ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

INVERZNÍ KYVADLO

Praha, 2008 **Autor: Lukáš Kratochvíl**

Prohlášení:

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

V Praze dne 10. 7. 08

podpis

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu bakalářské práce Ing. Jindřichu Fukovi za pomoc při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Slavomíru Jirků, CSc. a Ing. Petru Kočárníkovi za cenné připomínky při odvozování diferenciálních rovnic v rámci předmětu Dynamika mechanických soustav. Mé dík rovněž patří panu Ladislavu Čmelíkovi za výrobu některých mechanických částí k modelu. Závěrem bych chtěl také poděkovat celé mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce byla úprava a rozšíření výukového modelu inverzní kyvadlo tak, aby jej bylo možné řídit jak z PC, tak z programovatelného automatu. Model je umístěn v laboratoři K23 katedry řídící techniky a slouží především studentům v rámci předmětů zabývajících se řízením. Pro tyto účely byl vytvořen popis modelu včetně šablon v prostředí Simulinku, usnadňující studentům návrh regulátorů. Součástí práce byl také návrh ukázkového regulátoru stabilizující kyvadlo v horní poloze.

Abstract:

The aim of this bachelor thesis was to modify and extend the educational model of inverted pendulum, which is located in laboratory K23 of Czech Technical University in Prague, Department of Control Engineering. A description of the model was made including Simulink templates, which will be used by students in control lessons. Finally, a sample regulator, which stabilizes the pendulum in the upward position, was designed for presentation purposes.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Lukáš Kratochvíl**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Inverzní kyvadlo**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s programovatelným automatem ControlLogix firmy Rockwell Automation a panelem operátora PanelView Plus.
2. Upravte stávající elektroniku inverzního kyvadla tak, aby bylo zajištěno přepínání řízení mezi PC a programovatelným automatem.
3. Připravte demonstrační program pro programovatelný automat s případnou vizualizací.
4. Identifikací ověřte vlastnosti systému po provedených úpravách.
5. Zpracujte popis systému inverzního kyvadla pro výuku včetně typických úloh řízení jak pomocí Matlabu, tak i programovatelného automatu.

Seznam odborné literatury:

Firemní materiály

Vedoucí: Ing. Jindřich Fuka

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

r.z.
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

Obsah

Kapitola 1 Úvod **10**
Kapitola 2 Výukový přípravek inverzní kyvadlo **11**
2.1 Model inverzního kyvadla 12
2.2 Hlavní skříň 12
2.2.1 Obvod přepínání řízení mezi Matlabem a PLC 13
2.3 Joystick 13
2.4 Propojení modelu s Matlabem 14
2.4.1 Blok pendulum 14
2.4.2 Blok joystick 15
2.5 Propojení modelu s PLC 16
Kapitola 3 Řízení modelu **17**
3.1 Odvození rovnic 17
3.1.1 Ztráty třením 20
3.1.2 Konečná podoba rovnic 21
3.2 Identifikace modelu 21
3.3 Linearizace modelu 23
3.4 Stavový popis 24
3.5 Návrh regulátoru 25
3.5.1 Návrh vnitřní smyčky 26
3.5.2 Návrh vnější smyčky 26
3.6 Realizace regulace v Simulinku 27
3.6.1 Blok přepočet úhlu 27
3.6.2 Blok spuštění regulace 29
3.6.3 Automatické vyšvihnutí kyvadla do horní polohy 29
3.7 Realizace regulace v PLC 29
3.7.1 Spouštění řízení 29
3.7.2 Poznámky k implementaci 30
3.8 Vlastnosti navržené regulace 30
3.8.1 Stabilizace kyvadla 30
3.8.2 Systém s neminimální fází 30
3.8.3 Automatické vyšvihnutí do horní polohy 31
Kapitola 4 Závěr **36**
Literatura **37**
Příloha A Obsah přiloženého CD **38**
Příloha B Elektrické zapojení **39**
B.1. Zapojení konektorů na panelu hlavní skříně 39
B.2. Schémata zapojení 41
Příloha C Skript návrhu regulátoru pro Matlab **43**
Příloha D Realizace regulátoru v PLC **44**

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Model inverzního kyvadla 12
Tab. 2.2: Využité moduly PLC 16
Tab. 4.1: Konektor pendulum 39
Tab. 4.2: Konektor joystick 40
Tab. 4.3: Konektor kabelu propojující přípravek s PLC 40
Tab 4.4: Seznam součástek obvodu přepínání řízení 42

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Propojení přípravku včetně názvů kabelů 11
Obr. 2.2: Model inverzního kyvadla 12
Obr. 2.3: Hlavní skříň 13
Obr. 2.4: Joystick 14
Obr. 2.5: Šablona pro návrh regulátorů v Simulinku 14
Obr. 2.6: Měření náklonu 15
Obr. 2.7: Vnitřní struktura bloku pendulum 15
Obr. 2.8: Vnitřní struktura bloku joystick 16
Obr. 3.1: Mechanika modelu 17
Obr. 3.2: Rychlost těžiště kyvadla 19
Obr. 3.3: Virtuální práce kyvadla 20
Obr. 3.4: Nelineární model systému v Simulinku 22
Obr. 3.5: Porovnání odezvy reálného systému a simulace 22
Obr. 3.6: Základní regulační schéma 25
Obr. 3.7: Blok přepočet úhlu 27
Obr. 3.8: Odchylky od pracovního bodu 27
Obr. 3.9: Hlavní regulační schéma pro Simulink 28
Obr. 3.10: Blok přepínání řízení 29
Obr. 3.11: Přenos na polohu v uzavřené smyčce 31
Obr. 3.12: Stabilizace kyvadla bez vnějších zásahů 32
Obr. 3.13: Stabilizace kyvadla s vnějšími zásahy do soustavy 32
Obr. 3.14: Ovládání vozíku joystickem 33
Obr. 3.15: Posun vozíku se stabilizovaným kyvadlem 34
Obr. 3.16: Automatické vyšvihnutí vozíku do horní polohy 35
Obr. 4.1: Vnitřní zapojení modelu inverzní kyvadlo 41
Obr. 4.2: Vnitřní zapojení joysticku 41
Obr. 4.3: Schéma zapojení obvodu přepínání řízení 42
Obr. 4.4: Rutina pendulum1, část 1/2 44
Obr. 4.5: Rutina pendulum1, část 2/2 45
Obr. 4.6: Rutina pendulum2, list 1/2 46
Obr. 4.7: Rutina pendulum2 list 2/2 46

Kapitola 1

Úvod

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část, obsažená v kapitole 2, se zabývá úpravou výukového modelu inverzní kyvadlo, který je umístěn v laboratoři K23 katedry řídící techniky. Cílem provedených úprav bylo především umožnit řízení modelu jak z Matlabu v PC, tak z programovatelného automatu (PLC) firmy Rockwell Automation a dále rozšířit funkčnost modelu o další prvky. Součástí druhé kapitoly je i kompletní popis modelu po provedených úpravách, který bude sloužit studentům v rámci výuky v laboratoři. Jsou zde popsány jednotlivé části výukového modelu včetně obvodu přepínání řízení. Dále je uveden způsob připojení modelu k Matlabu a PLC a jsou připraveny šablony pro návrh regulátorů v prostředí Simulinku.

Cílem druhé části práce, obsažené v kapitole 3, bylo navrhnout a implementovat ukázkový regulátor, který bude stabilizovat kyvadlo v horní poloze. Kapitola zahrnuje všechny kroky nutné pro úspěšný návrh regulátoru od odvození diferenciálních rovnic a identifikace modelu přes linearizaci v pracovním bodě, výběr vhodného typu regulátoru a jeho návrh až po jeho samotnou realizaci v Simulinku a PLC. Závěrem je provedeno zhodnocení navrženého řízení a jeho porovnání se simulací.

Kapitola 2

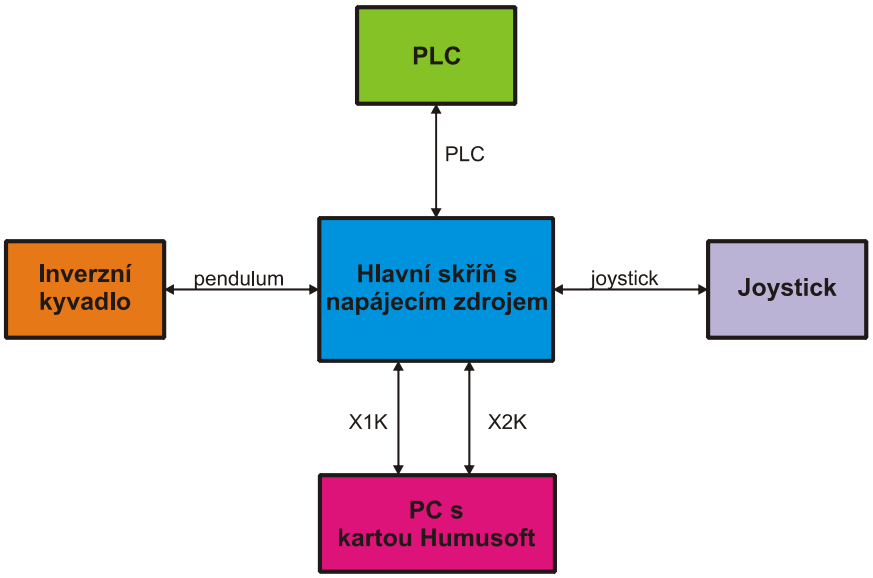
Výukový přípravek inverzní kyvadlo

Současná podoba výukového přípravku inverzní kyvadlo vznikla úpravou a rozšířením původního přípravku, který byl sestaven a poprvé uveden do provozu Tomášem Hanišem v roce 2007 v rámci jeho semestrální práce. Základem přípravku se tehdy stal zakoupený model vyrobený firmou Quanser. Následně byla sestavena dráha vozíku s kyvadlem a výrazně přepracováno elektrické zapojení umožňující přípravek alespoň provizorně připojit k PC s Matlabem. K provedeným změnám byla vytvořena pouze velice stručná dokumentace [1] doplněná uživatelským manuálem k zakoupenému modelu [2].

Hlavním motivem k dalším úpravám v rámci této bakalářské práce bylo umožnit řízení modelu jak z Matlabu v PC, tak z programovatelného automatu (PLC). Za tímto účelem byly provedeny některé další mechanické úpravy a došlo k rozšíření o dodatečnou elektroniku zajištující přepínání řízení. Během úprav přípravku bylo dbáno na to, aby jeho jednotlivé části byly snadno odpojitelné a tím byla zajištěna jeho snadná přenositelnost.

Přípravek se nyní skládá z několika navzájem propojených částí podle Obr. 2.1. Hlavní skříň obsahuje obvod přepínání řízení mezi Matlabem a PLC a současně slouží jako hlavní napájecí zdroj. Propojení s okolím je zajištěno přes konektorový panel v zadní části skříně, kam se připojuje samotný model inverzního kyvadla, převodníková karta PC, propojovací kabel s PLC a případně i joystick.

Dále je uveden stručný popis jednotlivých částí včetně samotného modelu Inverzní kyvadlo, na kterém sice nebyly prováděny žádné zásadní úpravy, ale podrobný popis je potřebný pro výuku v laboratoři.

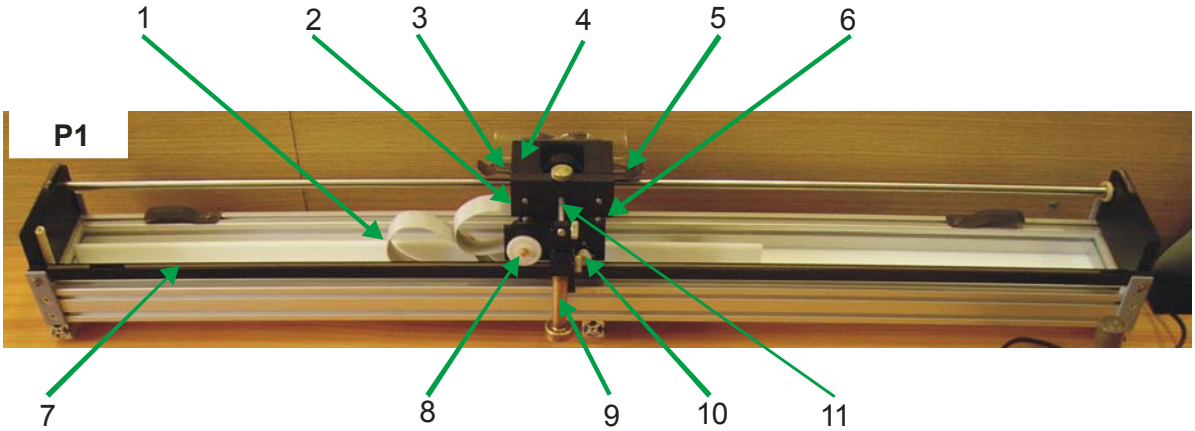


Obr. 2.1: Propojení přípravku včetně názvů kabelů

2.1 Model inverzního kyvadla

Model (Obr. 2.2) se skládá z vozíku poháněného stejnosměrným motorem přes ozubené kolo po ozubnici. Na vozíku je zavěšeno kyvadlo volně otočné na hřídeli. Model je vybaven dvěma optickými inkrementálními snímači (IRC). Jeden snímá polohu vozíku přes ozubené kolo, druhý snímá náklon kyvadla. Vozík je dále vybaven čtyřmi koncovými spínači. Dva horní snímače (KLN, KPN) hardwarově odpojují motor od napájení. Dva dolní spínače (KLD, KPD) jsou vyvedeny na připojovací sběrnici a jsou k dispozici pro účely řízení.

Inkrementální snímače generují 2x1024 pulzů na otočku, což dopovídá v kvadraturním módu rozlišení 4096 hodnot na otočku. Snímače nemají vyvedený signál nulové značky. Bližší technické specifikace jsou k dispozici v uživatelském manuálu výrobce [1]. Původní schéma zapojení modelu bylo opraveno a je uvedeno v příloze B.2.



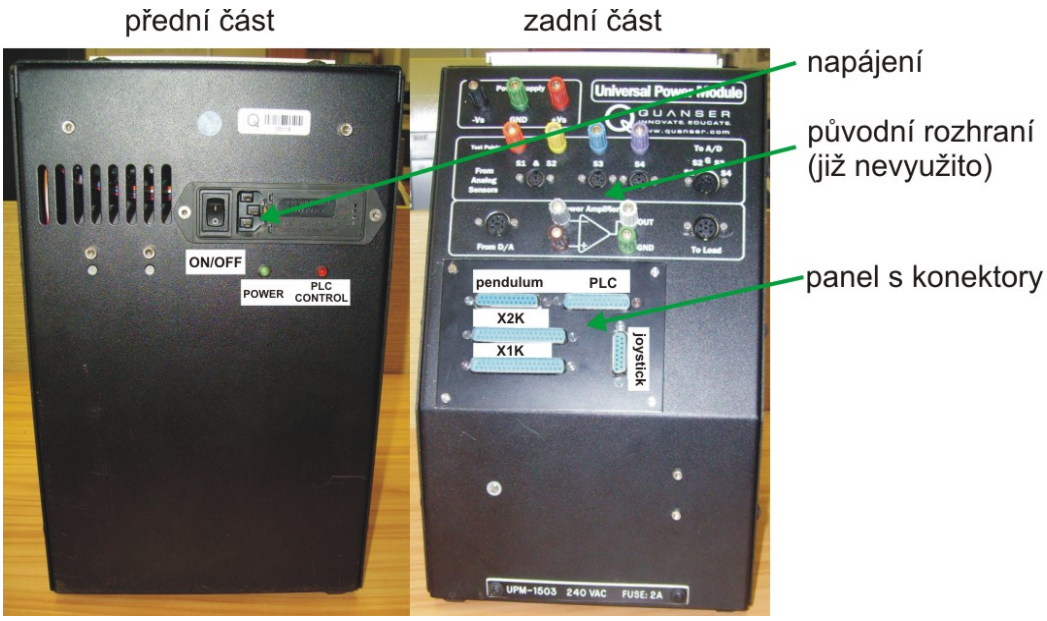
Obr. 2.2: Model inverzního kyvadla

1	připojovací sběrnice	7	ozubnice
2	koncový spínač KLD	8	snímání polohy vozíku přes IRC
3	koncový spínač KLN	9	kyvadlo
4	vozík	10	pohon vozíku stejnosměrným motorem
5	koncový spínač KPN	11	snímání náklonu kyvadla přes IRC
6	koncový spínač KPD		

Tab. 2.1: Model inverzního kyvadla

2.2 Hlavní skříň

Hlavní skříň vznikla úpravou napájecího zdroje pro původní model kyvadla. Jelikož se ve zdroji nacházel dostatek volného místa, byla přepínací deska s elektronikou umístěna přímo do skříně zdroje. Dále byl zdroj vybaven panelem s konektory pro připojení ostatních částí přípravku. Součástí hlavní skříně je i výkonový zesilovač, který slouží k napájení motoru ve vozíku.



Obr. 2.3: Hlavní skříň

2.2.1 Obvod přepínání řízení mezi Matlabem a PLC

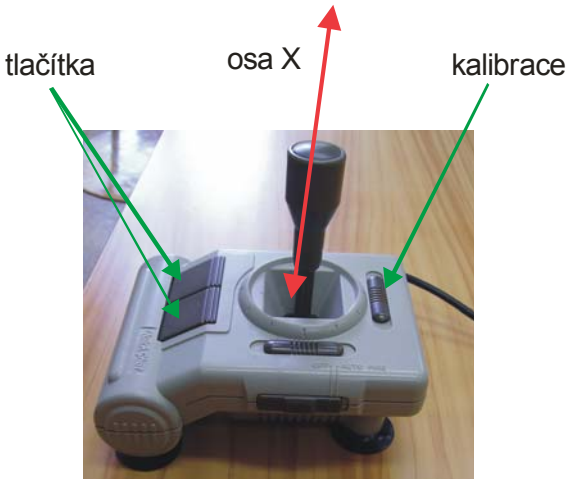
Kyvadlo je implicitně řízeno z Matlabu přes PC. V případě potřeby se PLC řízení přepíná speciálním signálem, což je indikováno červenou LED diodou na hlavní skříni. Jak PC tak PLC získává neustále informace o výstupech modelu (IRC snímače, koncové spínače) nezávisle na tom, z kterého místa je model právě řízen. Manuální režim řízení není umožněn.

Elektrické schéma je uvedeno v příloze B.2. Relé zajišťuje přepínání řízení vstupního signálu motoru a je ovládáno signálem z PLC. Obvod 74HCT04 plní funkci impedančního oddělení signálů z IRC snímačů od vstupů PLC, které mají příliš malý vnitřní odpor pro přímé připojení snímačů.

2.3 Joystick

Upravili jsme zapojení starého analogového PC herního joysticku s konektorem pro gameport (Obr. 2.4). Poloha páky je snímána v ose X pomocí posuvného potenciometru, dále jsou vyvedeny obě hlavní tlačítka pro případné další využití. Nevýhodou joysticku je nutnost kalibrace klidové polohy páky. Elektrické schéma zapojení je v příloze B.2.

Původní záměr byl využít joystick k manuálnímu řízení, což se ukázalo v praxi jako nereálné. Přesto má připojený joystick praktický význam, může být použit například jako zdroj referenční polohy vozíku.

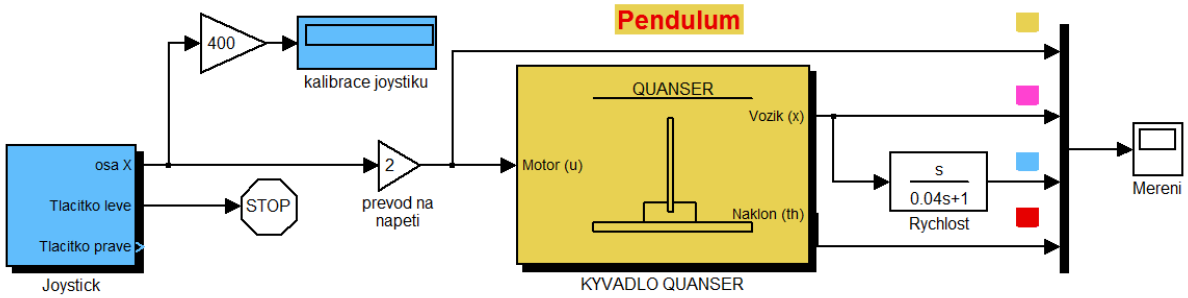


Obr. 2.4: Joystick

2.4 Propojení modelu s Matlabem

PC je vybaveno převodníkovou kartou Humusoft MF624 [3] a realtime toolboxem pro Matlab, který umožňuje v reálném čase řídit model. Karta MF624 obsahuje všechny potřebné vstupy a výstupy, jmenovitě čítače pro IRC, digitální a analogové vstupy a digitální a analogové výstupy.

Pro účely řízení kyvadla byl v Simulinku vytvořen blok pendulum. Propojení s joystickem je reprezentováno blokem joystick, oba bloky jsou použity v připravené šabloně pro výuku v laboratoři (Obr. 2.5).



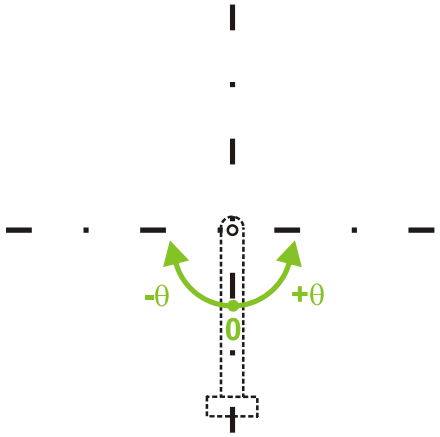
Obr. 2.5: Šablona pro návrh regulátorů v Simulinku

2.4.1 Blok pendulum

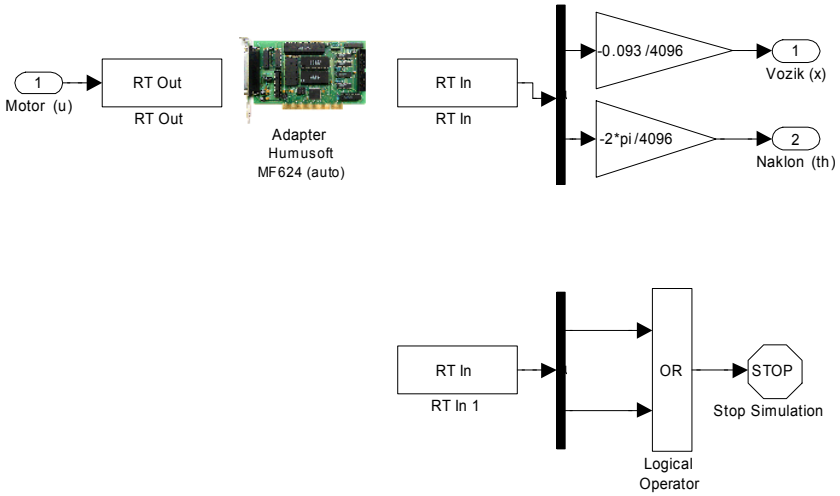
Vnitřní struktura bloku je znázorněna na Obr. 2.7. Vstup motor je převáděn DA převodníkem karty na řídící signál vozíku. Rozsah vstupu je normalizován na interval $<-1, 1>$, který odpovídá napětí převodníku $<-10\mathrm{V}, 10\mathrm{V}>$. Řídící signál je zesílen výkonovým zesilovačem v hlavní skříni a přiveden na vstup stejnosměrného motoru vozíku. Napěťový rozsah se při zesílení nemění a zůstává $<-10\mathrm{V}, 10\mathrm{V}>$.

Náklon kyvadla je snímán inkrementálním snímačem a ukládán v čítacím registru převodníkové karty. Hodnota na výstupu je převáděna na radiány, kde směru proti pohybu hodinových ručiček odpovídá kladná a směru opačnému záporná hodnota. Nulová hodnota je inicializována při spuštění simulace, typicky proto odpovídá dolní poloze kyvadla.

Způsob měření náklonu vystihuje Obr. 2.6. Poloha vozíku je měřena podobně jako náklon kyvadla. Hodnota na výstupu je převedena na metry. Nulová hodnota je opět inicializována při spuštění simulace, kladný směr odpovídá posuvu zleva doprava.



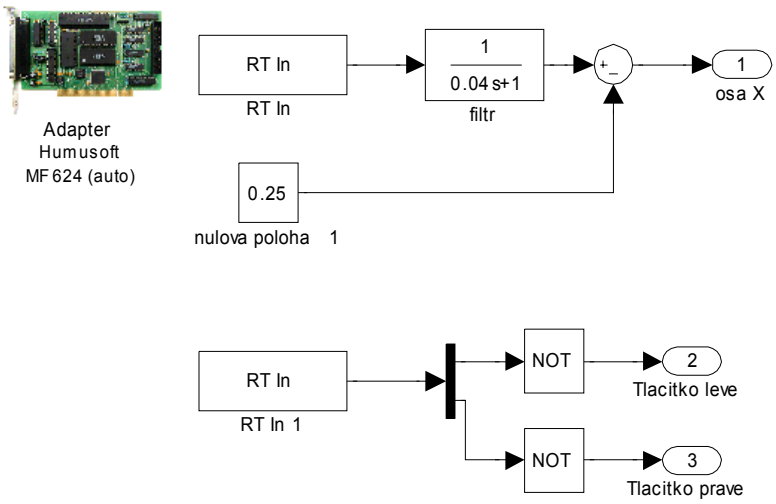
Obr. 2.6: Měření náklonu



Obr. 2.7: Vnitřní struktura bloku pendulum

2.4.2 Blok joystick

Vnitřní struktura bloku je znázorněna na Obr. 2.8. Napětí z potenciometru v rozsahu $< 0 - 5\mathrm{V} >$ je převáděno AD vstupem převodníkové karty na rozsahu hodnot $< 0 - 0.5 >$. Vzhledem k tomu, že signál potenciometru je silně zašuměný, je třeba použít frekvenční filtr. V našem případě postačila jednoduchá dolní propust prvního řádu s $\omega_0 = 25 rad/s$.



Obr. 2.8: Vnitřní struktura bloku joystick

2.5 Propojení modelu s PLC

Model byl připojen k programovatelnému automatu řady ControlLogix 1756 firmy Rockwell Automation. Jedná se o moderní automat vybavený celou řadou pokročilých funkcí hojně využívaný v celé řadě průmyslových aplikací. Důležitou součástí automatu je i kompletní balík uživatelsky přívětivého PC software sloužící především k jeho programování, ale plnící i řadu dalších funkcí jako například monitorování chodu systému.

Jednou z výhod automatů řady ControlLogix je jejich modulární struktura. K hlavnímu procesoru, který vykonává řídící program, se podle potřeby připojují externí I/O moduly jako jednotlivá samostatně fungující zařízení komunikující s hlavním procesorem.

Pro účely naší aplikace byly využity moduly z tabulky dole.

I/O	název	katalogové č.	využití
I	High Speed Counter [4]	1756-HSC	připojení inkrementálních snímačů IRC
I	Isolated Input Module [5]	1756-IB16I	připojení koncových spínačů
O	Fused Output Module [5]	1756-OB16E	přepnutí řízení na PLC
O	Analog Output Module [7]	1756-OF8	napětí pro motor vozíku

Tab. 2.2: Využité moduly PLC

Propojení konektoru PLC s jednotlivými moduly je uvedeno v příloze B.1.

Kapitola 3

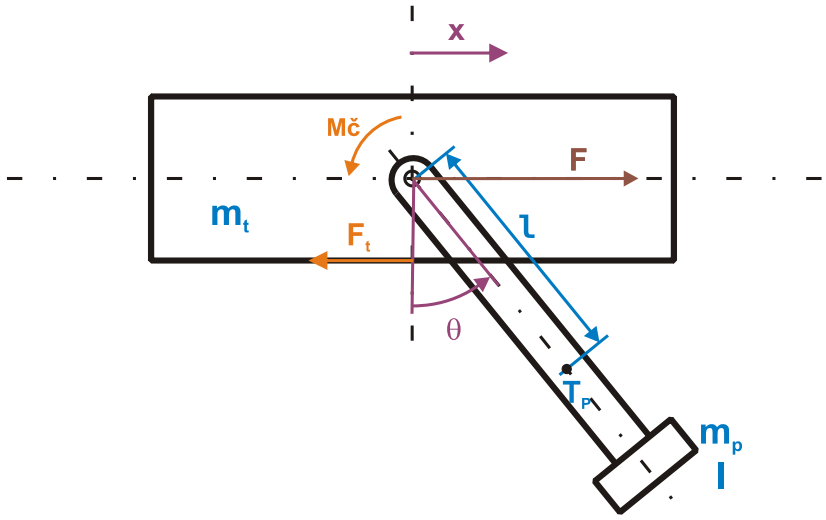
Řízení modelu

3.1 Odvození rovnic

Jelikož je pochopení mechanického chování modelu kyvadla důležité při jeho identifikaci a při následném návrhu vhodného regulátoru, rozhodli jsme se rovnice sami odvodit.

Vzhledem k tomu, že v knize Franklin [8] jsou rovnice odvozeny metodou uvolňování, zvolili jsme odvození pomocí Lagrangeových rovnic druhého druhu. Aby bylo možné výsledky obou metod na konci snadno porovnat, snažili jsme se používat stejné značení veličin jako v uvedené knize.

Schématicky je mechanika modelu vyznačena na obrázku Obr. 3.1. Vozíku má hmotnosti m_t a jeho pohon je reprezentován silou F, na vozíku je zavěšeno kyvadlo o hmotnosti m_p s momentem setrvačnosti I vůči ose otáčení. Vzdálenost těžiště kyvadla T_p od osy rotace je označena l. Ztráty třením reprezentuje síla F_t, která působí proti směru pohybu x, a moment $M_č$, který působí obdobně proti směru rotace θ.



Obr. 3.1: Mechanika modelu

Vyjdeme z Lagrangeových rovnic ve tvaru

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} = Q_i,\ i = 1..n\ , \tag{3.1.1}$$

kde

E_k je kinetická energie soustavy,

q_i je zobecněná souřadnice,

Q_i je zobecnělá síla,

n je počet stupňů volnosti soustavy.

Soustava vyznačená na obrázku Obr. 3.1 má dva stupně volnosti, za zobecněné souřadnice zvolíme polohu vozíku x a náklon kyvadla θ

$$q_1 = x,\ q_2 = \theta\,. \tag{3.1.2}$$

Lagrangeovy rovnice pro takto zvolené zobecnělé souřadnice jsou

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial E_k}{\partial x} = Q_X \tag{3.1.3}$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial E_k}{\partial \theta} = Q_\theta\,. \tag{3.1.4}$$

Celkovou kinetickou energii soustavy lze vyjádřit jako součet energie vozíku a kyvadla

$$E_k = E_{k\mathrm{VOZIK}} + E_{k\mathrm{KYVADLO}} = \frac{1}{2}m_t\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m_p c_T{}^2 + \frac{1}{2}I_T\dot{\theta}^2\,, \tag{3.1.5}$$

kde

I_T je monet setrvačnosti kyvadla vůči jeho těžišti,

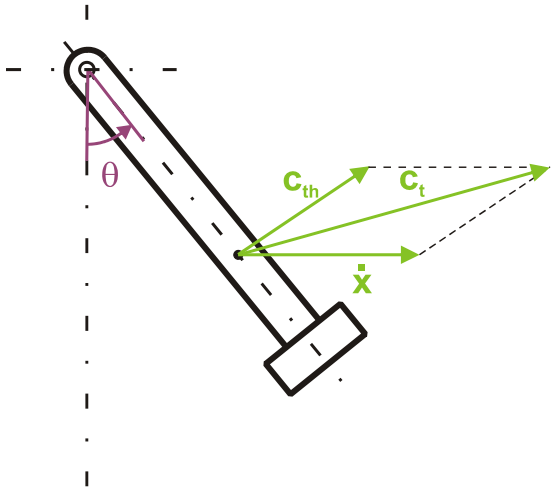
c_T je rychlost těžiště kyvadla.

Rychlost c_T je možné rozdělit na dvě složky. Složka $\dot{x}$ je rychlost udělená kyvadlu vozíkem, složka c_{th} je rychlost získaná rotací kyvadla. Problém vystihuje Obr. 3.2. Rychlost c_T je získána součtem obou složek v souřadnicích $[x, y]$, kde x odpovídá vodorovné ose, y svislé ose.

$$c_{thX} = l\dot{\theta}\cos\theta,\ c_{thY} = l\dot{\theta}\sin\theta$$

$$c_T{}^2 = (\dot{x} + c_{thX})^2 + c_{thY}{}^2 = (\dot{x} + l\dot{\theta}^2\cos\theta)^2 + l^2\dot{\theta}^2\sin^2\theta$$

$$c_T{}^2 = \dot{x}^2 + 2l\dot{\theta}\dot{x}\cos\theta + l^2\dot{\theta}^2 \tag{3.1.6}$$



Obr. 3.2: Rychlost těžiště kyvadla

Po dosazení $c_t^{\,2}$ do rovnice 3.1.5 a úpravě dostaneme

$$E_k = \frac{1}{2}\left(m_t + m_p\right)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + m_p l\dot{\theta}\dot{x}\cos\theta, \tag{3.1.7}$$

kde podle Steinerovy věty

$$I = I_T + m_p l^2. \tag{3.1.8}$$

Sestavení levé strany první Lagrangeovy rovnice 3.1.3:

$$\frac{\partial E_k}{\partial x} = 0 \tag{3.1.9}$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}} = \left(m_p + m_t\right)\dot{x} + m_p l\dot{\theta}\cos\theta \tag{3.1.10}$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}} = \left(m_p + m_t\right)\ddot{x} + m_p l\left(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta\right). \tag{3.1.11}$$

Stanovení levé strany druhé Lagrangeovy rovnice 3.1.4:

$$\frac{\partial E_k}{\partial \theta} = -m_2 l\dot{\theta}\dot{x}\sin\theta \tag{3.1.12}$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} = I\dot{\theta} + m_p l\dot{x}\cos\theta \tag{3.1.13}$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} = I\ddot{\theta} + m_p l\ddot{x}\cos\theta - m_p l\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta\,. \tag{3.1.14}$$

Pravé strany rovnic se stanoví pomocí metody virtuálních prací (viz Obr. 3.3). Platí, že

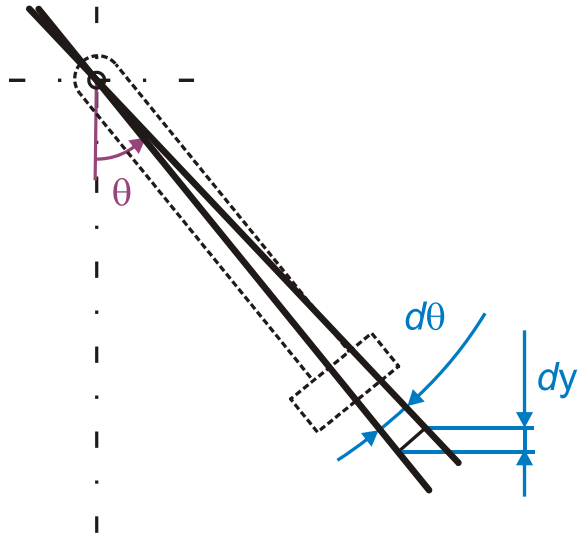
$$\sum_{i=1}^{n} Q_i dq_i = \sum_{j=1}^{N} dW_j\,, \tag{3.1.15}$$

což v našem modelu odpovídá

$$Q_x dx + Q_\theta d\theta = (F - F_t)dx - m_p gl \sin\theta d\theta + M_č d\theta \,. \tag{3.1.16}$$

Z rovnice 3.1.16 vyplývá, že

$$\begin{aligned} Q_x &= F - F_t \\ Q_\theta &= -m_p gl \sin\theta - M_č \end{aligned} \,. \tag{3.1.17}$$



Obr. 3.3: Virtuální práce kyvadla

Dosazením do Lagrangeových rovnic 3.1.3 a 3.1.4 dostaneme pohybové rovnice soustavy ve tvaru

$$I\ddot{\theta} + m_p gl \sin\theta + M_č = -m_p l\ddot{x}\cos\theta \tag{3.1.18}$$

$$(m_t + m_p)\ddot{x} + m_p l\ddot{\theta}\cos\theta - m_p l\dot{\theta}^2 \sin\theta + F_t = F \,. \tag{3.1.19}$$

3.1.1 Ztráty třením

Třecí ztráty vozíku vyjadřuje v rovnicích člen F_t, který zahrnuje odpor vzduchu vozíku a veškeré třecí ztráty při jeho pohybu včetně tření náhonového pastorku o ozubnici (viz Obr. 2.1).

Třecí ztráty kyvadla vyjadřuje obdobně čelen $M_č$, který reprezentuje podobně jako u vozíku odpor vzduchu při kývání kyvadla a odpor čepového tření v ose otáčení.

Kvůli zjednodušení rovnic budeme oba druhy ztrát považovat za čistě viskózní a tedy úměrné rychlosti $\dot{x}$ respektive úhlové rychlosti $\dot{\theta}$. Ostatní ztráty neuvažujeme.

V rovnicích provedeme navíc další zjednodušení, kdy budeme předpokládat, že hnací síla F je úměrná napětí na motoru vozíku.

3.1.2 Konečná podoba rovnic

Po dosazení za ztráty a hnací sílu dostáváme konečnou podobu rovnic, která je shodná s rovnicemi v knize Franklin [8]. Jedná se o soustavu dvou diferenciálních rovnic druhého řádu

$$I\ddot{\theta} + m_p gl \sin\theta + k\dot{\theta} = -m_p l\ddot{x}\cos\theta$$

$$(m_t + m_p)\ddot{x} + b\dot{x} + m_p l\ddot{\theta}\cos\theta - m_p l\dot{\theta}^2 \sin\theta = cu\ , \qquad (3.\ 1.\ 20)$$

kde

- θ je náklon kyvadla,
- x je poloha kyvadla,
- u je vstup do systému a odpovídá napětí na motoru vozíku,
- I je moment setrvačnosti kyvadla vztažený k ose rotace,
- m_t je hmotnost vozíku,
- m_p je hmotnost kyvadla,
- g je gravitační zrychlení,
- l je vzdálenost těžiště od středu rotace kyvadla,
- k je koeficient viskózního tření kyvadla v ose rotace,
- b je koeficient viskózního tření ozubeného kola vozíku s ozubnicí,
- c je převodní konstanta, převádí vstup na sílu vyvinutou motorem vozíku.

3.2 Identifikace modelu

Identifikaci systému jsme provedli v předmětu Systémy a modely a její popis je uveden v dokumentu [9].

V rámci této práce jsme identifikaci znovu překontrolovali. Zjistili jsme, že identifikace byla provedena správně, pouze jsme opravili koeficient viskózního tření vozíku b a převodní konstantu c po promazání dráhy vozíku silikonovým olejem.

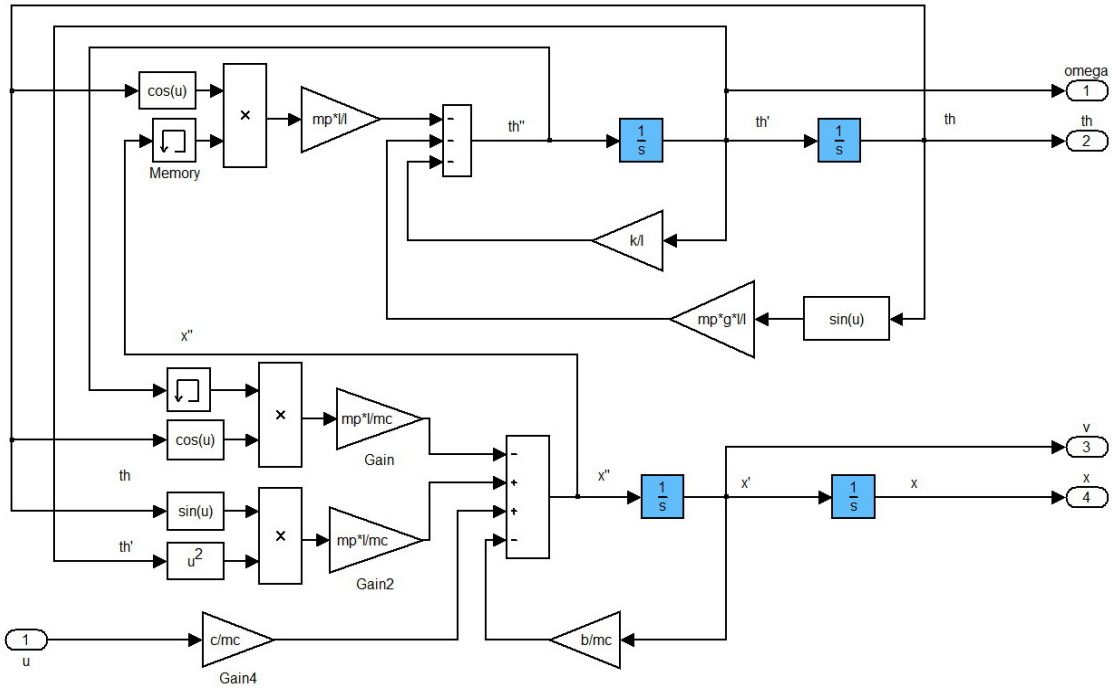
Pro úplnost uvádíme přehled všech identifikovaných konstant i s jejich jednotkami.

$$\mathrm{I} = 8.7\times10^{-4}\,\mathrm{kg.m^2} \qquad \mathrm{b} = 4.063\,\mathrm{kg.s^{-1}}$$
$$\mathrm{l} = 0.066\,\mathrm{m} \qquad \mathrm{c} = 6.01\,\mathrm{N}$$
$$\mathrm{m_t} = 0.94\,\mathrm{kg} \qquad \mathrm{g} = 9.81\,\mathrm{m.s^{-2}}$$
$$\mathrm{m_p} = 0.157\,\mathrm{kg} \qquad \mathrm{k} = 2.14\times10^{-4}\,\mathrm{kg.m^2.s^{-1}}$$

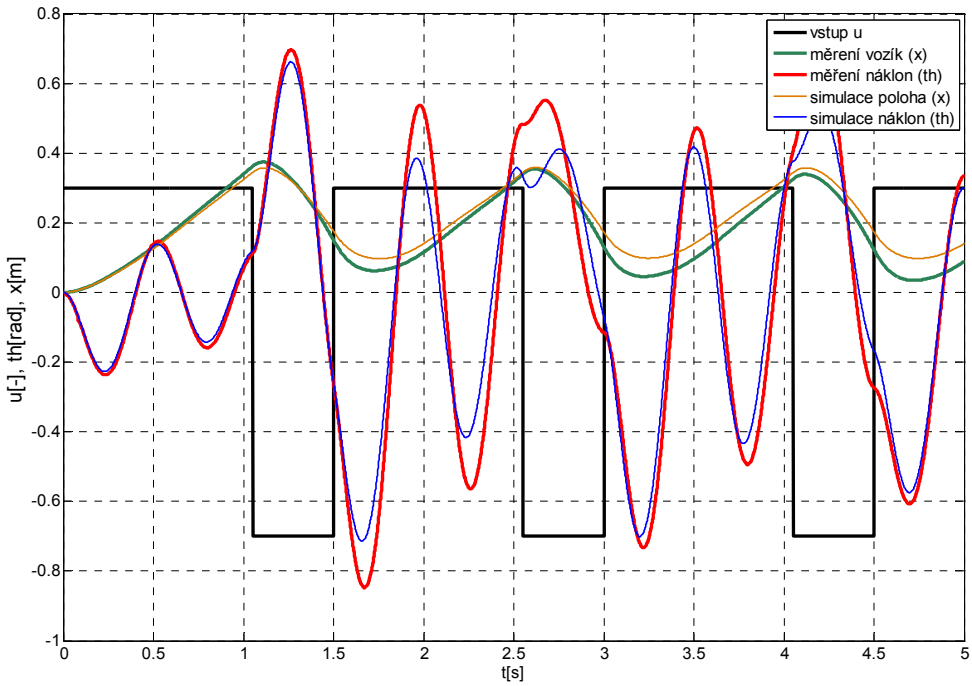
Kvůli ověření správnosti identifikace byl sestaven nelineární simulinkový model (Obr. 3.4) řešící soustavu rovnic (3. 1. 20). Bloky memory ve schématu řeší problémy s algebraickými smyčkami.

Obr. 3.5 porovnává výsledek simulace s naměřenými průběhy při odezvě systému na periodický obdélníkový signál. Největší nepřesnost do modelu vnáší třecí ztráty vozíku, které jsou pouze velice obtížně simulovatelné.

Simulinkové simulační schéma včetně nelineárního a linearizovaného modelu je k dispozici na přiloženém CD.



Obr. 3.4: Nelineární model systému v Simulinku



Obr. 3.5: Porovnání odezvy reálného systému a simulace

3.3 Linearizace modelu

V této části je provedena obecně linearizace modelu popsaného rovnicemi 3.1.20 a následné číselné dosazení pro kyvadlo v horní poloze. Linearizace z předmětu Systémy a modely [9] se nedala použít, protože nebyla provedena obecně a navíc pouze pro dolní polohu kyvadla.

Rovnice 3.1.20 vyjádříme ve tvaru vhodném pro linearizaci

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= f(\ddot{x}, \dot{\theta}, \theta) \\ \ddot{x} &= f(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta, \dot{x}, u)\,, \end{aligned} \tag{3.3.1}$$

tedy

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= -\frac{m_p g l \sin\theta}{I} - \frac{k\dot{\theta}}{I} - \frac{m_p l \ddot{x} \cos\Theta}{I} \\ \ddot{x} &= -\frac{b}{m_c}\dot{x} - \frac{m_p l \ddot{\theta}\cos\theta}{m_c} + \frac{m_p l \dot{\theta}^2 \sin\theta}{m_c} + \frac{c}{m_c}u\,. \end{aligned} \tag{3.3.2}$$

Linearizujeme rovnice 3.3.2 v obecném pracovním bodě

$$\begin{aligned} \Delta\ddot{\theta} &= \left|-\frac{m_p l \cos\theta}{I}\right|_p \Delta\ddot{x} - \left|\frac{k}{I}\right|_p \Delta\dot{\theta} + \left|-\frac{m_p g l \cos\theta}{I} + \frac{m_p l \ddot{x}\sin\theta}{I}\right|_p \Delta\theta \\ \Delta\ddot{x} &= \left|-\frac{m_p l \cos\theta}{m_c}\right|_p \Delta\ddot{\theta} + \left|\frac{2 m_p l \dot{\theta}\sin\theta}{m_c}\right|_p \Delta\dot{\theta} - \left|\frac{b}{m_c}\right|_p \Delta\dot{x} + \\ &\left|\frac{m_p l \ddot{\theta}\sin\theta}{m_c} + \frac{m_p l \dot{\theta}^2 \cos\theta}{m_c}\right| \Delta\theta + \frac{c}{m_c}\Delta u \end{aligned} \tag{3.3.3}$$

a dosadíme pracovní bod odpovídající horní poloze kyvadla, pro nějž $\theta = \pi$

$$\begin{aligned} \Delta\ddot{\theta} &= \frac{m_p l}{I}\Delta\ddot{x} - \frac{k}{I}\Delta\dot{\theta} + \frac{m_p g l}{I}\Delta\theta \\ \Delta\ddot{x} &= \frac{m_p l}{m_c}\Delta\ddot{\theta} - \frac{b}{m_c}\Delta\dot{x} + \frac{c}{m_c}\Delta u\,. \end{aligned} \tag{3.3.4}$$

3.4 Stavový popis

Linearizované rovnice 3.3.4 musí být ještě dále upraveny za účelem sestavní stavového popisu systému. Rovnice převedeme do tvaru

$$\Delta\ddot{\theta} = f(\Delta\dot{\theta}, \Delta\theta, \Delta\dot{x}, \Delta u)$$
$$\Delta\ddot{x} = f(\Delta\dot{\theta}, \Delta\theta, \Delta\dot{x}, \Delta u), \tag{3.4.1}$$

tedy

$$\Delta\ddot{\theta} = \frac{km_c}{a}\Delta\dot{\theta} - \frac{m_p glm_c}{a}\Delta\theta + \frac{m_p lb}{a}\Delta\dot{x} - \frac{m_p l}{a}\Delta u$$
$$\Delta\ddot{x} = \frac{m_p lk}{a}\Delta\dot{\theta} - \frac{m_p{}^2 l^2 g}{a}\Delta\theta + \frac{bI}{a}\Delta\dot{x} - \frac{I}{a}\Delta u, \tag{3.4.2}$$

kde jsme zavedli konstantu

$$a = m_p{}^2 l^2 - I\, m_c .$$

Zavedeme další stavy rychlost vozíku Δv a úhlová rychlost kyvadla $\Delta\omega$, čímž se zbavíme druhých derivací v rovnicích 3.4.2

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{km_c}{a}\Delta\omega - \frac{m_p glm_c}{a}\Delta\theta + \frac{m_p lb}{a}\Delta v - \frac{m_p l}{a}\Delta u$$
$$\Delta\dot{\theta} = \Delta\omega$$
$$\Delta\dot{v} = \frac{m_p lk}{a}\Delta\omega - \frac{m_p{}^2 l^2 g}{a}\Delta\theta + \frac{bI}{a}\Delta v - \frac{I}{a}\Delta u$$
$$\Delta\dot{x} = \Delta v . \tag{3.4.3}$$

Stavový popis linearizovaného systému pro kyvadlo v horní poloze získáme dosazením identifikovaných konstant do rovnic 3.4.3 ve tvaru

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x + B\Delta u$$
$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u , \tag{3.4.4}$$

kde vektor stavů je

$$x = \begin{bmatrix}\Delta\omega & \Delta\theta & \Delta v & \Delta x\end{bmatrix}^T \tag{3.4.5}$$

a matice systému

$$A = \begin{bmatrix} -0.277 & 132 & -49.7 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0026 & 1.24 & -4.17 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} 73.5 \\ 0 \\ 6.17 \\ 0 \end{bmatrix} C = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T D = 0 . \tag{3.4.6}$$

3.5 Návrh regulátoru

V práci [10] jsme regulátor pro inverzní kyvadlo navrhovali klasicky z přenosů systému metodou umisťování pólu (root locus). Navrženými regulátory se nám sice podařilo soustavu stabilizovat, systém byl ale ve výsledku příliš kmitavý a nebyl schopný uřídit ani drobné vnější zásahy.

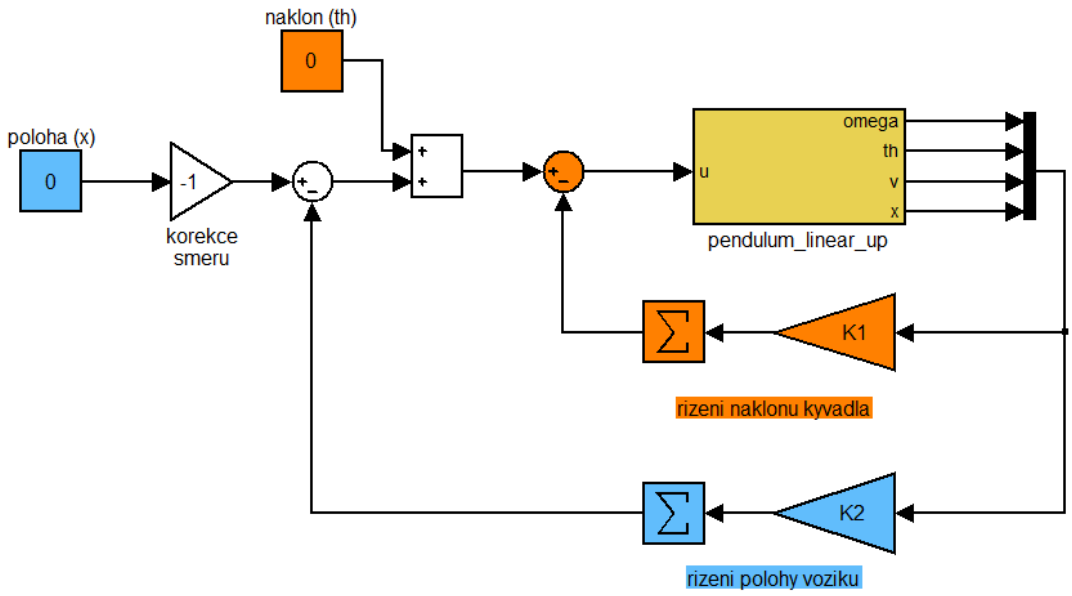
Z toho důvodu jsme se rozhodli návrh provést jako stavový kvadraticky optimální regulátor (LQR) a to z následujících důvodů:

- Stavový regulátor využívá informaci o všech stavech systému, může tedy lépe určit akční zásah do systému.
- Nemusíme navrhovat pozorovatele, protože máme k dispozici všechny stavy systému. Polohu vozíku x a náklon kyvadla θ přímo měříme, rychlost vozíku v a úlovou rychlost kyvadla ω snadno vypočteme filtrovanou derivací.
- Metoda symetric root locus (SRL) sama navrhne stabilní a optimální regulátor umístěním pólů systému do optimální polohy i pro složitější systémy. Odpadá tedy komplikované ruční umisťování pólů systému vyžadující značné zkušenosti návrháře.

Návrh regulátoru zahrnuje navržení dvou regulačních smyček. První vnitřní smyčka stabilizuje kyvadlo v rovnovážném bodě v horní poloze. Druhá vnější smyčka řídí polohu vozíku. Základní regulační schéma je znázorněno na Obr. 3.6.

Obě regulační smyčky jsou navrženy metodou symetric root locus (SRL) založenou na kvadraticky optimálních regulátorech (LQR), jejichž princip je popsán v knize Franklin [8]. Navržené regulační smyčky je možné v našem případě sloučit do jedné výsledné, ve které je vektor konstant $K = K_1 + K_2$. Kvůli názornosti jsou ale v následujících schématech smyčky kresleny odděleně.

Podrobný postup návrhu regulátoru je uveden v okomentovaném skriptu pro Matlab v příloze: Příloha C. V dalším textu jsou uvedeny pouze hlavní kroky návrhu.



Obr. 3.6: Základní regulační schéma

3.5.1 Návrh vnitřní smyčky

Vycházíme ze stavového popisu systému popsaného rovnicemi 3.5.4. Poloha pólů systému s uzavřenou smyčkou se určí metodou symetric root locus pomocí příkazu sisotool v Matlabu. Výpočet vektoru konstant regulátoru provádí příkaz place.

Přenos systému na náklon kyvadla θ v otevřené smyčce byl vypočten příkazem ss2tf z matic systému

$$f_\theta(s) = \frac{73.5\mathrm{s}^2}{\mathrm{s}^4 + 4.15\mathrm{s}^3 + 132.7\mathrm{s}^2 + 487.6\mathrm{s}}. \tag{3.5.1}$$

Poloha pólů systému v uzavřené vnitřní smyčce byla vypočtena příkazem sisotool

$$poles1 = \begin{bmatrix} -3.14 & -12.1-3.14\mathrm{i} & -12.1+3.14\mathrm{i} & 0 \end{bmatrix}. \tag{3.5.2}$$

Vektor konstant regulátoru byl vypočten příkazem place

$$K_1 = [0.43 \quad 4.96 \quad -1.36 \quad 0]. \tag{3.5.3}$$

Z vypočteného vektoru konstant je možné vidět, že pro samotnou stabilizaci náklonu kyvadla není podstatná poloha vozíku.

3.5.2 Návrh vnější smyčky

Vycházíme ze systému s uzavřenou vnitřní smyčkou, jehož matice se určí snadno z matic původního systému (3.4.6) a vektoru konstant vnitřní smyčky (3.5.3)

$$A_2 = A - BK_1 = \begin{bmatrix} -31.5 & -233 & 50 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2.63 & -29.4 & 4.20 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = B,\ C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ D_2 = D. \tag{3.5.4}$$

Postup návrhu je shodný s návrhem vnitřní smyčky. Přenos systému na polohu vozíku x

$$f_x(s) = \frac{6.17\,\mathrm{s}^2 + 1.52\,\mathrm{s} - 721}{\mathrm{s}^4 + 27.3\,\mathrm{s}^3 + 232.3\,\mathrm{s}^2 + 490.7\,\mathrm{s}}. \tag{3.5.5}$$

Poloha pólů systému v uzavřené smyčce

$$poles2 = \begin{bmatrix} -12.17+3.25\mathrm{i} & -12.17-3.25\mathrm{i} & -2{,}62 & -1{,}76 \end{bmatrix}. \tag{3.5.6}$$

Konstanty regulátoru

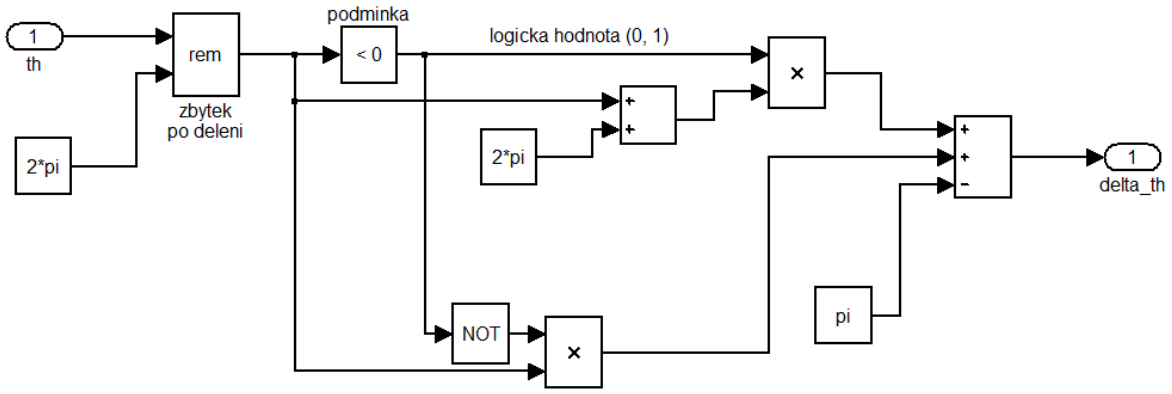
$$K_2 = [0.0559 \quad 0.606 \quad -0.441 \quad -1.014]. \tag{3.5.7}$$

3.6 Realizace regulace v Simulinku

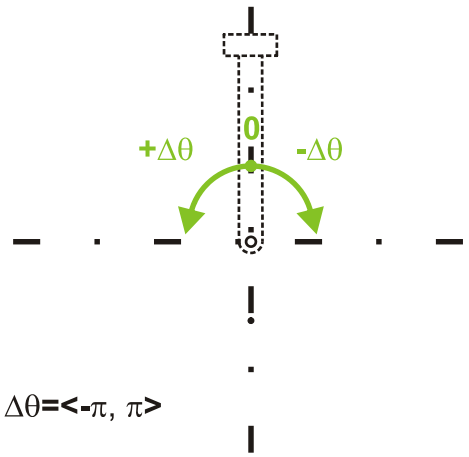
Kompletní regulační schéma je znázorněno na Obr. 3.9. Základní funkcí regulátoru je stabilizovat kyvadlo v horní poloze. Poloha vozíku je ovládána přes připojený joystick. Kyvadlo může být do horní polohy umístěno buďto ručně, nebo zcela automaticky vyšvihnutím. Mezi oběma režimy se přepíná ručním přepínačem. Vzhledem k tomu, že schéma bude používáno v laboratoři k prezentaci funkce výukového modelu, je jeho součástí i podrobný návod k ovládání a obsluze inverzního kyvadla.

3.6.1 Blok přepočet úhlu

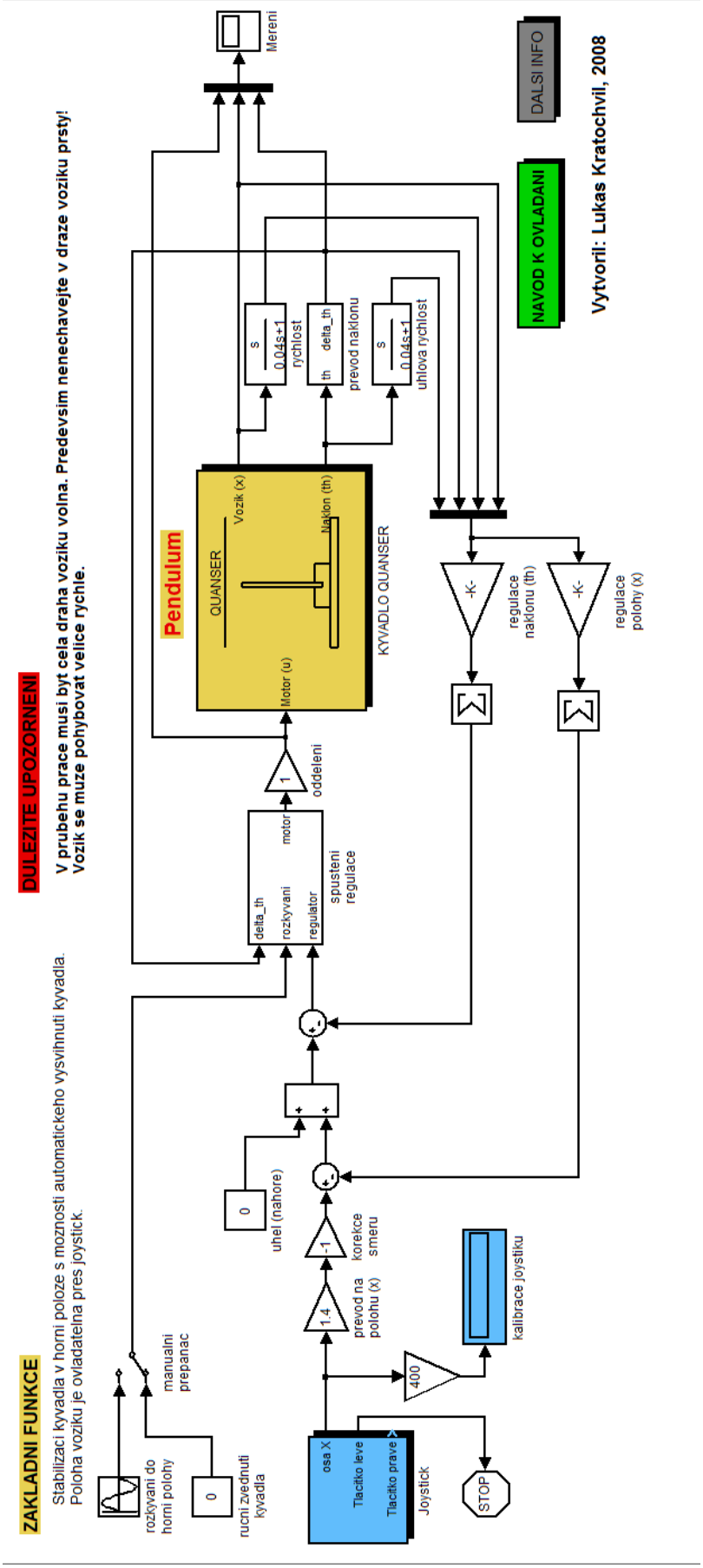
Blok (Obr. 3.7) provádí přepočet měřeného náklonu kyvadla pro potřeby regulátoru navrženého v části 3.5. Úhel náklonu je měřen proti směru hodinových ručiček v radiánech v teoretickém rozsahu $(-\infty, \infty)$, kde nulová poloha typicky odpovídá dolní poloze kyvadla. Na druhou stranu je regulátor navržen na základě linearizovaného modelu, a tudíž na vstupu očekává odchylky od pracovního bodu, který odpovídá horní poloze kyvadla. Tuto situaci vystihuje Obr. 3.8.



Obr. 3.7: Blok přepočet úhlu



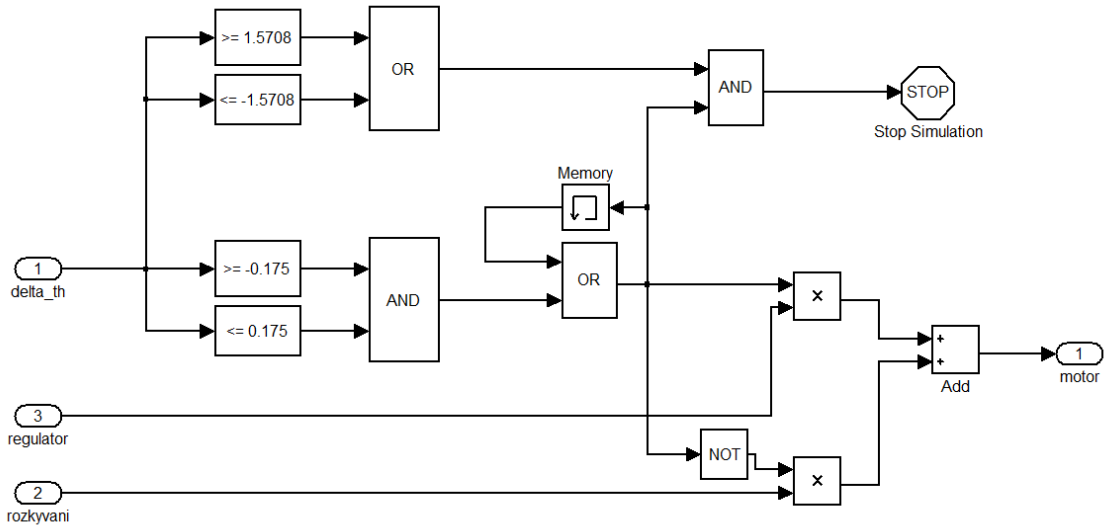
Obr. 3.8: Odchylky od pracovního bodu



Obr. 3.9: Hlavní regulační schéma pro Simulink

3.6.2 Blok spuštění regulace

Blok (Obr. 3.10) provádí přepínání signálu pro pohon motoru. Po spuštění simulace je na motor přiveden signál pro rozkývání kyvadla v automatickém režimu, případně nulový signál v ručním režimu. Jestliže se náklon kyvadla $\Delta\theta$ dostane do intervalu $< -0.175, 0.175 >$ což odpovídá $< -10°, 10° >$, přepne se na motor signál z regulátoru. Blok navíc zastavuje simulaci v případě spadnutí kyvadla při překročení náklonu $\pm\frac{\pi}{4}$, čímž jsou chráněné dorazy modelu před silnými nárazy rozjetého vozíku.



Obr. 3.10: Blok přepínání řízení

3.6.3 Automatické vyšvihnutí kyvadla do horní polohy

Nakonec se povedlo najít poměrně jednoduché řešení tohoto problému. Na vstup modelu je přiveden harmonický signál o frekvenci $10\,\mathrm{rad/s}$, která odpovídá rezonanční frekvenci linearizovaného systému. Experimentálně byla určena jako nejvhodnější amplituda $0{,}7$ a fázový posuv $\pi/4$.

3.7 Realizace regulace v PLC

Řídící program (Příloha D) byl vytvořen v programovacím software RSLogix 5000 firmy Rockwell Automation. V PLC byl realizován podobně jako v Simulinku stavový regulátor navržený v části 3.5. Oproti řízení v Simulinku byla implementována pouze základní funkčnost stabilizace. Rozšíření o další funkce ale není složité a je ponecháno studentům předmětů vyučovaných v laboratoři K23.

3.7.1 Spouštění řízení

Algoritmus se spouští ručním nastavením bitu running přes RSLogix 5000. PLC přepne řízení na sebe, což je indikováno červenou LED diodou na hlavní skříni, a čeká 5s na ruční zvednutí kyvadla. Kyvadlo musí být na začátku v klidu a do horní polohy zvednuto proti směru hodinových ručiček. Po pěti sekundách od startu začne regulátor stabilizovat kyvadlo, vozík je regulací udržován v původní poloze. Řízení se ukončí ručním shozením bitu running případně dosažením krajní polohy dráhy vozíkem.

3.7.2 Poznámky k implementaci

Program byl rozdělen na dvě rutiny pendulum1 (Obr. 4.4 a Obr. 4.5) a pendulum2 (Obr. 4.6 a Obr. 4.7). Zatímco rutina pendulum1 je napsána v žebříčkové logice a zajišťuje základní logiku řízení, pendulum2 realizuje samotný stavový regulátor v diagramu funkčních bloků. Obsahy registrů HSC modulu udávajícího náklon kyvadla a polohu vozíku jsou stejným způsobem jako v simulinkovém bloku pendulum převáděny na radiány pro náklon kyvadla a na metry pro polohu vozíku. Kvůli zjednodušení regulačního schématu byly obě navržené regulační smyčky sloučeny do jedné.

3.8 Vlastnosti navržené regulace

V této části je zhodnoceno chování stabilizujícího regulátoru navrženého v části 3.5 a realizovaného v Simulinku. Z naměřených průběhů je vidět skutečné chování řízené soustavy. V případech, kdy je to možné, jsou naměřená data porovnána s výsledky simulace. Průběhy při řízení z PLC nebyly naměřeny, ale vzhledem k tomu, že se jedná o realizaci stejného regulátoru, lze očekávat velice podobné výsledky. Pro správné pochopení následujících obrázků si je třeba uvědomit, že poloha vozíku je měřena z leva doprava v metrech a náklon kyvadla je měřen proti směru hodinových ručiček v radiánech.

Pro účely simulace řízení modelu lze systém s uzavřenou smyčkou určit snadno výpočtem z matic původního identifikovaného systému a vektorů konstant navrženého regulátoru.

Matice systému s uzavřenou regulační smyčkou se vypočítají snadno z matic původní soustavy

$$A_{CL} = A - B(K_1 + K_2)$$

$$B_{CL} = B\,,\; C_{CL} = C\,,\; D_{CL} = D\,. \tag{3.8.1}$$

3.8.1 Stabilizace kyvadla

Obr. 3.12 zachycuje stabilizaci kyvadla bez umělých zásahů do řízení. Lze si všimnout, že vozík nestojí na místě, ale kmitá pomalu okolo žádané polohy s rozkmitem přibližně čtyři centimetry. V simulaci se žádné kmity neobjevují díky silně zatlumeným kmitavým pólům (Obr. 3.11). V praxi se příležitostně stane, že se regulátoru podaří najít přesný rovnovážný bod a kmitání vozíku se zcela zastaví, takový případ ale nastává zřídka a zcela náhodně.

Obr. 3.13 zachycuje schopnost regulátoru stabilizovat vnější umělé zásahy do soustavy. V průběhu měření bylo do kyvadla šťoucháno prsty a vozíku byl rukou znemožňován volný pohyb. Lze si všimnout, že regulátor dokáže stabilizovat výchylky kyvadla až do náklonu dvaceti stupňů.

Typický průběh stabilizace je znázorněn na Obr. 3.14, kdy vozík musí měnit rychle svojí polohu podle požadavků z joysticku.

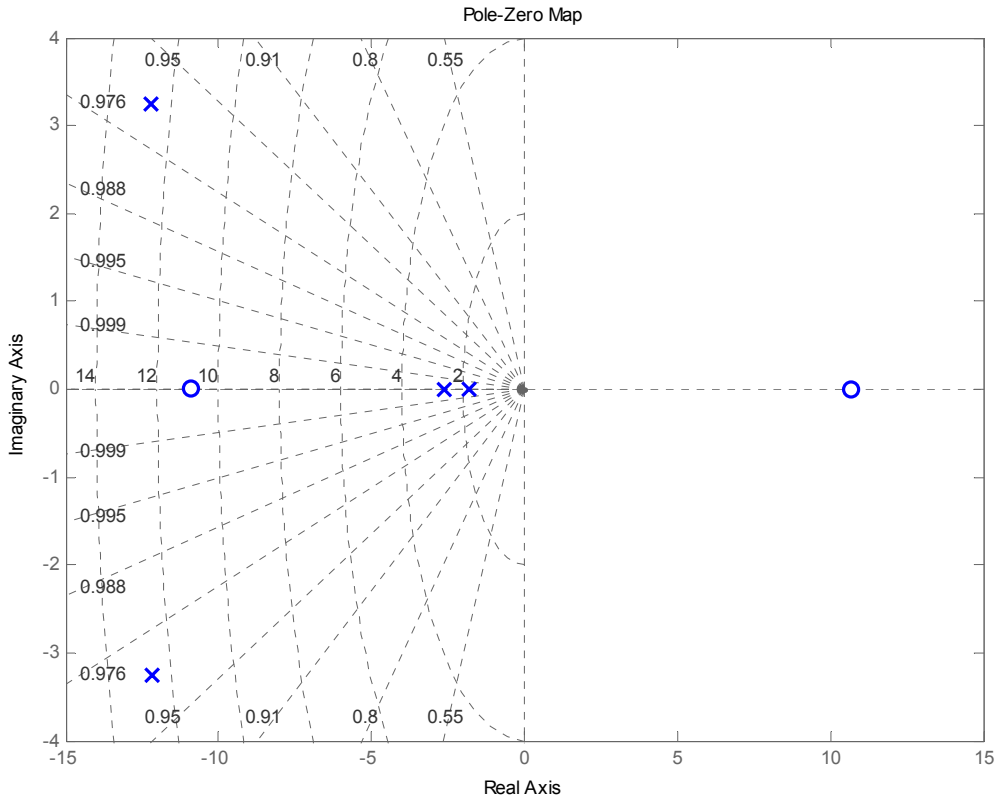
3.8.2 Systém s neminimální fází

Z přenosu na polohu v uzavřené smyčce

$$f_{xCL} = \frac{6.173\,\mathrm{s}^2 + 1.518\,\mathrm{s}^2 - 721.3}{\mathrm{s}^4 + 28.72\,\mathrm{s}^3 + 269.9\,\mathrm{s}^2 + 807.2\,\mathrm{s} + 731.7} \tag{3.8.2}$$

je patrné, že systém obsahuje kladnou nulu, což je graficky znázorněné na Obr. 3.11. Jedná se tedy o sytém s neminimální fází. Charakteristické chování sytému je dále patrné z naměřených i simulovaných průběhů.

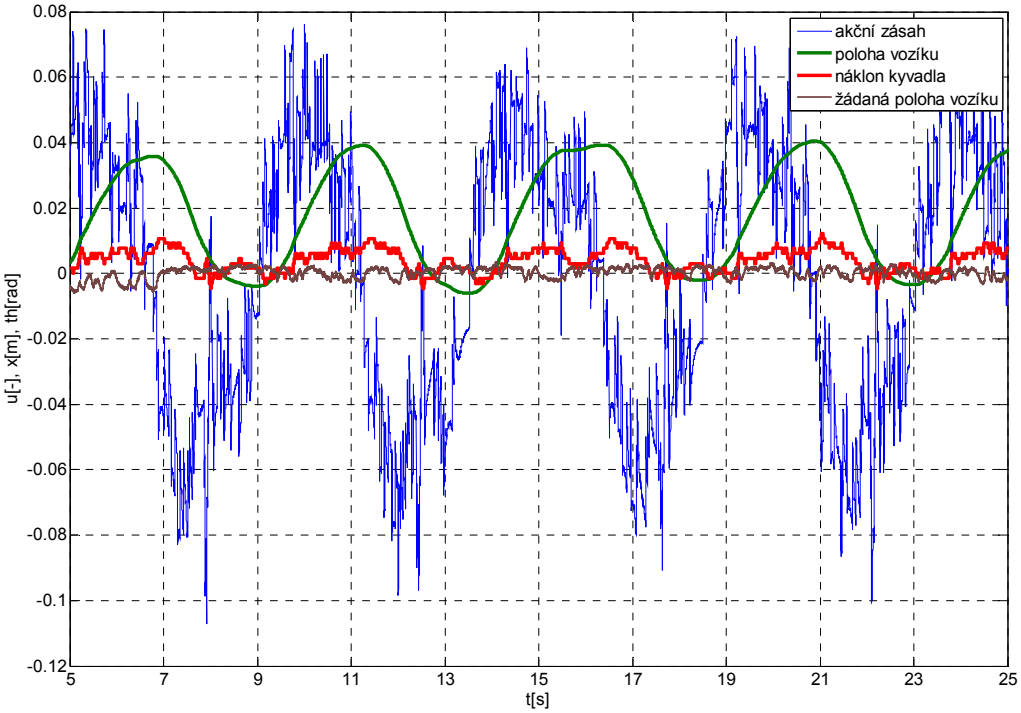
Obr. 3.15 zachycuje situaci, kdy byl na soustavu v klidu a s kyvadlem v horní poloze přiveden požadavek na rychlou změnu polohy vozíku doprava. Na uvedených průbězích je však vidět, že vozík se nejprve mírně posunul opačným směrem doleva a až poté se začal pohybovat doprava požadovaným směrem. Toto zajímavé chování je zcela přirozené a lze ho snadno vysvětlit: pokud by se vozík rozjel rovnou doprava, zrychlení v tomto směru by způsobilo pád kyvadla proti směru hodinových ručiček.



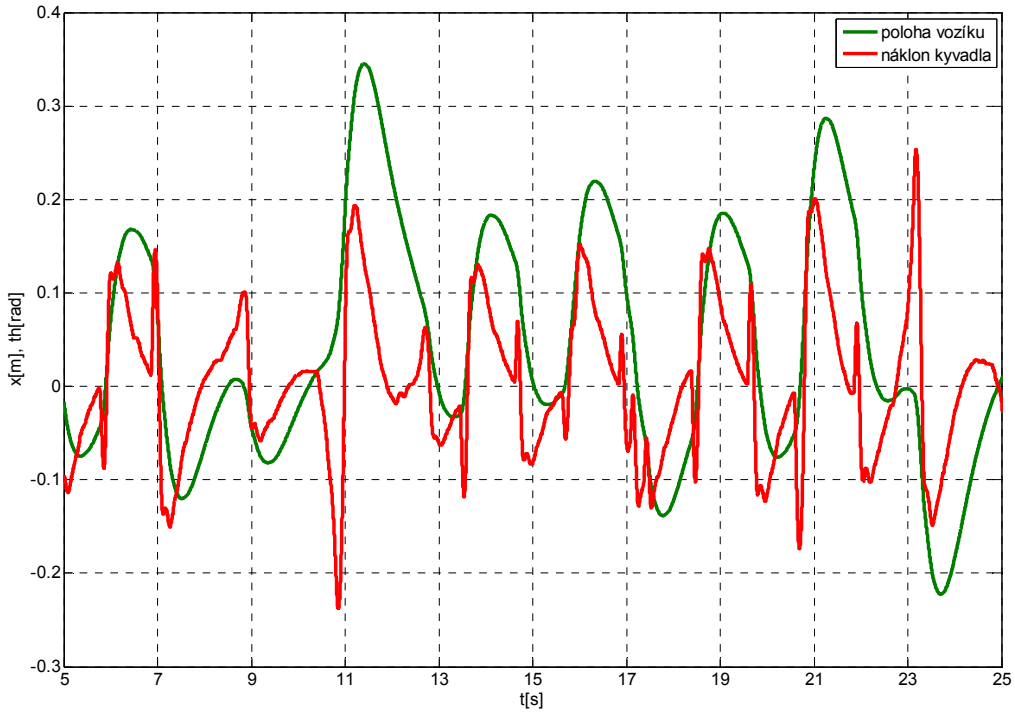
Obr. 3.11: Přenos na polohu v uzavřené smyčce

3.8.3 Automatické vyšvihnutí do horní polohy

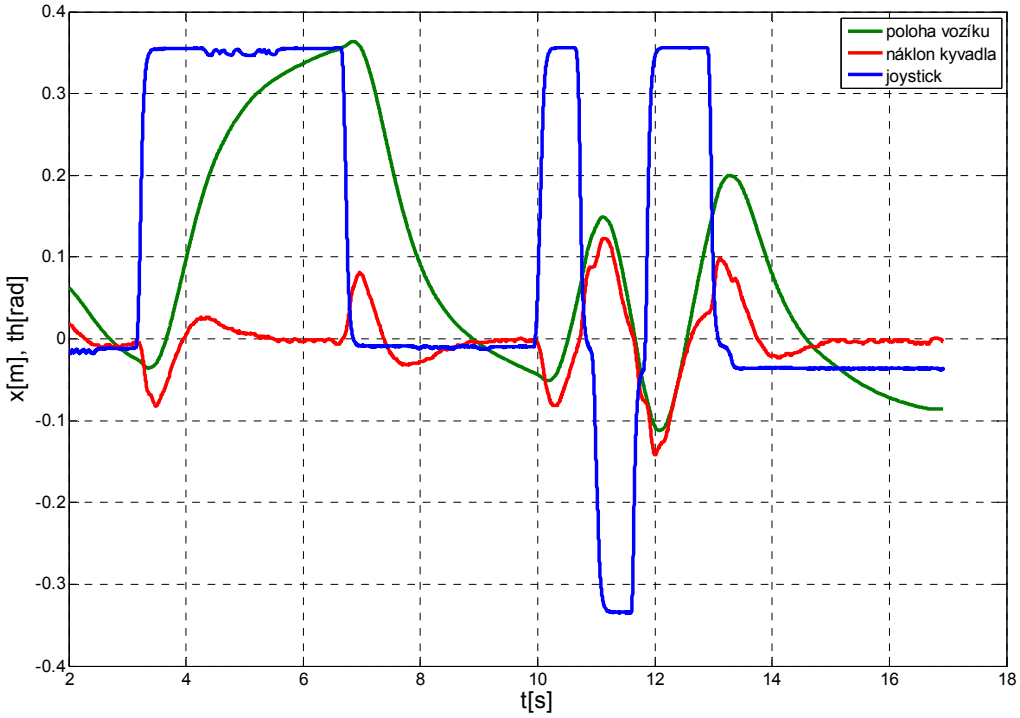
Automatické vyšvihnutí kyvadla do horní polohy pracuje velice spolehlivě a jeho typický průběh je znázorněn na Obr. 3.16. Vyšvihnutí kyvadla do horní polohy typicky trvá $1{,}3s$ s tím, že do zcela ustáleného stavu se soustava dostane do dvou sekund. Okamžik přepnutí na regulátor je z obrázku jasně patrný.



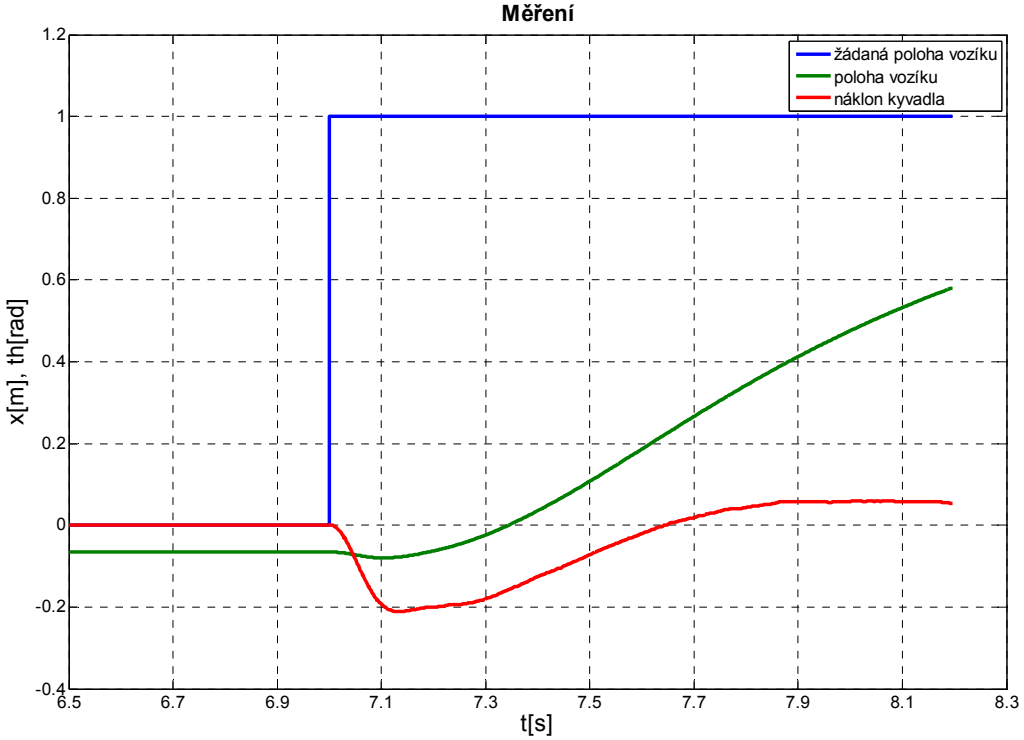
Obr. 3.12: Stabilizace kyvadla bez vnějších zásahů

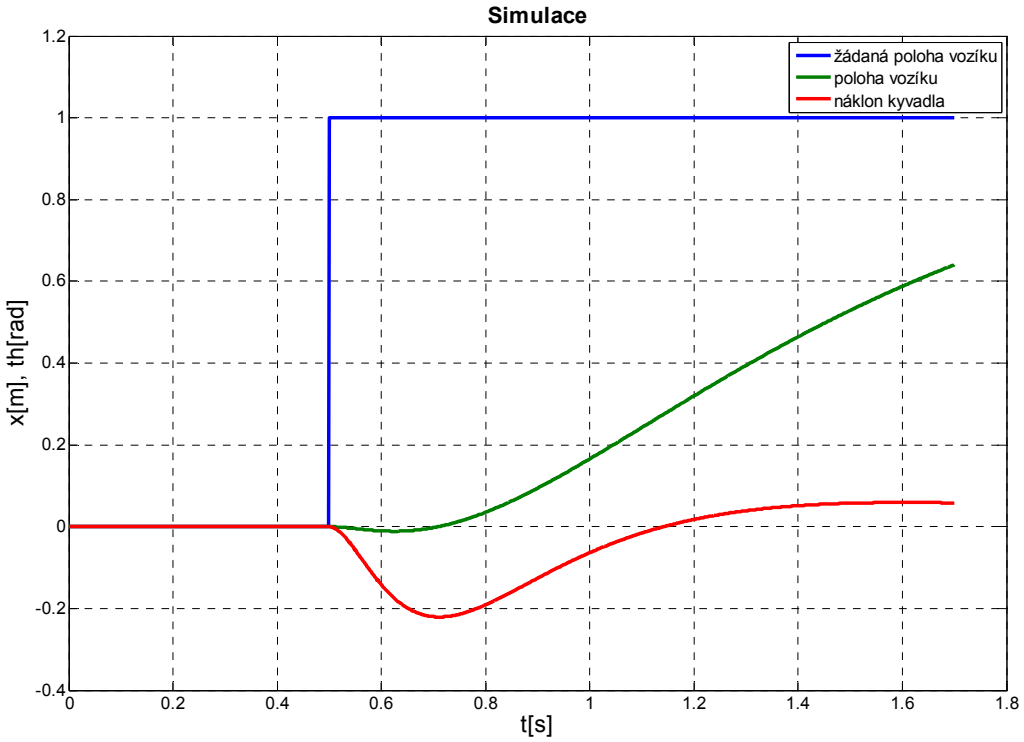


Obr. 3.13: Stabilizace kyvadla s vnějšími zásahy do soustavy

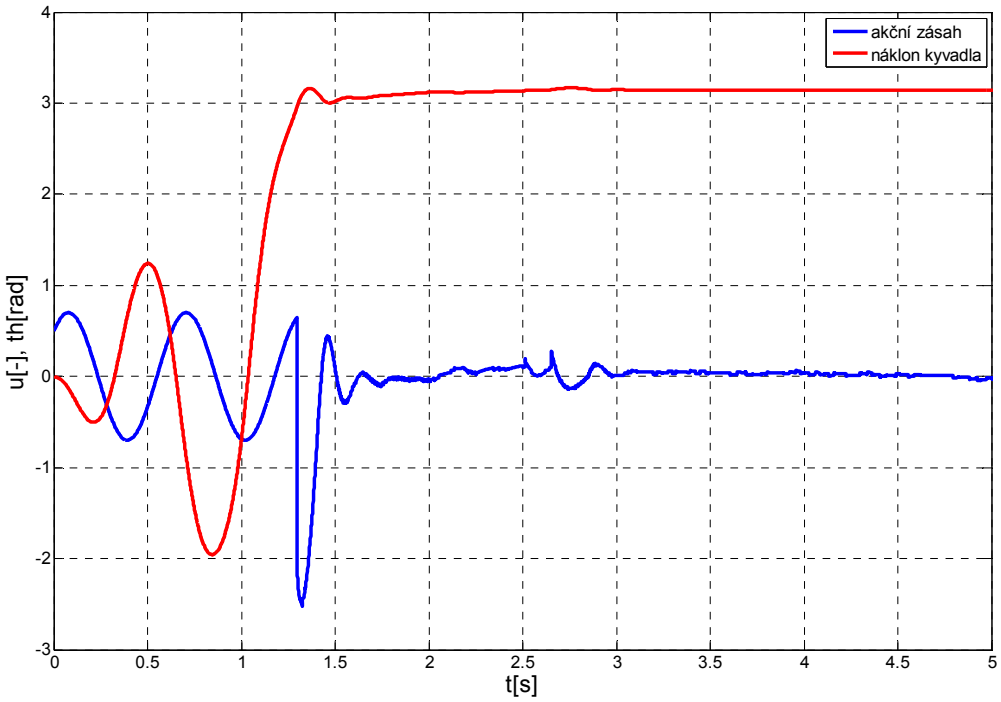


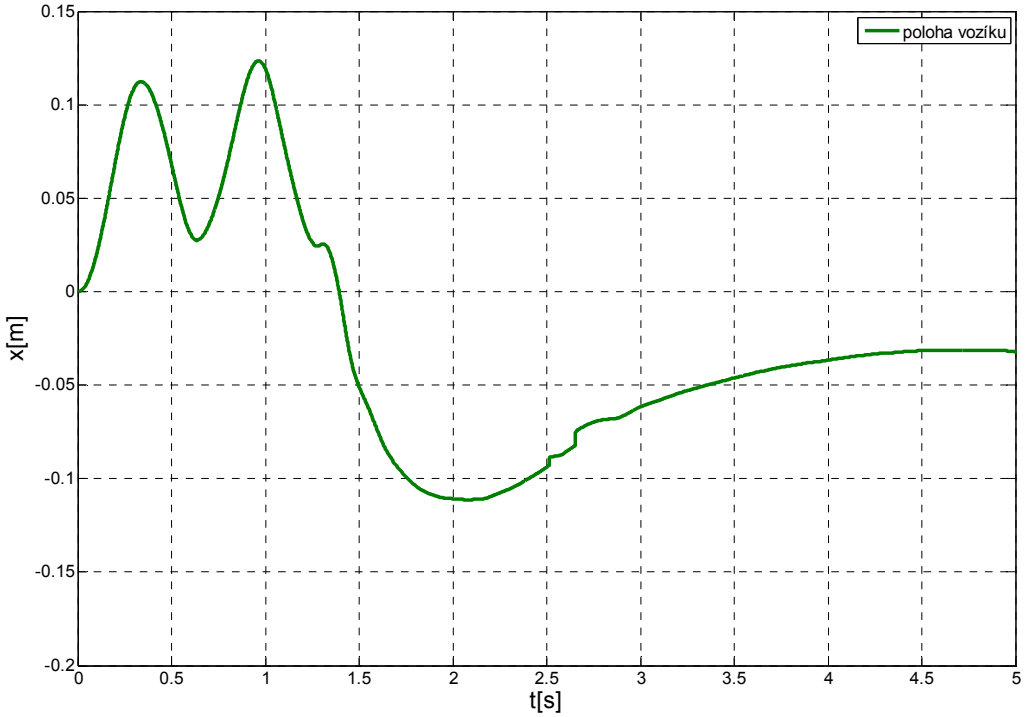
Obr. 3.14: Ovládání vozíku joystickem





Obr. 3.15: Posun vozíku se stabilizovaným kyvadlem





Obr. 3.16: Automatické vyšvihnutí vozíku do horní polohy

Kapitola 4

Závěr

V rámci práce se podařilo úspěšně splnit následující úkoly. Byly provedeny hardwarové úpravy přípravku inverzní kyvadlo tak, aby jej bylo možné řídit jak z Matlabu v PC tak z programovatelného automatu. Dále byl vytvořen popis přípravku po provedených úpravách, který bude sloužit studentům v rámci cvičení v laboratoři k rychlému seznámení s modelem. V druhé části práce byl kompletně navržen a v Simulinku realizován ukázkový stavový regulátor stabilizující kyvadlo v horní poloze. Jeho základní verze byla též implementována do programovatelného automatu řady ControlLogix firmy Rockwell Automation.

Součástí úprav modelu byla i realizace obvodu přepínání řízení. Vzhledem k tomu, že zpočátku nebyla zcela jasná finální podoba celého obvodu, rozhodli jsme se jej realizovat ručně na univerzální pájivé desce s tím, že podle aktuální potřeby bude obvod pružně upravován. Zvolený postup se ale ukázal jako ne příliš šťastný a přes relativní jednoduchost obvodu časově velice náročný. Výrazně jednodušší by zcela jistě bylo nejprve provést důkladný návrh obvodu a až poté jeho realizaci na desce plošného spoje. Na druhou stranu jako velice vhodné se ukázalo umístit přepínací obvod do skříně původního napájecího zdroje a na něm vytvořit panel s konektory pro připojení všech částí přípravku.

Za jednoznačný úspěch lze považovat navržený regulátor, který dokáže stabilizovat i značné vnější zásahy do řízení. Stabilizace kyvadla po jeho automatickém vyšvihnutí do horní polohy též nečiní regulátoru větší potíže. Úspěch také je, že se poměrně jednoduchým způsobem podařilo navržený stavový regulátor implementovat v programovatelném automatu ControlLogix, s čímž nebyly v laboratoři K23 doposud příliš velké zkušenosti. Drobným nedostatek použité regulace je v rámci stabilizace mírné kmitání vozíku okolo klidové polohy. Pokud by se podařilo kmitání ještě více zmírnit, je velice pravděpodobné, že regulátor by byl schopný rychle najít přesný rovnovážný bod a vozík by se zcela zastavil. Tento stavu ale v našem případě nastává velice zřídka a zcela náhodně.

Dobrých výsledků bylo mimo jiné dosaženo i díky zkušenostem autora práce s tímto modelem získaným v rámci laboratorních prací v předchozích semestrech.

Po dohodě s vedoucím bakalářské práce bylo upuštěno od programování panelu operátora PanelView Plus.

Literatura

[1] Tomáš Haniš, Semestrální práce, 2007

[2] Quanser, *IP02 User Manual*, 2003

[3] Humusoft, *MF624 User Manual*, 2006

[4] Rockwell Automation, *High Speed Counter User Manual*, 2000

[5] Rockwell Automation, *Isolated Input Module User Manual*, 1999

[6] Rockwell Automation, *Fused Output Module User Manual*, 2004

[7] Rockwell Automation, *Analog Output Module User Manual*, 2003

[8] FRANKLIN F., *Feedback control of dynamic systems, 5th edition.* Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006

[9] Lukáš Kratochvíl, *Laboratorní práce Systémy a modely*, 2007

[10] Lukáš Kratochvíl, *Laboratorní práce Systémy a řízení*, 2008

Příloha A

Obsah přiloženého CD

- kratol1_BP.pdf - bakalářská práce
- Dokumenty
    - Kyvadlo.doc - literatura [1]
    - Quanser_IP.pdf - literatura [1]
    - Humusoft_MF624.pdf - literatura [3]
    - 1756-HSC.pdf - literatura [4]
    - 1756-IB16I.pdf - literatura [5]
    - 1756-OB16E.pdf - literatura [6]
    - 1756-OF8.pdf - literatura [7]
    - kratol1_IP_SAM.pdf - liteartura [9]
    - kratol1_IP_SRI.pdf - literatura [10]
- Video
    - IP_prezentace.wmv - prezentační video stabilizace kyvadla
- Matlab
    - IP_control.mdl - hlavní regulační schéma v Simulinku (Obr. 3.9)
    - IP_teplate.mdl - šablona pro návrh regulátorů v Simulinku (Obr. 2.5)
    - IP_design.m - skript návrhu regulátoru v Matlabu (Příloha C)
    - IP_simul.m - simulační schéma modelu
- PLC
    - IP_control.acd - regulace v PLC (Příloha D)
- Eagle
    - pendulum.sch - elektrické schéma v programu Eagle (Obr. 4.1)
    - prepinani.sch - elektrické schéma v programu Eagle (Obr. 4.3)

Příloha B

Elektrické zapojení

B.1. Zapojení konektorů na panelu hlavní skříně

Pendulum (P)	
Pin	Popis
1	nic
2	nic
3	motor +
4	motor +
5	motor -
6	motor -
7	koncový spínač KPD
8	koncový spínač KLD
9	náklon IRC B
10	náklon IRC +5V
11	náklon IRC A
12	náklon IRC GND
13	koncový spínač KLD
14	koncový spínač KPD
15	vozík IRC GND
16	vozík IRC A
17	vozík IRC +5V
18	vozík IRC B
19	nic
20	nic

Tab. 4.1: Konektor pendulum

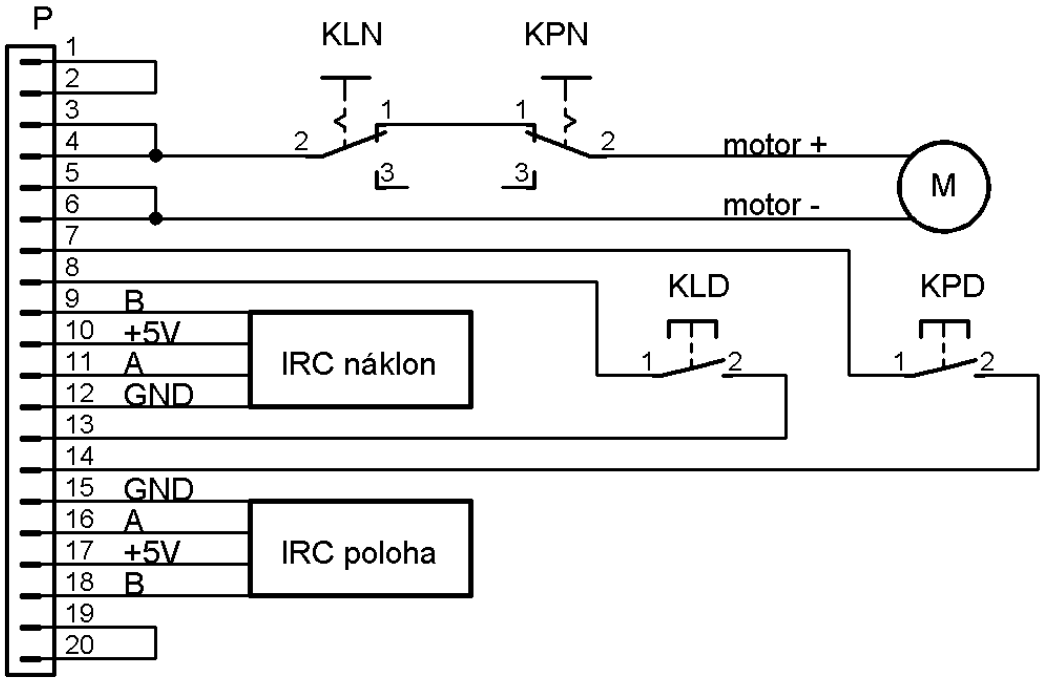
Joystick (J)	
Pin	Popis
1	potenciometr +5V
2	tlačítko levé B1
3	tlačítka GND
4	potenciometr GND
5	nic
6	potenciometr signál
7	tlačítko pravé B2
8-20	nic

Tab. 4.2: Konektor joystick

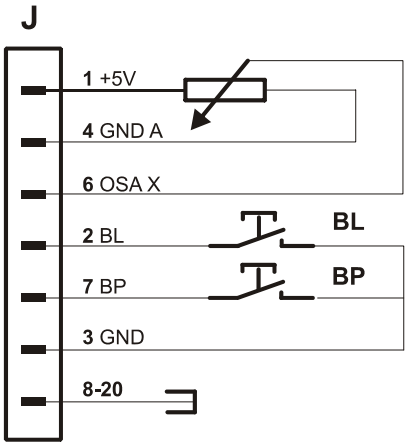
PLC				
Zapojení konektoru		Připojení PLC		
Pin	Popis	Modul	Pin modulu	Název pinu
1	vozík IRC A	1756-HSC	16	A0(5V)
2	vozík IRC B	1756-HSC	10	B0(5V)
3	náklon IRC A	1756-HSC	15	A1(5V)
4	náklon IRC B	1756-HSC	9	B1(5V)
5	oba IRC GND	1756-HSC	18, 12, 17, 11	RET
6	přepínání řízení +	1756-OB16E	1	OUT-0
7	přepínání řízení -	1756-OB16E	9	RTN OUT-0
8	signál motor +	1756-OF8	7	VOUT-1
9	signál motor GND	1756-OF8	15	RTN
10	koncový spínač KPD +5V	1756-IB16I	11	IN-5
11	koncový spínač KLD +5V	1756-IB16I	13	IN-6
12	koncové spínače GND	1756-IB16I	12, 14	GND-5, GND-6
13-25	rezerva			

Tab. 4.3: Konektor kabelu propojující přípravek s PLC

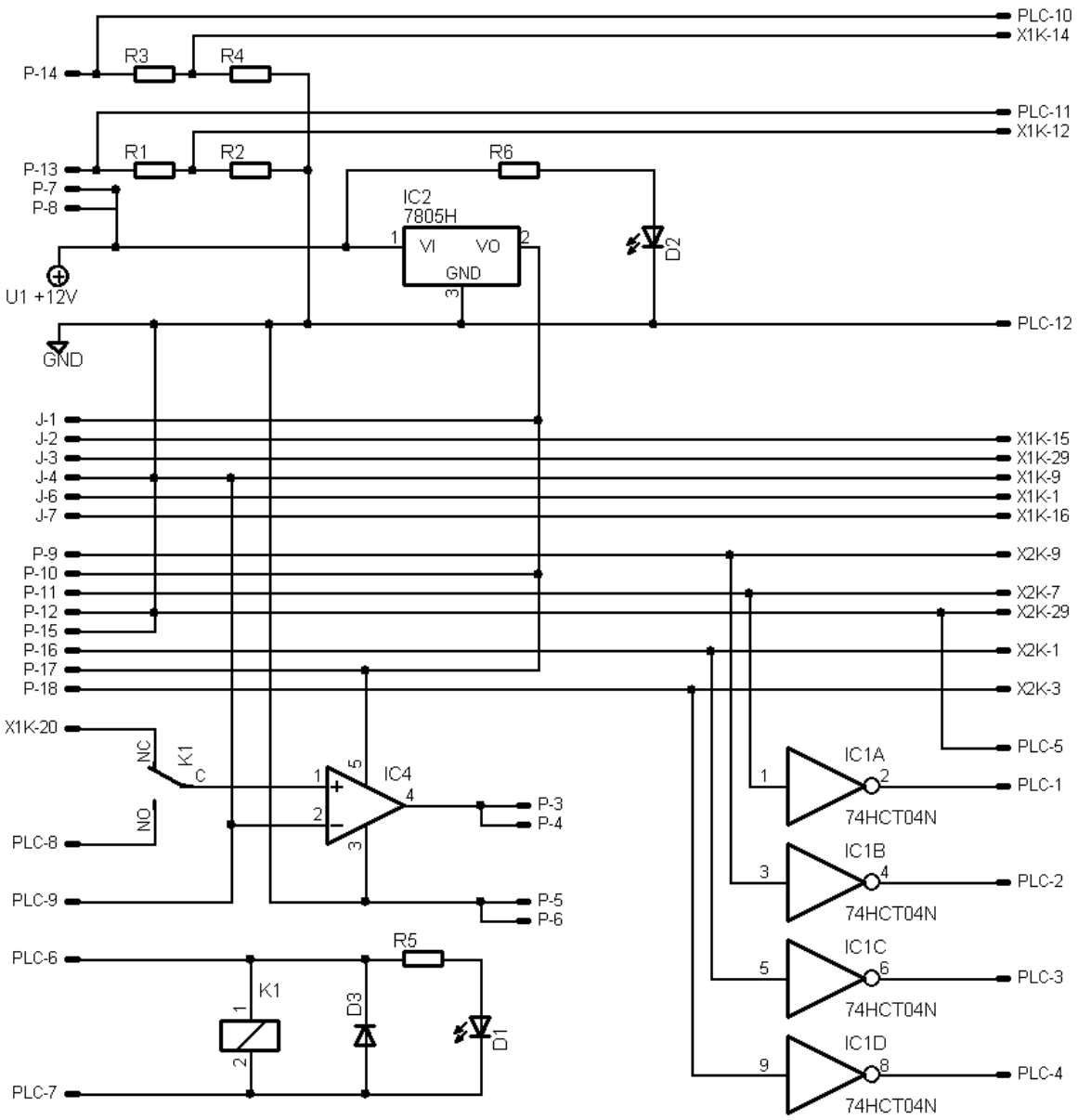
B.2. Schémata zapojení



Obr. 4.1: Vnitřní zapojení modelu inverzní kyvadlo



Obr. 4.2: Vnitřní zapojení joysticku



Obr. 4.3: Schéma zapojení obvodu přepínání řízení

Počet	Označení ve schématu	Typ	Hodnota
1	R1, R3	R-EU-0204/7	1 kΩ
3	R2, R4, R5	R-EU-0204/7	1,3 kΩ
1	R6	R-EU-0204/7	470 kΩ
1	IC1	74HCT04N	
1	IC2	7805H	+5 V
1	IC4	výkonový zesilovač, součást skříně	
1	K1	RELEH200SD24	24V
1	D1	LED 5MM RED	červená
1	D2	LED 5MM GREEN	zelená
1	D3	BY252	
1	U1	stabilizovaný, součást skříně	+12 V ss

Tab 4.4: Seznam součástek obvodu přepínání řízení

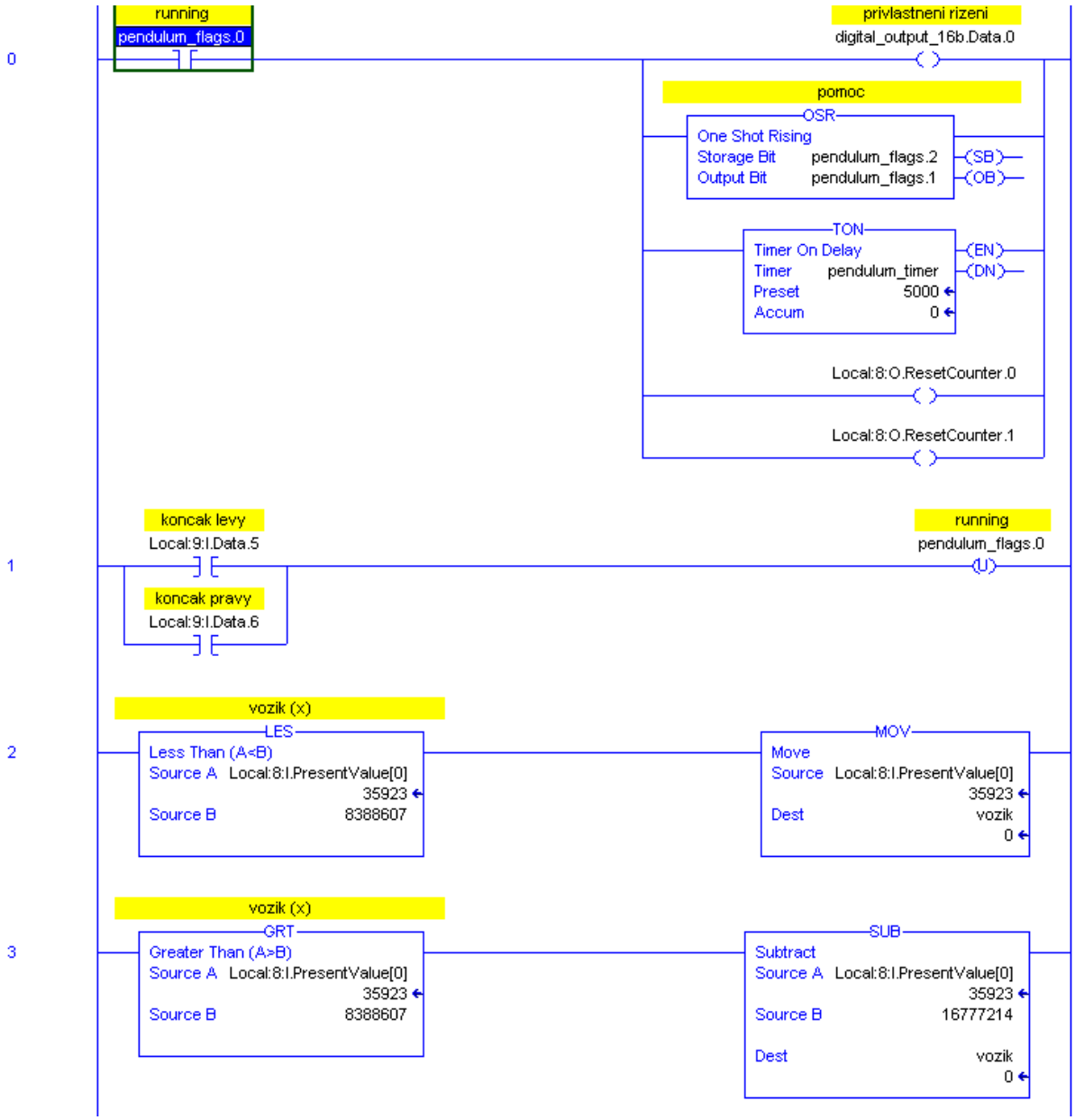
Příloha C

Skript návrhu regulátoru pro Matlab

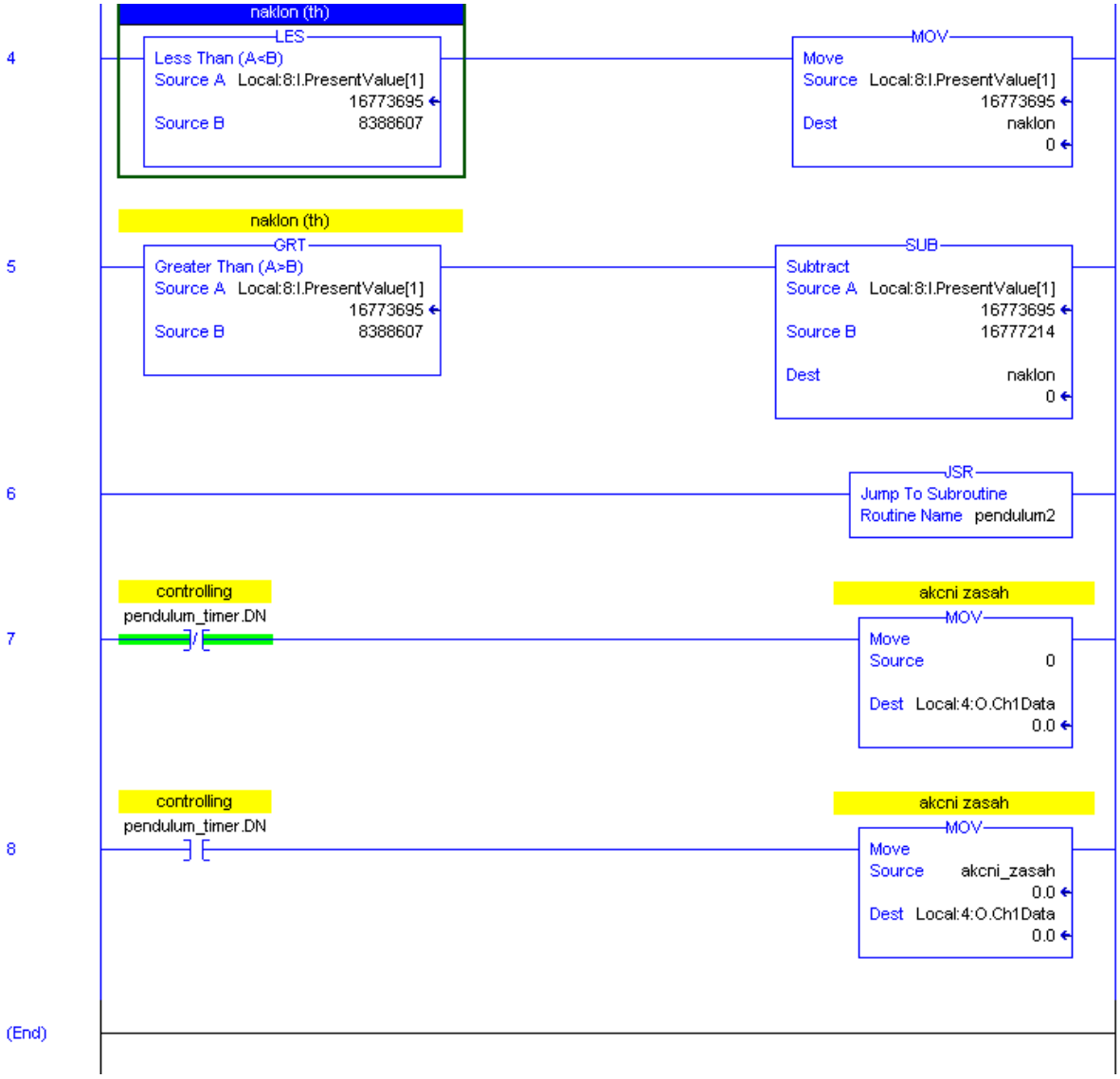
```
clear all;
%identifikované konstanty v rovnicích modelu
    I=8.7*10^-4;
    l=0.066;
    mt=0.94;
    mp=0.157;
    k=2.14*10^-4;
    c = 6.01;
    b = 4.063;
    g=9.81;
    fi0=1;
    %pomocné proměnné
    mc=mt+mp;
    a = mp^2*l^2-I*mc;
%Matice linearizovaného systému pro kyvadlo v horní poloze
    Au = [k*mc/a -mp*g*l*mc/a mp*l*b/a 0; 1 0 0 0; mp*l*k/a -mp^2*l^2*g/a
b*I/a 0; 0 0 1 0];
    Bu = [-mp*l*c/a; 0; -I*c/a; 0];
    Cu = [0 1 0 0];
    Du = 0;
    %vektor stavů [omega; theta; v; x];
    sysu = ss(Au, Bu, Cu, Du);
%Návrh vnitřní smyčky (regulace náklonu)
    r1 = rank(ctrb(Au, Bu));
    [num, den] = ss2tf(Au, Bu, Cu, Du);
    fu = tf([73.523 0 0], [1 4.4504 -130.6 -487.6 0]); %přenos systému sysu
na na náklon theta
    numBB = conv([73.523 0 0], [73.523 0 0]);
    denBB = conv([1 4.4504 -130.6 -487.6 0],[1 -4.4504 -130.6 +487.6 0]);
    fuBB = tf(numBB, denBB); %fuBB = fu(s)*fu(-s)
    %sisotool(fuBB) % zobrazí póly sysu v uzavřené smyčce, jako zesílení
volíme konstantu ro, C=ro=1
    poles1 = [-3.14, -12.1 - 3.14j, -12.1 + 3.14j, 0]; %vybíráme pouze
stabilní póly zobrazené v sisotool
    K1 = place(Au, Bu, poles1);
%Matice a přenos  systému s vnitřní regulační smyčkou (regulace náklonu)
    Au2 = Au - Bu*K1;
    Bu2 = Bu;
    Cu2 = [0 0 0 1];
    Du2 = Du;
    sysu2 = ss(Au2, Bu2, Cu2, Du2);
    [num, den] = ss2tf(Au2, Bu2, Cu2, Du2);
    fu2 = tf([6.173 1.518 -721], [1 27.3 232.3 490.7 0]); %fu(s)
%Návrh vnější smyčky (regulace polohy)
    r2 = rank(ctrb(Au2, Bu2));
    numBB2 = conv([6.173 1.518 -721], [6.173 -1.518 -721]);
    denBB2 = conv([1 27.3 232.3 490.7 0], [1 -27.3 232.3 -490.7 0]);
    fuBB2 = tf(numBB2, denBB2); %fuBB2 = fu2(s)*fu2(-s)
    %sisotool(fuBB2) %C = ro = 1
    poles2 = [-12.17 + 3.25j, -12.17 - 3.25j, -2.62, -1.76];
    K2 = place(Au2, Bu2, poles2);
```

Příloha D

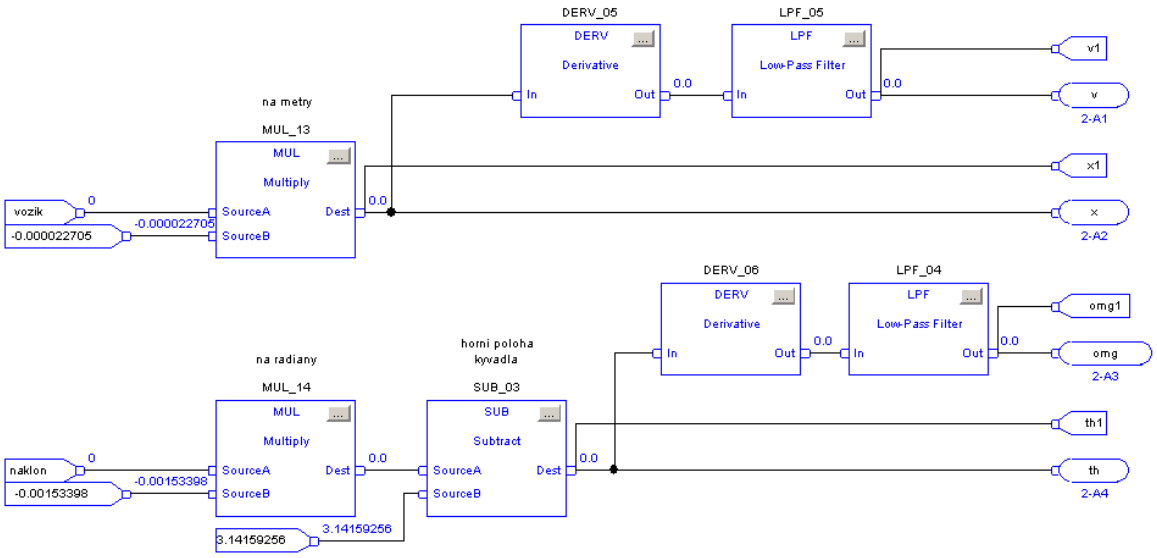
Realizace regulátoru v PLC



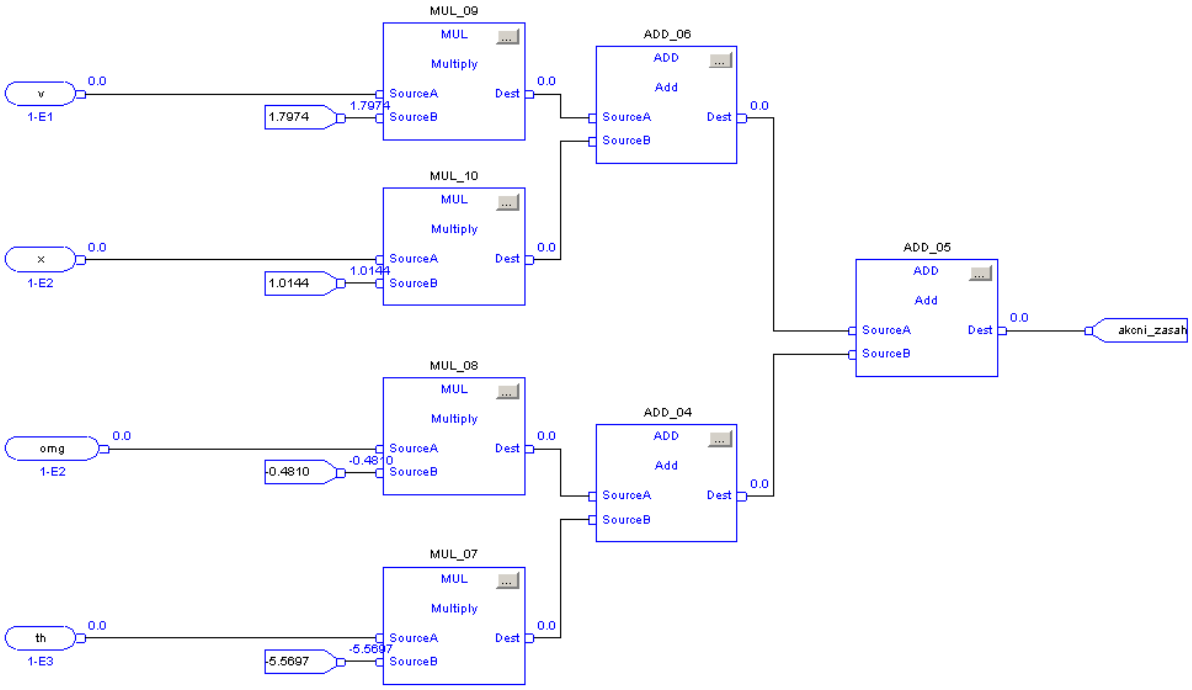
Obr. 4.4: Rutina pendulum1, část 1/2



Obr. 4.5: Rutina pendulum1, část 2/2



Obr. 4.6: Rutina pendulum2, list 1/2



Obr. 4.7: Rutina pendulum2 list 2/2