

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**ŘÍZENÍ ROTAČNÍHO INVERZNÍHO KYVADLA
QUANSER QNET**

Radek Mandík

Diplomová práce

2022

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek Mandík**
Osobní číslo: **I19298**
Studijní program: **N0714A150005 Automatické řízení**
Studijní obor: **Automatické řízení**
Téma práce: **Řízení rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cíl: Cílem práce je navrhnout a realizovat řídicí systém laboratorního systému – modulární soustavy Quanser QNET 2.0 Rotary Pendulum osazené v základně pro měření a ovládání NI ELVIS II+.

Teoretická část: Rešerše problematiky týkající se programování v grafickém programovacím jazyce G a tvorby aplikací v LabVIEW s využitím Control Design and Simulation Module. Vytvoření matematického modelu soustavy. Návrh regulátoru zvolené struktury a nalezení jeho optimálních parametrů.

Implementační část: Tvorba simulačních schémat a souvisejících aplikací pro měření a řízení laboratorního systému v prostředí Matlab & Simulink a v grafickém programovacím jazyce G a ověření jejich činnosti.

Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. 2005. Modern Control Systems. 10 vyd. New Jersey: Prentice Hall. 881 s. ISBN 0-13-127765-0.
VLACH, J.; HAVLÍČEK, J.; VLACH, M. 2008. Začínáme s LabVIEW. Praha: BEN – technická literatura. 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
BALÁTĚ, J. 2004. Automatické řízení. 2 vyd. Praha: BEN – technická literatura. 663 s. ISBN 80-7300-148-9.
MACHÁČEK, J. 2015. Pokročilé metody řízení procesů. Pardubice: Univerzita Pardubice. 164 s. ISBN 978-80-7395-937-1.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libor Kupka, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **6. listopadu 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2021**



L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji:

Práci s názvem Řízení rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 19. 8. 2022

Radek Mandík

Poděkování

Rád bych poděloval vedoucímu diplomové práce Ing. Liboru Kupkovi, Ph.D. za vedení práce, ochotný přístup, rady a připomínky ke zpracování.

V Pardubicích dne 19. 8. 2022

Radek Mandík

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací řídicího systému laboratorní soustavy rotačního inverzního kyvadla v prostředí LabVIEW s využitím simulačních nástrojů Control Design and Simulation Module. V práci je vytvořen matematický model rotačního inverzního kyvadla, na základě modelu je navržen regulátor. Znalosti soustavy jsou implementovány na řízení laboratorní soustavy. Chod aplikace je otestován a je provedeno kontrolní měření na laboratorní soustavě.

KLÍČOVÁ SLOVA

LabVIEW, Control Design and Simulation Module, rotační inverzní kyvadlo, swing-up, LQ regulátor

TITLE

CONTROL OF ROTARY INVERTED PENDULUM

ANNOTATION

The thesis deals with design and implementation of control system for a rotary inverted pendulum in the LabVIEW environment using simulation tools of Control Design and Simulation Module. A mathematical model of the rotary inverted pendulum is created in the work, based on the model the regulator is designed. System knowledge is implemented to control of the laboratory system. The operation of the application is tested and a control measurements are made on laboratory system.

KEYWORDS

LabVIEW, Control Design and Simulation Module, rotary inverted pendulum, swing-up, LQ regulator

OBSAH

Seznam zkratk a značek	9
Seznam symbolů proměnných veličin a funkcí	10
Seznam ilustrací	12
Seznam tabulek	14
Úvod	15
1 Grafické programování	16
1.1 LabVIEW	16
1.2 Control Design and Simulation Module	18
1.2.1 Simulation	18
1.2.2 Control Design	19
1.2.3 System Identification	20
1.2.4 PID	20
1.2.5 Fuzzy Logic	21
2 Inverzní kyvadlo	22
2.1 Rotační inverzní kyvadlo	24
2.2 Matematický model rotačního inverzního kyvadla	25
2.2.1 Kinetická energie	25
2.2.2 Potenciální energie	27
2.2.3 Lagrangian	28
3 Návrh regulátorů	31
3.1 Volba regulátoru	31
3.1.1 Návrh Swing-up regulátor	32
3.1.2 LQ regulátor	34
3.2 Simulace	36
4 Řízení rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET	38
4.1 Rotační inverzní kyvadlo Quanser QNET	39
4.2 Aplikace řídicí rotační inverzní kyvadlo Quanser QNET	40
4.2.1 Vývojový diagram aplikace	41
4.2.2 Čelní panel aplikace	42
4.2.3 Blokový diagram aplikace	44
4.3 Řízení laboratorní soustavy rotačního inverzního kyvadla	49
4.3.1 Swing-up regulátor	49

4.3.2	Regulační pochod	51
4.3.3	Odezva na poruchu	53
5	Závěr	55
	Použitá literatura	56
	Přílohy	58

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

CDSim	Control Design and Simulation Module
DAQmx	Data AcQuisition (oblast pořizování dat)
ELVIS	Engineering Laboratory Virtual Instrumentation Suite
Jazyk G	LabVIEW
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LQ	Lineární kvadratický regulátor
NI	National Instruments
PC	Personal Computer (osobní počítač)
PCI	Peripheral Component Interconnect (sběrnice pro připojení periferií)
PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
QNET	Quanser NI Engineering Trainers
SubVI	Subroutine VI
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
VI	Virtual Instrument (virtuálními instrument)

SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

a	zrychlení kyvadla k jeho těžišti
E_K	kinetická energie
E_{KK}	kinetická energie kyvadla
\dot{E}_{KP}	derivace součtu kinetické rotační a potenciální energie kyvadla
E_{KR}	kinetická energie ramene
E_{Krot}	kinetická energie kyvadla při rotaci
E_{Kvx}	kinetická energie kyvadla ve směru osy x
E_{Kvy}	kinetická energie kyvadla ve směru osy y
E_P	potenciální energie
E_{PK}	potenciální energie kyvadla
E_{PR}	potenciální energie ramene
E_r	referenční energie kyvadla
F	váhová matice kritéria
g	gravitační zrychlení
J	kritérium LQ regulátoru
J	moment setrvačnosti
J_K	moment setrvačnosti kyvadla
J_{KT}	moment setrvačnosti kyvadla procházející těžištěm
J_R	moment setrvačnosti ramene
J_T	moment setrvačnosti tělesa procházející těžištěm
K_e	emf konstanta
K_τ	konstanta točivého momentu
L	Lagrangián
L	Vektor zesílení LQ regulátoru
l_l	polovina délky kyvadla
l_k	délka kyvadla
l_r	délka ramene
m	hmotnost tělesa
m_k	hmotnost kyvadla
m_r	hmotnost ramene
q	úhel natočení
\dot{q}	úhlová rychlost

Q	váhová matice kritéria odchylky stavů
Q_i	externí síla
R	váhové matice kritéria akčního zásahu
r_T	vzdálenost osy rotace od těžiště
R_Ω	odpor vinutí servomotoru
sat_{max}	saturace maximální úhlové rychlosti kyvadla
t_0	počáteční stav
t_f	koncový čas
U	napětí
u	vektor vstupních veličin
v_x	rychlost kyvadla ve směru osy x
v_y	rychlost kyvadla ve směru osy y
W	ztráta energie
x	vektor stavových veličin
x_k	poloha kyvadla na ose x
y_k	poloha kyvadla na ose y
α	úhel natočení kyvadla
$\dot{\alpha}$	úhlová rychlost kyvadla
δ	rozdíl úhlů natočení kyvadla α od vzpřímené polohy
θ	úhel natočení ramene
$\dot{\theta}$	úhlová rychlost ramene
μ	zesílení signálu
τ	točivý moment servomotoru

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1.1 – Datový tok	16
Obrázek 1.2 – Čelní panel	17
Obrázek 1.3 – Blokový diagram	17
Obrázek 1.4 – Podknižovny modulu CDSim	18
Obrázek 1.5 – Podknižovna Simulation	19
Obrázek 1.6 – Podknižovna Control Design	19
Obrázek 1.7 – Podknižovna Systém Identification	20
Obrázek 1.8 – Podknižovna PID	20
Obrázek 1.9 – Podknižovna Fuzzy Logic	21
Obrázek 2.1 – Lineární inverzní kyvadlo	22
Obrázek 2.2 – Stabilizace rakety	23
Obrázek 2.3 – Schéma rotačního inverzního kyvadla	24
Obrázek 3.1 – Blokový diagram řízení inverzního kyvadla	31
Obrázek 3.2 – Uchycení kyvadla	33
Obrázek 3.3 – LQ regulátor	35
Obrázek 3.4 – Model soustavy	36
Obrázek 3.5 – Simulovaný regulační pochod	37
Obrázek 4.1 – Laboratorní sestava Quanser QNET 2.0	38
Obrázek 4.2 – Blokový diagram laboratorní sestavy Quanser QNET 2.0	39
Obrázek 4.3 – Měřicí karta NI ELVIS II+	40
Obrázek 4.4 – Vývojový diagram aplikace	41
Obrázek 4.5 – Čelní panel	43
Obrázek 4.6 – Inicializace enkodérů	44
Obrázek 4.7 – Inicializace napěťového výstupu motoru	45
Obrázek 4.8 – Inicializace laboratorní soustavy	45
Obrázek 4.9 – Blokový diagram aplikace	46
Obrázek 4.10 – Přepínací logika	47
Obrázek 4.11 – Swing-up regulátor	48
Obrázek 4.12 – Swing-up regulace průběh napětí	50
Obrázek 4.13 – Swing-up regulace úhly natočení	50
Obrázek 4.14 – Swing-up regulace úhlové rychlosti	51
Obrázek 4.15 – Regulační pochod průběh napětí	51

Obrázek 4.16 – Regulační pochod úhly natočení	52
Obrázek 4.17 – Regulační pochod úhlové rychlosti	52
Obrázek 4.18 – Odezva na poruchu průběh napětí	53
Obrázek 4.19 – Odezva na poruchu úhly natočení	53
Obrázek 4.20 – Odezva na poruchu úhlové rychlosti	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 – Parametry kyvadla	30
---------------------------------------	----

ÚVOD

Úkolem této diplomové práce je vytvoření řídicího systému rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET 2.0 v prostředí LabVIEW. V práci je provedena rešerše grafického vývojového prostředí LabVIEW s důrazem na rozšiřující modul Control Design and Simulation Module. Je vytvořen model rotačního inverzního kyvadla a je navržen regulátor.

Rotační inverzní kyvadlo v literatuře nazývané „Furutovo kyvadlo“, bylo vynalezeno profesorem Katsuhiso Furutou roku 1992 na Tokijském technologickém institutu. Systém rotačního inverzního kyvadla je nelineární podaktuovaný mechanický systém, tato kombinace dává vzniku mnoha zajímavých a složitých řídicích otázek. Mezi případy z praxe použití systému rotačního inverzního kyvadla je například stabilizace letadla při turbulenci či automatickém přistání, udržení humanoidního robota v přímé pozici a mnoho dalších.

Na základě matematicko-fyzikální analýzy pohybových rovnic rotačního inverzního kyvadla je vytvořen matematický model systému. Je proveden návrh regulátoru soustavy a s využitím nástrojů prostředí MATLAB SIMULINK je provedena simulace.

Řízení laboratorní soustavy je realizováno v prostředí LabVIEW s využitím rozšiřujícího modulu Control Design and Simulation Module je vytvořena aplikace řízení rotačního inverzního kyvadla, je ověřen návrh jednotlivých regulátorů, je provedeno měření a ověření modelu.

1 GRAFICKÉ PROGRAMOVÁNÍ

Grafické programování je takový způsob programování, který umožňuje uživateli tvorbu programů pomocí grafických prvků. Výhodou grafického programování je, že oproti textovému programování není potřeba znát syntaxi programovacího jazyka, stačí jen vědět v jaké posloupnosti grafické prvky seřadit, aby se dosáhlo požadovaného výsledku (Jost, 2014).

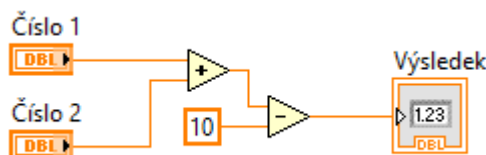
1.1 LABVIEW

Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench zkráceně LabVIEW, také nazývané jazyk G, je grafické vývojové prostředí od firmy National Instruments, která je hlavním představitelem v oblasti virtuální instrumentace. LabVIEW umožňuje vyvíjet aplikace určené k měření, sběru dat, řízení přístrojů, vizualizaci, ale dále také nachází uplatnění i v průmyslové automatizaci.

Cílem výše uvedené virtuální instrumentace je nahradit fyzické zařízení jeho softwarovou podobou, tento pojem se promítá i do aplikací, s kterými pracuje prostředí LabVIEW a to s virtuálními instrumenty tzn. VI. Každý VI se skládá ze dvou oken:

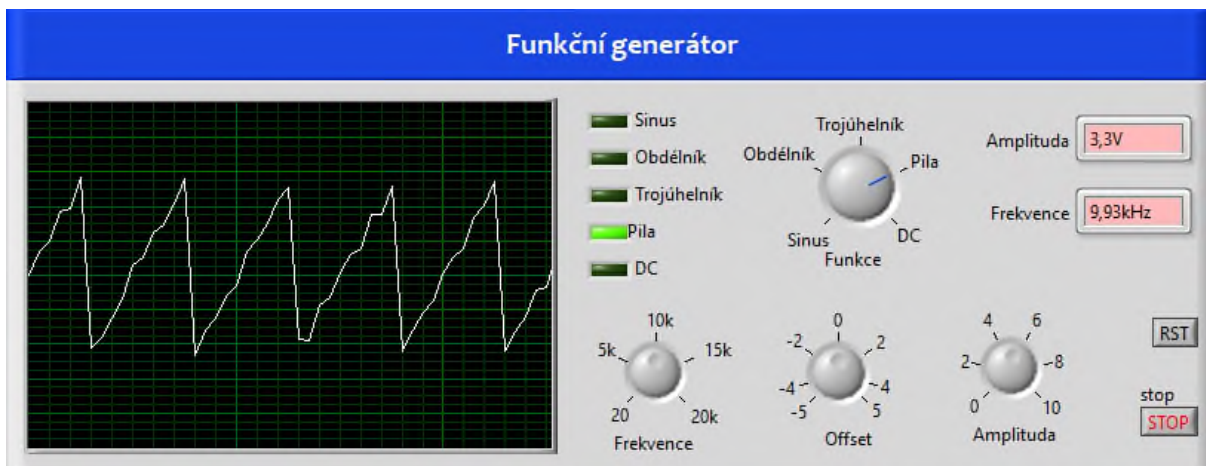
- čelního panelu,
- blokového diagramu.

Vykonávání programu v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW jednoznačně řídí datový tok. Princip datového toku (obrázek 1.1) spočívá v provedení dané části kódu, nazývané uzem, když jsou na jejím vstupu všechny požadované informace potřebné k výpočtu. Po provedení výpočtu jsou na výstupu uzlu definované výsledné informace připravené k dalšímu použití (Vlach, 2008, s. 18, 49).



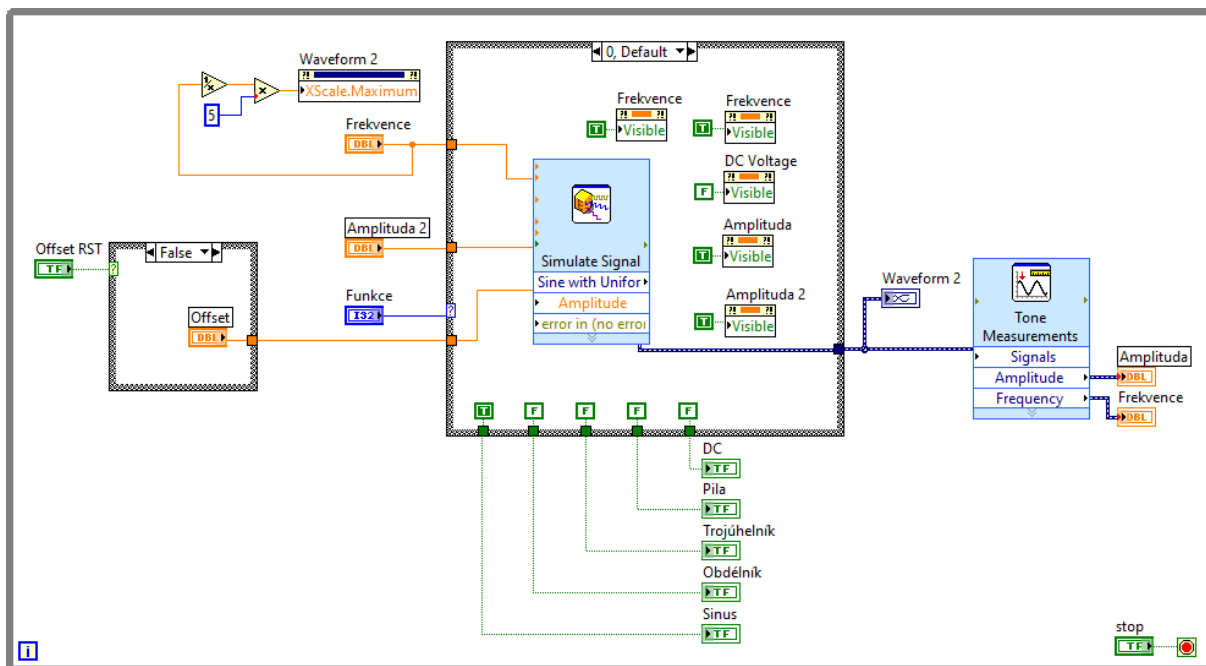
Obrázek 1.1 – Datový tok

Čelní panel (obrázek 1.2) tvoří uživatelské rozhraní virtuálního instrumentu a udává jeho vlastnosti. Vlastnosti čelního panelu určují ovládací a zobrazovací prvky, kterými lze řídit a získávat informace o průběhu aplikace (Vlach, 2008, s. 23).



Obrázek 1.2 – Čelní panel

Blokový diagram (obrázek 1.3) obsahuje samotný grafický zdrojový kód aplikace vytvořené v prostředí LabVIEW. Cílem blokového diagramu je separovat uživatelské rozhraní od grafického zdrojového kódu v logické a jednoduché formě. Blokový diagram se vytváří z terminálů, které jsou vázány na prvky čelního panelu. Změny terminálů v blokovém diagramu se reflektují na čelní panel a naopak (National Instruments, 2020).



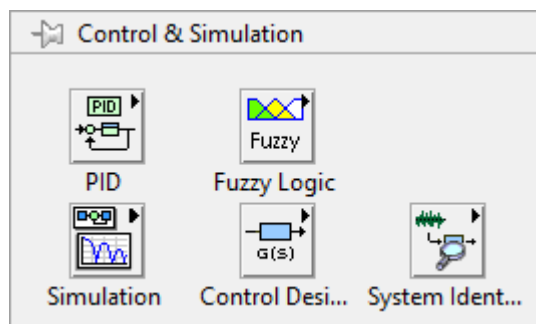
Obrázek 1.3 – Blokový diagram

1.2 CONTROL DESIGN AND SIMULATION MODULE

Control Design and Simulation Module zkráceně CDSim je rozšiřující modul vývojového prostředí LabVIEW, který poskytuje nástroje pro účely simulace dynamických systémů. CDSim se podobá Simulinku, grafické programovací nástavbě programového prostředí MATLAB. Hlavní motivací přidání modulu CDSim je přidání možnosti simulace dynamických systémů, návrhu regulátorů a následné použití v reálných aplikacích (National Instruments, 2018).

Modul Control Design and Simulation Module (obrázek 1.4) se skládá z podknižoven:

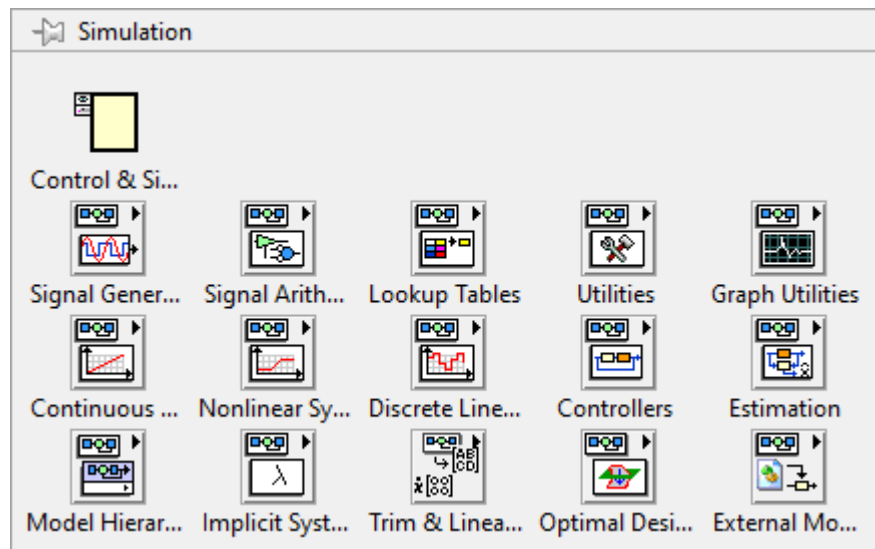
- Simulation,
- Control Design,
- System Identification,
- PID,
- Fuzzy Logic.



Obrázek 1.4 – Podknižovny modulu CDSim

1.2.1 Simulation

Podknižovna Simulation (obrázek 1.5) umožňuje samotný proces simulace, poskytuje softwarové nástroje používané k tvorbě a analýze chování dynamických systémů.

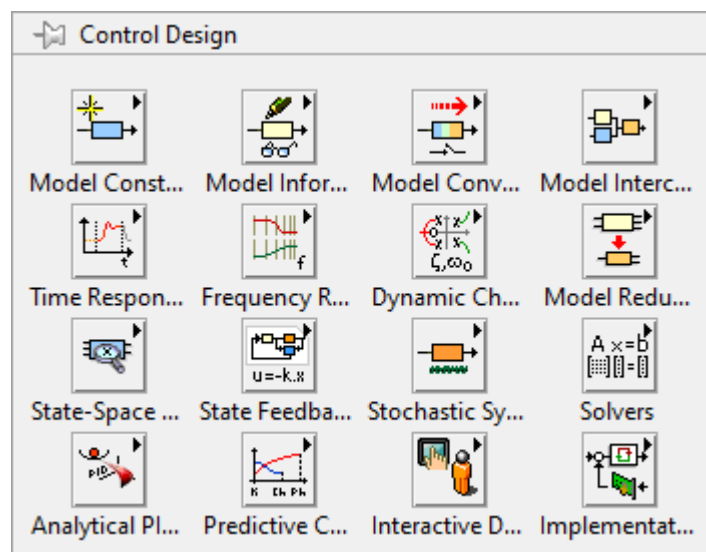


Obrázek 1.5 – Podknižovna Simulation

Základním stavebním prvkem knihovny simulation je programová struktura Control & Simulation Loop. Blok Control & Simulation Loop udává parametry simulace a definuje plochu simulačního blokového diagramu, do které se musí prvky simulace vkládat (National Instruments, 2018).

1.2.2 Control Design

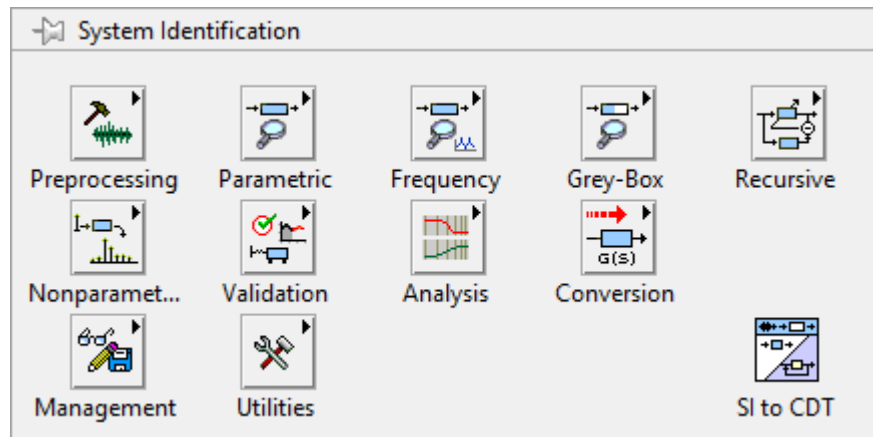
Podknižovna Control Design (obrázek 1.6) obsahuje obdobné funkce jako knihovna Simulation s tím rozdílem, že není nutné použít programovou strukturu Control & Simulation Loop. Podknižovna Control Design se skládá ze SubVI, které své parametry nastavují pomocí vstupních dat (National Instruments, 2018).



Obrázek 1.6 – Podknižovna Control Design

1.2.3 System Identification

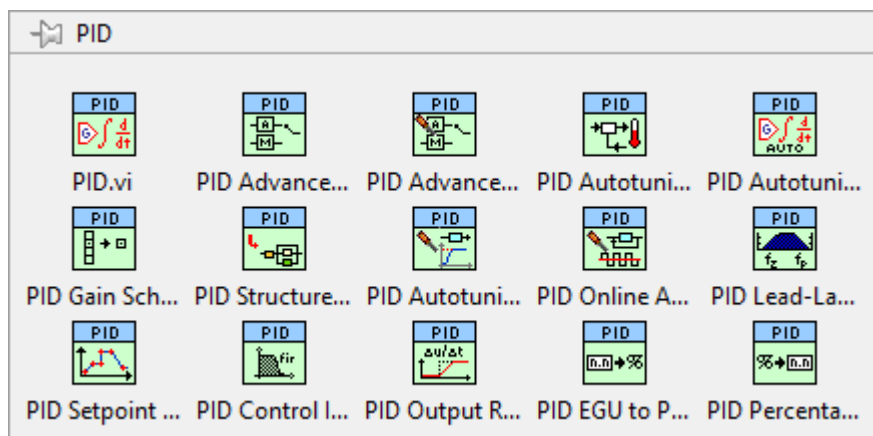
Podknižovna System Identification (obrázek 1.7) kombinuje měření dat s identifikačními algoritmy pro přesné tvorby modelů (National Instruments, 2006).



Obrázek 1.7 – Podknižovna Systém Identification

1.2.4 PID

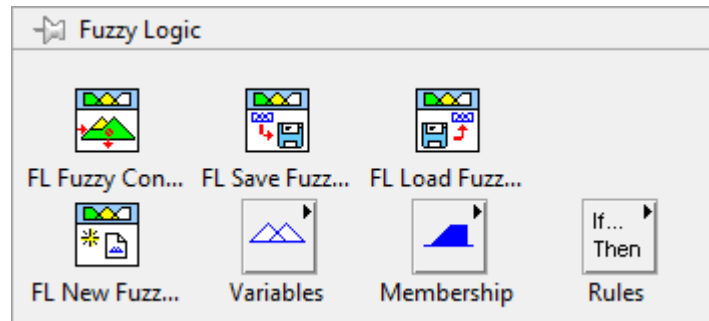
Podknižovna PID (obrázek 1.8) implementuje různé druhy PID regulátorů do virtuálních instrumentů. Tyto virtuální instrumenty mohou být mezi sebou zaměňovány v závislosti na požadavcích aplikace. Obsahuje klasické a rozšířené verze PID regulátorů, možnost autotuningu parametrů PID regulátoru a další (National Instruments, 2009).



Obrázek 1.8 – Podknižovna PID

1.2.5 Fuzzy Logic

Podknižovna Fuzzy Logic (obrázek 1.9) umožňuje tvorbu fuzzy systémů a použití fuzzy logiky k řízení procesů (National Instruments, 2009).

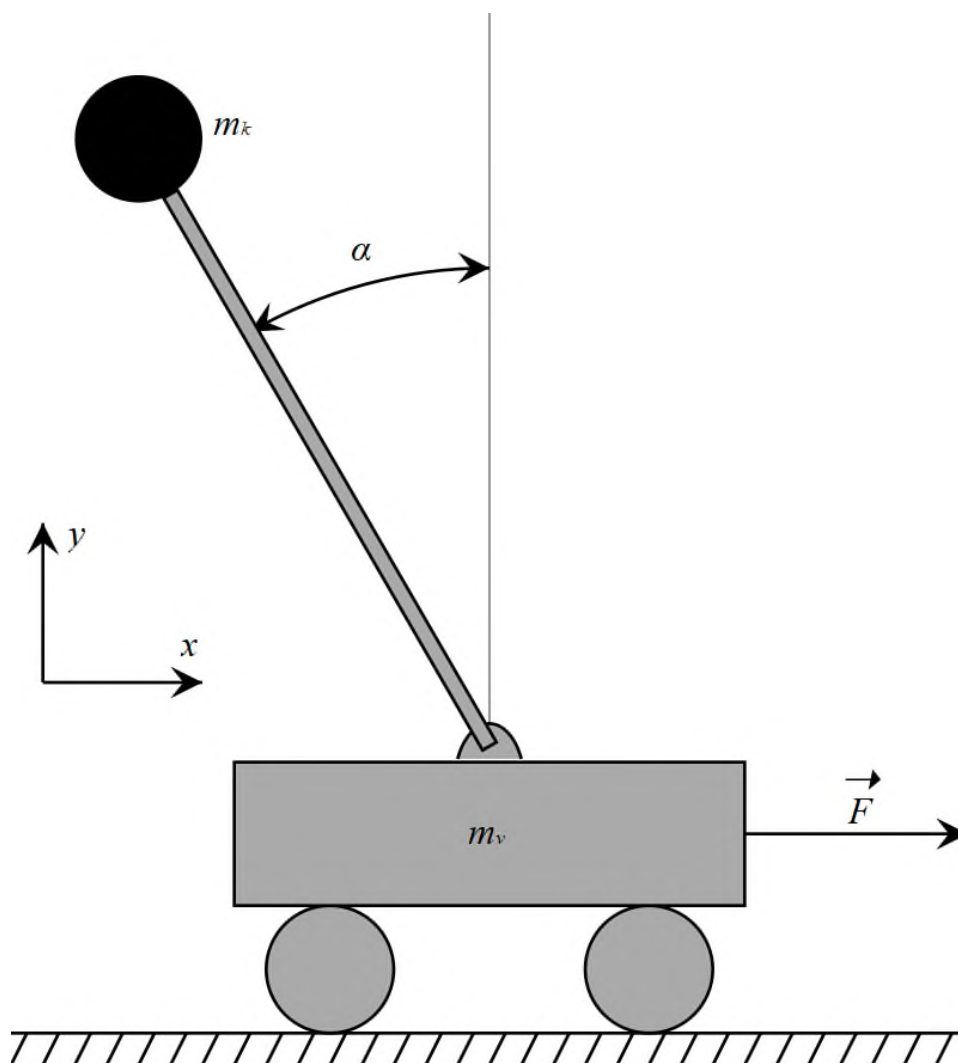


Obrázek 1.9 – Podknižovna Fuzzy Logic

2 INVERZNÍ KYVADLO

Inverzní kyvadlo je kyvadlo, které má své těžiště nad otočným bodem. Inverzní kyvadlo je nestabilní systém a bez další pomoci se převrhne. Kyvadlo může být udrženo v inverzní poloze, tedy poloze vzpřímené, pomocí řídicího algoritmu, který sleduje úhel natočení kyvadla a s kyvadlem pohybuje tak, aby se udrželo v rovnováze.

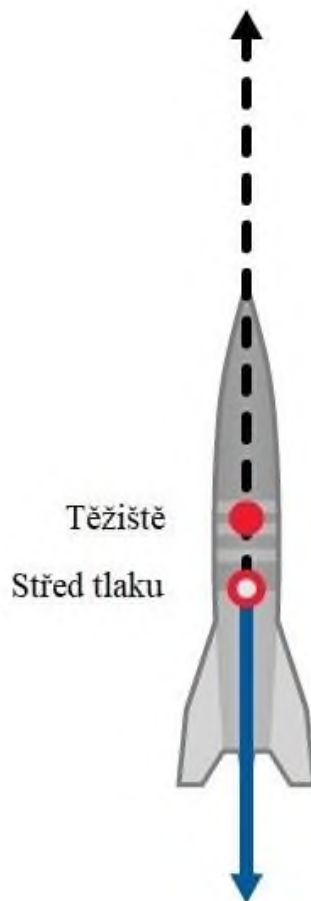
Samotné inverzní kyvadlo je systém s jedním stupněm volnosti, přidáním možnosti posunutí otočného bodu se stává systém inverzního kyvadla systémem se dvěma stupni volnosti. Posunutí otočného bodu se nejčastěji realizuje dvěma způsoby, připevněním otočného bodu na vozík tzv. lineární inverzní kyvadlo (obrázek 2.1), nebo volným spojením kyvadla k rameni, které vykonává horizontální rotační pohyb, tzv. rotační inverzní kyvadlo, kterým se bude tato práce zabývat dále podrobněji.



Obrázek 2.1 – Lineární inverzní kyvadlo

Řízení inverzního kyvadla se ukázalo jako složité, jelikož systém inverzního kyvadla je nelineární a zároveň podaktuovaný mechanický systém, tato kombinace dává vzniku mnoha zajímavým a složitým řídicím otázkám, proto je inverzní kyvadlo klasickým problémem dynamiky a regulace a je často používáno jako benchmark k mnoha řídicím strategiím, které reprezentují reálné aplikace jako například:

- balancování vozítka segway,
- stabilizace raket (obrázek 2.2),
- balancování letadla při automatickém přistání,
- stabilizace letadla při turbulenci,
- rovnováha humanoidního robota,
- simulace zavěšeného břemena.

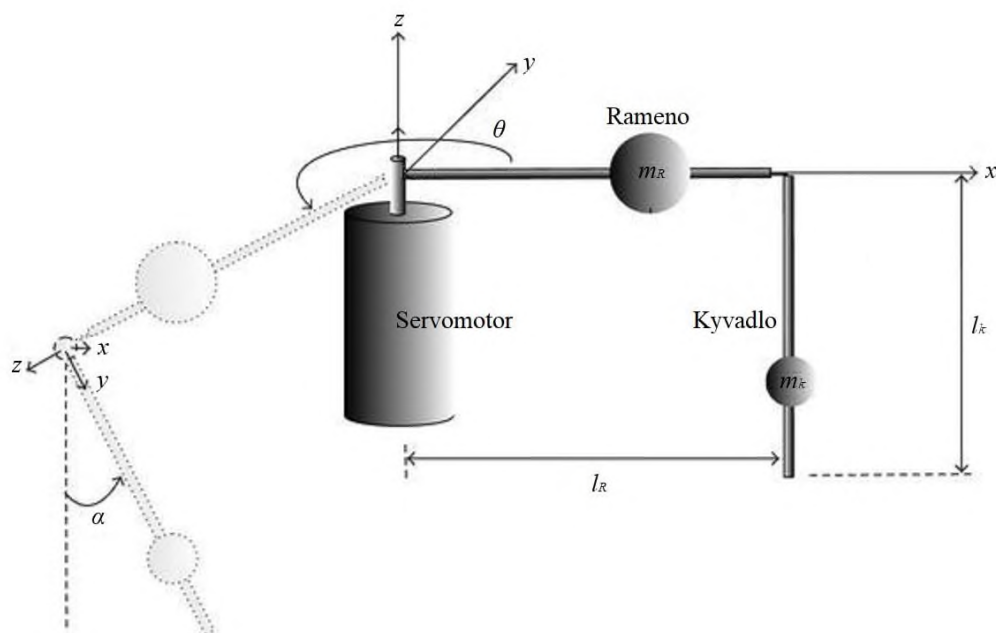


Obrázek 2.2 – Stabilizace rakety (Rocket aerodynamics)

2.1 ROTAČNÍ INVERZNÍ KYVADLO

Rotační inverzní kyvadlo, také nazývané po svém vynálezci Katsushiso Furutou „Furutovo kyvadlo“, se skládá z ramene, které je pevně spojené se servopohonem, vytvářející horizontální rotační pohyb a z kyvadla, které je volně spojené s ramenem, což umožňuje kyvadlu rotovat kolem osy ramene.

Systém rotačního inverzního kyvadla je nelineární a podaktuovaný mechanický systém, který je nestabilní v požadované vzpřímené poloze kyvadla. Tato kombinace vlastností umožňuje ilustraci dvou rozdílných způsobů řízení. První je vyhoupnutí tzv. swing-up kyvadla do vzpřímené polohy pomocí řízení energie kyvadla. V moment, kdy je kyvadlo v žádané vzpřímené poloze, převezme řízení druhý způsob řízení balanční algoritmus, který udržuje kyvadlo ve vzpřímené (Acosta, 2010).



Obrázek 2.3 – Schéma rotačního inverzního kyvadla

Stav systému rotačního inverzního kyvadla lze popsat pomocí úhlu natočení ramene θ , úhlové rychlosti ramene $\dot{\theta}$, úhlu natočení kyvadla α a úhlové rychlosti kyvadla $\dot{\alpha}$.

Vstupem systému je napětí V na servomotoru, pomocí kterého je ovládán točivý moment servomotoru τ . S motorem je pevně spojené rameno o délce l_r a hmotnosti m_r , které vykonává rotační pohyb po horizontální rovině, tento pohyb lze popsat úhlem natočení θ a úhlové rychlosti $\dot{\theta}$. Na rameno je volně zavěšeno samotné kyvadlo o délce l_k a hmotnosti m_r , které

provádí rotační pohyb kolem osy ramene, tento pohyb je vykonáván po vertikální rovině a je možné ho popsat pomocí úhlem natočení α a úhlové rychlosti $\dot{\alpha}$.

2.2 MATEMATICKÝ MODEL ROTAČNÍHO INVERZNÍHO KYVADLA

Model systému je odvozen na základě Eulerovy-Lagrangeovy rovnice. Vzhledem k dynamice jsou rotační inverzní kyvadla nelineární systémy, pohybové rovnice jsou tedy linearizovány kolem pracovního bodu, tj. kyvadlo zavěšené směrem dolů.

K tvorbě matematického modelu je použita Eulerova-Lagrangeova metoda ve tvaru

$$Q_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} + \frac{\partial W}{\partial \dot{q}}, \quad (2.1)$$

kde q je úhel natočení,
 \dot{q} – úhlová rychlost,
 L – Lagrangián,
 W – ztráta energie,
 Q_i – externí síla.

V případě rotačního inverzního kyvadla je Lagrangián L rozdíl kinetické a potenciální energie soustavy

$$L = E_K - E_P, \quad (2.2)$$

kde E_K je kinetická energie,
 E_P – potenciální energie.

2.2.1 Kinetická energie

Kinetická energie soustavy rotačního inverzního kyvadla se rovná součtu kinetických energií ramene E_{KR} a samotného kyvadla E_{KK} .

Pro výpočet kinetické energie ramene je použit vzorec kinetické energie při rotaci

$$E_{KR} = \frac{1}{2} J_R \dot{\theta}^2, \quad (2.3)$$

kde E_{KR} je kinetická energie ramene,
 J_R – moment setrvačnosti ramene,
 $\dot{\theta}$ – úhlová rychlost ramene.

Moment setrvačnosti ramene J_R se vypočítá pomocí závislosti momentu setrvačnosti tyče délky l a hmotnosti m vzhledem k ose procházející středem tyče kolmo k její délce

$$J_R = \frac{1}{12} m_R l_R^2, \quad (2.4)$$

kde J_R je moment setrvačnosti ramene,

m_R – hmotnost ramene,

l_R – délka ramene.

Kinetická energie kyvadla je dána součtem kinetických energií kyvadla ve směrech os x a y a kinetické energie kyvadla při rotaci

$$E_{KK} = E_{Kvx} + E_{Kvy} + E_{Krot}, \quad (2.5)$$

kde E_{KK} je kinetická energie kyvadla,

E_{Kvx} – kinetická energie kyvadla ve směru osy x ,

E_{Kvy} – kinetická energie kyvadla ve směru osy y ,

E_{Krot} – kinetická energie kyvadla při rotaci.

Rotační kinetická energie se vypočítá pomocí výpočtu kinetické energie při rotaci

$$E_{KKrot} = \frac{1}{2} J_K \dot{\alpha}^2, \quad (2.6)$$

kde J_K je moment setrvačnosti kyvadla,

$\dot{\alpha}$ – úhlová rychlost kyvadla.

Moment setrvačnosti kyvadla J_K se vypočítá pomocí závislosti momentu setrvačnosti tyče délky l a hmotnosti m vzhledem k ose otáčení na konci tyče

$$J_K = \frac{1}{3} m_K l_K^2, \quad (2.7)$$

kde m_K je hmotnost ramene,

l_K – délka kyvadla.

K určení kinetických energií kyvadla je nutné vypočítat rychlosti kyvadla v osách x a y .

Rychlost kyvadla určíme pomocí derivace polohy kyvadla, kde poloha kyvadla je

$$\begin{aligned} x_k &= l_R \theta - l_I \sin \alpha, \\ y_k &= l_I \cos \alpha, \end{aligned} \quad (2.8)$$

kde x_k je poloha kyvadla v ose x ,

θ – úhel natočení ramene,

l_1 – polovina délky kyvadla,

α – úhel natočení kyvadla,

y_k je poloha kyvadla v ose y.

Derivací polohy získáme rychlost kyvadla v osách x a y, derivace polohy je

$$\begin{aligned}v_x &= l_R \dot{\theta} - l_1 \cos \alpha \dot{\alpha}, \\v_y &= -l_1 \sin \alpha \dot{\alpha},\end{aligned}\tag{2.9}$$

kde v_x je rychlost kyvadla ve směru osy x,

v_y – rychlost kyvadla ve směru osy y.

Dosazením do rovnice pro celkovou kinetickou energii kyvadla je získán vztah

$$E_{KK} = \frac{1}{2} m_K (l_R \dot{\theta} - l_1 \cos \alpha \dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2} m_K (-l_1 \sin \alpha \dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2} J_K \dot{\alpha}^2.\tag{2.10}$$

Celková kinetická energie systému rotačního inverzního kyvadla je

$$E_K = \frac{1}{2} J_R \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_K (l_R \dot{\theta} - l_1 \cos \alpha \dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2} m_K (-l_1 \sin \alpha \dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2} J_K \dot{\alpha}^2.\tag{2.11}$$

2.2.2 Potenciální energie

Potenciální energie soustavy rotačního inverzního kyvadla se rovná součtu potenciálních energií ramene E_{PR} a samotného kyvadla E_{PK} .

Jelikož je rameno pevně spojeno s motorem, nepůsobí na něj gravitační potenciální energie, a tedy potenciální energie je

$$E_{PR} = 0,\tag{2.12}$$

kde E_{PR} je potenciální energie ramene.

Potenciální energie kyvadla se vypočte jako

$$E_{PK} = m_K g l_1 \cos \alpha,\tag{2.13}$$

kde E_{PK} je potenciální energie ramene,

g – gravitační zrychlení.

Celková potenciální energie systému rotačního inverzního kyvadla je rovna

$$E_P = m_K g l_1 \cos \alpha,\tag{2.14}$$

kde E_P je celková potenciální energie systému rotačního inverzního kyvadla.

2.2.3 Lagrangián

Lagrangián L soustavy rotačního inverzního kyvadla je dán jako rozdíl celkových kinetických E_K a potenciálních energií E_P

$$L = \frac{1}{2} J_R \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_K (l_R \dot{\theta} - l_1 \cos \alpha \dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2} m_K (-l_1 \sin \alpha \dot{\alpha})^2 + \frac{1}{2} J_K \dot{\alpha}^2 - m_K g l_1 \cos \alpha, \quad (2.15)$$

kde L je Lagrangián soustavy.

Eulerova-Lagrangeova rovnice pro úhly α a θ a úhlové rychlosti $\dot{\alpha}$ a $\dot{\theta}$ je

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} &= Q, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} &= 0. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Ztráta energií W je uvažována nulová, za externí sílu je považován točivý moment motoru τ ten se vypočte vztahem

$$\tau = K_\tau \frac{U - K_e \dot{\theta}}{R_\Omega}, \quad (2.17)$$

kde τ je točivý moment servomotoru,
 K_τ – konstanta točivého momentu,
 U – napětí vstupující do motoru,
 K_e – emf konstanta,
 R_Ω – odpor vinutí servomotoru.

Systém je linearizován v rovnovážném bodě zavěšený svisle dolů tedy

$$\begin{aligned} \alpha &= 0, \\ \dot{\alpha} &= 0, \\ \theta &= 0, \\ \dot{\theta} &= 0. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Dosažením a provedením parciální rovnice získáme vztahy

$$\ddot{\theta} (J_R + m_K l_R^2) - m_K l_R l_1 \ddot{\alpha} = \tau, \quad (2.19)$$

$$\frac{4}{3}m_K l_I^2 \ddot{\alpha} - m_K l_R \ddot{\theta} l_I - m_K g l_I = 0.$$

Získáme stavový popis ve tvaru

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_{31} \\ B_{41} \end{bmatrix} [\tau], \quad (2.20)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix}.$$

kde $\ddot{\theta}$ je úhlové zrychlení ramene,

$\ddot{\alpha}$ – úhlové zrychlení kyvadla.

Stavové proměnné nabývají hodnot

$$A_{31} = 0,$$

$$A_{32} = \frac{(m_K l_R l_I)(m_K g l_I)}{(J_R + m_K l_R^2) \left(\frac{4}{3} m_K l_I^2\right) - (m_K l_R l_I)^2},$$

$$A_{33} = \frac{-\left(\frac{4}{3} m_K l_I^2\right) \left(\frac{K_\tau K_e}{R}\right)}{(J_R + m_K l_R^2) \left(\frac{4}{3} m_K l_I^2\right) - (m_K l_R l_I)^2},$$

$$A_{34} = 0,$$

$$A_{41} = 0,$$

$$A_{42} = \frac{(J_R + m_K l_R^2)(m_K g l_I)}{(J_R + m_K l_R^2) \left(\frac{4}{3} m_K l_I^2\right) - (m_K l_R l_I)^2}, \quad (2.21)$$

$$A_{43} = \frac{-(m_K l_R l_I) \left(\frac{K_\tau K_e}{R}\right)}{(J_R + m_K l_R^2) \left(\frac{4}{3} m_K l_I^2\right) - (m_K l_R l_I)^2},$$

$$A_{44} = 0,$$

$$B_{11} = 0,$$

$$B_{21} = 0,$$

$$B_{31} = \frac{\left(\frac{4}{3}m_k l_l^2\right) \left(\frac{K_\tau}{R}\right)}{(J_R + m_k l_R^2) \left(\frac{4}{3}m_k l_l^2\right) - (m_k l_R l_l)^2},$$

$$B_{41} = \frac{(m_k l_R l_l) \left(\frac{K_\tau}{R_\Omega}\right)}{(J_R + m_k l_R^2) \left(\frac{4}{3}m_k l_l^2\right) - (m_k l_R l_l)^2}.$$

Matematický model byl sestaven na základě článku (Sritharan, 2018).

Parametry soustavy rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET 2.0 jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1 – Parametry kyvadla
(Martin, 2015)

l_r , m	0,085
l_k , m	0,129
l_l , m	0,0645
m_r , kg	0,095
m_k , kg	0,024
K_τ , Nm/A	0,042
K_e , rad/V·s	0,042
R_Ω , Ω	8,4

Dosažením parametrů a výpočtem stavových proměnných získáme stavový popis ve tvaru

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 149,28 & -2,09 & 0 \\ 0 & 261,61 & -2,06 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 49,73 \\ 49,15 \end{bmatrix} [\tau], \quad (2.22)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix}.$$

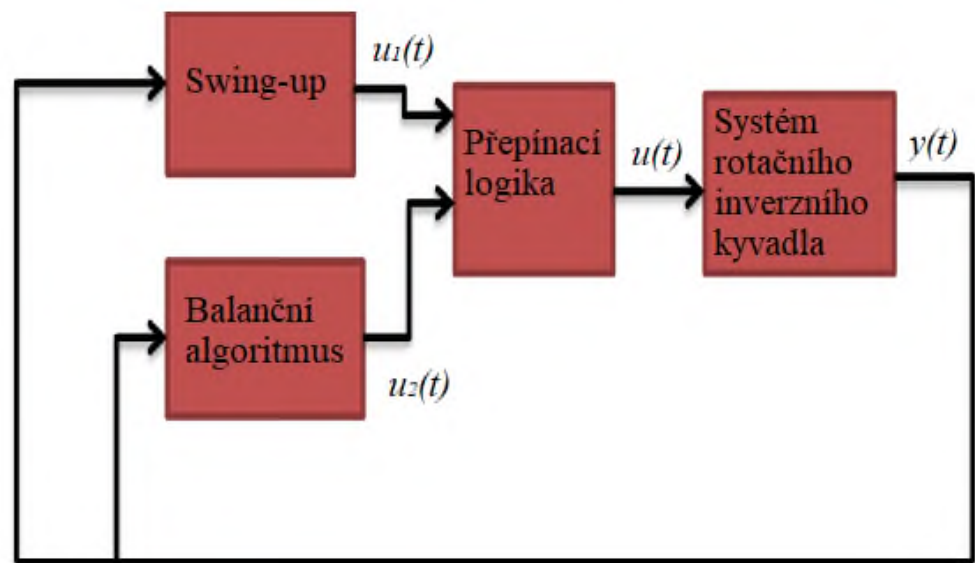
3 NÁVRH REGULÁTORŮ

Návrhu řídicího algoritmu rotačního inverzního kyvadla je věnována následující kapitola práce. Je vytvořen swing-up regulátor, zároveň je navržen regulátor balančního algoritmu rotačního inverzního kyvadla a je vytvořen přepínač mezi swing-up regulátorem a balančním algoritmem.

3.1 VOLBA REGULÁTORU

Úkolem řízení rotačního inverzního kyvadla je dostat kyvadlo z polohy zavěšené směrem dolů do polohy vzpřímené vzhůru a udržet ho ve vzpřímené poloze. Problém řízení rotačního inverzního kyvadla lze rozdělit na dvě části, a to na vyhoupnutí či vyšvihnutí ze zavěšené polohy kyvadla a balancování kyvadla ve vzpřímené poloze, kdy je vyhoupnutí realizováno pomocí swing-up regulátoru a vzpřímené polohy kyvadla je dosaženo balančním algoritmem. Na obrázku 3.1 je ilustrován blokový diagram řízení inverzního kyvadla.

V případě rotačního inverzního kyvadla má swing-up regulátor za úkol vyšvihnout kyvadlo z polohy zavěšené do polohy vzpřímené, kde převezme řízení balanční algoritmus. V moment, kdy je kyvadlo vyhoupnuté v určité vzdálenosti od vzpřímené polohy, je pomocí přepínací logiky předáno řízení systému rotačního inverzního kyvadla balančnímu algoritmu, který udržuje kyvadlo ve vzpřímené „invertované“ poloze.



Obrázek 3.1 – Blokový diagram řízení inverzního kyvadla

3.1.1 Návrh Swing-up regulátoru

Vyhoupnutí kyvadla do vzpřímené polohy je zajištěné swing-up regulátorem, který funguje na principu řízení energie kyvadla.

Jednou z možností, jak vychýlit kyvadlo do vzpřímené polohy, je dodat mu energii, která odpovídá vzpřímené poloze, tomu odpovídá součet kinetické rotační a potenciální energie kyvadla

$$E_{KP} = \frac{1}{2}J_{KT}\dot{\alpha}^2 + m_K g l_I (1 - \cos \alpha), \quad (3.1)$$

kde E_{KP} součet kinetické rotační a potenciální energie kyvadla.

K výpočtu momentu setrvačnosti je použita Steinerova věta, která umožňuje vypočítat moment setrvačnosti tělesa rotujícího kolem osy, která neprochází jeho těžištěm. Základní vzorec Steinerovy věty je

$$J = J_T + m r_T^2, \quad (3.2)$$

kde J je moment setrvačnosti,

J_T – moment setrvačnosti tělesa procházející těžištěm,

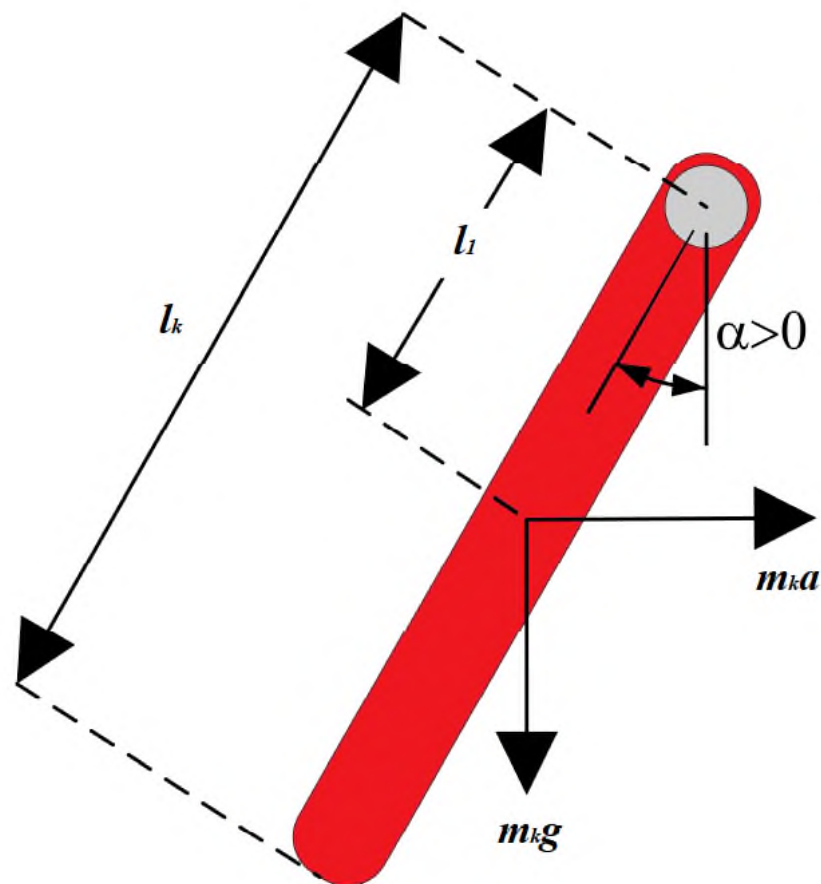
m – hmotnost tělesa,

r_T – vzdálenost osy rotace od těžiště.

Dosazením do případu rotačního inverzního kyvadla získáme vztah

$$J_K = J_{KT} + m_k l_I^2, \quad (3.3)$$

kde J_K je moment setrvačnosti kyvadla,
 J_{KT} – moment setrvačnosti kyvadla procházející těžištěm.



Obrázek 3.2 – Uchycení kyvadla

Pohybová rovnice kyvadla je

$$J_{KT}\ddot{\alpha}(t) = m_K g l_K \sin \alpha(t) + m_K a l_K \cos \alpha(t), \quad (3.4)$$

kde a je zrychlení kyvadla k jeho těžišti.

Derivací vztahu 3.1 získáme

$$\dot{E}_{KP} = \dot{\alpha}(J_{KT}\ddot{\alpha} + m_K g l_1 \sin \alpha), \quad (3.5)$$

kde \dot{E}_{KP} je derivace součtu kinetické rotační a potenciální energie kyvadla.

Dosazením pohybové rovnice kyvadla 3.4 za zrychlení $\ddot{\alpha}$ získáme

$$\dot{E}_{KP} = m_K a l_1 \dot{\alpha} \cos \alpha. \quad (3.6)$$

Vzhledem ke skutečnosti, že zrychlení a je úměrné proudu pohánějícímu servomotor ramene, který je úměrný napětí pohonu, zjistíme vztah k ovládní energie kyvadla ve tvaru

$$a = (E_r - E_{KP})\dot{\alpha} \cos \alpha, \quad (3.7)$$

kde E_r je referenční energie kyvadla.

Dále z důvodu nemožnosti kyvadla udržet stálou polohu, kdy úhlová rychlost $\dot{\alpha}$ mění znaménko, je přidána funkce sign. Zároveň je pro zajištění rychlé změny energie zavedeno zesílení signálu μ , zároveň je přidána saturace maximální úhlové rychlosti kyvadla

$$a = \text{sat}_{amax}(\mu(E_r - E_{KP})\text{sign}(\dot{\alpha} \cos \alpha)), \quad (3.8)$$

kde sat_{amax} je saturace maximální úhlové rychlosti kyvadla,
 μ – zesílení signálu.

Navrhnutý swing-up regulátor přibližuje energii kyvadla E_{KP} na požadovanou referenční energii E_r , tato strategie je v zásadě dvoustavový regulátor pro velké regulační odchylky a proporcionální regulátor pro malé regulační odchylky (Mathew, 2013; Martin, 2015).

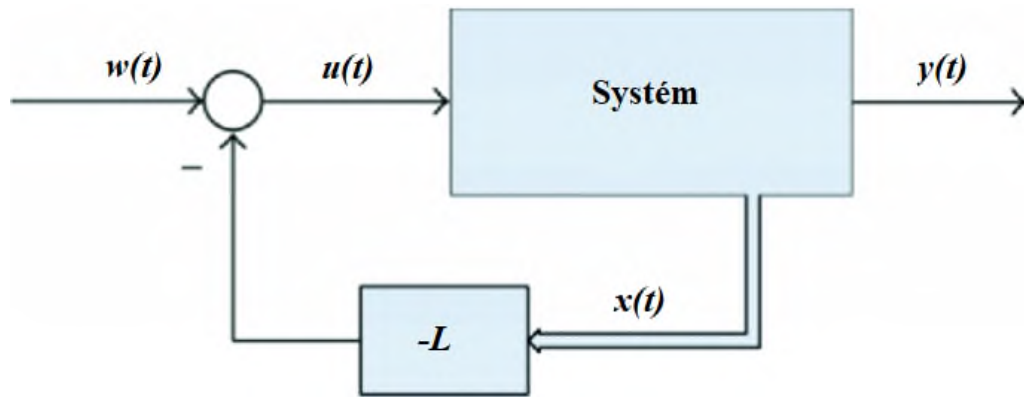
3.1.2 LQ regulátor

Pro balancování kyvadla je zvolen lineární kvadratický regulátor. LQ regulátor (obrázek 3.3) je stavový regulátor založený na principu minimalizace účelové funkce. Principem minimalizace účelové funkce je určení průběhu akční veličiny u , který změní počáteční stav systému x_0 na koncový stav systému x_f tak, aby účelová funkce byla minimální. Kritérium LQ regulátoru je definováno pro konečný interval řízení ve tvaru

$$J(u) = x^T(t_f)Fx(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt, \quad (3.9)$$

kde J je kritérium,
 x – vektor stavových veličin,
 t_f – koncový čas,
 t_0 – počáteční stav,
 u – vektor vstupních veličin,

F, Q, R – váhové matice kritéria.



Obrázek 3.3 – LQ regulátor

Jelikož LQ regulátor na konečném intervalu řízení není prakticky použitelný, použije se k řízení rotačního inverzního kyvadla LQ regulátor pro nekonečný interval řízení

$$J(u) = \int_{t_0}^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt. \quad (3.10)$$

Váhové matice Q a R mají za úkol tzv. penalizaci, slouží jako volitelný parametr k nastavení regulátoru. Váhová matice Q penalizuje odchylky stavů a matice R penalizuje velikost akčního zásahu (Lancaster, 1995; Dušek, 2019).

Vektor zesílení regulátoru je roven

$$u(t) = -Lx(t). \quad (3.11)$$

Matici zpětné vazby vypočteme

$$L = [R + B^T P B]^{-1} B^T P A. \quad (3.12)$$

Matice P se zjistí pomocí rovnice

$$P = Q + A^T P A - A^T P B [R + B^T P B]^{-1} B^T P A. \quad (3.13)$$

Pomocí vývojového prostředí MATLAB získáme vektor zesílení LQ regulátoru L . Uvažujeme váhové matice Q a R o velikostech

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ a } R_1 = [1], \quad (3.14)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ a } R_2 = [1],$$

$$Q_3 = \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ a } R_3 = [1],$$

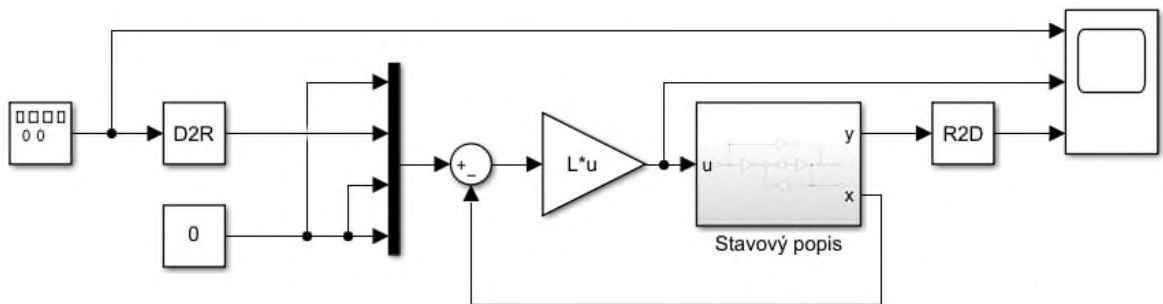
$$Q_4 = \begin{bmatrix} 30 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ a } R_4 = [1].$$

Nejlépeších výsledků regulace bylo dosaženo použitím váhových matic Q_4 a R_4 , s vektorem zesílení L o velikosti

$$L = -5,4772 \quad 30,8648 \quad -1,5996 \quad 2,5919. \quad (3.15)$$

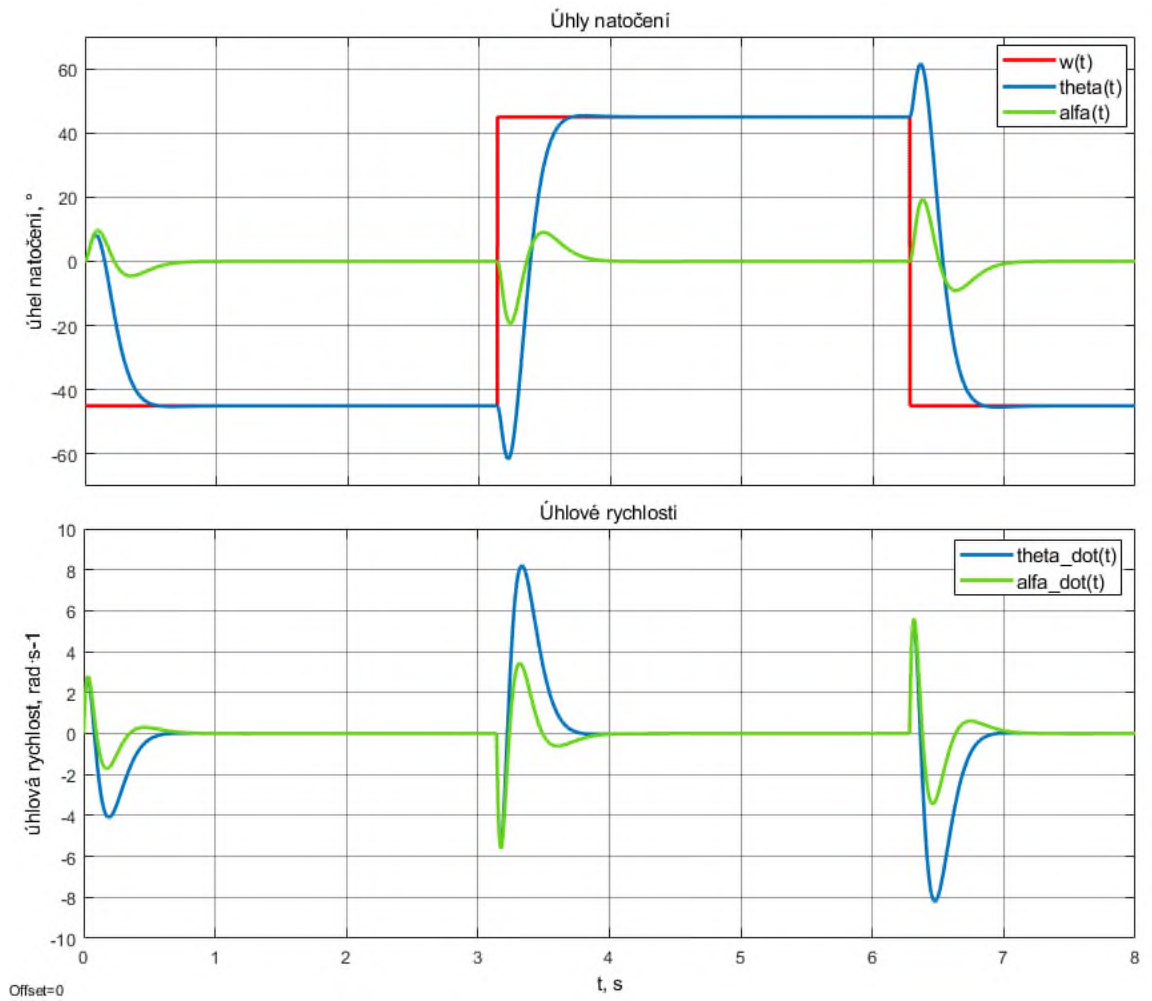
3.2 SIMULACE

Simulace rotačního inverzního kyvadla je provedena ve vývojovém prostředí MATLAB na základě znalosti matematického modelu laboratorní soustavy rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET. Model soustavy (obrázek 3.4) je vytvořen na základě zjištěného stavového popisu 2.16.



Obrázek 3.4 – Model soustavy

Průběh regulačního pochodu s navrhnutým regulátorem LQ je zobrazen na obrázku 3.5.

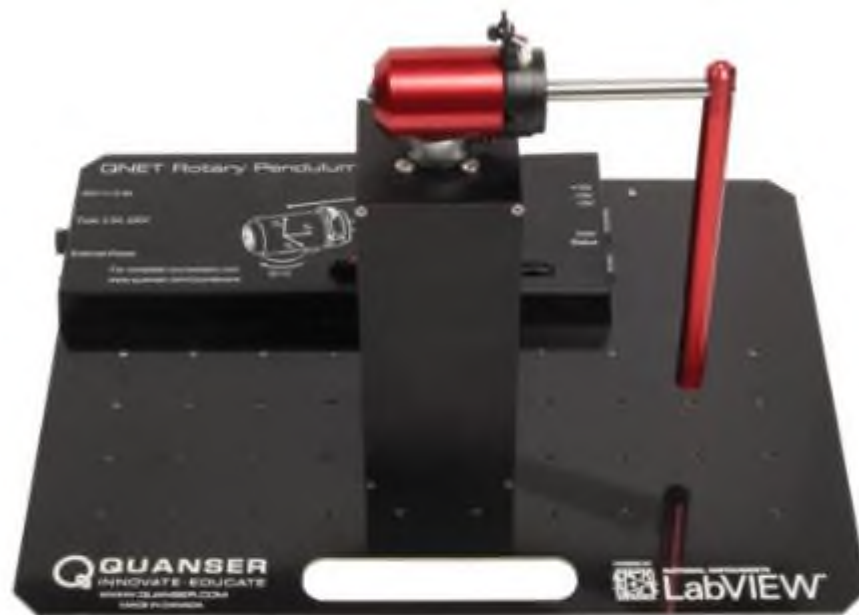


Obrázek 3.5 – Simulovaný regulační pochod

4 ŘÍZENÍ ROTAČNÍHO INVERZNÍHO KYVADLA QUANSER QNET

Praktická část této diplomové práce je realizována na laboratorní sestavě Quanser QNET 2.0 rotačního kyvadla, sestava je výrobcem navržena za účelem demonstrace a znázornění mechanického systému rotačního inverzního kyvadla a možnostech jeho řízení. Systém Rotačního kyvadla Quanser QNET 2.0 je navržen exkluzivně pro měřicí kartu NI ELVIS a grafickou vývojovou platformu LabVIEW (QNET 2.0 Rotary Pendulum Board).

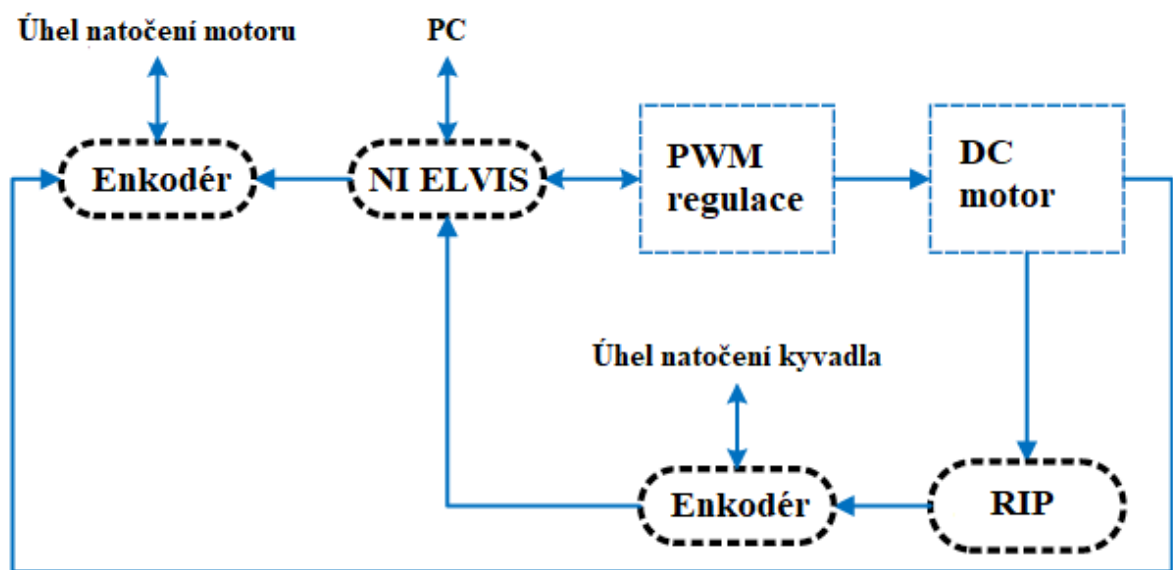
Aplikace řízení rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET 2.0 je vytvořena v aplikaci LabVIEW za pomoci rozšiřujícího modulu CDSim. Laboratorní sestava a vytvořená aplikace k řízení rotačního inverzního kyvadla jsou popsány a je provedeno měření a ověření navrženého regulátoru.



Obrázek 4.1 – Laboratorní sestava Quanser QNET 2.0

4.1 ROTAČNÍ INVERZNÍ KYVADLO QUANSER QNET

Laboratorní soustava rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET 2.0 (obrázek 4.1) se skládá z vertikálně nainstalovaného stejnosměrného motoru, který přenáší svůj moment na rameno, se kterým je volně spojeno samotné kyvadlo. Sestava je osazena dvěma enkodéry, které snímají úhel natočení ramene a kyvadla s rozlišením 512 impulzů na otáčku. Moment motoru je řízen změnou napětí na motoru, velikost napětí je řízena pulzní šířkovou modulací, kterou řídí PWM regulátor. Blokový diagram laboratorní sestavy Quanser QNET 2.0 je na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2 – Blokový diagram laboratorní sestavy Quanser QNET 2.0

Akční veličinou systému je tedy napětí na stejnosměrném motoru a výstupními veličinami jsou úhly natočení ramene a kyvadla.

Laboratorní sestava je navržena pro měřicí kartu NI ELVIS (obrázek 4.3). Měřicí karta NI ELVIS celým názvem „National Instruments Engineering Laboratory Virtual Instrumentation Suite“ je pracovní stanice umožňující připojení dalších laboratorních sestav Quanser QNET. NI ELVIS obsahuje v kompaktní podobě dvanáct nejpoužívanějších přístrojů využívaných v laboratoři, jako je například osciloskop, digitální multimetr, funkční generátor, nastavitelný zdroj a další.



Obrázek 4.3 – Měřicí karta NI ELVIS II+

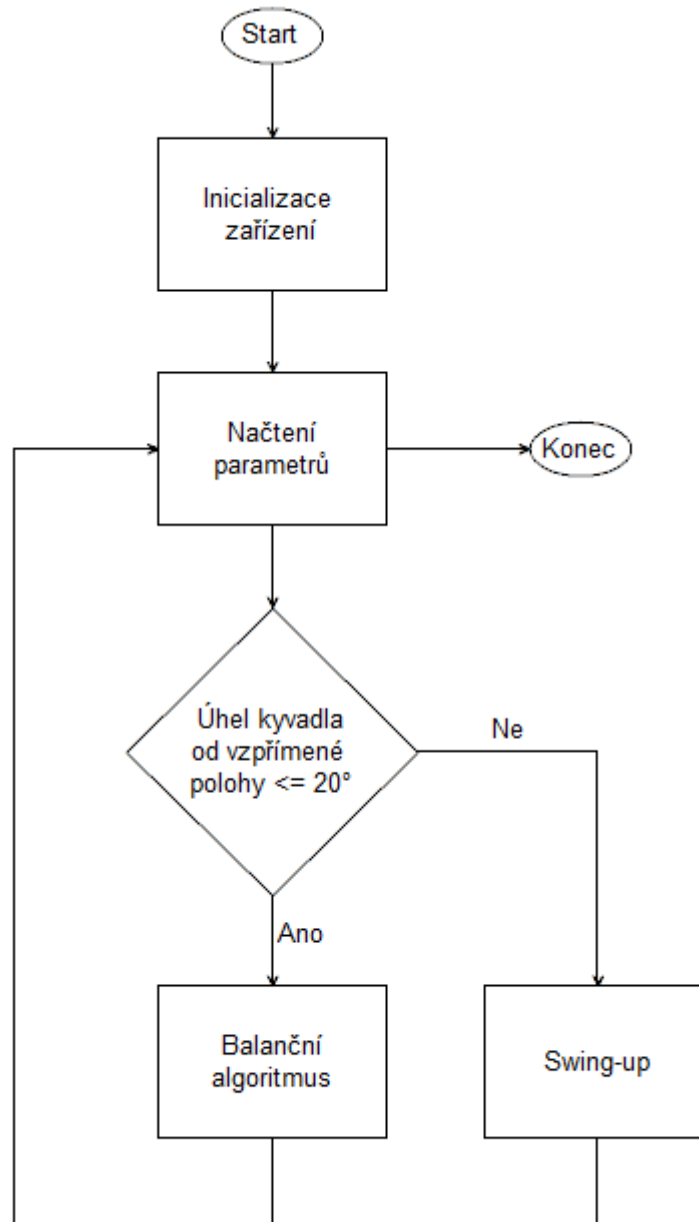
Laboratorní soustava rotačního inverzního kyvadla QNET 2.0 je PCI konektorem připojena do měřicí karty. Napájení soustavy je zajištěno jackem měřicí karty NI ELVIS. Měřicí karta je připojena k PC pomocí USB kabelu, který zprostředkovává komunikaci mezi PC a pracovní stanicí. Samotné napájení měřicí karty je realizováno transformovaným síťovým napětím (Mandík, 2019).

4.2 APLIKACE ŘÍDICÍ ROTAČNÍ INVERZNÍ KYVADLO QUANSER QNET

Vytvořené aplikaci je věnována následující část práce, je popsán princip fungování aplikace pomocí vývojového diagramu, dále je představen čelní panel aplikace a blokový diagram.

4.2.1 Vývojový diagram aplikace

Vývojový diagram (obrázek 4.4) aplikace je zjednodušený, je zde pouze nastíněn princip fungování aplikace, zkráceným částem vývojového diagramu se věnují předcházející kapitoly práce.



Obrázek 4.4 – Vývojový diagram aplikace

Prvním blokem ve vývojovém diagramu je blok „Start“, který reprezentuje spuštění aplikace. Ihned po spuštění aplikace dojde k inicializaci zařízení pomocí bloků DAQmx, které čtou, v případě laboratorní sestavy rotačního inverzního kyvadla, velikosti úhlů naměřených na enkodérech a ovládají napěťový výstup na motoru otáčejícím ramenem.

Dále je ve vývojovém diagramu aplikace naznačena přepínací logika mezi balančním algoritmem a swing-up regulátorem, kdy při dané velikosti rozdílů úhlů natočení kyvadla a vzpřímenou pozicí kyvadla dojde k přepnutí jednotlivých regulačních strategií.

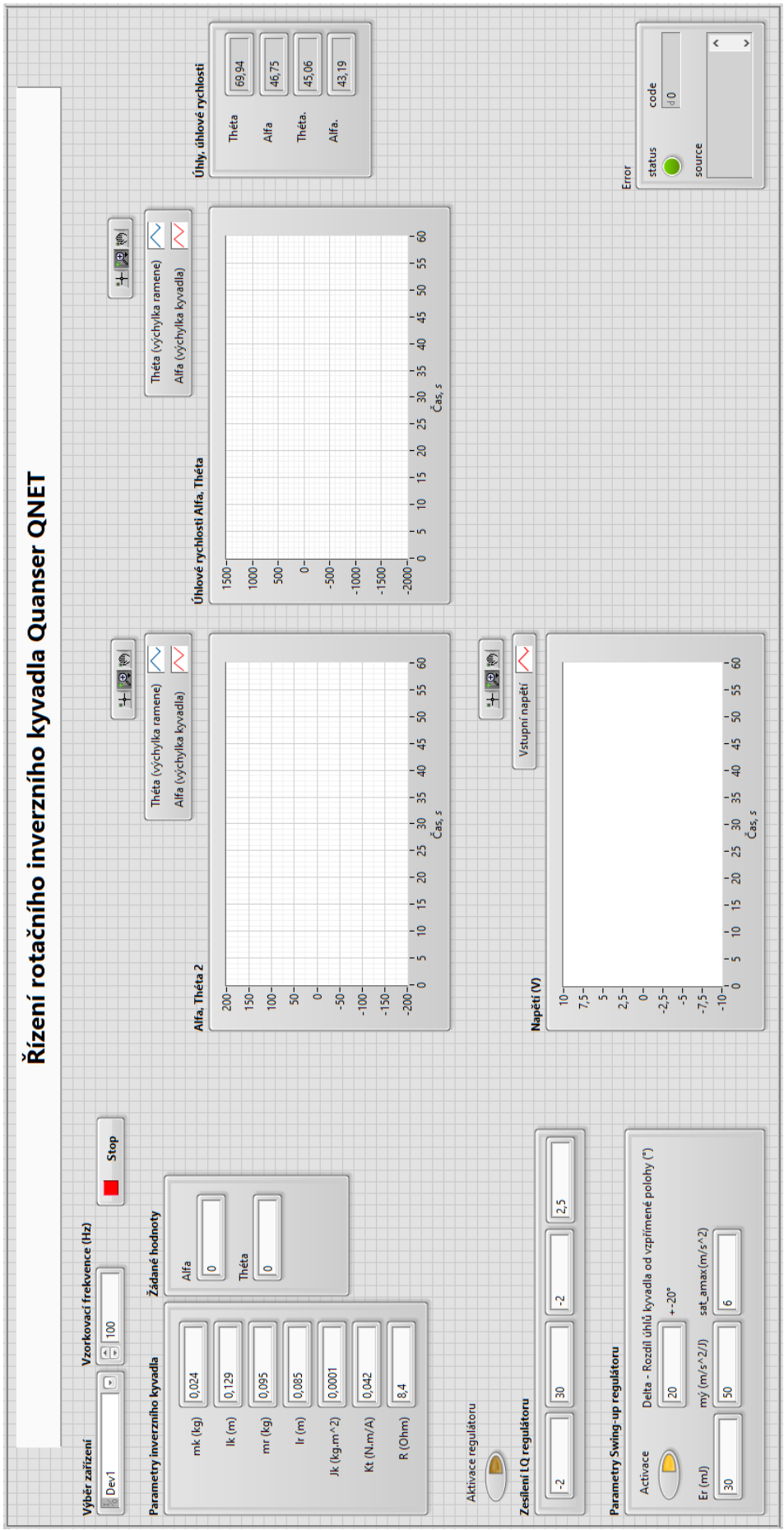
Jednotlivé regulační strategie jsou blíže popsány v předchozích kapitolách práce.

Aplikace pracuje v nekonečném čase, jednotlivé výše uvedené kroky jsou prováděny v nekonečné sekvenci do doby přerušení chodu aplikace uživatelem.

4.2.2 Čelní panel aplikace

Čelní panel (obrázek 4.5) aplikace zprostředkovává uživatelské rozhraní, které umožňuje uživateli monitorovat a ovládat laboratorní soustavu. Čelním panel poskytuje uživateli možnosti:

- výběr zařízení,
- nastavení vzorkovací frekvence,
- zastavení aplikace,
- nastavení parametrů systému rotačního inverzního kyvadla,
- nastavení žádaných hodnot,
- aktivaci či deaktivaci jednotlivých regulátorů,
- nastavení parametrů jednotlivých regulátorů,
- monitorování výstupních veličin (úhly natočení, úhlové rychlosti, napětí na servomotoru).

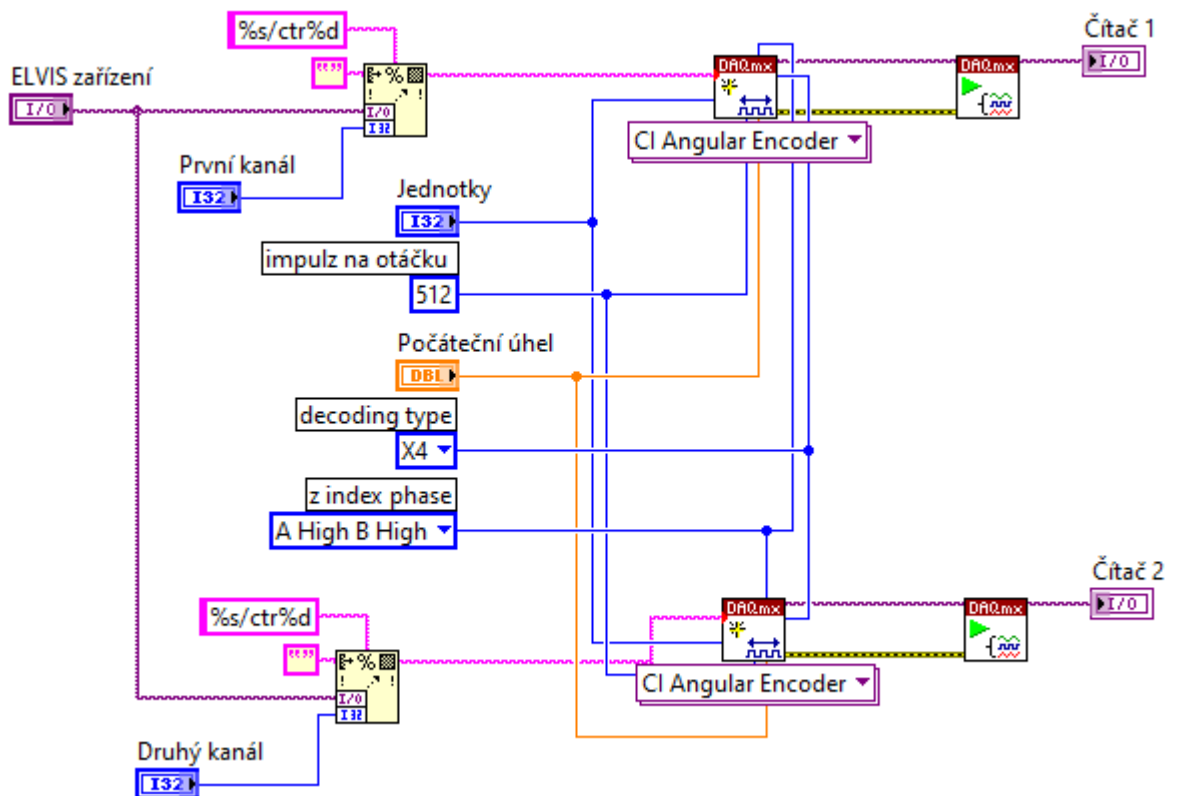


Obrázek 4.5 – Čelní panel

4.2.3 Blokový diagram aplikace

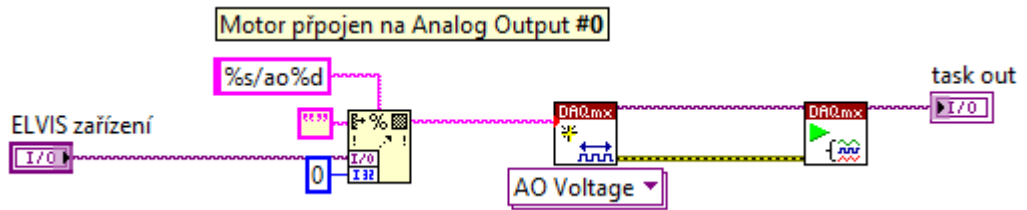
Blokový diagram (obrázek 4.9) obsahuje samotný zdrojový kód aplikace. Kód pracuje s daty získanými komunikací s měřicí kartou NI ELVIS a na základě nastavení na čelním panelu a sledu bloků v blokovém diagramu provádí dané operace. Při tvorbě byl použit rozšiřující modul CDSim, z tohoto důvodu je tělo kódu vnořeno do programové struktury Control & Simulation Loop.

První část kódu provádí inicializaci zařízení, v případě laboratorní sestavy rotačního inverzního kyvadla jde o dva enkodéry, motor a samotnou měřicí kartu. Velikosti úhlů natočení jsou realizovány čítači pomocí speciálních bloků DAQmx určených pro čtení hodnot enkodérů CI Angular Encoder. Blok CI Angular Encoder je nastaven na základě parametrů enkodérů uvedených v kapitole 4.1.



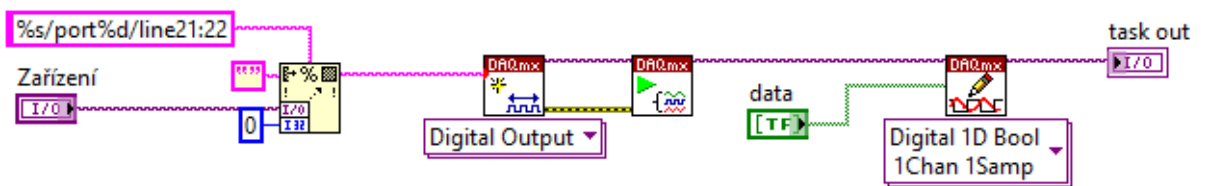
Obrázek 4.6 – Inicializace enkodérů

Motor je ovládán jednoduchým analogovým výstupem (obrázek 4.7).

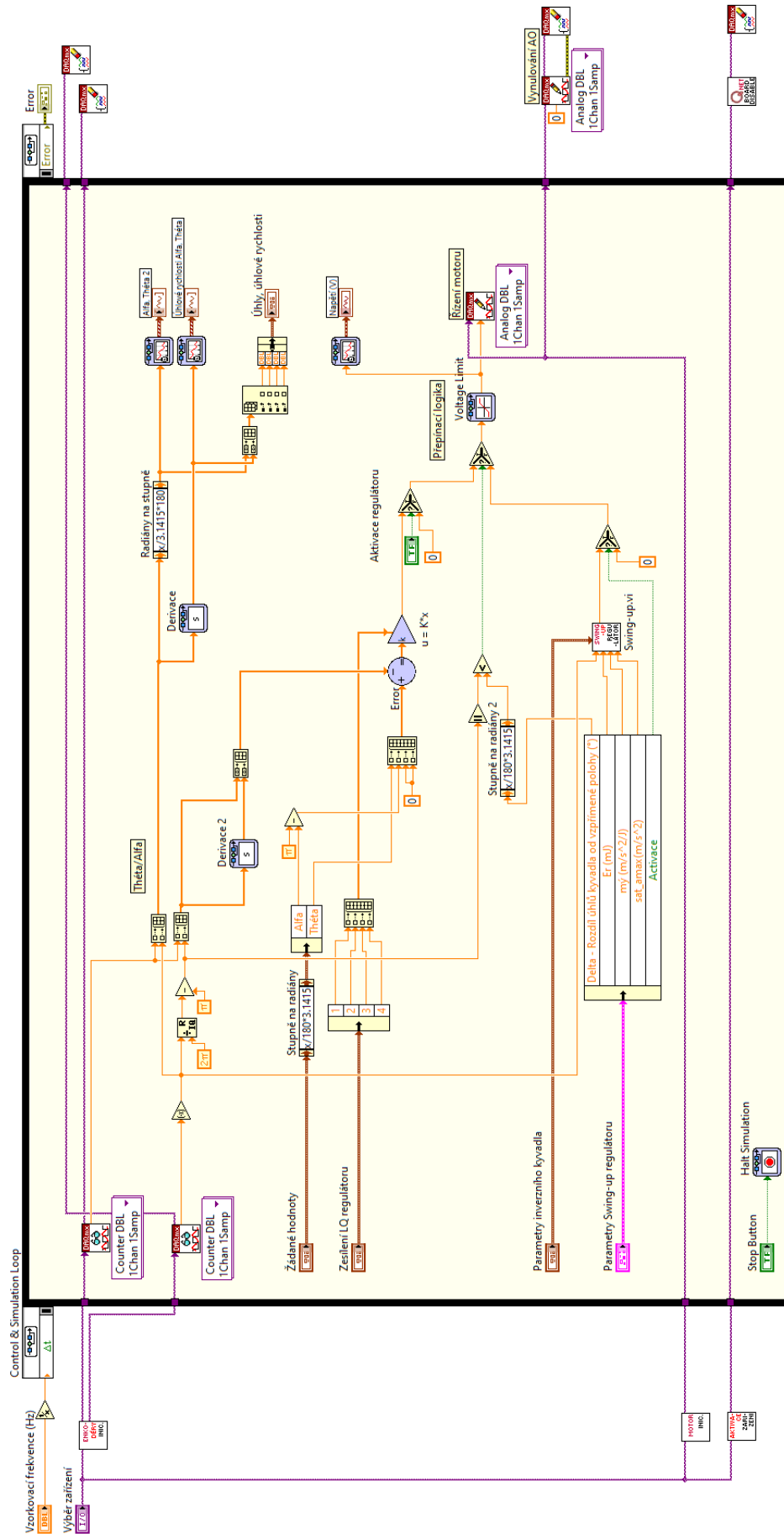


Obrázek 4.7 – Inicializace napětového výstupu motoru

Zařízení je inicializováno zapsáním logické jedničky pomocí bloku Digital Output na aktivační vstup soustavy.



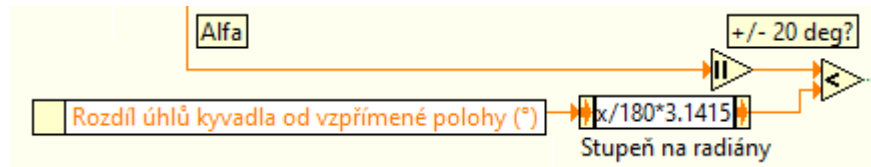
Obrázek 4.8 – Inicializace laboratorní soustavy



Obrázek 4.9 – Blokový diagram aplikace

V další části jsou načtena data z čelního panelu zadané uživatelem aplikace.

Přepínací logika (obrázek 4.10) je realizována pomocí porovnávacího bloku „je menší“, porovnává absolutní hodnotu úhlu α s uživatelem voleným rozdílem od vzpřímené polohy kyvadla. Na základě výsledku je volen regulátor swing-up či balanční LQ regulátor.



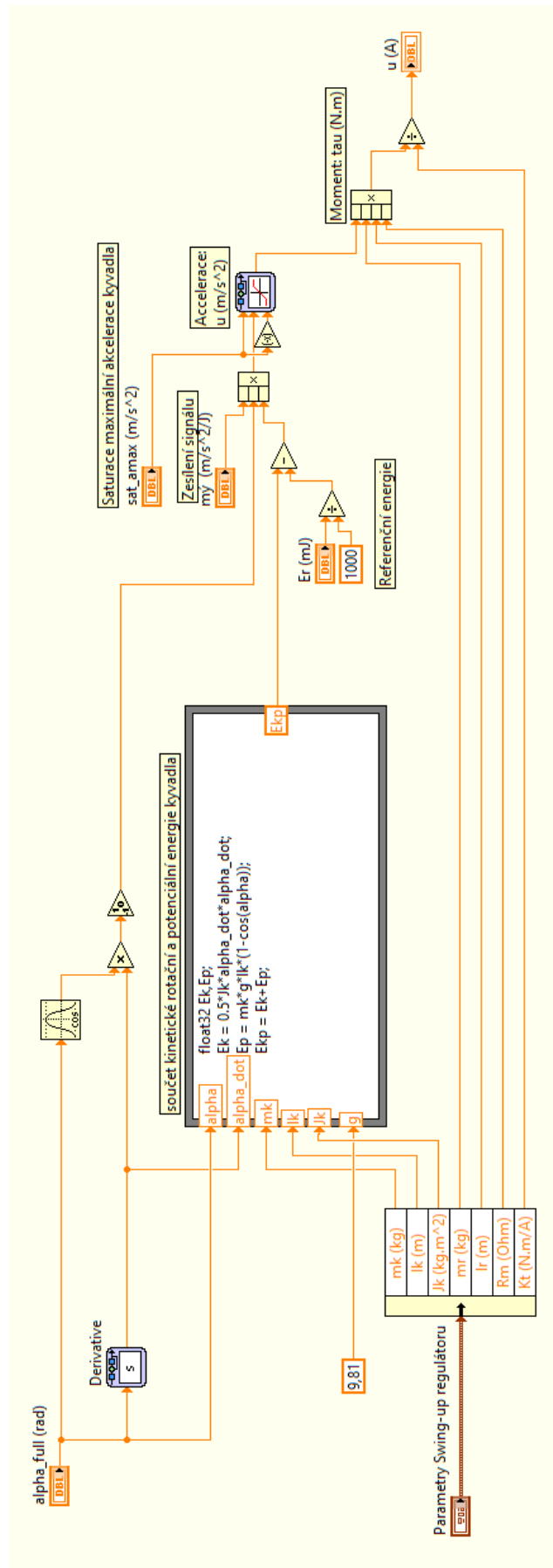
Obrázek 4.10 – Přepínací logika

Hlavní část swing-up (obrázek 4.11) regulátoru je vytvořena za pomoci bloku Formula Node, který umožňuje použití textového kódu k výpočtu vzorce (3.1). Výstup bloku Formula Node je porovnáván s referenční energií, zesílen, saturován a následně přepočítán na napětí řídicí analogový výstup na motoru.

LQ regulátor je realizován blokem Gain, který zesiluje regulační odchylku na základě zesílení zadaném na čelním panelu.

Veškeré monitorovatelné parametry jsou vyobrazovány na čelním panelu.

V posledním kroku je použit blok DAQmx Clear Task, který vymaže a ukončí úlohu na inicializovaných zařízeních. Na motor je zároveň před ukončením úlohy posláno nulové napětí z důvodu zabezpečení motoru. Zároveň je zařízení deaktivováno zapsáním logické nuly na aktivační vstup soustavy.



Obrázek 4.11 – Swing-up regulátor

4.3 ŘÍZENÍ LABORATORNÍ SOUSTAVY ROTAČNÍHO INVERZNÍHO KYVADLA

K řízení laboratorní soustavy rotačního inverzního kyvadla jsou použity navržené regulátory, je ověřen jejich návrh, je provedena jejich případná korekce a je uskutečněno měření na laboratorní soustavě.

4.3.1 Swing-up regulátor

Swing-up regulátor má čtyři nastavitelné parametry μ zesílení signálu, sat_{amax} saturaci maximálního zrychlení kyvadla, rozdíl úhlů natočení kyvadla α od vzpřímené polohy δ a E_r referenční energii kyvadla. První tři uvedené parametry jsou zjištěny na základě odhadu. Referenční energii kyvadla E_r je možné vypočítat pomocí vztahu (3.1) ve vzpřímené poloze kyvadla

$$\alpha = \pi. \quad (4.1)$$

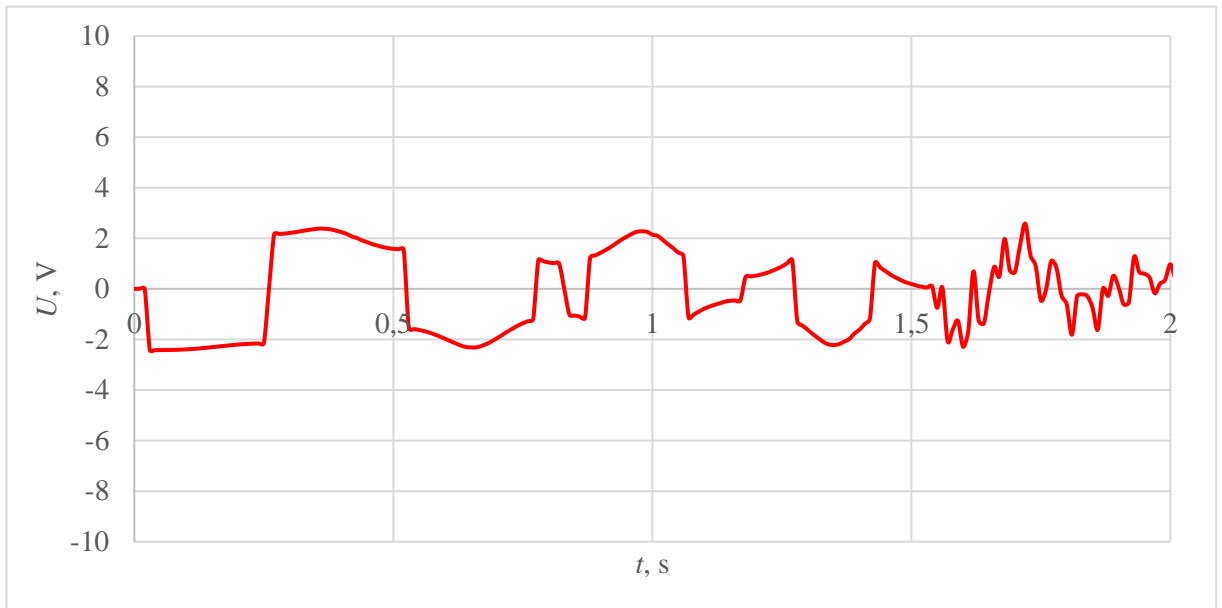
Dosazením do vzorce získáme referenční energii kyvadla

$$E_r = 30,4 \text{ mJ}. \quad (4.2)$$

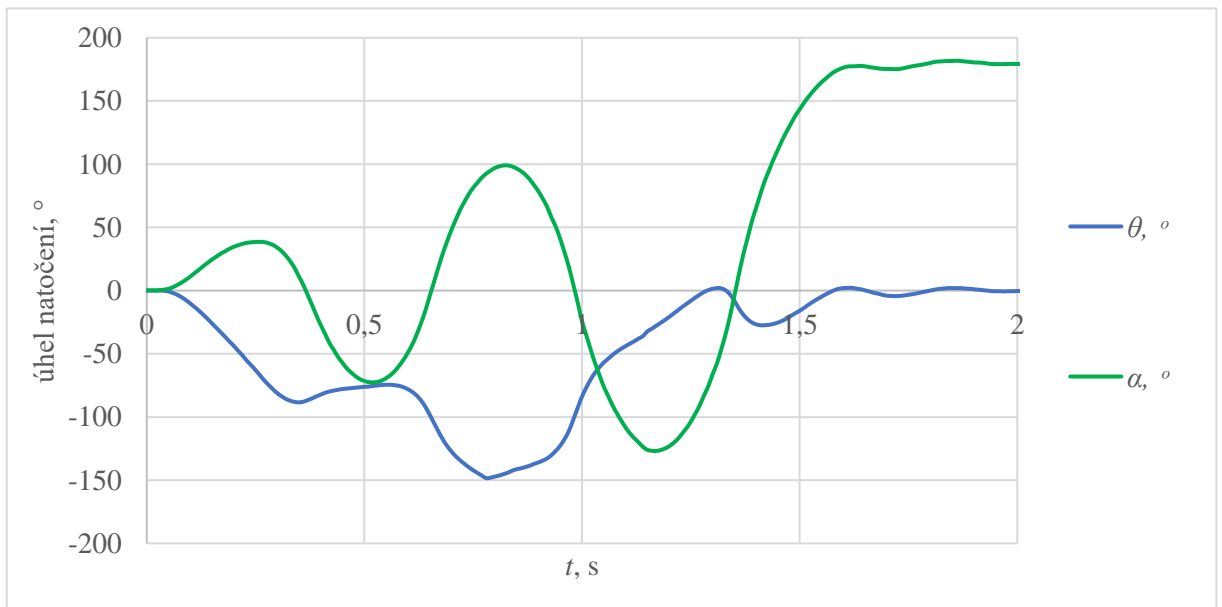
Ostatní parametry jsou pomocí pokusu odhadnuty na velikosti

$$\begin{aligned} \mu &= 20, \\ sat_{amax} &= 6, \\ \delta &= 20^\circ. \end{aligned} \quad (4.3)$$

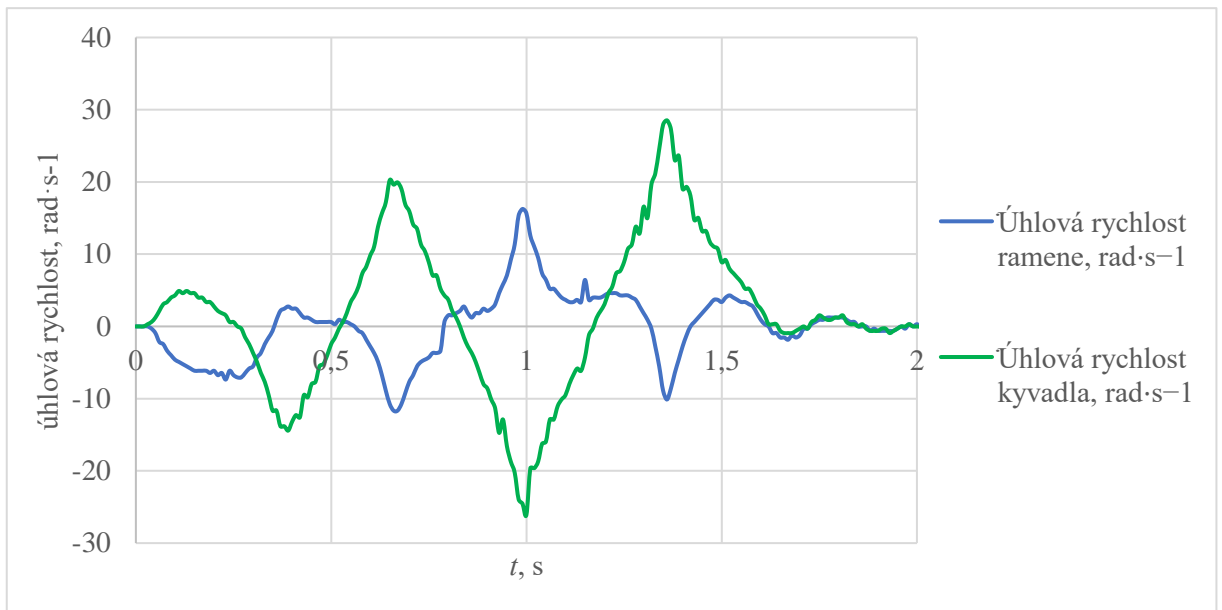
Regulační průběh swing-up regulátoru je znázorněn na obrázcích 4.12, 4.13 a 4.14, kde je nejdříve rozhoupáno kyvadlo prudkými pohyby ramene do bodu, kdy přibližně po dvou sekundách převezme řízení balanční algoritmus.



Obrázek 4.12 – Swing-up regulace průběh napětí na motoru



Obrázek 4.13 – Swing-up regulace úhly natočení



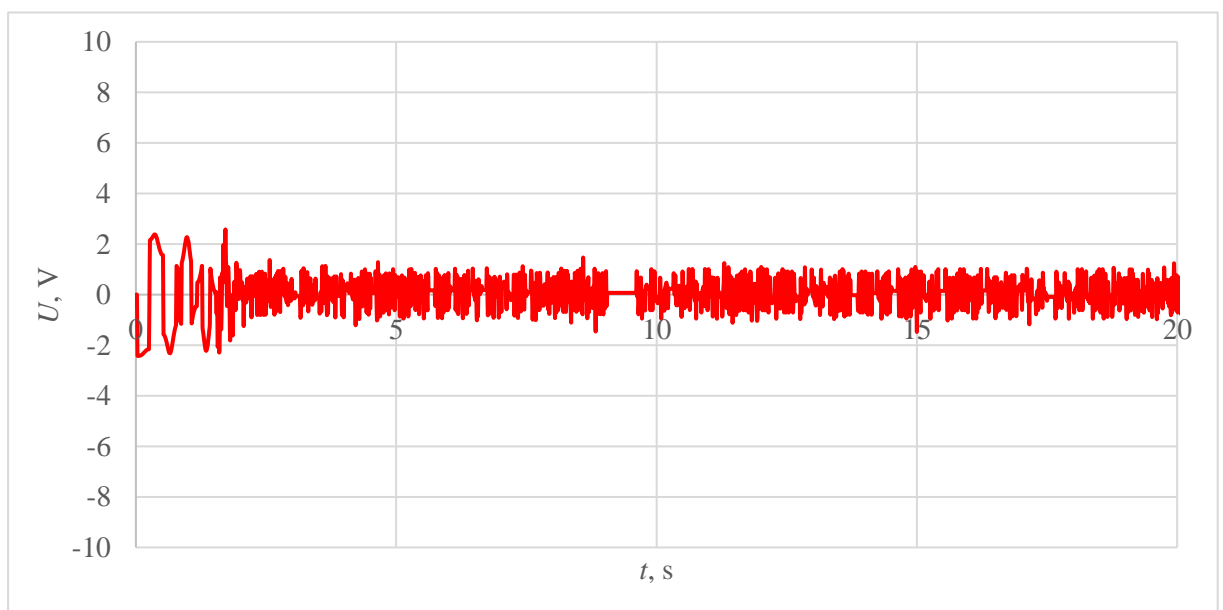
Obrázek 4.14 – Swing-up regulace úhlové rychlosti

4.3.2 Regulační pochod

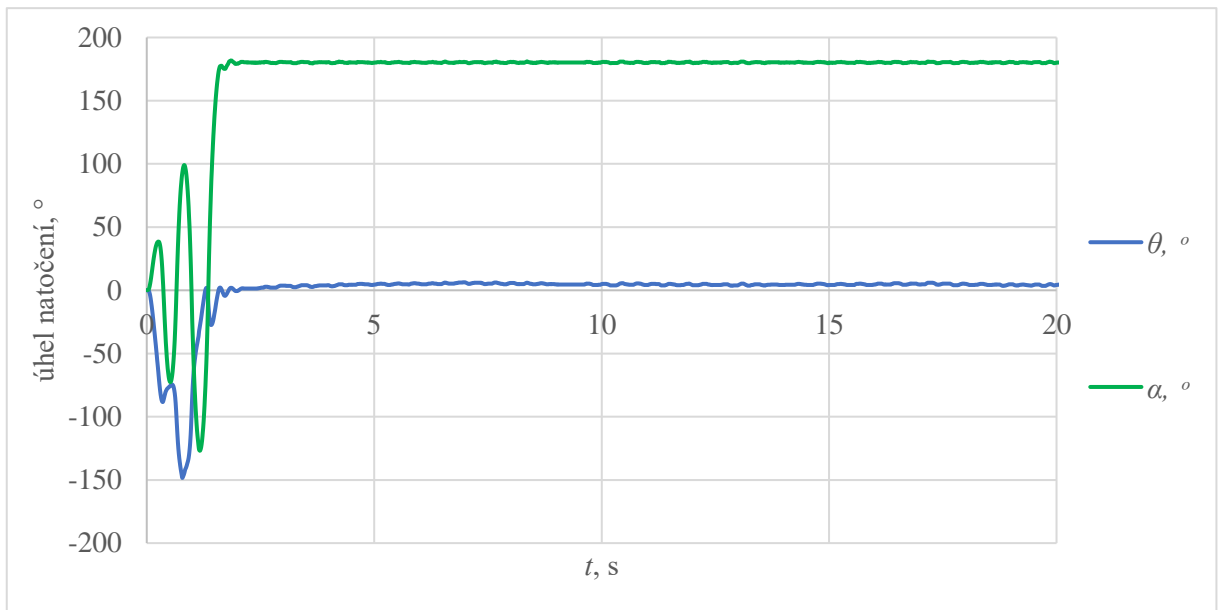
Obrázky 4.15, 4.16 a 4.17 znázorňují regulační pochod rotačního inverzního kyvadla od samotného vyhoupnutí po převzetí řízení balančním algoritmem LQ regulátorem.

Regulace začíná z polohy kyvadla svisle zavěšeného, v zavěšené poloze kyvadla začne swing-up regulátor kyvadlo rozhoupávat změnou energie kyvadla do polohy blízké inverzní zavěšenému stavu.

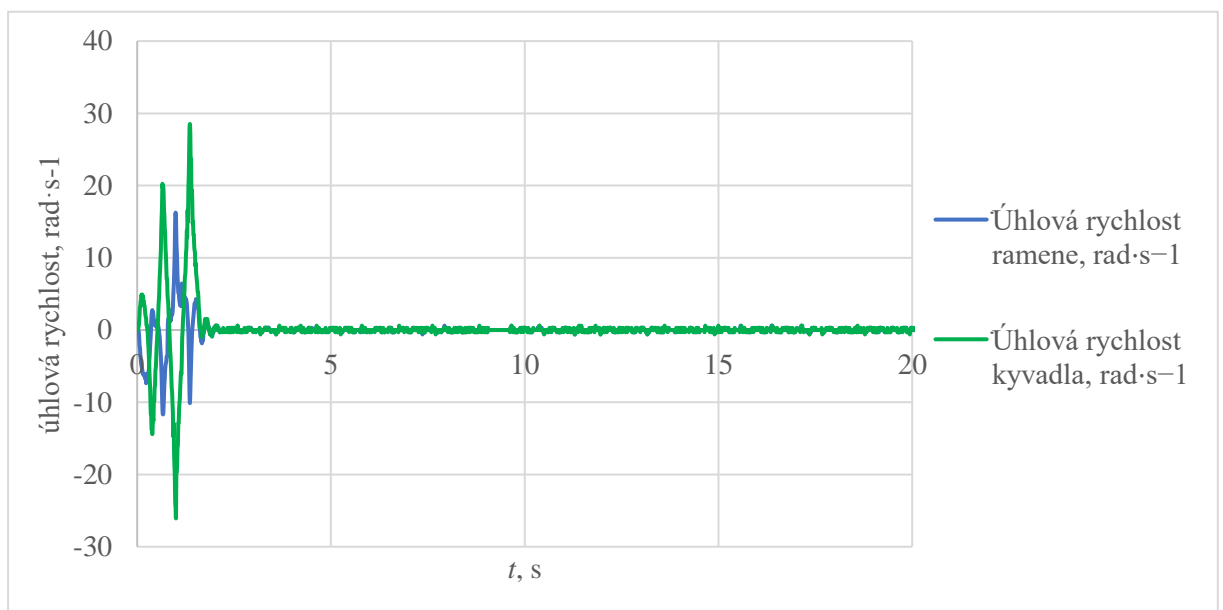
Ve vzpřímené poloze kyvadla převezme řízení LQ regulátor, který udržuje kyvadlo vybalancované ve vzpřímené poloze.



Obrázek 4.15 – Regulační pochod průběh napětí na motoru



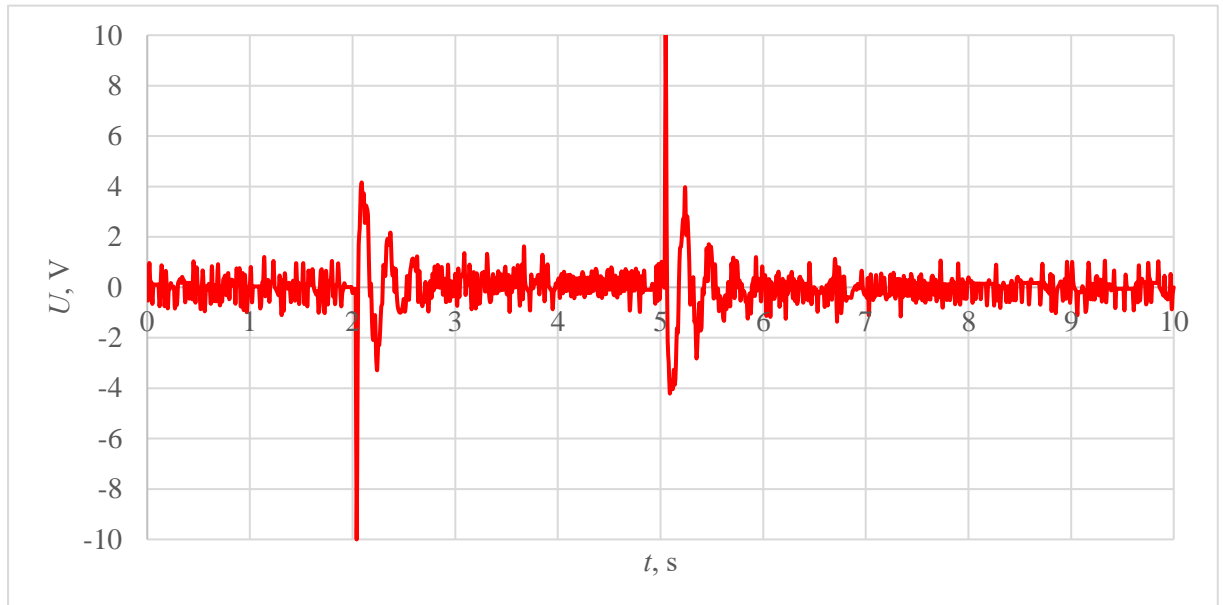
Obrázek 4.16 – Regulační pochod úhly natočení



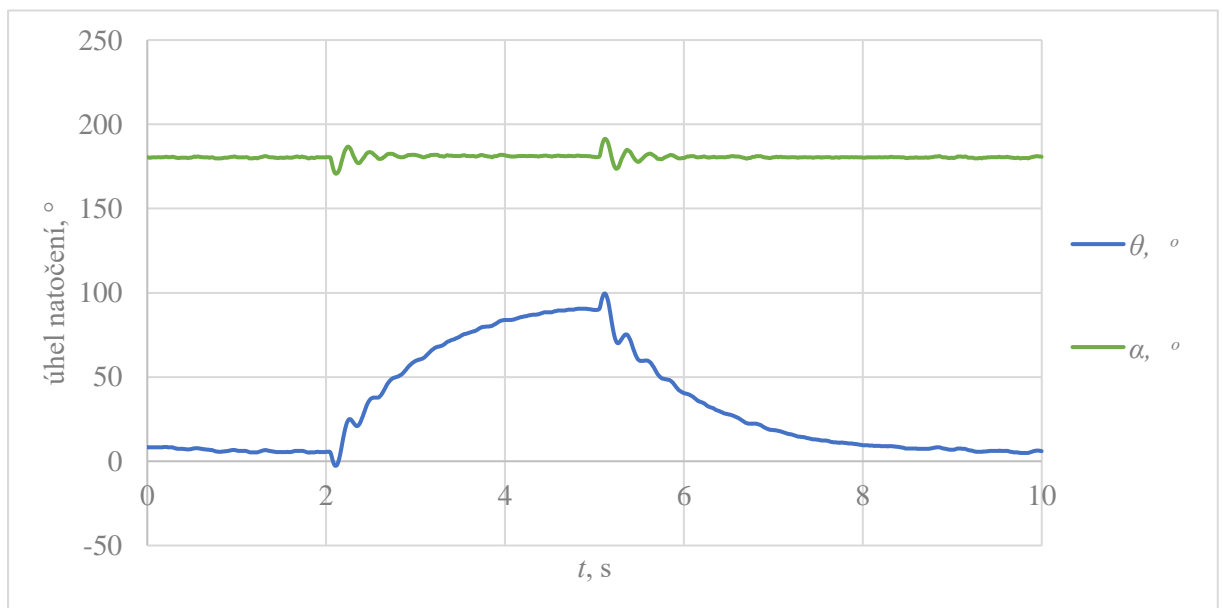
Obrázek 4.17 – Regulační pochod úhlové rychlosti

4.3.3 Odezva na poruchu

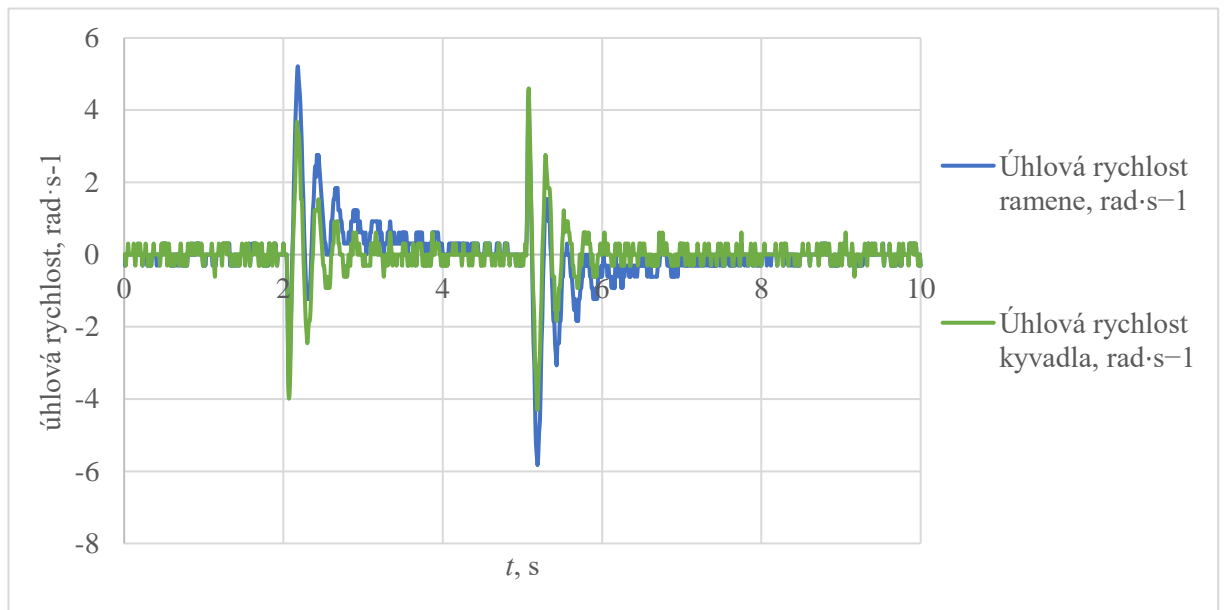
Odezva systému rotačního inverzního kyvadla je realizována skokovou změnou úhlu α o pět stupňů. Na obrázcích 4.18, 4.19 a 4.20 je zaznamenána reakce systému na poruchu.



Obrázek 4.18 – Odezva na poruchu průběh napětí na motoru



Obrázek 4.19 – Odezva na poruchu úhly natočení



Obrázek 4.20 – Odezva na poruchu úhlové rychlosti

5 ZÁVĚR

Úkolem diplomové práce bylo vytvoření řídicího systému soustavy rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET 2.0, seznámení s vývojovým prostředím LabVIEW a jeho rozšiřujícím modulem Control Design and Simulation Module, dále vytvoření modelu rotačního inverzního kyvadla a návržení regulátoru soustavy.

Bylo popsáno grafické vývojové prostředí LabVIEW, byl stručně vysvětlen princip fungování grafického programování a část byla věnována rozšiřujícímu modulu LabVIEW Control Design and Simulation Module a jeho nástrojům.

Dále bylo provedeno seznámení se systémem inverzního kyvadla, podrobněji bylo popsáno rotační inverzní kyvadlo a pomocí matematicko-fyzikální analýzy byl vytvořen matematický model laboratorní soustavy Quanser QNET 2.0.

Regulátor rotačního inverzního kyvadla byl vzhledem k vlastnostem soustavy rozdělen do dvou částí, a to vyhoupnutí kyvadla a jeho balancování. Vyhoupnutí kyvadla bylo realizováno řízením energie kyvadla pomocí swing-up regulátoru. K balancování kyvadla bylo použito LQ regulátoru.

Bylo provedeno seznámení s laboratorní soustavou rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET 2.0, byla popsána vytvořená aplikace k řízení laboratorní soustavy a provedeno měření na laboratorní soustavě.

Vytvořená aplikace řídicí soustavu rotačního inverzního kyvadla spolehlivě ovládá laboratorní soustavu. Navržené regulátory nemusely být k řízení laboratorní soustavy upravovány.

Mezi možností rozšíření práce je návrh jiného typu swing-up regulátoru, například použití PD regulátoru. Další možností rozšíření práce je vylepšení LQ regulátoru, jako jedna z možností se nabízí sledování žádané hodnoty, či úplné návržení jiného způsobu balancování kyvadla.

POUŽITÁ LITERATURA

- ACOSTA, J. Á., 2010. Furuta's Pendulum: A Conservative Nonlinear Model for Theory and Practise. In: *Mathematical Problems in Engineering* [online]. s. 1-29 [cit. 2022-07-31]. ISSN 1024-123X. Dostupné z: doi:10.1155/2010/742894
- DUŠEK, František, 2019. *Spojité řízení*.
- JOST, Beate, Markus KETTERL, Reinhard BUDDE a Thorsten LEIMBACH, 2014. Graphical Programming Environments for Educational Robots: Open Roberta - Yet Another One?. In: *2014 IEEE International Symposium on Multimedia* [online]. IEEE, s. 381-386 [cit. 2022-05-16]. ISBN 978-1-4799-4311-1. Dostupné z: doi:10.1109/ISM.2014.24
- LANCASTER, Peter a Leiba RODMAN, 1995. *Algebraic Riccati Equations*. 1st Edition. Oxford Science Publications, 504 s. ISBN 978-0-19-853795-3.
- MANDÍK, Radek, 2019. *ŘÍZENÍ TEPELNÉ SOUSTAVY*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Libor Kupka.
- MARTIN, Peter, Matthias KRUG a Jacob APKARIAN, 2015. *STUDENT WORKBOOK: QNET 2.0 Rotary Pendulum Board for NI ELVIS*. Quanser.
- MATHEW, Navin John, K. Koteswara RAO a N. SIVAKUMARAN, 2013. Swing Up and Stabilization Control of a Rotary Inverted Pendulum. In: *IFAC Proceedings Volumes* [online]. s. 654-659 [cit. 2022-08-02]. ISSN 14746670. Dostupné z: doi:10.3182/20131218-3-IN-2045.00128
- NATIONAL INSTRUMENTS, 2018. LabVIEW 2018 Control Design and Simulation Module Help: Introduction to Control Design (Control Design and Simulation Module). In: *National Instruments Corporation* [online]. © National Instruments [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371894J-01/lvsimconcepts/sim_c_ctrl_dsgn/
- NATIONAL INSTRUMENTS, 2018. LabVIEW 2018 Control Design and Simulation Module Help: Control Design and Simulation Module. In: *National Instruments* [online]. © National Instruments Corporation [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371894J-01/lvsimconcepts/sim_c_intro/
- NATIONAL INSTRUMENTS, 2020. LabVIEW Block Diagram Explained. In: *National Instruments* [online]. © National Instruments [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/documentation/supplemental/08/labview-block-diagram-explained.html>
- NATIONAL INSTRUMENTS, Austin, 2006. LabVIEW™: System Identification Toolkit User Manual. In: *National Instruments* [online]. © 2021 National Instruments Corporation [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.ni.com/pdf/manuals/371001c.pdf>
- NATIONAL INSTRUMENTS, Austin, 2009. LabVIEW™: PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual. In: *National Instruments* [online]. © National Instruments Corporation [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372192d.pdf>
- QNET 2.0 Rotary Pendulum Board. In: *Quanser* [online]. Quanser [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://www.quanser.com/products/qnet-2-0-rotary-pendulum-board/>
- Rocket aerodynamics. In: *Science Learning Hub* [online]. University of Waikato [cit. 2022-07-31]. Dostupné z: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/392-rocket-aerodynamics>

- SRITHARAN, R., M. SIVAPALANIRAJAN a M. WILLJUICEIRUTHAYARAJAN, 2018. Mathematical Modeling and Control of QNET Rotary Inverted Pendulum in MATLAB and Real Time Implementation in Lab View Using ELVIS. In: *2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)* [online]. IEEE, s. 1452-1457 [cit. 2022-07-31]. ISBN 978-1-5386-1974-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICICCT.2018.8473139
- VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH, 2008. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-245-9.

PŘÍLOHY

A - CD

Příloha k diplomové práci

Řízení rotačního inverzního kyvadla Quanser QNET

Radek Mandík

CD

Obsah

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF
- 2 Zdrojový kód aplikace