

# Řízení otáček motoru PI regulátorem

## Aplikace průmyslových regulátorů

Pokyny pro laboratorní práci, zpracování výsledků  
a tvorbu technické zprávy

Ing. Daniel Honc, Ph.D.



# Řízení otáček motoru PI regulátorem

## Aplikace průmyslových regulátorů

### Hlavní úkol

Návrh a aplikace PI regulátoru pro řízení otáček soustavy Modular Servo System od firmy INTECO.

### Doba nutná k vyřešení

2 hodiny práce v laboratoři, 2 hodiny na zpracování výsledků a vytvoření protokolu

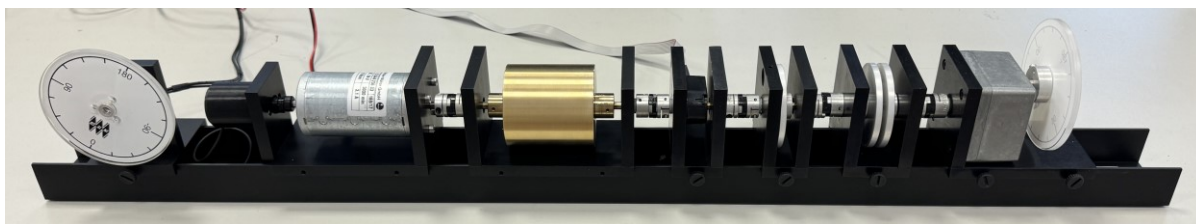
## 1 Zadání

Úkoly:

1. Seznamte se s možnostmi ovládání a měření soustavy.
2. Změřte statickou charakteristiku soustavy a vyhodnoťte její zesílení.
3. Změřte přechodovou charakteristiku soustavy.
4. Aproximujte chování soustavy modelem proporcionálního systému prvního řádu.
5. Použijte odvozené vztahy pro návrh regulátoru a proveďte simulace regulačních pochodů pro různé parametry metody.
6. Pro stejná nastavení proveďte reálné regulační experimenty a porovnejte výsledky se simulacemi.
7. O řešení jednotlivých úkolů vypracujte technickou zprávu, jejíž součástí bude stručný postup řešení a výsledky ve formě tabulek a grafů.

## 2 Popis laboratorního zařízení

Soustava Modular Servo System (INTECO, 2024) se skládá z několika modulů umístěných na kovové liště. Základními moduly jsou stejnosměrný motor, modul setrvačnicku (hmoty, která imituje dynamiku řízené soustavy) a moduly pro měření otáček (inkrementální senzor a tachodynamo).

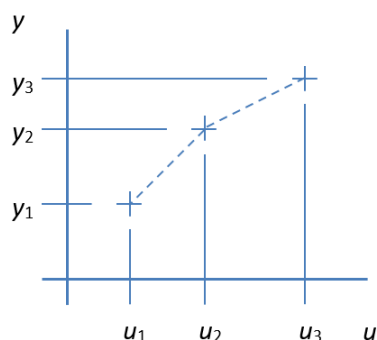


**Obr. 1 – Modular Servo System (zdroj vlastní)**

Soustavu lze ovládat a měřit pomocí PLC, průmyslového PC a HMI a také z prostředí MATLAB a Simulink. Pro všechny varianty jsou v laboratoři průmyslové automatizace připraveny knihovní bloky a ukázkové příklady.

## 2.1 Statická charakteristika soustavy

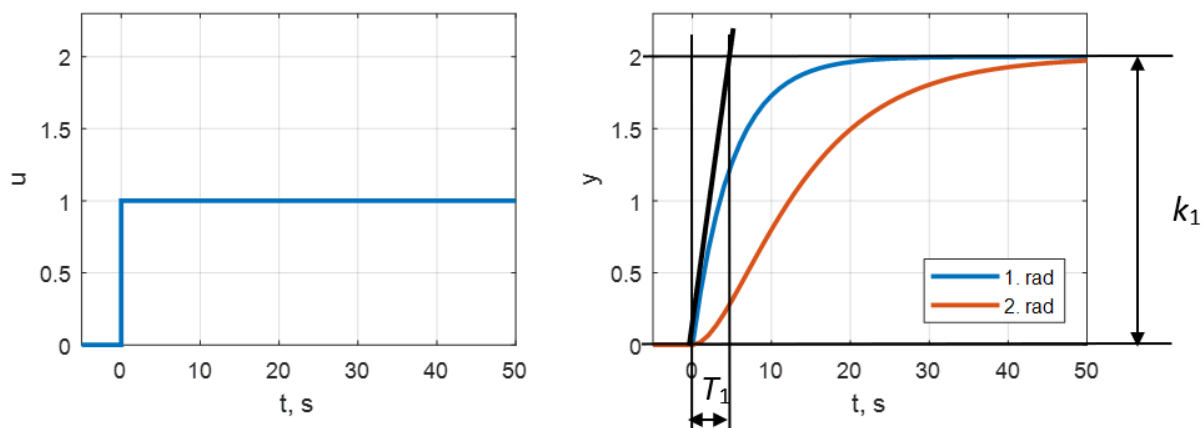
Při měření statické charakteristiky postupně měníme vstup do soustavy, čekáme na ustálení výstupu soustavy a hodnoty výstupu v ustálených stavech. Statická charakteristika je poté grafické znázornění závislosti ustálených výstupů na vstupech systému.



**Obr. 2 – Statická charakteristika soustavy (zdroj vlastní)**

## 2.2 Přechodová charakteristika soustavy

Přechodová charakteristika je grafické znázornění přechodové funkce – odezvy na jednotkový skok definovaný jako:  $u(t)=0$  pro  $t<0$  a  $u(t)=1$  pro  $t\geq 0$ . Pro proporcionální systémy prvního a druhého řádu má přechodová charakteristika tvar uvedený na obr. 3.



**Obr. 3 – Přechodová charakteristika proporcionální soustavy (zdroj vlastní)**

### 2.3 Model řízené soustavy

Pro návrh regulátoru budeme potřebovat znát model řízené soustavy. Dynamický model proporcionálního systému prvního řádu lze zapsat pomocí následující obyčejné diferenciální rovnice

$$T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_1 u(t) \quad (1)$$

kde  $u(t)$  je vstup systému,

$y(t)$  je výstup systému,

$T_1$  je časová konstanta a

$k_1$  je zesílení.

Neznámé parametry modelu (zesílení a časovou konstantu) určíme ze změřené statické a přechodové charakteristiky. Zesílení lze přibližně určit jako směrnici přímků spojujících jednotlivé body statické charakteristiky. Například pro první část statické charakteristiky na obr. 4 pro zesílení platí vztah

$$k_1 = \frac{y_2 - y_1}{u_2 - u_1} \quad (2)$$

Zesílení soustavy lze určit také z přechodové charakteristiky (obr. 3) jako podíl změny výstupu ku změně na vstupu.

Časovou konstantu je nutné určit z přechodové charakteristiky (obr. 3). Jednou z možností je zkonstruovat tečnu k přechodové charakteristice v čase 0 a odečíst čas průsečíku této tečny a ustálené hodnoty výstupu soustavy. Tento čas odpovídá časové konstantě soustavy. Jinými slovy směrnice tečny přechodové charakteristiky soustavy prvního řádu v čase 0 je  $k_1/T_1$ . Další možností je odečíst čas, kdy výstup soustavy nabude 63 % ustálené hodnoty. Případně lze hledat takové parametry modelu, aby se změřený a vypočítaný výstup co nejvíce shodovaly. Toho lze dosáhnout ruční iterací nebo automaticky pomocí numerické optimalizační metody.

### 2.4 Návrh regulátoru

Pro řízení použijeme spojitý PI regulátor, jehož rovnice je

$$u(t) = r_0 \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (3)$$

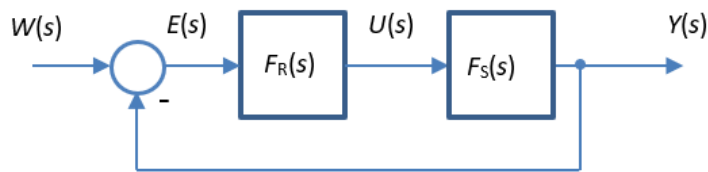
kde  $e(t)$  je regulační odchylka daná rozdílem žádané a regulované veličiny,  $e(t) = w(t) - y(t)$

$r_0$  je zesílení regulátoru a

$T_i$  je integrační časová konstanta regulátoru.

Parametry regulátoru lze nastavit různými metodami od experimentálních až po analytické. V našem případě budeme vycházet z modelu řízené soustavy a odvodíme jednoduchý vztah, kde na základě volby časové konstanty uzavřeného regulačního obvodu získáme parametry regulátoru.

Blokové schéma jednoduchého uzavřeného regulačního obvodu je



**Obr. 4 – Blokové schéma uzavřeného obvodu (zdroj vlastní)**

Přenos modelu soustavy (1) lze zapsat jako

$$F_S(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k_1}{T_1 s + 1} \quad (4)$$

Přenos PI regulátoru (3) je

$$F_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} \right] = \frac{r_0 (T_i s + 1)}{T_i s} \quad (5)$$

Přenos řízení uzavřeného regulačního obvodu je

$$F_{wy}(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{F_S(s) F_R(s)}{1 + F_S(s) F_R(s)} \quad (6)$$

Pokud dosadíme do rovnice (6) přenosy (4) a (5), získáme přenos uzavřeného regulačního obvodu

$$F_{wy}(s) = \frac{\frac{k_1}{T_1 s + 1} \frac{r_0 (T_i s + 1)}{T_i s}}{1 + \frac{k_1}{T_1 s + 1} \frac{r_0 (T_i s + 1)}{T_i s}} \quad (7)$$

Jedná se o přenos pseudoprvního řádu, kdy by nám v čitateli přenosu vyšel polynom prvního řádu a ve jmenovateli řádu druhého. Mohli bychom volit dva póly uzavřeného regulačního obvodu a výsledkem by byly dva parametry regulátoru. Řešení se dá zjednodušit, pokud zvolíme integrační časovou konstantu regulátoru rovnu časové konstantě soustavy  $T_i = T_1$ . Ve zlomcích přenosu se vykrátí členy  $T_i s + 1$  a  $T_1 s + 1$  a získáme přenos uzavřeného regulačního obvodu ve tvaru přenosu proporcionálního systému prvního řádu

$$F_{wy}(s) = \frac{\frac{k_1 r_0}{T_i s}}{1 + \frac{k_1 r_0}{T_i s}} = \frac{1}{\underbrace{\frac{T_1}{k_1 r_0}}_{T_{URO}} s + 1} \quad (8)$$

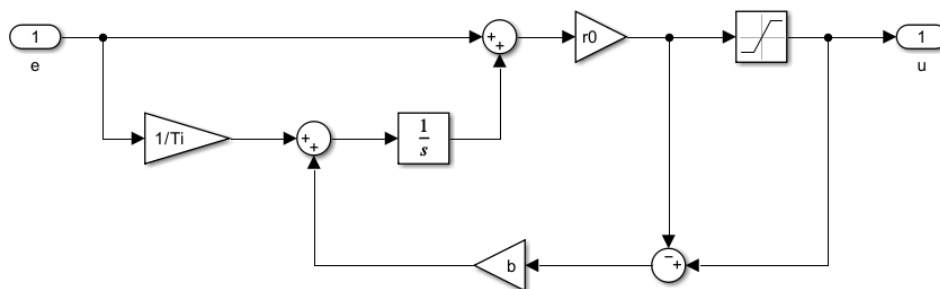
Z přenosu vidíme, že regulátor nezanechává trvalou regulační odchylku (zesílení uzavřeného regulačního obvodu je 1) a časová konstanta uzavřeného regulačního obvodu  $T_{URO}$  je  $\frac{T_1}{k_1 r_0}$ . Pokud zvolíme časovou konstantu uzavřeného regulačního obvodu  $T_{URO}$ , můžeme dopočítat zesílení regulátoru podle vztahu

$$r_0 = \frac{T_1}{k_1 T_{URO}} \quad (9)$$

To odpovídá běžné skutečnosti, kdy má být zesílení regulátoru nepřímo úměrné zesílení soustavy a pokud chceme řízení zrychlovat, musíme použít větší zesílení regulátoru. Výše uvedeným postupem máme zajištěný aperiodický regulační pochod na hranici periodicity – integrační složka je nejsilnější, jak to jen jde, aby nedošlo k přeregulování. Skutečné chování se bude více nebo méně blížit ideálnímu řešení podle toho, zda se opravdu jedná o soustavu prvního řádu nebo ne a jak přesně určíme parametry modelu.

## 2.5 Aplikace regulátoru včetně antiwindup

Pro řízení použijeme spojití PI regulátor, který má následující blokové schéma



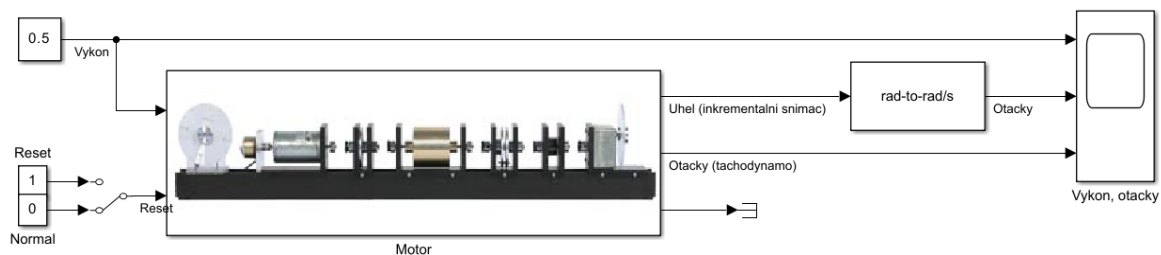
Obr. 5 – Blokové schéma PI regulátoru (vytvořeno v Matlab R2023b)

Kromě proporcionální a integrační složky je u regulátoru použit tzv. antiwindup. Windup efekt souvisí s integrační složkou regulátoru a vzniká při omezení akční veličiny, kdy akční zásah zůstane omezený, ale integrátor stále integruje a jeho výstup roste. Když se otočí regulační odchylka a měl by akční zásah okamžitě začít klesat, ale musí se nejprve odintegrovat výstup integrátoru a akční veličina tak určitou dobu zůstane na omezení, než začne klesat. Windup tedy zhoršuje kvalitu regulace. Antiwindup je možné realizovat například zastavením integrace, když dojde k omezení akčního zásahu nebo tak, že se regulační odchylka pro integrátor snižuje úměrně o rozdíl mezi vypočítaným a zrealizovaným akčním zásahem (zpětná vazba s váhou  $b$  obr. 7). Parametr  $b$  vystupuje potom jako ladicí parametr regulátoru.

## 3 Postup řešení

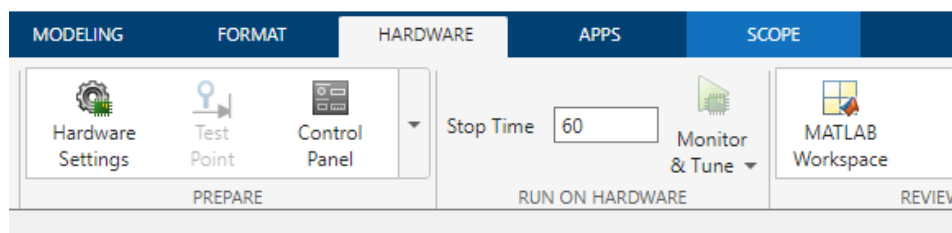
### 3.1 Ovládání a měření soustavy

Pro ovládání a měření použijeme předpřipravené schéma Simulinku *manual.slx*. Při ovládání lze nastavovat vstup do soustavy (napětí motoru – výkon). Otáčky měříme v rad/s pomocí inkrementálního snímače a tachodynama.



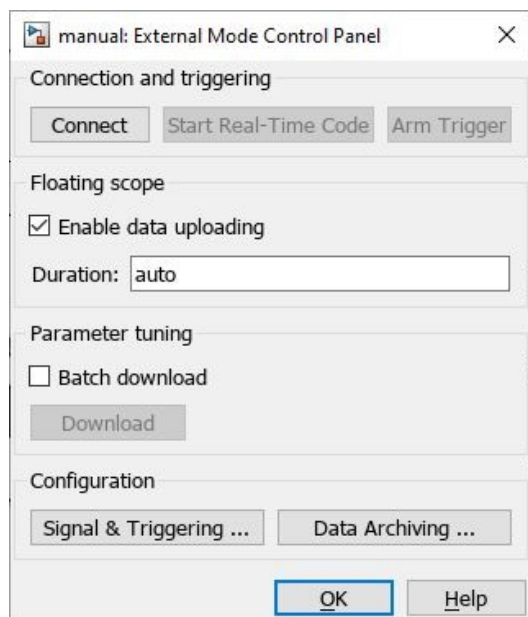
**Obr. 6 – Schéma manual.slx pro ovládání (vytvořeno v Matlab R2023b)**

Před spuštěním měření musíte stisknout Ctrl+B, aby došlo k překladi simulačního schématu a měření spustíte kliknutím na Control Panel v záložce HARDWARE



**Obr. 7 – Control Panel (vytvořeno v Matlab R2023b)**

a následně pomocí tlačítka Connect.



**Obr. 8 – Dialog Control Panel (vytvořeno v Matlab R2023b)**

### 3.2 Statická charakteristika soustav

Vstup soustavy lze ovládat mezi -1 až 1. Systém umožňuje změnu směru otáčení motoru – pokud chcete změnit směr, musíte počkat až se motor zastaví! Změřte statickou charakteristiku soustavy pro vstupy od 0 do 1 s krokem 0,2. Po změně vstupu počkejte vždy do ustálení a odečtěte otáčky motoru na obou snímačích. Hodnoty запиšte do tabulky a

vykreslete statickou charakteristiku soustavy. Získáte dva průběhy statických charakteristik:  $y_1$  jsou otáčky určené z inkrementálního snímače,  $y_2$  jsou otáčky z tachodynamu. Graf uložte a vložte jej do protokolu. Ze statických charakteristik dopočítejte zesílení soustavy  $k_1$  v jednotlivých pracovních bodech.

**Tab. 1 – Body statické charakteristiky a zesílení**

$u$	$y_1$	$k_1$	$y_2$	$k_1$
0,0		-		-
0,2				
0,4				
0,6				
0,8				
1,0				

### 3.3 Přejchodová charakteristika soustavy

Pro změřený přechodové charakteristiky nastavte vstup soustavy na 0,3 počkejte do ustálení a skokově změňte vstup na 0,6. Po druhém ustálení změňte vstup zpátky na 0,3 a opět počkejte do ustálení. Opět dostanete dva průběhy – jeden pro otáčky z inkrementálního snímače a druhý z tachodynamu. Průběhy všech veličin ze Scope „Vykon, otacky“ uložte do grafu Figure pomocí volby File – Print To Figure a graf uložte a vložte jej do protokolu.

### 3.4 Model soustavy

Ze změřené přechodové charakteristiky při použití inkrementálního snímače určete zesílení a časovou konstantu modelu soustavy a zapište hodnoty

$$k_1 =$$

$$T_1 = \quad \text{s}$$

V MATLABu vytvořte objekt spojitého modelu pomocí funkce *tf* a vypočítejte přechodovou charakteristiku funkcí *step*. Porovnejte ji se změřenou charakteristikou, zda odpovídá zesílení a doba do ustálení. Graf uložte a vložte jej do protokolu.

### 3.5 Simulované regulační pochody

a) Vypočítejte parametry regulátoru, abyste snížili časovou konstantu uzavřeného regulačního pochodu na polovinu časové konstanty soustavy a zapište parametry PI regulátoru

$$r_0 =$$

$$T_i = \quad \text{s}$$

Nepoužívejte antiwindup ( $b = 0$ ). Pro skokovou změnu otáček ze 40 na 100 a zpět na 40 proveďte simulovaný regulační experiment. Průběhy všech veličin ze Scope „Vykon, otacky“ uložte do grafu Figure pomocí volby File – Print To Figure, graf uložte a vložte do protokolu. Proveďte simulaci regulačního pochodu a graf uložte a vložte jej do protokolu.



b) Snižte časovou konstantu uzavřeného regulačního pochodu na desetinu časové konstanty soustavy a zapište parametry PI regulátoru

$r_0 =$

$T_i =$              $s$

Opět proveďte simulovaný experiment bez antiwindupu a výsledky uložte.

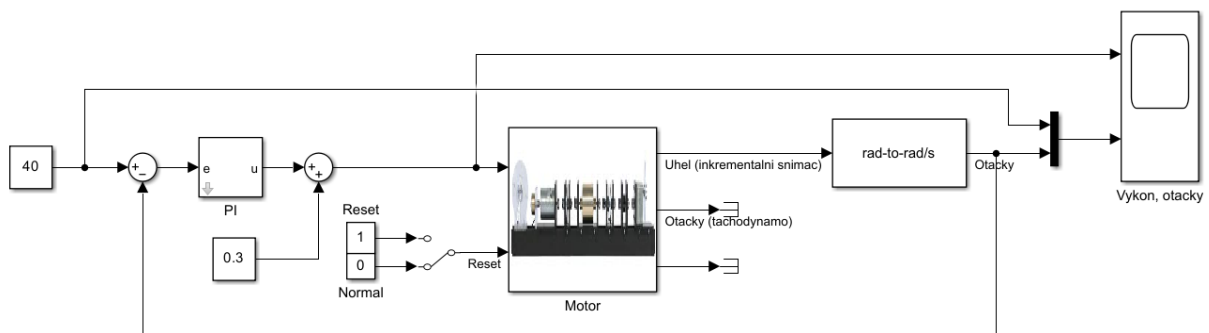
c) Nastavte parametr  $b$  pro antiwindup na takovou hodnotu, aby při regulaci nedošlo k přeregulování kvůli omezení akční veličiny a windup efektu. Zapište parametr

$b =$

Výsledek simulovaného regulačního pochodu uložte a vložte jej do protokolu.

### 3.6 Reálné regulační pochody

Pro regulaci použijeme předpřipravené schéma Simulinku *automat.slx*. Pro regulaci použijte informaci z inkrementálního snímače otáček. Proveďte stejné tři regulační experimenty jako v předchozím úkolu (pro stejná nastavení regulátoru a stejné průběhy žádaných hodnot). Průběhy všech veličin ze Scope „Vykon, otacky“ ukládejte do grafu Figure pomocí volby File – Print To Figure, grafy uložte a vložte je do protokolu.



Obr. 9 – Schéma *automat.slx* pro regulaci (vytvořeno v Matlab R2023b)

## 4 Pokyny pro vypracování

Technická zpráva (laboratorní protokol) bude obsahovat:

1. Tabulku s body statické charakteristiky a zesílením soustavy, statické charakteristiky pro oba snímače.
2. Změřené přechodové charakteristiky soustavy pro oba snímače.
3. Parametry modelu soustavy při měření otáček inkrementálním snímačem a přechodovou charakteristiku modelu.
4. Simulované regulační pochody pro stejné podmínky jako v bodu 4.
5. Reálné regulační pochody pro tři různá nastavení podle zadání.
6. Závěr s vlastním hodnocením.

V závěru mj. proveďte vlastní zhodnocení obdržených výsledků a popište, v čem příp. nastaly při práci v laboratoři problémy a jak jste se s nimi vypořádali.

## 5 Použitá a doporučená literatura

BALÁTĚ, Jaroslav, 2009. *Automatické řízení*. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 80-7300-148-9.

HONC, Daniel, 2024. Základy automatizace. [studijní opora]. Dostupné na: <https://moodle.upce.cz/moodle/>

HONC, Daniel, 2024. Modelování a simulace. [studijní opora]. Dostupné na: <https://moodle.upce.cz/moodle/>

INTECO, 2024. Modular Servo. [cit. 1. 5. 2024]. Dostupné z: <https://www.inteco.com.pl/products/modular-servo/>

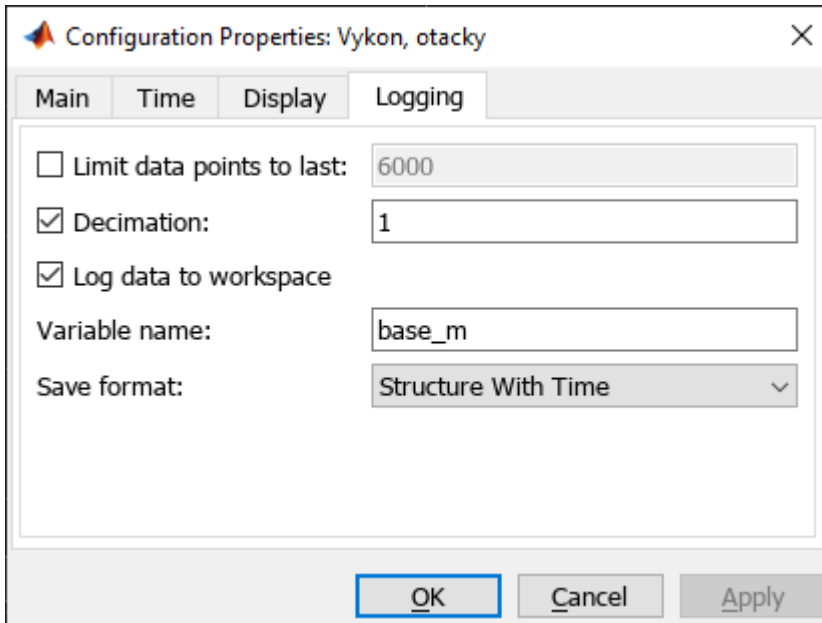
MATHWORKS Inc., 2024. *Matlab R2024a*. [software]. [cit. 1. 5. 2024]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/products/matlab.html>

## Seznam zkratk

PID   proporcionálně integračně derivační

## 6 Vypracování pro vyučující

Generování a sběr dat lze provádět ručně. Pro ukládání výsledků lze také použít postup, který je doporučen studentům, kdy uloží průběhy všech veličin z bloku Scope „Vykon, otacky“ do grafu Figure pomocí volby File – Print To Figure. Abychom mohli generovat definované průběhy vstupních veličin, lze také použít bloky Repeating Sequence Interpolated např. s nastavením výstupních hodnot pro změření přechodové charakteristiky  $[0.3 \cdot \text{ones}(1,1000)$   $0.6 \cdot \text{ones}(1,1000)$   $0.3 \cdot \text{ones}(1,1001)]$  a vektoru časů 0:0.01:30 při periodě vzorkování 0,01 s. V bloku Scope je potom nutné nastavit ukládání dat do proměnné formátu struktura s časem.



Obr. 10 – Nastavení bloku Scope (vytvořeno v Matlab R2023b)

Po skončení simulace se výsledky uloží do proměnné MATLABu a lze k nim přistupovat následujícím způsobem:

„manual.slx“

```
t=rt_base_m.time;  
u=rt_base_m.signals(1).values;  
y1=rt_base_m.signals(2).values;  
y2=rt_base_m.signals(3).values;
```

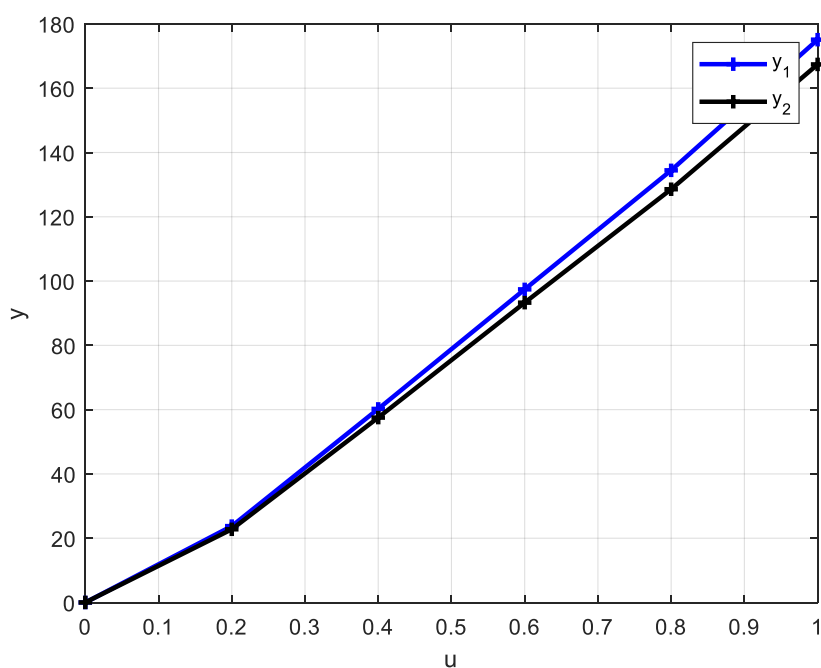
„automat.slx“

```
t= rt_base_m.time(zac:end)-zac/100;  
u= rt_base_m.signals(1).values(zac:end);  
w= rt_base_m.signals(2).values((zac:end),1);  
y= rt_base_m.signals(2).values((zac:end),2);
```

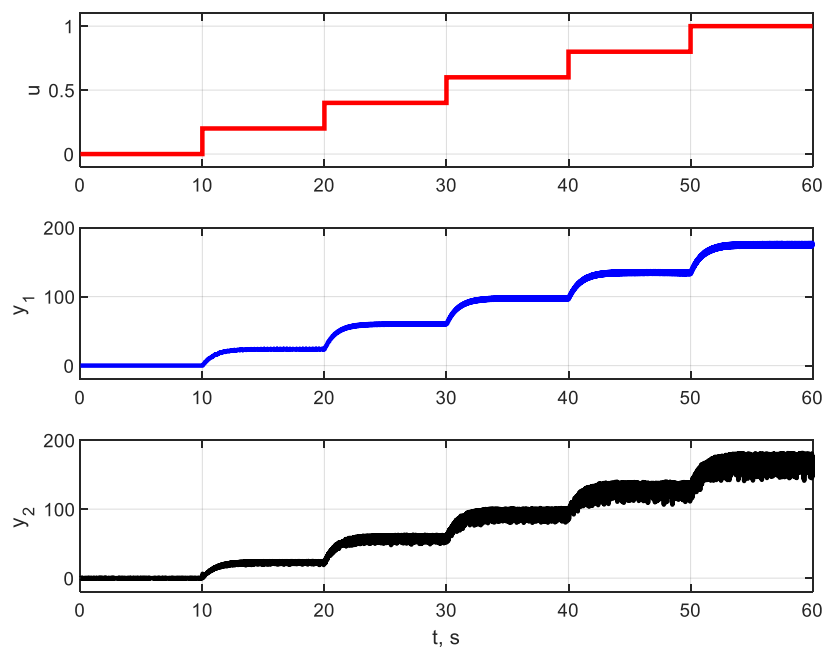
1. Tabulka s body statické charakteristiky a zesílením soustavy, statické charakteristiky pro oba snímače

**Tab. 2 – Body statické charakteristiky a zesílení**

$u$	$y_1$	$k_1$	$y_2$	$k_1$
0,0	0	-	0	-
0,2	24	119	23	114
0,4	60	182	58	174
0,6	97	186	93	179
0,8	134	185	129	176
1,0	175	203	167	194



**Obr. 11 – Statické charakteristiky (vytvořeno v Matlab R2023b)**



**Obr. 12 – Záznam měření statických charakteristik (vytvořeno v Matlab R2023b)**

### Skript MATLABu

```
clear
load stat_char.mat
t=rt_base_m.time;
u=rt_base_m.signals(1).values;
y1=rt_base_m.signals(2).values;
y2=rt_base_m.signals(3).values;

tiledlayout(3,1);
nexttile
stairs(t,u,'r',LineWidth=2), grid, ylabel('u'), axis([0 t(end) -0.1 1.1])
nexttile
plot(t,y1,'b',LineWidth=2), grid, ylabel('y_1'), axis([0 t(end) -20 200])
nexttile
plot(t,y2,'k',LineWidth=2), grid, xlabel('t, s'), ylabel('y_2'), axis([0 t(end) -20 200])

upch=zeros(6,1); ypch1=upch; ypch2=upch;
for i=1:6
    upch(i)=u(1+1000*(i-1));
    ypch1(i)=mean(y1(800+1000*(i-1):1000*i));
```

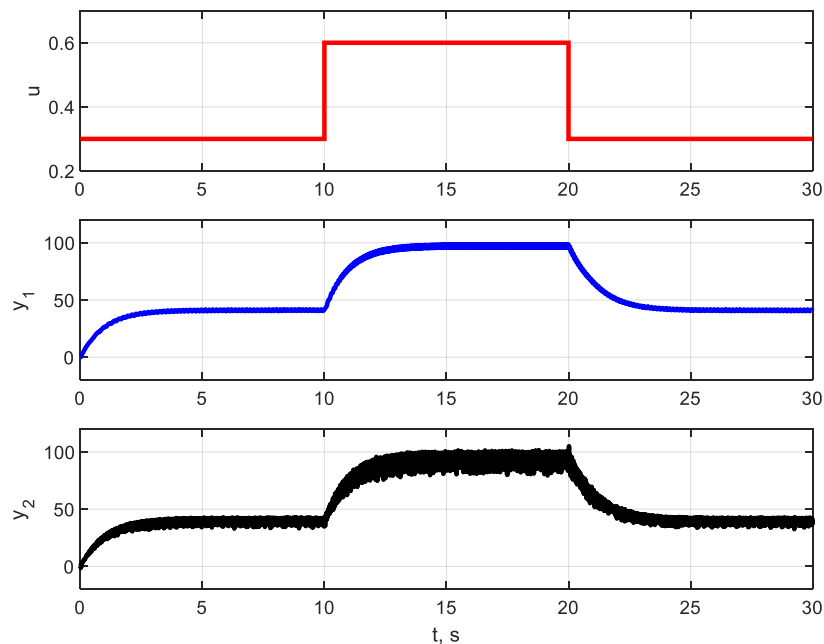
```

ypch2(i)=mean(y2(800+1000*(i-1):1000*i));
end
k1=zeros(5,1); k2=k1;
for i=1:5
    k1(i)=(ypch1(i+1)-ypch1(i))/(upch(i+1)-upch(i));
    k2(i)=(ypch2(i+1)-ypch2(i))/(upch(i+1)-upch(i));
end
round([ypch1 [0; k1] ypch2 [0; k2]])

figure
plot(upch,ypch1,'+b',LineWidth=2), hold, plot(upch,ypch2,'+k',LineWidth=2), grid, xlabel('u'), ylabel('y'),
legend('y_1','y_2'), axis([0 1 0 180])

```

## 2. Změřené přechodové charakteristiky soustavy pro oba snímače



**Obr. 13 – Přechodové charakteristiky (vytvořeno v Matlab R2023b)**

### Skript MATLABu

```

clear
load prech_char.mat
t=rt_base_m.time;
u=rt_base_m.signals(1).values;
y1=rt_base_m.signals(2).values;

```

```
y2=rt_base_m.signals(3).values;
```

```
figure
```

```
 tiledlayout(3,1);
```

```
 nexttile
```

```
 stairs(t,u,'r',LineWidth=2), grid, ylabel('u'), axis([0 t(end) 0.2 0.7])
```

```
 nexttile
```

```
 plot(t,y1,'b',LineWidth=2), grid, ylabel('y_1'), axis([0 t(end) -20 120])
```

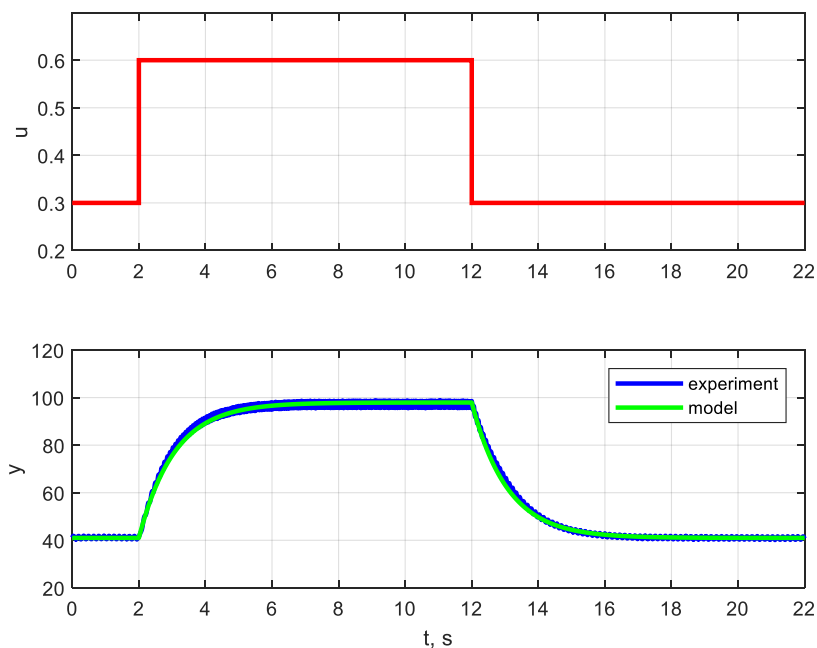
```
 nexttile
```

```
 plot(t,y2,'k',LineWidth=2), grid, xlabel('t, s'), ylabel('y_2'), axis([0 t(end) -20 120])
```

### 3. Parametry modelu soustavy pro otáčky měřené inkrementálním snímačem a přechodová charakteristika modelu

$k_1 = 190$

$T_1 = 1,1 \text{ s}$



Obr. 14 – Přechodové charakteristiky (vytvoreno v Matlab R2023b)

*Skript MATLABu*

```
clear
```

```
load prech_char.mat
```

```
zac=800;
```

```
t=rt_base_m.time(zac:end)-zac/100;
```

```

u=rt_base_m.signals(1).values(zac:end);
y=rt_base_m.signals(2).values(zac:end);

u0=0.3;
y0=41;

X0=[200 1];
X=fminsearch('hledej',X0,[],t,u-u0,y-y0);

k=X(1)
T=X(2)
M=tf(k,[T 1]);
yM=lsim(M,u-u0,t,'zoh')+y0;
K=(y-yM)^(y-yM);

tiledlayout(2,1);
nexttile
stairs(t,u,'r',LineWidth=2), grid, ylabel('u'), axis([0 t(end) 0.2 0.7])
nexttile
plot(t,y,'b',LineWidth=2), hold, plot(t,yM,'g',LineWidth=2), grid, xlabel('t, s'), ylabel('y'),
legend('experiment','model'), axis([0 t(end) 20 120])

```

#### 4. Simulované a reálné regulační pochody pro tři různá nastavení podle zadání

a)

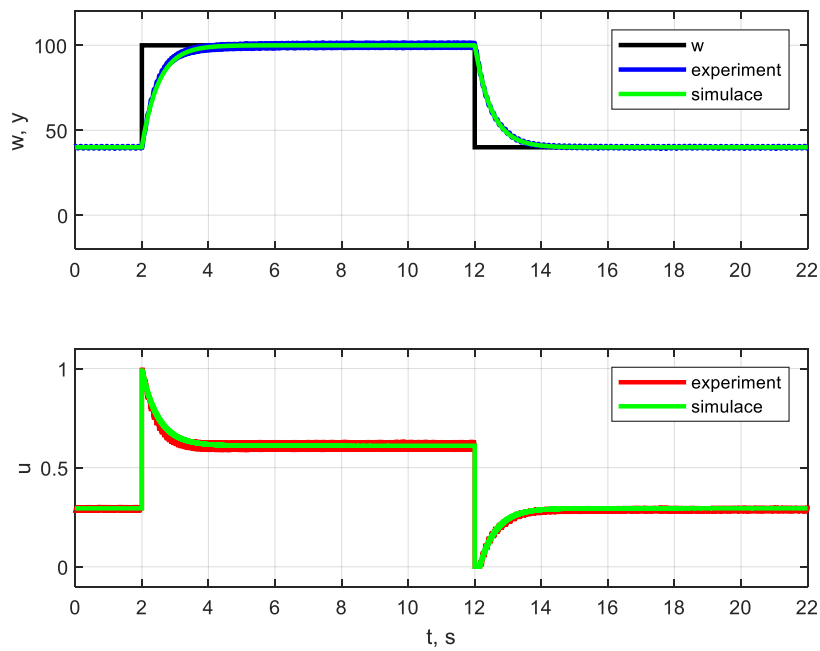
$$T_{URO} = 0,5 \text{ s}$$

$$r_0 = 0.01$$

$$T_i = 1,1 \text{ s}$$

$$b = 0$$





Obr. 15 – Regulační pochody pro  $T_{URO} = 0,5$  s,  $b = 0$  (vytvořeno v Matlab R2023b)

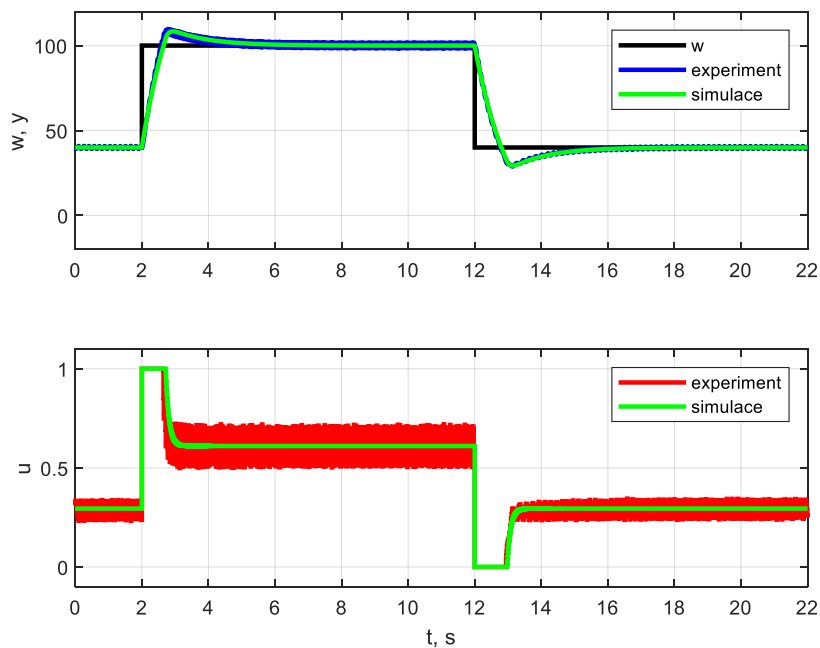
b)

$$T_{URO} = 0,1$$
 s

$$r_0 = 0.05$$

$$T_i = 1,1$$
 s

$$b = 0$$



Obr. 16 – Regulační pochody pro  $T_{URO} = 0,1$  s,  $b = 0$  (vytvořeno v Matlab R2023b)

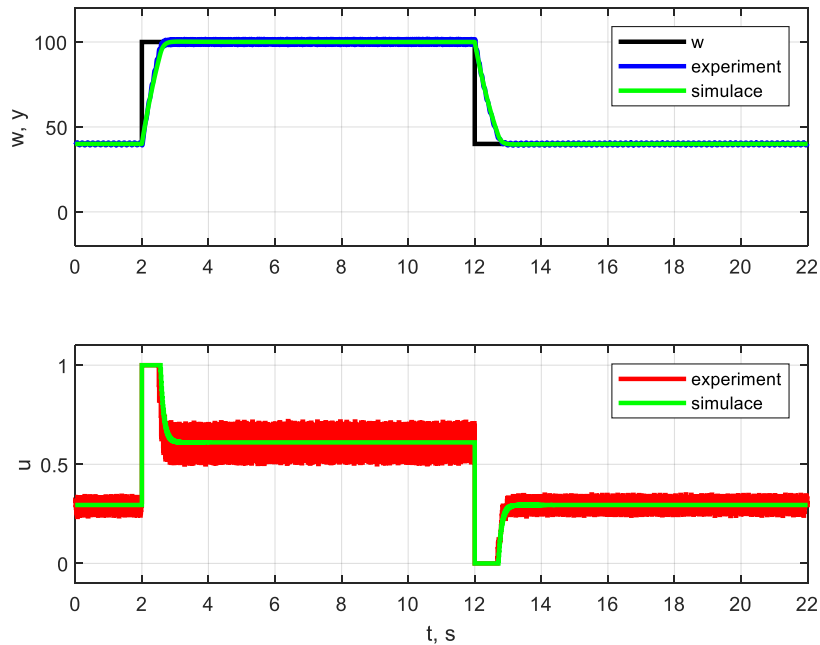
c)

$$T_{URO} = 0,1 \text{ s}$$

$$r_0 = 0.05$$

$$T_i = 1,1 \text{ s}$$

$$b = 15$$



Obr. 17 – Regulační pochody pro  $T_{URO} = 0,1 \text{ s}$ ,  $b = 15$  (vytvoreno v Matlab R2023b)

### Skript MATLABu

```
clear  
load PI_T2_05_b_0.mat  
load PI_T2_01_b_0.mat  
load PI_T2_01_b_15.mat  
zac=800;  
t=rt_base_m.time(zac:end)-zac/100;  
u=rt_base_m.signals(1).values(zac:end);  
w=rt_base_m.signals(2).values((zac:end),1);  
y=rt_base_m.signals(2).values((zac:end),2);  
  
load sim_PI_T2_05_b_0.mat  
load sim_PI_T2_01_b_0.mat
```

```

load sim_PI_T2_01_b_15.mat

sim_t=base_m.time(zac:end)-zac/100;
sim_u=base_m.signals(1).values(zac:end);
sim_w=base_m.signals(2).values((zac:end),1);
sim_y=base_m.signals(2).values((zac:end),2);

figure
tiledlayout(2,1);
nexttile
stairs(t,w,'k',LineWidth=2), hold, plot(t,y,'b',LineWidth=2), plot(sim_t,sim_y,'g',LineWidth=2), grid, ylabel('w, y'),
legend('w','experiment','simulace'), axis([0 t(end) -20 120])
nexttile
stairs(t,u,'r',LineWidth=2), hold, stairs(sim_t,sim_u,'g',LineWidth=2), grid, xlabel('t, s'), ylabel('u'),
legend('experiment','simulace'), axis([0 t(end) -0.1 1.1])

```

## 5. Závěr s vlastním hodnocením

Oba senzory dávají podobné informace o otáčkách. Informace z tachodynamu je oproti inkrementálnímu senzoru poměrně zašuměná. Soustava je až na začátek pracovní oblasti prakticky lineární.

Přechodové charakteristiky mají tvar charakteristik proporcionálních systémů prvního řádu a jsou téměř totožné při zvýšení i snížení otáček.

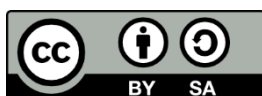
Volba  $T_{URO} = T_1 = 1,1$  s by vedla na zesílení  $r_0 = \frac{1}{k_1} = 0,005$  a regulační pochod by měl obdélníkový průběh akčních zásahů. Dynamika uzavřeného regulačního obvodu by byla stejná jako dynamika soustavy. Volba  $T_{URO} = 0,5$  s zrychlí uzavřený regulační obvod dvojnásobně a volba  $T_{URO} = 0,1$  s desetinásobně. U tohoto nastavení se projeví omezení akčního zásahu na 0 až 1 a je potřeba použít antiwindup. Volba  $b = 15$  dává ideální regulační pochod.

Vzhledem k dynamice prvního řádu je soustava jednoduše regulovatelná. Simulace se prakticky shodují s reálnými pochody, což vypovídá o kvalitě modelu a linearitě řízené soustavy.

Z praktického pohledu by bylo vhodné informaci o měřených otáčkách filtrovat, aby se snížil rozptyl akční veličiny. Mohlo by se ale stát, že začne regulovaná veličina v případě většího zesílení regulátoru kmitat.

Vytvořeno v rámci projektu **Studijní program Automatizace (SPAUT)**  
na **Univerzitě Pardubice**, reg. č. NPO\_UPCE\_MSMT-16591/2022.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek  
navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Financováno  
Evropskou unií  
NextGenerationEU



Národní  
plán  
obnovy

MS  
MIT  
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY