

Spřažené servomotory – statické a dynamické charakteristiky

Ondřej Sušina

Bakalářská práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav řízení procesů

akademický rok: 2004/2005

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej SUŠINA**
Studijní program: **B 2807 Chemické a procesní inženýrství**
Studijní obor: **Automatizace a řídicí technika**
Téma práce: **Spřažené servomotory – statické a dynamické charakteristiky**

Zásady pro vypracování:

1. Naměřte statické charakteristiky systému – závislost rychlosti a napětí pásu na otáčkách jednotlivých elektromotorů v ustáleném stavu.
2. Ze získaných statických charakteristik doporučte optimální pracovní oblast pro řízení
3. Naměřte dynamické charakteristiky systému – časové závislosti napětí a rychlosti pásu jako odezvy na skokové změny otáček jednotlivých servomotorů
4. Porovnejte získané dynamické charakteristiky s modely uváděnými v literatuře
5. Přehledně zpracujte a představte získané charakteristiky systému a proveďte závěrečný rozbor výsledků.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

[1] Real time toolbox – user's manual. Humusoft s.r.o., 2003.

[2] [http://www.tq.com/product/cart/pdfs/CE108\(2\).pdf](http://www.tq.com/product/cart/pdfs/CE108(2).pdf).

[3] Using MATLAB Graphics. The Mathworks Inc., 2000.

[4] <http://www.control-systems-principles.co.uk>.

[5] Wellstead, P.E.: Introduction to physical system modelling. Academic Press Ltd, London, 1979.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Gazdoš, Ph.D.**
Ústav řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **14. února 2005**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16. června 2005**

Ve Zlíně dne 25. února 2005


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
za pověřený děkan




prof. Ing. Petr Dostál, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Hlavním úkolem této bakalářské práce je naměření, zpracování a grafické znázornění statických a dynamických charakteristik systému sprážených servomotorů. Systém sprážených servomotorů je reprezentován laboratorním modelem CE108, který je připojen k PC přes technologickou kartu Advantech PCL-812. Ze získaných statických charakteristik je doporučena optimální pracovní oblast pro řízení. Získané dynamické charakteristiky jsou porovnány graficky i matematicky se zjednodušenými modely uváděnými v literatuře.

Klíčová slova: sprážené servomotory, CE 108, statická charakteristika, dynamická charakteristika.

ABSTRACT

The objective of this Bachelor thesis is to measure, process and present main static and dynamic properties of a coupled drives system. The coupled drives system is represented by a laboratory model CE108 connected to a PC through a lab card Advantech PCL- 812. From the measurements, optimal working area for control is recommended and moreover, dynamic characteristics are compared with simplified models from the literature both graphically and mathematically.

Keywords: coupled drives apparatus, CE 108, static behaviour, dynamic characteristics.

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Františkovi Gazdošovi, za jeho odbornou pomoc a cenné rady, které mi poskytoval v průběhu řešení mé bakalářské práce.

Ve Zlíně, 01. 09. 2006

.....

Ondřej Sušina

OBSAH

ÚVOD	7
I TEORETICKÁ ČÁST	8
1 CE108 – SPŘAŽENÉ SERVOMOTORY	9
1.1 ÚVOD	9
1.2 POPIS.....	10
1.3 PRAKTICKÉ POUŽITÍ.....	12
1.4 ZJEDNODUŠENÝ MATEMATICKÝ MODEL	13
II PRAKTICKÁ ČÁST	16
2 ZAPOJENÍ A ZPŮSOB MĚŘENÍ	17
2.1 ZAPOJENÍ.....	17
2.2 ZPŮSOB MĚŘENÍ	18
3 STATICKÉ CHARAKTERISTIKY	20
3.1 2D STATICKÉ CHARAKTERISTIKY SYSTÉMU	21
3.1.1 Servomotor M_1 v chodu	21
3.1.2 Servomotor M_2 v chodu	22
3.1.3 Stejně rychlosti otáčení obou servomotorů	23
3.2 3D STATICKÉ CHARAKTERISTIKY SYSTÉMU	24
3.2.1 Protažení pásu	24
3.2.2 Rychlost pásu	25
4 DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY	26
4.1 PROTAŽENÍ PÁSU	26
4.1.1 Naměřené dynamické charakteristiky	27
4.1.2 Porovnání s modelem	30
4.2 RYCHLOST PÁSU	33
4.2.1 Naměřené dynamické charakteristiky	33
4.2.2 Porovnání s modelem	35
5 DISKUZE VÝSLEDKŮ	37
ZÁVĚR	38
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	39
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	40
SEZNAM OBRÁZKŮ	41
SEZNAM TABULEK	42

ÚVOD

Náplní této bakalářské práce je naměření a grafické vyjádření statických a dynamických charakteristik spřažených servomotorů na laboratorním modelu CE108 a jejich porovnání s modelem uváděným v literatuře.

Laboratorní model CE108 je systém spřažených servomotorů, který vyrábí firma TQ Education and Training Ltd., Nottingham, Velká Británie [9] a je určen především pro výuku mnohorozměrových řídicích systémů. Model umožňuje řešit praktické úlohy napínání a rychlosti materiálu při spojitých procesech. Příkladem může být řízení rychlosti a napínání nitě z jedné cívky na druhou, které je třeba optimálně řídit.

Měření charakteristik systému je koncipováno tak, že řízení laboratorního modelu CE108 a následný sběr naměřených dat na CE108 je prováděno přes počítač pomocí programového prostředí Matlab[®]-Simulink.

Statické charakteristiky systému vyjadřují závislost protažení a rychlosti pásu na otáčkách jednotlivých elektromotorů v ustáleném stavu. Ze získaných statických charakteristik systému lze navrhnout optimální pracovní oblast pro řízení.

Dynamické charakteristiky systému vyjadřují časovou závislost protažení a rychlosti pásu jako odezvy na skokové změny otáček jednotlivých servomotorů a jsou důležitým prvkem při návrhu systému řízení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CE108 – spřažené servomotory

1.1 Úvod

Laboratorní model CE108 (Obr. 1) vyrábí firma TQ Education and Training Ltd., Bonsall Street, Long Eaton, Nottingham NG10 2AN, Velká Británie [9] a byl vyvíjen ve spolupráci s Centrem řídicích systémů Manchesterské university, Institutem pro vědu a technologii (UMIST) [10].

Vlastnosti [2]:

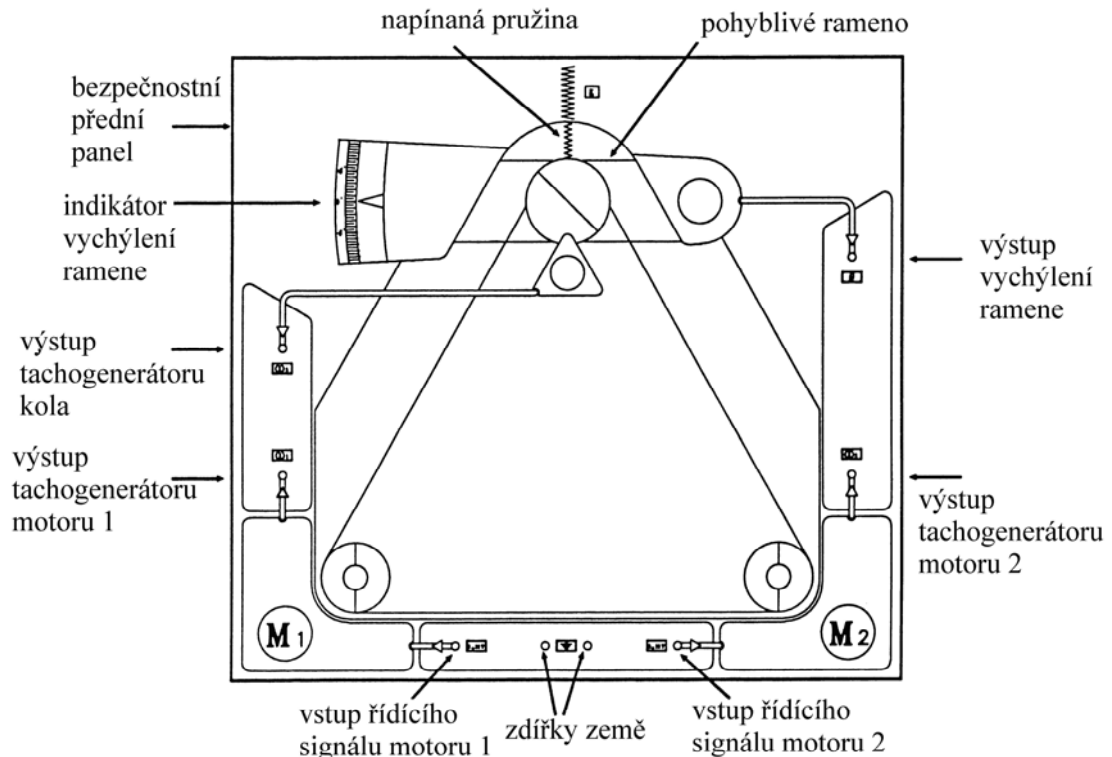
- samostatná kompaktní stolní sestava
- nový pásový hnací systém se dvěma ovlivňujícími se elektrickými hnacími motory
- všechny vstupy a výstupy chráněny proti zkratu a přetížení.
- navrženy pro analýzu a řízení užitím externího analogového nebo číslicového regulátoru, který může být reprezentován buď analogovým počítačem, mikroprocesorem nebo mikropočítačem
- vyžaduje minimální dohled
- formát souborů kompatibilní s programem MATLAB[®]



Obr. 1. Model CE108

Laboratorní model CE108 je jedním z unikátní řady určené pro studium dynamických systémů a techniky řízení používající analogové a počítačové řízení.

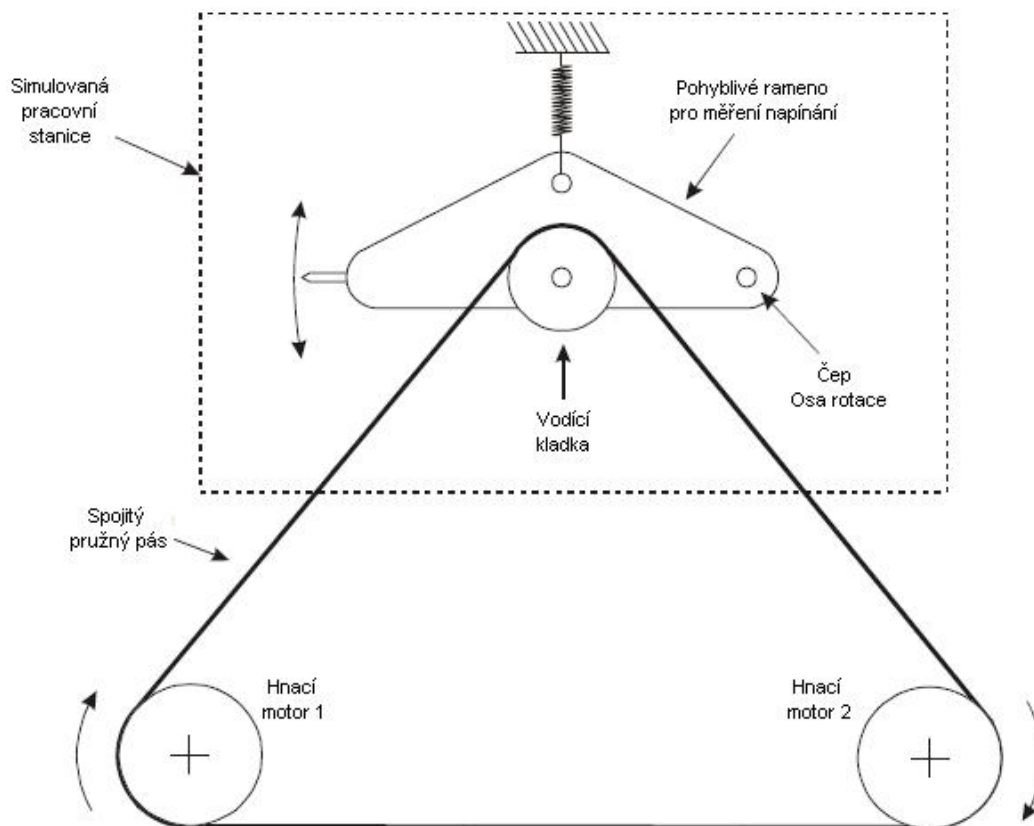
1.2 Popis



Obr. 2. Přední panel CE108

Na předním panelu (Obr. 2) jsou veškeré ovládací vstupy a výstupy měřitelných veličin modelu CE108 realizovány pomocí 2mm zdiřek. Přívod napětí 230V a hlavní vypínač jsou v zadní části přístroje. Ovládací vstupy slouží k regulaci otáček elektrických hnacích servomotorů a mají rozsah 0 až 10 V, který dle výrobce modelu odpovídá otáčkám 0 až 3000 za minutu. Výstup tachogenerátoru motoru 1 a výstup tachogenerátoru motoru 2 udávají rychlost jednotlivých elektrických hnacích servomotorů převedenou na napětí v rozsahu 0 až 10 V, jenž odpovídá dle výrobce modelu otáčkám 0 až 3000 za minutu. Výstup tachogenerátoru kola udává rychlost pružného pásu převedenou na napětí v rozsahu 0 až 10 V, kde 0 V znamená, že se pružný pás nepohybuje a při naměření 10 V se pružný pás pohybuje maximální možnou rychlostí.

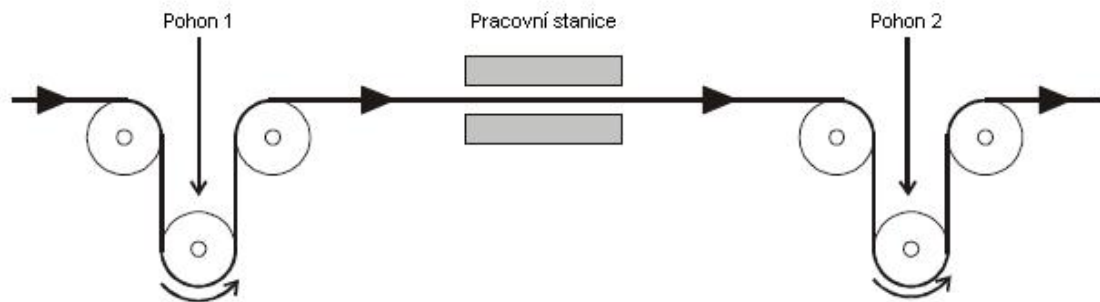
Výstup vychýlení ramene udává míru protažení pružného pásu převedenou na napětí v rozsahu -10 V až +10 V, kde -10 V odpovídá minimálnímu protažení, 0 V standardnímu protažení a +10 V maximálnímu protažení. Indikátor vychýlení ramene znázorňuje změnu polohy ramene v úhlových stupních. Při minimálním protažení pružného pásu se rameno vychýlí o 10° směrem dolů a při maximálním protažení pružného pásu se rameno vychýlí o 10° směrem nahoru.



Obr. 3. Hlavní vnitřní části CE108

Vnitřní část modelu se skládá ze dvou elektrických hnacích servomotorů, které jsou spřaženy spojitým pružným pásem. Pás rovněž prochází přes vodící kladku, která je namontována na pohyblivém rameni. Vodící kladka umožňuje měřit rychlost pásu a pohyblivé rameno je nástrojem umožňující měření napětí pásu. Odchylka ramene je míra napětí v pružném pásu.

1.3 Praktické použití



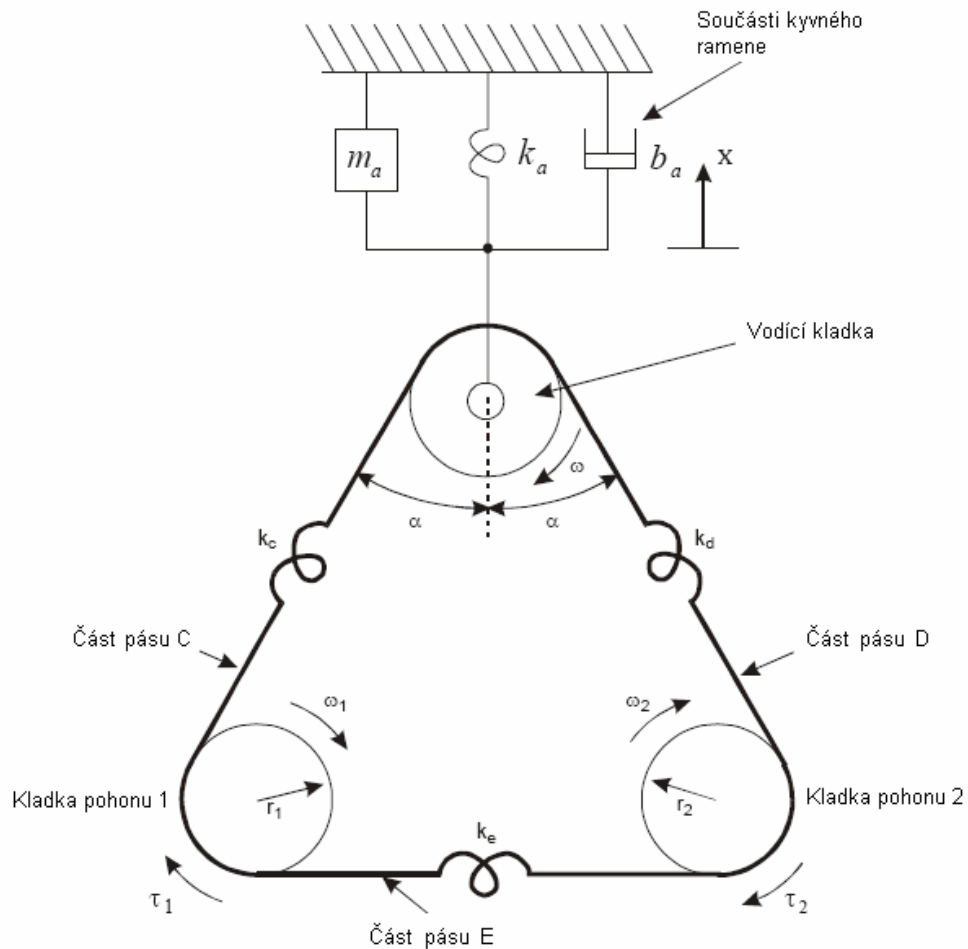
Obr. 4. Typická aplikace spřažených motorů

Typické využití spřažených motorů znázorňuje (Obr.4), kde jsou použity dva pohony na dopravu nepřetržitého pásu materiálu přes pracovní stanici. Úkolem řídicího systému pohonů je regulovat rychlost a napětí pásu. Jestliže tato regulace nebude správná, pak může dojít k poškození nebo dokonce roztržení nepřetržitého pásu materiálu.

Řízení napětí a rychlosti ovlivňující hnací systémy má mnoho průmyslových aplikací. Například běžné využití při výrobě nepřetržitě dlouhého materiálu jako textilie, papír, drát, plech, fólie. Materiál je dopravován a zpracováván hnacím systémem za pomoci pracovní stanice, která neustále udržuje rychlost a napětí zpracovávaného materiálu v předepsaných limitech. V provozech jako je válcovna ocelového plechu se materiál ztenčuje a napíná při průchodu přes každý válec, proto každý válec musí mít nastavenou různou rychlost [5].

1.4 Zjednodušený matematický model

Podrobný popis matematického modelu je uveden v literatuře [5] a [6].



Obr. 5. Schéma spřažených pohonů pro účely modelování

m_a, k_a, b_a = hmotnost ramene a vodící kladky, tuhost pružiny, součinitel tření ložiska ramene

x = svislý pohyb vodící kladky

$\omega, \omega_1, \omega_2$ = rychlost otáčení vodící kladky, kladky pohonu 1, kladky pohonu 2

τ_1, τ_2 = vstupní točivý moment pohonu 1, pohonu 2

k_c, k_d, k_e = tuhost pásu části C, D, E

r_1, r_2 = poloměr kladky pohonu 1, pohonu 2

I_1, I_2 = moment setrvačnosti pohonu 1, pohonu 2

b_1, b_2 = součinitel tření pohonu 1, pohonu 2

Rovnice (1a) až (1f) jsou zjednodušené stavové rovnice popisující standardní systém spřažených servomotorů. Takový zjednodušený matematický popis můžeme uvést za předpokladu, že systém je symetrický. A dále musí mít vodící kladky servomotorů stejný rádius a délku pásu mezi jednotlivými kladkami servomotorů musí být stejná:

$$r_1 = r_2 = r, \quad k_c = k_d = k_e = k$$

Aby byl systém spřažených pohonů symetrický, musí být hnací pohony stejné tak, že:

$$I_1 = I_2 = I, \quad b_1 = b_2 = b$$

CE 108 tyto dané předpoklady splňuje. Výsledné stavové rovnice:

$$\dot{h}_1 = \left[\frac{-b}{I} \right] h_1 + rkx_c - rkx_e + \tau_1 \quad (1a)$$

$$\dot{h}_2 = \left[\frac{-b}{I} \right] h_2 - rkx_c + rkx_e + \tau_2 \quad (1b)$$

$$\dot{x}_c = \frac{1}{2} \left[-h_1 \frac{r}{I} + h_2 \frac{r}{I} + p \frac{2 \cos \alpha}{m_a} \right] \quad (1c)$$

$$\dot{x}_e = \frac{r}{I} h_1 - \frac{r}{I} h_2 \quad (1d)$$

$$\dot{x} = \frac{p}{m_a} \quad (1e)$$

$$\dot{p} = 2(\cos \alpha)kx_c - k_a x - \frac{b_a}{m_a} p \quad (1f)$$

Ze stavových rovnic (1a) až (1f) můžeme odvodit dvě přenosové funkce pro standardní spřažené pohony [5]:

$$\omega(s) = \frac{[\tau_1(s) + \tau_2(s)]}{2(sI + b)} \quad (2)$$

$$x(s) = \frac{kr \cos(\alpha)(\tau_2(s) - \tau_1(s))}{(Is^2 + b + 3kr^2)(m_a s^2 + b_a s + (k_a + 2k \cos^2(\alpha))) - 2k^2 r^2 \cos^2(\alpha)} \quad (3)$$

Rovnice vyjadřují závislost rychlosti (2) a protažení (3) na točivých momentech servomotorů, které jsou úměrné napětí u_1 a u_2 .

Po dosazení konkrétních hodnot udaných výrobcem do rovnic (2) a (3) vychází přenosová funkce rychlosti pásu jako proporcionální přenos 1.řádu s kladným zesílením:

$$G_{\omega} = \frac{1}{0,3s + 1} \quad (5)$$

a přenosová funkce protažení pásu jako proporcionální přenos 4.řádu se záporným zesílením a s dvěma kmitavými členy:

$$G_x = \frac{-185600}{(s^2 + 11s + 150)(s^2 + 1,6s + 800)} \quad (6)$$

Přenosová funkce spřažených pohonů vyjádřená maticově je následující [6]:

$$\begin{pmatrix} \omega \\ x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{\omega} & G_{\omega} \\ -G_x & G_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

, kde u_1 a u_2 jsou vstupní veličiny ovládající rychlost otáček pohonů a ω a x jsou výstupní veličiny udávající rychlost a míru protažení pásu.

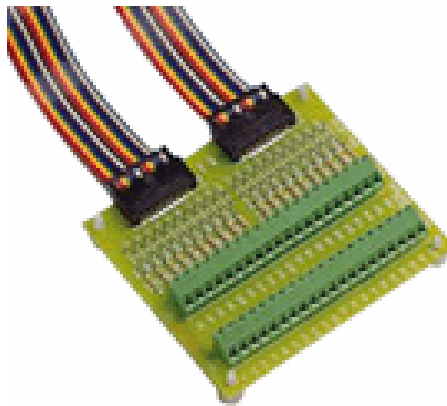
II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 ZAPOJENÍ A ZPŮSOB MĚŘENÍ

2.1 Zapojení

Sestava pro měření se skládá se tří základních hardwarových částí:

- Model CE108 (Obr.1)
- Svorkovnicová deska PCLD-780 (Obr.6)
- PC/AT s měřicí kartou Advantech PCL-812 (Obr.7)



Obr. 6. Svorkovnicová deska PCLD-780



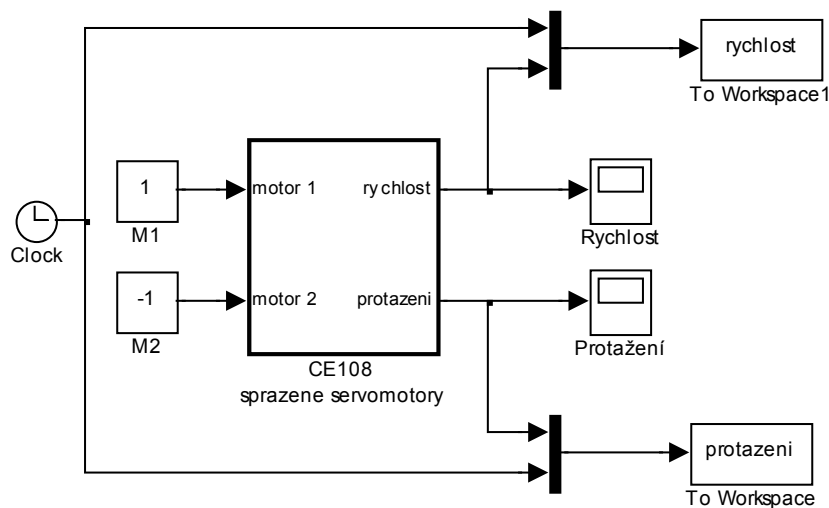
Obr. 7. Měřicí karta Advantech PCL-812

Advantech PCL-812 je multifunkční měřicí karta ISA do PC, která disponuje 16x analogový vstupem v zapojení proti zemi s 12-ti bitový A/D převodníkem, 2x analogový výstupem s 12-ti bitový D/A převodníkem, 16x digitální vstupem, 16x digitální výstupem [10].

Model CE108 je propojen 5-ti izolovanými vodiči se svorkovnicovou deskou. Dva vodiče jsou použity pro ovládací vstupy elektromotorů, 2 vodiče pro výstupní signály a poslední vodič je použit na uzemnění. Svorkovnicová deska je propojena 20-pinovým plochým kabelem s měřicí kartou Adventech PCL-812. Měřicí karta Adventech PCL-812 je zapojená v ISA slotu PC/AT.



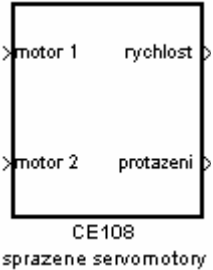
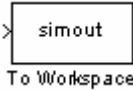


2.2 Způsob měření

Ovládání laboratorního modelu CE108 a následný sběr naměřených dat byl prováděn přes počítač pomocí programového prostředí Matlab[®]-Simulink. V tomto programovém prostředí byl vytvořen model (Obr.8), ve kterém se nastavovaly dvě důležité konstanty M1 a M2 a vzorkovací perioda. Těmito konstantami se určovaly hodnoty ovládacích vstupů elektromotorů. Konstanty M1 a M2 se nastavovaly v rozsahu $\langle -1;1 \rangle$, který odpovídá vstupním ovládacím hodnotám v rozsahu $\langle 0 \text{ V};10 \text{ V} \rangle$.



Obr. 8 .Měřící model v Matlab-Simulinku

Tab. 1. Použitá sada bloků v Simulinku

BLOK	FUNKCE
 Constant	blok generující konstantní hodnotu
 Clock	blok pro poskytování a zobrazování simulačního času
 CE108 sprazene servomotory	blok reprezentující systém uvnitř jiného systému
 simout To Workspace	blok pro zápis dat do pracovní oblasti
	blok pro slučování několika vstupních signálů do vektorového nebo sběrnicevého výstupního signálu
 Scope	blok pro zobrazování signálu v průběhu simulace

Po nastavení konstant M1 a M2 jsem spustil model v programovém prostředí Matlab[®]-Simulink, na CE108 se roztočily elektrické servomotory dle zadaného vstupního napětí a výstupní signály udávající rychlost a protažení pásu spolu s časovým údajem se ukládaly do proměnných v pracovní oblasti. Tyto výstupní signály jsem sledoval pomocí bloku pro zobrazování signálu v průběhu simulace na monitoru PC. Časovou délku měření jsem nastavoval podle rychlosti ustálení měřených signálů. Přesné nastavení a způsob měření je uveden u každé měřené charakteristiky samostatně. Naměřená data jsem zpracovával v programovém prostředí Matlab[®].

3 STATICKÉ CHARAKTERISTIKY

Statické charakteristiky systému vyjadřují závislost rychlosti a napětí pásu na otáčkách jednotlivých elektromotorů v ustáleném stavu. Ze získaných statických charakteristik systému lze např. navrhnout optimální pracovní oblast pro řízení.

Při měření statických charakteristik docházelo k tomu, že výstupní signály rychlosti a míry protažení pásu se nikdy neustálily na konstantní hodnotu, ale neustále mírně oscillovaly. Zvolil jsem takový postup, při kterém po spuštění modelu a následném relativním ustálením nechal model ještě několik sekund běžet a poté jsem udělal průměr z posledních 30-ti naměřených hodnot. Tyto průměry zapsané ve vektorové proměnné jsem vykreslil pomocí programového prostředí Matlab[®] do grafů (Obr.9), (Obr.10) a (Obr.11).

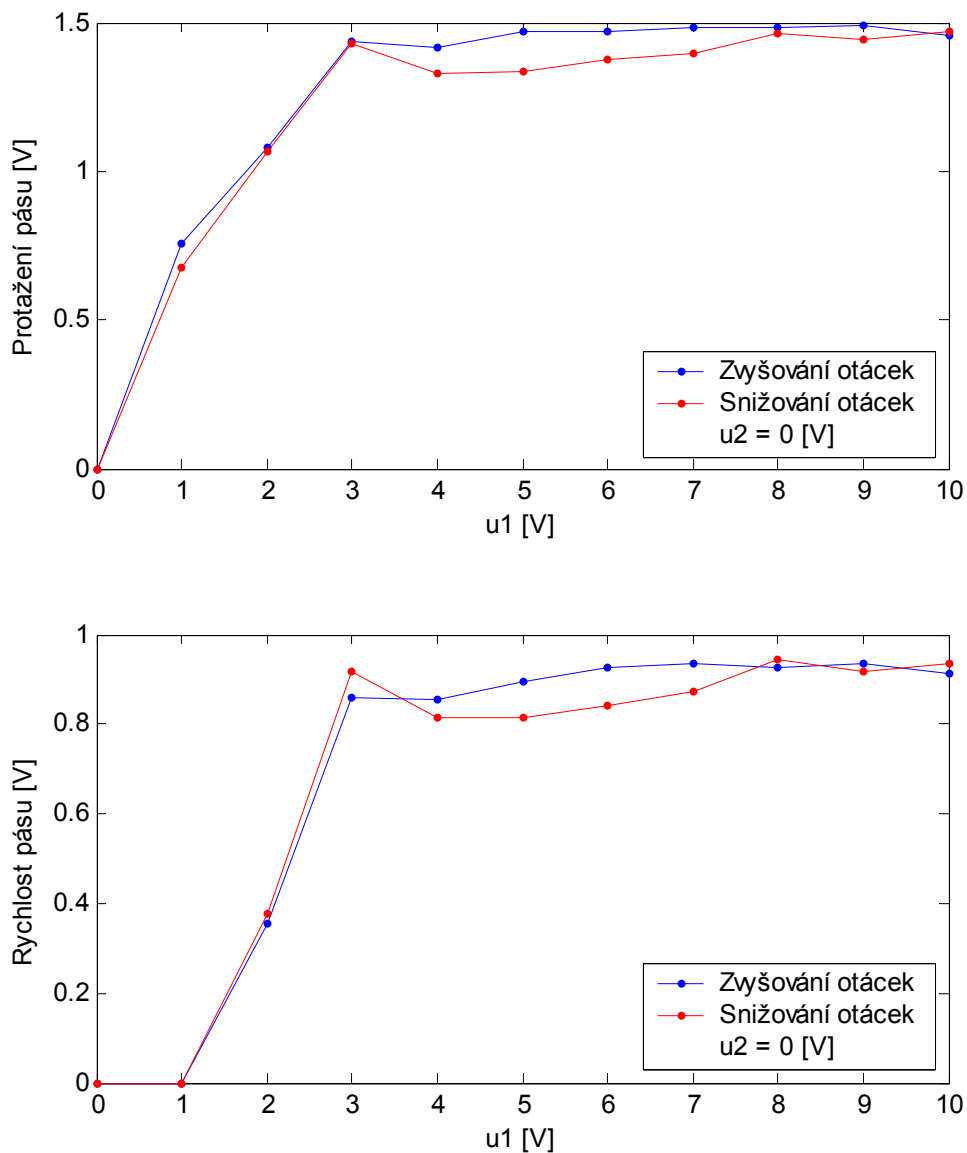
Grafy na obrázku (Obr.9) znázorňují statickou charakteristiku systému, kdy elektromotor M2 se netočil a u elektromotoru M1 byly postupně zvyšovány otáčky až na maximum a poté opět snižovány až na nulu.

Stejný postup měření byl aplikován i u statických charakteristik systému znázorněných na grafech (Obr.10) pouze s tím rozdílem, kdy elektromotor M1 se netočil a u elektromotoru M2 byly měněny otáčky.

Zvyšování a snižování otáček u všech grafů na obrázcích (Obr.9) a (Obr.10) je barevně odlišeno a výsledná hystereze je snadno viditelná, ale myslím si, že u tohoto měření je možno hysterezi zanedbat.

3.1 2D statické charakteristiky systému

3.1.1 Servomotor M_1 v chodu



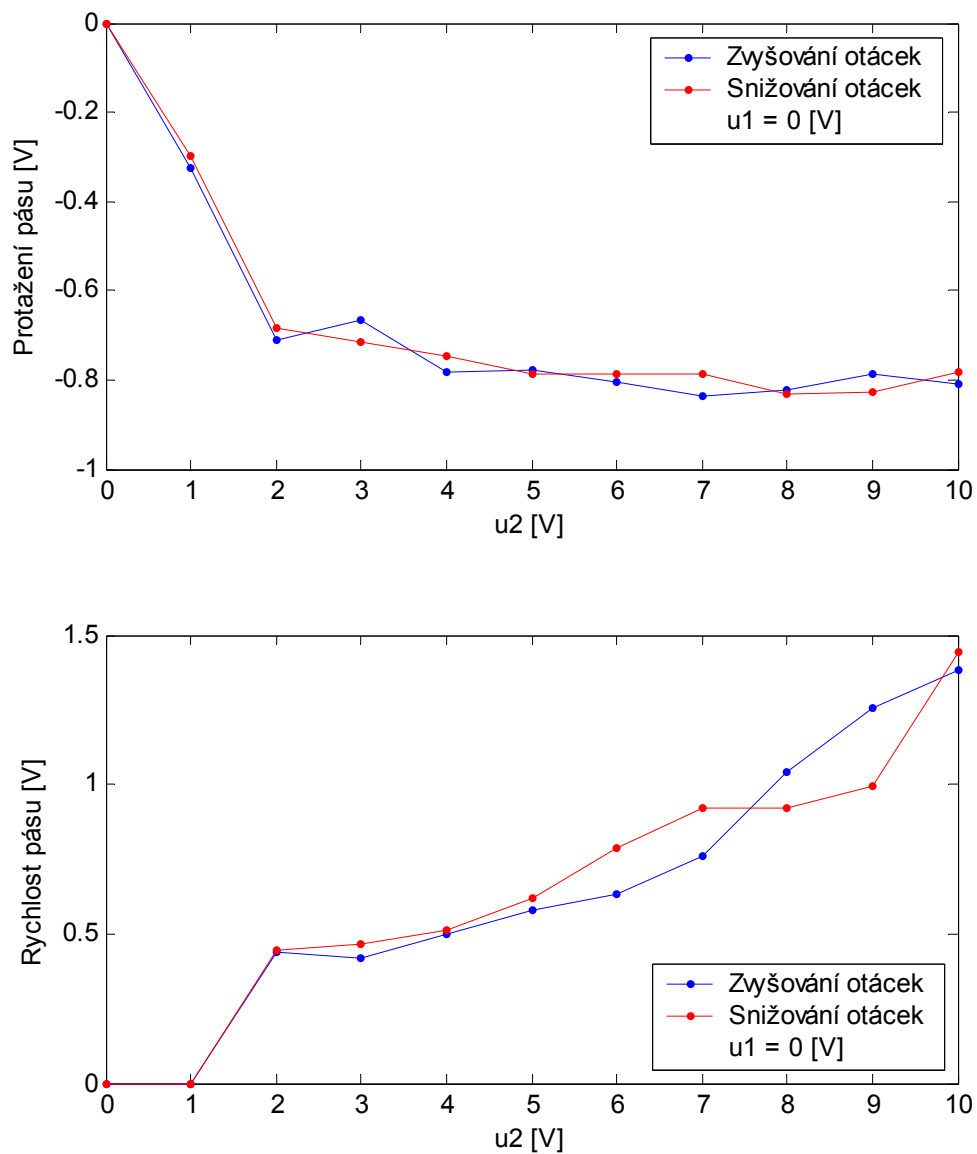
Obr. 9. Grafy závislosti protažení a rychlosti pásu na u_1

Z grafu závislosti protažení pásu na u_1 (Obr.9) vyplývá, že na počátku je závislost lineární, ale při větším diferenci rychlosti otáčení jednotlivých servomotorů dochází k prokluzování pásu a následné saturaci hodnoty protažení pásu. Naměřené hodnoty protažení pásu jsou

kladné, protože při otáčení pouze servomotoru M1 dochází k uvolňování napětí pásu mezi servomotorem M1 a vodící kladkou pohyblivého ramene a vlivem pružiny rameno stoupá.

U grafu závislosti rychlosti pásu na u_1 (Obr.9) je situace obdobná jen s tím rozdílem, kdy při prvním zvýšení resp. posledním snížení výkonu servomotoru M1, je rychlost pásu nulová, protože servomotor M1 nedokáže překonat odpor nečinného servomotoru M2.

3.1.2 Servomotor M_2 v chodu

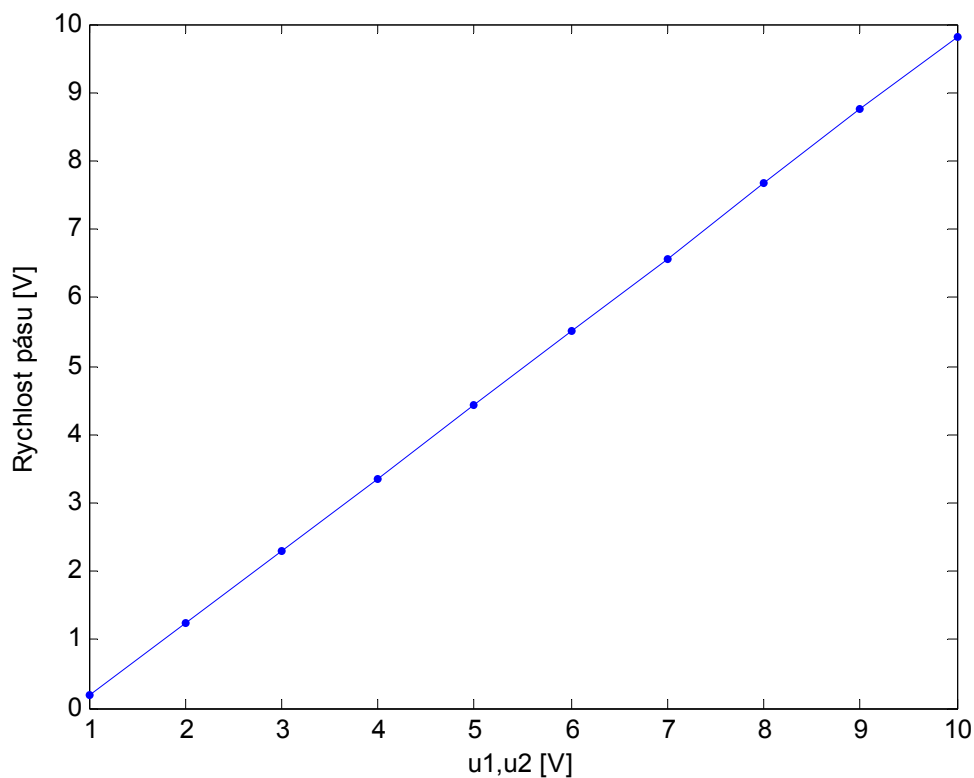


Obr. 10. Grafy závislosti protažení a rychlosti pásu na u_2

U grafu závislosti protažení pásu na u_2 (Obr.10) je z počátku také charakteristika lineární a k prokluzování pásu dochází ještě dříve než u grafu závislosti protažení pásu na u_1 (Obr.9). Naměřené hodnoty protažení pásu jsou záporné, protože při otáčení pouze servomotoru M2 dochází ke stahování vodící kladky pohyblivého ramene směrem dolů.

U grafu závislosti rychlosti pásu na u_2 (Obr.10) nedochází k tak rychlému nárůstu rychlosti, ale k pozvolnému zrychlování pásu.

3.1.3 Stejně rychlosti otáčení obou servomotorů



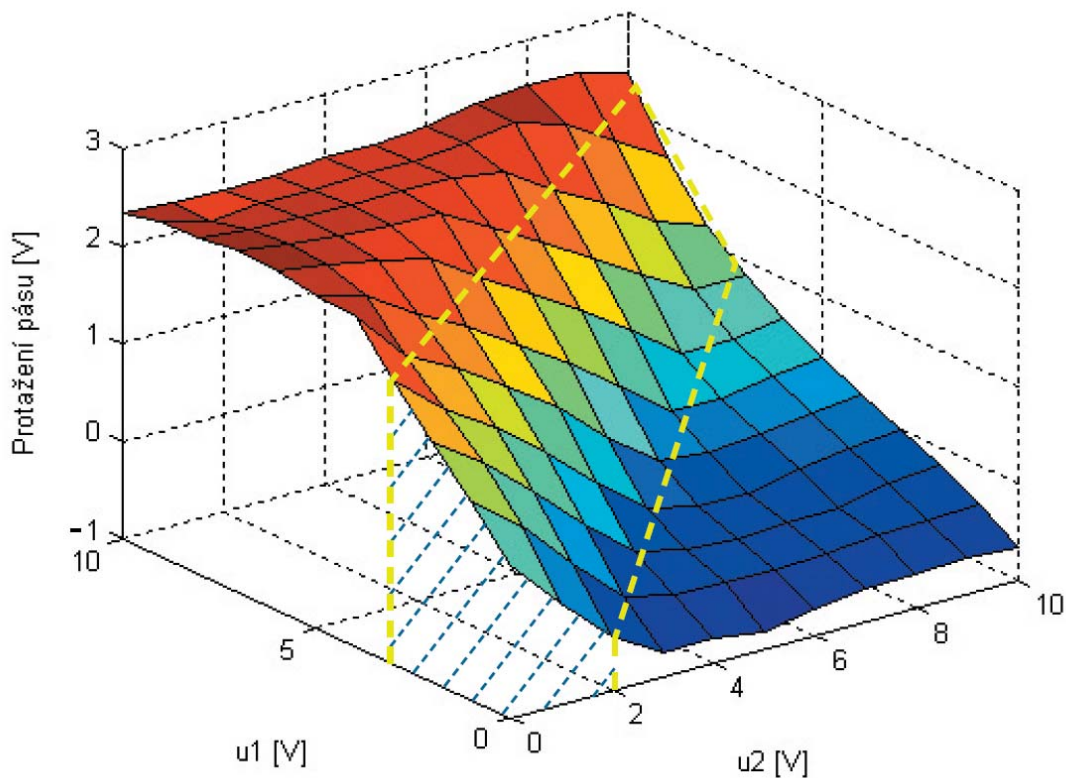
Obr. 11. Graf závislosti rychlosti pásu na u_1 , $u_2 = \text{konstanta}$

Při měření statické charakteristiky systému, která je znázorněna grafem na obrázku (Obr.11), se otáčky jednotlivých servomotorů od sebe nelišily. Výsledná statická charakteristika systému je lineární.

3.2 3D statické charakteristiky systému

Měření 3D statických charakteristik systému bylo více komplikované, protože bylo nutné provádět velké množství změn rychlosti otáček jednotlivých elektromotorů. Pro toto měření jsem vytvořil jednoduchý program v aplikaci Matlab[®], který automaticky měnil konstanty ovlivňující otáčky obou elektromotorů a po ustálení výstupních signálů s mírnou oscilací jsem z posledních 30-ti naměřených hodnot vypočítal průměrnou hodnotu. Průměrná hodnota byla zapsána do vektorové proměnné, ze které byl vykreslen 3D graf.

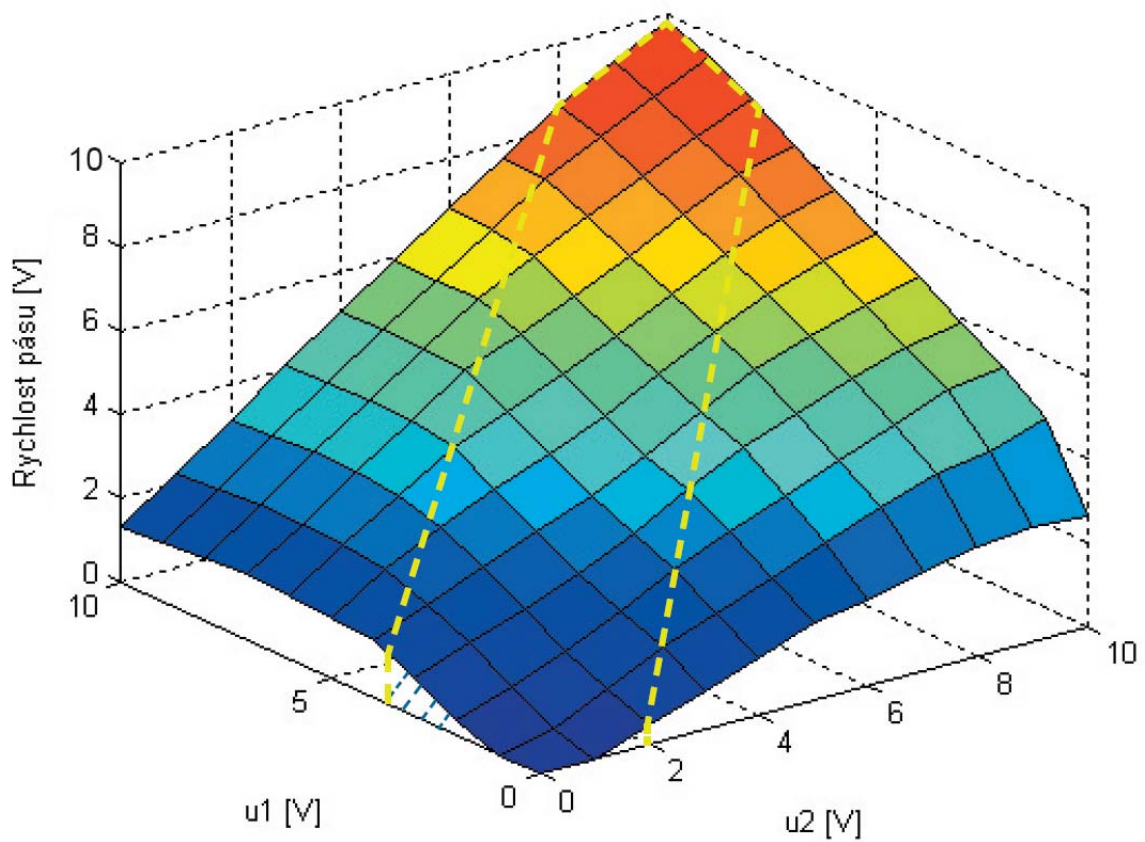
3.2.1 Protážení pásu



Obr. 12. 3D Graf závislosti protážení pásu na u_1 a u_2

Na 3D grafu (Obr.12) je vyznačena oblast, kterou bych doporučil jako optimální pracovní oblast pro řízení protážení pásu, protože v této oblasti je závislost protážení pásu na otáčkách obou servomotorů lineární. Mimo označenou oblast je závislost nelineární, protože zde dochází k větší oscilaci hodnoty protážení a k prokluzování pásu na vodících kladkách servomotorů.

3.2.2 Rychlost pásu



Obr. 13. 3D Graf závislosti rychlosti pásu na u_1 a u_2

Na 3D grafu (Obr.13) je vyznačena oblast, kterou bych doporučil jako optimální pracovní oblast pro řízení rychlosti pásu, protože v této oblasti je závislost rychlosti pásu na otáčkách servomotorů lineární a nedochází k prokluzování pásu.

Obě označené oblasti se překrývají a proto ve vzniklém průniku obou oblastí bych doporučil optimální pracovní oblast pro řízení laboratorního modelu CE108.

4 DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY

Dynamické charakteristiky systému vyjadřují časovou závislost napětí a rychlosti pásu jako odezvy na skokové změny otáček jednotlivých servomotorů a jsou důležitým prvkem při návrhu systému řízení.

4.1 Protážení pásu

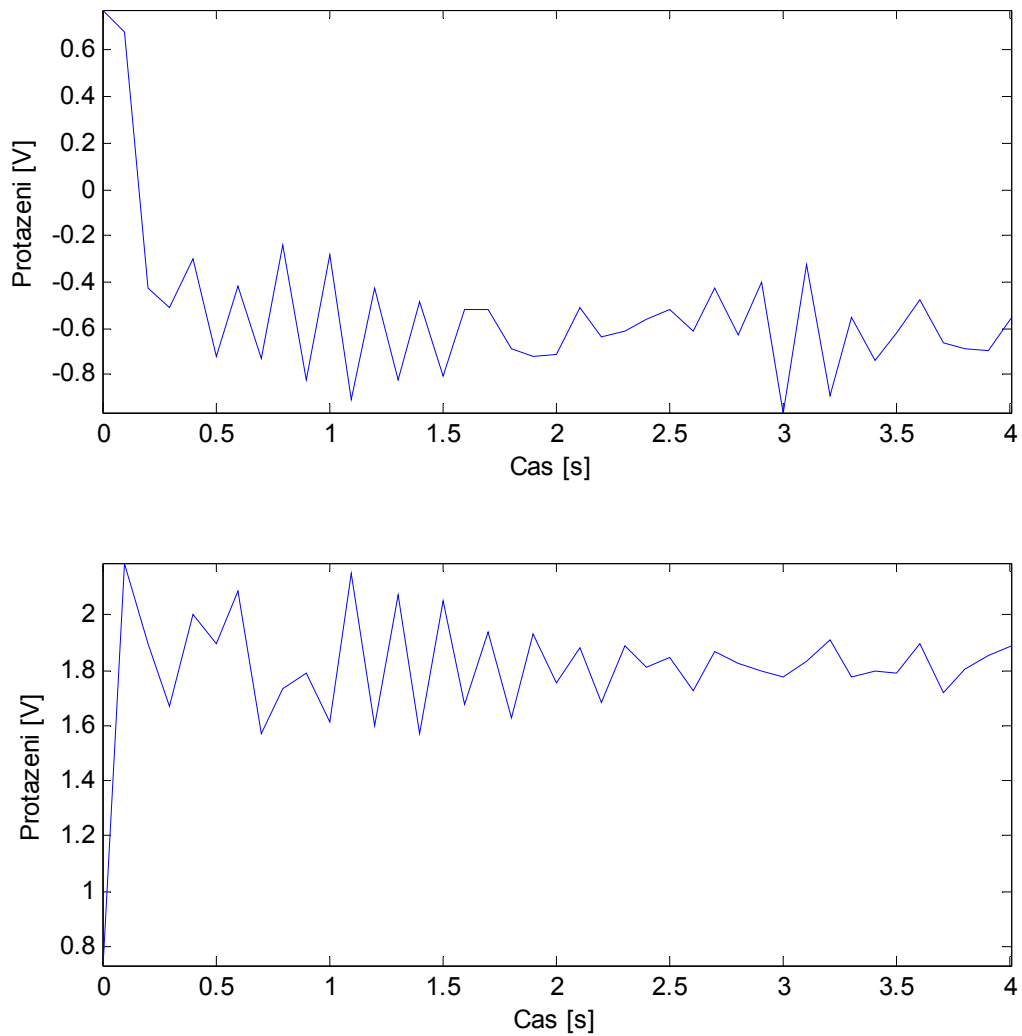
Měření dynamických charakteristik protažení pásu jsem prováděl ve třech pracovních bodech:

1. **pracovní bod** - výkon obou servomotorů je **25%**
2. **pracovní bod** - výkon obou servomotorů je **50%**
3. **pracovní bod** - výkon obou servomotorů je **75%**

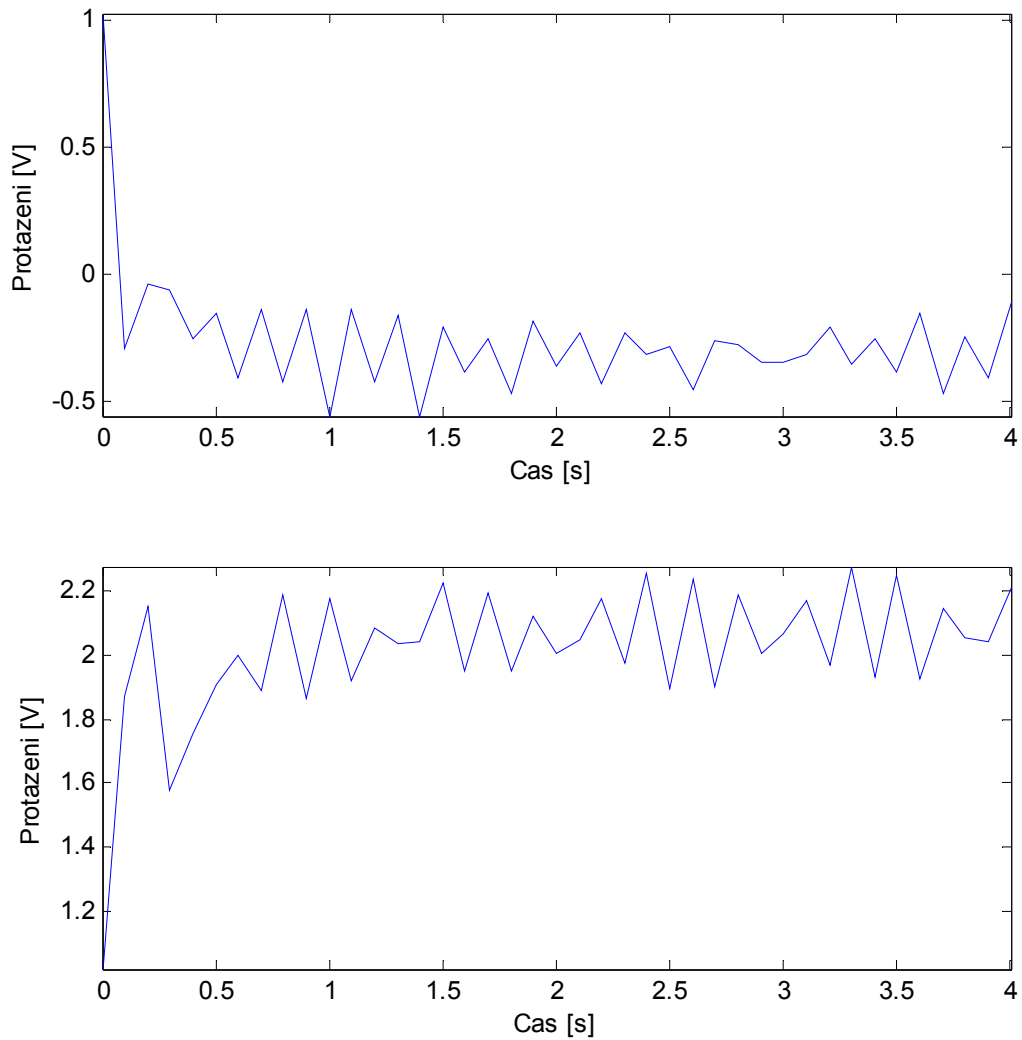
V těchto ustálených pracovních bodech jsem provedl změnu výkonu servomotoru M1 a to snížením a zvýšením o 25%. Z naměřených dat jsem použil hodnoty od změny výkonu do opětovného ustálení hodnoty protažení. Pro co nejlepší porovnání s modelem uváděným v literatuře jsem použil hodnoty odpovídající 4 sekundám chodu CE108. Po 4 sekundách byla hodnota protažení již ustálená. Hodnota protažení v ustáleném stavu nebyla zcela konstantní, ale vždy oscilovala. Naměřené dynamické charakteristiky protažení jsem zobrazil pomocí grafů (Obr.14), (Obr.15) a (Obr.16), kde první graf zobrazuje snížení a druhý graf zvýšení výkonu servomotoru M1 o 25%.

4.1.1 Naměřené dynamické charakteristiky

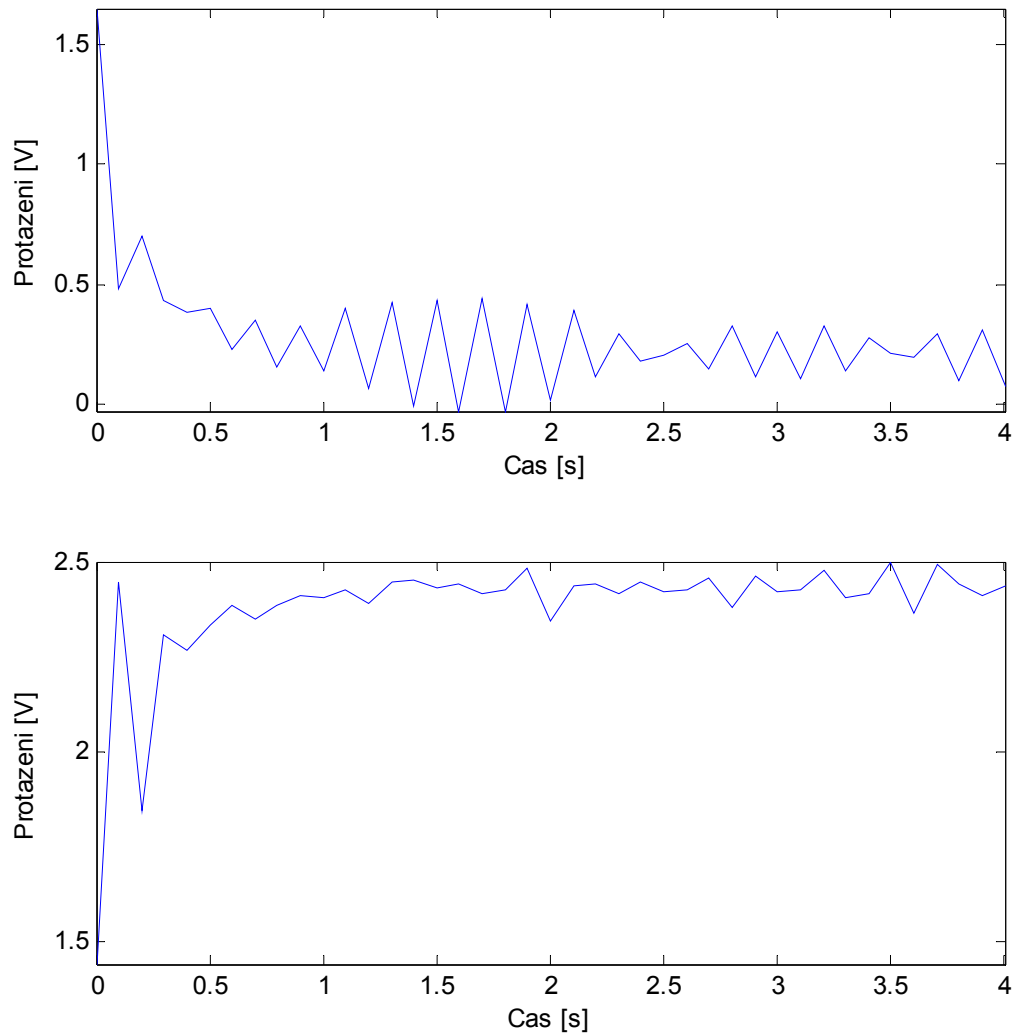
a) První pracovní bod



Obr. 14. Grafy závislosti protažení na čase - 1. pracovní bod

b) Druhý pracovní bod

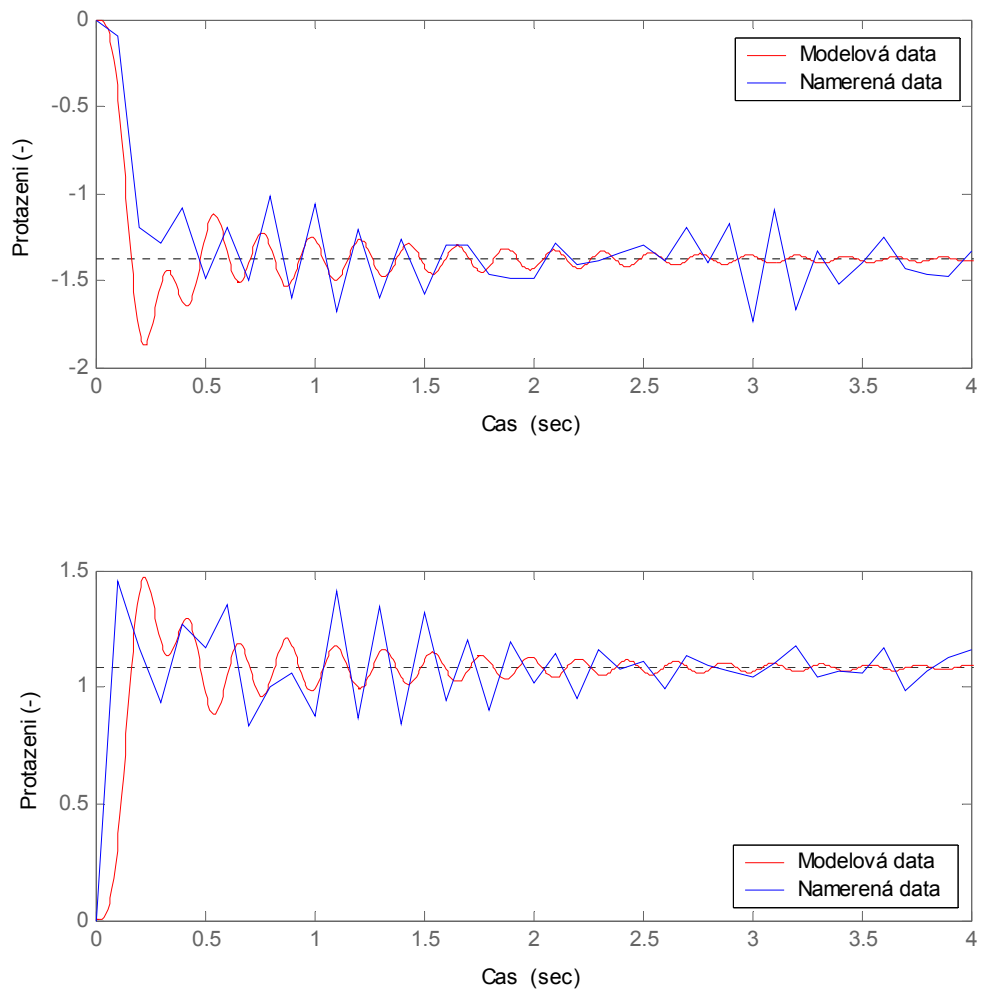
Obr. 15. Grafy závislosti protažení na čase - 2. pracovní bod

c) Třetí pracovní bod*Obr. 16. Grafy závislosti protažení na čase - 3. pracovní bod*

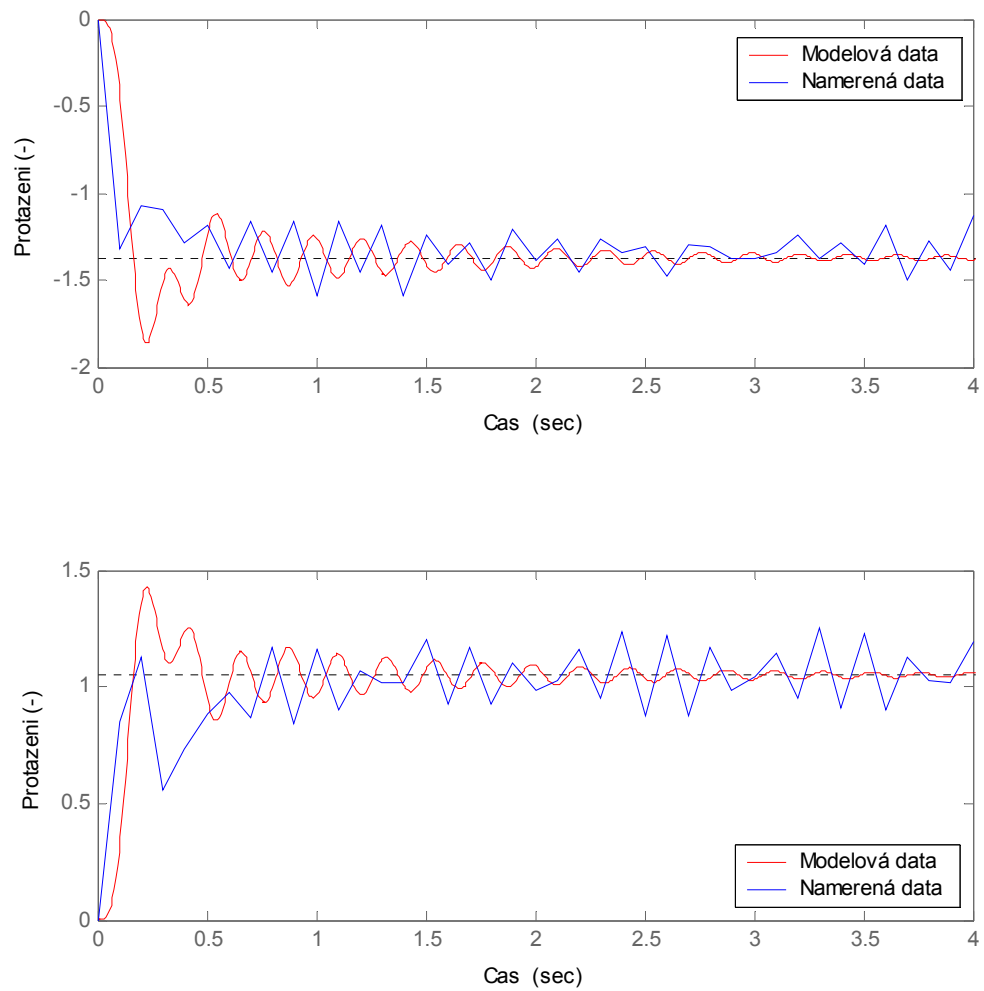
4.1.2 Porovnání s modelem

V této části jsem porovnával získané dynamické charakteristiky protažení pásu s modelem uváděným v literatuře [6]. Naměřené hodnoty jsem upravil tak, aby počátek vykreslované charakteristiky byl na souřadnicích [0,0]. Tato úprava byla důležitá pro lepší porovnání, protože vykreslená dynamická charakteristika zjednodušeného modelu má počátek právě na souřadnicích [0,0]. Dynamická charakteristika zjednodušeného modelu vychází z rovnice (6), u které jsem upravoval hodnotu zesílení pro přímé porovnání oscilací.

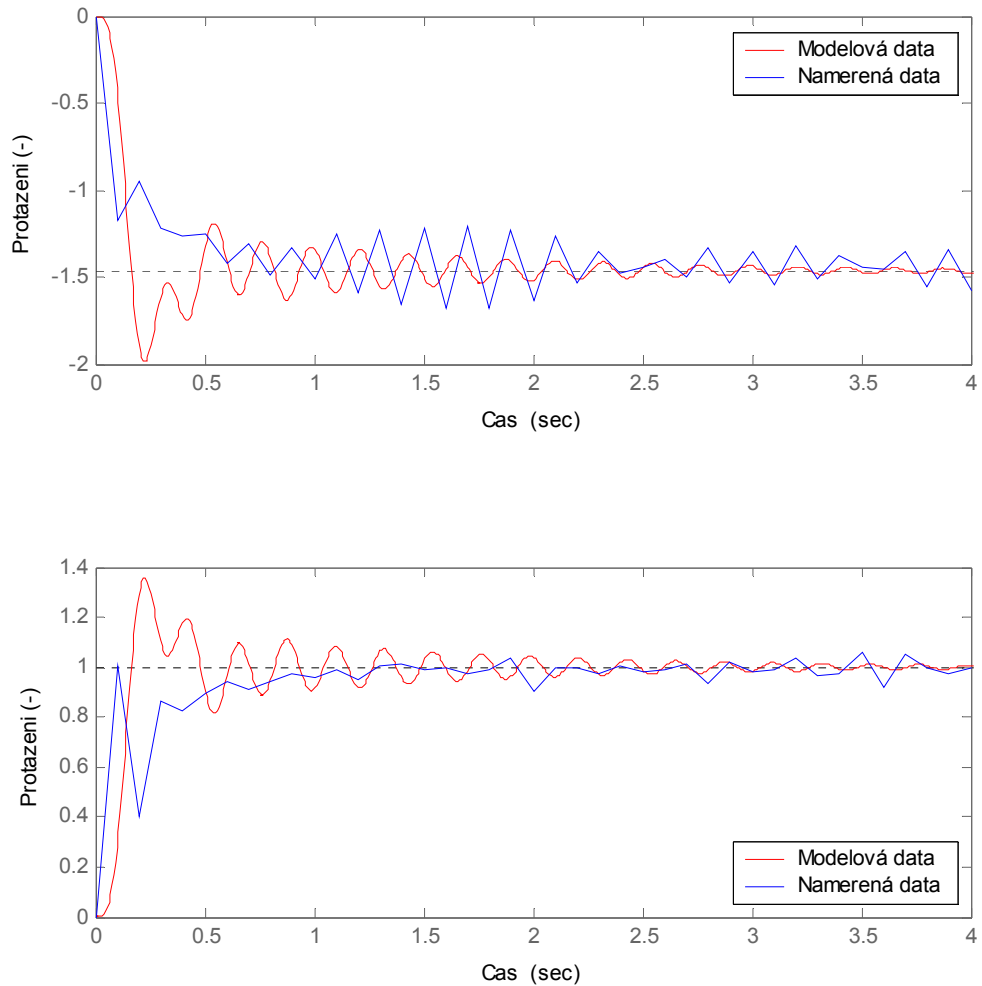
a) První pracovní bod



Obr. 17. Porovnání grafů závislosti protažení na čase – 1. pracovní bod

b) Druhý pracovní bod

Obr. 18. Porovnání grafů závislosti protažení na čase – 2. pracovní bod

c) Třetí pracovní bod

Obr. 19. Porovnání grafů závislosti protažení na čase – 3. pracovní bod

Grafickým porovnáním (Obr.17), (Obr.18) a (Obr.19) naměřené dynamické charakteristiky protažení pásu s vykreslenou dynamickou charakteristikou zjednodušeného modelu jsem dospěl k tomu, že dynamika oscilací reálného zařízení a modelu jsou si vcelku blízké. Odchylky jsou patrně dány zjednodušením modelu a přítomnými poruchami.

4.2 Rychlost pásu

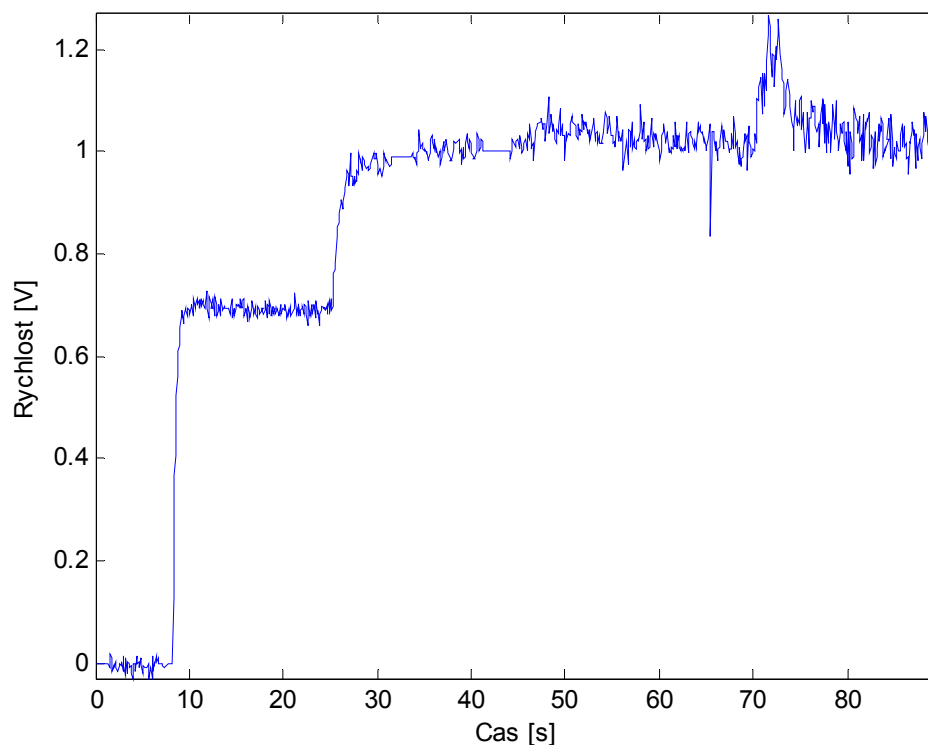
Měření dynamických charakteristik rychlosti pásu jsem prováděl postupným zvyšováním výkonu servomotoru o 25%. Na počátku byly výkony obou servomotorů na 0% tudíž rychlost byla nulová, poté jsem zvýšil výkon servomotoru M1 na 25%. Po ustálení a několika sekundové prodlevě jsem opět zvýšil výkon servomotoru M1 na 50% a tak jsem pokračoval až do 100% výkonu. Výkon servomotoru M2 jsem neměnil.

4.2.1 Naměřené dynamické charakteristiky

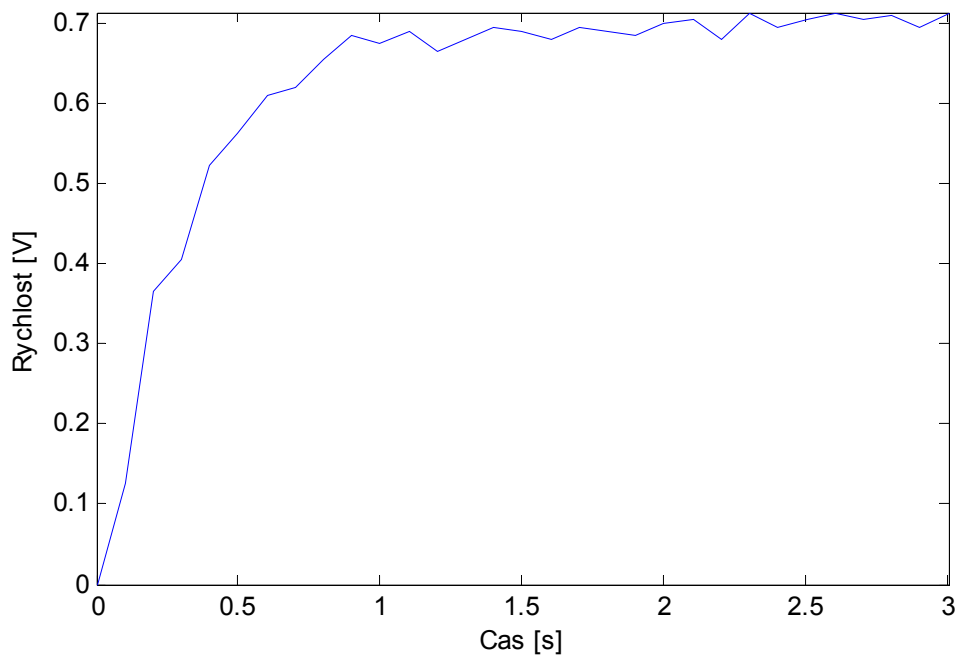
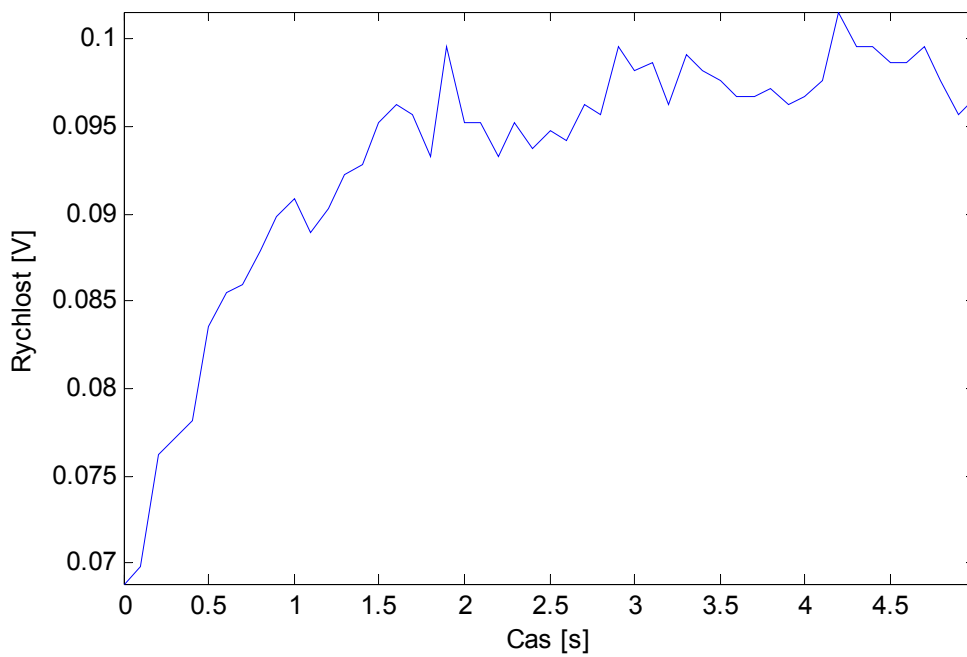
Z naměřených data zobrazených na grafu (Obr.20) jsem získal pouze 2 dynamické charakteristiky rychlosti:

- Zvýšení výkonu servomotoru M1 z **0% na 25%**
- Zvýšení výkonu servomotoru M1 z **25% na 50%**

U posledních dvou zvýšení výkonů servomotoru M1 nedošlo k výrazně změně rychlosti pásu, protože při větším rozdílu výkonů jednotlivých servomotorů dochází k prokluzování mezi pásem a kladkou servomotoru, v tomto případě servomotoru M1.



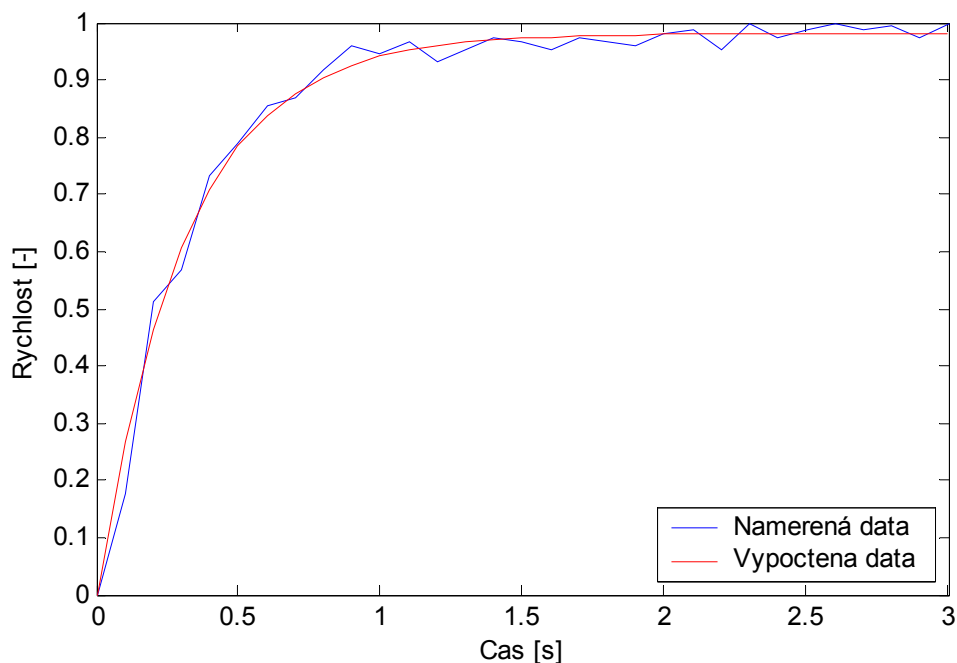
Obr. 20. Graf závislosti rychlosti na čase

a) Zvýšení výkonu servomotoru M1 z 0% na 25%*Obr. 21. Graf závislosti rychlosti na čase – M1 z 0% na 25%***b) Zvýšení výkonu servomotoru M1 z 25% na 50%***Obr. 22. Graf závislosti rychlosti na čase – M1 z 25% na 50%*

4.2.2 Porovnání s modelem

Získané dynamické charakteristiky rychlosti pásu jsem porovnával s modelem uváděným v literatuře [6] a to s rovnicí (5). Naměřené hodnoty jsem upravil tak, aby počátek vykreslované charakteristiky byl na souřadnicích [0,0] a znormoval získané data na rozsah 0 až 1. Tyto úpravy byly nutné pro aproximování získaných dat. K aproximaci jsem použil funkci *Řešitel*, která je součástí programu Microsoft® Office Excel 2003. Aproximací jsem získal hodnotu zesílení a časovou konstantu přenosu 1.řádu, která byla pro porovnání podstatnější. Získaný přenos jsem porovnával s přenosem rovnice (5) uváděným v literatuře [6].

a) Zvýšení výkonu servomotoru M1 z 0% na 25%



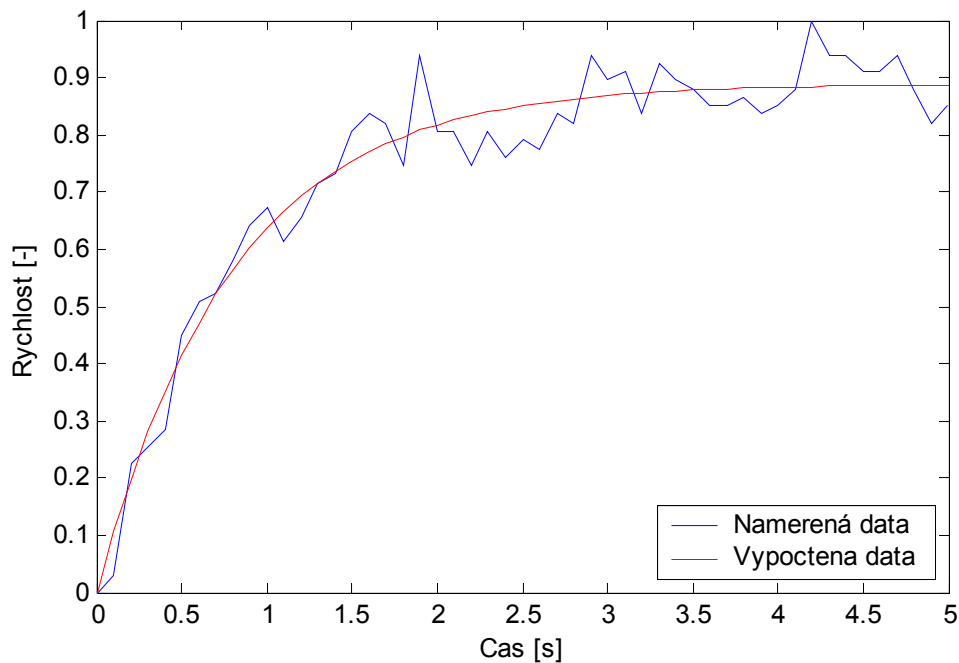
Obr. 23. Porovnání grafů závislosti rychlosti na čase – M1 z 0% na 25%

Získaný přenos:

$$G_{\omega} = \frac{0,98}{0,31s + 1} \quad (8)$$

Získaný přenos je co se časové konstanty týče téměř identický s přenosem modelu uváděným v literatuře. Tento výsledek potvrzuje, že v této pracovní oblasti matematický model vcelku věrně popisuje reálný model CE108.

b) Zvýšení výkonu servomotoru M1 z 25% na 50%



Obr. 24. Porovnání grafů závislosti rychlosti na čase – M1 z 25% na 50%

Získaná přenos:

$$G_{\omega} = \frac{0,89}{0,79s + 1} \quad (9)$$

Získaný přenos je již více odlišný než přenos uváděný v literatuře. Vzniklou odlišnost mezi oběma přenosy pravděpodobně zapříčinil větší rozdíl mezi výkony jednotlivých servomotorů, který způsoboval prokluzování pásu a menší protažení pásu.

5 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Z naměřených statických charakteristik jsem doporučil optimální pracovní oblast pro řízení laboratorního modelu CE108. Tato oblast se nedala snadno číselně vyjádřit a proto je barevně vyznačena v grafech (Obr.12) a (Obr.13) a za optimální pracovní oblast byl označen průnik barevně vyznačených oblastí. Z výsledného průniku vyplývá, že rozdíl otáček jednotlivých servomotorů vyjádřený v procentech by neměl překročit 25%. Při větším rozdílu by mohlo docházet k výraznějším oscilacím (zejména hodnoty protažení pásu) a k prokluzování pásu. K oscilacím a prokluzování pásu dochází zejména v krajních oblastech 3D grafů, kde rozdíl otáček jednotlivých servomotorů je největší.

Naměřené dynamické charakteristiky protažení pásu vykreslené do grafů jsem porovnal s vykreslenou charakteristikou zjednodušeného modelu vyplývající z rovnice (6). Z porovnání (Obr.17), (Obr.18) a (Obr.19) vyplývá, že dynamika oscilací reálného zařízení a modelu jsou si vcelku blízké.

Naměřené dynamické charakteristiky rychlosti pásu jsem vykreslil do grafů, znormoval a aproximoval. Aproximací jsem získal hodnotu zesílení a časovou konstantu přenosu 1.řádu. Získané přenosy jsem porovnával s přenosem rovnice (5). Přenos vyjádřený rovnicí (8), který byl získaný z dynamické charakteristiky naměřené v doporučené optimální pracovní oblasti, byl téměř identický s přenosem zjednodušeného modelu. Přenos rovnicí (9), který byl získaný s charakteristiky naměřené mimo doporučenou optimální pracovní oblast byl více odlišný od přenosu zjednodušeného modelu.

Výsledky z porovnání dynamických charakteristik potvrzují, že v optimální pracovní oblasti zjednodušený matematický model poměrně věrně popisuje reálný model CE108.

ZÁVĚR

Hlavním úkolem mé bakalářské práce bylo naměření statických a dynamických charakteristik systému sprážených servomotorů na laboratorním modelu CE108. Naměřené charakteristiky jsem porovnával s modely uváděnými v literatuře.

V teoretické části jsem uvedl základní vlastnosti a popis hlavních částí CE108 a praktické použití sprážených servomotorů. Je zde i zjednodušený matematický model, který byl používán pro porovnání s naměřenými dynamickými charakteristikami.

V praktické části jsem uvedl zapojení CE108 a způsob jakým jsem prováděl měření. Ovládání CE108 a následný sběr naměřených dat na CE108 byl prováděn přes počítač s měřicí kartou Advantech PCL-812 a to pomocí programového prostředí Matlab[®]-Simulink. Naměřené charakteristiky jsem vykresloval do grafů pomocí programového prostředí Matlab[®].

Naměřené statické charakteristiky jsem vykreslil do 2D a 3D grafů (Obr.9) – (Obr.13) jako závislost protažení a rychlosti pásu na rychlosti otáček jednotlivých servomotorů. Pomocí vykreslených grafů jsem doporučil optimální pracovní oblast pro řízení systému, protože v této oblasti je závislost protažení a rychlost pásu na otáčkách lineární. Tato oblast je barevně vyznačena na 3D grafech (Obr.12) a (Obr.13).

Naměřené dynamické charakteristiky protažení a rychlosti pásu jsem vykreslil do grafů (Obr.20) – (Obr.24) jako závislost protažení nebo rychlosti pásu na čase. Porovnání naměřených dynamických charakteristik se zjednodušenými modely uváděných v literatuře [6] nám potvrzuje, že zjednodušené modely vystihují podstatné dynamické vlastnosti reálného modelu a mohly by být využity pro návrh řízení systému, ale jen za podmínky, že se bude dodržovat doporučená optimální pracovní oblast pro řízení. Odchytky jsou patrně dány zjednodušením modelu a přítomnými poruchami. Mimo optimální pracovní oblast již naměřené dynamické charakteristiky neodpovídají zjednodušeným modelům.

Výsledky porovnání dynamických charakteristik potvrzují, že v doporučené optimální pracovní oblasti matematický model vcelku věrně popisuje reálný model CE108.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HUMUSOFT, s.r.o.: *Real-Time Toolbox -user's manual.*, 2003.
- [2] *CE108 Coupled Drives Apparatus* [online]. [2005] [cit. 2006-08-26]. Dostupný z WWW: <[http://www.tq.com/product/cart/pdfs/CE108\(2\).pdf](http://www.tq.com/product/cart/pdfs/CE108(2).pdf)>.
- [3] THE MATHWORKS Inc., *Using MATLAB Graphics.*, 2000.
- [4] BALÁTĚ , Jaroslav. *Automatické řízení*. Praha : Ben - technická literatura, 2003. 664 s. ISBN 80-7300-020-2.
- [5] HAGADOORN, Hilde, READMAN, Mark. *Coupled Drives 1:Basic* [online]. [2005] [cit. 2006-08-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/coupled-drives1.pdf>>.
- [6] HAGADOORN, Hilde, READMAN, Mark. *Coupled Drives 2:Control and analysis* [online]. [2005] [cit. 2006-08-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/coupled-drives2.pdf>>.
- [7] WELLSTEAD, P.E. *Introduction to physical system modelling*. London : Academic Press Ltd, 1979.
- [8] *The University of Manchester* [online]. [2005] [cit. 2006-08-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.manchester.ac.uk/>>.
- [9] *TQ Education and Training Ltd* [online]. [2006] [cit. 2006-08-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.tq.com/>>.
- [10] *Advantech : Trusted ePlatform Services - PCL-812PG - MultiLab Analog and Digital I/O Card* [online]. [2006] [cit.2006-08-26]. Dostupný z WWW: <http://www.advantech.com.tw/products/Model_Detail.asp?model_id=1-UC834&BU=EA#>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A/D	Analogově-digitální
D/A	Digitálně-analogový
G_{ω}	Přenosová funkce rychlosti pásu
G_x	Přenosová funkce protažení pásu
h_1	Moment hybnosti pohonu 1
h_2	Moment hybnosti pohonu 2
ISA	Industry Standard Architecture
M1	Označení levého servomotoru
M2	Označení pravého servomotoru
p	Hybnost ramene
u_1	Ovládací napětí levého servomotoru
u_2	Ovládací napětí pravého servomotoru
x_c	Protažení části pásu C
x_d	Protažení části pásu D
x_e	Protažení části pásu E

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Model CE108.....</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 2. Přední panel CE108.....</i>	<i>10</i>
<i>Obr. 3. Hlavní vnitřní části CE108.....</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 4. Typická aplikace spřažených motorů.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 5. Schéma spřažených pohonů pro účely modelování.....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 6. Svorkovnicová deska PCLD-780.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 7. Měřicí karta Advantech PCL-812.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 8. Měřicí model v Matlab-Simulinku.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 9. Grafy závislosti protažení a rychlosti pásu na u_1.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 10. Grafy závislosti protažení a rychlosti pásu na u_2.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 11. Graf závislosti rychlosti pásu na u_1, u_2=konstanta.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 12. 3D Graf závislosti protažení pásu na u_1 a u_2.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 13. 3D Graf závislosti rychlosti pásu na u_1 a u_2.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 14. Grafy závislosti protažení na čase - 1. pracovní bod.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 15. Grafy závislosti protažení na čase - 2. pracovní bod.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 16. Grafy závislosti protažení na čase - 3. pracovní bod.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 17. Porovnání grafů závislosti protažení na čase – 1. pracovní bod.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 18. Porovnání grafů závislosti protažení na čase – 2. pracovní bod.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 19. Porovnání grafů závislosti protažení na čase – 3. pracovní bod.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 20. Graf závislosti rychlosti na čase.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 21. Graf závislosti rychlosti na čase – M1 z 0% na 25%.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 22. Graf závislosti rychlosti na čase – M1 z 25% na 50%.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 23. Porovnání grafů závislosti rychlosti na čase – M1 z 0% na 25%.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 24. Porovnání grafů závislosti rychlosti na čase – M1 z 25% na 50%.....</i>	<i>36</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Použitá sada bloků v Simulinku.....</i>	<i>19</i>
--	-----------