

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a realizace laboratorní soustavy modelu kvadrokoptéry

Praha, 2019

NOVÁK Vítězslav

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novák** Jméno: **Vítězslav** Osobní číslo: **420477**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Přístrojová a řídicí technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a realizace laboratorní soustavy modelu kvadrokoptéry

Název diplomové práce anglicky:

Design and realization of laboratory quadcopter model setup

Pokyny pro vypracování:

- 1) Navrhněte konstrukční řešení laboratorní úlohy kvadrokoptéry na pojezdu se zavěšeným závažím.
- 2) Navrhněte instrumentaci laboratorní úlohy a implementujte řízení modelu v prostředí Matlab/Simulink.
- 3) Identifikujte parametry modelu.
- 4) Navrhněte řízení s využitím rozvětvených schémat PID regulátorů.

Seznam doporučené literatury:

BUŠEK, Jaroslav, et al. Control Design with Inverse Feedback Shaper for Quadcopter with Suspended Load. In: ASME 2018 Dynamic Systems and Control Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2018. p. V003T40A009-V003T40A009.
POTTER, James Jackson. Input-shaped manual control of helicopters with suspended loads. 2013. PhD Thesis. Georgia Institute of Technology.
POTTER, James J.; ADAMS, Christopher J.; SINGHOSE, William. A planar experimental remote-controlled helicopter with a suspended load. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2015, 20.5: 2496-2503.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jaroslav Bušek, U12110.3


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

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **12.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Jaroslav Bušek
podpis vedoucí(ho) práce


podpiš vedoucí(ho) ústavu/katedry

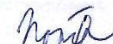

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

26.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Vítězslav Novák
Název DP:	Návrh a realizace laboratorní soustavy modelu kvadrokoptéry
Anglický název:	Design and realization of laboratory quadcopter model setup
Rok:	2019
Obor studia:	Přístrojová a řídicí technika
Ústav/Odbor:	Ústav přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí:	Ing. Jaroslav Bušek
Bibliografické údaje:	Počet stran 75 Počet obrázků 96 Počet tabulek 9
Klíčová slova:	Kvadrokoptéra; MATLAB & Simulink; Arduino Mega 2560; SPI; dron; Turnigy Park 300; AS5048A; AS5304; PID; ZOH; D-filter;
Keywords:	Quadcopter; MATLAB & Simulink; Arduino Mega 2560; SPI; dron; Turnigy Park 300; AS5048A; AS5304; PID; ZOH; D-filter;

Anotace:

Cílem je navrhnout, vyrobit a otestovat vhodnou konstrukci a senzorku laboratorní soustavy modelu kvadrokoptéry, který bude mít jeden stupeň volnosti v horizontálním směru. Na zařízení bude volně zavěšeno závaží a pohyb soustavy bude ovládán pomocí servomotorů.

K zajištění pohybu v jednom směru je použit vozík přichycený k dráze, senzory snímání úhlu ramene s vrtulemi, úhlu zavěšeného závaží i polohy vozíku jsou magnetické, sběr dat je pomocí elektronické platformy Arduino a řízení je uskutečněno pomocí MATLAB Simulink.

Laboratorní soustava je určena pro ústav přístrojové a řídicí techniky FS ČVUT v Praze, kde se plánuje jeho využití k dalším vysokoškolským pracím. Na tuto práci volně navazuje diplomová práce Venduly Hovorkové, která řeší kompenzaci kmitů závaží při pohybu kvadrokoptéry.

Abstract:

The aim is to design, manufacture and test a suitable construction and sensor system of the laboratory system of the quadcopter model, which will have one degree of freedom in the horizontal direction. The weight will be freely suspended on the device and the system will be controlled by servomotors.

The track-mounted trolley is used to move in one direction, angle sensors and trolley position sensor are magnetic, data acquisition is via the Arduino electronic platform, and control is performed using MATLAB Simulink.

The laboratory system is intended for the Department of Instrumentation and Control Engineering at Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague, where its use for further university work is planned. This work is loosely followed by the thesis by Vendula Hovorková, which deals with the compensation of the oscillations of the weights while moving the quadcopters.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval zcela samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 10.6.2019

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavu Buškovi za cenné rady, vstřícnost a věcné připomínky při tvorbě této práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za jejich podporu po celou dobu studia.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS17/176/OHK2/3T/12.

Obsah

1	Úvod	1
2	Laboratorní soustava modelu kvadrokoptéry	2
3	Návrh soustavy	2
3.3	Návrh komponent	2
3.3.1	Nosná konstrukce soustavy	3
3.3.2	Vozík a kolejnice	3
4	Vytvoření virtuálního modelu	4
4.1.1	Nosná deska	4
4.1.2	Lešení	5
4.1.3	Hřídele	5
4.1.4	Rameno s vrtulemi	6
4.1.5	Protizávaží	6
4.1.6	Celkový model	7
5	Elektronika	8
5.1	PID regulátory	8
5.2	Baterie	8
5.3	Servomotory a vrtule	9
5.4	Senzory	9
5.4.1	Magnetický senzor AS5048A pro měření úhlu	9
5.4.2	Magnetický senzor AS5304 pro měření polohy	10
6	Oživování	12
6.1	Zapojení řídicí desky	12
6.2	Oživování senzorů úhlu AS5048A	13
6.3	Oživování senzoru polohy AS5304	14
6.4	Oživování servomotorů Turnigy Park 300	15
7	Řízení soustavy	16
7.1	Regulace	16
7.1.1	Regulace úhlu	16
7.1.2	Diskretizace ZOH - step invariance	17
7.1.3	Regulace polohy	19
7.2	Finální program pro řízení modelu	19
8	Identifikace parametrů modelu	21
8.1	Měření frekvence a tlumení	22

8.1.1	Útlum závaží	23
8.1.2	Útlum ramene s motory	24
8.2	Měření úhlu	25
8.3	Měření polohy	27
9	Implementace řízení modelu v prostředí MATLAB Simulink	29
9.1	Nyquistovy-Shannonovy-Kotelnikovovy podmínky vzorkování	31
10	Závěr	33
A	Seznam literatury	34
B	Příloha 1: Výkresová dokumentace	35
C	Příloha 2: Měření parametrů modelu, regulace polohy a úhlu a testování komunikace... ..	49
	C.a Tlumení závaží	49
	C.b Tlumení ramene s motory	52
	C.c Regulace úhlu bez závaží	55
	C.d Regulace úhlu se závažím	60
	C.e Regulace polohy bez závaží	65
	C.f Regulace polohy se závažím	69
	C.g Test zadání požadovaného úhlu přes sériový monitor	73
	C.h Test zadání požadované polohy přes sériový monitor	74

Přehled použitých veličin a jednotek

m	[kg]	hmotnost
t	[s]	čas
s	[m]	vzdálenost
J	[kg · m ²]	moment setrvačnosti
M	[N · m]	klopný moment
M_x	[N · m]	dynamický moment ve směru x
M_y	[N · m]	dynamický moment ve směru y
M_z	[N · m]	dynamický moment ve směru z
M_{0x}	[N · m]	statický moment ve směru x
M_{0y}	[N · m]	statický moment ve směru y
M_{0z}	[N · m]	statický moment ve směru z
x	[m]	vzdálenost lineárního senzoru od zvoleného počátku
φ	[°]	úhel natočení ramene s motory
β	[°]	úhel natočení hřídele se zavěšeným závažím
U	[V]	napětí
I	[A]	proud
Q	[C], [Ah]	elektrický náboj
P_e	[W]	elektrický výkon
R	[Ω]	odpor
C_{dyn}	[W]	dynamická zátěž
C_0	[W]	statická zátěž
B	[T]	magnetická indukce
ξ	[-]	tlumení kmitání neboli útlum
α	[s ⁻¹]	vlastní útlum
ω_n	[s ⁻¹]	vlastní frekvence netlumených kmitů

ω_d	[s ⁻¹]	vlastní úhlová frekvence
K_P	[-]	regulační konstanta proporční složky
K_I	[-]	regulační konstanta integrační složky
K_D	[-]	regulační konstanta derivační složky
r_0	[-]	zesílení neboli proporcionalní konstanta P-regulátoru
T_I	[s]	integrační časová konstanta
T_D	[s]	derivační časová konstanta
T_F	[s]	časová konstanta filtru
W	[Hz]	šířka přenosového pásma
M	[Bd]	modulační rychlost
C	[bps]	přenosová rychlost
ω_m	[s ⁻¹]	mezní úhlová frekvence
f_s	[Hz]	vzorkovací frekvence
f_s	[Hz]	Nyquistova frekvence

Seznam obrázků

Obr. 1: Prvotní schéma laboratorní soustavy modelu kvadroptéry.	2
Obr. 2: Model použité konstrukce MayTec. [1]	3
Obr. 3: Příklad modelu vozíku a kolejnice HIWIN. [2]	3
Obr. 4: Schéma modelu vozíku a kolejnice HIWIN k Tab. 1. [2]	3
Obr. 5: Spodní pohled na desku se 2 vozíky na kolejnici a senzorem pro snímání lineárního pohybu.....	4
Obr. 6: Základní nosná kostra modelu kvadroptéry.....	5
Obr. 7: Horní pevně chycená a spodní volně kmitající hřídel.	5
Obr. 8: Horní hřídel s ramenem a servomotory.....	6
Obr. 9: Část určená pro připevnění závaží vyrovnávající klopný moment soustavy.	7
Obr. 10: Pohled na virtuální model s naznačeným závažím.....	7
Obr. 11: Schéma elektrického zapojení.	8
Obr. 12: Model Turnigy Park 300 s vrtulí v aplikaci Autodesk Inventor Professional 2018. [3]	9
Obr. 13: Blokový diagram AS5048A. [3].....	10
Obr. 14: Vertikální umístění magnetu. [3]	10
Obr. 15: Blokový diagram AS5304 a AS5306. [4]	11
Obr. 16: Senzor AS5304 s magnetickým kruhem (vlevo) a senzor AS5306 s magnetickou páskou (vpravo). [4].....	11
Obr. 17: Schéma Arduino Mega 2560 s označením pinů. [14].....	12
Obr. 18: Schéma regulace kvadroptéry.	16
Obr. 19: Schéma soustavy modelu kvadroptéry s parametry.	21
Obr. 20: Měření č.1 útlumu zavěšeného závaží.	23
Obr. 21: Měření č.5 útlumu ramene s motory.....	24
Obr. 22: Graf regulace úhlu ramene na požadovaný úhel 0° při základním výkonu motorů 40 jednotek.....	25
Obr. 23: Graf regulace úhlu ramene na požadovaný úhel 20° při základním výkonu motorů 50 jednotek.....	26
Obr. 24: Graf regulace úhlu ramene na požadovaný úhel 10° při základním výkonu motorů 40 jednotek.....	26
Obr. 25: Graf regulace polohy modelu na požadovanou hodnotu 0 j. při základním výkonu motorů 50 jednotek.....	27
Obr. 26: Graf regulace polohy modelu na požadovanou hodnotu 10 j. při základním výkonu motorů 40 jednotek.....	28
Obr. 27: Graf regulace polohy modelu na požadovanou hodnotu 10 j. při základním výkonu motorů 40 jednotek.....	28
Obr. 28: Příklad komunikace přes sériovou linky v prostředí MATLAB Simulink.	29
Obr. 29: Řízení modelu kvadroptéry v prostředí MATLAB Simulink.	29
Obr. 30: Výkres vodící trubky pro závaží.	36
Obr. 31: Výkres domku na ložisko.	37
Obr. 32: Výkres držáku lineárního senzoru.	38
Obr. 33: Výkres pilíře.	39
Obr. 34: Výkres středové obdélníkové desky.....	40
Obr. 35: Výkres upevňovací části ramene.	41

Obr. 36: Výkres desky pro senzory.	42
Obr. 37: Výkres hřídele pro závaží.	43
Obr. 38: Výkres hřídele pro rameno s motory.	44
Obr. 39: Výkres ramene pro motory.	45
Obr. 40: Výkres držáku pro protizávaží.	46
Obr. 41: Výkres desky pro hřídel se závažím.	47
Obr. 42: Výkres základní nosné části.	48
Obr. 43: Měření útlumu závaží č.1.	49
Obr. 44: Měření útlumu závaží č.2.	49
Obr. 45: Měření útlumu závaží č.3.	50
Obr. 46: Měření útlumu závaží č.4.	50
Obr. 47: Měření útlumu závaží č.5.	51
Obr. 48: Měření útlumu závaží č.6.	51
Obr. 49: Měření útlumu ramene s motory č.1.	52
Obr. 50: Měření útlumu ramene s motory č.2.	52
Obr. 51: Měření útlumu ramene s motory č.3.	53
Obr. 52: Měření útlumu ramene s motory č.4.	53
Obr. 53: Měření útlumu ramene s motory č.5.	54
Obr. 54: Měření útlumu ramene s motory č.6.	54
Obr. 55: Regulace úhlu na 0° při výkonu 50j.	55
Obr. 56: Regulace úhlu na 0° při výkonu 40j.	55
Obr. 57: Regulace úhlu na 5° při výkonu 50j.	56
Obr. 58: Regulace úhlu na 5° při výkonu 40j.	56
Obr. 59: Regulace úhlu na 10° při výkonu 50j.	57
Obr. 60: Regulace úhlu na 10° při výkonu 40j.	57
Obr. 61: Regulace úhlu na 15° při výkonu 50j.	58
Obr. 62: Regulace úhlu na 15° při výkonu 40j.	58
Obr. 63: Regulace úhlu na 20° při výkonu 50j.	59
Obr. 64: Regulace úhlu na 20° při výkonu 40j.	59
Obr. 65: Regulace úhlu na 0° při výkonu 50j.	60
Obr. 66: Regulace úhlu na 0° při výkonu 40j.	60
Obr. 67: Regulace úhlu na 5° při výkonu 50j.	61
Obr. 68: Regulace úhlu na 5° při výkonu 40j.	61
Obr. 69: Regulace úhlu na 10° při výkonu 50j.	62
Obr. 70: Regulace úhlu na 10° při výkonu 40j.	62
Obr. 71: Regulace úhlu na 15° při výkonu 50j.	63
Obr. 72: Regulace úhlu na 15° při výkonu 40j.	63
Obr. 73: Regulace úhlu na 20° při výkonu 50j.	64
Obr. 74: Regulace úhlu na 20° při výkonu 40j.	64
Obr. 75: Regulace polohy na 0j. při výkonu 50j.	65
Obr. 76: Regulace polohy na 0j. při výkonu 40j.	65
Obr. 77: Regulace polohy na 5j. při výkonu 50j.	66
Obr. 78: Regulace polohy na 5j. při výkonu 40j.	66
Obr. 79: Regulace polohy na 10j. při výkonu 50j.	67
Obr. 80: Regulace polohy na 10j. při výkonu 40j.	67

Obr. 81: Regulace polohy na 15j. při výkonu 50j.....	68
Obr. 82: Regulace polohy na 15j. při výkonu 40j.....	68
Obr. 83: Regulace polohy na 0j. při výkonu 50j.....	69
Obr. 84: Regulace polohy na 0j. při výkonu 40j.....	69
Obr. 85: Regulace polohy na 5j. při výkonu 50j.....	70
Obr. 86: Regulace polohy na 5j. při výkonu 40j.....	70
Obr. 87: Regulace polohy na 10j. při výkonu 50j.....	71
Obr. 88: Regulace polohy na 10j. při výkonu 40j.....	71
Obr. 89: Regulace polohy na 15j. při výkonu 50j.....	72
Obr. 90: Regulace polohy na 15j. při výkonu 40j.....	72
Obr. 91: Nastavení úhlu přes sériový monitor na 5° při výkonu 50j.....	73
Obr. 92: Nastavení úhlu přes sériový monitor na 10° při výkonu 50j.....	73
Obr. 93: Nastavení úhlu přes sériový monitor na 15° při výkonu 50j.....	74
Obr. 94: Nastavení polohy přes sériový monitor na 10j. při výkonu 50j.	74
Obr. 95: Nastavení polohy přes sériový monitor na 10j. při výkonu 50j.	75
Obr. 96: Nastavení polohy přes sériový monitor na 10j. při výkonu 40j.	75

Seznam tabulek

Tab. 1: Informace o parametrech vozíku EGH15CA s kolejnicí. [2]	3
Tab. 2: Informace o parametrech modelu.....	6
Tab. 3: Zapojení pinů na Arduinu Mega 2560.	12
Tab. 4: Hodnoty regulačních konstant úhlu.	19
Tab. 5: Hodnoty regulačních konstant polohy.	19
Tab. 6: Parametry modelu potřebné do matematického modelu.....	21
Tab. 7: Souhrn vypočítaných frekvencí a tlumení z hodnot měření útlumu závaží.	24
Tab. 8: Souhrn vypočítaných frekvencí a tlumení z hodnot měření útlumu ramene.....	25
Tab. 9: Spojový materiál.....	35

1 Úvod

Drony jsou v dnešních dnech velice populární a stále více cenově dostupné. Jsou využívány nejen soukromými osobami k rekreačním činnostem, ale i firmami k dopravě zboží, tvorbě reklam nebo například k točení filmů a seriálů. Trh stále tlačí tyto bezpilotní letouny k širšímu využití a ani strojní fakulta ČVUT nezůstává se svými projekty pozadu.

Tato diplomová práce popisuje návrh a realizaci laboratorní soustavy modelu kvadrokoptéry. Soustavu hodlá ústav v budoucnu využít k dalším projektům.

V první části diplomové práce je popsán konstrukční návrh včetně volby zakoupených komponent. K virtuálnímu modelování je použit program Autodesk Inventor Professional 2018. Výstupem z této části je výkresová dokumentace součástí, ze kterých by měl být smontován fyzický model.

Následuje část programování včetně návrhu řízení a ožívování kvadrokoptéry, kde je jako řídicí deska použita platforma Arduino Mega 2560.

Předposlední část popisuje měření a identifikaci parametrů soustavy. Jako hlavní veličiny jsou zkoumány poloha modelu vzhledem k původnímu místu a úhel natočení ramene s motory. Diplomová práce je zakončena implementací řízení v prostředí MATLAB Simulink.

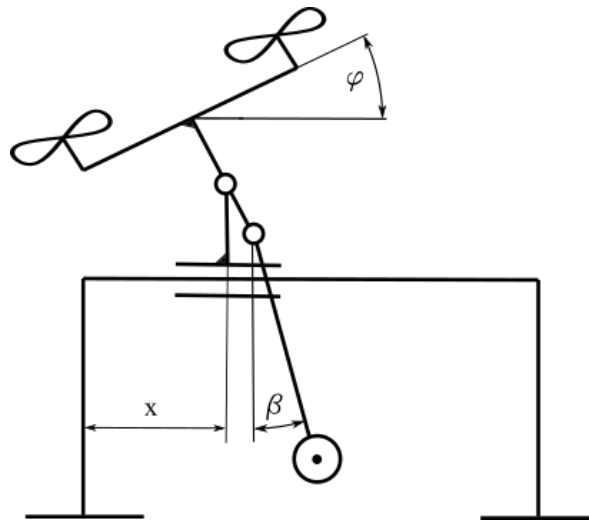
Cílem práce je vytvořit funkční laboratorní soustavu, která bude na ústavu k dispozici dalším studentům.

2 Laboratorní soustava modelu kvadrokoptéry

Model by měl sloužit k testování řízení pohybu kvadrokoptéry s volně zavěšeným závažím o zvolené maximální váze 2 kg. Důraz při vypracování je na pečlivou dokumentaci, jelikož je v budoucnu možná určitá modifikace pro jiné práce.

Pohyb soustavy by měl simulovat let dronu. Pro jednodušší analýzu vyrovňování výchylek závaží vůči ustálené poloze se v této fázi volí pouze lineární směr pohybu a to horizontální. Soustava bude mít jeden stupeň volnosti.

Sledována je poloha x , úhel naklonění závaží β a úhel naklonění ramene s motory φ .



Obr. 1: Prvotní schéma laboratorní soustavy modelu kvadrokoptéry.

3 Návrh soustavy

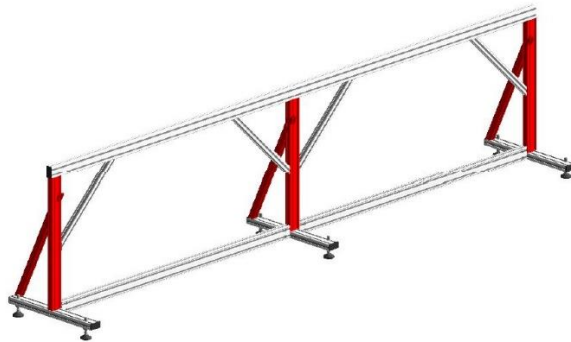
3.3 Návrh komponent

Základním návrhem je 3 m dlouhá kolejnice, na které se bude pohybovat vozík. Na vozíku je připevněn model kvadrokoptéry. Ten se skládá z hřídele s ramenem, na kterém jsou servomotory, a z hřídele se zavěšeným závažím. Model dále obsahuje prvek pro upevnění protizávaží a místa se senzory snímající natočení hřídelí a polohy modelu na kolejnici.

Pro řízení modelu je potřeba sledovat úhel natočení hřídele s motory a vzdálenost vozíku na kolejnici od zvoleného počátku.

3.3.1 Nosná konstrukce soustavy

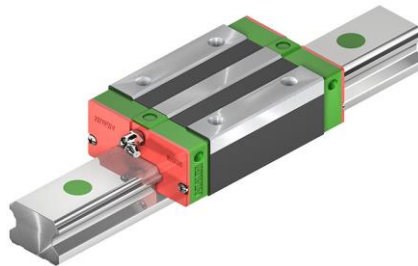
Jako nosná konstrukce pro soustavu byl smontován systém hliníkových profilů MayTec s dostačující délkou 3 m. Na horním profilu bude připevněna kolejnice a z boku nalepena magnetická páska pro snímání polohy modelu.



Obr. 2: Model použité konstrukce MayTec. [1]

3.3.2 Vozík a kolejnice

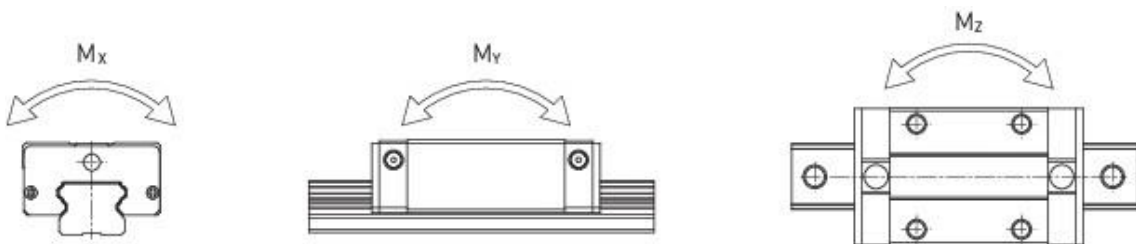
K zajištění lineární trajektorie byla zakoupena kolejnice a vozík značky HIWIN. Dle rozměrů se zvolil typ vozíku EGH15CA a tomu odpovídající kolejnice EGR15.



Obr. 3: Příklad modelu vozíku a kolejnice HIWIN. [2]

Dynamická zátěž na 50 000 m	Statická zátěž	Dynamický moment			Statický moment		
		M_x [N·m]	M_y [N·m]	M_z [N·m]	M_{0x} [N·m]	M_{0y} [N·m]	M_{0z} [N·m]
C_{dyn} [N]	C_0 [N]						
7830	16190	62	48	48	130	100	100

Tab. 1: Informace o parametrech vozíku EGH15CA s kolejnicí. [2]



Obr. 4: Schéma modelu vozíku a kolejnice HIWIN k Tab. 1. [2]

4 Vytvoření virtuálního modelu

Prvním krokem k realizaci soustavy bylo vytvoření softwarového modelu a následně výkresů. K tomu byl použit program Autodesk Inventor Professional 2018.

Kvůli senzoru na lineární pohyb je stěžejní, aby byla konstrukce modelu přesně smontovatelná a senzor byl v konstantní vzdálenosti od magnetické pásky. V základní desce je proto vytvořena drážka, ke které je vozík lícovaný. Deska je dostatečně dlouhá, aby se u modelu mohla použít varianta s jedním vozíkem nebo se dvěma vozíky najednou.

4.1.1 Nosná deska

Kvůli senzoru na lineární pohyb je stěžejní, aby byla konstrukce modelu přesně smontovatelná a senzor byl v konstantní vzdálenosti od magnetické pásky. V základní desce je proto vytvořena drážka, ke které je vozík lícovaný. Deska je dostatečně dlouhá, aby se u modelu mohla použít varianta s jedním vozíkem nebo se dvěma vozíky najednou.



Obr. 5: Spodní pohled na desku se 2 vozíky na kolejnici a senzorem pro snímání lineárního pohybu.

4.1.2 Lešení

Na desce jsou čtyři pilíře, které drží horní obdélníkové patro s dírou uprostřed. Prostor vybrání je rozměrově dostačující pro volné kmitání části s hřídelí se závažím.



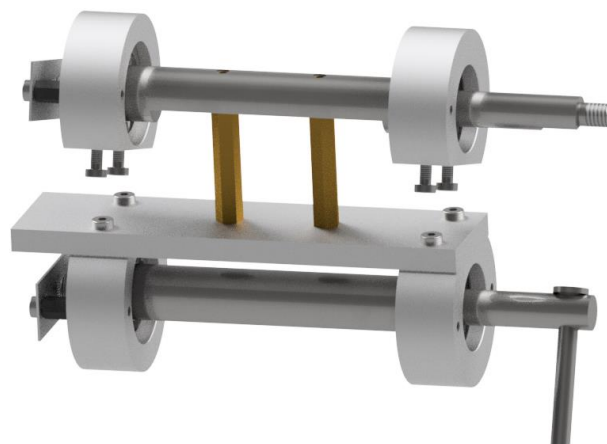
Obr. 6: Základní nosná kostra modelu kvadrokoptéry.

4.1.3 Hřídele

Shora jsou přišroubovány dva domky na ložiska, které svírají hřídel. Z této hřídele je distančními sloupky přichycena konstrukce s druhou hřídelí, na jejím konci je zavěšeno závaží.

Ložiska byla zvolena kuličková jednořadá. Zřetel na životnost se brát nemusel, jelikož se jedná o laboratorní soustavu a je možné brzké předělání modelu.

Obě hřídele mají z jedné strany vsazený magnet a z domku ložiska od magnetu s rozestupem 0,2 mm vzdálený senzor. Vzdálenost senzoru je zvolena dle informací v datasheetu. Kvůli díře na magnet a malé tloušťce stěny musel být u obou hřídelí na straně s magnety použit jemný závit.



Obr. 7: Horní pevně chycená a spodní volně kmitající hřídel.

4.1.4 Rameno s vrtulemi

K horní hřídeli je pevně aretováno rameno, které má na koncích servomotory zajišťující pohyb. Rameno je duté, aby jím mohli vést kabely od motorů k řídicí desce uprostřed konstrukce.



Obr. 8: Horní hřídel s ramenem a servomotory.

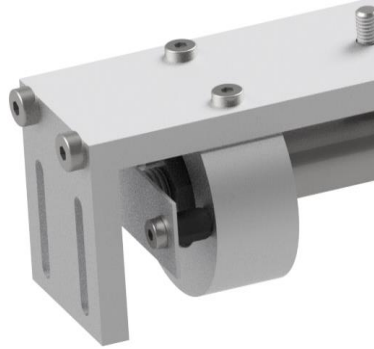
4.1.5 Protizávaží

V části vedle spodní hřídele je deska pro připevnění protizávaží, které by mělo vyrovnat klopný moment, jenž může mít nepříznivý vliv na lineární pohyb. V Tabulce 2 jsou zapsány hodnoty modelu získané pomocí fyzikálních výpočtů aplikace Autodesk Inventor Professional 2018.

Provedení	Hmotnost modelu	Moment setrvačnosti	Klopný moment	Hmotnost protizávaží
	m [kg]	J [kg·m ²]	M [N·m]	m [kg]
1 vozík	1,37	5,88	0,09	0,00
2 vozíky	1,47	6,26	0,09	0,00
2 v. + 2 kg závaží	3,47	20,26	1,54	0,00
2 v. + 2 kg závaží + protizávaží	5,38	46,65	0,00	2,01

Tab. 2: Informace o parametrech modelu.

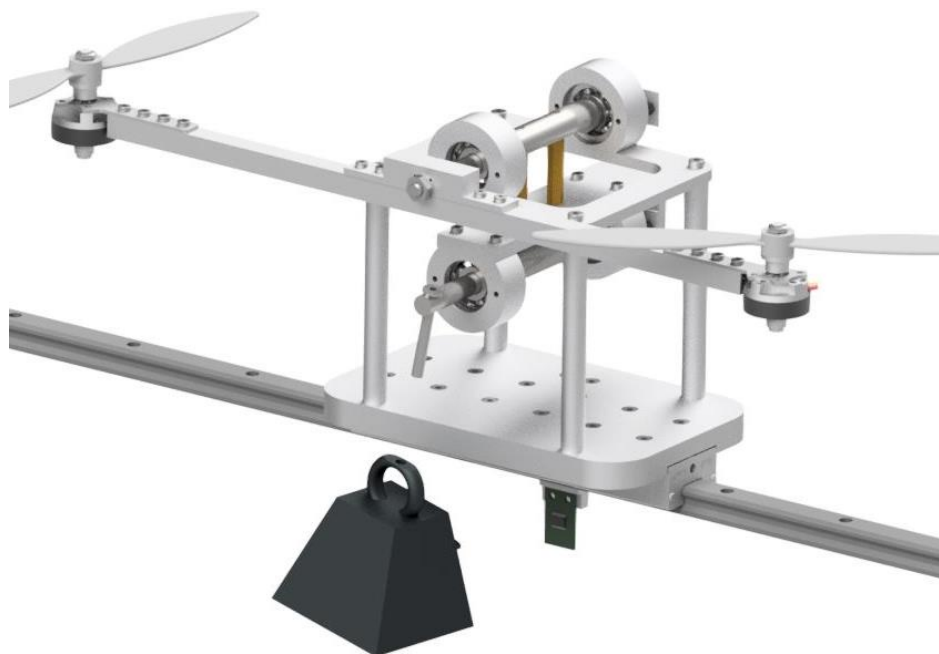
Celá sestava bez nosné konstrukce má klopný moment $0,09 \text{ N}\cdot\text{m}$ a se závažím $1,54 \text{ N}\cdot\text{m}$. Protizávaží by se například u 2 kg závaží mohlo volit přibližně $2,01 \text{ kg}$. Ovšem porovnáním momentů z Tab. 1 je zřejmé, že nedosahujeme vysokých hodnot klopného momentu a není tak při těchto parametrech nutné řešit vyvážení.



Obr. 9: Část určená pro připevnění závaží vyrovnávající klopný moment soustavy.

4.1.6 Celkový model

U celkového modelu bylo potřeba zvážit i kolizi vrtulí s kolejnicí. Náklon ramene s motory a tedy i dolní hřídele je omezen rozpětím pilířů. Při maximální výchylce se domek dolní hřídele zastaví o pilíř. Maximální úhel s vodorovnou osou je 30° .



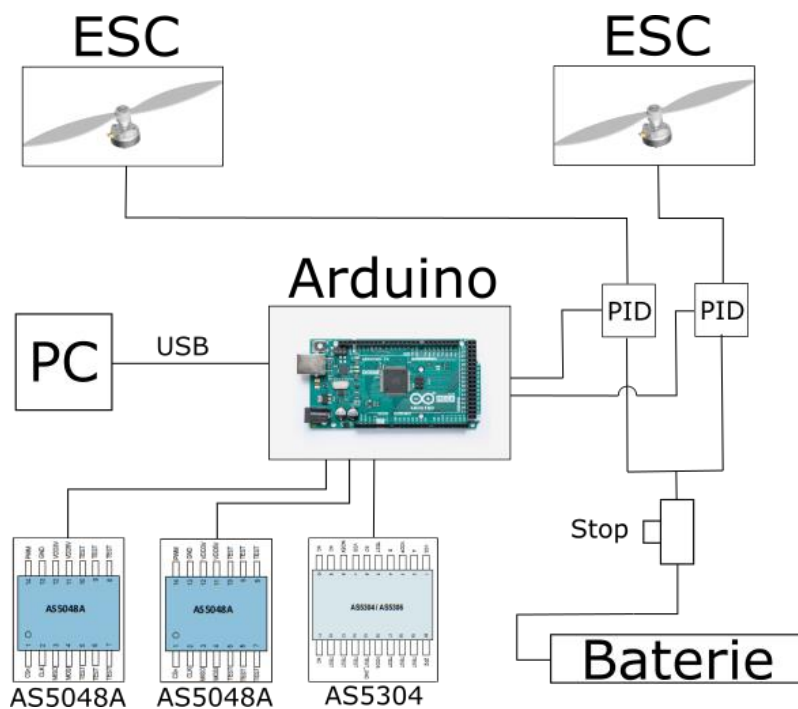
Obr. 10: Pohled na virtuální model s naznačeným závažím.

Při tvorbě výkresů se jako materiál pro hřídele zvolila nerezová ocel a pro zbytek součástí se jako materiál zvolil hliník.

5 Elektronika

Motory jsou napájeny pomocí baterie využívané pro RC modely. Na každý motor je připojen PID regulátor, který jej spojuje s Arduinem. Řídící deska je propojena se všemi 3 senzory.

Většina kabelů neměla dostatečnou délku, a proto bylo potřeba nastavit jejich dosah pomocí nově spájených kabelů a konektorů. Některé kabely od senzorů byly pájením spojeny do jednoho, jelikož na řídicí desce není dostatek pinů pro všechny kabely zvlášť. Důležité je i nezanedbat možnost zkratu jak řídicí desky, tak všech ostatních elektrických obvodů. Obnažená místa se zaizolovala pomocí bužírky a horkovzdušné pistole. Řídící deska se připevnila k nevodivé podložce.



Obr. 11: Schéma elektrického zapojení.

5.1 PID regulátory

Pro každý motor je použit jeden PID regulátor značky Multistar se specifikacemi LBEC 2A, 480 Hz, 10 A Turnigy, 2-3LIXX.

5.2 Baterie

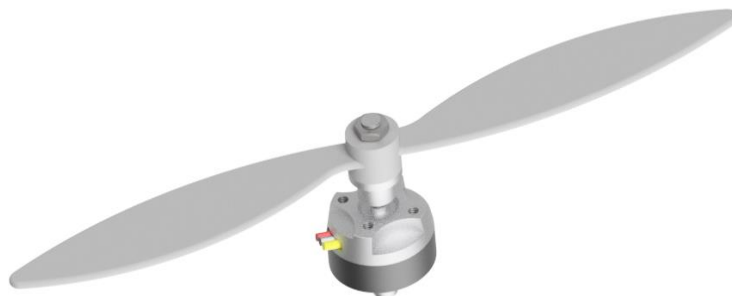
Baterii je možné připojit přes napájený konektor, aby byla možná rychlá výměna při vybití baterie. Na napájecím kabelu se kvůli ochraně vyskytuje vypínač. Při testování byly použity Li-Po baterie:

- 1) Gens ACQ, Rechargeable; 5000 mAh; 3S1P; 11,1 V 45C a
- 2) ZIPPY Compact; 25C Series; 2200 mAh; 3 Cell 11,1 V.

5.3 Servomotory a vrtule

Na modelu jsou použity dva střídavé servomotory Turnigy Park 300 1600kv, což jsou bezkartáčové motory s třífázovým vinutím statoru s 1600 otáčkami na volt. Na motorech jsou použity vrtule 8x3,8.

Výkon je dle stránek výrobce 85 W. Takže výkon obou motorů by měl být 150 W. U dvoučlánku je napětí 7,4 V a maximální proud je 9 A.



Obr. 12: Model Turnigy Park 300 s vrtulí v aplikaci Autodesk Inventor Professional 2018. [3]

5.4 Senzory

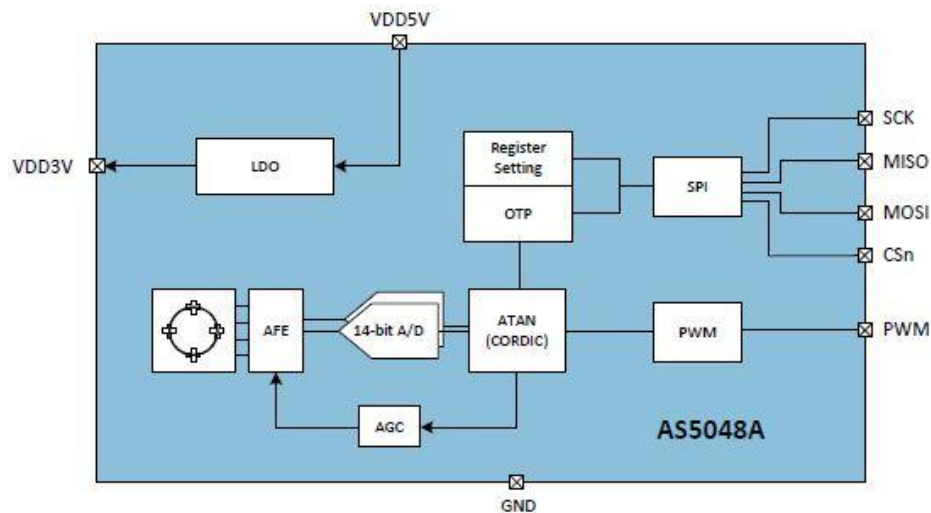
Natočení hřídele se zavěšeným závažím a hřídele s ramenem se servomotory zaznamenávají magnetické senzory AS5048A, které jsou umístěny proti magnetům pevně vsazených v hřídelích.

Polohu vozíku sleduje lineární senzor AS5304, jehož pozice je proti multipólové magnetické pásce nalepené podél nosné konstrukce s kolejnici.

5.4.1 Magnetický senzor AS5048A pro měření úhlu

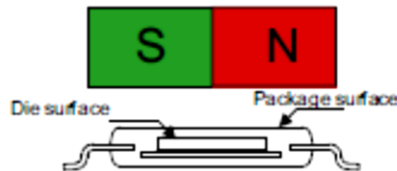
Jedná se o snadno použitelný snímač úhlu natočení o 360° se 14 bitovým rozlišením, což odpovídá 2^{14} dílkům, tedy 16 384 pozicím na 1 otáčku senzoru. IC měří absolutní polohu rotace magnetu a skládá se z Hallových senzorů, A/D převodníku a obvodu pro zpracování digitálního signálu. Informace o absolutní poloze magnetu je přístupná přes PWM výstup a může být přečtena přes standardní SPI komunikační rozhraní, které je dostatečně rychlé pro přenos dat. 16 bitové SPI dokáže číst v desítkách nanosekund. [3]

Bezkontaktní snímač toleruje nesouosost, odchylky vyvolané vzduchovými mezerami, teplotní odchylky a také odchylky vnějším magnetickým polem. Senzor se dokáže sám kalibrovat vůči magnetickému poli. Vnitřní regulátor napětí umožňuje pracovat na 5 i 3,3 V. [3]



Obr. 13: Blokový diagram AS5048A. [3]

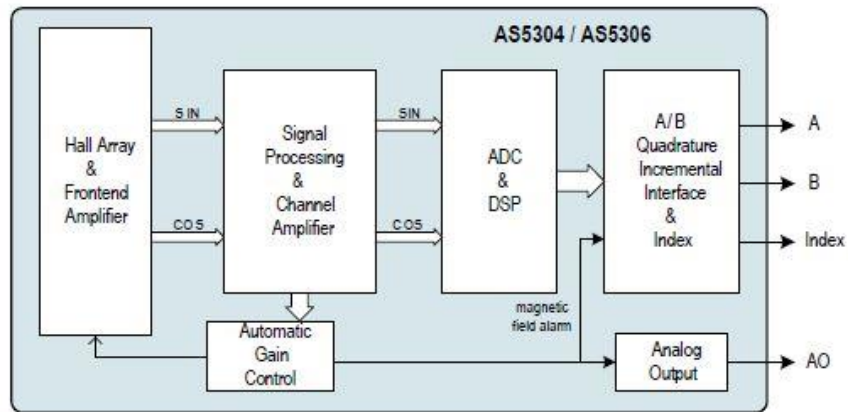
Nulová pozice magnetu může být naprogramována a nemusíme tak řešit mechanické natočení magnetu při počátečním umístění. Doporučený magnet pro senzor má mít průměr 6 až 8 mm a výšku minimálně 2,5 mm. Síla magnetického pole kolmá na povrch musí být v rozsahu $\pm 30\text{mT} \dots \pm 70\text{mT}$ (pík). Magnet může být umístěn pod nebo nad zařízením a jeho střed by měl být v ose středu senzoru. Typická vzdálenost mezi magnetem a povrchem čipu je 0,5 až 2,5 mm. [3]



Obr. 14: Vertikální umístění magnetu. [3]

5.4.2 Magnetický senzor AS5304 pro měření polohy

Čip poskytuje kvadraturní inkrementální výstup s 40 pulsy na pól pár s rychlostí až 20 m/s. Jeden indexový puls je vytvořen každý pól pár na indexovém výstupu. Pohyb multipólového magnetického pole nad Hallovými senzory snímače AS5304 generuje sinusový signál, který je po 90° fázi posunut v kosinový signál. Směr posunutí je zakódován do dvou signálů (A a B) posunutých právě o 90° . Podle toho, který signál vede druhý, poznáme, na kterou stranu se snímač pohybuje. [4]



Obr. 15: Blokový diagram AS5304 a AS5306. [4]

Standardní délka pólpáru pro AS53044 je 4 mm. Interpolační obvod rozdělí délku pólpáru do 160 pozic a následně dekóduje do 40 kvadrurních pulsů. Rozlišení je tedy 25 μm . [4]

Při uvažované délce pásky 3 m budeme mít 750 pólpárů a rozlišení 30 000 pulsů, což odpovídá 120 000 pozicím.

Snímač může být použit pro měření lineárního pohybu za použití multipólové magnetické pásky nebo pro měření kruhového pohybu za použití kruhové pásky. Dále obsahuje alarm pro chybějící magnet nebo konec pásky. Maximální vzdálenost pásky od senzoru je 0,8 mm. Síla magnetického pole by měla být v rozsahu 5 až 60 mT na povrchu čipu. Senzor umožňuje pracovat na 4,5 až 5,5 V. [4]



Obr. 16: Senzor AS5304 s magnetickým kruhem (vlevo) a senzor AS5306 s magnetickou páskou (vpravo). [4]

6 Oživování

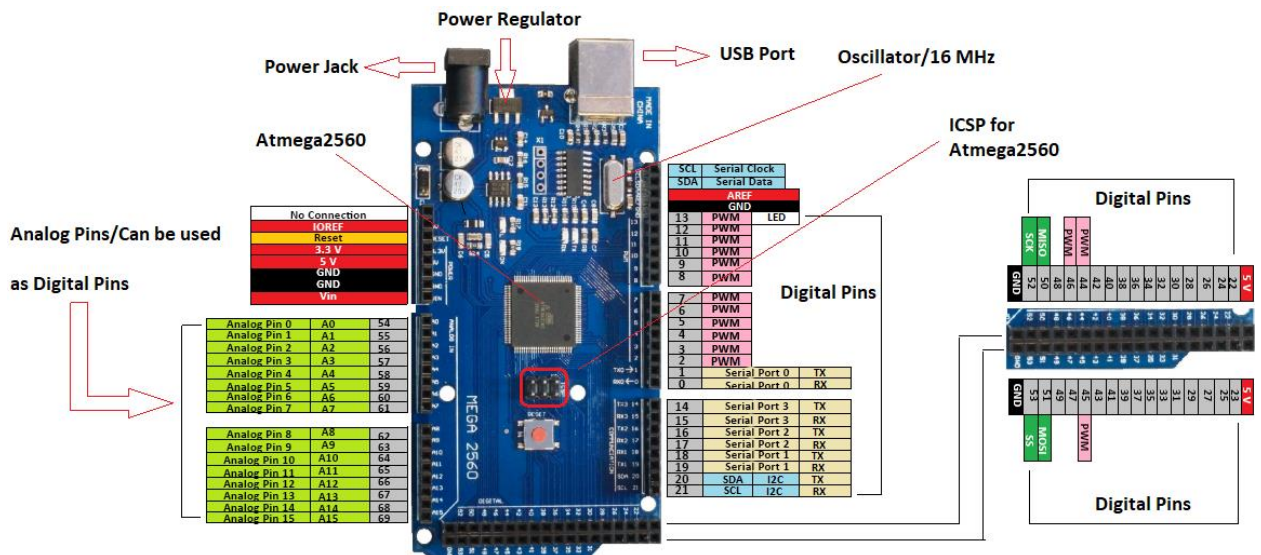
6.1 Zapojení řídicí desky

Senzory jsou propojené s elektronickou platformou Arduino Mega 2560, jež pomocí USB komunikuje s PC. Kód byl sestaven v SW Arduino IDE 1.8.7.

Senzory pro měření úhlu AS5048A byly dodány na deskách s SPI rozhraním. Dle datasheetu byly nalezeny SPI piny na Arduino. Tyto piny se se senzory zapojily dle Tab. 3.

	Arduino Mega 2560									
A/D pin	D	D	D	D	D	D	D	A	D	D
Upřesnění	MISO	MOSI	SCK	SS	SS	B	A	I		
AS5048A (úhel motorů)	50	51	52	53						
AS5048A (úhel závaží)	50	51	52		47					
AS5304 (vzdálenost)						3	2	32		
PID regulátor (motor 1)									8	
PID regulátor (motor 2)										10

Tab. 3: Zapojení pinů na Arduinou Mega 2560.



Obr. 17: Schéma Arduino Mega 2560 s označením pinů. [14]

6.2 Oživování senzorů úhlu AS5048A

Pro jednodušší zprovoznění senzorů úhlu se do programu v Arduino IDE naimportuje knihovna AS5048A-Arduino-master, která obsahuje soubory AS5048A.h a AS5048A.cpp.

V kódu se deklaruje pin 53 jako vstup ze senzoru. Dále se ve „void setup()“ senzor inicializuje pomocí příkazu „angleSensor.init()“ a ve „void loop()“ se pomocí „angleSensor.getRawRotation()“ čte hodnota úhlu, od které je odečítán úhel určující nulovou horizontální polohu. AS5048A má rozlišení 14 bitů, což znamená 2^{14} a tedy 16 384 rozlišitelných pozic na celou otáčku senzoru. Vynásobením 360 a vydělením počtem pozic se získá výsledný úhel ve stupních, který je zapisován do proměnné „val“ typu word.

Tímto způsobem jsou oživeny oba dva použité senzory pro měření úhlu natočení hřídelí.

```
#include <AS5048A.h>
#define NULOVY_UHEL 5850
AS5048A angleSensor(53);
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    angleSensor.init();
}
void loop() {
    word val = (angleSensor.getRawRotation() - (float)NULOVY_UHEL) * 360.0 / 16384.0;
    Serial.println(val);
    delay(1000);
}
```

6.3 Oživování senzoru polohy AS5304

V programu pro AS5304 se deklarují výstupní proměnné A, B a I ze senzoru. Dále se ve „void setup()“ senzor inicializuje pomocí příkazů „pinMode()“ a vytvoří se 2 programová přerušování těchto pinů příkazy „attachInterrupt()“. Poté napíšeme algoritmy „void sigA()“, „void sigB()“ a „void getDistance()“.

Pokud na pinu A čteme 1 a současně na pinu B čteme 0 nebo na pinu A čteme 0 a současně na pinu B čteme 1, tak se nám zvýší inkrement A o 1. Pokud tomu tak není, tak se naopak A o 1 sníží.

Pokud na pinu A čteme 0 a současně na pinu B čteme 0 nebo na pinu A čteme 1 a současně na pinu B čteme 1, tak se nám zvýší inkrement B o 1. Pokud tomu tak není, tak se naopak B o 1 sníží.

Následně sečteme hodnoty A a B.

Nakonec ve „void loop()“ čteme díky „getDistance()“ hodnoty výsledné vzdálenosti.

```
int32_t A, B, I;
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(PIN_A, INPUT);
    pinMode(PIN_B, INPUT);
    pinMode(PIN_I, INPUT);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_A), sigA, CHANGE);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_B), sigB, CHANGE);
}
void loop() {
    getDistance();
    Serial.println(distance);
    delay(1000);
}
void sigA() {
    if (digitalRead(PIN_A) == 1 & digitalRead(PIN_B) == 0 ||
        digitalRead(PIN_A) == 0 & digitalRead(PIN_B) == 1) {
        A++;
    }
    else {
        A--;
    }
}
void sigB() {
    if (digitalRead(PIN_A) == 0 & digitalRead(PIN_B) == 0 ||
        digitalRead(PIN_A) == 1 & digitalRead(PIN_B) == 1) {
        B++;
    }
    else {
        B--;
    }
}
void getDistance() {
    distance = (A + B);
}
```

6.4 Oživování servomotorů Turnigy Park 300

Před prvním zapojením je vhodné zkontrolovat směr točení motorů a náklon vrtulí. Vrtule by se měly točit proti sobě a jejich náklon by měl odpovídat směru otáčení tak, aby vztlková síla hnala motory vzhůru.

Chod motorů se nejprve testuje pomocí potenciometru. U motorů je vhodné naimportovat knihovnu Servo. V kódu se nejprve opět deklarují objekty a proměnné. Pro zaručený minimální výkon motorů se volí offset.

Dále se inicializují motory pomocí „ESC.attach()“, kde se nastaví připojený pin a minimální a maximální šířka pulsu v μs . Nastaví se hodnota offsetu a počáteční hodnota motorů.

Ve smyčce se čte hodnota potenciometru díky „analogRead()“, která je postupně namapována do rozmezí -30 až 30 v příkazu „cmd“. Nakonec se již jen transformovaná hodnota z potenciometru posílá do motorů s opačným znaménkem a se společnou hodnotou offsetu.

Program je zde pro lepší přehlednost zapsáno ve dvou sloupcích. V praxi je kód zapsán pod sebou.

```
#include <Servo.h>
Servo ESC;
Servo ESC2;
int potValue;
int offset;
int cmd;
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    ESC.attach(8, 1000, 2000);
    ESC2.attach(10, 1000, 2000);
    offset=90;
    ESC.write(0);
    ESC2.write(0);
    delay(2000);
}
void loop() {
    potValue = analogRead(A0);
    potValue = map(potValue, 0, 1023, 0,
180);
    cmd = map(potValue, 0, 174, -30, 30);
    ESC.write(offset+cmd);
    ESC2.write(offset-cmd);
    Serial.print(offset+cmd);
    Serial.print(" - ");
    Serial.println(offset-cmd);
    delay(10);
}
```

7 Řízení soustavy

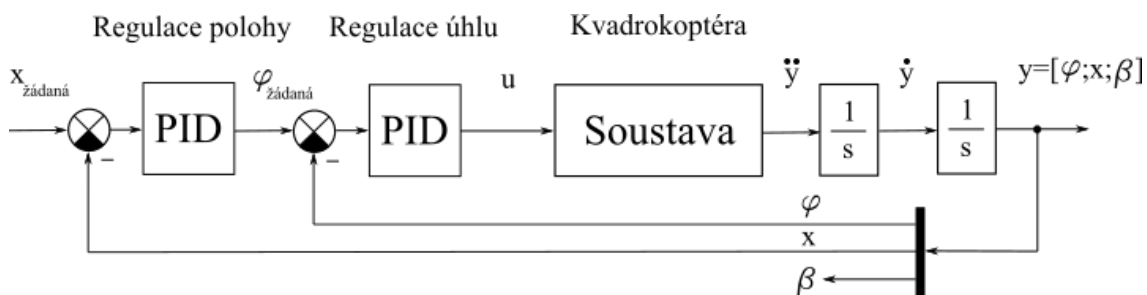
Řízení probíhá automaticky dle nahraného programu s předpokladem, že se model snaží držet a případně navrátit do původního místa, tedy inicializační polohy. Řízení úhlu natočení ramene s motory vychází z regulace polohy modelu díky regulaci úhlu ramene s motory.

Návrh řízení je dle zadání pomocí rozvětvených schémat PID regulátorů.

7.1 Regulace

Řídící a tedy i vstupní veličinou je požadovaná poloha modelu, která je primárně nula pro setrvání modelu v počátečním místě. PI regulací rozdílu požadované polohy a aktuální polohy se získá hodnota požadovaného úhlu naklonění ramene. PID regulací úhlu se určí potřebný výkon motorů.

Výstupem celé regulační smyčky je tedy výkon motorů. Tento výkon se u jednoho motoru přičte a u druhého motoru odečte k základnímu výkonu motorů, který reprezentuje výkon ustálené letové výšky.



Obr. 18: Schéma regulace kvadrokoptéry.

7.1.1 Regulace úhlu

Pro získání regulačních konstant úhlu se nejprve reguluje samotný úhel bez vlivu polohy modelu. Vstupem je požadovaný úhel společně se zápornou zpětnou vazbou aktuálního úhlu. Výstupem je hodnota výkonu motorů.

Hodnoty K_P , K_I a K_D PID regulace úhlu se určí experimentálně nebo například metodou „pokus-omyl“ [8].

Jako stěžejní pro stabilizaci je derivační složka regulace, avšak kvůli nevhodnému chování modelu, čímž jsou myšleny rychlé změny regulační odchylky či vliv vysokofrekvenčního šumu obsaženého v regulační odchylce, je příhodné použít u této složky filtr. Derivační složka jinak způsobuje značné a nežádoucí změny v akčních zásazích. [9]

Aplikován je filtr prvního řádu $\frac{1}{T_F \cdot s + 1}$, jenž je dostačující pro zmírnění kmitavého signálu a zabraňuje tak tomu, aby derivace v určitých momentech nefiltrovaného signálu aproximovala k nekonečnu.

V rovnici ideálního PID regulátoru jsou zesílení r_0 a jeho podíl a součin s časovými konstantami integrační a derivační složky nahrazeny konstantami K_P , K_I a K_D , viz. rovnice (1). [9]

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + \frac{r_0}{T_I} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + u(0) + r_0 \cdot T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + u(0) + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Následnou derivací v rovnici (2) a Laplaceovou transformací v rovnici (3) je vyjádřen přenos PID regulátoru.

$$\frac{du(t)}{dt} = K_P \cdot \frac{de(t)}{dt} + K_I \cdot e(t) + K_D \cdot \frac{d^2e(t)}{dt^2} \quad (3)$$

$$G_R(s) = \frac{\mathcal{L}\{u(t)\}}{\mathcal{L}\{e(t)\}} = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + K_I \cdot \frac{1}{s} + K_D \cdot s \quad (4)$$

V tomto tvaru je u derivační složky použit filtr, jak je vidět v rovnici (5).

$$G_R(s) = K_P + K_I \cdot \frac{1}{s} + K_D \cdot s \cdot \frac{1}{T_F \cdot s + 1} \quad (5)$$

7.1.2 Diskretizace ZOH - step invariance

Zero order hold (ZOH) je schodišťová diskretní aproximace spojitého signálu zachovávající přechodovou charakteristiku. ZOH udržuje hodnotu vzorku konstantní po dobu jedné vzorkovací periody až do získání dalšího vzorku a tím generuje spojitý signál. [10]

Základ krokové invariance je volba krokové odezvy diskretního systému, která je shodná s krokovou odezvou spojitého systému. Použití tohoto procesu není až tak často motivováno touhou zachovat tvar krokové odezvy, ale spíše znalostí, že u spojitého systému, který je pásmově ohraničen, bude frekvenční odezva v diskretním čase dostatečně aproximovat frekvenční odezvu spojitého systému. [7]

Krokové invariance diskretního systému se dosáhne přivedením jednotkového kroku na vstup spojitého systému $G_a(s)$ a vzorkovaného jednotkového kroku na vstup diskretního systému. Přechodová funkce $G(z)$ diskretního systému se přizpůsobuje, dokud výstup diskretního systému nereprezentuje vzorky výstupu spojitého systému. [7]

V rovnici (6) je impulzní charakteristika zvoleného filtru v Laplaceově transformaci. V dalších rovnicích je integrací vytvořena přechodová charakteristika $H(s)$. Vzniknou parciální zlomky, jejichž čitatele jsou vypočítány v rovnicích (9) až (11).

$$G_a(s) = \mathcal{L}\{g(t)\} = \frac{1}{T_F \cdot s + 1} \quad (6)$$

$$H(s) = \frac{1}{s} \cdot G(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{T_F \cdot s + 1} = \frac{1}{s \cdot (T_F \cdot s + 1)} \quad (7)$$

$$H(s) = \frac{1}{s \cdot (T_F \cdot s + 1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{T_F \cdot s + 1} \quad (8)$$

$$1 = A \cdot (T_F \cdot s + 1) + B \cdot s \quad (9)$$

$$s = 0 : 1 = A \quad (10)$$

$$s = -\frac{1}{T_F} : 1 = 1 \cdot (T_F \cdot (-\frac{1}{T_F}) + 1) + B \cdot (-\frac{1}{T_F}) \Rightarrow B = -T_F \quad (11)$$

$$H(s) = \frac{1}{s \cdot (T_F \cdot s + 1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{T_F \cdot s + 1} = \frac{1}{s} + \frac{-T_F}{T_F \cdot s + 1} \quad (12)$$

Výsledný tvar přenosu v rovnici (12) je převeden do diskretní podoby, viz (13).

$$H(z) = \frac{z}{z-1} + \frac{-T_F}{T_F} \cdot \frac{z}{z - e^{-\frac{T}{T_F}}} = \frac{z}{z-1} - \frac{z}{z - e^{-\frac{T}{T_F}}} \quad (13)$$

Jednotkový krok po Z transformaci na výstupu diskretního systému je vidět v rovnici (14). Porovnáním rovnic (13) a (14) lze vyjádřit diskretní přechodovou funkci, jak je napsáno v rovnici (15).

$$H(z) = G(z) \cdot \frac{z}{z-1} \quad (14)$$

$$G(z) = \frac{z-1}{z} \cdot \left(\frac{z}{z-1} - \frac{z}{z - e^{-\frac{T}{T_F}}} \right) = 1 - \frac{z}{z - e^{-\frac{T}{T_F}}} = \frac{0,951}{z - 0,951} \quad (15)$$

Na základě ZOH je napsána rovnice (16), která je použita při řízení modelu. T_F je dále označeno jako τ . Jsou zvoleny hodnoty $\tau = 0,4$ s a $T = 0,02$ s.

$$u_d[k] = u_d[k-1] \cdot e^{-\frac{T}{\tau}} + \frac{1}{\tau} \cdot (e[k] - e[k-1]) \quad (16)$$

V programu je použita knihovna AutoPID. Filtr je nutno nastavit přímo v knihovních souborech AutoPID.h a AutoPID.cpp. To však nelze přímo, jelikož jsou zapsány v jazyku C a je potřeba kompilátor. Možný postup je soubory otevřít v poznámkovém bloku a následně obsah zkopírovat do online C kompilátoru například

na stránce onlinegdb.com. Hlavní změna je přepsání části kódu a) na část b), jak je uvedeno níže. V obou souborech je ještě nutno zavést novou proměnnou `_tau`.

Přepsaná část v `AutoPID.cpp`:

- a) `double _dError = (_error - _previousError) / _dT / 1000.0;`
- b) `double _dError = _dError*exp(-1.0 * _dT / (1000.0 * _tau)) + (_error - _previousError) / _tau;`

V Tab. 4 jsou zapsány hodnoty regulačních konstant úhlu použité v dalších měřeních. Hodnota `_tau` je zvolena 0,4.

Regulační konstanta	Hodnota
K_P	0,1
K_I	0,08
K_D	4,5

Tab. 4: Hodnoty regulačních konstant úhlu.

7.1.3 Regulace polohy

Regulace vnější smyčky, která řídí polohu, může být provedena až po dokončení regulace vnitřní smyčky, jenž řídí úhel. Vstupem je požadovaná poloha modelu se zápornou zpětnou vazbou od aktuální polohy. Model při inicializaci stanoví svoji polohu jako nulovou. Výstupem z regulace polohy je požadovaný úhel, který je dále využit u regulace úhlu.

V Tab. 5 jsou zapsány hodnoty regulačních konstant polohy použité v dalších měřeních.

Regulační konstanta	Hodnota
K_P	20
K_I	1,5
K_D	0

Tab. 5: Hodnoty regulačních konstant polohy.

7.2 Finální program pro řízení modelu

Program je zde pro lepší přehlednost zapsáno ve dvou sloupcích. V praxi je kód zapsán pod sebou.

```
#include <AS5048A.h>
#include <Servo.h>
#include <AutoPID.h>
#define PIN_A 2
#define PIN_B 3
#define PIN_I 32
#define NULOVY_VYKON 40
#define NULOVY_UHEL 5850
#define NULOVY_UHEL_zavazi 115
#define TAU 0.4

#define TAU_x 1.0
//PID uhel
#define OUTPUT_MIN -30
#define OUTPUT_MAX 30
#define KP 0.1
#define KI 0.08
#define KD 4.5
double uhel, uhel_pozadovany, motory;
//PID poloha
#define OUTPUT_MIN_x -25
```



```

#define OUTPUT_MAX_x 25
#define KP_x 20.0
#define KI_x 1.5
#define KD_x 0.0
double poloha, poloha_pozadovana;
double uhel_pozadovany_minus;
AutoPID myPID_uhel(&uhel,
&uhel_pozadovany_minus, &motory,
OUTPUT_MIN, OUTPUT_MAX, KP, KI, KD,
TAU);
AutoPID myPID_poloha(&poloha,
&poloha_pozadovana, &uhel_pozadovany,
OUTPUT_MIN_x, OUTPUT_MAX_x, KP_x,
KI_x, KD_x, TAU_x);
Servo ESC;
Servo ESC2;
// position measurement
int32_t A, B, I;
uint32_t predchozi_cas = 0;
//the sensor CSn pin is connected to the 53 pin
AS5048A angleSensor(53);
AS5048A angleSensor_zavazi(47);

void setup() {
    myPID_uhel.setOutputRange(OUTPUT_MIN, OUTPUT_MAX);
    myPID_poloha.setOutputRange(OUTPUT_MIN_x, OUTPUT_MAX_x);
    myPID_uhel.setTimeStep(5);
    myPID_poloha.setTimeStep(5);
    poloha_pozadovana = 5.0;
    //uhel_pozadovany = 0.0;

    // inicializace sensoru polohy
    pinMode(PIN_A, INPUT);
    pinMode(PIN_B, INPUT);
    pinMode(PIN_I, INPUT);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_A), sigA, CHANGE);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_B), sigB, CHANGE);

    // inicializace sensoru uhlu
    angleSensor.init();
    angleSensor_zavazi.init();
    // inicializace seriove linky
    Serial.begin(115200);
    // inicializace motoru
    ESC.attach(8, 1000, 2000);
    ESC2.attach(10, 1000, 2000);
    ESC.write(0);
    ESC2.write(0);
    delay(2000);
}

void loop() {
    uhel = ((
(float)angleSensor.getRawRotation() -
(float)NULOYVY_UHEL) * 360.0 / 16384.0);
    poloha = (float)getDistance() / 1000.0;

```

```

    uhel_pozadovany_minus = -1.0 *
uhel_pozadovany;

    // uhel zavazi
    angleSensor_zavazi.getRawRotation();
    float uhel_zavazi =
(angleSensor_zavazi.getRawRotation() * 360.0 /
16384.0) - (float)NULOYVY_UHEL_zavazi;

    // PID regulatory
    myPID_poloha.run();
    myPID_uhel.run();

    // ESC pro motory
    ESC.write(NULOYVY_VYKON +
motory);
    ESC2.write(NULOYVY_VYKON -
motory);
    // vzorkovani prenosu dat
    uint32_t cas = millis();
    if (cas - predchozi_cas >= 20) {
        predchozi_cas = cas;
        Serial.print(uhel_zavazi);
        Serial.print("\t");
        Serial.print(uhel);
        Serial.print("\t");
        Serial.print(uhel_pozadovany_minus);
        Serial.print("\t");
        Serial.print(poloha);
        Serial.print("\t");
        Serial.println(motory);
    }
}

void sigA() {
    if (digitalRead(PIN_A) == 1 &
digitalRead(PIN_B) == 0 ||
digitalRead(PIN_A) == 0 &
digitalRead(PIN_B) == 1) {
        A++;
    }
    else {
        A--;
    }
}

void sigB() {
    if (digitalRead(PIN_A) == 0 &
digitalRead(PIN_B) == 0 ||
digitalRead(PIN_A) == 1 &
digitalRead(PIN_B) == 1) {
        B++;
    }
    else {
        B--;
    }
}

int32_t getDistance() {
    return (A + B);
}

```

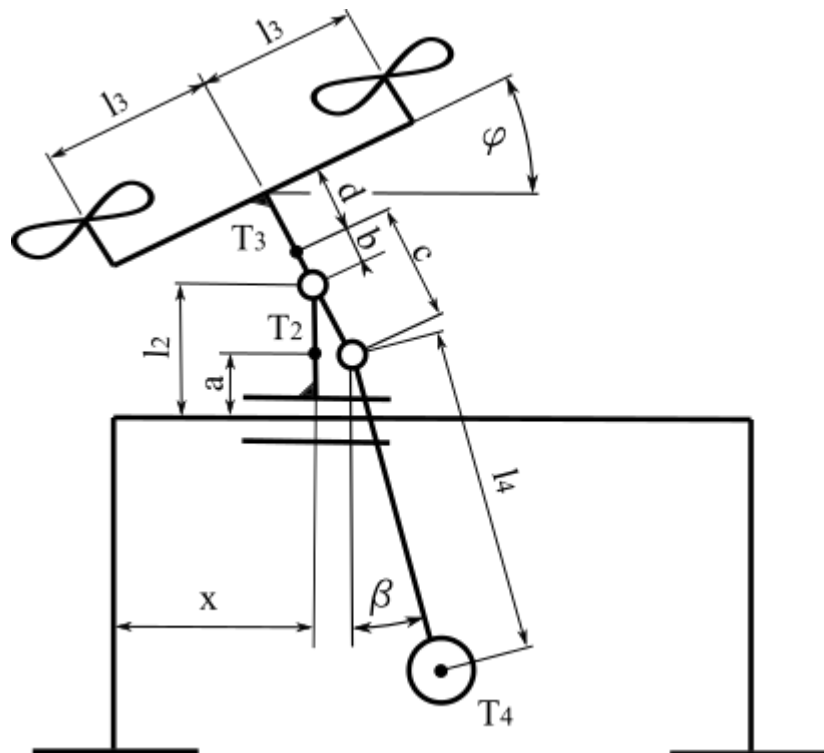
8 Identifikace parametrů modelu

V rámci identifikace parametrů bylo zvaženo testovací závaží o hmotnosti 232g a model bez baterie a kabelů k baterii o hmotnosti 1450g. Prostřednictvím aplikace Autodesk Inventor Professional 2018 jsou stanoveny další fyzikální parametry modelu, z nichž některé jsou potřebné do matematického modelu.

Nelineární dynamický model je zapsán v rovnici (17). [11]

$$M(t)\ddot{x}(t) + C(t)\dot{x}(t) + K(t)x(t) + Q(t) = L(t)u(t) + F(t)f \quad (17)$$

Matice obsahují parametry znázorněné na Obr. 19. Tyto parametry jsou zapsány v Tab. 6.



Obr. 19: Schéma soustavy modelu kvadrokoptéry s parametry.

Parametr	[mm]	Parametr	[mm]	Parametr	[kg]
a	38,5	l2	131,6	m2	0,90
b	-25,5	l3	175,0	m3	0,55
c	25,6	l4	nastavitelné	m4	nastavitelné
d	22,5				

Tab. 6: Parametry modelu potřebné do matematického modelu.

8.1 Měření frekvence a tlumení

Měření frekvence a tlumení je provedeno pomocí výpočtu z naměřených hodnot úhlu natočení měřené části.

Celá soustava je aretována tak, aby se vždy mohla hýbat jen část, která se měří. Závaží nebo rameno s motory je vychýleno o libovolný, ale dostatečný úhel a následně uvolněno. Hodnoty úhlu, které po vykreslení v čase ukazují tlumenou křivku kmitání, jsou poté podrobeny simulaci, jenž by se měla co nejvíce podobat naměřeným hodnotám. Ze simulační křivky se pomocí následujících vztahů vypočítá tlumení.

Nejprve jsou identifikovány hodnoty vrcholů měřené oscilující křivky. Jako vrcholy se určí body $(t_1, x_1), \dots, (t_i, x_i)$. Vlastní úhlová frekvence ω_d se spočítá z rovnice (18), kde T je perioda kmitů. [6]

$$\omega_d = \frac{2 \cdot \pi}{T} \approx \frac{2 \cdot \pi}{t_{i+1} - t_i} \quad (18)$$

Tlumení systému je určeno použitím logaritmického dekrementu, jak je ukázáno v rovnici (19). [6]

$$\xi = \frac{\ln \frac{x_i}{x_{i+1}}}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \left(\ln \frac{x_i}{x_{i+1}}\right)^2}} \quad (19)$$

Ovšem hodnoty tlumení z každého páru vrcholů se pohybují ve velkém rozpětí. Jedním z možných důvodů je kvantizace, která vyplývá z omezení analogově-digitální konverze. Dalším důvodem může být, že struktura předpokládaného modelu tření nemusí být správná. Kyvadlový systém například podléhá Coulombovu tření, které má konstantní velikost a je proti směru pohybu. Zatímco viskózní tření snižuje amplitudu exponenciálně, Coulombovo tření ji snižuje lineárně. [6]

Jedním ze způsobů, jak řešit tato omezení, je vypočítat ξ přes více period. To lze provést pomocí následující rovnice (20). [6]

$$\xi = \frac{\frac{1}{n-1} \cdot \ln \frac{x_i}{x_n}}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \left(\frac{1}{n-1} \cdot \ln \frac{x_i}{x_n}\right)^2}} \quad (20)$$

Vlastní frekvence netlumených kmitů ω_n se spočítá z rovnice (21). [6]

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (21)$$

$$\delta = \frac{|\alpha|}{\omega_d} = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (22)$$

$$\alpha = -\xi \cdot \omega_n \quad (23)$$

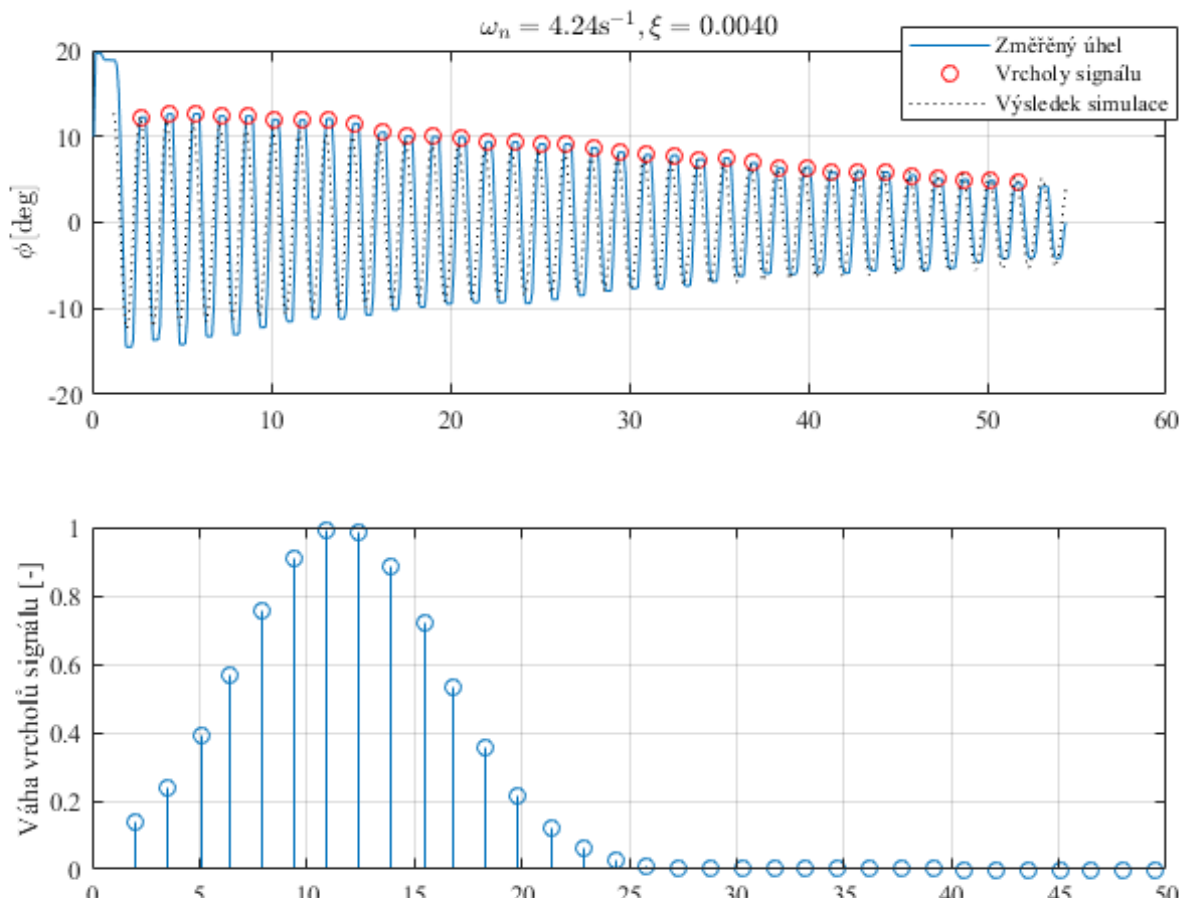
δ je součinitel poměrného tlumení neboli relativní útlum, viz rovnice (22). α je vlastní útlum a lze spočítat z rovnice (23).

8.1.1 Útlum závaží

Aby hřídel co nejlépe kopírovala pohyb zavěšeného závaží, je lanko uchyceno ve vodící trubce.

Na Obr. 20 je vidět příklad grafického výstupu z naměřených hodnot útlumu závaží. Modrá barva reprezentuje hodnoty aktuálního úhlu čtené snímačem AS5048A. Červenou barvou jsou označeny vrcholy kmitů a jsou to důležité body pro simulaci, která je zobrazena černou čárkovanou křivkou. Ve spodním grafu je zaznamenána váha signálu, která má přímý vliv na simulaci.

U tohoto měření je vidět, že pomyslná spojnice vrcholů se mírně vlní. To je způsobeno nedokonalým uvolněním závaží, které pak slabě oscilovalo do nechtěného směru. Zbytek grafů je v příloze 2.



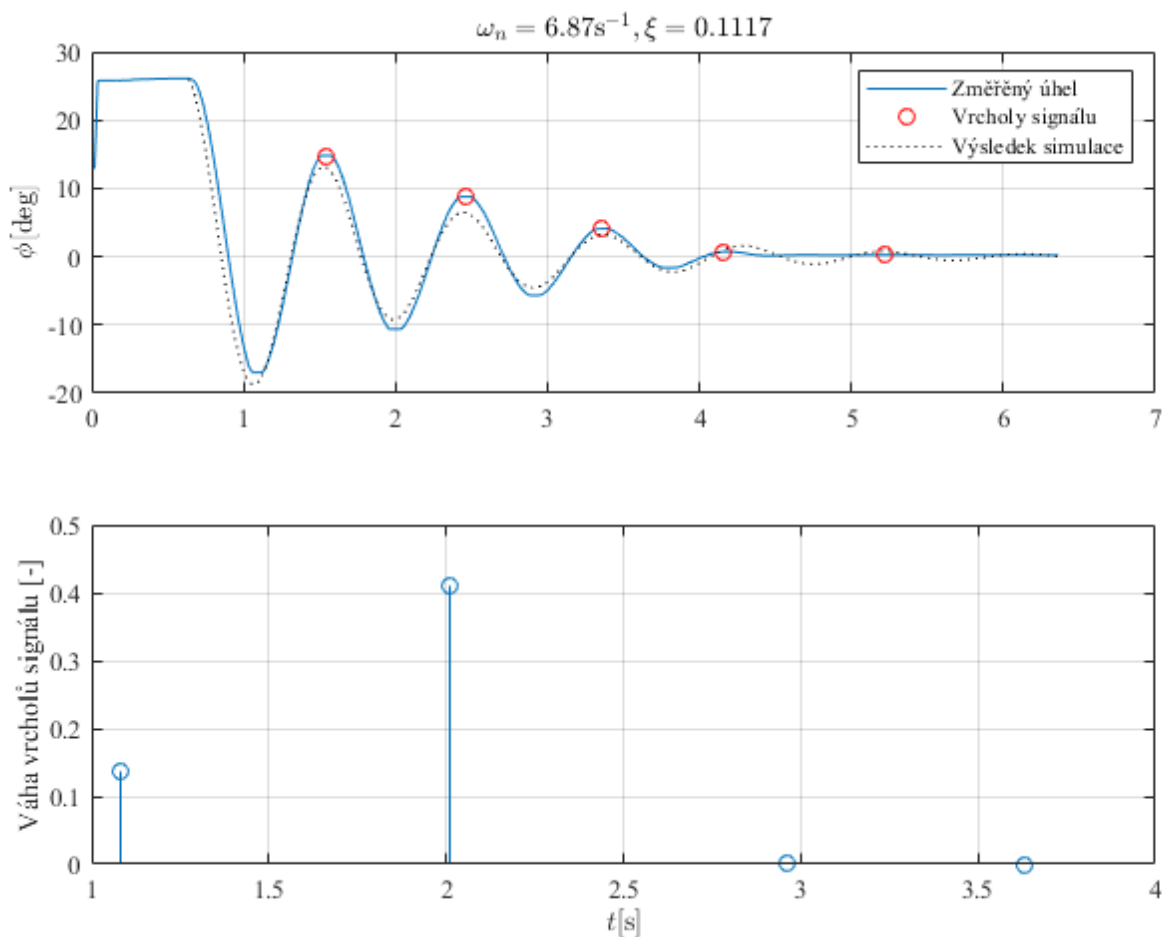
Obr. 20: Měření č. 1 útlumu zavěšeného závaží.

Měření	Frekvence ω_n [s ⁻¹]	Tlumení ξ [-]	Relativní útlum δ [-]
1	4,24	0,0040	0,0040
2	4,22	0,0031	0,0031
3	4,23	0,0038	0,0038
4	4,23	0,0044	0,0044
5	4,24	0,0038	0,0038
6	4,24	0,0037	0,0037
Průměr	4,23	0,0038	0,0038

Tab. 7: Souhrn vypočítaných frekvencí a tlumení z hodnot měření útlumu závaží.

8.1.2 Útlum ramene s motory

Útlum ramene je očividně výraznější než u závaží. Určitý vliv na to mají i kabely jdoucí od motorů.



Obr. 21: Měření č.5 útlumu ramene s motory.

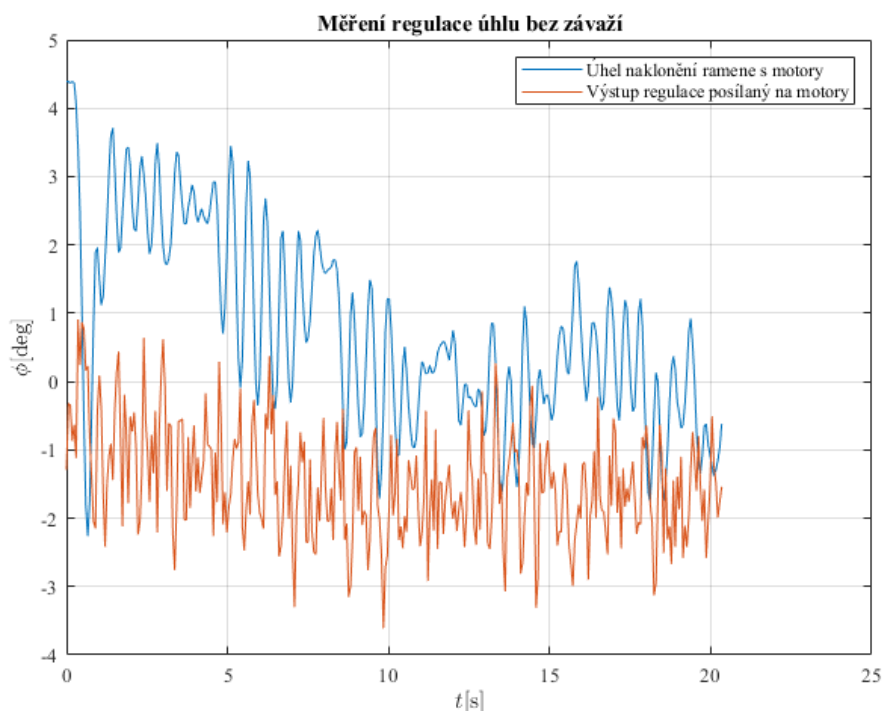
Měření	Frekvence ω_n [s ⁻¹]	Tlumení ξ [-]	Relativní útlum δ [-]
1	6,95	0,0809	0,08
2	6,98	0,1009	0,10
3	7,01	0,0960	0,10
4	6,76	0,0908	0,09
5	6,87	0,1117	0,11
6	6,88	0,1222	0,12
Průměr	6,91	0,1004	0,10

Tab. 8: Souhrn vypočítaných frekvencí a tlumení z hodnot měření útlumu ramene.

8.2 Měření úhlu

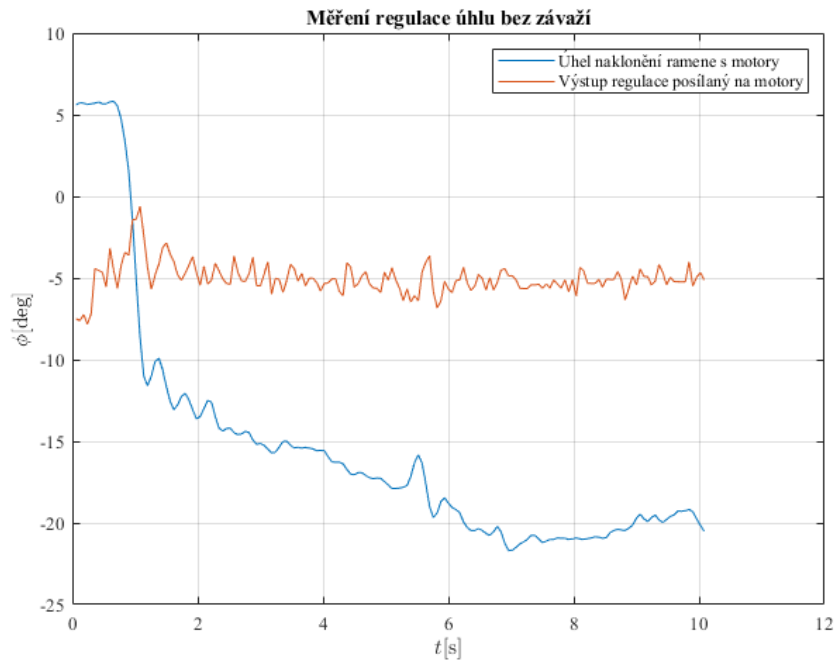
Úhel je změřen pro hodnoty požadovaného úhlu 0°, 5°, 10°, 15° a 20° jak pro variantu se závažím, tak bez závaží. Základní výkon je u každého měření zvolena 50 a 40. Celkem je tedy 20 měření.

Hodnoty regulace úhlu byly použity dle návrhu z Tab. 4.



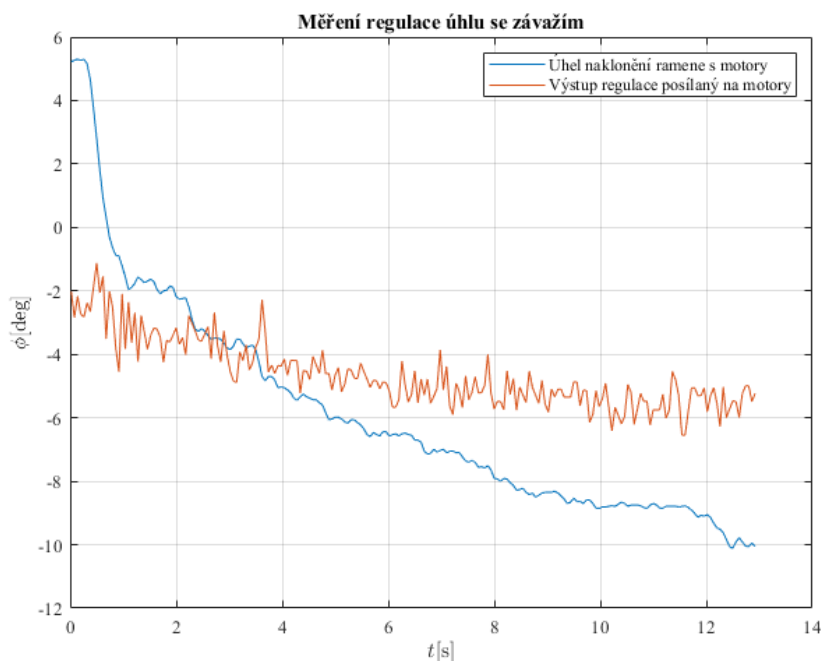
Obr. 22: Graf regulace úhlu ramene na požadovaný úhel 0° při základním výkonu motorů 40 jednotek.

Z grafu na Obr. 22 je vidět, že výkon lehce nadržuje jednomu motoru. To může být způsobeno rozdílným efektivním výkonem motorů nebo nepřesně nastavenou hodnotou nulového úhlu ramene.



Obr. 23: Graf regulace úhlu ramene na požadovaný úhel 20° při základním výkonu motorů 50 jednotek.

Vyšší výkon motorů často vykázal rychlejší dosáhnutí požadované hodnoty i menší známky překmitnutí.



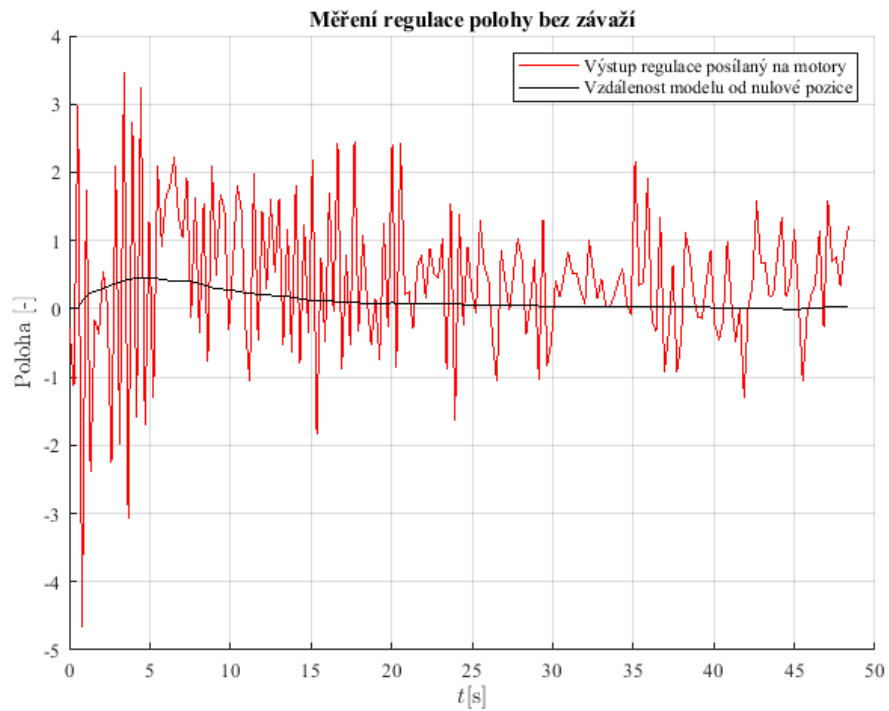
Obr. 24: Graf regulace úhlu ramene na požadovaný úhel 10° při základním výkonu motorů 40 jednotek.

Závaží se při měřeních většinou nerozkmitalo a nemělo tak silně viditelný vliv na regulaci.

8.3 Měření polohy

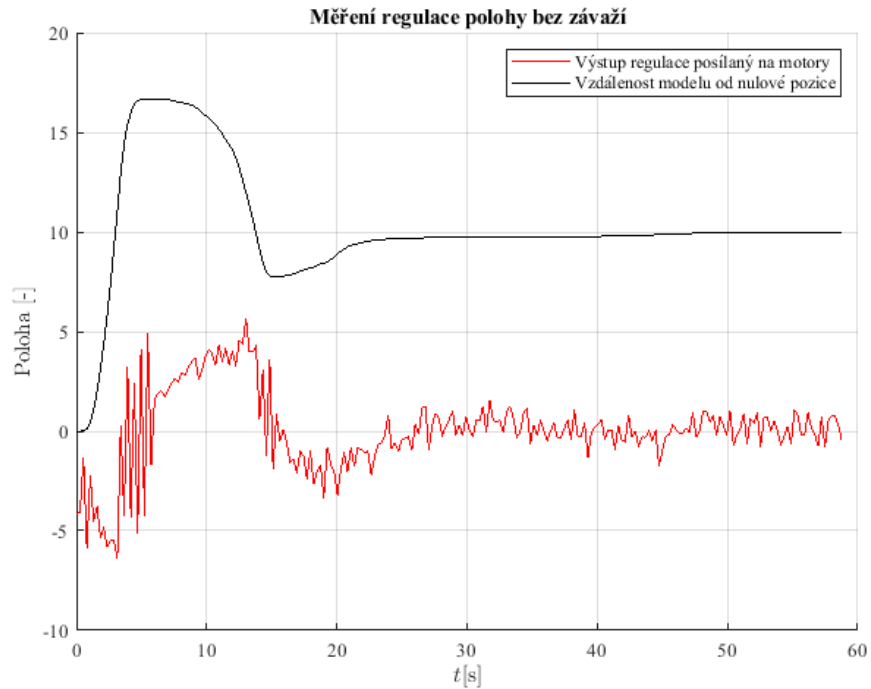
Úhel je změřen pro hodnoty požadované polohy 0, 5, 10 a 15 jednotek jak pro variantu se závažím, tak bez závaží. Základní výkon je u každého měření zvolena 50 a 40. Celkem je tedy 16 měření.

Hodnoty regulace polohy i potřebného úhlu byly použity dle návrhů z Tab. 4 a Tab. 5.



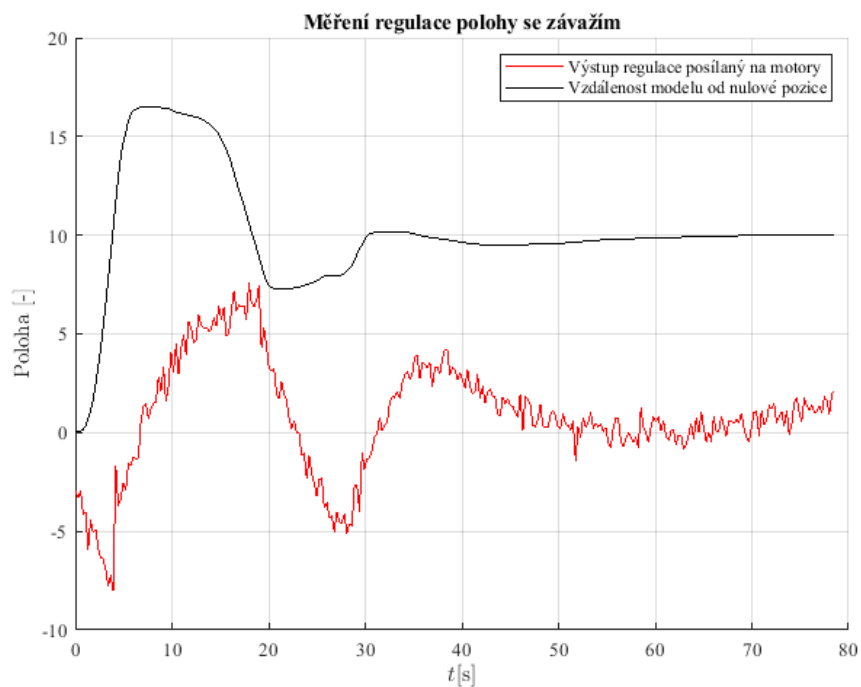
Obr. 25: Graf regulace polohy modelu na požadovanou hodnotu 0 j. při základním výkonu motorů 50 jednotek.

Při zapnutí se model mírně vychýlil. Rozdíl minima a maxima v prvních vteřinách byl přibližně 8 jednotek výkonu.



Obr. 26: Graf regulace polohy modelu na požadovanou hodnotu 10 j. při základním výkonu motorů 40 jednotek.

Zde je vidět, že model požadovanou polohu dvakrát přejel, než se ustálil.

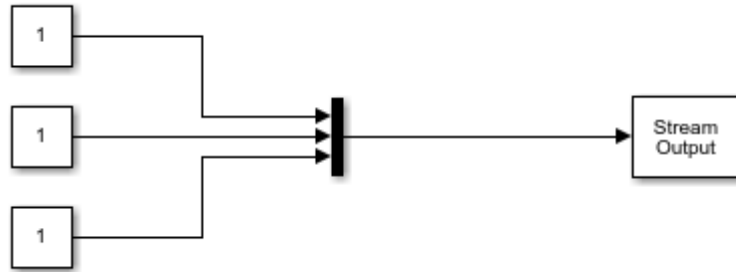


Obr. 27: Graf regulace polohy modelu na požadovanou hodnotu 10 j. při základním výkonu motorů 40 jednotek.

Vliv závaží na polohu už je patrný. Ve chvíli změny směru je malý schod na křivce polohy způsoben kyvem závaží v opačném směru inicializovaného pohybu modelu.

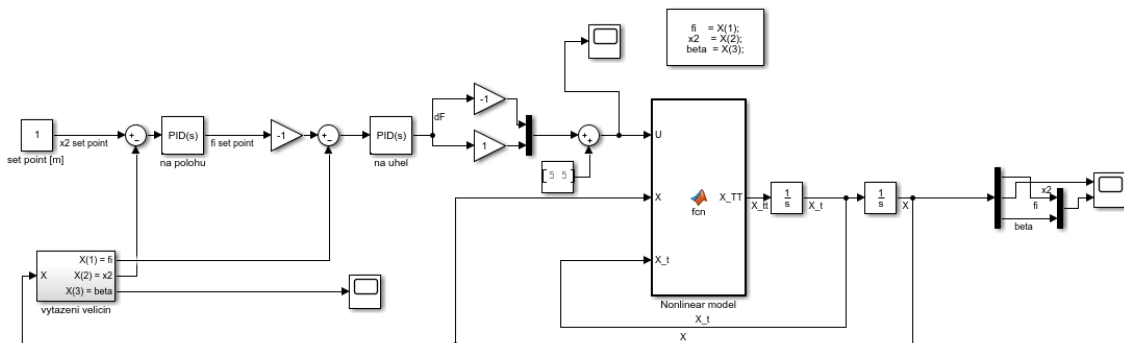
9 Implementace řízení modelu v prostředí MATLAB Simulink

V prostředí MATLAB Simulink je vytvořen model řízení. Komunikace je zajištěna pomocí sériové linky.



Obr. 28: Příklad komunikace přes sériovou linku v prostředí MATLAB Simulink.

Výhodou řízení v tomto prostředí je jednoduchá implementace i složitých procesů. Nevýhodou je potřeba licence pro používání komunikačních bloků a nižší komunikační rychlost, jelikož program nahraný přímo v Arduino je schopen rychleji reagovat, než když je řízení zajištěno skrze další komunikaci s PC a MATLAB Simulink.



Obr. 29: Řízení modelu kvadrokoptéry v prostředí MATLAB Simulink.

V důsledku chybějící licence a nemožnosti otestovat komunikaci je zhotoveno řízení pomocí sériového monitoru v prostředí Arduino IDE.

Při přímém řízení přes Arduino je pro zadávání požadovaných hodnot použit sériový monitor. Pokud je potřeba nastavit úhel, musí se zakomentovat celá regulace polohy.

Do části void setup() je přidán následující kód.

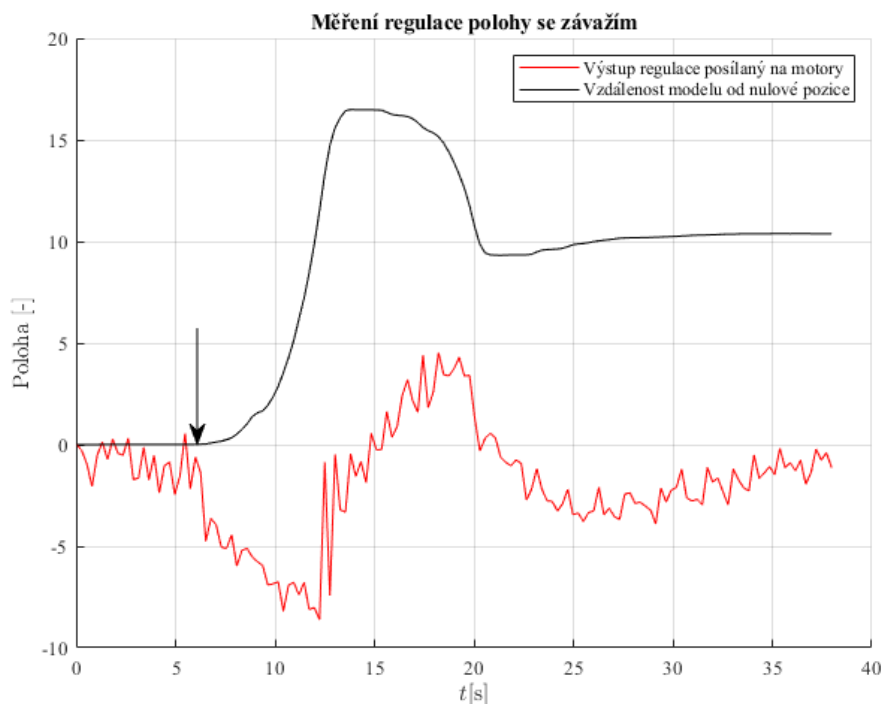
```
// inicializace seriové linky
Serial.begin(115200);
while (!Serial);
Serial.println("Zadejte požadovanou polohu (0-20)");
//Serial.println("Zadejte požadovaný úhel (0-20)");
```

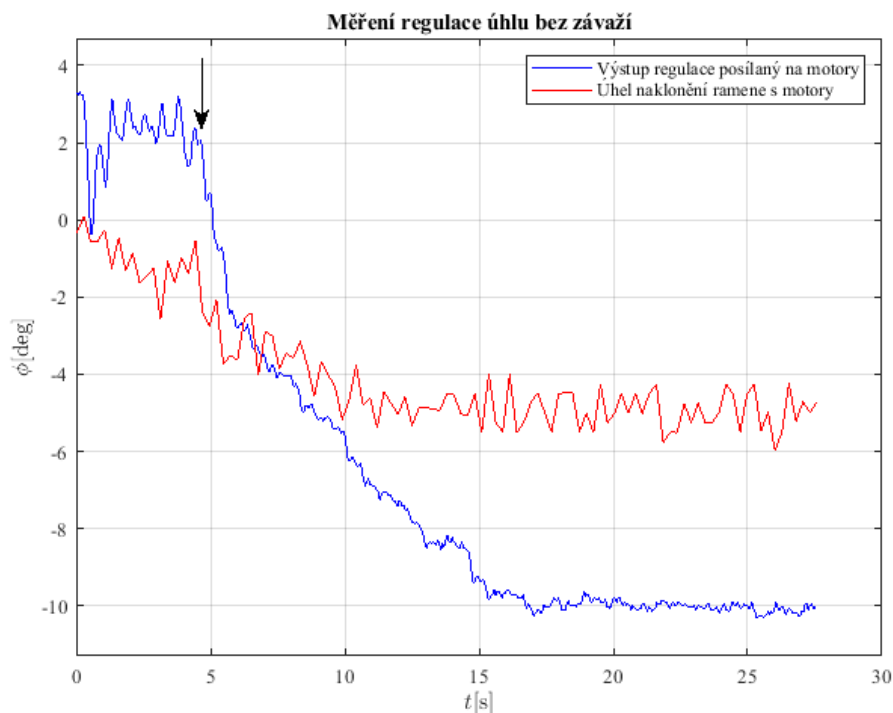
Do části void loop() je přidán následující kód, kdy lze aplikovat pouze variantu se zadáváním polohy nebo pouze se zadáváním úhlu.

```
//zadavani pozadovane polohy pres seriovy monitor
Serial.setTimeout(100);
if (Serial.available()>0){
poloha_pozadovana = Serial.parseInt();
  if (0 <= poloha_pozadovana < 20){
    Serial.print("Zadána poloha ");
    Serial.println(poloha_pozadovana);
  }
}
//zadavani pozadovaneho uhlu pres seriovy monitor
Serial.setTimeout(100);
if (Serial.available()>0){
uhel_pozadovany = Serial.parseInt();
  if (0 <= uhel_pozadovany <20){
    Serial.print("Zadán úhel ");
    Serial.println(uhel_pozadovany);
  }
}
}
```

Tato komunikace byla otestována pro zadanou polohu 10 jednotek při výkonu 40 jednotek bez závaží i se závažím a dále pro zadaný úhel 5°, 10° a 15° bez závaží.

Šipka označuje okamžik, kdy byla zadána požadovaná hodnota.





Modulační rychlost M sériové linky je zvolena 115 200 Bd. Tato rychlost vyjadřuje počet změn nosného signálu za jednotku času a měří se v baudech [Bd]. Modulační rychlost neudává množství informace, jakou nosný signál přenáší. [12]

Přenosová rychlost C naopak určuje objem informace přenesený za jednotku času. Vyjadřuje se v bitech za sekundu [bps]. Přenosová rychlost oproti modulační nevyjadřuje hodnotu, jak rychle se nosný signál mění. W je šířka přenosového pásma v hertzech [Hz]. [12]

$$C = 2 \cdot W \cdot \log_2 M \quad (24)$$

Pro sériový přenos platí, že 1 Bd = 1 bps. Zadávaná informace je číslo v rozmezí 0 až 20. Máme tedy dva číselné znaky, kdy každý zabírá 8 bitů informace plus 3 bity, které jsou startovací, paritní a ukončovací bit. Celkem je potřeba 11 bitů na každý znak. Při 115 200 bps je možné 22 bitovou informaci zapsat 5 236 krát.

9.1 Nyquistovy-Shannonovy-Kotelnikovovy podmínky vzorkování

Základní otázkou diskrétního řízení je délka periody vzorkování T , která stanoví, jak dlouho bude regulovaná veličina bez sledování a bez změny akčního zásahu. Je zřejmé, že čím „pomalejší“ je regulovaná soustava, tím delší může být perioda vzorkování. Při periodě vzorkování T získáme vzorkováním spojitého signálu

posloupnost hodnot, která z frekvenčního spektra obsaženého v původním spojitém signálu zachytí frekvence až do mezní úhlové frekvence ω_m . [9]

$$\omega_m = \frac{\pi}{T} \quad (25)$$

Vyšší frekvence než ω_m jsou vzorkováním potlačeny. To znamená, že mezní úhlová frekvence je taková, že na její periodu připadají alespoň dva vzorky. Perioda T se volí dle vztahu (26). [9]

$$T \leq \frac{\pi}{\omega_m} = \frac{1}{2 \cdot f_m} \quad (26)$$

f_m je maximální frekvence analogového signálu zachycená v diskretním signálu. f_s je vzorkovací frekvence a f_N je Nyquistova frekvence. [13]

$$f_s = \frac{1}{T} = 2 \cdot f_m \quad (27)$$

$$f_N = \frac{f_s}{2} \quad (28)$$

Frekvence vyšší, než je Nyquistova frekvence se „překlopí“ kolem Nyquistovy frekvence zpět do nižších frekvencí, což se projeví falešnou frekvencí. Tento jev se nazývá aliasing. [13]

Perioda vzorkování T je zvolena 0,02 s. Vzorkovací frekvence vychází $f_s = 50 \text{ Hz}$.

10 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout konstrukční řešení laboratorní úlohy kvadrokoptéry se zavěšeným závažím. Dále návrh instrumentace laboratorní úlohy včetně implementace řízení modelu v prostředí MATLAB Simulink a návrh řízení s využitím rozvětvených schémat PID regulátorů. Cílem je také identifikovat parametry modelu.

V úvodní části práce jsou popsány navržené konstrukční prvky modelu včetně zakoupených komponent a jejich použití v modelu. Výkresová dokumentace je v příloze 1. Z těchto výkresů a komponent byl vytvořen a smontován fyzický model kvadrokoptéry včetně nosné konstrukce s kolejnicí, po které model jezdí.

V další části je popsán postup zapojení elektroniky, postupného ožívování senzorů snímání pohybu a rotace a oživení servomotorů. V postupu jsou zahrnuty i kódy využité při ožívování.

Následuje sekce týkající se řízení a regulace, kde je použito schéma s rozvětvenými PID regulátory. Vnitřní smyčka, která řídí úhel, je nastavena přednostně oproti vnější smyčce, která řídí polohu.

Navazuje identifikace parametrů modelu včetně měření útlumu závaží i ramene s motory. Grafický výstup z veškerých měření je v příloze 2.

V závěru práce je navrženo řízení v prostředí MATLAB Simulink. Kvůli licenci však nebylo otestováno a místo toho bylo navrženo řízení přes sériový monitor, které bylo úspěšně vyzkoušeno.

Při této diplomové práci byla vytvořena funkční laboratorní soustava s modelem kvadrokoptéry, která může být ve škole nadále používána. Součástí je i virtuální model, který může v budoucnu usnadnit konstrukční modifikace.

Všem cílům zmíněných v úvodu práce byla věnována pozornost a lze je považovat za splněné.

A Seznam literatury

- [1] The Profile System. [online]. The_Profile_System_1_2018_GB_V02. [cit. 21. 3. 2019]. Dostupné z: <http://www.maytec.com.de/index.php?id=24&L=1#c96>
- [2] EGH15CA. [online]. [cit.21. 3. 2019]. Dostupné z: https://www.hiwin.de/en/Products/Linear_Guideways/Series_EG_QE/Block_EG/EGH/4307/2440745
- [3] Datasheet AS5048A/AS5048B. [online]. [v1-09] 2016-Nov-15 [cit.21. 3. 2019]. Dostupné z: https://ams.com/documents/20143/36005/AS5048_DS000298_4-00.pdf
- [4] Datasheet AS5304/AS5306. [online]. [v2-00] 2017-May-03 [cit. 21. 3. 2019]. Dostupné z: https://ams.com/documents/20143/36005/AS5304_06_DS000187_2-00.pdf/50d25cf2-337a-1b3c-2218-6dd9d16421fd
- [5] Datasheet Arduino Mega 2560 [online]. Revize 3. [cit. 21. 3. 2019]. Dostupné z: https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino-mega2560_R3-sch.pdf
- [6] Control Tutorials for MATLAB and Simulink (CTMS), Modeling of a Simple Pendulum [online], [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Activities_Pendulum
- [7] GOPAL M.: Digital Control and State Variable Methods: Conventional and Intelligent Control Systems. 3.vyd. The Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2009. ISBN-13: 978-0-07-0668805; ISBN-10: 0-07-0668809.
- [8] ŠULC B., VÍTEČKOVÁ M.: *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Vydavatelství ČVUT v Praze, Praha, 2004, s. 180-181. ISBN 80-01-03007-5.
- [9] HOFREITER M.: *Základy automatického řízení*. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 2012, 1.vyd., 165s. ISBN 978-80-01-05007-1.
- [10] Continuous-Discrete Conversion Methods [online], [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/continuous-discrete-conversion-methods.html#bs78nig-2>
- [11] HOVORKOVÁ V.: *Simulační model a aplikace pokročilých algoritmů pro řízení kvadroptéry na pojezdu se zavešeným břemenem* [online]. Studentská tvůrčí činnost 2019 [cit. 2019-05-31]. Dostupné z: https://stc.fs.cvut.cz/pdf19/9520.pdf?_=1553980826
- [12] FRENZEL L.: *What's The Difference Between Bit Rate And Baud Rate?* [online]. Electronic Design Magazine 27.4.2012 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-bit-rate-and-baud-rate>
- [13] HOFREITER M.: *Identifikace dynamických systémů – přednáška 2: Experimentální identifikace*. ČVUT, Praha, 2019.
- [14] Arduino Mega 2560 pinout [online]. Červen 2006, [cit. 21. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.theengineeringprojects.com/wp-content/uploads/2018/06/introduction-to-arduino-mega-5.png>

B Příloha 1: Výkresová dokumentace

Tato příloha obsahuje výkresy, na základě kterých byly vyrobeny části modelu kvadrokoptéry.

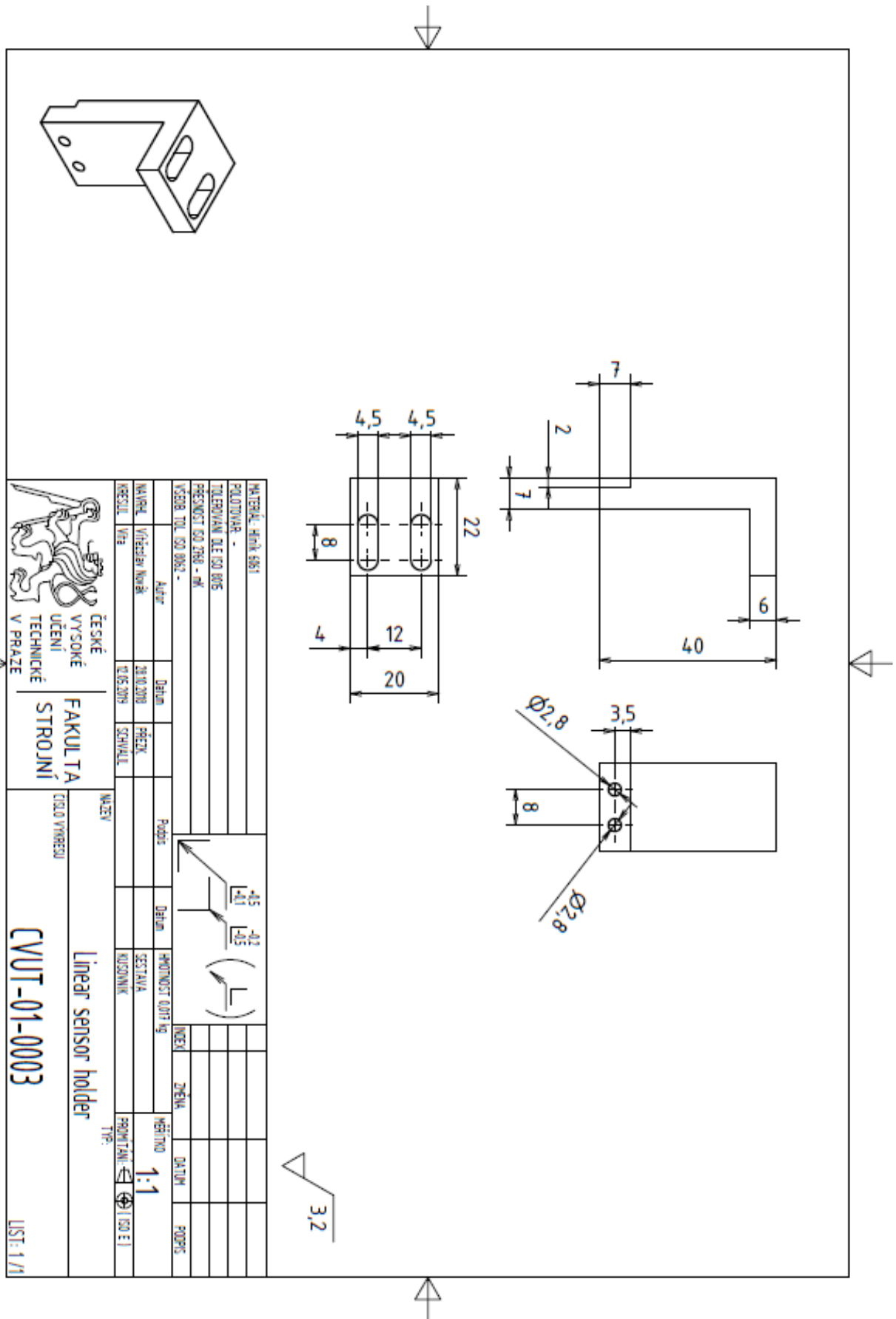
Seznam výkresů:

1) CVUT-01-0001	Weight Guide	Vodící trubka pro závaží
2) CVUT-01-0002	Bearing House	Domek na ložisko
3) CVUT-01-0003	Linear Sensor Holder	Držák lineárního senzoru
4) CVUT-01-0004	Pillar	Pilíř
5) CVUT-01-0005	Central Rectangle	Středová obdélníková deska
6) CVUT-01-0006	Motor Handle Holder	Upevňovací část ramene
7) CVUT-01-0007	Sensor Desk	Deska pro senzor
8) CVUT-01-0008	Shaft Weight	Hřídel pro závaží
9) CVUT-01-0009	Shaft	Hřídel ramene s motory
10) CVUT-01-0010	Motor Handle	Rameno pro motory
11) CVUT-01-0011	Counterweight Holder	Držák pro protizávaží
12) CVUT-01-0012	Movable Plate	Deska pro hřídel se závažím
13) CVUT-01-0013	Center Part	Základní nosná část

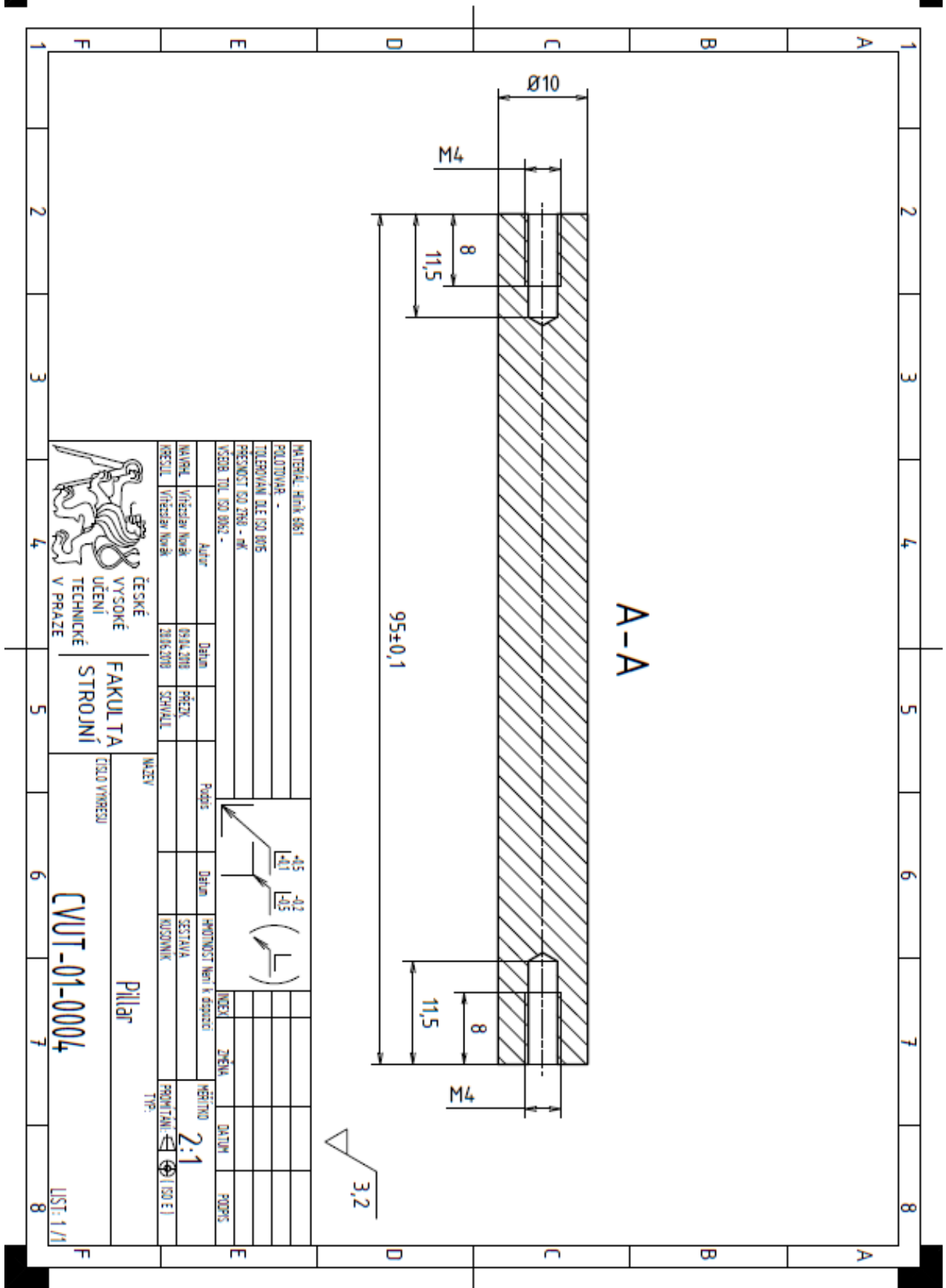
Tabulka spojového materiálu:

Označení	Typ	Počet kusů
DIN 7984	M3-5	4
DIN 7984	M3-10	12
DIN 7984	M4-10	10
DIN 7984	M4-12	4
DIN 7984	M4-16	4
DIN 7984	M4-20	2
DIN EN 24017	M4-12	2
CSN EN 24036	M4	2
CSN EN 24036	M6	1
CSN EN 24036	M8x1	2
CSN 02 1703	3	4
CSN 02 1703	4	2
CSN 02 1703	6	1
CSN 02 1703	8	2
Hex Spacer MF	M3 L7	4
Hex Spacer MF	M4 L30	2

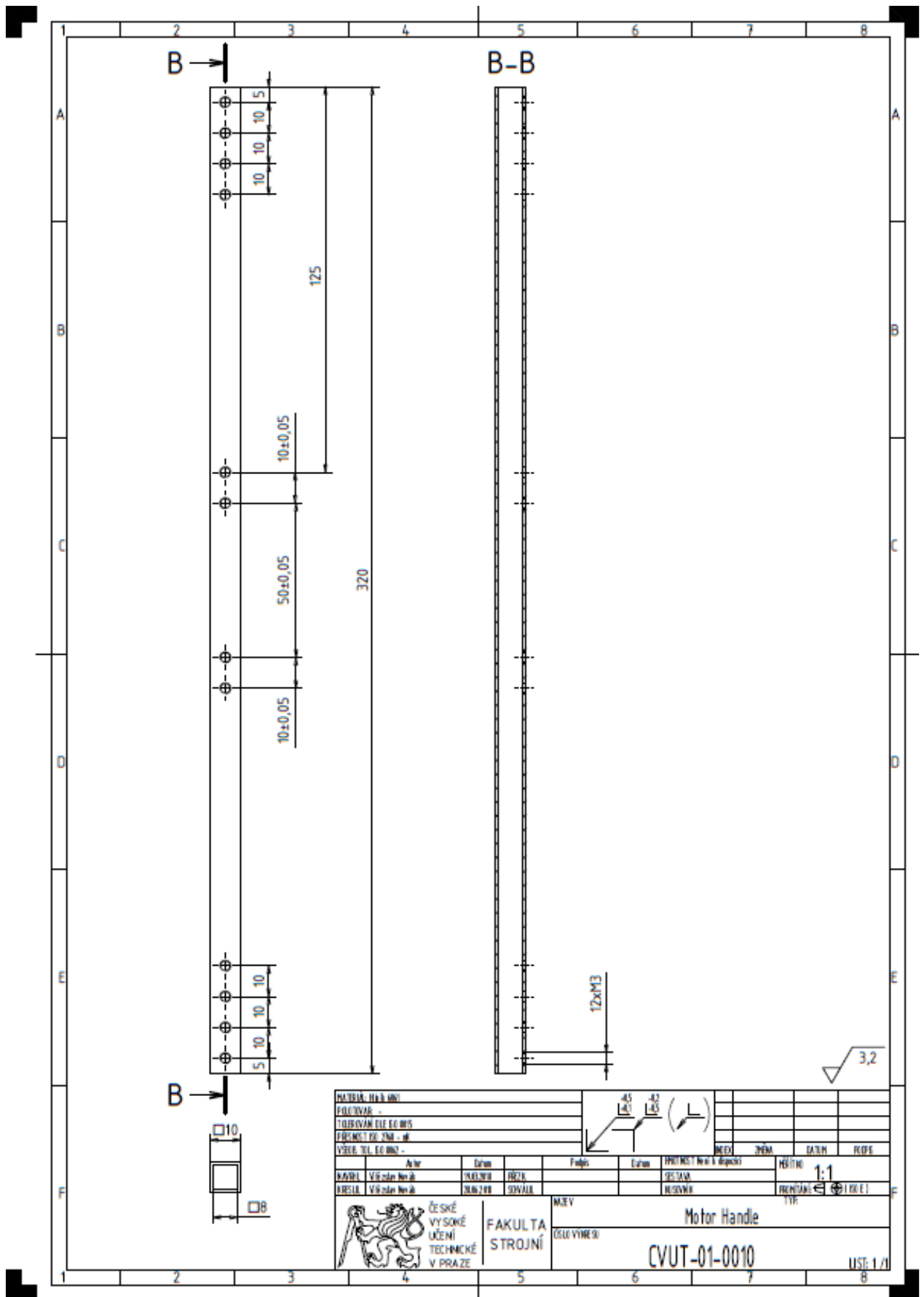
Tab. 9: Spojový materiál.



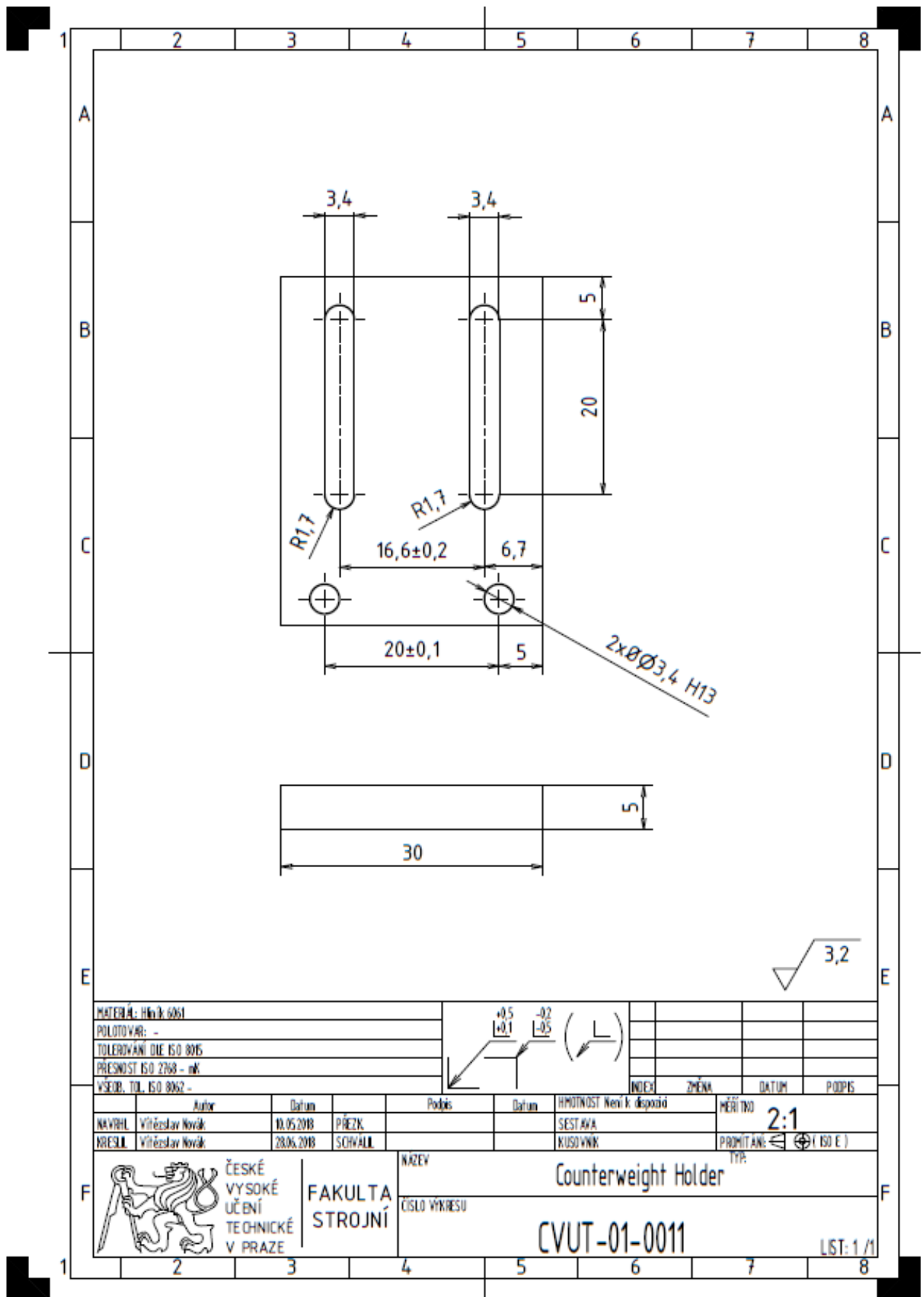
Obr. 32: Výkres držáku lineárního senzoru.



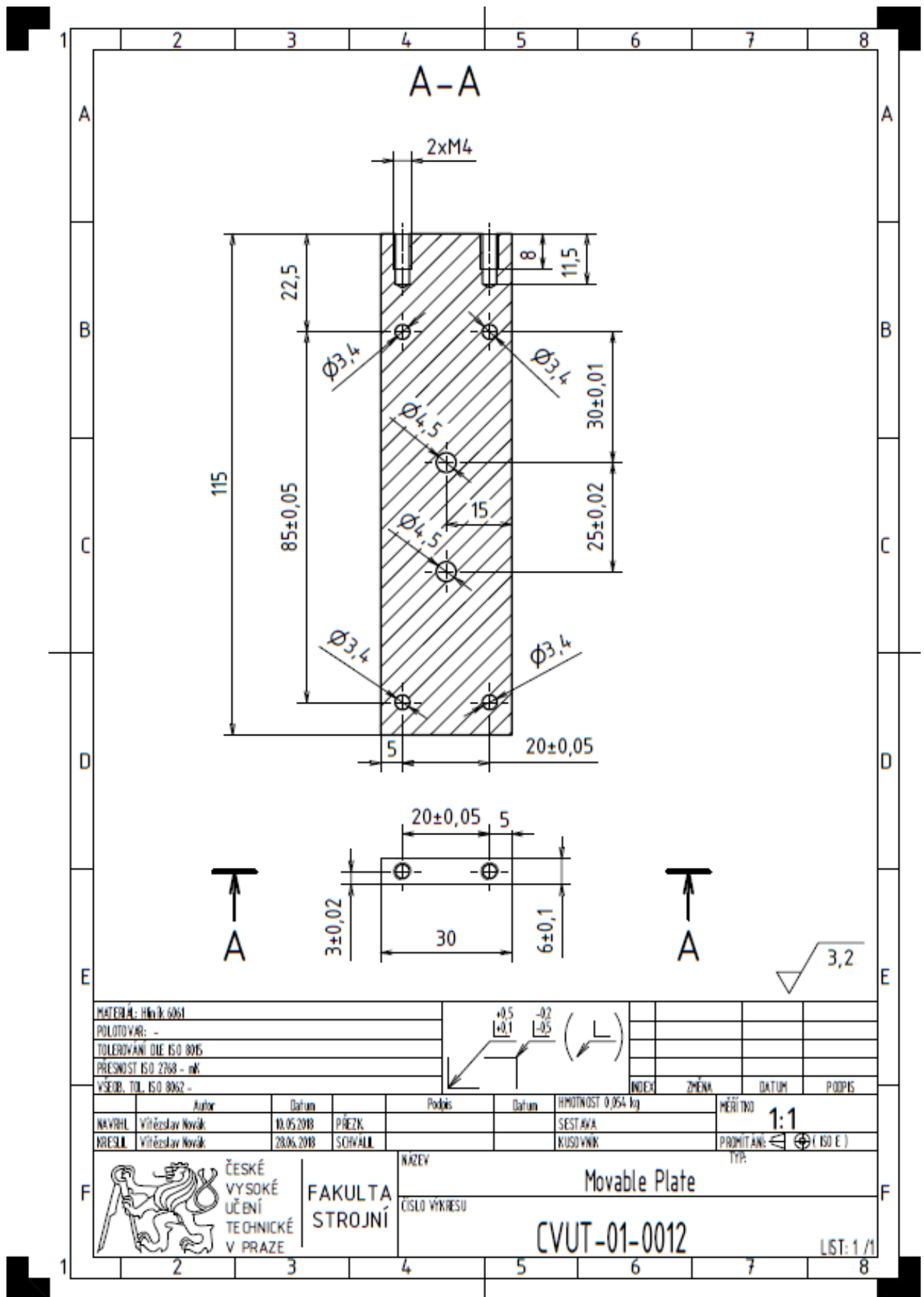
Obr. 33: Výkres pilíře.



Obr. 39: Výkres ramene pro motory.



Obr. 40: Výkres držáku pro protizávaží.

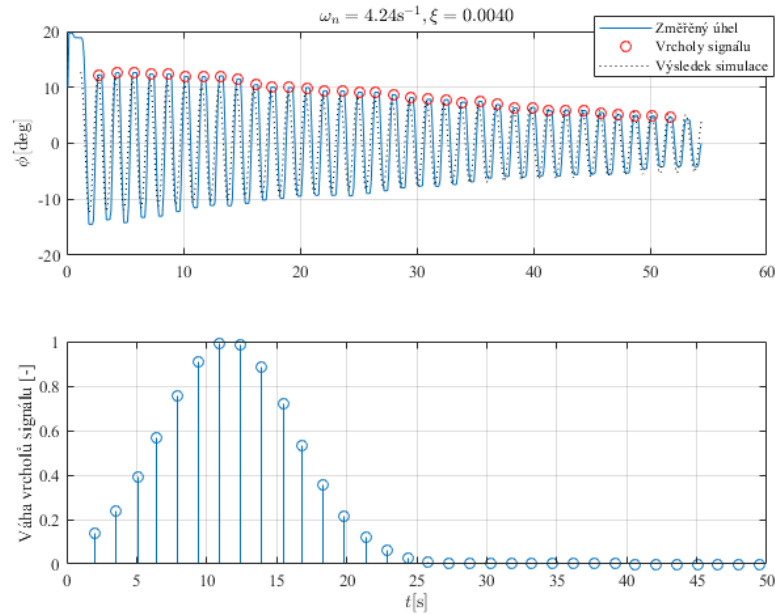


Obr. 41: Výkres desky pro hřídel se závažím.

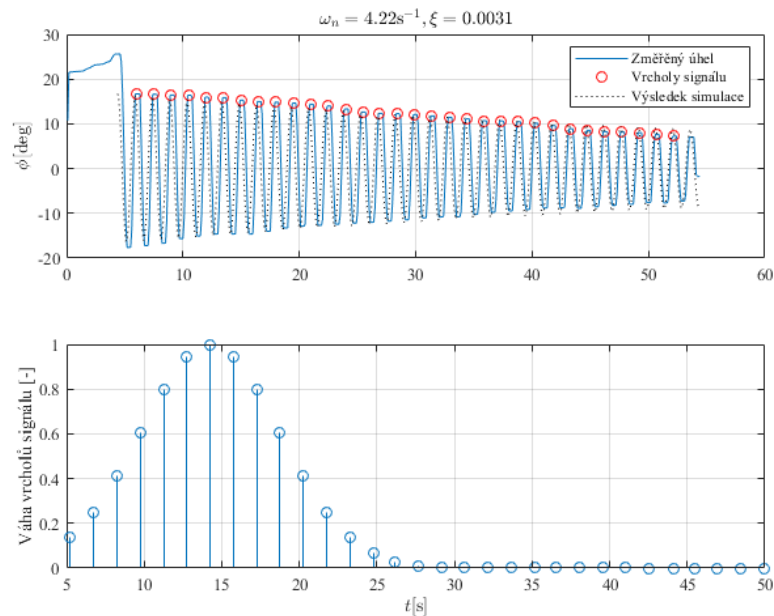
C Příloha 2: Měření parametrů modelu, regulace polohy a úhlu a testování komunikace

Tato příloha obsahuje grafické výstupy z naměřených dat identifikace parametrů modelu, regulace úhlu a polohy a testování komunikace.

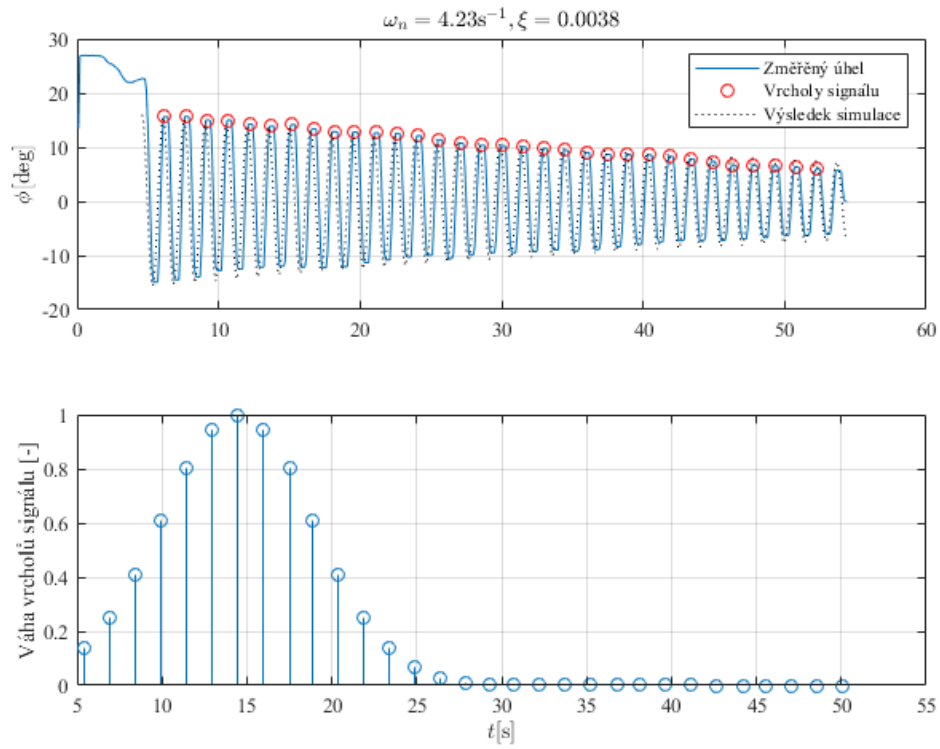
C.a Tlumení závaží



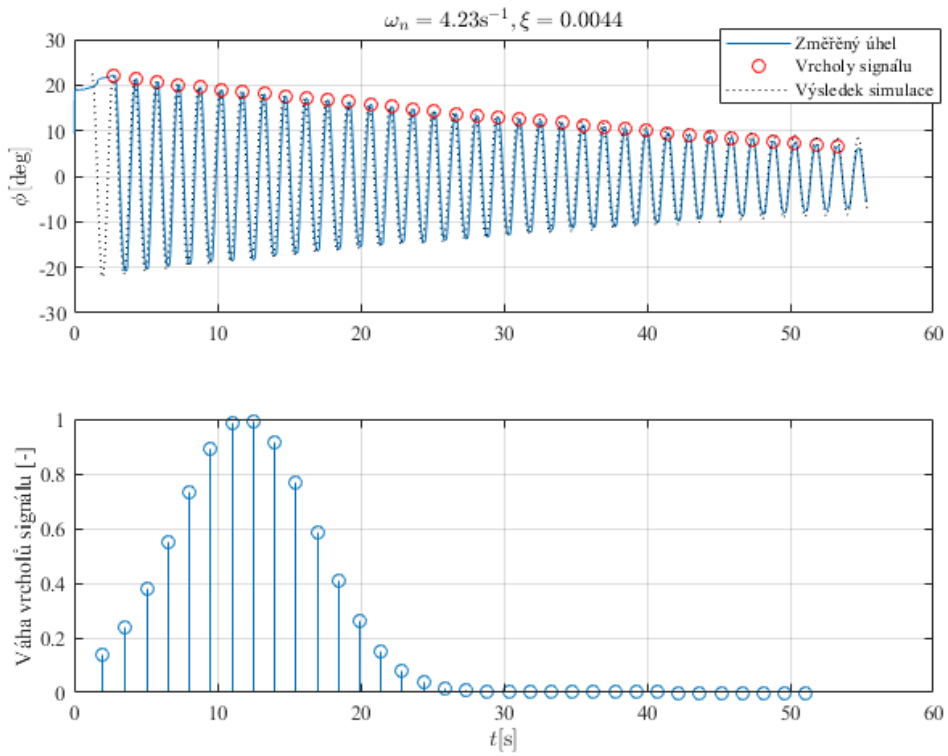
Obr. 43: Měření útlumu závaží č.1.



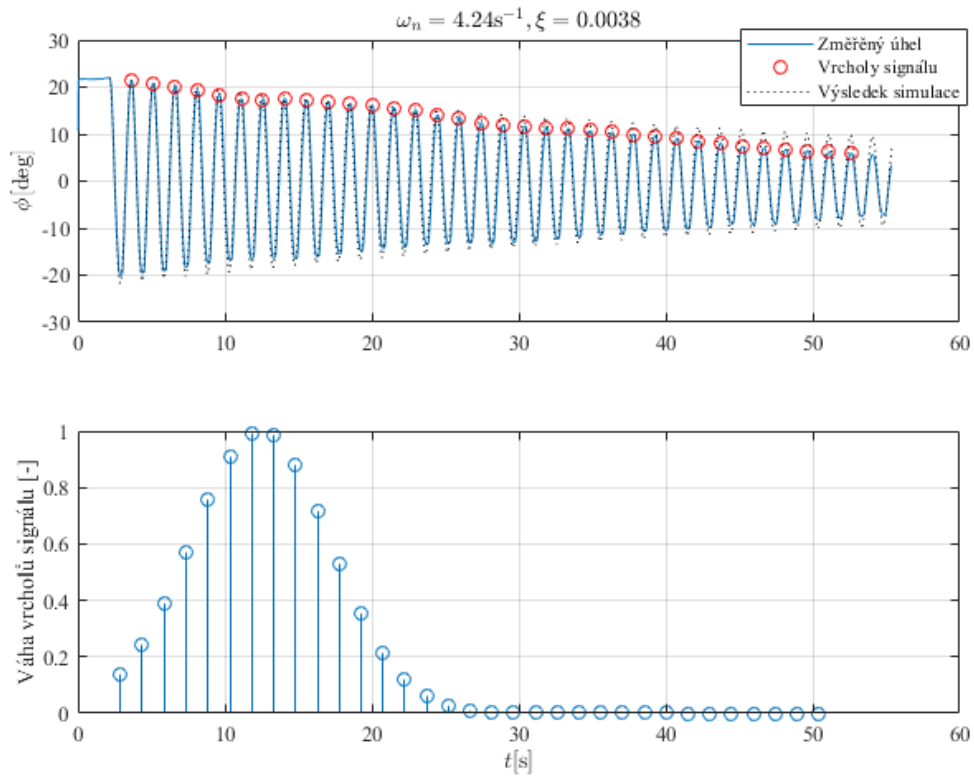
Obr. 44: Měření útlumu závaží č.2.



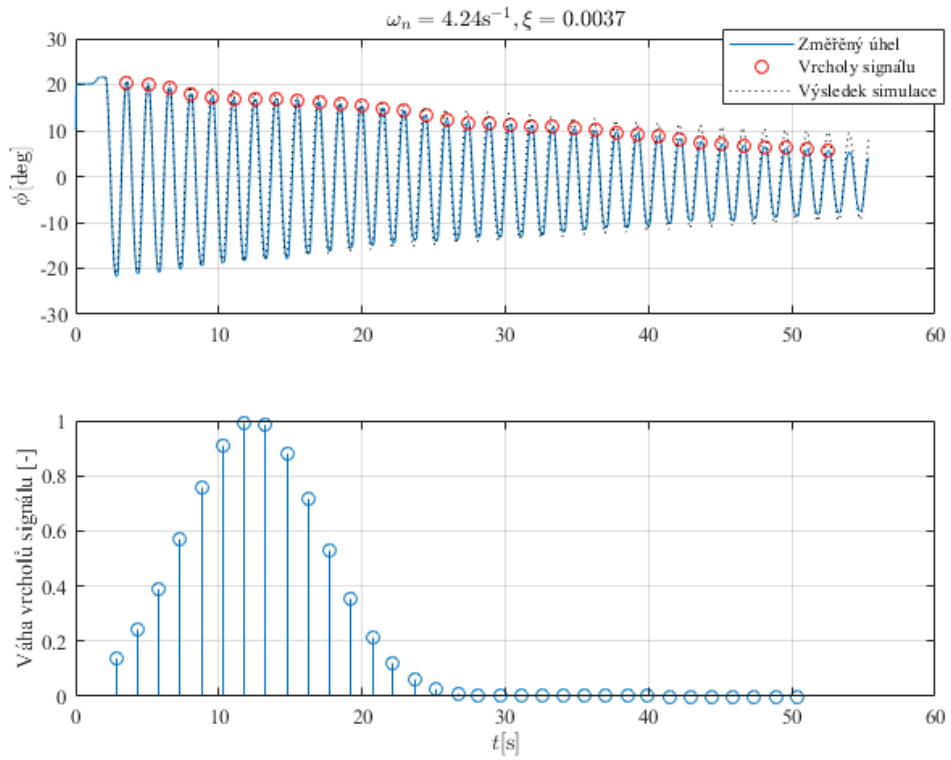
Obr. 45: Měření útlumu závaží č.3.



Obr. 46: Měření útlumu závaží č.4.

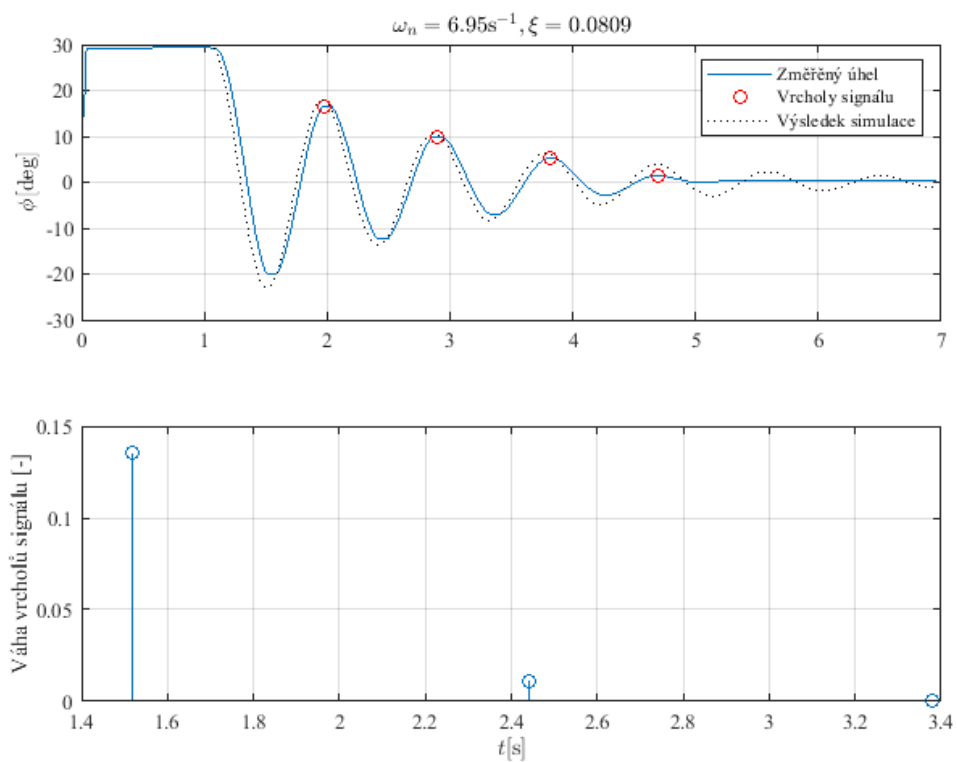


Obr. 47: Měření útlumu závaží č.5.

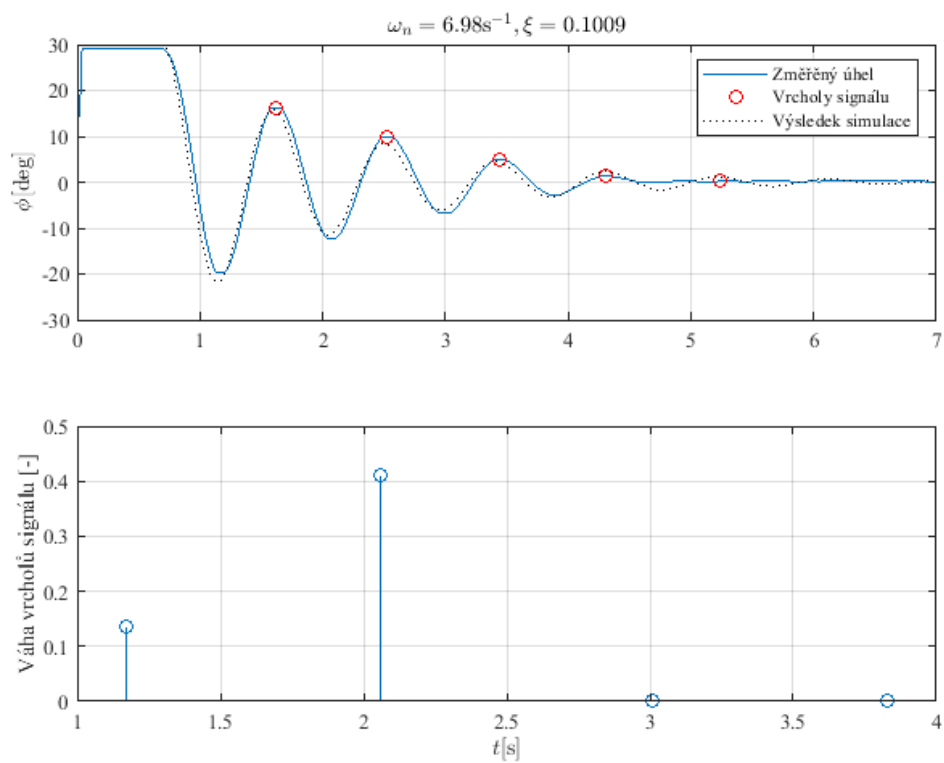


Obr. 48: Měření útlumu závaží č.6.

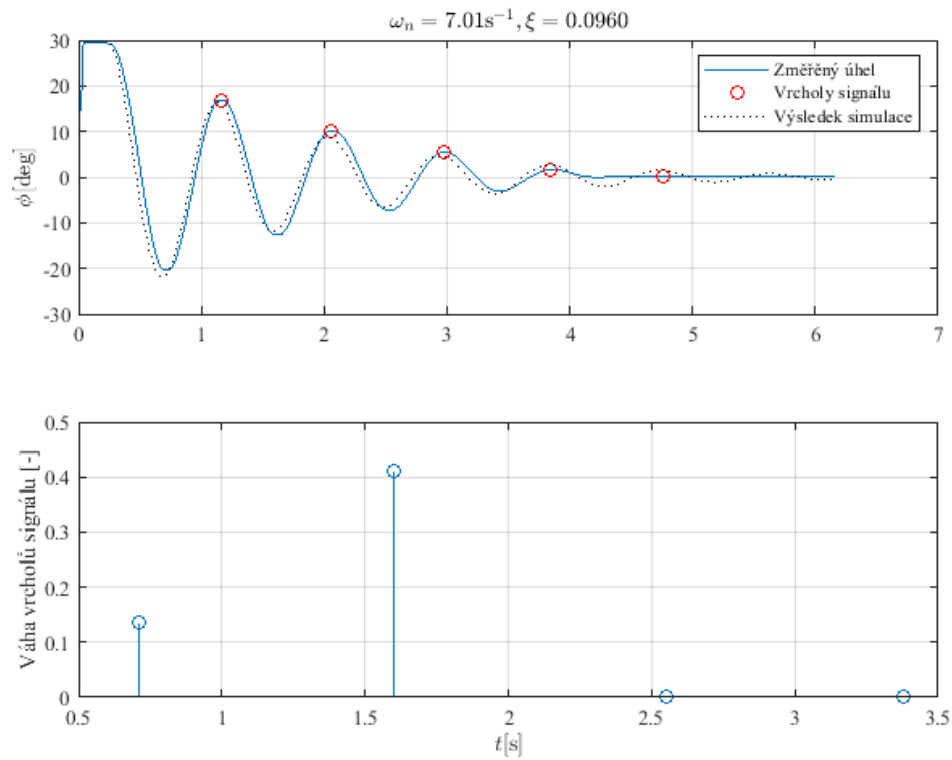
C.b Tlumení ramene s motory



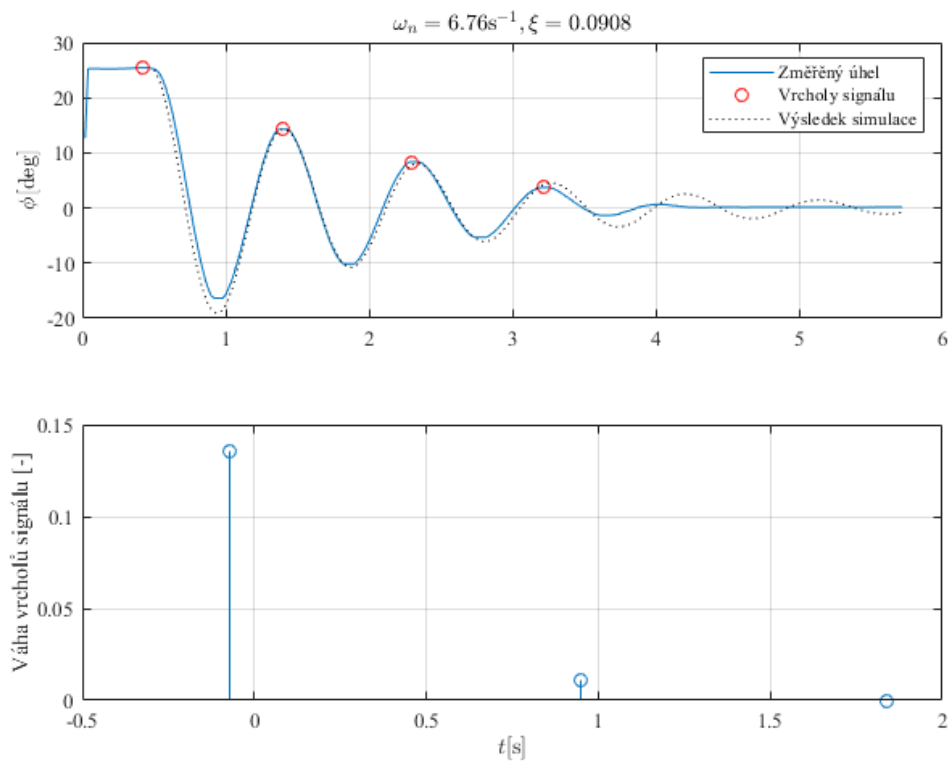
Obr. 49: Měření útlumu ramene s motory č.1.



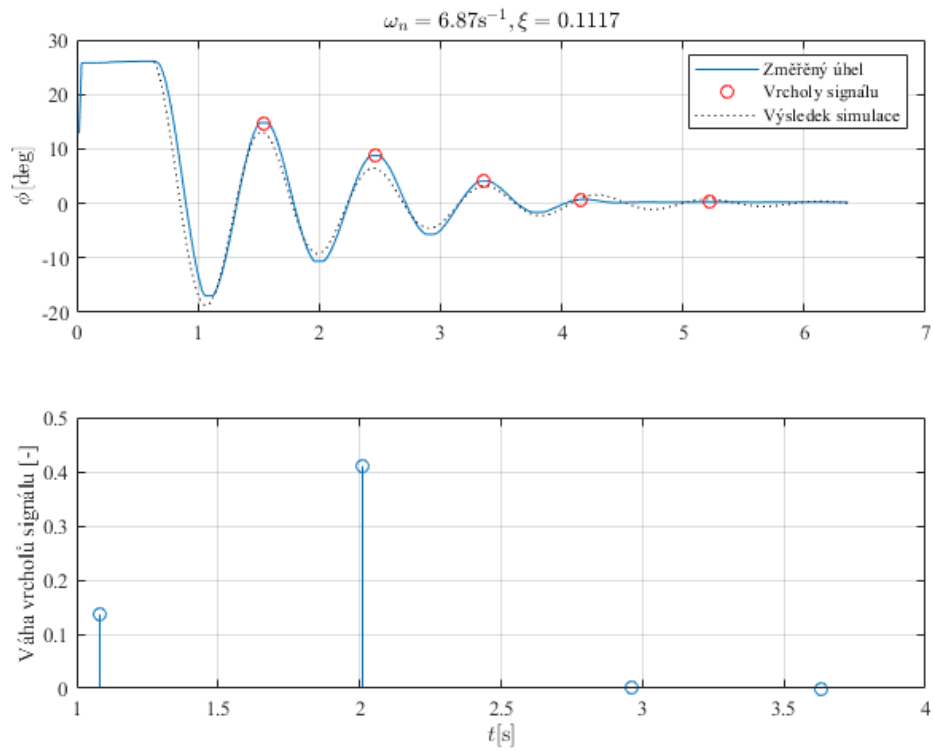
Obr. 50: Měření útlumu ramene s motory č.2.



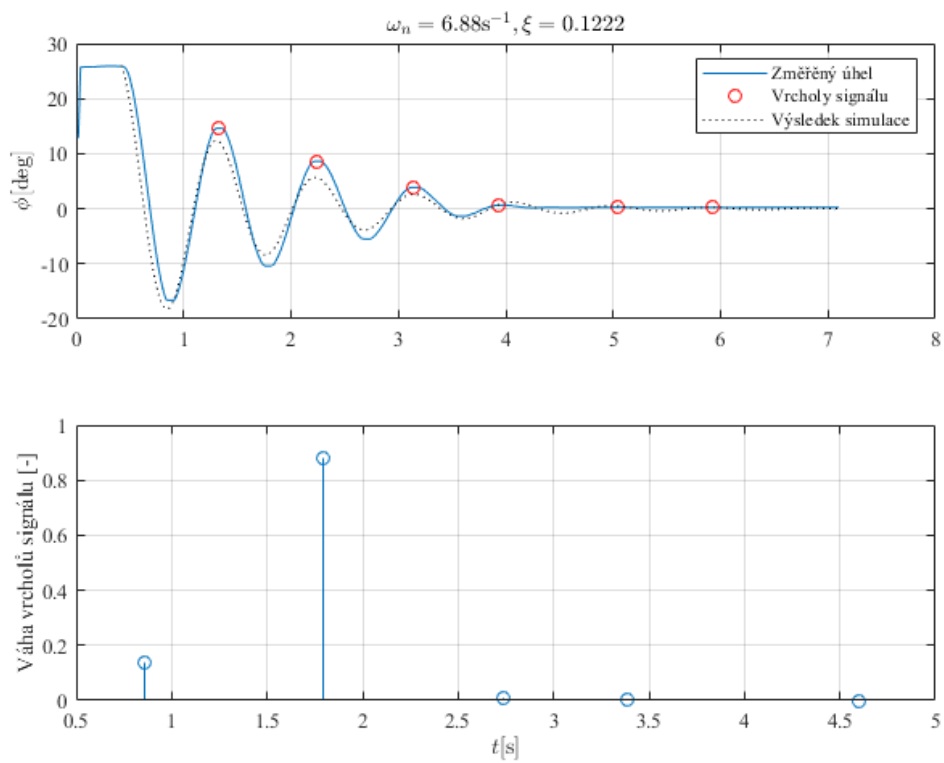
Obr. 51: Měření útlumu ramene s motory č.3.



Obr. 52: Měření útlumu ramene s motory č.4.

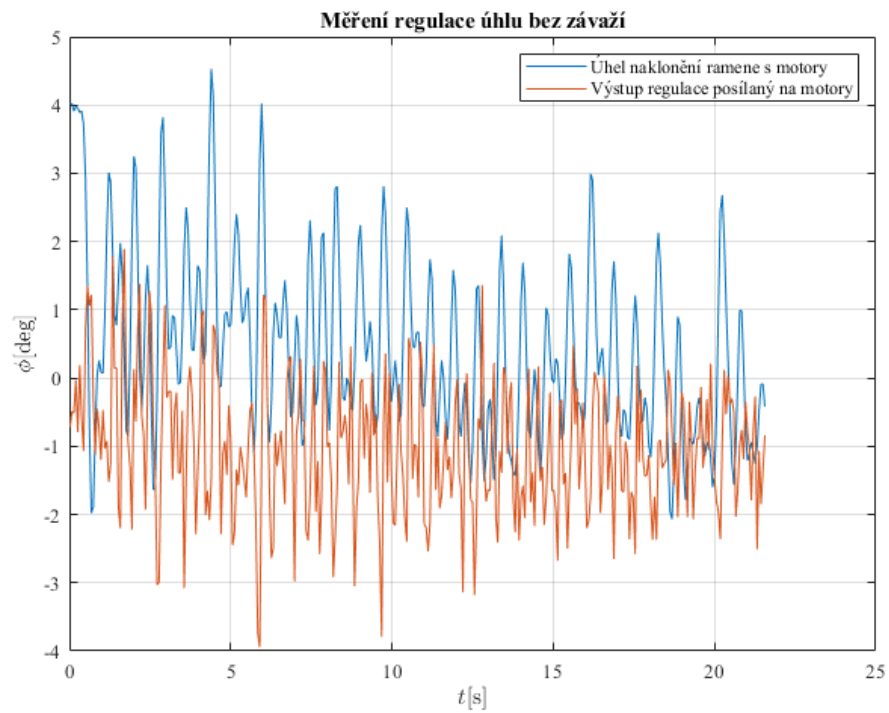


Obr. 53: Měření útlumu ramene s motory č.5.

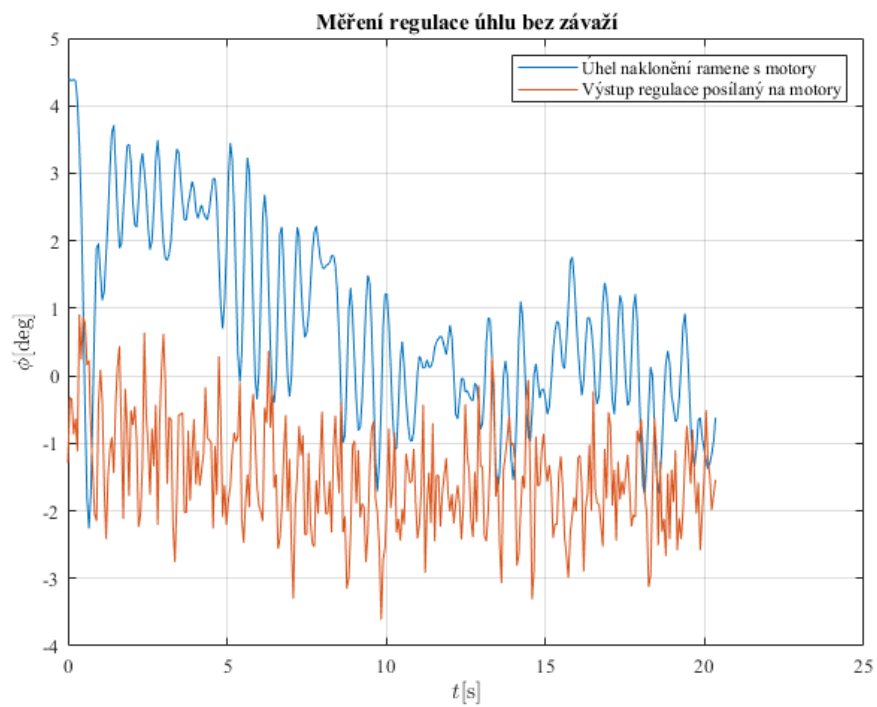


Obr. 54: Měření útlumu ramene s motory č.6.

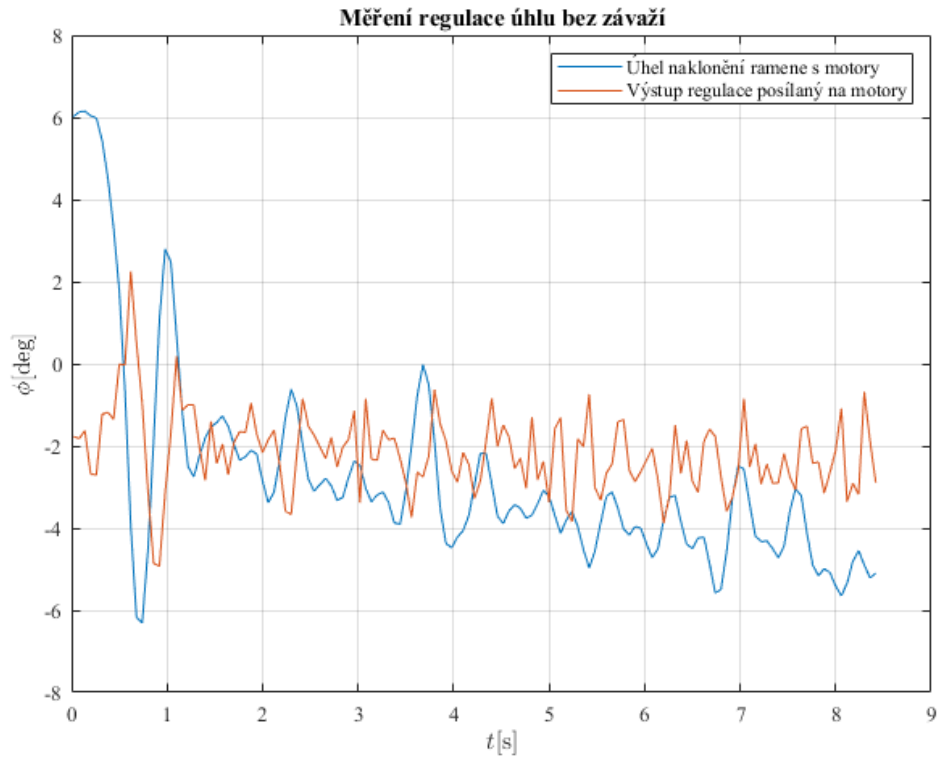
C.c Regulace úhlu bez závaží



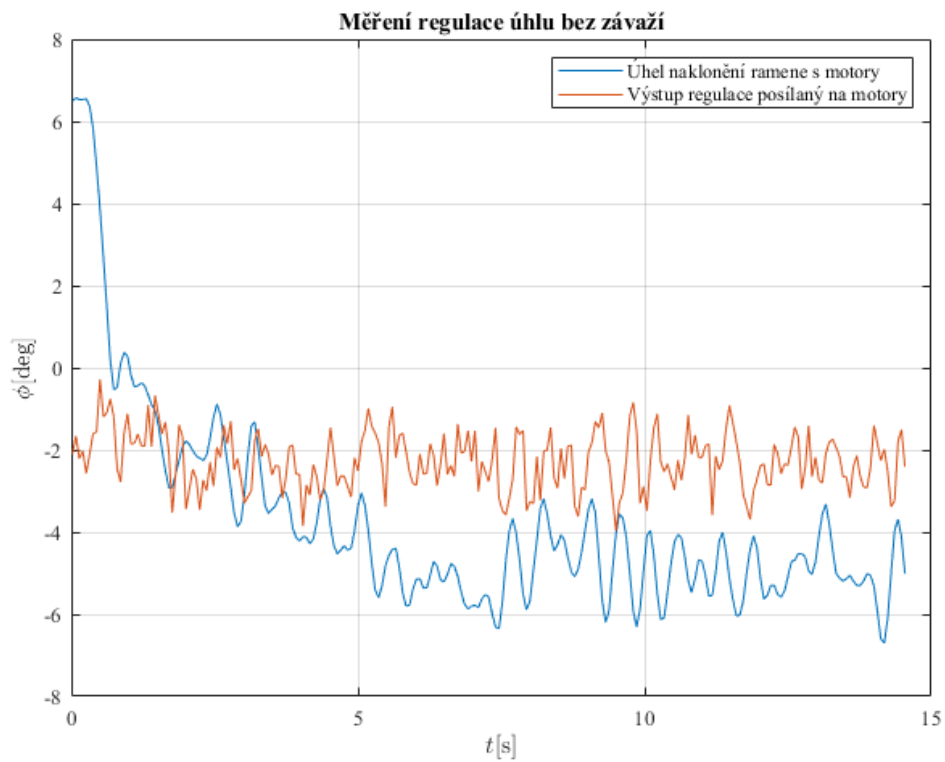
Obr. 55: Regulace úhlu na 0° při výkonu 50j.



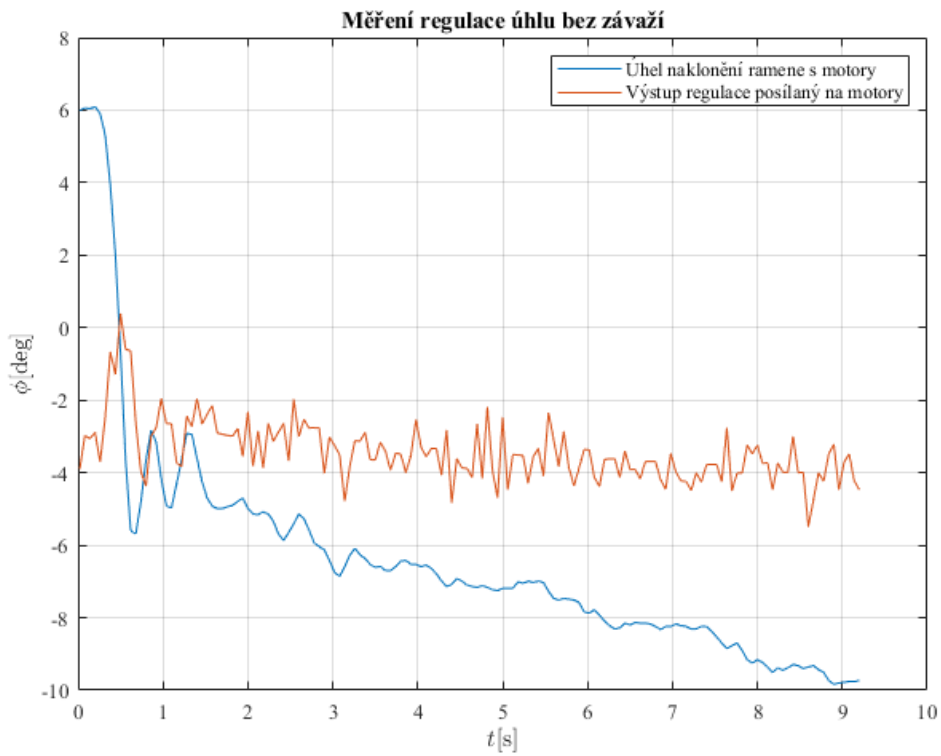
Obr. 56: Regulace úhlu na 0° při výkonu 40j.



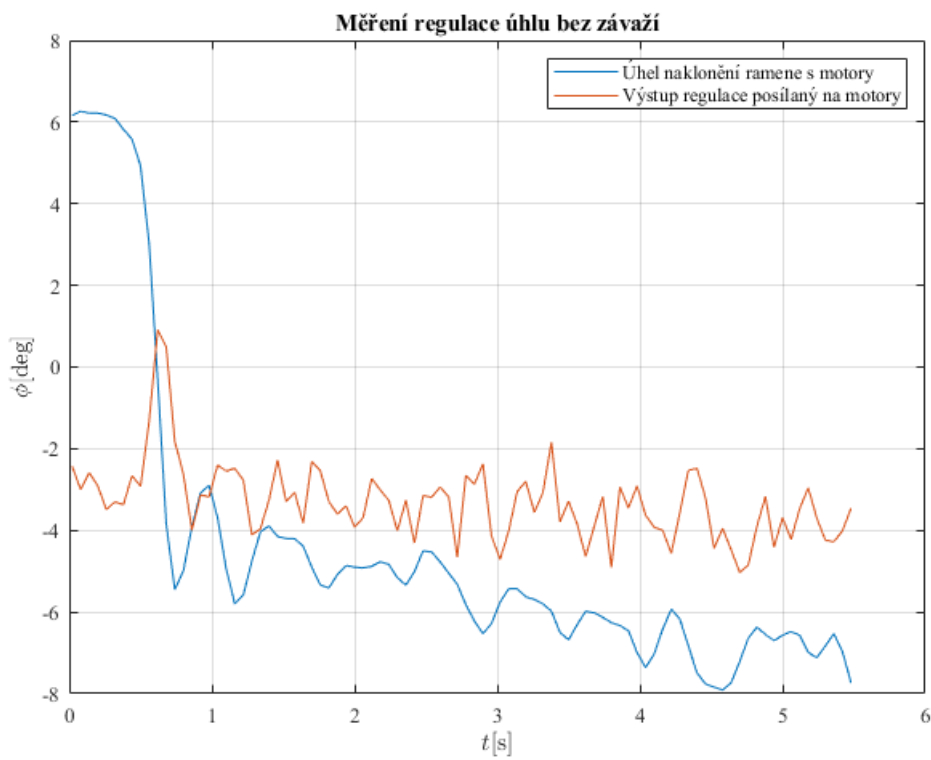
Obr. 57: Regulace úhlu na 5° při výkonu 50j.



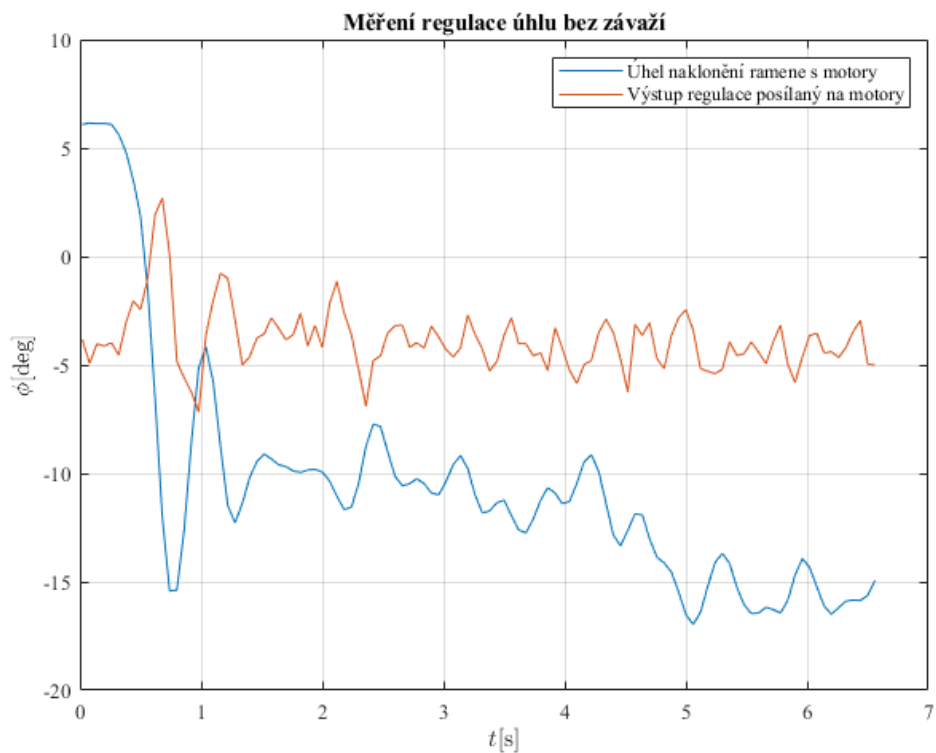
Obr. 58: Regulace úhlu na 5° při výkonu 40j.



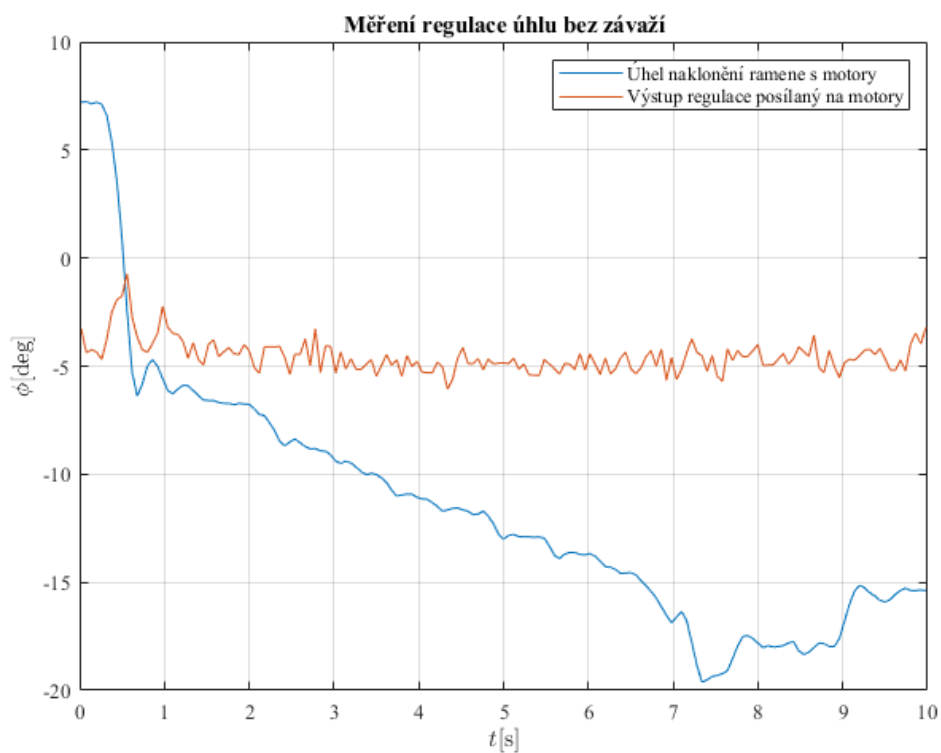
Obr. 59: Regulace úhlu na 10° při výkonu 50j.



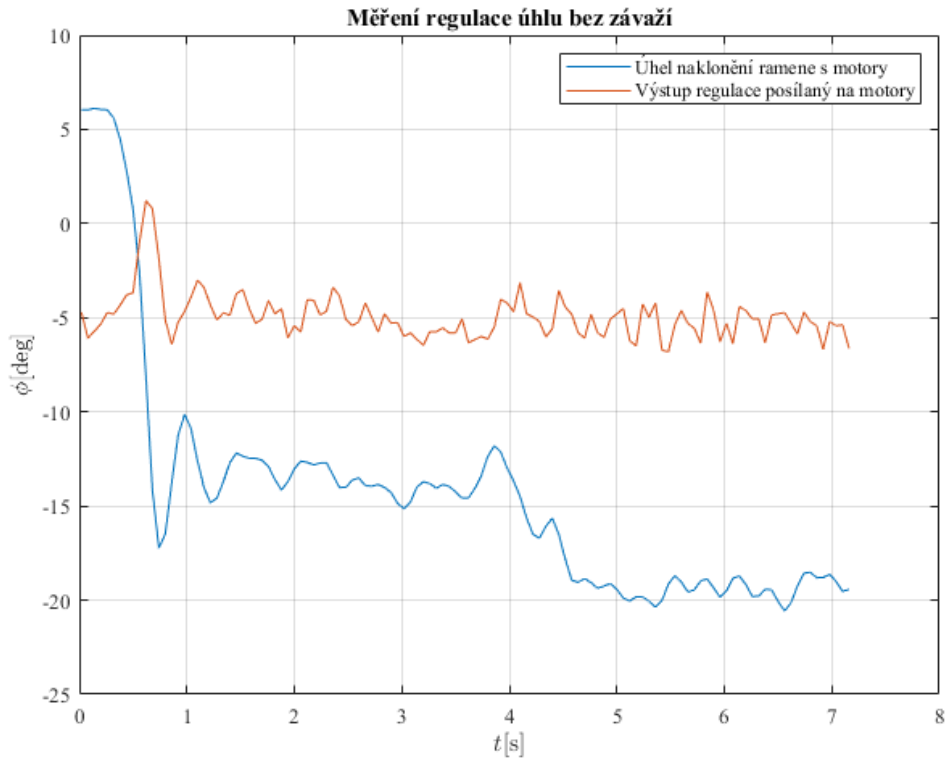
Obr. 60: Regulace úhlu na 10° při výkonu 40j.



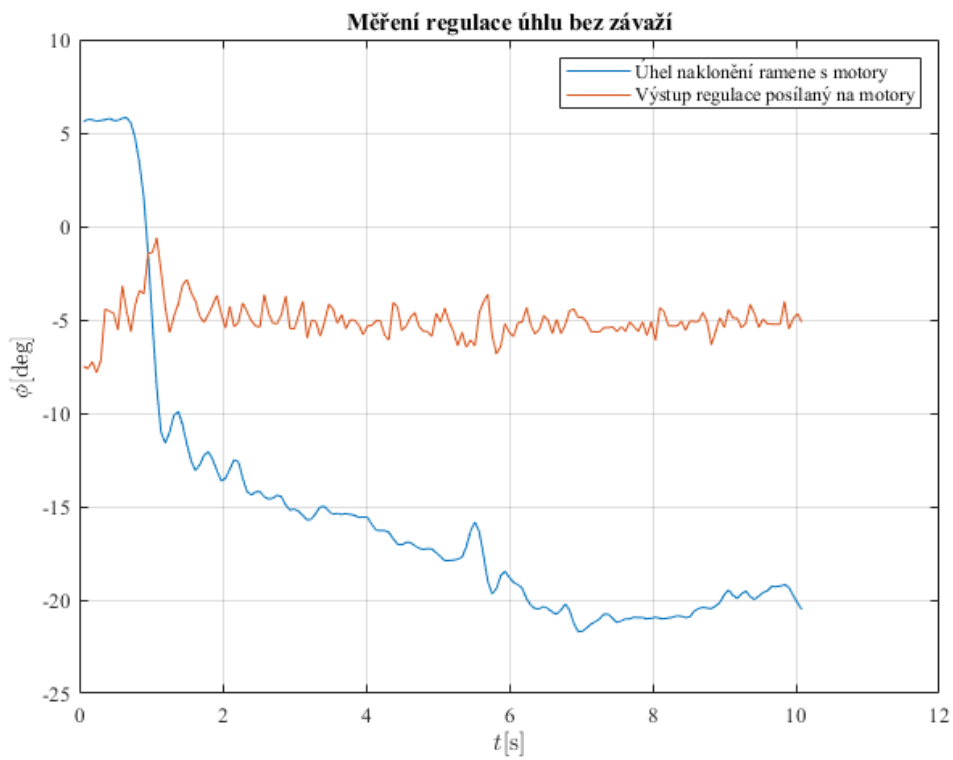
Obr. 61: Regulace úhlu na 15° při výkonu 50j.



Obr. 62: Regulace úhlu na 15° při výkonu 40j.

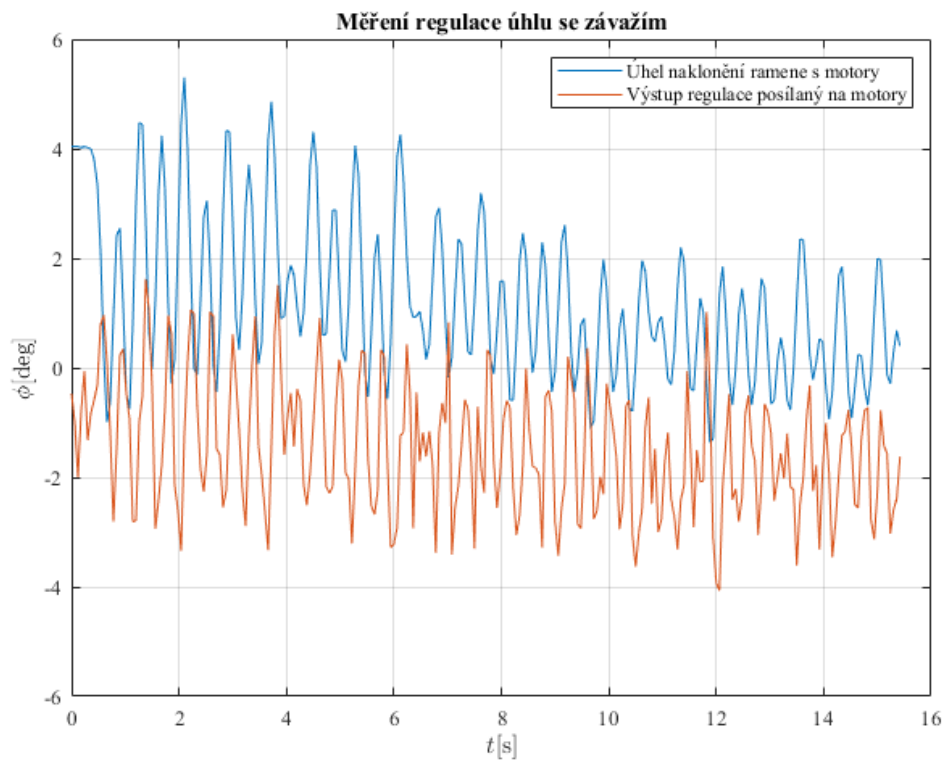


Obr. 63: Regulace úhlu na 20° při výkonu 50j.

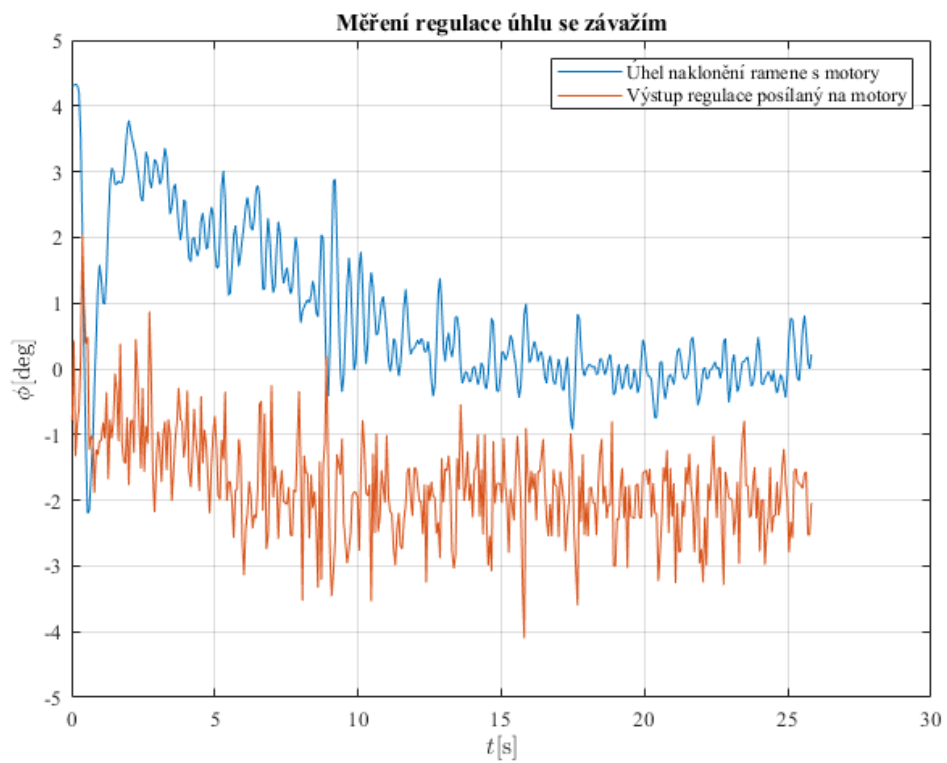


Obr. 64: Regulace úhlu na 20° při výkonu 40j.

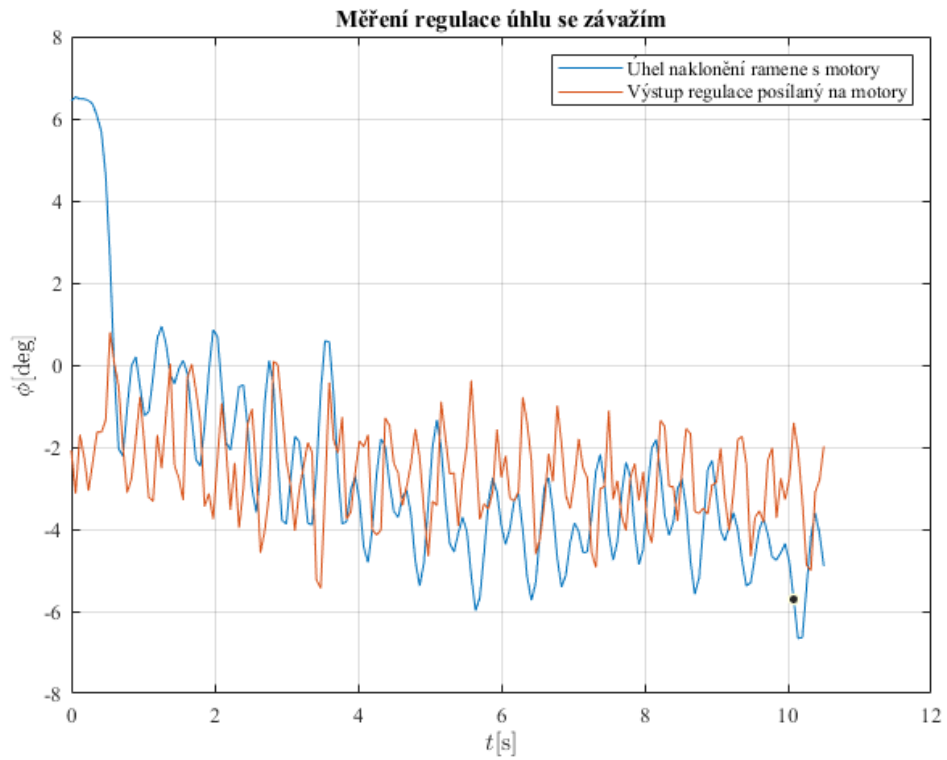
C.d Regulace úhlu se závažím



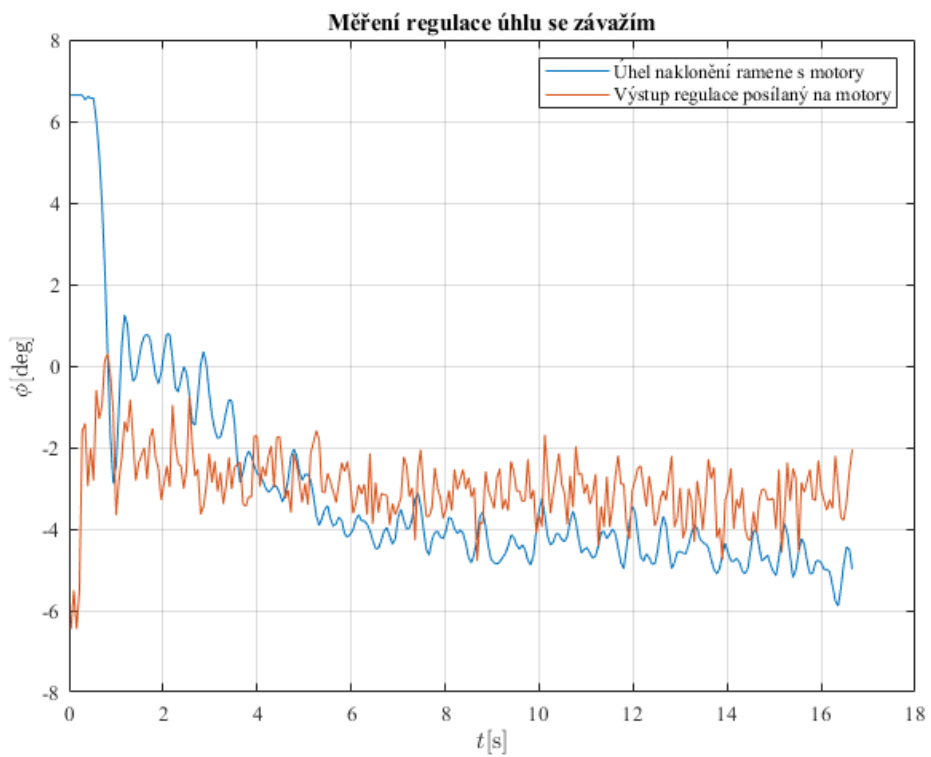
Obr. 65: Regulace úhlu na 0° při výkonu 50j.



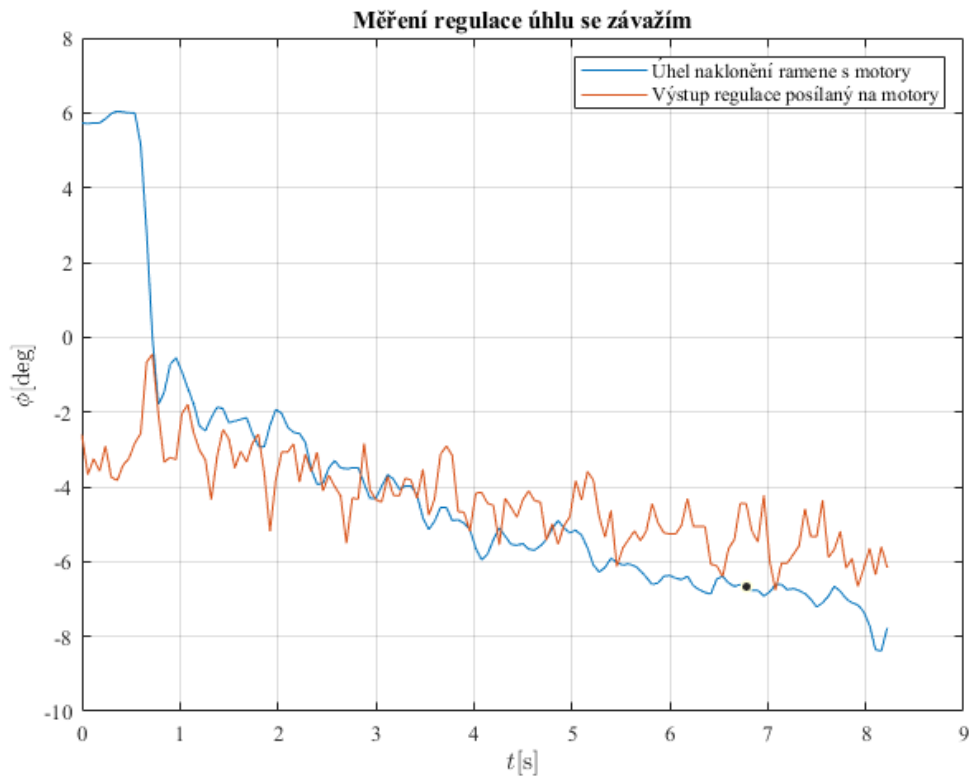
Obr. 66: Regulace úhlu na 0° při výkonu 40j.



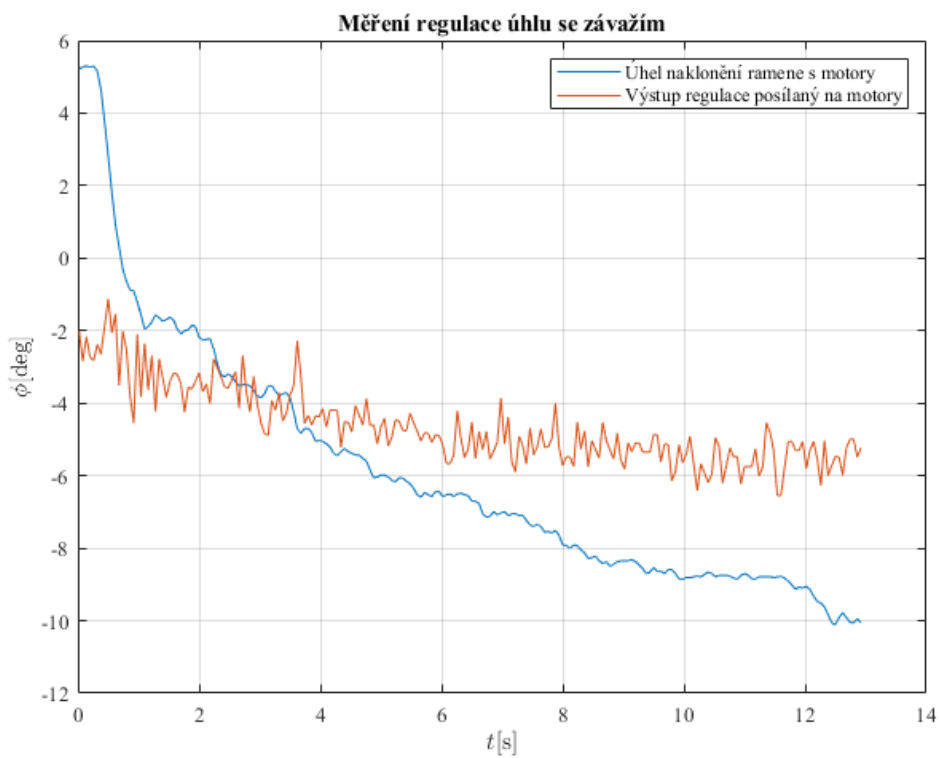
Obr. 67: Regulace úhlu na 5° při výkonu 50j.



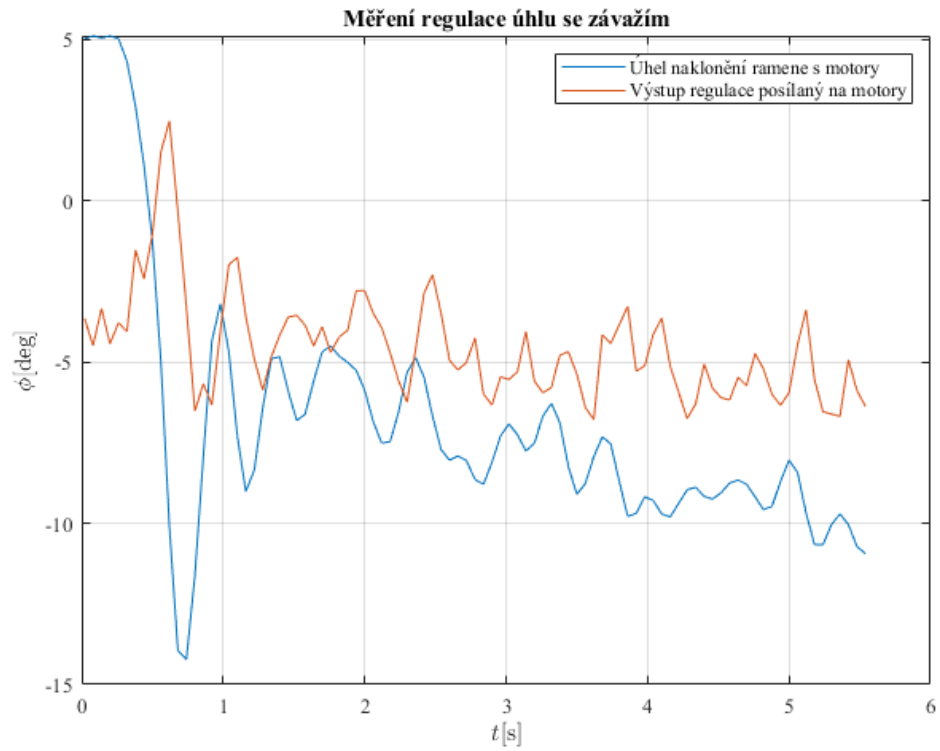
Obr. 68: Regulace úhlu na 5° při výkonu 40j.



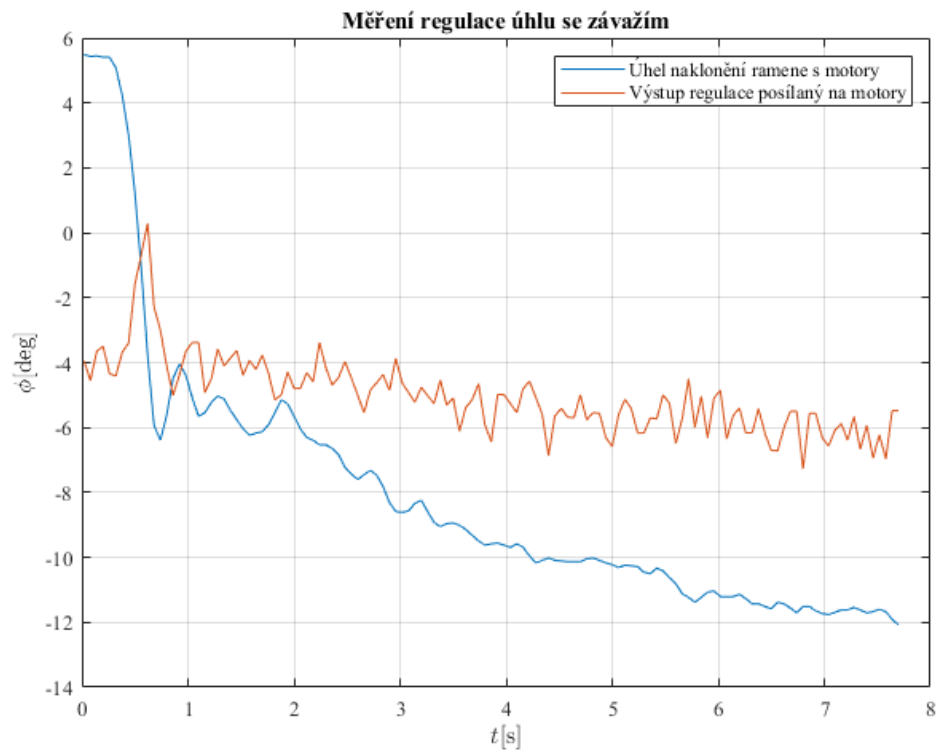
Obr. 69: Regulace úhlu na 10° při výkonu 50j.



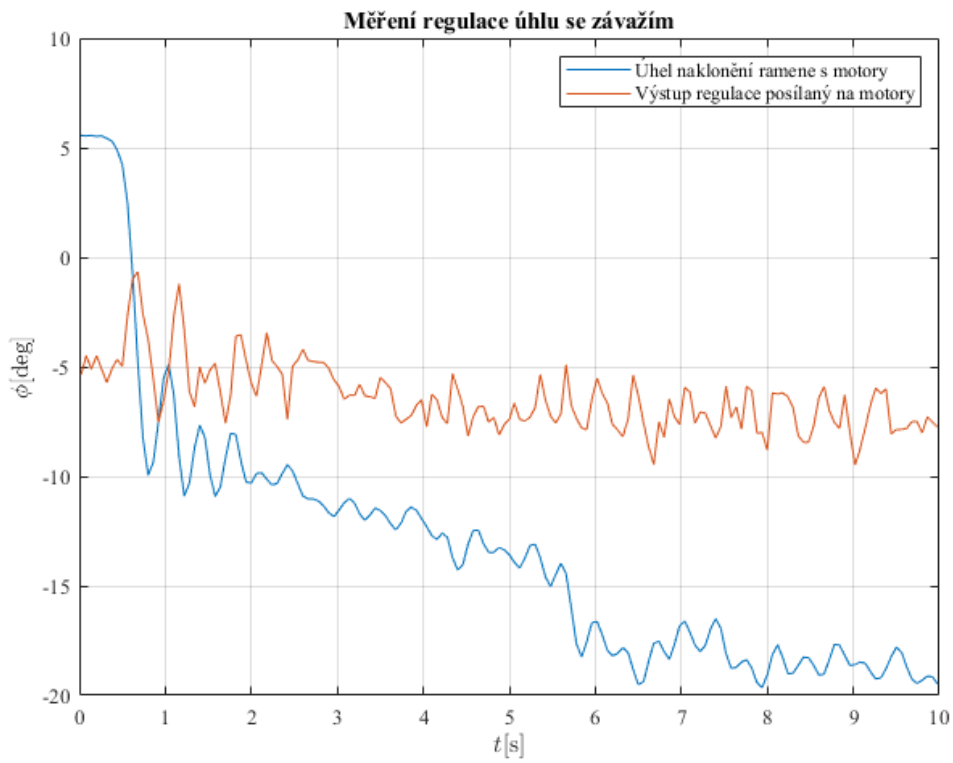
Obr. 70: Regulace úhlu na 10° při výkonu 40j.



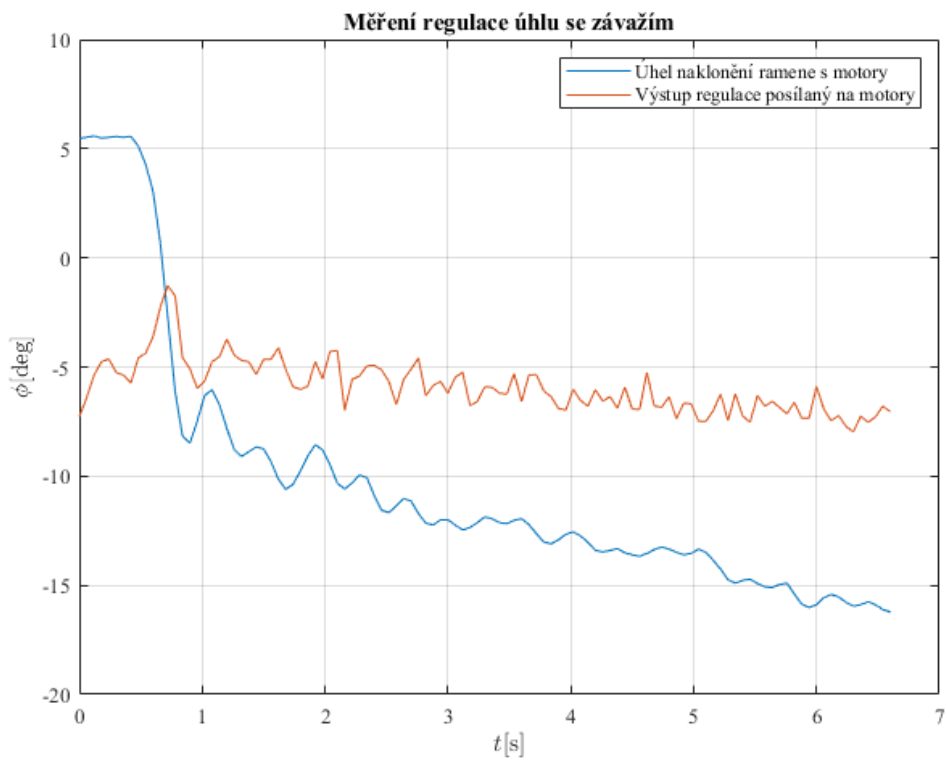
Obr. 71: Regulace úhlu na 15° při výkonu 50j.



Obr. 72: Regulace úhlu na 15° při výkonu 40j.

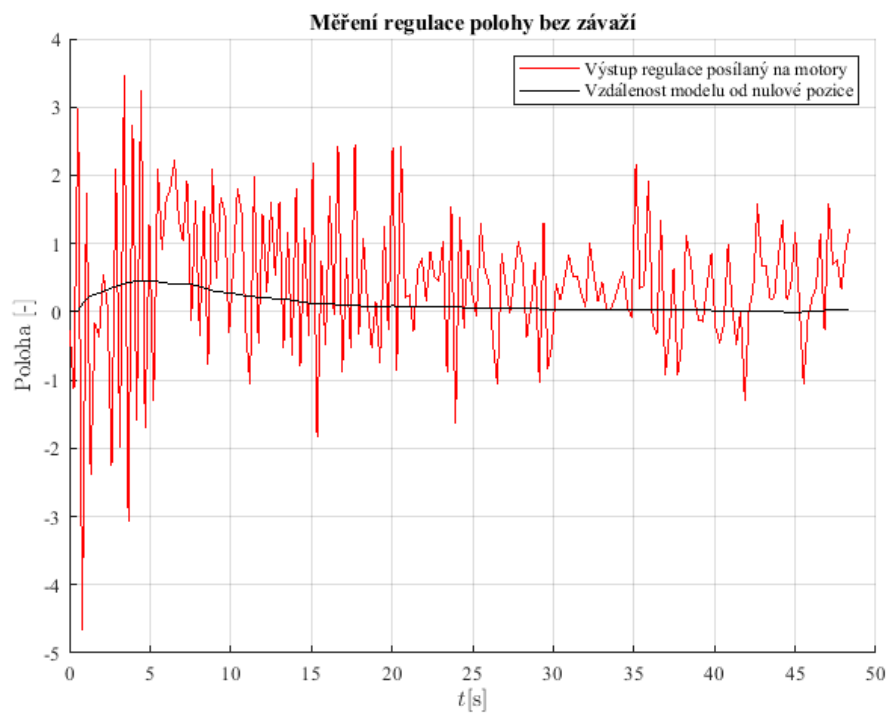


Obr. 73: Regulace úhlu na 20° při výkonu 50j.

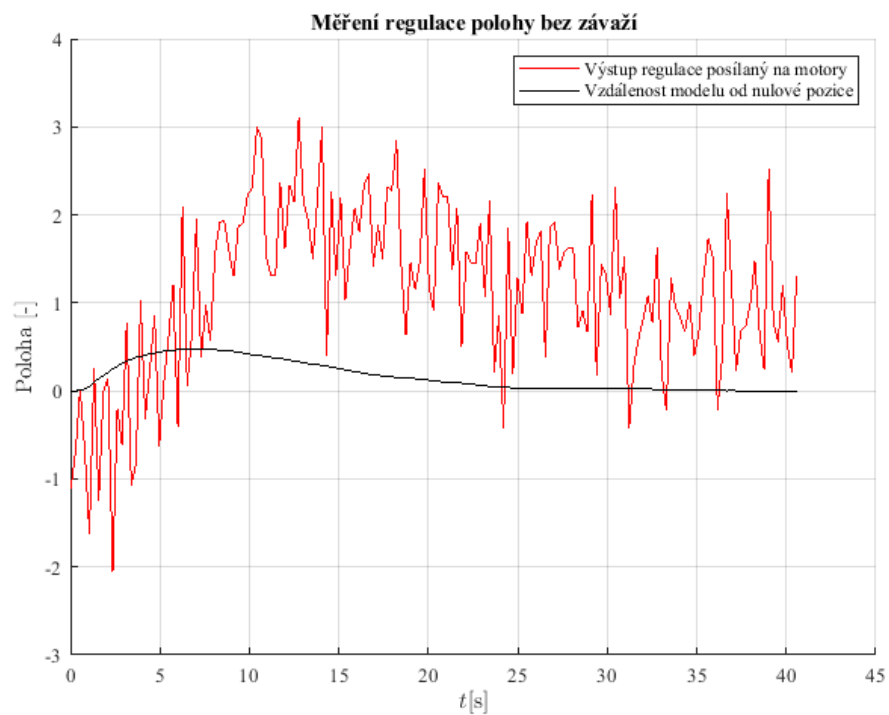


Obr. 74: Regulace úhlu na 20° při výkonu 40j.

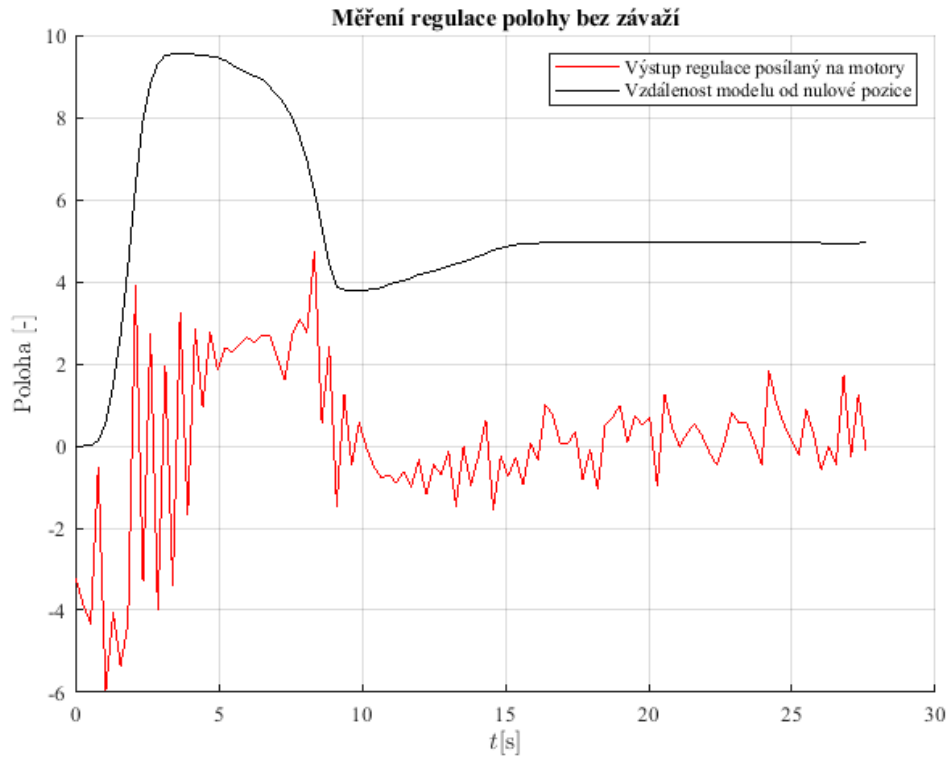
C.e Regulace polohy bez závaží



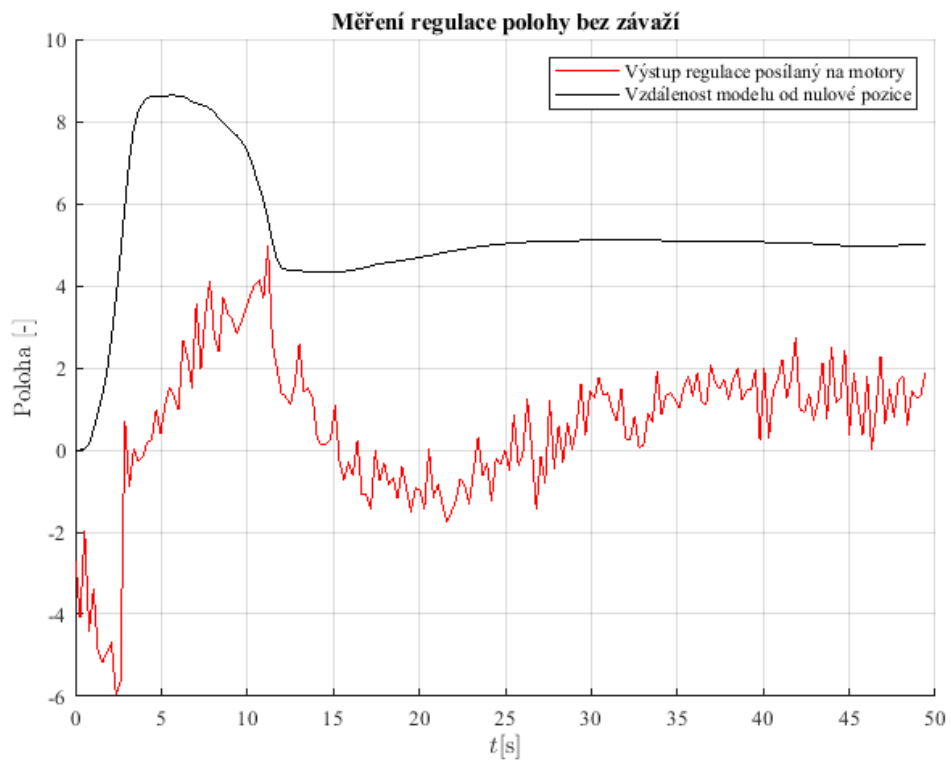
Obr. 75: Regulace polohy na 0j. při výkonu 50j.



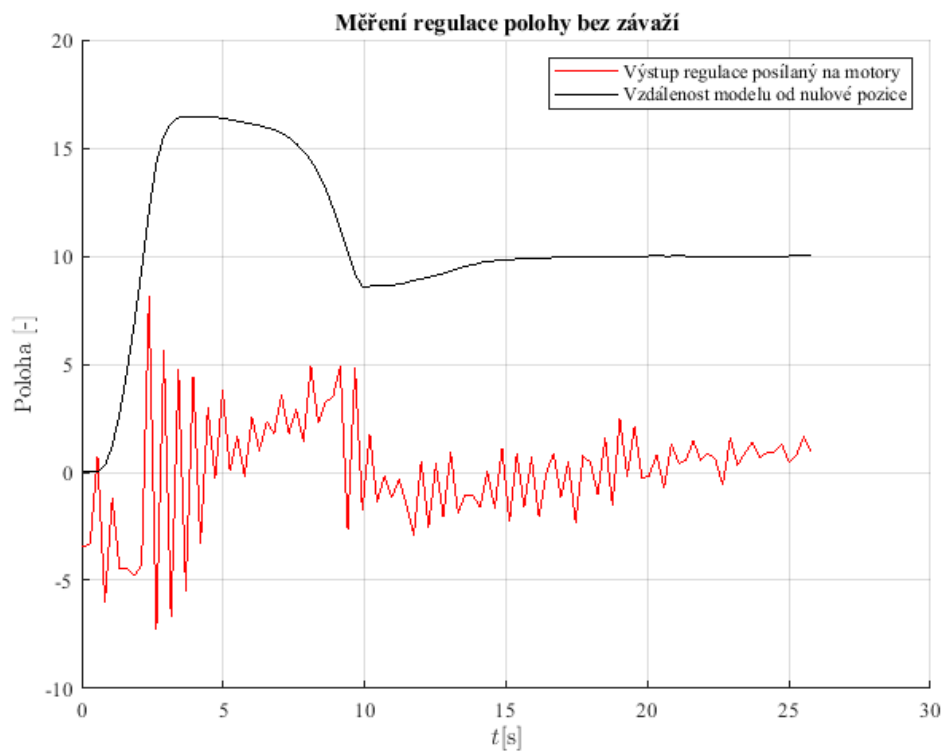
Obr. 76: Regulace polohy na 0j. při výkonu 40j.



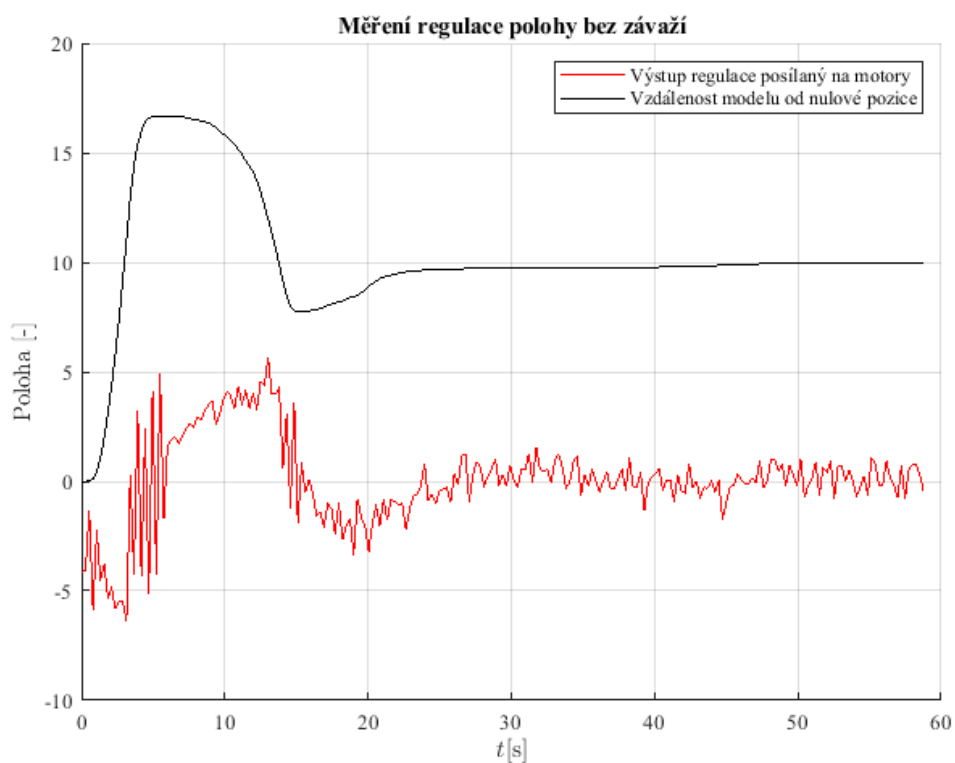
Obr. 77: Regulace polohy na 5j. při výkonu 50j.



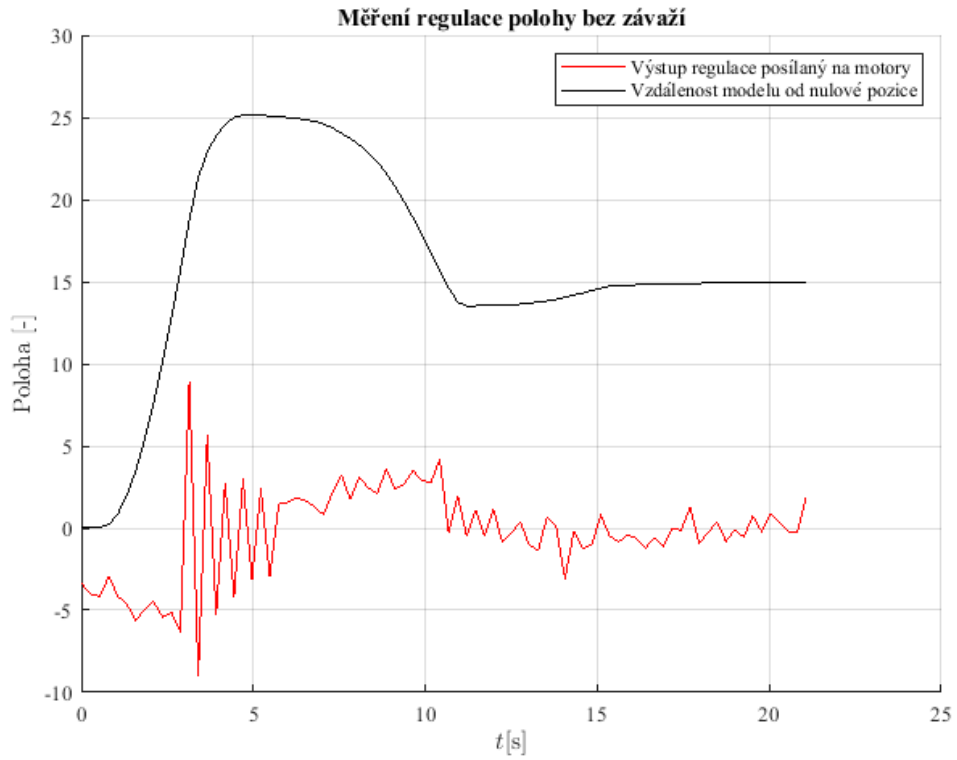
Obr. 78: Regulace polohy na 5j. při výkonu 40j.



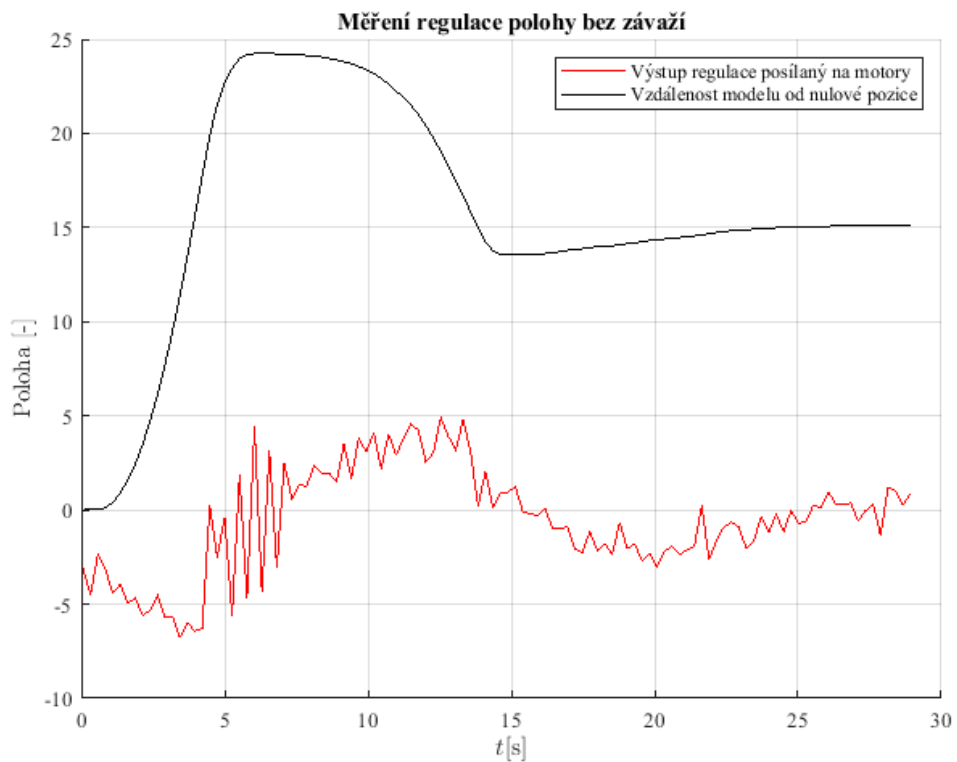
Obr. 79: Regulace polohy na 10j. při výkonu 50j.



Obr. 80: Regulace polohy na 10j. při výkonu 40j.

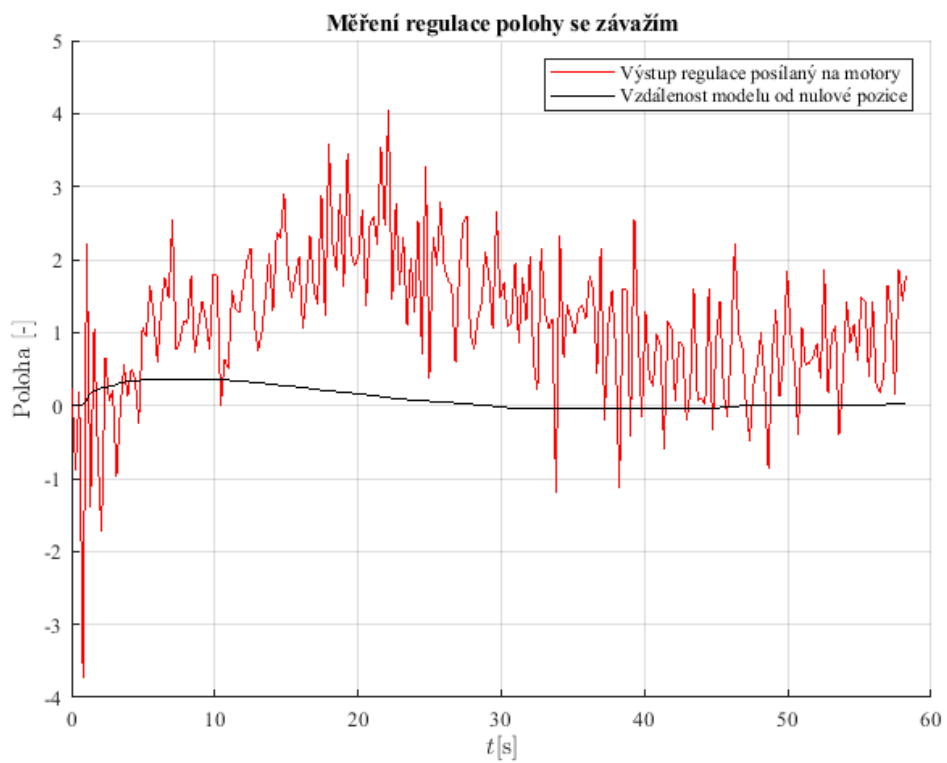


Obr. 81: Regulace polohy na 15j. při výkonu 50j.

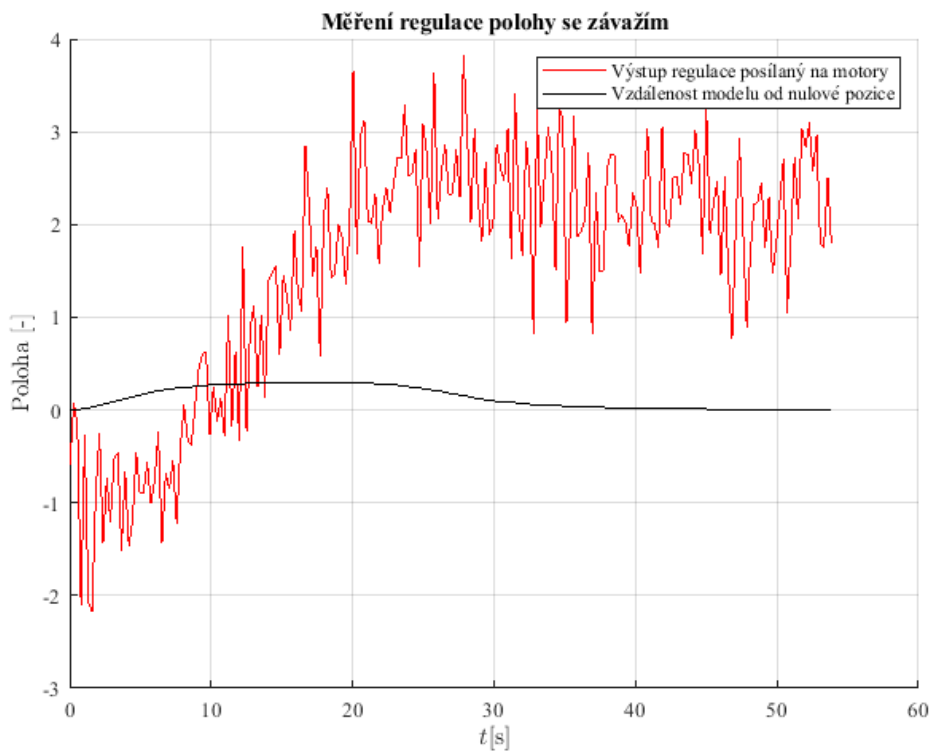


Obr. 82: Regulace polohy na 15j. při výkonu 40j.

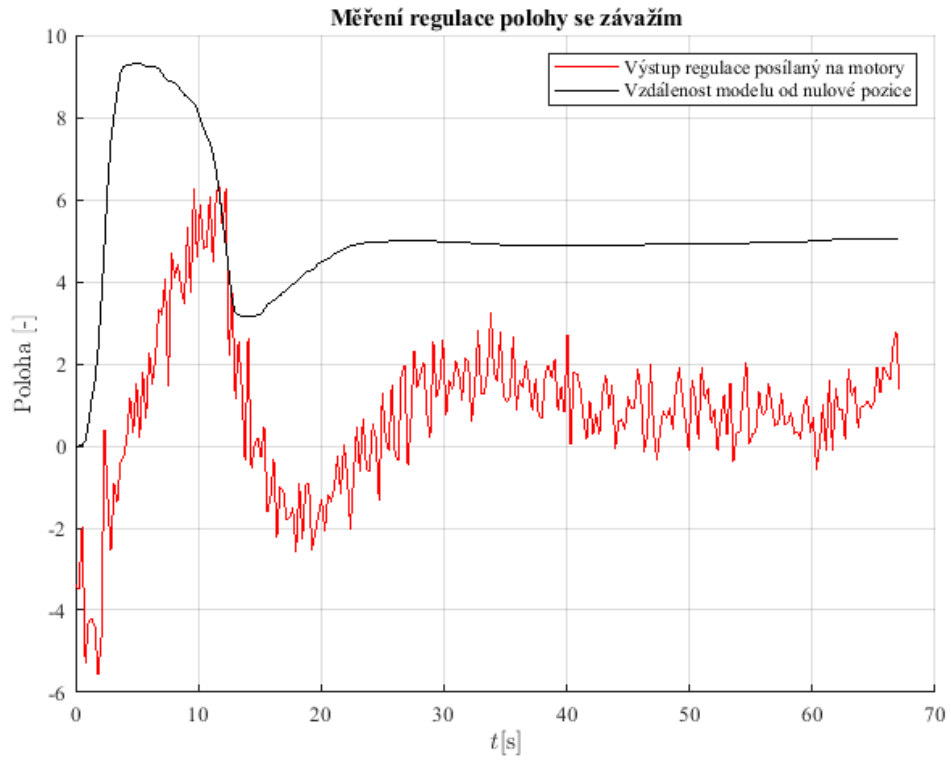
C.f Regulace polohy se závažím



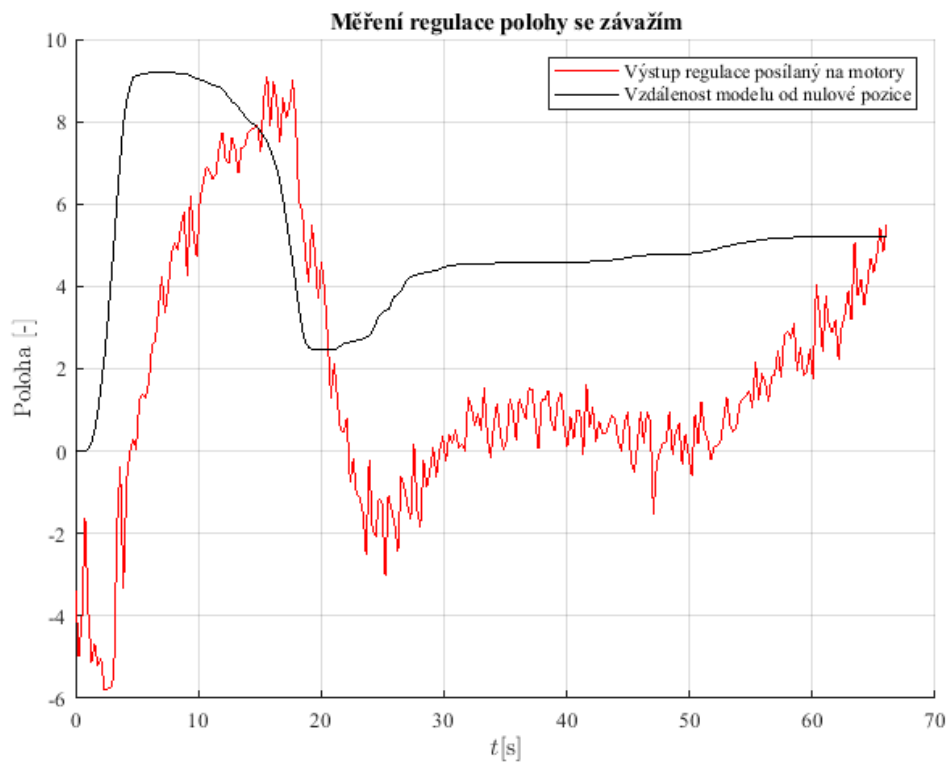
Obr. 83: Regulace polohy na 0j. při výkonu 50j.



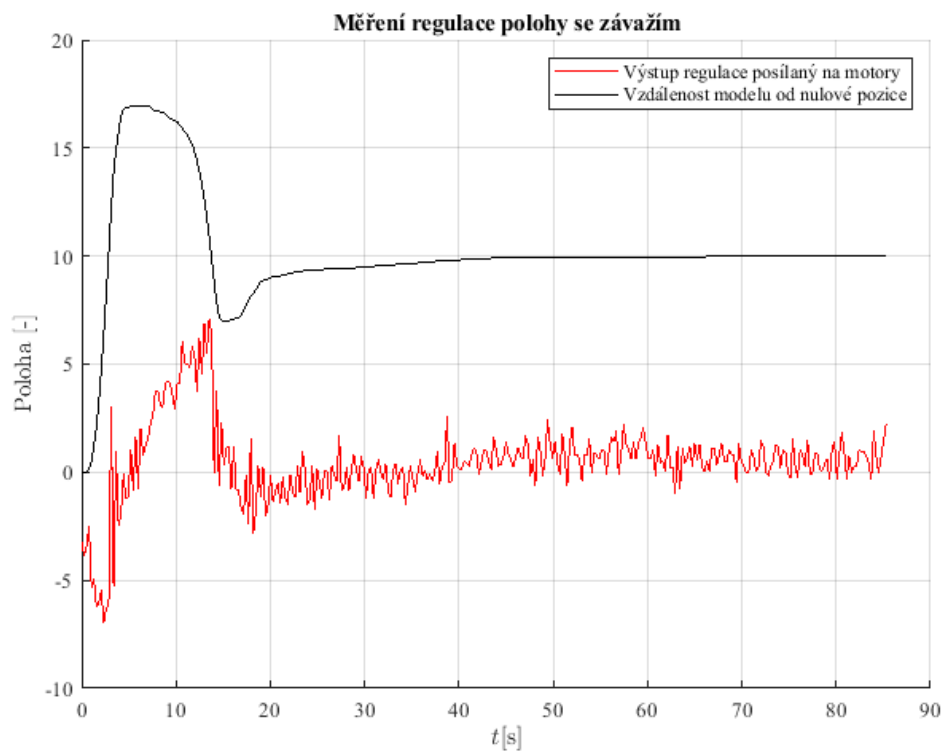
Obr. 84: Regulace polohy na 0j. při výkonu 40j.



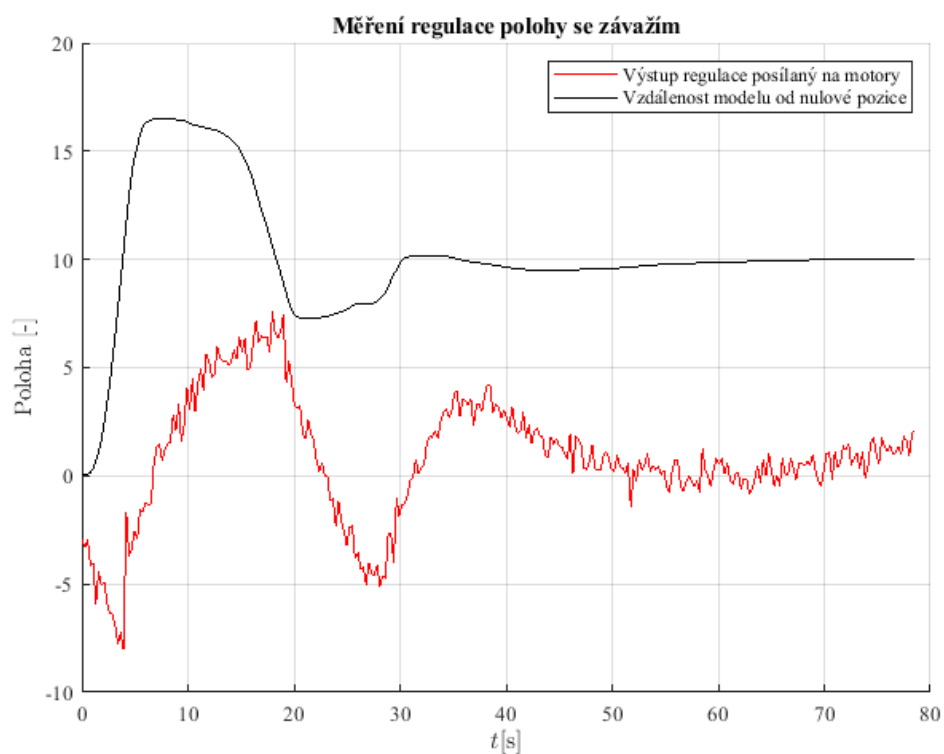
Obr. 85: Regulace polohy na 5j. při výkonu 50j.



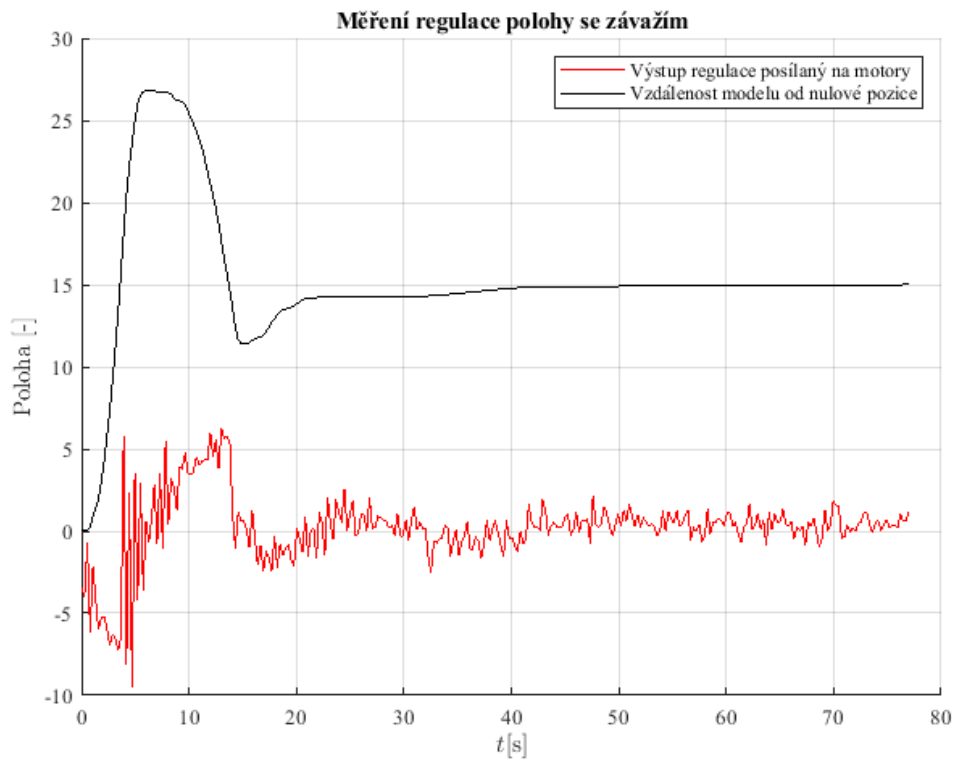
Obr. 86: Regulace polohy na 5j. při výkonu 40j.



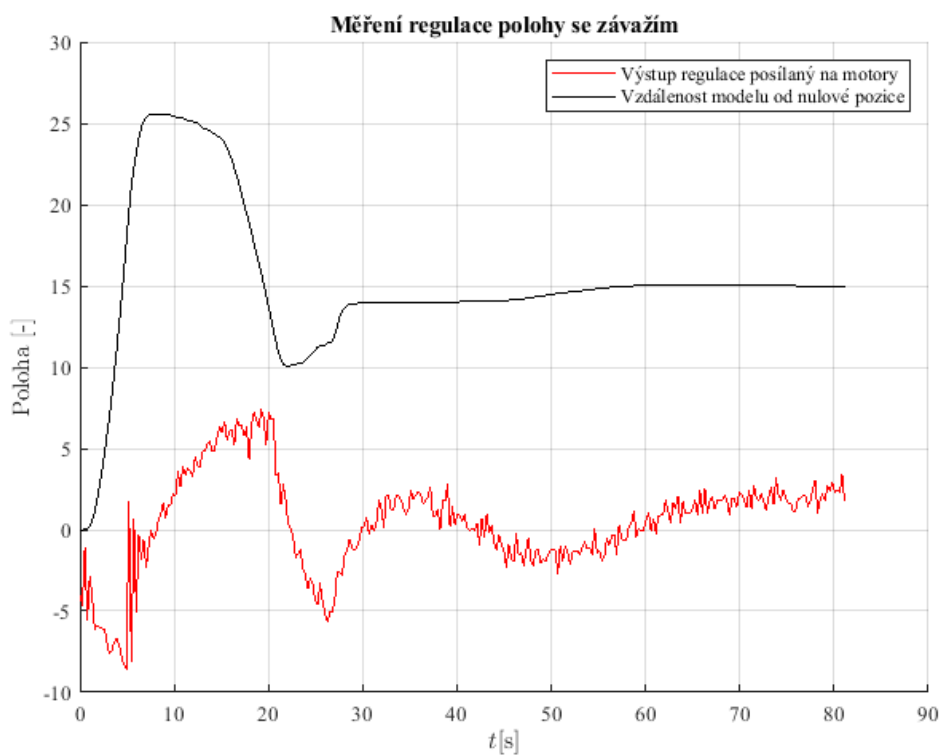
Obr. 87: Regulace polohy na 10j. při výkonu 50j.



Obr. 88: Regulace polohy na 10j. při výkonu 40j.

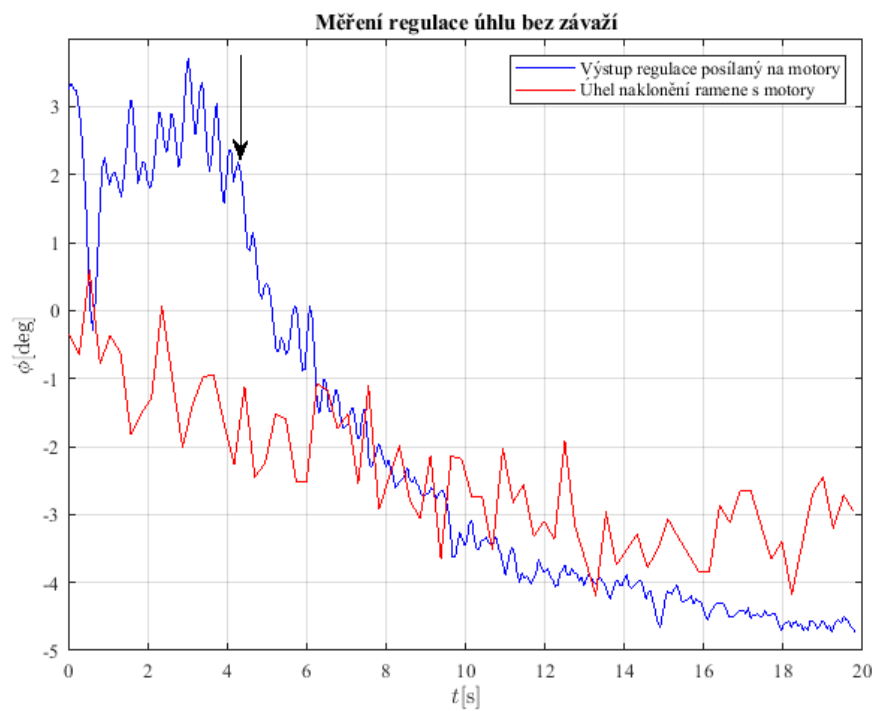


Obr. 89: Regulace polohy na 15j. při výkonu 50j.

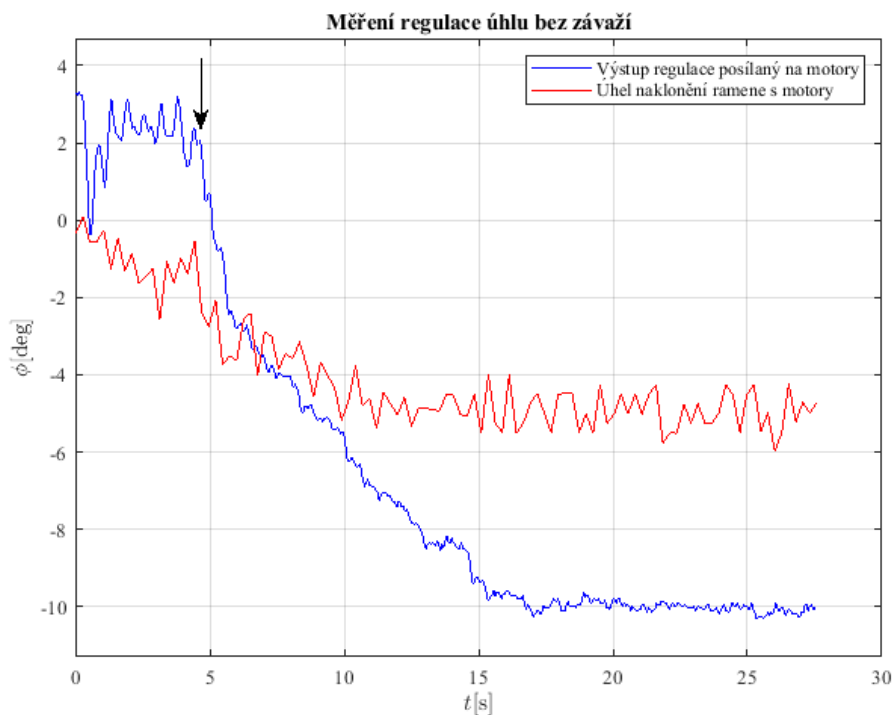


Obr. 90: Regulace polohy na 15j. při výkonu 40j.

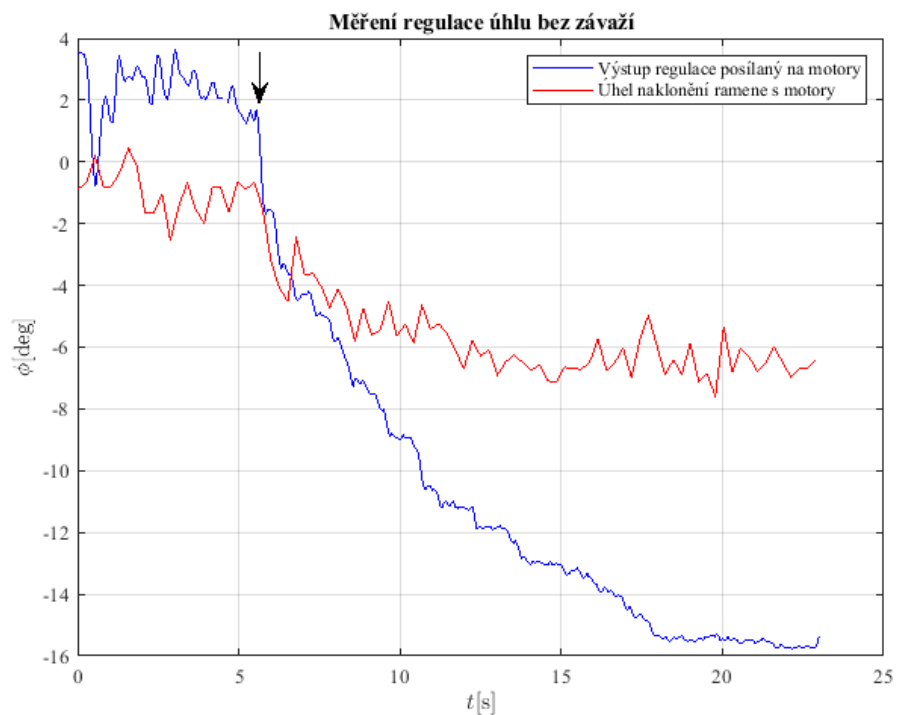
C.g Test zadání požadovaného úhlu přes sériový monitor



Obr. 91: Nastavení úhlu přes sériový monitor na 5° při výkonu 50j.

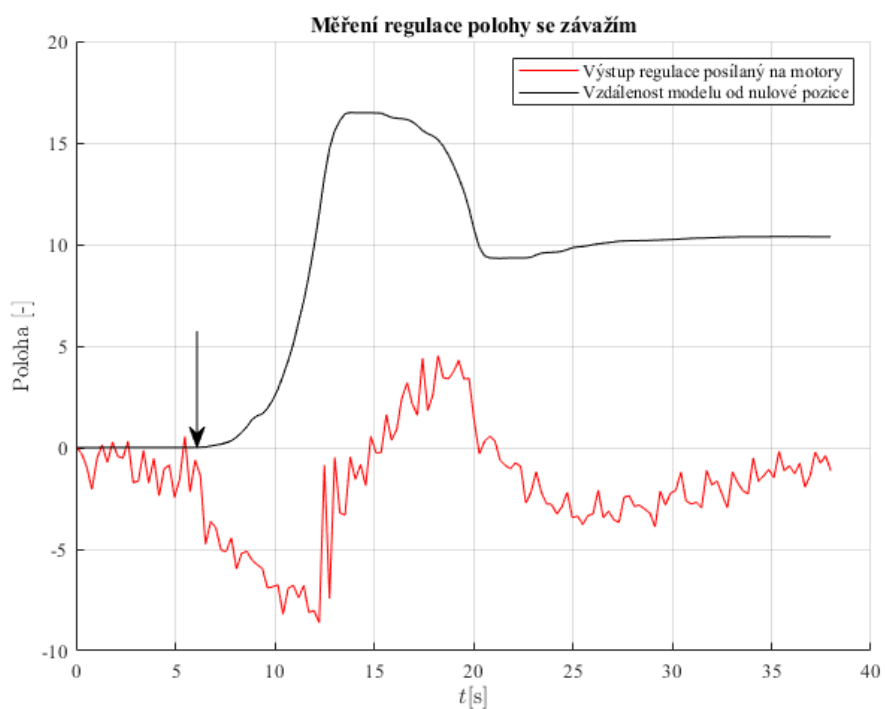


Obr. 92: Nastavení úhlu přes sériový monitor na 10° při výkonu 50j.

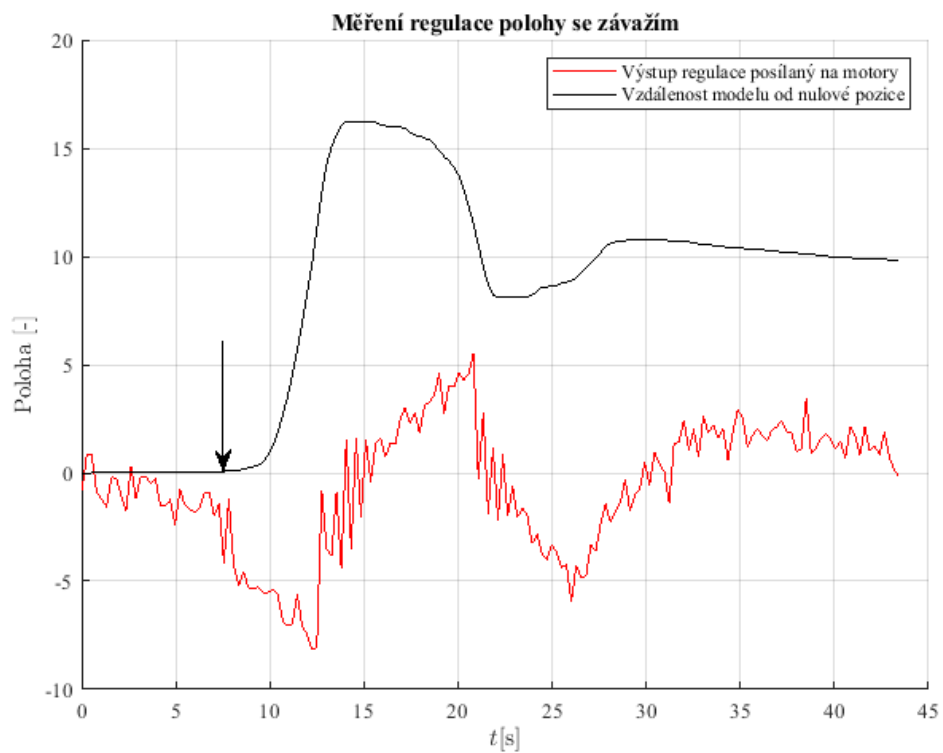


Obr. 93: Nastavení úhlu přes sériový monitor na 15° při výkonu 50j.

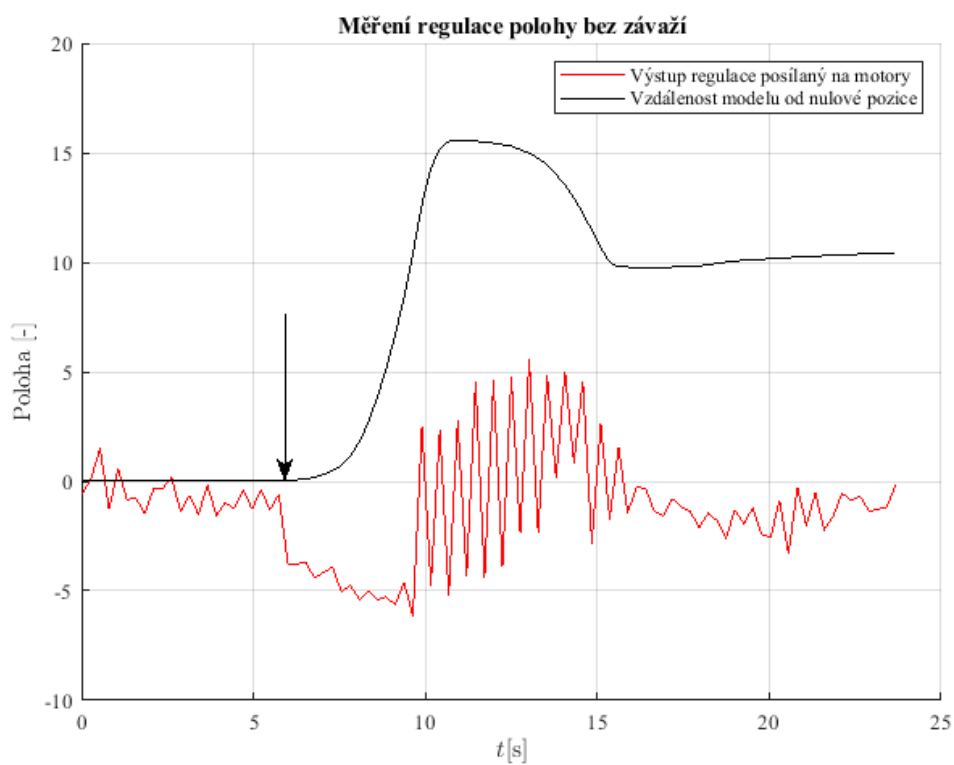
C.h Test zadání požadované polohy přes sériový monitor



Obr. 94: Nastavení polohy přes sériový monitor na 10j. při výkonu 50j.



Obr. 95: Nastavení polohy přes sériový monitor na 10j. při výkonu 50j.



Obr. 96: Nastavení polohy přes sériový monitor na 10j. při výkonu 40j.