.2 Bell Boeing V-22 Osprey 2		2.5 100 psi, $t_0 = 0.75$ s	8
1.3 Bell V-280 Valor	2	2.6 Tryska.	9
1.4 Sikorsky–Boeing SB-1 Defiant . . .	2	2.7 Zapojení řídicí elektroniky.	10
1.5 McDonnell Douglas AV-8B Harrier II	2	2.8 Pohled na celý experimentální model.	11
1.6 Lockheed Martin F-35 Lightning II	2	2.9 Pohled na celý experimentální model.	11
1.7 NASA GL-10 Greased Lightning .	2	2.10 Pohled na model ze shora na pneumatický systém.	12
1.8 Efektivita vznášení různých konceptů, jako výsledek testů při vývoji XV-15 [3].	3	2.11 Detailnější pohled na senzory a solenoidy.	12
1.9 Trysky využívající horkého vzduchu z motoru pro vytváření tahu. 4		2.12 Detail na řídicí trysku.	13
1.10 Trysky využívající odpařovaného zkapalněného plynu pro vytváření tahu.	5	2.13 Detail na tlačítka sloužící k ovládání.	13
2.1 Náčrt konstrukce experimentálního modelu.	7	2.14 Využití periferie na MCU	14
2.2 30 psi, $t_0 = 1.45$ s	8	2.15 Nastavení hodin MCU.	14
2.3 50 psi, $t_0 = 1.05$ s	8	2.16 Implementace modelu v prostředí Simulink.	16
		2.17 Skoková odezva systému.	17

3.1 Simulovaný průběh s regulací pomocí funkce signum . $\theta_0 = -15^\circ$. 20	3.12 Průběh regulace s konstantní a náhodnými poruchami pomocí PD BANG-OFF-BANG regulátoru. 25
3.2 Reálný průběh s regulací pomocí funkce signum . V čase $t = 3,6$ s došlo k zapnutí regulátoru. 20	3.13 Přepínací funkce pro můj systém. 26
3.3 Nasimulované průběhy regulace pomocí signum s pásmem necitlivosti. $\theta_0 = 3^\circ$ 21	3.14 Regulace pouze přepínací funkcí. 28
3.4 Funkce signum 21	3.15 Regulace přepínací funkcí s pásmem necitlivosti. 28
3.5 Funkce signum s pásmem necitlivosti. 21	3.16 Detaily průběhu minimum time regulace s akčními zásahy. 28
3.6 Reálný průběh s regulací pomocí funkce signum s pásmem necitlivosti. 21	3.17 Minimal-time regulace přepínací funkcí s kompenzací zpoždění ventilů. 29
3.7 Pásmo necitlivosti s hysterezí (Schmittův klopný obvod). 22	3.18 Detaily průběhu minimum time regulace s kompenzací zpoždění ventilů a s akčními zásahy. 29
3.8 Blokový diagram Schmittova klopného obvodu s lineární přepínací funkcí. 22	3.19 Průběh s proporcionálním PD regulátorem s imitací PWM. 31
3.9 Root-locus editor pro návrh konstanty τ 23	3.20 Simulinkové zapojení pro naladění PID pomocí PID tuner. 32
3.10 Simulovaný průběh regulace s PD BANG-OFF-BANG regulátorem. . . 25	3.21 Simulovaný průběh PWM řízení s frekvencí 2,5 Hz. 33
3.11 Průběh regulace s náhodnými poruchami pomocí PD BANG-OFF-BANG regulátoru. 25	3.22 Průběh PWM řízení s frekvencí 2,5 Hz. 33
	3.23 Simulovaný průběh PWM řízení s frekvencí 5 Hz. 33

3.24 Průběh PWM řízení s frekvencí 5 Hz.	33
3.25 Simulovaný průběh PWM řízení s frekvencí 1 kHz.....	34
3.26 Průběh PWM řízení s frekvencí 1 kHz.	34

Tabulky

2.1 Naměřený tah trysky v závislosti na tlaku.	9
3.1 Konstanty regulátoru.	24
3.2 Konstanty PD regulátoru.	30
3.3 Konstanty PID regulátoru.	32
3.4 Měření zpoždění systému [ms]. .	32

Kapitola 1

Úvod

1.1 Historický vývoj VTOL prostředků

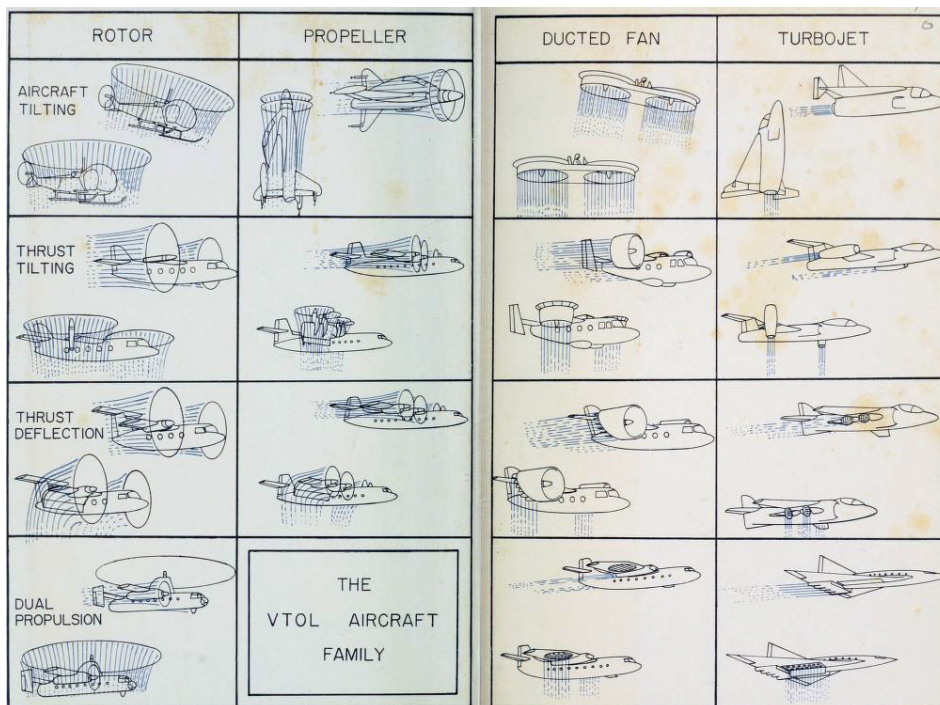
Myšlenka letadel s kolmým vzletem a přistáním (VTOL) se objevuje už v polovině 20. století. Principy a konstrukce, podle kterých lze rozdělit VTOL prostředky jsou znázorněny na obrázku 1.1. U velkých strojů jsou, v dnešní době, úspěšně používány způsoby rotoru s naklápěním celého stroje, naklápění celých rotorů (např. V-22 Osprey obr. 1.2, V-280 Valor obr. 1.3), kombinace dvou způsobů pohonu (např. SB-1 Defiant obr. 1.4) a deflekce tahu (např. AV-8b Harrier II obr. 1.5), případně s pomocným uzavřeným rotorem (např. F-35 Lightning II obr. 1.6).

U VTOL prostředků se vždy řeší efektivita vznášení. Jak je vidět na obrázku 1.8 nejlepších výsledků vztlaku vytvářeného při vzášení dosahují helikoptéry, které ale mají nevýhodu pomalé transportní rychlosti a velké spotřeby paliva při letech na dlouhé trasy. Hned za nimi je konstrukce naklápěcích rotorů, které sdílí výhody konvenčního vrtulového letadla v letu, což vede ke snaze využití této konstrukce.

S konstrukcí naklápěcích rotorů došla firma Bell ke konstrukci, která se v módu vrtulníku chová, jako dvourotorová helikoptéra, a tudíž ji lze i stejným způsobem řídit. Tvar listů rotoru, který je vhodný pro helikoptéru, není ale vhodný pro rychle letící vrtulové letadlo, proto je tvar listů rotorů u tiltrotorů specifický pro svojí aplikaci. Dnes používané rotory u turbohřídelových tiltrotorů jsou s nastavitelným kolektivem uloženy na gimballu. [1]

Konstrukční řešení rotorů s nastavitelným kolektivem uloženy na gimballu není konstrukčně triviální a vyžaduje drahou pravidelnou údržbu. Další problém je turbohřídelový motor, který lze spolehlivě naklápět, je taktéž konstrukčně

náročný, drahý na údržbu a nespolehlivý. [2]



Obrázek 1.1: Campbellova kategorizace VTOL prostředků v roce 1962 [1].



Obrázek 1.2: Bell Boeing V-22 Osprey



Obrázek 1.3: Bell V-280 Valor



Obrázek 1.4: Sikorsky-Boeing SB-1 Defiant



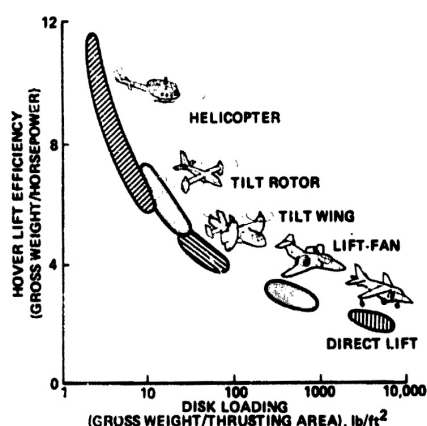
Obrázek 1.5: McDonnell Douglas AV-8B Harrier II



Obrázek 1.6: Lockheed Martin F-35 Lightning II



Obrázek 1.7: NASA GL-10 Greased Lightning



Obrázek 1.8: Efektivita vznášení různých konceptů, jako výsledek testů při vývoji XV-15 [3].

1.2 Elektromotory místo konvenčních pohonů

Díky novým technologiím se nabízí možnost využití výhod tiltrotorů a zároveň se vyhnou výše jmenovaným problémům použitím více elektromotorů, namísto páru turbohřídelových motorů. Takové řešení je vidět na obrázku 1.7. Osadit více elektromotorů není problém, protože elektromotor je lehčí, není problém s jeho natáčením a je konstrukčně jednoduchý. Osazením více elektromotorů a tím i rotorů na více míst dostáváme spíše systém, který se chová jako nějaká kvadrokoptéra, oktokoptéta, díky čemuž nemusí být rotory umístěné na gimbalu. Nabízí se i možnost, že díky schopnosti elektromotorů snadno měnit otáčky není třeba říditelného kolektivu, jako je to u malých dronů.

Ukazuje se, že při vzletech a přistáních změny otáček motorů musí být rychlé, což by u eVTOL, narozdíl od malých dronů, kde se počítá s využitím více velikých vrtulí, byl problém. Rychlými změnami rychlosti by docházelo u velkých vrtulí, z důvodu setrvačných sil, k velkému namáhání a pokud bylo takové vrtule, které by namáhání vydržely, možné vyrobit, muselo by dojít i ke zvětšení výkonu motorů, oproti potřebnému výkonu v klidném stavu, a příslušných dílů s tím spojených. Musíme tedy hledat i nějaký jiný způsob regulace pro vzlet a přistání.

1.3 Využití trysek místo konvenčních principů

Jak jsem již zmiňoval v 1.1, některá dnes používaná letadla s VTOL schopnostmi používají ke svému řízení reakční trysky. Jsou to konkrétně

stroje s proudovými motory, kdy hnací plyn do trysek získávají odebráním ze samotného hlavního motoru.

Je přirozené pro rotorově založené stroje s turbohřídelovými motory, aby používaly k řízení nastavení kolektivu a pro stroje s proudovým motorem, aby používaly odvod horkých plynů z motoru pro řízení tryskami reakční silou.

Pokud ale opouštíme konvenční pohony a nahrazujeme je elektromotory v kombinaci s generátorem, nabízí se myšlenka zkřížení obou technologií použitím konstrukčně jednoduchých fixních rotorů a reakčních trysek pro rychlé regulační zásahy, a to pouze v době konfigurace kolmého vzletu a přistání.

1.4 Perspektiva zkřížení principů

Potřeba rychlých regulačních zásahů je pouze ve fázi kolmého vzletu a přistání. Doba, kdy je stroj v této konfiguraci je relativně krátká část letu. Řešení regulace pro tuhle krátkou část letu se stává mrtvou váhou v konfiguraci letadla, ve které je stroj nejdelší dobu letu a dochází ke zbytečné spotřebě paliva. Proto připadá v úvahu využít i alternativního způsobu řízení tryskami, které by se mohlo ukázat jako lehčí a konstrukčně jednodušší. Realizace by mohla být s nějakou nádrží se zásobou plynu, jako v případě vesmírných plavidel obrázek 1.10, nebo použít generátor tlakového, případně horkého plynu, kterému dodává energii generátor, použitý i k pohonu samotných elektromotorů a použít trysky podobné tryškám použitým na proudových letadlech obrázek 1.9.

Myšlenka je taková, že nahradit systém stavění kolektivu takovýmto tlakovým systémem reakčních trysek by mohlo přinést lepší výsledky regulace a konstrukční zjednodušení.

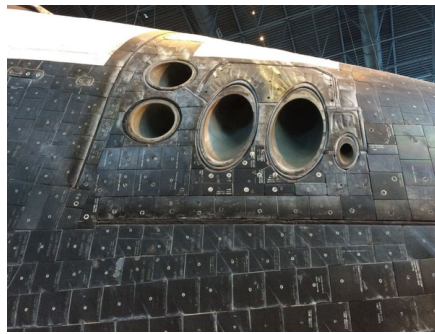
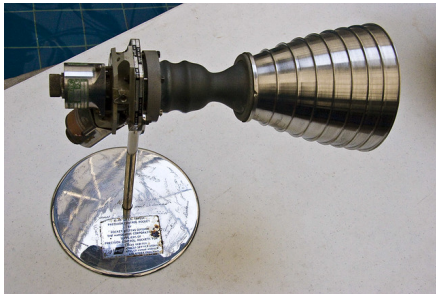


(a) : Detail trysky AV-8B Harrier II na konci křídla.



(b) : Detail trysky AV-8B Harrier II na ocasu.

Obrázek 1.9: Trysky využívající horkého vzduchu z motoru pro vytváření tahu.



(a) : Detail trysky z programu Apollo. (b) : Detail trysek na přídí raketoplánu.

Obrázek 1.10: Trysky využívající odpařovaného zkapalněného plynu pro vytváření tahu.

1.5 Řízení trysek

Pokud bychom chtěli implementovat proporční trysky ztratili bychom výhodu jednoduché konstrukce. Rozhodl jsem se tedy použít trysky pouze se dvěma stavy on-off, proto musí být regulace realizovaná on-off řízením.

Kapitola 2

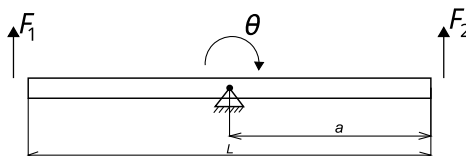
Model

2.1 Experimentální model

Pro otestování konceptu a porovnání řízení pomocí trysek s jinými možnými způsoby řízení jsem připravil jednoduchý experimentální model "houpačky".

2.1.1 Návrh modelu

Experimentální model je znázorněn na obrázku 2.1. Pro vytvoření reakční síly F slouží navržená tryska, a solenoid řízený mikrokontrolerem. Monostabilní solenoid nám věrně simuluje chování on-off trysek. Naklonění φ je sledováno pomocí optického rotačního enkodéru, který je spojen s hřídelí, která je uložena v ložiskách a nalisována do těla houpačky. Druhý sensor natočení je gyroskop kombinovaný s akcelerometrem a implementací Kalmanova filtru. Na jednom z ramen je umístěn akcelerometr, který slouží k měření zrychlení ramen. Úhel natočení je omezen dorazy a má rozsah θ je $-20^\circ - +20^\circ$.



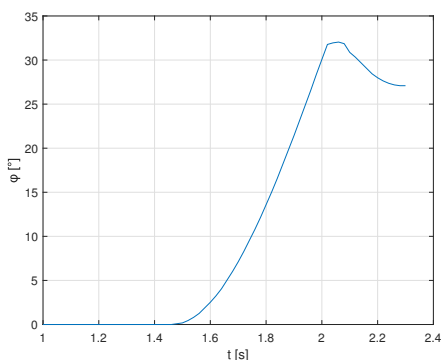
Obrázek 2.1: Náčrt konstrukce experimentálního modelu.

2.1.2 Návrh trysek

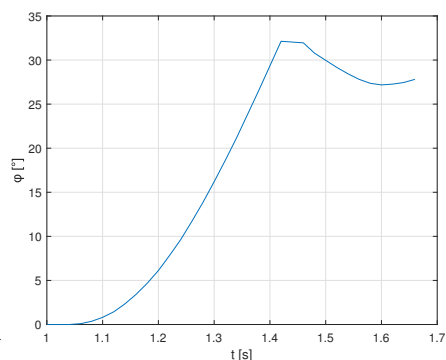
Trysky, které vytváří tah jsou umístěny na obou koncích ramen houpačky. Stlačený vzduch je přiveden přes řídicí solenoid z tlakové nádrže.

U trysky, viz obrázek 2.6 dosáhneme tahu až 2 N. Nejlepší tvar trysky jsem našel experimentálně. Nejlépe vyšel průměr 1,8 mm s konickým vstupem a rovným výstupem. Vztah tlaku a tahu jsem zjistil experimentálně postupným měřením tahu. Tah byl měřen přímo připevněním trysky na load cell, vpuštěním daného tlaku a zaznamenání tenze na load cell. Tenze tedy přímo odpovídá tahu trysky. Naměřené hodnoty ustáleného stavu, převedené na tah v N jsem zanesl do tabulky 2.1.

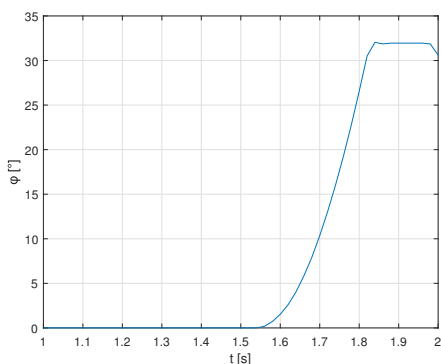
Na modelu jsem, experimentálním měřením odezvy na skok, zjistil (naměřené odezvy pro jednotlivé tlaky můžeme pozorovat na obr. 2.2, 2.3, 2.4, 2.5), že už 30 psi s tahem 0,5 N je dostačující pro otestování konceptu. Zvolením co nejnižšího potřebného tlaku snižujeme požadavky na tlakovou nádrž a prodlužujeme interval její výměny.



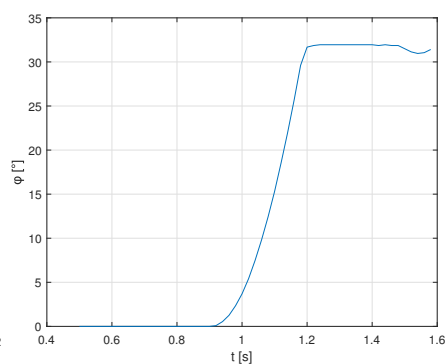
Obrázek 2.2: 30 psi, $t_0 = 1.45$ s



Obrázek 2.3: 50 psi, $t_0 = 1.05$ s



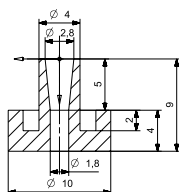
Obrázek 2.4: 75 psi, $t_0 = 1.55$ s



Obrázek 2.5: 100 psi, $t_0 = 0.75$ s

Tlak [psi]	Tah [N]		
	Tryska 1,8mm	Tryska 0,9mm	bez trysky
100psi	1,2	0,7	0,9
75psi	0,8	0,6	0,8
50psi	0,6	0,5	0,4
30psi	0,5	0,3	0,2

Tabulka 2.1: Naměřený tah trysky v závislosti na tlaku.



Obrázek 2.6: Tryska.

2.1.3 Řídící elektronika

Celý experimentální model je řízen vývojovým kitem STM32 Nucelo-F302 s MCU STM32F302R8T6. MCU počítá akční zásah regulátoru na základě signálů ze sensorů, které zpracovává a následně pomocí tranzistorů ovládá jednotlivé solenoidy, které otvírají ventily. Zároveň odesílá přes rozhraní UART zpracovaná data ze sensorů s časovými známkami.

Použitý enkodér má rozlišení 1000 dílků na otáčku, to mi dává rozlišení 0,36°, na což musím myslet později, při návrhu a evaluaci řízení.

Signál z enkodéru zpracovávám pomocí timerů integrovaných v MCU. MCU je nastaveno na rychlost 64 MHz, na stejné frekvenci běží i hodiny příslušející timerům.

Pro přesnější měření natočení jsem model vybavil i gyroskopem kombinovaným s akcelerometrem a Kalmanovým filtrem GY-25. Modul přes UART odesílá úhel natočení. V porovnání s enkodérem je u gyroskopu náročnější jeho inicializace a zpracování dat, ale má větší rozlišení.

K výpočtu rychlosti jsem se rozhodl využít akcelerace ramene. K jejímu měření jsem na rameno instaloval akceleometr ADXL345, a následně softwarově zpracovávám úhlové zrychlení, které poté numericky integruji pro získání rychlosti.

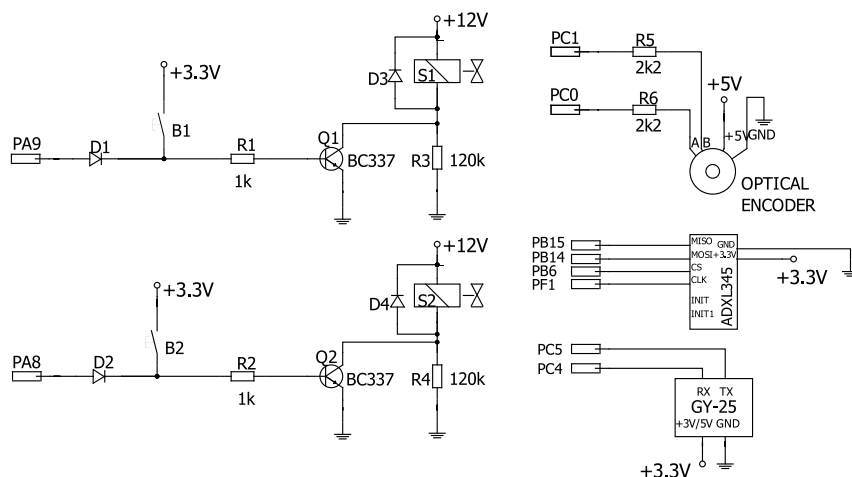
Ke spínání jsem použil monostabilní solenoidové ventily Heschen Electric 2V025-08 2/2 Way NC. Ventily jsou normally closed a otevírány jsou solenoidem 12 V, 350 mA. Dvoupolohový monostabilní ventil elektronicky ovládaný solenoidem nám věrně simuluje ON-OFF trysky.

Pro spínání solenoidů jsem použil tranzistory BC337.

Desku jsem vybavil i tlačítky, kterými je možno otevřít libovolný ze dvou ventilů a jedním dalším, kterým je možné inicializovat enkodér. Detail tlačítek je vidět na obrázku 2.13.

Tlačítko na inicializaci enkodéru je zapojeno přes interní pulldown rezistor a v MCU je obsluhováno jako interrupt na pinu PC8.

Regulaci lze spustit držetím uživatelského tlačítka na vývojovém kitu, nebo přepnutím spínače připojeného na pin PC9.



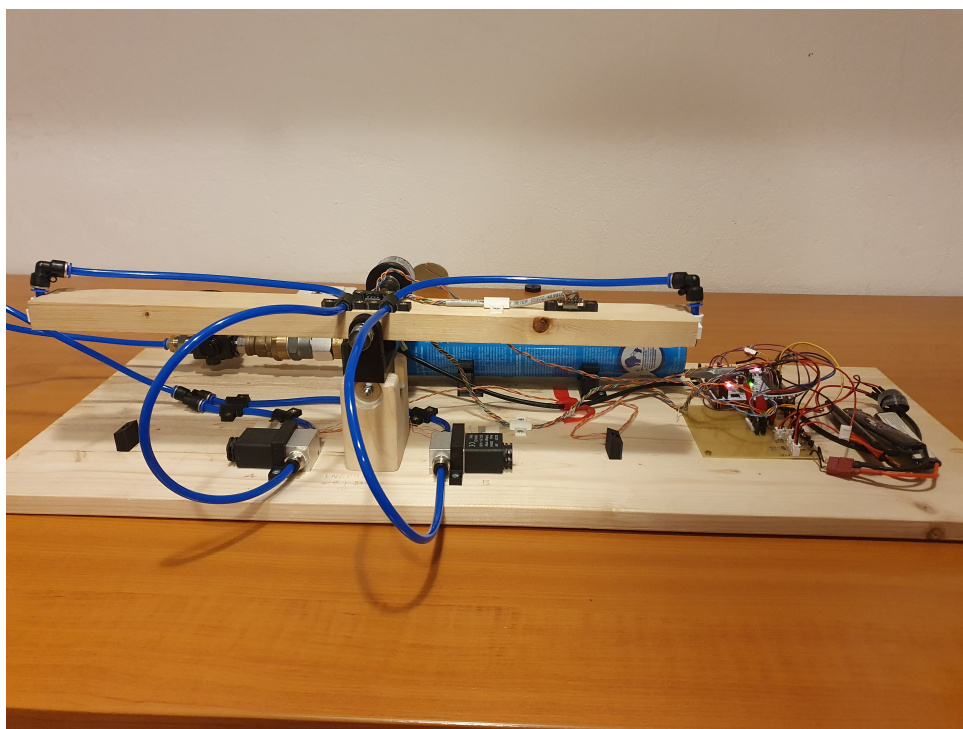
Obrázek 2.7: Zapojení řídicí elektroniky.

2.1.4 Sestavení experimentálního modelu

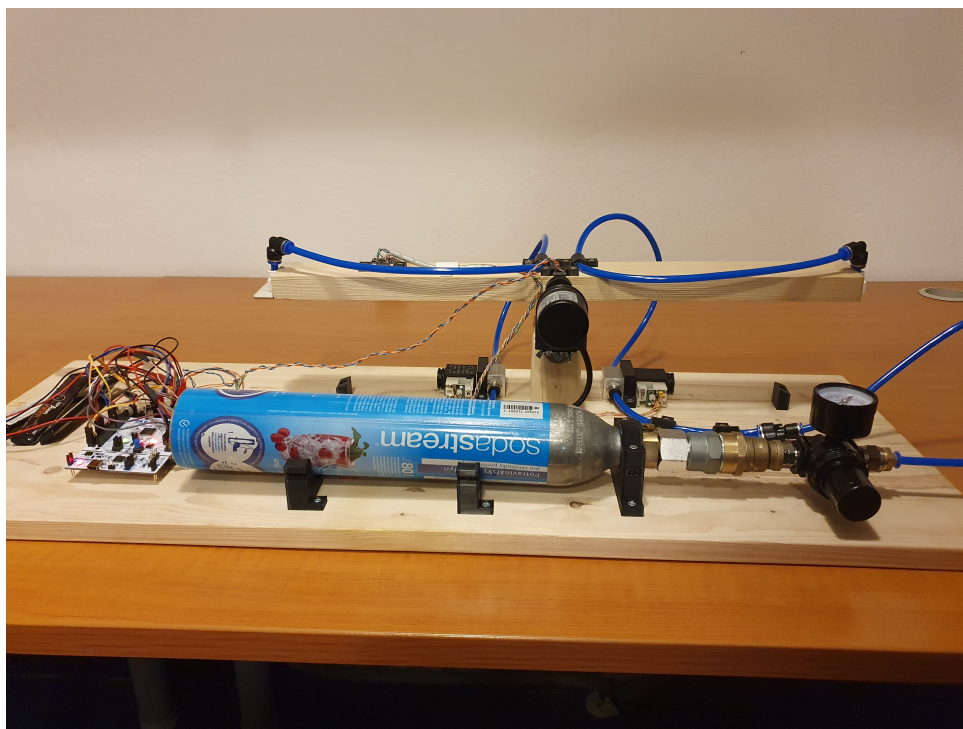
Navrhly model jsem vyrobil pomocí 3D tisku a dřeva. Celý sestavený experimentální model je vidět na obrázcích 2.8 a 2.9. Referenční 3D modely jsou v příloze. Jako zdroj plynu lze připojit libovolný zásobník tlakového plynu pomocí pneumatické rychlospojky. Pro jednoduchou přenositelnost je model vybaven místem pro Sodastreamovou láhev, kterou lze jednoduše koupit a je kompaktní. K nastavení požadovaného tlaku slouží regulátor tlaku viz obrázek 2.10.

Tlakový plyn je rozváděn k tryskám pneumatickými hadicemi spojenými rychlospojky. Senzory jsem k modelu připevnil na přípravcích, které jsem navrhl a vyrobil na 3D tiskárně. Dráty od senzorů a pneumatické hadice jsou odváděny z pohyblivé části co nejbližší středu, aby co nejméně ovlivňovaly možnost pohybu ramen. Způsob instalace senzorů a solenoidů je vidět na obrázku 2.11.

Podpurné elektronické obvody jsem realizoval na pájivém poli a periferie jsou k vývojovému kitu připojeny kablíky přes headery. Napájení jsem realizoval 12 V zdrojem, pro přenositelnost jsem použil tříčlánkový li-ion akumulátor. Trysky jsou vlepené do pneumatické hadice a připevněny na konce ramen pomocí svorek. Detail realizace připevnění trysky je vidět na obrázku 2.12.



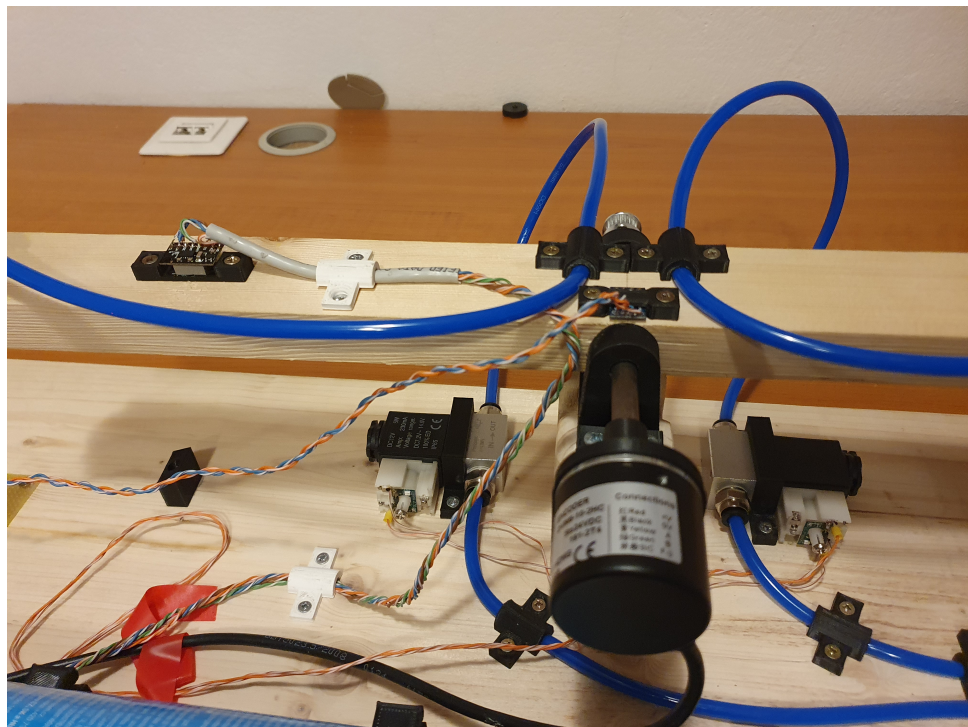
Obrázek 2.8: Pohled na celý experimentální model.



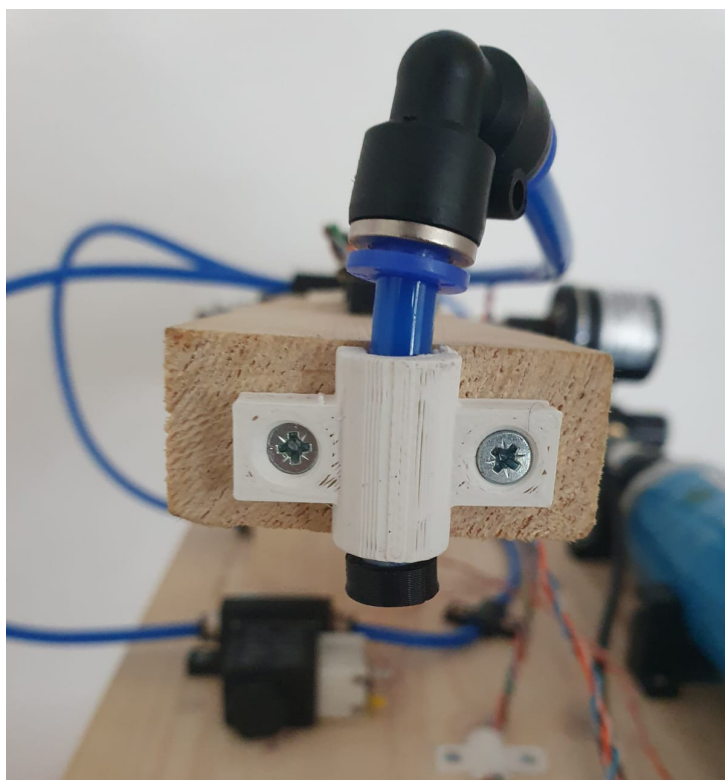
Obrázek 2.9: Pohled na celý experimentální model.



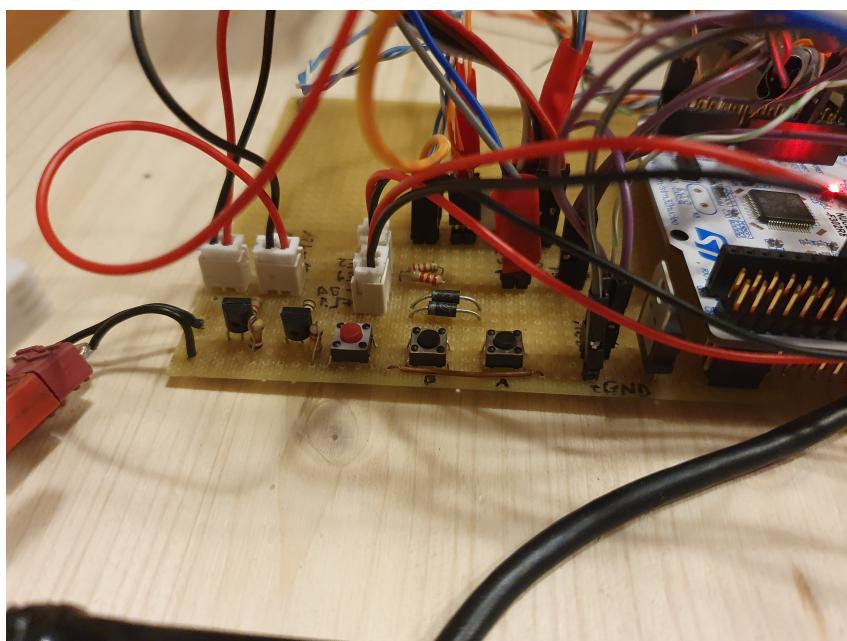
Obrázek 2.10: Pohled na model ze shora na pneumatický systém.



Obrázek 2.11: Detailnější pohled na senzory a solenoidy.



Obrázek 2.12: Detail na řídicí trysku.



Obrázek 2.13: Detail na tlačítka sloužící k ovládání.

2.1.5 Implementace řídicího kódu

K implementaci kódu, kterým je model řízen jsem využil IDE poskytovaného výrobcem k vývojovým kitům STM32 NUCLEO a to STM32 CUBE IDE. Využití IDE a v něm zahrnutých a používaných HAL knihoven mi umožnilo snadnou konfiguraci MCU a periférií.

Samotný řízení je psáno v jazyce C.

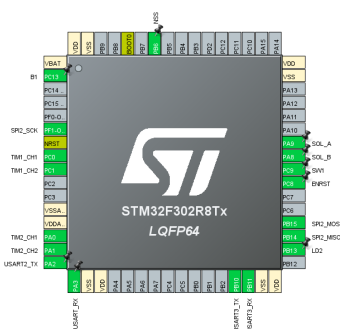
Všechny jednotlivé regulátory jsem implementoval do jednoho souboru *main.c*, kde se vybírá z jednotlivých regulátorů pomocí direktivy překladače *#define*. Výběr je v hlavičce souboru. Samotný program obstarává krom samotných regulačních smyček i jejich zapnutí a vypnutí pomocí uživatelského tlačítka na vývojovém kitu, nebo přidaného přepínače. Zapnutí regulační smyčky je signalizováno rozsvícením uživatelské LED na vývojovém kitu.

```

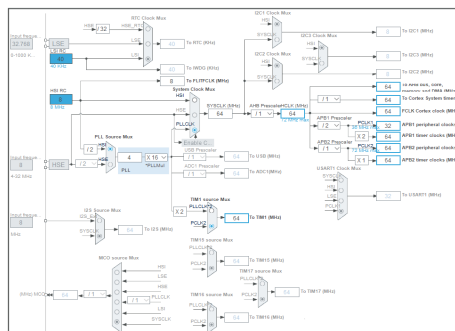
1  //#define TEST1      //test accelerometer - disable logging
2  //#define TEST2      //test gyroscope - disable logging
3  //#define SELSKY     //fake PWM profile
4  //#define PWM        //PWM control
5  //#define SIGNUM     //signum function
6  //#define DEADSIGNUM //signum function with deadzone
7  //#define BANG1      //BANG-OFF-BANG with PD
8  #define BANG2V1      //minimum time regulation based on gyroscope
                        //and accelerometer
9  //#define BANG2V2    //minimum time regulation based on encoder

```

Konfiguraci periférií a hodin jsem nastavil pomocí nástroje implementovaného v IDE. Využití periferie jsou na obrázku 2.14 a nastavení hodin na obrázku 2.15.



Obrázek 2.14: Využití periferie na MCU



Obrázek 2.15: Nastavení hodin MCU.

K záznamu dat ze senzorů s časovými známkami jsem využil timer, který

vyvolává periodicky přerušení po 20 ms. Po vyvolání přerušení se přes UART odešle záznam s daty senzorů a časovou známkou.

Kvůli následnému zpracování dat jsou data odesílány ve formátu čísel bez mezer oddělené čárkou.

```

1 char aTxBuffer[16];
2 logtime++;
3 uint32_t logtheta = TIM1->CNT;
4 sprintf(aTxBuffer, "%d,%d,%f,%f\r\n", logtheta-260, logtime,
5         velocity, switch_fcn);
6 HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *)aTxBuffer, strlen(
7         aTxBuffer), 100);

```

Pro zpracování dat na PC slouží python script. Tento script vyčítaná data ukládá do formátu .csv, který poté importuji do MATLABu k dalšímu zpracování.

Scripty sloužící ke zpracování dat, i celý STM32 CUBE IDE projekt, jsou přiloženy v příloze.

2.2 Simulační model

Kvůli návrhu regulátoru a snadnému testování je potřeba simulační model. Simulační model jsem vytvořil, jako matematický model v prostředí Simulink.

Modelovat celou soustavu jsem vyhodnotil jako zbytečné, protože soustava je symetrická. Simulační model je tudíž jedna polovina houpačky. To je jedno rameno a jeden aktuátor.

Systém má jeden vstup a jeden výstup, a charakteristiku dvojitého integrátoru. Vstupem je reakční síla trysky působící na konci ramena.

Výstupem je úhel natočení houpačky. V prostředí Simulink zadávám jako vstup reakční sílu vytvořenou tryskou a z reálných rozměrů modelu, délky ramene a [m], m [kg], které jsou implementovány jako konstanty, se počítá úhlové zrychlení $\dot{\omega}$ [rad s^{-2}], které je integrováno a dostávám úhlovou rychlost ω [rad s^{-1}], která je znovu integrována a dostávám polohu θ [rad]. Samotná implementace v prostředí Simulink je vidět na obrázku 2.16. Vztah mezi reakční silou F a úhlem natočení θ se dá matematicky popsat jako

$$\dot{\theta} = \omega, \quad (2.1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{F a}{0,5 m a^2}. \quad (2.2)$$

Kde m a a jsou konstanty, hmotnost a délka ramene modelu.

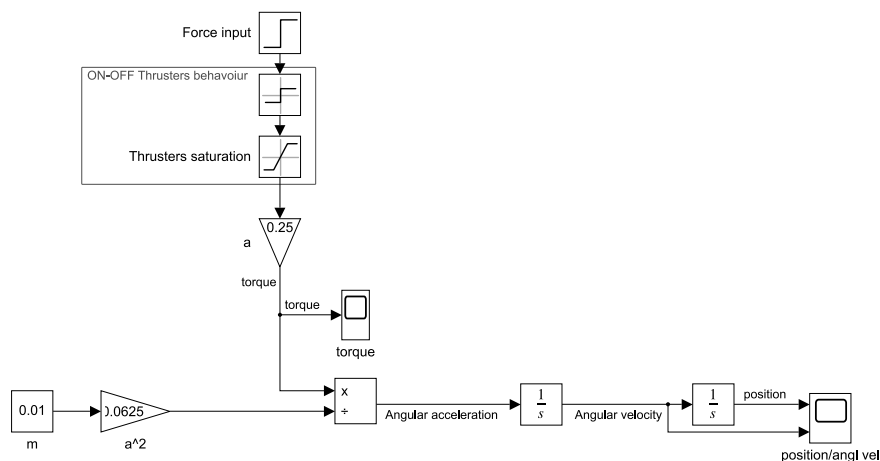
Délka ramene je konstrukčně daná, jako $L = 0,5$, $a = 0,25$ m a hmotnost m určíme identifikací z odezvy na skok reálného systému. Nafitovaná hmotnost

odpovídá $m = 0,02$ kg. Nafitovaná hmotnost přímo neodpovídá reálné hmotnosti ramene, protože samotné rameno je vyvažováno druhou polovinou houpačky, tato konstanta tedy spíše udává odpory, které musí houpačka překonat.

2.2.1 Simulinkové zapojení

Díky tomu, že houpačka je symetrická model pouze jednoho ramena s identifikovaným parametrem m stačí k popsání celého systému, kdy pro simulaci sepnutí druhé trysky stačí přivést na vstup zápornou sílu. Na vstupu modelu je zařazena saturace, která zajišťuje reprezentaci síly odpovídající nastavenému tlaku.

Simulinkový model vytvořený z dvou integrátorů používám pro simulaci bang-bang a PWM řízení.



Obrázek 2.16: Implementace modelu v prostředí Simulink.

2.2.2 Stavový model a přenos

Pro účely simulace jsem si připravil i stavový prostor a přenos systému. Stavový prostor jsem získal substituací $x = \begin{bmatrix} \varphi \\ \omega \end{bmatrix}$, $u = F \frac{a}{0,5 m a^2}$, $y = \varphi$. Což odpovídá stavovému prostoru dvojitého integrátoru, který popisuje můj systém

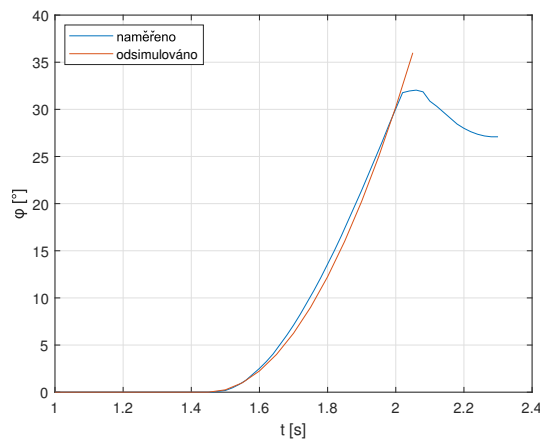
$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{0,5 \text{ m a}} \end{bmatrix} u(t), \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x(t).\end{aligned}\quad (2.3)$$

Dosažením identifikovaných hodnot jsem dostal konkrétní matice stavového prostoru

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 400 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}.\quad (2.4)$$

2.2.3 Ověření modelu simulací

V naitovaném simulačním modelu jsem odsimuloval odezvu na skok a porovnal jí s reálným modelem. Na obrázku 2.17 je vidět odsimulovaná odezva a naměřená odezva na experimentálním modelu. Odezvy si odpovídají. Odezva odpovídá nastavenému tlaku 30 psi, při kterém byla měřena a který budu používat při dalších simulacích a experimentech.



Obrázek 2.17: Skoková odezva systému.

Kapitola 3

Regulace

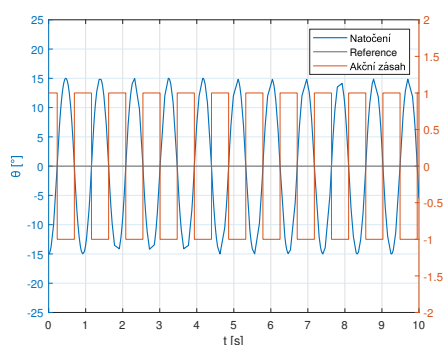
Pro návrh a vyzkoušení regulace jsem používal simulační model vytvořený v sekci [2.2]. Regulátory navržené na simulačním modelu jsem poté vždy verifikoval na experimentálním modelu.

3.1 ON-OFF regulace

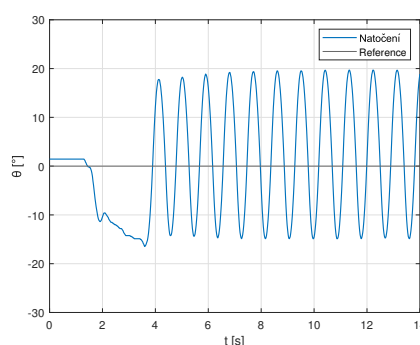
Vzhledem k použití on-off trysek, i k regulaci využiji regulační principy on-off regulace. Způsoby, které se nabízí jsou, nejjednodušší způsob BANG-BANG regulátoru, funkce signum. Tento způsob regulace způsoboval pouze rychlé a velké oscilace systému. Vylepšení regulátoru přidáním pásma necitlivosti, kdy z BANG-BANG regulátoru se stane BANG-OFF-BANG regulátor, bohužel i tento regulátor nepřinesl použitelné výsledky regulace. Použil jsem tedy regulaci s hysterezí, pro efektivní využití pásma necitlivosti. Takové řízení jsem implementoval jako schmittův spínač, který zajišťuje hysterezi a pásmo necitlivosti, dále lineární přepínací funkci závislou na nulté a první derivaci polohy. Ani tento způsob řízení nedokáže dostat systém do nuly, ale dostatečně se jí dokáže přiblížit s limitním cyklem nízké frekvence, což šetří palivo. Nebo je v tomto stavu možnost doregulování proporciálním regulátorem využívajícím jiného, proporcionálního, aktuátoru. Poslední regulátor, který jsem vyzkoušel je minimum time BANG-BANG, který by měl dostat systém přesně do 0 pouze na dvě sepnutí trysek.

3.1.1 Signum

BANG-BANG regulátor implementovaný pomocí funkce signum, na obrázku 3.4, je velice jednoduchý, ale vzhledem k rychlosti mého systému je prakticky nepoužitelný. Již v simulaci obrázek 3.1 vidím, že oscilace jsou příliš velké a rychlé. To se potvrdilo i na reálném modelu obrázek 3.2, kde kvůli oscilacím dochází k velké spotřebě paliva. Tento způsob je pro můj systém nepoužitelný.



Obrázek 3.1: Simulovaný průběh s regulací pomocí funkce signum. $\theta_0 = -15^\circ$.

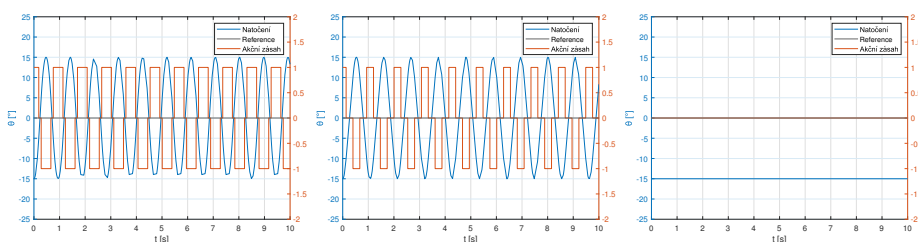


Obrázek 3.2: Reálný průběh s regulací pomocí funkce signum. V čase $t = 3,6$ s došlo k zapnutí regulátoru.

3.1.2 Signum s pásmem necitlivosti

Pouhé přidání pásma necitlivosti k funkci signum, na obrázku 3.5, stále vede k velkým oscilacím obrázek 3.3a. Při pokusu dalšího zmenšení oscilací pouhým zvětšováním pásma necitlivosti obrázek 3.3b se frekvence oscilací snižuje, amplituda ovšem zůstává stejná. Pokud nastavíme pásmo necitlivosti moc velké, ustálená odchylka od reference je nepřijatelná obrázek 3.3c. Tento způsob je pro můj systém nepoužitelný.

Na obrázku 3.6 vidíme praktickou implementaci s pásmem necitlivosti $\pm 4^\circ$, v čase $t = 6$ s byl model zastaven ručně a v čase $t = 8$ s byla způsobena porucha, pro demonstraci pásma necitlivosti.

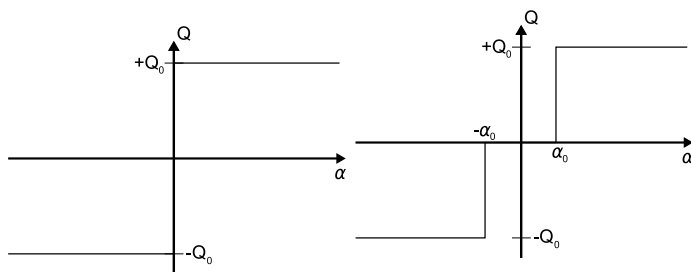


(a) : Pásmo necitlivosti $\pm 5^\circ$.

(b) : Pásmo necitlivosti $\pm 10^\circ$.

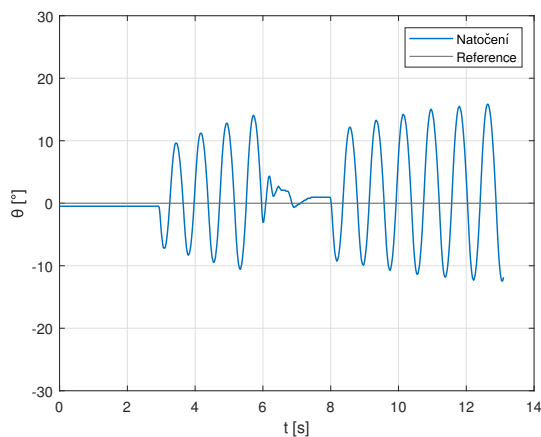
(c) : Pásmo necitlivosti $\pm 15^\circ$.

Obrázek 3.3: Nasimulované průběhy regulace pomocí signum s pásmem necitlivosti. $\theta_0 = 3^\circ$.



Obrázek 3.4: Funkce signum.

Obrázek 3.5: Funkce signum s pásmem necitlivosti.

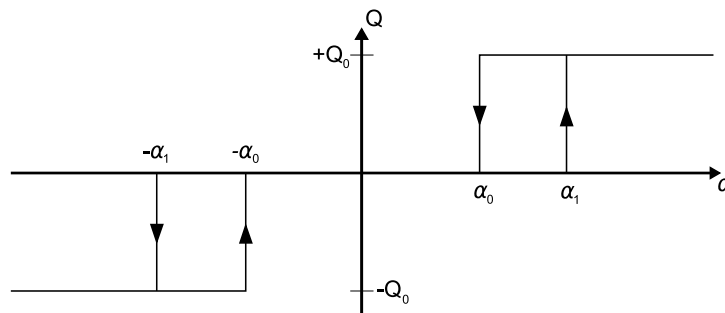


Obrázek 3.6: Reálný průběh s regulací pomocí funkce signum s pásmem necitlivosti.

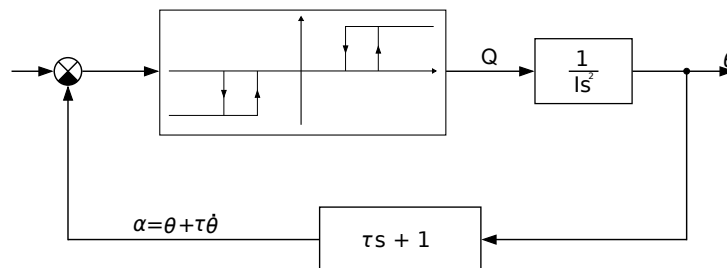
3.1.3 BANG-OFF-BANG s lineární funkcí

Tento způsob pro efektivní využití pásma necitlivosti využívá i hysterezi. Hystereze a pásmo necitlivosti jsou kombinované v Schmittově klopném obvodu obrázek 3.7. Schmittův klopný obvod použijeme s lineární přepínací funkcí viz obrázek 3.8.

Takovýto řídicí systém nedokáže uregulovat natočení θ do nuly, ale dokáže ho dostat na přijatelně malé hodnoty, končí v cyklu s nízkou frekvencí limitního cyklu. [4] Díky disipaci energie na odporech a pásmu necitlivosti dojde v mém případě dokonce k úplnému zastavení v konečném čase.



Obrázek 3.7: Pásmo necitlivosti s hysterezí (Schmittův klopný obvod).



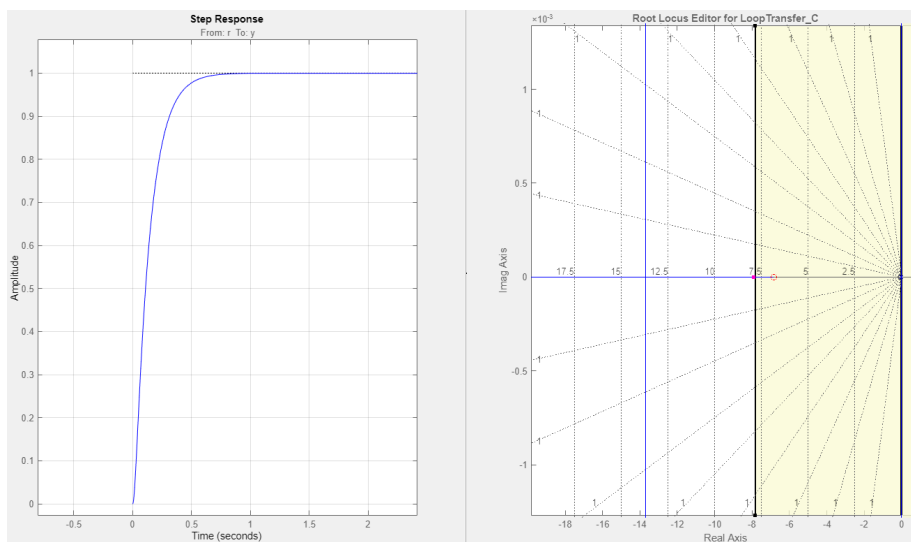
Obrázek 3.8: Blokový diagram Schmittova klopného obvodu s lineární přepínací funkcí.

Návrh PD

Lineární funkce zpětné vazby se chová jako zpětnovazební PD regulátor. K návrhu konstanty τ jsem využil standardní návrhové metody pro spojitě řízení root-locus. Ve funkci (3.1) odpovídá τ derivační složce D regulátoru a proporcionalní složka P je 1.

$$\tau s + 1 \quad (3.1)$$

Jako návrhové požadavky jsem zvolil relativní překmit 1%. Velice nízký překmit volím kvůli přestřelení zóny necitlivosti, což by způsobilo oscilace, což vede na problematické doregulování dalším systémem a zbytečně vysoké spotřebě paliva. Takovýto požadavek na překmit si můžu dovolit, vzhledem ke statickému zesílení systému 1. Požadavek na ustálení volím 0,5 s, jako dostatečně rychlý. S tímto požadavkem dostávám $\tau = 0,146$. Root-locus editor použitý k návrhu je na obrázku 3.9.



Obrázek 3.9: Root-locus editor pro návrh konstanty τ .

■ Implementace

V regulační smyčce je implementovaný výpočet rychlosti pomocí dvou odečtů polohy enkodéru s danou časovou prodlevou. Následně se spočte nalezenou funkcí α .

```

1 theta_last = ENCODER_GetCounter(TIM1);
2 HAL_Delay(vel_t);
3 theta = ENCODER_GetCounter(TIM1);
4 velocity = (theta - theta_last)/0.01; //calculate velocity by
   position measurment
5 Alpha = (-((velocity*tau) + theta)) + OFFSET; //calculate Alpha

```

Následně jsem implementoval Schmittův klopný obvod.

```

1 if(Alpha < -sA1){
2   out = -1;
3 }else if(Alpha > sA1){
4   out = 1;
5 }else if(Alpha > -sA0 && Alpha < sA0){
6   out = 0;
7 }else if((out_last == 1 && Alpha < sA0) || (out_last == -1 &&
8   Alpha > -sA0)){
9   out = 0;
10 out_last = out;

```

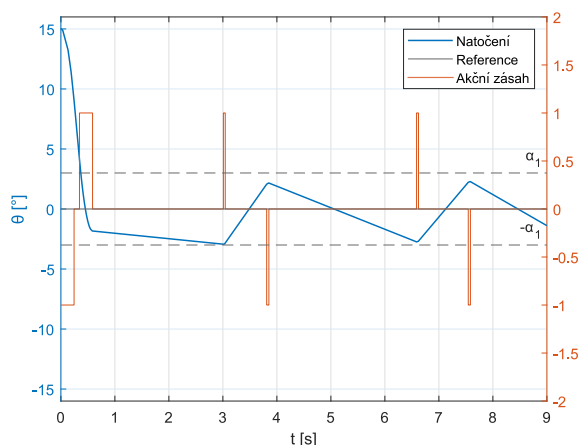
Podle hodnoty *out* se nastaví signál řídicí solenoidy.

■ Ověření funkčnosti

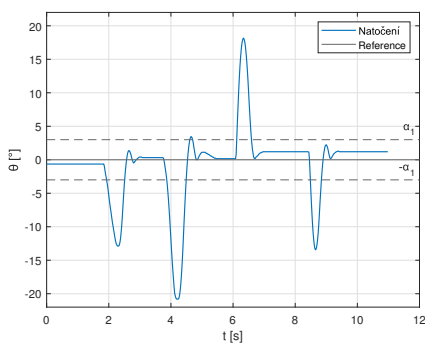
K navrženému τ jsem v simulaci experimentálně doladil zónu necitlivosti a odsimuloval odezvu obrázek 3.10. Odsimulovaná odezva odpovídá mým požadavkům. Oscilace se zdají velké, ale je to pouze škálováním grafu a jak můžeme vidět na naměřeném průběhu z experimentálního modelu na obrázku 3.11, díky odporům v systému dojde k jeho úplnému vyrovnání. Na experimentálním modelu jsem vyzkoušel naladění zóny necitlivosti, přičemž naladění ze simulace se potvrdilo a nastavené hodnoty, zanesené do tabulky 3.1, jsou nejnižší, které lze použít tak, aby systém neosciloval. Na obrázku 3.12 je zaznamenaný průběh, se zatíženým jedním koncem houpačky. Je vidět, že regulátor je schopen uregulovat i systém s konstantní poruchou na hraně pásma necitlivosti.

k_P	1
k_D	0,146
α_0	± 1.9
α_1	± 3

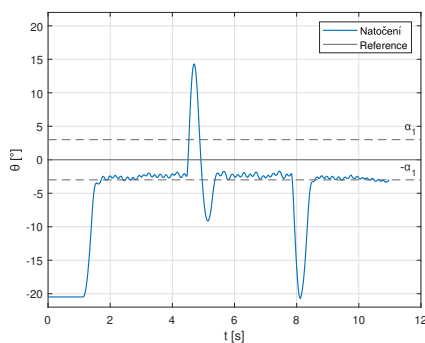
Tabulka 3.1: Konstanty regulátoru.



Obrázek 3.10: Simulovaný průběh regulace s PD BANG-OFF-BANG regulátorem.



Obrázek 3.11: Průběh regulace s náhodnými poruchami pomocí PD BANG-OFF-BANG regulátoru.



Obrázek 3.12: Průběh regulace s konstantní a náhodnými poruchami pomocí PD BANG-OFF-BANG regulátoru.

3.1.4 Minimum time BANG-BANG

Metody minimum time řízení dosahují uregulování systému v minimálním možném čase. Způsob, který se využívá v tomto případě je přepínání akčních zásahů podle nelineární přepínací funkce [4].

Přepínací funkci získáme jako parametrizovaný vztah první derivace polohy, rychlosti a nulté derivaci polohy, polohy. Přepínací funkce naškálovaná pro můj systém je na obrázku 3.13. Pro můj případ dostanu funkci pomocí vztahů:

$$\ddot{\theta} = u, \quad (3.2)$$

$$\dot{\theta} = t + \dot{\theta}_0, \quad (3.3)$$

$$\theta = \frac{t^2}{2} + t\dot{\theta}_0 + \theta_0. \quad (3.4)$$

Rovnice parametrizují s hodnotami mého systému získaných v sekci [2.2.2].

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{0,5 \text{ m a}}, \quad (3.5)$$

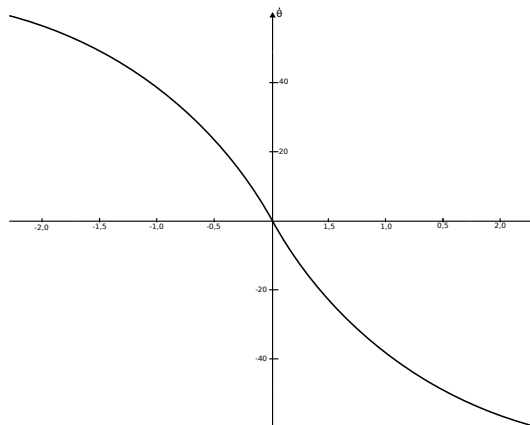
$$\dot{\theta} = \frac{t}{0,5 \text{ m a}} + \dot{\theta}_0, \quad (3.6)$$

$$\theta = \frac{t^2}{m a} + t\dot{\theta}_0 + \theta_0. \quad (3.7)$$

Z rovnice (3.6) vyjádřím $\dot{\theta}_0 = \frac{-t}{0,5 m a}$ a dosadím do rovnice (3.7), úpravou získávám kvadratickou přepínací funkci (3.8) parametrizovanou pro můj systém (3.9).

$$0 = -\frac{m a}{4} \dot{\theta}^2 + \theta_0 \quad (3.8)$$

$$0 = -\frac{\dot{\theta}^2}{40} + \theta_0 \quad (3.9)$$



Obrázek 3.13: Přepínací funkce pro můj systém.

■ Implementace řídicí smyčky

V regulační smyčce je implementovaný výpočet rychlosti pomocí dvou odečtů polohy gyroskopu, pro dostatečně rychlý a přesný údaj, s danou časovou prodlevou. Následně se spočte hodnota přepínací funkce, do které je započítána konstanta systému *SYSCON*, která nám kompenzuje chování ventilů. Význam této konstanty je popsán dále.

```

1 float delta = (theta - theta_last);
2 velocity = delta/vel_t;
3 theta = theta/100;
4
```

```

5 #define SYSCON 50
6 if(theta > 0){
7     switch_fcn = (theta)-(velocity*velocity)/SYSCON;}
8 else{
9     switch_fcn = (theta)+(velocity*velocity)/SYSCON;}

```

Podle přepínací funkce se rovnou nastaví řídicí signály k solenoidům.

```

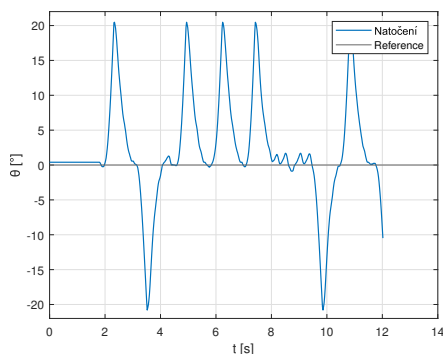
1 if(switch_fcn < 0){
2     HAL_GPIO_WritePin(SOL_A_GPIO_Port , SOL_A_Pin , SET);
3     HAL_GPIO_WritePin(SOL_B_GPIO_Port , SOL_B_Pin ,
4     GPIO_PIN_RESET);
5 }else if(switch_fcn > 0){
6     HAL_GPIO_WritePin(SOL_B_GPIO_Port , SOL_B_Pin , SET);
7     HAL_GPIO_WritePin(SOL_A_GPIO_Port , SOL_A_Pin ,
8     GPIO_PIN_RESET);
9 }else{
10    HAL_GPIO_WritePin(SOL_B_GPIO_Port , SOL_B_Pin ,
11    GPIO_PIN_RESET);
12    HAL_GPIO_WritePin(SOL_A_GPIO_Port , SOL_A_Pin ,
13    GPIO_PIN_RESET);
14 }

```

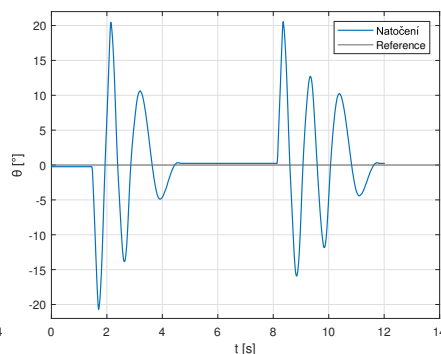
■ Ladění a ověření funkčnosti

Při první implementaci přepínací funkce, kde dochází pouze ke kontrole stavu systému a spočtení funkce a na základě výsledku nastavení akčních členů, kvůli zpoždění ventilů a tím i nepřesného sepnutí a v závislosti na rychlosti, kterou se rameno pohybuje přestřelení ideální křivky přepínací funkce, dochází k masivním přestřelům až na dorazy experimentálního modelu, k saturacím regulátoru a k chaotickému chování regulátoru, kde dochází k chybným výpočtům přepínací funkce po tvrdých nárazech do dorazů. Chaotické chování regulátoru je vidět na obrázku 3.14.

Problémy jsem se pokusil vyřešit přidáním pásma necitlivosti, kde by se systém mohl uklidnit a vyrovnat setrvačnou silou. Ani tento nápad nepřinesl požadovaný výsledek a na obrázku 3.15 je vidět, že regulátor hodně osciluje.

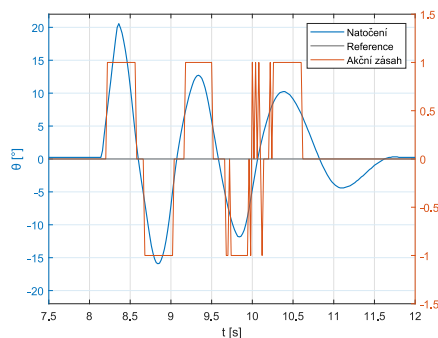
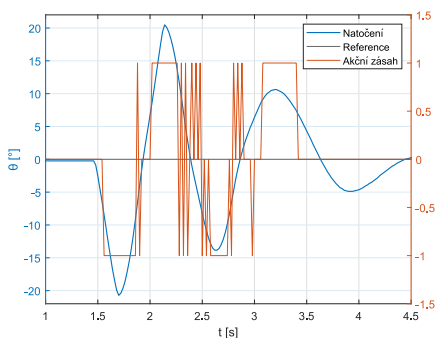


Obrázek 3.14: Regulace pouze přepínací funkcí.



Obrázek 3.15: Regulace přepínací funkcí s pásmem necitlivosti.

Na průbězích na obrázcích 3.16a a 3.16a je vidět detail průběhu regulace se znázorněným akčním zásahem. U akčního zásahu odpovídá hodnota 1 otevřenému solenoidu A a -1 otevřenému solenoidu B, pokud má akční zásah hodnotu 0 oba solenoidy jsou zavřeny. Zaznamenaný akční zásah nám nedává skutečný stav ventilů, ale pouze čas sepnutí signálu pro jejich otevření/zavření. Pokud dojde k překročení přepínací funkce akční zásah na to reaguje, pokud se ale pohybujeme těsně kolem této přepínací funkce, ventily nestíhají reagovat a dochází k rychlému přecházení přepínací funkce a tím dalším požadavkům na nesplnitelné přepnutí ventilů a pouze s menší pomocí reakční síly trysek dochází nakonec k samovolnému vyrovnání modelu.



(a) : Detail první poruchy z obrázku 3.15. **(b)** : Detail druhé poruchy z obrázku 3.15.

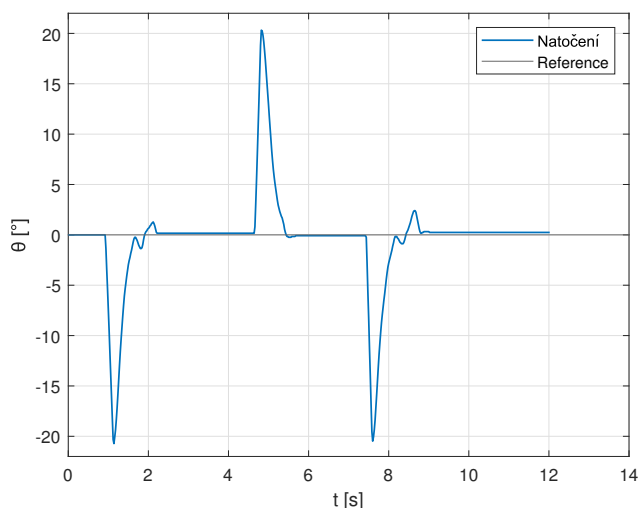
Obrázek 3.16: Detaily průběhu minimum time regulace s akčními zásahy.

Jako jiný přístup k napravení výše zmíněných problémů, jsem zvolil přidání předstihu přepnutí akčních členů na základě přiblížení se křivce přepínací funkce a pásmo necitlivosti pro přepínací funkci. Takováto úprava přinesla dobrý výsledek regulace, který je zaznamenan na obrázku 3.17.

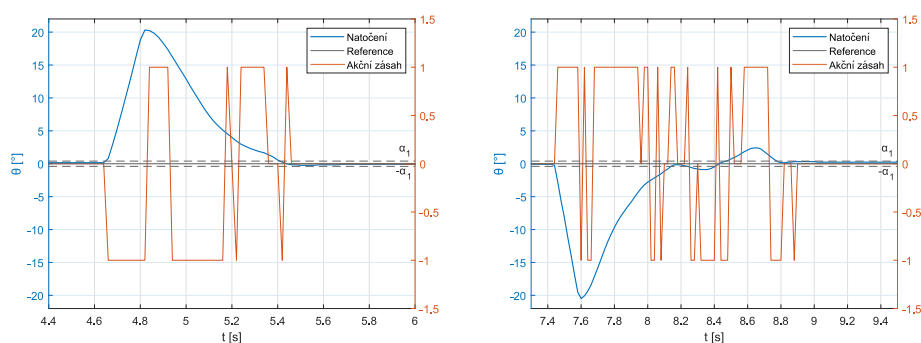
Můžeme ale stále pozorovat zakmitávání, které je způsobeno odezvou přepnutí. Zároveň je toto řešení nestálé, protože jak jsem při měření odezvy

systému u řízení pomocí PWM v sekci [3.2.2] zjistil, doba odezvy je různá a při vyšších rychlostech je důležité správné načasování přepnutí. V některých situacích, které se nepodařily zaznamenat do průběhu, dokonce dochází k rozkmitání systému a jeho nestabilitě.

Problém rychlosti reakce solenoidu a otevření ventilů lze pozorovat na obrázcích 3.18. Na obrázku 3.18a, kde je detail druhé poruchy z obrázku 3.17, je rychlost vychýlení dostatečně nízká pro dobrou reakci ventilu a k zakmitání způsobeného rychlými přechody přepínací funkce dochází jen minimálně a dochází k téměř optimálnímu dosažení reference. Oproti tomu na obrázku 3.18b, kde je detail třetí poruchy z obrázku 3.17, dochází k rychlým přechodům přepínací funkce a kvůli tomu nedosažitelným požadavkům na ventily. Dochází tedy k zakmitání a neoptimálnímu návratu k referenci.



Obrázek 3.17: Minimal-time regulace přepínací funkcí s kompenzací zpoždění ventilů.



(a) : Detail druhé poruchy z obrázku 3.17. **(b)** : Detail třetí poruchy z obrázku 3.17.

Obrázek 3.18: Detaily průběhu minimum time regulace s kompenzací zpoždění ventilů a s akčními zásahy.

3.2 PWM regulace

3.2.1 Regulace s konstantní dobou OFF stavu

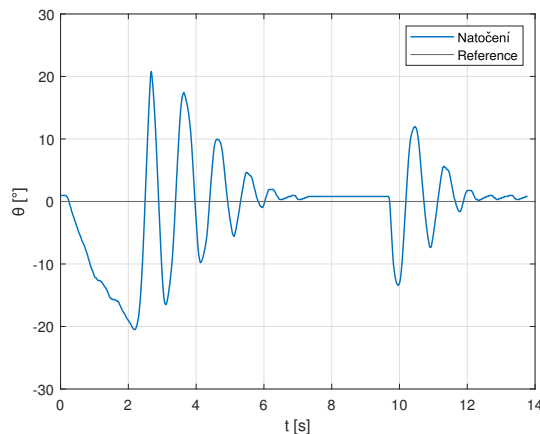
Tento způsob není přesně PWM dle definice, ale využívá podobného principu. K regulaci využívám proporcionální regulátor, a podle jeho výstupu nastavuji dobu, po kterou se sepne příslušná tryska. Mezi každým akčním zásahem je konstantní interval, během kterého jsou obě trysky vypnuté. Vzhledem k podobnosti s jinými regulátory typu BANG-BANG má i tento způsob implementované pásmo necitlivosti, ustálená odchylka úhlu natočení θ není nulová, ale je dostatečně malá.

Pro rychlé dosažení ustáleného stavu jsem jako první regulátor použil PD. Absence integrální složky eliminuje problém windupu a vzhledem k charakteru BANG-BANG regulátoru s pásmem necitlivosti nulová odchylka od reference není potřeba.

Tento regulátor jsem ladil experimentálně. Začal jsem s koeficientem proporcionální složky $k_P = 1$. Při jejím navýšení docházelo u systému k oscilacím kolem reference, při jejím snížení došlo ke snížení doby ustálení. Stejným postupem jsem naladil i koeficient derivační složky k_D . Dále jsem musel naladit i časové intervaly spuštění a vypnutí trysek. Experimentálním laděním, jsem dospěl k časům, které při dalším snížení způsobí oscilace systému. Časový interval pro sepnutí trysek se přepočítává konstantou z akčního zásahu spočteného regulátorem. Výsledné vyladěné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.2.

k_P	1
k_D	0,5
t_{ON}	1 [ms]
t_{OFF}	150 ms
pásmo necitlivosti	± 5

Tabulka 3.2: Konstanty PD regulátoru.



Obrázek 3.19: Průběh s proporcionálním PD regulátorem s imitací PWM.

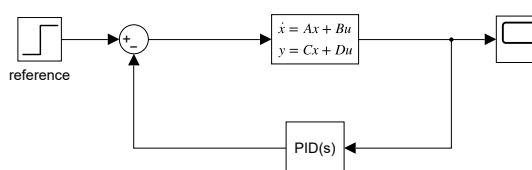
Výhodu tohoto přístupu vidím v tom, že v porovnání s metodou popsanou v kapitole 3.1.2 stačí informace o poloze, což je méně náročné na zpracování a sensoriku. Zároveň dosahuje vcelku dobrých výsledků. Jak můžeme vidět na obrázku 3.19 regulátor je funkční, ale ještě nemůžeme prohlásit, zda je obstojný pro naše potřeby. Jako nevýhodu tohoto přístupu vidím problematické ladění, celý systém je velice závislý na zvolení časových konstant pro zapnutí a vypnutí trysek. Tyto konstanty a jejich poměr je nutné ladit ručně, výsledek tedy pravděpodobně nebude optimální.

■ 3.2.2 PWM regulace s PID

Tento způsob se už předem vzhledem k dlouhé odezvě ventilů jeví, jako nevhodný, ale rozhodl jsem se tuto myšlenku ověřit.

■ Návrh PID

K návrhu konstant regulátoru PID jsem použil PID tuner z knihovny Simulink Control Designer, který jsem použil na zpětnovazební smyčku se stavovým prostorem systému 3.20. Regulátor jsem naladil na rychlou odezvu a malý překmit, konkrétně dobu ustálení 2 s a překmit 18%. K lepšímu nalazení regulátoru bych přistoupil, až po ověření funkčnosti metody. Výsledné konstanty regulátoru jsou zanesené do tabulky 3.3.



Obrázek 3.20: Simulinkové zapojení pro naladění PID pomocí PID tuner.

k_P	0,03
k_I	0,0102
k_D	0,016

Tabulka 3.3: Konstanty PID regulátoru.

■ PWM signál

Na experimentálním modelu jsem naměřil průměrnou dobu odezvy otevření ventilů jako $\bar{x} = 38,84$ ms.

Tuto hodnotu jsem získal naměřením 10 hodnot tab. 3.4 a výpočtem průměru (3.10). Odezvu jsem měřil připevněním mikrospínače na rameno modelu, spínač se tedy sepnul při pohybu ramene. Signál z mikrospínače a signál z procesoru pro solenoid na otevření ventilu jsem snímal osciloskopem. Na osciloskopu jsem naměřil dobu mezi signálem z procesoru a spuštěním mikrospínače.

Naměřená hodnota neodpovídá odezvě pouze ventilu, ale celého systému. Na odezvě se projeví i zpoždění mikrospínače, které ale je zanedbatelné. Pro zmenšení odezvy systému by bylo zapotřebí konstrukčních změn, proto není problémem počítat s odezvou celého systému.

33,2	48,8	37,6	36,8	36,4	39,2	43,6	36,0
------	------	------	------	------	------	------	------

Tabulka 3.4: Měření zpoždění systému [ms].

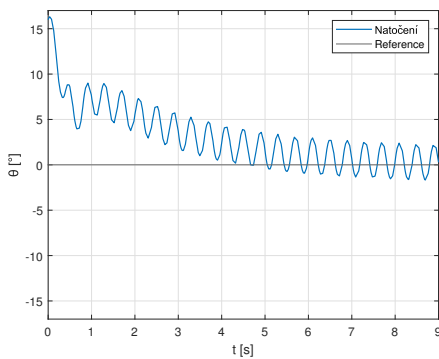
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) = \frac{33,2 + 48,8 + 37,6 + 36,8 + 36,4 + 39,2 + 43,6 + 36,0}{10} = 38,84 \text{ ms} \quad (3.10)$$

Z doby odezvy ventilů vím, že nemá cenu spouštět rychleji, než s periodou $T = 38,84$ ms, neboli frekvencí $f = \frac{1}{T} = 25,7$ Hz. To znamená, že pokud budeme uvažovat jako hraniční minimální střídu, kterou jsem schopný využít 10%. Musím mít PWM frekvenci 2,5 Hz, aby se stihly ventily otevřít. Ze simulace při PWM frekvenci 2,5 Hz a PID konstant z tabulky 3.3 na obrázku 3.21 vidíme, že frekvence je moc nízká a dochází ke zpomalení odezvy a výrazným oscilacím.

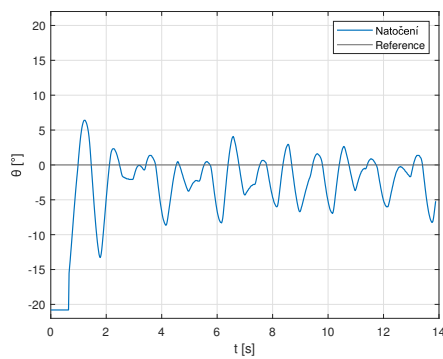
Postupným zvyšováním PWM frekvence v simulaci jsem došel k frekvenci 5 Hz, která, jak můžeme vidět na obrázku 3.23, je pro regulaci únosná, ale stále je šance na to, že ventily budou fungovat.

Jako poslední jsem vyzkoušel PWM frekvenci 1 kHz, která je funkční pro regulaci, ale nemožná pro ventily, které jsou zbytečně mechanicky namáhány a nedochází k jejich úplnému otevření a zavření.

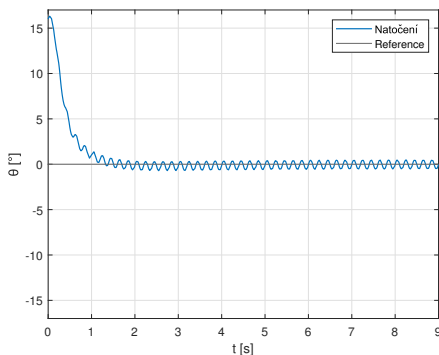
Na experimentálním modelu se potvrzují výsledky simulací a tím se tato metoda ukazuje jako nevhodná. Všechny průběhy na experimentálním modelu (obrázky 3.22, 3.24, 3.26) jsou měřeny z dolního limitu vychýlení modelu a bez dalších poruch. Průběh pro frekvenci 1 kHz, na obrázku 3.26, je zaznamenání návratu houpačky do rovnovážné polohy, bez akčních zásahů trysek, protože nedošlo k otevření ventilů.



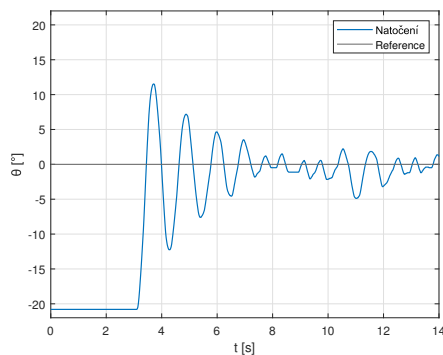
Obrázek 3.21: Simulovaný průběh PWM řízení s frekvencí 2,5 Hz.



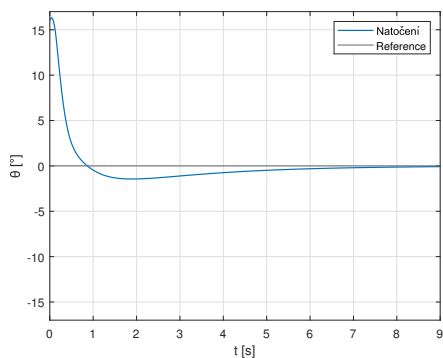
Obrázek 3.22: Průběh PWM řízení s frekvencí 2,5 Hz.



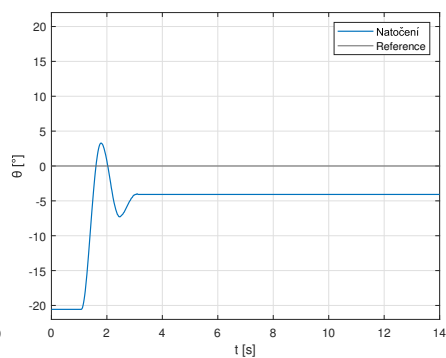
Obrázek 3.23: Simulovaný průběh PWM řízení s frekvencí 5 Hz.



Obrázek 3.24: Průběh PWM řízení s frekvencí 5 Hz.



Obrázek 3.25: Simulovaný průběh PWM řízení s frekvencí 1 kHz.



Obrázek 3.26: Průběh PWM řízení s frekvencí 1 kHz.

Kapitola 4

Závěr

Systém trysek byl již mnohokrát použit a ukazuje se, že by mohl být vhodný i pro naše účely. Pro další závěry bude potřeba sestavit komplexnější model, kde by se takové řízení otestovalo v 6DOF prostoru a porovnat regulaci pomocí stavění kolektivu a pomocí trysek. Až z takových testů půjdou vyvodit závěry, zda má smysl v tomto směru pokračovat, nebo je to slepá cesta.

4.1 PWM

Regulace pomocí PWM metod [3.2] je pro systémy reakčních trysek nevyhovující. Spínání není tak rychlé, aby bylo možno použít vysokofrekvenční PWM a PWM s nízkou frekvencí vede na špatné vlastnosti regulace a velké spotřebě paliva. Frekvence nosné funkce PWM, která by umožnila spolehlivé spínání ventilů je 2,5 Hz. Tato frekvence je tak nízká, že je pro řízení pomocí PWM nepoužitelná.

4.2 BANG-BANG

Pro náš rychlý systém trysek se ukazuje BANG-BANG jako nejvhodnější systém řízení.

Jednoduché metody, jako signum jsou nepoužitelné [3.1.1, 3.1.2].

Teoreticky nejlepší výsledek by měl přinést minimum time BANG-BANG [3.1.4]. Na mém experimentálním modelu však vykazoval problematické chování. Kvůli nepřesnosti určení systému, časové prodlevě vypnutí a sepnutí trysek nedochází k správnému přepnutí trysek a systém se v některých případech i rozkmitá. Pokud se regulátor zachová korektně, stále bohužel dochází k překmitu a oscilacím kolem reference. Oscilace se dají vyřešit pásmem necitlivosti, tím je ale regulátor v našem jednoduchém systému srovnatelný s regulátorem BANG-OFF-BANG s PD. Stálo by za to pokusit se dosáhnout lepší identifikace a možná úpravy hardwaru, protože minimum time BANG-BANG při správné funkci snižuje spotřebu paliva a dosáhne nejrychlejšího možného regulačního zásahu.

Nejlepší výsledky přinesl regulátor BANG-OFF-BANG s PD [3.1.3]. Způsob je robustní a má vyhovující vlastnosti. Dochází sice k malému překmitu a kvůli pásmu necitlivosti se nedostane systém do úplně přesné polohy, ale pro účely rychlého zásahu, který bude doregulován změnou otáček rotorů jsou takové vlastnosti dostačující. Výhodou metody je i potřeba pouze jednoho senzoru.



Příloha A

Literatura

- [1] P. J. Cambell, *Vertical takeoff and landing aircraft*. New York: Macmillan, 1962.
- [2] “Congressional Research Service, v-22 osprey tilt-rotor aircraft.” <https://web.archive.org/web/20090210092501/http://www.opencrs.com/document/RL31384>. Accessed: 2023-04-21.
- [3] S. L. G. Dugan D. C., Erhart R. G., “The xv-15 tilt rotor research aircraft,” Tech. Rep. 19810001546, NASA, January 1980.
- [4] A. E. Bryson, *Control of Spacecraft and Aircraft*. Princeton University Press, 1994.

Příloha B

Seznam příloh

B.1 3D model experimentálního modelu

Příložený je 3D model sestavy experimentálního modelu. Modely jsou rozděleny na vyrobené 3D tiskem a obrobené ze dřeva.

B.2 Simulinkové modely a MATLAB

Příložené jsou Simulinkové modely *seesaw_only.slx*, *basic_force_model.slx* a *PID_tune.slx*. Dále data z ControlSystemDesigner relace *desing_PD.mat* a MATLAB script *init_workspace.m*.

- *seesaw_only.slx* obsahuje pouze simulační model
- *basic_force_model.slx* obsahuje veškeré simulované regulátory
- *PID_tune.slx* jsem použil na naladění PID pro řízení PWM
- *desing_PD.mat* obsahuje data z ControlSystemDesigner relace pro naladění konstant PD pro BANG-OFF-BANG regulaci
- *init_workspace.m* je script pro inicializaci MATLAB workspace mým systémem

■ B.3 Kód regulátorů

Příložený je STM32 CUBE IDE projekt se souborem *main.c*, ve kterém jsou implementovány všechny testované regulátory. Konkrétní regulátor se volí pomocí `#define` direktivy.

Příložený soubor *serial_log_to_csv.py* je pomocný Python script, který slouží k zaznamenání dat ze sériové linky.