ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Diplomová práce

Portálový jeřáb

Tomáš Lembacher

2009

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Tomáš Lembacher**

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

Název tématu: **Portálový jeřáb**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s modelem portálového jeřábu v K26.
2. Analyzujte současný stav modelu a ověřte jeho činnost.
3. Navrhněte možná vylepšení konstrukce modelu.
4. Analyzujte současný stav připojení modelu k PC popř. navrhněte a proveďte potřebné úpravy.
5. Proveďte základní sadu statických i dynamický měření.
6. Identifikujte parametry systému, vytvořte jeho model v prostředí Matlab-Simulink.
7. Dle možnosti vytvořte model s pomocí VR-toolboxu.
8. Navrhněte základní regulátory pro řízení modelu.
9. Zpracujte stručný návod na obsluhu modelu.
10. Vytvořte graficky zajímavé demo, které bude prezentovat dynamiku systému a jeho řízení.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. František Vaněk

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

v.z. M. Šimák
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 9. 2007

Anotace

Tato práce pojednává o modelu portálového jeřábu v laboratoři K24 katedry řídící techniky ČVUT v Praze. Práce obsahuje odvození rovnic modelu, jejich linearizaci a identifikaci modelu. Dále v práci navrhuji regulátory pro daný systém (P regulátor, sledovací LQ regulátor).

Annotation

This work refers to gantry crane (bridge crane) model in K26 laboratory, deparment of Control Engineering, CTU in Prague. In this work I derive model equations, linearize them and performe model identification. Then I designed controllers for the model (P controller and LQ controller).

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne 23.1.2009 ..... Tomáš Lenka .....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval panu inženýrovi Františkovi Vaňkovi za trpělivost a cenné rady.

Obsah

ANOTACE **1**

ANNOTATION **2**

PROHLÁŠENÍ **3**

PODĚKOVÁNÍ **4**

ÚVOD **6**

LABORATORNÍ MODEL **7**

PORTÁLOVÝ JEŘÁB 7
MODEL 8
PŘIPOJENÍ K POČÍTAČI 9
Popis vstupů a výstupů *10*

MATEMATICKÝ MODEL **12**

ODVOZENÍ 12
Značení proměnných *13*
Rameno *14*
Naviják *15*
IDENTIFIKACE 16
Statické charakteristiky *16*
Dynamické vlastnosti *18*
Co jsem zanedbal *29*
Ověření správnosti modelů *30*
Shrnutí *33*

ŘÍZENÍ **35**

P REGULÁTOR 36
STAVOVÝ REGULÁTOR 39
Pozorovatel *40*
LQ regulátor *44*

ZÁVĚR **52**

REFERENCE **53**

ODKAZY V TEXTU 53
DALŠÍ POUŽITÉ MATERIÁLY 53

PŘÍLOHY **54**

PŘÍLOHA 1 54
PŘÍLOHA 2 55
PŘÍLOHA 3 56
PŘÍLOHA 4 57
PŘÍLOHA 5 58
PŘÍLOHA 6 59

Úvod

Tématem mé diplomové práce je řízení portálového jeřábu. Práce je rozdělena do 3 částí. V první části se zabývám popisem laboratorního modelu portálového jeřábu a jeho fungováním. Druhá část se věnuje matematickému modelu portálového jeřábu a jeho porovnání s modelem reálným. Ve třetí části popisuji návrh regulátorů a diskutuji jejich výsledky.

Laboratorní model

Portálový jeřáb

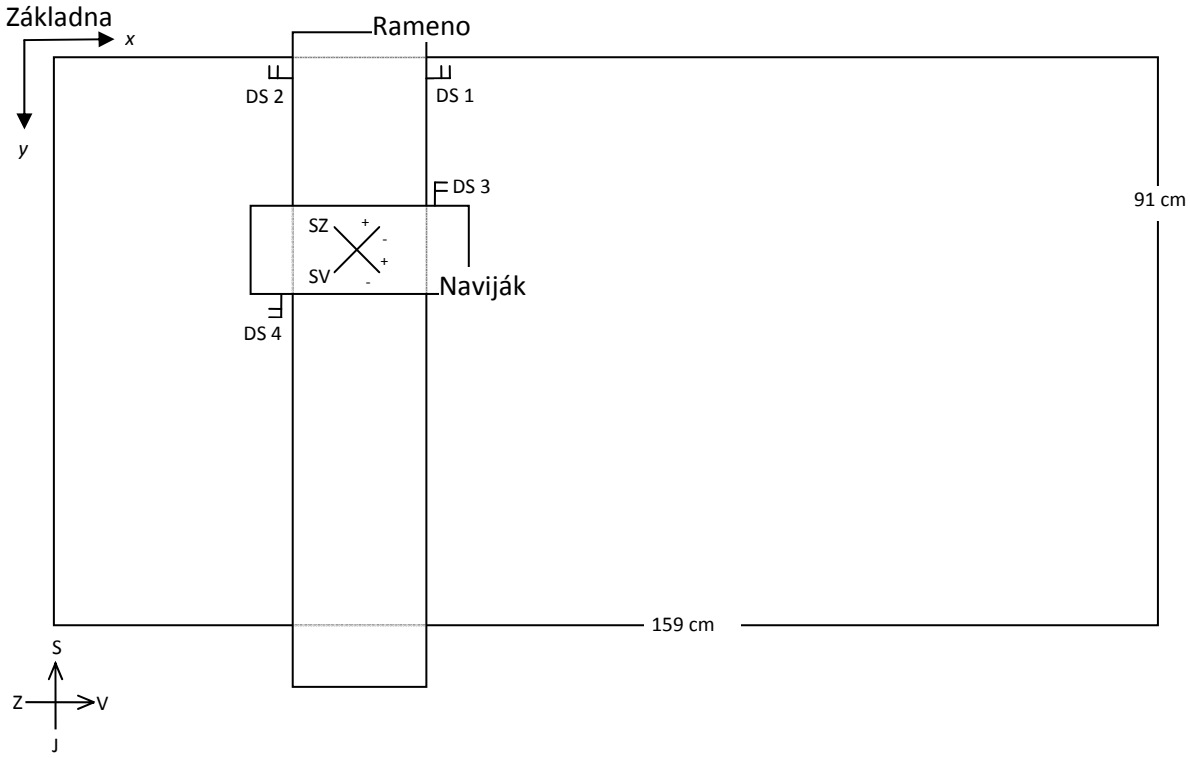
Portálové (nebo též halové, anglicky gantry crane, nebo bridge crane) jeřáby se používají při přepravě materiálu v rámci výrobních hal, ale i například při nakládání či překládání nákladu na železnicích.

Obrázek 1 - portálový jeřáb v hale

Model

Obrázek 2 - model portálového jeřábu v laboratoři K26

Laboratorní model je umístěn v laboratoří K26. Model je vybaven řadou senzorů, které umožňují získat veškeré podstatné informace k jeho ovládání a dále pak i k jeho řízení. Na obrázku 2 je schematický nákres modelu s označením jeho částí.



Obrázek 3 - schematický nákres modelu

Pro účel snazší orientace na modelu, jsem si zavedl orientační vztažnou soustavu. Horní a levá strana modelu (dle schématu na obrázku 2) slouží jako počátek souřadnic a směry jsou určeny směrovou

růžicí (též ve schematickém obrázku). Senzory výkyvu nosného lanka jsou označeny směrem, kterým sou nasměrovány jejich horní části (čili SV – severo-východ a SZ čili severo-západ). I dále v textu budu takto senzory označovat.

Připojení k počítači

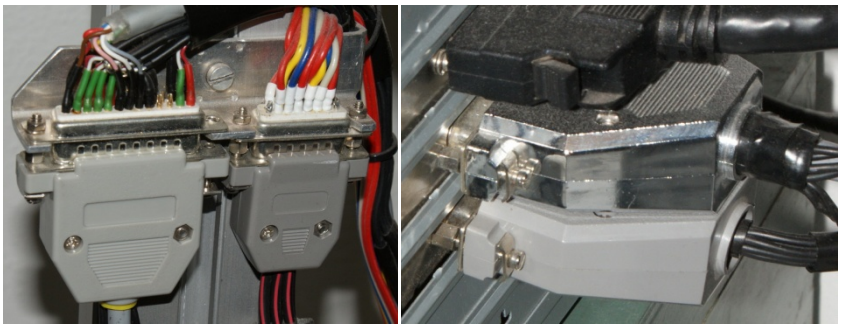
Model je připojen pomocí vstupně-výstupní karty HUMUSOFT MF614 ([1]). Tato karta disponuje mnoha vstupy a výstupy, které jsou shrnuty v tabulce.

Analog Input	
Channels:	8 single-ended
A/D converter:	12-bit, 10 microsec. conversion time
Input ranges:	+-10 V, +-5 V, 0-10 V, 0-5 V
Trigger mode:	software
Overvoltage:	+-16 V max.
Analog Output	
Channels:	4 channels, 12-bit
Output Range:	+-10 V
Output current:	10 mA max.
Digital I/O	
Input lines:	8, TTL compatible
Output lines:	8, TTL compatible
Timer/Counter	
Timer chip:	9513
Timer resolution:	50 ns
Encoder Inputs	
Input channels:	4, single ended or differential
Inputs:	A, B, Index
Input frequency:	max 2.5 MHz
General	
Power consumption:	100 mA @ +5 V, 50 mA @ +12 V, 50 mA @ -12 V
Operating temperature:	0 to 50 °C
Connector:	2 x DB-37
Interface:	PCI

Tabulka 1 - Specifikace karty HUMUSOFT MF614

Tato karta umožňuje modelu velmi efektivně komunikovat například se softwarovým balíkem MATLAB, ve kterém jsem pracoval.

Model je k počítači připojen pomocí dvou kabelů. Jeden je pro silové vstupy a prochází silovým zesilovačem. Druhý kabel přenáší data veškerých snímačů z modelu. Digitální výstup dorazových snímačů prochází optickým oddělovačem. Ostatní výstupy jsou zapojené přímo do karty Humusoft.



Obrázek 4 - připojení k PC. Levý obrázek: levý konektor - data, pravý konektor silové kabely. Pravý obrázek: spodní konektor vstupy, prostřední konektor výstupy senzorů.

Popis vstupů a výstupů

Vzhledem k tomu, že k modelu nebyla dostupná žádná dokumentace, musel jsem použít metody pokusu a omylu, abych zjistil jaké všechny vstupy a výstupy model poskytuje a které komponenty jsou připojeny k jakým kanálům na I/O kartě. Na modelu jsou k dispozici následující senzory:

- 4 inkrementální čítače: 2 snímají polohu ramene a navijáku, 2 snímají vychýlení nosného lanka
- 1 potenciometr, který ukazuje výšku zdvihu lanka (resp. polohu motoru, který toto řídí)
- 4 optické spínače, které slouží jako dorazy v krajních polohách ramene a vozíku
- 1 elektrický spínač, který sepne v případě, že je na lanko vyvíjen tah (buď z důvodu jeho horní krajní polohy, nebo z důvodu zavěšení nákladu)

Následující tabulka přiřazuje výstupy a vstupy modelu k jednotlivým vstupům a výstupům na I/O kartě.

Vstupy na kartě	**Kanál**	**Popis**
Analog		
	1	potenciometr indikující zdvih lanka
Digitál	1	doraz DS1
	2	doraz DS2
	3	doraz DS3
	4	doraz DS4
	5	spínač napnutí lanka
Encoder		
	1	inkrementální čítač polohy ramene
	2	SZ snímač výchylky lanka
	3	SV snímač výchylky lanka
	4	inkrementální čítač polohy vozíku
Výstupy na kartě		
Analog		
	1	motor ramene
	2	motor vozíku
	3	motor pro navíjení a svíjení lana

Tabulka 2 - Popis připojení vstupů a výstupů modelu k I/O kartě

V další tabulce jsou uvedeny převodní konstanty a další důležité poznámky při používání jednotlivých vstupů a výstupů:

Výstupy	Převodní konstanta	Poznámka	Min	Max	
potenciometr indikující zdvih lanka		při navíjeni hodnota roste, je nutné ho filtrovat	0	2,95	horní poloha ≈ 0 dolní poloha ≈ 0,069
doraz DS1	-	1 ≈ není na dorazu			
doraz DS2	-	1 ≈ není na dorazu			
doraz DS3	-	1 ≈ není na dorazu			
doraz DS4	-	1 ≈ není na dorazu			
spínač napnutí lanka	-	0 ≈ lanko visí volně			
inkrementální čítač polohy ramene	na centimetry: 0,05	-- při posuvu od základny (není žádoucí proto bude dále převodní konstanta se znaménkem -	0	2636	0 ≈ rameno je u základny
SZ snímač výchylky lanka	na stupně: 0,119119	znaménka hodnot při vychýlení zobrazeny v Obrázku 2	-101	113	0 ≈ lanko klidně visí
SV snímač výchylky lanka	na stupně: 0,119119		-115	98	
inkrementální čítač polohy navijáku	na centimetry: 0,05	-- při posuvu k základně	0	1401	0 ≈ naviják je u základny
motor ramene		+ pohyb od základny			
motor navijáku		+ pohyb od základny			
motor pro navíjení a svíjení lana		+ navíjení			

Tabulka 3 - Převodní konstanty vstupů a výstupů

Analogový výstup z potenciometru je třeba filtrovat, protože je poměrně hodně zatížen šumem. Pro začátek jsem zvolil dvoustupňové filtrování. Prvním filtrem je systém s přenosem

$$G(s) = \frac{20^3}{(s+20)^3}$$

Tento filtr je aplikován na zcela surový výstup z potenciometru. Dalším filtrem je Besselův filtr prvního řádu typu lowpass (Simulink blok Analog Filter Design; Bessel Lowpass, order 1, frequency 5 rad/s) se zlomovou frekvencí 5 rad/s. Tento filtr je zařazen až za převodní konstantu a ještě dále zlepšuje výstup bez významného ovlivnění dynamiky změn.

Pro práci s modelem jsem si vytvořil simulinkový submodel (viz. Příloha 2).

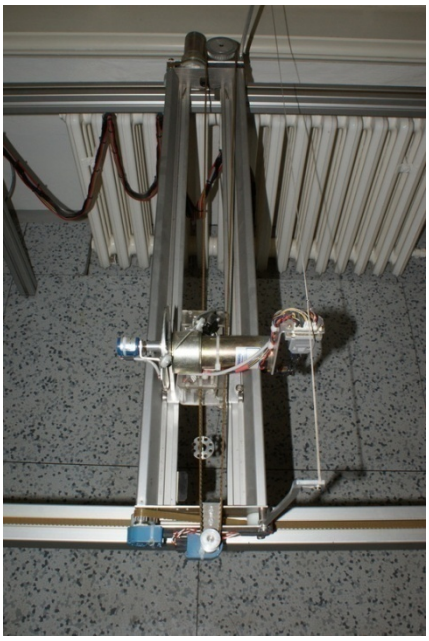
Matematický model

Odvození

Model jsem pro zjednodušení dekomponoval na 6 subsystémů. 5 z nich je kaskádně pospojováno. Toto je možné, protože u systémů nedochází ke zpětnému ovlivňování předcházejícího systému.

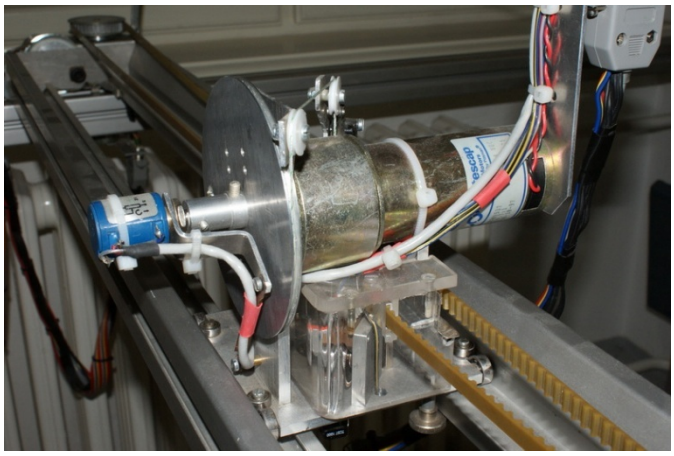
Subsystémy jsou následující:

- Rameno:
  - Pojezd ramene:
    - Zajišťuje pohyb ve směru ZV (souřadnice x)
    - Budí systém Lanko se závažím (rameno)
  - Lanko se závažím (rameno)
    - Tento systém popisuje kývání lanka se závažím ve směru pohybu ramene (ZV)
    - Systém je buzen Pojezdem ramene



Obrázek 5 - Rameno laboratorního modelu

- Naviják
  - Pojezd navijáku:
    - Zajišťuje pohyb ve směru SJ (souřadnice y)
    - Budí systém Lanko se závažím (naviják)
  - Lanko se závažím (naviják)
    - Tento systém popisuje kývání lanka se závažím ve směru pohybu ramene (ZV)
    - Systém je buzen Pojezdem navijáku

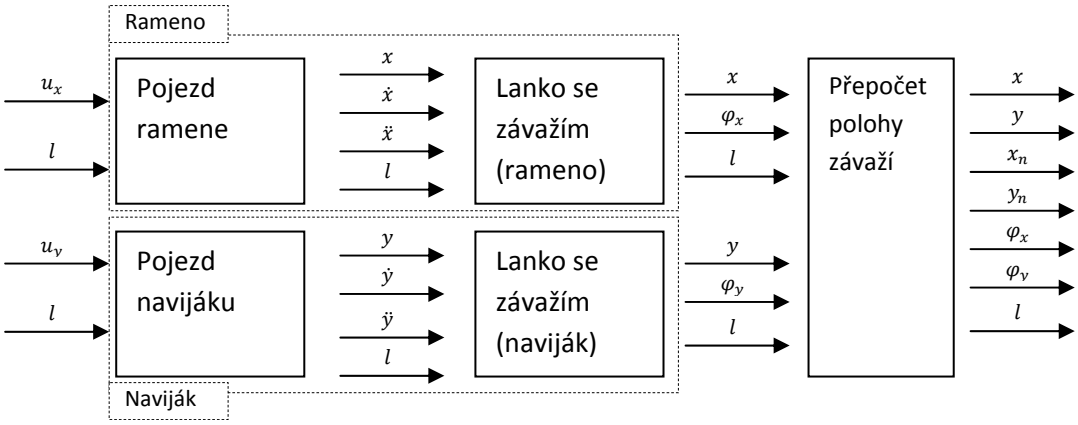


Obrázek 6 - Naviják laboratorního modelu

- Přepočet polohy závaží
  - Systém přepočítává výstupy na polohu závaží (tato veličina bude zásadní při regulaci)
- Navíjení
  - Systém navíjení lanka

Pro systém navíjení jsem identifikaci nedělal (jen jsem zjistil příslušné převodní konstanty). Řízení tohoto systému je z důvodů velkého zašumění analogového výstupu velmi obtížná. Proto jsem zvolil jiný způsob, jak systém dostat do příslušného pracovního bodu.

Následující obrázek ukazuje zapojení všech systémů:



Obrázek 7 - schéma zapojení jednotlivých subsystémů

Značení proměnných

Následující tabulka shrnuje značení proměnných.

proměnná	popis
x	poloha pojezdu ramene
$\dot{x}$	rychlost pojezdu ramene
$\ddot{x}$	zrychlení pojezdu ramene
y	poloha pojezdu navijáku
$\dot{y}$	rychlost pojezdu navijáku
$\ddot{y}$	zrychlení pojezdu navijáku
φ_x	výchylka lanka ve směru ZV
φ_y	výchylka lanka ve směru SJ
$\dot{\varphi}_x$	uhlová rychlost lanka ve směru ZV
$\ddot{\varphi}_x$	uhlové zrychlení lanka ve směru ZV
$\dot{\varphi}_y$	uhlová rychlost lanka ve směru SJ
$\ddot{\varphi}_y$	uhlové zrychlení lanka ve směru SJ
x_n	poloha závaží (nákladu) ve směru ZV
y_n	poloha závaží (nákladu) ve směru SJ
u_x	vstup do pojezdu ramene
u_y	vstup do pojezdu navijáku
u_z	vstup pro navíjení nákladu
l	délka závěsného lanka
m_{cr}	hmotnost pojezdu ramene
m_{cn}	hmotnost pojezdu navijáku
m_l	hmotnost závaží (nákladu)
k_{1r}	třecí konstanta pro pojezd ramene
k_{1n}	třecí konstanta pro pojezd navijáku
k_{2r}	třecí konstanta pro lanko se závažím ve směru ZV
k_{2n}	třecí konstanta pro lanko se závažím ve směru SJ
k_{3r}	konstanta zahrnující další vlivy ve směru ZV
k_{3n}	konstanta zahrnující další vlivy ve směru SJ
G_{pr}	přenos sytému pojezdu ramene
G_{pn}	přenos sytému pojezdu navijáku
G_{lzr}	přenos systému lanka se závažím (rameno)
G_{lzn}	přenos systému lanka se závažím (naviják)

Tabulka 4 - tabulka použitých proměnných

Rameno

Pojezd ramene

Pro pojezd stačí jediná pohybová rovnice:

$$m_{cr}\frac{d^2x}{dt^2} = u_x + k_{1r}\frac{dx}{dt}$$

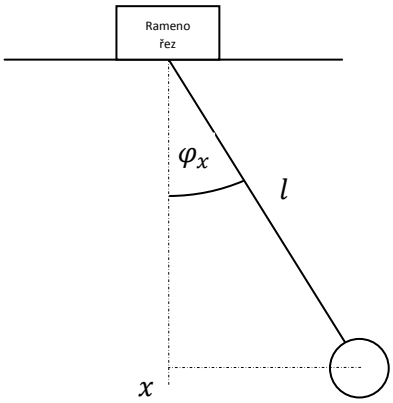
$$\ddot{x} = \frac{u_x + k_{1r}\dot{x}}{m_{cr}}$$

Jako stavové proměnné volím x a $\dot{x}$. Výstupními proměnnými jsou pro účel spojení s druhým podsystémem zvoleny x, $\dot{x}$ a $\ddot{x}$. Po linearizaci v pracovním bodě (v oblasti nelinearity) $u_x = 0$, $l = 0$, $x = 0$ a $\dot{x} = 0$ dostávám následující systém (vstup l je potřeba vzhledem k jeho fyzikálnímu významu přepočítat jako $0.65 - l$; viz. část 0):

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \ddot{x}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & \frac{k_{1r}}{m_{cr}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ \dot{x}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0\\ \frac{1}{m_{cr}} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_x\\ l\end{bmatrix}$$

Lanko se závažím (rameno)

Pro matematický model lanka se závažím jsou potřeba dvě pohybové rovnice. Jedna pro sílu působící horizontálně a jedna pro sílu působící vertikálně.



I. $m_l\frac{d^2(x+l\sin\varphi_x)}{dt^2} = -\ddot{x}\sin\varphi_x + k_{2r}\frac{d(x+l\sin\varphi_x)}{dt}$

II. $m_l\frac{d^2(l\cos\varphi_x)}{dt^2} = -\ddot{x}\cos\varphi_x + m_l g + k_{3r}$

Z obou rovnic jsem vyjádřil $\ddot{x}$ a vzájemně porovnal. Po upravení dostávám rovnici pro $\ddot{\varphi}_x$:

$$\ddot{\varphi}_x = \frac{-\ddot{x}m_l\cos\varphi_x + \dot{x}k_{2r}\cos\varphi_x + k_{2r}l\dot{\varphi}_x\cos^2\varphi_x - m_l g\sin\varphi_x - k_{3r}\sin\varphi_x}{m_l l}$$

Jako stavové proměnné volím φ_x a $\dot{\varphi}_x$. Výstupními proměnnými jsou jako výstup celého subsystému hodnoty x a φ_x. Po linearizaci v pracovním bodě (v oblasti nelinearity) $x = 0$, $\dot{x} = 0$, $\ddot{x} = 0$, $l = 0$, $\varphi_x = 0$ a $\dot{\varphi}_x = 0$ dostávám následující lineární systém (vstup l je potřeba vzhledem k jeho fyzikálnímu významu přepočítat jako $0.65 - l$; viz. část 0):

$$\begin{bmatrix}\dot{\varphi}_x\\ \ddot{\varphi}_x\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -\frac{20k_{3r}}{13m_l} - \frac{981}{65} & \frac{k_{2r}}{m_l}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varphi_x\\ \dot{\varphi}_x\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \frac{20k_{3r}}{13m_l} & -\frac{20}{13} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ \dot{x}\\ \ddot{x}\\ l\end{bmatrix}$$

Naviják

Pojezd navijáku

Pro pojezd stačí jediná pohybová rovnice:

$$m_{cn}\frac{d^2y}{dt^2} = u_y + k_{1n}\frac{dy}{dt}$$

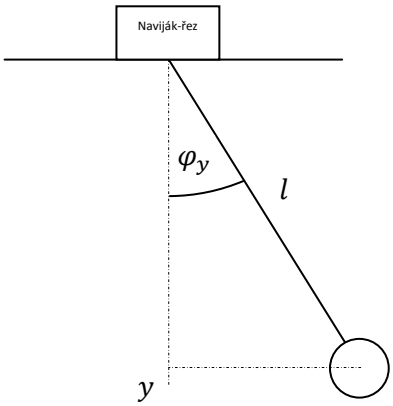
$$\ddot{y} = \frac{u_y + k_{1n}\dot{y}}{m_{cn}}$$

Jako stavové proměnné volím y a $\dot{y}$. Výstupními proměnnými jsou pro účel spojení s druhým podsystémem zvoleny x, $\dot{x}$ a $\ddot{x}$. Po linearizaci v pracovním bodě (v oblasti nelinearity) $u_y = 0$, $l = 0$, $y = 0$ a $\dot{y} = 0$ dostávám následující systém (vstup l je potřeba vzhledem k jeho fyzikálnímu významu přepočítat jako $0.65 - l$; viz. část 0):

$$\begin{bmatrix}\dot{y}\\ \ddot{y}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & \frac{k_{1n}}{m_{cn}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}y\\ \dot{y}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0\\ \frac{1}{m_{cn}} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_y\\ l\end{bmatrix}$$

Lanko se závažím (naviják)

Pro matematický model lanka se závažím jsou potřeba dvě pohybové rovnice. Jedna pro sílu působící horizontálně a jedna pro sílu působící vertikálně.



I. $m_l\frac{d^2(y+l\sin\varphi_y)}{dt^2} = -\ddot{y}\sin\varphi_y + k_{2n}\frac{d(y+l\sin\varphi_y)}{dt}$

II. $m_l\frac{d^2(l\cos\varphi_y)}{dt^2} = -\ddot{y}\cos\varphi_y + m_l g + k_{3n}$

Z obou rovnic jsem vyjádřil $\ddot{y}$ a vzájemně porovnal. Po upravení dostávám rovnici pro $\ddot{\varphi_y}$:

$$\ddot{\varphi_y} = \frac{-\ddot{y}m_l\cos\varphi_y + \dot{y}k_{2n}\cos\varphi_y + k_{2n}l\dot{\varphi_y}\cos^2\varphi_y - m_l g\sin\varphi_y - k_{3n}\sin\varphi_y}{m_l l}$$

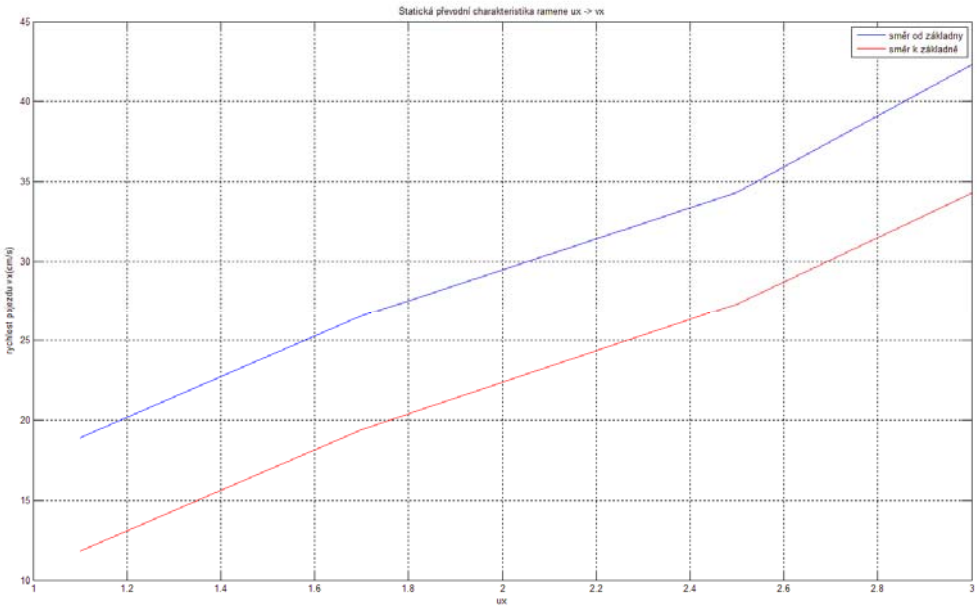
Jako stavové proměnné volím φ_y a $\dot{\varphi_y}$. Výstupními proměnnými jsou jako výstup celého subsystému hodnoty y a φ_y. Po linearizaci v pracovním bodě (v oblasti nelinearity) $y = 0$, $\dot{y} = 0$, $\ddot{y} = 0$, $l = 0$, $\varphi_y = 0$ a $\dot{\varphi_y} = 0$ dostávám následující lineární systém (vstup l je potřeba vzhledem k jeho fyzikálnímu významu přepočítat jako $0.65 - l$; viz. část 0):

$$\begin{bmatrix}\dot{\varphi_y}\\ \ddot{\varphi_y}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -\frac{20k_{3n}}{13m_l} - \frac{981}{65} & \frac{k_{2n}}{m_l}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varphi_y\\ \dot{\varphi_y}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \frac{20k_{3n}}{13m_l} & -\frac{20}{13} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}y\\ \dot{y}\\ \ddot{y}\\ l\end{bmatrix}$$

Identifikace

Statické charakteristiky

Pojezd ramene



Obrázek 8 - statická převodní charakteristika pojezdu ramene

Obě charakteristiky jsou přibližně lineární. Ve směru pohybu od základny je rovnice odpovídající lineární funkce:

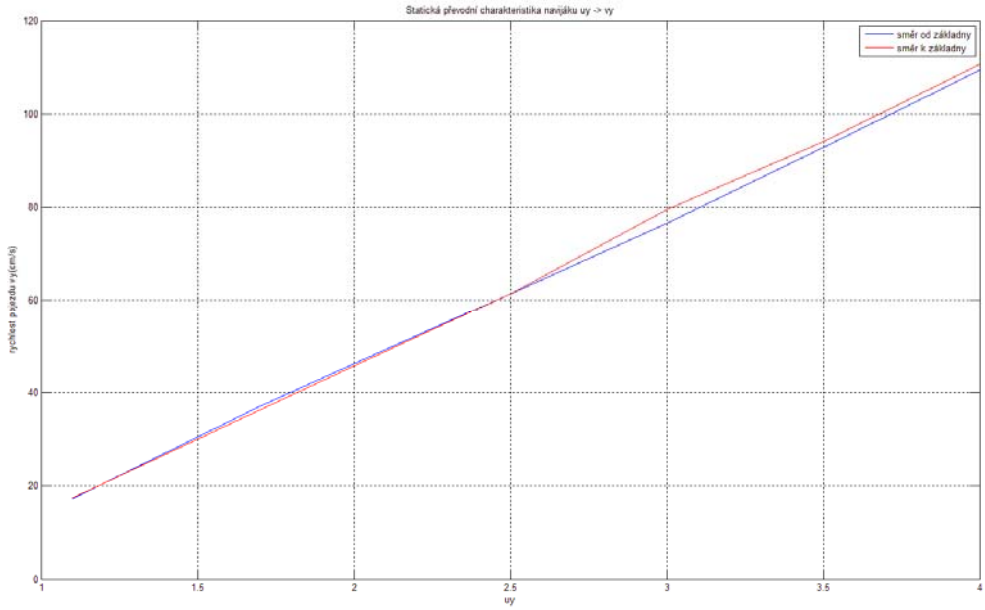
$$v_x = 12.3u_x + 5.41 \ \text{[cm]}$$

Ve směru k základně je rovnice odpovídající funkce:

$$v_x = 11.82u_x - 1.16 \ \text{[cm]}$$

Ze statické charakteristiky pojezdu ramene si můžeme všimnout poměrně velké hystereze v rámci směru pohybu. Tato hystereze mi značně komplikovala návrh regulátorů.

Pojezd navijáku



Obrázek 9 - statická převodní charakteristika pojezdu navijáku

Obě charakteristiky budu považovat za lineární. Rovnice proložené lineární funkce je:

$$v_y = 31.81u_y - 17.7833 \ \text{[cm]}$$

Dynamické vlastnosti

Pro určení dynamických vlastností všech subsystémů jsem změřil průběhy veličin v odezvě na skokovou změnu vstupní veličiny. Z těchto průběhů jsem byl schopen, pomocí postupů identifikace systémů ([2] a [3]), určit jmenovatele všech přenosů. Z těch jsem, porovnáním se spočítanými přenosy, spočítal hodnoty všech konstant.

Odpovídající přenosy jsem získal z odvozených linearizovaných matic pomocí:

$$G = C \cdot inv(Is - A)B + D$$

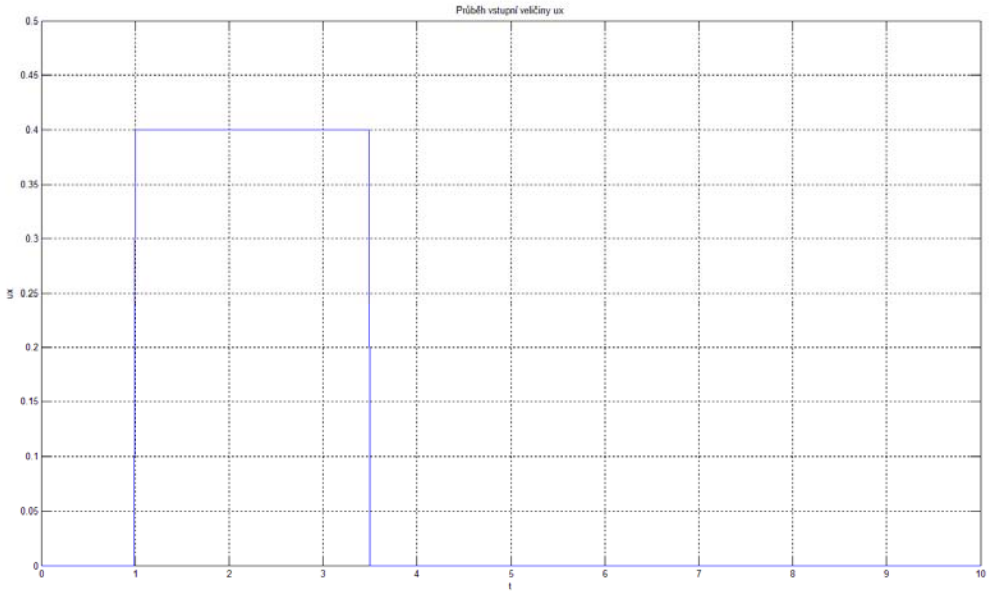
Pro tyto účely jsem matici C zvolil jednotkovou, protože její hodnota neovlivňuje jmenovatele přenosů. Odpovídajícími maticemi C jsem následně korigoval odchylky modelu od naměřených hodnot výstupních veličin. Z toho důvodu hodnoty stavů jednotlivých systémů neodpovídají velikostí svým fyzikálním protějškům. Při návrhu regulátorů je na to třeba brát zřetel.

Subsystém rameno vyvolává vychýlení lanka ve směru ZV, subsystém navijáku ve směru SJ. K získání správné odezvy je třeba hodnoty ze senzorů SV a SZ přepočítat do správných směrů. Vektor určený složkami SV a SZ je třeba přepočítat na složky ve směrech SJ a ZV. To se nejsnadněji provede tak, že se na senzorový kříž SV, SZ budeme dívat jako na rovinu komplexních čísel. Matlab nám pak dává k dispozici veškeré nástroje potřebné k tomuto úkolu. Složky SJ a ZV jsou pak jen pootočené o 45°. Pro přepočet jsem si vytvořil následující skript:

```
function [SJ,ZV]=prepocet_senzoru(SV,SZ)
I=SV+SZ*i;
A=abs(I);
alpha=angle(I);
beta=alpha-pi/4;
SJ=A.*cos(beta);
ZV=A.*sin(beta);
end
```

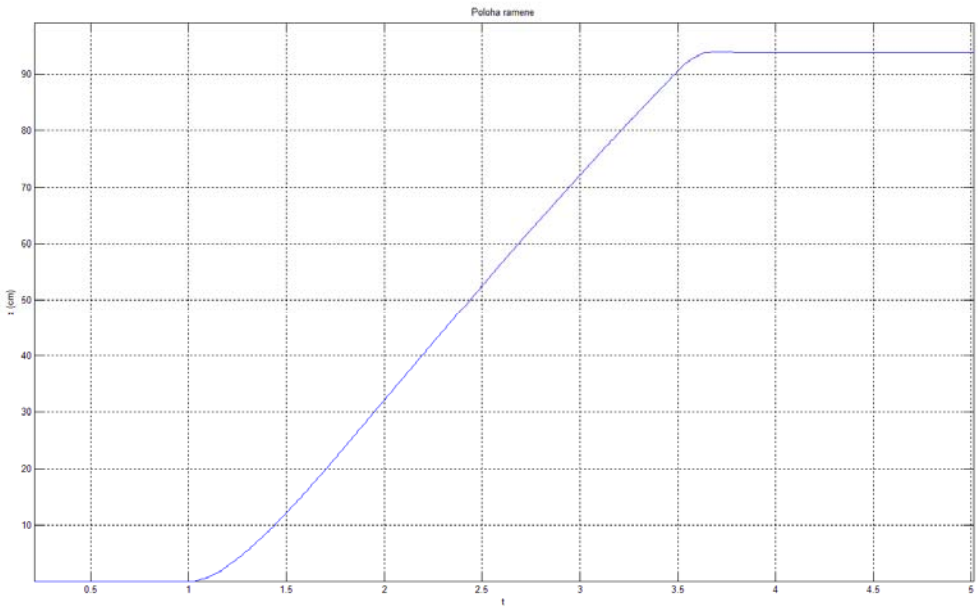
Rameno

Systém jsem vybudil skokovou změnou vstupní veličiny.



Obrázek 10 - průběh vstupní veličiny

Pojezd ramene



Obrázek 11 - odezva pojezdu ramene na skok vstupní veličiny

Jmenovatel spočítaného přenosu je

$$s(m_{cr}s - k_{1r})$$

Identifikace podle odezvy je:

Časová konstanta T [s]	0.173
Jmenovatel přenosu podle odezvy na skok vstupní veličiny	$s(sT+1)$
Hodnoty konstant	k1r/mcr = -5.76

Tabulka 5 - identifikace pojezdu ramene

Z této identifikace se mi podařilo zjistit pouze poměr $-\frac{m_{cr}}{k_{1r}}$. Ten se v maticích vyskytuje v převrácené hodnotě. Konstanta m_{cr} se vyskytuje ještě v maticích B a D, ale vzhledem k tomu, že v matematickém modelu nedodržuji reálné velikosti stavů, mohu tuto konstantu v matici B vypustit a na její jisto dosadit 1. Hodnoty výstupů pak srovnám přes matici C.

Matice systému pak jsou:

$$A_{pr} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -5.76 \end{bmatrix}$$
$$B_{pr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$
$$C_{pr} = \begin{bmatrix} 540.83 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -5.76 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_{pr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

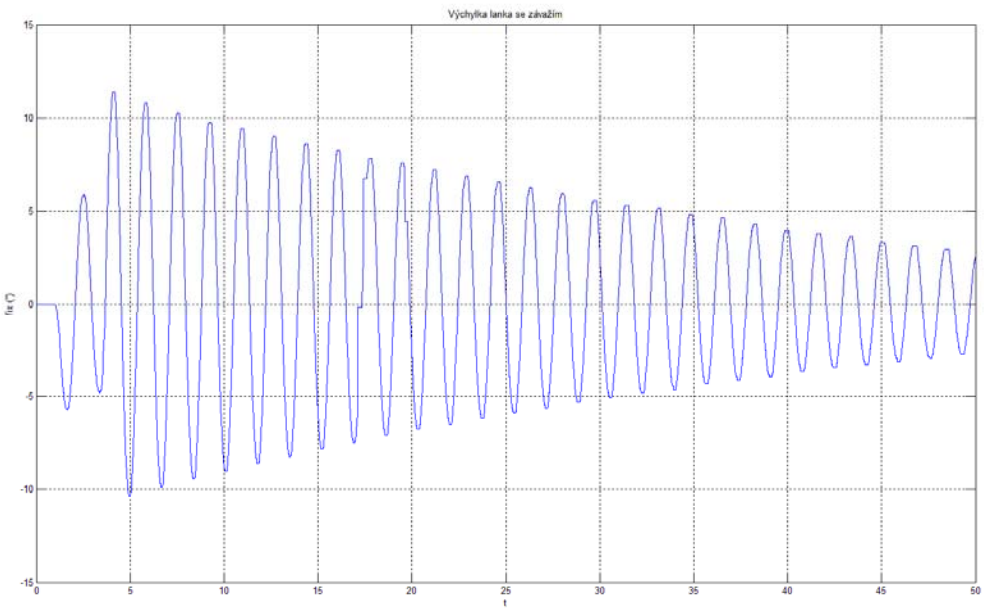
Vstupní vektor systému: $\begin{bmatrix} u_x \\ l \end{bmatrix}$

Výstupní vektor systému: $[x \quad \dot{x} \quad \ddot{x} \quad l]$

Přenosová matice systému:

$$G_{pr} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s\,(0.0018\,s + 0.0107)} & 0 \\ \frac{1}{s + 5.7627} & 0 \\ \frac{1}{0.1735\,s + 1} + 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Lanko se závažím (rameno)



Obrázek 12 - odezva lanka se závažím na skok vstupní veličiny

Jmenovatel spočítaného přenosu je

$$65s^2m_l - 65sk_{2r} + 981m_l + 100k_{3r}$$

Identifikace podle odezvy je:

jmenovatel identifikovaného přenosu	s^2+2*0.0084391*3.6771*s+3.6771^2
konstanty	ml = 0,0154
	k2r = -0,000955
	k3r = -0,0157

Tabulka 6 - identifikace lanka se závažím (rameno)

Matice systému pak jsou:

$$A_{lzr} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -13.52 & -0.062 \end{bmatrix}$$
$$B_{lzr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.096 & -1.539 & 0 \end{bmatrix}$$
$$C_{lzr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 102.11 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_{lzr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Vstupní vektor systému: $\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ l \end{bmatrix}$

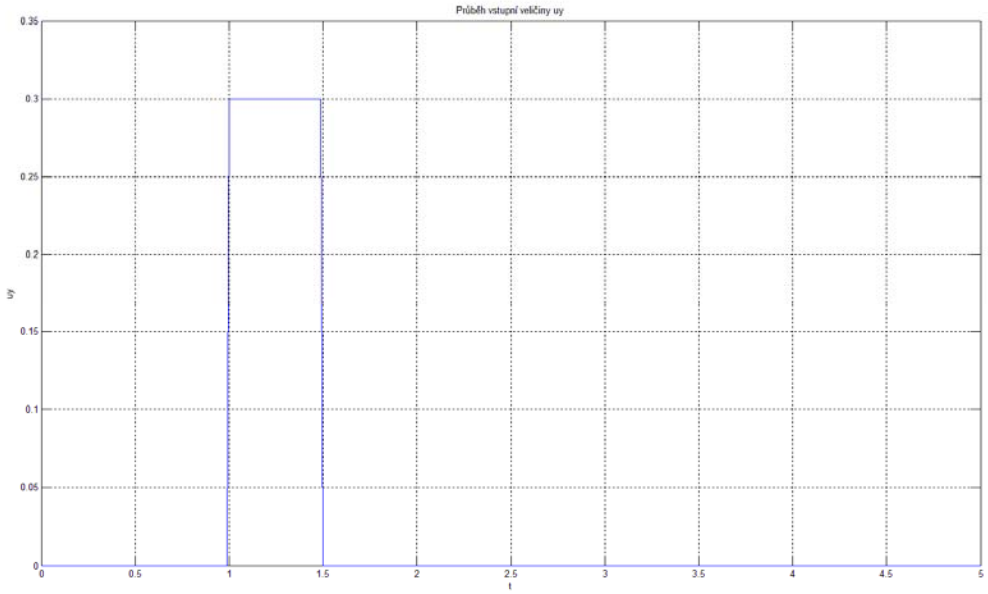
Výstupní vektor systému: $[x \quad \varphi_x \quad l]$

Přenosová matice systému:

$$G_{lzr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{-1}{0.0459s^2 + 0.0028s + 0.6202} & \dfrac{-1}{0.0028s^2 + 1.77 \cdot 10^{-4}s + 0.0385} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

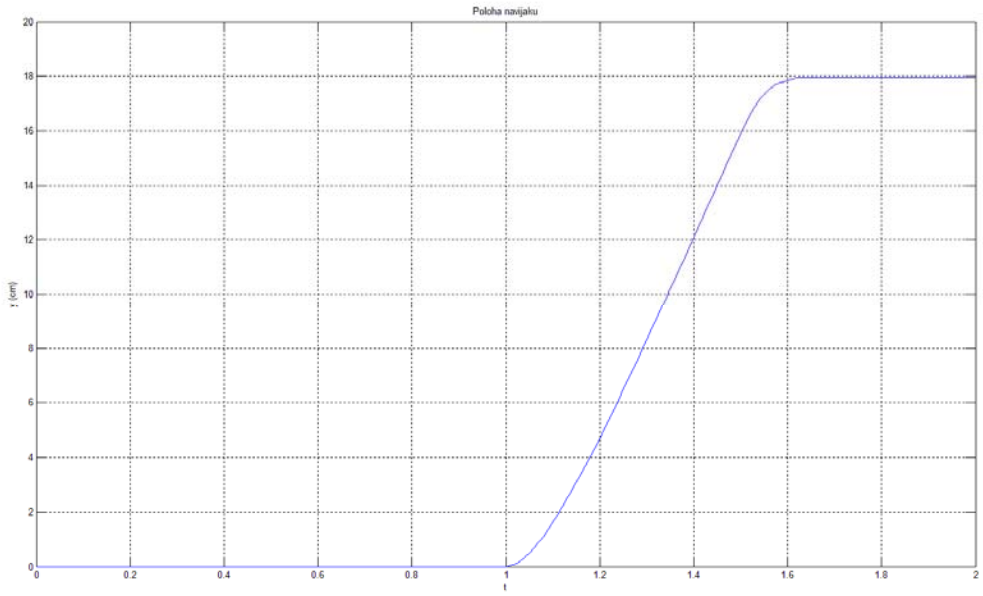
Naviják

Systém jsem vybudil skokovou změnou vstupní veličiny.



Obrázek 13 - průběh vstupní veličiny

Pojezd navijáku



Obrázek 14 - odezva pojezdu ramene na skok vstupní veličiny

Jmenovatel spočítaného přenosu je

$$s(m_{cn}s - k_{1n})$$

Identifikace podle odezvy je:

Časová konstanta T [s]	0.0568
Jmenovatel přenosu podle odezvy na skok vstupní veličiny	$s(sT+1)$
Hodnoty konstant	k1n/mcn = -17.6

Tabulka 7 - identifikace pojezdu navijáku

Z této identifikace se mi podařilo zjistit pouze poměr $-\frac{m_{cn}}{k_{1n}}$. Ten se v maticích vyskytuje v převrácené hodnotě. Konstanta m_{cn} se vyskytuje ještě v maticích B a D, ale vzhledem k tomu, že v matematickém modelu nedodržuji reálné velikosti stavů, mohu tuto konstantu v matici B vypustit a na její jisto dosadit 1. Hodnoty výstupů pak srovnám přes matici C.

Matice systému pak jsou:

$$A_{pn} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -17.6 \end{bmatrix}$$
$$B_{pn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$
$$C_{pn} = \begin{bmatrix} 502.02 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -17.6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_{pn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

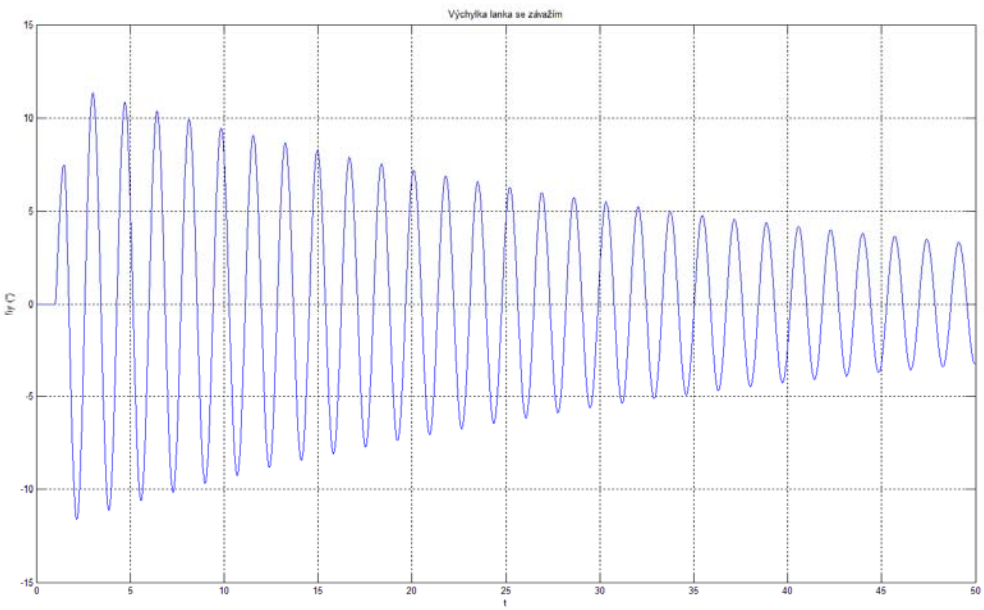
Vstupní vektor systému: $\begin{bmatrix} u_y \\ l \end{bmatrix}$

Výstupní vektor systému: $[y \quad \dot{y} \quad \ddot{y} \quad l]$

Přenosová matice systému:

$$G_{pn} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s\,(0.002\,s + 0.035)} & 0 \\ \frac{1}{s + 17.6} & 0 \\ \frac{1}{0.0568\,s + 1} + 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Lanko se závažím (rameno)



Obrázek 15 - odezva lanka se závažím na skok vstupní veličiny

Jmenovatel spočítaného přenosu je

$$65s^2m_l - 65sk_{2n} + 981m_l + 100k_{3n}$$

Identifikace podle odezvy je:

jmenovatel identifikovaného přenosu	s^2+2*0.0072267*3.6799*s+3.6799^2
konstanty	ml = 0,0154
	k2n = -0,000818
	k3n = -0,0155

Tabulka 8 - identifikace lanka se závažím (naviják)

Matice systému pak jsou:

$$A_{lzn} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -13.54 & -0.053 \end{bmatrix}$$
$$B_{lzn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0818 & -1.539 & 0 \end{bmatrix}$$
$$C_{lzn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -225 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_{lzn} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Vstupní vektor systému: $\begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ l \end{bmatrix}$

Výstupní vektor systému: $[y \quad \varphi_y \quad l]$

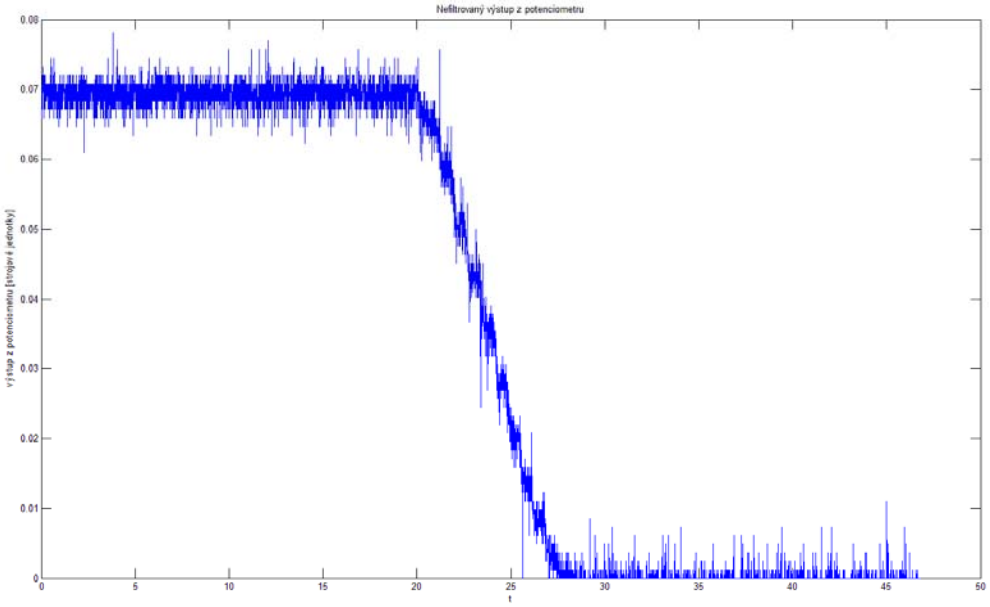
Přenosová matice systému:

$$G_{lzn} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{0.0115s^2 + 6.14 \cdot 10^{-4}s + 0.1562} & \dfrac{1}{6.14 \cdot 10^{-4}s^2 + 3.26 \cdot 10^{-5}s + 0.0083} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

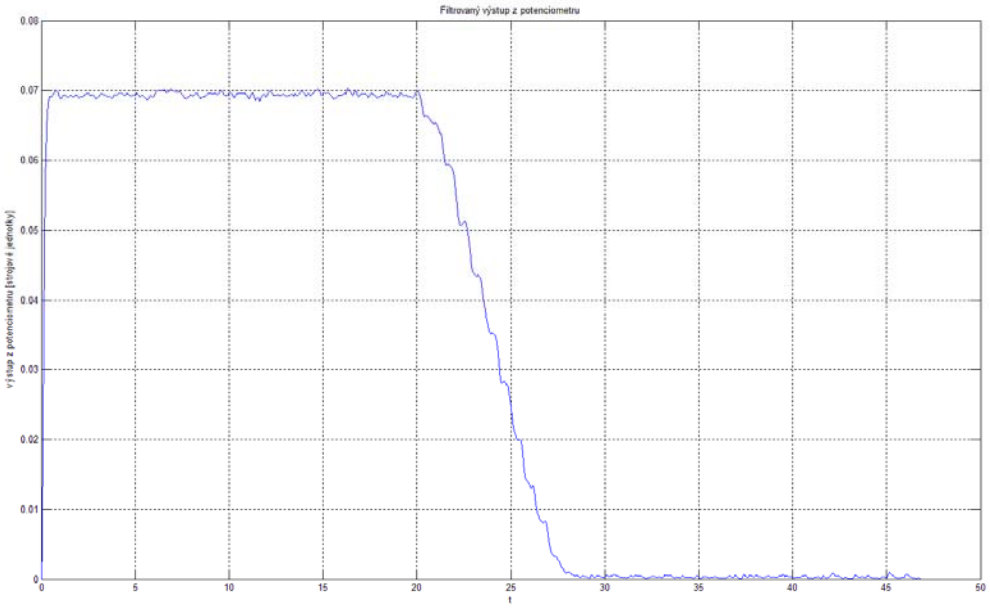
Navíjení

Pro systém navíjení bylo potřeba určit offset a převodní konstantu. Dále byl záměr, aby výstupní hodnota odpovídala výšce nákladu. Proto hodnota 0 odpovídá plně spuštěnému lanka. Maximální výška, do které je možné náklad vyzvednout je 65 cm. Vzhledem k tomu, že v systémech ramene a navijáku je třeba pracovat s jinou fyzikální podstatou tohoto čísla (délka kyvadla), je potřeba hodnotu pro tyto potřeby přepočítat.

V následujících grafech je výstup z potenciometru navíjení. Lanko je ve výchozím stavu spuštěno do polohy 0 a následně navinuto do maximální výšky (nadoraz).



Obrázek 16 - nefiltrovaný výstup z potenciometru



Obrázek 17 - filtrovaný výstup z potenciometru

Z tohoto grafu jsem zjistil offset a převodní konstantu výšky nákladu na centimetry.

offset	0,0694
převodní konstanta (cm)	1022

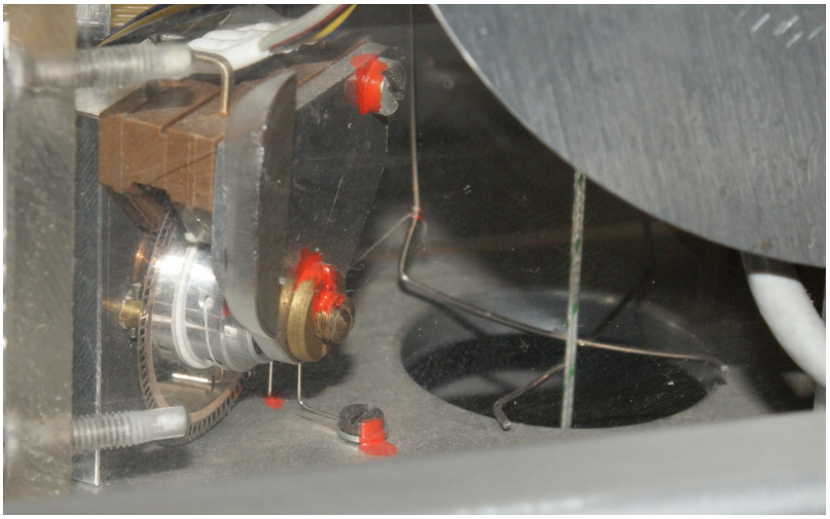
Tabulka 9 - konstanty navíjení

Co jsem zanedbal

Při odvozování jsem v systému zanedbal některé jevy, které by identifikaci značně ztížily. Tyto jevy se tak z hlediska matematického modelu jeví jako poruchové veličiny a zapříčiňují to, že se matematický model ne vždy chová tak jako model reálný.

V matematickém modelu jsem zanedbal:

- Pružnost závěsného lanka: závěsné lanko považuji za dokonale tuhé.
- Pojezd kabelů: jak je vidět z fotografií, tak jak pojezd ramene, tak pojezd navijáku si s sebou musí „tahat“ příslušnou kabeláž.
- Rotační části pohybujících se částí: jak pojezd ramene, tak pojezd navijáku obsahují rotační části, které ovlivňují jejich translační pohyb.
- Dorazy v krajních polohách.

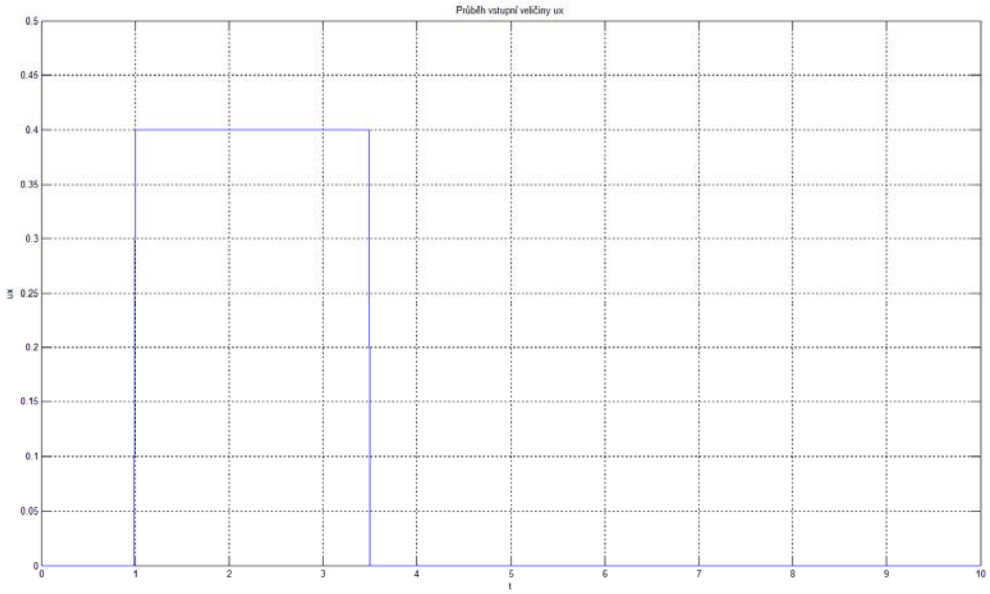


Obrázek 18 - senzory pro snímání výkyvu lanka

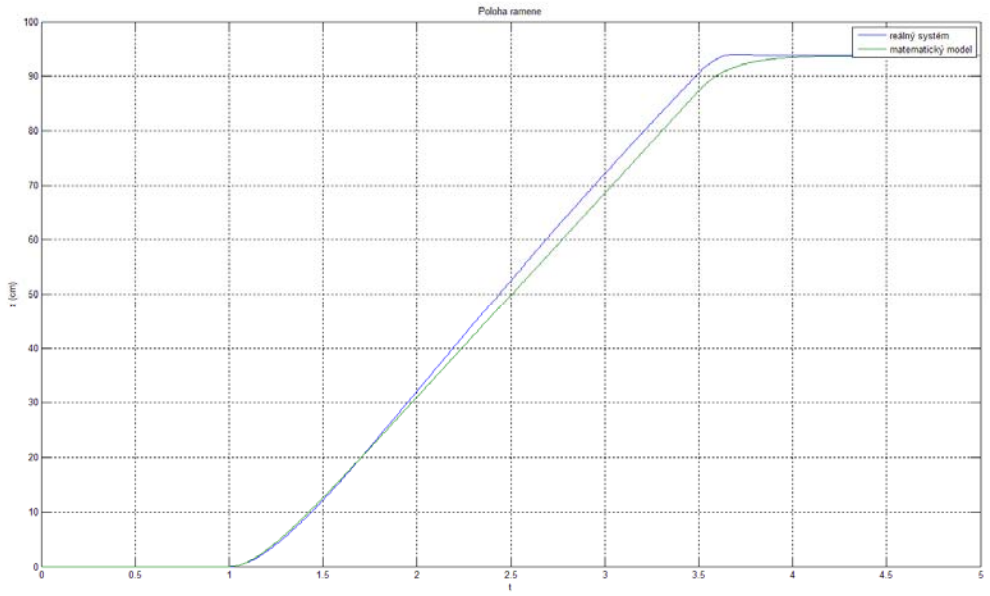
Ověření správnosti modelů

Matematické modely jednotlivých subsystémů jsem zapojil do logických celků, abych mohl ověřit jejich správnost.

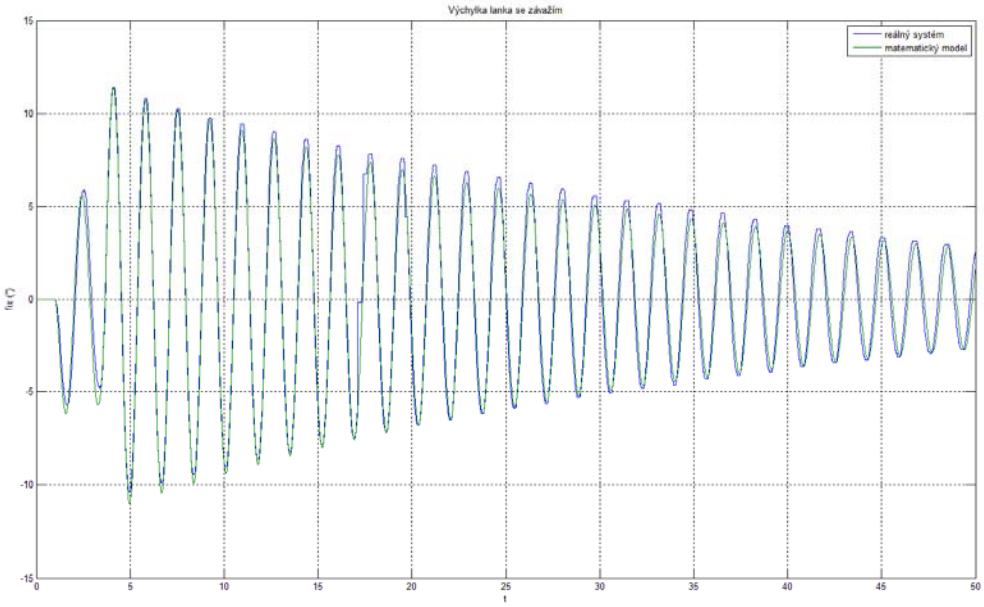
Rameno



Obrázek 19 - průběh vstupní veličiny

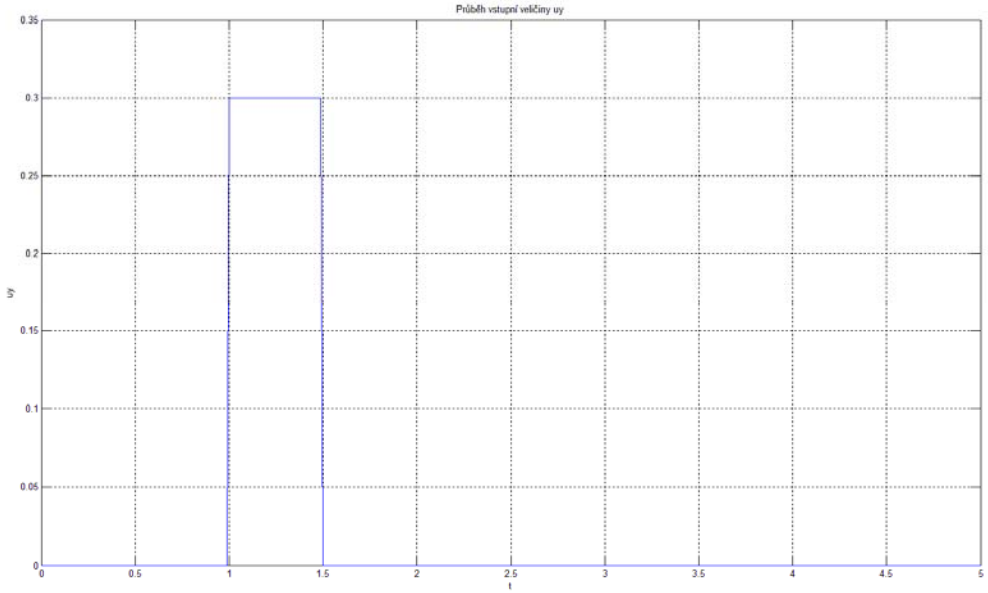


Obrázek 20 - průběh polohy ramene

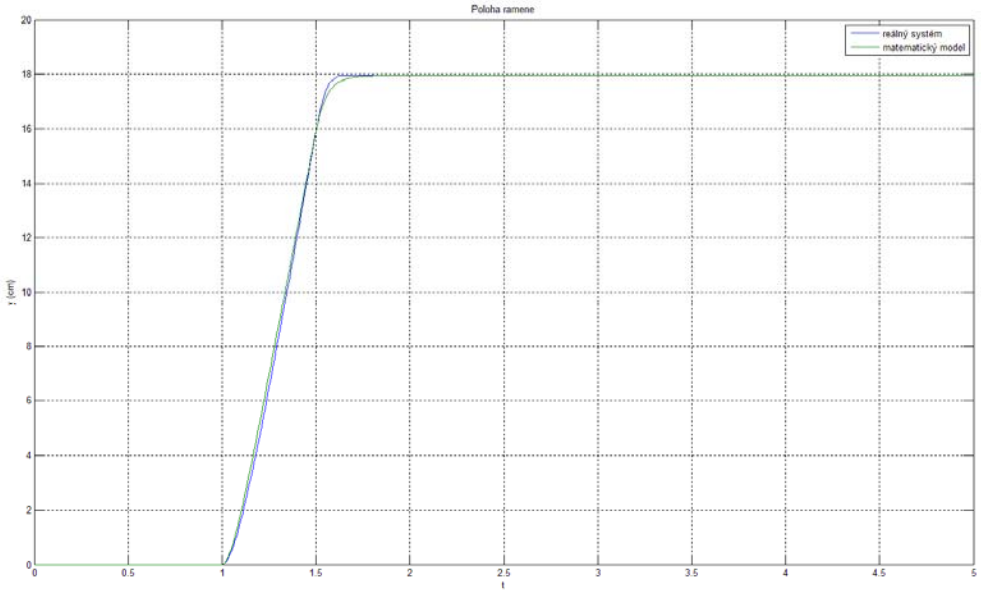


Obrázek 21 - průběh kývání závaží na lanku

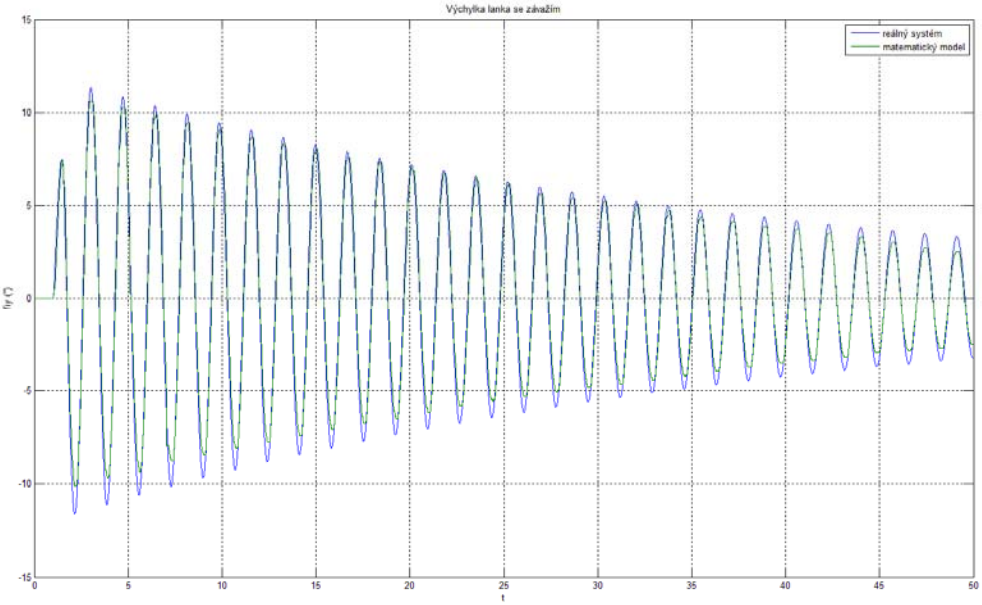
Naviják



Obrázek 22 - průběh vstupní veličiny



Obrázek 23 - průběh polohy navijáku



Obrázek 24 - průběh kývání závaží na lanku

Shrnutí

Identifikoval jsem klíčové systémy portálového jeřábu. Systémy pojezdu ramene a pojezdu navijáku jsou astatické systémy druhého řádu, oba systémy lanka se závažím jsou kmitavé systémy druhého řádu s nenulovým tlumením.

Parametry systémů jsou následující:

- Pojezd ramene

$$A_{pr} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -5.76 \end{bmatrix}$$
$$B_{pr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$
$$C_{pr} = \begin{bmatrix} 540.83 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -5.76 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_{pr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$G_{pr} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s\,(0.0018\,s\ +\ 0.0107)} & 0 \\ \frac{1}{s\ +\ 5.7627} & 0 \\ \frac{1}{0.1735\,s\ +\ 1} + 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Lanko se závažím (rameno)

$$A_{lzr} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -13.52 & -0.062 \end{bmatrix}$$
$$B_{lzr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.096 & -1.539 & 0 \end{bmatrix}$$
$$C_{lzr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 102.11 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_{lzr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{lzr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{0.0459s^2 + 0.0028s + 0.6202} & \frac{-1}{0.0028s^2 + 1.77 \cdot 10^{-4}s + 0.0385} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Pojezd navijáku

$$A_{pn} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -17.6 \end{bmatrix}$$
$$B_{pn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$
$$C_{pn} = \begin{bmatrix} 502.02 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -17.6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_{pn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$G_{pn} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s\,(0.002\,s\ +\ 0.035)} & 0 \\ \frac{1}{s\ +\ 17.6} & 0 \\ \frac{1}{0.0568\,s\ +\ 1} + 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Lanko se závažím (naviják)

$$A_{lzn} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -13.54 & -0.053 \end{bmatrix}$$
$$B_{lzn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0818 & -1.539 & 0 \end{bmatrix}$$
$$C_{lzn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -225 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_{lzn} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{lzn} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{0.0115s^2 + 6.14 \cdot 10^{-4}s + 0.1562} & \frac{1}{6.14 \cdot 10^{-4}s^2 + 3.26 \cdot 10^{-5}s + 0.0083} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dále jsem určil převodní konstanty sytému navíjení.

Provedl jsem ověření matematického modelu porovnáním s reálnými naměřenými průběhy.

Řízení

Účelem řízení portálového jeřábu je možnost přemístit závaží na lanku z bodu A do bodu B a při tom lanko pokud možno co nejméně rozhoupat. Pro řízení jeřábu jsem použil jednak klasický regulátor a dále jsem navrhl stavový regulátor.

Všechny regulátory byly testovány, aby s jeřábem najely z výchozí polohy na polohu [50;20].

P regulátor

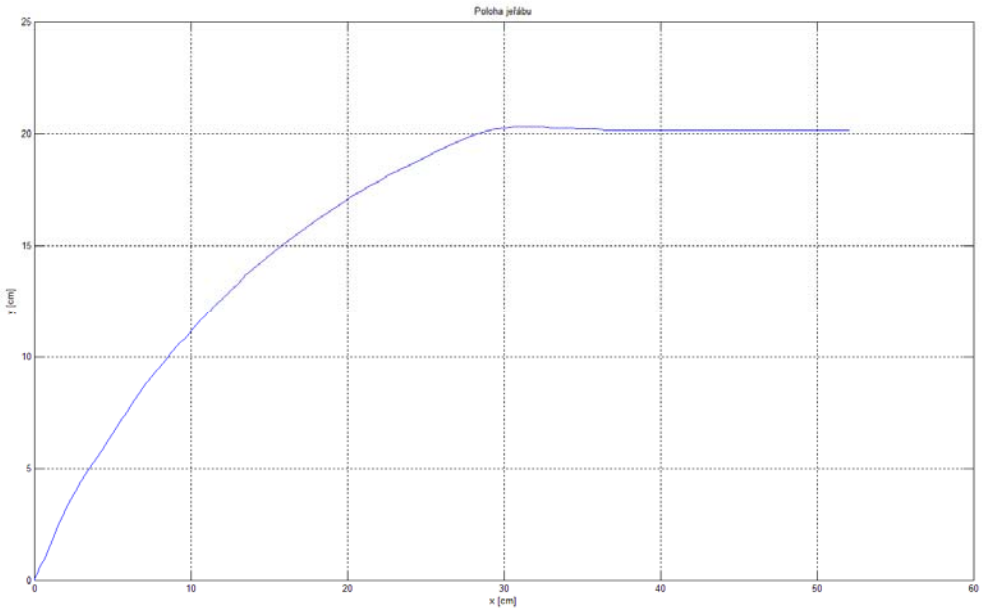
Pomocí MATLAB nástroje *sisotool* jsem navrhl klasický regulátor pro polohu jeřábu. Vzhledem k tomu, že jak pojezd ramene, tak pojezd navijáku v sobě obsahují integrační složku, není potřeba jí přidávat do regulátoru. Ukázalo se, že není potřeba přidávat ani derivační složku, protože systém sám o sobě je poměrně rychlý. Návrh nakonec vedl na P regulátor:

	zesílení
pojezd ramene	0,01
pojezd navijáku	0,01

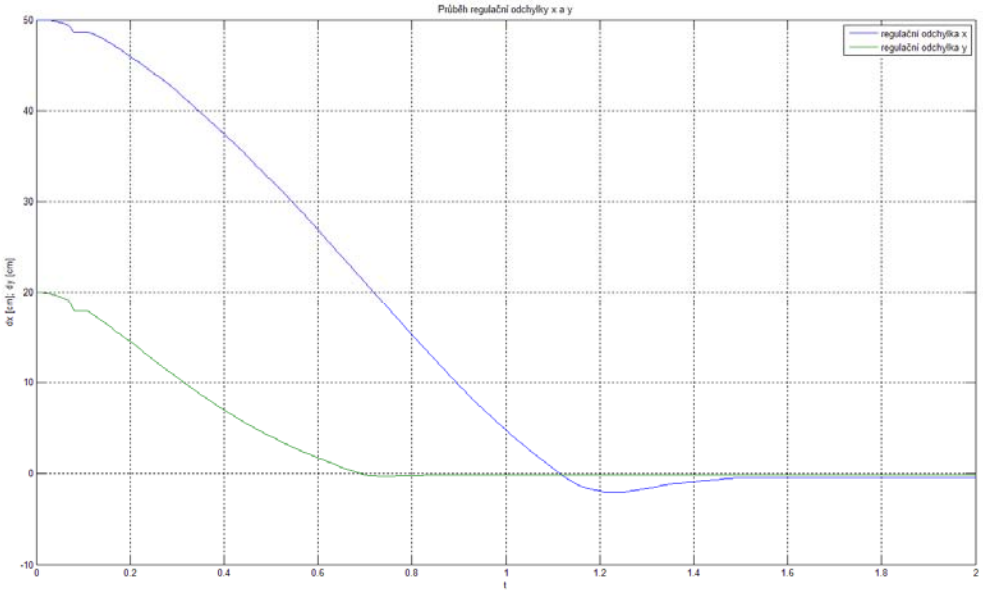
Tabulka 10 - parametry P regulátoru

Schéma zapojení regulátoru je v příloze 3.

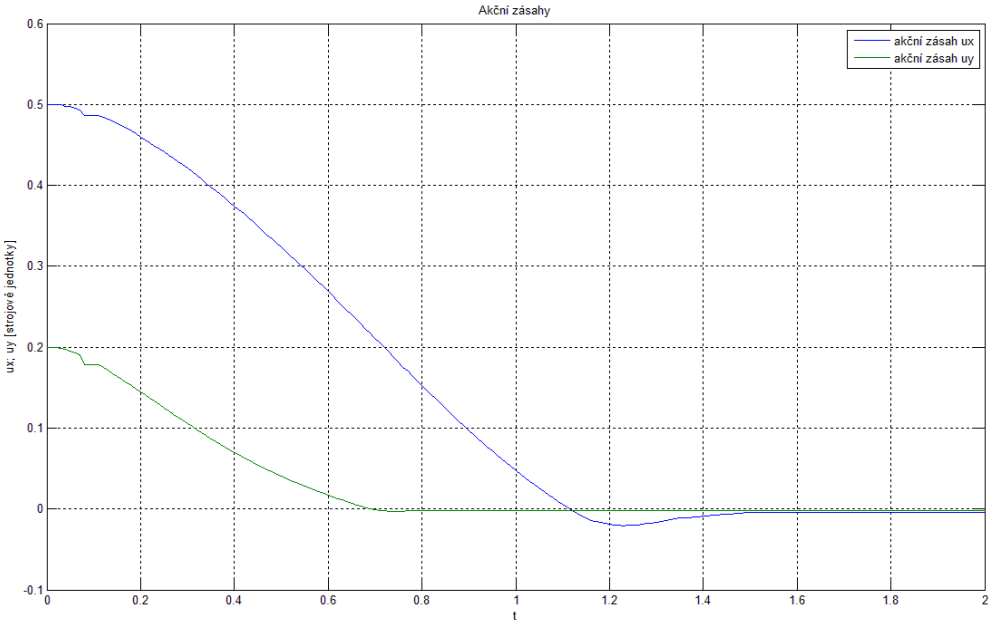
Grafy průběhů jednotlivých veličin při použití P regulátoru:



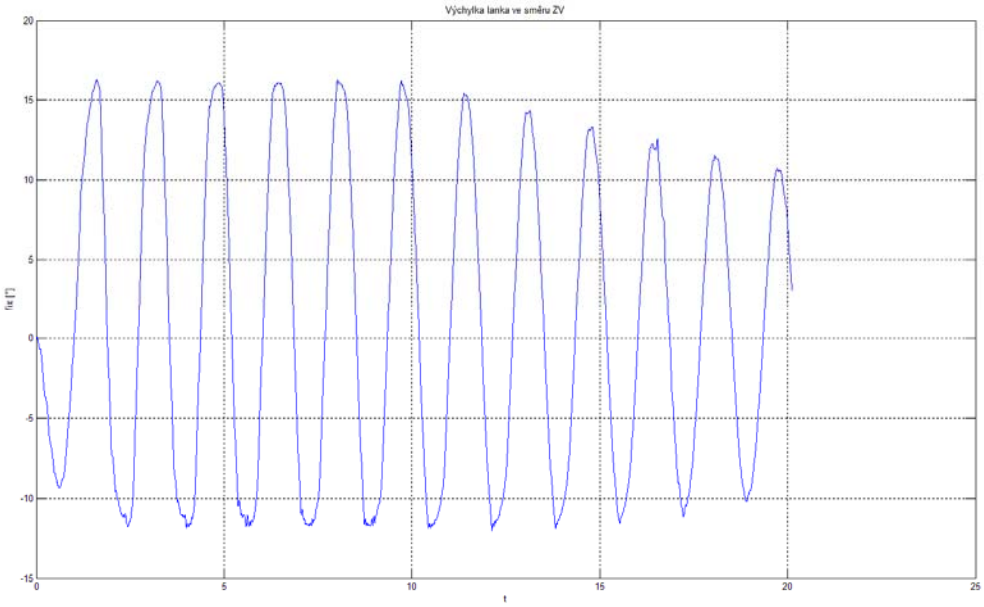
Obrázek 25 - průběh polohy jeřábu



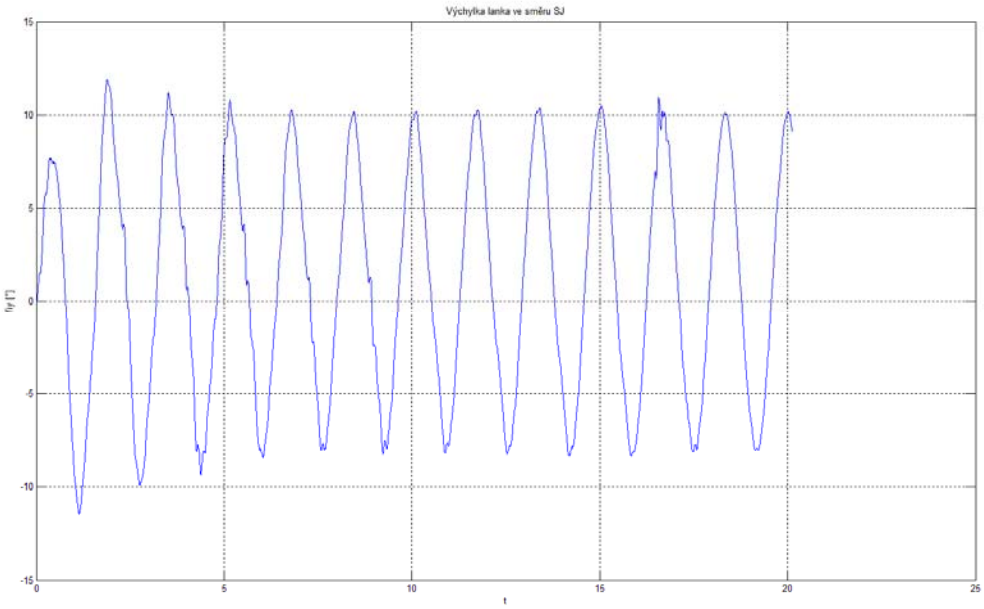
Obrázek 26 - regulační odchylky x a y



Obrázek 27 - akční zásahy



Obrázek 28 - výchylka lanka ve směru ZV



Obrázek 29 - výchylka lanka ve směru SJ

Z naměřených průběhů je vidět, že jeřáb sice najel na požadovanou pozici, ale za cenu extrémního rozhoupání lanka. Malá odchylka v poloze je způsobena vstupní necitlivostí modelu, která je sice částečně kompenzována, ale až pro vstupy v absolutní hodnotě vetší než 0.01.

Velké rozkmitání lanka by se dalo částečně kompenzovat kaskádovým zapojením dvou PID regulátorů podle schématu v příloze 4.

Toto řešení jsem z důvodu nedostatku času nerealizoval.

Stavový regulátor

Abych zlepšil parametry regulace, navrhl jsem sledovací LQ regulátor.

Pro potřeby návrhu tohoto regulátoru jsem potřeboval sloučit jednotlivé subsystémy to větších celků. Vznikly tak systém Rameno sloučením pojezdu ramene a lanka se závažím (rameno) a systém Naviják sloučením pojezdu navijáku a lanka se závažím (naviják). Spojení systémů jsem realizoval pomocí matic sytému takto:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ B_2C_1 & A_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2D_1 \end{bmatrix} u$$

$$y = [D_2C_1 \quad C_2]x + D_2D_1u$$

Dalším krokem, který jsem musel udělat, byla redukce systému tak, aby měl stejný počet vstupů jako výstupů. Bez této úpravy se nedařilo projít algoritmem pro návrh sledovacího LQ regulátoru. Proto jsem z obou systémů odstranil výstup l.

Po těchto úpravách jsem nakonec získal tyto matice dvou systémů:

- Rameno

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -5.76 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 8.77 & -13.52 & -0.0621 \end{bmatrix}$$
$$B_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1.5385 & 0 \end{bmatrix}$$
$$C_r = \begin{bmatrix} 540.8298 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 228.335 & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- Naviják

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -17.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 26.9954 & -13.54 & -0.0531 \end{bmatrix}$$
$$B_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1.5385 & 0 \end{bmatrix}$$
$$C_n = \begin{bmatrix} 502 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1059 & 0 \end{bmatrix}$$
$$D_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Pro tyto dva systémy jsem navrhoval LQ regulátor zvlášť.

Pozorovatel

Abych mohl navrhnout stavový regulátor, potřebuji znát stavy v systému. Protože na reálném modelu neznám všechny stavy, navrhl jsem pozorovatele stavu – Kalmanův filtr. K návrhu jsem použil standardní algoritmus z [4] a poskytl mu reálná naměřená data a matematické modely.

Kovarianční matice Kalmanova filtru jsem navrhl experimentálně.

Výsledky návrhu:

- Rameno
  - Kovarianční matice: $Q_{kr} = diag([1000, 10, 1, 1])$; $R_{kr} = 1$
  - Kalmanovo zesílení $L_{kr} = \begin{bmatrix} 0.0018 & 3.05 \cdot 10^{-5} \\ 1.38 \cdot 10^{-6} & 0.003 \\ 1.49 \cdot 10^{-8} & 0.0045 \\ 1.55 \cdot 10^{-6} & 0.0154 \end{bmatrix}$
- Naviják
  - Kovarianční matice: $Q_{kn} = diag([1000, 10, 1, 1])$; $R_{kn} = 1$
  - Kalmanovo zesílení $L_{kn} = \begin{bmatrix} 0.0020 & -2.67 \cdot 10^{-6} \\ 4.27 \cdot 10^{-7} & -2.44 \cdot 10^{-4} \\ 8.09 \cdot 10^{-9} & -9.84 \cdot 10^{-4} \\ 8.696 \cdot 10^{-7} & -0.004 \end{bmatrix}$

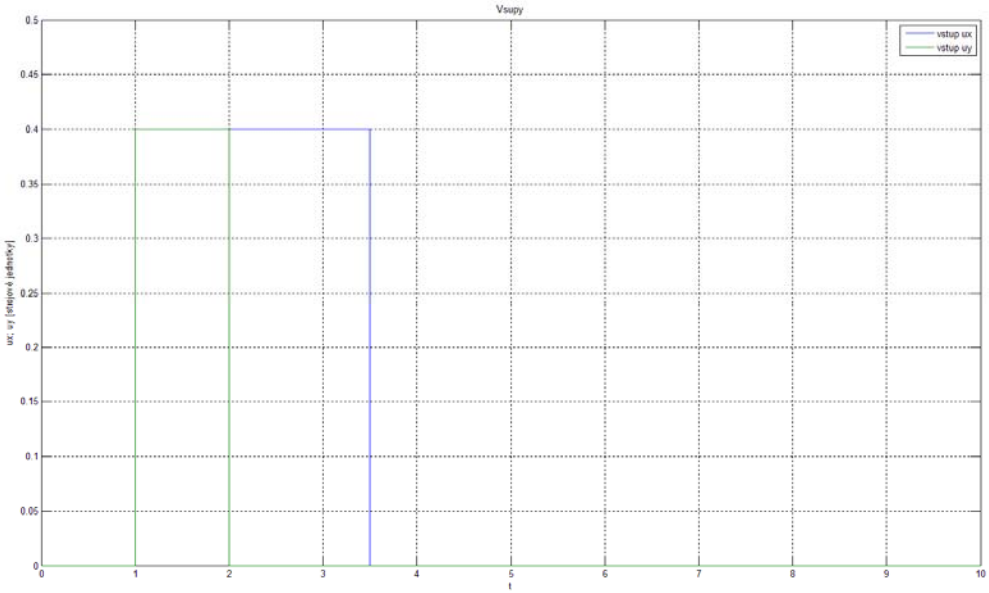
Kalmanův filtr jsem testoval na zapojení v příloze 5.

Odhadnuté stavy vykazovaly poměrně velké oscilace při ustáleném výstupu. Je to proto, že Kalmanův filtr přenáší výkyv lanka zpět na pohyb ramene či navijáku (frekvence oscilací byla stejná jako frekvence kývání lanka). Proto jsem obě kalmanova zesílení ručně upravil, abych tento nežádoucí jev (kývající-se lanko v reálu polohu navijáku ani ramene neovlivňuje) odstranil.

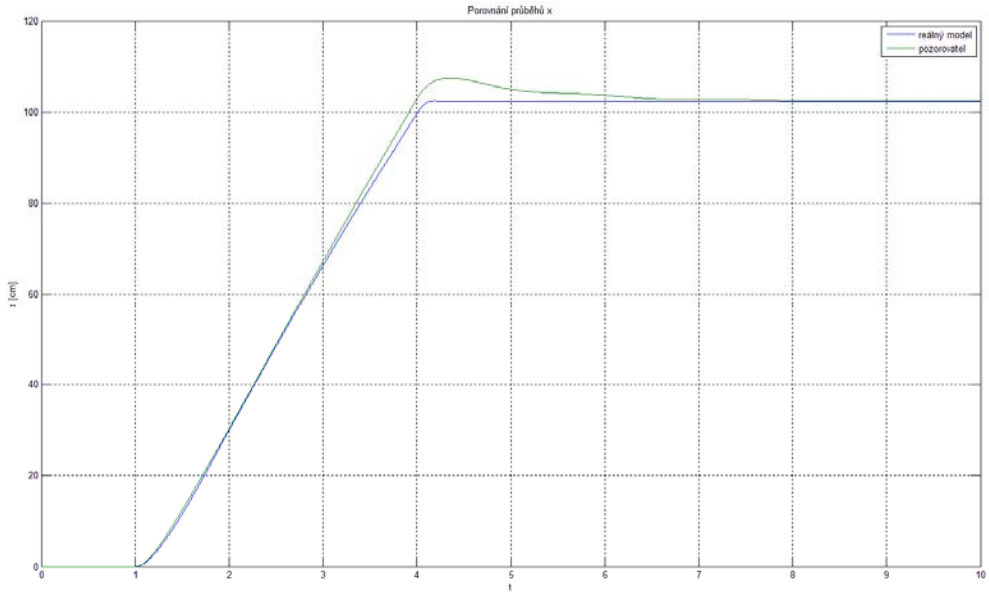
$$L_{kr} = \begin{bmatrix} 0.0018 & 0 \\ 1.38 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 1.49 \cdot 10^{-8} & 0.0045 \\ 1.55 \cdot 10^{-6} & 0.0154 \end{bmatrix}$$

$$L_{kn} = \begin{bmatrix} 0.0020 & 0 \\ 4.27 \cdot 10^{-7} & 0 \\ 8.09 \cdot 10^{-9} & -9.84 \cdot 10^{-4} \\ 8.696 \cdot 10^{-7} & -0.004 \end{bmatrix}$$

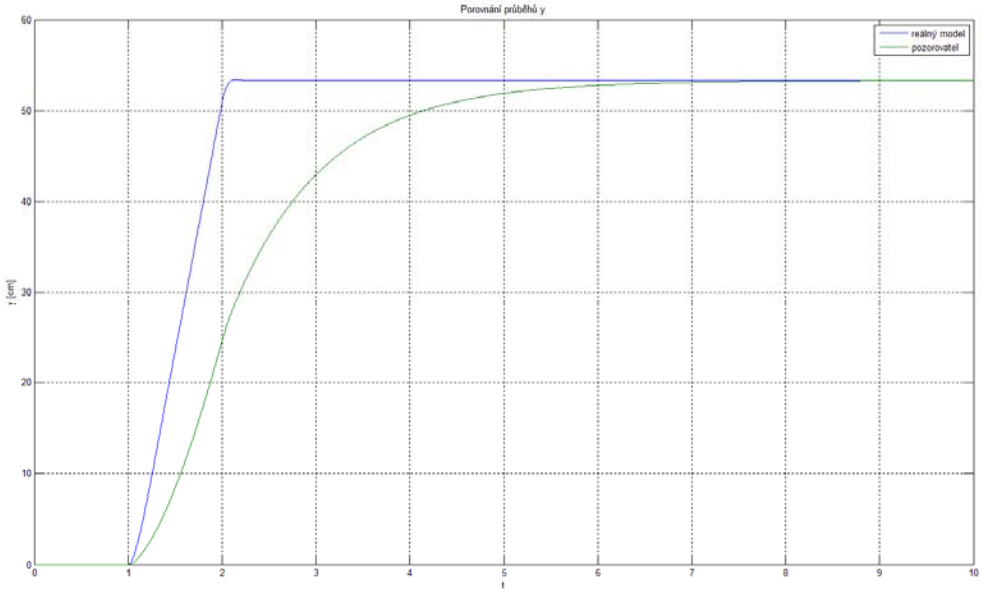
Následně jsem ověřil funkci kalmanova filtru:



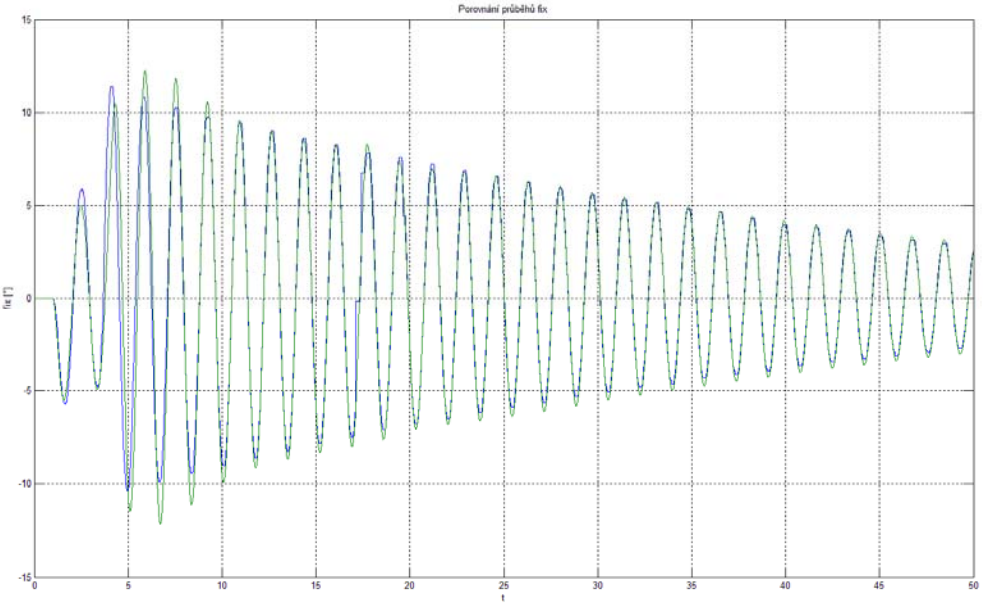
Obrázek 30 - průběh vstupů



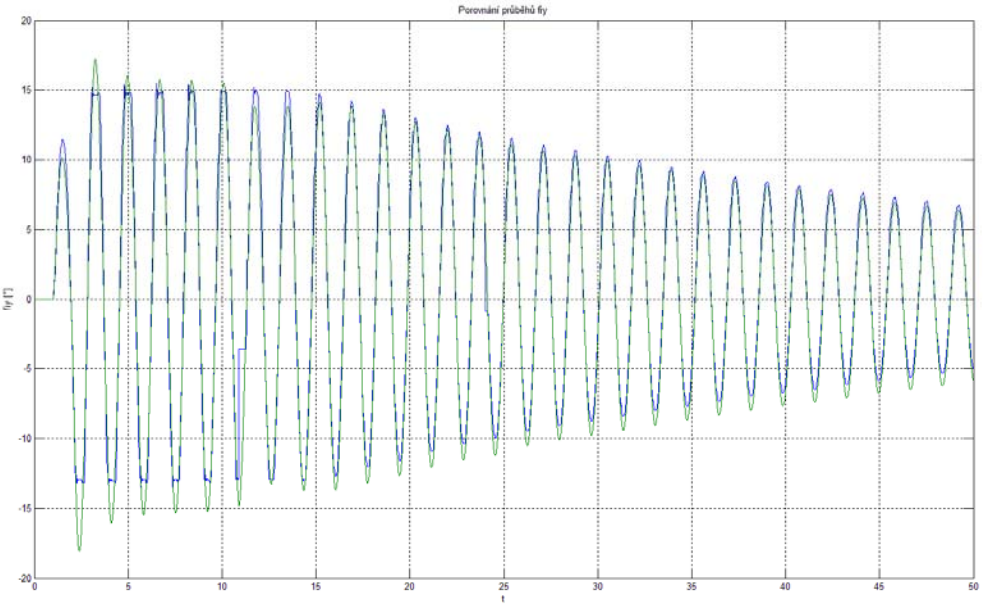
Obrázek 31 - porovnání souřadnic x



Obrázek 32 - porovnání souřadnic y



Obrázek 33 - porovnání výkyvu lanka ve směru ZV



Obrázek 34 - porovnání výkyvu lanka ve směru SJ

Vezmeme-li v úvahu dynamiku systémů pojezdu, tak Kalmanův filtr funguje dle očekávání (u souřadnice y odpovídá přechodový děj systému 2 řádu).

LQ regulátor

Pro systém jsem navrhl 2 sledovací LQ regulátory (jeden pro Rameno a jeden pro Naviják).

Návrh sledovacího LQ regulátoru spočívá v rozšíření příslušného systému o fiktivní stavy zahrnující v sobě řízení (viz. [4]). Dále pak probíhá běžný návrh LQ regulátoru podle [4]. Váhové matice LQ regulátoru pak neváží stavy, ale váží regulační odchylku od požadované hodnoty.

Abych mohl jednotlivé odchylky správně vážit, bylo potřeba váhy normovat („vyvážit“). To jsem udělal tak, že jsem každou hodnotu ve váhové matici vydělil kvadrátem její maximální hodnoty. Při vážení jsem pak měnil jen čitatele.

Pro porovnání jsem navrhl dva LQ regulátory. První má váhu více přenesenou na regulační odchylku polohy, druhý na výchylku lanka. To znamená, že první regulátor lépe a rychleji dojede se systémem na určené místo, ovšem při větší výchylce lanka. Druhý regulátor dojede o něco pomaleji, ale výchylka lanka je menší.

Při aplikaci LQ regulátorů jsem pozoroval kmitání celé konstrukce modelu. Odhadem vypadalo, že frekvence kmitů je přibližně stejná, jako vzorkovací perioda pro měření dat z modelu (0.01 s). Proto jsem vzorkovací periodu změnil na 0.03 s, čímž jsem malinko zpomalil reakce regulátoru a kmitání konstrukce jsem velmi redukoval.

Pro další zlepšení regulace jsem do stavové zpětné vazby zavedl reálné hodnoty z modelu pro polohu a výchylku lanka. Musel jsem u toho respektovat to, že ve stavech nejsou reálné fyzikální hodnoty. Proto jsem hodnoty redukoval o příslušné konstanty v příslušných maticích C.

Zapojení LQ regulátoru v simulinku je v příloze 6.

LQ 1

Váhy LQ regulátoru	
x	100
fi_x	10
ux	100
y	1000
fi_y	10
uy	10

Tabulka 11 - váhy prvního LQ regulátoru

Hodnoty Kalmanova zesílení jsou:

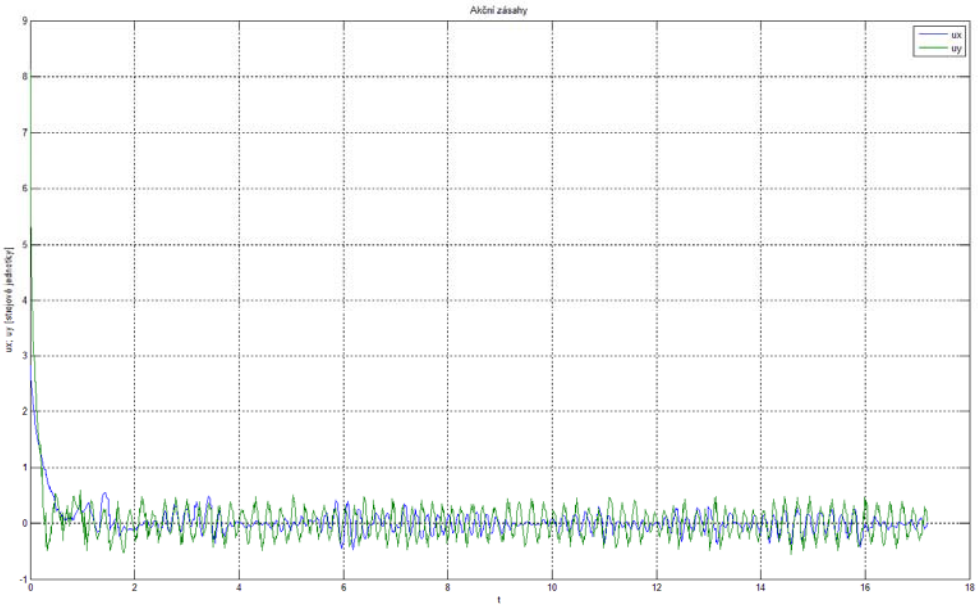
- Rameno

$$K_{rr} = \begin{bmatrix} -0.056 & 2.27 \cdot 10^{-8} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$K_{xr} = \begin{bmatrix} 30.37 & 7.62 & -12.82 & 1.13 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

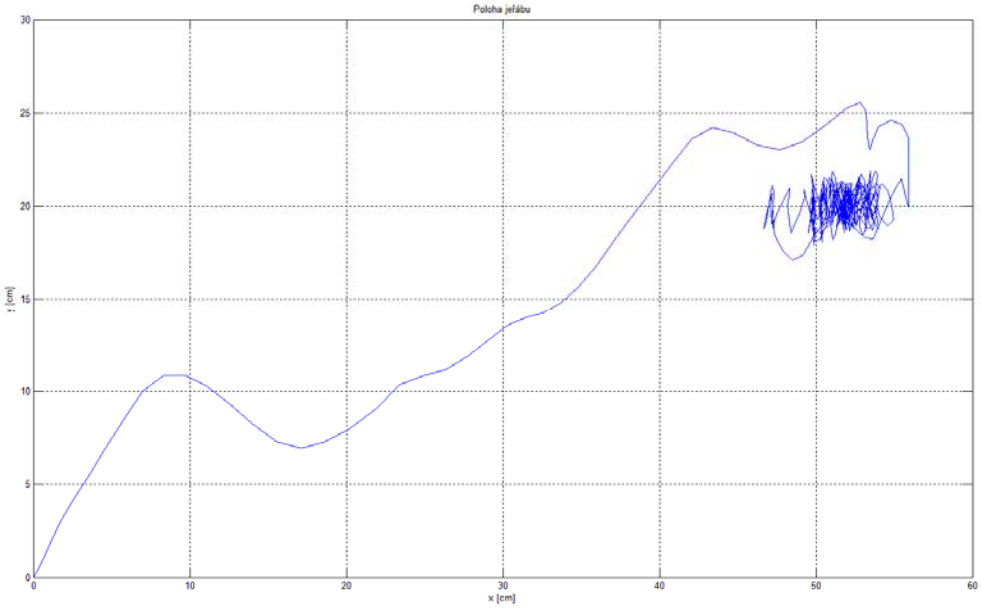
- Naviják

$$K_{rn} = \begin{bmatrix} -0.41 & 1.25 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$K_{xn} = \begin{bmatrix} 855.12 & 69.56 & -29.39 & 25.62 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

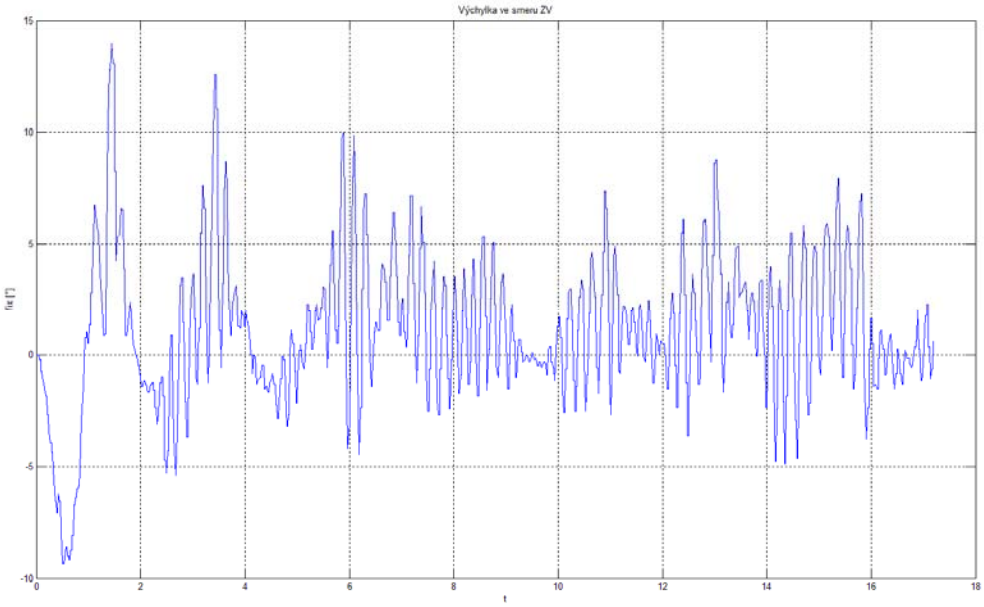
Průběhy veličin jsou na následujících grafech:



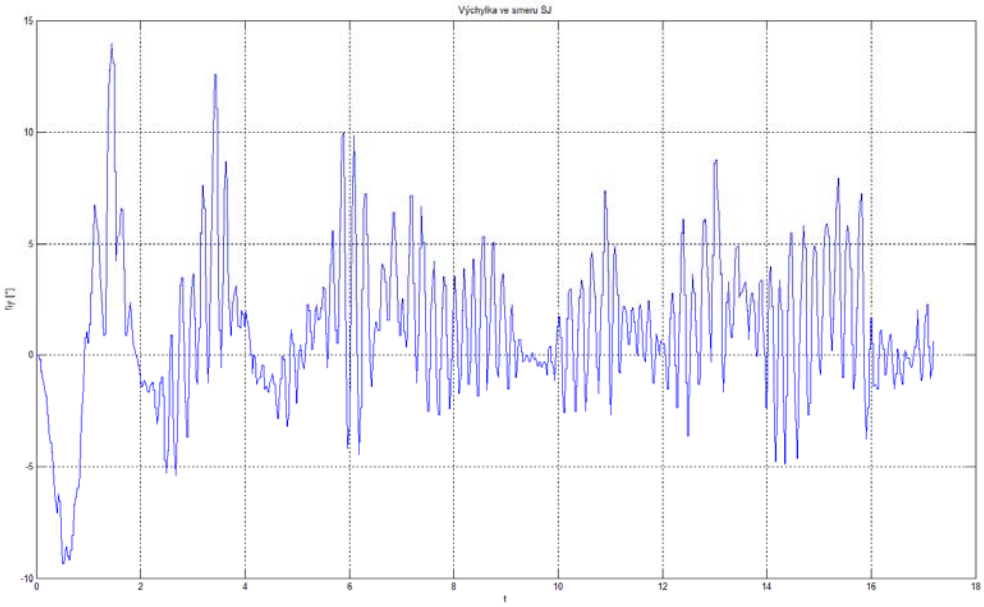
Obrázek 35 - akční zásahy



Obrázek 36 - průběh polohy jeřábu



Obrázek 37 - výchylka lanka ve směru ZV



Obrázek 38 - výchylka lanka ve směru SJ

LQ 2

Váhy LQ regulátoru	
x	10
fi_x	100
ux	100
y	100
fi_y	100
uy	10

Tabulka 12 - váhy prvního LQ regulátoru

Hodnoty Kalmanova zesílení jsou:

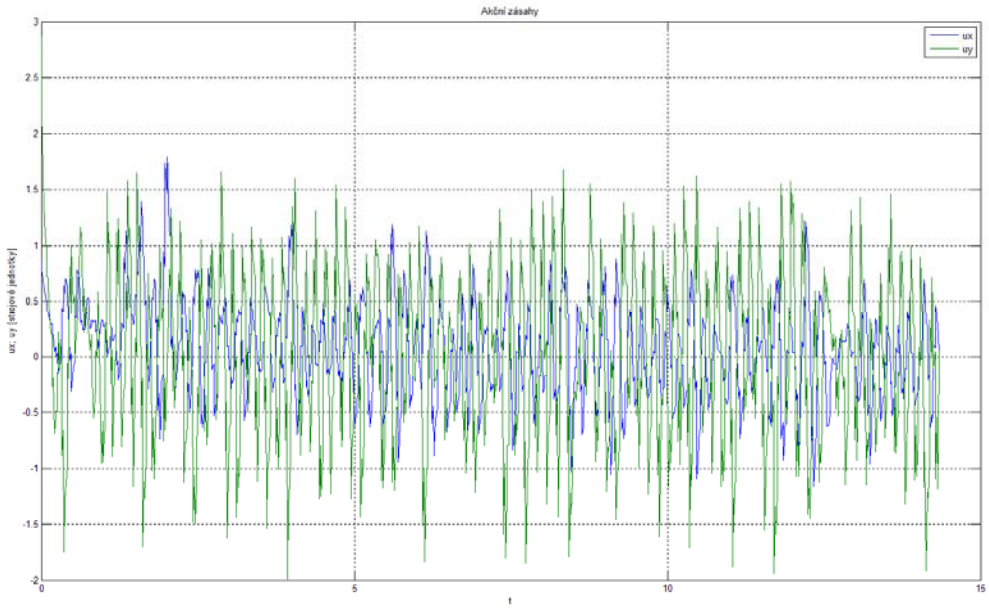
- Rameno

$$K_{rr} = \begin{bmatrix} -0.0172 & 1.17 \cdot 10^{-8} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$K_{xr} = \begin{bmatrix} 9.28 & 5.56 & -42.07 & -1.53 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

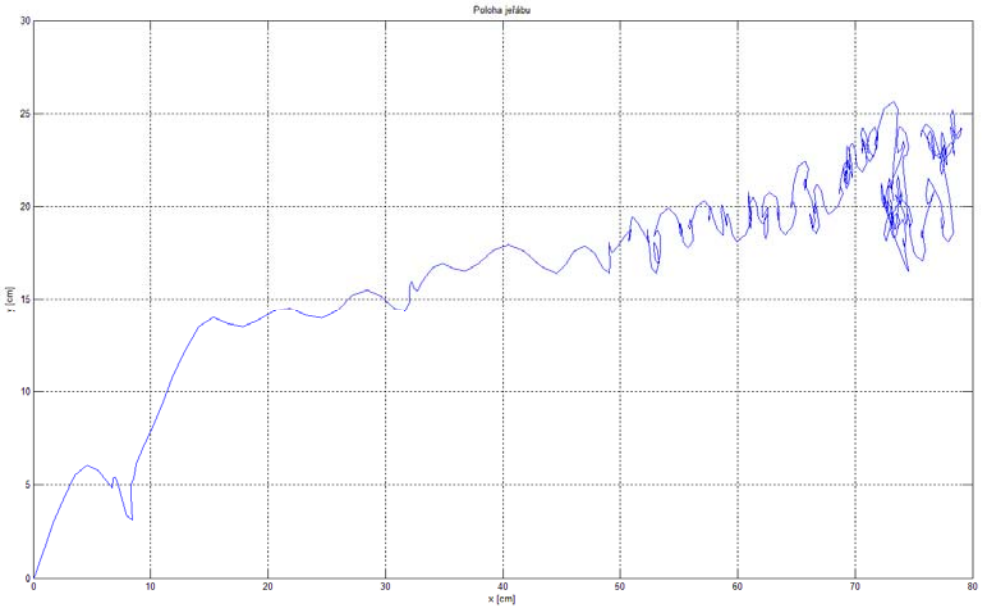
- Naviják

$$K_{rn} = \begin{bmatrix} -0.1434 & -2.55 \cdot 10^{-9} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$K_{xn} = \begin{bmatrix} 301.93 & 123.75 & -289.36 & 63.46 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

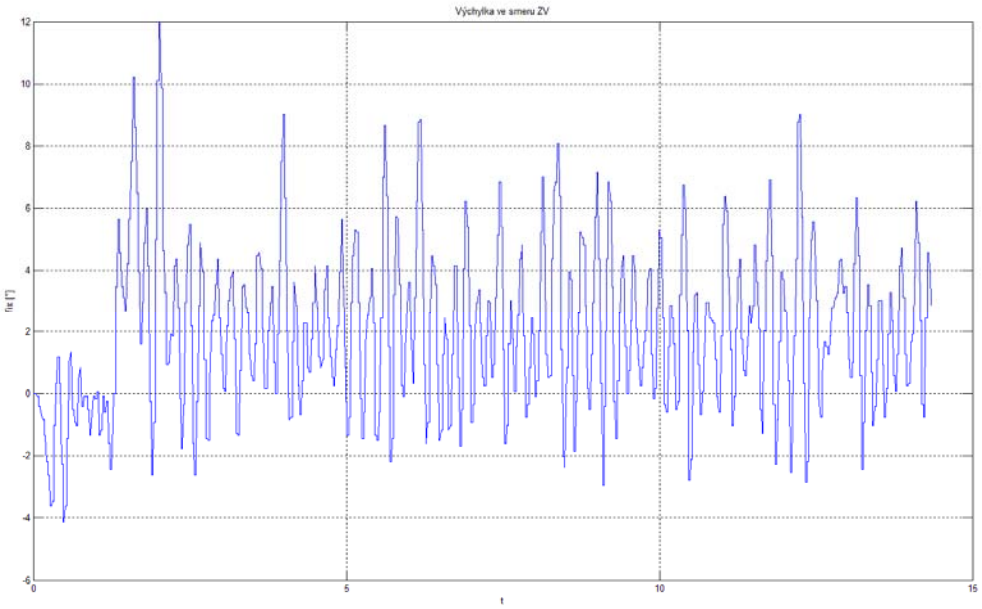
Průběhy veličin jsou na následujících grafech:



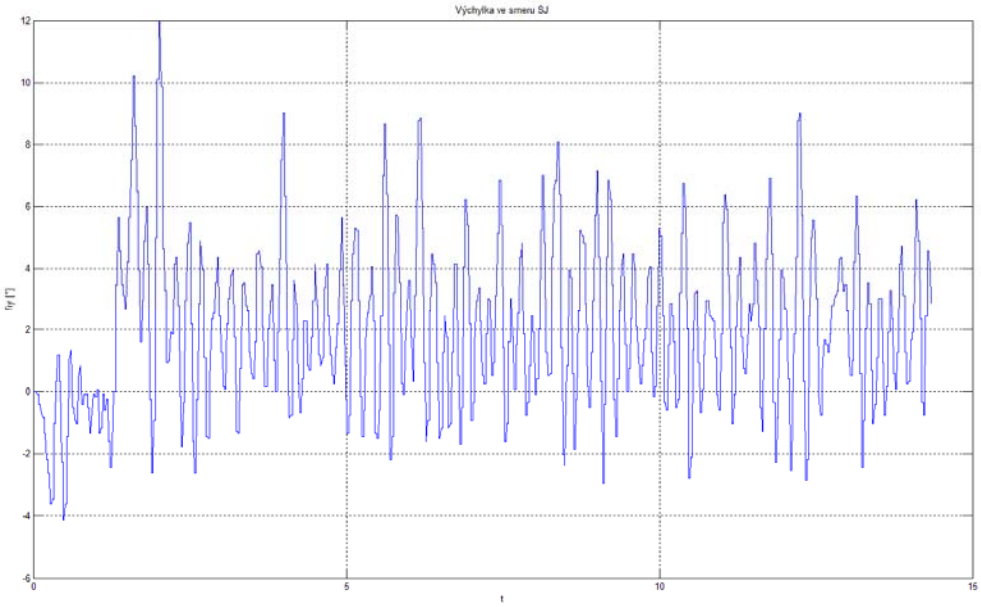
Obrázek 39 - akční zásahy



Obrázek 40 – průběh polohy jeřábu



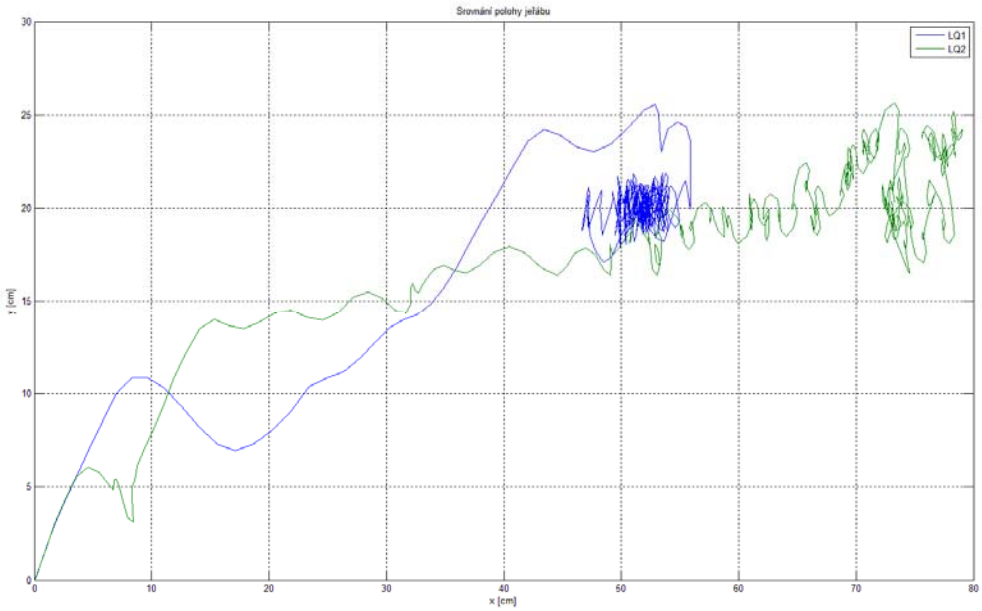
Obrázek 41 - výchylka lanka ve směru ZV



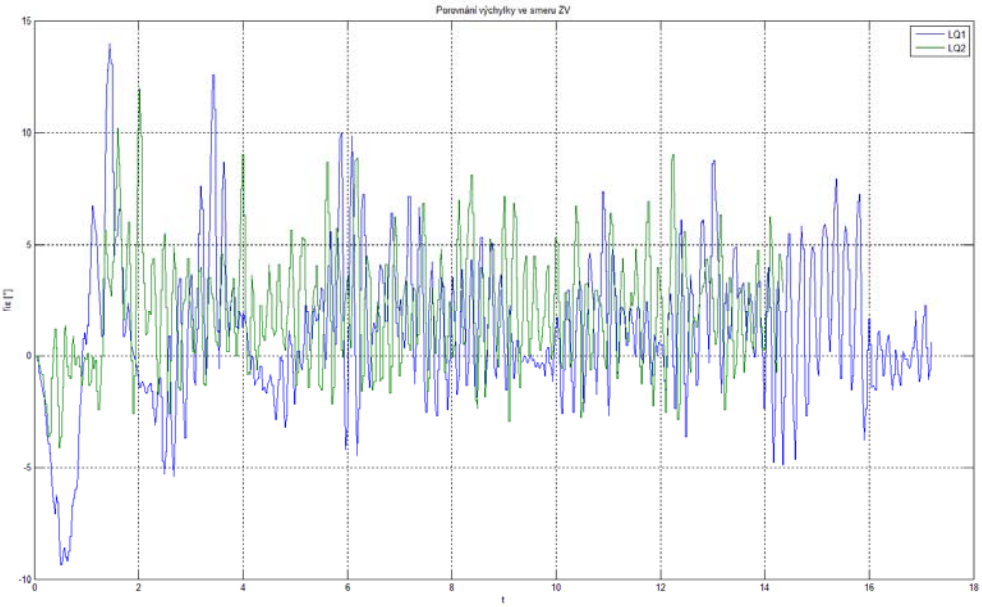
Obrázek 42 - výchylka lanka ve směru SJ

Srovnání obou LQ regulátorů

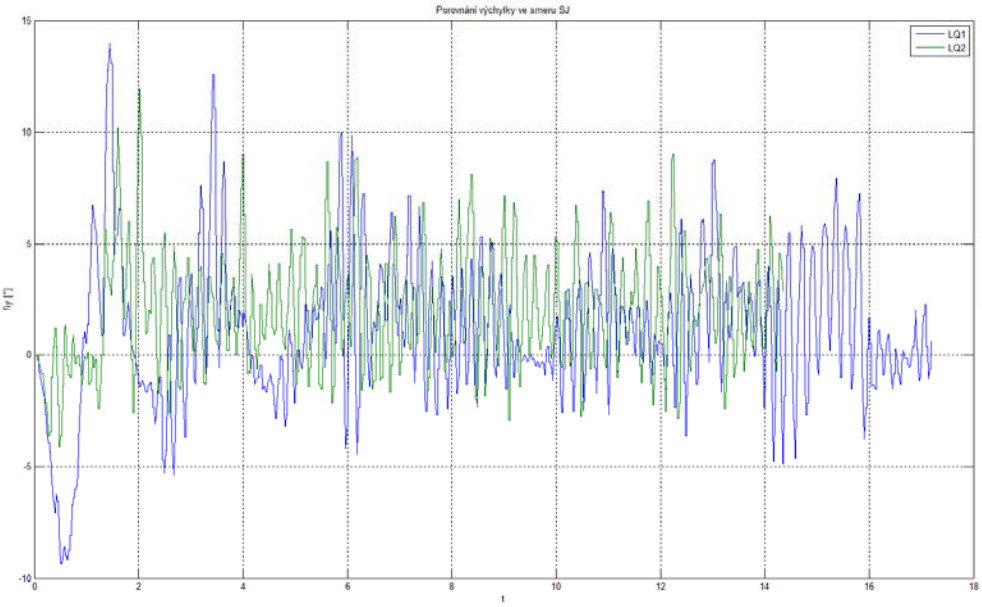
Na následujících grafech je srovnání výstupních veličin při regulaci oběma regulátory:



Obrázek 43 - porovnání průběhů polohy jeřábu



Obrázek 44 - srovnání výchylky lanka ve směru ZV



Obrázek 45 - srovnání výchylky lanka ve směru SJ

Z grafů je vidět, že první regulátor opravdu „trefil“ požadovanou polohu jeřábu s větší přesností. Zároveň je vidět, že nejenom, že maximální výchylka lanka je u druhého regulátoru menší, ale i rozkmit je v průměru o něco nižší u druhého regulátoru než u prvního.

V porovnání z P regulátorem, je zcela zjevné, že se regulátory snaží utlumit výchylku lanka. Je též vidět, že je tak částečně na úkor přesnosti požadované polohy.

Ani jeden z regulátorů není příliš dokonalý. Pro zlepšení regulace by bylo třeba lépe „naladit“ váhy ve váhových maticích LQ regulátoru. To by se dalo ideálně udělat tak, že by se do 3D grafu vykreslily na osu x a y jednotlivé váhy odchylek výstupních veličin a na osu z veličina indikující kvalitu regulace (například součet regulačních odchylek). Při dostatečném množství měření by vznikl graf, na kterém by se dalo najít sedlo na ose z a z ostatních os odečíst ideální parametry vah vzhledem ke kvalitativní veličině. Toto jsem bohužel do své práce nestihl zahrnout.

Závěr

Ve své práci jsem provedl identifikaci laboratorního modelu portálového jeřábu. Dále jsem navrhl P regulátor a dva LQ regulátory pro tento model.

Při identifikaci jsem nedodržoval reálné fyzikální hodnoty stavů. Musel jsem s tím následně počítat při regulaci. Zároveň to jistě přispělo k jisté nepřesnosti matematického modelu. Dále k nepřesnostem modelu přispěly mnou zanedbané skutečnosti. Dále pak hystereze statických charakteristik se negativně projevily v matematickém modelu a nakonec i ve kvalitě regulace.

Pro zpřesnění matematického modelu by bylo vhodné zachovat fyzikální hodnoty všech stavů a obecně poněkud přesněji proměřit statické charakteristiky a pásmo necitlivosti vstupů. U systému navíjení mi celou situaci komplikoval fakt, že výstup z potenciometru je značně zašuměn. Proto jsem se rozhodl zvolit alternativní způsob dosažení pracovního bodu. Zvláštností tohoto systému je, že se průběžně mění offset potenciometru. Nepřišel jsem na to, co je příčinou tohoto posuvu.

Navržené regulátory nejsou zcela v pořádku. Navržený P regulátor sice poměrně přesně dosáhne správné polohy, ale nebere v potaz výchylku lanka. Pro její kompenzaci by bylo třeba navrhnout minimálně kaskádní variantu tohoto regulátoru. U tohoto regulátoru se nejméně projevila nedokonalost matematického modelu.

Navržené LQ regulátory potvrzují to, že je potřeba mít velmi přesný matematický model, aby regulátory správně fungovali. Zde situaci značně komplikuje fakt, že existuje jistá hystereze ve statických charakteristikách. Další poměrně nepříjemným faktem je vstupní necitlivost systémů pojezdů. Tuto necitlivost jsem se snažil kompenzovat, ovšem jen s částečným úspěchem. Pro lepší kompenzaci by asi bylo lepší celý rozumný interval vstupů rozdělit na diskrétní části a sestavit z nich jakousi look-up tabulku, která by hodnoty přepočítávala tak, aby systém reagoval na jakoukoliv hodnotu okolo nuly adekvátně velkou odezvou.

Dále by se LQ regulátor dal ještě lépe naladit způsobem, který jsem popsal v části o srovnání obou regulátorů.

Z časových důvodů se mi nepodařilo vytvořit funkční demo k modelu.

Reference

Odkazy v textu

[1] http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/old/mf614.php?lang=cz&p1=1&p2=6&p3=3

[2] http://dce.felk.cvut.cz/sari/SARI-analyzapolu.html

[3] http://dce.felk.cvut.cz/sari/download/other/prechod_skripta.pdf

[4] Ing. Jiří Roubal; Ing. Jaroslav Pekař; Ing. Daniel Pachner, PhD. D.; Prof. Ing. Vladimír Havlena, CSc. Moderní teorie řízení – Cvičení, Vydavatelství ČVUT v Praze 2005, ISBN 80-01-03208-6

Další použité materiály

Prof. RNDr. Pavel, KUBEŠ, CSc.; Doc. RNDr. Zdeněk, KYNCL, DrSc. **Fyzika I**, Vydavatelství ČVUT v Praze, 2003, ISBN 80-01-02671-X

Doc. Ing. Petr, HORÁČEK, CSc. **Systémy a Modely**, Vydavatelství ČVUT v Praze 2001

Prof. Ing. Jan Štecha, CSc.; Doc. Ing. Vladimír Havlena, CSc., **Teorie dynamických systémů**, Vydavatelství ČVUT v Praze 2005,

Doc. Ing. Vladimír Havlena, CSc. **Moderní teorie řízení – Doplňkové skriptum**, Vydavatelství ČVUT v Praze 2001, ISBN 80-01-02036-3

Doc. Ing. Jan John, CSc. **Systémy a řízení**, Vydavatelství ČVUT v Praze 2003, ISBN 80-01-02745-7

Dynamics and control of cranes: a review
Abdel-Rahman, E.M.; Nayfeh, A.H.; Masoud, Z.N.
Dept. of Eng. Sci. & Mech., Virginia Polytech. Inst. & State Univ., Blacksburg, VA, USA
Journal of Vibration and Control , vol.9, no.7 , Page: 863-908
Publisher: Sage Science Press , July 2003

Ing. Jiří Roubal, **Diplomová práce**, 2002

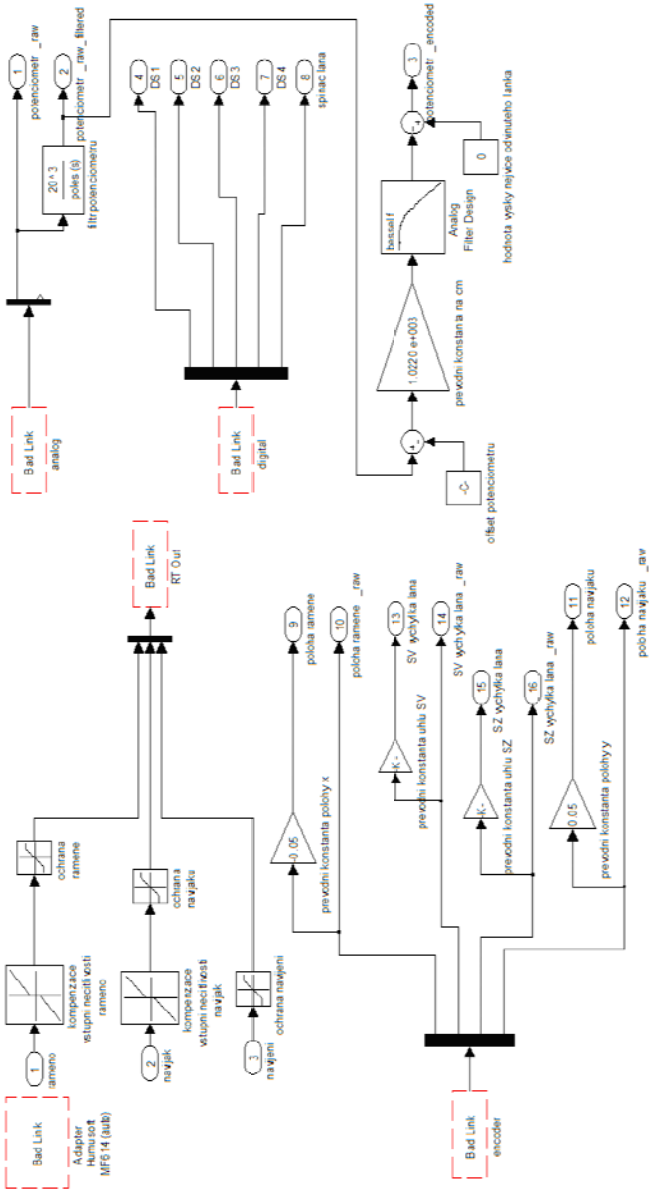
Přílohy

Příloha 1

První přílohou je datové CD, které obsahuje všechna simulinková schémata v původní podobě (*.mdl) a všechny obrázky v této práci použité.

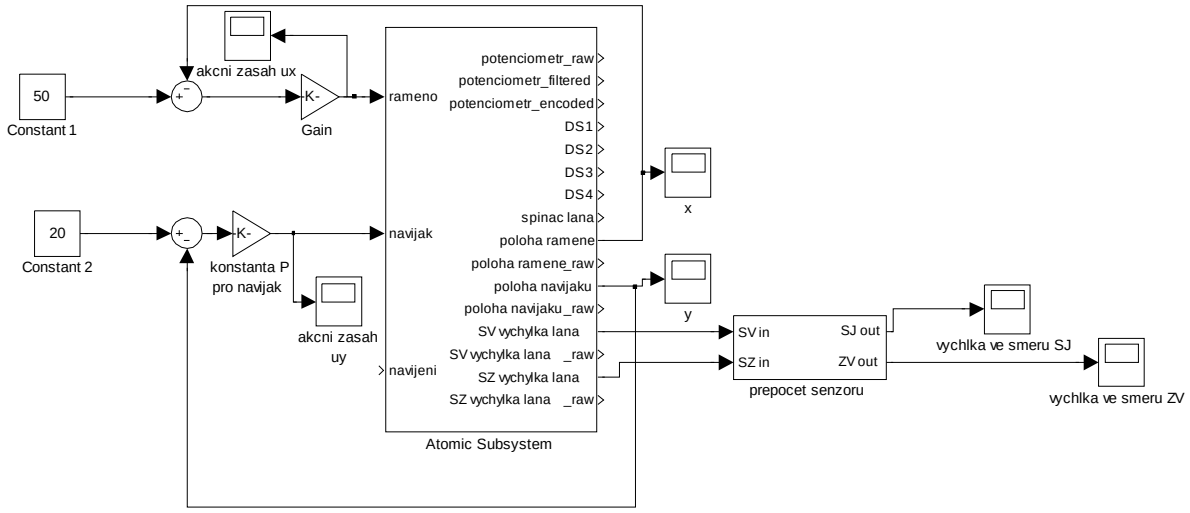
Příloha 2

Simulinkové schéma použité pro práci s laboratorním modelem.



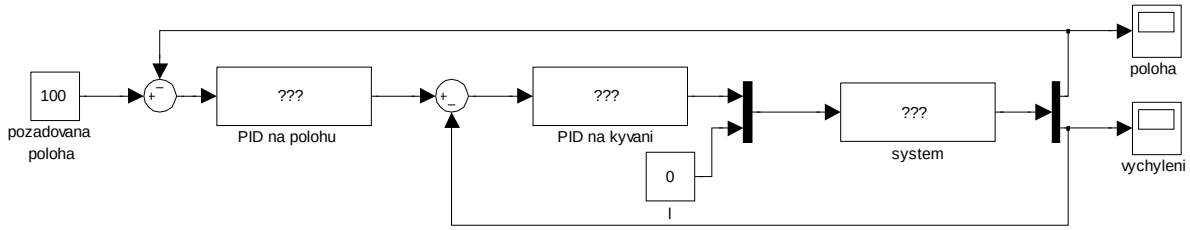
Příloha 3

Simulinkove schéma pro P regulátor (systém pro zjednodušení předpokládá správnou pozici závaží).



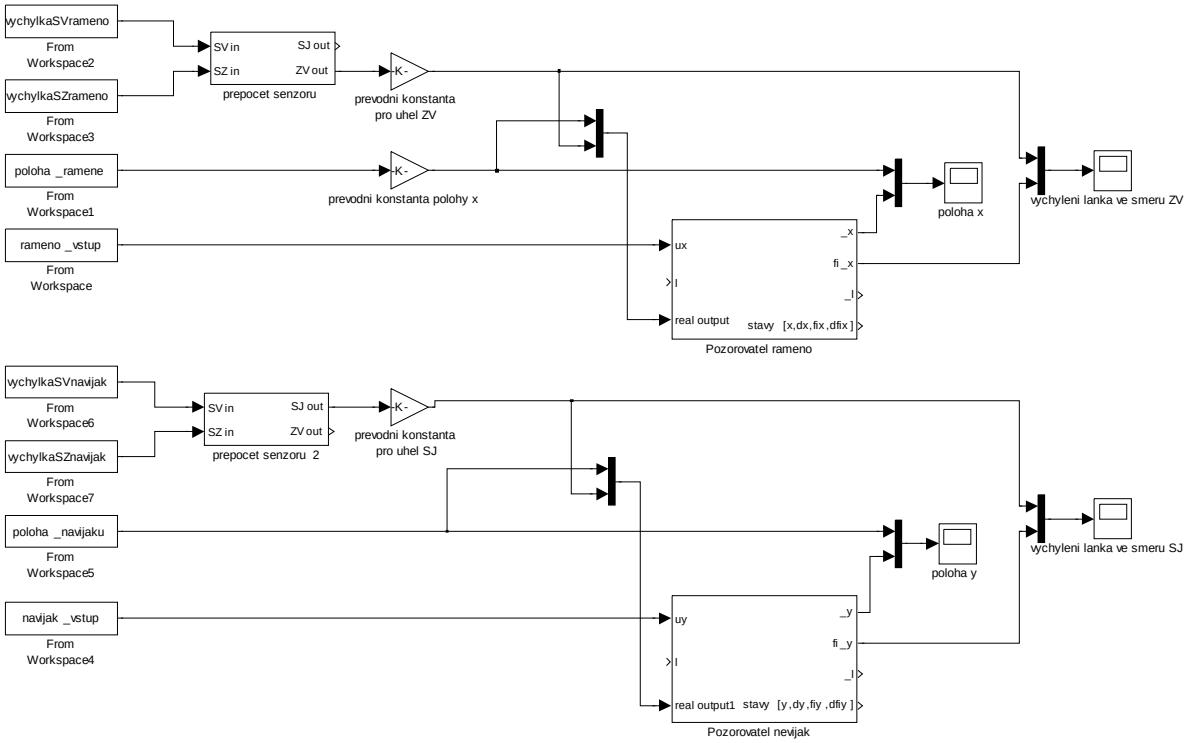
Příloha 4

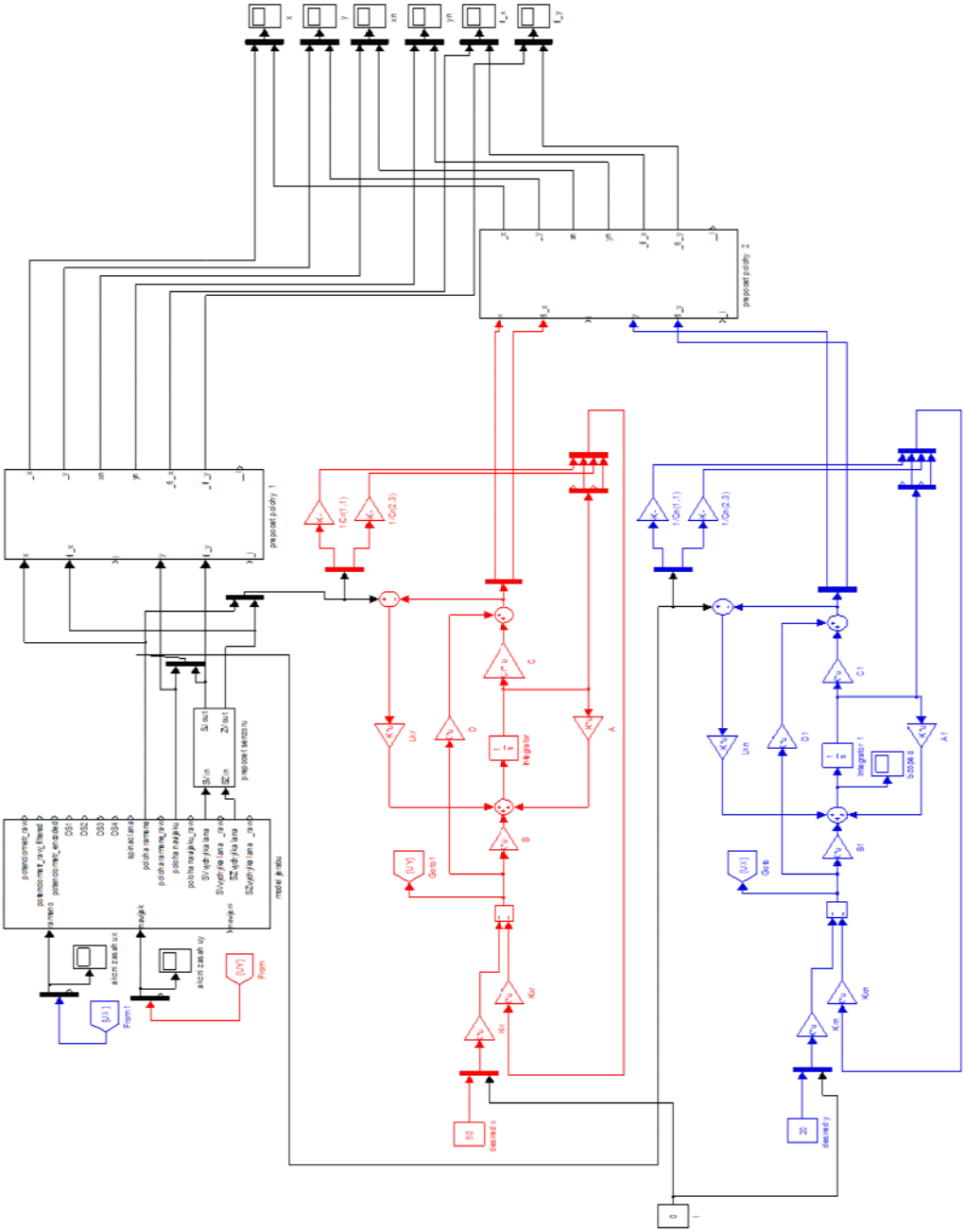
Schematický nákres kaskádního PID regulátoru pro zlepšení regulace.



Příloha 5

Simulinkové schéma pro testování Kalmanova filtru.



Příloha 6

Zapojení reálného modelu, pozorovatele a LQ regulátoru (systém pro zjednodušení předpokládá správnou pozici závaží).