České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Podpora výuky dynamických systémů – II.

Bakalářská práce
2006

Vypracoval : Petr Husa
Vedoucí práce: Ing. František Vaněk

České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

Školní rok: 2005/2006

Zadání bakalářské práce

Student: Petr Husa

Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: Laboratoř dynamických systémů – II.

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s modely kuličky na tyči (K3), servomechanismu Amira (S4) a magnetického závěsu (M).
2. Proveďte základní statická měření na všech uvedených modelech.
3. Proveďte změření přechodových charakteristik na všech přidělených modelech.
4. Proveďte změření frekvenční charakteristiky u modelů, kde to je možné.
5. Zpracujte stručný návod na obsluhu modelu.
6. Vytvořte dokument na formát A1-A2 (umístěný na stěnu nad modelem), který bude obsahovat. popis systému, HW-zapojení a ukázkový řídicí program v Simulinku.

Seznam odborné literatury: Dodá vedoucí práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Vaněk

Datum zadání bakalářské práce: zimní semestr 2005/06

Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 6. 2006

Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

V.Z.

Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.
děkan

V Praze, dne 1. 2. 2006

Anotace

Cílem této práce je ukázat metody identifikace neznámého dynamického systému. V první části jsou tyto metody popsány teoreticky, ve druhé potom předvedené prakticky. Praktická část se zabývá měřením základních charakteristik – statické, přechodové a frekvenční a jejich využitím při identifikaci systému. Měření je prováděno na modelech servomotoru, kuličky na tyči a magnetického závěsu. Dále je součástí práce vytvoření plakátů a návodů pro jednotlivé modely, které by měly sloužit jako studijní materiály pro budoucí studenty.

Annotation

The aim of this bachelor thesis is to show methods of identification of unknown dynamic system. In first part are these methods described theoretically, in second part practically. The practical part is concerned with measurement of basic characteristics – static, step and bode and their application for identification. The measurement is accomplished on models servomotor, ball and beam and magnetic levitation. The last part of this thesis is creating of posters and instructions for each model, which would serve as studying materials for incoming students.

Prohlášení

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

V Praze dne ……. …….
podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé práce Ing. Františku Vaňkovi za trpělivost, cenné rady, informace a odpovědi na řadu mých otázek, které jsem potřeboval při tvorbě této práce. Dále děkuji rodině a všem blízkým za podporu při studiu.

Obsah

Úvod ... 8
Teoretický úvod ... 9
Statická charakteristika ... 9
Pracovní bod ... 9
Přenos lineárního spojitého systému ... 9
Přechodová charakteristika ... 9
Stavové rovnice ... 9
Linearizaci stavových rovnic ... 10
Identifikace systémů vyšších řádů ... 11
Frekvenční charakteristika ... 12
Měření frekvenčních charakteristik ... 13
1. Servo DR300 – AMIRA ... 14
1.1 Popis systému ... 15
1.2 Matematický popis stejnosměrného motoru ... 15
1.3 Schéma modelu ... 16
1.4 Vypracování úkolů dle zadání ... 16
1.4.1. Měření základních statických měření ... 17
1.4.2. Měření přechodové charakteristiky a identifikace systému ... 18
1.4.3. Měření frekvenční charakteristiky ... 21
1.5 Závěr ... 23
2. Kulička na tyči (TQ) ... 25
2.1 Popis systému ... 26
2.2 Matematický popis modelu kuličky na tyči ... 26
2.3 Schéma modelu ... 27
2.4 Vypracování úkolů dle zadání ... 27
2.4.1. Měření základních statických měření ... 27
2.4.2. Měření přechodové charakteristiky a identifikace systému ... 29
I. Část odpovídající servomotoru a převodu na náklon tyče ... 29
II. Mechanická část složená z tyče a kuličky ... 32
2.4.3. Měření frekvenční charakteristiky ... 34
2.5 Závěr ... 35
3. Magnetický závěs (AMIRA MA400) ... 36

3.1 Popis systému 37
3.2 Matematický popis modelu magnetický závěs 38
3.3 Schéma modelu 38
3.4 Vypracování úkolů dle zadání 39
3.4.1. Měření základních statických měření 39
3.4.2. Měření přechodové charakteristiky a identifikace systému 39
I. Část popisující chování elektroniky a elektromagnetu 39
II. Mechanika kyvadélka 40
III. magnetická část soustavy 42
3.4.3. Měření frekvenční charakteristiky 46
3.5 Závěr 47
Zhodnocení práce 48
Použitá literatura 49
Použitý software 49
Obsah přiloženého CD 50

Úvod

Abychom mohli plně využívat nějaké neznámé zařízení, je třeba zjistit jeho vlastnosti . Jak se chová za určitých podmínek. K tomu nám slouží řada charakteristik – např. impulsní, přechodová a frekvenční charakteristika, statické charakteristiky, atd. Principem měření těchto charakteristik na neznámém zařízení je získat přenos, který nám toto zařízení charakterizuje. Postup, kterým získáme přenos zařízení se nazývá identifikace.

Cílem mojí práce je ukázat principy identifikace na několika různých modelech a shrnout výsledky měření do stručných návodů pro budoucí kolegy studenty, které toto učivo teprve čeká. Pokusím se do výsledků zahrnout i mé osobní poznatky a zkušenosti, se kterými jsem se během studia setkal. Doufám, že tato práce bude budoucím studentům ku prospěchu.

Teoretický úvod

Statická charakteristika

Statická charakteristika je závislost výstupní veličiny na veličině vstupní v ustáleném stavu [4].

Pracovní bod

Pracovní bod se zpravidla volí uprostřed používaného rozsahu vstupní veličiny. Důvodem je co nejmenší odchylka aproximačního lineárního modelu (frekvenční přenos) od vlastností skutečného systému v co největším rozpětí hodnot vstupní veličiny [1].

Přenos lineárního spojitého systému

Přenosem systému nazýváme poměr Laplaceova obrazu výstupu ku Laplaceovu obrazu vstupu při nulových počátečních podmínkách [2] a jeho tvar je :

$$G(s) = \frac{\mathrm{Y\,(s)}}{\mathrm{U\,(s)}}$$

Přechodová charakteristika

Přechodová funkce (přechodová charakteristika) systému h(t) je odezva systému na jednotkový skok 1(t) při nulových počátečních podmínkách. Jednotkový skok je definovaný jako:

$$\begin{aligned} 1(t) &= 0 \text{ pro } t < 0 \\ &= 1 \text{ pro } t \geq 0 \,. \end{aligned}$$

Podmínku nulového počátečního stavu splňuje libovolný rovnovážný pracovní bod systému.

Přechodová charakteristika je grafické vyjádření časové odezvy systému při působení jednotkové skokové změny vstupního signálu v čase *t = 0.* Čerpáno ze skript [2].

Stavové rovnice

Systémy lze popsat diferenciálními rovnicemi. Soustavu rovnic takových systémů ve tvaru

$$\begin{aligned} x'(t) &= f(x,u,t) \\ y(t) &= g(x,u,t) \end{aligned} \qquad (1)$$

nazýváme stavové rovnice systému. Vektory u, y, x jsou řídicí, výstupní a stavové vektory systému. Jsou-li f, g nelineární funkce, jedná se o stavové rovnice nelineárního spojitého dynamického systému. Je-li navíc takový systém lineární, je přechodová funkce stavu lineární, a proto i tvořící funkce f a výstupní funkce g jsou lineární funkce vzhledem ke stavu a řízení. Proto rovnice (1) můžeme vyjádřit ve zvolené bázi pomocí matic. Potom platí:

$$x'(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t)$$
$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t),$$

kde A(t) je matice systému rozměru (n × n),

B(t) je matice řízení rozměru (n × r),

C(t) a D(t) jsou výstupní matice rozměru (m × n) a (m × r).

Předchozí rovnice jsou stavové rovnice lineárního spojitého systému. Jsou tedy určeny čtveřicí matic A(t),B(t),C(t),D(t). Čerpáno ze skript [3].

Linearizace stavových rovnic

Chceme-li vyšetřovat lokální vlastnosti nelineárního systému, provádíme často jeho linearizaci. Lineární modely používáme proto, že se s nimi lépe pracuje a že v mnoha případech s dostatečnou přesností vyhovují.

Postup linearizace spočívá v rozvoji nelineárních funkcí f a g (1) v Taylorovu řadu kolem daného pracovního bodu, nebo kolem předem zadané trajektorie pracovních bodů. Všechny členy Taylorovy řady řádu vyššího než prvého zanedbáme a dostaneme aproximace funkcí f a g , které jsou vzhledem ke svým argumentům lineární. Tímto postupem dostaneme lineární aproximaci funkcí f a g.

$$f(x,u,t) = f(x_0,u_0,t) + \frac{\delta f}{\delta x}\Big|_{(x0,u0)} * \Delta x + \frac{\delta f}{\delta u}\Big|_{(x0,u0)} * \Delta u$$

$$g(x,u,t) = g(x_0,u_0,t) + \frac{\delta g}{\delta x}\Big|_{(x0,u0)} * \Delta x + \frac{\delta g}{\delta u}\Big|_{(x0,u0)} * \Delta u$$

Protože $f=[f1,f2,...,fn]^T$ a $g=[g1, g_2,..., g_m]^T$, jsou výrazy $\delta f/\delta x$ a $\delta g/\delta u$ rovny Jacobiho matici příslušné vektorové funkce, vyčíslené v bodě x_o, u_o.

Vyjádřeme původní nelineární rovnice (1) pomocí odchylkového modelu a dosaďme za nelineární vektorové funkce *f* a *g* jejich Taylorovy rozvoje se zanedbanými členy vyšších

řádů. Protože v pracovním bodě platí stavové rovnice, dostaneme výsledný odchylkový linearizovaný model ve tvaru.

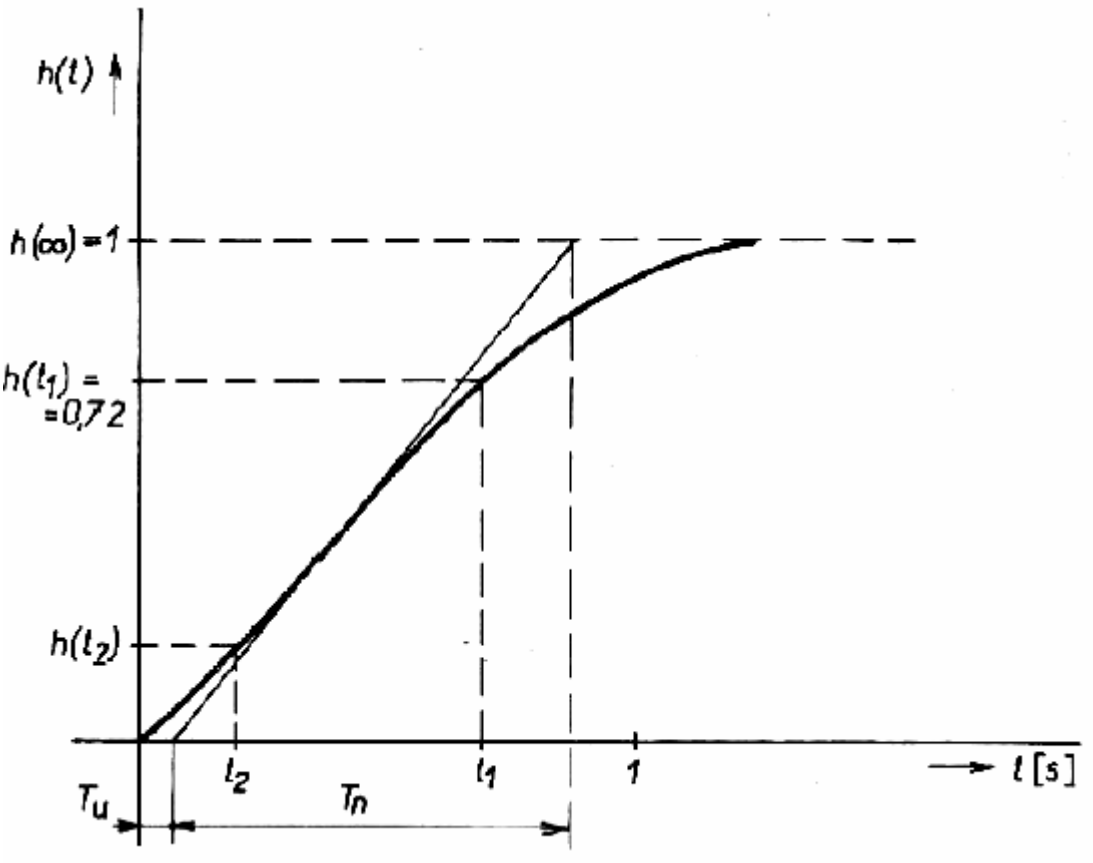
$$\Delta x\,(t) = A(t)\Delta x(t) + B\{t)\ \Delta u\{t)$$

$$\Delta y\,(t) = C(t)\ \Delta x(t) + D(t)\ \Delta u(t)$$

Čerpáno ze skript [2].

Identifikace systémů vyššího řádu

Viz *Návod na identifikaci z přechodové charakteristiky* [7]. Mějme přechodovou charakteristiku ve tvaru :



Podle tvaru přechodové charakteristiky se jedná zřejmé o statický systém vyššího řádu, bez členů schopných vlastních kmitů, který budeme aproximovat systémem s přenosem

$$G(s) = \frac{K}{(1+sT)^n} \quad \text{nebo} \quad G(s) = \frac{K}{(1+sT_1)\ *(1+sT_2)}$$

kde K Je zesílení systému,

T je n-násobná časová konstanta systému,

n je řád systému.

K určení parametrů T a n nejprve určíme hodnotu Tu (doba průtahu) a Tn (doba náběhu) a jejich poměr τ_u.

Je-li hodnota $\tau_u \geq 0{,}104$,použijeme aproximační přenos n-tého řádu se stejnými časovými konstantami, je-li $\tau_u < 0{,}104$, použijeme aproximační přenos druhého řádu s různými časovými konstantami.

Jako první naznačím řešení pro $\tau_u \geq 0{,}104$. V tomto případě se jedná o systém vyššího řádu se stejnými časovými konstantami. K určení řádu n aproximačního přenosu použijeme tabulku (viz níže), ze které ještě odečteme pořadnici φ inflexního bodu. Je to hodnota nejbližší k hodnotě vypočtené (může být vyšší i nižší).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ_u	0	0,104	0,218	0,319	0,410	0,493	0,570	0,642	0,709	0,771
φ_i	0	0,264	0,353	0,363	0,371	0,384	0,394	0,401	0,407	0,413

K hodnotě pořadnice ještě odečteme časovou hodnotu inflexního bodu (viz graf) t_i . Časovou konstantu T určíme ze vztahu

$$T = \frac{t_i}{n-1}$$

Pokud vyšlo $\tau_u < 0{,}104$ jedná se o systém vyššího řádu s různými časovými konstantami. Postup nalezení přenosu je následující. V tabulce (viz níže) nalezneme nejbližší hodnotu τ_2 pro τ_u. a hodnotu T_1 a T_2 získáme dosazením do rovnic

$$\tau_2 = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{a} \quad T_2 + T_1 = \frac{t_1}{1{,}2564} ,$$

kde t_1 je čas ,kdy výstupní veličina dosáhne 72% své maximální hodnoty .

τ_2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
τ_u	0,050	0,072	0,084	0,092	0,097	0,100	0,102	0,103	0,103	0,104
φ_i	0,148	0,197	0,224	0,240	0,250	0,256	0,260	0,263	0,264	0,264

Návod na identifikaci systému jiného typu je podrobně popsán v [7].

Frekvenční charakteristika

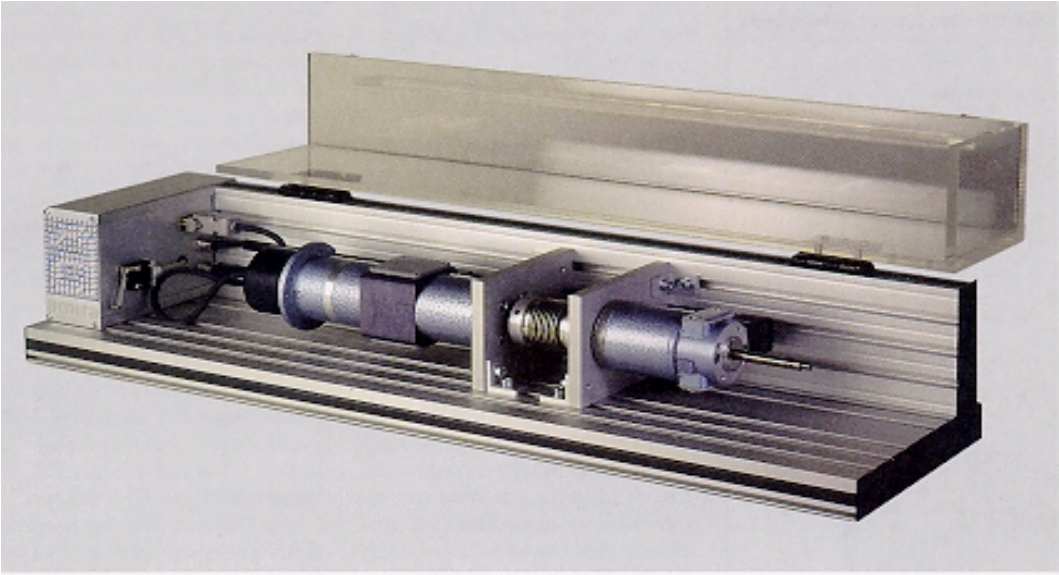
Frekvenční charakteristika je jedním z popisů spojitého lineárního jednorozměrového systému. Je to komplexní funkce - poměr fázorů vstupního a výstupního signálu systému při ustálených sinusových kmitech. Nezávislou proměnnou je kruhová frekvence kmitů

$\omega = 2\pi f$ v rad/s. Parametrickou formu frekvenční charakteristiky (vzoreček, někdy nazývaný *frekvenčním přenosem*) získáme pouhou náhradou Laplaceovy proměnné s ve vzorci pro přenos systému výrazem $i\omega$, kde i je imaginární jednotka. Frekvenční charakteristika se ovšem nejčastěji užívá v neparametrické formě, t.j. jako tabulka nebo graf, získává se výpočtem z přenosu nebo měřením a může být zobrazena mnoha způsoby. Měřit frekvenční charakteristiku je možno pomocí sinusových nebo obecných signálů. Modul (absolutní hodnotu) frekvenční charakteristiky nazýváme obvykle *zesílením* nebo (poněkud nepřesně) *amplitudou*, argument frekvenční charakteristiky (rozdíl fázových úhlů vstupního a výstupního signálu) nazýváme (opět ne zcela přesně) *fázovým úhlem* nebo *fází*. Čerpáno ze skript [2].

Měření frekvenčních charakteristik

Při měření pomocí sinusových signálů potřebujeme měřidla amplitud a fázových posunů vstupního signálu u a výstupního signálu y a vhodný generátor sinusového vstupního signálu u. Modul frekvenční charakteristiky $|G(i\omega)|$ v jednotlivých bodech měření w pak počítáme podle pravidel algebry komplexních čísel jako poměr amplitud $|G(i\omega)| = |Y(i\omega)| / |U(i\omega)|$. Fázový úhel se počítá jako rozdíl $\arg(G(i\omega)) = \arg(Y(i\omega)) - \arg(U(i\omega))$. Čerpáno ze skript [2].

1. Servo DR300 – AMIRA



1.1) Popis systému :

Systém DR300-AMIRA se skládá ze tří základních částí. První, adaptér Humusoft MF614, který slouží ke spojení modelu s počítačem. Druhá, výkonová část (dále ACTUATOR) obsahuje zdroje, senzory proudu, zesilovače pro převod signálů z V/V karty na výkonové veličiny pro motory a zesilovače pro převod signálů ze senzorů na unifikované signály pro vstupy V/V karty. Třetí, mechanická část tvoří dva identické motory s pevně spojenou hřídelí (neuvažujeme pružnost spojky), tachodynamo pro měření otáček ω a IRC senzor pro měření úhlu natočení hřídele φ. První motor (vlevo) je používán jako generátor (můžeme jej využít například pro simulaci proměnného zatěžovacího momentu). Druhý motor (vpravo) slouží pro řízení otáček motoru ω , respektive úhlu natočení hřídele motoru φ. Motor je řízen zesilovačem, který pracuje jako proudový regulátor (proud i můžeme měřit) se dvěma různými časovými konstantami (dle nastavení TIME1 nebo TIME2). Zesilovač je ovládán vstupním napětím u. Všechny veličiny jsou ve strojových jednotkách.

Mým úkolem je provést identifikaci servomechanismu DR300-AMIRA (získat model, který bude popisovat tento systém)

1.2) Matematický popis stejnosměrného motoru:

Rovnice popisující chování stejnosměrného motoru s cizím buzením můžeme zapsat ve tvaru

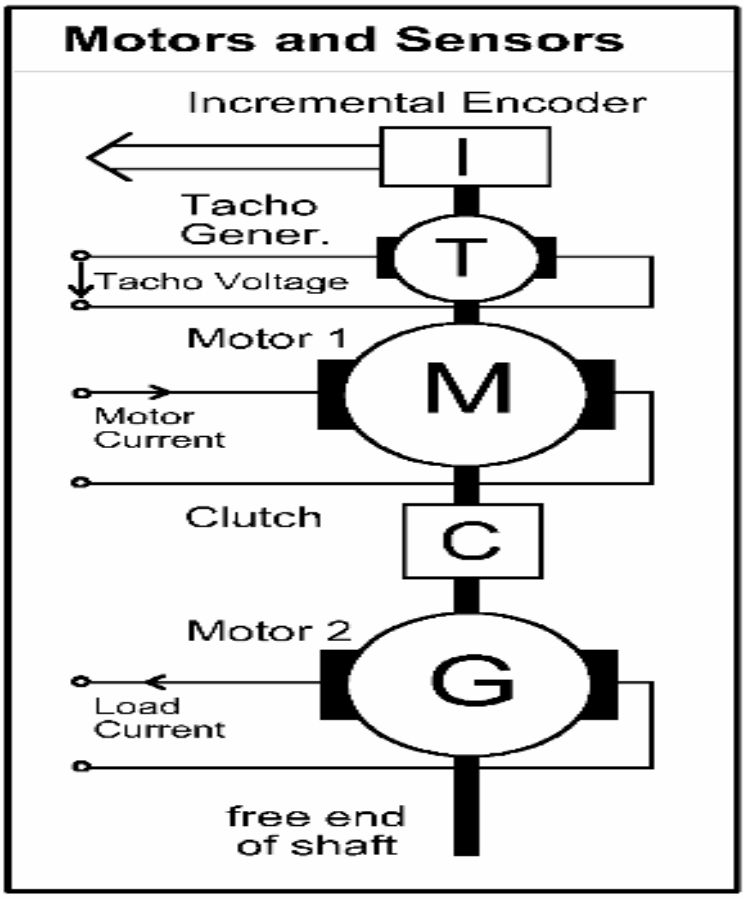
$$
\begin{aligned}
L\frac{d\,i(t)}{dt} &= -R\,i(t) - k_e\,\omega(t) + u(t)\,,\\
J\frac{d\,\omega(t)}{dt} &= k_m\,i(t) - b\,\omega(t) - m_z(t)\,,\\
\frac{d\,\varphi(t)}{dt} &= \omega(t)\,,
\end{aligned}
$$

kde i [A] je proud motoru, ω [s^{-1}] jsou otáčky motoru, φ [rad] je úhel natočení hřídele motoru, u [V] je vstupní napětí motoru (narozdíl od serva AMIRA, které je řízeno proudem), m_z [Nm] je vnější zatěžovací moment (druhý nezávislý vstup v našem případě reprezentovaný například generátorem), R [-] je elektrický odpor motoru, L [H] je indukčnost motoru, J [kgm2 s$_i$1] je moment setrvačnosti motoru, b [$kgm^2\ s^{-2}$] je konstanta tření motoru, k_e [sV^{-1}] je elektrická konstanta motoru a k_m [$kgm^2\ s^{-2}$] je mechanická konstanta motoru.

Poznámka: Uvažujeme-li, že je v systému proudový zdroj, můžeme 1. rovnici vynechat a do druhé rovnice dosadit za proud $i = k_{iu}u$.

1.3) Schéma modelu :

Viz dokumentace k modelům AMIRA [5]



1.4) Vypracování úkolů dle zadání :

1. proveďte základní statická měření $u \rightarrow i$ **a** $u \rightarrow \omega$

2. proveďte změření přechodových charakteristik

3. proveďte změření frekvenční charakteristiky

Při měření uvažuji tyto signály:

napětí motoru $\boldsymbol{u}$ (vstupní signál)

proud motoru $\boldsymbol{i}$ (výstupní signál)

otáčky motoru $\boldsymbol{\omega}$ (výstupní signál)

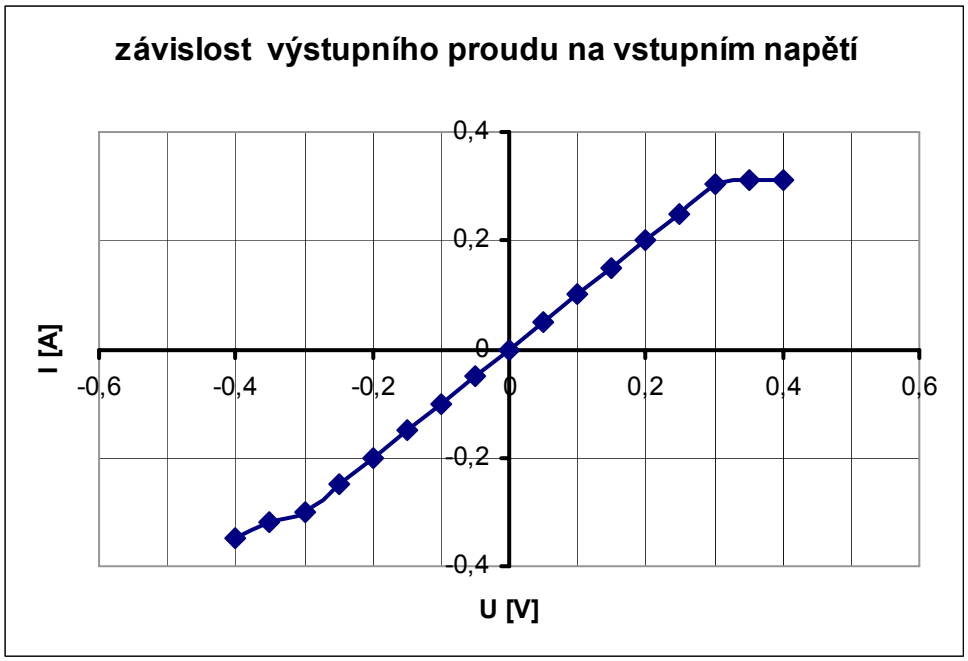
poloha hřídele motoru $\boldsymbol{\varphi}$ (výstupní signál)

1.4.1. Měření základních statických měření

Provedl jsem měření statických převodních charakteristik $u \rightarrow i$ a $u \rightarrow \omega$. Z těchto charakteristik jsem zjistil rozsah napětí, ve kterém systém pracuje v lineární oblasti. Zjistil jsem hodnotu napětí, kdy se motor přestane točit (jde o proudovou ochranu), dále pak maximální možné otáčky a maximální proud.

- **závislost výstupního proudu motoru na napětí motoru** – jednoduše jsem zvyšoval vstupní napětí a odečítal proud motoru

u [V]	i [A]
-0,4	-0,35
-0,35	-0,32
-0,3	-0,3
-0,25	-0,25
-0,2	-0,2
-0,15	-0,15
-0,1	-0,1
-0,05	-0,05
0	0
0,05	0,05
0,1	0,1
0,15	0,15
0,2	0,2
0,25	0,25
0,3	0,305
0,35	0,31
0,4	0,31



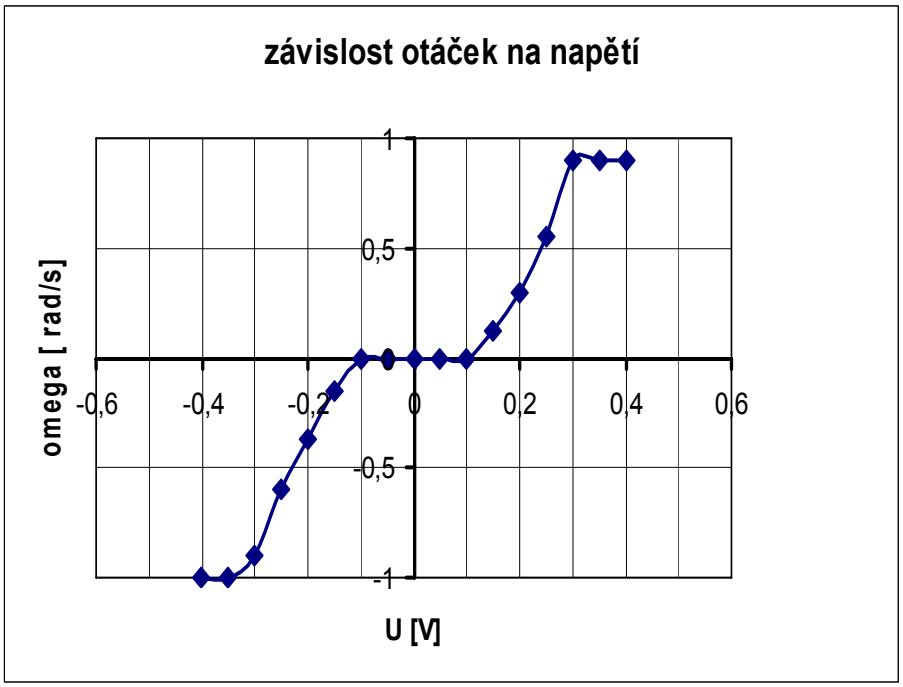
obr. 1: Závislost proudu motoru na napětí motoru

Z převodní charakteristiky je patrné, že lineární průběh je mezi napětími -0,3 a +0,3 V. V grafu je také vidět, že model má proudovou ochranu pro napětí mimo rozsah -0,3 až +0,3 V. Převodní vztah pro přepočet vstupního napětí motoru na výstupní proud motoru je

$$\boxed{y = 0{,}9225x - 0{,}0026}$$

- **závislost otáček motoru na vstupním napětí** – opět jsem zvyšoval vstupní napětí, tentokrát jsem odečítal otáčky motoru (resp. bezrozměrné jednotky v maltabu, na které jsou převedeny otáčky motoru). Nešlo mi ani tak o konkrétní počet otáček, ale spíše jsem potřeboval zjistit saturaci systému (=> maximální hodnotu napětí, při kterém ještě roste počet otáček) a mrtvé pásmo (=> hodnotu napětí, pro kterou se motor vůbec neroztočí)

U [V]	otáčky
-0,4	-1
-0,35	-1
-0,3	-0,9
-0,25	-0,6
-0,2	-0,37
-0,15	-0,15
-0,1	0
-0,05	0
0	0
0,05	0
0,1	0
0,15	0,12
0,2	0,3
0,25	0,55
0,3	0,9
0,35	0,9
0,4	0,9



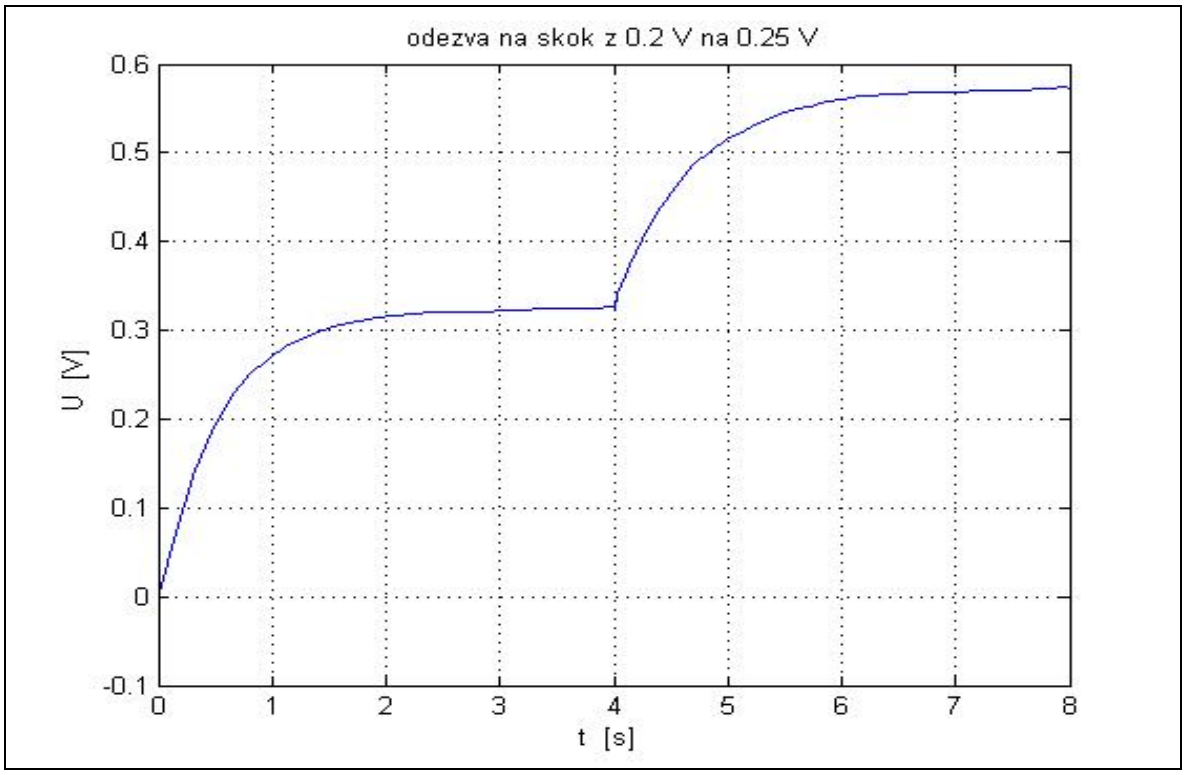
obr. 2 : Závislost otáček motoru na napětí motoru

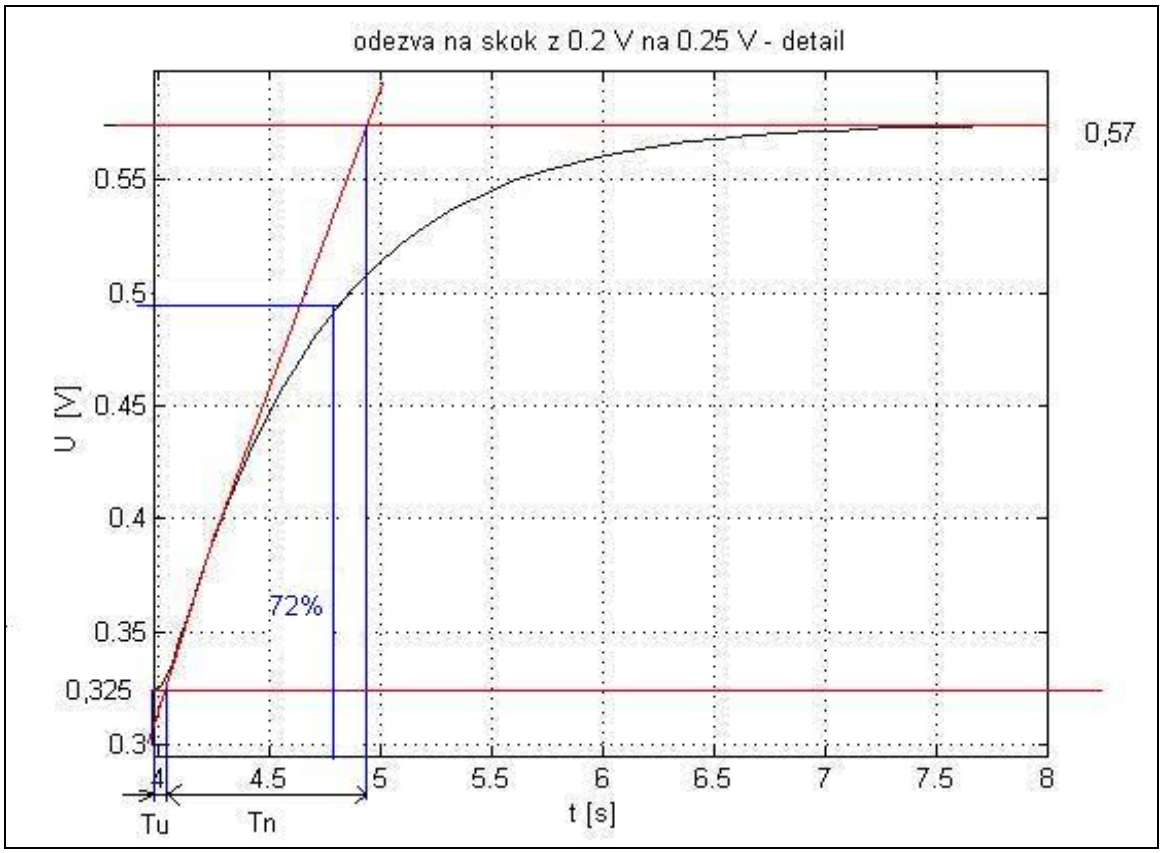
Z převodní charakteristiky je patrné pásmo, kdy se motor netočí, tj. pro U od -0,1V do +0,1V. V kladném směru otáčení otáčky nerostou při napětí vyšším než 0,3 V. Při poklesu napětí se otáčky ustálí na hodnotě napětí -0,3 V . Při měření jsem zjistil, že je zde malá hystereze – při změně napětí z -0,3 V směrem k 0 V klesají otáčky dříve než při obráceném směru. Tato hystereze mi ale vyšla tak zanedbatelná, že ji ani neuvažuji. Dále je velmi obtížné určit počet otáček pro jednotlivá vstupní napětí, protože servo se otáčí příliš rychle. Z toho důvodu nemohu ani určit převodní vztah pro tuto charakteristiku.

Z přenosových charakteristik plyne, že identifikaci dynamického systému z přechodové charakteristiky budeme dělat v rozmezí vstupního napětí do 0,3 V.

1.4.2. Měření přechodové charakteristiky a identifikace systému

Vzhledem k výše uvedené statické převodní charakteristice jsem si zvolil **pracovní bod** v lineární oblasti reálného systému. **Zvolil jsem 0,2 V**. Z přechodové charakteristiky můžeme určit časovou konstantu, z té potom výsledný přenos. Kvůli pásmu necitlivosti jsem nemohl zvolit původní hladinu jednotkového skoku menší než přibližně 0,15 V (tj. hodnota napětí, pro které se motor začne točit). Zvolil jsem tedy skok z 0,2 V na 0,25 V a pustil simulaci. V matlabu jsem si poté vykreslil přechodovou charakteristiku





obr. 3 : Přechodová charakteristika pro skok z 0,2 V na 0,25 V a detail v pracovním bodě

Z přechodové charakteristiky je patrné,že se jedná o systém druhého řádu (protože charakteristika hned neroste, ale je zde patrné malé zpoždění). Při identifikaci jsem bod [4, 0,325] použil jako počátek soustavy.

Z grafu byly odečteny hodnoty časových konstant Tu a Tn.

Doba průtahu: **Tu = 0,04 s**

Doba náběhu: **Tn = 0,86 s**

$$t_u = \frac{\mathrm{Tu}}{\mathrm{Tn}} = 0.0465$$

$t_u < 0.104$ a tudíž obecný přenos bude $G(s) = \dfrac{\mathrm{K}}{(1+\mathrm{T}_1 * s)*(1+T_2 * s)}$

Z tabulek lze určit další parametr**: t = 0.1**

- <u>Výpočet přenosu</u>:

platí rovnice:

$$t = \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1}$$

$$T_2 + T_1 = \frac{\mathrm{T}}{1{,}2564}$$

T je čas ,kdy výstupní veličina dosáhne 72% své maximální hodnoty.

Z grafu: **T = 0.7 s**

Z toho plynou hodnoty konstant: **T_1 = 0,506 s, T_2 = 0.0506 s** .

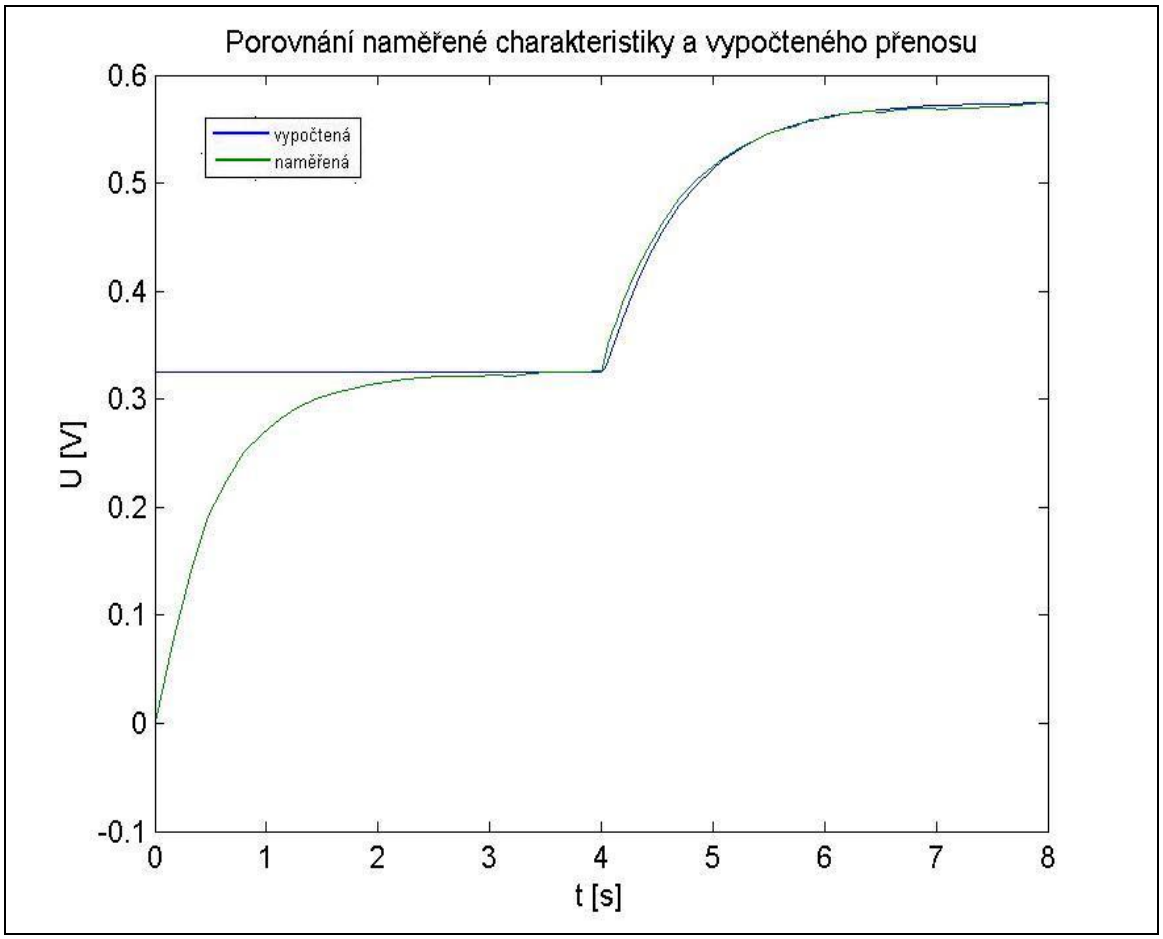
Výsledný přenos jsem zjistil tak, že jsem dosadil hodnoty T_1 a T_2 do obecného vzorce a hodnotu K jsem určil pomocí matlabu (metodou pokus omyl jsem hledal nejvhodnější zesílení) a potom jsem ještě lehce poupravil pomocí matlabu časové konstanty

$$G(s) = \frac{4.7}{(1+0{,}506*s)*(1+0{,}0506*s)} = \frac{185}{\mathrm{s^2} + 21.74\mathrm{s} + 39.1}$$

<u>Výsledný přenos:</u>

$$G(s) = \frac{185}{\mathrm{s^2} + 26.74\mathrm{s} + 37.1}$$

Při simulaci tohoto přenosu, vykazovala přechodová charakteristika podobné rysy jako přechodová charakteristika měřeného systému:



obr. 4 : Porovnání naměřené charakteristiky a vypočteného přenosu

1.4.3. Měření frekvenční charakteristiky:

Ze stejných důvodů jako u přechodové charakteristiky jsem měřil frekvenční charakteristiku v lineární oblasti systému. Tedy v oblasti, kde nejsem omezen saturací ani pásmem necitlivosti. Zvolil jsem tedy:

$u(t) = 0{,}1 \ \sin(wt) + 0{,}2$

Budu postupovat tak, že budu systém budit signálem $u(t) = U_o + U_{\sin}(\omega t + \varphi)$ a po ustálení odečítat amplitudu otáček a fázové posunutí oproti vstupnímu signálu. ($w(t) = w_o + w_{\sin}(\omega t + \varphi_2)$). Z těchto hodnot určím amplitudovou a fázovou část frekvenční charakteristiky.

Amplitudová charakteristika $Am = 20 \log_{10} \frac{w_o}{U_o}$

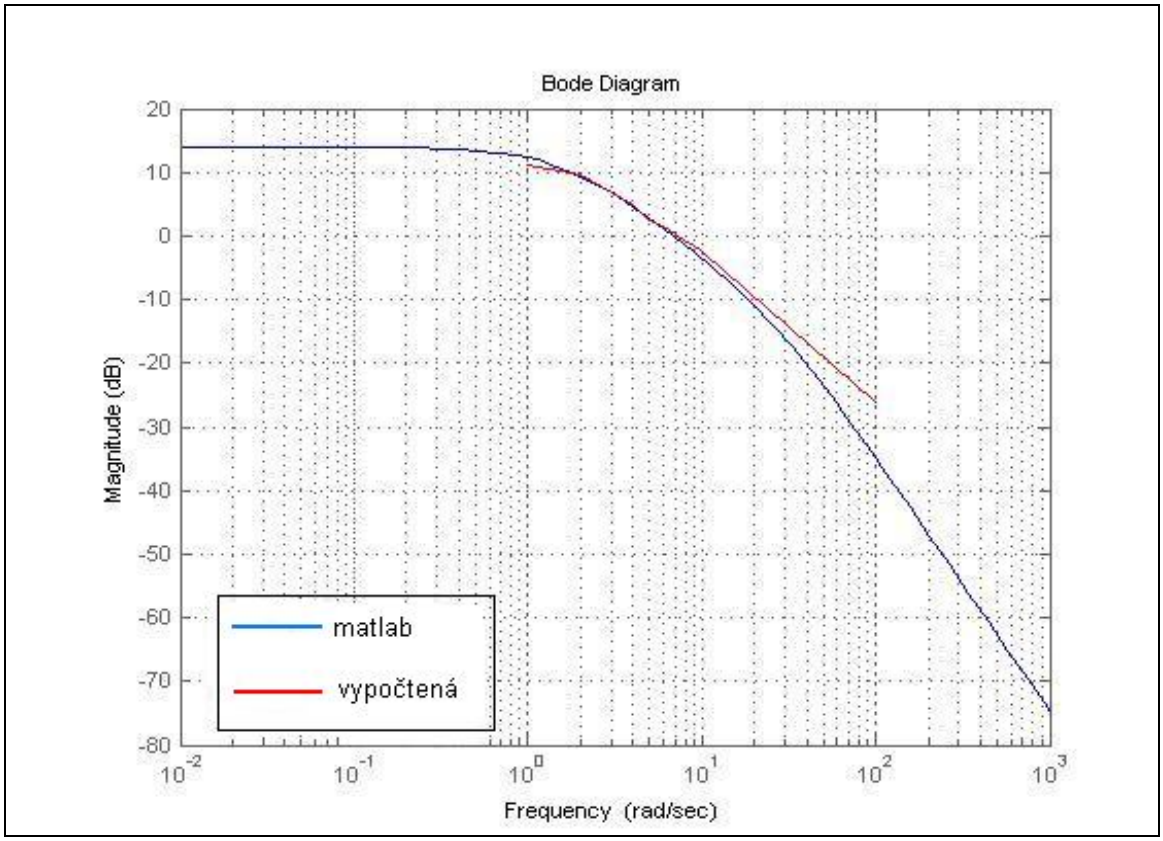
Fázová charakteristika $\varsigma = \frac{180}{\pi}(\varphi_1 - \varphi_2)$

Kvůli obtížnému způsobu odečítání fáze vstupního a výstupního signálu jsem zvolil metodu trojčlenky – zjistil jsem, kolik je perioda T vstupního signálu, jaké je zpoždění výstupu za

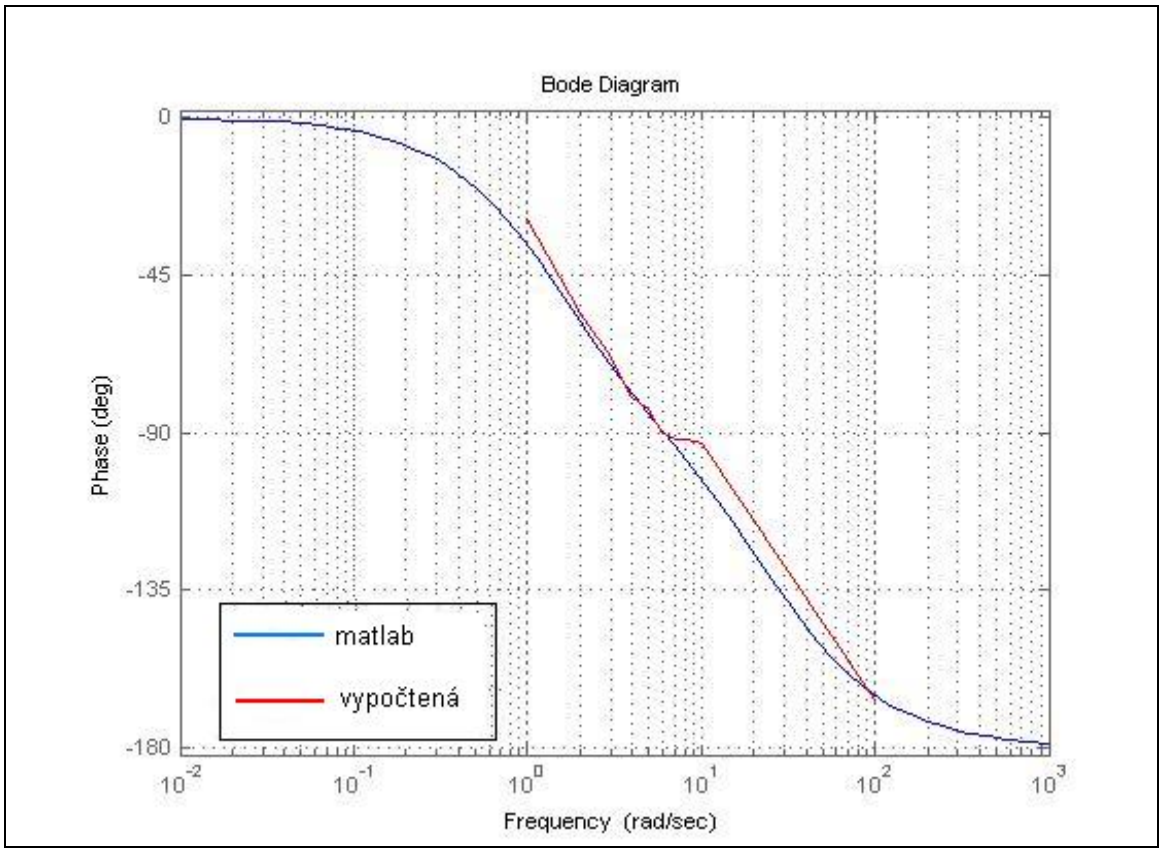
vstupem a potom trojčlenkou – při úvaze, že 2π (tj. 360 stupňů) je celá perioda - jsem zjistil, kolika stupňům odpovídá konkrétní zpoždění. Odečtené údaje jsou uvedeny v následující tabulce.

frekvence [rad/s]	1	2	3	4	5	6
Uvst [V]	2	2	2	2	2	2
Uvyst [V]	7,4	6	4,35	3,5	2,65	2,4
T [s]	6,1	3,2	2,1	1,4	1,25	1
tzp [s]	0,5	0,5	0,4	0,35	0,29	0,25
Am [V]	11,3	9,54	6,75	4,86	2,44	1,58
φ [stupeň]	-29,5	-56,25	-68,57	-89,98	-83,52	-90
frekvence [rad/s]	7	8	9	10	100	
Uvst [V]	2	2	2	2	2	
Uvyst [V]	2,07	1,8	1,65	1,47	0,1	
T [s]	0,9	0,76	0,7	0,63	0,065	
tzp [s]	0,23	0,23	0,18	0,16	0,03	
Am [V]	0,29	-0,92	-1,67	-2,67	-26	
φ [stupeň]	-92	-108,8	-92,57	-91,42	-166,14	

Jak je z tabulky patrné, tak hodnoty fáze pro frekvenci 4 rad/s a 8 rad/s jsou scestné, tzn. že jsem je nezapočítal do grafu.



obr. 5 : Amplitudová charakteristika



obr. 6 : Fázová charakteristika

Jak je patrné z grafů frekvenční charakteristiky, naměřená (a následně vypočtená podle výše uvedených vzorců) frekvenční charakteristika se velmi podobá charakteristice, kterou jsem vykreslil pomocí příkazu bode z mého vypočteného přenosu.

1.5) Závěr:

Mým úkolem bylo provést měření a identifikaci servomechanismu DR-300 AMIRA. Cílem bylo určit přenos odpovídající danému systému.

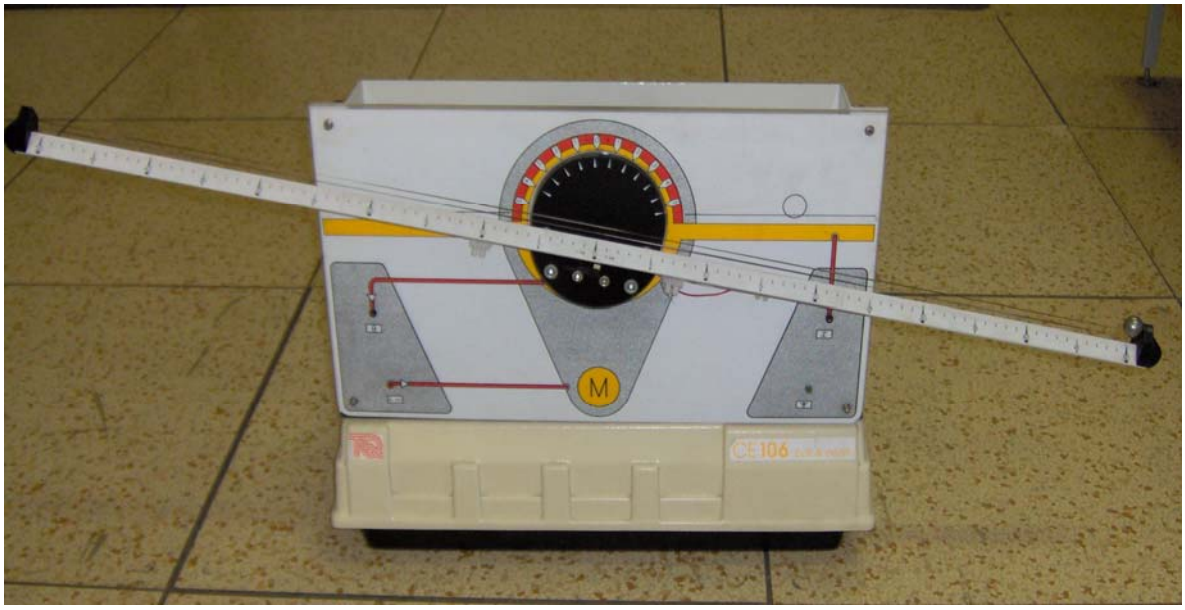
Nejprve jsem změřil statické charakteristiky a určil převodní vztahy. Jako první jsem měřil závislost výstupního proudu motoru na napětí motoru. Jak je patrné z grafu (viz obr. 1), je průběh lineární v rozsahu -0,3 V až +0,3 V vstupního napětí. Poté se uplatní proudová ochrana servomotoru a proud již více neroste. Převodní vztah pro výpočet výstupního proudu motoru v závislosti na vstupním napětí motoru je $y = 0{,}9225x - 0{,}0026$. Další statickou charakteristikou je závislost otáček motoru na vstupním napětí. Její průběh je na obr. 2 a je z něj patrné, že se opět uplatní proudová ochrana pro napětí mimo rozsah -0,3 V až +0,3 V. Dále je patrné mrtvé pásmo (tj. pásmo, kdy se motor vůbec nerozběhne) pro napětí -0,1 až +0,1 V. Také jsem zjistil, že je zde nepatrná hystereze, při snižování napětí

z -0,3 V směrem k 0 V otáčky klesají dříve než při obráceném směru. Tato hystereze je ovšem velmi malá, takže jsem ji zanedbal.

Poté jsem se dostal k samotnému měření přechodové charakteristiky a identifikaci systému. Zvolil jsem pracovní bod 0,2V, z něj skok na 0,25V a z výsledného průběhu přechodové charakteristiky (obr. 3) jsem identifikoval. Výsledný přenos po výpočtech a úpravě v matlabu mi vyšel $G(s) = \frac{185}{\mathrm{s^{\wedge}2} + 26.74\mathrm{s} + 37.1}$, porovnáním s naměřenou charakteristikou (obr. 4) jsem si ověřil jeho správnost.

Dalším úkolem bylo změřit frekvenční charakteristiku. Abych neměřil pro celé pásmo frekvencí, volil jsem nejdůležitější - od 1 rad/s do 100 rad/s. Porovnáním naměřené frekvenční charakteristiky s vypočtenou jsem si podruhé ověřil, že vypočtený přenos je dostatečně přesný.

2. Kulička na tyči (TQ)



2.1) Popis systému:

Laboratorní systém Kulička na tyči K3 je tvořen motorem, nakloněnou rovinou a kuličkou. Stejnosměrný motor s konstantním buzením, řízený napětím, otáčí nakloněnou rovinou. Úhel náklonu je nastavován pomocí tzv. *proporcionálního regulátoru* a měří se pomocí odporového snímače polohy. Motor ve skutečnosti neovládá náklon tyče přímo, ale prostřednictvím vačky. Vačka je speciálně tvarovaná tak, aby byl převod lineární v co největším rozsahu úhlů. Po nakloněné rovině se na dvou odporových drátech pohybuje kulička.

2.2) Matematický popis modelu kuličky na tyči

Model stejnosměrného motoru lze rozdělit na elektrickou a mechanickou část. První převádí napětí na kotvě motoru na elektromotorickou sílu (tzv. *emsu*)

$$u = R\, i_a + L\, di_a / dt + E_{emf}\,,$$
$$U_{emf} = k\, i_a\,,$$

kde u je napětí přiváděné na kotvu motoru, k je tzv. *motorová konstanta*, ia je proud tekoucí kotvou, Ra a La jsou odpor a indukčnost obvodu kotvy a $Uemf$ je napětí indukované *emsou.*

Mechanická část převádí *emsu* na výstupní otáčky a moment

$$E_{emf} = k\omega,$$
$$\tau_m = \eta_m\, k\, i_a$$

kde ω je úhlová rychlost výstupní hřídele motoru, τ_m je moment dodávaný motorem na výstupní hřídel a η_m je účinnost motoru.

Zdroje nelinearit v systémech se stejnosměrnými motory jsou typicky tyto:
Převod elektrické energie na mechanickou vykazuje hysterezi způsobenou remanencí a koercitivitou vinutí motoru. Pro motory malých výkonů (mezi něž se použitý motor bezesporu řadí), je hystereze zanedbatelná. Zmíněnou nelinearitu proto neuvažujeme. Dalším zdrojem nelinearity bývá samotná zátěž motoru, přesněji řečeno průběh závislosti zatěžovacího momentu na otáčkách, případně zrychlení motoru.

Při konstantním řídicím napětí roste natočení použitého motoru po odeznění přechodového děje lineárně s časem. Pro pohodlné ovládání tyče s kuličkou potřebujeme ovšem jednoduchý vztah mezi řídicím napětím a náklonem tyče. Toho lze docílit například pomocí proporcionálního regulátoru, viz schéma modelu

2.3) Schéma modelu :

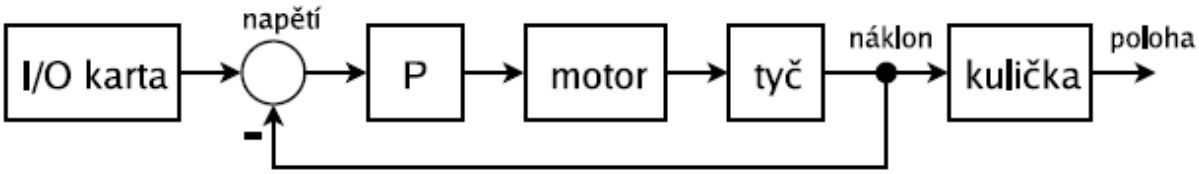


Schéma modelu kulička na tyči TQ

2.4) Vypracování úkolů dle zadání :

1. proveďte základní statická měření $u \to x$ **a** $u \to \varphi$

2. proveďte změření přechodových charakteristik

3. proveďte změření frekvenční charakteristiky

Při měření uvažuji tyto signály:

napětí, kterým se ovládá motor $\boldsymbol{u}$ (vstupní signál)

náklon tyče $\boldsymbol{\varphi}$ (výstupní signál)

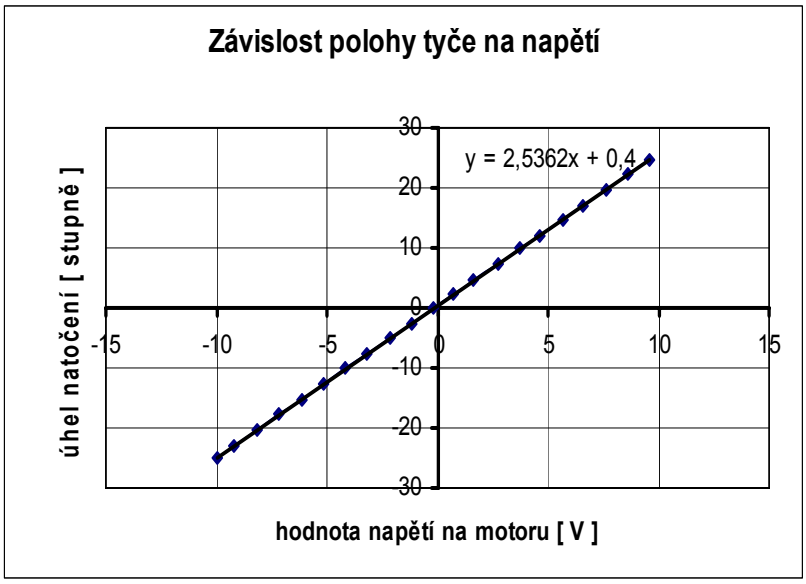
poloha kuličky **x** (výstupní signál)

2.4.1. Měření základních statických měření

Provedl jsem měření statických převodních charakteristik $u \to x$ *a* $u \to \varphi$. Z těchto charakteristik jsem zjistil rovnice pro přepočet polohy tyče a kuličky z napětí.

- **závislost polohy tyče na napětí –** Charakteristiku jsem měřil tak, že jsem v matlabu nastavil hodnotu napětí a odečítal jsem (opět v matlabu) hodnotu napětí, která odpovídá otočení tyče o určitý úhel. Poté jsem si spočetl, kolika stupňům natočení přibližně toto napětí odpovídá - znám polovinu délky tyče = 50 cm a změřil jsem si délku odvěsny pomyslného trojúhelníku, což je výška o kterou mi tyč změnila polohu a pomocí funkce tangens (tj. protilehlá odvěsna ku přilehlé) jsem vypočetl úhel natočení. Tento způsob není nejpřesnější, ale zdá se mi přesnější než měřit tento úhel pomocí úhloměru.

U_{vst} [V]	poloha[stupeň]
-10	-24,962
-9,19	-22,9077
-8,17	-20,3208
-7,15	-17,7338
-6,14	-15,1723
-5,14	-12,6361
-4,15	-10,1252
-3,18	-7,66512
-2,13	-5,00211
-1,15	-2,51663
-0,16	-0,00579
0,72	2,226064
1,64	4,559368
2,78	7,450636
3,74	9,885388
4,63	12,14261
5,65	14,72953
6,6	17,13892
7,61	19,70048
8,63	22,28741
9,6	24,74752



obr.7 : Závislost polohy tyče na napětí

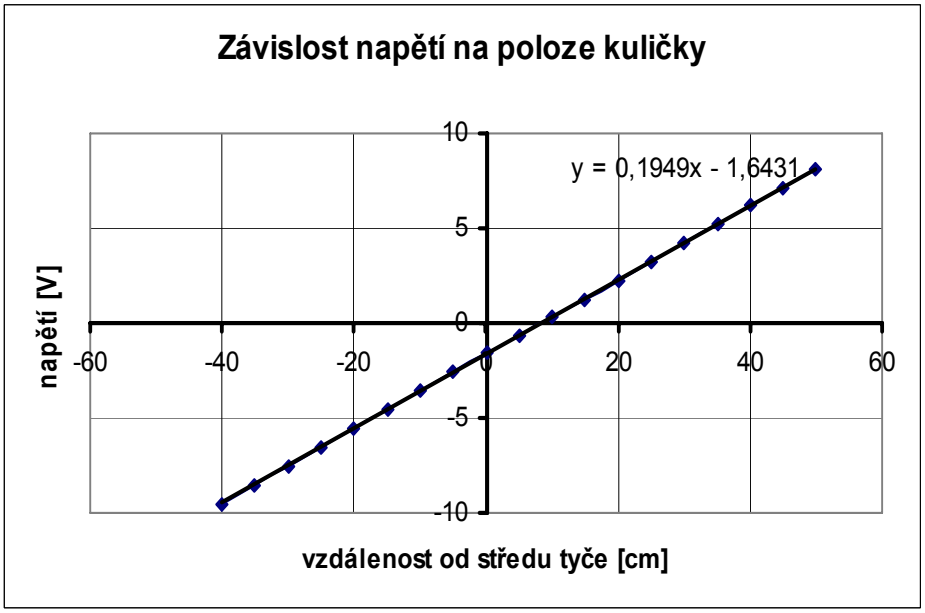
Jak je z obrázku patrné, závislost je takřka lineární. Z této charakteristiky jsem zjistil převodní vztah mezi výstupním napětím a skutečným úhlem natočení tyče:

$$\boxed{y = 2{,}5362x + 0{,}4}$$

- **závislost výstupního napětí na poloze kuličky -** Charakteristiku jsem měřil tak, že jsem manuálně pokládal kuličku do dané polohy a v matlabu odečítal hodnotu naměřeného napětí.

x … poloha kuličky; U … výstupní napětí

x[cm]	U [V]
-40	-9,5
-35	-8,5
-30	-7,5
-25	-6,5
-20	-5,5
-15	-4,5
-10	-3,6
-5	-2,6
0	-1,6
5	-0,65
10	0,35
15	1,2
20	2,2
25	3,2
30	4,2
35	5,2
40	6,2
45	7,1
50	8,1



obr. 8 : Závislost výstupního napětí na poloze kuličky

Tuto charakteristiku stačí proložit lineárním průběhem a dostanu vztah pro přepočet výstupního napětí v závislosti na poloze kuličky:

$$\boxed{y = 0{,}1949x - 1{,}6431}$$

2.4.2. Měření přechodové charakteristiky a identifikace systému

Ve volbě pracovního bodu jsem měl volné ruce díky tomu, že vačka je speciálně tvarovaná tak, aby byl převod lineární v co největším rozsahu úhlů. Maximální úhel natočení tyče je omezen podmínkou, že kulička se po drátech musí valit – nesmí prokluzovat (jinak by měla jiný moment setrvačnosti). To je splněno pro celý měřitelný rozsah. Mohl jsem tedy volit jakékoliv napětí z celého rozsahu (tj. -10 V až +10V)

Jako **pracovní bod** jsem si zvolil hodnotu vstupního napětí 0 V (tj. stav, kdy je soustava v klidu)

Systém lze rozdělit na 2 části, které budu identifikovat každou zvlášť:

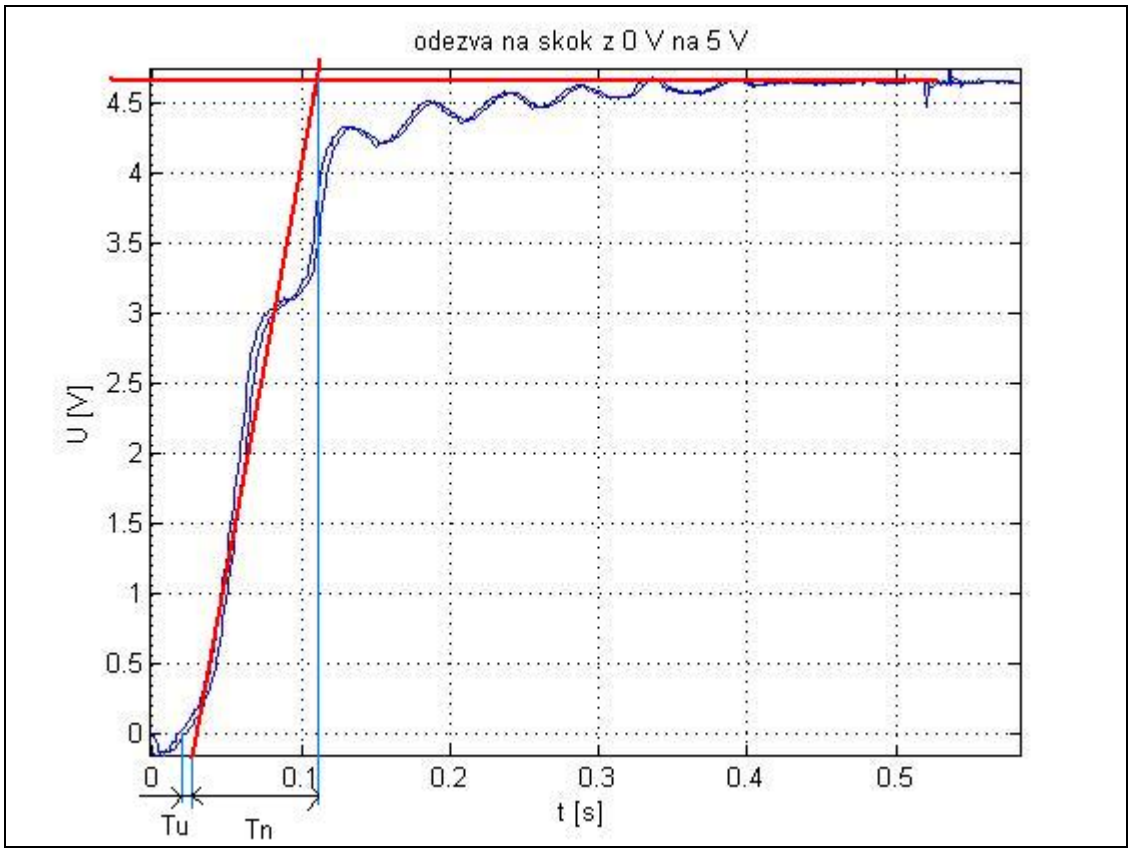
I. část, která odpovídá servomotoru a převodu na náklon tyče
II. mechanická část složená z tyče a kuličky

I. Část odpovídající servomotoru a převodu na náklon tyče :

Měřil jsem tak, že jsem v simulinku na vstup nastavil požadovaný skok (z 0 na 5 V) a pomocí matlabu jsem naměřil přechodovou charakteristiku pro náklon tyče.

Tato část lze popsat dynamickým systémem prvního až druhého řádu:

$$F_1(s) = \frac{k_1}{T_1 \cdot s + 1} \quad resp. \quad F_1(s) = \frac{k_1}{(T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)}$$



obr. 9 : Přechodová charakteristika motoru pro skok z 0 V na 5 V

Na grafu jsou patrné 2 průběhy – první je původní přechodová charakteristika a 2. je filtrovaná přech. char. Filtrovaná je ta zpožděná

Z přechodové charakteristiky je patrné,že se jedná o systém druhého řádu
Z grafu byly odečteny hodnoty časových konstant Tu a Tn.

Doba průtahu: **Tu = 0.01 s**

Doba náběhu: **Tn = 0,08 s**

$$t_u = \frac{\mathrm{Tu}}{\mathrm{Tn}} = 0.125$$

t_u> 0.104 a tudíž obecný přenos bude $G(s) = \dfrac{\mathrm{K}}{(1 + s * \mathrm{T})^n}$

Vyšla hodnota t_u = 0,125, což podle tabulky odpovídá přibližně 2.řádu, tudíž zvolím z tabulek hodnotu n=2 a z toho plyne pořadnice inflexního bodu φ_i = 0,264. Tato hodnota pořadnice je určena pro jednotkový skok, z toho plyne, že ji musím přepočítat. K ní odečtu časovou hodnotu inflexního bodu (z přechodové charakteristiky) t_i = 0,02

Časovou konstantu T určíme ze vztahu :

$$T = \frac{t_i}{n-1} = \frac{0{,}02}{2-1} = 0{,}02s$$

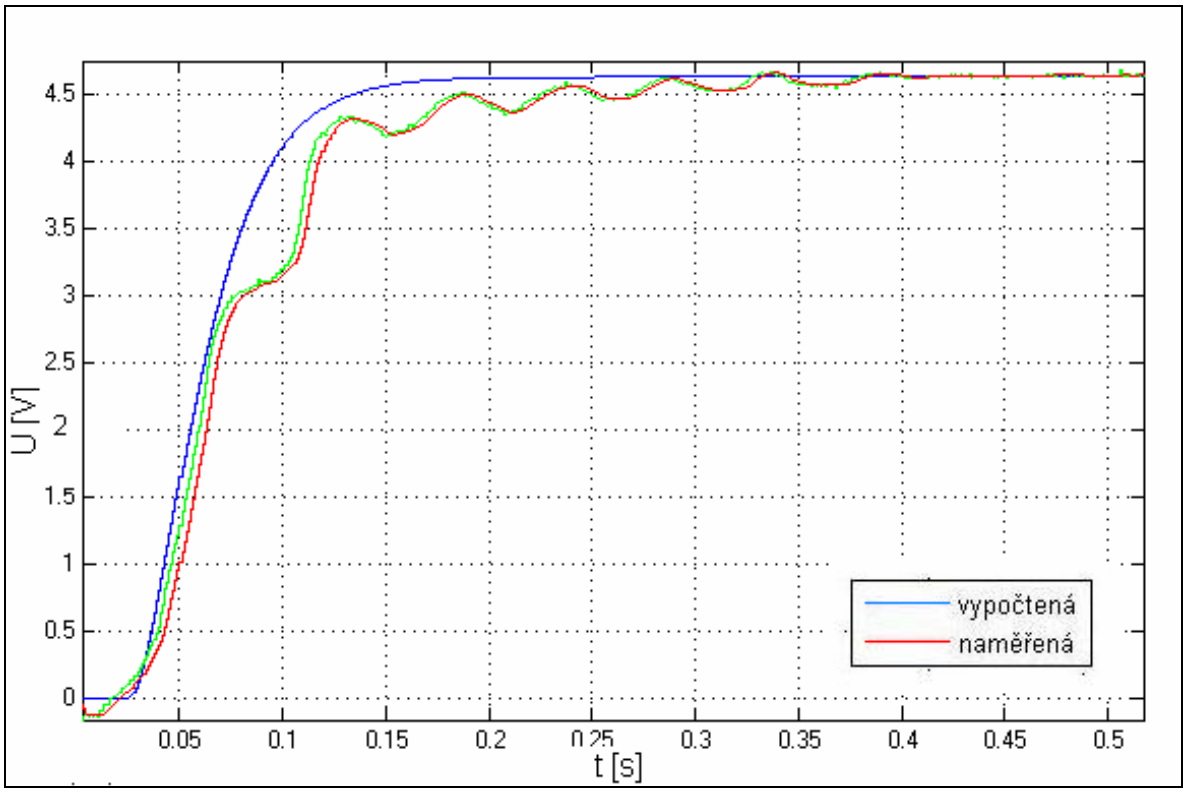
Výsledný přenos jsem zjistil tak, že jsem dosadil hodnot T do obecného vzorce a hodnotu K jsem určil pomocí matlabu (metodou pokus omyl jsem hledal nejvhodnější zesílení) a potom jsem ještě lehce poupravil pomocí matlabu časové konstanty

$$G(s) = \frac{0{,}926}{(1+0{,}02*s)^2} = \frac{2315}{s^2+100\,s+2500}$$

<u>Výsledný přenos servomotoru a převodu na náklon tyče:</u>

$$G(s) = \frac{2315}{s^2+100\,s+2500}$$

Při simulaci tohoto přenosu, vykazovala přechodová charakteristika podobné rysy jako přechodová charakteristika měřeného systému:



Obr. 10 : Porovnání charakteristik servomotoru a převodu na náklon tyče

II. Mechanická část složená z tyče a kuličky

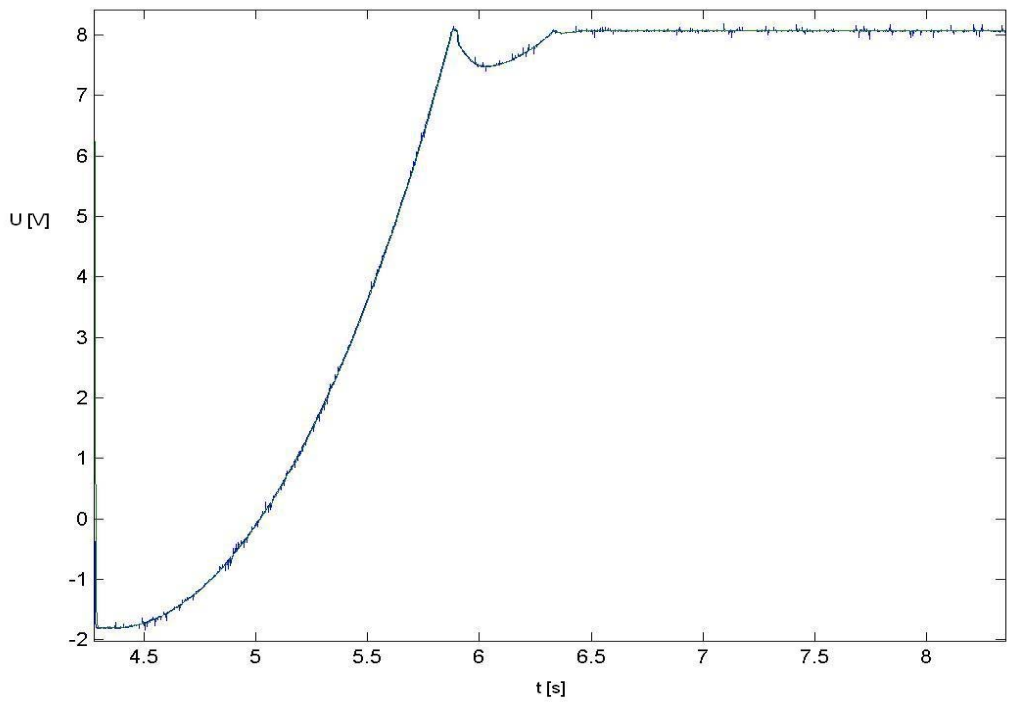
Mechanická část je složena z tyče a kuličky (těleso na nakloněné rovině). Při zanedbání tření lze mechanickou část popsat diferenciální rovnicí resp. přenosem:

$$F_3(s) = \frac{k_3}{s^2}.$$

Tření kuličky na tyči však zcela zanedbat nelze, projeví se především při malých rychlostech kuličky. Popis mechanické části pak je:

$$F_3(s) = \frac{k_3}{s \cdot (T_t \cdot s + 1)}$$

Měření jsem provedl tím způsobem, že jsem naklonil tyč (pomocí matlabu), pustil simulaci a položil doprostřed nakloněné tyče kuličku, která sjela ke kraji tyče. Přechodovou charakteristiku jsem si opět vykreslil v matlabu.



obr. 11 : Přechodová charakteristika mechanické části pro skok z 0 V na 5 V

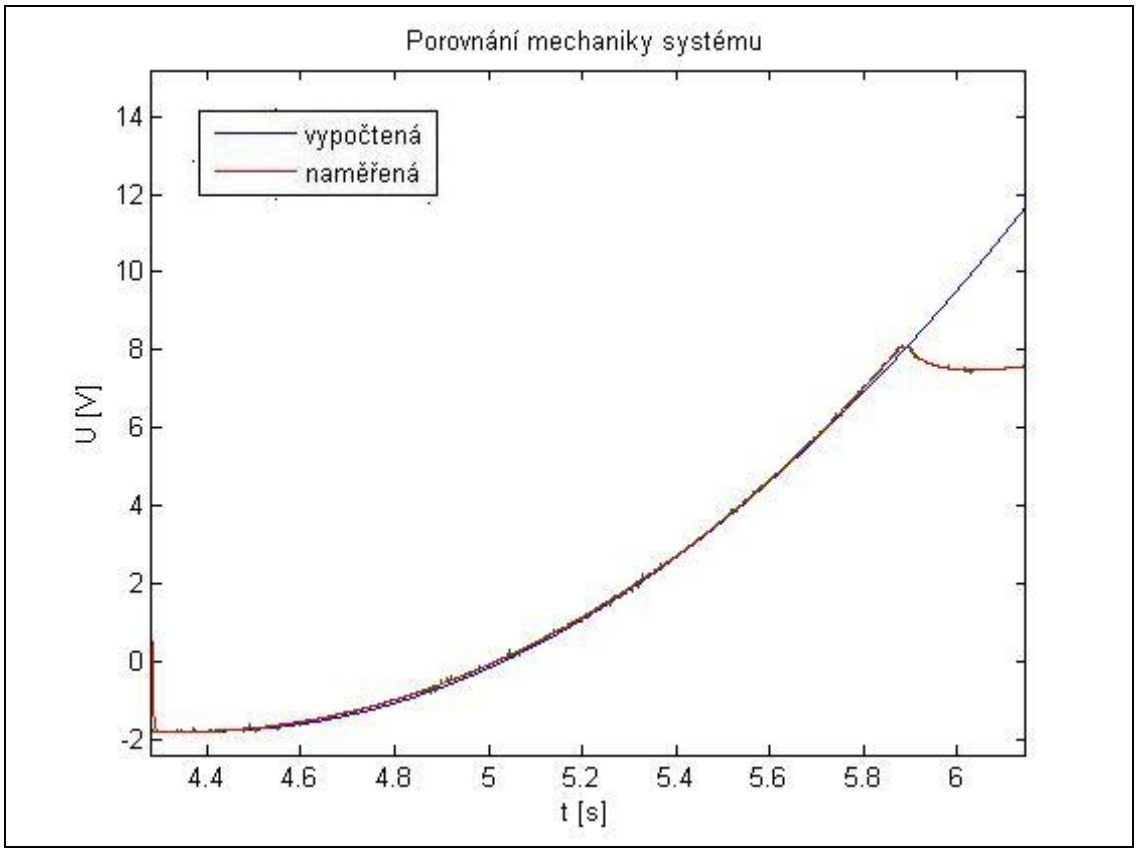
Na grafu je vidět, že uběhlo kolem 4 vteřin mezi spuštěním simulace a položením kuličky na tyč (proto časová osa nezačíná v 0). Dále je patrné, že přechodová charakteristika není naměřena celá - je shora omezená v okamžiku, kdy kulička dorazí ke kraji tyče. Z toho plyne, že nemohu identifikovat standardním způsobem pomocí odečtení časové konstanty přímo z grafu přechodové charakteristiky. Pomocí numerické derivace (odstraní astatismus ze systému) jsem odhadl, že doba ustálení je velká, takže T_1 je také velké a z toho plyne, že

systém má velmi malý pól. Řešil jsem to tedy tak, že jsem pomocí matlabu hledal systém, který má velmi malý pól a podobný průběh naměřenému. Po chvíli jsem zjistil odpovídající přenos:

<u>Výsledný přenos mechanické části:</u>

$$G(s) = \frac{1.8}{s^2 + 0{,}03\,s}$$

Simulací tohoto přenosu, jsem si ověřil podobnost mnou identifikovaného přenosu s naměřenou přechodovou charakteristikou systému:



obr. 12 : Porovnání mechaniky systému

Tímto jsem identifikoval obě části, na které jsem si systém rozdělil a výsledný přenos získám vynásobením těchto dvou částí.

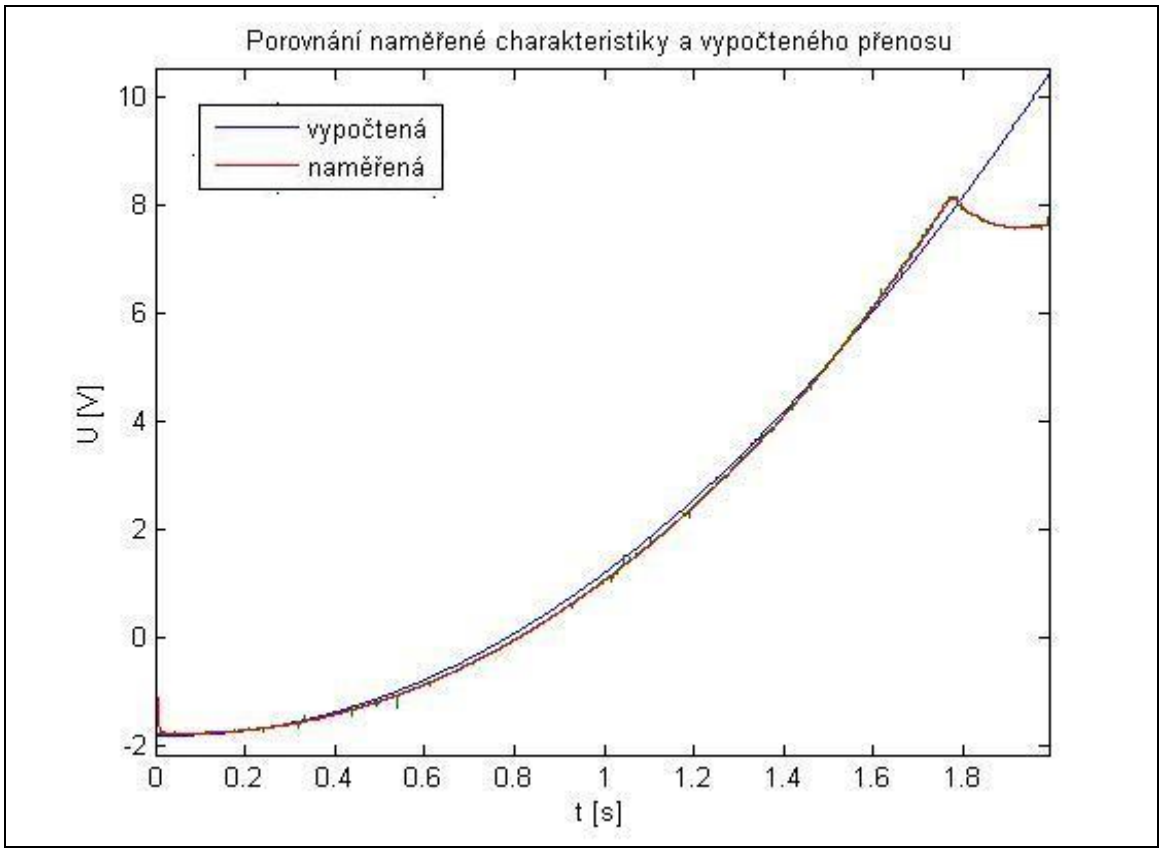
Výpočet konečného přenosu soustavy:

$$G(s) = \frac{1.8}{s^2 + 0{,}03\,s} * \frac{2315}{s^2 + 100\,s + 2500} = \frac{4167}{s^4 + 100\,s^3 + 2503s^2 + 75s}$$

Po lehké úpravě v matlabu jsem získal odpovídající přenos, který má velmi podobný průběh jako naměřená přechodová charakteristika

Výsledný přenos soustavy:

$$G(s) = \frac{3270}{s^4 + 100\,s^3 + 2503s^2 + 75s}$$



Obr. 13 : Porovnání naměřené charakteristiky a vypočteného přenosu

2.4.3. Měření frekvenční charakteristiky:

Měření frekvenční charakteristiky u tohoto modelu je velmi obtížné, proto jsem po dohodě s vedoucím práce toto měření nedělal. Pohyb tyče by při sinusovém vstupu opisoval sinusoidu a problém je v tom, že kulička dorazí ke konci tyče dříve, než tyč změní směr pohybu a zarazí se o konec. Tomu by šlo zamezit buď použitím delší tyče nebo sinusového signálu s větší frekvencí. Delší tyč není vhodné použít, protože kulička by na dlouhé tyči při otočení tyče do protipohybu chvíli setrvala na místě a pak až by se dala do pohybu. Použití sinusového signálu s větší frekvencí je také nevhodné, protože by se tyč otáčela tak rychle, že by se na ní kulička neudržela.

2.5) Závěr :

Opět jsem měl za úkol proměřit a identifikovat daný model, tentokrát model kulička na tyči TQ. Začal jsem změřením statických charakteristik a výpočtem převodních vztahů. Jako první jsem měřil závislost polohy tyče na napětí, jejíž průběh vyšel lineární (viz obr.7) a převodní vztah mezi výstupním napětím a skutečným úhlem natočení tyče je y = 2,5362x + 0,4 . Druhá statická charakteristika je závislost výstupního napětí na poloze kuličky. Tato závislost vyšla také lineární (viz obr.8) a převodní vztah pro přepočet výstupního napětí v závislosti na poloze kuličky je y = 0,1949x -1,6431 .

Poté jsem se dostal k samotné identifikaci modelu z naměřených přechodových charakteristik pro skok z 0V na 5V . Systém jsem si totiž pro upřesnění výsledku rozdělil na 2 části, které jsem identifikoval samostatně. Systém se mi podařilo identifikovat i z celkové přechodové charakteristiky (porovnáním v matlabu jsem si to ověřil), ale zjistil jsem, že přenos neodpovídá vnitřní struktuře systému – to je dané tím, že rozdíl mezi přechodovou charakteristikou astatického systému 3. a 4. řádu se od sebe moc neliší.

První část systému tvoří část odpovídající servomotoru a převodu na náklon tyče. Pro tuto část jsem identifikoval přenos ve tvaru $G(s) = \frac{2315}{s^2 + 100\,s + 2500}$, jehož přechodová charakteristika se shoduje s naměřenou přechodovou charakteristikou této části (viz obr.10). Druhou částí systému je mechanická část složená z tyče a kuličky. Pro ní jsem identifikoval přenos ve tvaru $G(s) = \frac{1.8}{s^2 + 0{,}03\,s}$. Porovnání tohoto přenosu a naměřené přechodové charakteristiky je na obr. 12.

Výsledný přenos celého systému jsem získal vynásobením obou předchozích přenosů. Po vynásobení a malé úpravě zesílení pomocí matlabu jsem získal přenos ve tvaru $G(s) = \frac{3270}{s^4 + 100\,s^3 + 2503s^2 + 75s}$. Porovnáním tohoto přenosu a naměřené přechodové charakteristiky (viz obr. 13) jsem si ověřil, že identifikovaný přenos je velmi přesný.

Frekvenční charakteristika se u tohoto modelu měří jen velmi obtížně, proto po dohodě s vedoucím práce jsem ji neměřil.

3. Magnetický závěs (AMIRA MA400)

3.1) Popis systému :

Model MA400 firmy Amira je rychlý a silně nelineární fyzikální systém. MA400 lze z hlediska konstrukce rozdělit na části:

- elektronika (převodník napětí / proud a výkonový zesilovač)
- elektromagnet
- feromagnetické těleso (kyvadélko), které je zavěšené pod elektromagnetem
- indukční snímač polohy kyvadélka

Vstupem do soustavy je proud hlavní a pomocnou cívkou elektromagnetu. Výstupem je vertikální poloha kyvadélka. Kromě polohy kyvadélka můžeme ještě měřit skutečný proud procházející elektromagnetem (tj. výstup převodníku napětí/proud).
Model je připojen k PC přes I/O kartu a je možné jej řídit z prostředí Matlab+RealTime toolbox.

V systému se vyskytuje mnoho nelinearit. Hlavní nelinearitou je fyzikální vztah mezi vzdáleností a přítažnou sílou elektromagnetu, kdy obecně platí:

$$F = \frac{k * i}{x^2} \tag{1}$$

kde F je přítažná síla, x je vzdálenost kyvadélka od elektromagnetu a i je proud elektromagnetem. Konstanta k je závislá na tvaru elektromagnetického pole elektromagnetu (tj. např. na tvaru styčných ploch elektromagnetu a kyvadélka,...).

Soustavu lze z hlediska dynamického popisu rozdělit na tři základní části:
První část popisuje chování elektroniky a elektromagnetu, kde je vstupem napětí z PC a výstupem je proud elektromagnetem. Tuto část lze popsat systémem prvního řádu:

$$G(s) = \frac{\mathrm{k}}{T_s + 1} \tag{2}$$

Druhou část tvoří magnetická část soustavy, která popisuje převod proudu elektromagnetem na přítažnou sílu - viz vztah (1). Pokud chceme lineární popis soustavy, musíme tento vztah linearizovat ve zvoleném pracovním bodě.
Třetí částí je pak vlastní mechanika magnetického kyvadélka, což je mechanický systém druhého řádu. Vzhledem k faktu, že je kyvadélko udržováno ve vzduchu a to bez kontaktu s ostatními tělesy, je mechanická část bez tlumení (bez tření):

$$G(s) = \frac{k}{s^2} \tag{3}$$

3.2) Matematický popis :

Rovnice popisující chování systému magnetického závěsu lze zapsat ve tvaru:

$$x' = v\,,$$
$$v' = \frac{k * i}{x^2 * m} - g\,, \tag{4}$$

kde x [m] je vzdálenost kyvadélka od elektromagnetu, v [ms^{-1}] je rychlost pohybu kyvadélka, k je konstanta převodu proudu na přítažnou sílu, i [A] je vstupní proud, m [kg] je hmotnost kyvadélka a g [ms^{-2}] je gravitační zrychlení.

První rovnice vyplývá ze středoškolské fyziky, která říká, že derivace polohy je rychlost. Druhá rovnice plyne z úvahy, že derivace rychlosti (tj. zrychlení) je rovna podílu síly, která působí na těleso a jeho hmotností :

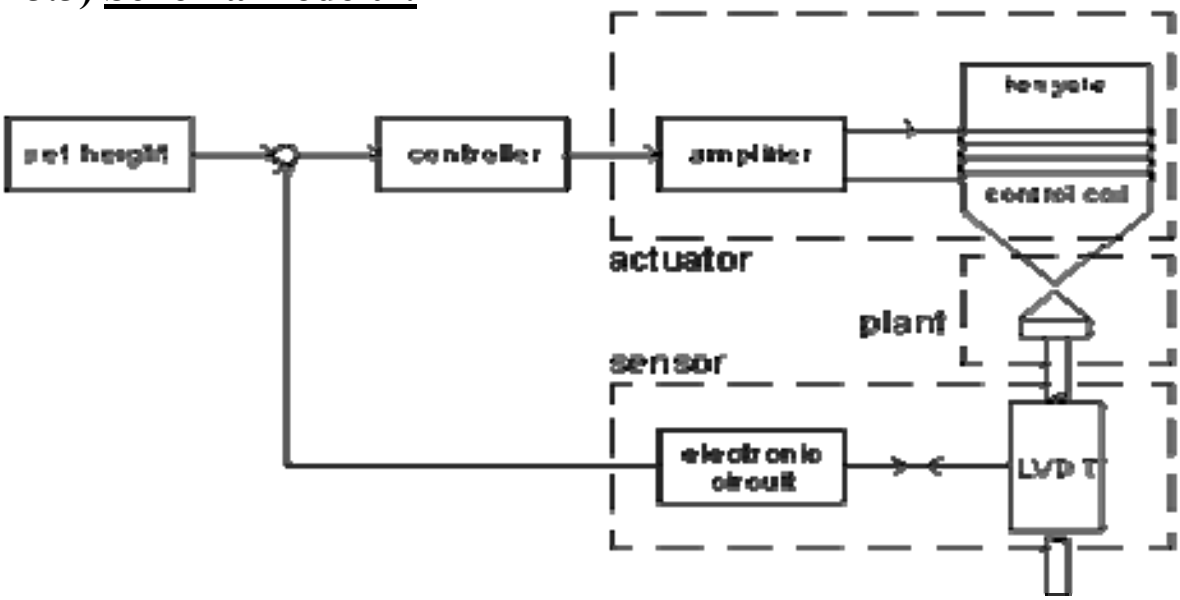
$$v' = \frac{F}{m}\,, \tag{5}$$

kde F [N] je síla působící na těleso a m [kg] je hmotnost tělesa. Dále platí, že síla F je rovna rozdílu přítažné síly tvořené elektromagnetem a gravitační síly, která působí opačným směrem:

$$F_{přřtažná} = \frac{k * i}{x^2} \qquad F_g = m * g \qquad F = F_{přřtažná} - F_g\,, \tag{6}$$

Jednoduchým dosazením (6) do (5) dostaneme rovnici (4).

3.3) Schéma modelu :



set height…. vstupní napětí

controller…. převodník napětí/proud

amplifier…. zesilovač

control coil.. vinutí elektromagnetu

LVDT……. indukčnostní senzor pro měření polohy

3.4) Vypracování úkolů dle zadání :

1. proveďte základní statická měření

2. proveďte změření přechodových charakteristik

3. proveďte změření frekvenční charakteristiky

Při měření uvažuji tyto signály:

proud hlavní a pomocnou cívkou elektromagnetu ***i*** (vstupní signál)

poloha kyvadélka ***x*** (výstupní signál)

skutečný proud procházející elektromagnetem (tj. výstup převodníku napětí/proud) ***i*** (výstupní signál)

3.4.1. Měření základních statických charakteristik

Měření statické charakteristiky $u \rightarrow x$ u tohoto modelu nemá smysl, protože kyvadélko je buďto v poloze úplně dole nebo úplně nahoře a jinou polohu vykazuje pouze v okolí pracovního bodu

3.4.2. Měření přechodové charakteristiky a identifikace systému

Jak jsem psal již v úvodu, lze systém rozdělit na 3 části :

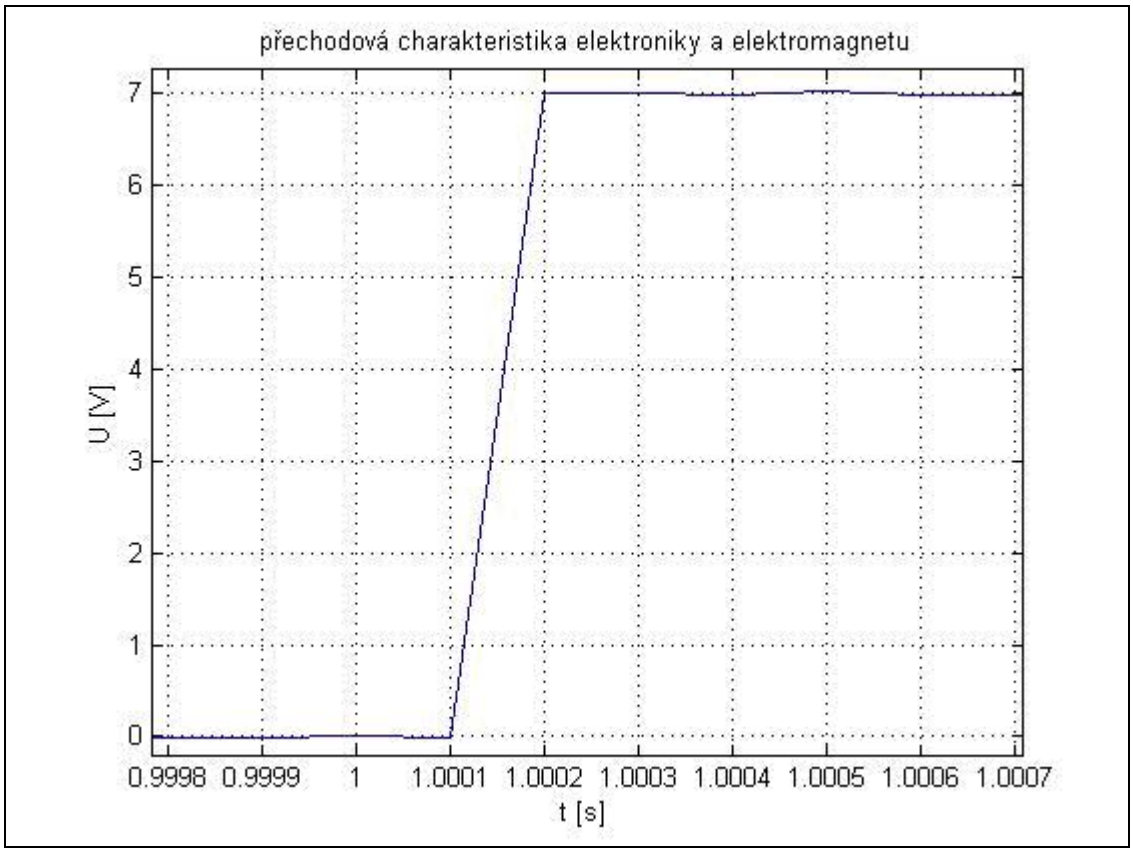
I. část popisující chování elektroniky a elektromagnetu

II. mechanika magnetického kyvadélka

III. magnetická část soustavy (popisuje převod proudu elektromagnetem na přítažnou sílu)

I. Část popisující chování elektroniky a elektromagnetu :

Tuto část jsem měřil tak, že jsem na vstup přivedl skok v čase 1 sekunda z napětí 0V na 7V, které je dostatečně silné k tomu, aby se kyvadélko přitáhlo k magnetu a sledoval průběh.



Obr. 14 : Přechodová charakteristika elektroniky a elektromagnetu

Tuto část lze popsat systémem prvního řádu viz (2). Jak je vidět na obr. 14, je reakce na skok velmi rychlá, takřka okamžitá. Jelikož je reakce rychlejší než perioda vzorkování, mohu tuto část popsat místo systémem 1. řádu pouze konstantou a to takovou, která mi určí vzájemný přepočet mezi vstupním napětím a proudem v elektromagnetu. Jak je opět patrné z obrázku 14 je proud pro vstupní napětí 7V roven 7 strojovým jednotkám. Z toho plyne,že **tuto část lze nahradit konstantou k = 1.**

II. Mechanika kyvadélka

Tato část je vlastně ověření platnosti vzorce pro gravitační zrychlení. Mým úkolem bylo zjistit konstantu *k* ze vtahu (3). Nejprve jsem si změřil jak se chová reálný systém při pádu kyvadélka, tzn. na vstup jsem přivedl napětí, které odpovídá situaci, kdy přítažná síla je nulová a na kyvadélko působí pouze gravitační síla.

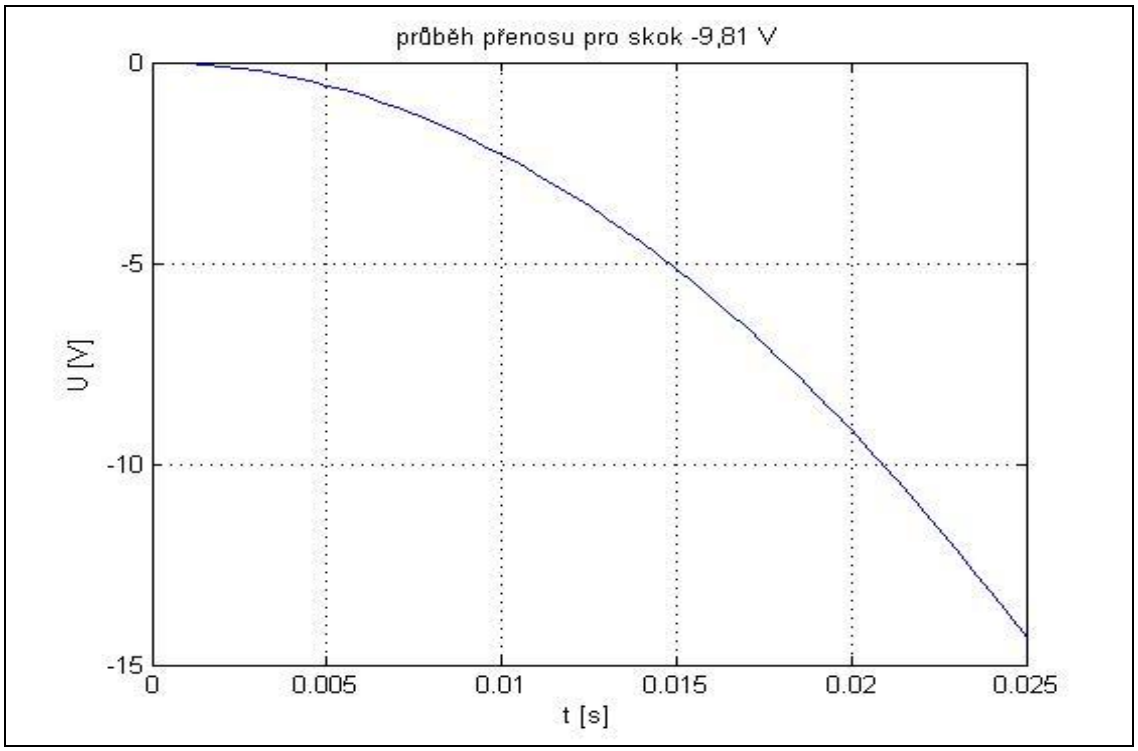
Pro tuto situaci jsem zvolil napětí -9,81 V (analogicky k hodnotě gravitačního zrychlení). Změřil jsem si výšku o kterou kyvadélko spadne,což se rovná celkové dráze, po které se kyvadélko může pohybovat (s = 0,003m) a kolik této hodnotě odpovídá voltů,které ukazuje matlab (tj. rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou napětí v matlabu = 14 V). Z těchto údajů jsem vypočetl teoretickou hodnotu *k:*

$$k = \frac{14}{0{,}003} = 4667 \qquad (7)$$

Dále jsem si spočetl dobu pádu kyvadélka. Použitý vzorec odvodím ze vztahu pro výpočet dráhy volného pádu:

$$s = \frac{1}{2} g t^2 \quad \rightarrow \quad t = \sqrt{\frac{2s}{g}} = \sqrt{\frac{2 * 0{,}003}{9{,}81}} = 0{,}0247 s = \underline{\mathbf{24{,}7\ ms}}$$

Z těchto údajů vyplývá, že kyvadélko při vstupním napětí -9,81 V spadne za 24,7 ms o 3 mm (kterým v matlabu odpovídá už zmíněných 14 V). Hledám tedy hodnotu *k* ze vztahu (3) takovou, aby platilo, že pro vstupní napětí -9,81 V klesne přechodová charakteristika o 14 V za přibližně 25 ms. Nejprve jsem zkusil dosadit do simulinkového schématu spočítanou teoretickou hodnotu *k* = 4667 (7) s tím, že ji v matlabu upravím, aby splnila tuto podmínku.



Obr. 15 : Průběh přenosu mechanické části pro vstupní napětí -9,81 V

Jak je z obrázku 15 patrné přenos $G(s) = \frac{4667}{s^2}$ dobře popisuje mechanickou část systému, protože splňuje podmínku pádu přechodové charakteristiky o 14 V za 25ms. Přesnost přenosu si ověřím ještě dosazením do nelineárního a lineárního schématu v dalším bodě.

Výsledný přenos popisující mechanickou část:

$$G(s) = \frac{4667}{s^2}$$

III. magnetická část soustavy (popisuje převod proudu elektromagnetem na přítažnou sílu)

Jak jsem psal již v úvodu tato část je velmi nelineární, protože velikost přítažné síly je velmi závislá na poloze kyvadélka. Čím blíže je kyvadélko k elektromagnetu, tím větší je přítažná síla a uplatní se více než gravitační síla, což má za následek přitažení kyvadélka k magnetu. Naopak čím dále je kyvadélko od elektromagnetu tím je přítažná síla menší a více se uplatňuje gravitační síla a kyvadélko padá dolů.

Tuto část lze popsat nelineárním schématem a po linearizaci v pracovním bodě je možné získat i lineární popis systému.

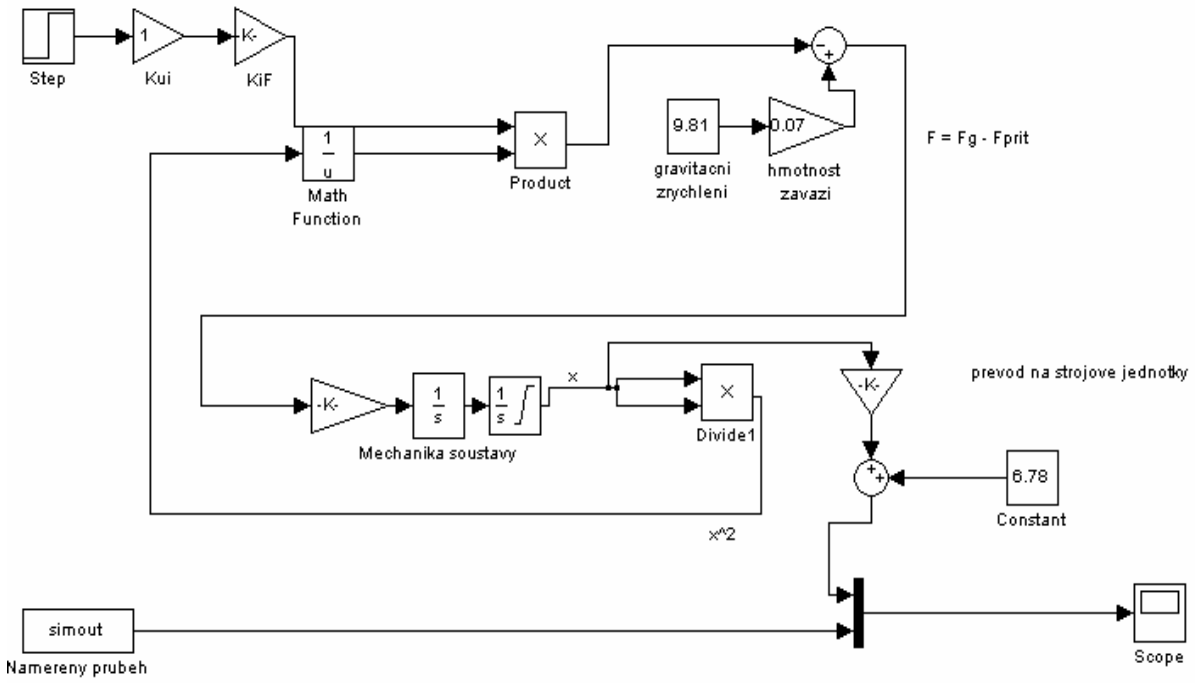
<u>Nelineární schéma:</u>

Abych mohl sestavit nelineární schéma, potřebuji zjistit ještě několik údajů :

Konstanta pro převod strojových jednotek na vzdálenost $k = \frac{14}{0{,}003} = 4667$

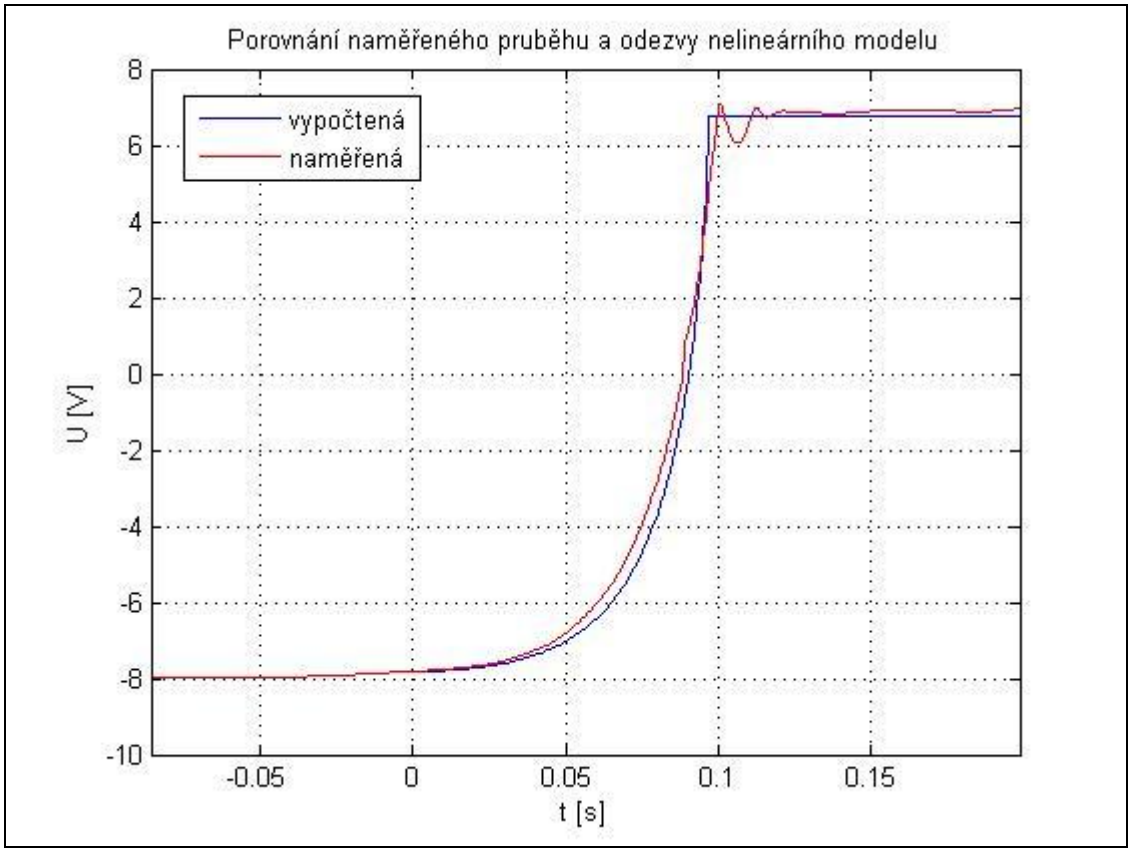
Konstanta pro převod vstupního proudu na přítažnou sílu k_{iF} – tu vypočtu ze vtahu (1) tak, že dosadím hodnoty, které odpovídají rovnovážnému stavu soustavy, tzn. místu, ve kterém se kyvadélko nachází v místě rovnosti gravitační a přítažné síly. Tato konstanta mi vyšla:

$k_{iF} = 1{,}056*10^{-6}$



Obr. 16 : Nelineární schéma popisující soustavu

Pro ověření správnosti přenosu mechaniky systému jsem na vstup pustil skok z 0 V na 5,85 V (tj. vstupní napětí,které odpovídá proudu v rovnovážném stavu) a porovnal s naměřeným průběhem:



Obr. 17 : Porovnání naměřeného průběhu a odezvy nelineárního modelu

Jak je vidět na obr. 17, naměřená charakteristika a odezva nelineárního modelu na skok jsou velmi podobné. To znamená, že přenos mechanické části je dostatečně přesný a lze ho použít

<u>linearizace v pracovním bodě + lineární schéma:</u>

Linearizaci jsem prováděl v bodě, kde se přítažná a gravitační síla sobě rovnají, takže výsledná síla,která působí na kyvadélko je nulová. Tento bod je v polovině dráhy kyvadélka, tj. x = 0,0015 m. Ze vztahu (1) si vypočtu proud, který odpovídá tomuto stavu. Po dosazení do vzorečku jsem získal hodnotu i = 1,46 A. Tuto hodnotu jsem si ověřil tím, že jsem na vstup systému přivedl napětí 5,84 V, které odpovídá proudu 5,84 A. Tuto hodnotu proudu jsem získal logickou úvahou, protože kyvadélko případě ověření není v polovině vzdálenosti, ale úplně dole, takže vzdálenost je 2krát větší a při pohledu na vzorec (1) je jasné, že proud musí být 4krát větší (ve vzorci je x^2). Při puštění se kyvadélko opravdu nepřitáhlo k magnetu, ale „vrtělo“ se přibližně veprostřed vzdálenosti.

Mám tedy pracovní bod [x,i] = [0.0015, 1.46] ve kterém provedu linearizaci: Problém je v tom, že tento bod je nestabilní, tzn. pokud se kyvadélko dostane z pracovního bodu, už nikdy se do něj nevrátí. Jestliže se kyvadélko vychýlí směrem dolů, bude v tu chvíli na něj působit gravitační síla více než přítažná síla a kyvadélko spadne dolů. Naopak, vychýlí-li se kyvadélko směrem nahoru, bude na něj působit více přítažná síla a kyvadélko se přitáhne k magnetu.

Nejprve jsem si 2. stavovou rovnici ze vztahu (4) upravil do tvaru, abych měl rovnici, která mi charakterizuje celkovou sílu působící na kyvadélko. Vynásobil jsem celou rovnici hmotností kyvadélka m a dostal jsem tvar:

$$v'*m = \frac{k*i}{x^2} - g*m\,, \quad \text{kde } v'*m = F, \text{ takže platí:}$$

$$F = \frac{k*i}{x^2} - g*m \tag{8}$$

Tuto rovnici jsem poté linearizovat v pracovním bodě, tzn. provedl jsem Taylorův rozvoj pro tuto rovnici v bodě [x_0, i_0] = [0.0015, 1.46] :

$$F = \frac{\delta F}{\delta x}\Big|_{p_0} *(x - x_0) + \frac{\delta F}{\delta i}\Big|_{p_0} *(i + i_0)$$

(9)

$$\frac{\delta F}{\delta x} = -\frac{2*x*k*i}{x^4} = -\frac{2*k*i}{x^3}$$

$$\frac{\delta F}{\delta i} = \frac{k}{x^2}$$

Po dosazení do rovnice (9) dostaneme tvar:

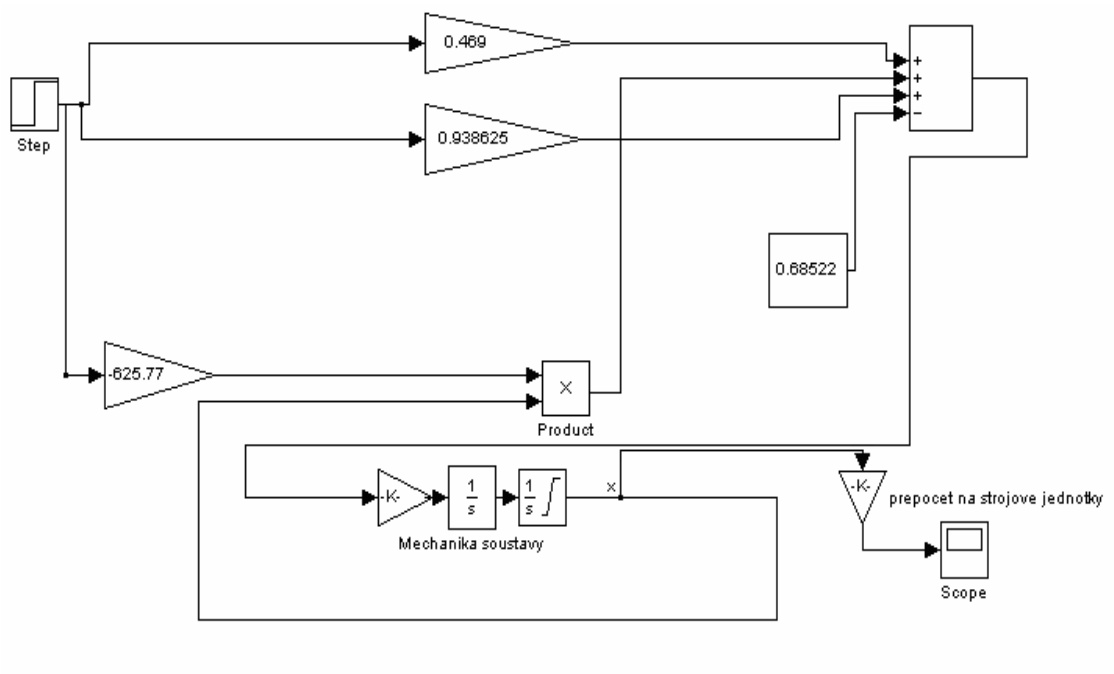
$$F = -\frac{2*k*i}{x^3}*(x - x_0) + \frac{k^2}{x^2}*(i - i_0)$$

A po dosazení hodnot dostaneme:

$$F = -\frac{2*1.056*10^{-6}*i}{x^3}*(x - 0.0015) + \frac{\left(1.056*10^{-6}\right)^2}{x^2}*(i - 1.46)$$

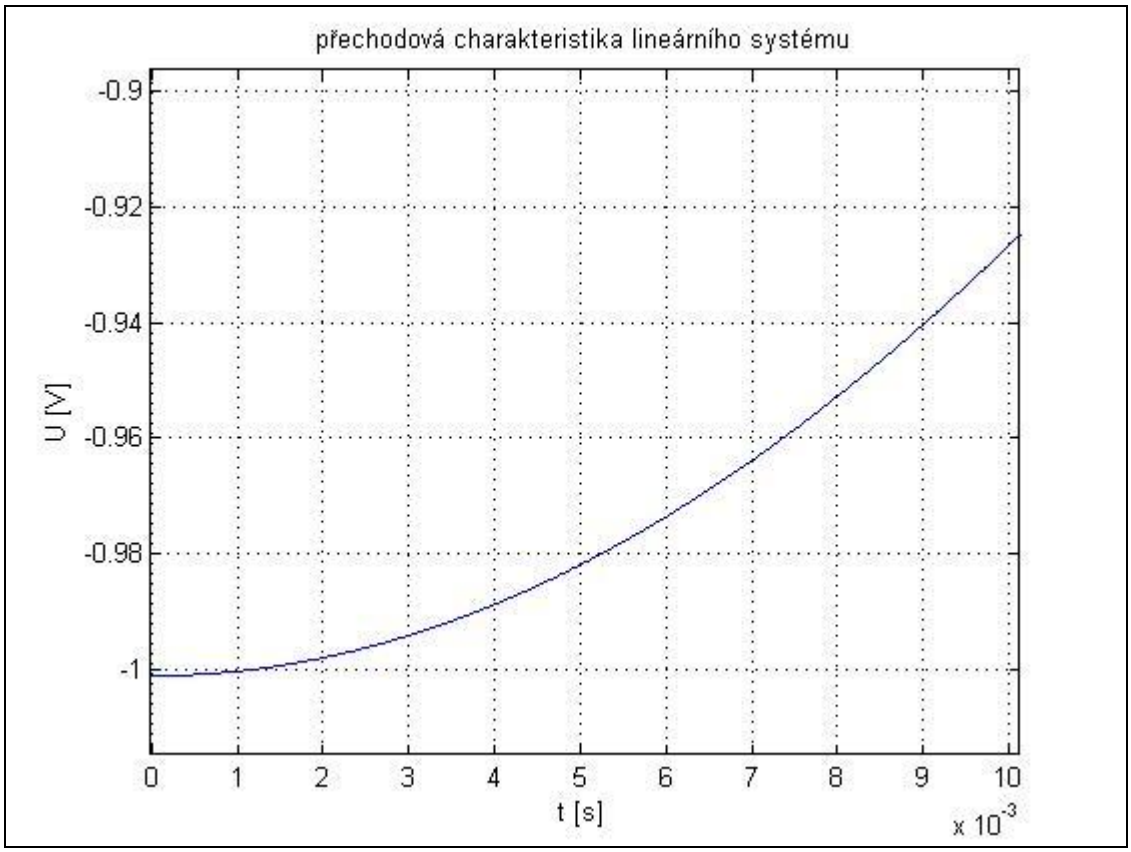
Výsledkem je **<u>linaerizovaná rovnice pro sílu F:</u>**

F = - 625,77*x*i + 0,938625* i + 0,469*i – 0,68522



Obr. 18 : Lineární schéma popisující soustavu v pracovním bodě

Na problém jsem narazil, když jsem chtěl porovnat přenos mnou vytvořeného schématu se skutečným chováním soustavy v pracovním bodě. Abych získal reálný přenos soustavy, musel bych ručně nastavit kyvadélko do pracovního bodu, nastavit na vstup napětí a v momentě kdy spustím simulaci pustit kyvadélko. Toto se mi bohužel v žádném případě nepodařilo dosáhnout, protože pracovní bod je nestabilní,jak už jsem psal, a jakákoliv výchylka jakýmkoliv směrem má za následek vychýlení buď k magnetu nebo na dno mechanizmu. Nemohl jsem tedy porovnat naměřenou a skutečnou charakteristiku soustavy, tak jsem si alespoň ověřil, jestli je moje lineární schéma správné, tzn. jestli po přivedení změny napětí na vstupu o 10% na tuto změnu zareaguje.



Obr. 20 : Přechodová charakteristika lineárního systému

Z grafu je patrné, že lineární schéma reaguje na změnu vstupního napětí, což je dobře. Má cenu zobrazit odezvu pouze pro dobu přibližně 10 ms (pro kterou se kyvadélko vychýlí přibližně o 17 μm), potom už začne působit vliv jedné z dvojice působících sil více a kyvadélko se vychýlí ke kraji. V mém případě jsem napětí zvyšoval, proto se kyvadélko vychýlí směrem nahoru a po určité velmi krátké době (max. 10 ms) se dostane mimo linearitu a o trochu později vyletí směrem vzhůru k magnetu.

Oblast, kde je zlinearizovaný systém lineární je tak malá (tj. časový úsek, kdy kyvadélko setrvá v lineární oblasti je velmi krátký), že se nedá přesně popsat rozumným přenosem, proto jsem tento krok vynechal.

3.4.3. Měření frekvenční charakteristiky:

Měření frekvenční charakteristiky je u tohoto modelu nemožné, z důvodu nestabilního pracovního bodu. Mám-li nestabilní pracovní bod, je můj linearizovaný systém také nestabilní, z čehož plyne, že odezva na sinusovku nemá konečnou odezvu.

3.5) Závěr :

Mým úkolem bylo proměřit a identifikovat model magnetického závěsu AMIRA MA400.

Jako v předchozích úlohách jsem nejprve měl změřit statické charakteristiky, ale u tohoto modelu statické charakteristiky měřit nelze, protože závislost polohy na napětí je taková,že kyvadélko j buď dole, nebo se pohybuje přibližně veprostřed své dráhy nebo úplně nahoře u magnetu. Tento krok jsem tedy vynechal a přistoupil rovnou k měření přechodové charakteristiky a identifikaci.

Identifikace tohoto modelu je velmi obtížná, protože systém je velmi rychlý a velmi nelineární. Rozdělil jsem si ho proto na 3 části, které jsem se snažil identifikovat postupně. Nejprve to byla část popisující chování elektroniky a elektromagnetu, která reagovala na změnu napětí na vstupu tak rychle, že jsem ji mohl nahradit konstantou. Druhá část je mechanika kyvadélka. Přenos této části mi vyšel $G(s) = \frac{4667}{s^2}$ a jeho přesnost jsem si ověřil sestavením nelineárního schématu, který jsem si vytvořil na základě třetí části popisující převod proudu elektromagnetem na přítažnou sílu. Průběhy nelineárního simulinkového schématu a naměřené přechodové charakteristice soustavy (oboje pro vstupní napětí 7V,tj. napětí zaručující přitažení kyvadélka k magnetu) jsou velmi podobné. Z toho plyne,že můj přenos mechaniky je dostatečně přesný.

Dalším krokem bylo zjistit přenos linearizované části pro převod proudu elektromagnetem na přítažnou sílu. Zlinearizoval jsem tedy stavové rovnice, sestavil simulinkové schéma a snažil se porovnat s naměřenou přechodovou charakteristikou. Zde se ovšem vyskytl problém. Abych mohl porovnat, musel bych manuálně nastavit kyvadélko do pracovního bodu a zároveň pustit simulaci i kyvadélko. To bylo nemožné provést, protože systém má nestabilní pracovní bod, ze kterého když se kyvadélko o trochu vychýlí na jakoukoliv stranu, už se nikdy nevrátí zpět. Linearizovaná oblast je tedy velmi malá. Z tohoto důvodu nelze tuto část popsat rozumným přenosem.

Posledním bodem bylo měření frekvenčních charakteristik, které u tohoto modelu také nelze provést.

Zhodnocení práce

S menšími i většími problémy se mi povedlo splnit cíl práce, čímž bylo ukázat metody identifikace na několika modelech. Shrnutí práce na jednotlivých modelech je v závěrech části, která se týká toho určitého modelu, tudíž to zde už nebudu opakovat. Využil jsem metodu identifikace z přechodové charakteristiky, ukázal jsem metodu linearizace nelineárního systému, měření statické charakteristiky, měření frekvenční charakteristiky, předvedl jsem návrh simulinkového schématu z nelineárního stavového popisu i z linearizovaného popisu, atd. V první části jsem většinu těchto metod popsal teoreticky, následně předvedl prakticky. Nakonec jsem vytvořil plakáty a návody pro budoucí studenty, kterým tímto doufám umožním snadnější pochopení použitých modelů.

Použitá literatura

[1] *Učebnice SARI,* URL: http://dce.felk.cvut.cz/sari

[2] HORÁČEK, P. *Systémy a modely*, 2. přeprac. vyd. PRAHA : ČVUT, 1999

[3] ŠTECHA, J. – HAVLENA, V. *Teorie dynamických systémů* ediční středisko PRAHA : ČVUT, 2005

[4] *Internetová encyklopedie*, URL: http://en.wikipedia.org

[5] *Dokumentace k modelům AMIRA,* URL: http://www.amira.de/index_engl.html

[6] *Online převod dokumentu do pdf* , URL: http://www.pdfonline.com/convert_pdf.asp

[7] *Návod na identifikaci z přechodové charakteristiky* , URL : http://dce.felk.cvut.cz/sari/download/other/prechod_skripta.pdf

Použitý software

Matlab 7.0

Microsoft Word 2003

Microsoft Excel 2003

Microsoft PowerPoint 2003

Windows malování

Obsah přiloženého CD

Soubor *BP_husap1.pdf* - bakalářská práce ve formátu pdf

Adresář PLAKATY - plakáty pro všechny 3 modely

Soubor *S4_plakat* - plakát k modelu SERVOMOTOR (S4)

Soubor *K3_plakat* - plakát k modelu KULIČKA NA TYČI (K3)

Soubor *M_plakat* - plakát k modelu MAGNETICKÝ ZÁVĚS (M)

Adresář NAVODY - Návody pro všechny 3 modely

Soubor *S4_navod* - návod k modelu SERVOMOTOR (S4)

Soubor *K3_navod* - návod k modelu KULIČKA NA TYČI (K3)

Soubor *M_navod* - návod k modelu MAGNETICKÝ ZÁVĚS (M)

Adresář SCHEMATA - Simulinková schémata na ovládání modelů

Soubor s*4_ok* - simul. schéma k modelu SERVOMOTOR (S4)

Soubor *k3_ok* - simul. schéma k modelu KULIČKA NA TYČI (K3)

Soubor *magnet_ok* - simul. schéma k modelu MAGNETICKÝ ZÁVĚS (M)