ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DVOUSTUPŇOVÁ INERCIÁLNÍ STABILIZACE

Praha, 2011

Autor: Bc. Lukáš Kratochvíl

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil pouze materiály uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 3. 1. 2011

Lukáš Rybovič

podpis

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat celému týmu projektu Svíce, v rámci kterého tato práce vznikala. V první řadě vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Řezáčovi za vedení, vydatnou pomoc a trpělivost v celém průběhu jejího vzniku. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavu Žohovi za připomínky k hardwarové části práce, především za cenné rady ohledně návrhu a osazovaná desek plošných spojů. Také bych chtěl poděkovat Bc. Honzovi Saláškovi za pomoc při práci s jím vyvinutým externím řídicím modulem. Mé dík rovněž patří vedoucímu týmu Ing. Zdeňku Hurákovi Ph.D. za cenné rady ohledně teorie řízení. Závěrem bych chtěl také poděkovat celé mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Abstrakt:

Práce vznikala v rámci týmu projektu Svíce na Katedře řídicí techniky, zabývajícího se vývojem inerciální stabilizované základny pro bezpilotní letadla. Jejím cílem bylo nejprve hardwarově připojit zkušební laboratorní model dvojité inerciální stabilizace k PC tak, aby mohl být členy týmu využíván k snadnému testování zkušeních regulátorů do doby, než byl zkonstruován funkční zkušební prototyp základny Svíce 250.

Cílem druhé části práce byl zjednodušený návrh řízení základny na základně zkušeností získaných členy týmu na laboratorním modelu. Za tímto účelem byla provedena identifikace základny, bylo prakticky ozkoušeno a odladěno řízení základny externím modulem a dále vyřešena řada praktických problémů při spolupráci a přenosu dat mezi prostředím Matlab Simulink a základnou.

Abstract:

This diploma thesis was made in the team of Svíce project at department of Control Engineering, which develops stabilized inertial platform for unmanned aircraft vehicles. The aim of the first part was to design hardware and connect an experimental laboratory model of dual stage stabilization to PC in the way the members of the Svíce team could use it easily to test their own designs until the working prototype of Svíce 250 platform was made.

The aim of the second part was to make a simplified control design for Svíce 250 platform based on experience with the laboratory model. For this purpose, the system identification was made, the special external control module was tested and successfully used for control of Svíce 250 and many practical problems with communication, data and signal transfer between platform and Matlab Simulink environment were solved.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Lukáš Kratochvíl**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (magisterský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření, blok KM1 - Řídicí technika

Název tématu: **Dvoustupňová inerciální stabilizace**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout hardware a řídicí software pro laboratorní model dvouúrovňové stabilizace zaručující potlačení poruch a sledování reference pro polohovací systém. Hlavní úkoly práce jsou:

1) připojení senzorů (MEMS gyroskop, inkrementální snímače, měření proudu vinutím motoru),
2) připojení akčních členů (klasický stejnosměrný motor s převodovkou a "voice coil" motor) k převodníkové kartě pro PC,
3) návrh a implementace řídicího algoritmu pro potlačení poruch a sledování reference: klasický návrh (PID, lead-lag, ...) i moderní návrh (LQG, Hinf, ...),
4) experimentální ověření na laboratorním modelu.

Seznam odborné literatury:

[1] T. Semba, T. Hirano, J. Hong, and L. Fan, Dual-stage servo controller for HDD using MEMS microactuator, Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 35, 1999, pp. 2271-2273.
[2] S. Schroeck, W. Messner, and R. McNab, On compensator design for linear time-invariant dual-input single-output systems, Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, vol. 6, 2001, pp. 50-57.

Vedoucí: Ing. Martin Řezáč

Platnost zadání: do konce letního semestru 2010/2011

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 11. 11. 2009

Obsah

Obsah **7**
Seznam obrázků **9**
Seznam tabulek **10**
Kapitola 1 Úvod **11**
1.1 Projekt Svíce 11
1.2 Cíl práce 11
1.3 Úloha inerciální stabilizace 12
1.4 Úloha dvoustupňové řízení 12
Kapitola 2 Laboratorní model dvojité stabilizace **13**
2.1 Vznik modelu 13
2.2 Popis modelu 13
2.2.1 Akční členy pohonu 15
2.2.2 Senzory 15
2.2.3 Základní fyzikální vlastnosti modelu 15
2.3 Propojení modelu s PC 16
2.3.1 Ovládací karta 16
2.3.2 Softwarová část v PC 17
2.3.3 Elektromagnetické rušení 18
2.4 Matematický popis 18
2.4.1 Lineární model 19
2.4.2 Omezení lineárního modelu 21
2.5 Návrh řízení 23
Kapitola 3 Základna Svíce 250 ..... **24**
3.1 Popis základny 25
3.1.1 Komunikace se základnou 25
3.1.2 Řízení základny externím modulem 25
3.1.3 Zpracování naměřených signálů 25
3.1.4 Měření vnějších vibrací 25
3.2 Matematický model 26
3.3 Identifikace systému 26
3.3.1 Metoda identifikace typu gray box 26
3.3.2 Způsob identifikace 27
3.3.3 Identifikovaný systém jako celek 29
Kapitola 4 Řízení modelu **32**
4.1 Požadavky na řízení 32

4.2 Analýza požadavků na řízení 32
4.2.1 Potlačení poruch 32
4.2.2 Sledování reference 33
4.2.3 Akční členy 33
4.2.4 Diskretizace 34
4.3 Návrhová metoda H_∞ 34
4.3.1 H_∞ obecně 34
4.3.2 Mixed sensitivity 35
4.4 SISO řízení 36
4.4.1 PID řízení 37
4.4.2 Mixsyn SISO regulátor 39
4.4.3 Vlastnosti SISO řízení 41
4.5 MIMO řízení 42
4.5.1 H_∞ MIMO návrh 42
Kapitola 5 Závěr 44
5.1 Laboratorní model 44
5.2 Základna Svíce 250 44
5.3 Celkové zhodnocení 45
Reference 46

Seznam obrázků

obr. 2.1: Fotografie laboratorního modelu s vyznačením hlavní osy rotace - celkový pohled (vlevo) a detail (vpravo) 14

obr. 2.2: Navržená ovládací karta propojuje fyzický model dvoustupňové stabilizace s převodníkovou kartou Humusoft MFC624, která je součástí PC. Karta je napájena dvojím napětím. 16

obr. 2.3: Principielní schéma spojitého řízení akčního členu H můstkem, obvod umožňuje obousměrné řízení motorů jedním PWM a jedním směrovým signálem a měření proudu vinutím 17

obr. 2.4: Schéma mechanického uspořádání dvoustupňového modelu v pohledu shora a z boku s označenými stavovými veličinami 19

obr. 2.5: Schematické vyjádření pohonu prvního stupně přes převodovku a pružný převodový pás 21

obr. 2.6: Schematické znázornění geometrie přenosu síly VCM na hnací moment prvního stupně s vyznačením výchozí středové (černá) a krajní polohy (hnědá) 22

obr. 3.1: Fotografie základny Svíce 250 bez krytů s vyznačením hlavních os otáčení, azimutální osy, osy elevace a k ní kolmé osy cross elevace 24

obr. 3.2: Schematické vyjádření modelu Svíce 250 v pohledu shora a z boku. Ve schématu jsou vyznačeny pouze prvky podstatné pro řízení v ose elevace 26

obr. 3.3: Příklad PRBS signálu vhodného pro identifikaci, který dobře vybudí systém na všech frekvencích do 20Hz 27

obr. 3.4: Porovnání odezvy modelu druhého stupně na vstupní PRBS signál s naměřenými daty 28

obr. 3.5: Porovnání odezvy modelu prvního stupně na vstupní PRBS signál s naměřenými daty 28

obr. 3.6: Přesnost modelu ověřovaná v prvním experimentu, model věrohodně vystihuje přenos napětí na pohyb druhého stupně, posunutí měření a simulace u e_φ je přirozené a není způsobené chybou v modelu 29

obr. 3.7: Přesnost modelu ověřovaná v druhém experimentu, model nevystihuje přenos vnější poruchy na druhý stupeň 30

obr. 3.8: Nelinearita tření druhého stupně, z odezvy je vidět pásmo necitlivosti způsobené suchým třením v mechanismu druhého stupně než dojde k "utržení", u prvního stupně je situace obdobná 30

obr. 4.1: Přenos poruchy na druhý stupeň bez řízení založený na identifikovaném lineárním modelu 33

obr. 4.2: Šířka pásma akčních členů se zátěží bez řízení 34

obr. 4.3: Základní uspořádání H_∞ zpětnovazebního řízení 34

obr. 4.4: Mixed sensitivity ve standardní formě regulace s rozkreslenou vnitřní strukturou zobecněného systému P 36

obr. 4.5: Principielní schéma řízení dvěma nezávislými regulátory s vyznačenou vnitřní strukturou modelu a způsobem přenosu vnější poruchy díky tření 37

obr. 4.7: Naměřené průběhy řízení PI regulátory, řízení dobře potlačuje vnější poruchy, při prudkých pohybech základnou se dostává voice coil motor na svůj doraz a tím se stabilizace zhoršuje 38

obr. 4.6: Regulační schéma pro variantu se dvěma SISO regulátory, vliv akčního zásahu u_2 na druhý stupeň je u druhého stupně vyjádřen v rámci obecné vnější poruchy $d_{\omega 1}$ 38

obr. 4.8: Naměřené průběhy řízení PI regulátory, reference je sledována s překmitem, voice coil motor se příliš nevychyluje od středové polohy 39

obr. 4.9: Výsledek návrhu regulátoru, citlivostní funkce systému respektuje omezení zadané váhovým filtrem pouze s malým přesahem 40

obr. 4.10: Naměřené průběhy řízení regulátory navrženými metodou mixed sensitivity, potlačení vnější poruchy, porovnání měření se simulací 40

obr. 4.11: Naměřené průběhy řízení regulátory navrženými metodou mixed sensitivity, sledování reference, porovnání měření se simulací 41

obr. 4.12: Potlačení vnějších poruch v uzavřené smyčce na různých frekvencích, nízké frekvence potlačuje bez problémů řízení, vysoké frekvence se potlačují přirozeně díky dvoustupňové konstrukci, nejvíce se přenášení poruchy na frekvencích okolo 2Hz 41

obr. 4.13: MIMO návrhové schéma, požadujeme minimalizaci odchylky od reference, vzájemné odchylky obou stupňů a akčních zásahů 42

Seznam tabulek

tab. 2.1: Části laboratorního modelu 14

tab. 2.2: Konstanty dvoustupňového modelu 20

tab. 3.1: Konstanty modelu Svíce 250 v ose elevace 31

Kapitola 1

Úvod

1.1 Projekt Svíce

Diplomová práce vznikla v rámci projektu Svíce, jehož cílem je vývoj nové verze inerciálně stabilizované kamerové platformy pro bezpilotní letoun. Projekt je řízen Vojenským technickým ústavem letectva a protivzdušné obrany (VTÚLaPVO) a na jeho realizaci se podílí v oblasti řízení zaměstnanci a studenti Katedry řídící techniky pod vedením Ing. Zdeňka Huráka Ph.D. a v oblasti počítačového vidění odborníci z Centra strojového vnímání, mechanické konstrukční práce zajišťovala firma Essa Praha (1) zastupovaná Milanem Bartošem.

Hlavním úkolem inerciálně stabilizované platformy je sledování zaměřeného objektu kamerou ve středu zorného pole bez rychlých pohybů v obraze. Základna rozpoznává sledovaný objekt a na základě obrazové informace pohybuje kamerou tak, aby bylo zajištěno kvalitní sledování. Natáčení kamery vlastně kompenzuje vzájemný pohyb nosiče a cíle a inerciální rotaci nosiče.

Projekt Svíce vychází ze zkušeností a navazuje na úspěšný projekt Mamok (2) realizující první verzi stabilizované platformy (3). Jednou z významných inovací oproti staré verzi je dvoustupňové řešení konstrukce umožňující kvalitnější stabilizaci obrazu.

V počáteční fázi nového projektu byl sestrojen firmou Essa zkušební laboratorní model sloužící k otestování návrhu a možností dvoustupňového inerciálního řízení v zjednodušených podmínkách v době, kdy ještě nebyl k dispozici funkční prototyp vyvíjené základny. Počítalo se s tím, že zkušenosti získané na laboratorním modelu budou využity pro návrh kompletního řízení a stabilizace vyvíjené kamerové platformy.

1.2 Cíl práce

V první části práce popsané v kapitole 2 byl navržen hardware umožňující kompletní připojení zkušebního modelu dvouúrovňové stabilizace k PC tak, aby bylo možné model snadno řídit v reálném čase z prostředí Matlab Simulink.

Vzhledem k tomu, že během diplomové práce byl dokončen funkční prototyp stabilizované základny Svíce 250, bylo rozhodnuto provést identifikaci a návrh řízení již pro reálnou základnu v zjednodušené variantě jedné osy elevace s použitím matematického popisu vytvořeného pro zkušební laboratorní model. Základna Svíce 250 je představena v kapitole 3 a navržené řízení je prezentováno v kapitole 4.

1.3 Úloha inerciální stabilizace

Inerciální stabilizací je v našem případě myšlena stabilizace druhého stupně základny s uchycenou kamerou v inerciálním prostoru ve smyslu Newtonových zákonů. Podle druhé věty impulzové pokud na tuhé těleso nepůsobí vnější moment, zůstává jeho úhlová rychlost rotace konstantní.

Aby bylo možné tohoto principu využít, je druhý stupeň uložen volně bez pevné mechanické vazby ke kostře a je poháněn lineárním voice coil motorem, který z principu netvoří pevnou vazbu. Volné uložení není ideální a částečná vazba vždy vzniká díky tření v ložiskách uložení a mechanismu voice coil motoru a proto musí být přenos poruchy kompenzován řízením.

Podobným problémem stabilizace se zabýval tým pracující na vývoji aktivního absorbéru vibrací pro průmyslové využití. Podobně jako v našem případě využívali jako akční členy lineární voice coil motory. Výsledky jejich práce jsou uvedeny v článku (4).

1.4 Úloha dvoustupňové řízení

Dvoustupňové mechanické uspořádání je takové, že na první mechanický stupeň ovládaný akčními členy, které jsou upevněny ke kostře, je navázán druhý stupeň ovládaný akčními členy upevněnými k prvnímu stupni.

Důvodů pro volbu dvoustupňového uspořádání může být více. V našem případě je toto uspořádání nutné, pokud chceme využít výhod popsaných v kapitole 1.3 díky malému rozsahu voice coil motoru.

Pravděpodobně nejznámější, nelépe teoreticky a prakticky propracovaným případem dvoustupňového uspořádání je řízení pohybu čtecí hlavy pevného disku. Rameno čtecí hlavy, tvořící první stupeň, je natáčeno lineárním voice coil motorem, na špičku ramene je přes rychlé MEMS piezoelektrické členy zavěšen druhý stupeň s čtecím zařízením. Díky velmi vysoké šířce pásma piezoelektrických členů oproti hlavnímu voice coil motoru je možné dosáhnout větší šířky pásma celku a v důsledku umožnit rychlejší a přesnější pohyb hlav. Nevýhodou dvoustupňového uspořádání je vždy komplikovanější návrh řízení, jehož možnostmi se zabývá například článek (5).

Kapitola 2

Laboratorní model dvojité stabilizace

2.1 Vznik modelu

Základ experimentálního laboratorního modelu byl sestrojen na zakázku externí konstrukční firmou a byl navržen tak, aby se oba jeho stupně mohly pohybovat pouze v jedné svislé ose na rozdíl od vyvíjené základy Svíce 250, kde mají oba mechanické stupně každý dva stupně volnosti. Celý problém stabilizace se na modelu redukuje do jedné svislé osy.

Sestrojený laboratorní model se skládal z mechanické kostry s dvěma elektromotory jako akčními členy pro jednotlivé stupně, převodovky, převodového řemene a byl osazen základními senzory úhlové polohy.

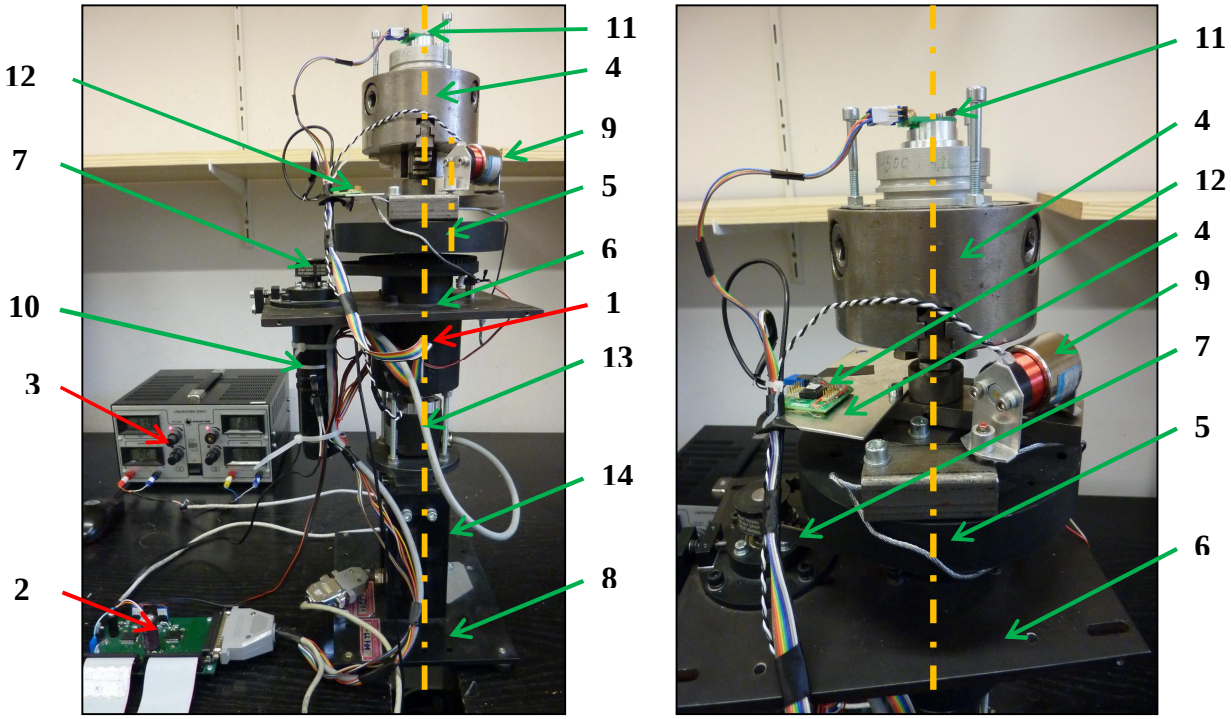
2.2 Popis modelu

Mechanická část modelu na obr. 2.1 byla navržena tak, aby redukovala problém inerciální stabilizace pouze do jedné svislé osy rotace oproti vyvíjené základně, kde má každý mechanický stupeň dva stupně volnosti.

Samotný model se skládá z podstavce 8 na kterém je volně uložena základna 6 s rotačním motorem a převodovkou 10. Motor pohání přes ozubený řemen 7 první stupeň 5. Na prvním stupni je umístěno jádro lineárního voice coil motoru, který přes rameno páky otáčí druhým stupněm 4. Na druhém stupni je uchycen gyroskopický senzor 12, který měří inerciálně úhlovou rychlost druhého stupně a jehož signál je klíčový k jeho samotné stabilizaci.

Prvním stupněm může rotační motor otáčet v plném rozsahu 360° pouze s přihlédnutím na délku kabeláže. Druhý stupeň se může vůči prvnímu otáčet pouze v malém rozsahu ± 5°, je totiž omezen poměrně malým rozsahem pohybu lineárního voice coil motoru.

Základna 6 je na podstavci uložena volně z toho důvodu, aby bylo možné simulovat vnější poruchy působící na základnu. Ručně simulované poruchy jsou měřeny inkrementálním senzorem 14 v podobě úhlu natočení základny a podstavce. Inkrementální senzor 15 měří natočení prvního stupně vůči základně a magnetický senzor 11 měří natočení druhého stupně vůči stupni prvnímu.



obr. 2.1: Fotografie laboratorního modelu s vyznačením hlavní osy rotace - celkový pohled (vlevo) a detail (vpravo)

tab. 2.1: Části laboratorního modelu

Základní části modelu	
1	mechanická část modelu
2	ovládací deska
3	napájecí zdroj
Konstrukční prvky modelu	
4	druhý otočný stupeň
5	první otočný stupeň
6	základna
7	ozubený řemen převodu prvního stupně
8	podstavec
Akční členy	
9	voice coil motor (VCM)
10	DC rotační motor s převodovkou
Senzory	
11	magnetický senzor úhlového natočení druhého stupně vůči prvnímu
12	MEMS gyroskop úhlové rychlosti druhého stupně
13	IRC snímač natočení prvního stupně
14	IRC snímač natočení celé základny

2.2.1 Akční členy pohonu

Model obsahuje dva motory, každým stupněm otáčí jeden motor.

Prvním stupněm otáčí stejnosměrný rotační motor Maxon RE36 118800 s jmenovitým napětím 42V a příkonem 70W. Moment motoru je přenášen převodovkou Maxon GP42c 203123 s převodovým poměrem 1:72, a dále přes ozubený řemen na první stupeň modelu s převodovým poměrem 1:4.

Druhým stupněm otáčí lineární voice coil motor H2W Technologies NCC05-11-011-1X s jmenovitým výkonem 3W s možností krátkodobého přetížení, napájen je ze zdroje 7V.

Oba motory jsou řízeny H-můstky L6234 pro VCM motor a L6023 pro rotační motor, které jsou umístěny na ovládací desce. Můstky umožňují plynulé řízené výkonu od nuly až po jmenovitou hodnotu v obou směrech otáčení resp. pohybu. H-můstky jsou ovládány PWM signálem a směrovým signálem z PC, při frekvenci spínání nad 5kHz.

2.2.2 Senzory

Natočení základny vůči podstavci a natočení prvního stupně vůči základně je snímáno dvěma inkrementálními optickými snímači Essa s 14000 a 24000 pulzy na otočku.

Natočení druhého stupně vůči prvnímu je snímáno magnetickým senzorem úhlu natočení AM8192BD01 s 8192 pulzy na otočku, což je zhruba 200 pulzů na rozsah otáčení, který umožňuje VCM motor.

Důležité pro kvalitní stabilizaci je kvalitní snímání inerciální úhlové rychlosti druhého stupně, které zajišťuje přesný MEMS senzor Analog Devices ADIS16250, šířka pásma senzoru je 50Hz, maximální měřená úhlová rychlost 5.59 rad/s.

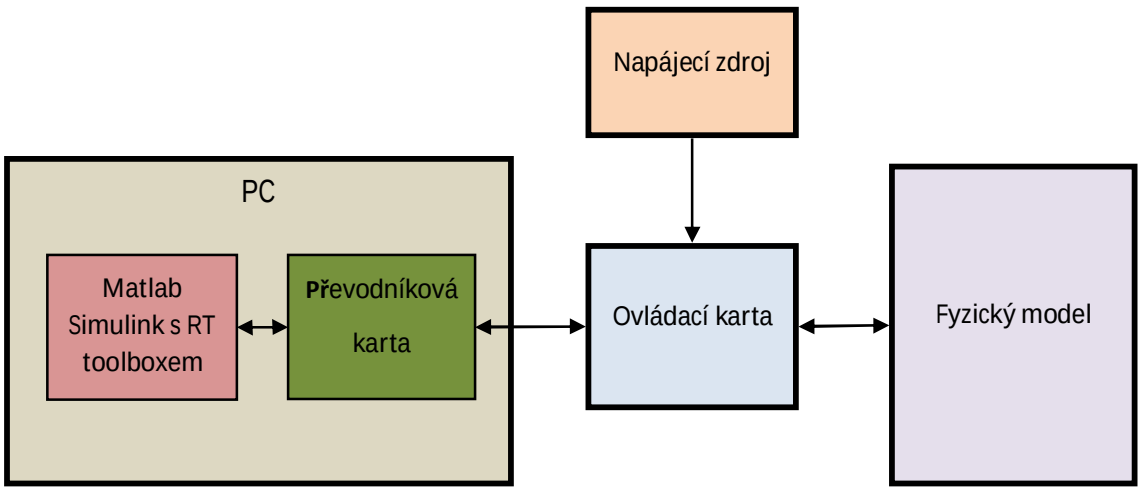
2.2.3 Základní fyzikální vlastnosti modelu

Klíčovou charakteristikou navrženého modelu je vazba mezi prvním a druhým stupněm přes lineární voice coil motor, který díky své konstrukci vnitřní cívky a vnějšího pláště neváže první stupeň s druhým.

Uvedené uspořádání je velice výhodné pro samotnou stabilizaci. Druhý stupeň se nachází ve volném uložení a podle impulsových vět přirozeně setrvává v poloze, do které byl nastaven. Vnější poruchy působící na základnu se plně přenášejí pevnou vazbou přes odpor převodovky rotačního motoru na první stupeň. Přenos poruch z prvního stupně na druhý je ale díky volnému uložení výrazně potlačen a je umožněn pouze díky mechanickému tření v ložiskách a samotném voice coil motoru.

2.3 Propojení modelu s PC

V rámci této práce byl model napojen se všemi senzory a akčními členy k PC tak, aby ho bylo možné snadno řídit v reálném čase z prostředí Matlab Simulink. Konečné uspořádání je zachycené ve schématu na obr. 2.2.



obr. 2.2: Navržená ovládací karta propojuje fyzický model dvoustupňové stabilizace s převodníkovou kartou Humusoft MFC624, která je součástí PC. Karta je napájena dvojím napětím.

2.3.1 Ovládací karta

Hlavním účelem navržené ovládací karty je zajištění napájení a obousměrného spojitého řízení obou motorů řídicími signály z PC. Dále karta zajišťuje napájení veškerých senzorů modelu a přivedení signálů z nich na převodníkovou kartu v PC přes příslušné konektory.

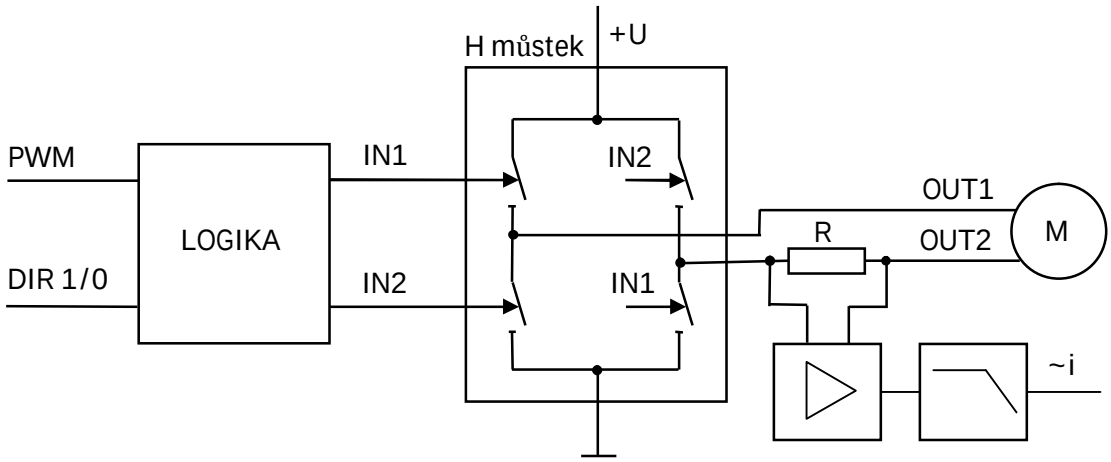
Při návrhu řízení motorů se vycházelo z již osvědčeného řešení použitého u akčních členů starší verze základny v rámci projektu Mamok, kde jsou motory řízeny integrovanými H-můstky, které zajišťují řízení výkonu akčních členů v celém jejich rozsahu s velkou účinností.

Princip řízení je pro oba akční členy stejný a je vystižen na obr. 2.3. H-můstky jsou ovládány PWM signálem a digitálním směrovým signálem (DIR) z PC. Nosná signálu je generována na vysokých frekvencích nad 5kHz, aby nedocházelo k nežádoucímu pískání, a je modulována spojitým ovládacím signálem. Modulace mění střídu PWM a tím i celkovou střední hodnotu napětí na motorech.

Používaný plný H můstek se čtyřmi spínacími členy z principu umožňuje řízení v obou směrech otáčení resp. pohybu. V prvním směru je spínána dvojice tranzistorů IN1 a dvojice IN2 zůstává rozepnuta, v druhém směru je situace opačná, dvojice IN1 je rozepnuta a na IN2 je přiveden PWM signál. Vzhledem k tomu, že pro řízení každého motoru byl k dispozici pouze jeden zdroj PWM signálu, byla navržena jednoduchá logika zajištující jeho přepínání mezi vstupy IN1 a IN2 na základě směrového bitu DIR.

Ovládací karta také zajišťuje měření proudu vinutím díky malým přesným snímacím odporům zapojeným do série mezi H-můstky a akční členy. Protékaný proud na nich vytváří malé napětí v řádech desítek milivoltů, které je pro účely měření zesíleno diferenciálním zesilovačem. Abychom měřili střední hodnotu proudu bez střídavé složky vzniklé spínáním, je snímaný signál dále vyhlazen jednoduchým RC článkem.

Kompletní schéma zapojení ovládací karty včetně rozložení součástek na desce je na obrázcích v příloze. Byly použity H můstky v integrovaném provedení L6203PS pro napájení rotačního motoru pracující do napětí 48V a L6234 pro napájení VCM motoru pracující již od 7V. Můstky jsou v provedení pouzdra PowerSO2, kde je ztrátové teplo odváděno spodní částí pouzdra na měřenou plochu desky plošného spoje. Můstky pro svoji funkci vyžadují ve své blízkosti velké kondenzátory s kapacitou nejlépe přes 1mF, které slouží jako okamžitý zdroj energie při rychlém spínání napájecího proudu. Snímací odpor je realizován paralelní kombinací rezistorů s odpory 0,1 a 0,15 Ω, kombinovaných tak, abychom zachytili celý rozsah měřených proudů. Rozdílový zesilovač AD8210, je navržen přímo pro tento měřící účel a jeho výstupem je napětí v rozsahu 0 až 5 V. Další zesílení signálu již nebylo nutné a proto se operační zesilovače OPA340N ukázaly jako zbytečné. Logiku přepínání směru se podařilo realizovat pouze pomocí obyčejných NAND obvodů SN74AHC00N. Při návrh desky bylo třeba dát pozor na fyzické uspořádání součástek především s ohledem na oddělení signálové a výkonové části, která je díky rychlému spínání proudů zdrojem značného rušení.



obr. 2.3: Principielní schéma spojitého řízení akčního členu H můstkem, obvod umožňuje obousměrné řízení motorů jedním PWM a jedním směrovým signálem a měření proudu vinutím

2.3.2 Softwarová část v PC

Přenos signálů mezi prostředím Matlab Simulink a převodníkovou kartu zajišťuje v PC v reálném čase Real Time Toolbox firmy Humusoft.

Převodníková karta Humusoft MF624 obsahuje řadu digitálních a analogových vstupů a výstupů s odpovídajícími D/A a A/D převodníky. Karta dále obsahuje vstupy a obvody pro snímání signálů z inkrementálních snímačů a obvody generující PWM signál na vysokých frekvencích.

Pro účely řízení modelu z prostředí Simulink byla vytvořena šablona (viz příloha) zprostředkovávající komunikaci s modelem realizovaná jako blok se vstupy a výstupy. Vstupní signály pro akční členy jsou škálovány na rozsah $\langle -1, 1 \rangle$. Výstupní signály odpovídají signálům ze senzorů, jsou převedeny na základní jednotky a v případě potřeby jsou dále upraveny filtrací a kompenzací offsetu.

Problémem převodníkové karty MF624 byla neúplná dokumentace ohledně generování PWM signálu z prostředí Simulink. Díky tomu jsme byli nejdříve nuceni naprogramovat generování PWM signálu ze Simulinku na kartě pomocí vlastního bloku Simulink realizovaného jako S funkce napsaná v jazyce C. Karta je dodávána se sadou dynamických knihoven dll umožňujících přímý přístup k registrům převodníkové karty, ve kterých jsou uloženy okamžité hodnoty na vstupech a výstupech a pomocí kterých se karta nastavuje a ovládá. Díky tomu, že se později podařilo získat chybějící dokumentaci přímo od výrobce, není blok již v šabloně používán a je k dispozici pouze na přiloženém datovém nosiči včetně zdrojového kódu.

2.3.3 Elektromagnetické rušení

Vzhledem k tomu, že H-můstky jsou výkonové součástky spínající velké proudy nad 1A s frekvencí nad 5kHz, jsou zdrojem elektromagnetického rušení, se kterým bylo nutno počítat při návrhu, aby nedocházelo k rušení přenášených signálů.

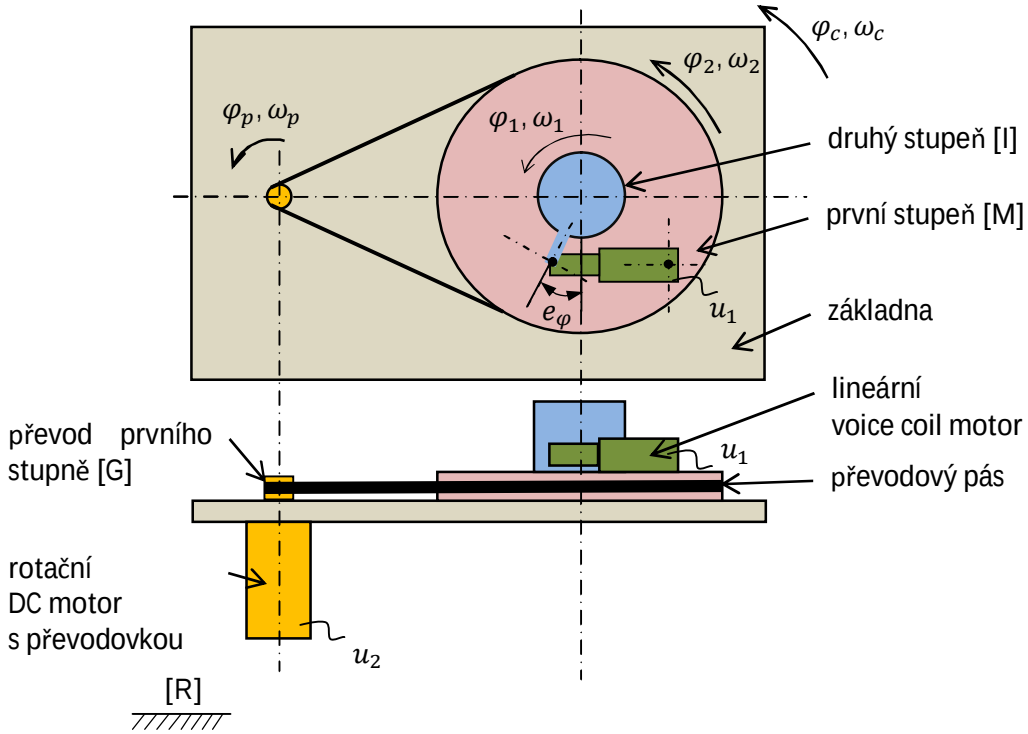
Největší problém působilo rušení na signál z gyroskopu, který musel být přenášen v analogové podobě, protože převodníková karta neumožňuje přenos dat po digitální sběrnici SPI, kterou podporuje gyroskop. I přes to, že jsme signál od senzoru až k převodníkové kartě vedli samostatným stíněným kabelem, byly v signálu přítomné nepravidelné rušivé špičky snižující kvalitu měření.

Rušení také ovlivnilo měření proudu ve vinutích motorů, protože napětí snímané na odporech je velmi malé a může být před zesílením snadno zarušeno. Při návrhu ovládací desky byly bohužel rozdílové zesilovače napětí umístěny zbytečně daleko od snímacích odporů. Měření proudů, ale není pro samotné řízení kritické.

2.4 Matematický popis

Matematický model včetně odvození rovnic jsme sestavili spolu s vedoucím práce, jeho detailnější popis a způsob odvození je uveden v článku (6).

2.4.1 Lineární model



obr. 2.4: Schéma mechanického uspořádání dvoustupňového modelu v pohledu shora a z boku s označenými stavovými veličinami

Chování reálného modelu jsme popsali lineárními rovnicemi (1) až (7). Uspořádání je schematicky vyjádřeno na obr. 2.4. Použité konstanty a jejich význam jsou uvedeny v tab. 2.2 a jejich hodnoty byly získány z článku (6) vedoucího práce.

Uvedené úhly a úhlové rychlosti jsou vztaženy k zemi [R]. Proměnná ω_1 určuje inerciální rychlost druhého stupně a je přímo měřena gyroskopem, proměnná e_φ odpovídá rozdílu φ_1 a φ_2 a je přímo měřena inkrementálním senzorem. Proměnná φ_c vyjadřuje vnější poruchu působící na model a je přímo měřena inkrementálním senzorem.

Rovnice (1) a (3) popisují elektrické chování voice coil motoru a rotačního motoru se zátěží. Rovnice (2) popisuje dynamiku mechaniky druhého stupně. Rovnice (4) a (5) popisují dynamiku mechaniky prvního stupně včetně převodovky a pružného převodového řemenu.

Pohon prvního stupně je schematicky vyjádřen na obr. 2.5 převzatém z článku (6), kde je vyznačen přenos hnacího momentu na druhý stupeň, jsou vyznačeny momenty setrvačnosti motoru J_m, převodovky J_pa prvního stupně J_2 včetně převodových poměrů. Vlastnosti převodového řemene jsou vyjádřeny konstantou pružnosti k a tlumení b. Odvození rovnic pro modelování mechanické vazby dvou těles s pružným členem s tlumením je uvedeno v knize (7).

Rovnice modelu:

$$U_{1MAX}\, u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{d_t} + r k_{e1}(\omega_1 - \omega_2) \tag{1}$$

$$J_1 \dot{\omega}_1 = r k_{t1} i_1 - b_1(\omega_1 - \omega_2) \tag{2}$$

$$U_{2MAX} u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + n_1 k_{e2}(\omega_p - n_2 \omega_c) \tag{3}$$

$$\begin{gathered} n_1^2 (J_m + J_p)\dot{\omega}_p = n_1 k_{t2} i_2 - k(\varphi_p - n_2 \varphi_2) - b(\omega_p - n_2 \omega_2) \\ - b_p(\omega_p - n_2 \omega_c) \end{gathered} \tag{4}$$

$$J_2 \dot{\omega}_2 = k(\varphi_p - n_2 \varphi_2) + b(\omega_p - n_2 \omega_2) - r k_{t1} i_1 \tag{5}$$

$$\dot{\varphi}_p = \omega_p, \dot{\varphi}_2 = \omega_2, \dot{\varphi}_1 = \omega_1 \tag{6}$$

$$e_\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \tag{7}$$

Na model je možné se dívat jako na stavový systém 8. řádu ve tvaru

$$\begin{gathered} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{gathered} \tag{8}$$

s vektorem stavů

$$x' = [i_1 \quad \omega_1 \quad i_2 \quad \omega_p \quad \omega_2 \quad \varphi_p \quad \varphi_2 \quad \varphi_1]\,, \tag{9}$$

s vektorem vstupů

$$u' = [u_1 \quad u_2 \quad \omega_c] \tag{10}$$

a vektorem výstupů například

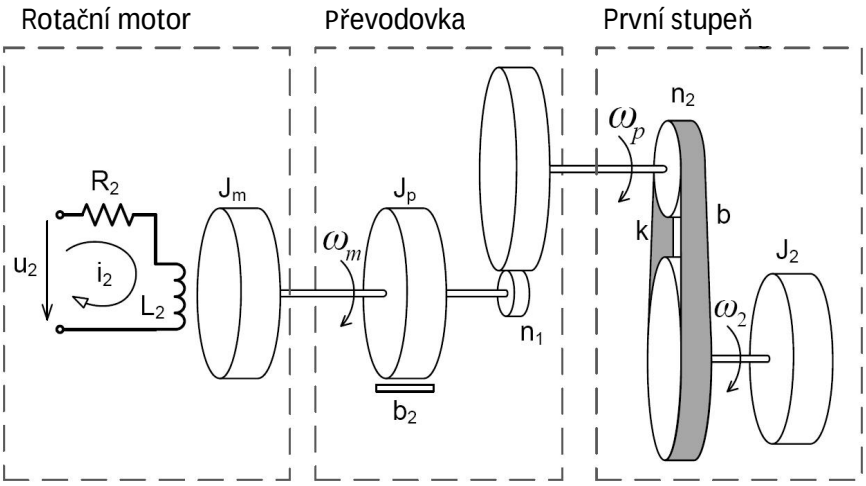
$$y' = [e_\varphi \quad \omega_1]. \tag{11}$$

Popsaný stavový systém je možné vygenerovat k použití pro Matlab skriptem umístěným na přiloženém datovém nosiči.

tab. 2.2: Konstanty dvoustupňového modelu

Par.	Popis	Hod.	Jednotka
k_{t1}	VCM - mechanická motorová konstanta	5,11	N/A
k_{e1}	VCM - elektrická motorová konstanta	5,11	V/(m/s)
R_1	VCM - odpor vinutí	2,9	Ω
L_1	VCM - indukčnost vinutí	0,99	mH
U_{1max}	VCM - jmenovité napětí	7	V
r	VCM - rameno páky druhého stupně	65	mm
J_1	moment setrvačnosti druhého stupně	10	gm^2
b_1	viskózní tření mechanismu druhého stupně	0,125	Nms/rad
k_{t2}	rot. motor - mechanická motorová konstanta	0,0566	Nm/A

k_{e2}	rot. motor - elektrická motorová konstanta	0,0566	V/(m/s)
R_2	rot. motor - odpor vinutí	3,43	Ω
L_2	rot. motor - indukčnost vinutí	0,65	mH
U_{2max}	rot. motor - jmenovité napětí	32	V
J_m	rot. motor - moment setrvačnosti	67,8	gcm^2
b_2	viskózní tření mechanismu prvního stupně	0,48	Nms/rad
n_1	převodovka - převodový poměr	74:1	-
J_p	převodovka - moment setrvačnosti	15	gcm^2
J_2	moment setrvačnosti prvního stupně	25	gm^2
n_2	převodový poměr ozubeného řemenu	4:1	-
k	pružnost ozubeného řemenu	250	Nm/rad
b	tlumení ozubeného řemenu	0,9	Nm/(rad/s)



obr. 2.5: Schematické vyjádření pohonu prvního stupně přes převodovku a pružný převodový pás

2.4.2 Omezení lineárního modelu

Mechanická tření obou stupňů byla modelována jako viskózní tření, které je úměrné rychlosti otáčení. Důvod je ten, že použité návrhové metody regulátorů neumí se složitými modely tření pracovat. Bohužel má tření ve skutečnosti nelineární charakter především v oblasti malé rychlosti otáčení, než dojde k "utržení" třecích ploch. Více je problematika modelování mechanického tření přehledně zpracována v diplomové práci (8).

Přenos hnací síly F vyvinuté voice coil motorem na otočný moment M přes rameno r jsme vyjádřili jako lineární podle vztahu

$$M = rF. \tag{12}$$

Ve skutečnosti se voice coil motor s posuvným pohybem jádra ještě natáčí, jak mu dovoluje volné uchycení v osách, otočný moment je proto spíše funkcí síly F a odchylky e_φ

$$M = f(F, e_\varphi), \tag{12.1}$$

z mechanického uspořádání schematicky vyjádřeného na obr. 2.6 je patrné že

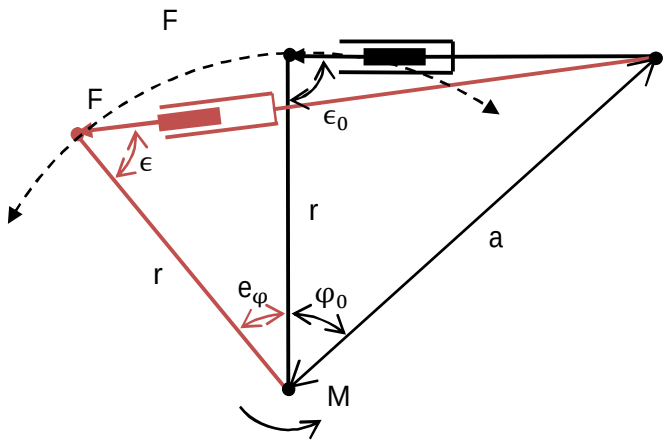
$$M = rFsin(\epsilon), \tag{12.2}$$

kde ϵ vyjadřuje úhel, pod kterým působí hnací síla F na rameno páky r. Podle sinové a kosinové věty je možné vyjádřit $\sin(\epsilon)$ jako funkci e_φ

$$\sin(\epsilon) = \frac{a \sin(e_\varphi + \varphi_0)}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2racos(\varphi_0 + e_\varphi)}}, \tag{12.3}$$

kde φ_0 určuje výchozí středovou polohu voice coil motoru a konstanta a odpovídá vzdálenosti uchycení VCM od středu otáčení druhého stupně.

Z mechanického uspořádání jde vidět, že pokud působí hnací síla na rameno páky ve výchozí středové poloze kolmo, je chyba způsobená linearizací okolo počátečního bodu vzhledem k malému rozsahu e_φ malá.



obr. 2.6: Schematické znázornění geometrie přenosu síly VCM na hnací moment prvního stupně s vyznačením výchozí středové (černá) a krajní polohy (hnědá)

2.5 Návrh řízení

Identifikaci laboratorního modelu a návrh řídících regulátorů provedl vedoucí práce Ing. Martin Řezáč, výsledky jsou shrnuty v článku (6).

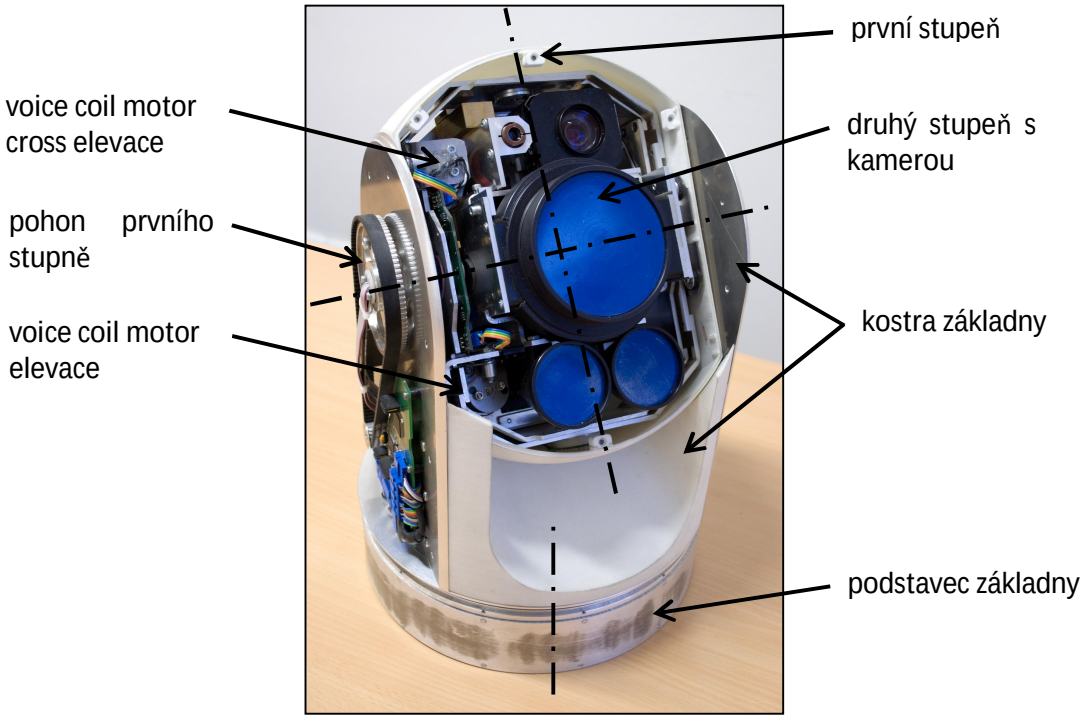
Některé zkušení regulátory pro laboratorní model, které byly navrženy paralelně autorem diplomové práce, jsou k dispozici na datovém nosiči. Identifikací a návrhem řízení se zabývá kapitola 4, kde jsou představeny regulátory pro základnu Svíce 250.

Kapitola 3

Základna Svíce 250

Stabilizovaná základna Svíce 250 je vyvíjena na Katedře řídicí techniky jako nástupce stabilizované základy vyvinuté v rámci úspěšného projektu Mamok (2). Základna je určena k umístění na pohyblivé dopravní prostředky jako bezpilotní letoun, vrtulník nebo automobil a umožňuje zaměření a plynulé sledování objektu vestavěnou kamerou při kompenzaci vnějších poruch v podobě vibrací, náklonu a změny kurzu pohyblivého dopravního prostředku.

Po dohodě s vedoucím práce bylo rozhodnuto provést identifikaci a návrh řízení již pro reálnou základnu v zjednodušené variantě jedné osy elevace s použitím matematického popisu vytvořeného pro zkušební laboratorní model.



obr. 3.1: Fotografie základny Svíce 250 bez krytů s vyznačením hlavních os otáčení, azimutální osy, osy elevace a k ní kolmé osy cross elevace

3.1 Popis základny

Základna (obr. 3.1) má podobně jako laboratorní model dvoustupňové uspořádání. Druhý stupeň (vnější stupeň) má oproti laboratornímu modelu dva stupně volnosti a je natáčen dvěma voice coil motory ve směru elevace a kolmém směru cross elevace. První stupeň (vnitřní stupeň) má jeden stupeň volnosti a je stejně jako u laboratorního modelu poháněn rotačním motorem s převodovkou a převodovým řemenem. Celá základna se pak ještě může otáček dokola kolem své svislé azimutální osy.

V době dokončování diplomové práce nebyla ještě dokončena oficiální dokumentace vyvíjené základny. Termíny a označení částí základny se proto mohou lišit od oficiálních.

3.1.1 Komunikace se základnou

Pro účely ovládání a vizualizace základny je vyvinuto grafické uživatelské rozhraní jako aplikace pro PC, která umožňuje především vizualizaci signálů ze senzorů, ukládání komunikace se základnou do souboru a přepínání režimů ovládání mezi řízením vestavěnými regulátory a externím řízením.

Komunikace se základnou a se všemi akčními členy a senzory probíhá digitálně po sběrnici CAN, což umožňuje snadný a spolehlivý přenos signálů ze všech senzorů v reálním čase.

3.1.2 Řízení základny externím modulem

Aby bylo možné snadno testovat regulátory navržené v prostředí Matlab Simulink bez nutnosti jejich ručního programování, vyvinul v rámci projektu Jan Salášek programovatelný procesorový modul a k němu příslušný software. Modul umožňuje jediným příkazem z regulačního schématu v Matlab Simulinku vygenerovat spustitelný program jazyce C, zkompilovat ho a nahrát přes USB do externího modulu, který již samostatně řídí základnu přes definované zprávy CAN. Funkce modulu je založená na spolupráci s Real Time Workshopem Matlabu.

Popsaný modul byl využíván k identifikaci modelu jako generátor vhodných budících signálů a k testování navržených regulátorů. Vzhledem k tomu, že byl modul používán prvně, bylo součástí této práce i jeho důkladné otestování a oprava nalezených chyb spolu s jeho autorem.

3.1.3 Zpracování naměřených signálů

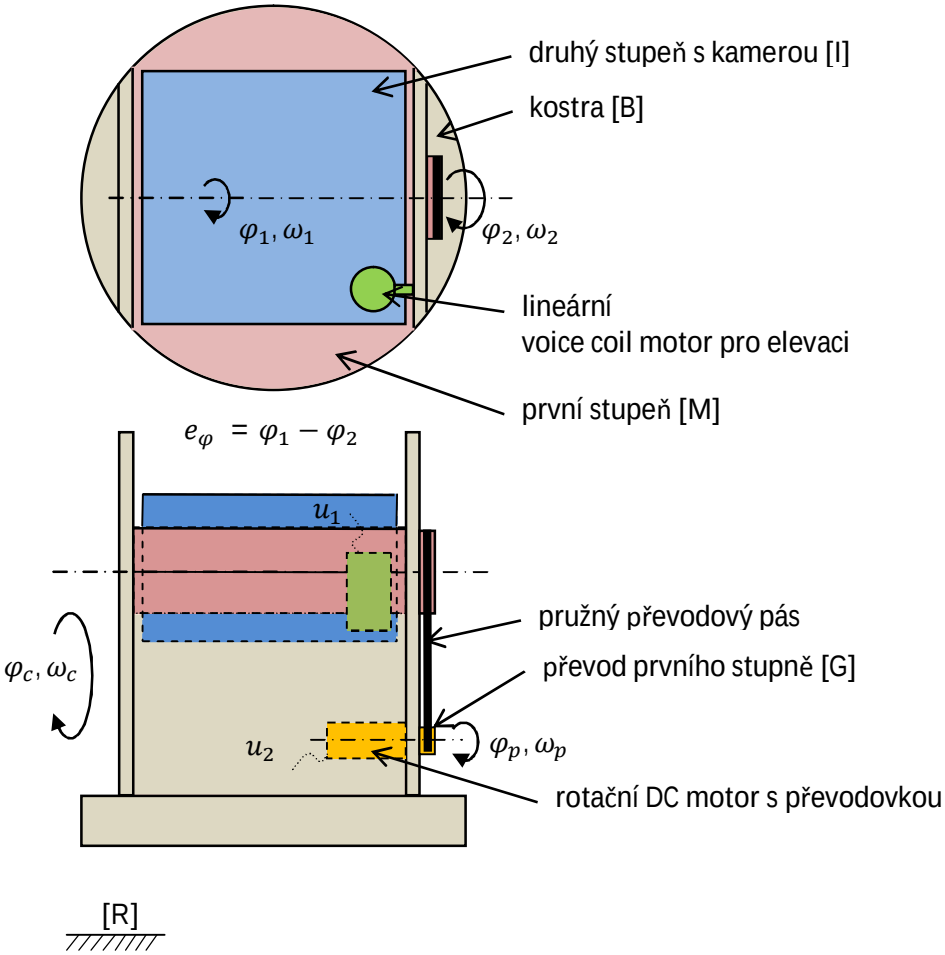
Signály zachycené v podobě zpráv na sběrnici CAN se importují do Matlabu kvůli dalšímu zpracování pomocí připraveného konfigurovatelného parseru ParseCanMsgs. Parser byl napsán v jazyce C# a jehož zdrojové kódy jsou umístěny na přiloženém datovém nosiči.

3.1.4 Měření vnějších vibrací

Základna neumožňuje přímo měření vnějších poruch na ni působících. Aby bylo možné posuzovat kvalitu navržených regulátorů, byla pro měření poruch připevněna k základně externí inerciální jednotka měřící gyroskopicky svoji rychlost rotace ve třech osách. Díky komunikaci jednotky po sběrnici CAN nebyl problém s jejím připojením do systému.

3.2 Matematický model

Matematický popis pro případ řízení hlavice pouze v jedné ose elevace je shodný s rovnicemi laboratorního modelu z kapitoly 2.4. Označení veličin se také nemění, pouze fyzické uspořádání je odlišné a je vystiženo na obr. 3.2.



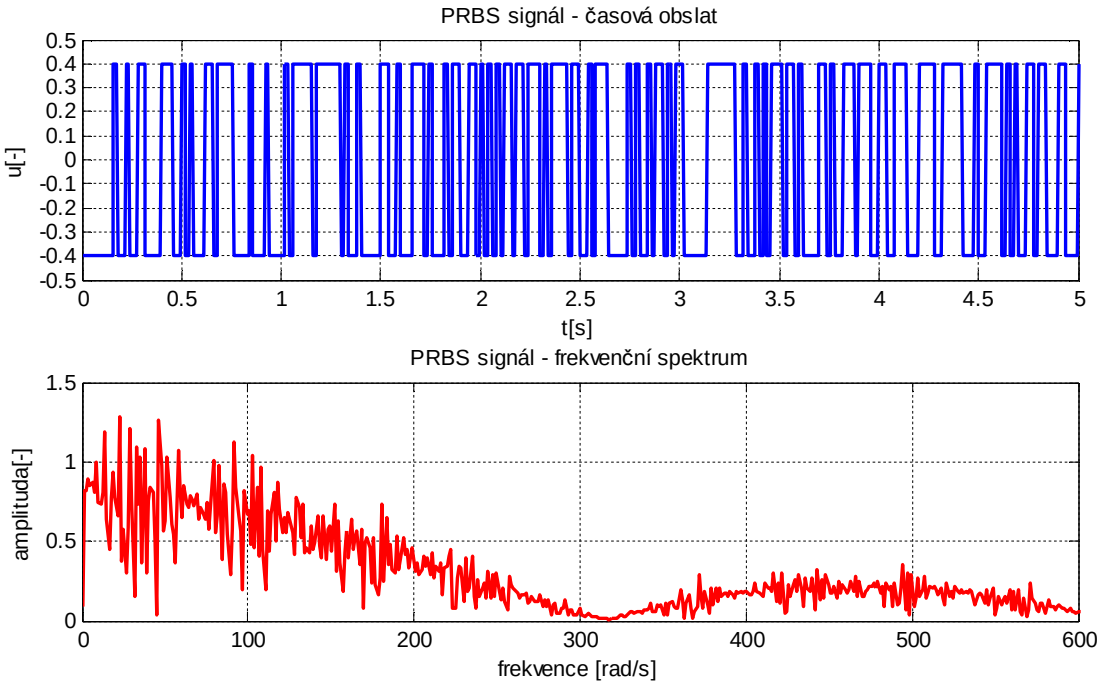
obr. 3.2: Schematické vyjádření modelu Svíce 250 v pohledu shora a z boku. Ve schématu jsou vyznačeny pouze prvky podstatné pro řízení v ose elevace

3.3 Identifikace systému

3.3.1 Metoda identifikace typu gray box

Identifikace systému byla provedena metodou gray box, která je implementovaná v rámci System Identification Toolboxu v Matlabu pomocí příkazu *pem*. Metoda iteračně hledá požadované parametry při znalosti struktury modelu na základě měřených vstupních a výstupních signálů. Její výhodou je možnost definování vnitřní struktury modelu včetně známých konstant a hledání pouze neznámých parametrů.

Pro správnou funkci metody je důležitá volba vhodného vstupního signálu, který vybudí systém pokud možno v jeho celém frekvenčním rozsahu. Jako nejvhodnější se ukázal pseudonáhodný obdélníkový signál označovaný jako PRBS s ovlivnitelnou šířkou pásma. Signál je možné vygenerovat příkazem Matlabu idinput, příklad signálu vhodného pro identifikaci v našem případě je na obr. 3.3.



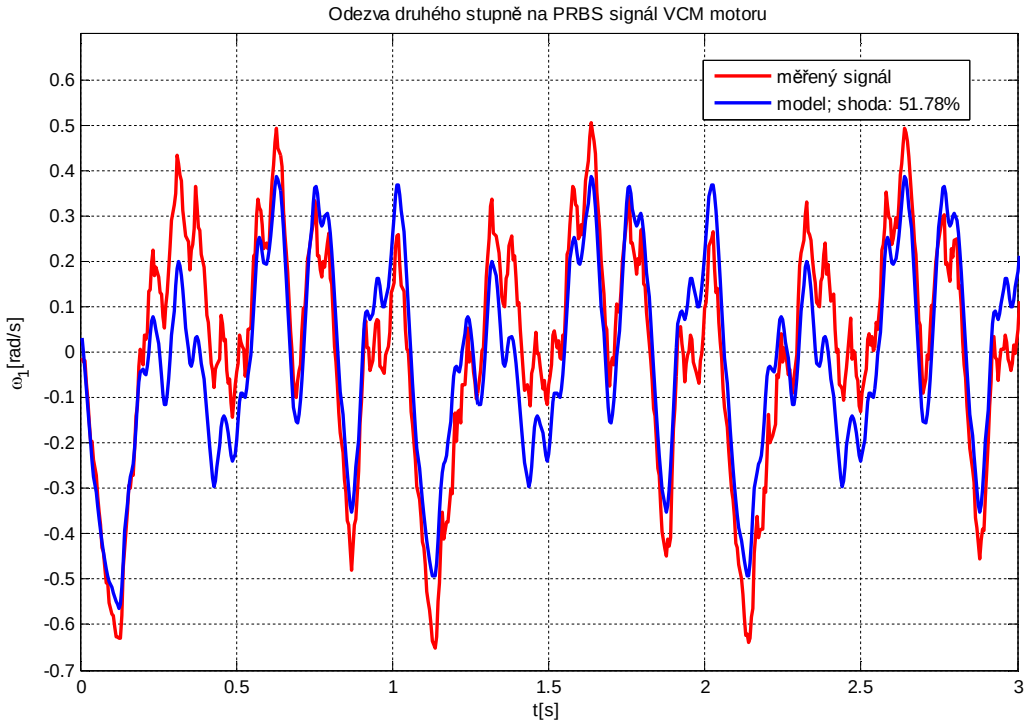
obr. 3.3: Příklad PRBS signálu vhodného pro identifikaci, který dobře vybudí systém na všech frekvencích do 20Hz

3.3.2 Způsob identifikace

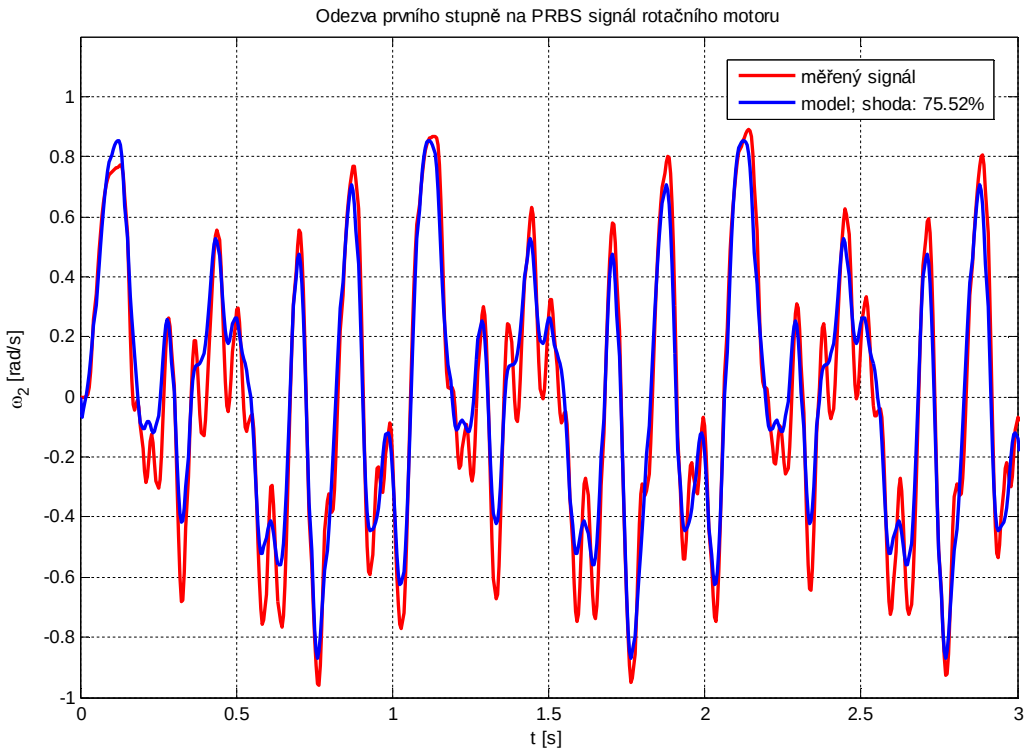
Oba stupně modelu jsme identifikovali samostatně ve dvou oddělených experimentech. Druhý stupeň jsme měřili při zablokovaném pohybu prvního stupně, cílem bylo určit moment setrvačnosti J_1 a viskózní tření b_1. VCM motor jsme budili PRBS signálem s šířkou pásma odpovídající zhruba dosažitelné šířce pásma ve zpětné vazbě (do 20Hz) a měřili jsme rychlost druhého stupně ω_1. Výsledek identifikace jsme ověřili porovnáním odezvy modelu s naměřenou odezvou na jiný PRBS signál, než byl použit pro identifikaci, výsledek je vidět na obr. 3.4.

První stupeň jsme identifikovali při ručním zablokování druhého stupně, hledali jsme moment setrvačnosti J_2, viskózní tření b_2 a konstanty pružnosti a tlumení hnacího řemenu k a b. Identifikaci jsme prováděli na základě signálu ω_2, který jsme získali filtrovanou derivací měřeného signálu φ_2, který se pro identifikaci přímo ukázal jako nevhodný. Na obr. 3.5 je ukázáno, jak se odezva modelu druhého stupně shoduje s naměřenou odezvou (po derivaci a filtraci). Opět byly pro porovnání použity jiné průběhy než pro identifikaci.

Nižší přesnost identifikace v případě druhého stupně může být způsobena zanedbanou nelinearitou v přenosu hnací síly druhého stupně, jak je uvedeno v kapitole 2.4.2. Naopak druhý stupeň se podařilo identifikovat přesněji díky zakomponování pružnosti přenosového pásu do matematického modelu.



obr. 3.4: Porovnání odezvy modelu druhého stupně na vstupní PRBS signál s naměřenými daty



obr. 3.5: Porovnání odezvy modelu prvního stupně na vstupní PRBS signál s naměřenými daty

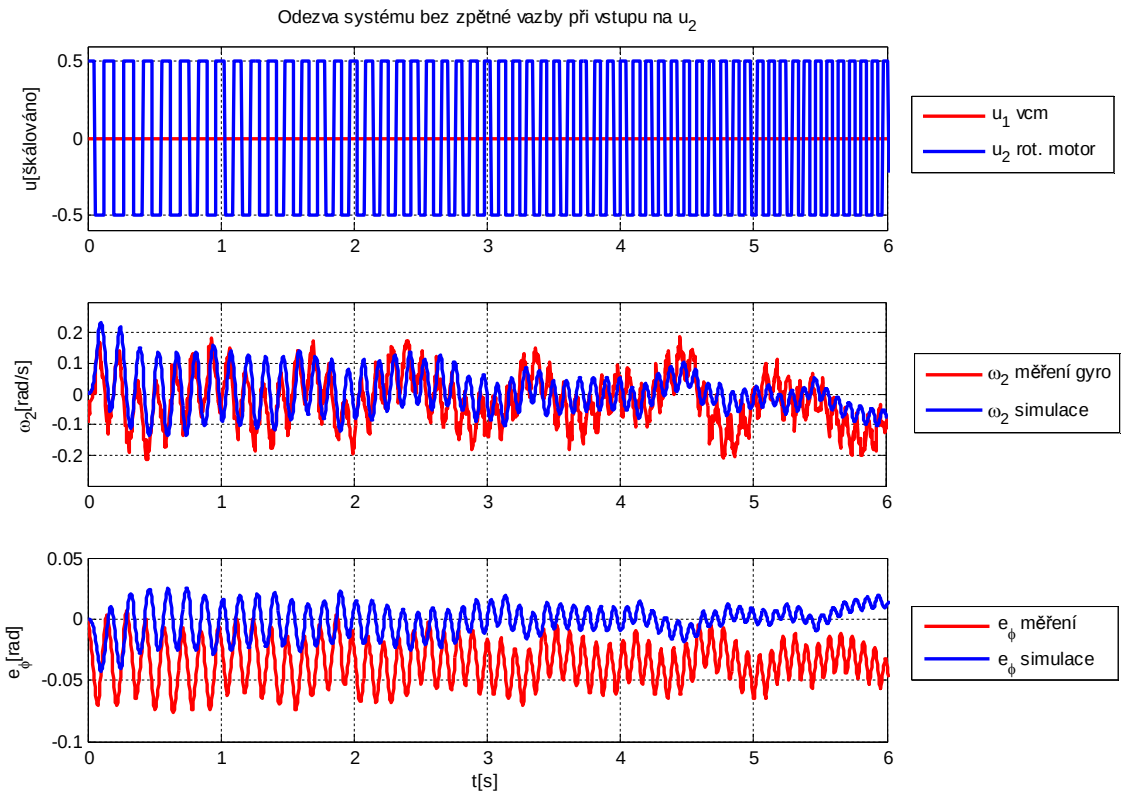
3.3.3 Identifikovaný systém jako celek

Veškeré konstanty modelu jsme získali buďto přímo z dokumentace k jednotlivým částem nebo provedenou identifikací, souhrnně jsou uvedeny v tab. 3.1.

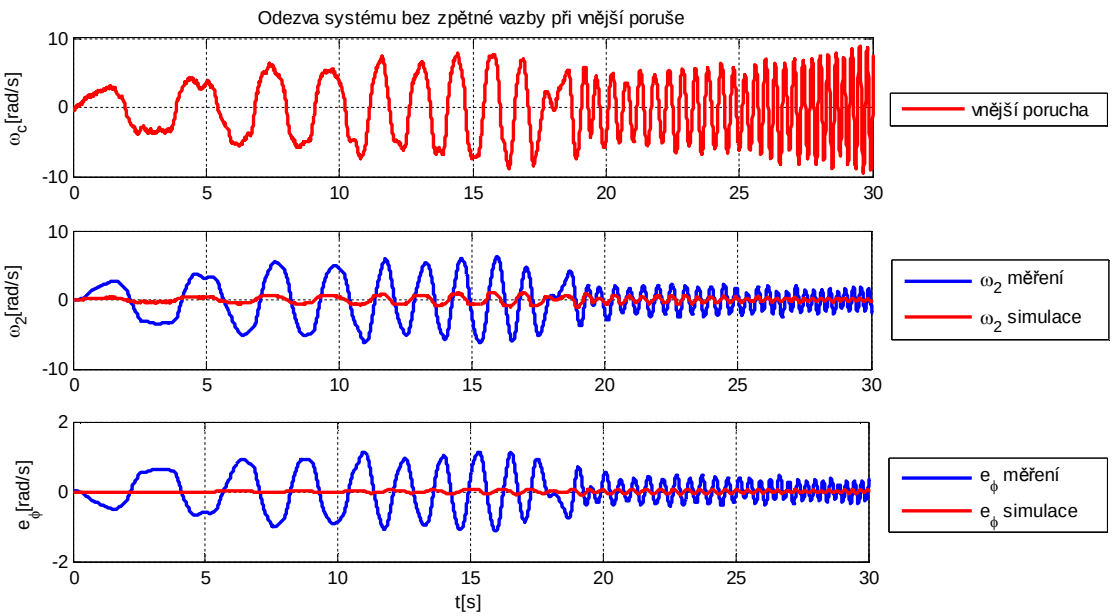
Přesnost modelu jsme otestovali na dvou experimentech se základnou bez řízení. V prvním případě (obr. 3.6) jsme vybudili systém napětím na rotačním motoru u_2, v druhém případě (obr. 3.7) jsme na základnu působili vnější poruchou, tím že jsme s ní ručně třásli různou rychlostí a s různou intenzitou tak, aby se voice coil motory nedostaly na svůj doraz.

Jak jde vidět z porovnání měření se simulací, podařilo se nám, aby model dostatečně přesně vystihl přenos napětí rotačního motoru na pohyb druhého stupně přes mechanické tření.

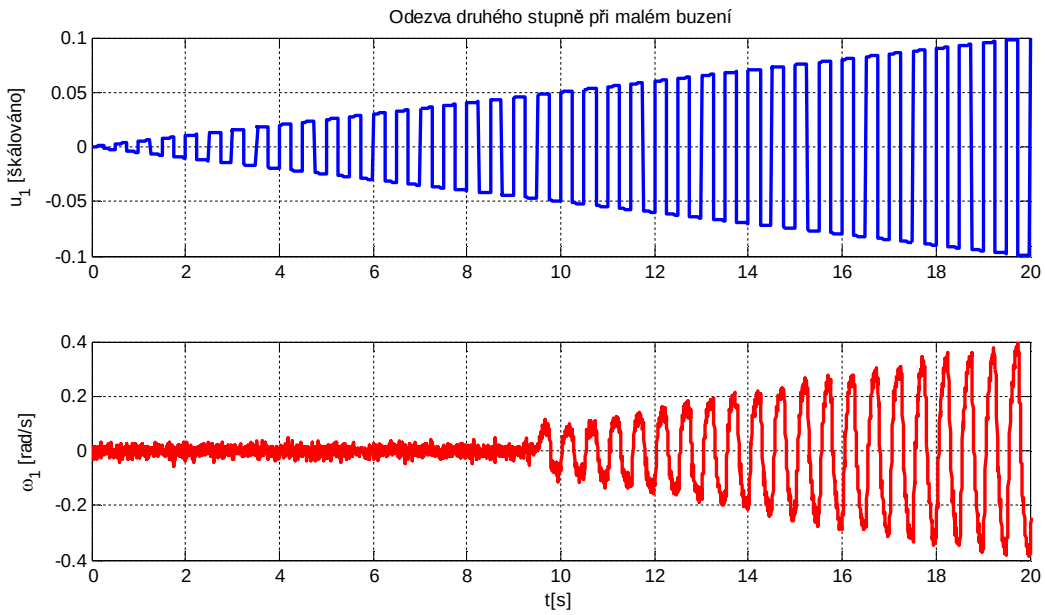
Bohužel model nevystihuje ani řádově správně přenos vnější poruchy na pohyb druhého stupně. Podle zkušenosti lze lepších výsledků dosáhnout pouze na úkor přesnosti odezvy v rámci prvního experimentu. Důvod je zřejmě ten, že tření v mechanismu druhého stupně není lineární, jak je vidět z obr. 3.8, a proto nejde modelovat jednoduše jako viskózní tření úměrné úhlové rychlosti.



obr. 3.6: Přesnost modelu ověřovaná v prvním experimentu, model věrohodně vystihuje přenos napětí na pohyb druhého stupně, posunutí měření a simulace u e_φ je přirozené a není způsobené chybou v modelu



obr. 3.7: Přesnost modelu ověřovaná v druhém experimentu, model nevystihuje přenos vnější poruchy na druhý stupeň



obr. 3.8: Nelinearita tření druhého stupně, z odezvy je vidět pásmo necitlivosti způsobené suchým třením v mechanismu druhého stupně než dojde k "utržení", u prvního stupně je situace obdobná

tab. 3.1: Konstanty modelu Svíce 250 v ose elevace

Par.	Popis	Hod.	Jednotka	Zdroj
k_{t1}	VCM - mechanická motorová konstanta	5,11	N/A	datasheet
k_{e1}	VCM - elektrická motorová konstanta	5,11	V/(m/s)	datasheet
R_1	VCM - odpor vinutí	2,9	Ω	datasheet
L_1	VCM - indukčnost vinutí	0,99	mH	datasheet
U_{1max}	VCM - jmenovité napětí	7	V	stanoveno
r	VCM - rameno páky druhého stupně	65	mm	změřeno
J_1	moment setrvačnosti druhého stupně	33,17	gm^2	identifikováno
b_1	viskózní tření mechanismu druhého stupně	0,35	Nms/rad	identifikováno
k_{t2}	rot. motor - mechanická motorová konstanta	10,9	mNm/A	datasheet
k_{e2}	rot. motor - elektrická motorová konstanta	5,11	V/(m/s)	datasheet
R_2	rot. motor - odpor vinutí	5,74	Ω	datasheet
L_2	rot. motor - indukčnost vinutí	0,362	mH	datasheet
U_{2max}	rot. motor - jmenovité napětí	12	V	stanoveno
J_m	rot. motor - moment setrvačnosti	4,26	gcm^2	datasheet
b_2	viskózní tření mechanismu prvního stupně	0,028	Nms/rad	identifikováno
n_1	převodovka - převodový poměr	62:1	-	datasheet
J_p	převodovka - moment setrvačnosti	0,3	gcm^2	datasheet
J_2	moment setrvačnosti prvního stupně	23	gm^2	identifikováno
n_2	převodový poměr ozubeného řemenu	86:18	-	změřeno
k	pružnost ozubeného řemenu	4,92	Nm/rad	identifikováno
b	tlumení ozubeného řemenu	0,001	Nm/(rad/s)	identifikováno

Kapitola 4

Řízení modelu

4.1 Požadavky na řízení

Cílem řízení je zajistit inerciální stabilizaci druhého stupně základny v ose elevace potlačením vnějších poruch působících na základnu způsobených nežádoucím pohybem nosiče. Řízení dále umožňuje plynulé a přesné natočení druhého stupně do požadované polohy v inerciálním prostoru.

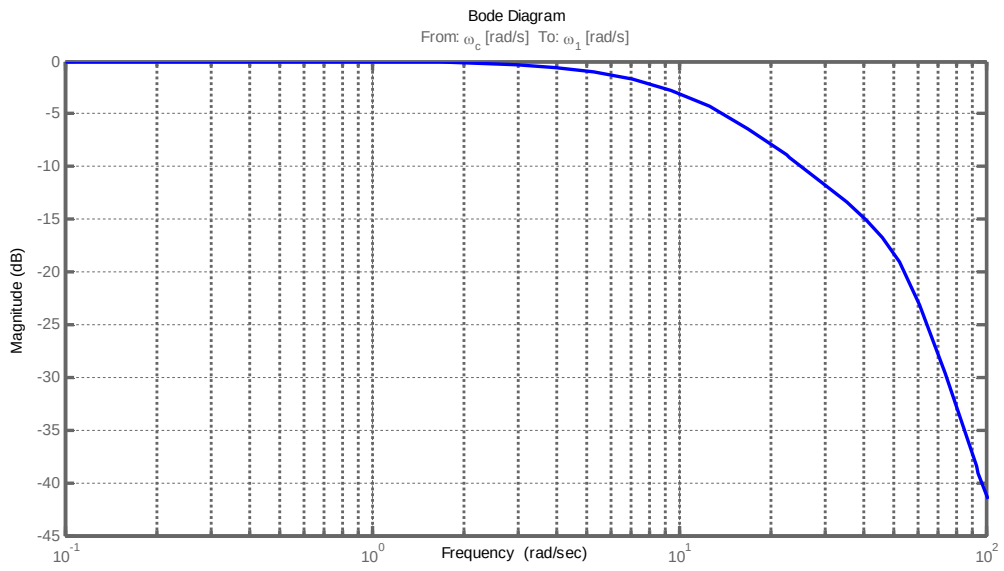
Požadavky na řízení základny byly stanoveny na základě potřeby zadavatelů projektu a měření provedených v reálných podmínkách, kde bude vyvinutá základna nasazena.

Řízením je třeba co nejlépe potlačit nežádoucí pohyb nosiče základny v celém frekvenčním pásmu, aby nedocházelo k roztřepání obrazu z kamer. Dále je třeba kompenzovat větší výchylky základny do úhlové rychlosti 1 rad/s způsobené náklonem nebo změnou kurzu letounu a nakonec je třeba zajistit sledování referenční úhlové rychlosti druhého stupně modelu s nulovou regulační odchylkou v ustáleném stavu s minimálním povoleným překmitem pro maximální rychlost otáčení 1 rad/s.

4.2 Analýza požadavků na řízení

4.2.1 Potlačení poruch

Jak je uvedeno výše, stabilizaci usnadňuje dvoustupňová konstrukce modelu s volným uložením druhého stupně. Nežádoucí pohyby nosiče se na druhý stupeň základny přenášejí pouze díky tření v ložiskách druhého stupně a voice coil motoru a to především na nižších frekvencích, vyšší frekvence jsou přirozeně potlačeny, jak je vidět z charakteristiky na obr. 4.1. Je třeba podotknout, že charakteristika byla vygenerována na základě lineárního modelu a díky jeho nepřesnosti v oblasti tření je pouze orientační.



obr. 4.1: Přenos poruchy na druhý stupeň bez řízení založený na identifikovaném lineárním modelu

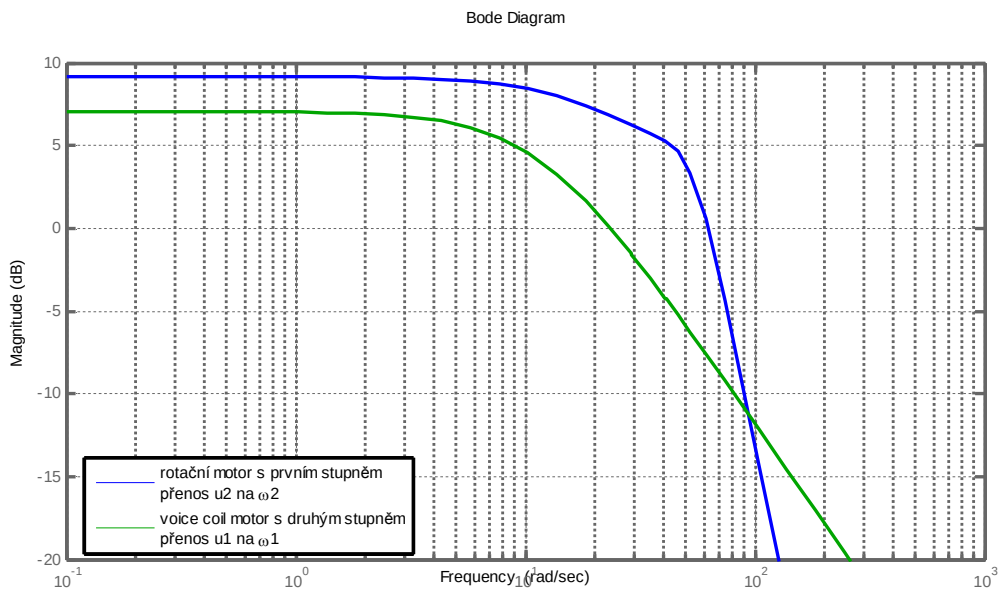
Nízkofrekvenční poruchy, které se přenesou na druhý stupeň, budou kompenzovány lineárním voice coil motorem v rámci jeho relativně malého akčního rozsahu ± 5°. Při větších výchylkách se zapojí do řízení rotační motor, který vhodným otáčením prvního stupně zajistí, aby voice coil motor mohl stále pracovat uprostřed svého pracovního rozsahu a nedostal se na jeden z krajních dorazů.

4.2.2 Sledování reference

Podobný princip platí i při sledování reference. Na regulační odchylku nejprve zareaguje voice coil motor, který se vychýlí ze středové polohy a pootočí základnou v požadovaném směru. Následně zareaguje rotační motor a pootočí prvním stupněm, aby snížil výchylku voice coil motoru a udržel ji v pracovním rozsahu do 5°. První stupeň vlastně "dobíhá" stupeň druhý a ve výsledku kopíruje jeho pohyb. Vzhledem k tomu, že při sledování reference pohyb prvního stupně sleduje referenci podobně jako druhý stupeň, je možné zavést přímo vazební regulační člen z referenční odchylky na rotační motor a tím docílit lepšího řízení.

4.2.3 Akční členy

Významný vliv na kvalitu a dosažitelnou rychlost řízení mají parametry akčních členů. Na obr. 4.2 je vidět, že šířka pásma voice coil motoru se zátěží druhým stupněm je 8 rad/s a šířka pásma rotačního motoru s prvním stupněm je 10,5 rad/s. Šířky pásma jsou dány výkonem motorů a velikostí zátěže. Jedním z cílů řízení je jejich maximální rozšíření ve zpětné vazbě při respektování možností akčních zásahů.



obr. 4.2: Šířka pásma akčních členů se zátěží bez řízení

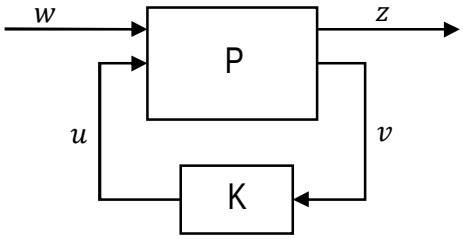
4.2.4 Diskretizace

Přestože matematický model i návrh regulátorů je spojitý, samotné řízení probíhá číslově. Vzorkovací frekvence signálů ze základny je 200Hz, což je dostatečné pro řízení vzhledem k rychlosti dynamiky systému. Navržené regulátory je proto nutné pro účely řízení diskretizovat.

4.3 Návrhová metoda H_∞

4.3.1 H_∞ obecně

Návrhová metoda je založena na minimalizaci nekonečné normy zobecněného systému v základním uspořádání podle obrázku obr. 4.3. P je zobecněný systém, K navrhovaný regulátor, v měřené veličiny, u akční zásahy, z jsou takzvané chyby, které jsou minimalizovány za účelem dosažení požadavků kladených na řízení a w jsou vstupy jako reference nebo vnější poruchy.



obr. 4.3: Základní uspořádání H_∞ zpětnovazebního řízení

Základní uspořádání popisuje rovnice

$$\begin{bmatrix} z \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix}, u = K(s)v. \tag{13}$$

Zpětnovazební přenos z w na z popisuje vztah

$$z = F_L(P, K)w \tag{14}$$

kde F_L značí lineární podílovou transformaci,

$$F_L(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}. \tag{15}$$

Standardní návrh H_∞ spočívá v nalezení všech stabilizujících regulátorů K, které minimalizují

$$\|F_L(P, K)\|_\infty = \max_\omega \sigma\big(F_L(P, K)(j\omega)\big). \tag{16}$$

Podrobně se návrhovými metodami založenými na minimalizaci H_∞ zabývá kniha (9).

4.3.2 Mixed sensitivity

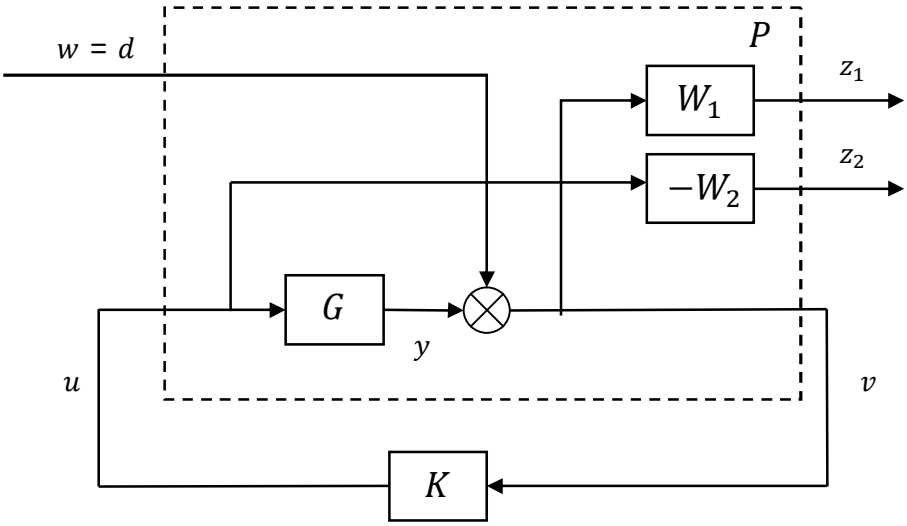
V našem případě jsme využívali nejčastěji používanou variantu H_∞ nazývanou Mixed Sensitivity a její modifikovanou podobu pro naše účely.

Metoda je založena na tvarování citlivostní funkce $S = (I + GK)^{-1}$ spolu s funkcí KS, případě komplementární citlivostní funkcí $T = 1 - S$. Principielní schéma je na obr. 4.4. Na obrázku je rozkreslena vnitřní struktura zobecněného systému P, který se skládá z modelu soustavy G a váhových filtrů, kterými se specifikují požadavky na řízení formou omezení na tvar citlivostní funkce a omezení na akční zásah. Filtr W_1 slouží k tvarování citlivostní funkce, filtr W_2 k tvarování a omezení akčních zásahů. Vzhledem k tomu, že neuvažujeme neurčitosti v modelu, nepoužíváme filtr na komplementární citlivostní funkci T.

Citlivostní funkce udává přenos reference na regulační odchylku. Její tvar volíme jako kompromis mezi sledováním reference s potlačením vnějších poruch a velikostí akčních zásahů. Typicky je citlivostní funkce na nižších frekvencích nízká, kdy je možné sledovat referenci. Na vyšších frekvencích, podle toho, jakou požadujeme šířku pásma, stoupá k jedničce.

Výpočet optimálního regulátoru pak spočívá v minimalizaci přes K vztahu

$$\left\| \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 KS \end{bmatrix} \right\|_\infty. \tag{17}$$



obr. 4.4: Mixed sensitivity ve standardní formě regulace s rozkreslenou vnitřní strukturou zobecněného systému P

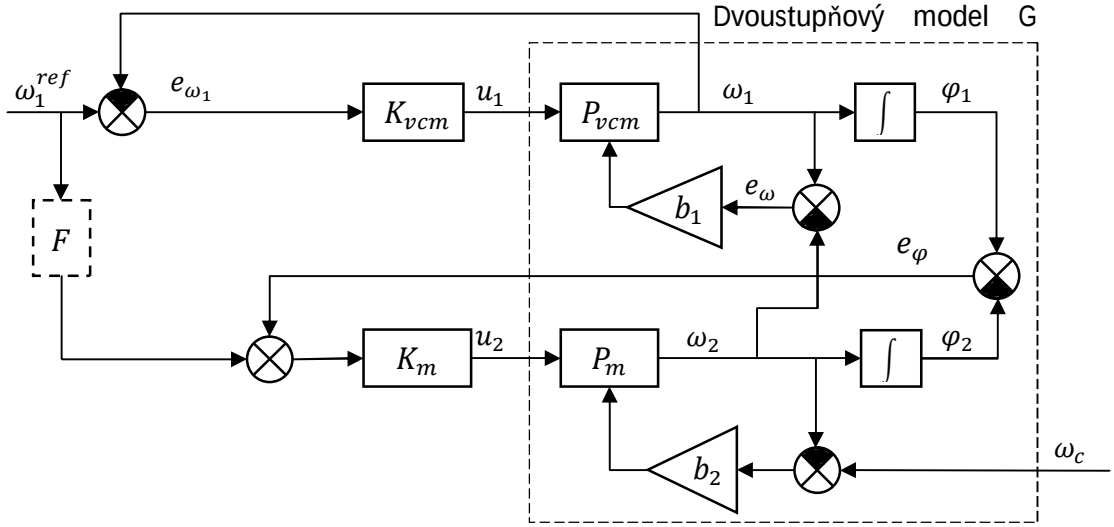
Pro výpočet jsme použily implementaci metody H_∞ z Robust System Toolboxu v Matlabu přes příkazy *mixsyn* pro mixed sensitivity problém a jeho obecnou verzi *hinfsyn*.

4.4 SISO řízení

První možností jak systém řídit je dvojicí nezávislých SISO regulátorů, kdy každý regulátor řídí jeden stupeň. Princip je vystižen na obr. 4.5. Ve schématu jsou pro lepší pochopení rozkresleny vazby uvnitř dvoustupňovém modelu včetně vyznačení fyzikálních veličin.

Regulátor K_{vcm} zajišťuje sledování reference lineárním voice coil motorem, který je reprezentován přenosem P_{vcm} z napětí na otáčení druhého stupně ω_1. V modelu je vyznačeno, jakou úlohu hraje viskózní tření b_1 při přenosu poruchy z prvního stupně na druhý, které je úměrné rychlosti otáčení e_ω druhého stupně vůči prvnímu.

Regulátor K_m udržuje výchylku voice coil motoru ze středové polohy e_φ kolem nulové hodnoty pomocí rotačního motoru, který je reprezentovaný přenosem P_m z napětí na otáčení prvního stupně ω_2. Porucha ω_c se přenáší na první stupeň přes tření b_2 stejným principem jako v případě u druhého stupně, s tím rozdílem, že velké tření v převodech rotačního motoru vytváří na rozdíl od lineárního voice coil motoru pevnou mechanickou vazbu mezi kostrou a prvním stupněm.



obr. 4.5: Principielní schéma řízení dvěma nezávislými regulátory s vyznačenou vnitřní strukturou modelu a způsobem přenosu vnější poruchy díky tření

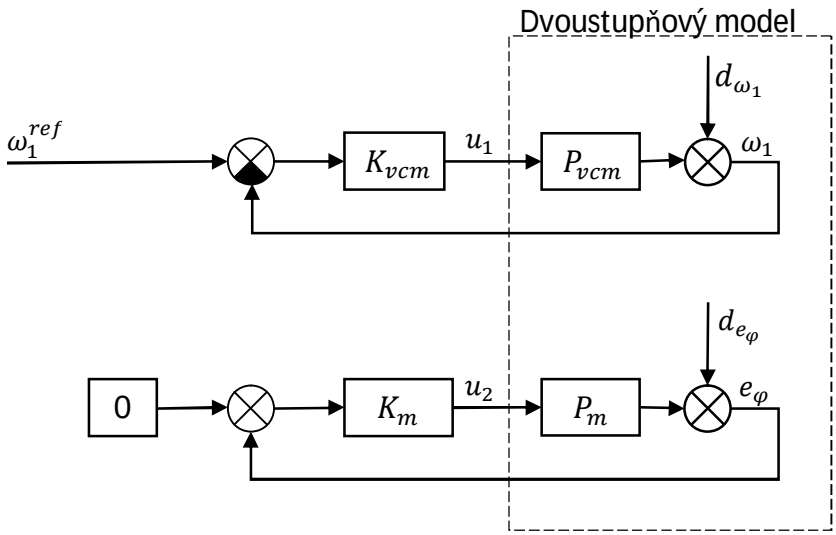
4.4.1 PID řízení

Jedná se o nejjednodušší způsob řízení, a proto ho budeme považovat za referenční. K řízení stačí dvojice PI regulátorů, kde integrační složky jsou nutné k dosažení nulové odchylky od reference. Regulátory byly navrženy metodou umisťování pólů systému ve zpětné vazbě (root locus) na modelu a následně byly konstanty doladěny na reálním systému. Regulační schéma je na obr. 4.6.

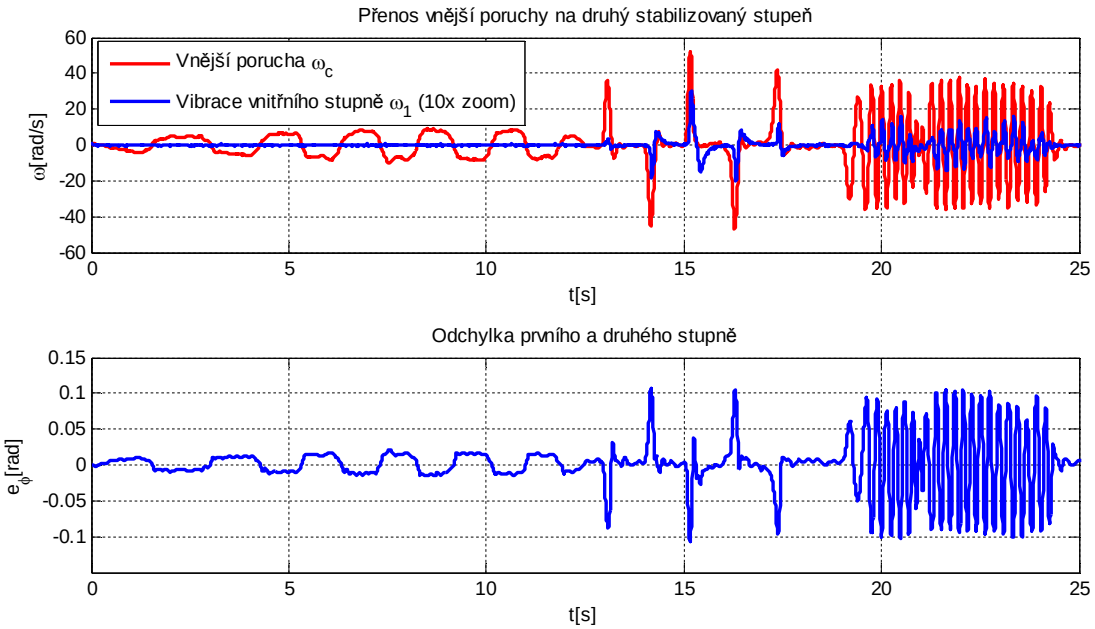
Na obr. 4.7 a obr. 4.8 s průběhy řízení je vidět, jak řízení potlačuje vnější poruchy a jak je sledována požadovaná reference.

Navržené regulátory:

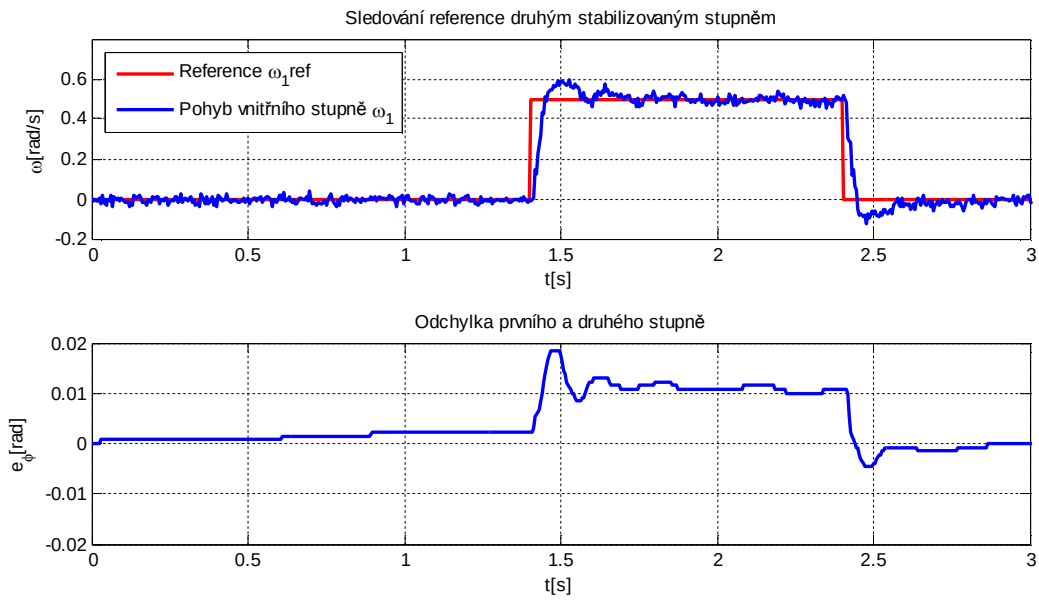
$$K_{vcm} = 2.5 + \frac{15}{s}, K_m = 20 + \frac{5}{s} \tag{18}$$



obr. 4.6: Regulační schéma pro variantu se dvěma SISO regulátory, vliv akčního zásahu u_2 na druhý stupeň je u druhého stupně vyjádřen v rámci obecné vnější poruchy d_{ω_1}



obr. 4.7: Naměřené průběhy řízení PI regulátory, řízení dobře potlačuje vnější poruchy, při prudkých pohybech základnou se dostává voice coil motor na svůj doraz a tím se stabilizace zhoršuje



obr. 4.8: Naměřené průběhy řízení PI regulátory, reference je sledována s překmitem, voice coil motor se příliš nevychyluje od středové polohy

4.4.2 Mixsyn SISO regulátor

Pokusili jsme se zlepšit kvalitu řízení tím, že jsme regulátor pro druhý stupeň K_{vcm} navrhli metodou mixed sensitivity, regulátor prvního stupně jsme ponechali PI. Regulační schéma se nemění a je stejné jako na obr. 4.6.

Citlivostní filtr W_1 jsme volili tak, aby šířka pásma uzavřené smyčky byla $\omega_0 = 60\ \mathrm{rad/s}$ a aby byla dostatečně potlačena ustálená odchylka koeficientem $A = 0{,}001$. Koeficient M jsme zvolili rovný 2. Dosazením do obecného vztahu pro návrh citlivostního filtru

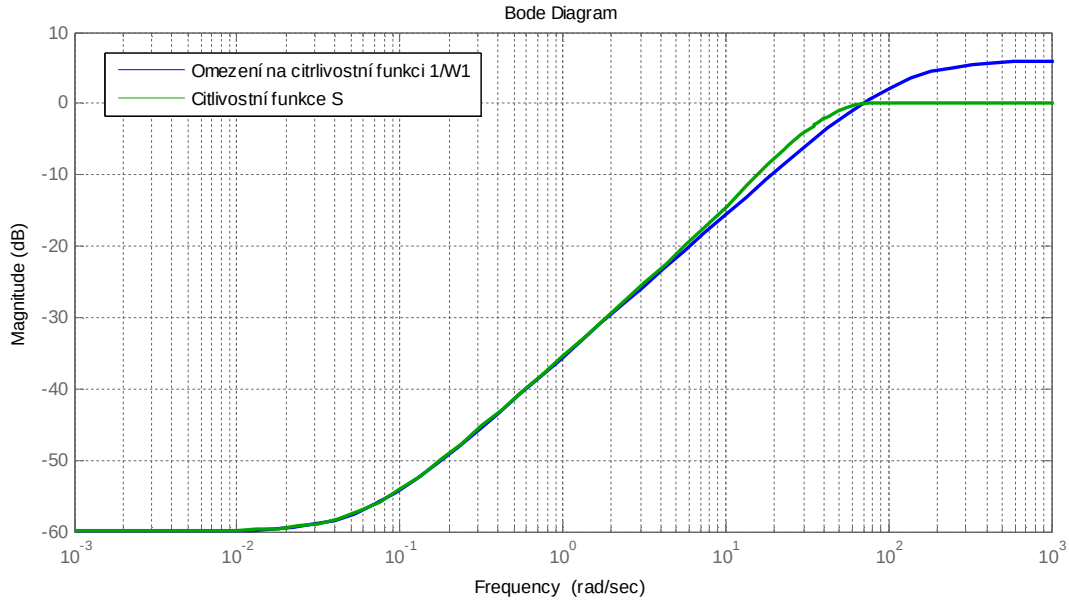
$$W_1 = \frac{\frac{s}{M} + \omega_0}{s + \omega_0 A} \tag{19}$$

získáváme filtr

$$W_1 = \frac{0{,}5s + 60}{s + 0{,}06}. \tag{20}$$

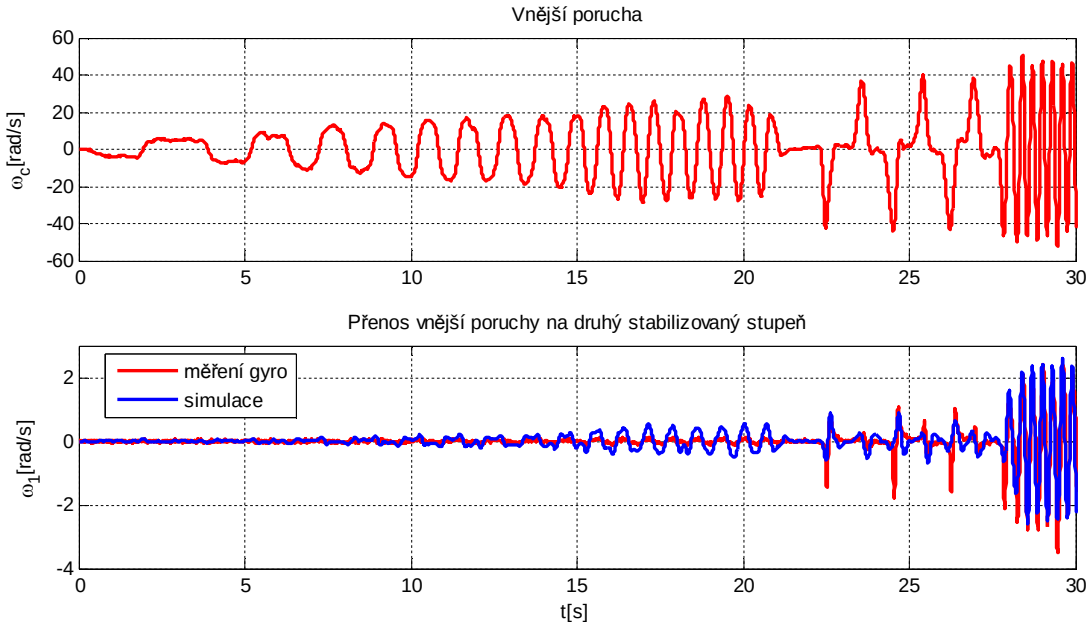
Vzhledem k tomu, že jsou v modelu škálovány akční zásahy, můžeme ponechat filtr $W_2 = 1$.

Navržený regulátor K_{vcm} je šestého řádu a je možné ho vyjádřit přenosovou funkcí v časové oblasti, nebo v diskrétní podobě po diskretizaci. Na obr. 4.9 je vidět, jak citlivostní funkce respektuje omezení zadaná filtrem W_1.

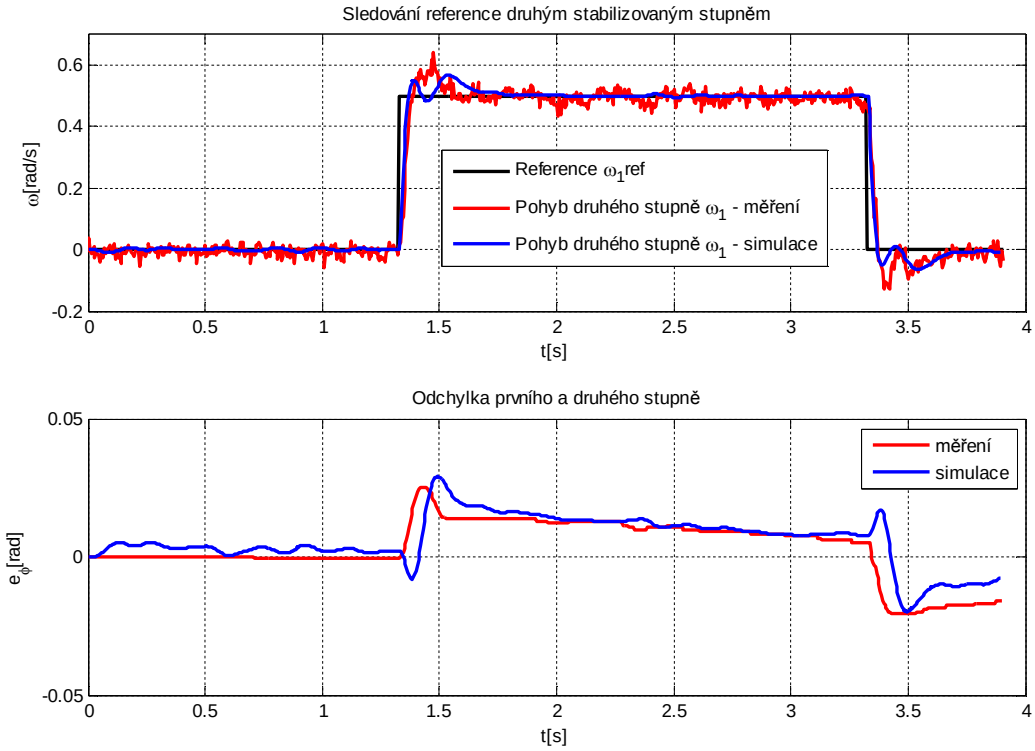


obr. 4.9: Výsledek návrhu regulátoru, citlivostní funkce systému respektuje omezení zadané váhovým filtrem pouze s malým přesahem

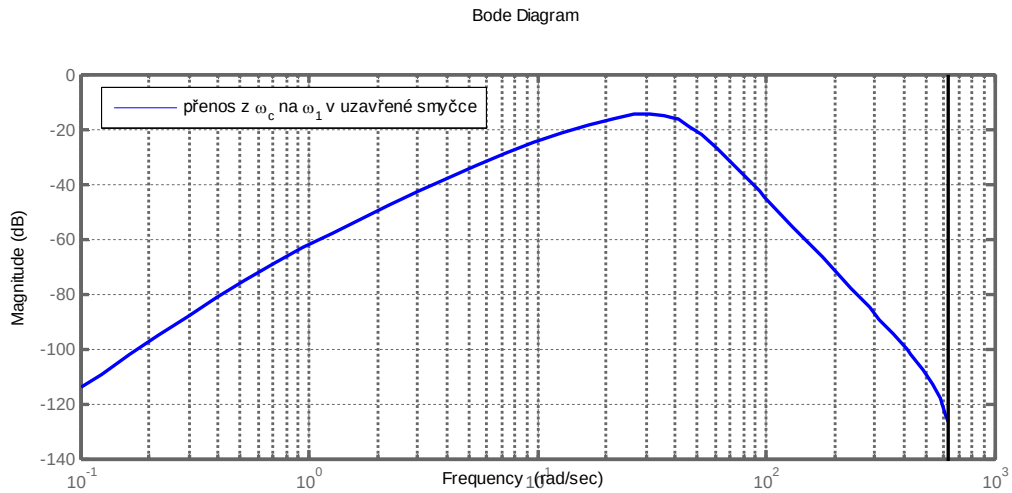
Z průběhů na obr. 4.10 a obr. 4.11 je vidět, že kvalita řízení se zásadně nezlepšila oproti řízení se dvěma PI regulátory. Z charakteristiky na obr. 4.12 je vidět, jak řízení potlačuje přenos poruch na druhý stupeň na různých frekvencích. Jedná pouze o model situace, který se může lišit o reality. Nejvíce se podle modelu přenášejí poruchy na frekvenci 12 rad/s (1,9Hz) s útlumem -14dB, což odpovídá potlačení vnější poruchy 5 krát.



obr. 4.10: Naměřené průběhy řízení regulátory navrženými metodou mixed sensitivity, potlačení vnější poruchy, porovnání měření se simulací



obr. 4.11: Naměřené průběhy řízení regulátory navrženými metodou mixed sensitivity, sledování reference, porovnání měření se simulací



obr. 4.12: Potlačení vnějších poruch v uzavřené smyčce na různých frekvencích, nízké frekvence potlačuje bez problémů řízení, vysoké frekvence se potlačují přirozeně díky dvoustupňové konstrukci, nejvíce se přenášení poruchy na frekvencích okolo 2Hz

4.4.3 Vlastnosti SISO řízení

Hlavní nevýhodou oddělených SISO regulátorů je, že nedokážou pracovat s křížovými vazbami, což se projevuje například v případě, kdy akční zásah na rotačním motoru má díky tření vliv na druhý stabilizovaný stupeň. Problém jde vidět na průbězích z obou řízení na obr. 4.8 a obr. 4.11, kdy se projevuje při sledování reference s překmitem. Akční zásah rotačního motoru u_2 a

následný pohyb prvního stupně za účelem snížení odchylky e_φ se přenese přes tření na stabilizovaný stupeň, který se regulátor K_{vcm} snaží potlačit jako vnější poruchu (viz regulační schéma obr. 4.6).

4.5 MIMO řízení

Hlavní motivací pro MIMO návrh byla možnost zohlednění křížových vazeb v modelu, což by vedlo k sledování reference bez překmitu a lepšímu potlačení vnějších poruch.

4.5.1 H_∞ MIMO návrh

Standardní mixsyn návrhové schéma podle obr. 4.4 jsme modifikovali pro potřeby našeho řízení, což je vystiženo ve schématu na obr. 4.13. Rozšířený systém P je vytvořen tak, aby minimalizoval filtrem W_1 odchylku ω_1 od reference a filtrem W_2 odchylku obou stupňů základny e_φ, akční zásahy jsou omezeny filtry W_3 a W_4.

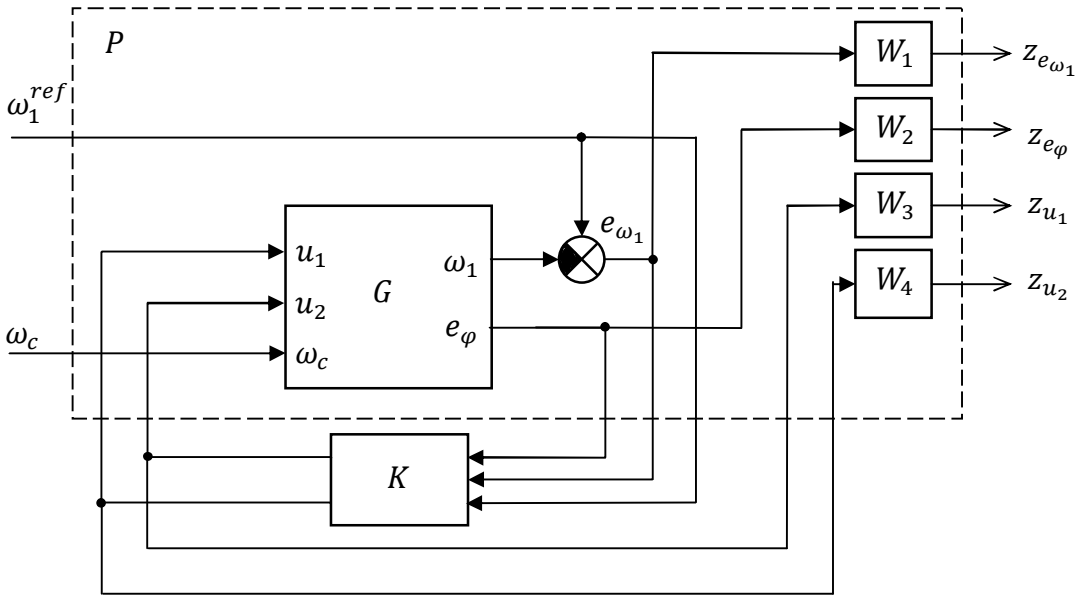
Filtr W_1 jsme volili podobně jako v SISO případě

$$W_1 = \frac{0{,}5s + 60}{s + 0{,}06} \tag{21}$$

Filtr W_2 jsme volili tak, aby odchylka e_φ nebyla větší, než umožňuje rozsah voice coil motoru, což je $\pm 0{,}1$ rad.

$$W_2 = \frac{10s + 500}{s + 0{,}5} \tag{22}$$

Vzhledem k tomu, že jsou v modelu škálovány akční zásahy, můžeme ponechat filtry $W_3 = W4 = 1$.



obr. 4.13: MIMO návrhové schéma, požadujeme minimalizaci odchylky od reference, vzájemné odchylky obou stupňů a akčních zásahů

Výsledkem návrhu je regulátor K se třemi vstupy, dvěma výstupy a deseti stavy. Je možné ho vyjádřit jako stavový systém ve spojitém nebo diskrétním stavu.

Bohužel se nepodařilo navrhnout MIMO regulátor tak, aby potlačoval poruchu a sledoval referenci lépe než předešlé regulátory. Důvod je nejspíš ten, že se v modelu nepodařilo vyjádřit ani řádově přesně přenos poruchy ω_c na druhý stupeň ω_1 a odchylku obou stupňů e_φ (viz kapitola 3.3.3).

Kapitola 5

Závěr

5.1 Laboratorní model

V první části práce se podařilo připravit laboratorní model dvojité inerciální stabilizace tak, aby na něm mohli členové týmu Svíce ověřovat a testovat návrhy dvoustupňového řízení v době, kdy ještě nebyl funkční prototyp vyvíjené základny Svíce 250.

Laboratorní model byl připojen k PC tak, aby jej bylo možné přímo řídit z prostředí Matlab Simulink. Za tímto účelem byla navržena ovládací karta, která slouží ke spojitému ovládání akčních členů modelu a přenosu signálů ze senzorů do PC. V prostředí Simulink byla vytvořena šablona zajištující obousměrnou komunikaci s modelem v reálném čase.

Jako problematický se ukázal přenos některých signálů díky elektromagnetickému rušení generovanému výkonovými H-můstky. I přes maximální snahu o odstínění je analogový signál z gyroskopu mírně degradovaný indukovanými špičkami a bohužel jej není možné přenášet v digitální podobě, která je vůči rušení odolnější. Nakonec se ale ukázala kvalita signálů pro testovací účely, pro které byl model vytvořen, jako dostatečná.

5.2 Základna Svíce 250

V průběhu práce bylo rozhodnuto provést návrh řízení v zjednodušené podobě již přímo na hotovém prototypu vyvíjené základny Svíce 250, s tím, že se využijí zkušeností s návrhem na laboratorním modelu.

Pro identifikaci matematického modelu se osvědčila metoda identifikace typu gray box, která na základě naměřené odezvy na vstupní signál hledá ve známém modelu pouze neznámé konstanty. Pomocí dvou experimentů se podařilo identifikovat celý matematický model. Jako nejproblematičtější se ukázalo modelování přenosu vnější poruchy přes mechanické tření na druhý stupeň modelu. Lineární model viskózního tření se ukázal pro naše účely jako velice nepřesný. Přestože matematický model dostatečně přesně vyjadřuje odezvu na akční zásahy, nepodařilo se díky problémům se třením ani řádově namodelovat odezvu na vnější poruchu. Bohužel se tato vlastnost ukázala později jako kritická při návrhu složitějších regulátorů.

Ukázalo se, že poměrně kvalitního řízení je možné dosáhnout dvojicí nezávislých PI regulátorů. Řízením se podařilo velmi dobře kompenzovat vnější poruchu v očekávaném frekvenčním rozsahu. Při sledování reference docházelo k většímu překmitu díky vlivu rotačního motoru prvního stupně na druhý stupeň, který regulátor druhého stupně potlačuje jako vnější poruchu.

Lepších výsledků jsme se pokusili dosáhnout návrhem regulátoru druhého stupně, který je pro celkovou kvalitu řízení kritický, metodou mixed sensitivity. Ukázalo se ale, že rozdíl v kvalitě řízení je minimální.

Nakonec jsme se pokusili o návrh MIMO regulátoru, který by respektoval křížové vazby modelu metodou H_∞, bohužel ale nepodařilo dosáhnout lepších výsledků než s dvojicí PI regulátorů. Důvodem je pravděpodobně nepřesné vyjádření tření matematickým modelem.

V rámci návrhu jsme se měli pravděpodobně více soustředit na přesnější nelineární modelování tření druhého stupně, které se ukázalo pro kvalitnější návrh řízení jako klíčové. Při návrhu regulátoru by bylo poté nutné implementovat některý druh kompenzace nelinearity případně zkusit přímo některou z nelineárních návrhových metod. Nelinearity je také možní pokrýt v rámci používaných návrhových metod založených na H_∞ zavedením neurčitostí v modelu.

5.3 Celkové zhodnocení

Diplomová práce byla z části praktická a z části teoretická. Podařilo úspěšně vyřešit veškeré praktické problémy spojené s laboratorním modelem a základnou Svíce 250. Podařilo se navrhnout ovládací desku pro laboratorní model a připojit ho PC, řídit základnu Svíce 250 nově vyvinutým externím modulem, zajistit přenos naměřených signálů v podobě CAN zpráv do prostředí Matlab pro další zpracování a mnoho dalšího.

V rámci teoretické části se podařilo si osvojit metodu identifikace typu gray box a využít ji k identifikaci matematického modelu pro řízení základny Svíce 250 v jedné ose elevace.

Podařilo se navrhnout kvalitní SISO regulátory pro řízení základny, které se pravděpodobně přibližují maximálním teoretickým možnostem tohoto typu řízení.

I přes to, že se podařilo si osvojit pokročilou návrhovou metodu H_∞, nepodařilo se nakonec s její pomocí navrhnout kvalitní MIMO regulátor, který by měl z principu dosahovat lepších výsledků než dvojice nezávislých SISO regulátorů.

Celkově považuji svou diplomovou práci za úspěšnou a věřím, že úkoly v rámci ní odvedené byly pro tým projektu Svíce přínosem.

Reference

1. Essa Praha. [Online] http://www.essapraha.cz/.

2. Projekt Mamok. [Online] http://dce.felk.cvut.cz/mamok/.

3. **Zdeněk Hurák, kol.** *Inerciálně stabilizovaná kamerová základna pro bezpilotní letoun.* Praha : Automa, 2008.

4. **Yi-De Chen, Chyun-Chau Fuh, and Pi-Cheng Tung.** *Application of Voice Coil Motors in Active Dynamic.* Taoyuan : IEEE Transitions on magnetics, 2005. 10.1109/TMAG.2004.843329.

5. **Tetsuo Semba, Toshiki Hirano, John Hongt, Long-Sheng Fan.** *Dual-Stage Servo Controller for HDD Using MEMS Microactuator.* San Jose : IEEE Transitions on magnetics, 1999. 0018-9464/99$10.0.

6. **Martin Řezáč, Zdeněk Hurák.** *Structured MIMO H-infinity Design for Dual-Stage Inertial Stabilization: Case Study for HIFOO.* Praha : IFAC World Congress, 2010. IFAC11_2242_MS.

7. **Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini.** *Feedback Control Of Dynamic Systems fifth edition.* New Jearsy : Prentice Hall, 2006. ISBN 0-13-149930-0.

8. **Růžička, Ladislav.** *Diplomová práce - Výukový model řízení polohy čtecí hlavy pevného disku* . Praha : ČVUT v Praze, 2008.

9. **Sigurd Skogestad, Ian Postlethwaite.** *Multivariable Feedback Control Analysis and design (2nd Edition).* New York : Wiley, 2005. ISBN-13 978-0-470-01168-3.

10. **Ananthanarayanan, K. S.** *Third-Order Theory and Bang-Bang Control of.* Santa Clara : IEEE, 1982. 0018-9464/82/0500-0888$00.75.

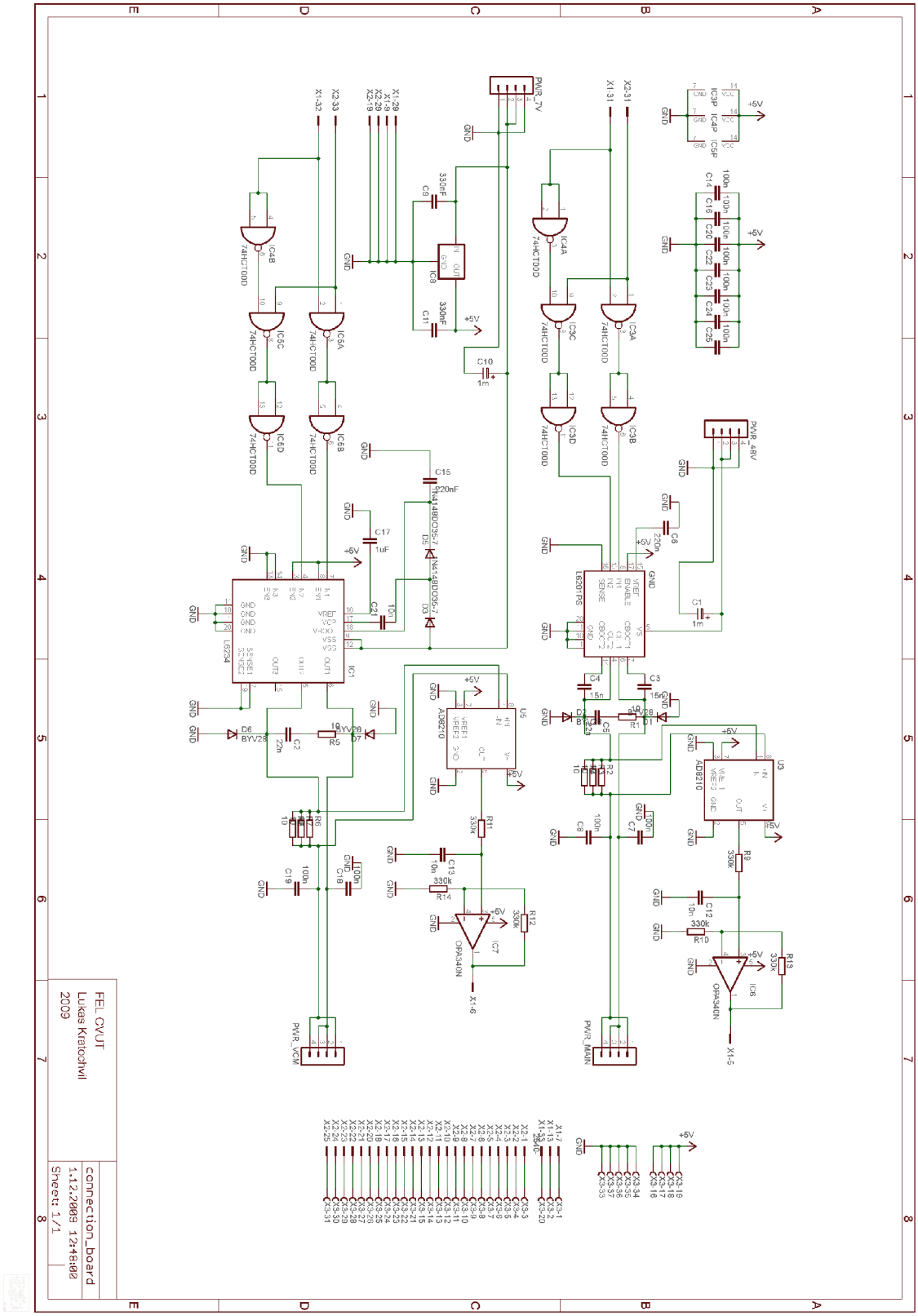
11. **Hurák, Zdeněk.** *Inertial line-of-sight stabilization, pointing and tracking for an airborne double gimbal Az-El system: control design aspects.* Praha : ČVUT Praha, 2008.

12. **Steven J. Schroeck, William C. Messner, Robert J. McNab.** *On Compensator Design for Linear Time-Invariant Dual-Input Single-Output Systems.* Pittsburgh : IEEE/ASME Transitions on mechatronics, 2001. 1083-4435(01)02719-3.

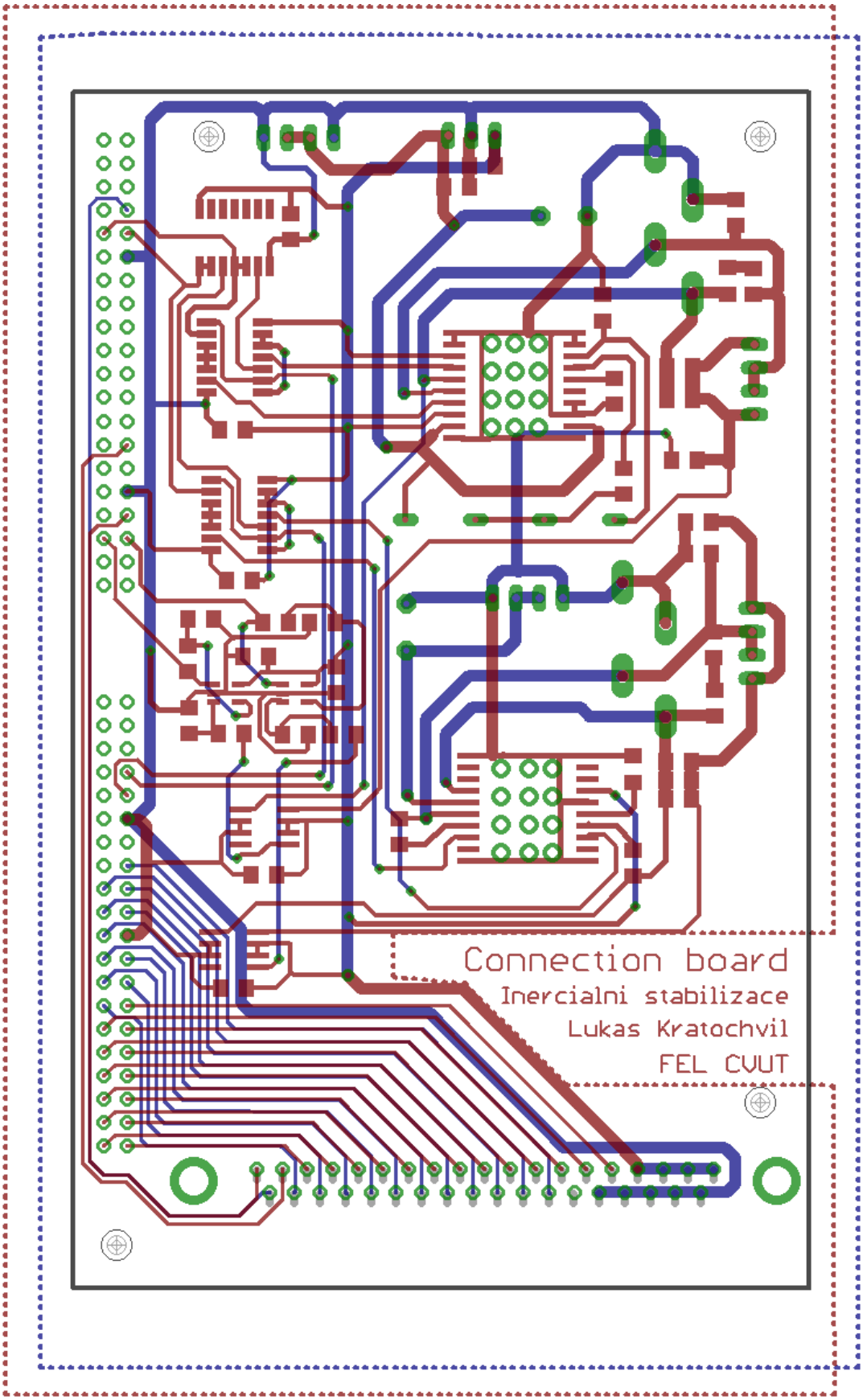
Příloha A: Obsah přiloženého DVD

- **DSmodel**
  - Board_design - návrh ovládací desky - schéma a rozložení
  - Model - šablona pro ovládání modelu
  - TestControlDesign - návrhové skripty zkušeních regulátorů
- **Svíce250**
  - Ident
    - GrayBoxIdent - skripty gray box identifikace
    - MesSignals - naměřené průběhy pro identifikaci
  - Control
    - Design - skripty návrhu regulátorů
    - Controllers - regulační schémata s uloženými regulátory
    - MesSignals - neměřené průběhy řízení
  - ParseCanMsgs - parser CAN zpráv
- **Foto** - fotografie laboratorního modelu a Svíce 250
- **kratoluk_DP.pdf** - text diplomové práce v pdf formátu
- **kratoluk_DP.docx** - text diplomové práce v docx formátu

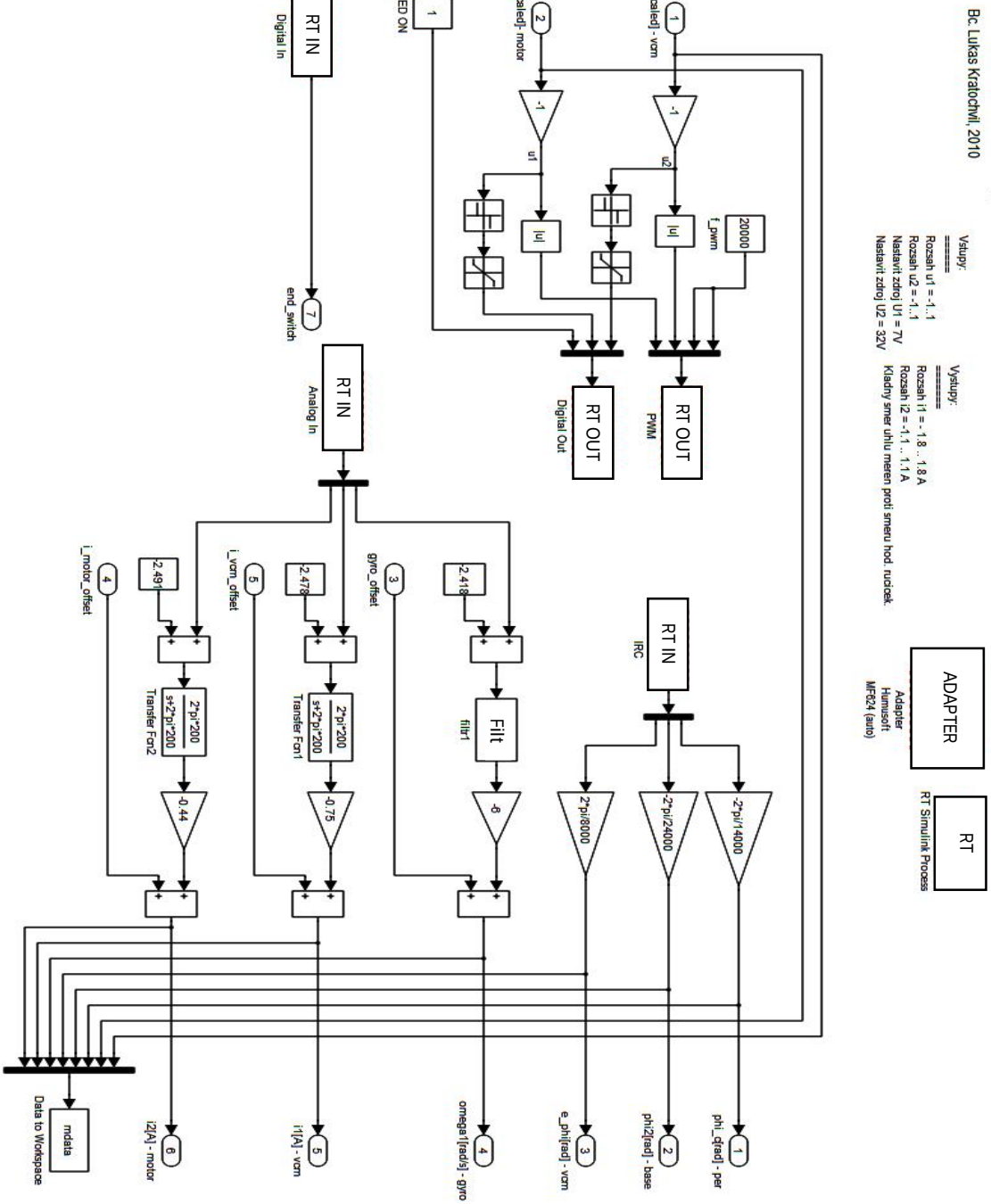
Příloha B: Elektrická schémata



Obrázek 1: Schéma zapojení ovládací desky



Obrázek 2: Rozložení desky plošného spoje ovládací karty



Obrázek 3: Šablona pro RT komunikaci s laboratorním modelem