

Laboratorní model CE 151 – Kulička na ploše

CE 151 Ball and Plate Apparatus

Bc. Miroslav Kirchner

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav KIRCHNER**
Osobní číslo: **A09339**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Laboratorní model CE 151 – kulička na ploše**

Zásady pro vypracování:

1. **Důkladně se seznamte s reálným modelem Kulička na ploše CE 151 včetně dostupné dokumentace a literatury.**
2. **Vytvořte zjednodušený matematický model tohoto zařízení.**
3. **Neznámé parametry navrženého matematického modelu určete experimentálně.**
4. **Implementujte vytvořený matematický model do prostředí MATLAB Simulink.**
5. **Porovnejte získané simulační odezvy s reálně naměřenými daty, a to jak v otevřeném, tak i uzavřeném regulačním obvodu.**
6. **Pro tyto účely navrhnete vhodný systém řízení.**
7. **Vytvořte stručný manuál k danému modelu.**
8. **Navrhnete vhodné laboratorní úlohy pro studenty realizovatelné na tomto zařízení.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. CE 151 Ball and Plate Apparatus. Technical manual. Praha: Humusoft s.r.o., 2006. 17 s.
2. CE 151 Ball and Plate Apparatus. Educational manual. Praha: Humusoft s.r.o., 2006. 33 s.
3. ŠTOLFA, M. Návrh a realizace vybraných algoritmů řízení pro laboratorní model kulička na ploše. Ostrava, 2005. 82 s. Diplomová práce na Fakultě strojní VŠB Technické Univerzity Ostrava.
4. HORÁČEK, Petr. Systémy a modely. Praha : ČVUT, 1999. 232 s. ISBN 80-01-01923-3.
5. WELLSTEAD, Peter. Introduction to Physical Modelling. London : Academic Press Ltd, 1979. 244 s. ISBN 0-12-744380-0.
6. BOBÁL, Vladimír. Identifikace systémů. Zlín : UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2009. 128 s. ISBN 978-80-7318-888-7.
7. KARBAN, Pavel. Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. Praha : BEN-technická literatura, 2007. 220 s. ISBN 978-80-251-1448-3.
8. BALÁTĚ, Jaroslav . Automatické řízení. Praha : BEN-technická literatura, 2003. 664 s. ISBN 80-7300-020-2.
9. DOSTÁL, Petr; MATUŠŮ, Radek. Stavová a algebraická teorie řízení. Zlín : UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2010. 90 s. ISBN 978-80-7318-991-4.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. František Gazdoš, Ph.D.

Ústav řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

25. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato diplomové práce se zabývá reálným modelem kuličky na ploše CE151, což je, z pohledu řízení, nelineární nestabilní systém. Úlohou bylo vytvořit jeho matematický model, dále ho identifikovat a experimentálně zjistit potřebné parametry, které se následně porovnaly s hodnotami uvedenými výrobcem tohoto modelu. Dále byl stanoven přenos soustavy a navržen vhodný regulátor pomocí metody geometrického místa kořenů pro řízení polohy kuličky na desce. Navíc zde byla užita obrazová analýza pro přesnou identifikaci dráhy kuličky v osách x a y . V poslední části diplomové práce byly navrženy laboratorní úlohy realizovatelné na tomto zařízení a je zde také uveden stručný manuál.

Klíčová slova : kulička na ploše CE151, modelování, identifikace, návrh řízení, metoda geometrického místa kořenů.

ABSTRACT

This thesis deals with real ball&plate model CE151, which, in terms of control, nonlinear system is unstable. The task was to develop his mathematical model, as well as to identify and experimentally determine the necessary parameters, which are then compared with the values provided by the manufacturer of this model. Furthermore, the transmission system was established and a suitable controller designed using the geometric roots of the control ball position on the board. In addition, there was used for image analysis of the exact identification of the track ball in the x and y axes In the last part of laboratory tasks were designed for sale on this device and there is also a brief guide.

Keywords : ball&plate CE151, modeling, identification, control design, Root Locus Method.

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Františku Gazdošovi, Ph.D. za ochotu, odborné vedení, cenné rady, které mi poskytl během mé diplomové práce. Dále pak své rodině za to, že mi umožnila studium na této vysoké škole.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 POPIS LABORATORNÍHO MODELU	10
1.1 VÝUKOVÝ MODEL KULIČKA NA PLOŠE.....	10
1.2 PARAMETRY MODELU.....	11
1.3 PROGRAMOVÁ PODPORA	11
2 MATEMATICKÝ MODEL SYSTÉMU	13
2.1 Servosystém	16
2.2 Senzor polohy.....	18
3 ZÁKLADNÍ POZNATKY METODY GEOMETRICKÉHO MÍSTA KOŘENŮ	19
3.1 Vlastnosti metody geometrického místa kořenů :	23
3.2 Názorná ukázka vlivu pólů a nul :	25
II PRAKTICKÁ ČÁST	27
4 IDENTIFIKACE MODELU CE 151	28
5 NÁVRH ŘÍZENÍ	38
5.1 NASLINOVA METODA ODVOZENÍ PID REGULÁTORU :	38
5.2 Návrh regulátoru pomocí metody geometrického místa kořenů	43
5.3 Zhodnocení výsledků :	56
ZÁVĚR	57
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	59
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	60
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
SEZNAM OBRÁZKŮ	64
SEZNAM TABULEK	66
SEZNAM PŘÍLOH	67

ÚVOD

V dnešní době je kladen důraz na praktické zkušenosti, a proto mají školy, jak střední, tak vysoké, velký zájem zařadit do výuky reálné výukové modely, které umožní studentovi uplatnit jeho teoretické znalosti, vyzkoušet praktické experimenty a naučit se potřebným výpočtům. Navíc studenti nabývají cenné zkušenosti, které mohou uplatnit při řešení problémů v budoucí praxi. Z tohoto důvodu jsem si zvolil diplomovou práci, která mimo jiné řeší reálné řízení modelu.

V konkrétním případě je to výukový model CE 151 kulička na ploše od firmy Humusoft s.r.o. Model je přímo řízen počítačem v reálném čase a realizuje okamžitou reakci kuličky při naklonění roviny při řízení. Systém je vybaven počítačovým viděním - webkamerou, kde je obraz zpracováván přes kartu a příslušným softwarem se zpracuje obrazová informace. Model je identifikován a řízen pomocí programového prostředí MATLAB/Simulink, které se využívá nejen pro vědecké aplikace, modelování a analýzu dat a má všestranné uplatnění. Moderní metody řízení vyžadují dobrou znalost modelu - čím přesněji je model popsán, tím lepší je možnost návrhu regulátoru. Daný model je dobře popsán v technickém manuálu od firmy Humusoft a moje práce se zabývá porovnáním dosažených výsledků a závěrů výrobce se samotným modelem na půdě naší univerzity.

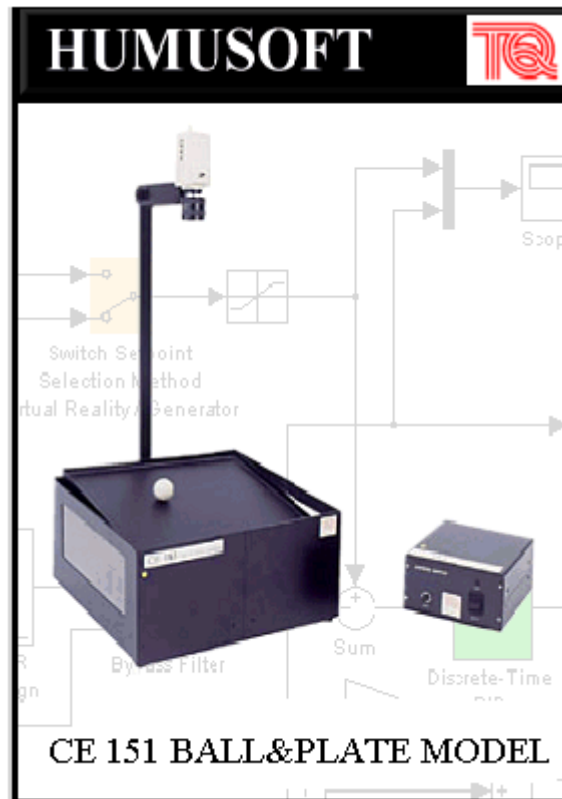
Tento model má vysokou míru nestability, proto se zabývám návrhem příslušného regulátoru, který by byl schopný danou soustavu bez problémů uregulovat. Při návrhu byla využita metoda Geometrického místa kořenů, které je věnována část teoretického rozboru v diplomové práci. Dále jsem se seznámil se základy video-analýzy realizované programem Viana3, vytvořeným pro potřebu fyzikálních experimentů na univerzitě v Essenu.

Smyslem této práce bylo seznámit se s daným modelem, analyzovat ho pro potřeby řízení, reálně ho řídit a nakonec navrhnout vhodné laboratorní úlohy a vytvořit příslušný manuál pro další studenty, kteří se budou touto soustavou zabývat.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POPIS LABORATORNÍHO MODELU

Tato část práce je zaměřena na popis modelu , jeho jednotlivých částí jak mechanických tak softwarových a obeznámení se základním užíváním modelu CE 151 BALL&PLATE.



Obr. 1 . Model kuličky na ploše

1.1 Výukový model kulička na ploše

Jedná se o laboratorní model firmy Hummusoft ,který demonstruje problémy řízení spojené s nestabilitou systémů.Zařízení je sestaveno z výkyvné desky jež má ve středu čep ,takže náklon desky může být manipulován ve dvou kolmých směrech.Servosystém je složen z karty řízení motoru a dvou krokových motorů použitých pro naklání desky. „Vidění“ modelu neboli zpracovávání obrazové informace o aktuální poloze míčku je zde řešeno přes CCD kameru a software na zpracování obrazu v reálném čase. Základním úkolem regulace je tedy řídit valivý pohyb míčku po desce k zadaným souřadnicím.System BALL&PLATE je dynamický systém s dvěma vstupy a dvěma výstupy. Obě souřadnice můžou být řízeny nezávisle a jejich vzájemné interakce jsou zanedbatelné v důsledku nízké rychlosti a stupně zrychlení pohybu míčku. Systém je navržen pro řízení číslicovými regulátory. [1]

1.2 Parametry modelu

Hlavní část má rozměry 430 x 430 x 200mm, na tomto těle je namontována tyč o 1100mm připojená k zadní straně hlavní části na níž je umístěna CCD kamera. Naklápěcí deska o rozměrech 400 x 400mm je umístěna ve vyzkoušené vzdálenosti 250mm od kamery. Hmotnost je 9kg zařízení je napájeno externím zdrojem o rozměrech 175 x 175 x 100mm s váhou 2kg. Doporučené napájení je 240V / 50Hz / 250mA nebo 110V / 60 Hz / 500mA . Kamera CCD u modelu CE 151 je od firmy Logitech a je označena jako QuickCam Express. Jde tedy o klasickou webkameru pro domácí užití. Kamera má optické rozlišení 640 x 480 bodů, rozměry 240 x 240 x 90mm a hmotnost 700gm. [1],[10]

Model obsahuje řídicí kartu Humusoft MF 624 spojující počítač s externím zařízením, které přijímá signály z reálného světa. Karta má 32bitovou architekturu a doba převodu je pod 4 μ s. Náklon desky je řízen krokovými motory spojenými s kartou MF 624, která je užitá pro generování pulzní sekvence pro krokové motory. Výstupní kanály 5 a 6 této karty jsou užity pro řízení pozice desky. [9]

Typ synchronních krokových motorů modelu je MA61-FS-82001 od Superior Electric SLO-SYN, Hold 450 OZ. IN., 200 kroků na jednu otáčku, 1.22V / 3.8A, DC Hz. Max provozní teplota je 65 °C. Tyto údaje byly získány ze štítku na krokovém motoru.

1.3 Programová podpora

Demo program (CE151.exe) je dodán s modelem, v tomto prostředí se uživatel seznámí se základními vlastnostmi, zde lze vidět reálnou polohu míčku, či nastavit parametry kamery nebo použitého PID regulátoru. Program je napsán v jazyce C a model je v něm řízen přes PID regulátor v uzavřeném obvodu. Přátelské prostředí s dobrou grafikou usnadňuje prvotní experimenty se zařízením a možnosti sledovat chování systému v reálném čase. Ucelený popis programu se nachází v příloze. [2]

Programové prostředí MATLAB integruje numerickou analýzu, maticové výpočty a grafiku do uživatelsky příjemného prostředí. V MATLABu je možné řešit široký okruh

problémů spojených především s matematikou, fyzikou, měřením a zpracováním dat a grafikou, ale i mnoho dalších.

Nadstavbové prostředí SIMULINK slouží k modelování a simulaci dynamických systémů. Simulink využívá rozsáhlých grafických možností operačního systému Windows. Uživatelé poskytují možnost snadno a rychle vytvářet modely ve formě blokových schémat. Obsahuje také výpočetní toolboxy bez kterých nelze experimentovat s modelem CE 151. [2]

Real Time Toolbox = Externí analogové a digitální signály lze zpracovat v programovém prostředí MATLAB/Simulink. Knihovna bloků umožňuje práci v reálném čase bez nutnosti použití dalších nástrojů. Real Time Toolbox je založen na výkonném jádře reálného času a používá ovladače pro měřicí kartu MF 624. [12]

Image Acquisition Toolbox = Je využit k získávání obrazových dat a videa z PC-kompatibilních snímacích zařízení přímo do MATLABu a Simulinku. Hardware je možno detekovat automaticky a lze konfigurovat jeho nastavení, zobrazit náhled a uložit obraz nebo video do paměti nebo přímo na disk. V daném modelu je využit k zpracování obrazu z web kamery. [11]

Výčet toolboxů je umístěn v technickém manuálu [str.5.]

Pro přesnější videoanalýzu byl použit program Viana 3.64 vytvořeny pro potřebu fyzikálních experimentů na univerzitě v Essenu. [13]

Podrobný popis se nachází v manuálu na konci této práce.

K návrhu regulátoru byla použita podpora v programovém prostředí Matlab – tzv. „SISOTOOL“ ,která pracuje se zpětnovazebními systémy. Dá se zde navrhnout základní nastavení zpětnovazebního obvodu s jeho všemi prvky, přenos řízení, poruchy, a dále je možné pomocí polohy kořenů vyšetřit přechodové charakteristiky a odezvy a to přímo real-time změnou parametrů.

2 MATEMATICKÝ MODEL SYSTÉMU

Dynamický systém může být rozdělen do dvou částí. Na nezávislý pohyb kuličky po ploše a servosystém naklápějící se desky. Moment generující se kuličkou, kterou uzavřeme hranicemi na ploše, je mnohem menší než točivý moment krokového motoru. To znamená, že elektronické řadiče v krokovém motoru jsou analyzovány odděleně od ostatních částí systému. Přístup kolísavého modelování byl použit pro odvození všeobecného modelu dynamického systému, bez vyloučeného servosystému naklápějící se desky, který může být modelově separován. Všeobecná forma Euler-Lagrangeovy rovnice je : [2]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial W_k}{\partial q_i} + \frac{\partial W_p}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

kde q_i – i -tá obecná souřadnice, \dot{q}_i – první derivace i – té obecné souřadnice podle času, W_k – kinetická energie systému, W_p – potenciální energie systému, Q_i – i -tá obecná síla.

Systém má čtyři stupně volnosti, dva stupně má pohyb kuličky po ploše a dva naklápějící se rovina. Určí se obecné souřadnice x a y pro pozice míčku na ploše a úhly α , β naklápějící se roviny. Shrnutím je, že naklápějící se rovina je řízena obecným momentem, který je vyvolán naklápěním roviny rychlostmi β_α a β_β do zadaných úhlů. Přiřazení souřadnic systému k obecným souřadnicím může být

$$q_1 = x, q_2 = y, q_3 = \alpha, q_4 = \beta$$

kde x, y [m] – souřadnice polohy kuličky na ploše, α, β [rad] – úhly natočení naklápějící se roviny, β_α [rad/s] – vektor úhlové rychlosti rotující kuličky, β_β [rad/s] – vektor úhlové rychlosti pohybující se plochy.

Matematický model dynamického systému je odvozen při platnosti následujících předpokladů

- Kulička je s plochou neustále v kontaktu,
- není povolen žádný posuv kuličky po ploše,
- všechny třecí síly a momenty jsou zanedbány,
- neuvažujeme omezení plochy a také úhlů jejího natočení.

Kinetická energie kuličky je složena z rotační a translační energie středu kuličky :

$$W_{kb} = \frac{1}{2} \left[m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{I_b}{r_b^2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \right] = \frac{1}{2} \left(m + \frac{I_b}{r_b^2} \right) (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \quad (2)$$

kde m [kg] – hmotnost kuličky, I_b [kg.m²] – setrvačnost kuličky, r_b [m] – poloměr kuličky.

Kinetická energie plochy, včetně umístěné kuličky v souřadnicích x, y , rotující okolo středu je dána rovnicí.

$$W_{kp} = \frac{1}{2} \left[(I_p + I_b)(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + m|\beta x r|^2 \right] \quad (3)$$

kde I_p [kg.m²] – setrvačnost plochy, r [m] – vektor polohy středu kuličky.

Člen $|\beta x r|^2$ může být vyjádřen jako

$$(\dot{\beta}y + \dot{\alpha}x)^2 = \dot{\beta}^2 y^2 + 2\dot{\alpha}\dot{\beta}xy + \dot{\alpha}^2 x^2 \quad (4)$$

Kinetická energie včetně kuličky, kterou reprezentuje hmotný bod je potom

$$W_{kp} = \frac{1}{2} \left[(I_p + I_b)(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + m(\dot{\beta}^2 y^2 + 2\dot{\alpha}\dot{\beta}xy + \dot{\alpha}^2 x^2) \right] \quad (5)$$

Celková kinetická energie systému je potom

$$\begin{aligned} W_k &= W_{kp} + W_{kb} = \\ &= \frac{1}{2} \left[(I_p + I_b)(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + m(\dot{\beta}^2 y^2 + 2\dot{\alpha}\dot{\beta}xy + \dot{\alpha}^2 x^2) + \left(m + \frac{I_b}{r_b^2} \right) (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Potenciální energie kuličky je závislá na horizontálním umístění kuličky na ploše

$$W_p = mgh = mg(x \sin \alpha + y \sin \beta) \quad (7)$$

Zobecněná síla je dána momentem, který je generován servem včetně převodového systému :

$$Q_\alpha = F_\alpha d \cos \alpha, Q_\beta = F_\beta d \cos \beta \quad (8)$$

kde d - vzdálenost mezi otočným čepem a místem, kde servosystém otáčí plochou.

Po derivacích, nutných k získání partikulární formy Euler-Lagrangeových rovnic, se získají nelineární diferenciální rovnice

$$\text{pro } x \quad \left(m + \frac{I_b}{r_b^2} \right) \ddot{x} - m(\dot{\alpha}\dot{\beta}y + \dot{\alpha}^2 x) + mg \sin \alpha = 0 \quad (9)$$

$$\text{pro } y \quad \left(m + \frac{I_b}{r_b^2} \right) \ddot{y} - m(\dot{\alpha}\dot{\beta}y + \dot{\beta}^2 x) + mg \sin \beta = 0 \quad (10)$$

$$(I_p + I_b + mx^2) \ddot{\alpha} + m(\ddot{\beta}xy + \dot{\beta}\dot{x}y + \dot{\beta}x\dot{y} + 2\dot{\alpha}\dot{x}x) + mgx \cos \alpha = F \quad (11)$$

$$(I_p + I_b + my^2) \ddot{\beta} + m(\ddot{\alpha}xy + \dot{\alpha}\dot{x}y + \dot{\alpha}x\dot{y} + 2\dot{\beta}\dot{x}x) + mgx \cos \beta = F \quad (12)$$

Rovnice (9) a (10) popisují pohyb kuličky po ploše, ukazují jak závisí zrychlení pohybu kuličky na úhlu natočení a na úhlové rychlosti naklápějící se plochy. Rovnice (11) a (12) říkají jak je naklápějící se rovina ovlivňována externí řídicí silou, pozicí a rychlostí kuličky. Interpretace partikulárních členů z rovnic (9) a (10) je

$(\beta\dot{\alpha}y + \dot{\alpha}^2 x)m$ odstředivá síla vyplývající z rotace plochy,

$(I_p + I_b + mx^2) \ddot{\alpha}$ síla jako produkt setrvačnosti plochy, kuličky a úhlového zrychlení okolo jedné osy,

$(\ddot{\beta}xy + \dot{\beta}\dot{x}y + \dot{\beta}x\dot{y})$ vliv gyroskopických momentů,

$2\dot{\alpha}\dot{x}x$ coriolisovo zrychlení,

$mgx \cos \alpha$ moment, jako produkt váhy kuličky,

$F_\alpha d \cos \alpha$ externí řídicí moment.

Popis nelineárních diferenciálních rovnic (9) až (12) může být snadno převeden do nelineárního stavového modelu. Tento model je ale spíše komplexní a je tedy složitější jej použít pro analyzování a návrh regulačního obvodu. [2]

Ve skutečnosti nejsou výstupem systému síly F_α a F_β , ale přímo úhly α , β . To je z toho důvodu, že frekvence krokového motoru je pod akceleračním limitem. Žádný krok nemůže být ztracen a amplituda zátěžového momentu nemůže ovlivnit pozici motoru. Tento předpoklad má za následek nezahrnutí rovnic (11) a (12) do modelu.

Poměr mezi nelineárním členem, reprezentující odstředivou sílu, a gravitační silou, působící v odpovídajícím směru, závisí na velikosti maximální úhlové rychlosti naklápějící se plochy. Na modelu CE151 je možné předpokládat úhlovou rychlost jako konstantu, závislou na amplitudě řídicí frekvence krokového motoru. Pro normálně používaný krokový motor s frekvencí 400 Hz je poměr zhruba 1:25 a odstředivá síla může být tudíž zanedbána. V ustáleném stavu by měla být plocha v horizontální poloze, kde se oba úhly blíží nule. Setrvačnost kuličky (za předpokladu, že se oba úhly mění max. cca ± 5 stupňů) může být počítána jako. [2]

$$I_b = \frac{5}{2}mr^2 \quad (13)$$

Dále budeme pro zbytek analýzy uvažovat následující model :

$$x = \frac{5}{7}g \sin \alpha \Rightarrow K_b \alpha \quad (14)$$

$$\ddot{y} = \frac{5}{7}g \sin \beta \Rightarrow K_b \beta \quad (15)$$

2.1 Servosystém

Náklon desky zajišťují dva krokové motory. Tyto motory jsou stejné, takže jeden krok odpovídá konstantní změně uhlu desky $\Delta\alpha=\Delta\beta$. Krokový motor lze modelovat jako ideální integrátor, který integruje konstantní rychlosti. Tato rychlost závisí na frekvenci pulsů generovaných řídicí kartou. Ovladače řídicí karty krokových motorů a elektroniky karty samotné vykazují další nelinearity. V prvním případě je hodnota poslaná kartě z prostředí Matlab limitována na 1. Pak se hodnota zapíše do zásobníku a obsah nelze přepsat dokud karta generuje počet impulsů úměrných hodnotě uložené v zásobníku. Tak se mění tvar vstupního signálu, když se vstupní signál servosystému mění rychleji jak nominální rychlost krokového motoru - potom motor nedokáže následovat vstup a nastane zpoždění. Řešení takto vzniklého problému spočívá ve filtraci vstupního signálu, tak že servosystém bude schopný následovat filtrovaný signál. Nejjednodušší filtr odvozený ze známé hodnoty rychlosti krokového motoru je rychlostní omezovač (rate limiter), který je diskrétně popsán :

[2]

$$rate = \frac{u_a(k) - u_a(k-1)}{T_s} \quad (16)$$

$$u_{af}(k) = +T_s R + u_{af}(k-1) \quad \text{pro rychlost } >+R \quad (17)$$

$$u_{af}(k) = -T_s R + u_{af}(k-1) \quad \text{pro rychlost } <-R \quad (18)$$

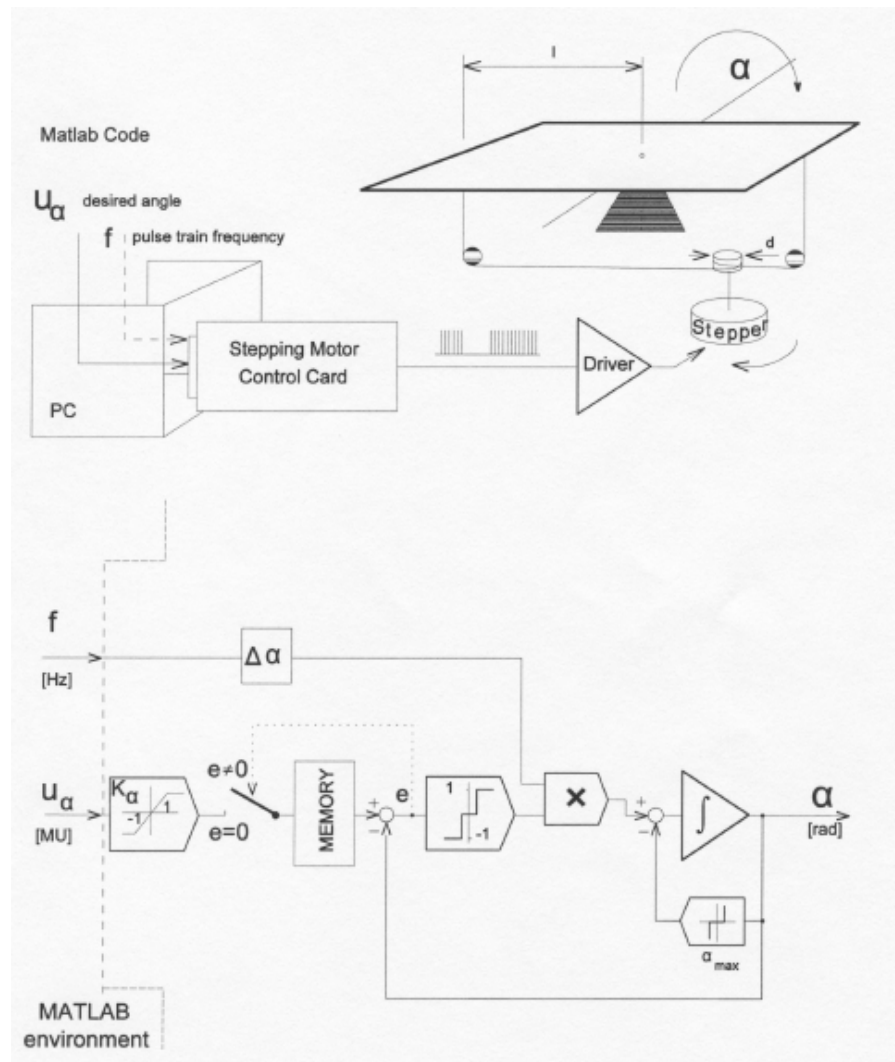
$$u_{af}(k) = u_a \quad \text{jinak} \quad (19)$$

Kde

u_a = vstup do filtru , u_{af} = výstup z filtru , k = index času , R = prahová rychlost

T_s = vzorkovací perioda

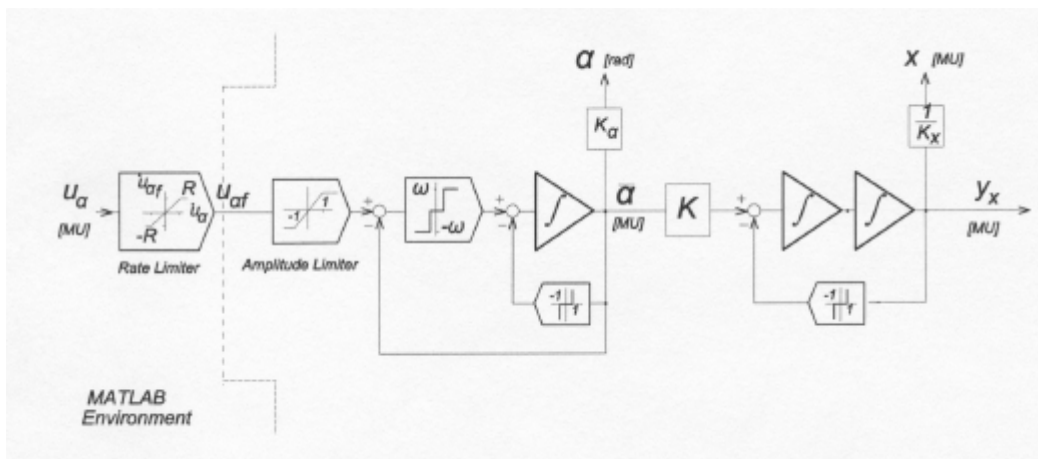
Když je prahová rychlost nižší nebo rovna nominální rychlosti serva, tak servo dokáže kopírovat signál u_{af} a obsah zásobníku řídicí karty motoru je pravidelně aktualizován.



Obr. 2. Schéma principu servosystému a odpovídající blokový diagram [2]

2.2 Senzor polohy

Pozice kuličky je vyhodnocena CCD kamerou a kartou FG201 Frame Grabber. Dohromady tvoří vizuální systém obsahující softwarové ovladače, který je dostatečně rychlý, aby umožňoval uživateli zanedbávat dynamiku inteligentního senzoru. Časová perioda pro snímání pozice je 40 ms. Tato obnovovací rychlost nemůže být měněná, jelikož závisí na funkci elektroniky karty. Zbývající parametr popisující senzor je konstanta převádějící pozici v metrech na MU (Machine Units) pozici v prostředí Matlab. [2]



Obr. 3. Blokové schéma kompletní dynamiky systému v jedné souřadnici [2]

3 ZÁKLADNÍ POZNATKY METODY GEOMETRICKÉHO MÍSTA KOŘENŮ

Tento model spadá pod systémy, které mohou z různých příčin měnit své dynamické vlastnosti. Tyto změny se projevují zesílením regulačního systému např. vlivem nelinearit nebo změnou parametrů matematického modelu. Oblastí hlavního zájmu je tedy zesílení a jeho změny v regulované soustavě, které působí na kvalitu regulace a dokáží zapříčinit nestabilitu regulačního obvodu. Preferovaná metoda vyšetřování je metoda geometrického místa kořenů, z anglického jazyka „Root Locus“. Základní nástin této metody včetně popisu softwérové podpory v prostředí Matlab – tzv. „SISOTOOL“ bude objasněn níže. Tato metoda se softwérovou podporou je velmi účinná pro analýzu i syntézu regulačních obvodů. [14]

Základní pojmy :

Uvažujeme přenos otevřeného obvodu $F_0(s)$, který je znázorněn níže, jehož přenos je možné vyjádřit ve tvaru :

$$F_0(s) = R(s)F(s) = \frac{r_2 s^2 + r_0 s + r_1}{s} F(s) = K \frac{(s - s_{B1})(s - s_{B2})}{s} F(s) = K * R_0(s) * F(s) \quad (20)$$

kde $R(s) = K * R_0(s)$... přenos regulátoru

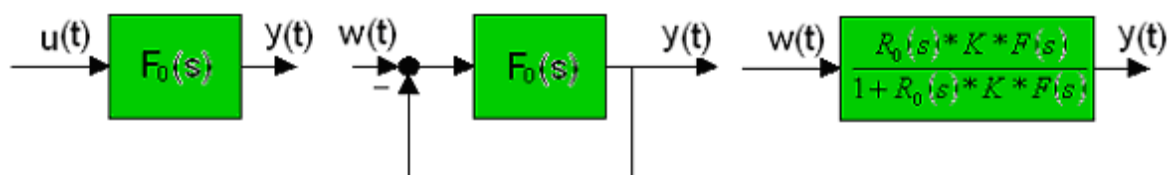
K =Gain ...celkové zesílení zpětné vazby

$R_0(s)$... struktura regulátoru definována póly a nulami

$F(s)$... přenos soustavy

s_{Bj} ... pro $j = 1, 2, \dots, m$ jsou nuly systému.

Aby bylo možné vyšetřit vliv zesílení K na vlastnosti uzavřeného obvodu, bude uvažován regulační obvod a přenos uzavřeného obvodu ve tvaru : [14]



Otevřený obvod

Uzavřený obvod

Přenos uzavřeného obvodu

kde je výstupní veličina $y(t)$, akční veličina $u(t)$ a požadovaná veličina $w(t)$

Obrazový přenos regulované soustavy je ve tvaru $F(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$, kde $A(s)$, $B(s)$ jsou polynomy.

Pro ideální PID lze přenos regulátoru odvodit ve tvaru :

$$R(s) = K * R_0(s) = K \frac{R_B(s)}{R_A(s)} = K \frac{(s - s_{BR1})(s - s_{BR2})}{s - s_{R1}} \quad (21)$$

Kde K je chápáno jako celkové zesílení regulátoru.

Přenos otevřené smyčky je ve tvaru :

$$F_0(s) = K * F_0(s)R_0(s) = K \frac{B(s) R_B(s)}{A(s) R_A(s)} = K \frac{M(s)}{Q(s)} = K \frac{\prod_{j=1}^{mM} (s - s_{Mj})}{\prod_{k=1}^{nQ} (s - s_{Qk})} \quad (22)$$

kde je

$F_0(s)$... přenos otevřené smyčky

$M(s)$... polynom čitatele otevřené smyčky,

$N = mM$ je počet nul otevřené smyčky,

s_{Mj} ... kořeny čitatele otevřené smyčky – „nuly“, $j = 1, 2, \dots$,

$Q(s)$... polynom jmenovatele otevřené smyčky,

$P = nQ$ je počet pólů otevřené smyčky

s_{Qk} ... kořeny jmenovatele otevřené smyčky – „póly“, $k = 1, 2, \dots, N$

Přenos uzavřené smyčky je roven :

$$F_{uz} = \frac{F_0(s)}{1 + F_0(s)} = \frac{K \cdot \frac{M(s)}{Q(s)}}{1 + K \cdot \frac{M(s)}{Q(s)}} = \frac{R_0(s) \cdot K \cdot F(s)}{1 + R_0(s) \cdot K \cdot F(s)} = \frac{K \cdot B(s) \cdot R_B(s)}{A(s) \cdot R_A(s) + K \cdot B(s) \cdot R_B(s)} \quad (23)$$

Z daného přenosu vyplývá, že nuly uzavřené regulační smyčky (racionální lomené funkce) jsou rovny nulám otevřené smyčky. Póly uzavřené regulační smyčky jsou takové (s) pro které platí

$$1 + F_0(s) = 1 + K \cdot R_0(s) F(s) = 1 + K \frac{M(s)}{Q(s)} = 0 \rightarrow K \frac{M(s)}{Q(s)} = -1 \quad (24)$$

Vliv změn zesílení otevřené smyčky na rozložení pólů uzavřené smyčky v s-rovině je dobře pozorovatelný např. u přenosu otevřené smyčky ve tvaru :

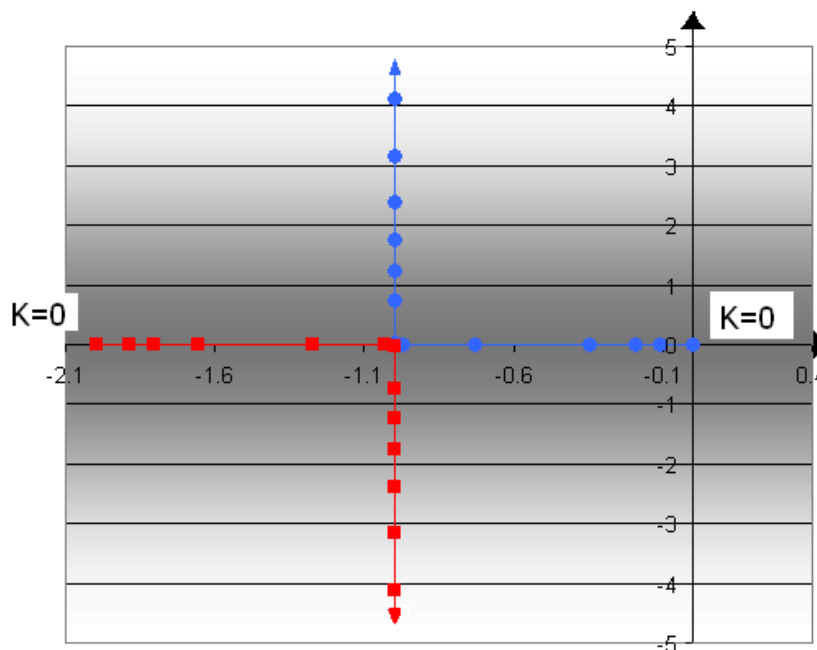
$$\frac{K}{s(2s + 4)} \tag{25}$$

Přenos uzavřené smyčky je roven $F_{uz}(s) = \frac{K}{2s^2 + 4s + K}$ (26)

V tabulce jsou uvedeny hodnoty pólů s_1 a s_2 pro různé hodnoty K.

Tab. 1. Polohy pólů

K	S_1	S_2
0	0	-2
0.21	-0.1112	-1.8888
0.3441	-0.1901	-1.8099
0.5639	-0.3396	-1.6604
0.924	-0.7243	-1.2757
0.999	-0.9684	-1.0316
1	-1	-1
1.001	-1 + 0.0316i	-1 - 0.0316i
1.5141	-1 + 0.717i	-1 - 0.717i
2.4811	-1 + 1.217i	-1 - 1.217i
4.0656	-1 + 1.7509i	-1 - 1.7509i
6.662	-1 + 2.3795i	-1 - 2.3795i
10.9167	-1 + 3.1491i	-1 - 3.1491i
17.8885	-1 + 4.1096i	-1 - 4.1096i



Obr. 4. Ukázka kořenového hodografu

V obr.4. jsou zobrazeny póly v s -rovině pro $K \geq 0$. Poloha pólů je označena čtverečkem pro s_1 a kolečkem pro s_2 pro zvolené zesílení. Když je $K=0$, potom jsou póly uzavřené smyčky rovny pólům otevřené smyčky. Při rostoucím K se mění poloha obou pólů a dochází k vytvoření dvou větví - větev modrá vychází z pólu s_1 a pokračuje vlevo, červená větev směřuje vpravo. Pokud je K v rozmezí $0 \leq K < 1$, tak pro takto zvolená zesílení je soustava přetlumená. Jakmile je $K=1$ obě větve se střetnou v bodě -1 . Póly jsou potom dvojnásobné : $s_1, s_2 = -1$ a uzavřená smyčka je aperiodická. Zvýšením zesílení jsou póly komplexní s konstantní hodnotou reálné části. První větev reprezentuje komplexní číslo $-1 + i\omega$, druhá větev je také komplexní číslo se zápornou imaginární částí $-1 - i\omega$. Uzavřená smyčka je tlumená, když při rostoucím K roste úhlová frekvence ω . Jak jsou dané hodnoty zesílení větší než nula, proto póly nedosáhnou pravé poloroviny a uzavřená smyčka je stabilní pro všechna $K \geq 0$. Pokud se mění polohy pólů uzavřené smyčky pro $K \geq 0$, vznikají tak trajektorie označené jako kořenové hodografy. Tento zvolený postup vytvoření kořenového hodografu, bohužel nelze použít v úlohách vyšších řádů.

Je tedy nutné použít Evansovu „Root Locus Technikus“ neboli Metodu geometrického místa kořenů. Ze známých nul a pólů otevřené smyčky a zesílení K je možné grafickým způsobem určit póly uzavřené smyčky v komplexní rovině. Kromě analýzy uzavřené smyčky tato metoda umožňuje také syntézu regulačních obvodů. [14]

Kořenový hodograf musí splňovat podmínky :

$$F_0(s) = \frac{M(s)}{Q(s)} = -\frac{1}{K} \Rightarrow \left| K \frac{M(s)}{Q(s)} \right| = 1 \rightarrow |K| = \left| \frac{Q(s)}{M(s)} \right| = \frac{\prod_{j=1}^{mQ} |s - s_{Qj}|}{\prod_{k=1}^{nM} |s - s_{Mk}|} \quad (27)$$

$$K \frac{M(s)}{Q(s)} = -1 \rightarrow \text{Arg} \left\{ K \frac{M(s)}{Q(s)} \right\} = \angle K \frac{M(s)}{Q(s)} = (2k+1)\pi. \text{ pro } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Body, které vyhovují těmto podmínkám tvoří množinu bodů, které se označují jako geometrické místo kořenů, což je spojnice takovýchto bodů v rovině (s) za předpokladu, že součet všech úhlů vektoru vedených z nul a pólů otevřené smyčky do bodu (s) musí být roven lichému násobku π .

3.1 Vlastnosti metody geometrického místa kořenů :

- Počet větví geometrického místa kořene je definován počtem pólů uzavřeného obvodu, a je nutné brát v úvahu násobnost pólů.

- K nalezení výchozích bodů geometrického místa kořenů musí platit

$$\frac{M(s)}{Q(s)} = -\frac{1}{K} \rightarrow K.M(s) = -Q(s) \quad (28)$$

Pro $K = 0$, tedy $0 = -Q(s)$ se póly blíží k pólům otevřeného obvodu.

Pro $K \rightarrow \infty$, $\frac{M(s)}{Q(s)} = 0$ se póly blíží k nulám otevřeného obvodu .

- Geometrické místo kořenů je symetrické vzhledem k reálné ose.

- Segment reálné osy je geometrickým místem kořenů tehdy, jestliže vpravo od tohoto segmentu je lichý součet nul a pólů.

- Když N je počet nul a P je počet pólů otevřené smyčky, pak $(P - N)$ větví geometrického místa kořenů končí v nekonečnu.

- Úhel v počátku trajektorie z r - násobného pólů otevřeného obvodu vybíhá r -větví pod úhlem

$$\varphi_k = \frac{1}{r} [(n_p - n_L - 1) * \pi + k * 2\pi] \quad (29)$$

kde n_p je počet pólů a nul ležících vpravo od uvažovaného násobného pólů, n_L je počet pólů a nul ležících vlevo od uvažovaného násobného pólů $k = 1, 2, 3, \dots, r$

- Průsečík geometrického místa kořenů s imaginární osou se odečte z kritického zesílení neboli ryze imaginární kořeny.

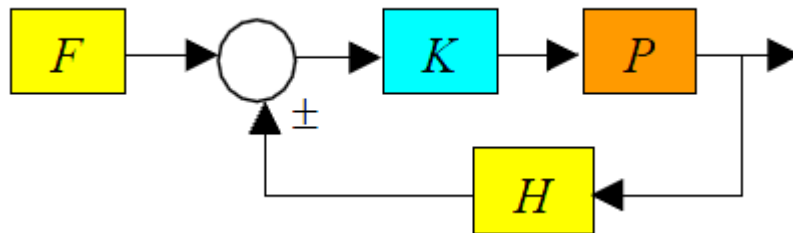
- Pokud otevřená smyčka má minimálně o dva póly více než nul, pak geometrické místo kořenů je pro každou hodnotu zesílení K konstantní a platí

$$\sum_{k=1}^P \operatorname{Re}\{s_k\} = \text{kons.} \quad (30)$$

- V programovém prostředí Matlab lze příkazem `rlocus` vypočítat a vykreslit z přenosu otevřené smyčky kořenový hodograf geometrického místa kořenů, charakteristické rovnice uzavřené smyčky.

- Příkaz *rlocfind* určí z geometrického místa kořenů pro zvolený bod trajektorii zesílení otevřené smyčky. [14]

Uvažujeme strukturu uzavřeného obvodu ve tvaru :



Obr. 5. Struktura uzavřeného obvodu [15]

kde F – přenos filtru, K – zesílení otevřené smyčky, P – přenos soustavy, H – přenos čidla

Syntéza regulačního obvodu pomocí geometrického místa kořenů umožňuje návrh obvodu s regulátorem typu PID i kompenzátorem typu filtr s fázovým zpožděním nebo předstihem. Aby mohla proběhnout syntéza je zapotřebí přenos regulátoru vyjádřit pomocí pólů a nul. [15]

Regulátor PD vyjádřený pomocí nul je ve tvaru :

$$R(s) = r_0 + r_2 s = r_2 \left(s + \frac{r_0}{r_2} \right) = K(s + s_{BR2}) \quad (31)$$

kde K je zesílení regulátoru, potom platí

$$K = r_2, \quad s_{BR2} = \frac{r_0}{r_2} \rightarrow r_0 = r_2 * s_{BR2} \quad (32)$$

PD - regulátor představuje v otevřené smyčce nulu a zesílení K .

Regulátor PI

$$R(s) = r_0 + \frac{r_1}{s} = \frac{r_0 s + r_1}{s} = \frac{r_0 \left(s + \frac{r_1}{r_0} \right)}{s} = \frac{K(s + s_{BR1})}{s} \quad (33)$$

kde K je zesílení regulátoru a platí

$$K = r_0, \quad s_{BR1} = \frac{r_1}{r_0} \rightarrow r_1 = r_0 * s_{BR1} \quad (34)$$

PI – regulátor je vyjádřen v otevřené smyčce jako pól rovnající se nule, dále má nulu S_{BR1} a zesílení K .

Regulátor PID

$$R(s) = r_0 + \frac{r_1}{s} + r_2 s = \frac{r_2 s^2 + r_0 s + r_1}{s} = \frac{r_2 \left(s^2 + \frac{r_0}{r_2} s + \frac{r_1}{r_2} \right)}{s} = \frac{K(s + S_{BR1})(s + S_{BR2})}{s} \quad (35)$$

kde K je zesílení regulátoru a platí

$$K = r_2, S_{BR1} + S_{BR2} = \frac{r_0}{r_2}, S_{BR1} * S_{BR2} = \frac{r_1}{r_2} \quad (36)$$

PID – regulátor reprezentuje v otevřené smyčce pól nula, dvě nuly S_{BR1} , S_{BR2} a zesílení K .

Zjednodušením lze odvodit :

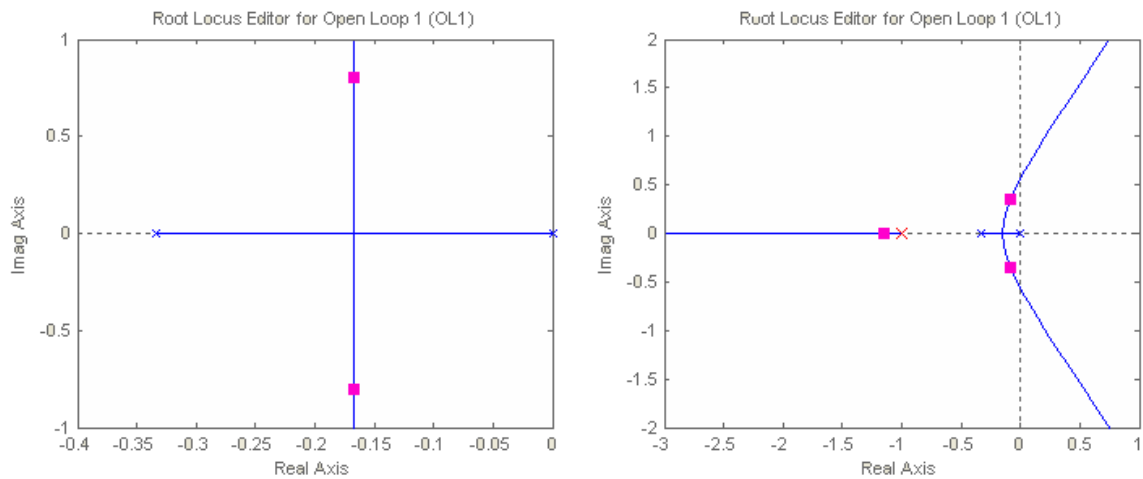
$$\begin{aligned} r_0 &= r_2 * (S_{BR1} + S_{BR2}) \\ r_1 &= r_2 * (S_{BR1} * S_{BR2}) \\ r_2 &= K \end{aligned} \quad (37)$$

3.2 Názorná ukázka vlivu pólů a nul :

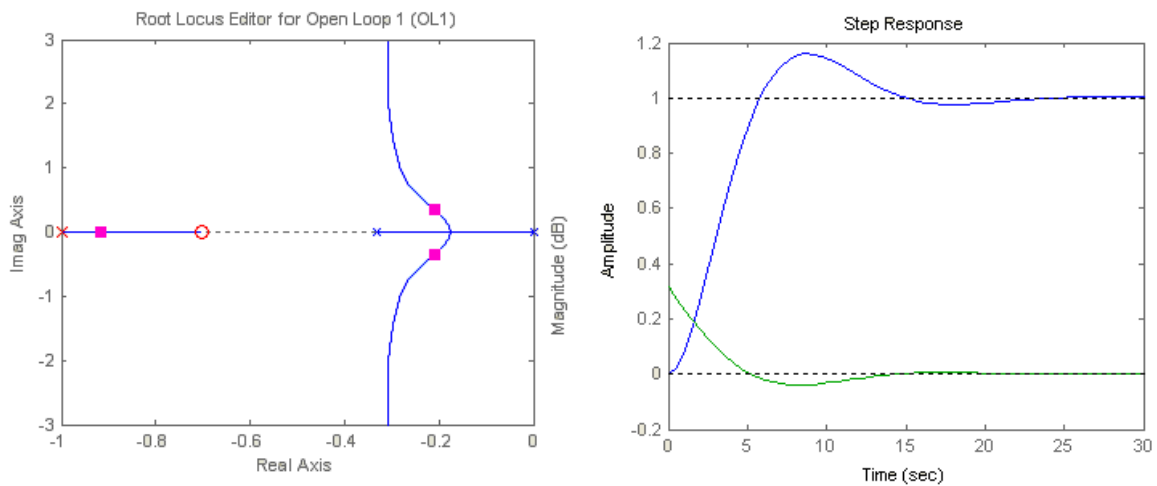
Pokud se přidají póly do otevřené smyčky vyvolají posun pólu uzavřené smyčky k imaginární ose a tak dochází k přeregulování uzavřeného obvodu.

Nuly připojené do otevřené smyčky stabilizují a tlumí regulační pochody uzavřené smyčky. Změní se tak trajektorie geometrického místa kořenů. K demonstraci vlivu byl použit přenos ve tvaru užitém v manuálu k CE 151 upraven na druhý řád .

$$F(s) = \frac{K}{s(T_m s + 1)} = \frac{2}{s(3s + 1)} \quad (38)$$



Obr. 6. Kořenový hodograf bez připojení nul a pólů a kořenový hodograf s připojeným pólem ve tvaru $s_I = -1$



Obr. 7. Kořenový hodograf s připojeným pólem ve tvaru $s_I = -1$ a nulou $s_{BRI} = -0.7$ a přechodová charakteristika daného přenosu.

Tyto kořenové hodografy byly získány pomocí matlabovského toolboxu „Siso Design“, jehož stručný popis je umístěn v manuálu na konci práce.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 IDENTIFIKACE MODELU CE 151

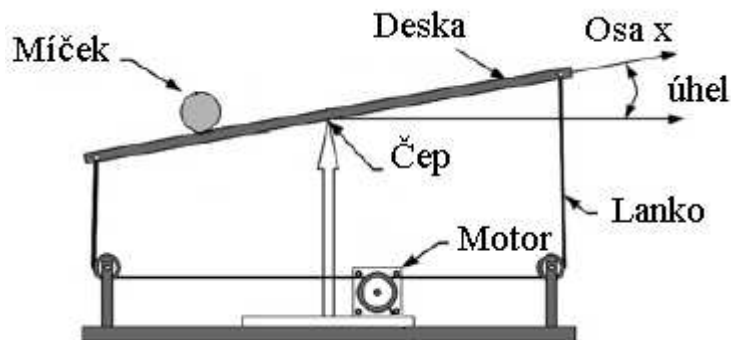
Základní zásady pro identifikaci dynamiky v otevřeném obvodu.

Postup v režimu on-line :

- náklon desky musí být v konstantním úhlu.
- daný úhel se zaznamená.
- spustí se demo-schéma v programovém prostředí MATLAB/Simulink, kde se ukládá pozice míčku v závislosti na čase.
- míček se pouští po nakloněné desce.

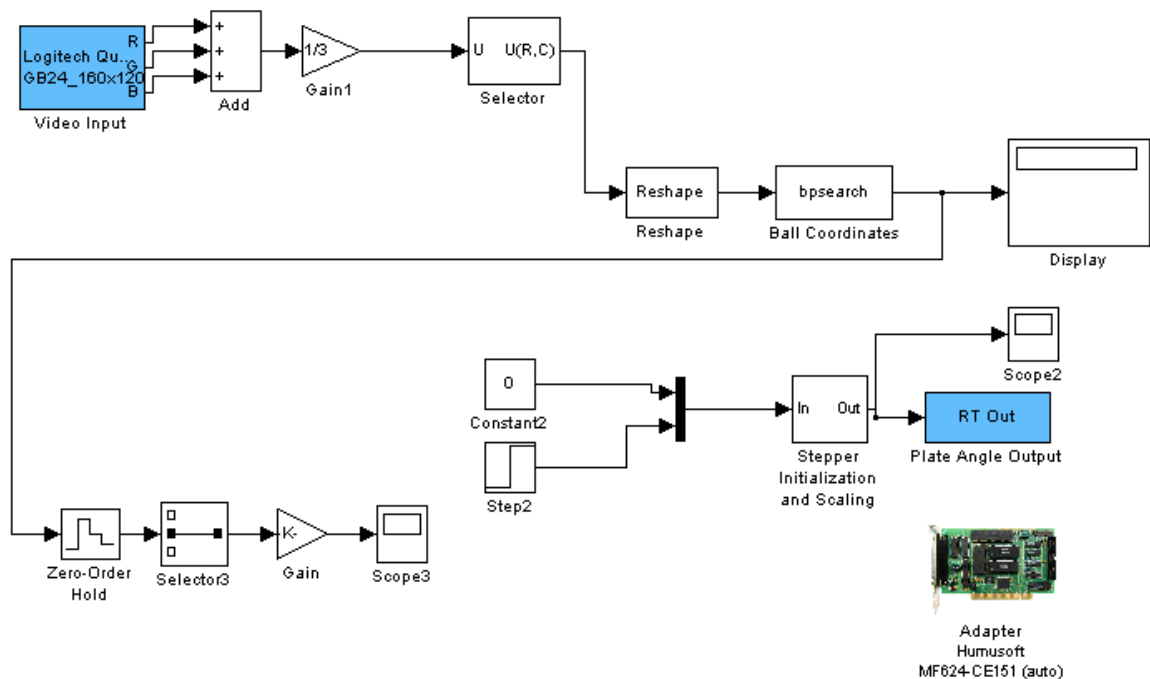
Postup v režimu off-line :

Zpracují se data odpovídající reakci při startu míčku, který má nulovou počáteční rychlost a na konci kdy se míček dotkne okraje desky poprvé. [2]



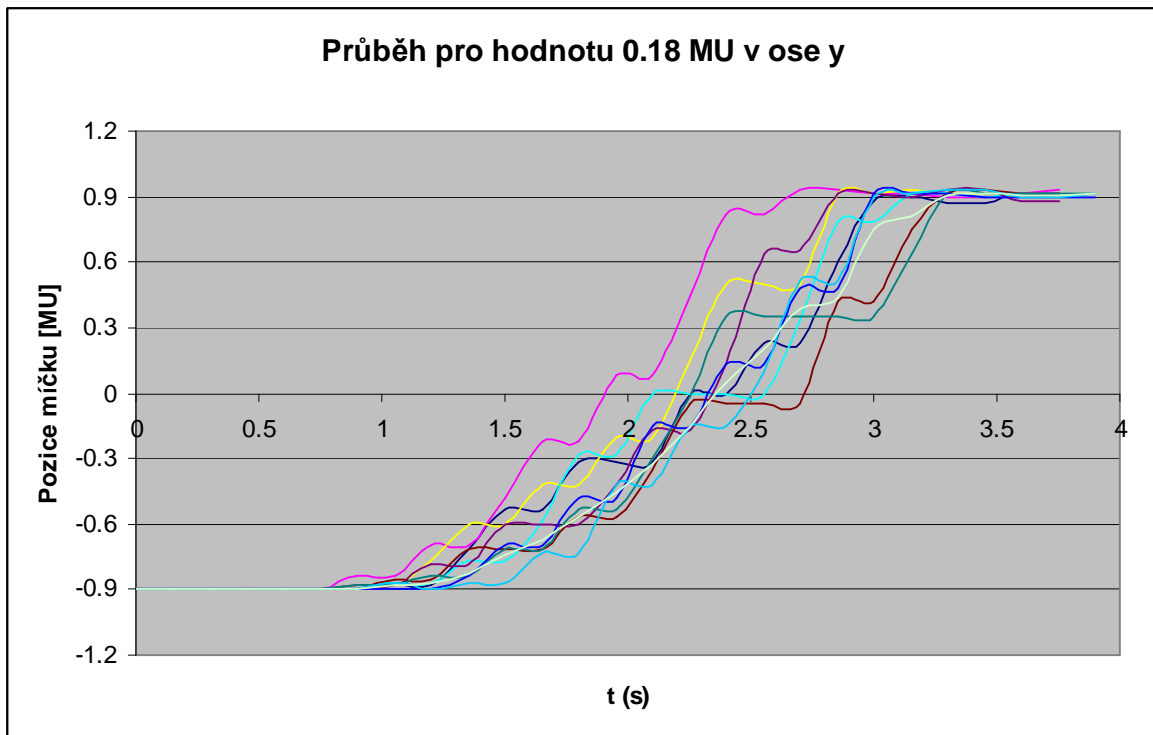
Obr. 8. Popis modelu CE151

Nejprve bylo důležité zaznamenat polohu míčku pro další analýzu, úpravou demo schématu v programovém prostředí MATLAB/Simulink, kde se ze zachyceného obrazu postupně vygenerují hodnoty pro osu x a y pomocí skriptu *bpsearch.m*



Obr. 9. Upravené schéma z demo-programu za účelem identifikace

Byly postupně získány pro obě osy přechodové odezvy. Postupným zadáváním hodnot v rozsahu $-0.8 - 0.8$ MU do skokové funkce v demo-programu se měnil úhel náklonu desky pro danou hodnotu. Pouštěním míčku po desce s ustáleným úhlem, byly zaznamenány průběhy dráhy. První pokusy naznačily potřebu kolejniček, aby se zamezilo přeskokování míčku z jedné osy do druhé a tím nepřesnosti nasnímané dráhy. Nejprve byly použity dvě špejle natřené na modro, bohužel i mezi nimi docházelo k značnému kmitání. Jako zlepšení byl použit vršek od hnědé elektrikářské krycí lišty o velikosti 0.4m. Při zanedbaném tření byly získány průběhy, které odpovídají integrační soustavě a pro zpřesnění jsem použil průměr z 10 průběhů, jak je patrné z obr.10.



Obr. 10. Průběh hodnot v ose y

Dále bylo potřeba získat identifikací parametry přenosu – použit byl Řešitel v programu MS EXCEL, kdy jsem vycházel z přenosu v manuálu, a z něj byla odvozena rovnice přechodového děje :

$$G(s) = \frac{K}{s^2(T_m s + 1)} = \frac{k}{s^2(s+b)} = \frac{K = \frac{k}{b}}{T_m = \frac{1}{b}}$$

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{k}{s^3 \cdot (s+b)} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s^3} + \frac{D}{(s+b)} \right\}$$

$$k = As^2(s+b) + Bs(s+b) + C(s+b) + s^3 D$$

∴

$$A = \frac{k}{b^3}$$

$$B = -\frac{k}{b^2}$$

$$C = \frac{k}{b}$$

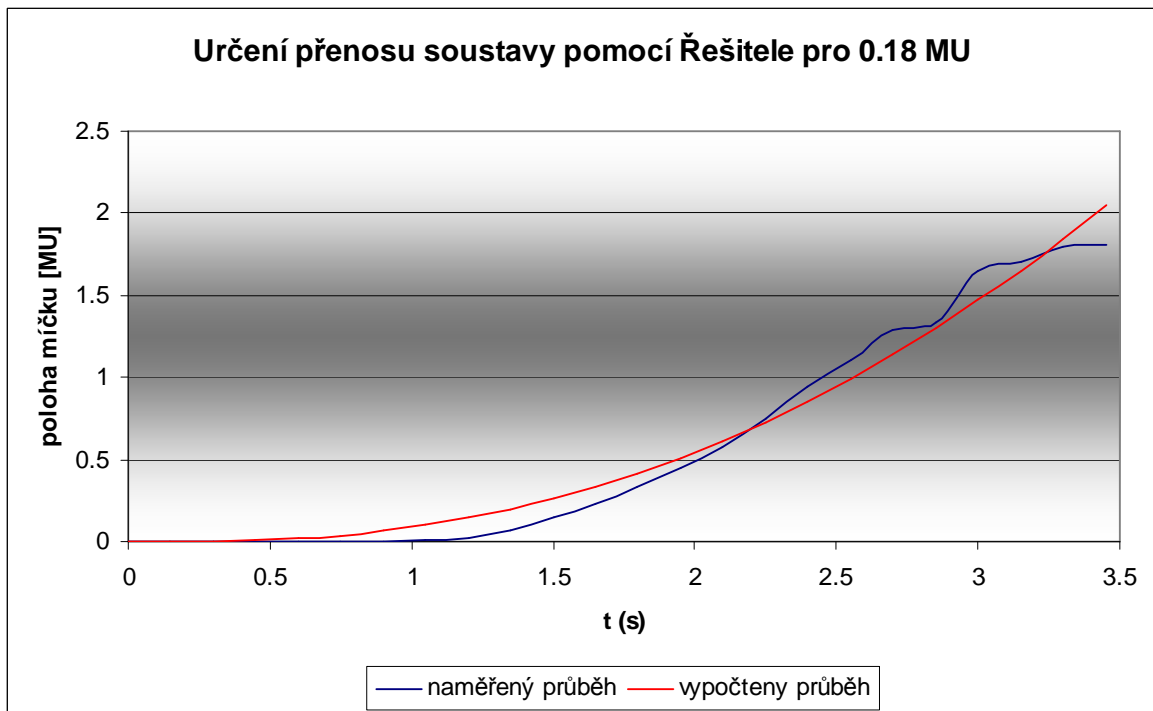
$$D = -\frac{k}{b^3}$$

(39)

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{k}{b^3} - \frac{k}{b^2} + \frac{k}{b} - \frac{k}{b^3} \right\} \quad (40)$$

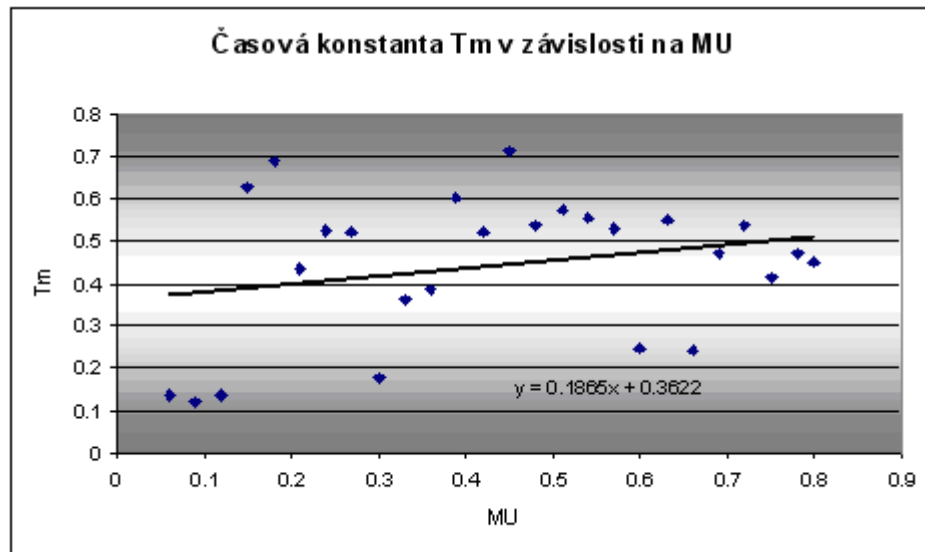
$$h(t) = \frac{k}{b^3} - \frac{k}{b^2} \cdot t + \frac{k}{b} \frac{t^2}{2} - \frac{k}{b^3} \cdot e^{-bt}$$

Ta byla použita pro rovnici z které vycházel Řešitel v programu MS EXCEL.



Obr. 11. Použití Řešitele pro identifikaci

Hodnoty parametrů T_m a K byly získány z naměřených charakteristik dráhy míčku v Matlab/Simulinku a pomocí Řešitele v MS EXCELu byly vypočteny pro daný přenos třetího řádu. Ze zprůměrovaných hodnot K bylo patrné, že zesílení je příliš velké a neodpovídá, proto byl použit jiný postup k přesnějšímu získání hledaných parametrů. Časová konstanta T_m byla tedy vyhovující a z naměřených hodnot se proložením křivky lineární regrese získala hodnota časové konstanty $T_m=0.1865$, což je patrné z obr. 12.



Obr. 12. Hodnoty Tm závislé na vstupním napětí v MU.

Z výukového manuálu byl převzat přenos linearizovaného modelu ve tvaru :

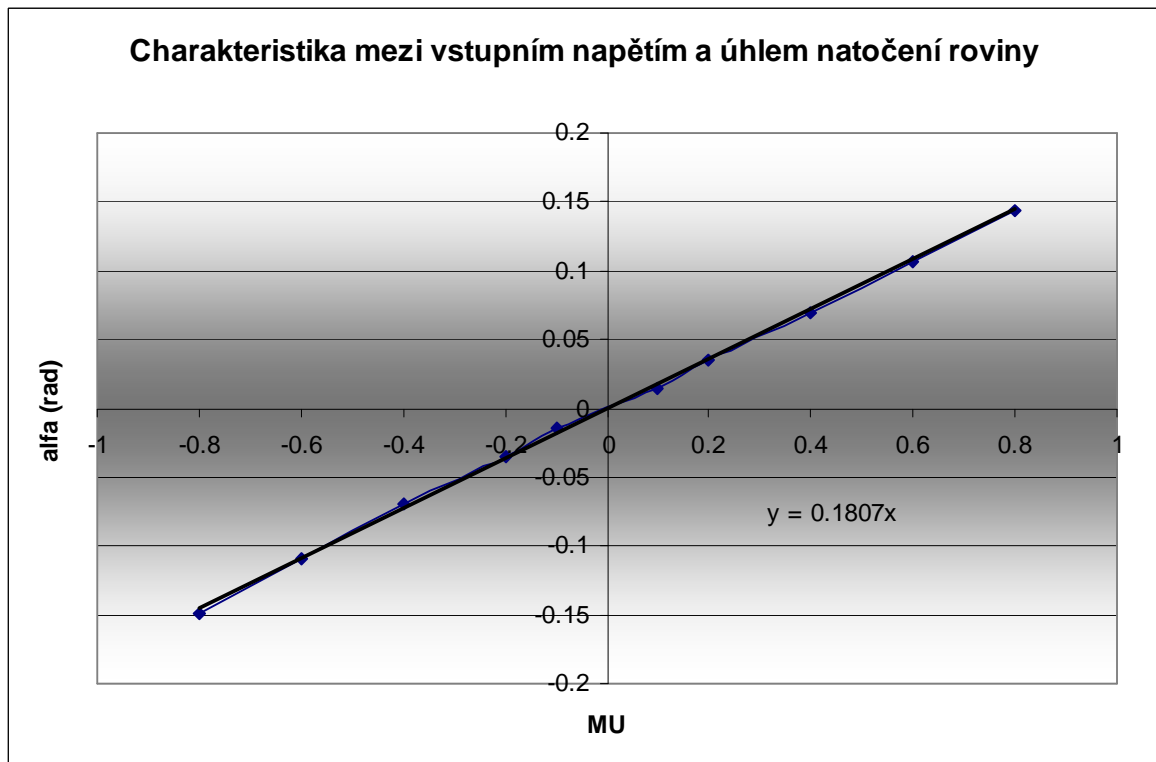
$$G(s) = \frac{Y_x}{U_\alpha} = \frac{K_\alpha * K_b * K_x}{s^2(T_m s + 1)} \tag{41}$$

kde získání specifických parametrů tohoto přenosu bylo provedeno experimentálním měřením:

Statické zesílení servosystému K_α bylo vyjádřeno jako závislost úhlu naklonění roviny na vstupním napětí krokového motoru. Z měření bylo patrné, že se jedná o lineární závislost pro obě osy .

Tab. 2.Tabulku naměřených hodnot na modelu CE 151

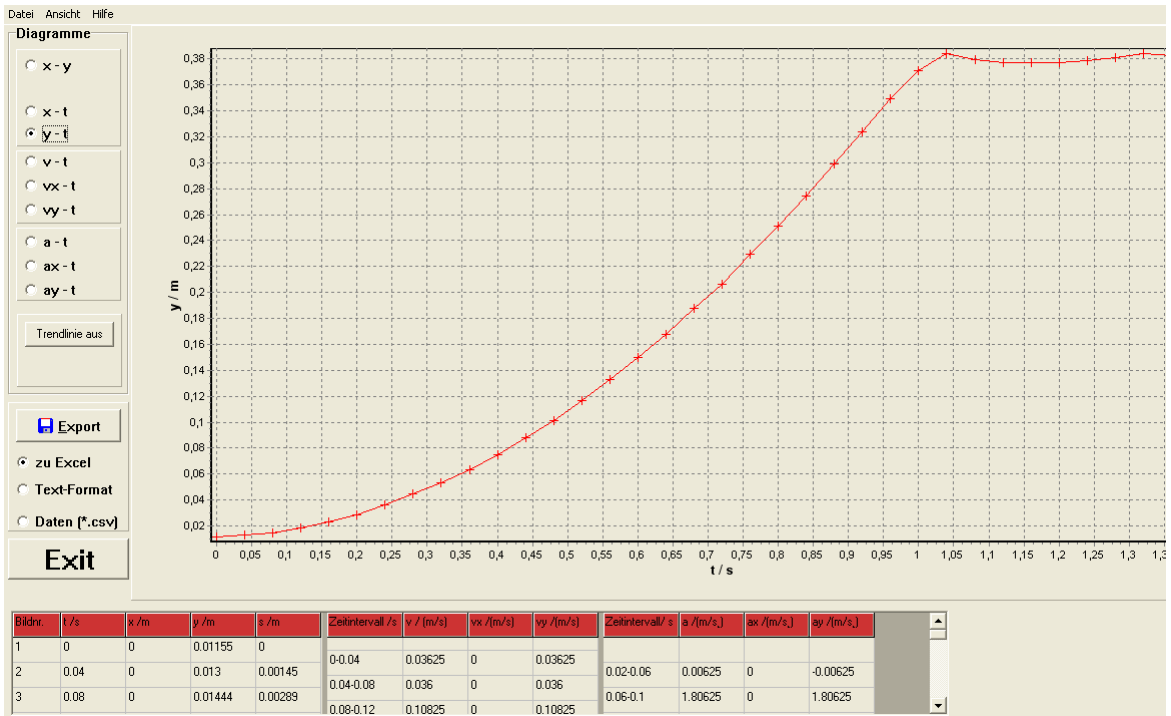
MU	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
y(cm)	-3	-2.2	-1.4	-0.7	-0.3	0.3	0.7	1.4	2.15	2.9
α (°)	-8.53509	-6.28048	-4.0062	-2.00555	-0.85981	0.85980	2.00555	4.00620	6.13884	8.25457
α (rad)	-0.14889	-0.10956	-0.06989	-0.03499	-0.015	0.01499	0.03498	0.06988	0.10708	0.14399



Obr. 13. Závislost natočení roviny na vstupním napětí v [MU]

Z Obr.12. je patrná lineární funkce $\alpha = k \cdot MU$, kde k bylo určeno jako 0.1878 rad/MU

Zesílení systému kulička-rovina K_b . K získání této konstanty byl využit program Viana3 [13], který s velkou přesností analyzuje zaznamenanou trajektorii míčku v metrech, a lze jednoduše vyjádřit jeho rychlost a zrychlení pro danou osu.

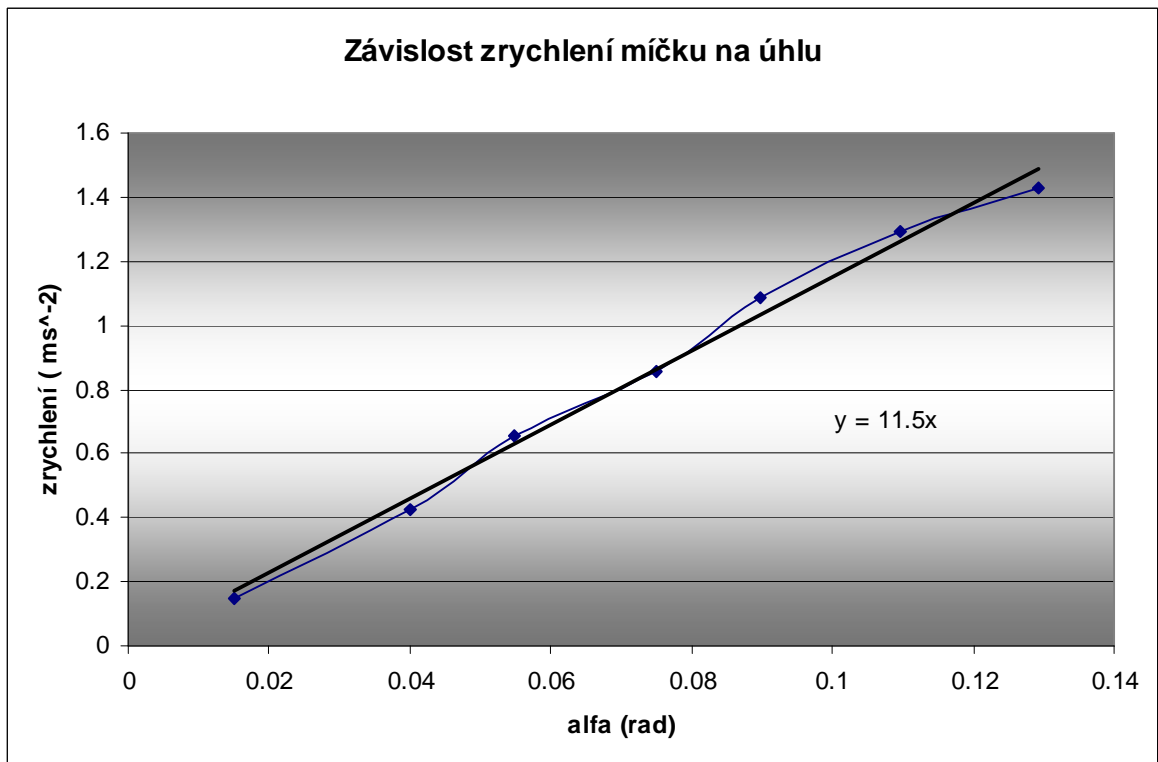


Obr. 14. Průběh dráhy míčku v programu Viana3

Z těchto drah míčku byly posléze získány konstanty proložení křivkou polynomiální regrese v programu MS EXCEL rovnicí druhého řádu a z ní po prvním derivaci vypočet rychlosti a po druhé zrychlení. Jak je patrné z tabulky níže :

Tab. 3. Hodnoty závislosti MU na zrychlení

MU	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
alfa	0.014999	0.039979	0.054945	0.07486	0.089758	0.10956	0.129275
rychlost	0.0732	0.2136	0.3269	0.4287	0.5444	0.6461	0.713
zrychleni	0.1464	0.4272	0.6538	0.8574	1.0888	1.2922	1.426

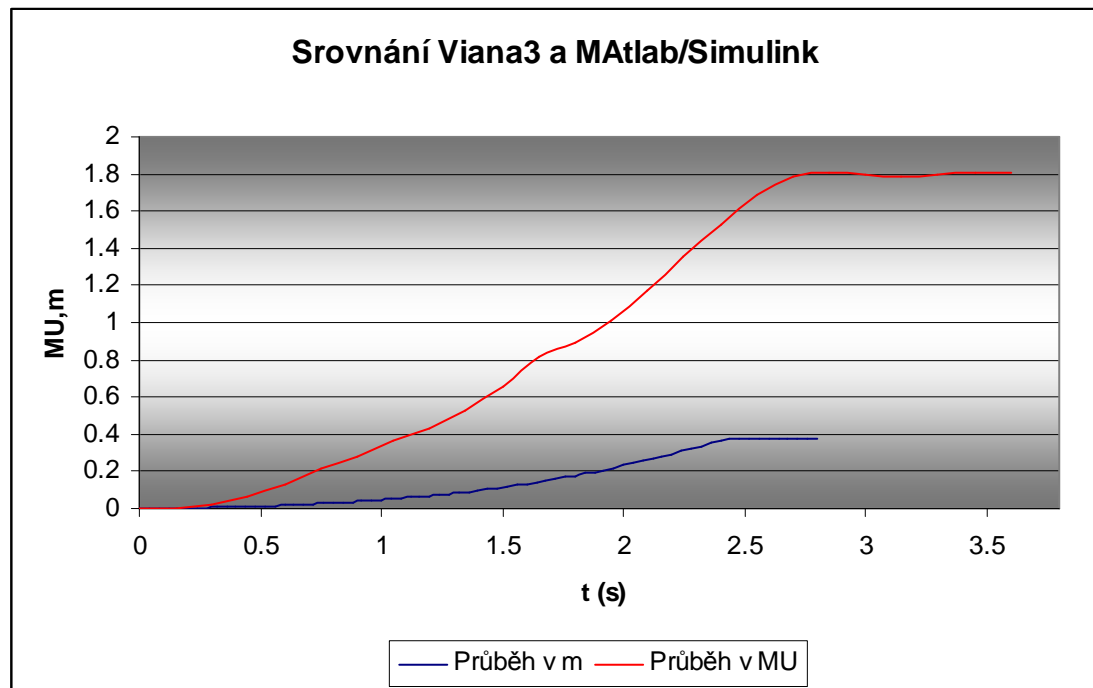


Obr. 15. Závislost zrychlení míčku na úhlu natočení roviny

Koeficient K_b byl stanoven jako 11.5

Na základě takto provedeného měření byla získána konstanta K_b jako : $11.5 \text{ ms}^{-2}/\text{rad}$.

Konstanta senzoru pozice míčku K_x , která byla vyjádřena v MU/m , byla získána porovnáním ustálené koncové polohy míčku z programu Viana3 v metrech s naměřeným průběhem ze schématu v Matlab/Simulinku v MU pro několik průběhů, zprůměrováním byla získána výsledná hodnota $K_x = 4.833 \text{ MU}/\text{m}$



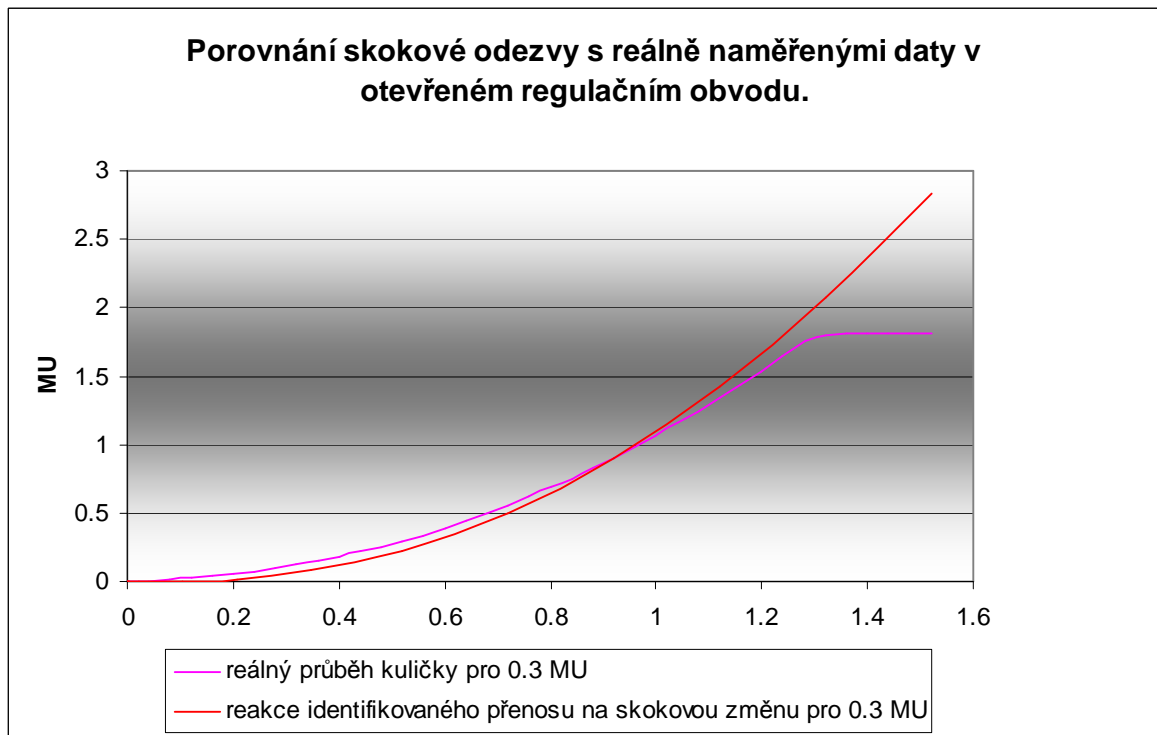
Obr. 16. Srovnání Viana3 a reakcí v programovém prostředí MATLAB/Simulink.

Ze získaných parametrů vyšel výsledný přenos ve tvaru :

$$G(s) = \frac{Y_x}{U_\alpha} = \frac{K_\alpha * K_b * K_x}{s^2(T_m s + 1)} = \frac{0.1878 * 11.5 * 4.83324}{s^2(0.1865s + 1)} = \frac{10.438}{s^2(0.1865s + 1)} \quad (42)$$

přičemž v manuálu je uváděn :

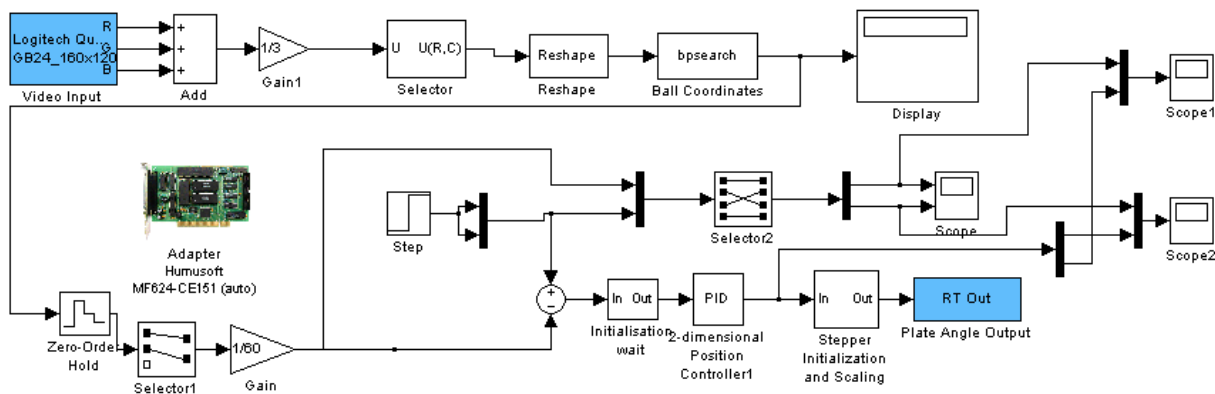
$$G(s) = \frac{4.803}{s^2(0.187s + 1)} \quad (43)$$



Obr. 17. Porovnání simulační odezvy s reálně naměřenými daty v otevřeném regulačním obvodu.

5 NÁVRH ŘÍZENÍ

Pro řízení bylo použité upravené schéma z demo-programu.



Obr. 18. Upravené schéma řízení

5.1 Naslinova metoda odvození PID regulátoru :

Naslinova metoda dokazuje, že pokud pro koeficienty charakteristické rovnice :

$$a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \tag{44}$$

platí nerovnost :

$$a_i^2 \geq a a_{i-1} a_{i+1} \text{ pro } i = 1, 2, \dots, (n-1) \tag{45}$$

potom maximální přeregulování $\Delta y_{\max} [\%]$ - překmit závisí na hodnotě α podle následující tabulky.

Tab. 4. Závislost $\Delta y_{\max} [\%]$ na α podle Naslina [7]

α	1.75	1.8	1.9	2	2.2	2.4
$\Delta y_{\max} [\%]$	16	12	8	5	3	1

Přenos soustavy uvažujeme ve tvaru :

$$G(s) = \frac{10.438}{s^2(0.1865s + 1)} \quad (46)$$

Přenos regulátoru (ideální PID) :

$$G(r) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_d s\right) \quad (47)$$

Přenos řízení :

$$\begin{aligned} G_{w/Y}(s) &= \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} = \frac{\left(r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s\right) \left(\frac{10.438}{0.1865s^3 + s^2}\right)}{1 + \left(r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s\right) \left(\frac{10.438}{0.1865s^3 + s^2}\right)} = \\ &= \frac{r_0 s + r_{-1}}{0.1865s^4 + s^3 + 10.438r_0 s + 10.438r_{-1} + 10.438r_1 s^2} \end{aligned} \quad (48)$$

Charakteristická rovnice :

$$0.1865s^4 + s^3 + 10.438r_1 s^2 + 10.438r_0 s + 10.438r_{-1} \quad (49)$$

$$a_i^2 \geq a a_{i-1} a_{i+1} \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (50)$$

platí :

$$\text{pro } i=1: (10.438r_0)^2 \geq 2 * 10.438r_1 * 10.438r_{-1} \Rightarrow r_{-1} = 2.4063 \quad (51)$$

$$\text{pro } i=2: (10.438r_1)^2 \geq 2 * 1 * 10.438r_0 \Rightarrow r_0 = 0.3441 \quad (52)$$

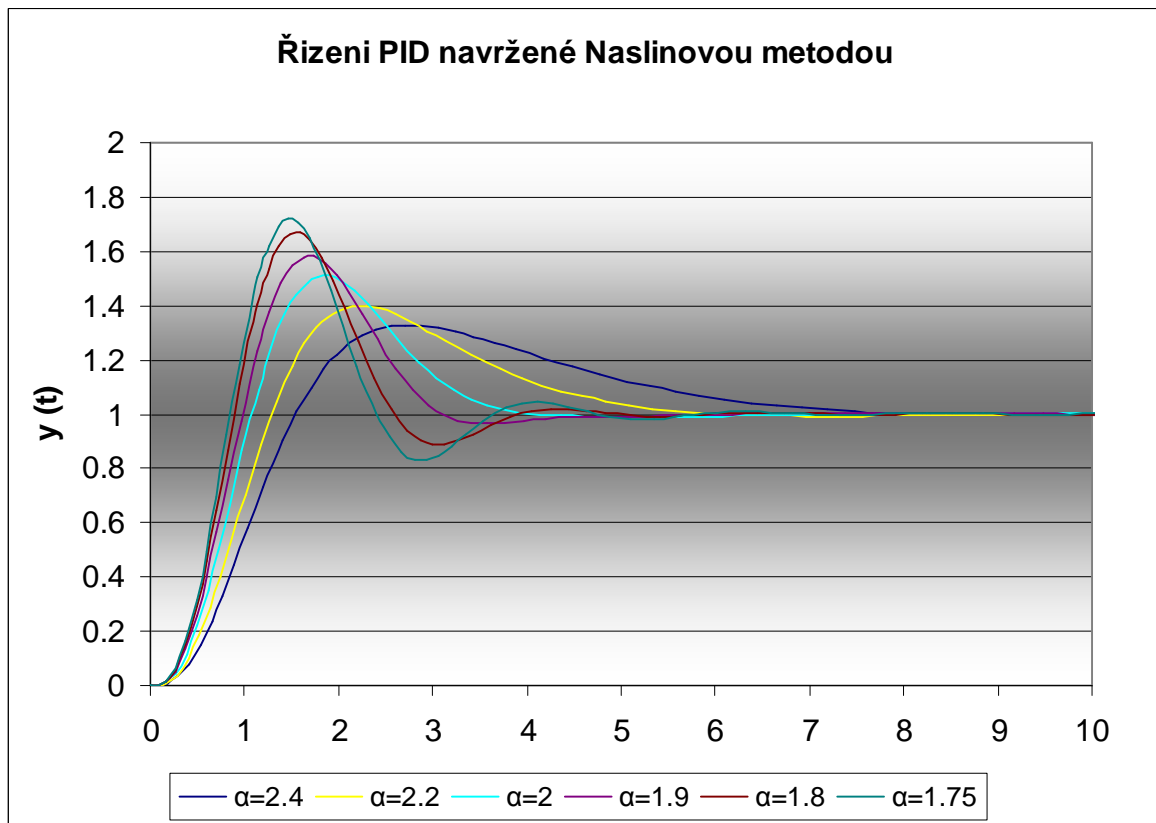
$$\text{pro } i=3: (1)^2 \geq 2 * 10.438r_1 * 0.1865 \Rightarrow r_1 = 0.2568 \quad (53)$$

parametry regulátoru :

$$r_{-1} = 0.2308 \quad r_0 = 0.3443 \quad r_1 = 0.2568 \quad (54)$$

Výsledný přenos regulátoru :

$$G_R(s) = 0.3443 + \frac{0.2308}{s} + 0.2568s \quad (55)$$

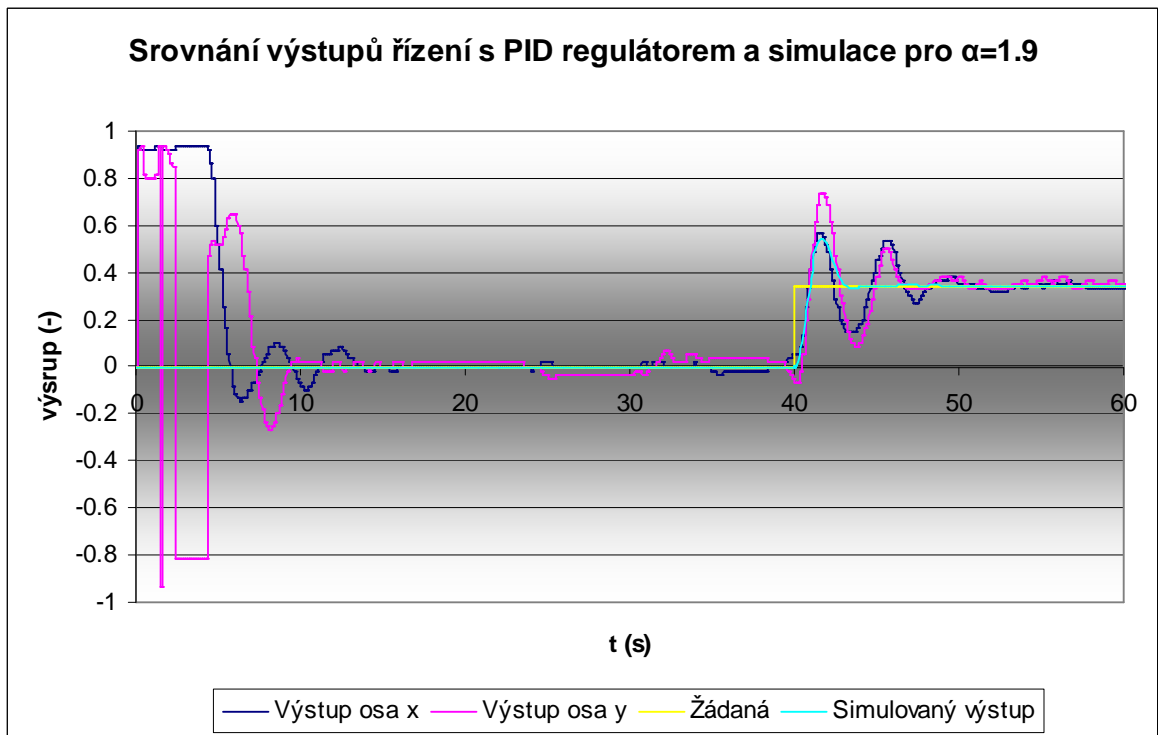


Obr. 19. Simulace řízení PID pomocí Naslinovy metody

Z toho vyplynulo, že nejrychlejší ustálení bez podkmitu bylo pro

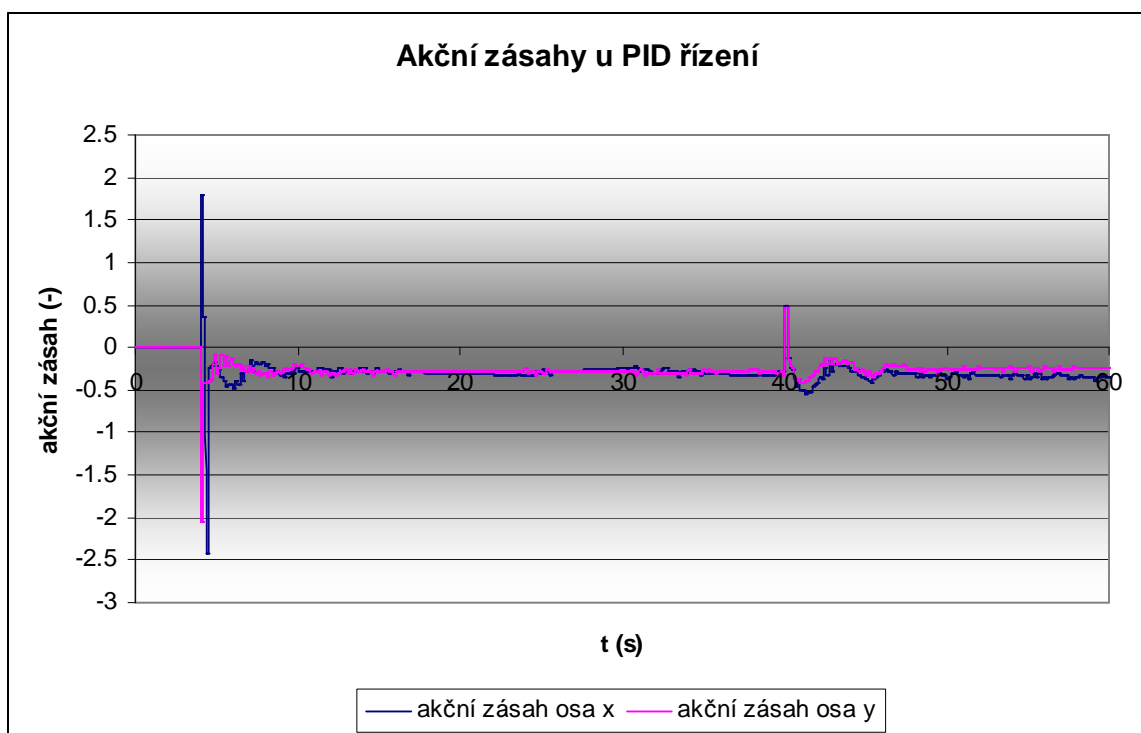
$\alpha=2$ s přeregulování 66 %.

Srovnáním s reálným modelem :

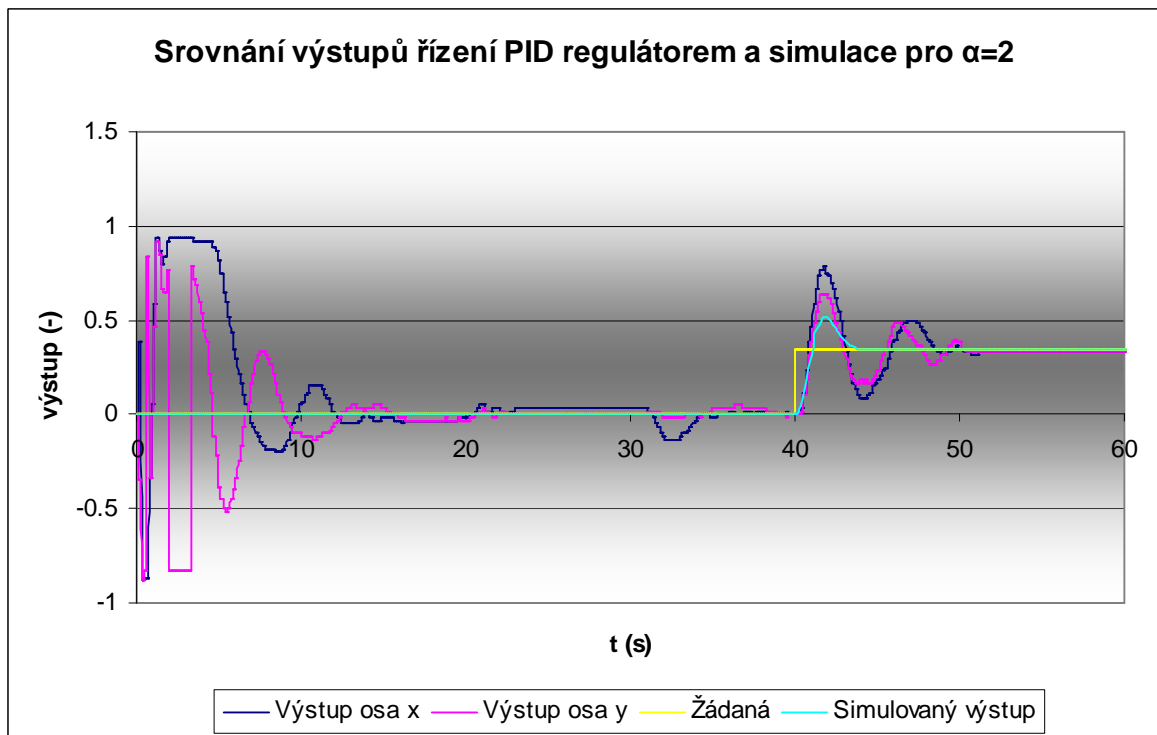


Obr. 20. Srovnání výstupu PID regulátorem

Kde v simulaci v MATLAB/Simulinku byla hodnota překmitu 67[%] a doba ustálení 4.2[s], při reálném řízení pak v ose x byl překmit 68[%] a ustálení 11[s] a osa y měla překmit 108[%] a ustálení 10[s].

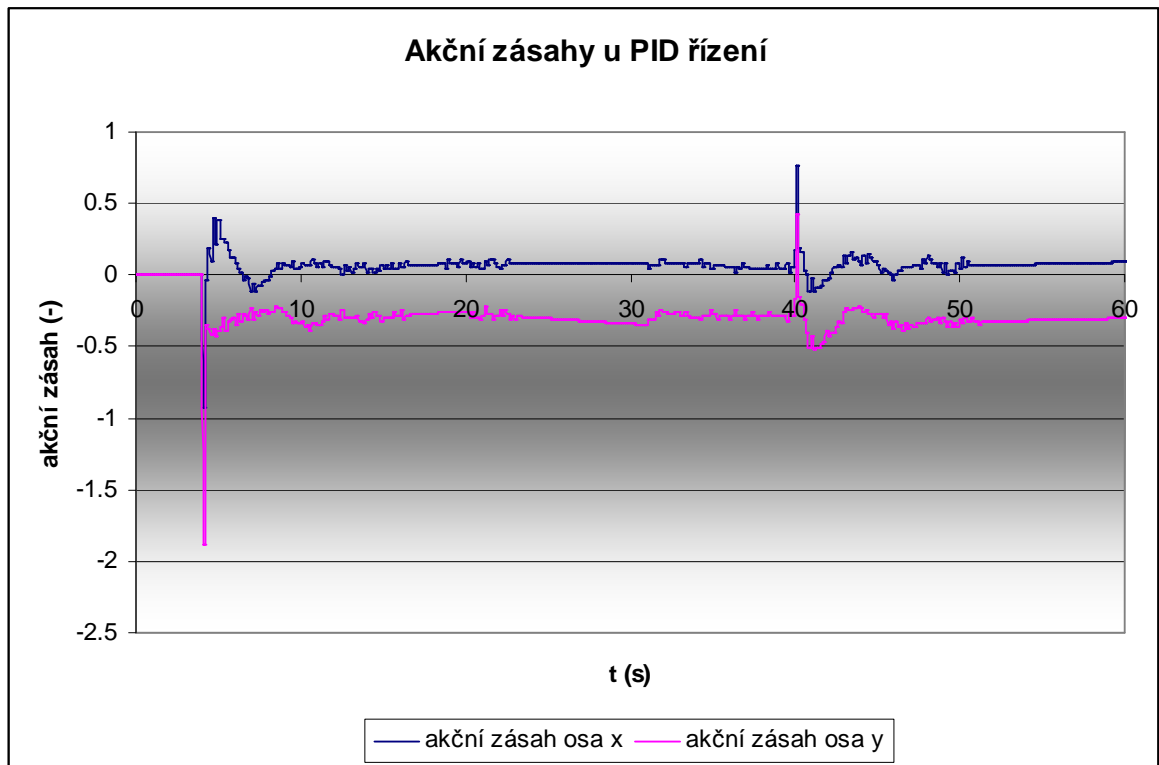


Obr. 21. Akční zásahy u PID



Obr. 22. Srovnání výstupu PID regulátorem

Kde v simulaci v MATLAB/Simulinku byla hodnota překmitu 44[%] a doba ustálení 4.5[s], při reálném řízení pak v ose x byl překmit 125[%] a ustálení 10[s] a osa y měla překmit 76[%] a ustálení 10[s].



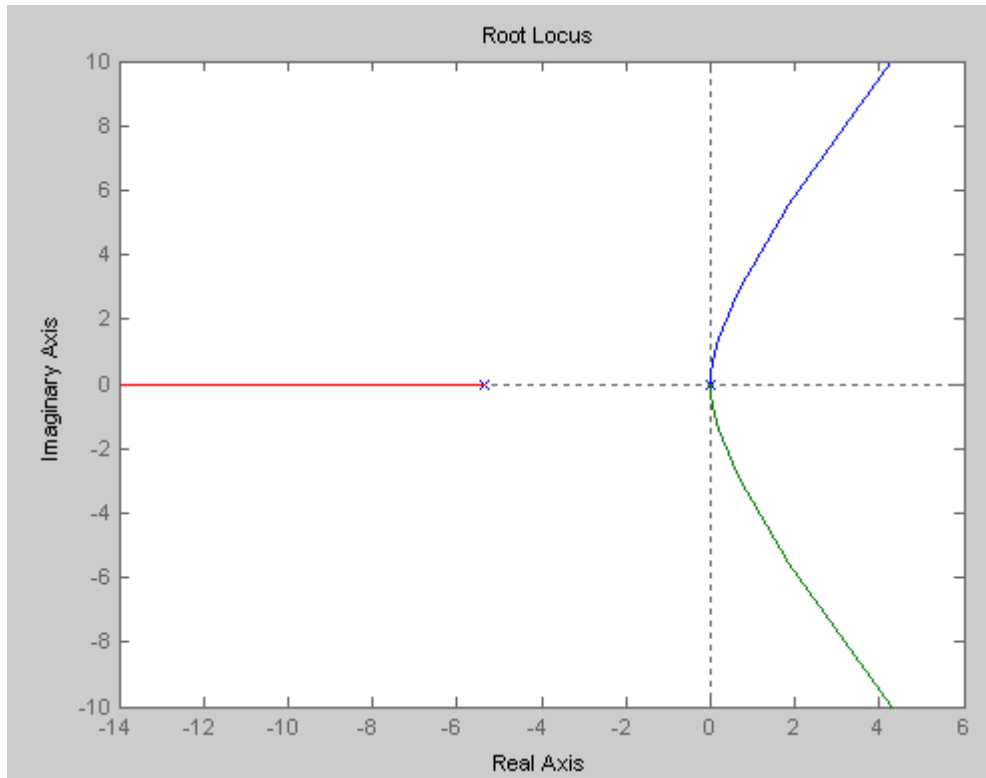
Obr. 23. Akční zásahy u PID

5.2 Návrh regulátoru pomocí metody geometrického místa kořenů

Přenos soustavy je uvažován ve tvaru :

$$G(s) = \frac{10.438}{s^2(0.1865s + 1)} \quad (56)$$

Pomocí příkazu rlocus byly vykresleny polohy kořenů.



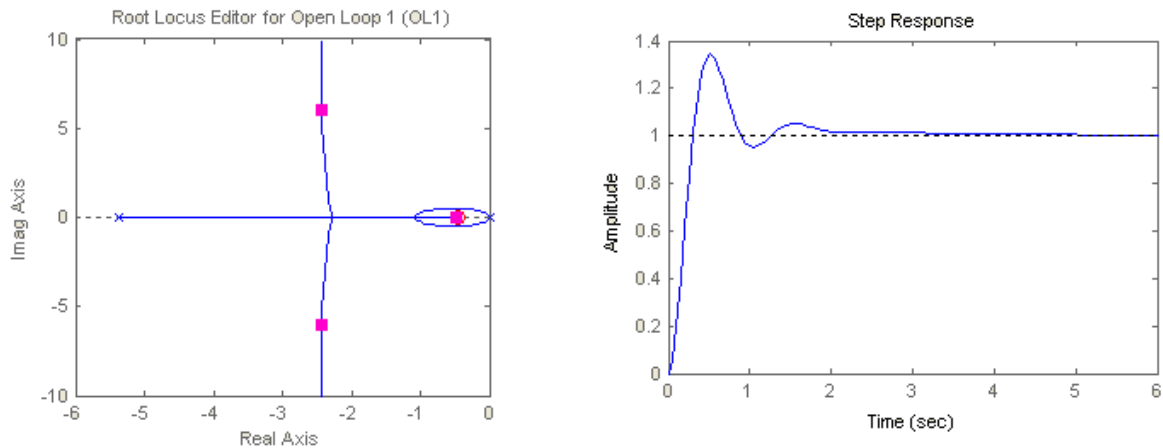
Obr. 24. Kořenový hodograf identifikovaného přenosu.

Z obr.24 je patrné, že je to soustava s astatismem druhého řádu a soustava je v uzavřené smyčce nestabilní. Dvě větve kořenového hodografu vychází z nulových pólů a směřují do nestabilní oblasti. Z toho lze vyvodit, že nelze užít pro regulaci P ani PI regulátor - z důvodu přidání dalších pólů by větve kořenového hodografu nedosáhly stabilní oblasti.

Stabilní návrh se tedy docílí tak, že se část křivek přesune do stabilní oblasti tím, že se přidají do soustavy regulátorem nuly. S teorie vyplývá vhodný regulátor PD a PID. Pomocí nástroje Sisotool byly tedy nalezeny vhodné typy přenosů regulátoru splňující dynamické požadavky soustavy a stabilitu obvodu.

Návrh PD regulátoru pro danou soustavu :

PD- regulátor představuje v otevřené smyčce nulu a zesílení K .



Obr. 25. Kořenový hodograh s přechodovou odezvou pro navržený PD regulátor.

Nula, která byla umístěna na záporně-reálnou poloosu blízko počátku, přesune větve kořenového hodografu do stabilní oblasti, jak patrné z obr.25, kde nula byla zvolena ve tvaru

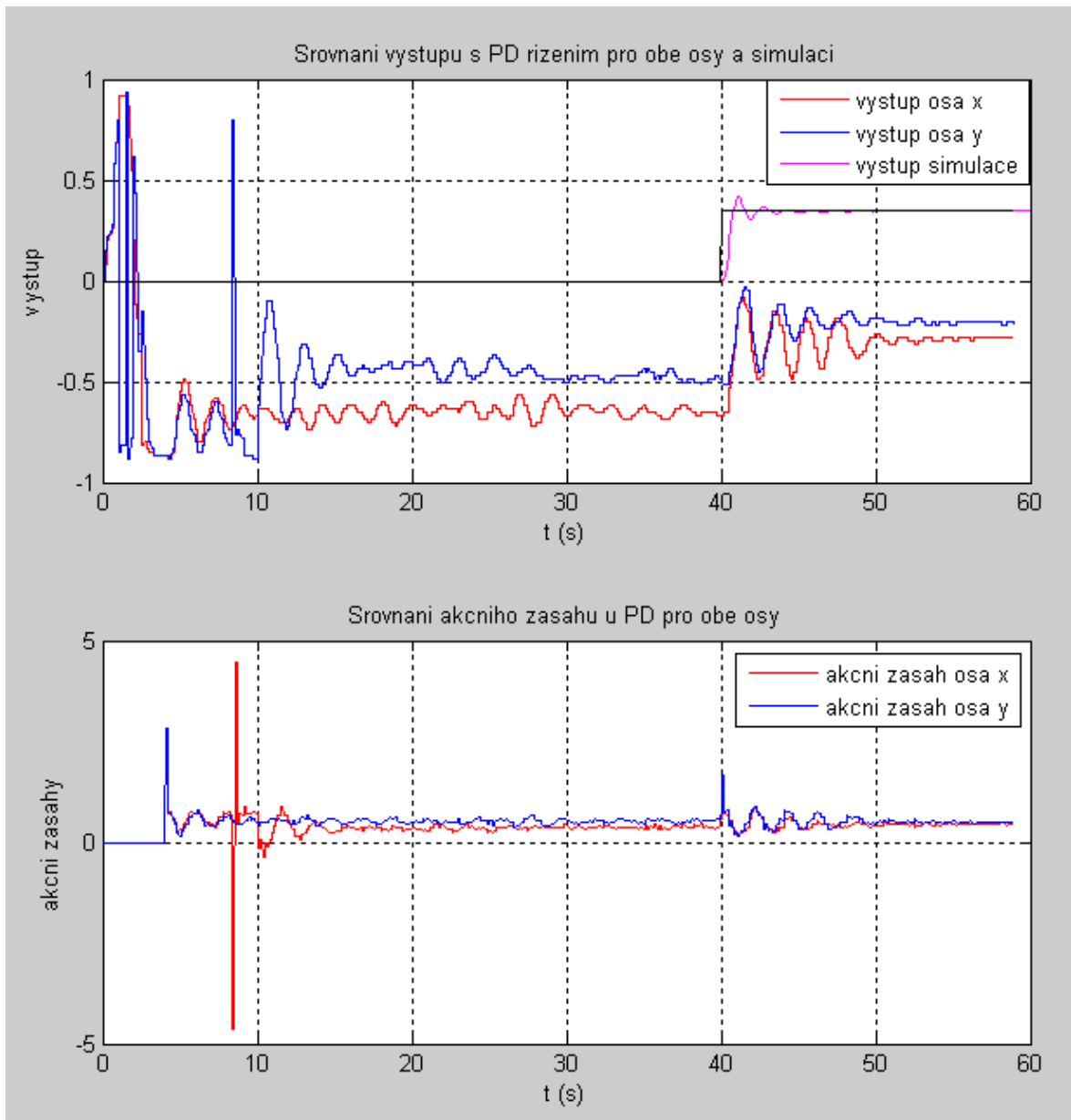
$$n = -0.463.$$

Experimentálním seřízením byl získán přeno regulátoru ve tvaru :

$$R(s) = K(s + s_{BR2}) = 0.8(s + 0.4625) \quad (57)$$

$$K = r_2 = 0.8 \quad (58)$$

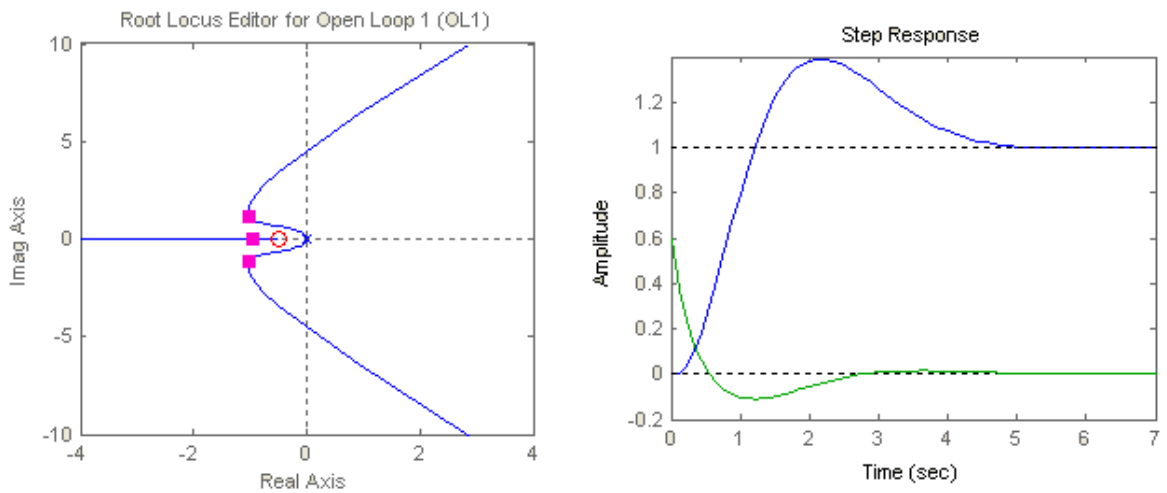
$$r_0 = r_2 * s_{BR2} = 0.37 \quad (59)$$



Obr. 26. Srovnání výstupu s PD řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů

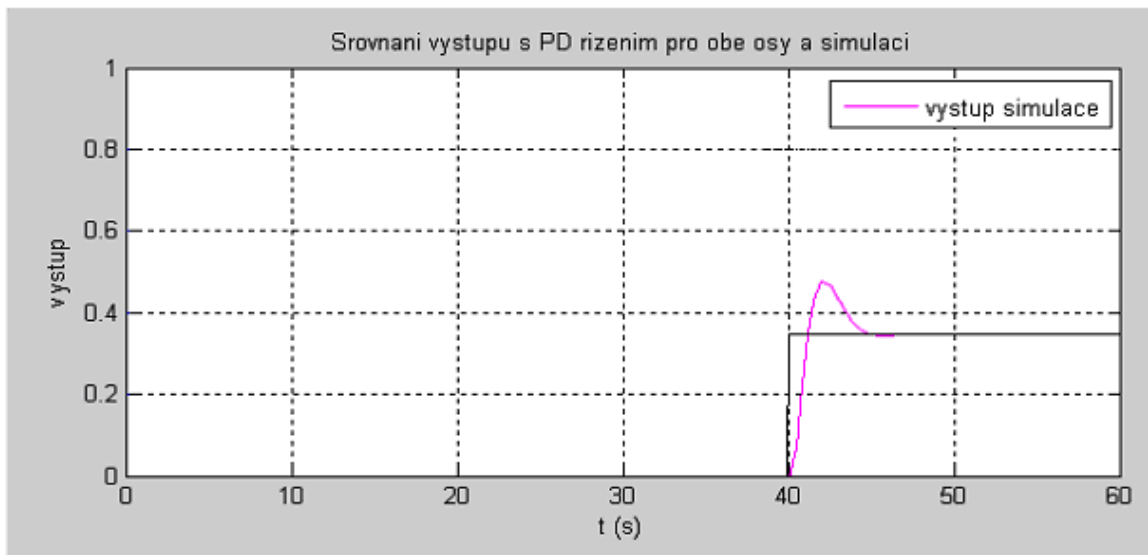
Z výsledku je patrné, že samotný PD regulátor simulačně dosáhl stanovené žádané hodnoty, ale u reálného řízení nedosáhne - tak byl pro regulaci reálné soustavy nepoužitelný. Překmit byl 34.4[%] a doba ustálení 1.93[s] pro simulaci v programové podpoře „*SISO Design Tool*“ v MATLAB/Simulinku byly hodnoty překmitu 16[%] a doba ustálení 4[s].

Další možností byla použití filtrací regulátoru, které se docílilo tak, že kromě nuly se přidal pól, odpovídající dané filtraci. Zvolením nuly o velikosti $n = -0,494$, potom pól daný filtrací by měl být 10 až 15× větší, tedy $p = -4.8$.



Obr. 27. Kořenový hodograf s přechodovou odezvou pro navržený PD regulátor s filtrací.

Průběh v simulaci vyšel, při aplikaci na reálný model však docházelo k značnému rušení a nestabilitě.



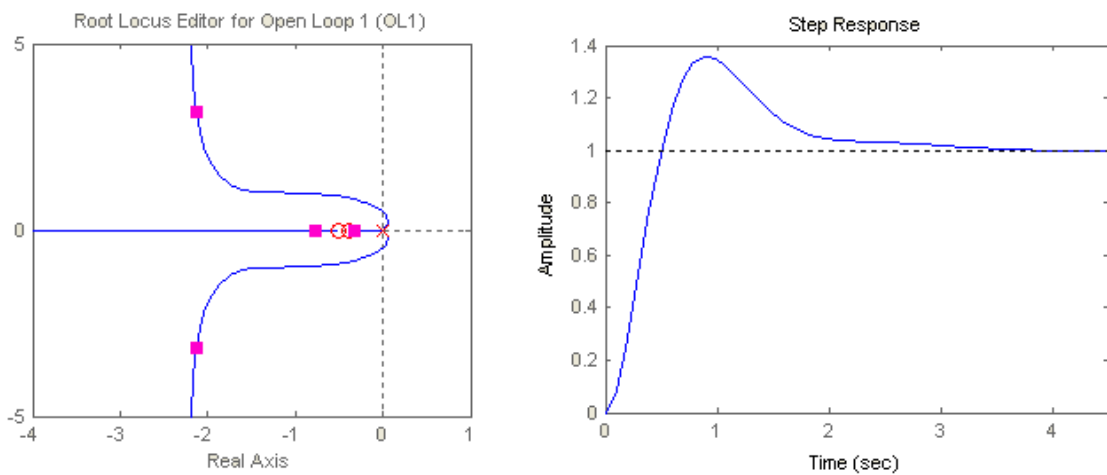
Obr. 28. Simulace PD regulátoru s filtrem.

Překmit byl 38.9[%] a doba ustálení 4.56[s] pro simulaci v programové podpoře „*SISO Design Tool*“ v MATLAB/Simulinku byly hodnoty překmitu 36[%] a doba ustálení 5[s].

Proto byl další návrh regulátoru realizován pomocí PID regulátoru, označeném jako PID.1.

Ideální PID – regulátor reprezentuje v otevřené smyčce pól v hodnotě nula, dvě nuly S_{BR1} , S_{BR2} a zesílení K .

Experimentálně byly zvoleny dvě nuly $n_1 = -0.38$, $n_2 = -0.5$. a překmit v simulaci vyšel 35.6 [%] a ustálení 2.97 [s].



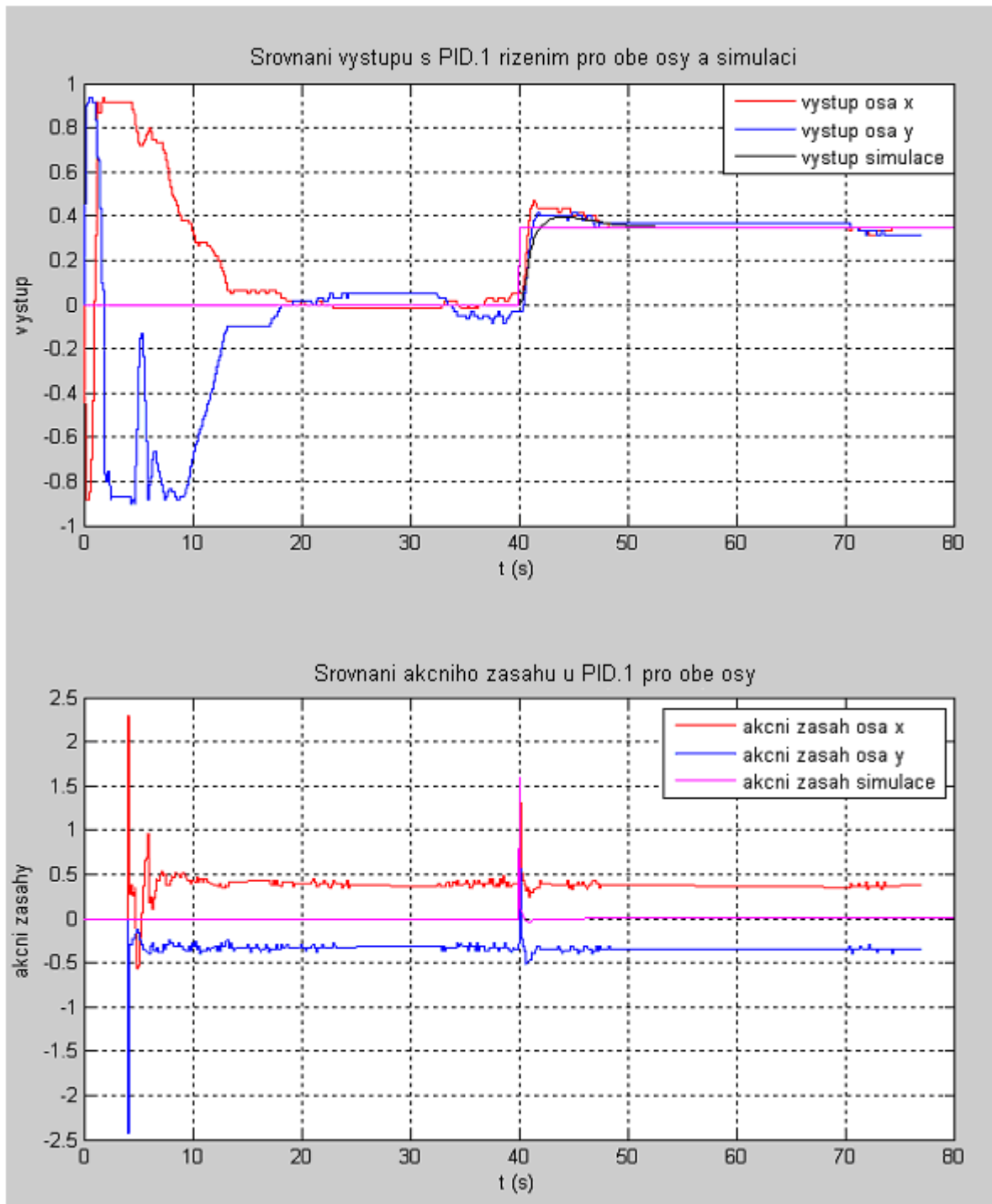
Obr. 29. Kořenový hodograf s přechodovou odezvou pro PID.1 regulátor.

Výsledný regulátor byl tedy ve tvaru :

$$R(s) = \frac{0.35(s + 0.38)(s + 0.5)}{s} \quad (60)$$

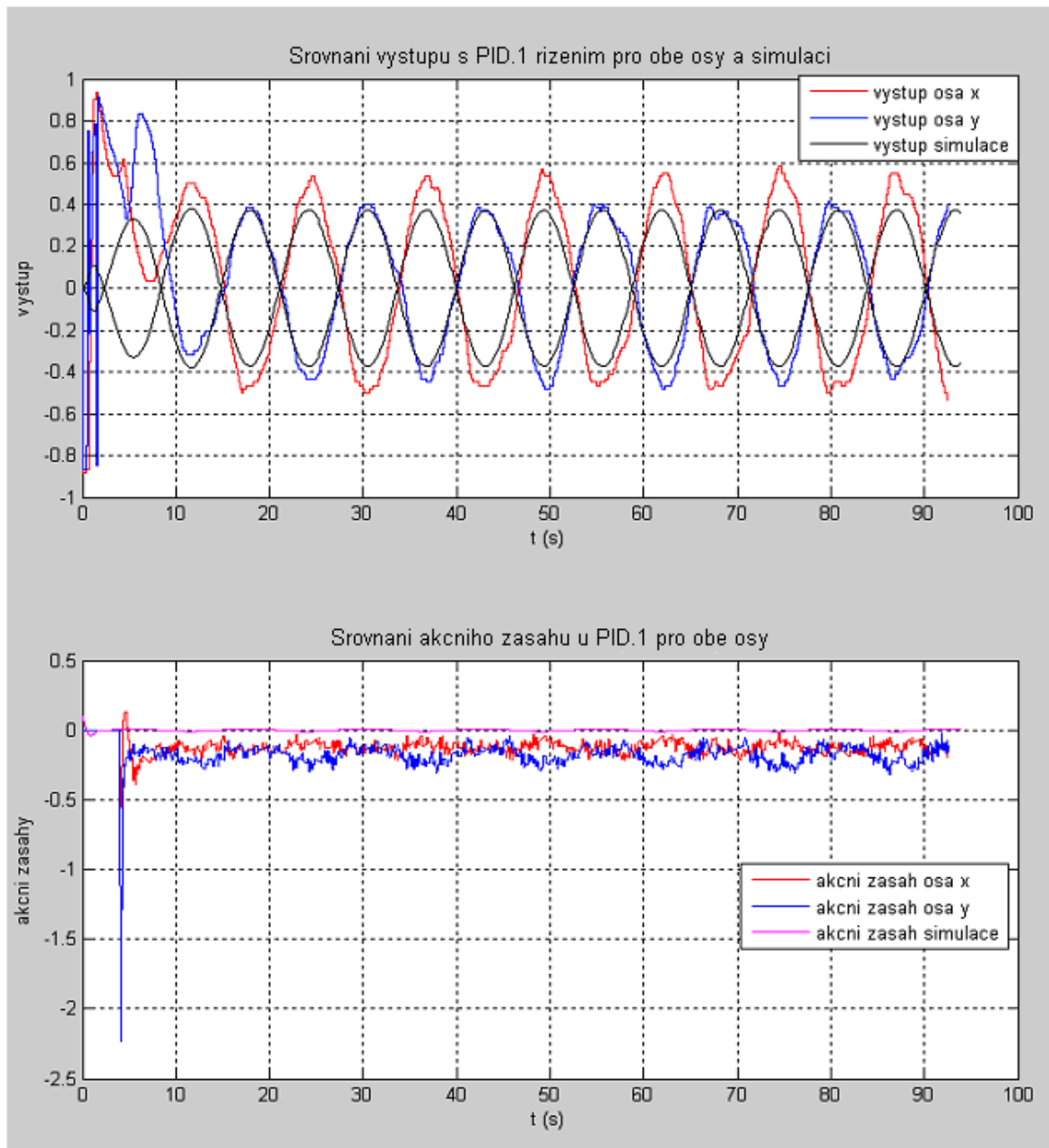
Porovnáním lze odvodit :

$$\begin{aligned} r_0 &= r_2 * (S_{BR1} + S_{BR2}) = 0.308 \\ r_1 &= r_2 * (S_{BR1} * S_{BR2}) = 0.0665 \\ r_2 &= 0.35 \end{aligned} \quad (61)$$



Obr. 30. Srovnání výstupu s PID.1 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů.

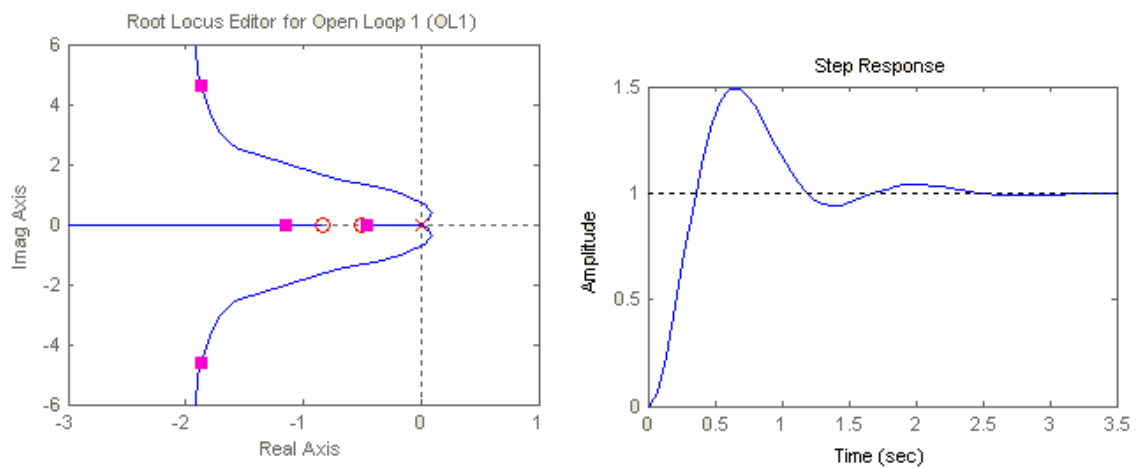
Kde v simulaci v MATLAB/Simulinku byla hodnota překmitu 16[%] a doba ustálení 8[s], při reálném řízení pak v ose x byl překmit 30[%] a ustálení 9[s] a osa y měla překmit 16[%] a ustálení 9[s]. Překmit byl 35.6[%] a doba ustálení 2.97[s] pro simulaci v programové podpoře „*SISO Design Tool*“.



Obr. 31. Srovnání výstupu s PID.1 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů pro funkci sinus v ose x a cosinus v ose y.

Další navržený PID regulátor byl označen jako PID.2 .

Experimentálně byly zvoleny dvě nuly $n_1 = -0.838$, $n_2 = -0.4992$.



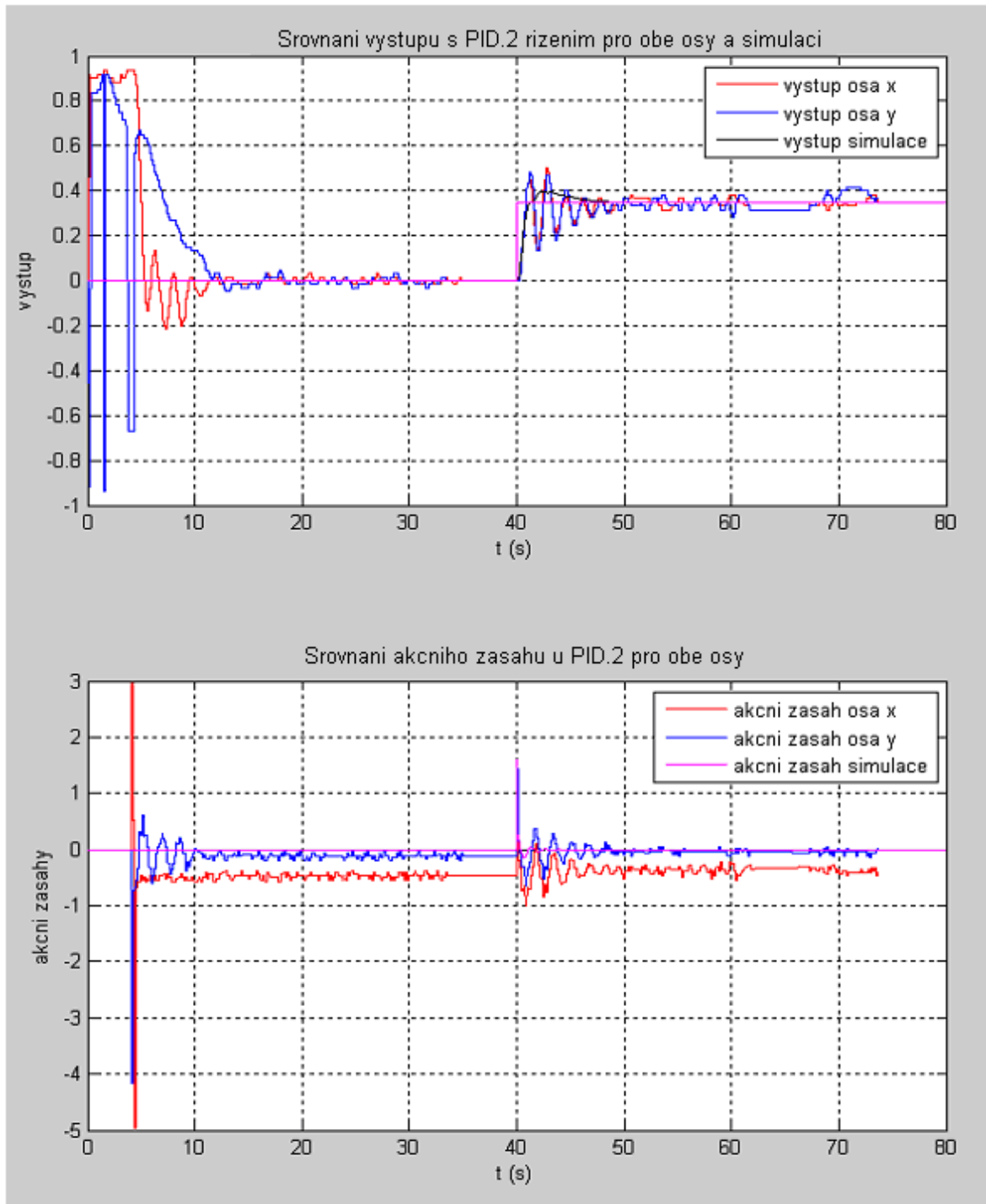
Obr. 32. Kořenový hodograf a přechodová odezva pro PID.2 regulátor.

Výsledný regulátor byl tedy ve tvaru :

$$R(s) = \frac{0.55698(s + 0.838)(s + 0.4992)}{s} \quad (62)$$

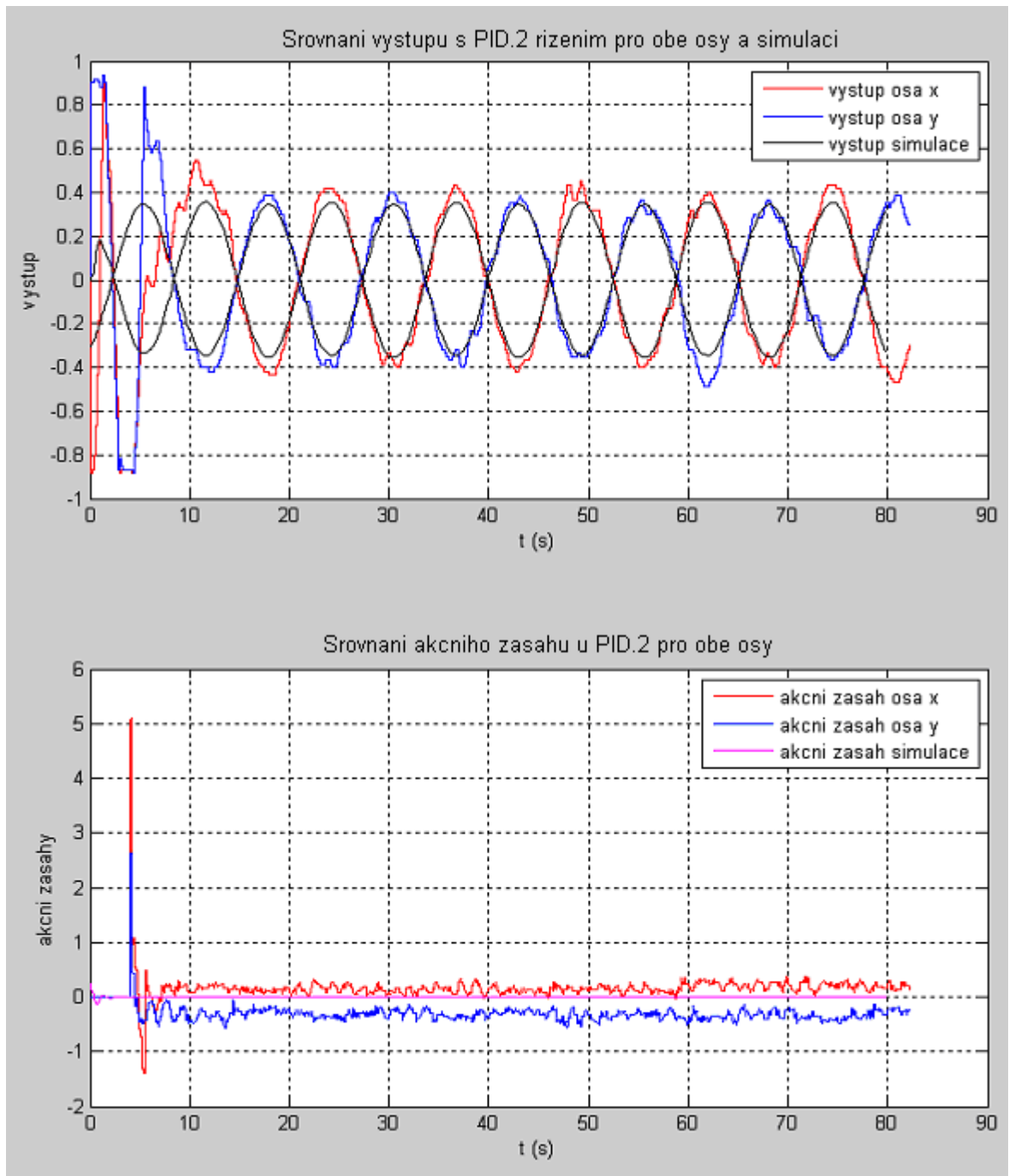
Porovnáním lze odvodit :

$$\begin{aligned} r_0 &= r_2 * (S_{BR1} + S_{BR2}) = 0.7442 \\ r_1 &= r_2 * (S_{BR1} * S_{BR2}) = 0.2328 \\ r_2 &= 0.5566 \end{aligned} \quad (63)$$



Obr. 33. Srovnání výstupu s PID.2 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů

Kde v simulaci v MATLAB/Simulinku byla hodnota překmitu 16[%] a doba ustálení 8[s], při reálném řízení pak v ose x byl překmit 36[%] a ustálení 30[s] a osa y měla překmit 33[%] a ustálení 30[s]. Překmit byl 48.2[%] a doba ustálení 2.27[s] pro simulaci v programové podpoře „*SISO Design Tool*“.



Obr. 34. Srovnání výstupu s PID.2 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů pro funkce sinus v ose x a cosinus v ose y.

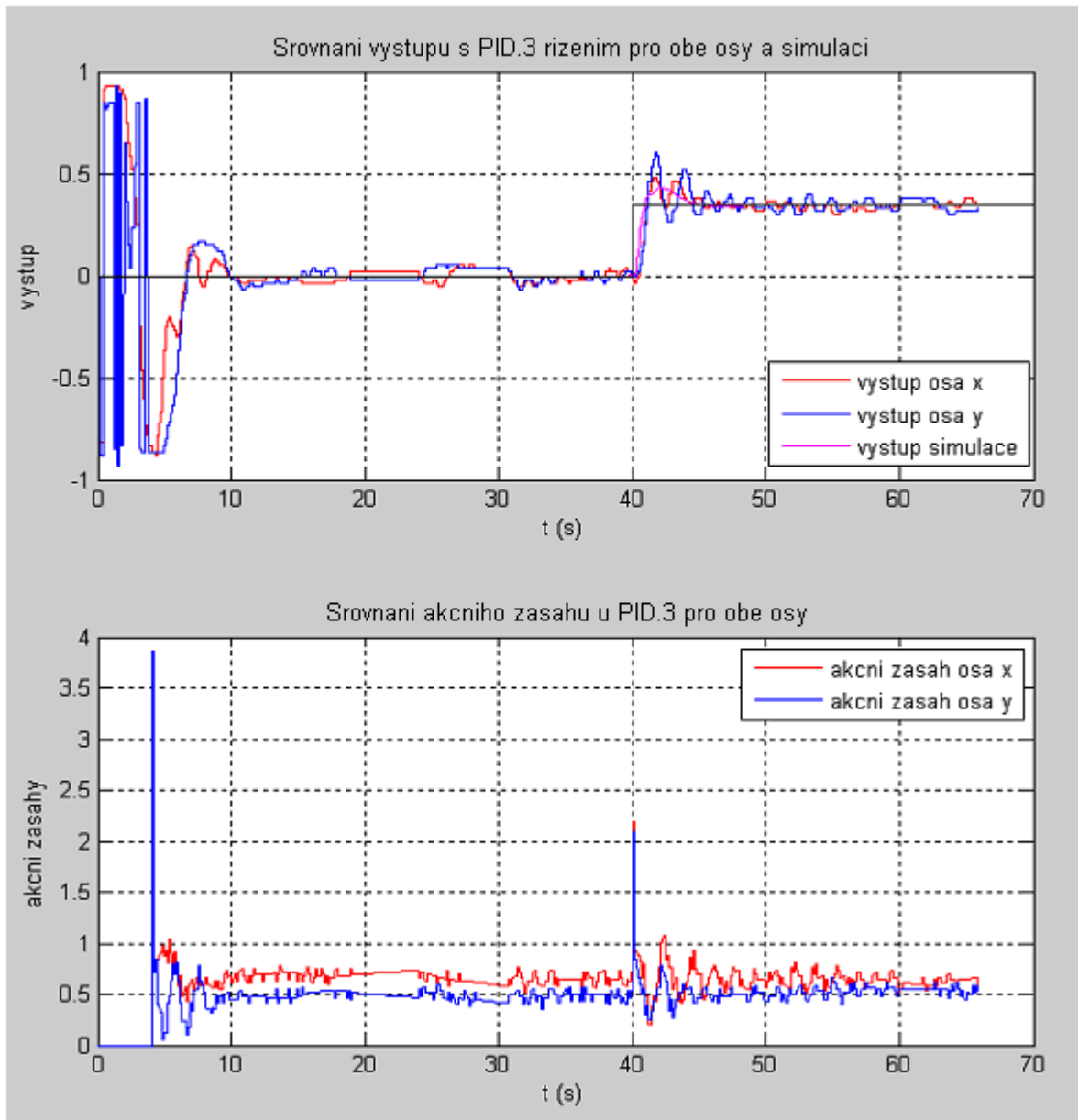
Ponecháním předchozího regulátoru a zvýšením integrační složky byly získány parametry z kterých se porovnáním odvodily parametry PID.3 regulátoru :

$$r_0 = r_2 * (S_{BR1} + S_{BR2}) = 0.7442$$

$$r_1 = r_2 * (S_{BR1} * S_{BR2}) = 0.4974$$

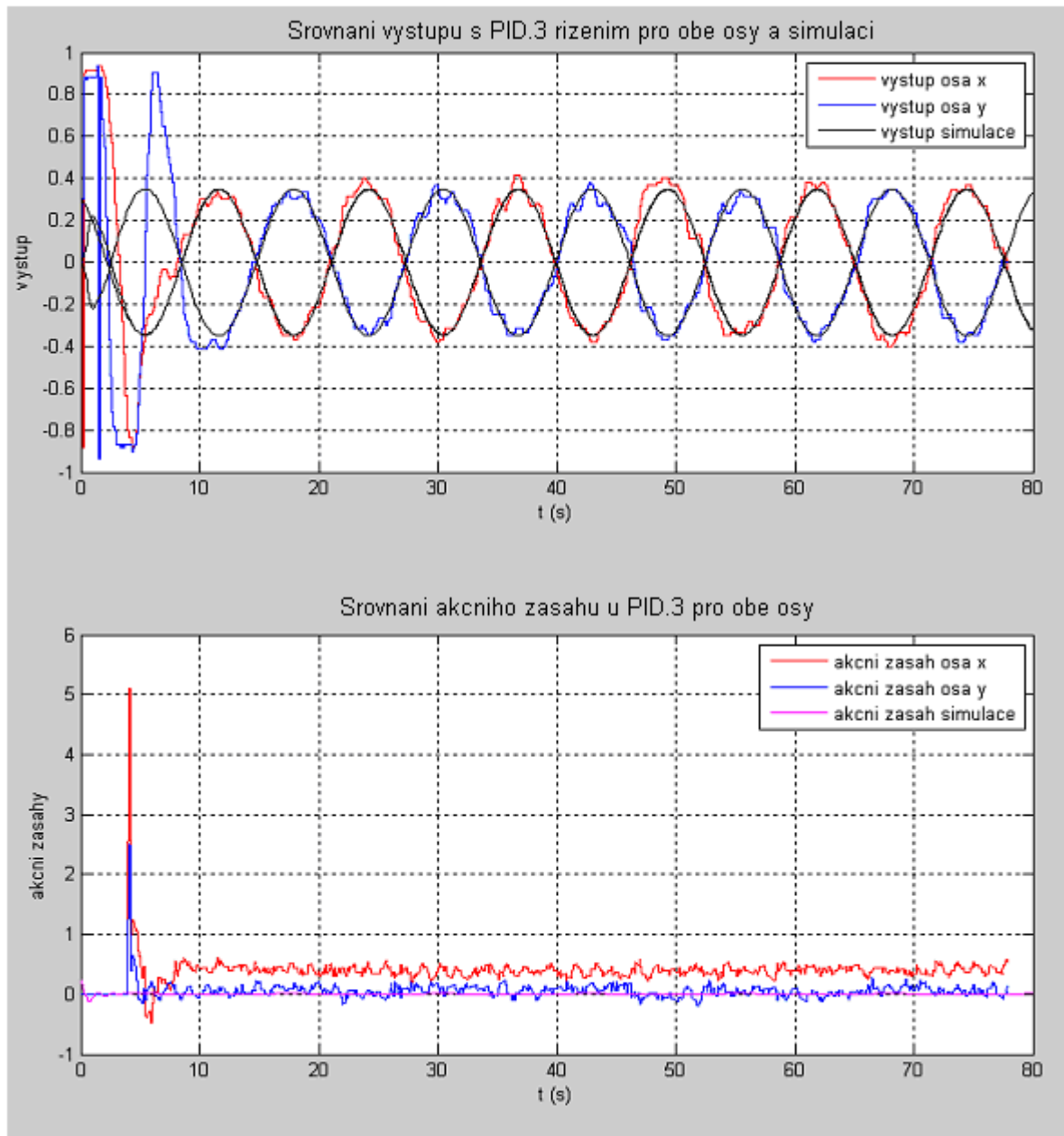
$$r_2 = 0.5566$$

(64)



Obr. 35. Srovnání výstupu s PID.3 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů

Kde v simulaci v MATLAB/Simulinku byla hodnota překmitu 30[%] a doba ustálení 5[s], při reálném řízení pak v ose x byl překmit 39[%] a ustálení 20[s] a osa y měla překmit 56[%] a ustálení 20[s].



Obr. 36. Srovnání výstupu s PID.3 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů pro funkci sinus v ose x a cosinus v ose y.

5.3 Zhodnocení výsledků :

Z výsledků bylo patrné, že metoda podle Naslina regulovala s vysokým překmitem a dlouhou dobou ustálení, což bylo patrné již ze simulace, a byla v této úloze realizována pro prvotní řízení. Dále byl navrhnut PD regulátor a poté PD s filtrací. Podle simulací vycházel PD regulátor nejlépe, ale při aplikaci na reálné řízení vůbec nebyl schopen dosáhnout žádané polohy. Při reálném řízení se osvědčil PID.1, který dosahoval nejmenšího překmitu i nejkratší doby ustálení. Je zajímavé, že se některé simulace v programové podpoře „*SISO Design Tool*“ lišily od simulací v MATLAB/Simulinku.

Tab. 5. Tabulka dosažených výsledků

Typ	Přenos regulátoru	Překmit [%]				Doba ustálení [s]			
		A	B	x	y	A	B	x	y
PID-Naslin $\alpha=1.9$	$R(s) = \frac{0.2568s^2 + 0.344s + 0.2308}{s}$	-	67	68	108	-	4.2	11	10
PID-Naslin $\alpha=2$	$R(s) = \frac{0.2704s^2 + 0.4016s + 0.3139}{s}$	-	44	125	76	-	4.5	10	10
PD	$R(s) = 0.8(s + 0.4625)$	34.4	16	-	-	1.93	4	-	-
PD+fil.	$R(s) = \frac{0.5923(s + 0.494)}{s + 4.8}$	38.9	36	-	-	4.56	5	-	-
PID.1	$R(s) = \frac{0.35(s + 0.38)(s + 0.5)}{s}$	35.6	16	30	16	2.97	8	9	9
PID.2	$R(s) = \frac{0.55698(s + 0.835)(s + 0.4992)}{s}$	48.2	16	36	33	2.27	8	30	30
PID.3	$r_0 = 0.7442, r_1 = 0.4974, r_2 = 0.5566$	-	30	39	56	-	5	20	20

Ke A = simulaci v programové podpoře „*SISO Design Tool*“ a B = simulace v MATLAB/Simulink.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala reálným modelem CE 151 od firmy Humusoft - kuličkou na ploše. Na začátku jsem se důkladně seznámil s příloženým manuálem. Poté následovaly prvotní pokusy o identifikaci, kde byla kulička pouštěna po nakloněné rovině a zaznamenávala se její dráha. Z prvních experimentů byla patrná potřeba zafixovat pohyb kuličky v jedné ose a tak byla použita vrchní část od krycí elektrická lišty tmavé barvy. Z dosažených výsledků byla provedena identifikace pomocí Řešitele v programu *MS EXCEL*, jelikož výsledky nebyly uspokojivé. Pokusil jsem se provést video-analýzu pomocí programu *Viana3* a dosažené výsledky byly konfrontovány s přenosem v manuálu, ze kterých vyplynulo že se jedná o soustavu s astatismem druhého řádu.

V další části jsem se zabýval návrhem regulátoru nejprve pomocí Naslinovy metody, která se ukázala jako neefektivní. Druhou užitou metodou byla metoda geometrického místa kořenů, kde je soustava v uzavřené smyčce nestabilní a dvě větve kořenového hodografu směřují do nestabilní oblasti. Proto pro regulaci nelze uvažovat regulátor typu P ani PI - kdyby se přidaly další póly, větve hodografu by se neposunuly do stabilní oblasti.

Nejprve byl navrhnout PD regulátor a poté PD s filtrací. Podle simulací vycházel PD regulátor nejlépe. V reálném nasazení však vůbec nebyl schopen dosáhnout žádané polohy. Při reálném řízení se osvědčil PID.1, který dosahoval nejmenšího překmitu i nejkratší doby ustálení. Metoda podle Naslina regulovala s vysokým překmitem a dlouhou dobou ustálení, což bylo patrné již ze simulace.

V předposlední části byl vytvořen stručný manuál popisující demo-program daného modelu pro rychlé seznámení, dalším popsáním programem byl *Viana3* určený k video-analýze, poslední část manuálu je věnovaná programové podpoře – součásti *MATLABu - SISO Design Tool*, sloužící pro jednoduchou analýzu a syntézu jednorozměrných řídicích obvodů.

Na závěr byly navrhnuty laboratorní úlohy pro daný model, které mimo jiné umožní seznámení studentům s metodou geometrického místa kořenů a aplikovat ji na reálné řízení.

Pro všechny výpočty a práci s modelem byl úspěšně využit program *MATLAB* a jeho toolboxy.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Conclusion

This thesis dealt with the real model CE151 from Humusoft - ball&plate. At the beginning I was thoroughly acquainted with the attached manual. This was followed by initial attempts to identify where the ball on an inclined plane listened and recorded her runway. The first experiments were needed to fix the apparent movement of balls in line and was used as the upper part of the electrical cover leaves of dark colors. The results of identification was performed using the *Solver* program *MS-EXCEL*, since the results were not satisfactory. I tried to do video analysis using *Viana3* and the results were compared with the manual transmission, from which emerged that a system with astatismem second order.

The next part dealt with the controller design using Naslinovy first method, which proved to be ineffective. The second method used was the method of the geometric roots of where closed-loop system unstable and the two branches tend to root hodografu unstable region. Therefore, the regulation can not think of P controller or PI - had joined the other poles, branches hodografu would not move into the stable area. The first was designed PD controller with the PD and then filtered. According to simulations based on the PD controller the best. In real deployment, however, has not been able to achieve the desired position. The real procedure proved PID.1, which reached the lowest overshoot and short settling time. The method according Naslina regulate high overshoot and long settling time, which was already evident from the simulation. The part was created by a short manual describing the *demo-program* the model for quick, further described *Viana3* program was designed for video analysis, the last section is devoted to the promotion of the program - part of the MATLAB - *SISO Design Tool* is used for simple one-dimensional analysis and synthesis control circuits. At the conclusion of the laboratory tasks were designed for the model, which, inter alia, to familiarize students with using the geometric roots, and apply it to real control.

For all calculations and work with a model successfully used the program MATLAB and its toolboxes.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CE 151 Ball and Plate Apparatus .Technical manual.Praha: Humusoft s.r.o.,2006. 17 s.
- [2] CE 151 Ball and Plate Apparatus .Educational manual.Praha: Humusoft s.r.o.,2006. 33 s.
- [3] ŠTOLFA,M. Návrh a realizace vybraných algoritmů řízení pro laboratorní model kulička na ploše.Ostrava ,2005.82 s.Diplomová práce na Fakultě strojní VŠB Technické Univerzity Ostrava.
- [4] Horáček,Petr. Systémy a modely. Praha :ČVUT, 1999. 232 s. ISBN 80-01-01923-3.
- [5] KARBAN, Pavel .Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink.Praha :BEN-technická literatura ,2007.220 s.ISBN 978-80-251-1448-3.
- [6] BOBÁL, Vladimír. Identifikace systémů. Zlín : UTB ve Zlíně,Fakulta aplikované informatiky, 2009. 128 s.ISBN 978-80-7318-888-7.
- [7] BALÁTĚ, Jaroslav .Automatické řízení. Praha : BEN-technická literatura,2003. 664 s. ISBN 80-7300-020-2.
- [8] DOSTÁL, Petr;MATUŠU, Radek. Stavová a algebraická teorie řízení.Zlín : UTB ve Zlíně,Fakulta aplikované informatiky, 2010. 90s. ISBN 978-80-7318-991-4.
- [9] Humusoft produkty : Měřicí karta MF624 [online]. 2005 [cit. 2011-06-02].Humusoft. Dostupné z <http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/mf624/index.php?lang=cz&p1=1>
- [10] Czechcomputer [online]. 18.10.2005 [cit. 2011-05-02]. Logitech QuickCam . Dostupné z WWW: <<http://www.czechcomputer.cz/product.jsp?artno=33969>>.
- [11] Humusoft [online]. 2005 [cit. 2011-05-02]. Image Acquisition Toolbox Dostupnéz:<<http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/aknihovny/imaq/>>.
- [12] Humusoft produkty [online]. 2005 [cit. 2011-05-02]. Real Time Toolbox. Dostupné z WWW: <<http://www.humusoft.com/produkty/rtt/>>.
- [13] Viana [online]. 26.03.2002 [cit. 2011-05-02]. Didaktik.physik. Dostupné z WWW: <<http://didaktik.physik.uni-essen.de/viana/>>.
- [14] MODRLÁK, Osvald. *Analýza dynamických systémů* [online],08.03.02. 70 s. Studijní materiály. Technická univerzita v Liberci/Fakulta mechatroniky. Dostupné z WWW: <http://www.mti.tul.cz/files/zky/Analyza_DS.pdf>.

[15] MODRLÁK, Osvald. *Syntéza regulačních obvodů* [online], 23.08.04. 60 s. Studijní materiály. Technická univerzita v Liberci/Fakulta mechatroniky. Dostupné z WWW: <http://mono.rss.tul.cz/skola/pdf/tar1_syn.pdf>.

[16] *VirtualDub 1.9.11* [online]. 27.12.2010 [cit. 2011-05-02]. Slunečnice.cz . Dostupné z WWW: <<http://www.slunecnice.cz/sw/virtualdub/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α, β	úhly natočení naklápějící se roviny [rad]
β_α	vektor úhlové rychlosti rotující kuličky [rad/s]
β_β	vektor úhlové rychlosti pohybující se desky [rad/s]
d	vzdálenost mezi otočným čepem a místem, kde servosystém otáčí polohu
I_b	setrvačnost kuličky [kg*m ²]
I_p	setrvačnost plochy [kg*m ²]
k	časový index
k_1, k_2	koeficienty soustavy
m	hmotnost kuličky [kg]
N	počet vzorků
$N(s)$	charakteristický mnohočlen
q_i	i-tá obecná souřadnice
\dot{q}_i	první derivace i-té obecné souřadnice podle času
Q_i	i-tá obecná síla
r	vektor polohy středu kuličky [m]
r_b	poloměr kuličky [m]
R	podílový práh
t	čas [s]
T_I	integrační časová konstanta [s]
T_D	derivační časová konstanta [s]
T_m	časová konstanta
u_a	vstup filtru
u_{af}	výstup filtru
u_α	žádaný úhel plochy [rad]
u, U	napětí [V]
U_m	maximální napětí [V]
w	žádaná hodnota
W_K	kinetická energie systému [J]

W_p	potenciální energie systému [J]
x,y	souřadnice polohy kuličky
y_x	pozice kuličky načítána do Matlabu [m]
K_α	Statické zesílení servo systému [rad/MU]
K_x	Konstanta pozice senzoru míčku [MU/m]
K_b	Systémové zesílení [$\text{ms}^{-2}/\text{rad}$]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 . Model kuličky na ploše.....	10
Obr. 2. Schéma principu servosystému a odpovídající blokový diagram [2]	17
Obr. 3. Blokové schéma kompletní dynamiky systému v jedné souřadnici [2].....	18
Obr. 4. Ukázka kořenového hodografu.....	21
Obr. 5. Struktura uzavřeného obvodu [15]	24
Obr. 6. Kořenový hodograf bez připojení nul a pólů a kořenový hodograf s připojeným pólem ve tvaru $s_I = -1$	26
Obr. 7. Kořenový hodograf s připojeným pólem ve tvaru $s_I = -1$ a nulou $s_{BRI} = -0.7$ a přechodová charakteristika daného přenosu.....	26
Obr. 8. Popis modelu CE151	28
Obr. 9. Upravené schéma z demo-programu za účelem identifikace	29
Obr. 10. Průběh hodnot v ose y.....	30
Obr. 11. Použití Řešitele pro identifikaci	31
Obr. 12. Hodnoty T_m závislé na vstupním napětí v MU.....	32
Obr. 12. Závislost natočení roviny na vstupním napětí v [MU]	33
Obr. 13. Průběh dráhy míčku v programu Viana3	34
Obr. 14. Závislost zrychlení míčku na úhlu natočení roviny	35
Obr. 15. Srovnání Viana3 a reakcí v programovém prostředí MATLAB/Simulink.....	36
Obr. 17. Porovnání simulační odezvy s reálně naměřenými daty v otevřeném regulačním obvodu.	37
Obr. 18. Upravené schéma řízení.....	38
Obr. 19. Simulace řízení PID pomocí Naslinovy metody.....	40
Obr. 20. Srovnání výstupu PID regulátorem.....	41
Obr. 21. Akční zásahy u PID	42
Obr. 22. Srovnání výstupu PID regulátorem.....	42
Obr. 23. Akční zásahy u PID	43
Obr. 24. Kořenový hodograf identifikovaného přenosu.	44
Obr. 25. Kořenový hodograf s přechodovou odezvou pro navržený PD regulátor.....	45
Obr. 26. Srovnání výstupu s PD řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů.....	46
Obr. 27. Kořenový hodograf s přechodovou odezvou pro navržený PD regulátor s filtrací.	47

Obr. 28. Simulace PD regulátoru s filtrem.	47
Obr. 29. Kořenový hodograp s přechodovou odezvou pro PID.1 regulátor.	48
Obr. 30. Srovnání výstupu s PID.1 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů.	49
Obr. 31. Srovnání výstupu s PID.1 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů pro funkci sinus v ose x a cosinus v ose y.	50
Obr. 32. Kořenový hodograp a přechodová odezva pro PID.2 regulátor.	51
Obr. 33. Srovnání výstupu s PID.2 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů.	52
Obr. 34. Srovnání výstupu s PID.2 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů pro funkci sinus v ose x a cosinus v ose y.	53
Obr. 35. Srovnání výstupu s PID.3 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů.	54
Obr. 36. Srovnání výstupu s PID.3 řízením pro obě osy se zobrazením akčních zásahů pro funkci sinus v ose x a cosinus v ose y.	55
Obr. 37. Model CE 151.	68
Obr. 38. Pohled do prostředí demo programu.	70
Obr. 39. Hlavní panelové okno demo programu.	71
Obr. 40. Průběh jednotlivých os.	72
Obr. 41. Programové prostředí Viana3.	73
Obr. 42. Posuvné nastavení záznamu.	73
Obr. 43. Barva zvoleného objektu.	74
Obr. 44. Ukázka zvolené dráhy s nastavením vyhodnocení.	74
Obr. 45. Menu kalibrace.	74
Obr. 46. Programové zpracování dráhy.	75
Obr. 47. Průběh míčku v ose y v programu Viana3.	76
Obr. 48. Prostředí SISO Design Tool.	77
Obr. 49. Základní charakteristiky.	78
Obr. 50. Umístění kořenů.	78

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Polohy pólů.....	21
Tab. 2. Tabulku naměřených hodnot na modelu CE 151.....	32
Tab. 3. Hodnoty závislosti MU na zrychlení	34
Tab. 4. Závislost Δy_{\max} [%] na α podle Naslina [7]	38
Tab. 5. Tabulka dosažených výsledků	56

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I – Návrh laboratorních úloh

Příloha II – Manuál k CE151 demo-program

Příloha III – Manuál k programu Viana 3.64

Příloha IV - Popis SISO Design Tool

Příloha I – Návrh laboratorních úloh

Ball&Plate Apparatus



Obr. 37. Model CE 151

Základem modelu je pohyblivá deska, která je řízena krokovými motory přes kartu v závislosti na souřadnicích míčku získaných přepočtem z webkamery.

Zadání

Úkol 1 :

Seznamte se modelem CE151 a demo-programem nacházejícím se na ploše označeném *CE151 kulička na ploše* a programem Viana3 použitého pro video-analýzu. Oba jsou popsány v příloženém manuálu na konci práce. Proveďte pokusnou video-analýzu videa průběhu dráhy míčku v příložené složce *Video* umístěné na ploše.

Úkol 2 :

Umístěte hnědou lištu prvně do osy x potom do osy y na modelu, dále pomocí skokové změny v demo-programu v rozsahu (-0.8 – 0.8) MU nastavte úhel náklonu desky. Postupně použijte kuličku po nakloněné rovině a zaznamenávejte video pomocí Logitech QuickCam pro pozdější analýzu minimálně pro 8 poloh.

Úkol 3 :

V programu Viana3 vyexportujte dosažené průběhy do MS EXCElu a proveďte identifikaci parametrů dané soustavy ve tvaru :

$$G(s) = \frac{Y_x}{U_\alpha} = \frac{K_\alpha * K_b * K_x}{s^2(T_m s + 1)} \quad (65)$$

kde jednotlivý význam konstant je uveden v manuálu modelu.

Úkol 4 :

Porovnejte parametry přenosu jednotlivých os. Seznamte se s metodou návrhu regulátoru pomocí metody geometrického místa kořenů v programovém prostředí Matlab – tzv. „SISOTOOL“ popsané v manuálu, navrhnete PID regulátor tak, aby byl systém stabilní. Pozorujte velikost akčního zásahu, velikost ustálené odchylky a velikost překmitu.

Úkol 5 :

Navrhnete tři PID regulátory, porovnejte průběhy získané simulací v programovém prostředí MATLAB/Simulink s daty získaných na modelu CE 151, snažte se o nejrychlejší dobu ustálení a nejmenší překmit. Průběh žádané veličiny volte tak aby obsahoval skokové změny a sinusoidu která, realizuje krouživý pochyb míčku na desce.

Příloha II – Manuál k CE151 demo-program

Poznámka :

Po aktivaci demonstračního programu zařízení začne s kalibrací koncových snímačů, a to zapříčiní pohyb desky v obou osách. To není chyba, ale běžná funkce.

Nastavení pracovních podmínek :

Správná funkce zařízení vyžaduje vhodné nastavení světelných podmínek. Program CE151 kulička na ploše byl navržen, aby dovolil vidět co kamera aktuálně snímá.

Nejsnadnější spuštění programu CE151 lze pomocí ikony dvojitým poklepáním na *CE151 kulička na ploše* nebo může být vyvolán přes soubor CE151.EXE.

V levém dolním rohu aplikace přepneme na *Raw picture* (Reálný obraz). V programu lze nastavit ohnisko a clonu u CCD kamery, (pokud je dostupá), nebo jas a kontrast v řídicím panelu kamery nainstalovaném dohromady s kamerovými ovladači. Na desce musí být jenom jeden bílý objekt - v našem případě míček. Pokud přepneme na *Thresholded picture* (Prahový obraz) uvidíme černobílou pracovní plochu, kde jeden bílý bod reprezentuje míček na tmavém pozadí. Zde je možné si všimnout, že i ruka je brána jako bílý bod, což je

nežádoucí při řízení – nepohybujeme tedy rukou v blízkosti kamery. *Threshold* (práh) lze nastavit ve Video Settingu umístěném v menu Hardware, jestliže je to nezbytné. [1]



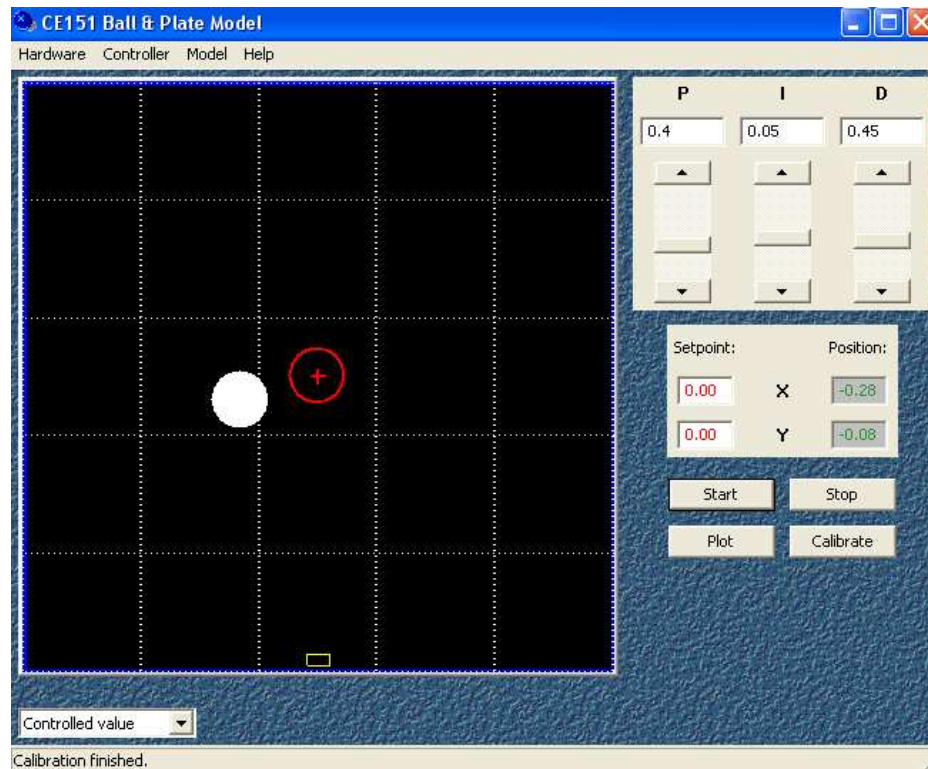
Obr. 38. Pohled do prostředí demo programu

Program zkouší rozpoznat objekt na desce - míček, jeho aktuální pozice je zobrazena na pravé straně obrazovky.

Ukázka řízení :

Ukázkový PID program slouží jen pro základní experimenty a pro rychlý start k užití modelu. Předpokládá se, že po těchto počátečních experimentech se přejde k užití MATLAB/Simulinku a REAL Time Toolboxu, které umožňují více sofistikované úkoly řízení.

Po spuštění programu je vidět hlavní řídicí panelové okno.



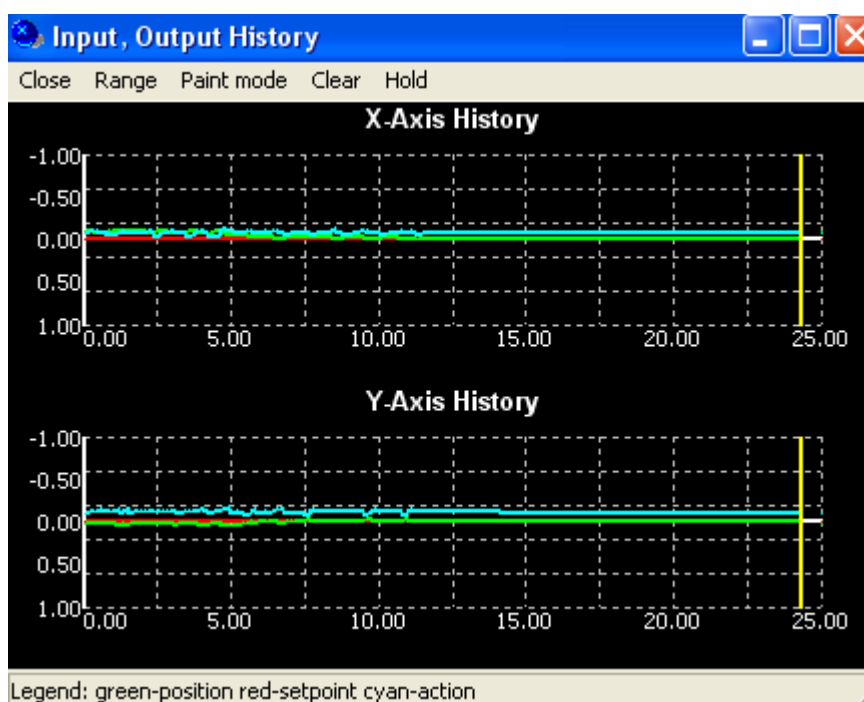
Obr. 39. Hlavní panelové okno demo programu

V hlavním panelovém okně je prostor desky vlevo, grafická reprezentace tří potenciometrů je vpravo, tlačítka označená *Start*, *Stop*, *Plot* a *Reset* jsou umístěna v dolním pravém rohu obrazovky. V prostoru desky je plný bílý kruh reprezentující aktuální pozici míčku a prázdný červený kruh ukazující požadovanou polohu. [1]

Program je řízen myší. Kliknutím na tlačítko *Start* začne řízení. Před prvním spuštěním, je nutné spustit kalibraci (uvedeno výše) a deska se srovná před začátkem experimentu. Stisknutím tlačítka *Stop* zastavíme experiment. Požadovanou polohu lze změnit pohybováním kurzorem po prostoru desky a kliknutím se mění pozice nového požadovaného bodu. Červený kruh změní svoji pozici a regulátor okamžitě přijme novou hodnotu požadovaného bodu. Lze také měnit parametry PID tažením posuvníku. Jiná možnost změny koeficientu PID je užít menu *Controller/Parameters*. Zavřením hlavního panelového okna se ukončí demonstrace. *Start* a *Stop* příkazy můžou být spuštěny také z výběru v hlavním menu v položce *Controller*. Výběrem (*Set Factory Defaults*) z menu *Model* se software dostane do počátečního nastavení, které je přednastaveno z výroby. Pokud je nutné lze změnit v *Hardware* menu v hlavním řídicím panelu. To je užitečné,

když jsou nainstalovány různé I/O karty nebo kamery. Není doporučeno měnit vzorkovací periodu.

Kliknutím na tlačítko *Plot* se otevře nové okno s průběhem grafů. Podobné hlavnímu řídicímu panelu, červená čára reprezentuje požadovanou polohu a zelená čára představuje aktuální pozici. Čáry jsou automaticky aktualizovány. Aktualizaci lze pozastavit kliknutím na tlačítko *Hold* a vyčistit grafy kliknutím na tlačítko *Clear*. Uzavře se přes tlačítko *Close*. Rozsah časových os může být nastaven v menu *Range*. [1]

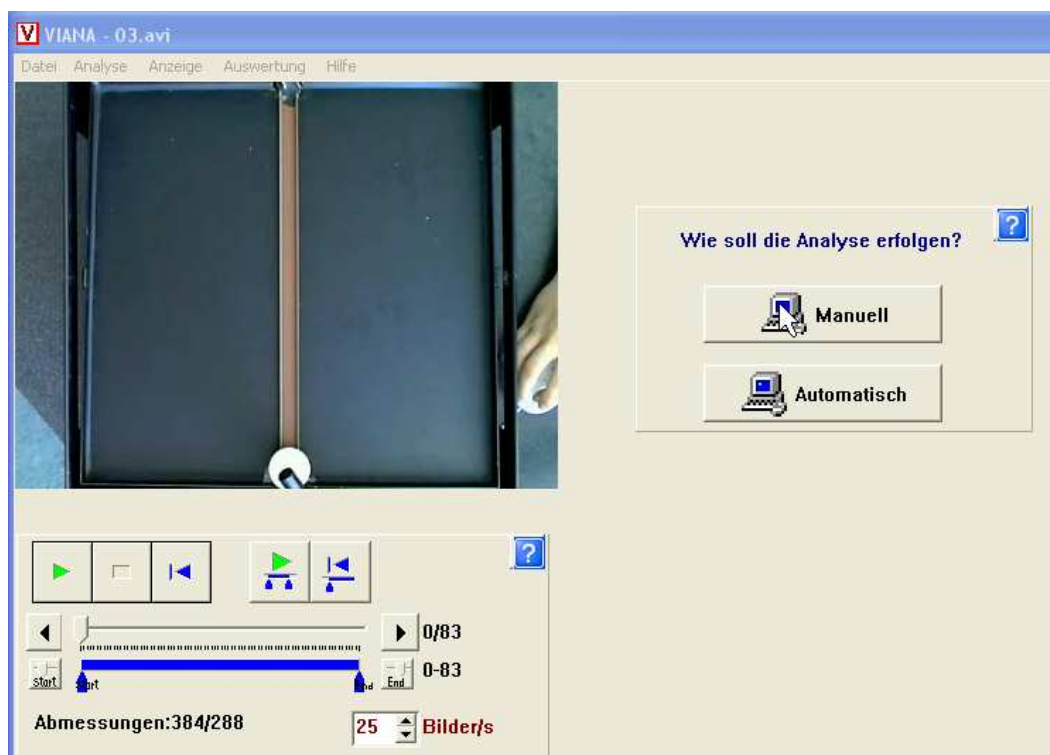


Obr. 40. Průběh jednotlivých os

Příloha III – Manuál k programu Viana 3.64

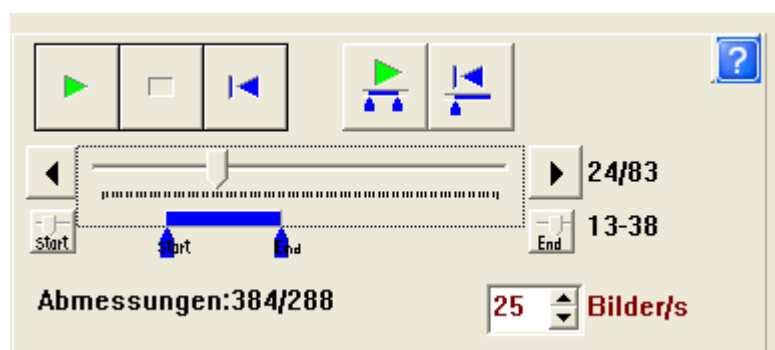
Tento program v dané práci sloužil k přesné analýze pohybu míčku po dráze - kamerou byl zachycen pohyb tělesa a na počítači je provedena analýza jednotlivých snímků záznamu. Při prvním spuštění je patrné, že je program německy, což je zezáčátku trochu problém. [13]

Klikneme na políčko *Film Laden* a zvolíme nahranou stopu ve formátu (*avi*) nacházející se v složce *Video* na ploše.



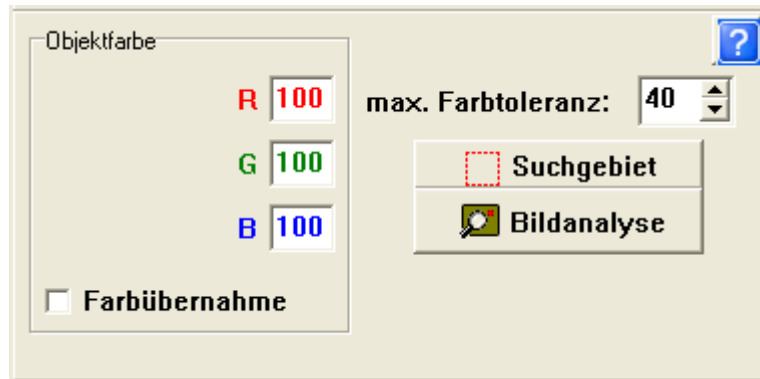
Obr. 41. Programové prostředí Viana3

Nejprve se zvolí koncové body, pomocí šedého posuvníku se určí přibližný start a ten se doladí krajními černými šipkami až na místo prvního pohybu míčku, modrým posuvníkem se nastaví daná poloha. Je zde také možnost zvolit počet snímků za vteřinu, ze zkušenosti vyplývá, že 25/s je dostačující.



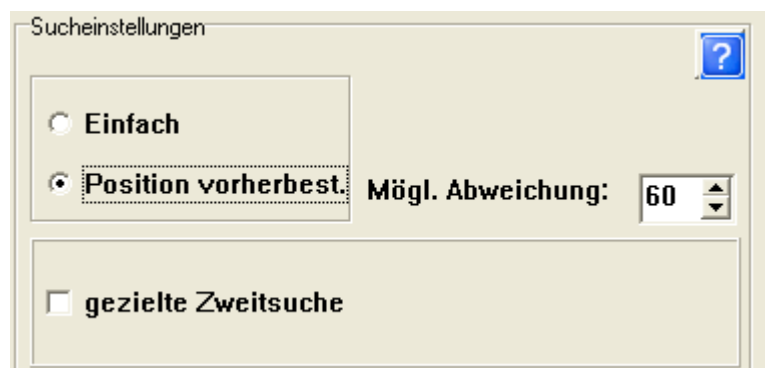
Obr. 42. Posuvné nastavení záznamu

Dále lze kliknout na políčko *Manuell* nebo *Automatisch*, což je manuální a automatické nastavení. Pracuje se s automatickým nastavením, jelikož je to rychlejší. Po kliknutí se nám otevřou další pole. *Objektfarbe* znamená barvu objektu po kliknutí na míček se nastaví hodnoty RGB reprezentující barvu sledovaného bodu. Zaškrtně se *Farbübernahme*, pro lepší barevnou toleranci.



Obr. 43. Barva zvoleného objektu

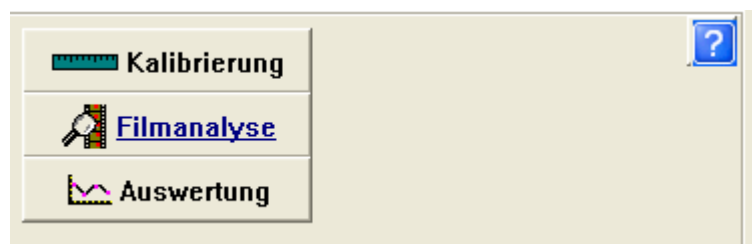
Dále se vybere políčko *Suchgebiet* neboli oblast detekce, po kliknutí se dotazuje zda chceme zvolit oblast hledání, odpověď je *Ja*. Specifikuje a potvrdí se oblast zájmu. Po kliknutí na *Bildanalyse* je možné vidět detekovanou barvu v závislosti na okolí.



Obr. 44. Ukázka zvolené dráhy s nastavením vyhodnocení

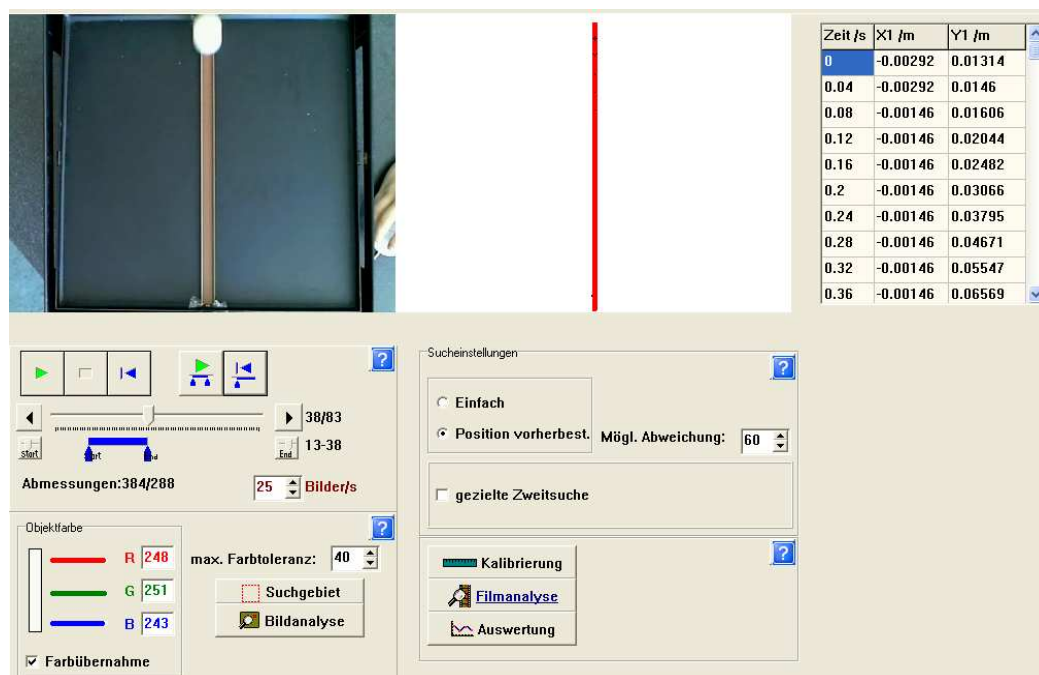
Dalším polem je *Sucheinstellungen*, zde lze zvolit *Einfach* (jednoduchá) nebo *Position vorherbest* (přesná pozice předurčení) a *gezielte Zweitsuche* (cílené vyhledávání).

Zvolí se tedy *Position vorherbest*, protože volba jednoduchá je docela nepřesná a cílené vyhledávání dává stejné výsledky jako přesná pozice předurčení. *Mögl. Abweichung* (odchylka) vyhovuje na hodnotě 60.



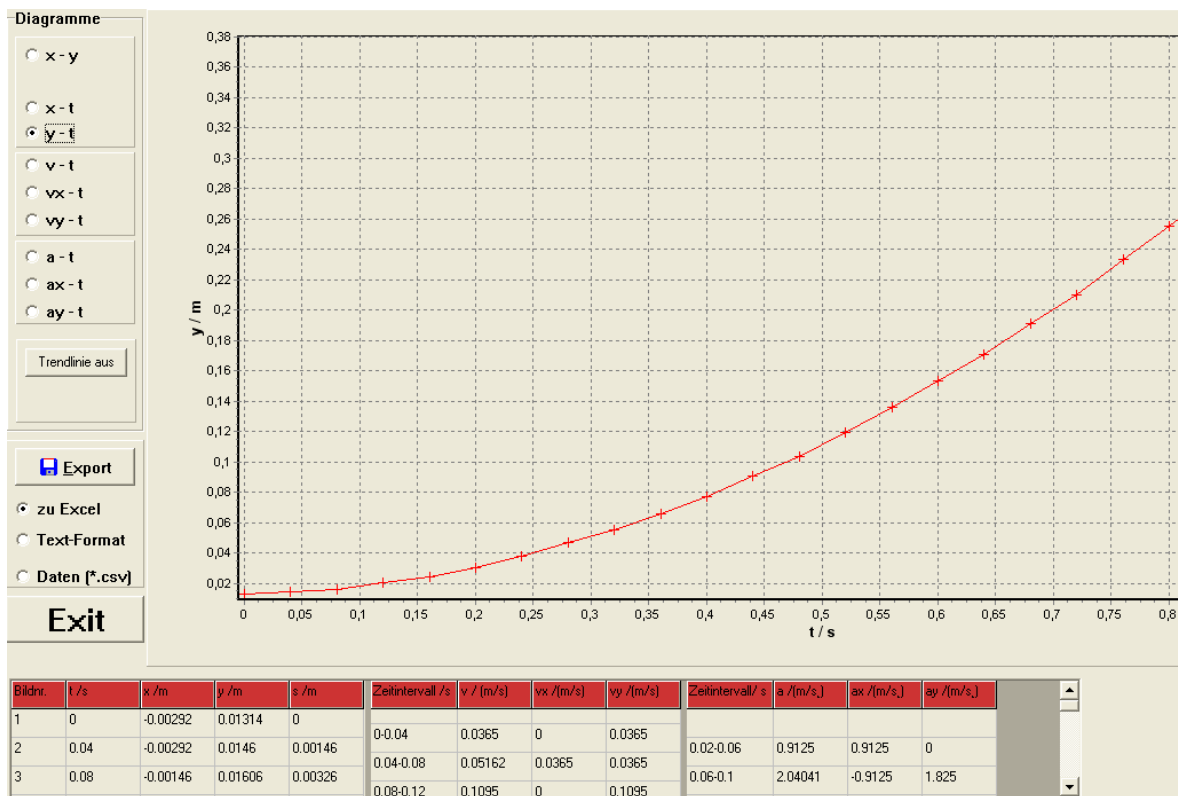
Obr. 45. Menu kalibrace

Kliknutím na *Kalibrierung* (kalibrace) se nastaví počáteční a koncové body sledované dráhy, tedy začátek a konec desky. Dál se zadá skutečná délka dráhy v metrech, deska modelu má rozměr 0.4m. Potom se zvolí *bod 0*, který se nachází v začátku dráhy. Poté se vybere *Filmanalyse* (filmová analýza) a program detekuje míček na daném intervalu.



Obr. 46. Programové zpracování dráhy

Kliknutím na *Auswertung*, dojde k zobrazení grafů dráhy v metrech závislé na čase a lze zvolit sledovanou osu x nebo y nebo rychlost a zrychlení míčku. Tyto údaje se dají exportovat do MS EXCELu na další analýzu. Pokud při detekci míčku na dráze po spuštění filmové analýzy program vydává zvuk je to zapříčiněné nenalezením míčku na dráze, což se projeví v grafu a je tedy nutno zvolit lepší oblast detekce *Suchgebiet*.



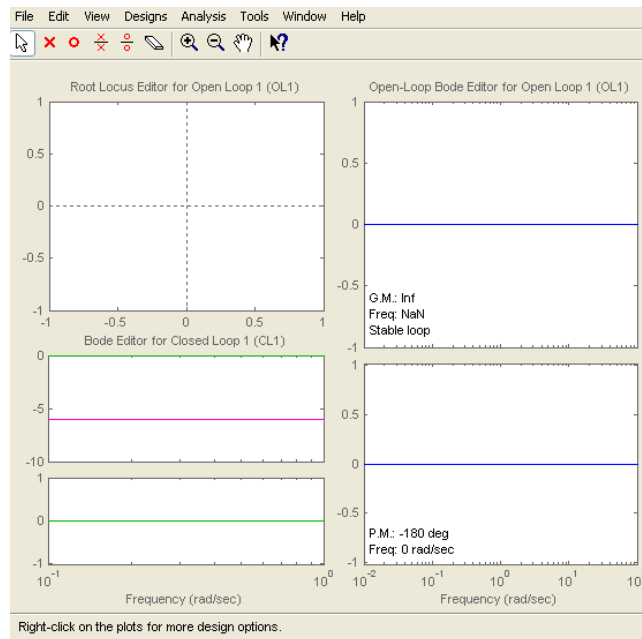
Obr. 47. Průběh míčku v ose y v programu Viana3

Pořízení vlastního videozáznamu se realizuje tak, že se spustí demo-schéma v programovém prostředí MATLAB/Simulink a skokovou změnou zadanou v rozsahu (-0.8 až 0.8)MU v jedné ose x a poté v ose y se vyvolá náklon desky v odpovídajícím úhlu. V ustáleném úhlu náklonu se pouští míček z krajní polohy. Vzniklá dráha se zaznamená pomocí programu webkamery QuickCam se stejnojmennou ikonou na ploše. Bohužel QuickCam pracuje s výstupem ve formátu (*wmv*), takže je nutné převést na výstup ve formátu 320 x 240 bodů na (*avi*). To není problém, protože na webu je dostatek konverzních programů, např. program VirtualDub [16]. Tento převod se poté realizuje, protože program Viana3 podporuje jen formát (*avi*).

Příloha IV - Popis SISO Design Tool

Pro rychlé seznámení se nejprve ve workspace programového prostředí MATLABu vytvoří přenos uvažované soustavy příkazem *tf* a uloží se do libovolné proměnné. Pak se v příkazovém řádku zadá „*sisotool*“ a tím proběhne spuštění programové podpory *SISO*

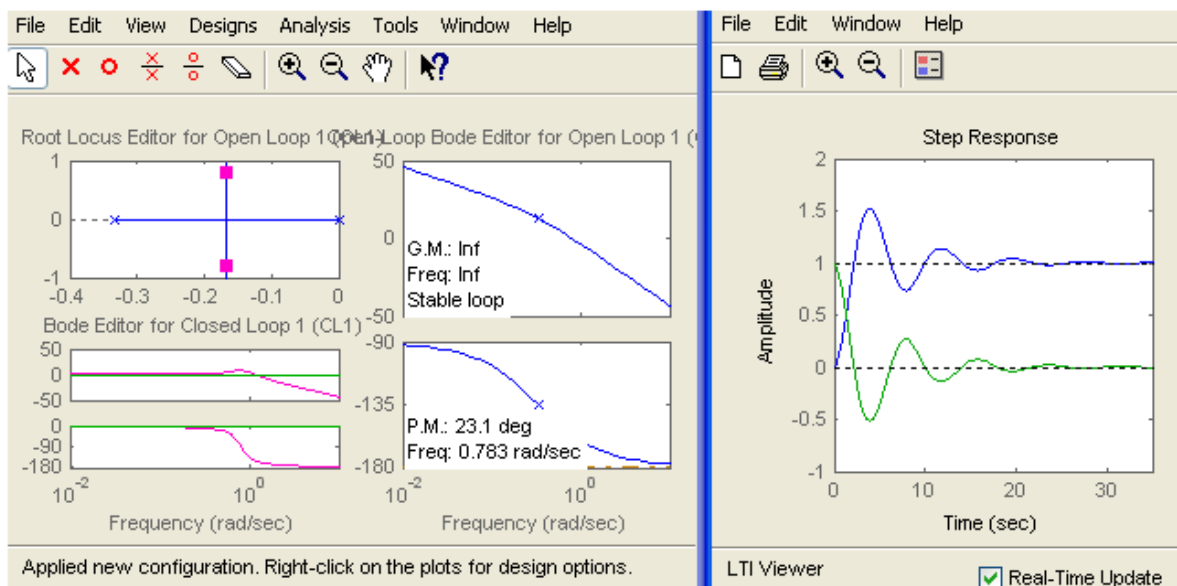
Design Tool – interaktivní GUI pro jednoduchou analýzu a syntézu jednorozměrných řídicích obvodů.



Obr. 48. Prostředí SISO Design Tool

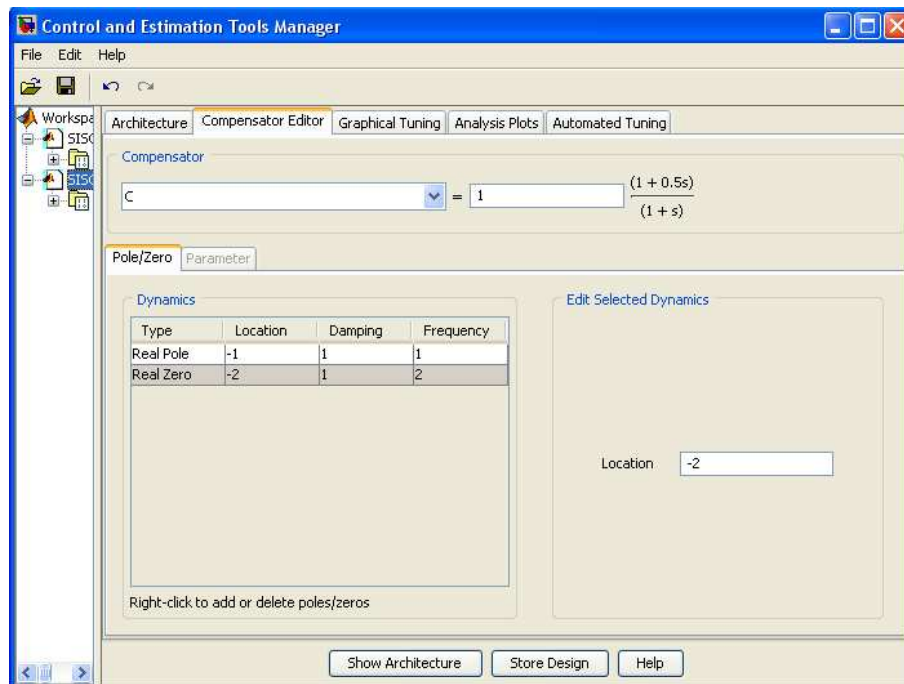
Přenos soustavy se importuje do *SISO Design* přes *File/Import*, kde se zvolí systém G odpovídající přenosu soustavy a vloží se.

V menu *Analysis* se vybere položka *Response to step command*, která zobrazuje nejen odezvu výstupu (modře), ale i odezvu akční veličiny (zeleně). Je zde možnost i vícero zobrazení výsledků například Bodeho a Nyquistovi charakteristiky.



Obr. 49. Základní charakteristiky

Póly i nuly přenosu regulátoru lze přímo přidělit tak, že se poklepe na červené ikony, kde X jsou (póly) a O (nuly), ve zlomku se nachází komplexně sdružené. Snadné přidělení pomocí myši lze přímo v grafu kořenového hodografu. Toto je spíše orientační, zpřesnění se dosáhne přes menu *Designs* v „*Edit Compensator*“, kde se definují přímo číselně póly a nuly.



Obr. 50. Umístění kořenů

V kořenovém hodografu je patrná modrá čára reprezentující polohu pólů systému se zpětnou vazbou. Parametrem na této čáře je zesílení K . Toto zesílení lze měnit v „*Edit Compensator*“, vedle přenosu regulátoru. Při změně zesílení v přímé větvi regulovaného obvodu se mění poloha pólů a nul v otevřené smyčce systému tak, že se pohybují po vyznačených čarách. Aktuální poloha pólů je označena růžovým čtverečkem a nuly jsou označeny červeným kolečkem – v jednom čase může být nastaveno pouze jedno K . Při pohybu pólu po křivce hodografu se zároveň mění zesílení K , a tudíž i poloha pólů na ostatních křivkách. Křivky jsou větvemi hodografu. Potom platí, že jedna větev vyjadřuje jeden řád (jmenovatele) uzavřeného systému.

Syntéza regulačního obvodu :

Návrh regulátoru závisí na připojených pólech a nulách v otevřeném obvodu a analýze geometrického místa kořenů daného obvodu. Dosažené výsledky se srovnají

s požadovanými vlastnostmi uzavřeného obvodu. Zhodnocení dynamických vlastností je patrné z přechodových a frekvenčních charakteristik.

Po získání výsledného přenosu kompenzátoru (regulátoru), je nutné před ukončením dosažené výsledky exportovat do *workspace* v programovém prostředí MATLAB. To se provede přes menu *File/Export* tak, že se označí *Compensator C* a exportuje se do pracovní plochy, kde se používá pro odvození parametrů PID regulátoru. Další podrobnosti programové podpory „*SISO Design Tool*“ jsou uvedeny v Helpu. [15]