



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

EMULACE TECHNOLOGICKÉHO PROCESU

TECHNOLOGICAL PROCESS SIMULATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ DOSTÁL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR MALOUNEK

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Jiří Dostál

ID: 106411

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Emulace technologického procesu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s možnostmi Matlab/Simulink při vytváření modelů technologických procesů a řízení. Navrhněte model technologického procesu a jeho řízení v Matlab/Simulink reprezentující realný proces dle pokynů vedoucího (konzultanta). Ověřte možnosti využití podpory pro automatické generování kódu z Matlab/Simulink do programovatelných automatů firmy B&R. Detailně se zabývejte problematikou modelování a simulace reálných systémů v řídicím hardwaru. Propojte dvě PLC s využitím průmyslové sběrnice Ethernet Powerlink a vytvořte tak v jednom PLC emulaci technologického procesu a v druhém jeho plnohodnotné řízení. Vytvořte vhodné vizualizace technologického procesu a jeho řízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

B&R školící materiál TM140

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Petr Malounek

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem modelu inverzního kyvadla a jeho řízení v prostředí Matlab/Simulink, převedením modelu a řídicího členu do jazyka ANSI C s využitím knihovny pro automatické generování kódu z Matlab/Simulink do PLC společnosti B&R a realizací modelu a jeho řízení ve dvou PLC. Úvodní část práce popisuje mechanismus tvorby matematického modelu inverzního kyvadla a jeho simulačního schématu v Matlab/Simulink. Následuje návrh LQ regulátoru s využitím funkcí Matlabu a popis knihovny pro automatické generování kódu z Matlab/Simulink do PLC firmy B&R. Poslední část se zabývá realizací modelu a regulátoru ve dvou oddělených PLC propojených průmyslovou sběrnici Ethernet Powerlink a popisuje vytvořené vizualizace k ovládání a sledování procesu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Inverzní kyvadlo, LQ regulátor, Automatické generování kódu, PLC, B&R, Powerlink

ABSTRACT

This paper deals with a design of an inverted pendulum model and its controller in Matlab/Simulink, a conversion of the model and its controller to the ANSI C language and its implementation to B&R PLC's. The source code for B&R PLC's is generated automatically by the B&R Automation Studio Target for Simulink library. The first part deals with the design of a mathematical model of the inverted pendulum and its simulation in Matlab/Simulink, followed by a design of a LQ controller for this model using Matlab functions and a description of the B&R Automation Studio Target for Simulink library. The last part of this paper deals with the implementation of the model and its controller into two separate B&R PLC's, which are networked with the Ethernet Powerlink industrial fieldbus and it also describes visualizations that were designed for operating the system.

KEYWORDS

Inverted Pendulum, LQ controller, Automatic code generation, PLC, B&R, Powerlink

DOSTÁL, Jiří. *Emulace technologického procesu*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2010. 58 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Malounek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Emulace technologického procesu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Malounkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

OBSAH	6
SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	9
ÚVOD	10
1. INVERZNÍ KYVADLO	12
1.1 Matematický popis systému.....	12
1.1.1 Lagrangeovy rovnice druhého druhu.....	13
1.1.2 Odvození pohybových rovnic kyvadla	14
1.1.3 Model stejnosměrného motoru	16
1.1.4 Model inverzního kyvadla se stejnosměrným motorem.....	18
1.2 Model inverzního kyvadla v podobě blokového schématu.....	20
2. NÁVRH REGULÁTORU	22
2.1 Rozbor možných řešení regulace inverzního kyvadla	22
2.2 Stavový regulátor	23
2.2.1 LQ regulátor.....	23
2.2.2 Linearizace v okolí inverzní polohy	24
2.2.3 Stavový popis v maticovém tvaru	25
2.2.4 Volba váhových matic Q a R.....	27
2.2.5 Realizace systému v prostředí Matlab/Simulink	28
2.3 Testování.....	29
3. AUTOMATICKÉ GENEROVÁNÍ KÓDU	30
3.1 B&R Automation Studio Toolbox	30
3.1.1 Blok B&R Config	31
3.1.2 Blok B&R Input.....	31
3.1.3 Blok B&R Output	31
3.1.4 Blok B&R Parameter	31
3.2 Model inverzního kyvadla a regulátor s bloky B&R Toolboxu	32
3.3 Řešení spojitého modelu kyvadla v PLC	33
3.3.1 Numerické řešení obyčejných diferenciálních rovnic	34

3.3.2 Algoritmy pro řešení ODE v prostředí Matlab/Simulink	34
3.3.3 B&R Automation Studio Target for Simulink a metody řešení ODE	35
4. REALIZACE SYSTÉMU V PLC	37
4.1 Použitá PLC	37
4.2 B&R Automation Studio.....	38
4.3 Ethernet Powerlink.....	38
4.3.1 Základní vlastnosti EPL.....	38
4.3.2 Princip real-time komunikace.....	39
4.3.3 Komunikace modelu kyvadla a regulátoru	40
4.4 Vizualizace.....	41
4.4.1 Vizualizace regulátoru	41
4.4.2 Vizualizace modelu inverzního kyvadla.....	42
4.4.3 VISAPI	43
ZÁVĚR.....	44
SEZNAM LITERATURY	46
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	48
SEZNAM PŘÍLOH.....	50

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Schéma systému inverzního kyvadla.....	14
Obrázek 1.2: Náhradní schéma stejnosměrného motoru.....	17
Obrázek 1.3: Realizace necitlivosti motoru	21
Obrázek 2.1: Řízení dvěma PID regulátory	23
Obrázek 2.2: Struktura LQ řízení s integrálem regulační odchylky [16].....	26
Obrázek 4.1: Vizualizace regulátoru	41
Obrázek 4.2: Vizualizace modelu inverzního kyvadla	42

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1: Parametry motoru pro pohon kyvadla.....	18
Tabulka 2.1: Parametry modelu inverzního kyvadla	27
Tabulka 3.1: Bloky B&R v modelovém schématu kyvadla.....	33
Tabulka 3.2: Bloky B&R v modelovém schématu regulátoru.....	33
Tabulka 4.1: Vlastnosti použitých PLC	37
Tabulka 4.2: Seznam kanálů pro komunikaci přes EPL	41

ÚVOD

Cílem této práce je vytvořit plnohodnotnou emulaci technologického procesu a jeho řízení pomocí dvou programovatelných automatů. Návrh tohoto systému má být proveden s využitím výkonných nástrojů výpočetní techniky, jako je programové prostředí Matlab s nástavbou Simulink, knihovna pro automatické generování kódu z Matlab/Simulink do programovatelných automatů společnosti B&R a průmyslová sběrnice Ethernet Powerlink.

Za model technologického procesu byl vzhledem k možnosti využití těchto pokročilých nástrojů zvolen systém inverzního kyvadla. Tento systém sice není příliš „technologický“, neboť v praxi se s jeho aplikací setkáme velmi zřídka, na druhou stranu je to systém velmi oblíbený a zajímavý pro návrh různých řídicích algoritmů. Jeho emulace na PLC v laboratoři číslicové řídicí techniky může být užitečná k výukovým účelům.

Práce je rozdělena na čtyři hlavní části. První část práce představuje systém inverzního kyvadla jako dynamický systém, který je nelineární, nestabilní a takzvaně podaktuovaný. Práce se zabývá odvozením matematického modelu tohoto systému a způsobem jeho reprezentace v prostředí Matlab/Simulink.

Další část se zabývá možnostmi regulace systému inverzního kyvadla. Je vybrán jeden z nejčastěji používaných regulátorů, který je schopen stabilizovat kyvadlo v inverzní poloze a pro model s vhodně zvolenými parametry je navržena konkrétní podoba takového regulátoru.

Následuje třetí část práce, která se zabývá knihovnou pro automatické generování kódu z Matlab/Simulink do programovatelných automatů firmy B&R. Věnuje se mimo jiné způsobu modelování spojitého dynamického systému v programovatelných automatech a také některým omezením, která jsou tím dána, vzhledem k možnostem modelování spojitých systémů v prostředí Matlab/Simulink.

Poslední část práce se zabývá realizací modelu a jeho řízení ve dvou oddělených programovatelných automatech a jejich propojením real-timeovou průmyslovou sběrnici založenou na bázi Ethernetu – Ethernet Powerlink. Krom toho také popisuje vizualizace, které byly vytvořeny zvlášť pro model a zvlášť pro regulátor, a které slouží ke sledování a ovládání celého systému uživatelem.

1. INVERZNÍ KYVADLO

Systém inverzního kyvadla je jednou z typických akademických úloh, kterou se zabývají studenti na univerzitách po celém světě. Systém má řadu vlastností, které jsou z hlediska regulační techniky nepříznivé, a tak ho předurčují k testování různých typů regulátorů. Mezi tyto vlastnosti patří zejména:

- nelinearita,
- nestabilita v inverzní poloze,
- podaktuovanost.

Nelinearitu řešíme obvykle linearizací v okolí rovnovážného stavu. To nám způsobuje problémy s robustností regulace, která může být při větších odchylkách systému od rovnovážného stavu nespolehlivá. Podaktuovanost vyjadřuje, že systém má více stupňů volnosti, než je počet vstupů, kterými na něj můžeme působit.

Nejčastěji je systém inverzního kyvadla tvořen pojízdným vozíkem na pevné kolejnici s volně otáčejícím se ramenem. Méně často se můžeme setkat s vozíkem s podvozkem, který se může pohybovat po rovné ploše bez kolejnice. Jiná, často se vyskytující alternativa, je systém rotačního inverzního kyvadla, kdy je rameno kyvadla upevněno k rotačnímu rameni, které se otáčí v horizontální rovině. Rameno kyvadla je tvořeno buď homogenní tyčí, nebo se na konec ramene přidává závaží.

Pro vytvoření modelu byl zvolen nejčastěji se vyskytující systém inverzního kyvadla s vozíkem na kolejnici a ramenem bez závaží. Vozík je poháněn stejnosměrným motorem. Celý systém je znázorněn na Obrázek 1.1.

1.1 MATEMATICKÝ POPIS SYSTÉMU

Tato část práce se zabývá sestavením pohybových rovnic systému inverzního kyvadla. K tomu využijeme Langrangeovy rovnice druhého druhu. Ty se s výhodou používají k sestavování pohybových rovnic mechanických systémů, které lze zjednodušit na soustavu hmotných bodů a těles, jejichž pohyb je omezen vzájemnými holonomními vazbami [13].

1.1.1 Lagrangeovy rovnice druhého druhu

Odvození Lagrangeových rovnic druhého druhu vychází z principu virtuálních prací, podle kterého je soustava v rovnováze, je-li virtuální práce všech působících sil v soustavě nulová [9]:

$$\delta w = \sum_{i=1}^n Q_i \delta q_i = 0, \quad (1.1)$$

kde:

Q_i ... zobecněná síla působící ve směru i -té zobecněné souřadnice;

q_i ... i -tá zobecněná souřadnice.

Základní tvar Lagrangeových rovnic druhého druhu je [9]:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L_a}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L_a}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1.2)$$

kde:

L_a ... Lagrangeova funkce, definovaná jako:

$$L_a = E_K - E_P, \quad (1.3)$$

kde:

E_K ... celková kinetická energie soustavy;

E_P ... celková potenciální energie soustavy.

Zobecněné síly se určí podle následující rovnice [13]:

$$Q_i = \sum_j \left(X_j \frac{\partial x_j}{\partial q_i} + Y_j \frac{\partial y_j}{\partial q_i} + Z_j \frac{\partial z_j}{\partial q_i} \right) + \sum_m M_m \frac{d\varphi_m}{dq_i}, \quad (1.4)$$

kde:

X_j, Y_j, Z_j ... jsou postupně x -ová, y -ová a z -ová složka j -té pracovní síly;

x_j, y_j, z_j ... jsou postupně x -ová, y -ová a z -ová souřadnice působíště této síly;

M_m ... krouticí moment m -té pracovní silové dvojice;

φ_m ... úhel natočení této silové dvojice.

Podrobnější odvození a vysvětlení principu Lagrangeových rovnic druhého druhu lze nalézt např. v [9] nebo [13].

1.1.2 Odvození pohybových rovnic kyvadla

Systém inverzního kyvadla lze zjednodušit dle Obrázek 1.1. Pro celkovou kinetickou energii systému platí:

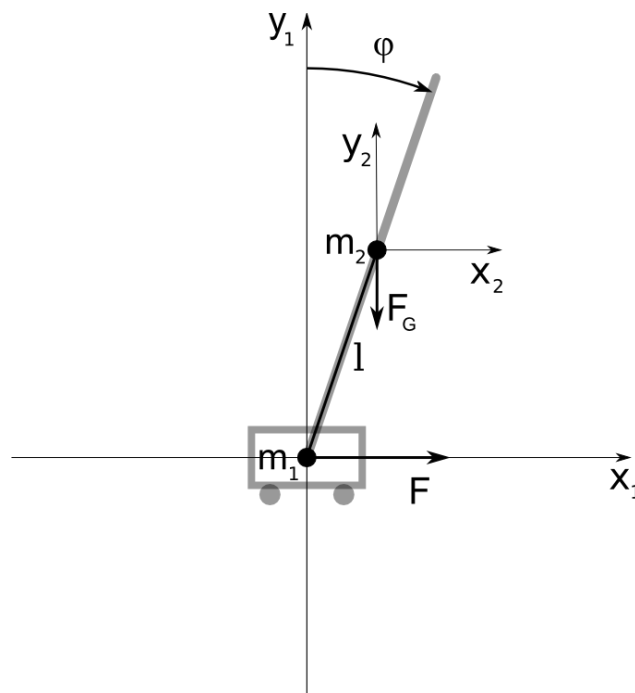
$$E_K = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2, \quad (1.5)$$

kde:

m_1 ... hmotnost vozíku;

m_2 ... hmotnost ramene kyvadla;

J ... moment setrvačnosti ramene kyvadla.



Obrázek 1.1: Schéma systému inverzního kyvadla

Systém má celkem dva stupně volnosti. Zavedeme-li jako zobecněné souřadnice polohu vozíku $q_1 = x$ a úhel natočení ramene kyvadla $q_2 = \varphi$, platí:

$$\begin{aligned} x_1 &= x, & \dot{x}_1 &= \dot{x}, \\ x_2 &= x + l \sin \varphi, & \dot{x}_2 &= \dot{x} + l \dot{\varphi} \cos \varphi, \\ y_2 &= l \cos \varphi, & \dot{y}_2 &= -\dot{\varphi} l \sin \varphi, \end{aligned} \quad (1.6)$$

kde:

l ... vzdálenost těžiště kyvadla od místa závěsu (polovina délky kyvadla).

Uvažujeme-li kyvadlo jako tenkou tyč z homogenního materiálu, je moment setrvačnosti vzhledem k ose otáčení procházející jejím těžištěm $J = \frac{1}{3}m_2l^2$ [5].

Potom celková kinetická energie soustavy v závislosti na zobecněných souřadnicích:

$$E_K = \frac{1}{2}m_1\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m_2\left[(\dot{x} + l\dot{\varphi}\cos\varphi)^2 + (-\dot{\varphi}l\sin\varphi)^2\right] + \frac{1}{2}J\dot{\varphi}^2, \quad (1.7)$$

$$E_K = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)\dot{x}^2 + m_2l\dot{x}\dot{\varphi}\cos\varphi + \frac{2}{3}m_2l^2\dot{\varphi}^2.$$

Potenciální energie soustavy bude nulová v případě, že se kyvadlo nachází v dolní rovnovážné poloze. Potom platí:

$$E_p = m_2g(l + l\cos\varphi), \quad (1.8)$$

kde:

$g = 9,81$ [m.s⁻²] ... tíhové zrychlení.

Podle vztahu (1.3) dostáváme Lagrangeovu funkci L ve tvaru:

$$L_a = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)\dot{x}^2 + m_2l\dot{x}\dot{\varphi}\cos\varphi + \frac{2}{3}m_2l^2\dot{\varphi}^2 - m_2g(l + l\cos\varphi). \quad (1.9)$$

Dále je třeba určit jednotlivé zobecněné síly Q_i působící na soustavu. Na soustavu působí vnější síla F , která pohybuje s vozíkem a třecí síla $B_V\dot{x}$, která působí proti směru pohybu vozíku a kde B_V [kg.s⁻¹] je koeficient viskózního tření. Na rameno kyvadla působí jediná síla tlumící kmity kyvadla. Velikost této síly lze zjednodušeně popsat takto: $R_K = 2\delta_K J^* \dot{\varphi}$, kde δ_K [s⁻¹] $\in \langle 0; 1 \rangle$ je koeficient útlumu kyvadla a $J^* = \frac{4}{3}m_2l^2$ [kg.m²] je moment setrvačnosti kyvadla vzhledem k ose otáčení procházející koncem tyče [5], [11].

S využitím rovnice (1.4) dostáváme pro zobecněnou souřadnici x :

$$Q_x = F - B_V\dot{x} \quad (1.10)$$

a zobecněnou souřadnici φ :

$$Q_\varphi = -\frac{8}{3}\delta_k m_2 l^2 \dot{\varphi}. \quad (1.11)$$

Nyní postupně sestavíme Lagrangeovy rovnice druhého druhu pro obě zobecněné souřadnice:

$$\frac{\partial L_a}{\partial x} = 0, \quad (1.12)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L_a}{\partial \dot{x}} \right] = (m_1 + m_2) \ddot{x} + m_2 l \ddot{\varphi} \cos \varphi - m_2 l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi, \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial L_a}{\partial \varphi} = -m_2 l \dot{x} \dot{\varphi} \sin \varphi + m_2 l g \sin \varphi, \quad (1.14)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L_a}{\partial \dot{\varphi}} \right] = m_2 l \ddot{x} \cos \varphi - m_2 l \dot{x} \dot{\varphi} \sin \varphi + \frac{4}{3} m_2 l^2 \ddot{\varphi}. \quad (1.15)$$

Dosazením do (1.2) dostaneme výsledné pohybové rovnice pro model inverzního kyvadla:

$$(m_1 + m_2) \ddot{x} + m_2 l \ddot{\varphi} \cos \varphi - m_2 l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi = F - B_v \dot{x}, \quad (1.16)$$

$$\ddot{x} \cos \varphi + \frac{4}{3} l \ddot{\varphi} - g \sin \varphi = -\frac{8}{3} \delta_k l \dot{\varphi}. \quad (1.17)$$

Tyto rovnice popisují chování samotného modelu reprezentovaného volně pohyblivým vozíkem a ramenem kyvadla. V této podobě má ovšem model tu nevýhodu, že pokud bychom chtěli navrhnout regulátor na daný systém, je vstupem do systému síla F působící na vozík. Ve skutečnosti by model inverzního kyvadla vypadal zhruba tak, jak ukazuje Obrázek 4.2. Vstupem do tohoto systému je napětí na svorkách DC motoru. V následující části doplníme soustavu o model stejnosměrného motoru tak, aby vstupem do soustavy bylo napětí na svorkách motoru.

1.1.3 Model stejnosměrného motoru

Pro jednoduchost byl jako model motoru k pohánění soustavy zvolen klasický stejnosměrný komutovaný motor. Takový motor si lze představit jako lineární dynamický systém, kde vstupem je napětí na svorkách motoru a výstupem může být

zrychlení, rychlost a úhel natočení hřídele. Rovnice popisující chování motoru je možné odvodit z náhradního schématu (Obrázek 1.2) [12]:

$$\begin{aligned}
 u &= Ri + L \frac{di}{dt} + u_e, \\
 M &= J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m, \\
 u_e &= k_u \omega_m, \\
 M &= k_m i,
 \end{aligned}
 \tag{1.18}$$

kde:

u ... napětí na svorkách motoru;

i ... proud motorem;

ω_m ... úhlová rychlost hřídele (otáčky motoru);

u_e ... zpětné indukované napětí motoru;

R ... odpor vinutí motoru;

L ... indukčnost vinutí motoru;

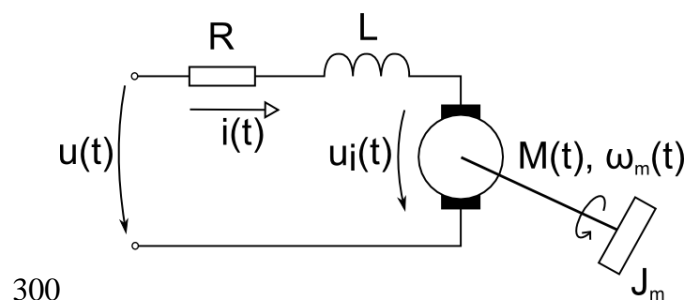
J_m ... moment setrvačnosti hřídele;

B ... tlumení zátěže;

M ... moment motoru;

k_m ... momentová konstanta motoru;

k_u ... napěťová konstanta motoru.



Obrázek 1.2: Náhradní schéma stejnosměrného motoru

Parametry motoru byly stanoveny z katalogového listu zvoleného motoru [10] a jsou uvedeny v Tabulka 1.1. Jelikož momentová konstanta motoru k_m se přibližně

rovná napěťové konstantě, je pro zjednodušení zavedena konstanta motoru $k = k_m \doteq k_u$.

Parametr	Značka	Hodnota
Odpor vinutí	R	2,07 Ω
Indukčnost vinutí	L	0,62 mH
Moment setrvačnosti hřídele	J_m	72,0 g.cm ²
Konstanta motoru	k	52,5 mNm.A ⁻¹

Tabulka 1.1: Parametry motoru pro pohon kyvadla

Z rovnic (1.18) byl vzájemným dosazením vyloučen proud i a byla vypočtena následující rovnice motoru:

$$\ddot{\omega}_m = \frac{k}{J_m L} u - \left(\frac{R}{L} + \frac{B}{J_m} \right) \dot{\omega}_m - \left(\frac{RB + k^2}{J_m L} \right) \omega_m. \quad (1.19)$$

Tato rovnice je dále použita k získání konečných stavových rovnic systému inverzního kyvadla se stejnosměrným motorem.

1.1.4 Model inverzního kyvadla se stejnosměrným motorem

Pro určení stavových rovnic celého systému inverzního kyvadla poháněného stejnosměrným motorem byly provedeny následující úpravy:

1. Transformace hmotnosti vozíku s kyvadlem na moment setrvačnosti na hřídeli motoru a stanovení celkového momentu setrvačnosti motoru.
2. Transformace úhlové rychlosti motoru ω_m na rychlost pohybu vozíku v .
3. Zanedbání vlivu pohybu kyvadla na vozík.

Podle zákona zachování energie platí pro moment setrvačnosti J_V přepočtený z hmotnosti vozíku s kyvadlem [13]:

$$J_V = (m_1 + m_2) r^2, \quad (1.20)$$

kde:

r ... poměr převodu mezi hřídelí motoru a posuvným mechanismem vozíku.

Vzhledem k vlastnostem motoru bylo uvažováno, že převod bude tvořen planetární převodovkou s převodem 1:10 do pomala a poloměr převodu mezi rotační a translační částí mechanismu je 5 cm. Celkový moment setrvačnosti na hřídeli motoru je součtem momentu setrvačnosti hřídele a přepočteného momentu setrvačnosti vozíku s kyvadlem: $J_c = J_m + J_v$. Tlumení zátěže B bylo nahrazeno koeficientem viskózního tření vozíku B_v . Převodový poměr r byl dále využit k transformaci rovnice (1.19). Pro rychlost pohybu vozíku platí: $v = r\omega_m$ a tedy:

$$\begin{aligned}\frac{\ddot{v}}{r} &= \frac{k}{J_c L} u - \left(\frac{R}{L} + \frac{B}{J_c} \right) \frac{\dot{v}}{r} - \left(\frac{RB + k^2}{J_c L} \right) \frac{v}{r}, \\ \ddot{v} &= \frac{kr}{J_c L} u - \left(\frac{R}{L} + \frac{B}{J_c} \right) \dot{v} - \left(\frac{RB + k^2}{J_c L} \right) v.\end{aligned}\tag{1.21}$$

Poslední úprava spočívá v zanedbání vlivu otáčení ramene kyvadla na polohu vozíku. V blízkém okolí horního rovnovážného stavu kyvadla, ve kterém se při regulaci pohybujeme, je zpětný vliv kyvadla na vozík malý. Vliv pohybu kyvadla na pohyb vozíku se dále snižuje se zmenšováním poměru hmotnosti kyvadla k hmotnosti vozíku. Pro daný model inverzního kyvadla lze předpokládat, že hmotnost kyvadla je řádově menší, než hmotnost vozíku. Zpětný vliv kyvadla na vozík je tedy možné zanedbat.

Zavedením stavových proměnných x , v , a , φ a ω , které vyjadřují postupně polohu, rychlost a zrychlení vozíku, úhel natočení a úhlovou rychlost ramene kyvadla a spojením rovnic (1.17) a (1.21) získáme výsledné stavové rovnice popisující celý systém inverzního kyvadla poháněného stejnosměrným motorem:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v, \\ \dot{v} &= a, \\ \dot{a} &= \frac{kr}{J_c L} u - \left(\frac{R}{L} + \frac{B}{J_c} \right) a - \left(\frac{RB + k^2}{J_c L} \right) v, \\ \dot{\varphi} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{3g}{4l} \sin \varphi - \frac{3}{4l} a \cos \varphi - 2\delta_K \omega.\end{aligned}\tag{1.22}$$

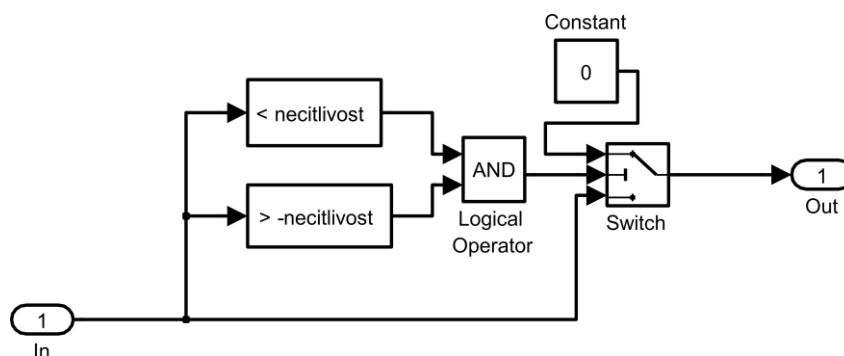
1.2 MODEL INVERZNÍHO KYVADLA V PODOBĚ BLOKOVÉHO SCHÉMATU

Programové prostředí Matlab od společnosti MathWorks je velmi silný, vědecký nástroj pro řešení technických, matematických, ekonomických či jiných problémů. Pomocí programovacího jazyka Matlab je možné řešit nepřeberné množství úloh, od vědeckotechnických a numerických výpočtů, modelování a počítačové simulace přes měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů včetně analýzy a prezentace dat. Základní datovou strukturou, kterou Matlab používá při výpočtech, jsou matice. Z této skutečnosti je též odvozen název Matlab, který vznikl zkrácením slov MATrix LABoratory (volně přeloženo „laboratoř s maticemi“).

Nástavba Simulink pro systém Matlab je simulační prostředí, které umožňuje grafické vyjádření – modelování dynamických systémů všech druhů. Simulink je schopen řešit chování takových systémů v čase pomocí algoritmů Matlabu pro numerické řešení diferenciálních rovnic a velmi usnadňuje řešení zejména nelineárních dynamických systémů, mezi které patří i systém inverzního kyvadla. Pokud je znám matematický popis systému, lze s pomocí Simulinku snadno určit časové průběhy výstupních i stavových veličin systému v závislosti na časovém průběhu vstupních veličin a počátečním stavu. Lze modelovat i velmi složité komplexní systémy s mnoha vstupy a výstupy, jejichž řešení analytickými postupy by bylo příliš komplikované.

Blokové schéma modelu inverzního kyvadla lze snadno sestavit ze stavových rovnic systému. Každý stav je reprezentován integrátorem, celkem obsahuje blokové schéma modelu pět integrátorů. V příloze A.1 je zobrazeno vytvořené blokové schéma modelu v Simulinku. Mimo reprezentaci stavových rovnic systému je toto schéma doplněno ještě o další prvky, které modelují různá omezení systému a umožňují ovládní modelu uživatelem:

- Možnost resetu systému, kdy je pomocí vnějšího signálu resetován stav integrátorů do počáteční hodnoty. Počáteční hodnota je u všech integrátorů nastavena na nulu, což odpovídá ustálenému stavu kyvadla v horní poloze.
- Omezení v krajních polohách vozíku, kdy stav vyjadřující polohu vozíku x je limitován v intervalu $\langle -2; 2 \rangle$ a při dosažení této hodnoty je současně vynulována rychlost v a zrychlení a vozíku.
- Vstupní nelinearita reprezentující necitlivost motoru na malá napětí, viz Obrázek 1.3. Rozsah necitlivosti je možné nastavovat za běhu.
- Vstupní signál poruchy, který je přičten před integrátor rychlosti kyvadla. Tento vstup byl do systému zaveden za účelem simulování „strčení“ do kyvadla. Z fyzikálního hlediska vstup reprezentuje přidané úhlové zrychlení kyvadla.
- Bloky pro konverzi datových typů.



Obrázek 1.3: Realizace necitlivosti motoru

Kromě toho jsou do schématu zavedeny bloky pro automatické generování kódu ze Simulinku do B&R Automation Studia, jejichž funkce je popsána v kapitole 3.

2. NÁVRH REGULÁTORU

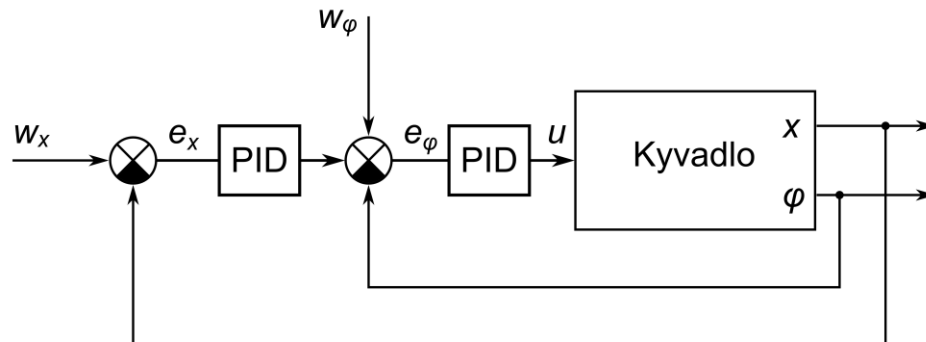
Tato část práce se zabývá návrhem regulátoru pro výše popsany model inverzního kyvadla se stejnosměrným motorem. Regulátor je navržen s podporou funkcí Matlabu a následně je tak jako model kyvadla realizován v blokovém schématu v Simulinku.

2.1 ROZBOR MOŽNÝCH ŘEŠENÍ REGULACE INVERZNÍHO KYVADLA

Systémy typu inverzního kyvadla patří mezi zajímavé úlohy pro návrh a testování různých druhů regulátorů. Vzhledem ke svým nepříznivým vlastnostem, mezi které patří zejména nelinearita a nestabilita systému, kladou zvýšené nároky na kvalitu regulátorů. Problémem řízení inverzního kyvadla se zabývá množství odborných článků, ve kterých lze najít různé typy regulátorů, které lze k řízení použít. Většinou jsou definovány tři hlavní požadavky, které by měl systém s regulátorem splňovat:

1. Stabilizace kyvadla v inverzní labilní poloze.
2. Přemístění a ustálení vozíku v požadované pozici.
3. Vyšvihnutí kyvadla z dolní polohy do inverzní polohy – často označováno jako „swing-up controller“.

Prostudováním dostupné literatury bylo zjištěno, že vhodným a nejčastěji používaným regulátorem pro řízení inverzního kyvadla je lineární, kvadraticky optimální regulátor (LQR). Poměrně často se také používá koncepce dvou PID regulátorů tak, jak ukazuje Obrázek 2.1. Vnitřní smyčka zajišťuje udržení kyvadla v inverzní poloze a vnější zajišťuje přemístění a ustálení vozíku v žádané pozici. Lze se také setkat s pokusy o řízení adaptivními regulátory a dalšími specializovanými algoritmy, jako jsou např. neuronové sítě. Cílem je ale většinou jen testování takových algoritmů, ke kterému se systém inverzního kyvadla hodí.



Obrázek 2.1: Řízení dvěma PID regulátory

2.2 STAVOVÝ REGULÁTOR

V této části bude navržen stavový regulátor pro stabilizaci kyvadla v inverzní poloze. Princip stavového řízení spočívá ve výpočtu akčního zásahu na základě znalosti stavu systému, který je definován hodnotou stavových veličin systému. Návrh stavových regulátorů se standardně provádí dvěma způsoby [7]:

- Metodou zadání pólů charakteristické rovnice.
- Návrh podle kvadratického kriteria – LQ regulátor.

V následujících kapitolách je proveden návrh LQ regulátoru pro systém inverzního kyvadla s využitím funkcí Matlabu.

2.2.1 LQ regulátor

LQ (linear-quadratic) regulátor je nejčastěji používaný stavový regulátor, jehož princip spočívá v nalezení hodnot vektoru zesílení zpětných vazeb od stavů systému tak, aby byla minimalizována hodnota kvadratického kriteria [7] [15]:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + 2\mathbf{x}^T(t)\mathbf{N}\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)) dt, \quad (2.1)$$

$$\mathbf{x}(0) \neq \mathbf{0}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x}(t) = \mathbf{0},$$

kde:

\mathbf{x} ... vektor stavů systému;

\mathbf{u} ... vektor vstupů systému;

$\mathbf{Q}, \mathbf{N}, \mathbf{R} \dots$ volené matice koeficientů.

V základním tvaru je LQ regulátor tvořen vektorem zesílení zpětných vazeb od stavů systému:

$$u_r(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t), \quad (2.2)$$

kde:

$u_r \dots$ akční zásah regulátoru.

Zesílení \mathbf{K} lze získat řešením Riccatiho rovnice, jejíž tvar lze najít např. v [7], nebo lze využít vestavěných funkcí Matlabu. K získání vektoru zesílení \mathbf{K} bylo v tomto případě využito Matlabovské funkce `lqr` ($\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}, T_s$), která vrací vektor zesílení diskrétního LQ regulátoru pracujícího se vzorkovací periodou T_s . Vstupními parametry funkce jsou stavové matice \mathbf{A} , \mathbf{B} spojitého linearizovaného systému, volené váhové matice \mathbf{Q} a \mathbf{R} a vzorkovací perioda regulátoru, která byla zvolena $T_s = 0,01$ s.

Nejprve je třeba stanovit lineární stavové rovnice systému v maticovém tvaru. Následující část se zabývá linearizací modelu inverzního kyvadla v pracovním bodě.

2.2.2 Linearizace v okolí inverzní polohy

Pracovnímu bodu odpovídá nulová výchylka kyvadla $\varphi = 0$. Linearizaci stavových rovnic lze provést jednoduchou úvahou. Pro $\varphi \rightarrow 0$ platí:

$$\sin \varphi \approx \varphi, \quad \cos \varphi \approx 1. \quad (2.3)$$

Dosazením do stavových rovnic (1.22) získáme linearizované stavové rovnice modelu:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v, \\ \dot{v} &= a, \\ \dot{a} &= \frac{kr}{J_c L} u - \left(\frac{R}{L} + \frac{B}{J_c} \right) a - \left(\frac{RB + k^2}{J_c L} \right) v, \\ \dot{\varphi} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{3g}{4l} \varphi - \frac{3}{4l} a - 2\delta_K \omega. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Linearizovaný systém odpovídá původní soustavě pouze v jistém malém okolí pracovního bodu. Z toho vyplývá, že výsledný regulátor nemusí být schopen stabilizace kyvadla v případě, že výchylka kyvadla bude větší než jistá mezní hodnota. Tuto mez můžeme později stanovit experimentálně. Regulátor bude tím robustnější, čím větší bude tato mezní hodnota.

2.2.3 Stavový popis v maticovém tvaru

Dalším krokem je vyjádření linearizovaných stavových rovnic v maticovém tvaru. Stavové rovnice lze vyjádřit maticově takto [1]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}.\end{aligned}\tag{2.5}$$

Systém inverzního kyvadla má jeden vstup u a dva výstupy x a φ . Vektor stavů byl zvolen následovně:

$$\mathbf{x} = [x \quad v \quad a \quad \omega \quad \varphi]^T.\tag{2.6}$$

Potom stavové matice linearizovaného systému jsou:

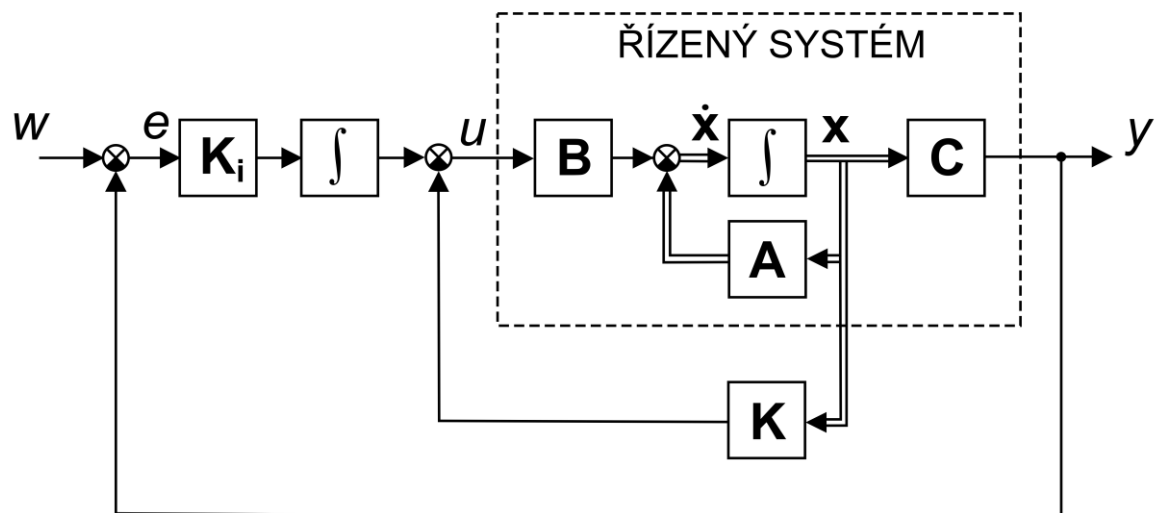
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{RB+k^2}{J_c L} & \frac{R}{L} + \frac{B}{J_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{3}{4l} & \frac{3g}{4l} & -2\delta_k \end{bmatrix},\tag{2.7}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{kr}{J_c L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\tag{2.8}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},\tag{2.9}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Tyto matice by již bylo možné použít k výpočtu zesílení LQ regulátoru. Regulační smyčka s takto navrženým regulátorem ovšem neobsahuje vstup pro žádanou hodnotu a regulátor pracuje tak, že se snaží dostat všechny stavy systému z počátečních hodnot do nuly. Aby byl systém schopen regulace na žádanou hodnotu s nulovou regulační odchylkou, byla regulační smyčka modifikována dle Obrázek 2.2 a mezi stavy systému byl přidán další stav x_i reprezentující integrál výstupu [15].



Obrázek 2.2: Struktura LQ řízení s integrálem regulační odchylky [15]

Za výstup je nyní považována pouze poloha vozíku x . Úhel natočení ramene φ zůstává nulový, jeho hodnotu neovlivňujeme vstupem žádané hodnoty, proto $\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ a stavový popis rozšířeného modelu je:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{A}'\mathbf{x}' + \mathbf{B}'\mathbf{u}, \quad (2.11)$$

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ x_i \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

$$\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{D} \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Matice \mathbf{A}' a \mathbf{B}' jsou následně použity jako vstupní parametry Matlabovské funkce `lqr(A, B, Q, R, Ts)`. Posledním krokem k získání hodnot vektoru zesílení \mathbf{K} je volba váhových matic \mathbf{Q} a \mathbf{R} .

2.2.4 Volba váhových matic \mathbf{Q} a \mathbf{R}

Tyto matice hrají zásadní roli ve výsledném chování regulační smyčky. Jejich koeficienty určují konkrétní tvar kvadratického kriteriá, podle kterého je regulátor optimalizován. Velké hodnoty v \mathbf{R} oproti \mathbf{Q} znamenají, že je preferována malá vynaložená energie na akční zásah před rychlostí ustálení, při malých hodnotách v \mathbf{R} oproti \mathbf{Q} je preferováno rychlé ustálení. Prvky na diagonálách matic váží jednotlivé stavy, ostatní prvky váží součiny stavů navzájem. Obvykle se používají pouze hodnoty na diagonále matice \mathbf{Q} a matice \mathbf{R} se volí jako skalár $R=1$. Je-li hodnota prvku v matici \mathbf{Q} vyšší, je rychlejší reakce regulátoru na příslušnou stavovou proměnnou – spotřebuje se více energie na snižování stavové proměnné k nule.

Aby bylo možné stanovit zesílení regulátoru, je nutné nejprve určit hodnotu parametrů systému. Zvolené parametry ukazuje tabulka 2.1.

Parametr	Značka	Hodnota
Hmotnost vozíku	m_1	5 kg
Hmotnost ramene kyvadla	m_2	0,5 kg
Délka kyvadla ¹	d	0,5 m

Tabulka 2.1: Parametry modelu inverzního kyvadla

Volba koeficientů matic \mathbf{Q} a \mathbf{R} byla provedena úvahou s následným ověřením pomocí testování regulátoru na modelu v Simulinku. Podstatný je vždy poměr koeficientu v matici \mathbf{Q} k \mathbf{R} . Můžeme zvolit $\mathbf{R} = [1]$. V matici \mathbf{Q} budou zvoleny

¹ V modelu systému podle (1.22) je parametr l vzdálenost těžiště kyvadla od místa závěsu, což odpovídá polovině délky kyvadla. Proto $l = \frac{1}{2} d$.

koeficienty příslušející stavu φ , x a přidávanému stavu x_i , ostatní členy matice jsou nulové. Volba jednotlivých koeficientů záleží na subjektivním posouzení dané úlohy a nelze jednoznačně určit, zda je jedno řešení lepší než druhé.

Pro úlohu inverzního kyvadla má nejvyšší prioritu regulace výchylky φ , neboť důležité je hlavně udržet kyvadlo v inverzní poloze. Koeficient příslušející úhlu natočení kyvadla by tedy neměl být menší než zbylé dva volené koeficienty. Testováním bylo zjištěno, že koeficienty s hodnotou větší než 10^5 již mohou způsobovat nestabilitu regulační smyčky. Příloha B ukazuje průběhy výchylky kyvadla φ , polohy vozíku x a akční zásahy regulátoru u , při skoku žádané hodnoty a impulsu poruchy pro čtyři různé volby koeficientů matice \mathbf{Q} :

$$\mathbf{Q}_1 = \text{diag}[1 \ 0 \ 0 \ 10^2 \ 0 \ 1], \quad (2.15)$$

$$\mathbf{Q}_2 = \text{diag}[10 \ 0 \ 0 \ 10^3 \ 0 \ 10], \quad (2.16)$$

$$\mathbf{Q}_3 = \text{diag}[10^2 \ 0 \ 0 \ 10^2 \ 0 \ 10^2], \quad (2.17)$$

$$\mathbf{Q}_4 = \text{diag}[10^3 \ 0 \ 0 \ 10^4 \ 0 \ 10^3]. \quad (2.18)$$

Pro výpočet vektoru zesílení regulátoru, který je následně implementován do PLC, byla zvolena matice \mathbf{Q}_3 .

2.2.5 Realizace systému v prostředí Matlab/Simulink

Tak jako model inverzního kyvadla je i regulátor realizován blokovým schématem v Simulinku, viz příloha A.2. Regulátor pracuje diskrétně se vzorkovací periodou $T_s = 0,01$ s. Namísto integrátoru je použit sumátor. Blokové schéma regulátoru je taktéž doplněno o další prvky, které částečně ošetřují havarijní stavy a rozšiřují ovladatelnost modelu:

- Vypnutí regulátoru, při kterém se na výstup nastaví nula a zároveň se nuluje sumátor. Vypnutí je dáno:
 - manuálně pomocí vstupní proměnné;
 - automaticky při nárazu vozíku na kraj a při vychýlení ramene kyvadla o více než $\pm 90^\circ$.

- Saturace na výstupu, která omezuje akční zásah v rozsahu daném rozsahem povolených napětí na vstupu motoru ($-42 \div 42$ V).
- Bloky pro konverzi datových typů.

Propojení modelu regulátoru a modelu kyvadla je znázorněno v příloze A.3. Výsledné průběhy v příloze B byly získány simulací na tomto spojeném modelu.

Příložený CD-ROM obsahuje m-file se zdrojovým kódem Matlabu použitý k nastavení celého systému. Nejprve jsou definovány všechny potřebné parametry modelu, dále jsou definovány stavové matice linearizovaného modelu a mezi stavy je zařazen nový stav x_i , reprezentující integrál výstupu. Nakonec jsou definovány váhové matice \mathbf{Q} a \mathbf{R} , vzorkovací perioda pro regulátor T_s a pomocí funkce $\text{lqrd}(A_i, B_i, Q, R, T_s)$ je vypočten vektor zesílení regulátoru \mathbf{K} .

2.3 TESTOVÁNÍ

Na soustavě s regulátorem byla experimentálně ověřena maximální možná počáteční výchylka kyvadla, při které je ještě regulátor schopen stabilizace kyvadla v inverzní poloze. Tato mezní výchylka je zhruba 48 stupňů. Mimo to daný průběh ukazuje zajímavý vliv vstupní necitlivosti motoru, která se projeví pravidelným kmitáním okolo rovnovážné polohy. Tento jev lze pozorovat také u fyzikálně realizovaných systémů inverzních kyvadel. Experiment zároveň ukazuje vliv umělého šumu, který je přiveden jako porucha do modelu.

3. AUTOMATICKÉ GENEROVÁNÍ KÓDU

B&R Automation Studio Target for Simulink je nástroj pro automatické generování kódu z Matlab/Simulink do programovatelných automatů společnosti B&R, který velmi urychluje a usnadňuje návrh regulačních algoritmů pro PLC. Nástroj umožňuje automaticky převádět modelová schémata vytvořená v Simulinku do zdrojového kódu v programovacím jazyce ANSI C, který je spustitelný v programovatelných automatech B&R.

Modelování a simulace často složitých nelineárních systémů a návrh jejich řízení je v prostředí Matlab/Simulink relativně snadné. Naopak bylo by velmi pracné ručně programovat chování takových nelineárních systémů v programovacích jazycích spustitelných v PLC. Proto je tento systém pro automatické generování kódu velmi užitečný. Model systému a jeho řízení lze snadno a rychle navrhnout pomocí Matlab/Simulinku, následně lze celý navržený systém automaticky přenést a verifikovat tak řízení na modelu v cílovém hardwaru a na závěr lze již bezpečně implementovat řízení na reálný systém. Použití automatického generování nám nejen ušetří čas a usnadní práci, ale také nám pomůže vyhnout se častým chybám při ručním programování řídicích algoritmů do PLC.

Tato kapitola stručně popisuje nástroj *B&R Automation Studio Target for Simulink* a ukazuje jeho použití k vytvoření modelu inverzního kyvadla a jeho řízení v PLC B&R. Je zde popsána metoda řešení spojitého modelu kyvadla v PLC, které pracuje pouze diskrétně a navíc cyklicky s pevnou periodou cyklu.

3.1 B&R AUTOMATION STUDIO TOOLBOX

B&R Automation Studio Toolbox je nástavbová knihovna funkcí pro program Simulink, která definuje vazbu mezi blokovým modelem systému v Simulinku a jeho obrazem v podobě zdrojového kódu v ANSI C spustitelného na PLC společnosti B&R.

Knihovna je tvořena čtyřmi funkčními bloky:

- B&R Config;
- B&R Input;
- B&R Output;
- B&R Parameter.

Jednotlivé bloky se vkládají do simulačního schématu a slouží k nastavení modelu, definici vstupních a výstupních proměnných a parametrů [14].

3.1.1 Blok B&R Config

Tento blok se používá k přepínání mezi režimem simulace, který umožňuje simulovat model s vlastním nastavením všech běžných parametrů simulace a režimem generování kódu, při kterém jsou automaticky provedena nastavení potřebná ke generování kódu z modelu. Tento blok je pro použití automatického generování povinný a může být do schématu vložen jen jednou.

3.1.2 Blok B&R Input

Blok slouží k definici vstupních proměnných. V cílovém projektu v Automation Studiu je po spuštění generování kódu vytvořena jedna proměnná pro každý blok B&R Input. Ve vlastnostech bloku lze definovat jméno výsledné proměnné, datový typ a počáteční hodnotu. Lze také specifikovat, zda bude proměnná polem a zda bude v cílovém projektu definována jako lokální nebo globální.

3.1.3 Blok B&R Output

Slouží k definici výstupních proměnných. Jinak je totožný s výše popsaným blokem B&R Input.

3.1.4 Blok B&R Parameter

Chceme-li v projektu zpřístupnit některé proměnné parametry vnitřních bloků simulačního schématu (např. zesílení K bloku Gain), použijeme blok B&R Parameter. Pro každý takový blok je v Automation Studiu vytvořena proměnná, která má jméno definované ve vlastnostech bloku. Toto jméno musí být

stejně, jako jméno parametru ve schématu, který chceme tímto způsobem měnit. Další vlastnosti definujeme stejným způsobem jako u bloků B&R Input a B&R Output.

3.2 MODEL INVERZNÍHO KYVADLA A REGULÁTOR S BLOKY B&R TOOLBOXU

Simulační schémata modelu inverzního kyvadla (příloha A.1) a LQ regulátoru (příloha A.2) jsou vhodně doplněna o výše zmíněné bloky, které posléze umožní propojit, sledovat a ovládat výsledný model kyvadla a regulátor běžící v PLC. Bloky přidávané do modelového schématu inverzního kyvadla shrnuje Tabulka 3.1. Bloky přidávané do modelového schématu regulátoru shrnuje Tabulka 3.2.

Typ bloku	Název proměnné	Datový typ	Počáteční hodnota	Význam
Config	—	—	—	Povinný konfigurační blok
Input	akcni_zasahIN	REAL	0	Vstup akčního zásahu z regulátoru
	porIN	REAL	0	Vstup pro působení poruch
	resetIN	BOOL	FALSE	Inicializace kyvadla do výchozí polohy
Output	xOUT	REAL	0	Poloha vozíku
	vOUT	REAL	0	Rychlost vozíku
	aOUT	REAL	0	Zrychlení vozíku
	phiOUT	REAL	0	Úhel natočení ramene kyvadla
Output	omegaOUT	REAL	0	Úhlová rychlost ramene kyvadla
	krajOUT	BOOL	FALSE	Indikace nárazu vozíku na okraj pojezdu
Parameter	l	LREAL	0,25	Polovina délky ramene kyvadla
	mI	LREAL	5	Hmotnost vozíku

Parameter	m2	LREAL	0,5	Hmotnost ramene kyvadla
	necitlivost	LREAL	0	Rozsah necitlivosti motoru na nízká napětí

Tabulka 3.1: Bloky B&R v modelovém schématu kyvadla

Typ bloku	Název Proměnné	Datový typ	Počáteční hodnota	Význam
Config	—	—	—	Povinný konfigurační blok
Input	zadana_hodnota	REAL	0	Žádaná poloha vozíku
	xIN	REAL	0	Poloha vozíku
	vIN	REAL	0	Rychlost vozíku
	aIN	REAL	0	Zrychlení vozíku
	phiIN	REAL	0	Úhel natočení ramene kyvadla
	omegaIN	REAL	0	Úhlová rychlost ramene kyvadla
	krajIN	BOOL	FALSE	Indikace nárazu vozíku na okraj pojezdu
	regOFF	BOOL	FALSE	Manuální vypnutí regulátoru
Output	akcni_zasahOUT	REAL	0	Akční zásah regulátoru

Tabulka 3.2: Bloky B&R v modelovém schématu regulátoru

3.3 ŘEŠENÍ SPOJITÉHO MODELU KYVADLA V PLC

Spojité dynamické systémy jsou nejčastěji popsány soustavou diferenciálních rovnic. Soustava nelineárních stavových rovnic inverzního kyvadla (1.22) je typickým příkladem takového systému. Analytické řešení nelineárních diferenciálních rovnic je často velmi složité, někdy dokonce nemožné. Proto se používá výpočetní techniky, která řeší diferenciální rovnice výhradně numerickými metodami. Tato část práce stručně popisuje metody numerického řešení obyčejných diferenciálních rovnic (ordinary differential equations – ODE) používané programem

Matlab/Simulink pro časovou simulaci chování podobných spojitých systémů a dále řešení použité pro simulaci systému inverzního kyvadla v PLC.

3.3.1 Numerické řešení obyčejných diferenciálních rovnic

Obyčejné diferenciální rovnice vyšších řádů lze vždy převést na soustavu ODE prvního řádu, které nazýváme stavové rovnice. ODE prvního řádu je obecně definována takto [4], [8]:

$$\dot{y}(t) = f(t, y(t)), \quad y(t_0) = y_0. \quad (3.1)$$

Numerické řešení takových rovnic probíhá v diskrétních časových krocích t_0, t_1, \dots . Výsledkem je posloupnost hodnot y_0, y_1, \dots , které aproximují skutečnou hodnotu v daném časovém okamžiku [8]:

$$y_n \approx y(t_n), \quad n = 0, 1, \dots \quad (3.2)$$

Velikost kroku obvykle značíme h :

$$h = t_{n+1} - t_n. \quad (3.3)$$

Metod pro numerické řešení ODE existuje celá řada a jejich detailní popis lze najít např. v [8]. Jednou z hlavních vlastností určujících typ metody je její řád. Metody se dají rozdělit na jednokrokové a vícekrokové a na metody s pevným či proměnným krokem [4].

3.3.2 Algoritmy pro řešení ODE v prostředí Matlab/Simulink

Matlab/Simulink rozděluje metody pro řešení ODE především na metody s pevným krokem a metody s proměnným krokem. Mezi metody s pevným krokem se řadí např. nejjednodušší Eulerova metoda prvního řádu, nebo také velmi oblíbená Runge-Kuttova metoda čtvrtého řádu. Metody s proměnným krokem jsou matematicky složitější, ale jsou schopny dosahovat větší přesnosti při nižší výpočetní náročnosti. Jejich princip spočívá ve změně velikosti kroku h na základě odhadu chyby výsledku předchozího kroku. K výpočtu chyby se většinou používá kombinace dvou metod různého řádu [8].

Pokud nemáme bližší představu o dynamice modelu, je vhodné používat metody s proměnným krokem, které automaticky zajistí dostatečně malý krok v místech, kde je to nezbytné. Z toho také vyplývá, že jejich použitím je možné dosáhnout velmi vysoké přesnosti při stále rozumné době výpočtu. U modelů obsahujících spojitě bloky je použití těchto metod preferováno.

3.3.3 B&R Automation Studio Target for Simulink a metody řešení ODE

Systém pro automatické generování kódu *B&R Automation Studio Target for Simulink* má určitá omezení týkající se rozsahu použitelných funkcí Simulinku. Například nelze v modelu určeném pro automatické generování kódu používat některé funkční bloky (blok *MATLAB Function*, *Level-2 M-file S-function*, ...). Největší omezení se ovšem týkají použitelnosti automatického generování kódu pro modely spojitých systémů. Podle [14] je sice možné používat ke generování kódu modely spojitých systémů, pro průmyslové aplikace to ale není doporučeno a spojitě bloky by měly být nahrazeny jejich diskrétním ekvivalentem.

Model inverzního kyvadla podle (1.22) je spojitý nelineární model. Je tedy otázkou, zda model diskretizovat, nebo vyzkoušet generování kódu ze spojitého modelu přesto, že není doporučeno. Vzhledem k tomu, že se nejedná o průmyslovou aplikaci a nehrozí žádná nebezpečí při případné chybě, ale právě naopak má tato práce výukový charakter a snahou je prověřit možnosti tohoto automatického generování kódu, je model kyvadla pro PLC generován ze spojitého modelu v Simulinku.

Při generování kódu ze spojitého modelu je nutné zvolit, která z metod numerického řešení ODE bude použita pro simulaci. Zde je právě největší rozdíl mezi simulací systému v Simulinku a v programovatelném automatu. Každý proces v PLC je volán cyklicky v ekvidistantních časových krocích. Z toho vyplývá, že při simulaci v PLC není možné použít pokročilé algoritmy Simulinku pro řešení ODE s proměnným krokem, ale pouze jednodušší metody s krokem pevným.

Pro automatické generování kódu z modelu inverzního kyvadla dle schématu v příloze A.1, byla zvolena metoda Runge-Kutta čtvrtého řádu, která je jednou z nejproslulejších metod a která je definována takto [4]:

$$\begin{aligned}y_{n+1} &= y_n + \frac{1}{6}h(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \\k_1 &= f(x_n, y_n), \\k_2 &= f(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hk_1) \\k_3 &= f(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hk_2), \\k_4 &= f(x_n + h, y_n + hk_3).\end{aligned}\tag{3.4}$$

Krok metody byl vzhledem k malé časové konstantě motoru zvolen $h = 0,001$ s. Srovnáním odezvy systému při použití této metody s odezvou systému použitím některé z metod s proměnným krokem s minimální nastavitelnou tolerancí chyby bylo zjištěno, že časové průběhy pro všechny stavové veličiny jsou téměř totožné.

Po spuštění automatického generování vznikne v cílovém projektu Automation Studia nový program v jazyce ANSI C. Tento program je již uzpůsoben tak, aby mohl být spuštěn na procesoru PLC B&R. Je zřejmé, že aby program fungoval správně, je nutné jej přiřadit do cyklické třídy, která má periodu cyklu shodnou s velikostí kroku h zvolenou při generování. Při podrobnějším studiu výsledného programu lze nalézt funkce shodné s funkcemi jednotlivých bloků modelu v Simulinku.

4. REALIZACE SYSTÉMU V PLC

Společnost Bernecker+Rainer Industrie-Elektronik vznikla v roce 1979 a postupem času se stala velmi významným hráčem na trhu automatizační techniky. Jejich produkty dosahují vysoké kvality a flexibility. Programovatelné automaty (PLC) dosahují v dnešní době mnohem větších výkonů, než v dobách jejich největšího rozmachu. Ani programovatelné automaty společnosti B&R nejsou výjimkou. Podporují velkou škálu průmyslových komunikačních systémů a mohou být obsazeny velkým počtem periferií. Poměrně velkou předností programovatelných automatů společnosti B&R je možnost jejich programování v jednom z nejrozšířenějších programovacích jazyků vůbec – ANSI C. Tím lze dosáhnout prakticky neomezených možností v použití a lze do nich naprogramovat jakékoliv pokročilé řídicí algoritmy. Možnost programování těchto PLC v jazyce ANSI C je také jedním z předpokladů pro podporu automatického generování kódu do těchto automatů.

4.1 POUŽITÁ PLC

Proces je realizován ve dvou programovatelných automatech B&R, které jsou vzájemně propojeny průmyslovou sběrnici Ethernet Powerlink. V jednom PLC běží nelineární model inverzního kyvadla, ve druhém LQ regulátor, který kyvadlo stabilizuje v inverzní poloze. Každé PLC je vybaveno vlastní vizualizací. Typ použitých PLC a jejich základní vlastnosti shrnuje Tabulka 4.1.

	PLC s modelem kyvadla	PLC s regulátorem
Typ	4PP481.1043-75	X20CP1485-1
CPU	Geode LX800 500Mhz	Celeron 400
RAM	128 MB	32 MB
Obrazovka	Vestavěná – VGA	Vzdáleně: SG4 terminal – 4PP320.1043-31

Tabulka 4.1: Vlastnosti použitých PLC

4.2 B&R AUTOMATION STUDIO

B&R Automation Studio je komplexní vývojové prostředí, které obsahuje nástroje pro programování všech cílových systémů společnosti B&R. Slouží k tvorbě aplikačních programů pro řízení, regulaci, vizualizaci a komunikaci od jednoduchých strojů až po složité procesy.

V Automation Studiu byl vytvořen jeden výsledný projekt, který obsahuje dvě hardwarové konfigurace. Konfigurace **DA15** je konfigurace PLC s modelem kyvadla, konfigurace **DA10** je konfigurace PLC s LQ regulátorem. Softwarová část projektu obsahuje tyto hlavní prvky:

- Programy **LQ** a **model**, obsahující automaticky generované zdrojové soubory v ANSI C.
- Program **Animace** pro vizualizaci vozíku s kyvadlem pomocí knihovny **VISAPI** a program **regulace**, který slouží pouze k nutné definici některých proměnných použitých ve vizualizaci regulátoru.
- Vizualizace **VisReg** pro regulátor a **VisKyv** pro kyvadlo.

Celý projekt lze najít na přiloženém CD, viz příloha C.

4.3 ETHERNET POWERLINK

Standard Ethernet Powerlink (EPL) patří v současné době mezi nejrozšířenější standardy průmyslového Ethernetu. Existují dvě verze EPL a to Powerlink V1 a Powerlink V2. Novější verze V2 rozšiřuje starší verzi zejména o aplikační vrstvu, jinak jsou až na výjimky velmi podobné. Vzhledem k tomu, že první verze EPL byla vyvinuta společností B&R, je EPL v jejich zařízeních plně podporován. Všechny informace v následujícím textu se vztahují k novější verzi V2.

4.3.1 Základní vlastnosti EPL

EPL je svými vlastnostmi univerzálním a velmi rychlým real-time (RT) protokolem. K jeho použití není potřeba žádný speciální hardware, protože EPL se pevně drží standardu IEEE 802.3. Lze použít jakékoliv zařízení, které je určené pro

klasický Ethernet. Problém determinismu je v protokolu EPL řešen čistě softwarovou cestou, přesto má výtečné RT vlastnosti [3]:

- Nejkratší doba cyklu 200 μ s.
- Nejistota synchronizace (jitter) menší než 1 μ s
- Determinismus třídy 4 dle IAONA

Tyto vlastnosti ho předurčují k použití v oblasti řízení strojů.

Pro EPL je možné použít jakoukoliv topologii sítě. Lze použít topologii typu hvězda, nebo strom, včetně jejich kombinací. Velkou výhodou je podpora tzv. „Plug and Play“, které umožňuje připojovat i odpojovat zařízení kdykoliv za běhu systému bez nutnosti vypnutí systému nebo ohrožení funkcí reálného času ostatních uzlů.

Sít' EPL lze snadno začlenit do jakékoli jiné Ethernetové sítě, včetně internetu. Spojení s veškerými ostatními non-RT sítěmi se uskutečňuje prostřednictvím EPL směrovačů, které striktně oddělují RT části sítě od těch non-RT. Tyto brány se chovají jako podřízené uzly sítě EPL a vnější non-RT komunikaci propouštějí jen v asynchronní části RT cyklu (viz následující část 4.3.2). Pro zvýšenou bezpečnost také slouží jako účinný firewall a implementují mechanismus NAT (Network Address Translation) překladu veřejných IP adres na lokální, které nejsou viditelné z vnějších sítí [3].

4.3.2 Princip real-time komunikace

EPL používá princip s názvem Slot Communication Network Management (SCNM), který zaručuje bezkolizní výměnu dat po síti. Synchronizace je řešena rozdělením rolí jednotlivých uzlů sítě. Jednomu z uzlů je přiřazena role arbitra sítě, tzv. Managing Node (MN), a ten řídí veškeré dění na síti. Ostatní uzly se potom nazývají řízené uzly, tzv. Controlled Node (CN). Některá specifická zařízení mohou sloužit pouze jako CN, u ostatních je většinou možné jejich roli nastavit. Tento způsob komunikace se nazývá master–slave, která se běžně používá i v jiných průmyslových a komunikačních sítích [16].

Přenos dat se uskutečňuje v přenosových cyklech. Jednotlivé cykly jsou rozděleny na část pro izochronní data a část pro asynchronní data. Během izochronní části cyklu jsou všechny CN postupně vyzvány arbitrem sítě MN ke komunikaci. Determinismus je zaručen tak, že CN nesmí vysílat, aniž by byl nejprve vyzván arbitrem MN, který může být v síti jen jeden. Během asynchronní fáze cyklu komunikuje pouze jeden uzel, který je určen na začátku asynchronní fáze arbitrem na základě jistých priorit [2], [3].

4.3.3 Komunikace modelu kyvadla a regulátoru

V Automation Studiu lze komunikaci dvou PLC přes Ethernet Powerlink nastavit poměrně snadno. Celý problém spočívá v definování jistých „virtuálních“ vstupně-výstupních kanálů v konfiguraci EPL a přiřazení proměnných (mapování) jednotlivých procesů k těmto kanálům. V podstatě se jedná o obdobu mapování proměnných do běžných vstupní či výstupních karet s tím rozdílem, že kanály jsou totožné v obou vzájemně propojených PLC. Ke konfiguraci komunikace přes EPL je nutné mít hardwarové konfigurace obou použitých PLC v jednom projektu. Detailní popis s návodem, jak nakonfigurovat celý systém lze najít v [2].

Pro soustavu inverzního kyvadla a regulátoru byla komunikace přes EPL nastavena následovně:

- PLC s regulátorem je MN.
- PLC s modelem kyvadla je CN.
- Perioda cyklu je 10 ms (s touto periodou pracuje také regulátor).

Seznam vytvořených komunikačních kanálů udává Tabulka 4.2.

Název kanálu	Datový typ	Význam
CNx	REAL	Poloha vozíku
CNv	REAL	Rychlost vozíku
CNa	REAL	Zrychlení vozíku
CNphi	REAL	Úhel natočení ramene
CNomega	REAL	Úhlová rychlost ramene

CNakcni_zasah	REAL	Akční zásah regulátoru
CNkraj	BOOL	Indikace nárazu vozíku na okraj pojezdu

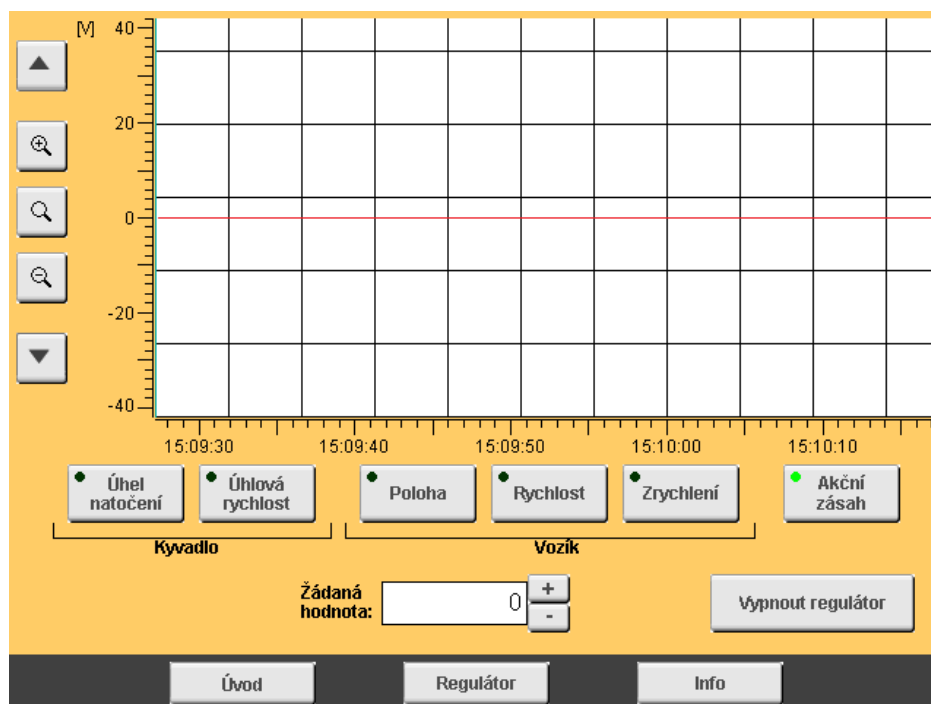
Tabulka 4.2: Seznam kanálů pro komunikaci přes EPL

4.4 VIZUALIZACE

Aby bylo možné ovládat a sledovat chování modelu inverzního kyvadla s LQ regulátorem, byly vytvořeny dvě vizualizace, jedna pro PLC s modelem inverzního kyvadla a jedna pro PLC s regulátorem.

4.4.1 Vizualizace regulátoru

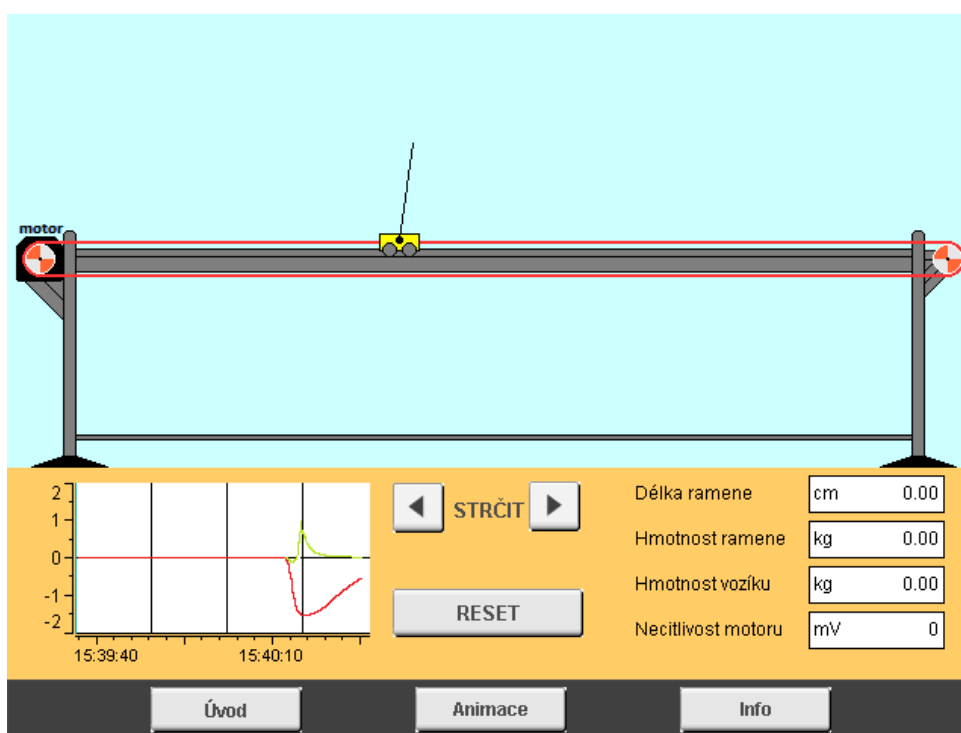
Vizualizace na PLC s regulátorem slouží zejména k zobrazování průběhů stavových veličin modelu kyvadla a akčního zásahu regulátoru. K tomu bylo vytvořeno prostředí, kde lze mezi jednotlivými grafy přepínat a částečně ovládat jejich zobrazení pomocí tlačítek na levé straně grafu. Mimo sledování grafů lze zadávat žádanou hodnotu polohy vozíku v rozsahu -2 až 2 m a případně lze manuálně vypínat a zapínat regulátor. Hlavní stránka vizualizace je na Obrázek 4.1.



Obrázek 4.1: Vizualizace regulátoru

4.4.2 Vizualizace modelu inverzního kyvadla

Vizualizace na PLC s modelem inverzního kyvadla slouží ke sledování modelu a k interakci uživatele s modelem. Snahou bylo, aby se vizualizace tvářila jako určitá „virtuální realita“ a její ovládání i sledování bylo víceméně stejné, jako kdybychom měli reálný fyzikální model kyvadla. Hlavní stránka vizualizace je na Obrázek 4.2.



Obrázek 4.2: Vizualizace modelu inverzního kyvadla

Spodní část obrazovky slouží k interakci uživatele s modelem a k nastavování parametrů modelu. Tlačítka „STRČIT“ slouží k simulaci postrčení ramene kyvadla na jednu nebo na druhou stranu. Jinak řečeno jejich stisknutím udělíme kyvadlu úhlové zrychlení v naznačeném směru. Tlačítko reset slouží k nastavení kyvadla zpět do počátečního stavu $x = 0$, $\varphi = 0$ (vozík uprostřed, kyvadlo ve svislé inverzní poloze).

Nutno poznamenat, že parametry regulátoru, který běží na druhém PLC nelze měnit a regulátor pracuje spolehlivě jen pro model s parametry dle Tabulka 2.1. Při

změně parametrů modelu, zejména délky ramene kyvadla, nemusí být regulátor schopen udržet kyvadlo v inverzní poloze.

Horní část obrazovky slouží k animaci vozíku s kyvadlem. Tato animace dynamicky zobrazuje polohu vozíku a natočení ramene kyvadla v čase podle stavových veličin modelu, který běží v tomto PLC. Pomocí editoru vizualizací v Automation Studiu by nebylo možné takovou animaci vytvořit. Animace je vytvořena pomocí knihovny funkcí **visapi.h**. Použití této knihovny stručně popisuje následující kapitola.

4.4.3 VISAPI

Knihovna **visapi.h** slouží k ovládání vizualizace programově. Její funkce umožňují komunikovat s běžící vizualizační aplikací. Tyto funkce umožňují získávat informace o běžící vizualizaci, ale také umožňují programově vykreslovat některé jednodušší tvary a prvky.

Program **Animace** slouží k animování jednoduchého vozíku s kyvadlem. K vykreslení vozíku jsou použity funkce pro kreslení obdélníku, elipsy a čáry. Detailní popis funkcí lze nalézt v [2]. Pro správné vykreslení ramene kyvadla program využívá výpočet souřadnic ze stavových veličin modelu pomocí goniometrických funkcí. Mimo to se ve výpočtu vyskytuje funkce **int roundint(double x)**, která byla definována za účelem prostého zaokrouhlování. Ukázalo se, že překladač zřejmě používá knihovnu **math.h** v té nejzákladnější podobě, která neobsahuje zaokrouhlovací funkci **round()**.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvořit emulaci technologického procesu pomocí dvou PLC propojených sběrnicí Ethernet Powerlink. Model technologického procesu, který měl být předmětem emulace, nebyl v zadání specifikován. Jako zmíněný proces byl tedy zvolen systém inverzního kyvadla.

Pomocí Lagrangeových rovnic druhého druhu byly odvozeny obecné pohybové rovnice lineárně se pohybujícího vozíku s kyvadlem. Tento systém byl následně doplněn o model reálného stejnosměrného motoru tak, aby vstupem do systému bylo napětí na vstupu motoru a model celkově více odpovídal technologickému procesu. Výsledný matematický popis byl vyjádřen ve formě nelineárních stavových rovnic. Matematický model v podobě stavových rovnic byl poté převeden do blokového schématu v prostředí Matlab/Simulink a byl doplněn o další upřesňující prvky.

Vzhledem k obtížné realizaci řízení tohoto modelu pomocí klasických regulátorů typu PID, které by byly schopné stabilizovat kyvadlo v inverzní poloze a zároveň regulovat na žádanou polohu vozíku, byl k řízení inverzního kyvadla vybrán stavový LQ regulátor. Použití stavového regulátoru je v tomto případě výhodné, protože model inverzního kyvadla je popsán stavovými rovnicemi a lze přímo měřit všechny stavy tohoto systému. Aby byl regulátor schopen regulace s nulovou ustálenou odchylkou, byl doplněn o sumátor regulační odchylky. Regulátor byl navržen jako diskrétní s využitím funkcí Matlabu. Výsledný regulátor je poměrně robustní a dokáže stabilizovat kyvadlo i při poměrně velké počáteční výchylce kyvadla.

Pomocí knihovny pro automatické generování kódu byl model a regulátor převeden ze Simulinku do zdrojového kódu v jazyce ANSI C, který je spustitelný v programovatelných automatech B&R. Při převodu byly ověřeny vlastnosti numerických metod, kterými je v cílovém hardwaru řešen spojitý model inverzního kyvadla.

Na závěr byl celý systém realizován ve dvou programovatelných automatech B&R, které si vyměňují procesní proměnné s využitím průmyslové sběrnice Ethernet Powerlink. Pro ovládání a sledování celého systému byly vytvořeny dvě vizualizace pro PLC s modelem i PLC s regulátorem. Přes počáteční neúspěchy s knihovnou VISAPI se nakonec podařilo vytvořit poměrně působivou animaci, která dynamicky zobrazuje pohyb inverzního kyvadla.

SEZNAM LITERATURY

- [1] BLAHA, P. VAVŘÍN, P. *Řízení a regulace I: Základy regulace lineárních systémů – spojité a diskrétní*. Brno: VUT, 2009. 212 s.
- [2] *B&R Automation Studio Software Help*. Ver. 3.0.71.10. Eggelsberg: Bernecker+Rainer Industrie-Elektronik GmbH, 2008.
- [3] EPSG Draft Standard 301. *Ethernet POWERLINK: Communication Profile Specification* [online]. Version 1.1.0. Berlín, Ethernet POWERLINK Standardisation Group, 2008. Dostupné z <http://www.ethernet-powerlink.org/> 349 s.
- [4] FAJMON, B. – RŮŽIČKOVÁ, I. *Matematika 3*. Brno: VUT, 2005. 257 s.
- [5] HALLIDAY, D. – RESNICK, R. – WALKER, J. *Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. 1278 s. ISBN 80-214-1869-9.
- [6] HAVLENA, V. – ŠTECHA, J. *Moderní teorie řízení* [online]. Praha: ČVUT, 1999 [cit. 2010-5-26]. Dostupné z http://dce.felk.cvut.cz/mtr/cv/skripta/mtr_old.pdf. 304 s.
- [7] MODRLÁK, O. *Teorie automatického řízení II: Základy analýzy a syntézy ve stavovém prostoru* [online]. Liberec, 2004 [cit. 2010-5-25]. Dostupné z http://www.fm.vslib.cz/krtsub/fm/modrlak/pdf/tar2_zas.pdf. 83 s.
- [8] MOLER, C. *Numerical Computing with MATLAB* [online]. Natick: The MathWorks, Inc., 2004 [cit. 2010-29-5]. Chapter 7, Ordinary Differential Equations. Dostupné z <http://www.mathworks.com/moler/odes.pdf>. 53 s.
- [9] NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: MONTANEX, a.s., 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.
- [10] *RE 35* [online]. 2009. Dostupné z http://shop.maxonmotor.com/maxon/assets_external/Katalog_neu/eshop/Downloads/Katalog_PDF/maxon_dc_motor/RE-programm/new/newpdf_09/RE-35-273752_09_EN_081.pdf.
- [11] ROUBAL, J. – HUŠEK, P. *Základy regulační techniky v příkladech* [online]. Poslední revize 2009-6-25 [cit. 2010-15-4]. Dostupné z <http://support.dce.felk.cvut.cz/pub/roubalj/>. 382 s.

- [12] SKALICKÝ, J. *Elektrické servopohony*. Brno: VUT, 2001. 84 s.
- [13] ŠOLC, F. – VÁCLAVEK, P. *Modelování a Simulace*. Brno: VUT, 2009. 171 s.
- [14] *TM140 – B&R Automation Studio Target for Simulink*. Eggelsberg: Bernecker+Rainer Industrie-Elektronik GmbH, 2008.
- [15] TUREK, M. *Stavové řízení* [online]. Brno: VUT, 2007 [cit. 2010-5-25].
Dostupné z http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a4-716/vyuka/rir/pdf/stavove_rizeni.pdf. 15 s.
- [16] ZEZULKA, F. – HYNČICA, O. Průmyslový Ethernet VIII: Ethernet Powerlink, Profinet. *Automa*. 2008, č. 5, s. 62-64.2

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a	Zrychlení vozíku
$B\&R$	Bernecker+Rainer Industrie-Elektronik GmbH
B	Tlumení zátěže motoru
B_V	Koeficient viskózního tření vozíku
CN	Controlled Node
δ_K	Koeficient útlumu kyvadla
E_K	Kinetická energie
E_P	Potenciální energie
EPL	Ethernet Powerlink
φ	Úhel natočení ramene kyvadla
F	Vnější síla působící na vozík
g	Tíhové zrychlení
h	Velikost kroku metody řešení ODE
i	Proud motorem
J	Moment setrvačnosti ramene kyvadla vzhledem k ose otáčení v těžišti
J^*	Moment setrvačnosti ramene kyvadla vzhledem k ose otáčení na konci
J_c	Celkový moment setrvačnosti na hřídeli motoru
J_m	Moment setrvačnosti hřídele motoru
k	Konstanta motoru
k_m	Momentová konstanta motoru
k_u	Napět'ová konstanta motoru
l	Vzdálenost těžiště kyvadla od místa závěsu (polovina délky kyvadla)
L	Indukčnost vinutí motoru
L_a	Lagrangeova funkce
LQR	Linear-Quadratic Regulator
M	Moment motoru
m_1	Hmotnost vozíku
m_2	Hmotnost ramene kyvadla
MN	Managing Node

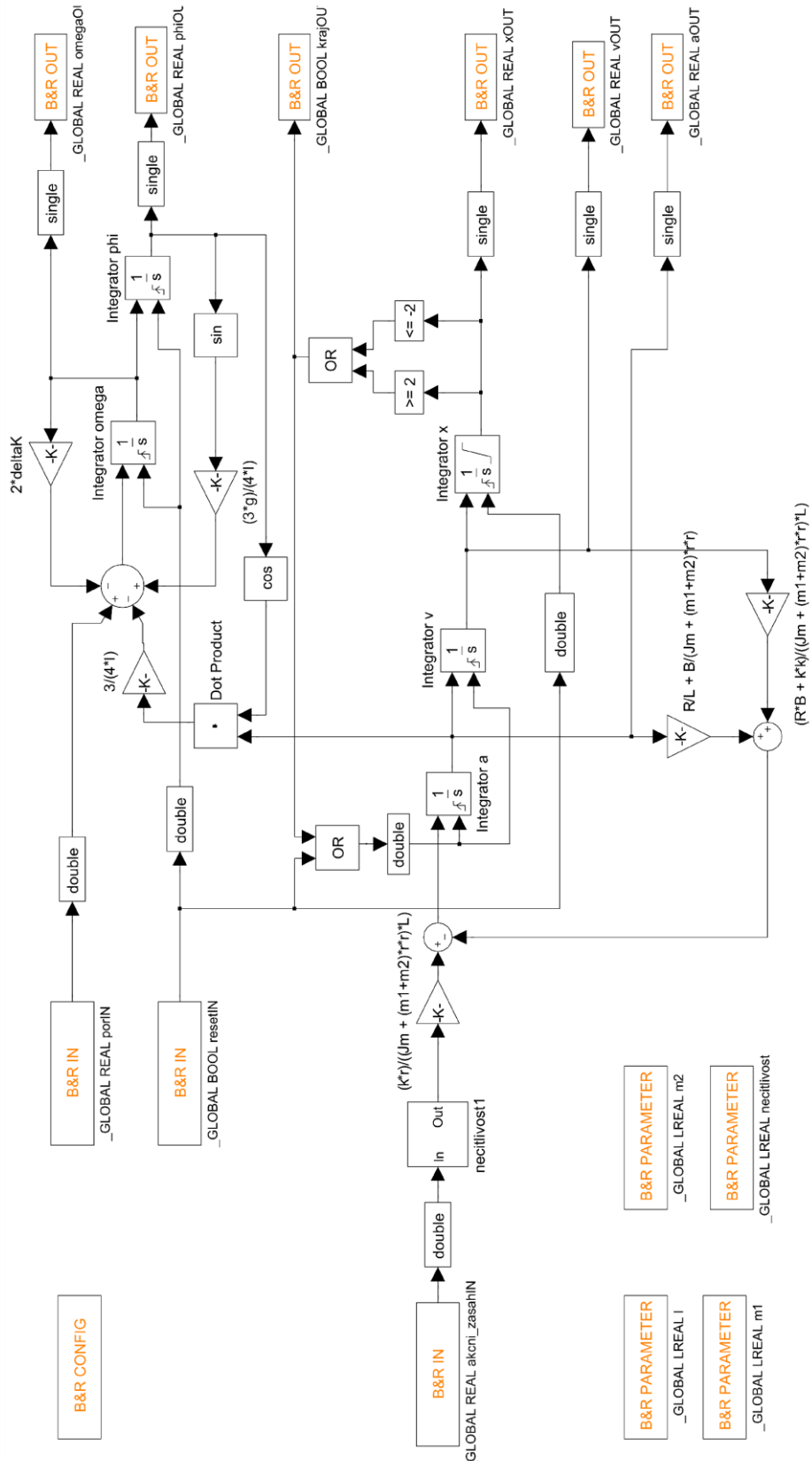
<i>NAT</i>	Network Address Translation
<i>ODE</i>	Ordinary Differential Equation
ω	Úhlová rychlost ramene kyvadla
ω_m	Úhlová rychlost hřídele motoru
<i>PLC</i>	Programmable Logic Controller
q_i	i -tá zobecněná souřadnice
Q_i	Zobecněná síla působící ve směru i -té zobecněné souřadnice
r	Poměr převodu mezi hřídelí motoru a posuvným mechanismem vozíku
R	Odpor vinutí motoru
R_K	Síla tlumící kmity kyvadla
<i>RT</i>	Real Time
<i>SCNM</i>	Slot Communication Network Management
T_S	Vzorkovací perioda regulátoru
u	Vstupní napětí motoru
v	Rychlost vozíku
u_e	Zpětné indukované napětí motoru
x	Poloha vozíku

SEZNAM PŘÍLOH

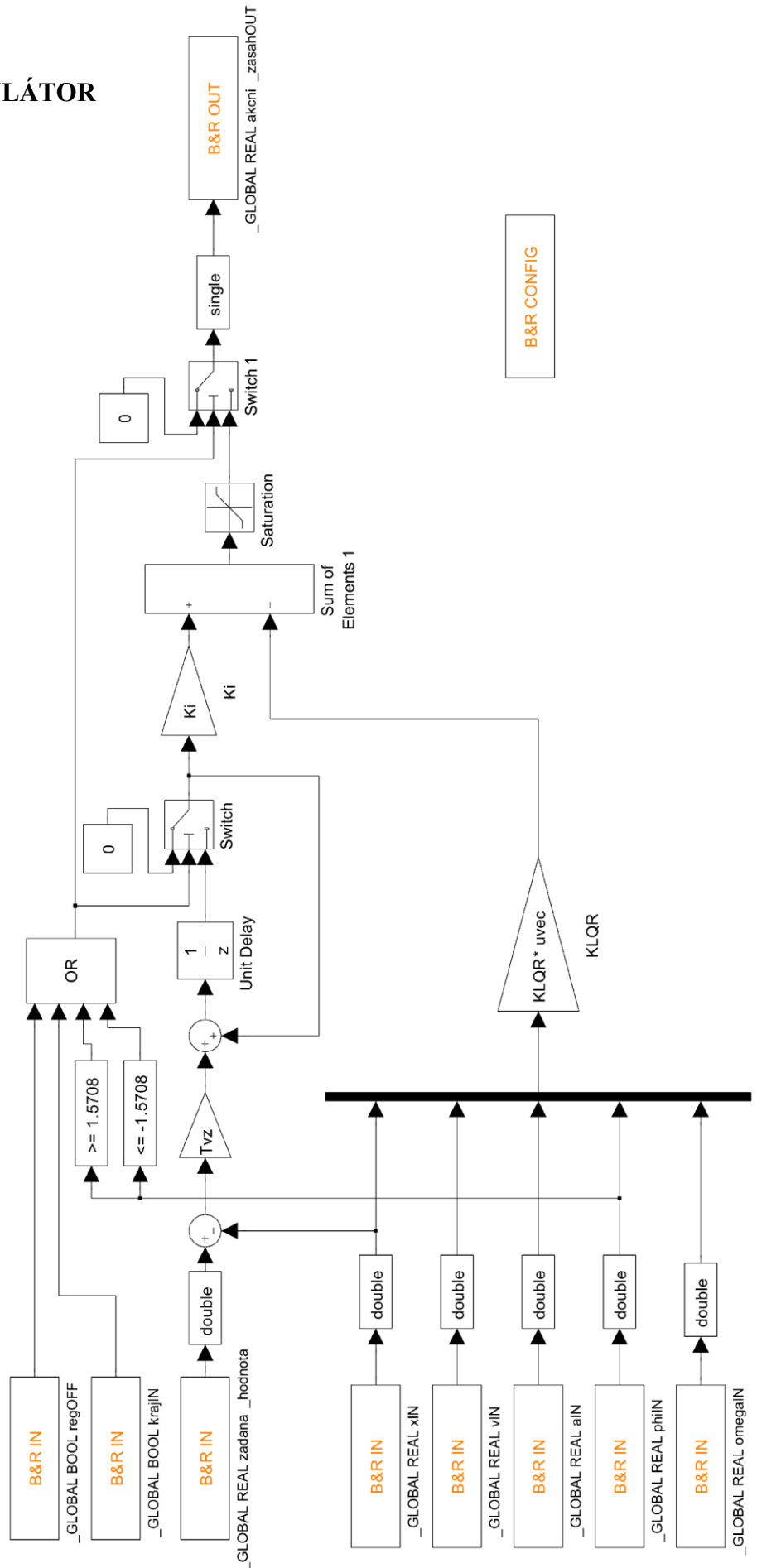
A BLOKOVÁ SCHÉMATA	51
A.1 Schéma modelu inverzního kyvadla	51
A.2 Regulátor	52
A.3 Model s regulátorem	53
B ODEZVY SYSTÉMU S RŮZNOU VOLBOU MATICE Q	54
B.1 Poloha vozíku	54
B.2 Úhel natočení ramene kyvadla	55
B.3 Akční zásah regulátoru	56
C TESTOVÁNÍ	57
D DISK CD-ROM	58

A BLOKOVÁ SCHÉMATA

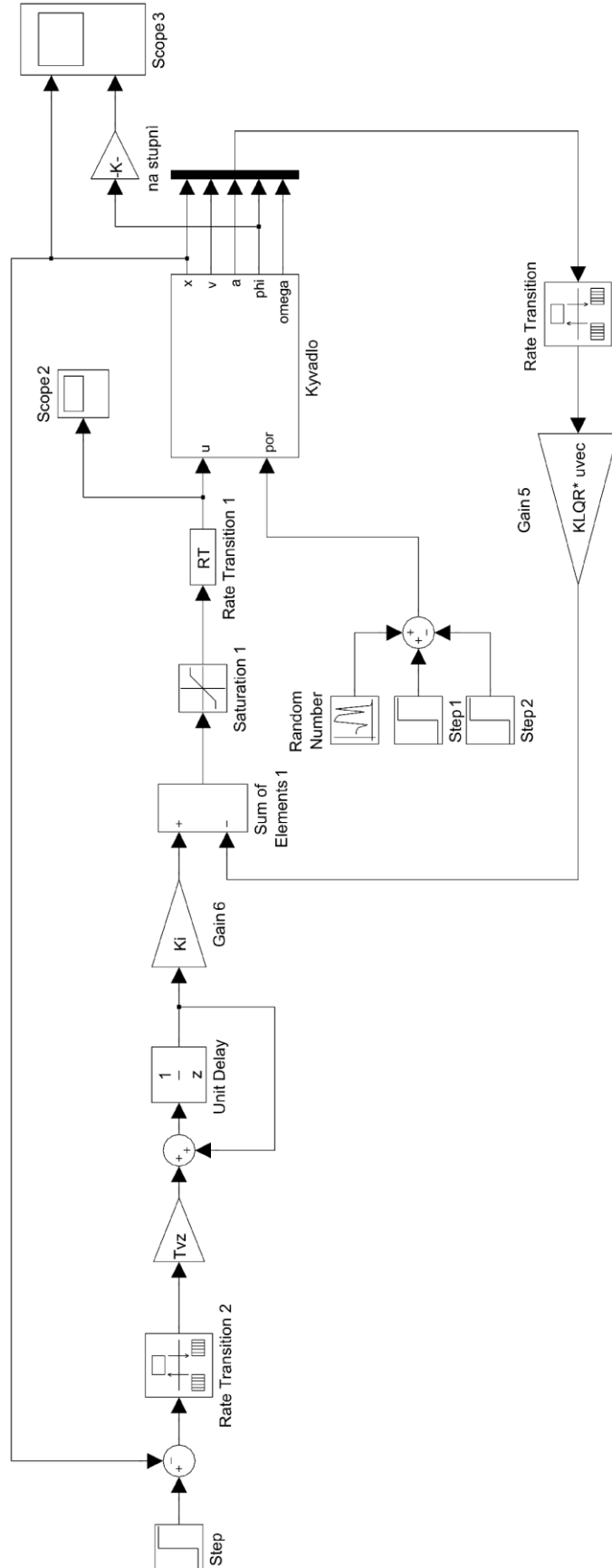
A.1 SCHÉMA MODELU INVERZNÍHO KYVADLA



A.2 REGULÁTOR

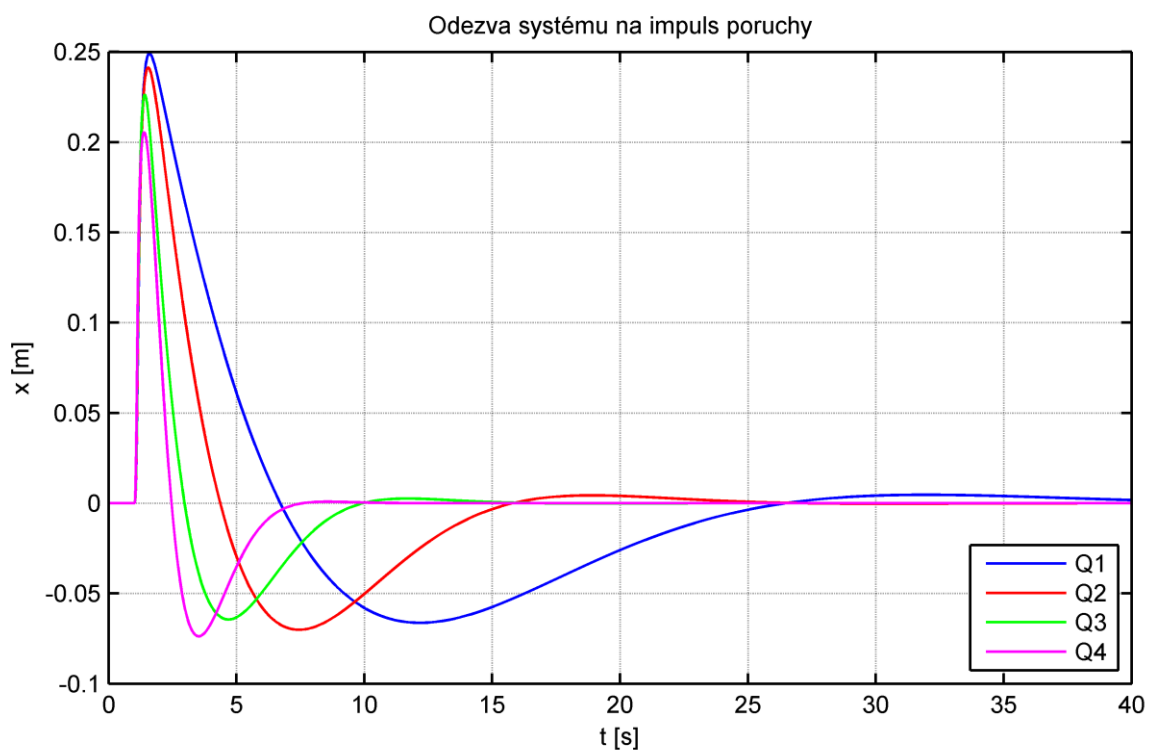
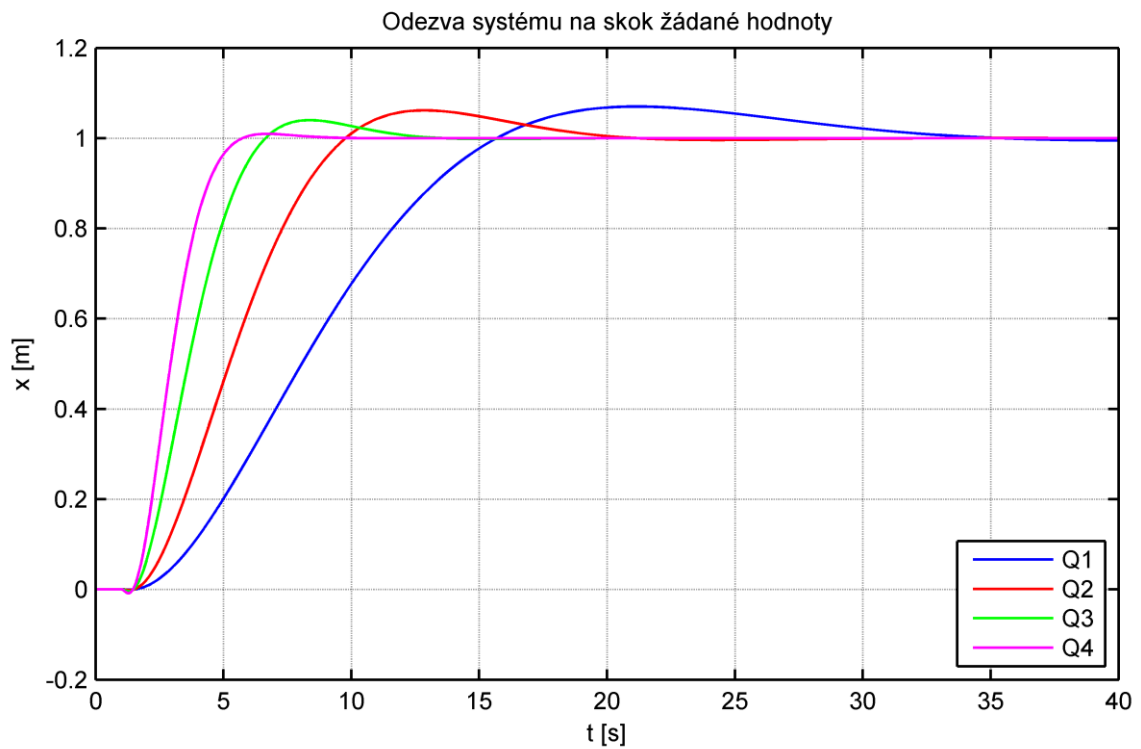


A.3 MODEL S REGULÁTOREM

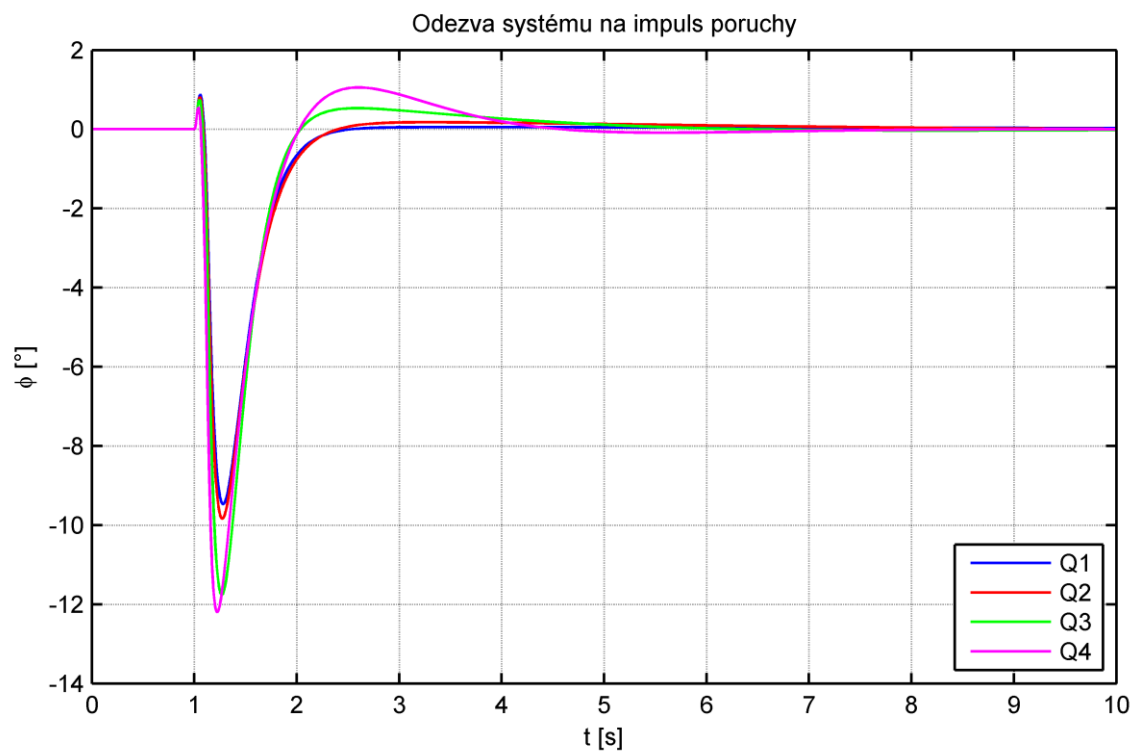
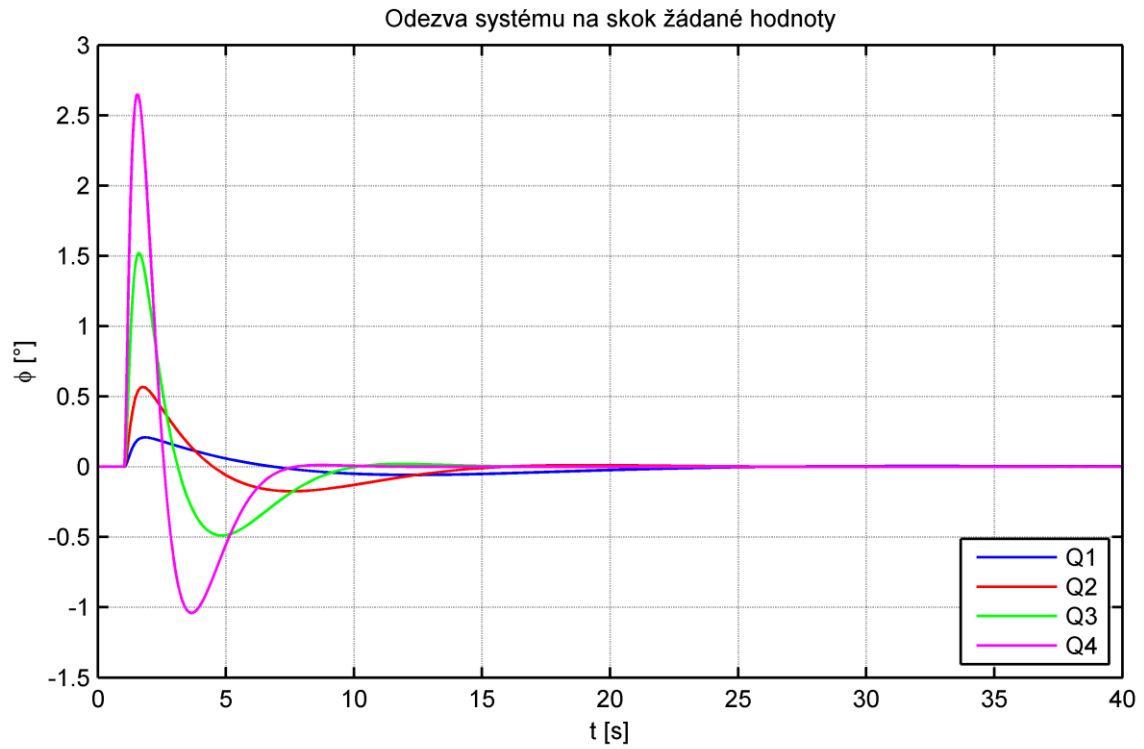


B ODEZVY SYSTÉMU S RŮZNOU VOLBOU MATICE Q

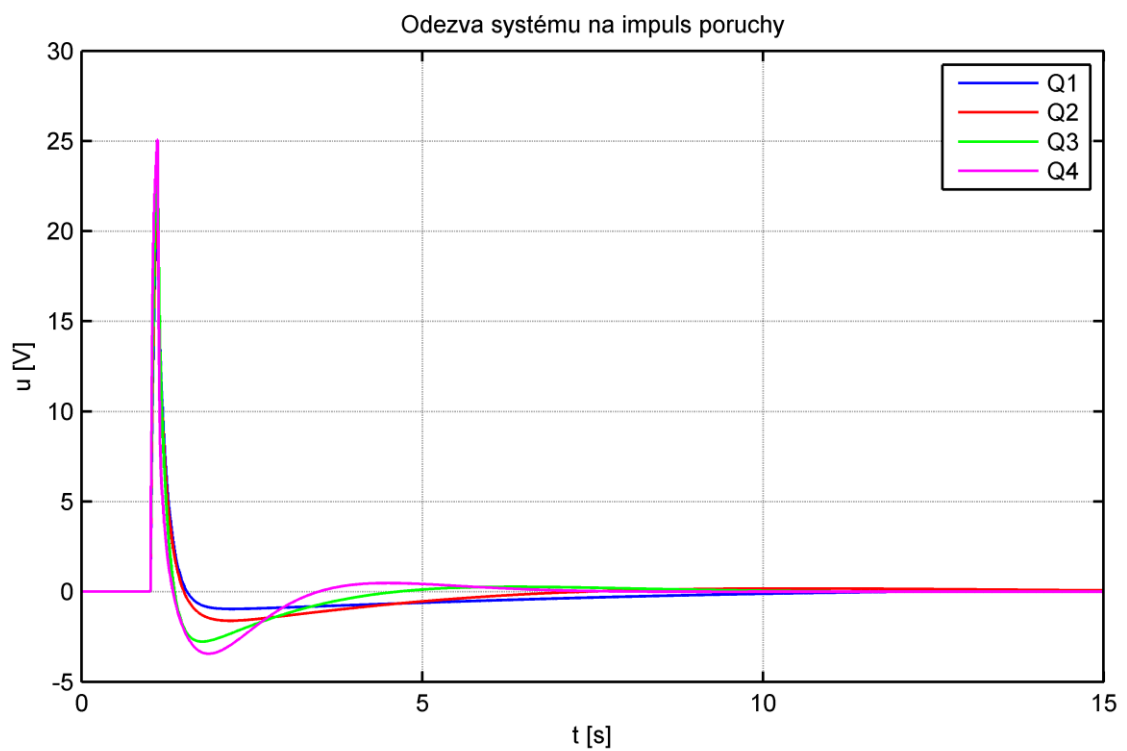
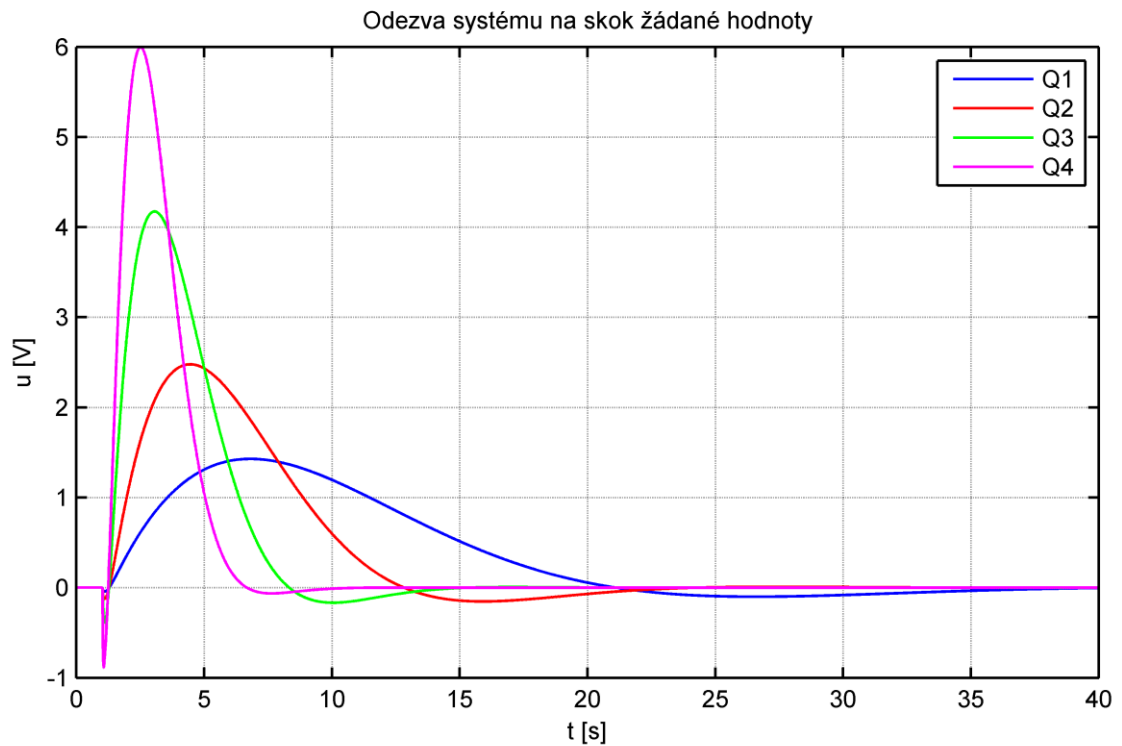
B.1 POLOHA VOZÍKU



B.2 ÚHEL NATOČENÍ RAMENE KYVADLA

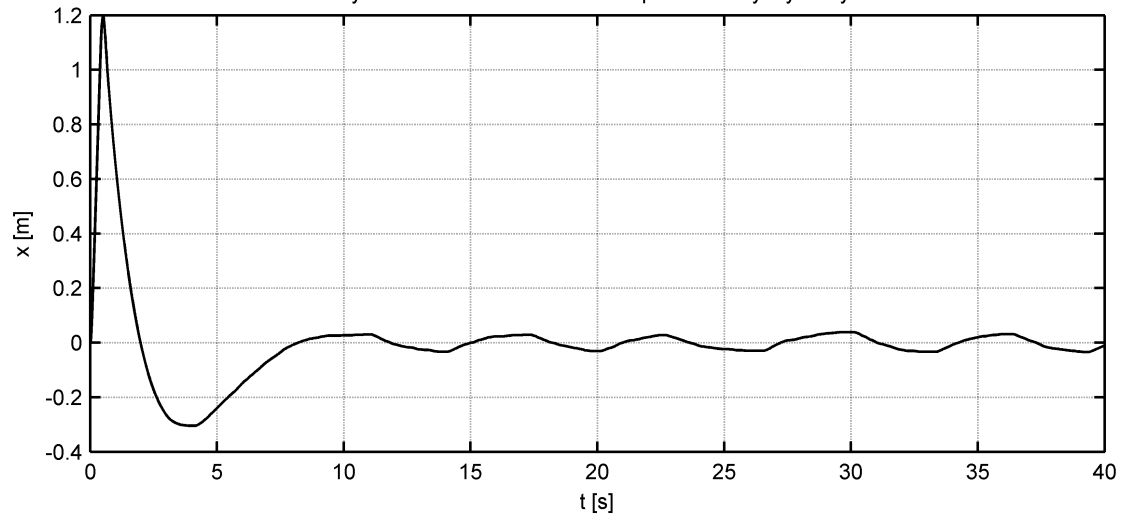


B.3 AKČNÍ ZÁSAH REGULÁTORU

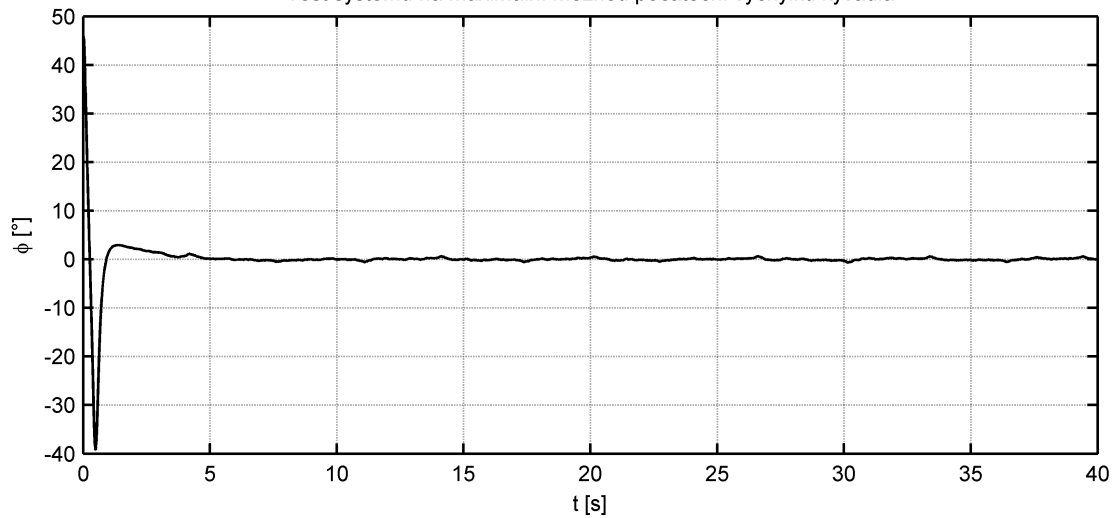


C TESTOVÁNÍ

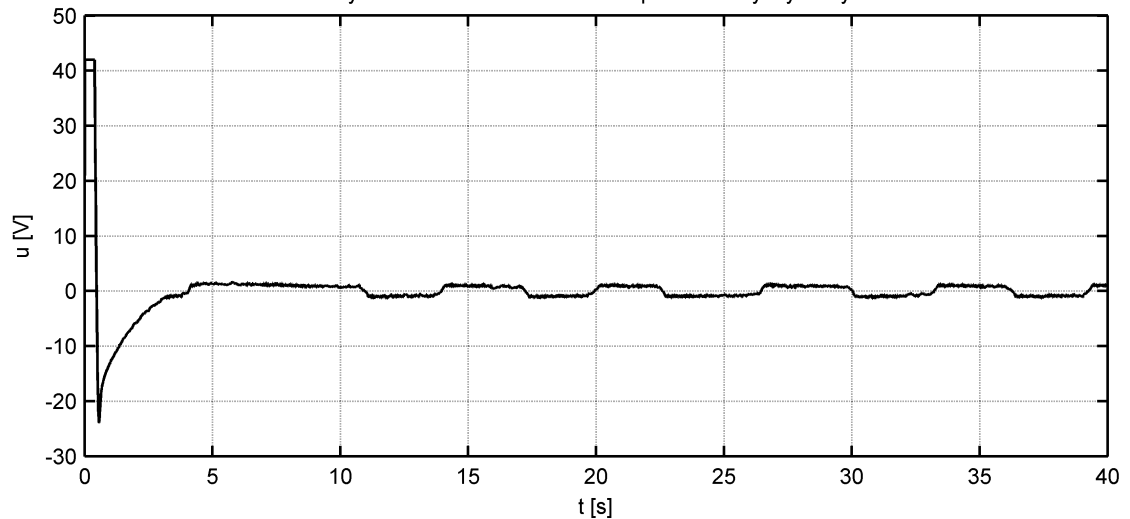
Test systému na maximální možnou počáteční výchylku kyvadla



Test systému na maximální možnou počáteční výchylku kyvadla



Test systému na maximální možnou počáteční výchylku kyvadla



D DISK CD-ROM

- Elektronická verze této práce
- Adresář „AS“ s výsledným projektem Automation Studia
- Adresář „Matlab“ s modely kyvadla a regulátoru v Simulinku a m-filem, který obsahuje definice konstant modelu a algoritmus pro návrh LQ regulátoru