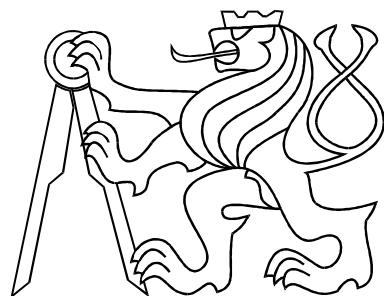


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Identifikace a řízení laboratorního modelu
Spojené pohony**

Praha, 2009

Autor: Losos Radek

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 9.6.2009

Losoš Radíč
podpis

Poděkování

Děkuji především vedoucímu bakalářské práce Jirku Roubalovi za jeho velkou ochotu a trpělivost, dále chci poděkovat rodině a přátelům za podporu.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je identifikace a návrh řízení pro laboratorní model Spojené pohony umístěného v laboratoři K26, katedry řídicí techniky Českého vysokého učení technického v Praze, který slouží pro podporu praktické výuky studentům katedry řídicí techniky. Cílem identifikace systému je, nalézt co nejpřesnější model systému, a pokusit se navrhout vhodný jednoduchý regulátor.

Abstract

The goal of this bachelor work is to identificate and design control of laboratory model called Coupled Drives placed in the K26 laboratory, Department of Control Engineering, Czech Technical University. The goal of the identification is to find the most accurate model of real system and try to design simple control.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Radek Losos**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Identifikace a řízení laboratorního modelu Spojených pohonů**

Pokyny pro vypracování:

1. Sestavte matematicko fyzikální model odpovídající laboratornímu modelu spojených pohonů.
2. Připravte simulinkový komunikační soubor k ovládání laboratorního modelu včetně masky a návodů.
3. Vytvořte popis laboratorního modelu na internetové stránky laboratoře ve stylu těchto stránek.
4. Navrhněte identifikační experimenty, proveděte identifikaci teoretického modelu a ověřte jeho správnost.
5. Navrhněte základní řízení modelu.

Seznam odborné literatury:

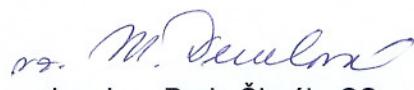
Dorf, R. C. and Bishop, R. H. Modern Control Systems, 11. vydání, Prentice Hall, 2007, ISBN-10: 0132270285, ISBN-13: 978-0132270281.
Petr Horáček, Systémy a modely, Praha 2000
Web SARI, <http://dce.felk.cvut.cz/sari/>
Jan John, Systémy a řízení, Praha 1999
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/vr/>

Vedoucí: Ing. Jiří Roubal, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2008/09



prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 27. 2. 2009

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
1 Úvod	1
2 Popis systému Spojené pohony	3
2.1 Popis laboratorního modelu	3
2.2 Matematický model laboratorního modelu	4
2.2.1 Matematicko-fyzikální popis stejnosměrného motoru	4
2.2.2 Matematicko-fyzikální popis mechanické části modelu	5
2.2.3 Stavový popis systému	7
3 Identifikace systému	9
3.1 Identifikace převodních konstant	9
3.1.1 Konstanta převodu úhlové rychlosti motorů	9
3.1.2 Převodní konstanta úhlu výchýlení na polohu vychýlení vodiče .	10
3.2 Identifikace motorů	11
3.2.1 Statické převodní charakteristiky motorů	11
3.2.2 Identifikace přenosu motorů	12
3.3 Identifikace mechanické části	15
4 Návrh regulátorů systému	19
4.1 Zpětnovazební řízení	19
4.2 Regulátory pro úhlovou rychlosť	20
4.3 Návrh regulátoru výchylky ramene	22
5 Závěr	29

Literatura **31**

A Obsah přiloženého CD **I**

Seznam obrázků

1.1	Laboratorní model Spojené pohony	2
2.1	Schématický nákres systému spojených pohonů	3
2.2	Fyzikální veličiny v systému	6
3.1	Statická převodní charakteristika motoru MOT1	11
3.2	Statická převodní charakteristika motoru MOT2	11
3.3	Příklad průběhů vstupního napětí a úhlové rychlosti	13
3.4	Změřená frekvenční charakteristika motoru MOT1	13
3.5	Změřená frekvenční charakteristika motoru MOT2	14
3.6	Odezva otáček motoru MOT1	15
3.7	Odezva otáček motoru MOT2	15
3.8	Reakce pružiny na vychýlení	16
3.9	Vstupní signál pro meření odezvy zavěšeného ramene	17
3.10	Srovnání odezv výchylky ramene modelu a reálného systému	17
4.1	Schéma zpětnovazebního zapojení regulátoru a soustavy	19
4.2	Schéma zpětnovazebního zapojení regulátoru Lag a soustavy	20
4.3	Akční zásah vstupující do soustavy	21
4.4	Odezva systému	21
4.5	Geometrické místo kořenů regulační smyčky	23
4.6	Geometrické místo kořenů regulační smyčky přenosu $G(s)$ a $C(s)$	24
4.7	Schéma zpětnovazebního zapojení regulátoru PID a soustavy	24
4.8	Vstupní skok poruchy motoru MOT1	25
4.9	Akční zásah do systému	25
4.10	Odezva výchylky regulovaného systému při konstantní referenci	26
4.11	Akční zásah do systému	26
4.12	Odezva výchylky regulovaného systému při skoku reference	27

Seznam tabulek

3.1	Převodní konstanty úhlové rychlosti u jednotlivých motorů	10
3.2	Konstanty mechanické části	16

Kapitola 1

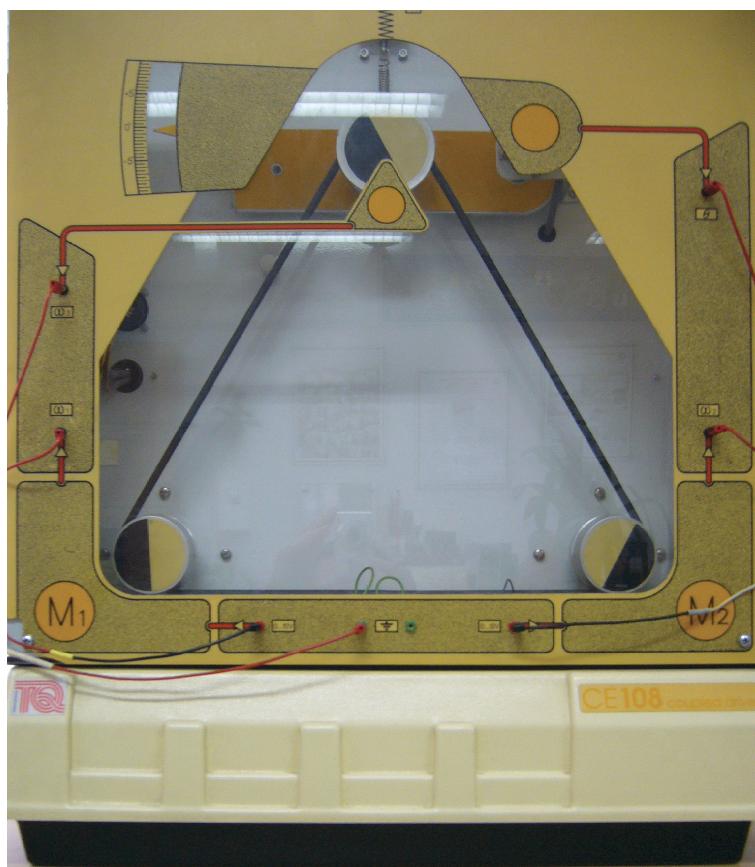
Úvod

Cílem této bakalářské práce je identifikace systému pro získání co nejpřesnějšího modelu reálného systému Spojených pohonů znázorněného na obrázku 1.1 umístěného v Laboratoři teorie automatického řízení K26 (ROUBAL, J., 2009) katedry řídicí techniky Českého vysokého učení technického v Praze. Dále pro tento systém navrhnut regulaci pomocí základních typů regulátorů (FRANKLIN, G.F. et al., 2006).

Pro získání přesného modelu reálného systému Spojených pohonů je nejdříve potřeba nalézt matematicko-fyzikální popis systému Spojených pohonů. Dynamický popis bude získán pomocí diferenciálních rovnic klasické mechaniky a dynamiky tuhého tělesa (KUBEŠ, P. and KYNCL, Z., 1996). Dynamické chování motorů, které pohánějí soustavu, bude popsáno diferenciálními rovnicemi popisující chování stejnosměrného motoru (VOŽENÍLEK, P. and JANOUŠEK, J., 2008). Z těchto diferenciálních rovnic, které popisují dynamické chování motorů a mechanické části, lze poté získat stavový popis modelu, ze kterého lze následně získat i požadované přenosy systému.

Identifikace fyzikálních a převodních konstant systému Spojené pohony bude vycházet především z experimentálního měření jednotlivých veličin. Regulace úhlové rychlosti motoru a výchylky zavěšeného ramene bude navržena klasickými metodami návrhu regulátorů jako je například návrh regulátorů pomocí geometrického místa kořenů, nebo pomocí frekvenčních charakteristik (NISE, G.F. et al., 2003).

Struktura této práce je následující. V kapitole 2 bude uveden popis elektrických a mechanických částí laboratorního modelu Spojené pohony. Dále bude také v této kapitole odvozen stavový popis a přenosy systému. V kapitole 3 budou identifikovány konstanty systému, konkrétní přenosy motorů a systému jako celku i s porovnáním přechodových odezv jak reálného systému, tak modelu. V kapitole 4 se bude nacházet návrh regulátorů a srovnání jejich odezv na modelu a na reálného systému.



Obrázek 1.1: Laboratorní model Spojené pohony

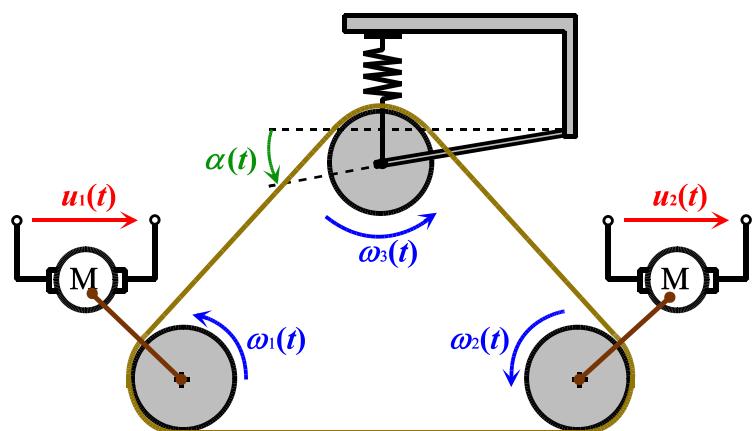
Kapitola 2

Popis systému Spojené pohony

V této kapitole se nachází matematicko-fyzikální popis k jednotlivým částem laboratorního modelu Spojené pohony. Takož jendotlivě popsané části budou spojeny ve stavovém popisu modelu, a tím bude získán celkový popis laboratorního modelu Spojené pohony.

2.1 Popis laboratorního modelu

Laboratorní model Spojené pohony zobrazený na obrázku 2.1 se skládá ze dvou stejnosměrných motorů MOT1 a MOT2 s cizím konstantním buzením, který vytvářejí základní hnací moment a představují tak akční členy.



Obrázek 2.1: Schématický nákres systému spojených pohonů

Na hřídelích motoru jsou kola K1, K2. S motory lze točit v obouch směrech. Dále je zde volně zavěšené samostatné kolo K3, které je umístěno na vodiči. Tento vodič je pak dále zavěšen na pružině. Přes hnací kola K1, K2 na hřídelích motorů a kola K3 zavěšeného na vodiči je natažen homogení gumový pás, který imituje pružnost materiálu jako je tomu u průmyslových aplikací.

Otáčky jednotlivých kol K1 a K2 umístěných na hřídelích motorů a otáčky kola K3 umístěného na zavěšeném vodiči se snímají tachogenerátory. Úhel vychýlení vodiče $\alpha [^\circ]$ zavěšeného na pružině se snímá přesným potencimetrem a vychýlení nabývá hodnot $\pm 5^\circ$. Laboratorní systém Spojené pohony obsahuje 2 vstupy. Napětí vstupující do levého motoru MOT1 $u_1[V]$ a napětí vstupující do pravého motoru MOT2 $u_2[V]$. Dále pak systém obsahuje 4 výstupy. Úhlovou rychlosť otáčení $\omega_3 [\text{rad s}^{-1}]$ kola K3 umístěného na zavěšeném vodiči, úhlovou rychlosť otáčení pravého motoru MOT2 $\omega_2 [\text{rad s}^{-1}]$, úhlovou rychlosť otáčení levého motoru MOT1 $\omega_1 [\text{rad s}^{-1}]$ a úhel vychýlení zavěšeného vodiče $\alpha [^\circ]$.

2.2 Matematický model laboratorního modelu

2.2.1 Matematicko-fyzikální popis stejnosměrného motoru

Systém spojených pohonů lze popsat diferenciálními rovnicemi klasické mechaniky (KUBEŠ, P. and KYNCL, Z., 1996), a pro motory platí rovnice platné pro stejnosměrný motor s cizím buzením (VOŽENÍLEK, P. and JANOUŠEK, J., 2008).

Stejnosměrný motor s cizím konstantním buzením se skládá ze statoru, který tvoří póly permanentního magnetu, který vytváří konstantní magnetické pole. Dále je zde rotor, který je uložen v ložiscích a přes komutátor je na cívky rotoru přiváděno napětí. Otáčení rotoru vytváří moment síly. Elektrický obvod kotvy (rotoru) lze popsat diferenciální rovnicí

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + k_e \omega(t), \quad (2.1)$$

kde u [V] je vstupní elektrické napětí motoru, L [H] je indukčnost vinutí kotvy, R [Ω] je odpor vinutí kotvy, i [A] je elektrický proud procházející obvodem kotvy, k_e [$s V^{-1}$] je elektrická konstanta motoru a ω [rad s^{-1}] je úhlová rychlosť otáčení rotoru. Rovnici (2.1)

můžeme upravit do výhodnějšího tvaru

$$L \frac{di(t)}{dt} = -Ri(t) - k_e \omega(t) + u(t). \quad (2.2)$$

Mechanicky je stejnosměrný motor popsán pomocí momentové rovnice

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = k_m i(t) - b_m \omega(t) - M_z(t), \quad (2.3)$$

kde J [kg m²] je moment setrvačnosti kola na hřídeli motoru, ω [rad s⁻¹] je úhlová rychlosť otáčení rotoru, k_m [kg m² s⁻² A⁻¹] je mechanická konstanta motoru, i [A] je elektrický proud procházející obvodem rotoru a M_z [Nm] je zátěžový moment motoru.

Rovnice (2.2) a (2.3) budou postačovat pro fyzikální popis elektrické a mechanické části popisu stejnosměrného motoru. Z tohoto stavového popisu získáme přenos ze vstupního napětí na úhlovou rychlosť

$$G_{MOT}(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{\frac{k_m}{JL}}{s^2 + \left(\frac{R}{L} + \frac{b_m}{J}\right)s + \frac{Rb_m + k_e k_m}{JL}}. \quad (2.4)$$

kde $U(s)$ je obraz vstupního napětí v a Laplaceově transformaci, $\Omega(s)$ je obraz úhlové rychlosti v Laplaceově transformaci. Z přenosu (2.4) je zřejmé, že se jedná o stabilní systém 2.řádu, bez nul (NISE, G.F. et al., 2003).

2.2.2 Matematicko-fyzikální popis mechanické části modelu

Matematicko-fyzikální popis mechanické části laboratorního modelu Spojené pohony je tvořen pohybovými diferenciálními rovnicemi 2. řádu podle klasické mechaniky (KUBEŠ, P. and KYNCL, Z., 1996).

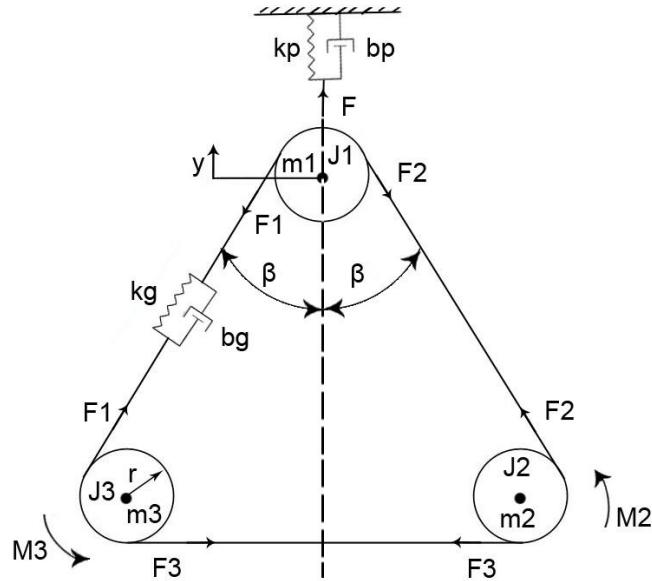
V gumovém pásu působí síla, která je vyvolána natažením pasu vlivem rozdílných rychlostí, podle vztahu

$$F_{13}(t) = F_{23}(t) = k_g \Delta l(t), \quad (2.5)$$

kde k_g [N m⁻¹] je pružnost gumového pásu, a Δl [m] je prodloužení gumového pásu při natažení z klidové polohy. Rychlosť natažení závisí na rozdílu rychlostí motorů a posunu zavěšeného ramene s kolem K3 podle vztahu

$$\Delta \dot{l}(t) = r_k \omega_1(t) - r_k \omega_2(t) + 2 \cos \beta \dot{y}(t) - k_l \Delta l(t), \quad (2.6)$$

kde ω_1 [rads⁻¹] je úhlová rychlosť otáčení motoru MOT1, ω_2 [rad s⁻¹] je úhlová rychlosť otáčení motoru MOT2, r_k [m] je poloměr hnacích kol, k_l [s⁻¹] je konstanta úměrná



Obrázek 2.2: Fyzikální veličiny v systému

prokluzu, a y [m] je výchylka ramene. Rychlosť natažení gumeny medzi motory MOT1 a MOT2 (spodná časť pásu) je dána vzťahom

$$\dot{\Delta l}_{12}(t) = r_k \omega_2(t) - r_k \omega_1(t) - k_{l_{12}} \Delta l_{12}(t), \quad (2.7)$$

kde $k_{l_{12}}$ [s^{-1}] je konštantá úmerná prokluzu.

Základný vzťah pre popis chovania pružiny je dán

$$m_z \ddot{y}(t) = F_p(t) - k_p y(t) - b_p \dot{y}(t), \quad (2.8)$$

kde m_z [kg] je hmotnosť zavŕšeného ramene s kolem K3, a sila F_p [N] je dána ako súčet sil $F_{13} = F_{23}$ [N], ktoré lze vyjádriť pomocou vzťahu (2.5) a je tedy rovna

$$F_p(t) = 2k_g k_B \Delta l(t), \quad (2.9)$$

kde $k_B = \cos \beta$ [-] je konštantá, protože mērením bylo zjištene, že sa úhel β [rad] témene nemiení. Vzťah (2.8) lze upraviť na výhodnejší tvar, ktorý bude vhodnejší ke stavovému popisu

$$\ddot{y}(t) = -\frac{b_p}{m_z} \dot{y}(t) - \frac{k_p}{m_z} y(t) + \frac{2k_B k_g}{m_z} \Delta l(t). \quad (2.10)$$

Zátěžový moment, který se nachází ve vztahu pro motor (2.3) je pro motor MOT1 dán vztahem

$$M_{z_1}(t) = r_k F_{12}(t) - r_k F_{13}(t) \quad (2.11)$$

a pro motor MOT2

$$M_{z_2}(t) = r_k F_{23}(t) - r_k F_{12}(t), \quad (2.12)$$

kde F_{12} [N] je síla působící vlivem nestejných úhlových rychlostí motorů MOT1 a MOT2, a je dána vztahem

$$F_{12}(t) = k_g \Delta l_{12}(t). \quad (2.13)$$

Tyto zjednodušené rovnice poskytují dostatečný popis pro sestavení stavového popisu systému.

2.2.3 Stavový popis systému

Pro sestavení stavového popisu (ROUBAL, J. et al., 2009) ve tvaru

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}x(t) + \mathbf{D}u(t), \end{aligned} \quad (2.14)$$

kde matice \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} jsou stavové matice, x je vektor stavových proměnných, u je vektor vstupních proměnných a y je vektor výstupních proměnných, jsou využity rovnice (2.6), (2.10) a (2.7). Stavy od motorů lze získat složitěji, protože nelze změřit všechny konstanty ve vztazích (2.1) a (2.3). Bude identifikován pouze přenos ze vstupního napětí na úhlovou rychlosť motoru. Přenos (2.4) bude po identifikaci znám ve tvaru

$$G(s)_{MOT} = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{k_0}{s^2 + as + a_0}. \quad (2.15)$$

Z přenosu (2.15) lze zpětnou Laplaceovou transformací získat diferenciální rovnice, ze kterých lze získat zbývající stavy. Diferenciální rovnici, vzniklou zpětnou Laplaceovou transformací pro motor MOT1, je

$$\ddot{\omega}_1(t) = -a_1 \dot{\omega}_1(t) - a_{10} \omega_1(t) + k_{10} u_1(t) \quad (2.16)$$

a pro motor MOT2

$$\ddot{\omega}_2(t) = -a_2 \dot{\omega}_2(t) - a_{20} \omega_2(t) + k_{20} u_2(t). \quad (2.17)$$

Z rovnic (2.6), (2.7), (2.10), (2.16) a (2.17) lze získat úplný stavový popis systému Spojené pohony.

Stavové proměnné celého modelu byly zvoleny

$$x(t) = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_1(t) & \omega_1(t) & \dot{\omega}_2(t) & \omega_2(t) & \Delta l_{12}(t) & \Delta l(t) & y(t) & \dot{y}(t) \end{bmatrix}^T. \quad (2.18)$$

Vektor vstupních proměných byl zvolen

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) & u_2(t) \end{bmatrix}^T \quad (2.19)$$

a vektor výstupních proměných byl zvolen

$$y(t) = \begin{bmatrix} \omega_1(t) & \omega_2(t) & y(t) \end{bmatrix}^T \quad (2.20)$$

Stavové matice **A**, **B**, **C** a **D** ze vztahu (2.14) jsou

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -k_g & k_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_2 & -a_{20} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & k_g & -k_g & 0 & 0 \\ 0 & -r_k & 0 & r_k & -k_{l_{12}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_k & 0 & r_k & 0 & -k_l & 0 & 2k_B \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2k_g k_B}{m_z} & -\frac{k_p}{m_z} & -\frac{b_p}{m_z} \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{20} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (2.22)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Tímto byl získán celkový stavový popis labrotarního modelu Spojené pohony. V následující kapitole bude provedena jeho identifikace.

Kapitola 3

Identifikace systému

V této kapitole se nachází přehled o tom, jak byly získány konkrétní hodnoty převodních konstant a konstant systému. Nejdříve jsou měřené veličiny převedeny do fyzikálních jednotek a poté jsou na základě identifikačních experimentů určeny neznámé konstanty matematického modelu odvozeného v předcházející kapitole. Na konci kapitoly se nachází srovnání odezv systému Spojené pohony a jeho modelu.

3.1 Identifikace převodních konstant

Protože měřící karta (HUMUSOFT, 2007), přes kterou jsou přiváděna data ze snímačů do programu Matlab (THE MATHWORKS, 2008), neměří skutečné hodnoty veličin, ale bezrozměrné hodnoty obvykle v intervalu $\langle -1; 1 \rangle$, je třeba tyto hodnoty převést tak, aby model odpovídal fyzikální realitě. Proto je třeba nalézt potřebné konstanty převodu mezi hodnotami z měřící karty a fyzikálními jednotkami.

3.1.1 Konstanta převodu úhlové rychlosti motorů

Konstantu převodu mezi úhlovou rychlostí v Matlab bezrozměrných jednotkách a skutečnou úhlovou rychlostí $k_{y\omega}$ lze snadno získat experimentálně pomocí hodnoty otáček. Platí že,

$$\omega = k_{y\omega} \omega_{MAT}, \quad (3.1)$$

kde ω [rad s⁻¹] je úhlová rychlosť otáčení kola, $k_{y\omega}$ [rad s⁻¹] je převodní konstanta a ω_{MAT} [-] je úhlová rychlosť otáčení kola změřená v bezrozměrných Matlab jednotkách. Získané převodní konstanty pro jednotlivá kola K1, K2 a K3 jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 3.1: Převodní konstanty úhlové rychlosti u jednotlivých motorů

kolo	značení	konstanta převodu [rad s ⁻¹]
K1	$k_{y_1\omega}$	343,52
K2	$k_{y_2\omega}$	322,239
K3	$k_{y_3\omega}$	314,16

3.1.2 Převodní konstanta úhlu výchýlení na polohu výchýlení vodiče

Konstantu převodu mezi výchylkou $\alpha[^{\circ}]$ a hodnotou odpovídající výchylce získané z měřící karty v Simulinku $\alpha[-]$ získáme podobným způsobem jako v předešlé kapitole

$$\alpha = k_{y\alpha} \alpha_{MAT}, \quad (3.2)$$

kde $\alpha[^{\circ}]$ je skutečný úhel výchýlení vodiče, $\alpha_{MAT}[^{\circ}]$ je hodnota výchýlení z měřící karty a $k_{y\alpha} = 5,2826^{\circ}$ je experimentálně získaná konstanta převodu. Pomocí vztahu (3.2) získáme údaj o výchylce ve stupních. Informaci o poloze výchylky získáme pomocí jednoduchého vztahu

$$y(t) = l \sin \alpha(t), \quad (3.3)$$

kde $l[\text{m}]$ je vzdálenost středu kola K3 a bodu, kde je vodič ukotven.

Vzhledem k tomu, že úhel α je pouze v rozmezí $\pm 5^{\circ}$ lze po převedení úhlu na radiány použít pouze vztah

$$y(t) = \alpha(t). \quad (3.4)$$

Využitím vztahů (3.2), (3.3) a (3.4) dostaneme celkovou konstantu převodu mezi výchýlením získaného z měřící karty a polohou výchylky

$$y(t) = k_{y\alpha} \alpha_{MAT}, \quad (3.5)$$

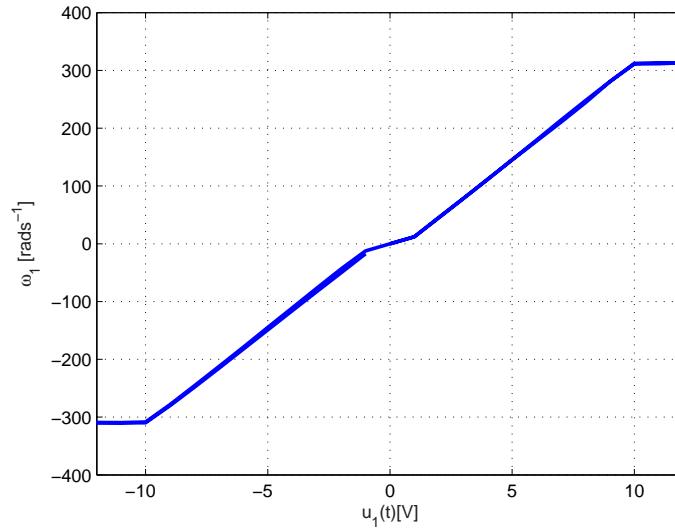
kde $y[\text{m}]$ je výchylka zavěšeného ramene, $k_y = 0,00922 [\text{m}]$ je konstanta převodu a $\alpha_{MAT}[-]$ je bezrozměrná hodnota odpovídající úhlu výchýlení v programu Matlab.

3.2 Identifikace motorů

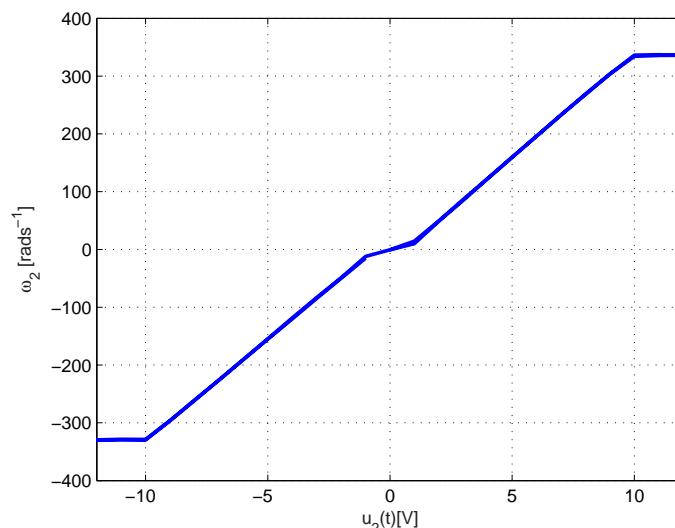
V této kapitole bude provedeno nejdříve měření statické převodní charakteristiky motorů, poté bude identifikováno jejich dynamické chování.

3.2.1 Statické převodní charakteristiky motorů

Statická charakteristika ze vstupního napětí na výstupní úhlovou rychlosť motoru velmi dobře poslouží k určení nelinearit typu necitlivost v počátku a saturace úhlové rychlosti.



Obrázek 3.1: Statická převodní charakteristika motoru MOT1



Obrázek 3.2: Statická převodní charakteristika motoru MOT2

Z charakteristiky na obr. 3.1 byly zjistěny hodnoty nelinearit typu necitlivost $\pm 1,5$ V a saturace ± 10 V. U motoru MOT2 je statická charakteristika zobrazena na obr. 3.2. U motoru MOT2 byla ze statické charakteristiky zjištěna hodnota necitlivosti $\pm 1,5$ V a hodnota saturace ± 10 V.

3.2.2 Identifikace přenosu motorů

Pro identifikaci motorů byla vybrána metoda identifikace z frekvenčních charakteristik (ROUBAL, J. et al., 2009). Z frekvenčních charakteristik budou zkonstruovány přenosy ze vstupních napětí na úhlové rychlosti motorů, respektive konstanty v rovnicích (2.16) a (2.17).

Při měření budíme motory sinusovým vstupním signálem

$$u(t) = u_0 + A_U \sin(\omega_s t), \quad (3.6)$$

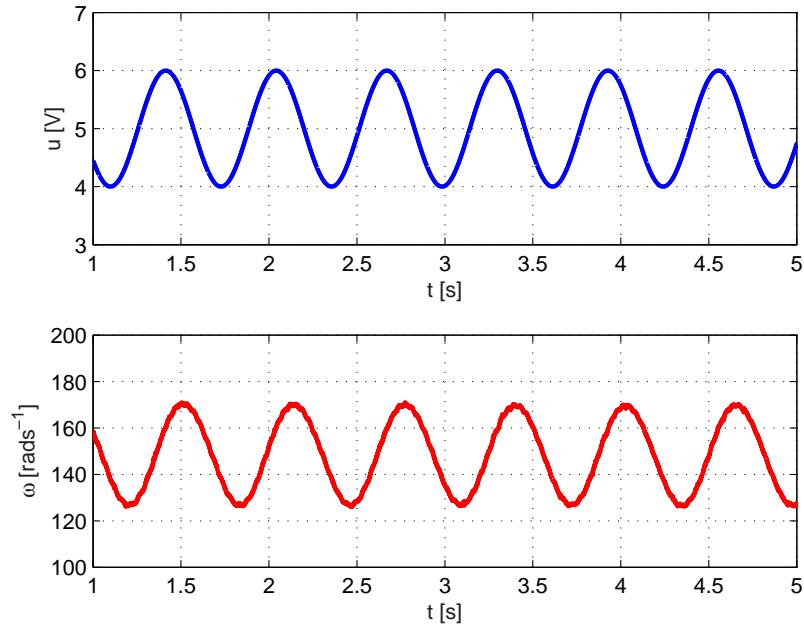
kde u_0 [V] je stejnosměrná složka (z důvodu nelineární statických převodních char. v okolí počátku, viz obr. 3.1 a 3.2), A_U [V] je amplituda a ω_s [rad s⁻¹] je úhlová frekvence průběhu vstupního napětí. Amplitudová frekvenční charakteristika byla získána tak, že byly odečteny amplituda vstupního napětí a amplituda výstupních otáček a byla získána hodnota přenosu podle vztahu

$$|G_{MOT}(j\omega)| = 20 \log \frac{A_\omega}{A_U}, \quad (3.7)$$

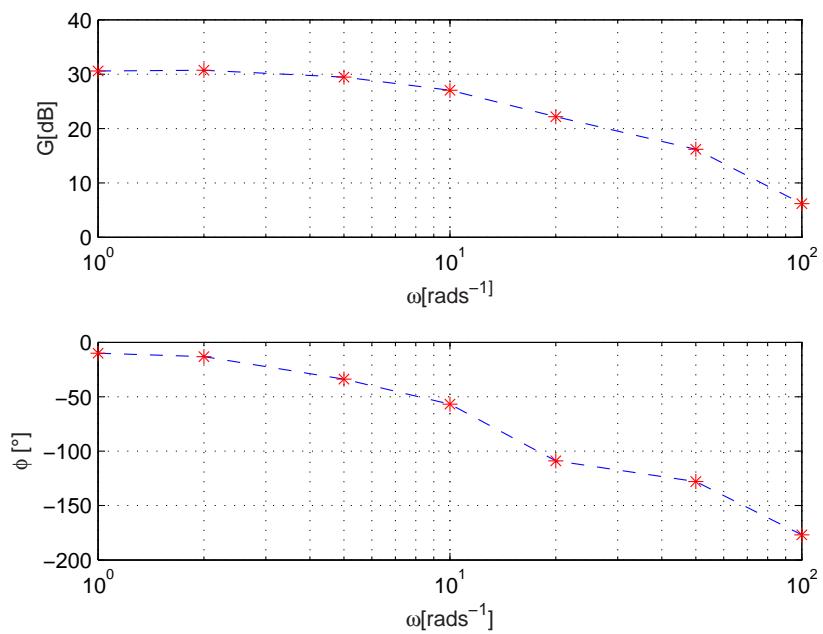
v [dB], kde A_ω [rad s⁻¹] je amplituda průběhu úhlové rychlosti. Fázová frekvenční charakteristika byla získána z časové rozdílu dvou stejných bodů, například průchodu nulovou hodnotou, podle vztahu

$$|\angle G_{MOT}(j\omega)| = \frac{360 \Delta t \omega_s(t)}{2\pi} \quad (3.8)$$

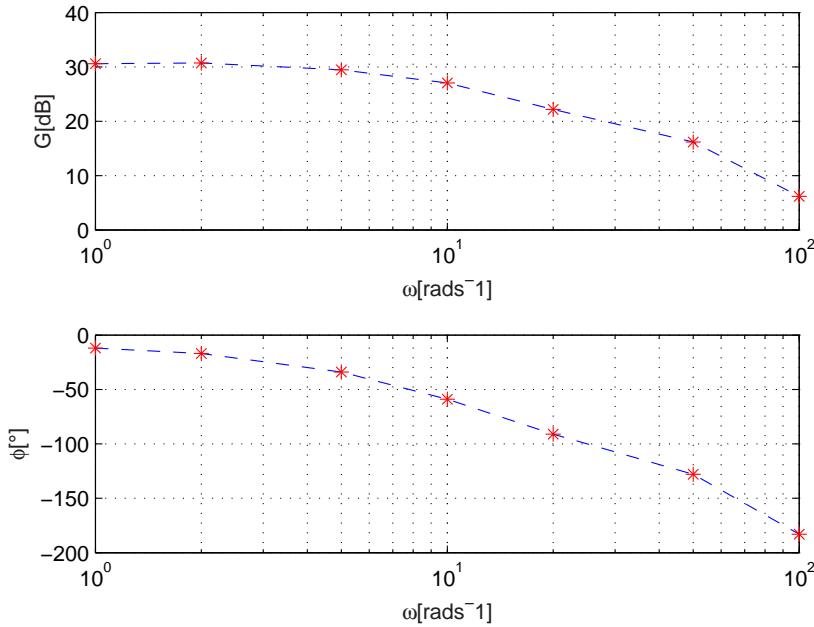
ve [°], kde Δt [s] je časový rozdíl mezi oběma průběhy, ω_s [rad s⁻¹] je úhlová rychlosť vstupního signálu a samozřejmě i výstupního signálu. Na obrázku 3.3 je znázorněn příklad průběhů vstupního napětí a výstupní úhlové rychlosti při měření frekvenčních charakteristik. Z těchto experimentů budou určeny frekvenční charakteristiky motorů MOT1 a MOT2, viz obr. 3.4 a 3.5.



Obrázek 3.3: Příklad průběhu vstupního napětí a úhlové rychlosti



Obrázek 3.4: Změřená frekvenční charakteristika motoru MOT1



Obrázek 3.5: Změřená frekvenční charakteristika motoru MOT2

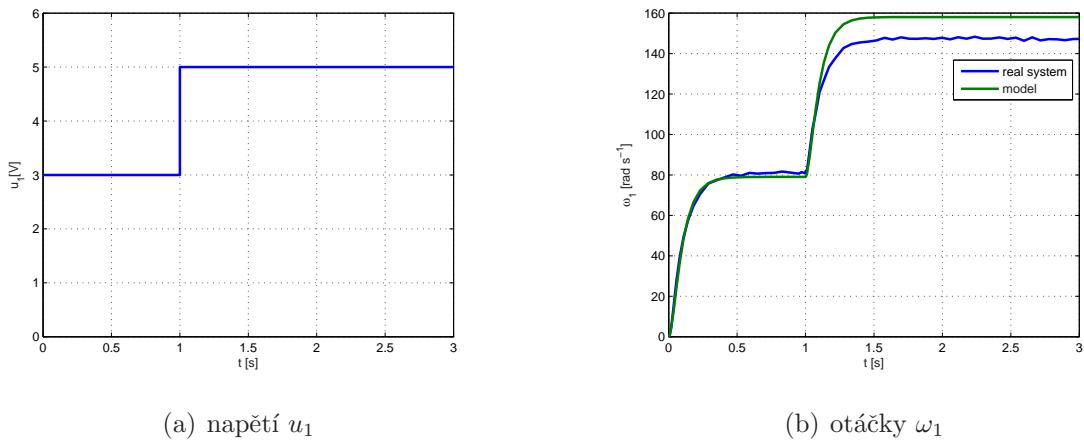
Z frekvenčních charakteristik na obrazkách 3.4 a 3.5 byly nalezeny přibližné póly přenosů, a to v bodech kde má frekvenční amplitudová charakteristika body zlomu. Přechodová odezva přenosu získaného z frekvenčních charakteristik byla ještě porovnána s přechodovou odezvou reálného systému, póly a zesílení přenosu byly doupraveny. Nalezený přenos motoru MOT1 je

$$G_{MOT1}(s) = \frac{\Omega_1(s)}{U_1(s)} = \frac{13598}{s^2 + 45s + 416}, \quad (3.9)$$

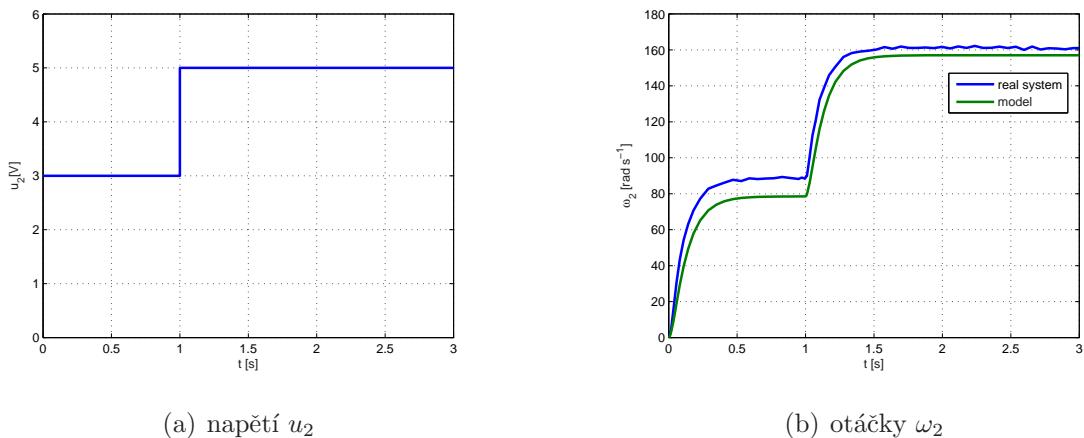
a přenos motoru MOT2 je

$$G_{MOT2}(s) = \frac{\Omega_2(s)}{U_2(s)} = \frac{11748}{s^2 + 44s + 315}. \quad (3.10)$$

Porovnání přechodových odezv reálného systému a přechodových odezv přenosů (3.9) a (3.10) matematického modelu jsou na následujících obrazcích.



Obrázek 3.6: Odezva otáček motoru MOT1



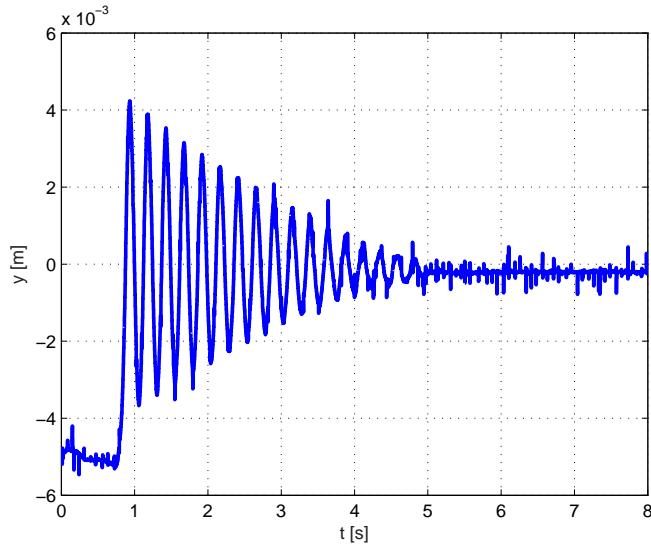
Obrázek 3.7: Odezva otáček motoru MOT2

Z obrázků 3.6 a 3.7 je vidět, že model nalezený pomocí frekvenčních charakteristik je dobrou approximací reálné soustavy.

3.3 Identifikace mechanické části

Z mechanické části lze přímo zjistit pouze konstanty k_p a b_p , protože je možné změřit reakci pružiny na počáteční vychýlení. Zbylé konstanty k_g , k_l a $k_{l_{12}}$ lze určit pouze experimentálně pomocí simulací nalezeného modelu z kapitoly 2 v programu Matlab.

Reakce pružiny na počáteční vychýlení je zobrazeno na obrázku 3.8. Z tohoto průběhu byly zjištěny konstanty k_p a b_p a pomocí dalších experimentů v programu Matlab byly určeny konstanty k_g , k_l a $k_{l_{12}}$. Konstanty jsou uvedeny v tab. 3.2.



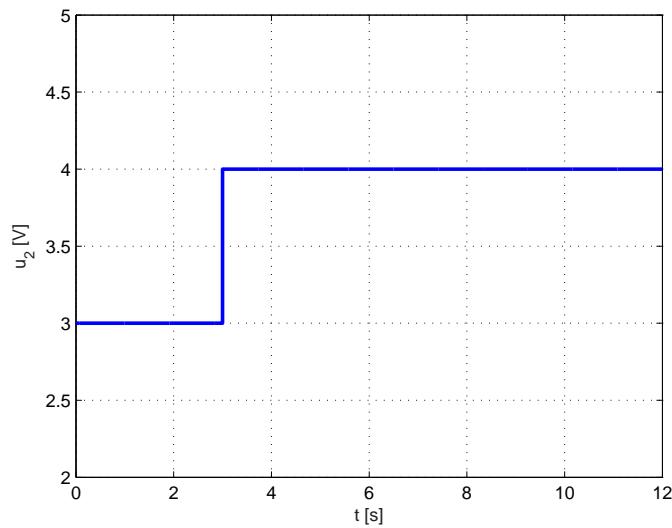
Obrázek 3.8: Reakce pružiny na vychýlení

Tabulka 3.2: Konstanty mechanické části

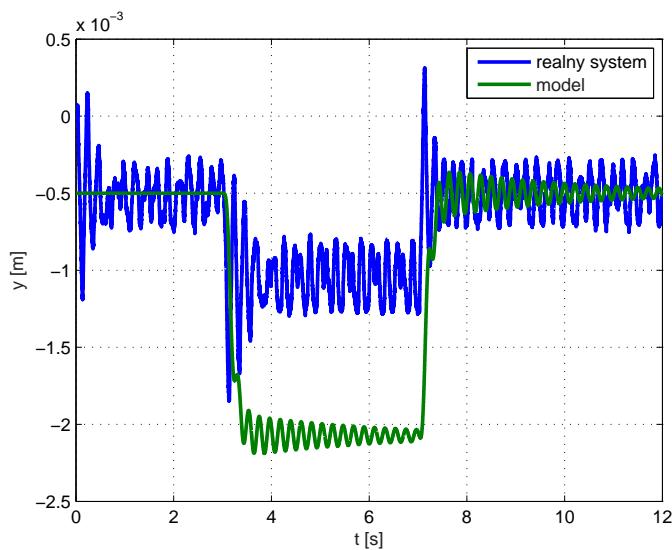
značení	hodnota konstanty	jednotka
k_p	8,54	N m^{-1}
b_p	0,94	s^{-1}
k_g	2,5	N m^{-1}
k_l	10	s^{-1}
$k_{l_{12}}$	10000	s^{-1}

Nyní jsou vyčísleny všechny konstanty matematicko-fyzikálního popisu. Dosazením hodnot konstant do stavových matic (2.21), (2.22), (2.23), (2.24) a přivedením skoku na vstup matematického i laboratorního modelu, bude získána odezva, která je vidět na obrázku 3.10. Z tohoto obrázku je zřejmé, že nalezený model není úplně přesnou approximací reálného systému. Je to dáno, tím, že matematicko-fyzikální popis systému je zjednodušený, a nejsou popsány všechny interakce mezi jednotlivými součástmi systému, ale jenom pouze ty, které mají na chování systému největší vliv. I přes určitou chybu je

pomocí modelu možno navrhnout regulátor, který by reguloval výchylky ramene reálného systému Spojené pohony.



Obrázek 3.9: Vstupní signál pro meření odezvy zavěšeného ramene



Obrázek 3.10: Srovnání odezv výchylky ramene modelu a reálného systému

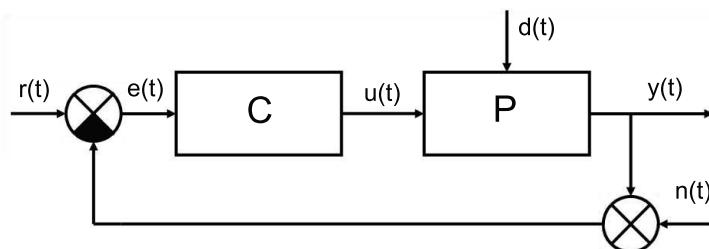
Kapitola 4

Návrh regulátorů systému

V této kapitole bude ukázán návrh regulátorů úhlové rychlosti motorů, a výchylky zařízeného ramene. Budou navrženy pouze jednoduché typy regulátoru typu P, PI a PID (NISE, G.F. et al., 2003). Dále bude porovnána odezva regulovaného reálného systému s odezvou regulovaného matematického modelu.

4.1 Zpětnovazební řízení

Zpětnovazební obvod se zápornou zpětnou vazbou je dán podle obrázku 4.1 regulátorem a regulovanou soustavou.



Obrázek 4.1: Schéma zpětnovazebního zapojení regulátoru a soustavy

Na obr. 4.1 představuje blok C regulátor a P soustavu. Signály vstupující do zpětnovazebního obvodu a z něho vystupující jsou:

$r(t)$... reference (žádaná hodnota výstupu systému),

$e(t)$... regulační odchylka,

$u(t)$... akční zásah (vstup do soustavy),

$y(t)$... výstup ze soustavy,

$d(t)$... porucha (vstup do soustavy),

$n(t)$... šum měření.

Jedná se o odchylkové řízení, protože vstupem do regulátoru není přímo reference ale rozdíl reference a výstupu ze soustavy, tj. regulační odchylka. Přenos zpětnovazebního zapojení regulátoru a soustavy z reference na výstupní hodnotu bez působení poruchy a šumu je

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)}, \quad (4.1)$$

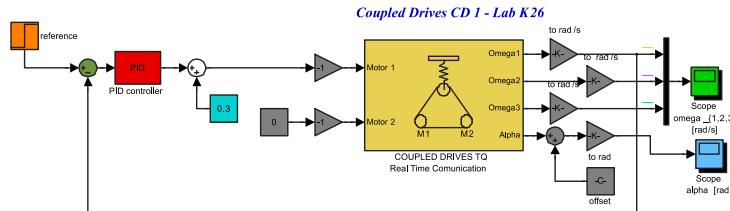
kde $Y(s)$ je obraz výstupní hodnoty v Laplaceově transformaci, $R(s)$ je obraz reference v Laplaceově transformaci, $P(s)$ je přenos soustavy získaný identifikací a $C(s)$ je přenos regulátoru.

4.2 Návrh regulátoru úhlové rychlosti otáčení motoru MOT1

Pro regulaci úhlové rychlosti otáčení motoru MOT1 byl vybrán regulátor typu Lag (NISE, G.F. et al., 2003), který se navrhuje pomocí frekvenčních charakteristik otevřené regulační smyčky $L(s) = C(s)P(s)$. Požadavky na regulaci byly nasledující. Regulační odchylka měla být menší než 5%, a hodnota překmitu neměla přesáhnout 20% požadované hodnoty. Doba regulace měla být co nejmenší. Analýzou frekvenční charakteristiky otevřené regulační smyčky pro konkrétní požadavky regulace byl nalezen přenos Lag regulátoru

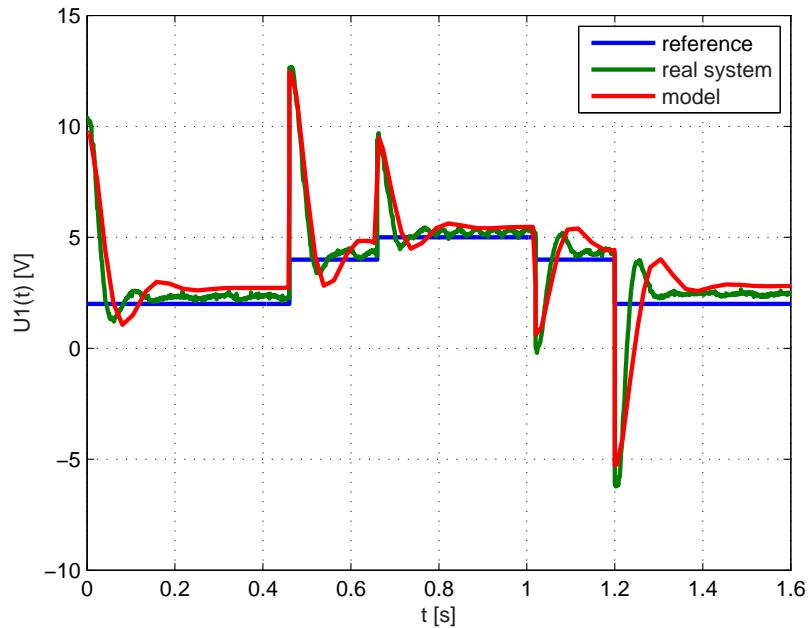
$$C(s) = \frac{0,211(s + 3,34)}{s + 0,707}. \quad (4.2)$$

Regulační smyčka regulátoru a soustavy je na obrázku 4.2.

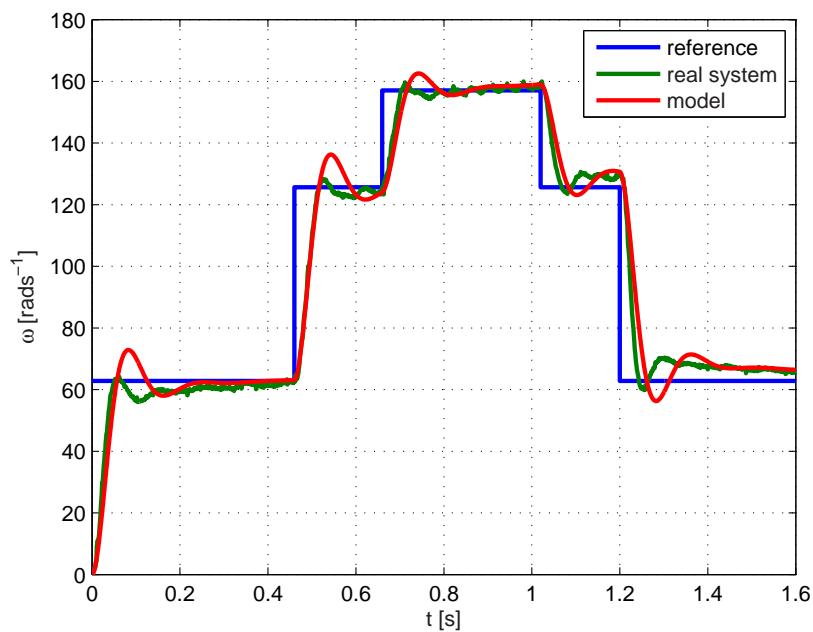


Obrázek 4.2: Schéma zpětnovazebního zapojení regulátoru Lag a soustavy

Odezva zpětnovazebního zapojení regulátoru a soustavy je na obrázku 4.4. Akční zásahy jsou na obr. 4.3.



Obrázek 4.3: Akční zásah vstupující do soustavy



Obrázek 4.4: Odezva systému

Ze získaných odezv je zřejmé, že model motorů je velmi dobrou approximací reálných motorů, proto i odezvy regulační smyčky jsou velmi podobné. Tato regulace také velmi dobře splnila požadavky, které na ni byly kladeny.

4.3 Návrh regulátoru výchylky ramene

Regulace výchylky zavěšeného ramene, bude složitější než byla regulace úhlové rychlosti u motorů. Ze stavového popisu je zřejmé že se jedná o systém s více vstupy a více výstupy (tzv. MIMO systém). U MIMO systému lze ze stavového popisu získat více přenosů. Problém více výstupů lze vyřešit jednoduše, protože lze získat pouze přenosy ze vstupů na jeden konkrétní výstup, a mít o tomto výstupu úplnou informaci. Skutečnost, že systém má 2 vstupy, lze zjednodušit tak, že na vstupu motoru MOT1 se bude nacházet konstantní hodnota vstupního napětí u_1 [V], a motor MOT1 se bude točit úhlovou rychlostí ω_1 [rad s⁻¹] v okolí pracovního bodu, daného vstupním napětím. Regulační smyčka bude obsahovat přenos regulátoru $C(s)$ a přenos ze vstupního napětí motoru MOT2 u_2 [V] na vychýlení zavěšeného ramene, tedy akční zásah do soustavy bude vykonávat motor MOT2. Případnou změnou napětí na motoru MOT1 lze simulovat poruchu vstupující do soustavy a reakci regulátoru na ni.

Přenos vstupního napětí u_2 na výchylku y lze získat ze stavového popisu podle vztahu

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{D}, \quad (4.3)$$

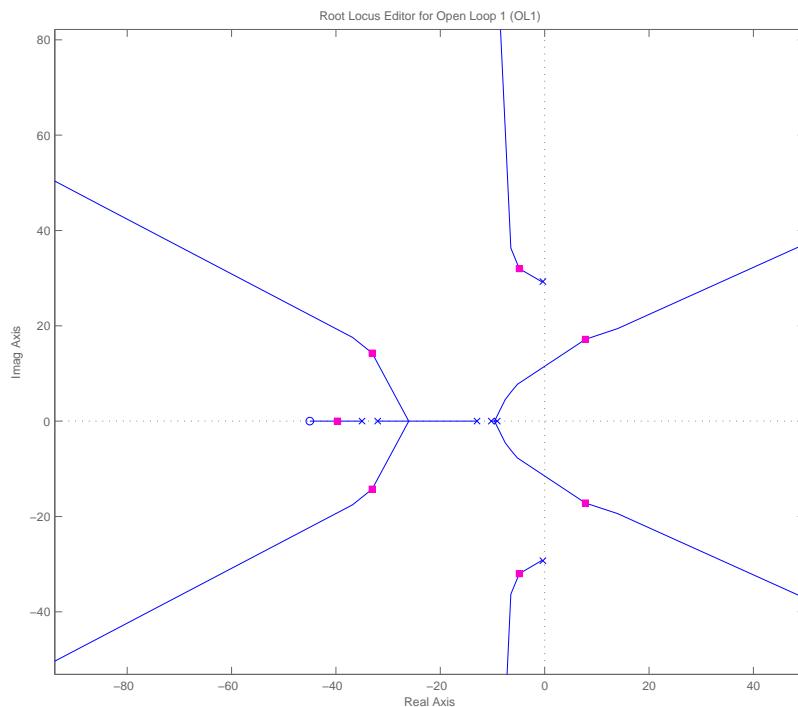
kde $\mathbf{G}(s)$ je matice přenosů, \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} a \mathbf{D} jsou stavové matice systému a \mathbf{I} je jednotková matice. Námi požadovaný přenos se nachází v matici $\mathbf{G}(s)$ na pozici $\mathbf{G}(2,3)$ a je roven

$$G(s) = \frac{8582134,275(s + 45)(s^2 + 0,9698s + 880,5)}{(s + 10^4)(s + 32)(s + 12,95)(s + 10,2)(s + 9,083)(s^2 + 0,7029s + 857,8)}. \quad (4.4)$$

Z přenosu napětí u_2 a výchylky y (4.4) je vidět že se jedná o stabilní systém 7. rádu, bez astatismu, s komplexními nulami a póly. Aby se navrh regulátoru zjednodušil, je možné zanedbat komplexní nuly. Přenos z (4.4) pak bude mít tvar

$$G(s) = \frac{7555478129,1784(s + 45)}{(s + 10^4)(s + 32)(s + 12,95)(s + 10,2)(s + 9,083)(s^2 + 0,7029s + 857,8)}. \quad (4.5)$$

Regulátor výchylky ramene, lze nalézt analýzou pólů a nul přenosu (4.5) nástrojem programu Matlab Sisotool (THE MATHWORKS, 2008). Zde je možno sledovat reakci systému na hodnotu zesílení, dále je možno přidávat póly a nuly regulátoru a tímto způsobem lze nalézt vhodný přenos regulátoru. Geometrické místo kořenů regulační smyčky soustavy s proporcionálním regulátorem je na obr. 4.5.

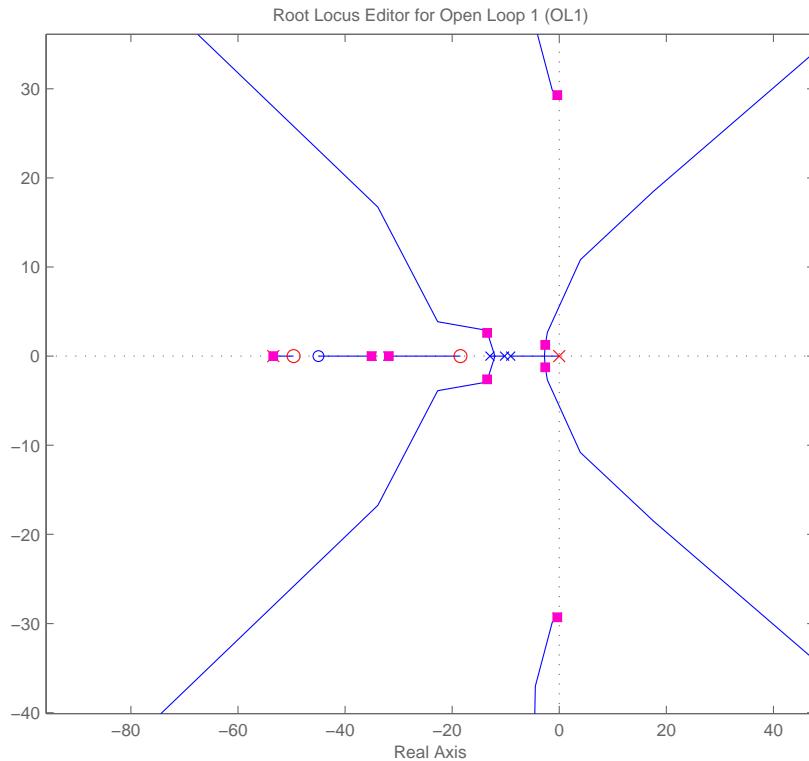


Obrázek 4.5: Geometrické místo kořenů regulační smyčky přenosu $G(s)$
s proporcionálním regulátorem

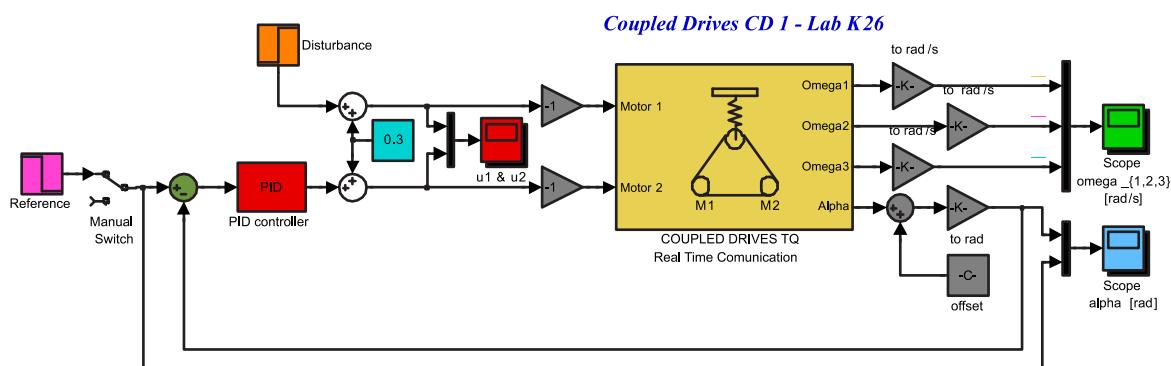
Nejlepší možnou reakci systému nalezneme při zesílení $K = 4,57$ a přidáním 2 reálných pólů do polohy 0 a $-53,4$ a přidáním 2 reálných nul do polohy $-49,6$ a $-18,6$ v komplexní rovině. To znamená že navíc byl k přenosu $G(s)$ přidán přenos regulátoru

$$C(s) = 4,57 \frac{(1 + 0,02s)(1 + 0,054s)}{s(1 + 0,019)}. \quad (4.6)$$

Poloha pólů a nul systému i s regulátorem je na obrázku 4.6. Tento přenos odpovídá přenosu PID regulátoru. Zpětnovazebním zapojením systému a přenosu regulátoru (4.6) dostaneme tedy regulační smyčku pro regulaci vychýlení ramene viz obr. 4.7. Odezvy systému ve zpětné vazbě s tímto regulátorem při konstantní referenci rovné $-0,002$ m jsou na obrázcích 4.8, 4.10 a 4.9.



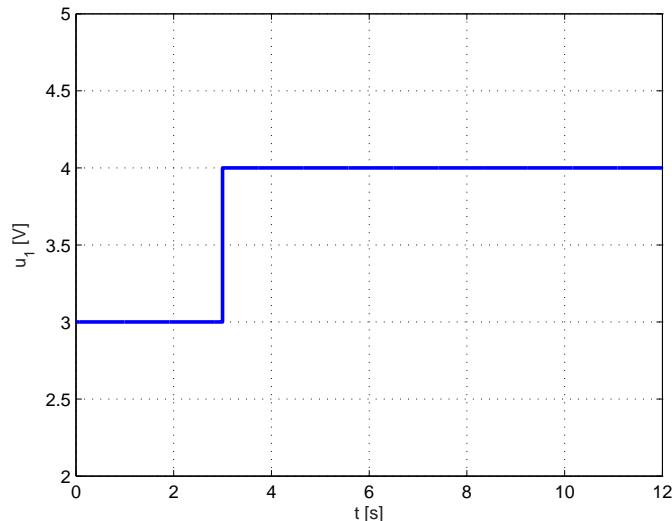
Obrázek 4.6: Geometrické místo kořenů regulační smyčky přenosu $G(s)$
a $C(s)$



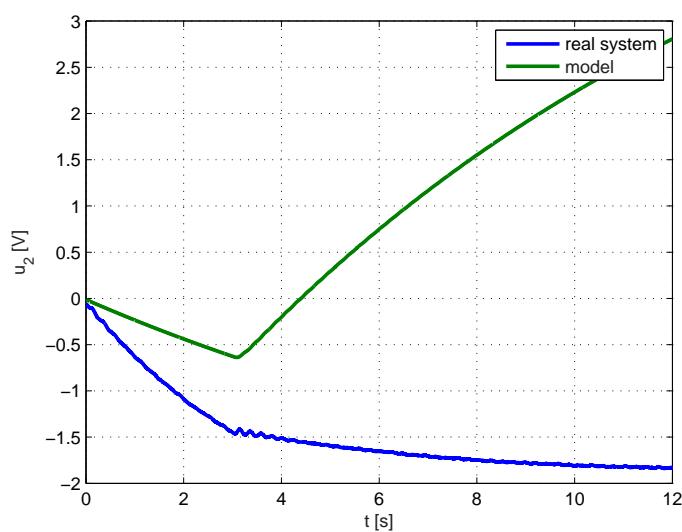
Obrázek 4.7: Schéma zpětnovazebního zapojení regulátoru PID a soustavy

Z naměřených průběhů je vidět že odezva reálné regulace dosáhne reference ve střední hodnotě. Regulátor neodstranil ovšem kmitání kolem referenční hodnoty. To je dáno tím, že regulátor nedokáže posunout imaginární póly, které způsobují kmitání systému.

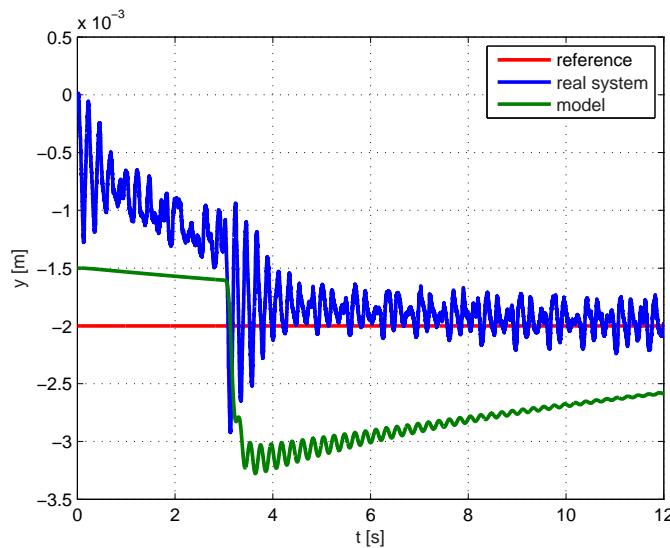
Tento nedostatek by bylo možné odstranit stavovým regulátorem, který by byl navržen na základě nějakého kritéria optimality (HAVLENA, V. and ŠTECHA, J., 2000). Na následujících obrázcích se nachází odezva regulační smyčky pro konstantní referenci výchylky ramene a skokovou poruchu způsobenou změnou napětí na motoru MOT1.



Obrázek 4.8: Vstupní skok poruchy motoru MOT1

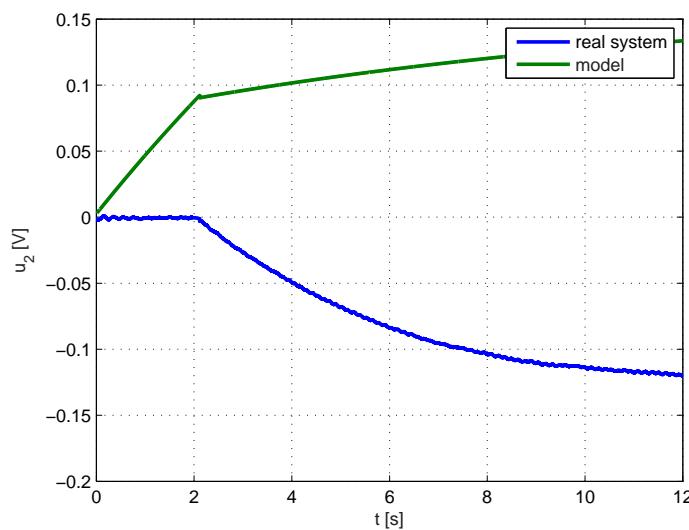


Obrázek 4.9: Akční zásah do systému

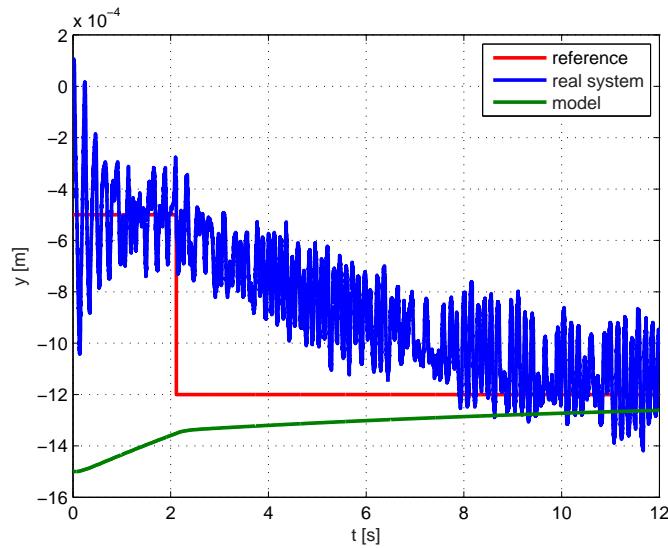


Obrázek 4.10: Odezva výchylky regulovaného systému při konstantní referenci

Ze simulací uvedených na předešlých obrázcích jsou patrné rozdíly reálného systému a jeho matematické approximace. Tyto rozdíly jsou dány zjednodušením některých vztahů při návrhu matematického modelu. Základní rysy matematického modelu jsou ovšem zachovány.



Obrázek 4.11: Akční zásah do systému



Obrázek 4.12: Odezva výchylky regulovaného systému při skoku reference

Na obrázcích 4.11 a 4.12 se nacházejí odezvy regulační smyčky pro skok reference bez poruchy. Výsledky jsou podobné, regulační smyčka funguje podobně jako v předchozí simulaci. Z průběhů je vidět, že navržený regulátor má i přes neúplně přesný model velmi dobré odezvy.

Kapitola 5

Závěr

V této práci byl v kapitole 2 matematicko-fyzikálně popsán laboratorní systém Spojené pohony TQ, umístěný v Laboratoři teorie automatického řízení K26 (ROUBAL, J., 2009) katedry řídicí techniky Českého vysokého učení technického v Praze, který popisoval hlavní fyzikální děje jednotlivých částího modelu a interakce mezi nimi. Pro tento matematicko-fyzikální popis byl nasledně sestrojen staový popis, ze kterého bylo možno získat přenosy systému.

Poté byly v kapitole 3 získány konstanty systému a převodní konstanty. Některé bylo nutné získat pomocí experimentů, takže je možné že jejich konkrétní hodnota nemusí odpovídat fyzikální realitě, ale v poměru s jinými konstantami mohou mít stejný poměr jako poměr reálných fyzikálních konstant.

Identifikací systému byly získány velmi přesné approximace přenosu vstupního napětí a úhlové rychlosti otáčení motorů. Celkový model systému už tak přesný nebyl. To je dáno tím že systém je velmi složitý a popsat ho dostatečně přesně by bylo podstatně složitější. Také identifikace některých konstant nebyla jednoduchá vzhledem k šumu měření a nemožnosti přímeho měření některých veličin. Přesto i tento model byl postačující pro následný návrhu regulátorů.

Pro soustavu bylo navrženo více regulátorů, ale zde jsou uvedeny pouze ty s nejlepšími výsledky. Pro regulaci úhlové rychlosti motoru byl zvolen regulátor Lag, protože nejlépe splňoval požadavky na regulaci. Regulace výchylky ramene byl podstatně složitější úkol, protože se jednalo o systém 7. rádu s dominantním kmitavým módem. Proto byla zvolena metoda návrhu pomocí geometrického místa kořenů, která nabízela nejlepší analýzu o kořenech systému spolu s regulátorem. Vzhledem ke složitosti systému je navržený regulátor výchylky poměrně kvalitní. Video s průběhem regulace je na přiloženém CD i na internetových stránkách Laboratoře teorie automatického řízení K26 (ROUBAL, J., 2009).

Literatura

- FRANKLIN, G.F., POWEL, J.D. and NAEINI, A.E. (2006), *Feedback Control of Dynamic Systems*, New Jersey: Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-149930-0.
- HAVLENA, V. and ŠTECHA, J. (2000), *Moderní teorie řízení*, Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-02095-9.
- HUMUSOFT (2007), Humusoft s.r.o. [online]. [cit. 2007-08-17],
[\(http://www.humusoft.cz/\)](http://www.humusoft.cz/).
- KUBEŠ, P. and KYNCL, Z. (1996), *Fyzika I*, Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-01487-8.
- NISE, G.F., POWEL, J.D. and NAEINI, A.E. (2003), *Control System Engineering*, USA: Wiley. ISBN 0-13-149930-0.
- ROUBAL, J. (2009), Laboratoř teorie automatického řízení [online]. [cit. 2009-01-16],
[\(http://support.dce.felk.cvut.cz/lab26/\)](http://support.dce.felk.cvut.cz/lab26/).
- ROUBAL, J., HUŠEK, P. and SPOL. (2009), *Základy regulační techniky v příkladech*, Pracovní verze. [\(http://support.dce.felk.cvut.cz/pub/roubalj/\)](http://support.dce.felk.cvut.cz/pub/roubalj/).
- THE MATHWORKS (2008), The Mathworks [online]. [cit. 2008-07-20],
[\(http://www.mathworks.com/\)](http://www.mathworks.com/).
- VOŽENÍLEK, P. and JANOUŠEK, J. (2008), *Základy silnoproudé elektrotechniky*, Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-03135-3.

Příloha A

Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy zdrojové kódy a simulinková schémata.

- Demo PID regulátor: `CD_TQ.mdl`
- Bakalářská práce PDF
- Video s regulací