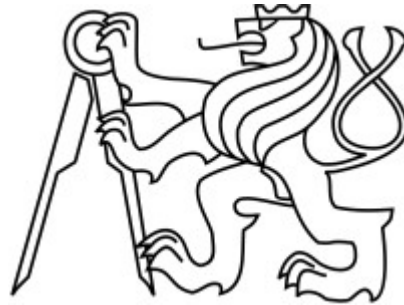


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Webová podpora výuky v laboratoři Allen–Bradley**

Praha, 2011

Vypracoval: Lukáš Bundil

Vedoucí práce: Ing. Jindřich Fuka

# Prohlášení

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

V Praze dne \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ podpis

# Poděkování

Děkuji všem, kteří mě podporovali při vytváření této práce, především vedoucímu práce, panu Ing. Jindřichovi Fukovi, za poskytnuté informace, cenné připomínky a rady týkající se daného tématu.

..... Zadání .....

# Abstrakt

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření podkladů a materiálů pro práci s laboratorními modely, které se nachází v laboratoři Allen–Bradley (K23). Tyto modely slouží k podpoře výuky předmětů na Katedře řídicí techniky a jedná se konkrétně o modely Inverzní kyvadlo P1, Servomechanismus S1, Servomechanismus S2, Kulička na tyči K1 a Tepelná soustava T1. Pro tyto účely byly pořízeny fotografie modelů, vytvořeny popisy jednotlivých modelů, informace pro studenty a vyučující a zadání pro identifikaci a řízení laboratorních modelů. Veškeré informace jsou umístěny na webových stránkách laboratoře, které za účelem podpory výuky vznikly a které tak budou sloužit studentům i vyučujícím při výuce.

# Abstract

The aim of this bachelor's work was to create the source materials and documents to work with laboratory models which are located in the Allen-Bradley Laboratory (K23). These models are used to support training at the Department of Control Engineering. Mentioned models are Inverted pendulum P1, Servomechanism S1, Servomechanism S2, Ball and Beam K1 and Thermal system T1. For these purposes, the photographs of models were taken, the general descriptions of individual models, information for students and teachers and assignments for the identification and management of laboratory models were made. All informations are placed on the website of laboratory that were created for those purposes and are supposed to support the training and serve students and teachers in the classroom.

# Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>viii</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Laboratorní modely</b>	<b>2</b>
2.1 Inverzní kyvadlo P1	3
2.1.1 Schéma a konstrukce modelu	3
2.1.2 Informace pro studenty	7
2.1.3 Informace pro vyučující	8
2.2 Servomechanismus S1	11
2.2.1 Schéma a konstrukce modelu	12
2.2.1.1 Přední panel přístrojové skříně	13
2.2.1.2 Zadní panel přístrojové skříně	16
2.2.2 Informace pro studenty	18
2.2.3 Informace pro vyučující	19
2.3 Servomechanismus S2	21
2.3.1 Schéma a konstrukce modelu	22
2.3.2 Informace pro studenty	25
2.3.3 Informace pro vyučující	28
2.4 Kulička na tyči K1	30
2.4.1 Schéma a konstrukce modelu	30
2.4.2 Informace pro studenty	31
2.4.3 Informace pro vyučující	34
2.5 Tepelná soustava T1	36
2.5.1 Schéma a konstrukce modelu	36
2.5.2 Informace pro studenty	37
2.5.3 Informace pro vyučující	40
2.6 Ostatní modely	41
<b>3 Webová prezentace</b>	<b>43</b>
3.1 Základní popis webových stránek laboratoře	43
3.2 Editace webu	43

<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>46</b>
	<b>Literatura</b>	<b>47</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Ukázka zdrojového kódu textu MediaWiki</b>	<b>II</b>
<b>C</b>	<b>Ukázka zadání laboratorní úlohy</b>	<b>X</b>

# Seznam obrázků

Obr. 1	Obecné blokové schéma laboratorního modelu	2
Obr. 2	Inverzní kyvadlo P1	3
Obr. 3	Blokové schéma zapojení modelu P1 včetně typů propojovacích kabelů	4
Obr. 4	Hlavní skříň modelu P1	4
Obr. 5	Popis částí vlastního modelu P1	5
Obr. 6	Joystick	6
Obr. 7	Servomechanismus S1	11
Obr. 8	Přední panel přístrojové skříně	12
Obr. 9	Zadní panel přístrojové skříně	13
Obr. 10	Servomechanismus S2	21
Obr. 11	Popis částí vlastního modelu S2	22
Obr. 12	Přístrojová skříň modelu S2	24
Obr. 13	Význam parametrů vyměnitelného disku	25
Obr. 14	Náhradní schéma modelu S2	26
Obr. 15	Kulička na tyči K1	30
Obr. 16	Přístrojová skříň modelu K1	31
Obr. 17	Náhradní schéma modelu K1	32
Obr. 18	Tepelná soustava T1	36
Obr. 19	Pohled na model shora	37
Obr. 20	Zadní panel modelu	37
Obr. 21	Výběr způsobu řízení	37
Obr. 22	Náhradní elektrické schéma	40



# Seznam tabulek

Tab. 1	Popis částí vlastního modelu P1	5
Tab. 2	Technické parametry modulu <i>SERVO GENERATOR 1</i>	13
Tab. 3	Technické parametry modulu <i>SERVO GENERATOR 2</i>	13
Tab. 4	Technické parametry modulu <i>SERVO MOTOR 1</i>	14
Tab. 5	Technické parametry modulu <i>SERVO MOTOR 2</i>	14
Tab. 6	Technické parametry modulu <i>SENSOR</i>	15
Tab. 7	Technické parametry BNC – konektorů	16
Tab. 8	Technické parametry konektoru	16
Tab. 9	Technické parametry motorů	17
Tab. 10	Technické parametry tachodynamy	17
Tab. 11	Technické parametry inkrementálního čidla	17
Tab. 12	Technické parametry vlnovce	18
Tab. 13	Lokace a odstranění poruch	18
Tab. 14	Popis částí vlastního modelu S2	23
Tab. 15	Technické parametry modelu S2	24
Tab. 16	Parametry výměnných disků	25
Tab. 17	Nastavení rychlostí větráku	38
Tab. 18	Připojení soustavy k PLC	39

# 1 Úvod

Laboratoř Allen-Bradley (K23), která se nachází na Katedře řídicí techniky FEL ČVUT v Praze, prošla roku 2009 celkovou stavební rekonstrukcí. Součástí rekonstrukce byl mimo jiné vznik nových laboratorních modelů a úprava modelů starších. Vznikla tak potřeba informace a podpůrné materiály pro výuku v laboratoři aktualizovat, zároveň je umístit na místo dobře dostupné nejen studentům ale i vyučujícím. Roku 2010 tak byly vytvořeny Michalem Pilným nové webové stránky laboratoře [10], jejichž částečný obsah zajistil téhož roku David Charvát v rámci své bakalářské práce [9].

Cílem mé bakalářské práce bylo navázat na předchozí práci kolegů a pokračovat ve vytváření a rozšiřování studijních materiálů potřebných pro výuku v laboratoři. Tyto materiály jsou dostupné online na již zmíněných webových stránkách laboratoře na adrese [http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/index.php/Laboratoř\\_Allen-Bradley](http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/index.php/Laboratoř_Allen-Bradley).

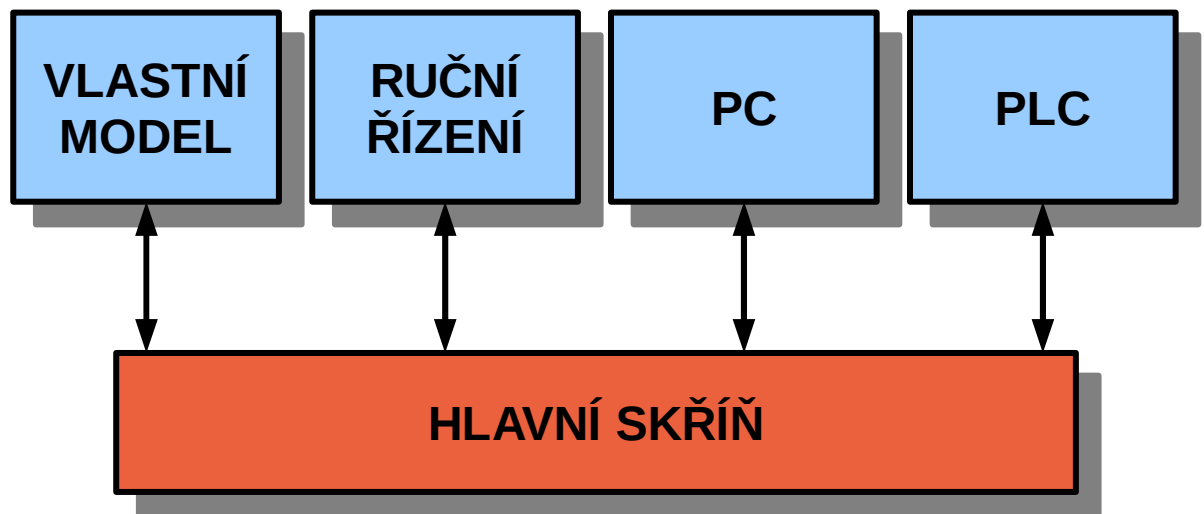
Práce je rozčleněna do dvou částí. První část se zabývá vybranými laboratorními modely, které jsou v laboratoři umístěny, konkrétně Inverzní kyvadlo P1, Servomechanismus S1, Servomechanismus S2, Kulička na tyči K1 a Tepelná soustava T1. V kapitole jsou veškeré informace týkající se těchto modelů, jejich konstrukcí, matematických popisů i pokynů pro práci s nimi. Obsahem druhé části práce je umístění a prezentace vypracovaných materiálů na webových stránkách laboratoře.

Jako součást práce byla vytvořena zadání laboratorních úloh pro identifikaci a řízení těchto modelů. Příklad zadání je uveden v příloze C, zbylá zadání jsou umístěna na CD, které je součástí této bakalářské práce.

## 2 Laboratorní modely

Laboratorní modely slouží k podpoře výuky předmětů týkajících se modelováním, identifikací a řízením dynamických systémů. Každý model demonstruje procesy reálného světa, student na nich efektivně využije svých teoretických znalostí při řešení praktického problému. Ke každému modelu je sestrojeno schéma v Simulinku, z něhož lze model ovládat a řídit.

Obecně lze každý laboratorní model znázornit následujícím blokovým schématem.



Obrázek 1: Obecné blokové schéma laboratorního modelu

Jak je z obrázku patrné, máme k dispozici 3 možnosti ovládnání modelů: ruční řízení, pomocí PC s převodníkovou kartou a programem Matlab a řízení modelu pomocí programovatelného automatu (PLC).

Hlavní skříň zpravidla obsahuje obvod pro přepínání jednotlivých typů řízení, zároveň slouží jako napájecí zdroj vlastního modelu.

Ne každý model podporuje všechny zmíněné způsoby ovládnání. Proto jsou u každého popisu modelu zvlášť probrány způsoby jeho ovládnání.

Pro popis modelu Inverzní kyvadlo P1 jsem použil informace z [1], pro Servomechanismus S1 z [2], pro Servomechanismus S2 z [3] a [4], pro Kuličku na tyči K1 z [5] a pro Tepelnou soustavu T1 informace z [6]. Zároveň jsem čerpal informace z [7] a [8].

## 2.1 Inverzní kyvadlo P1

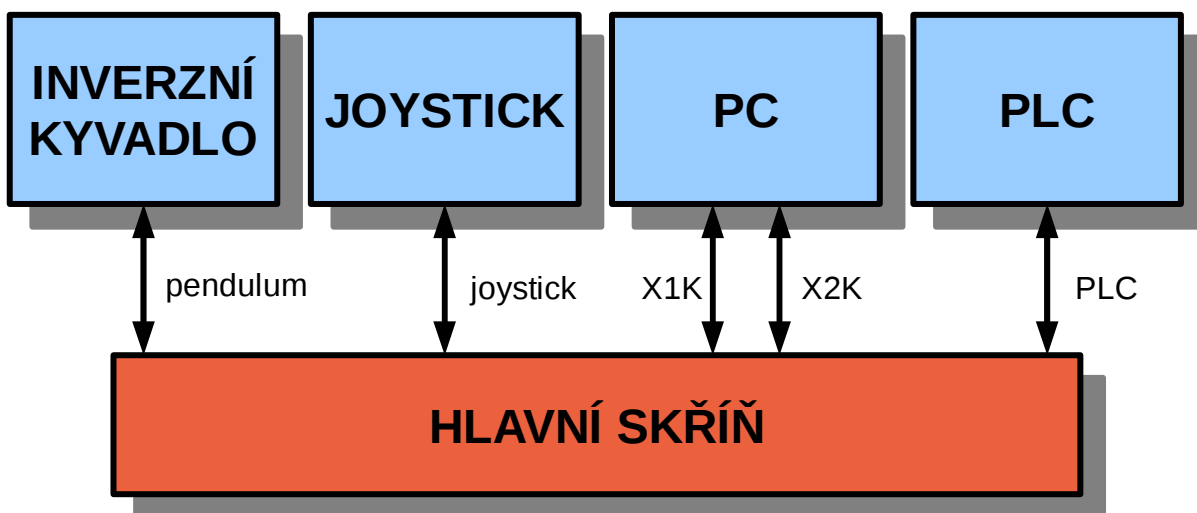
Laboratorní model Inverzní kyvadlo P1 byl sestaven a uveden do provozu Tomášem Hanišem v roce 2003. Základem tohoto modelu byl tehdy model firmy Quanser. Současná podoba modelu vznikla dalšími úpravami v rámci bakalářské práce Lukáše Kratochvíla [1] v roce 2008. Model simuluje řadu procesů vyskytujících se v reálném světě, např. simuluje chování rakeplánu při startu. Model je možné v rámci výuky využít k řízení polohy kyvadla a jeho stabilizaci (např. pomocí PID regulátorů, LQR řízení). Fotografie modelu je na obr. 2.



Obrázek 2: Inverzní kyvadlo P1

### 2.1.1 Schéma a konstrukce modelu

Celý model Inverzní kyvadlo P1 je složen ze čtyř samostatných částí zapojených do hlavní skříně. Situace je zobrazena na obr. 3 a vychází z blokového schématu na obr. 2. Je zřejmé, že části jsou: vlastní model inverzního kyvadla, joystick, PC, PLC a hlavní skříně. Jednotlivé části si nyní popíšeme.



Obrázek 3: Blokové schéma zapojení modelu P1 včetně typů propojovacích kabelů

- **Hlavní skříň**

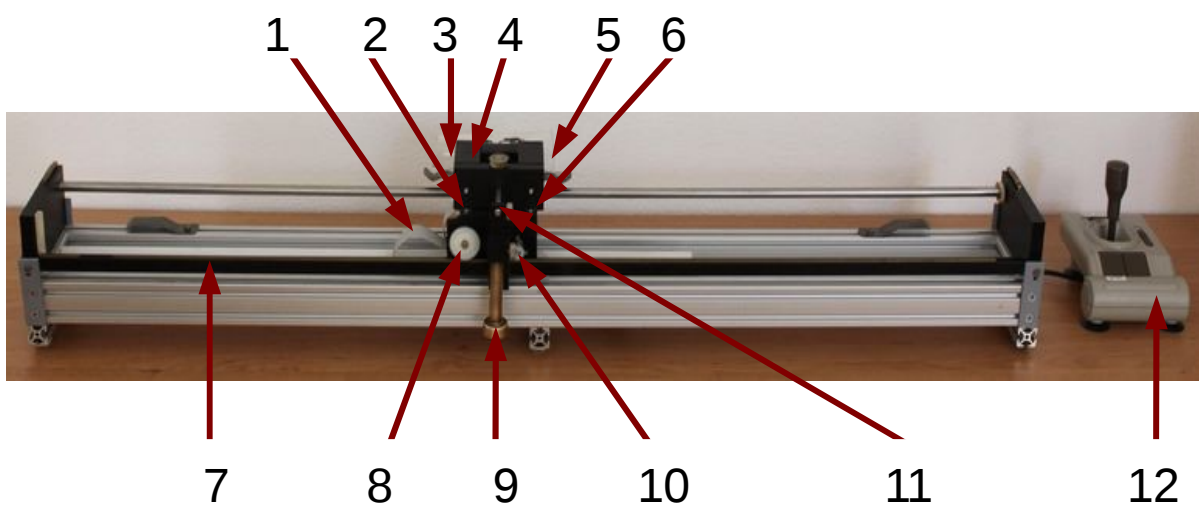
Hlavní skříň obsahuje obvod pro přepínání řízení mezi PC a programovatelným automatem, současně slouží jako hlavní napájecí zdroj. Do hlavní skříně jsou zapojeny zbylé části modelu. Detail hlavní skříně je zobrazen na obr. 4. Z obrázku je patrný panel s konektory PLC, X1K, X2K, joystick a pendulum, původní rozhraní umístěné nad tímto panelem se již nepoužívá. Na zadní stěně skříně je vypínač, kterým se celý laboratorní model zapíná.



Obrázek 4: Hlavní skříň modelu P1

- **Inverzní kyvadlo**

Vlastní model inverzního kyvadla je složen z vozíku poháněného stejnosměrným motorem přes ozubené kolo po ozubici. Na vozíku je zavěšeno kyvadlo, které je volně otočné na hřídeli. Snímání polohy vozíku a snímání náklonu kyvadla je zajištěno dvěma IRC snímači. Model dále obsahuje 4 spínače: 2 horní (KLN a KPN) slouží k hardwarovému odpojení motoru od napájení, 2 dolní (KLD a KPD) jsou využity pro účely řízení. Detail inverzního kyvadla a popis důležitých částí je zobrazen na obr. 5 a v tab. 1.



Obrázek 5: Popis částí vlastního modelu P1

označení v obrázku	část
1	připojovací sběrnice
2	koncový spínač KLD
3	koncový spínač KLN
4	vozík
5	koncový spínač KPN
6	koncový spínač KPD
7	ozubice
8	snímání polohy vozíku přes IRC
9	kyvadlo
10	pohon vozíku stejnosměrným motorem
11	snímání náklonu kyvadla přes IRC
12	joystick

Tabulka 1: Popis částí vlastního modelu P1

- **PC**

Připojení modelu k PC je realizováno pomocí převodníkové karty Humusoft MF624 a Real Time Toolboxu pro Matlab, který umožňuje řízení modelu v reálném čase.

- **PLC**

Model je připojen k programovatelnému automatu (PLC) řady ControlLogix 1756 (firma Rockwell Automation). K automatu je nainstalován PC software umožňující jeho programování, zároveň však plní řadu dalších užitečných funkcí jako např. monitorování chodu systému apod.

- **Joystick**

Původním záměrem joysticku bylo využití k manuálnímu řízení modelu. To se však v praxi ukázalo jako nereálné, proto se od tohoto způsobu řízení upustilo. Přesto má využití joysticku praktický význam – je možné použít ho jako zdroj referenční polohy vozíku. Detail joysticku je na obr. 6.



Obrázek 6: Joystick

## 2.1.2 Informace pro studenty

- **Obecné informace**

Z matematického hlediska model představuje nelineární astatický systém. Jak již bylo zmíněno výše, model můžeme řídit dvěma způsoby – buď pomocí PC s programem Matlab/ Simulink a Real Time Toolboxu, kde jsou všechny veličiny převedeny na bezrozměrná čísla obvykle v intervalu (-1, +1), nebo pomocí PLC.

- **Pokyny pro práci s modelem**

- Při spuštění nemějte ruce ani žádné předměty v dráze vozíku!
- Pro vyšší hodnoty vstupního napětí zkráťte dobu simulace, aby nedocházelo k poškození kyvadla!

- **Důležité vztahy**

Při odvozování stavového popisu systému vycházíme z následujících rovnic:

$$I \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} + k \frac{d \theta(t)}{dt} + m_p g l \sin \theta(t) = -m_p l \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \cos \theta(t) \quad (1)$$

$$(m_t + m_p) \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + m_p l \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} \cos \theta(t) - m_p l \frac{d \theta^2(t)}{dt} \sin \theta(t) = c u(t) \quad (2)$$

Význam použitých symbolů:

$\theta(t)$	[rad]	náklon kyvadla
$x(t)$	[m]	poloha vozíku
$u(t)$	[V]	napětí na motoru vozíku
$I$	[kg m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti kyvadla vztažený k ose rotace
$m_c$	[kg]	hmotnost vozíku
$m_p$	[kg]	hmotnost kyvadla
$g$	[m s <sup>-2</sup> ]	gravitační zrychlení
$l$	[m]	vzdálenost těžiště od středu rotace kyvadla
$k$	[kg m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	koeficient viskózního tření kyvadla v ose rotace
$b$	[kg s <sup>-1</sup> ]	koeficient viskózního tření ozubeného kola vozíku s ozubnicí



$c$  [N] převodní konstanta převádějící vstup na sílu vyvinutou motorem

Pozn.: Hmotnost vozíku s kyvadlem je 1170 g, hmotnost kyvadla se šrouby je 157 g.

- **Volba vstupních a výstupních veličin systému**

Jako vstupní veličinu volíme napětí na motoru  $u(t)$ , výstupní veličiny potom představují náklon kyvadla  $\theta(t)$  a poloha vozíku  $x(t)$ .

### 2.1.3 Informace pro vyučující

Vzhledem k tomu, že model inverzního kyvadla P1 představuje nelineární systém, bude nutné provést jeho linearizaci. Rovnice (1) a (2) vyjádříme tedy ve tvaru vhodném k linearizaci:

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = -\frac{m_p l \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \cos\theta(t)}{I} - \frac{k \frac{d\theta(t)}{dt}}{I} - \frac{m_p g l \sin\theta(t)}{I} \quad (3)$$

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -\frac{b}{m_c} \frac{dx(t)}{dt} - \frac{m_p l \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \cos\theta(t)}{m_c} + \frac{m_p l \frac{d\theta^2(t)}{dt} \sin\theta(t)}{m_c} + \frac{c}{m_c} u(t) \quad (4)$$

kde zároveň platí

$$m_c = m_t + m_p \quad (5)$$

Nyní již můžeme model linearizovat. Linearizaci provedeme nejprve v obecném pracovním bodě a poté v konkrétním, námi zvoleném, pracovním bodě.

#### Linearizace v obecném pracovním bodě

$$\Delta\ddot{\theta}(t) = \left. -\frac{m_p l \cos\theta(t)}{I} \right|_p \Delta\ddot{x}(t) - \left. \frac{k}{I} \right|_p \Delta\dot{\theta}(t) + \left. -\frac{m_p g l \cos\theta(t)}{I} + \frac{m_p l \ddot{x}(t) \sin\theta(t)}{I} \right|_p \Delta\theta(t) \quad (6)$$

$$\Delta\ddot{x}(t) = \left. -\frac{m_p l \cos\theta(t)}{m_c} \right|_p \Delta\ddot{\theta}(t) + \left. \frac{2m_p l \dot{\theta}(t) \sin\theta(t)}{m_c} \right|_p \Delta\dot{\theta}(t) - \left. \frac{b}{m_c} \right|_p \Delta\dot{x}(t) + \left. \frac{m_p l \ddot{\theta}(t) \sin\theta(t)}{m_c} + \frac{m_p l \dot{\theta}^2(t) \cos\theta(t)}{m_c} \right|_p \Delta\theta(t) + \frac{c}{m_c} \Delta u(t) \quad (7)$$

### Linearizace v konkrétním pracovním bodě

Jako pracovní bod si zvolíme horní polohu kyvadla, tzn. do rovnic (6) a (7) dosadíme  $\theta = \pi$  a tím obdržíme následující rovnice:

$$\Delta \ddot{\theta}(t) = \frac{m_p l}{I} \Delta \ddot{x}(t) - \frac{k}{I} \Delta \dot{\theta}(t) + \frac{m_p g l}{I} \Delta \theta(t) \quad (8)$$

$$\Delta \ddot{x}(t) = \frac{m_p l}{m_c} \Delta \ddot{\theta}(t) - \frac{b}{m_c} \Delta \dot{x}(t) + \frac{c}{m_c} \Delta u(t) \quad (9)$$

### Stavový popis modelu

Úpravou rovnic (8) a (9) a zavedením konstanty  $a$ , pro kterou platí

$$a = m_p^2 l^2 - I m_c \quad (10)$$

získáme rovnice

$$\Delta \ddot{\theta}(t) = \frac{k m_c}{a} \Delta \dot{\theta}(t) - \frac{m_p g l m_c}{a} \Delta \theta(t) + \frac{m_p l b}{a} \Delta \dot{x}(t) - \frac{m_p l}{a} \Delta u(t) \quad (11)$$

$$\Delta \ddot{x}(t) = \frac{m_p l k}{a} \Delta \dot{\theta}(t) - \frac{m_p^2 l^2 g}{a} \Delta \theta(t) + \frac{b I}{a} \Delta \dot{x}(t) - \frac{I}{a} \Delta u(t) \quad (12)$$

K vyjádření stavového popisu potřebujeme odstranit druhé derivace. To zajistíme zavedením dalších stavů: rychlost vozíku  $\Delta v(t)$  a úhlová rychlost kyvadla  $\Delta \omega(t)$ . Následně upravíme rovnice (11) a (12) na vhodný tvar popsaný rovnicemi (13), (14), (15) a (16).

$$\Delta \dot{\omega}(t) = \frac{k m_c}{a} \Delta \omega(t) - \frac{m_p g l m_c}{a} \Delta \theta(t) + \frac{m_p l b}{a} \Delta v(t) - \frac{m_p l}{a} \Delta u(t) \quad (13)$$

$$\Delta \dot{\theta}(t) = \Delta \omega(t) \quad (14)$$

$$\Delta \dot{v}(t) = \frac{m_p l k}{a} \Delta \omega(t) - \frac{m_p^2 l^2 g}{a} \Delta \theta(t) + \frac{b I}{a} \Delta v(t) - \frac{I}{a} \Delta u(t) \quad (15)$$

$$\Delta \dot{x}(t) = \Delta v(t) \quad (16)$$

Ze znalosti obecné rovnice stavového popisu

$$\begin{aligned} \Delta \frac{dx(t)}{dt} &= A \Delta x(t) + B \Delta u(t) \\ \Delta y(t) &= C \Delta x(t) + D \Delta u(t) \quad , \end{aligned} \quad (17)$$

kde je v našem případě stavový vektor:

$$x(t) = [\Delta \omega(t) \Delta \theta(t) \Delta v(t) \Delta x(t)]^T, \quad (18)$$

získáme stavové matice systému

$$A = \begin{bmatrix} \frac{k m_c}{a} & -\frac{m_p g l m_c}{a} & \frac{m_p l b}{a} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{m_p l k}{a} & -\frac{m_p^2 l^2 g}{a} & \frac{b l}{a} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{m_p l}{a} \\ 0 \\ -\frac{l}{a} \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad D = [0]. \quad (19)$$

Po dosazení hodnot těchto matic do obecné rovnice přenosu systému

$$G(s) = C(sI - A)^{-1} B + D \quad (20)$$

získáme přenos systému:

$$G(s) = \frac{-(l m_p a) s}{a^2 s^3 - (I a b + a k m_c) s^2 + (a g l m_c m_p - b k l^2 m_p^2 + I b k m_c) s - I b g l m_c m_p + b g l^3 m_p^3}. \quad (21)$$

## 2.2 Servomechanismus S1

Laboratorní model Servomechanismus S1 je systém vyrobený firmou Amira. Model je možné využít k výuce základního řízení (např. pomocí PID regulátorů) úhlové rychlosti  $\omega(t)$  nebo úhlu natočení hřídele  $\varphi(t)$ . Může se také použít k aplikaci Kalmanova filtru k odhadu neznámého zatěžovacího momentu na základě měření vstupního napětí a výstupních otáček hřídele či navrhnout složitější metody řízení - LQ a LQR regulátory. Model simuluje v praxi se vyskytující situace při zkoumání rychlostních a pozičních řídicích systémů. Regulace pozice (úhlu natočení) a rychlosti jsou v praxi používány u mnoha systémů, např. u různých robotů, manipulátorů apod. Využití najdeme také v dopravě, letectví, medicíně apod. Model servomechanismu S1 je zobrazen na obr. 7.



Obrázek 7: Servomechanismus S1

## 2.2.1 Schéma a konstrukce modelu

Model je tvořen dvěma identickými motory s pevně spojenou hřídelí (pružnost hřídele není uvažována). První motor (tzv. GENERÁTOR) simuluje proměnný zatěžovací moment, druhý motor (tzv. MOTOR) je buzen signálem regulátoru. Dále model obsahuje tachodynamo pro měření otáček motoru  $\omega(t)$  a IRC senzor pro měření úhlu natočení hřídele  $\varphi(t)$ . Celý systém lze potom rozdělit na 3 části: vstupně – výstupní kartu, výkonovou část a mechanickou část.

- **Univerzální vstupně – výstupní karta DAC98**

Karta obsahuje analogové a digitální V/ V plus encoder pro IRC čidlo. Pro tuto kartu bohužel není dostupný software schopný spolupracovat s programem Matlab, z toho důvodu je systém připojen přes V/ V kartu AD512, pro kterou jsou k dispozici ovladače pro Real Time Toolbox pro Matlab.

- **Výkonová část**

Výkonová část, tzv. ACTUATOR (přístrojová skříň), 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. Na obr. 8 a obr. 9 je přístrojová skříň zobrazena. Jak je z obrázků patrné, přístrojová skříň je složena z několika modulů, jejichž význam si nyní popíšeme.



Obrázek 8: Přední panel přístrojové skříně



Obrázek 9: Zadní panel přístrojové skříně

### 2.2.1.1 Přední panel přístrojové skříně

– *SERVO GENERATOR*

Modul obsahující zesilovač pro GENERÁTOR, který pracuje jako proudový regulátor (zdroj) s nulovou časovou konstantou.

konkrétní technické parametry:

vstupy	hodnota	jednotka
napájecí napětí	+35/ -35	V
řídící veličina	+10 až -10	V
zesílení	0,2	A/ V
časová konstanta	< 1	ms

Tabulka 2: Technické parametry modulu *SERVO GENERATOR* 1

výstupy	hodnota	jednotka
výstupní napětí	+35/ -35	V
měřený veličina	5	V/ A

Tabulka 3: Technické parametry modulu *SERVO GENERATOR* 2

– *SERVO MOTOR*

Modul obsahuje zesilovač pro MOTOR, který pracuje jako proudový regulátor. Časová konstanta tohoto regulátoru je nastavitelná přepínačem hodnot TIME1 a TIME2. V poloze TIME1 regulátor simuluje zpoždění prvního řádu v uzavřené smyčce s časovou konstantou přibližně 30 ms. V poloze TIME2 je regulátor v optimálním nastavení s minimální časovou konstantou.

konkrétní technické parametry:

<b>vstupy</b>	<b>hodnota</b>	<b>jednotka</b>
napájecí napětí	+35/ -35	V
řídící veličina	+10 až -10	V
zesílení	0,4	A/ V
časová konstanta TIME1	30	ms
časová konstanta TIME2	5	ms

Tabulka 4: Technické parametry modulu *SERVO MOTOR 1*

<b>výstupy</b>	<b>hodnota</b>	<b>jednotka</b>
výstupní napětí	+35/ -35	V
měřený proud	2,5	V/ A

Tabulka 5: Technické parametry modulu *SERVO MOTOR 2*

– *POWER SERVO*

- *System* indikuje připojení mechanického systému
- *Ready* ochranný štít je uzavřen
- *Analog PI* analogový regulátor (tento modul není součástí našeho zařízení)
- *PC* PC regulace - svítí při komunikaci s V/ V kartou
- *Extern* externí regulace - zapíná se přepínačem *Start* na modulu *EXTERN*
- *+35V, -35V* napájení pro zesilovače (servo motor a servo generátor)
- *Stop* odpojí vstupní signály zesilovačů

– *SENSOR*

Obsahuje 4 BNC – konektory s analogovými signály (napětí):

- *Tacho* signál z tachodynamu (2.5 mV/ ot. za min)
- *I – Motor* proud tekoucí kotvou MOTORU (0.4 V/ A)
- *I – Generator* proud tekoucí kotvou GENERÁTORU (0.2 V/ A)
- *Index* signál z inkrementálního čidla (jeden puls/ ot.)

konkrétní technické parametry:

BNC - KONEKTORY	hodnota	jednotka
TACHO	+10 až -10	V
převodní konstanta	2,5	mV/ Rpm
I – MOTOR	+10 až -10	V
převodní konstanta	0,4	A/ V
I - GENERATOR	+10 až -10	V
převodní konstanta	0,2	A/ V
INDEX	1	TTL puls/ ot.

Tabulka 6: Technické parametry modulu *SENSOR*

– *POWER*

Tento modul obsahuje zdroje pro digitální elektroniku, inkrementální čidlo, zesilovač signálu z tachodynamu a zesilovače pro snímání proudů do motorů.

- +15V
- -15V
- +5V

– *INPUT EXTERN – CONTROLLER*

- *I – Motor* vstup pro řídicí signál MOTORU (rozsah ±10 V, ±2.37 A)
- *I – Generator* vstup pro řídicí signál GENERÁTORU (rozsah ±10 V, ±2.37 A)
- *Start* připojí napětí z BNC - konektorů k zesilovačům pro motory (pokud neřídí jiný regulátor), dalším stisknutím odpojí tyto dva signály



### 2.2.1.2 Zadní panel přístrojové skříně

- *Control Signal Motor*
- *Control Signal Generator* řídicí signály z regulátorů pro motory
- *PC – Connector* připojení k universální V/ V kartě
- *System* připojení mechanického systému, výkonová část

konkrétní technické parametry:

BNC - KONEKTORY	hodnota	jednotka
CONTROL SIGNAL MOTOR	+10 až -10	V
převodní konstanta	2,5	V/ A
CONTROL SIGNAL GENERATOR	+10 až -10	V
převodní konstanta	5	V/ A

Tabulka 7: Technické parametry BNC – konektorů

KONEKTOR							
pin	reservace		pin	reservace		pin	reservace
a1	Inc. chB-		b1	Inc. chB+		c1	n. c.
a2	Inc. chA-		b2	Inc. chA+		c2	n. c.
a3	Inc. Index-		b3	Inc. Index+		c3	n. c.
a4	Kryt		b4	Kryt		c4	n. c.
a5	DGND		b5	+5 V dig.		c5	n. c.
a6	AGND		b6	TACHO		c6	n. c.
a7	n. c.		b7	LED/ sys		c7	n. c.
a8	PE		b8	Stop/ Ready		c8	n. c.
a9	Generator-		b9	Generator+		c9	n. c.
a10	Motor-		b10	Motor+		c10	n. c.

Tabulka 8: Technické parametry konektoru

- **Mechanická část**

Tato část je tvořena motory a senzory rychlosti a polohy.

konkrétní technické parametry:

<b>vstupy</b>	<b>hodnota</b>	<b>jednotka</b>
jmenovité napětí	24	V
jmenovité otáčky	3000	Rpm
jmenovitý proud	2	A
jmenovitý výkon	30	W
moment setrvačnosti	$17,7 \cdot 10^{-6}$	kg m <sup>2</sup>
jmen. točící moment	$9,6 \cdot 10^{-2}$	N m
start. točící moment	0,4	N m
třecí točící moment	0,02	N m
mech. časová konst.	15,4	ms
odpor vedení	3,13	Ω
indukce kotvy	3	mH
odpor kotvy	2,6	Ω
napěťová konst.	6,27	mV/ Rpm
momentová konst.	0,06	N m/ A
max. špičkový proud	16	A
el. časová konst.	0,96	ms

Tabulka 9: Technické parametry motorů

<b>T 9.05</b>	<b>hodnota</b>	<b>jednotka</b>
jmen. proud	10	mA
moment setrvačnosti	$10,6 \cdot 10^{-6}$	kg m <sup>2</sup>
celkový odpor	23	Ω

Tabulka 10: Technické parametry tachodynamy

<b>RI58</b>	<b>hodnota</b>	<b>jednotka</b>
moment setrvačnosti	$1,4 \cdot 10^{-6}$	kg m <sup>2</sup>
rozlišení	1024	linek/ ot.

Tabulka 11: Technické parametry inkrementálního čidla

VLNOVEC	hodnota	jednotka
moment setrvačnosti	$33 \cdot 10^{-6}$	kg m <sup>2</sup>
torsní pružnost	4200	N m/ rad

Tabulka 12: Technické parametry vlnovce

Laboratorní model se zapíná vypínačem, který se nachází na zadní stěně přístrojové skříně. Zapnutí zdroje je indikováno zelenou LED diodou na tomto zdroji. Přepínač Time by měl být v poloze 1.

## 2.2.2 Informace pro studenty

- **Obecné informace**

Stabilita systému je podmíněna volbou výstupní veličiny. Volbou výstupní veličiny  $\omega(t)$  získáme lineární stabilní systém, při volbě výstupu  $\varphi(t)$  je systém nestabilní díky vzniklému astatismu. Model servomechanismu je možné řídit pomocí PC s programem Matlab/ Simulink a Real Time Toolboxu, kde jsou všechny veličiny převedeny na bezrozměrná čísla obvykle v intervalu (-1, +1).

- **Pokyny pro práci s modelem**

V případě poruchy je možné řídit se instrukcemi podle tab. 13.

porucha	odstranění poruchy
LEDky nesvítí	zkontrolujte pojistky vzadu na přístrojové skříně
LEDka +35 V nesvítí	zkontrolujte pojistku v modulu POWER SERVO
LEDka -35 V nesvítí	zkontrolujte pojistku v modulu POWER SERVO
LEDky +15 V a -15 V nesvítí	zkontrolujte pojistku v modulu POWER
LEDka +5 V nesvítí	zkontrolujte pojistku v modulu POWER
LEDka „System“ nesvítí	zkontrolujte spojení přístrojové skříně a systému
nelze zvolit požadovaný regulátor	zkontrolujte, zda není zvolen jiný regulátor (LEDky na modulu POWER SERVO) a LEDku „Ready“ (štít je zavřený)
regulátor je povolen, ale motor se netočí	zkontrolujte LEDky zdrojů

Tabulka 13: Lokace a odstranění poruch

- **Důležité vztahy**

Při popisu systému vycházíme z následujících rovnic:

$$L \frac{di(t)}{dt} = -Ri(t) - k_e \omega(t) + u(t) \quad (22)$$

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = k_m i(t) - b \omega(t) - M_z(t) \quad (23)$$

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t) \quad (24)$$

Význam použitých symbolů:

$i(t)$	[A]	proud motoru
$\omega(t)$	[rad s <sup>-1</sup> ]	otáčky motoru
$\varphi(t)$	[rad]	úhel natočení hřídele
$u(t)$	[V]	vstupní napětí motoru
$M_z$	[N m]	vnější zatěžovací moment
$R$	[Ω]	elektrický odpor motoru
$L$	[H]	indukčnost motoru
$J$	[kg m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	moment setrvačnosti motoru
$k_m$	[kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> ]	mechanická konstanta motoru
$k_e$	[s V s <sup>-1</sup> ]	elektrická konstanta motoru
$b$	[kg m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	konstanta tření motoru

- **Volba vstupních a výstupních veličin systému**

Jako vstupní veličinu volíme vstupní napětí motoru  $u(t)$ , výstupní veličina, jak bylo uvedeno v obecných informacích, může být  $\omega(t)$  nebo  $\varphi(t)$ .

### 2.2.3 Informace pro vyučující

Ze znalosti stavového vektoru  $x(t) = [i(t) \omega(t) \varphi(t)]^T$  (25)

a úpravou rovnic (22) a (23) sestavíme stavové matice systému:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} & 0 \\ \frac{k_m}{J} & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad D = [0] \quad . \quad (26)$$

Při volbě výstupní veličiny

$$1) \quad y(t) = \omega(t) \quad (27)$$

$$\text{platí } C = [0 \quad 1 \quad 0] \quad . \quad (28)$$

Volbou

$$2) \quad y(t) = \varphi(t) \quad (29)$$

$$\text{platí } C = [0 \quad 0 \quad 1] \quad . \quad (30)$$

Dosazením hodnot stavových matic do obecné rovnice pro určení přenosu systému (20) získáme přenos systému:

1)

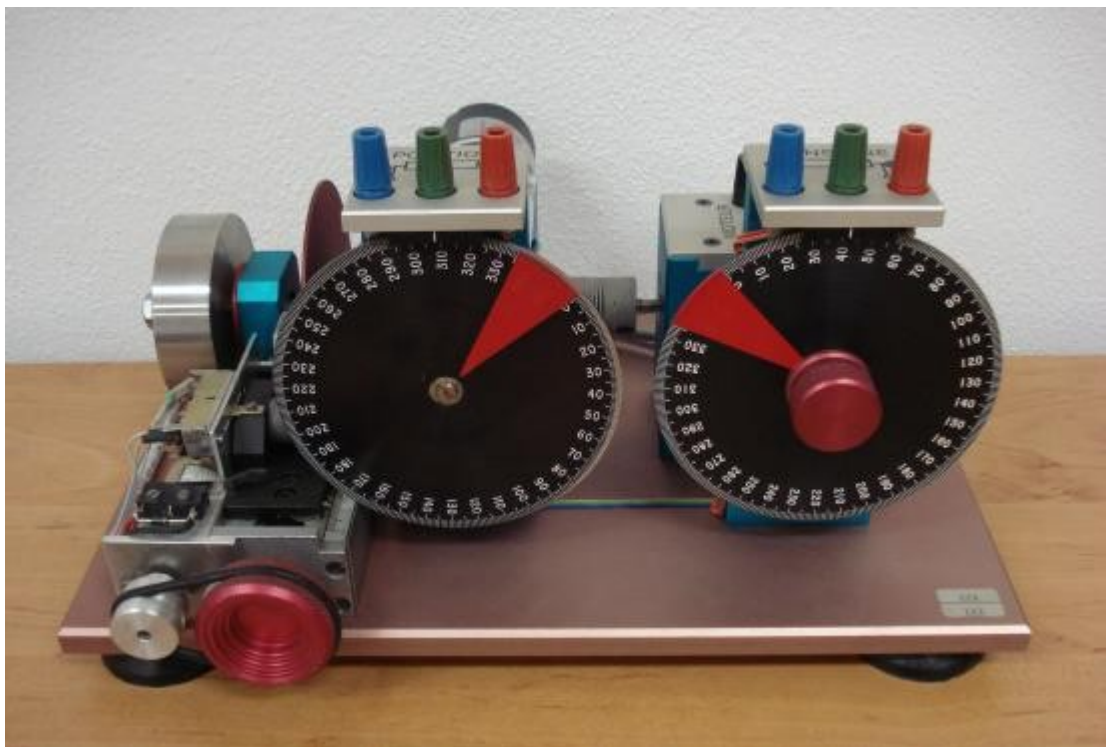
$$G(s) = \frac{k_m}{JLs^2 + (JR + Lb)s + Rb + k_e k_m} \quad (31)$$

2)

$$G(s) = \frac{k_m}{s(JLs^2 + (JR + Lb)s + Rb + k_e k_m)} \quad . \quad (32)$$

## 2.3 Servomechanismus S2

Základnem tohoto laboratorního přípravku je model servomechanismu IfA – 122, současná podoba je výsledkem úprav z roku 2007 Alexandrem Cillerem v rámci jeho bakalářské práce [3] a z roku 2009, kdy úpravy dokončil Adam Hořčica [4]. Model Servomechanismus S2 je využíván pro řízení rychlosti a úhlu natočení servomechanismu (např. pomocí PID regulátorů, lead – lag regulátorů). V praxi se se systémy simulovanými tímto modelem setkáváme v mnoha situacích, např. při zkoumání rychlostních a pozičních řídicích systémů. Regulace pozice (úhlu natočení) a rychlosti jsou v praxi používané u mnoha systémů, např. u různých robotů, manipulátorů apod. Využití najdeme také v dopravě, letectví, medicíně apod. Fotografie laboratorního modelu je na obr. 10.



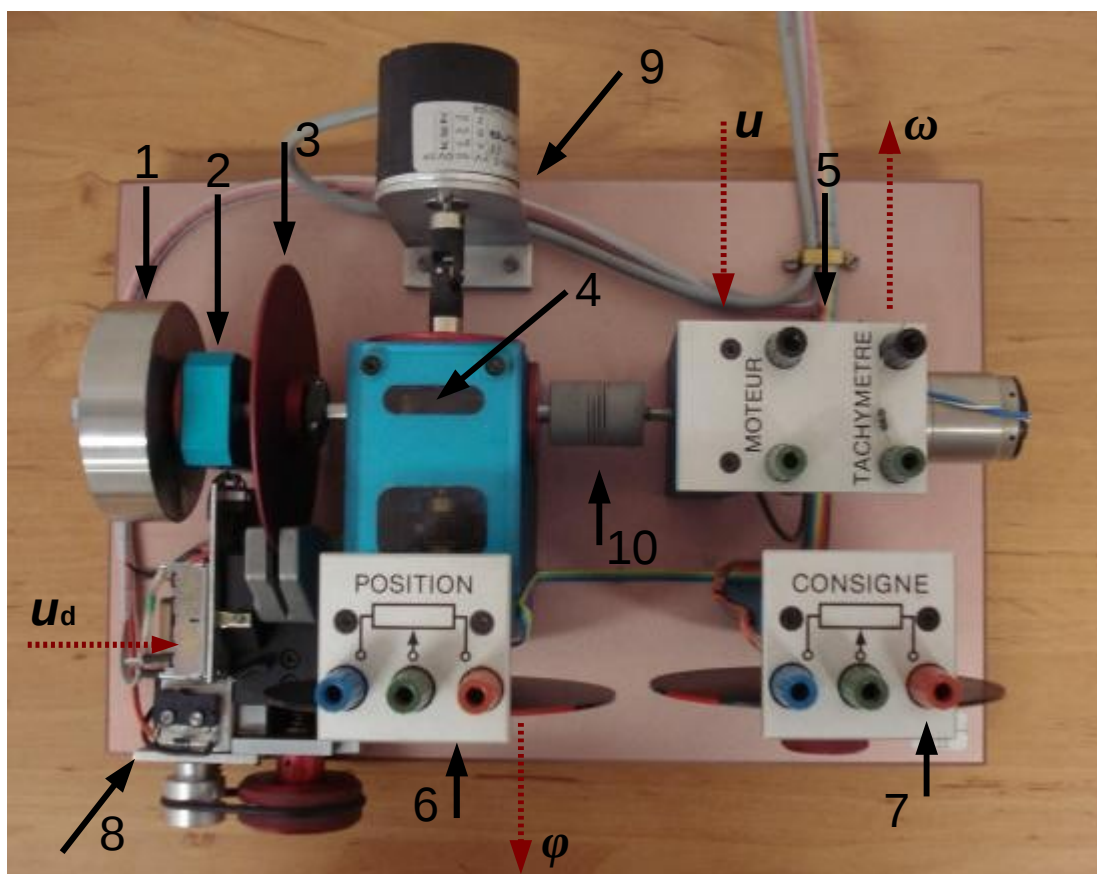
Obrázek 10: Servomechanismus S2

### 2.3.1 Schéma a konstrukce modelu

Model servomechanismu S2 je tvořen 2 částmi: vlastním modelem servomechanismu a přístrojovou skříní.

- **Vlastní model servomechanismu**

Vlastní model s popisem jednotlivých částí znázorňuje obr. 11 a tab. 14.



Obrázek 11: Popis částí vlastního modelu S2

označení v obrázku	část
1	výměnný kotouč
2	ložisko
3	tlumící kotouč
4	převodovka
5	motor s tachodynamem
6	ukazatel otáček
7	potenciometr – rychlost otáčky
8	motor pro nastavení tlumení
9	IRC
10	pevná spojka

Tabulka 14: Popis částí vlastního modelu S2

Základem modelu je stejnosměrný motor, na jehož hřídeli je tachodynamo, kterým lze měřit rychlost otáčení motoru, jeden ze 3 výměnných disků (parametry jednotlivých disků uvedeny v tab. 16), kterými se mění moment setrvačnosti, převodovka, kotouč setrvačnicku a disk magnetického tlumení. Úroveň tlumení lze regulovat pomocí pohyblivého magnetu ovládaného druhým motorem. Tlumení je způsobeno vířivými proudy, které vznikají v hliníkovém disku. Model je též vybaven dvěma ukazateli:

#### Ukazatel úhlu natočení hřídele

S modelem je spojen přes převodovku (1:60), tak že na jednu otáčku ukazatele se hřídel otočí právě 60 krát. Zároveň je ukazatel spojen s potenciometrem s přerušením dráhy na úhlu  $0^\circ$ , který je využit pro snímání výstupního úhlu natočení.

#### Ukazatel zadání požadovaného úhlu natočení resp. otáček hřídele

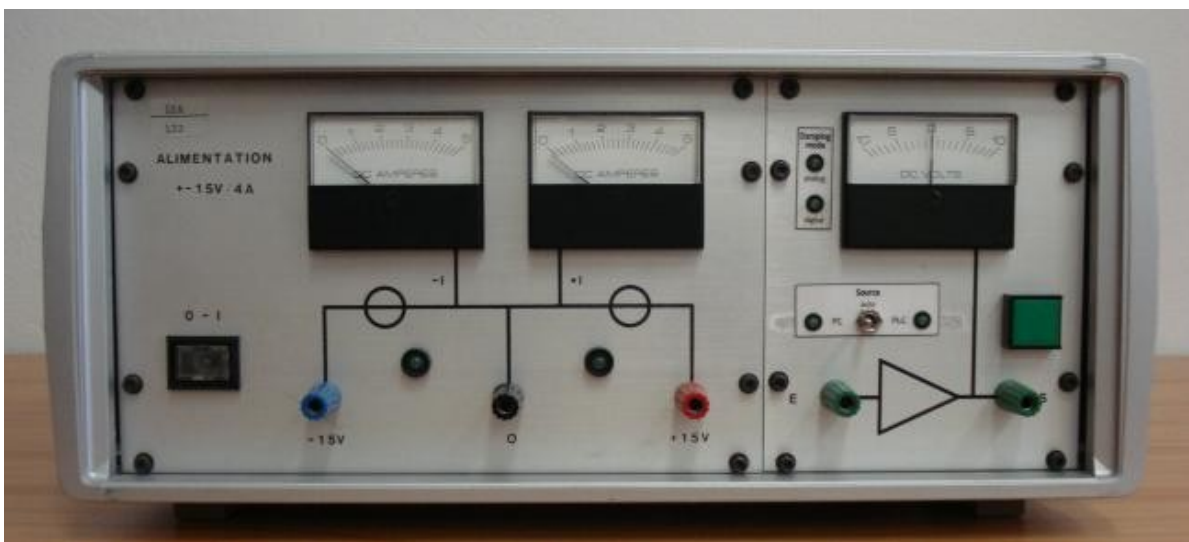
Tento ukazatel je využíván pro ruční řízení rychlosti a úhlu natočení servomechanismu.

Akční veličiny představují  $u$  (vlastní motor servomechanismu) a  $u_d$  (motor pro nastavení úrovně tlumení).



- **Přístrojová skříň se zdrojem a zesilovačem**

Výkonový zesilovač představuje řízený zdroj napětí, který výkonově zesiluje signál z měřicí karty. Zdroj zajišťuje napájení potenciometrů, pomocí nichž rozvažujeme napětí následně snímaná měřicí kartou. Model je spojen s PC pomocí karty MF614. Model se zapíná spínačem na levé straně přístrojové skříň. Přístrojová skříň je zobrazena na obr. 12.



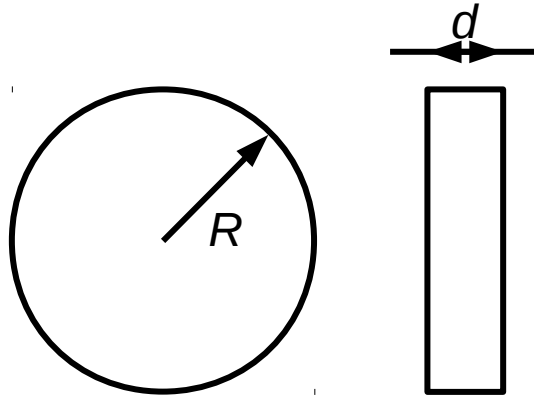
Obrázek 12: Přístrojová skříň modelu S2

V tab. 15 jsou uvedeny konkrétní technické parametry modelu.

veličina	hodnota	jednotka
nominální napětí motoru	10	V
nominální proud motoru	2,5	A
odpor vinutí kotvy	6,2	W
indukčnost vinutí kotvy	0,75	mH
moment setrvačnosti bez závaží	$30 \cdot 10^{-6}$	$\text{kg m}^2$
konstanta tlumení	$3 \cdot 10^{-5}$	$\text{N m s rad}^{-1}$
momentová konstanta motoru	$32 \cdot 10^{-3}$	$\text{M m A}^{-1}$
konstanta tachodynamy	27,11	$\text{rad s}^{-1} \text{V}^{-1}$

Tabulka 15: Technické parametry modelu S2

Další důležité parametry se týkají vyměnitelných disků. Jsou zaznamenány v tab. 16, význam veličin zobrazuje obr. 13.



Obrázek 13: Význam parametrů vyměnitelného disku

disk č.	$d$ [mm]	$R$ [mm]	$m$ [kg]	$J$ [kg m <sup>2</sup> ]
1	10	28	0,193	$75,6 \cdot 10^{-6}$
2	20	34	0,578	$330,5 \cdot 10^{-6}$
3	28,6	44,5	1,401	$1,387 \cdot 10^{-3}$

Tabulka 16: Parametry výměnných disků

## 2.3.2 Informace pro studenty

- **Obecné informace**

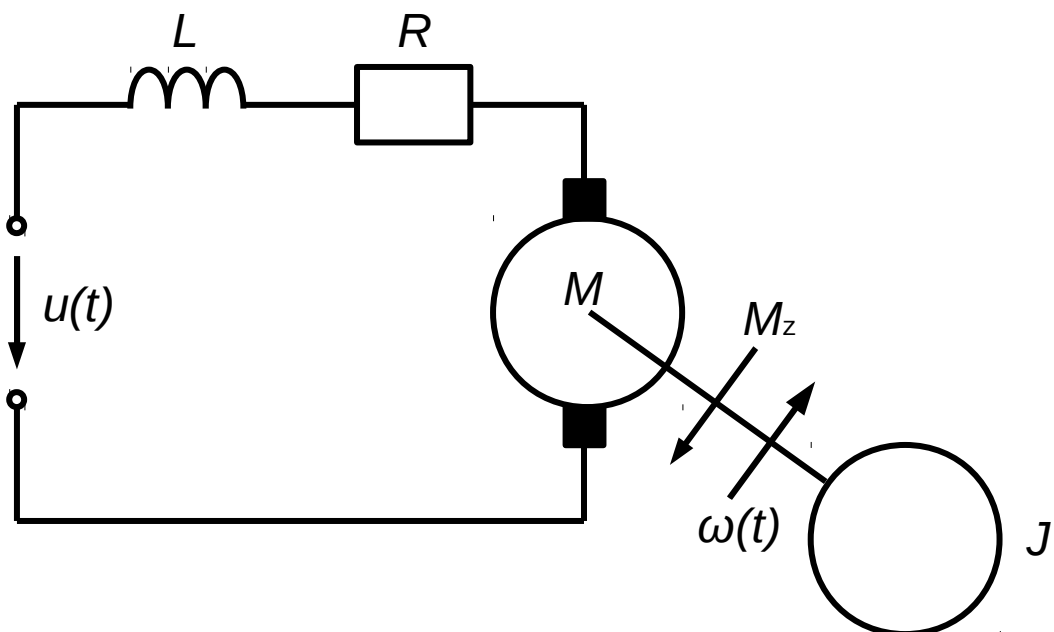
Při volbě výstupní veličiny úhlová rychlost  $\omega(t)$  je systém lineární stabilní. Druhá možnost je volit jako výstupní veličinu polohu (úhel)  $\varphi(t)$ , jež je integrací rychlosti, tj. v laplaceově transformaci dělíme laplaceovým operátorem, potom systém popisuje přenos s astatismem, tzn. že systém je nestabilní. Model servomechanismu je možné řídit pomocí PC s programem Matlab/ Simulink a Real Time Toolboxu, kde jsou všechny veličiny převedeny na bezrozměrná čísla obvykle v intervalu (-1, +1).

- **Pokyny pro práci s modelem**

- Měřicí kotouč výstupní polohy je pouze přilepen. Netočte za něj!

- **Důležité vztahy**

Model lze z fyzikálního hlediska rozdělit na 2 části jak je patrné z obr. 14: mechanickou a elektrickou. V mechanické části jsou zahrnuty součty jednotlivých momentů, elektrická část vychází z 2. Kirchhoffova zákona, který říká, že algebraický součet napětí ve smyčce je roven nule.



Obrázek 14: Náhradní schéma modelu S2

Pro matematické vyjádření modelu vycházíme z náhradního schématu (obr. 14). Zavedeme následující proměnné:

$u(t)$	[V]	vstupní napětí na motoru
$i(t)$	[A]	proud kotvou
$\omega(t)$	[rad s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost hřídele
$\varphi(t)$	[rad]	úhel natočení hřídele
$L$	[H]	celková indukčnost kotvy
$R$	[Ω]	odpor kotvy

$J$	[kg m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti
$J_0$	[kg m <sup>2</sup> ]	setrvačnost hřídele
$J_d$	[kg m <sup>2</sup> ]	setrvačnost námi použitého disku č. 2
$B$	[N m s rad <sup>-1</sup> ]	tlumení
$B_0$	[N m s rad <sup>-1</sup> ]	tlumení
$k_m$	[N m A <sup>-1</sup> ]	momentová konstanta motoru
$k_\omega$	[rad s <sup>-1</sup> V <sup>-1</sup> ]	konstanta tachodynamy.

Rovnice elektrické smyčky podle obr. 14 je

$$u(t) - E(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (33)$$

a zároveň elektromotorická síla motoru je dána vztahem

$$E(t) = k_m \omega(t) \quad (34)$$

Závislost mezi elektrickou a mechanickou částí motoru vyjadřuje vztah pro točivý moment  $M_m$  (35), který je produkován motorem.

$$M_m = k_m i(t) \quad (35)$$

V každém časovém okamžiku platí:

$$M_m = M + M_z + M_{BO} \quad , \text{ kde} \quad (36)$$

$M$  [N m] moment vyvolaný setrvačností rotující části

$M_z$  [N m] zatěžovací moment magnetického kotouče

$M_{BO}$  [N m] brzdný moment způsobený tlumením.

Pro  $M_{BO}$  platí

$$M_{BO} = B_0 \omega(t) \quad (37)$$

Moment  $M_z$  se mění nelineárně v závislosti na otáčkách motoru  $\omega(t)$ . Vztah linearizujeme aproximací přímkou:

$$M_z = B \omega(t) \quad (38)$$

Použitím 2. Newtonova zákona pro rotaci lze pro  $M$  definovat rovnici

$$M = J \frac{d\omega(t)}{dt} , \quad (39)$$

kde pro celkový moment setrvačnosti  $J$  platí

$$J = J_0 + J_d . \quad (40)$$

Dále platí vztah

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t) . \quad (41)$$

- **Volba vstupních a výstupních veličin systému**

Jako vstupní veličinu volíme vstupní napětí  $u(t)$ , výstupní veličinu volíme, jak již bylo řečeno v obecných informacích, buď úhlovou rychlost  $\omega(t)$  nebo polohu (úhel)  $\varphi(t)$ .

### 2.3.3 Informace pro vyučující

Dosazením (34) do (33) a vyjádřením derivace proudu získáme rovnici

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} (u(t) - Ri(t) - k_m \omega(t)) , \quad (42)$$

která popisuje elektrickou část motoru.

Dosazením (35), (36), (37), (38) a (40) do (39) a následným vyjádřením  $\frac{d\omega(t)}{dt}$  představující úhlové zrychlení  $\varepsilon(t)$  [rad s<sup>-2</sup>] obdžime rovnici mechanické soustavy

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J_0 + J_d} (k_m i(t) - (B + B_0) \omega(t)) . \quad (43)$$

#### Stavový popis modelu

Využitím rovnic (41), (42), (43) a volbou stavového vektoru

$$x(t) = [i(t) \omega(t) \varphi(t)]^T \quad (44)$$

získáme matice systému pro

$$1) \quad y(t) = \omega(t) \quad (45)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_m}{L} & 0 \\ \frac{k_m}{J} & -\frac{B+B_0}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad 1 \quad 0] \quad D = [0] \quad (46)$$

a po dosazení hodnot matic do rovnice (20) je přenos systému

$$G(s) = \frac{k_m}{JLs^2 + (JR + L(B+B_0))s + R(B+B_0) + k_m^2} \quad (47)$$

2) Výstupem je poloha (úhel)  $\varphi(t)$ , jež je integrací úhlové rychlosti  $\omega(t)$

$$y(t) = \varphi(t) \quad (48)$$

tím se změní matice  $C$ :  $C = [0 \quad 0 \quad 1]$  (49)

a dosazením hodnot matic do rovnice (20) získáme přenos systému

$$G(s) = \frac{k_m}{s(JLs^2 + (JR + L(B+B_0))s + R(B+B_0) + k_m^2)} \quad (50)$$

## 2.4 Kulička na tyči K1

Model Kulička na tyči K1 simuluje problémy objevující se při řízení nestabilních systému jako např. v letectví, při startu raketoplánu, řízení exotermní reakce v chemickém průmyslu, řízení vertikální polohy plazmatu v tokamaku apod. Ve výuce můžeme model využít např. k aplikaci základního řízení (PID regulace) náklonu tyče  $\alpha$  pomocí vstupu  $\alpha_{\text{ref}}$  nebo polohy kuličky  $x(t)$  pomocí vstupu  $\alpha_{\text{ref}}$ . Dále je možné použít Kalmanův filtr k odhadování náklonu tyče  $\alpha(t)$  na základě měření vstupu  $\alpha_{\text{ref}}$  a polohy kuličky  $x(t)$  či navrhnout pokročilé metody řízení jako je LQ regulátor nebo explicitní MPC regulátor. Laboratorní model je zobrazen na obr. 15.



Obrázek 15: Kulička na tyči K1

### 2.4.1 Schéma a konstrukce modelu

Model kuličky K1 je složen z elektromotoru, tyče a ocelové kuličky, která se volně pohybuje v kolejnicích umístěných na tyči. Elektromotor je řízen ve zpětné vazbě P (proporcionálním) regulátorem a umožňuje naklánět tyč přibližně v rozsahu  $\pm 10^\circ$  od vodorovné polohy. Vstupem modelu je pak žádaný úhel náklonu tyče  $\alpha_{\text{ref}}$ . Skutečný úhel náklonu tyče  $\alpha(t)$  je snímán servopotenciometrem připevněným na zadní část osy tyče. Kulička se pohybuje po tyči, respektive po dvou rovnoběžných drátech, pomocí kterých je také snímána její poloha  $x(t)$ . Jeden z drátů je připojen na zdroj napětí a kulička mezi dráty funguje jako jezdec potenciometru, který převádí část napětí na druhý drát. Všechny veličiny jsou převedeny na elektrická napětí. Součástí modelu je přístrojová skříň obsahující zdroj (obr. 16). Model se zapíná páčkovým vypínačem, který se nachází na zadní stěně tohoto zdroje a zapnutí je indikováno zelenou LED diodou na tomto zdroji. Kapacitu u filtru pro snímání polohy kuličky je vhodné nastavit na hodnotu 1M.

Přepínač pro ovládání náklonu tyče je pro komunikaci s Matlabem třeba nastavit do polohy EXT. Nastavením přepínače do polohy MAN je náklon tyče možné ovládat ručně levým potenciometrem.



Obrázek 16: Přístrojová skříň modelu K1

## 2.4.2 Informace pro studenty

- **Obecné informace**

Z matematického hlediska model představuje nelineární astatický systém. Model servomechanismu je možné řídit pomocí PC s programem Matlab/ Simulink a Real Time Toolboxu, kde jsou všechny veličiny převedeny na bezrozměrná čísla obvykle v intervalu  $(-1, +1)$ . Náklon tyče je také možné řídit ručně (levým potenciometrem na zdroji).

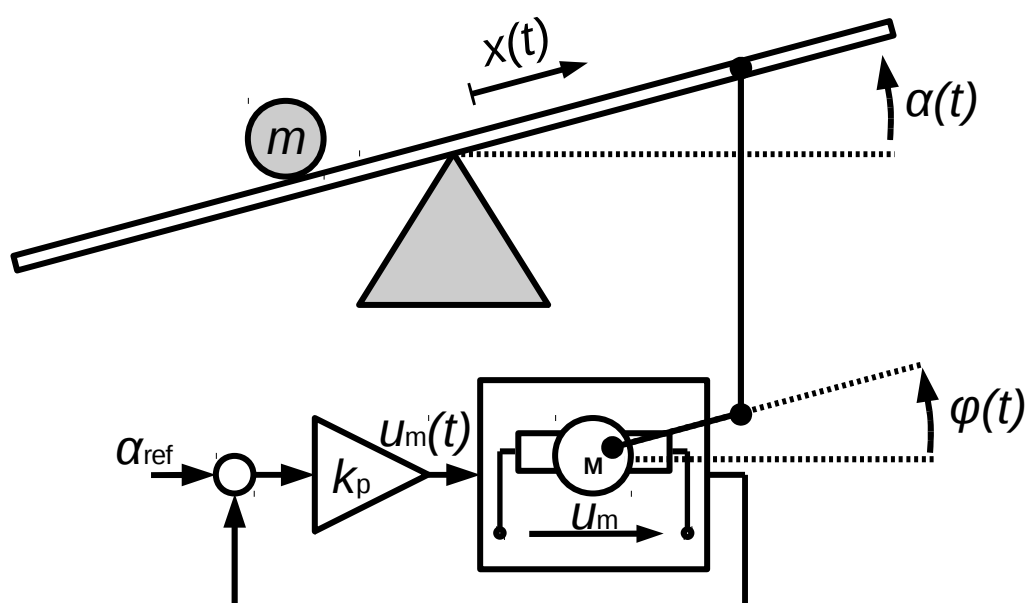


- **Pokyny pro práci s modelem**

- Výchozí náklon tyče volte nulový, výchozí polohu kuličky od 10 cm od středu tyče na levo až do kraje!
- Hodnotu požadovaného náklonu tyče po skončení měření po případné změně vraťte na nulovou hodnotu!

- **Důležité vztahy**

Schématicky zobrazený model je na obr. 17.



Obrázek 17: Náhradní schéma modelu K1

Význam použitých symbolů:

$\alpha_{\text{ref}}$	[°]	žádaný náklon tyče
$\alpha(t)$	[rad]	skutečný úhel náklonu tyče
$x(t)$	[m]	poloha kuličky
$k_p$	[-]	zesílení P regulátoru
$u_m(t)$	[V]	napětí motoru
$\varphi(t)$	[rad]	úhel natočení hřídele motoru
$m$	[kg]	hmotnost kuličky

Pro matematický popis modelu využijeme rovnice popisující činnost stejnosměrného motoru (51), (52) a (53).

$$L \frac{di(t)}{dt} = -Ri(t) - k_e \omega(t) + u(t) \quad (51)$$

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = k_m i(t) - b \omega(t) - M_z(t) \quad (52)$$

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t) \quad (53)$$

Význam použitých symbolů:

$i(t)$	[A]	proud motoru
$\omega(t)$	[rad s <sup>-1</sup> ]	otáčky motoru
$u(t)$	[V]	vstupní napětí motoru
$M_z$	[N m]	vnější zatěžovací moment
$R$	[Ω]	elektrický odpor motoru
$L$	[H]	indukčnost motoru
$J$	[kg m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	moment setrvačnosti motoru
$k_e$	[s V <sup>-1</sup> ]	elektrická konstanta motoru
$k_m$	[kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> ]	mechanická konstanta motoru
$b$	[kg m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	konstanta tření motoru

Při odvození rovnic popisující chování kuličky vycházíme ze vztahu pro zachování mechanické energie, zároveň uvažujeme vliv tření kuličky o dráty. Rovnice jsou potom

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{g}{1 + \frac{2}{5} \left(\frac{R_k}{r}\right)^2} \sin(\alpha(\varphi)) - \delta v(t) \quad (54)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = v(t) \quad (55)$$

Význam použitých symbolů:

$v(t)$	[m s <sup>-1</sup> ]	rychlost pohybu kuličky
$g$	[m s <sup>-2</sup> ]	gravitační zrychlení
$R_k$	[m]	poloměr kuličky
$r$	[m]	poloměr odvalování kuličky mezi dráty
$\delta$	[-]	koefficient tření

- **Volba vstupních a výstupních veličin systému**

Jako vstupní veličinu volíme  $\alpha_{ref}$ , výstupní veličiny jsou potom  $\alpha(t)$  a  $x(t)$ .

### 2.4.3 Informace pro vyučující

Lze předpokládat, že proudová rovnice odezní podstatně rychleji než rovnice mechanická,

můžeme tedy uvažovat, že  $\frac{di(t)}{dt} = 0$  . (56)

Z náhradního schématu na obr. 17 sestavíme rovnici pro  $u(t)$ . Platí, že

$$u(t) = k_p (\alpha_{ref}(t) - \varphi(t)) \quad . \quad (57)$$

Kombinací rovnic (51), (52), (53), (56) a (57) a za předpokladu, že tyč zpětně neovlivňuje chování motoru, tzn.  $M_z = 0$  N m, získáme rovnici

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \left(-\frac{k_m k_e}{JR} - \frac{b}{J}\right) \omega(t) + \frac{k_m k_p}{JR} (\alpha_{ref}(t) - \varphi(t)) \quad . \quad (58)$$

Rovnice (58) spolu s rovnicí (53) tvoří stavové rovnice popisující chování motoru.

Závislost úhlu náklonu tyče na úhlu natočení hřídele  $\alpha(\varphi)$  je lineární, můžeme tedy psát

$$\alpha(\varphi) = k \varphi \quad . \quad (59)$$

#### **Stavový popis modelu**

Stavový vektor volíme  $x(t) = [\omega(t) \varphi(t) v(t) x(t)]^T$  . (60)

Provedeme linearizaci v obecném pracovním bodě a získáme stavové matice popisující systém:

$$\begin{aligned}
A &= \begin{bmatrix} -\frac{k_m k_e}{JR} - \frac{b}{J} & -\frac{k_m k_p}{JR} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{g}{1 + \frac{2}{5} \left(\frac{R_k}{r}\right)^2} \cos(k\alpha_0) & -\delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} \frac{k_m k_p}{JR} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & C &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
D &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{61}$$

Dosažením hodnot matic do rovnice (20) získáme přenos systému.

Přenos  $\alpha_{\text{ref}}$  na  $\alpha$ :

$$G(s) = \frac{\frac{k_m k_p}{JR}}{s^2 - \left(-\frac{k_m k_e}{JR} - \frac{b}{J}\right)s + \frac{k_m k_p}{JR}} \tag{62}$$

Přenos  $\alpha_{\text{ref}}$  na  $x$ :

$$G(s) = \frac{\left(\frac{k_m k_p}{JR}\right) \left(\frac{g}{1 + \frac{2}{5} \left(\frac{R_k}{r}\right)^2}\right) \cos(k\alpha_0)}{s(s + \delta) \left(s^2 - \left(-\frac{k_m k_e}{JR} - \frac{b}{J}\right)s + \frac{k_m k_p}{JR}\right)} \tag{63}$$

## 2.5 Tepelná soustava T1

Laboratorní model Tepelná soustava T1 slouží k demonstraci, identifikaci a testování řídicích algoritmů pro soustavy s velmi dlouhými časovými konstantami. Typické aplikace jsou různé tepelné systémy, vytápěcí systémy, sklářské pece, kalcinační rotační pece apod. Fotografie modelu je na obr. 18.



Obrázek 18: Tepelná soustava T1

### 2.5.1 Schéma a konstrukce modelu

Tepelná soustava je tvořena dvěma relativně samostatnými systémy s různými časovými konstantami, které jsou představovány rezistory s odlišně provedenou izolací. Tyto rezistory jsou umístěny uprostřed chladičů pro procesory PC. Jejich teplota je měřena pomocí polovodičových prvků. Chladiče jsou připevněny na černé krabici, spolu s přepínačem pro výběr jedné ze dvou tepelných soustav a indikační dvoubarevné diody ukazující vybranou soustavu. V krabici je umístěno řízení a veškerá obslužná elektronika. Do čela krabice jsou vyvedeny ovládací prvky. V zadní části jsou konektory pro připojení vzdáleného řízení a napájení. Vzdálené řízení umožňuje

připojení jak k počítači, tak i k průmyslovému řídicímu systému. Soustava je napájena ze stabilizovaného zdroje B2 – 23. Model se spouští páčkovým přepínačem na tomto zdroji. Detaily modelu jsou znázorněny na obr. 19, obr. 20 a obr. 21.



Obrázek 19: Pohled na model shora



Obrázek 20: Zadní panel modelu

## 2.5.2 Informace pro studenty

- **Obecné informace**









Model tepelné soustavy je možné ovládat ručně nebo vzdáleně - výběr způsobu řízení je volen z panelu současně s volbou typu vzdáleného řízení: PC, PLC nebo rezervní řízení. Situace je znázorněna na obr. 21.



Obrázek 21: Výběr způsobu řízení

### Ruční řízení

V tomto režimu řízení je možné na panelu nastavit tepelný výkon a regulaci otáček větráku chlazení. Tepelný výkon se nastavuje spojitě otočným potenciometrem, otáčky se nastavují dvěma přepínači na čtyři různé rychlosti (viz tab. 17). Sepnutí přepínače je inicializováno rosvícenou diodou nad přepínačem. Ručně se nastavují otáčky větráku také při vzdáleném řízení z PC (Matlab). Teplotu soustavy je možné sledovat pouze na vzdáleném systému.

přepínač 1	přepínač 1	rychlost
		nejvyšší
		střední
		nejnižší
		nulová

Tabulka 17: Nastavení rychlostí větráku

### PC

Pro připojení modelu k PC je použita multifunkční měřicí karta MF614. Model servomechanismu se řídí v programu Matlab/ Simulink s Real Time Toolboxem, kde jsou všechny veličiny převedeny na bezrozměrná čísla obvykle v intervalu (-1, +1).

### PLC

Pro ovládání pomocí PLC je nutné nastavit potenciometr do polohy A-B. Soustava je připojena k automatu Allen–Bradley SLC 500. Konfigurace automatu je následující:

0. 1747-L532E 5/03 CPU - 16K Mem. OS302 Series C
1. 1747-DCM-FULL Node Adapter Module (Full Rack)
2. 1746-OB8 8-Output (TRANS-SRC) 10/50 VDC
3. 1746-IB16 16-Input (SINK) 24 VDC
- 4.
5. 1746-FIO4V Fast Analog 2 Ch In/2 Ch Volt. Out
6. 1746-IB32 32-Input (SINK) 24 VDC
7. 1746-OB16 16-Output (TRANS-SRC) 10/50 VDC

Připojení soustavy je na následující adresy:

adresa	symbol	popis
I:5.0	TEPLOTA	teplota soustavy
I:5.1	POTENCIOMETR	natočení potenciometru
I:6.0/ 0	SOUSTAVA 1	volba soustavy 1
I:6.0/ 1	SOUSTAVA 2	volba soustavy 2
I:6.0/ 2	TLACITKO 1	stav tlačítka 1
I:6.0/ 3	TLACITKO 2	stav tlačítka 2
N7: 0/ 0	RSV_PREVZETI	převzetí řízení do AB
N7: 0/ 1	RSV_O_VETRAK1	nastavení rychlosti větráku 1
N7: 0/ 2	RSV_O_VETRAK2	nastavení rychlosti větráku 2
N7: 0/ 15	RUCNE	ruční řízení z RSView
O: 5.0	SET_TEPLOTA	nastavení požadované teploty
O: 7.0/ 0	PREVZETI	převzetí řízení do AB
O: 7.0/ 1	O_VETRAK1	nastavení rychlosti větráku 1
O: 7.0/ 2	O_VETRAK2	nastavení rychlosti větráku 2

Tabulka 18: Připojení soustavy k PLC

- **Důležité vztahy**

Při odvozování matematického popisu soustavy uvažujeme následující teploty:

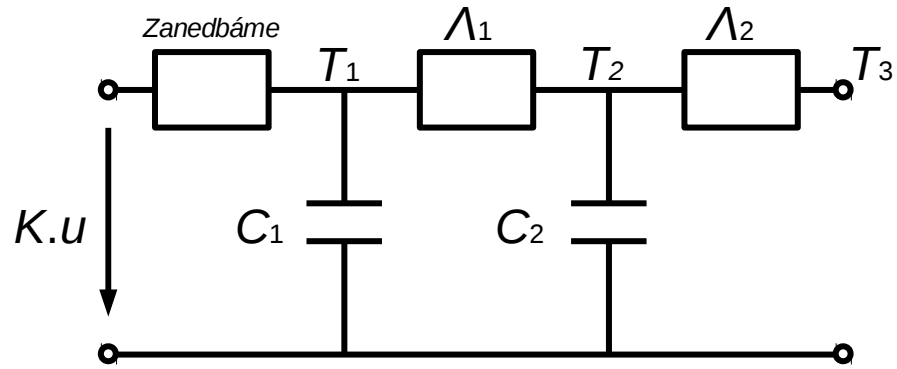
$T_1$  [°] teplota odporového drátu uvnitř rezistoru

$T_2$  [°] teplota na povrchu rezistoru

$T_3$  [°] teplota na senzoru, který snímá teplotu v místě mezi zdrojem tepla a okolím.

Pro jednoduchost neuvažujeme závislost odporu rezistoru na teplotě a rezistor lze tedy považovat za zdroj tepelného toku řízený napětím, zároveň uvažujeme konstantní hodnotu  $T_3$ . Náhradní elektrické schéma je na obr. 22.





Obrázek 22: Náhradní elektrické schéma

Z tohoto schématu odvodíme stavové rovnice systému (64), (65) a (66).

$$\frac{dT_1(t)}{dt} = \frac{K}{C_1} u(t) - T_1(t) \frac{\Lambda_1}{C_1} + T_2(t) \frac{\Lambda_1}{C_1} \quad (64)$$

$$\frac{dT_2(t)}{dt} = T_1(t) \frac{\Lambda_1}{C_2} - T_2(t) \frac{\Lambda_1}{C_2} - T_2(t) \frac{\Lambda_2}{C_2} + T_3(t) \frac{\Lambda_2}{C_2} \quad (65)$$

$$y(t) = T_2(t) \quad (66)$$

- **Volba vstupních a výstupních veličin systému**

Jako vstupní veličiny volíme příkon topného rezistoru a teplotu  $T_3$ . Výstupní veličinou je teplota  $T_2$ .

### 2.5.3 Informace pro vyučující

Z rovnic (64), (65) a (66) získáme matice systému:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{\Lambda_1}{C_1} & \frac{\Lambda_1}{C_1} \\ \frac{\Lambda_1}{C_2} & -\frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{C_2} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{K}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{\Lambda_2}{C_2} \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad 1] \quad D = [0 \quad 0] \quad (67)$$

Dosazením hodnot těchto matic do rovnice (20) sestavíme přenosy systému:

Přenos  $u$  na  $T_2$ :

$$G(s) = \frac{\frac{K \Lambda_1}{C_1 C_2}}{s^2 + \frac{C_1 \Lambda_1 + C_1 \Lambda_2 + C_2 \Lambda_1}{C_1 C_2} s + \frac{\Lambda_1 \Lambda_2}{C_1 C_2}} \quad (68)$$

Přenos  $T_3$  na  $T_2$ :

$$G(s) = \frac{\frac{\Lambda_2}{C_2} s + \frac{\Lambda_1 \Lambda_2}{C_1 C_2}}{s^2 + \frac{C_1 \Lambda_1 + C_1 \Lambda_2 + C_2 \Lambda_1}{C_1 C_2} s + \frac{\Lambda_1 \Lambda_2}{C_1 C_2}} \quad (69)$$

## 2.6 Ostatní modely

V laboratoři se mimo modely popsané v této práci vyskytují ještě tyto modely: Vodárny V1 – V5, Vodní elektrárna E1, Vznášení L1, Soustruh S3 a Rychlé pohony M1. V této kapitole zmíním jejich stručný popis.

- **Vodárny V1 – V4**

Laboratorní modely Vodárna V1 – V4 byly vytvořeny v rámci diplomové práce Jiřího Hanzlíka v roce 2008. Jedná se o model řízení výšky hladiny kapaliny ve spojených nádržích s uzavřeným cyklem. Modely simulují v praxi se vyskytující systémy v petrochemickém, chemickém průmyslu, ve vodním hospodářství apod. Materiály pro výuku zpracoval David Charvát v rámci své bakalářské práce [9].

- **Vodárna V5**

Laboratorní model Vodárna V5 vznikl modernizací staršího modelu v rámci bakalářské práce Jozefa Fetterika roku 2007. Je tvořen dvěma nádržemi navzájem propojenými ventilem. Ke každé nádrži je připojeno jedno zubové čerpadlo, vypustní ventil z nádrže do rezervoáru a senzor na měření výšky hladiny. Materiály pro výuku zpracoval David Charvát v rámci své bakalářské práce [9].

- **Vodní elektrárna E1**

Laboratorní model Vodní elektrárna E1 vznikl modernizací staršího modelu Milanem Janečkem roku 2007. Jedná se o model s výrazným a proměnným dopravním zpožděním. Materiály pro výuku zpracoval David Charvát v rámci své bakalářské práce [9].

- **Vznášení L1**

Laboratorní model Vznášení L1 simuluje pneumatickou dopravu materiálu. Základem konstrukce je plastová trubka, do které se umístí těleso, a ventilátor, který funguje jako zdroj proudu vzduchu. Řízením ventilátoru lze pohybovat tělesem nahoru a dolů. Materiály pro výuku zatím nejsou zpracovány.

- **Soustruh S3**

Laboratorní model Soustruh S3 slouží jako simulace analogového dvouosého servosystému. Materiály pro výuku zatím nejsou zpracovány.

- **Rychlé pohony M1**

Laboratorní model Rychlé pohony M1 umožňuje řízení jednoho motoru v závislosti na rychlosti druhého motoru a měnícím se převodovém poměru. Materiály pro výuku zatím nejsou zpracovány.

## 3 Webová prezentace

Součástí této práce bylo umístit a prezentovat vytvořené materiály na podpůrném webu laboratoře. Vytvoření nových internetových stránek laboratoře bylo hlavním úlohem bakalářské práce Michala Pilného [10].

V první části této kapitoly webové stránky stručně popíši, v druhé části se zmíním o možnostech jejich editace.

### 3.1 Základní popis webových stránek laboratoře

Základem webových stránek laboratoře je systém MediaWiki. Ten představuje software původně vytvořený pro webovou encyklopedii Wikipedia. Je napsán v jazyce PHP a využívá MySQL databázi. Jeho použití je výhodné zejména pro kvalitu správy systému, možnost využití uživatelských práv a uživatelských skupin, jednoduchou správu souborů i samotnou editaci.

Struktura stránek je navržena tak, aby umožňovala snadnou úpravu a rozšiřitelnost. Mají 3 úrovně přístupu – návštěvník bez přihlášení, běžný student a učitel. Podle tohoto schématu byla členěna i tato práce – např. pro studenta jsou dostupné veškeré informace kromě materiálů pro vyučující – k těm má přístup pouze učitel. Stránky obsahují 2 základní menu – jedno horizontální v horní části stránek, druhé postranní v levé části stránek.

### 3.2 Editace webu

Pro editaci webu musí být uživatel, který změny provádí, přihlášen a mít práva k vykonávání příslušných změn. Veškeré operace lze provádět pomocí běžného internetového prohlížeče. Nejčastěji prováděné editace jsou:

- **Vytvoření nové stránky**

Pro vytvoření nové stránky máme 2 možnosti. První možností je přejít na zatím neexistující URL adresu. Přejdeme-li na adresu `.../mediawiki/index.php/Nová_stránka`, kde *Nová\_stránka* představuje název stránky, kterou chceme vytvořit, zobrazí se textové pole pro vytvoření obsahu nové stránky. Druhá možnost souvisí s barvou odkazu na stránku. Odkaz na existující stránku je zobrazen modře, odkaz na neexistující pak

červeně. Po kliknutí na červený odkaz se nám zobrazí stejné textové pole pro vytvoření nové stránky jako v předchozím případě.

- **Editace obsahu již vytvořené stránky**

Stránku lze editovat celou, příp. po částech. Pro editaci celé stránky volíme v horním menu položku *editovat*, pro editaci části stránky volíme taktéž položku *editovat*, ovšem v pravé horní části příslušného bloku.

- **Nahrání souboru**

V levém postranním menu je položka *Načíst soubor*. Po rozkliknutí se zobrazí stránka s možností nahrání souboru, s důležitými informacemi týkající se např. maximální povolené velikosti souboru, zakázaných souborů apod.

Mezi základní prvky stránky patří:

- **Nadpis**

Počet znaků „=" určuje řád nadpisu. Zde uvádím příklad použití:

= = Toto je nadpis druhého řádu = =

- **Písmo**

Styl písma můžeme měnit „uzavřením“ příslušného textu do apostrofů. Např. :

- "'tučný text'" se zobrazí jako **tučný text** (použití 3 apostrofů)
- "kurzíva" se zobrazí jako *kurzíva* (použití 2 apostrofů)
- <sub>dolní index</sub>
- <sup>horní index</sup>

apod.

- **Odkaz na místo v rámci systému**

[[Hlavní strana]] – použití dvojité hranaté závorky

- **Odkaz na místo mimo systém**

[<http://www.fel.cvut.cz>] - použití hranaté závorky

- **Matematické vzorce**

Psaní matematických vzorců se provádí sázecím systémem Latex

- **Další**

- \* položka nečíslovaného seznamu
- # číslovaný seznam 1. úrovně
- ## číslovaný seznam 2. úrovně

apod.

Bližší informace týkající se editace webových stránek jsou dostupné na webu Katedry řídicí techniky [11] v sekci *Nápověda*.

## 4 Závěr

V rámci této bakalářské práce jsem pokračoval ve vytváření podpůrných materiálů potřebných pro výuku v laboratoři Allen-Bradley (K23). Vypracoval jsem detailní popisy laboratorních modelů Inverzní kyvadlo P1, Servomechanismus S1, Servomechanismus S2, Kulička na tyči K1 a Tepelná soustava T1, které jsou v laboratoři umístěny. V úvodním odstavci u každého modelu čtenář nalezne popis modelu z hlediska využití ve výuce, jaké procesy a systémy reálného světa model simuluje, dále je model zobrazen na fotografii. V části Schéma a konstrukce modelu je, jak samotný název napovídá, detailní popis přípravku a jeho částí. Další část je určena pro studenty, kteří s modelem pracují – naleznou zde důležité vztahy potřebné pro matematický popis systému, pokyny pro práci s modelem a další užitečné rady. Odvození stavových popisů, linearizace nelineárního systému apod. je v části pro vyučující. Pro modely Vznášení L1, Soustruh S3 a Rychlé pohony M1 zatím obdobné popisy pro výuku nebyly vytvořeny, u nich, stejně jako u ostatních modelů, které již popsány byly, jsem uvedl základní informace. Základní popis modelů jsem přeložil do anglického jazyka.

Jako součást práce jsem vytvořil zadání pro laboratorní úlohy. Pro každý model jsou vytvořena zadání dvě – jedno pro identifikaci laboratorního modelu a druhé pro jeho řízení. Tato zadání jsou uložena na přiloženém CD.

Veškeré vytvořené materiály jsou zároveň umístěny na webových stránkách laboratoře, kterými se zabývá druhá část této práce. V té je stručně popsán systém MediaWiki i samotná struktura webových stránek, zároveň jsou uvedeny příklady editace jejich obsahu.

# Literatura

- [1] KRATOCHVÍL, Lukáš. *Inverzní kyvadlo*, 2008
- [2] ROUBAL, Jiří; AUGUSTA, Petr; HAVLENA, Vladimír; FUKA, Jindřich. *Control Design For Servo AMIRA – DR300*
- [3] CILLER, Alexandr. *Servomechanismus s proměnným tlumením*, 2007
- [4] HOŘČICA, Adam. *Servomechanismus s proměnným tlumením*, 2009
- [5] HALÍŘ, Lukáš. *K1 – Kulička na tyči UTIA*, 2010
- [6] VARGA, Rostislav. *Identifikace a popis systému TEPLO*, 2005/2006
- [7] FUKA, Jindřich; JOHN, Jan; KUTIL, Michal. *Učebnice SARI* [online]. Dostupné z WWW: <<http://dce.felk.cvut.cz/sari>>
- [8] HOLEČEK, Jan. *Laboratoř teorie automatického řízení K26* [online]. Dostupné z WWW: <<http://support.dce.felk.cvut.cz/lab26>>
- [9] CHARVÁT, David. *Podpora výuky v laboratoři K23*, 2010
- [10] PILNÝ, Michal. *Webové stránky laboratoře Allen-Bradley*, 2010
- [11] *DCEwiki* [online]. Dostupné z WWW: <<http://support.dce.felk.cvut.cz>>



# Příloha A

## Obsah přiloženého CD

K práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy veškeré materiály k modelům, všechna zadání pro identifikaci a řízení modelů a nachází se zde i tato bakalářská práce ve formátu PDF.

- Adresář BP: Vlastní bakalářská práce ve formátu PDF
- Adresář Zadání: Zadání pro identifikaci a řízení laboratorních modelů
- Adresář Web: Materiály pro webové stránky laboratoře (fotografie, obrázky atd.)

# Příloha B

## Ukázka zdrojového kódu textu MediaWiki

Zde je uveden zdrojový kód stránky „Servomechanismus S2“.

`__NOTOC__`

`{{Allen-Bradley menu}}`

Základnem tohoto laboratorního přípravku je model servomechanismu IfA – 122, současná podoba je výsledkem úprav z roku 2007 Alexandrem Cillerem v rámci jeho bakalářské práce <ref name="ciller">CILLER, Alexandr. "Servomechanismus s proměnným tlumením", 2007</ref> a z roku 2009, kdy úpravy dokončil Adam Hořčica <ref name="horcica">HORČICA, Adam. "Servomechanismus s proměnným tlumením", 2009</ref>. Model Servomechanismus S2 je využíván pro řízení rychlosti a úhlu natočení servomechanismu (např. pomocí PID regulátorů, lead – lag regulátorů). V praxi se se systémy simulovanými tímto modelem setkáváme v mnoha situacích, např. při zkoumání rychlostních a pozičních řídicích systémů. Regulace pozice (úhlu natočení) a rychlosti jsou v praxi používané u mnoha systémů, např. u různých robotů, manipulátorů apod. Využití najdeme také v dopravě, letectví, medicíně apod. Fotografie laboratorního modelu je na obr. 1.

`<gallery>`

`Image:S2_01_web.JPG|<center>Obrázek 1: Servomechanismus S2</center>`

`</gallery>`

= Schéma a konstrukce modelu =

Model servomechanismu S2 je tvořen 2 částmi: vlastním modelem servomechanismu a přístrojovou skříní.

====Vlastní model servomechanismu====

Vlastní model s popisem jednotlivých částí znázorňuje obr. 2 a tab. 1.

<gallery>

Image:S2\_popis\_web.jpg|<center>Obrázek 2: Popis částí vlastního modelu S2</center>

</gallery>

Tabulka 1: Popis částí vlastního modelu S2

```
{| border="1" cellpadding="2" cellspacing="0"
```

```
!align="center"|<b>označení v obrázku</b> || <b>část</b>
```

```
|- align="center"
```

```
|1 || výměnný kotouč
```

```
|- align="center"
```

```
|2 || ložisko
```

```
|- align="center"
```

```
|3 || tlumící kotouč
```

```
|- align="center"
```

```
|4 || převodovka
```

```
|- align="center"
```

```
|5 || motor s tachodynamem
```

```
|- align="center"
```

```
|6 || ukazatel otáček
```

```
|- align="center"
```

```
|7 || potenciometr - rychlost otáčky
```

```
|- align="center"
```

```
|8 || motor pro nastavení tlumení
```

```
|- align="center"  
|9 || IRC  
|- align="center"  
|10 || pevná spojka  
|}
```

Základem modelu je stejnosměrný motor, na jehož hřídeli je tachodynamo, kterým lze měřit rychlost otáčení motoru, jeden ze 3 výměnných disků (parametry jednotlivých disků uvedeny v tab. 16), kterými se mění moment setrvačnosti, převodovka, kotouč setrvačnicku a disk magnetického tlumení. Úroveň tlumení lze regulovat pomocí pohyblivého magnetu ovládaného druhým motorem. Tlumení je způsobeno vířivými proudy, které vznikají v hliníkovém disku. Model je též vybaven dvěma ukazateli:

Ukazatel úhlu natočení hřídele

S modelem je spojen přes převodovku (1:60), tak že na jednu otáčku ukazatele se hřídel otočí právě 60 krát. Zároveň je ukazatel spojen s potenciometrem s přerušením dráhy na úhlu 0°, který je využit pro snímání výstupního úhlu natočení.

Ukazatel zadání požadovaného úhlu natočení resp. otáček hřídele

Tento ukazatel je využíván pro ruční řízení rychlosti a úhlu natočení servomechanismu.

Akční veličiny představují "u" (vlastní motor servomechanismu) a "u"<sub>d</sub> (motor pro nastavení úrovně tlumení).

====Přístrojová skříň se zdrojem a zesilovačem====

Výkonový zesilovač představuje řízený zdroj napětí, který výkonově zesiluje signál z měřicí karty. Zdroj zajišťuje napájení potenciometrů, pomocí nichž rozvažujeme napětí následně snímaná měřicí kartou. Model je spojen s PC pomocí karty MF614. Model se zapíná spínačem na levé straně přístrojové skříně. Přístrojová skříň je zobrazena na obr. 3.

<gallery>

Image:S2\_02\_web.JPG|<center>Obrázek 3: Přístrojová skříň modelu S2</center>

</gallery>

V tab. 2 jsou uvedeny konkrétní technické parametry modelu.

Tabulka 2: Technické parametry modelu S2

```
{| border="1" cellpadding="2" cellspacing="0"
```

```
!align="center"|<b>veličina</b> || <b>hodnota</b> || <b>jednotka</b>
```

```
|- align="center"
```

```
|nominální napětí motoru || 10 || V
```

```
|- align="center"
```

```
|nominální proud motoru || 2,5 || A
```

```
|- align="center"
```

```
|odpor vinutí kotvy || 6,2 || W
```

```
|- align="center"
```

```
|indukčnost vinutí kotvy || 0,75 || mH
```

```
|- align="center"
```

```
|moment setrvačnosti bez závaží ||  $3 \cdot 10^{-6}$  ||  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 
```

```
|- align="center"
```

```
|konstanta tlumení ||  $3 \cdot 10^{-5}$  ||  $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$ 
```

```
|- align="center"
```

```
|momentová konstanta motoru ||  $32 \cdot 10^{-3}$  ||  $\text{M} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ 
```

```
|- align="center"
```

```
|konstanta tachodynamy || 27,11 ||  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ 
```

```
}
```

Další důležité parametry se týkají vyměnitelných disků. Jsou zaznamenány v tab. 3, význam veličin zobrazuje obr. 4.

<gallery>

Image:S2\_03\_web.jpg|<center>Obrázek 4: Význam parametrů vyměnitelného disku</center>

</gallery>

Tabulka 3: Technické parametry modelu S2

```
{| border="1" cellpadding="2" cellspacing="0"
```

```
!align="center"|<b>disk č.</b> || <b>"d" [mm]</b> || <b>"R" [mm]</b> || <b>"m" [kg]</b> ||  
<b>"J" [kg m<sup>2</sup>]</b>
```

```
|- align="center"
```

```
|1 || 10 || 28 || 0,193 || 75,6.10<sup>-6</sup>
```

```
|- align="center"
```

```
|2 || 20 || 34 || 0,578 || 330,5.10<sup>-6</sup>
```

```
|- align="center"
```

```
|3 || 28,6 || 44,5 || 1,401 || 1,387.10<sup>-3</sup>
```

```
|}
```

= Informace pro studenty =

=== Obecné informace ===

Při volbě výstupní veličiny úhlová rychlost " $\omega(t)$ " je systém lineární stabilní. Druhá možnost je volit jako výstupní veličinu polohu (úhel) " $\varphi(t)$ ", jež je integrací rychlosti, tj. v laplaceově transformaci dělíme laplaceovým operátorem, potom systém popisuje přenos s astatismem, tzn. že systém je nestabilní. Model servomechanismu je možné řídit pomocí PC s programem Matlab/ Simulink a Real Time Toolboxu, kde jsou všechny veličiny převedeny na bezrozměrná čísla obvykle v intervalu (-1, +1).

==== Pokyny pro práci s modelem ====

\*Měřicí kotouč výstupní polohy je pouze přilepen. Netočte za něj!

==== Důležité vztahy ====

Model lze z fyzikálního hlediska rozdělit na 2 části jak je patrné z obr. 5: mechanickou a elektrickou. V mechanické části jsou zahrnuty součty jednotlivých momentů, elektrická část vychází z 2. Kirchhoffova zákona, který říká, že algebraický součet napětí ve smyčce je roven nule.

<gallery>

Image:S2\_04\_web.jpg|<center>Obrázek 5: Náhradní schéma modelu S2</center>

</gallery>

Pro matematické vyjádření modelu vycházíme z náhradního schématu (obr. 5), kde

" $u(t)$ "[V] je vstupní napětí na motoru,

" $i(t)$ "[A] je proud kotvou,

" $\omega(t)$ "[rad s<sup>-1</sup>] je úhlová rychlost hřídele,

" $\varphi(t)$ "[rad] je úhel natočení hřídele,

" $L$ "[H] je celková indukčnost kotvy,

" $R$ "[ $\Omega$ ] je odpor kotvy,

" $J$ "[kg m<sup>2</sup>] je moment setrvačnosti,

" $J_0$ "[kg m<sup>2</sup>] je setrvačnost hřídele,

" $J_d$ "[kg m<sup>2</sup>] je setrvačnost námi použitého disku č. 2,

" $B$ "[N m s rad<sup>-1</sup>] je tlumení,

" $B_0$ "[N m s rad<sup>-1</sup>] je tlumení,

" $k_m$ "[N m A<sup>-1</sup>] je momentová konstanta motoru,

" $k_\omega$ "[rad s<sup>-1</sup> V<sup>-1</sup>] je konstanta tachodynamy.

Rovnice elektrické smyčky podle obr. 5 je

$$u(t) - E(t) = R i(t) + J \frac{d i(t)}{d t}$$

a zároveň elektromotorická síla motoru je dána vztahem

$$E(t) = k_m \omega(t)$$

Závislost mezi elektrickou a mechanickou částí motoru vyjadřuje vztah pro točivý moment " $M$ ", který je produkován motorem:

$$M_m = k_m i(t)$$

V každém časovém okamžiku platí:

$$M_m = M_z + M_{B0}$$
, kde

" $M$ " [N m] je moment vyvolaný setrvačností rotující části,

" $M_z$ " [N m] je zatěžovací moment magnetického kotouče,

" $M_{B0}$ " [N m] je brzdny moment způsobeny tlumením.

Pro " $M_{B0}$ " platí

$$M_{B0} = B_0 \omega(t)$$

Moment " $M_z$ " se měni nelineárně v závislosti na otáčkách motoru " $\omega(t)$ ". Vztah linearizujeme aproximací přímkou:

$$M_z = B \omega(t)$$

Použitím 2. Newtonova zákona pro rotaci lze pro " $M$ " definovat rovnici

$$M = J \frac{d \omega(t)}{d t},$$



kde pro celkový moment setrvačnosti "J" platí<br>

$$J = J_0 + J_d.$$

Dále platí vztah<br>

$$\frac{d \varphi(t)}{dt} = \omega(t).$$

=== Volba vstupních a výstupních veličin systému ===

Jako <u>vstupní</u> veličinu volíme vstupní napětí "u(t)", <u>výstupní</u> veličinu volíme, jak již bylo řečeno v obecných informacích, buď úhlovou rychlost " $\omega(t)$ " nebo polohu (úhel) " $\varphi(t)$ ".

= Soubory =

\*[[Média:S2-id.pdf]] - zadání pro identifikaci laboratorního modelu

\*[[Média:S2-reg.pdf]] - zadání pro řízení laboratorního modelu

= Literatura =

<references/>

# **Příloha C**

## **Ukázka zadání laboratorní úlohy**

V této příloze jsou uvedena dvě zadání laboratorní úlohy pro model Inverzní kyvadlo P1. První zadání je pro identifikaci modelu, druhé pro jeho řízení.

Zadání úloh pro ostatní modely jsou umístěna na CD, které je součástí této bakalářské práce.

# INVERZNÍ KYVADLO P1

Identifikace laboratorního modelu

## 1 Zadání

Inverzní kyvadlo P1 je nelineární astatický systém složený z lineárně se pohybujícího pohonu a na něm volně uchyceného kyvadla. Více se o tomto modelu dozvíte na stránkách [1].

**Cílem** této úlohy je provést identifikaci laboratorního modelu, tzn. získat matematický model včetně jeho konstant, v případě nelineárního modelu provést jeho linearizaci v konkrétním pracovním bodě a následně porovnat identifikovaný model s laboratorním modelem. Matematický model hledáme proto, abychom s jeho pomocí mohli navrhnout regulátory pro řízení laboratorního modelu.



Obrázek 1: Inverzní kyvadlo P1

**POZOR** Při spuštění nemějte ruce ani žádné předměty v dráze vozíku! Pro vyšší hodnoty vstupního napětí zkrat'te dobu simulace, aby nedocházelo k poškození kyvadla!

**Úkoly:**

- 1) *Matematický model a popis laboratorního modelu* **4 body**

Před prvním měřením odvoďte stavový popis modelu na základě popisu na stránkách [1]. Pro Vámi zvolené hodnoty konstant určete jednotlivé přenosy v Laplaceově transformaci a odsimulujte je pro jednotkové skoky vstupních veličin. Vyzkoušejte vliv jednotlivých konstant na chování modelu.

*Upozornění:* Body za splnění 1. bodu se udělují pouze na začátku cvičení v 8. týdnu, později již na ně není nárok.
- 2) *Komunikace s Matlabem*

Ověřte komunikaci Matlabu s fyzikálním systémem. Příslušné simulinkové soubory naleznete v adresáři X: \ Vyuka \ Tar \ SAM \ Lab \ P1. V tomto souboru je nastaveno, že data z osciloskopu se uloží v pracovním prostoru do proměnné *ty*, kde jsou uložena po sloupcích.
- 3) *Simulink* **2 body**

Sestavte obecný nelineární model systému v Simulinku.
- 4) *Identifikace systému* **3 body**

Proveďte identifikaci parametrů systému pomocí analýzy časové odezvy na skok, počáteční podmínku nebo jiný vhodný signál.
- 5) *Linearizace* **2 body**

Zvolte 2 různé pracovní body a proveďte linearizaci modelu systému. Následně porovnejte chování lineárního a nelineárního modelu v pracovním bodě.
- 6) *Frekvenční charakteristika* **3 body**

Proveďte analýzu systému ve frekvenční oblasti – změřte jeho frekvenční charakteristiku v bodech, kde je to proveditelné, zaměřte se zejména na okolí fáze  $-180^\circ$ . Porovnejte frekvenční charakteristiku s charakteristikou modelu získaného v předchozím bodě.
- 7) *Výstupní odezva* **3 body**

Porovnejte výstupní odezvy reálného systému a získaných modelů v předchozích bodech. Jako vstupní signál volte jednotkový skok, krátký impuls, obdelníkový signál s nulovou střední hodnotou a vhodně zvolenou střídou a periodou.
- 8) *Protokol* **5 bodů**

Do vašeho pracovního sešitu vložte toto zadání spolu s poznámkami o měření. Vypracujte protokol dle požadavků na [2].

## **2 Reference**

[1]*Webové stránky laboratoře Allen–Bradley (K23)* [online]. Dostupné z WWW: <[http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/index.php/Laboratoř\\_Allen-Bradley](http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/index.php/Laboratoř_Allen-Bradley)>

[2]Katedra řídicí techniky. *Stránky předmětů Katedry řídicí techniky FEL ČVUT: Moodle* [online]. Dostupné z WWW: <[http:// support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy](http://support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy)>

# INVERZNÍ KYVADLO P1

Řízení laboratorního modelu

## 1 Zadání

Inverzní kyvadlo P1 je nelineární astatický systém složený z lineárně se pohybujícího pohonu a na něm volně uchyceného kyvadla. Více se o tomto modelu dozvíte na stránkách [1].

**Cílem** této úlohy je navrhnout několik regulátorů podle zadaných kritérií, jejich odzkoušení na fyzikálním systému, a vzájemné porovnání jednotlivých regulátorů.



Obrázek 1: Inverzní kyvadlo P1

**POZOR** Při spuštění nemějte ruce ani žádné předměty v dráze vozíku! Pro vyšší hodnoty vstupního napětí zkrat'te dobu simulace, aby nedocházelo k poškození kyvadla!

**Úkoly:**

- 1) *Ověření správnosti matematického popisu laboratorního modelu* **1 bod**

Ověřte správnost Vašeho matematického modelu systému. V případě neshody model dolad'te.

- 2) *Návrh regulátorů*

Navrhněte a odzkoušejte vhodné typy regulátorů pro polohu kyvadla jak v dolní (stabilní) tak horní (nestabilní) poloze a pro současné řízení polohy vozíku, které splňující následující požadavky:

- ustálená regulační odchylka na jednotkový skok je menší než 5%,
- ustálená regulační odchylka na jednotkový skok je nulová,
- stabilizace v požadované poloze.

Regulátory navrhněte tak, aby doba regulace byla co nejkratší a překmit byl menší než 20% ustálené hodnoty. Kontrolujte velikost akčního zásahu a v případě problematické regulace jej omezte i za cenu zpomalení regulace.

Návrh regulátorů pro řízení polohy a otáček proved'te, pokud je to možné (není – li, zdůvodněte), následujícími způsoby:

- a) Empirickými metodami **2 body**

- „ručně“ metodou cyklické optimalizace konstant regulátoru (pokus – omyl)
- podle Zieglera – Nicholse

- b) Frekvenčními metodami **4 body**

- pomocí kompenzací lead, lag a lead – lag
- regulátory typu P, PI, PD a PID - v případě PID regulátoru návrh proved'te jak pro ideální varianty regulátoru, tak i pro jeho realizovatelnou podobu s omezeným ziskem derivační složky na vyšších frekvencích na hodnotu  $N$ :

$$k_D s \rightarrow \frac{k_D s}{\frac{k_D}{N} s + 1}, N \in (5-20)$$

- c) Metodou umístění pólů uzavřené regulační smyčky **4 body**

- pomocí geometrického místa kořenů, výpočtem z předdefinovaných pólů

3) *Testování a porovnání regulátorů***4 body**

Porovnejte jednotlivé regulátory použité na laboratorním modelu mezi sebou, to samé proveďte pro simulinkový model.

4) *Protokol a prezentace*

Do vašeho pracovního sešitu vložte toto zadání spolu s poznámkami o měření. Vypracujte protokol (**5 bodů**) a prezentaci (**2 body**) dle požadavků na [2]. Za vypracování v anglickém jazyce je možné získat až **4 body** navíc.

## 2 Reference

[1] *Webové stránky laboratoře Allen–Bradley (K23)* [online]. Dostupné z WWW: <[http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/index.php/Laboratoř\\_Allen-Bradley](http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/index.php/Laboratoř_Allen-Bradley)>

[2] Katedra řídicí techniky. Stránky předmětů Katedry řídicí techniky FEL ČVUT: Moodle [online]. Dostupné z WWW: <[http:// support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy](http://support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy)>