O samonastavujúcom sa regulátore

Obsah

1 Konkrétny príklad

PRINCÍP samonastavujúceho sa regulátora (Self-Tuning Regulator, i.e. STR) spočíva v tom, že v každej perióde vzorkovania sa identifikujú parametre modelu riadeného systému a následne, s využitím identifikovaných parametrov modelu, sa pomocou určitej metódy vypočítajú parametre regulátora.

Hneď v prvej vete sme použili pojem perióda vzorkovania. Je teda zrejmé, že celý riadiaci systém bude pracovať v diskrétnej časovej oblasti. Modelom riadeného systému bude ARX (Auto Regressive eXogenous) model. Štruktúra riadenia bude tzv. „trojzložková“. Tromi zložkami sú polynómy R, S a T. Tieto polynómy majú svoje koeficienty, ktoré sú zároveň parametrami riadiacej štruktúry, vlastne parametrami regulátora. Skonkretizujme teraz tento všeobecný popis.

1.1 Riadený systém

Riadený systém nech predstavuje prenosová funkcia v tvare

$$G(s) = \frac{0,15}{s^2 + 0,3s + 0,2} \tag{1}$$

Ide o prenosovú funkciu druhého rádu, ktorá má v čitateli polynóm nultého stupňa, teda nemá nuly.

1.2 ARX model

Nech modelom riadeného systému je ARX (AutoRegressive eXogenous) model. Vo všeobecnosti ARX model má tvar

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + \xi(k) \tag{2}$$

kde

$$\begin{aligned} B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + \ldots + b_{n_b} z^{-n_b} \\ A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + \ldots + a_{n_a} z^{-n_a} \end{aligned} \tag{3}$$

a $\xi(k)$ predstavuje poruchy a šum. V ďalšom budeme uvažovať $\xi(k) = 0$. ARX model vyjadrený v tvare diferenčnej rovnice:

$$y(k) = -\, a_1 y(k-1) - \ldots - a_{n_a} y(k-n_a) + b_1 u(k-1) + \ldots + b_{n_b} u(k-n_b) \tag{4}$$

Nech modelom sústavy je diferenčná rovnica v tvare (4), kde hodnoty $n_a = 2$ a $n_b = 2$. Potom táto diferenčná rovnica má tvar

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) \tag{5}$$

V maticovom zápise:

$$y(k) = h^\mathsf{T}\Theta \tag{6}$$

kde $h^\mathsf{T} = \begin{bmatrix} -y(k-1) & -y(k-2) & u(k-1) & u(k-2) \end{bmatrix}$ a $\Theta = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & b_1 & b_2 \end{bmatrix}^\mathsf{T}$. Neznámymi parametrami modelu teda sú koeficienty a_1, a_2, b_1 a b_2.

1.3 Štruktúra riadenia

Štruktúra riadenia je zrejmá zo zápisu „trojzložkového" zákona riadenia

$$\begin{aligned} R(z^{-1})u(k) &= T(z^{-1})r(k) - S(z^{-1})y(k) \\ u(k) &= \frac{T(z^{-1})}{R(z^{-1})} r(k) - \frac{S(z^{-1})}{R(z^{-1})} y(k) \end{aligned} \tag{7}$$

kde R, S a T sú polynómy v tvare

$$\begin{aligned} R(z^{-1}) &= 1 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} + \ldots + r_{n_r} z^{-n_r} \\ S(z^{-1}) &= s_0 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} + \ldots + s_{n_s} z^{-n_s} \\ T(z^{-1}) &= t_0 + t_1 z^{-1} + t_2 z^{-2} + \ldots + t_{n_t} z^{-n_t} \end{aligned} \tag{8}$$

Ako už bolo uvedené, koeficienty polynómov sú parametrami regulátora. Počet parametrov regulátora závisí od stupňa jednotlivých polynómov. Pre tento príklad sú stupne polynómov nasledovné: $n_r = 1$, $n_s = 1$ a $n_t = 0$. Potom počet parametrov regulátora je $n_r + n_s + 1 + n_t + 1$. Teda $1 + 1 + 1 + 0 + 1 = 4$.

Zákon riadenia je možné zapísať aj v tvare diferenčnej rovnice

$$u(k) = -r_1 u(k-1) - s_0 y(k) - s_1 y(k-1) + t_0 r(k) \tag{9}$$

1.4 Výpočet parametrov regulátora

Metóda, pomocou ktorej sa v tomto prípade budú počítať parametre regulátora bude *Pole placement* – Metóda rozmiestňovania pólov uzavretého regulačného obvodu (URO). Ako už názov naznačuje, metóda spočíva v predpísaní rozmiestnenia pólov URO. Inými slovami, predpisujú sa korene charakteristického polynómu URO. Voľbou polohy pólov URO je možné zvoliť dynamické vlastnosti URO. Poloha pólov sa zadáva zvolením *želaného polynómu*, ktorý má také korene, aké si želáme. Ak napr. žiadame, aby URO mal dynamiku druhého rádu, tak želaný polynóm bude 2. stupňa.

Pripomeňme, že v tomto prípade ide o „diskrétny“ polynóm, pretože riadiaci systém pracuje v diskrétnej oblasti, t.j. model sústavy je „diskrétny“ a aj zákon riadenia je „diskrétny“.

Parametre regulátora sa vypočítajú z porovnania koeficientov pri rovnakých mocninách charakteristického polynómu URO a želaného polynómu. Charakteristický polynóm URO sa bude skladať z polynómov modelu sústavy a zo zložiek regulátora, čo sú polynómy vystupujúce v zákone riadenia. Koeficienty polynómov modelu sústavy považujeme za známe, pretože ich získame identifikáciou. Koeficienty polynómov zo zákona riadenia – parametre regulátora sú neznáme. Získame ich riešením rovnice, kde na jednej strane je charakteristický polynóm URO a na druhej strane je želaný polynóm. Takáto rovnica sa nazýva *Diofantická rovnica.*

2 Identifikácia parametrov lineárneho modelu

Uvažujeme lineárny model v tvare (6). Parametre modelu budeme určovať *rekurzívnou metódou najmenších štvorcov.* Najskôr však odvodíme tzv. Off – line odhad parametrov modelu.

2.1 Metóda najmenších štvorcov

Predpokladajme, že sme spravili N experimentov – meraní. Napr.: na vstup sústavy sme priviedli „vhodný“ signál a s nejakou periódou vzorkovania sme zaznamenávali hodnoty vstupného aj výstupného (zo sústavy) signálu. Teda máme nameraných N hodnôt vstupu, ku ktorým prislúcha N hodnôt výstupu.

V i-tom experimente sme namerali hodnotu výstupného signálu y_i. Nech model má odhadnuté „nejaké“ parametre. Potom ak privedieme na vstup modelu hodnotu u_i, čo je nameraná hodnota vstupného signálu prislúchajúca k y_i, na výstupe modelu bude odhad $\hat{y}_i$. Tento odhad bude vo všeobecnosti rozdielny od nameranej hodnoty. Namiesto „nejakých“ hodnôt parametrov modelu určme také, pre ktoré bude platiť, že suma štvorcov odchýlok vo všetkých nameraných bodoch bude minimálna.

Odchýlka v i-tom experimente je $e_i = y_i - \hat{y}_i$. Odhad výstupu v i-tom experimente je $\hat{y}_i = h_i^\mathsf{T}\Theta$, čo je rovnaký zápis ako v (6), len namiesto času k je použitý index i. Všetky odchýlky v N meraniach sú:

$$\begin{aligned} e_1 &= y_1 - h_1^\mathsf{T}\Theta \\ &\vdots \\ e_N &= y_N - h_N^\mathsf{T}\Theta \end{aligned} \tag{10}$$

čo možno zapísať aj takto:

$$e = y - \begin{bmatrix} h_1^\mathsf{T} \\ \vdots \\ h_N^\mathsf{T} \end{bmatrix} \Theta \tag{11}$$

Vektor h_1^T, za predpokladu, že začiatočný čas je $t_0 = 0$ a prvá vzorka vstupu a výstupu bola nameraná v čase $t(k = 1) = 1 \cdot T_{vz}$ je $h_1^\mathsf{T} = [-y(0) \quad 0 \quad u(0) \quad 0]$. Analogicky $h_5^\mathsf{T} = h(5)^\mathsf{T} = [-y(4) \quad -y(3) \quad u(4) \quad u(3)]$.

Pre lepšiu názornosť nech je nameraných 5 vzoriek (a tiež hodnoty $y(0)$, $u(0)$).

Potom všetky odchýlky je možné zapísať takto:

$$e = y - \begin{bmatrix} -y(0) & 0 & u(0) & 0 \\ -y(1) & -y(0) & u(1) & u(0) \\ -y(2) & -y(1) & u(2) & u(1) \\ -y(3) & -y(2) & u(3) & u(2) \\ -y(4) & -y(3) & u(4) & u(3) \end{bmatrix} \Theta \tag{12}$$

Všeobecný zápis

$$e = y - H\Theta \tag{13}$$

Ako už bolo uvedené, vektor Θ, čo je vektor parametrov modelu určíme tak, aby suma štvorcov odchýlok bola minimálna. Zaveďme účelovú funkciu v tvare

$$J(\Theta) = \frac{1}{2} e^{\mathsf{T}} e = \frac{1}{2} (y - H\Theta)^{\mathsf{T}} (y - H\Theta) \tag{14}$$

Je potrebné nájsť extrém tejto účelovej funkcie, čo znamená derivovať ju podľa vektora parametrov modelu.

$$J(\Theta) = \frac{1}{2} (y - H\Theta)^{\mathsf{T}} (y - H\Theta) = \frac{1}{2} \left(y^{\mathsf{T}} y - y^{\mathsf{T}} H\Theta - \Theta^{\mathsf{T}} H^{\mathsf{T}} y + \Theta^{\mathsf{T}} H^{\mathsf{T}} H\Theta \right) \tag{15}$$

S využitím rovnosti

$$\nabla_x \left(x^{\mathsf{T}} a \right) = \nabla_x \left(a^{\mathsf{T}} x \right) = a \tag{16}$$

máme

$$\begin{aligned} \nabla_\Theta \left(y^{\mathsf{T}} y \right) &= 0 \\ \nabla_\Theta \left(y^{\mathsf{T}} H\Theta \right) &= \left(y^{\mathsf{T}} H \right)^{\mathsf{T}} = H^{\mathsf{T}} y \\ \nabla_\Theta \left(\Theta^{\mathsf{T}} H^{\mathsf{T}} y \right) &= H^{\mathsf{T}} y \\ \nabla_\Theta \left(\Theta^{\mathsf{T}} H^{\mathsf{T}} H\Theta \right) &= \left(H^{\mathsf{T}} H\Theta + \left(\Theta^{\mathsf{T}} H^{\mathsf{T}} H \right)^{\mathsf{T}} \right) = H^{\mathsf{T}} H\Theta + H^{\mathsf{T}} H\Theta \end{aligned}$$

teda

$$\begin{aligned} \nabla_\Theta (J) &= \frac{1}{2} \left(-H^{\mathsf{T}} y - H^{\mathsf{T}} y + H^{\mathsf{T}} H\Theta + H^{\mathsf{T}} H\Theta \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(-2H^{\mathsf{T}} y + 2H^{\mathsf{T}} H\Theta \right) \\ &= -H^{\mathsf{T}} y + H^{\mathsf{T}} H\Theta \end{aligned} \tag{17}$$

V extréme je hodnota $\nabla_\Theta (J)$ nulová, teda

$$\begin{aligned} 0 &= -H^{\mathsf{T}} y + H^{\mathsf{T}} H\Theta \\ H^{\mathsf{T}} H\Theta &= H^{\mathsf{T}} y \end{aligned} \tag{18}$$

a nakoniec

$$\Theta = \left(H^{\mathsf{T}} H \right)^{-1} H^{\mathsf{T}} y \tag{19}$$

Rovnica (19) sa nazýva Gaussov vzorec.

Keďže $\nabla_\Theta \nabla_\Theta (J) = \left(H^{\mathsf{T}} H \right) = H^{\mathsf{T}} H$ a $H^{\mathsf{T}} H = R$ je kladne definitná, pretože H je nenulová a teda $H^{\mathsf{T}} H$ je symetrická a kladne definitná, potom nájdený extrém je minimum. Matica R sa nazýva informačná matica a $P = R^{-1}$ sa nazýva disperzná matica (alebo aj Kovariančná matica) s $(n_a + n_b)$ riadkami a $(n_a + n_b)$ stĺpcami.

Dosadením do Gaussovho vzorca získame Off–line odhad parametrov modelu.

2.2 Rekurzívna metóda najmenších štvorcov

Predpokladajme, že poznáme odhad parametrov modelu v predchádzajúcom kroku $(k-1)$ a chceme získať odhad parametrov modelu v aktuálnom kroku k. Ak poznáme odhad parametrov v kroku $(k-1)$, je zrejmé, že poznáme aj maticu $P(k-1)$.

Pre lepšiu názornosť nech situácia je takáto: Aktuálny krok je $k = 2$. V kroku $(k-1)$, teda v kroku $k = 1$ bola matica $P(k-1)$. Ak prejdeme z kroku $(k-1)$ do kroku k, znemená to pridať nový riadok matice H. Novým riadkom je vektor $h^\mathsf{T}(k)$. Pre krok k môžme písať Gausov vzorec:

$$\Theta(k) = \left(\begin{bmatrix} H^\mathsf{T}(k-1) & h(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H(k-1) \\ h^\mathsf{T}(k) \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} H^\mathsf{T}(k-1) & h(k) \end{bmatrix} y(k) \tag{20}$$

Odkiaľ matica $P(k)$ je

$$\begin{aligned} P(k) &= \left(\begin{bmatrix} H^\mathsf{T}(k-1) & h(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H(k-1) \\ h^\mathsf{T}(k) \end{bmatrix} \right)^{-1} \\ &= \left(H^\mathsf{T}(k-1)H(k-1) + h(k)h^\mathsf{T}(k) \right)^{-1} \\ &= \left(P(k-1)^{-1} + h(k)h^\mathsf{T}(k) \right)^{-1} \end{aligned} \tag{21}$$

V rovnici (21) sa vyskytuje inverzia matice, ktorej rozmer závisí od počtu parametrov modelu. Tento počet môže byť veľký, a inverzia takto veľkej matice môže byť nerealizovateľná. Použitie Woodburryho lemmy o inverzií matíc rieši tento problém. Platí (v tomto texte nebudeme uvádzať dôkaz Woodburryho lemmy)

$$(A+BD)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B\left(DA^{-1}B+1\right)^{-1}DA^{-1} \tag{22}$$

Použitím (22) prejde (21) do tvaru

$$\begin{aligned} P(k) &= P(k-1) - P(k-1)h(k)\left(1 + h^\mathsf{T}(k)P(k-1)h(k)\right)^{-1} \cdot h^\mathsf{T}(k)P(k-1) \\ &= P(k-1) - Y(k)h^\mathsf{T}(k)P(k-1) \end{aligned} \tag{23}$$

kde

$$Y(k) = \frac{P(k-1)h(k)}{1 + h^\mathsf{T}(k)P(k-1)h(k)}$$

je tzv. „zosilnenie“. Rovnica (23) je rekurzívnym vzťahom pre výpočet novej matice P z predchádzajúcej matice P.

Odhad parametrov modelu v kroku k je

$$\Theta(k) = P(k)H^\mathsf{T}(k)y(k) = P(k)\sum_{i=1}^{k} h(i)y_i = P(k)\left(\sum_{i=1}^{k-1} h(i)y_i + h(k)y(k)\right) \tag{24}$$

Z (21) je zrejmé že platí

$$P^{-1}(k) = P(k-1) + h(k)h(k)^\mathsf{T} \tag{25a}$$

$$P^{-1}(k-1) = P^{-1}(k) - h(k)h^\mathsf{T}(k) \tag{25b}$$

Potom

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{k-1} h^\mathsf{T}(i)y_i &= P^{-1}(k-1)\Theta(k-1) = \left(P^{-1}(k) - h(k)h^\mathsf{T}(k)\right)\Theta(k-1) \\ &= P^{-1}(k)\Theta(k-1) - h(k)h^\mathsf{T}(k)\Theta(k-1) \end{aligned} \tag{26}$$

čo umožní písať odhad parametrov modelu v kroku k v tvare

$$\begin{aligned} \Theta(k) &= P(k)\left(P^{-1}(k)\Theta(k-1) - h(k)h^\mathsf{T}(k)\Theta(k-1) + h(k)y(k)\right) \\ &= P(k)P^{-1}(k)\Theta(k-1) - P(k)h(k)h^\mathsf{T}(k)\Theta(k-1) + P(k)h(k)y(k) \\ &= I\Theta(k-1) + P(k)h(k)\left(y(k) - h^\mathsf{T}(k)\Theta(k-1)\right) \\ &= \Theta(k-1) + P(k)h(k)e(k) \end{aligned} \tag{27}$$

Tabuľka 1: Algoritmus rekurzívnej MNŠ

1.	Odchýlka (rezíduum)	$e(k) = y(k) - h^{\mathsf{T}}(k)\Theta(k-1)$
2.	Zosilnenie	$Y(k) = \dfrac{P(k-1)h(k)}{1 + h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}$
3.	Kovariančná matica	$P(k) = P(k-1) - Y(k)h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)$
4.	Nový odhad parametrov	$\Theta(k) = \Theta(k-1) + Y(k)e(k)$

Rovnicu (27) môžeme priviesť aj do iného tvaru. Platí:

$$\begin{aligned}
\Theta(k) &= \Theta(k-1) + P(k)h(k)e(k) \\
&= \Theta(k-1) + \left(P(k-1) - Y(k)h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)\right) h(k)e(k) \\
&= \Theta(k-1) + \left(P(k-1)h(k) - \frac{P(k-1)h(k)h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}{1 + h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}\right) e(k) \\
&= \Theta(k-1) \\
&+ \left(\frac{P(k-1)h(k) + P(k-1)h(k)h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}{1 + h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}\right. \\
&- \left.\frac{P(k-1)h(k)h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}{1 + h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}\right) e(k) \\
&= \Theta(k-1) + \left(\frac{P(k-1)h(k)}{1 + h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}\right) e(k) \\
&+ \left(\frac{P(k-1)h(k)h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}{1 + h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}\right) e(k) \\
&- \left(\frac{P(k-1)h(k)h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}{1 + h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}\right) e(k) \\
&= \Theta(k-1) + \left(\frac{P(k-1)h(k)}{1 + h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}\right) e(k)
\end{aligned} \tag{28}$$

Potom

$$\Theta(k) = \Theta(k-1) + Y(k)e(k) \tag{29}$$

Rovnica (29) je rekurzívnym vzťahom pre výpočet nových parametrov modelu z predchádzajúcich hodnôt parametrov modelu.

2.2.1 Súhrn

Algoritmus rekurzívnej metódy najmenších štvorcov je zhrnutý v Tabuľke 1.

2.2.2 Štart algoritmu

Disperzná matica má začiatočný tvar

$$P(0) = \alpha I \tag{30}$$

kde I je jednotková matica rovnakého rozmeru ako P a α je reálne číslo napríklad z intervalu $\langle 10,\ 10^6 \rangle$.

Začiatočné hodnoty parametrov modelu môžu byť napríklad nulové, t.j. vektor Θ je nulový vektor príslušnej dĺžky:

$$\Theta(0) = 0 \tag{31}$$

Nie je to však pravidlo a začiatočné hodnoty parametrov modelu môžu byť v princípe akékoľvek. Tieto hodnoty sa spravidla využívajú v ďalších výpočtoch a tak napríklad môže vzniknúť požiadavka, že niektorý z parametrov nemôže byť nulový (napr. pre delenie nulou) a podobne. Tiež môže existovať približný, hrubý odhad týchto hľadaných (identifikovaných) parametrov a tento je potom často výhodné použiť ako začiatočný.

Tabuľka 2: Algoritmus rekurzívnej MNŠ s exponenciálnym zabúdaním

1.	Odchýlka (rezíduum)	$e(k) = y(k) - h^{\mathsf{T}}(k)\Theta(k-1)$
2.	Zosilnenie	$Y(k) = \dfrac{P(k-1)h(k)}{\lambda + h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)h(k)}$
3.	Kovariančná matica	$P(k) = \dfrac{1}{\lambda}\left(P(k-1) - Y(k)h^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)\right)$
4.	Nový odhad parametrov	$\Theta(k) = \Theta(k-1) + Y(k)e(k)$

2.2.3 Modifikácia algoritmu - zabúdanie

V účelovej funkcii (14) sa nepredpokladá žiadne váhovanie jednotlivých prvkov vektora odchýlok e. Všetky prvky majú rovnakú váhu. Z pohľadu rekurzívneho algoritmu to znamená, že najstaršie odchýlky majú rovnakú váhu ako najnovšie. Často však môže byť veľmi výhodné ak by novšie vzorky, teda novšie zistené odchýlky mali vyššiu váhu ako staršie. Inými slovami výhodné by bolo zabúdať na staršie odchýlky a uvažovať len tie novšie.

V účelovej funkcii (14) je možné uvažovať váhovaciu maticu W nasledovne:

$$J(\Theta) = \frac{1}{2}e^{\mathsf{T}}We \tag{32}$$

kde matica

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & w_N \end{bmatrix} \tag{33}$$

umožní realizovať váhovanie jednotlivých štvorcov odchýlok.

Ak zvolíme váhovacie koeficienty ako $w_i = \lambda^{N-i}$ potom sa takého váhovanie nazýva exponenciálne zabúdanie. Číslo λ sa volí z intervalu $\langle 0, 1\rangle$, pričom typické hodnoty sú $\lambda = 0,99$ či $\lambda = 0,95$. Potom je zrejmé, že najnovšia vzorka, najnovší štvorec odchýlky, má váhu (je prenásobený číslom) $w_N = \lambda^{N-N} = 1$. Všetky ostatné váhovacie koeficienty majú nižšiu hodnotu (hodnota exponenciálne klesá ako sa zmenšuje poradové číslo i).

Ak aplikujeme ten istý postup pre získanie rekurzívneho algoritmu MNŠ ako v prípade bez exponenciálneho zabúdania, tak verzia so zabúdaním vedie na algoritmus sumarizovaný v tabuľke 2.

3 Cvičenie druhé

1. Zrealizujme priebežnú identifikáciu parametrov ARX modelu tak ako to predpokladá konkrétny príklad v časti 1. Vyskúšajte verziu bez exponenciálneho zabúdania a s exponenciálnym zabúdaním.

3.1 Ukážka simulačnej schémy pre simuláciu daného riadeného systému

Cieľom nasledujúceho je zostaviť (univerzálnu) simulačnú schému, do ktorej je možné následne doplniť v podstate akýkoľvek riadiaci systém.

Simulačná schéma v tomto prípade realizuje len simuláciu samotného riadeného systému. Vstupný signál riadeného systému je tu zvolený (daný vopred), nie je generovaný riadiacim systémom.

Riadený systém nech predstavuje prenosová funkcia v tvare

$$G(s) = \frac{0,15}{s^2 + 0,3s + 0,2} \tag{34}$$

Ide o prenosovú funkciu druhého rádu, ktorá má v čitateli polynóm nultého stupňa, teda nemá nuly.

Parametre riadeného systému vo forme vstupného vektora matice dynamiky potom sú:

Výpis kódu 1: Súbor ar03_pr01.py

```python
A = np.array([[0, 1], [-0.2, -0.3]])
b = np.array([[0], [0.15]])
```

Funkcia, ktorá realizuje diferenciálne rovnice riadeného systému, nech je nasledovná:

Výpis kódu 2: Súbor ar03_pr01.py

```python
def fcn_difRovnice(x, t, u):

    dotx = np.dot(A,x) + np.dot(b,u)

    return dotx
```

Simulačnú schému nech realizuje nasledujúca funkcia:

Výpis kódu 3: Súbor ar03_pr01.py

```python
def fcn_simSch_01_zaklad(t_start, T_s, finalIndex, sig_u_ext):

    #-----------------------------------------
    t_log = np.zeros([finalIndex, 1])
    t_log[0,:] = t_start

    #-----------------------------------------
    x_0 = np.array([0, 0])

    x_log = np.zeros([finalIndex, len(x_0)])
    x_log[0,:] = x_0

    #-----------------------------------------


    #-----------------------------------------
    timespan = np.zeros(2)
    for idx in range(1, int(finalIndex)):

        timespan[0] = t_log[idx-1,:]
        timespan[1] = t_log[idx-1,:] + T_s

        u = sig_u_ext[idx-1,:]

        odeOut = odeint(fcn_difRovnice,
                        x_log[idx-1,:],
                        timespan,
                        args=(u,)
                        )

        x_log[idx,:] = odeOut[-1,:]
        t_log[idx,:] = timespan[-1]

    return [t_log, x_log]
```

Nastavenia potrebné pre samotnú simuláciu a vygenerovanie signálov, ktoré sa používajú pri simulácii (ktoré sú dopredu známe - dané):

Výpis kódu 4: Súbor ar03_pr01.py

```python
# Nastavenia simulacie

sim_t_start = 0
sim_t_final = 200
sim_T_s = 0.1
sim_finalIndex = int(((sim_t_final - sim_t_start)/sim_T_s) + 1)
```

Pre simuláciu je potrebné vytvoriť vstupný signál $u(t)$ pre riadený systém. Nech je nasledovný:

Výpis kódu 5: Súbor ar03_pr01.py

```python
tab_delt_u = np.array([
                      [0, 0],
                      [1, 1],
                      [50, 0],
                      [100, -1],
                      [150, 0],
```

```
                               ])


sig_delt_u = np.zeros([sim_finalIndex, 1])
for idx in range(sig_delt_u.shape[0]):
    lastValue = tab_delt_u[:,1][tab_delt_u[:,0]<=idx*sim_T_s ][-1]
    sig_delt_u[idx] = lastValue


sig_u_ext = sig_delt_u
```

Vstupný signál $u(t)$ je zobrazený na obr. 1.

Spustenie simulácie:

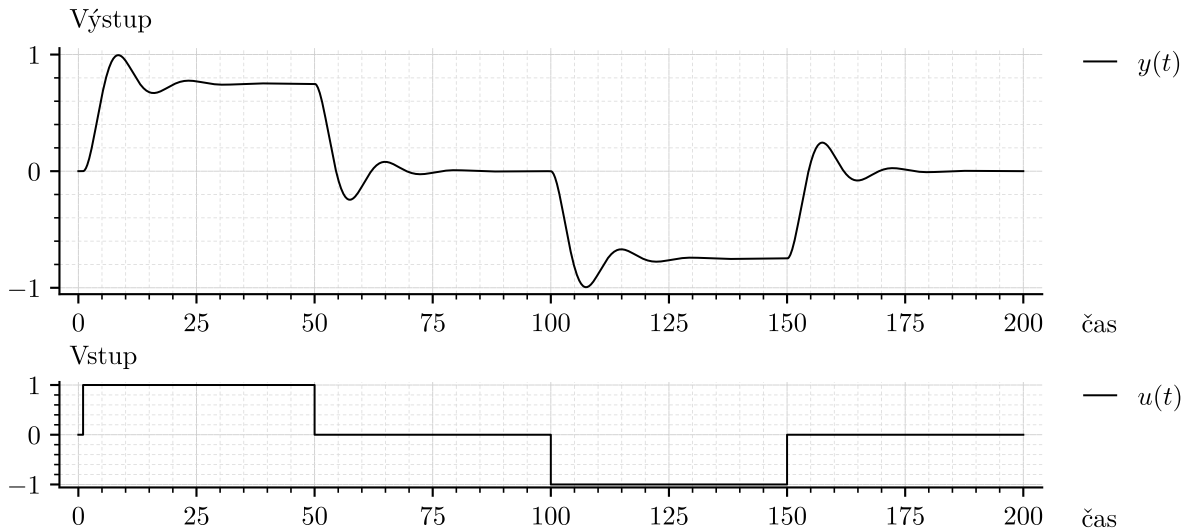
Výpis kódu 6: Súbor `ar03_pr01.py`

```
# Spustenie simulacie

t_log, x_log = fcn_simSch_01_zaklad(
                    sim_t_start,
                    sim_T_s,
                    sim_finalIndex,
                    sig_u_ext,
                    )
```

Nakreslenie obrázka (pre prehľadnosť je kód v samostatnom súbore):

Výpis kódu 7: Súbor `ar03_pr01.py`

```
# Obrazok

figName = 'figsc_ar03_fig01'
figNameNum = 1

exec(open('./figjobs/' + figName + '.py', encoding='utf-8').read())

```



Obr. 1

3.2 Doplnenie algoritmu RMNŠ do simulačnej schémy

V predchádzajúcom bola vytvorená simulačná schéma pre simuláciu uvažovaného riadeného systému. Tu je cieľom doplniť do simulačnej schémy algoritmus RMNŠ.

Pre úplnosť, ARX (AutoRegressive eXogenous) model, ktorý je identifikovaný (klasickou RMNŠ), je vo všeobecnosti nasledovný:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + \xi(k) \tag{35}$$

kde

$$\begin{aligned} B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + \ldots + b_{n_b} z^{-n_b} \\ A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + \ldots + a_{n_a} z^{-n_a} \end{aligned} \tag{36}$$

a $\xi(k)$ predstavuje poruchy a šum. V ďalšom budeme uvažovať $\xi(k) = 0$. ARX model vyjadrený v tvare diferenčnej rovnice:

$$y(k) = -\,a_1 y(k-1) - \ldots - a_{n_a} y(k-n_a) + b_1 u(k-1) + \ldots + b_{n_b} u(k-n_b) \tag{37}$$

Nech modelom riadeného systému je diferenčná rovnica v uvedenom tvare, kde hodnoty $n_a = 2$ a $n_b = 2$. Potom táto diferenčná rovnica má tvar

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) \tag{38}$$

V maticovom zápise:

$$y(k) = h^\mathsf{T} \Theta \tag{39}$$

kde $h^\mathsf{T} = \begin{bmatrix} -y(k-1) & -y(k-2) & u(k-1) & u(k-2) \end{bmatrix}$ a $\Theta = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & b_1 & b_2 \end{bmatrix}^\mathsf{T}$. Neznámymi parametrami modelu teda sú koeficienty a_1, a_2, b_1 a b_2.

Takpovediac diferenciálne rovnice riadeného systému ostavajú samozrejme rovnaké ako sme ich realizovali v predchádzajúcom, teda aj tu („na začiatku skriptu“) platí výpis kódu 1 a 2.

Simulačnú schému nech realizuje nasledujúca funkcia:

Výpis kódu 8: Súbor ar03_pr02.py

```python
def fcn_simSch_02_lenRMNS(t_start, T_s, finalIndex, sig_u_ext):

    #-----------------------------------------
    t_log = np.zeros([finalIndex, 1])
    t_log[0,:] = t_start

    #-----------------------------------------
    x_0 = np.array([0, 0])

    x_log = np.zeros([finalIndex, len(x_0)])
    x_log[0,:] = x_0

    #-----------------------------------------

    u_log = np.zeros([finalIndex, 1])

    #-----------------------------------------

    RMNS_theta_0 = np.array([[ 0.001],
                             [ 0.001],
                             [ 0.001],
                             [ 0.001]])

    RMNS_theta_log = np.zeros([finalIndex, len(RMNS_theta_0)])
    RMNS_theta_log[0,:] = RMNS_theta_0.reshape(1,-1)

    RMNS_P_0 = np.identity(4) * 10**6

    RMNS_P_log = np.zeros([finalIndex, RMNS_P_0.size])
    RMNS_P_log[0,:] = RMNS_P_0.reshape(1,-1)

    #----

    RMNS_y_predict_log = np.zeros([finalIndex, 1])

    #-----------------------------------------
    timespan = np.zeros(2)
    for idx in range(1, int(finalIndex)):

        timespan[0] = t_log[idx-1,:]
        timespan[1] = t_log[idx-1,:] + T_s

        odeOut = odeint(fcn_difRovnice,
                        x_log[idx-1,:],
                        timespan,
                        args=(u_log[idx-1,:],)
                        )

        x_log[idx,:] = odeOut[-1,:]
        t_log[idx,:] = timespan[-1]

```

```
        #--------------------
        # ALGORITMUS RMNS
        y_k = x_log[idx,0]

        h_k = np.array([[-x_log[idx-1,0]],
                        [-x_log[idx-2,0]], # pozor na to idx-2 !!!
                        [u_log[idx-1,0]],
                        [u_log[idx-2,0]], # pozor na to idx-2 !!!
                        ])

        theta_km1 = RMNS_theta_log[idx-1,:].reshape(4,-1)
        P_km1 = RMNS_P_log[idx-1,:].reshape(4,4)

        #----------
        lambdaKoef = 1.0

        e_k = y_k - np.matmul(h_k.T, theta_km1)
        Y_k =  np.matmul(P_km1, h_k) / (lambdaKoef + np.matmul(np.matmul(h_k.T, P_km1), h_k))
        P_k = (1/lambdaKoef) * (P_km1 - np.matmul(np.matmul(Y_k, h_k.T), P_km1))
        theta_k = theta_km1 + Y_k * e_k

        #----

        RMNS_theta_log[idx,:] = theta_k.reshape(1,-1)
        RMNS_P_log[idx,:] = P_k.reshape(1,-1)

        #----------

        RMNS_y_predict_log[idx,:] = np.matmul(h_k.T, theta_km1)

        #--------------------
        u_log[idx,:] = sig_u_ext[idx-1,:]

    return [t_log, x_log, RMNS_y_predict_log, RMNS_theta_log]
```

V uvedenej simulačnej schéme je implementovaný RMNŠ algoritmus, ktorého výstupom je vektor parametrov `theta_k` a následne je tiež vypočítaná (v každom cykle) jednokroková predikcia výstupného signálu zapisovaná do vektora `RMNS_y_predict_log`.

Všimnime si tiež napríklad, že faktor zabúdania λ (premenná `lambdaKoef`) je nastavený na hodnotu $\lambda = 1$, teda algoritmus nevyužíva zabúdanie.

Nastavenia potrebné pre samotnú simuláciu a vygenerovanie signálov, ktoré sa používajú pri simulácii (ktoré sú dopredu známe - dané):

Výpis kódu 9: Súbor `ar03_pr02.py`

```
# Nastavenia simulacie

sim_t_start = 0
sim_t_final = 55
sim_T_s = 0.25
sim_finalIndex = int(((sim_t_final - sim_t_start)/sim_T_s) + 1)
```

Pre simuláciu je potrebné vytvoriť vstupný signál $u(t)$ pre riadený systém. Nech je nasledovný:

Výpis kódu 10: Súbor `ar03_pr02.py`

```
# Preddefinovane signaly

period_time = 40
period_tab = np.array([
                      [0, 1],
                      [10, 0],
                      [20, -1],
                      [30, 0],
                      ])

sig_vysl = np.zeros([sim_finalIndex, 1])

for period in range(int(sim_t_final/period_time) + 1):


    for idx in range( int((period*period_time)/sim_T_s), int((period*period_time + period_time)/sim_T_s)):

        lastValue = period_tab[:,1][(period_tab[:,0] + (period*period_time))<=idx*sim_T_s ][-1]
```

```
        try:
            sig_vysl[idx] = lastValue
        except:
            break

sig_u_ext = sig_vysl
```

Spustenie simulácie:

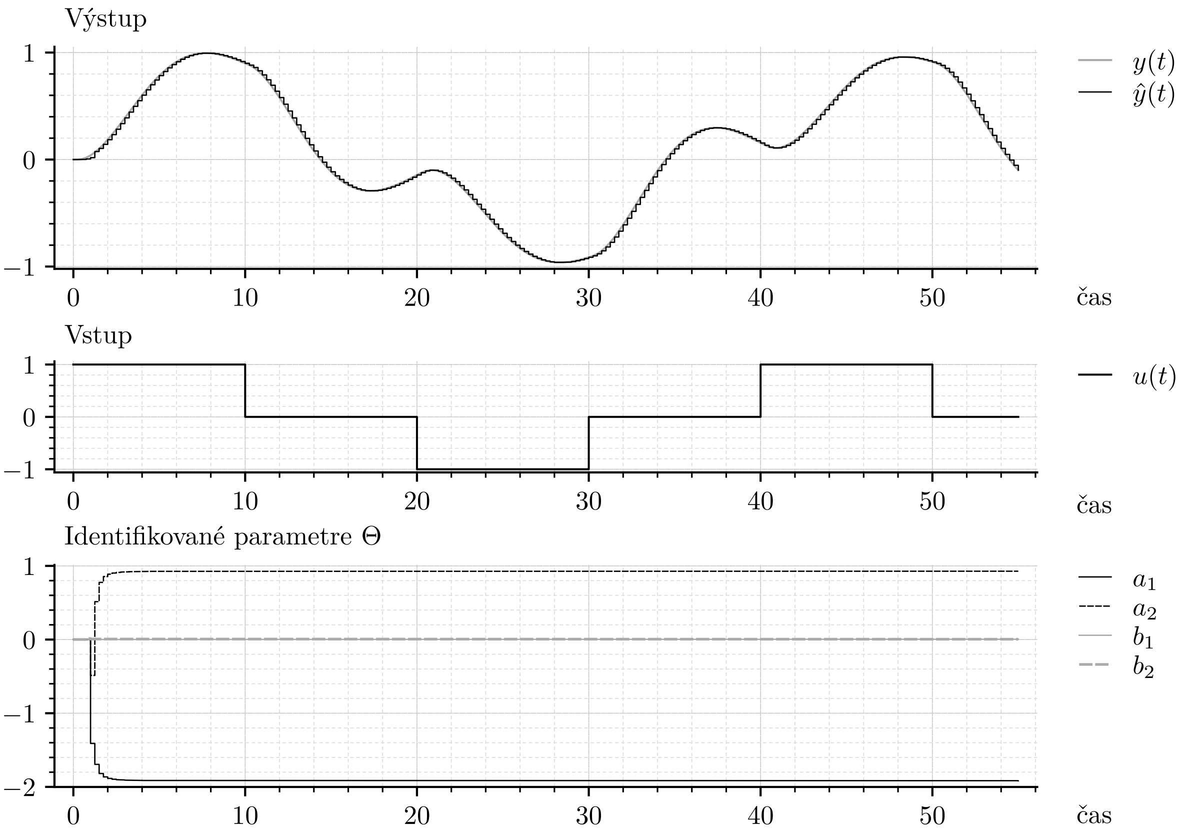
Výpis kódu 11: Súbor `ar03_pr02.py`

```
# Spustenie simulacie

t_log, x_log, RMNS_y_predict_log, RMNS_theta_log =
    fcn_simSch_02_lenRMNS(
    sim_t_start,
    sim_T_s,
    sim_finalIndex,
    sig_u_ext,
    )
```

Nakreslenie obrázku (pre prehľadnosť je kód v samostatnom súbore):

Výpis kódu 12: Súbor `ar03_pr02.py`

```
# Obrazok

figName = 'figsc_ar03_fig02'
figNameNum = 0

exec(open('./figjobs/' + figName + '.py', encoding='utf-8').read())

```



Obr. 2

Pre zaujímavosť, priebežne identifikované parametre Θ sú zapisované do poľa `RMNS_theta_log`. Posledný riadok v tomto poli je:

Výpis kódu 13: Súbor `ar03_pr02.py`

```
print(RMNS_theta_log[-1,:])
```

```
[-1.91569536  0.92772642  0.00456786  0.00445568]
```

3.3 Algoritmus RMNŠ pri zašumených dátach

V predchádzajúcom bola vytvorená simulačná schéma pre simuláciu uvažovaného riadeného systému a bol do nej doplnený algoritmus RMNŠ.

Výstupná veličina samotného simulovaného riadeného systému je, pochopiteľne, bez šumu. Tu je cieľom preskúmať ako je RMNŠ schopný vysporiadať sa s prítomnosťou šumu v dátach výstupnej veličiny.

Aj tu platí, že diferenciálne rovnice riadeného systému ostávajú samozrejme rovnaké ako sme ich realizovali v predchádzajúcom, teda aj tu („na začiatku skriptu“) platí výpis kódu 1 a 2.

Simulačnú schému nech realizuje nasledujúca funkcia:

Výpis kódu 14: Súbor `ar03_pr03.py`

```
# Simulacna schema:

def fcn_simSch_02_lenRMNS_noise(t_start, T_s, finalIndex, sig_u_ext, lambdaKoef):

    #------------------------------------------
    t_log = np.zeros([finalIndex, 1])
    t_log[0,:] = t_start

    #------------------------------------------
    x_0 = np.array([0, 0])

    x_log = np.zeros([finalIndex, len(x_0)])
    x_log[0,:] = x_0


    y_log_noise = np.zeros([finalIndex, 1])
    y_log_noise[0,0] = x_log[0,0]

    #------------------------------------------

    u_log = np.zeros([finalIndex, 1])

    #------------------------------------------

    RMNS_theta_0 = np.array([[ 0.001],
                             [ 0.001],
                             [ 0.001],
                             [ 0.001]])


    RMNS_theta_log = np.zeros([finalIndex, len(RMNS_theta_0)])
    RMNS_theta_log[0,:] = RMNS_theta_0.reshape(1,-1)

    RMNS_P_0 = np.identity(4) * 10**2

    RMNS_P_log = np.zeros([finalIndex, RMNS_P_0.size])
    RMNS_P_log[0,:] = RMNS_P_0.reshape(1,-1)

    RMNS_y_predict_log = np.zeros([finalIndex, 1])

    #------------------------------------------
    timespan = np.zeros(2)
    for idx in range(1, int(finalIndex)):

        timespan[0] = t_log[idx-1,:]
        timespan[1] = t_log[idx-1,:] + T_s

        odeOut = odeint(fcn_difRovnice,
                        x_log[idx-1,:],
                        timespan,
                        args=(u_log[idx-1,:],)
                        )

        x_log[idx,:] = odeOut[-1,:]
        t_log[idx,:] = timespan[-1]

        # Tu sa umelo pridava sum k vystupnej velicine riadeneho systemu

        y_log_noise[idx,0] = x_log[idx,0] + np.random.normal(0, 0.1, size=1)
```

```
        #--------------------
        # ALGORITMUS RMNS

        # Pri RMNS sa vyuziva zasumena vystupna velicina

        y_k = y_log_noise[idx,0]

        h_k = np.array([[-y_log_noise[idx-1,0]],
                        [-y_log_noise[idx-2,0]], # pozor na idx-2 !!!
                        [u_log[idx-1,0]],
                        [u_log[idx-2,0]], # pozor na idx-2 !!!
                        ])

        theta_km1 = RMNS_theta_log[idx-1,:].reshape(4,-1)
        P_km1 = RMNS_P_log[idx-1,:].reshape(4,4)

        #----------
        e_k = y_k - np.matmul(h_k.T, theta_km1)
        Y_k =  np.matmul(P_km1, h_k) / (lambdaKoef + np.matmul(np.matmul(h_k.T, P_km1), h_k))
        P_k = (1/lambdaKoef) * (P_km1 - np.matmul(np.matmul(Y_k, h_k.T), P_km1))
        theta_k = theta_km1 + Y_k * e_k

        #----------
        RMNS_theta_log[idx,:] = theta_k.reshape(1,-1)
        RMNS_P_log[idx,:] = P_k.reshape(1,-1)

        RMNS_y_predict_log[idx,:] = np.matmul(h_k.T, theta_km1)

        #--------------------
        u_log[idx,:] = sig_u_ext[idx-1,:]

    return [t_log, x_log, RMNS_y_predict_log, RMNS_theta_log, y_log_noise]
```

V uvedenej simulačnej schéme je implementovaný RMNŠ algoritmus, ktorého výstupom je vektor parametrov `theta_k` a následne je tiež vypočítaná (v každom cykle) jednokroková predikcia výstupného signálu zapisovaná do vektora `RMNS_y_predict_log`.

Nastavenia potrebné pre samotnú simuláciu a vygenerovanie signálov, ktoré sa používajú pri simulácii (ktoré sú dopredu známe - dané):

Výpis kódu 15: Súbor `ar03_pr03.py`

```
# Nastavenia simulacie

sim_t_start = 0
sim_t_final = 250
sim_T_s = 0.1
sim_finalIndex = int(((sim_t_final - sim_t_start)/sim_T_s) + 1)
```

Pre simuláciu je potrebné vytvoriť vstupný signál $u(t)$ pre riadený systém. Nech je nasledovný:

Výpis kódu 16: Súbor `ar03_pr03.py`

```
# Preddefinovane signaly

period_time = 200
period_tab = np.array([
                      [0, 1],
                      [80, 0],
                      [120, -1],
                      [180, 0],
                      ])

sig_vysl = np.zeros([sim_finalIndex, 1])

for period in range(int(sim_t_final/period_time) + 1):

    for idx in range( int((period*period_time)/sim_T_s), int((period*period_time + period_time)/sim_T_s)):

        lastValue = period_tab[:,1][(period_tab[:,0] + (period*period_time))<=idx*sim_T_s ][-1]
        try:
            sig_vysl[idx] = lastValue
```

```
        except:
            break

sig_u_ext = sig_vysl
```

3.3.1 Bez zabúdania

Ďalším nastavením, špeciálne dôležitým v tomto príklade je koeficient zabúdania λ:

Výpis kódu 17: Súbor `ar03_pr03.py`

```
sim_lambdaKoef = 1.0
```

Pamätajme teda, že faktor zabúdania λ (premenná `lambdaKoef`) je tu nastavený na hodnotu $\lambda = 1$, teda algoritmus nevyužíva zabúdanie.
Spustenie simulácie:

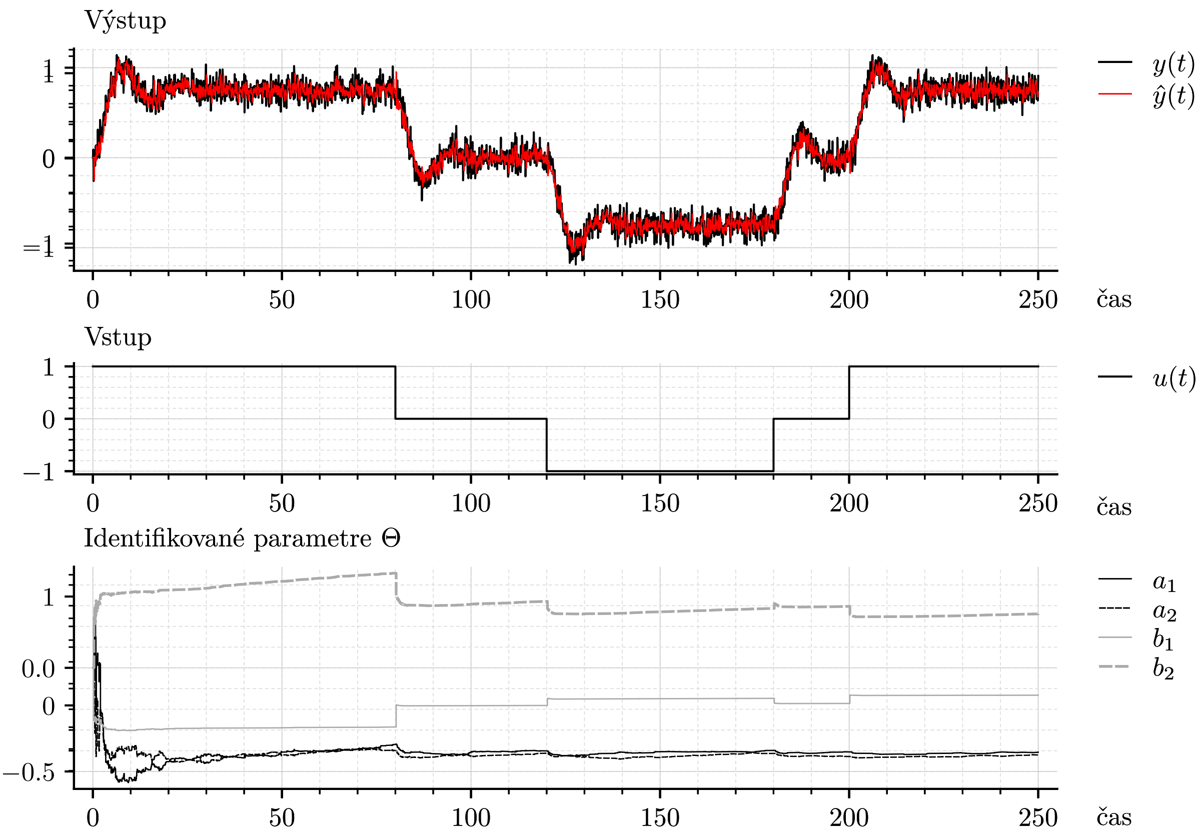
Výpis kódu 18: Súbor `ar03_pr03.py`

```
# Spustenie simulacie

t_log, x_log, RMNS_y_predict_log, RMNS_theta_log, y_log_noise =
    fcn_simSch_02_lenRMNS_noise(
    sim_t_start,
    sim_T_s,
    sim_finalIndex,
    sig_u_ext,
    sim_lambdaKoef
    )
```

Nakreslenie obrázka (pre prehľadnosť je kód v samostatnom súbore):

Výpis kódu 19: Súbor `ar03_pr03.py`

```
# Obrazok

figName = 'figsc_ar03_fig03'
figNameNum = 0

exec(open('./figjobs/' + figName + '.py', encoding='utf-8').read())
```



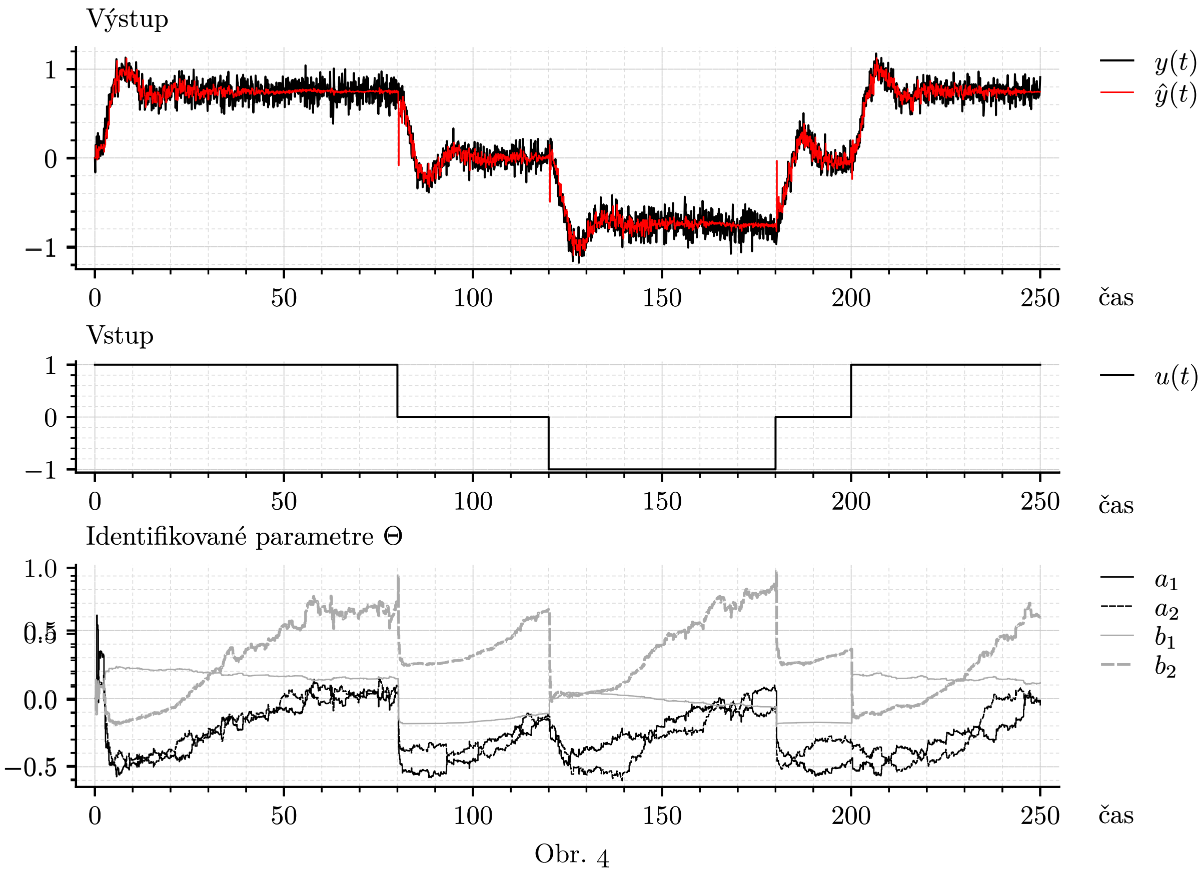
Obr. 3

3.3.2 So zabúdaním

Iná simulácia nech je s nasledovným koeficientom zabúdania:

Výpis kódu 20: Súbor ar03_pr03.py

```
sim_lambdaKoef = 0.987

# Spustenie simulacie

t_log, x_log, RMNS_y_predict_log, RMNS_theta_log, y_log_noise =
    fcn_simSch_02_lenRMNS_noise(
    sim_t_start,
    sim_T_s,
    sim_finalIndex,
    sig_u_ext,
    sim_lambdaKoef
    )

# Obrazok

figName = 'figsc_ar03_fig03'
figNameNum = 1

exec(open('./figjobs/' + figName + '.py', encoding='utf-8').read())
```



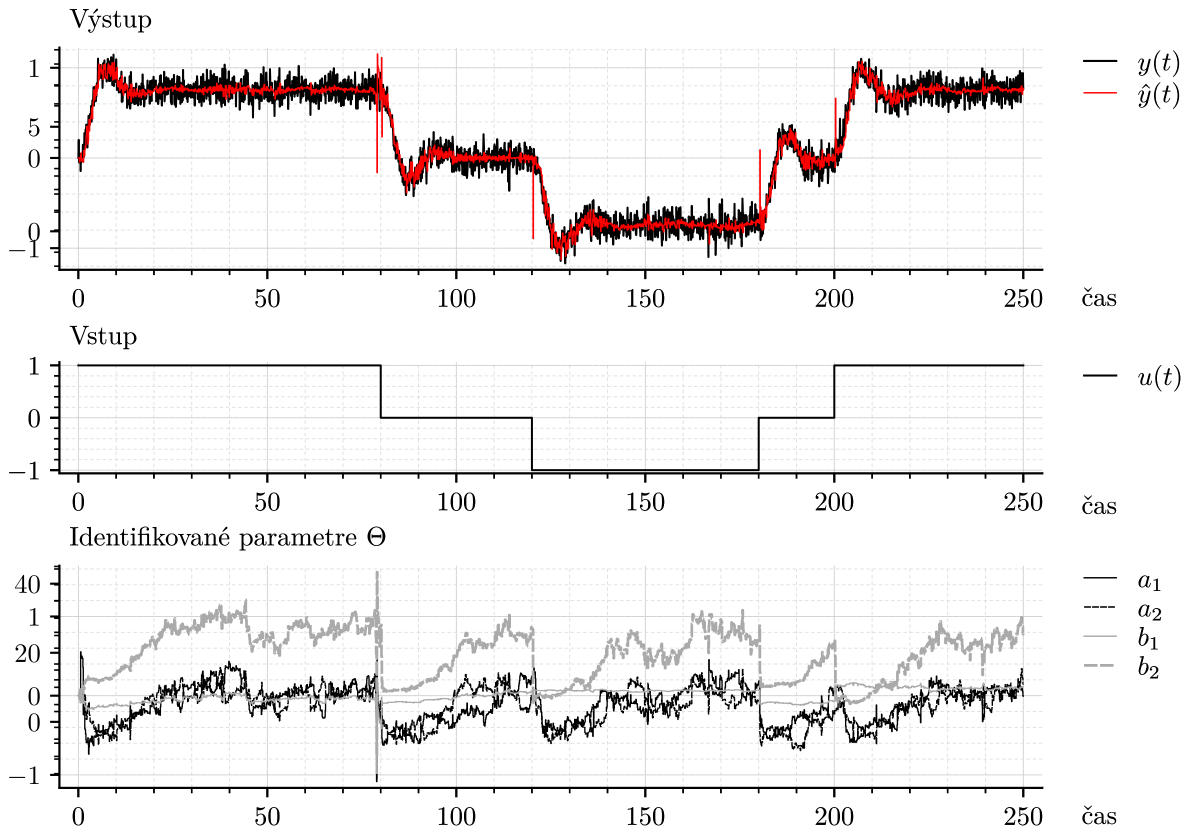
Obr. 4

Extrémnou voľbou koeficientu zabúdania pre tento prípad by bolo:

Výpis kódu 21: Súbor ar03_pr03.py

```
sim_lambdaKoef = 0.957

# Spustenie simulacie

t_log, x_log, RMNS_y_predict_log, RMNS_theta_log, y_log_noise =
    fcn_simSch_02_lenRMNS_noise(
    sim_t_start,
    sim_T_s,
    sim_finalIndex,
    sig_u_ext,
    sim_lambdaKoef
    )

```

```python
# Obrazok

figName = 'figsc_ar03_fig03'
figNameNum = 2

exec(open('./figjobs/' + figName + '.py', encoding='utf-8').read())
```

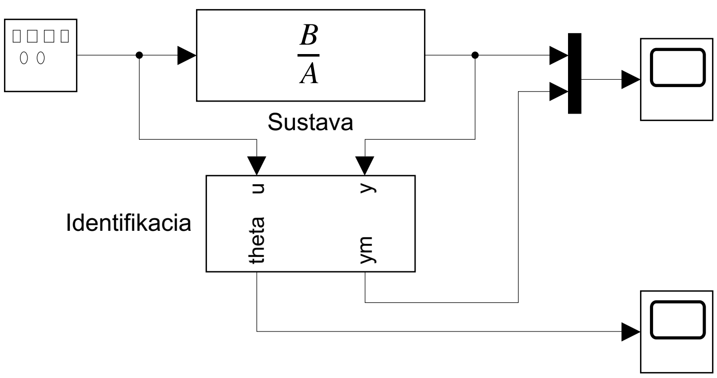


Obr. 5

3.4 Iná ukážka simulačnej schémy pre simuláciu RMNŠ

V tejto časti sa použije Simulink pre riešenie úloh ako v predchádzajúcom.

Majme sústavu, lepšie povedané dynamický systém (ktorý neskôr budeme riadiť), a k tomu istý blok, ktorého funkciou je realizovať priebežnú identifikáciu predmetného systému. Schematicky znázornené:



Obr. 6

Blok Identifikácia slúži na priebežnú identifikáciu a teda jeho hlavným výstupom sú parametre Θ a tiež sa uvažuje výstupná veličina modelu $\hat{y}$ (na obr. označená ako `ym`).

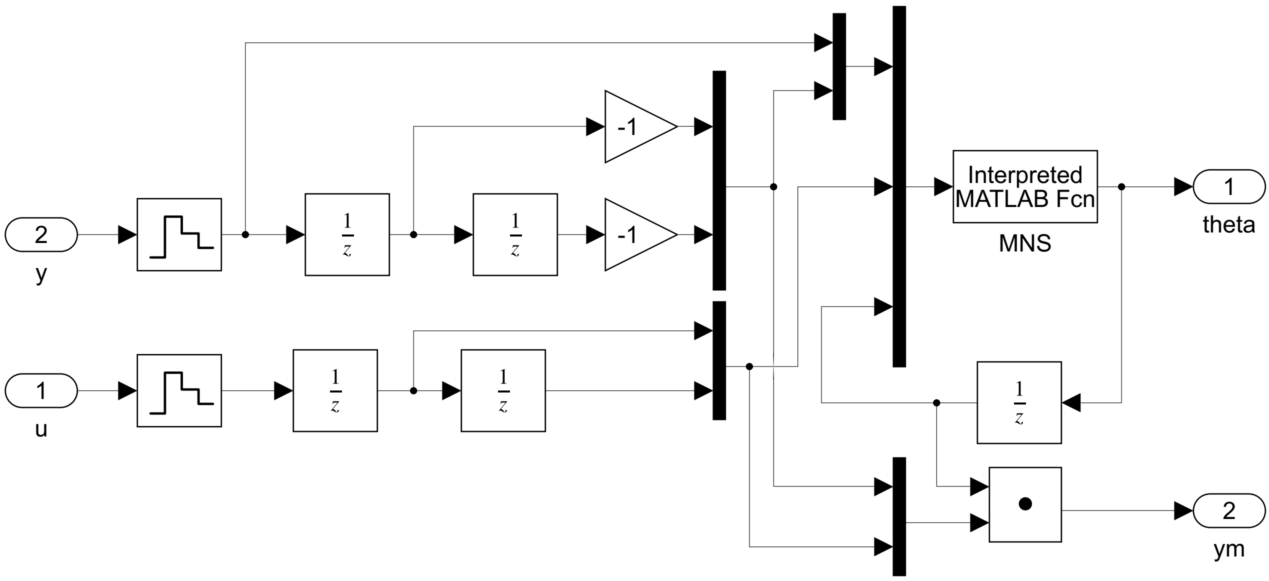
Pred spustením schémy (v Simulinku) je samozrejme potrebné inicializovať parametre riadeného systému (sústavy) a ako sa ukáže aj iné veci (v tomto prípade).

Je to realizované v skripte:

Výpis kódu 22: Súbor ar03_spustima_RMNS.m

```
clear all;
clc

global P

% Perioda vzorkovania
Tvz = 0.1;

% Identifikovana sustava
B = [0 0.15];
A = [1 0.3 0.2];

% Prepis do diskretneho tvaru (len tak pre zaujimavost...)
Gs = tf(B,A);
Gz = c2d(Gs,Tvz);
[Bz,Az] = tfdata(Gz,'v')

% Startovacia matica P
P = 10^6 * eye(4,4) ;
```

Samotný blok Identifikácia je realizovaný nasledovne:



Obr. 7

Obsahuje vzorkovanie signálov (zero order hold) a oneskorovanie signálov (v zmysle z^{-1}). Tým je realizované získavanie tzv. signálneho vektora a podobne. Ďalej je súčasťou bloku funkcia, ktorá realizuje samotný algoritmus RMNŠ. Kód funkcie:

Výpis kódu 23: Súbor MNS.m

```
function odhadTheta = MNS(vst)
global P

P_n = P;

theta = vst(6:9);

h_n1 = [vst(2:5)];
y_n1 = vst(1);

e_n1 = y_n1 - h_n1' * theta;
Y_n1 = (P_n*h_n1)/(1+h_n1'*P_n*h_n1);
P_n1 = P_n - Y_n1*h_n1'*P_n;
odhadTheta = theta + Y_n1*e_n1;

P = P_n1;
```

4 Metóda rozmiestňovania pólov

Pripomeňme, že zákon riadenia (štruktúra riadenia) samonastavujúceho sa regulátora v uvažovanom konkrétnom príklade je v tvare

$$R(z^{-1})u(k) = T(z^{-1})r(k) - S(z^{-1})y(k) \tag{40a}$$

$$u(k) = \frac{T(z^{-1})}{R(z^{-1})}r(k) - \frac{S(z^{-1})}{R(z^{-1})}y(k) \tag{40b}$$

kde R, S a T sú polynómy v tvare

$$R(z^{-1}) = 1 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} + \ldots + r_{n_r} z^{-n_r} \tag{41a}$$

$$S(z^{-1}) = s_0 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} + \ldots + s_{n_s} z^{-n_s} \tag{41b}$$

$$T(z^{-1}) = t_0 + t_1 z^{-1} + t_2 z^{-2} + \ldots + t_{n_t} z^{-n_t} \tag{41c}$$

Ako už bolo uvedené, koeficienty polynómov sú parametrami regulátora. Počet parametrov regulátora závisí od stupňa jednotlivých polynómov. Pre uvažovaný konkrétny príklad sú stupne polynómov nasledovné: $n_r = 1$, $n_s = 1$ a $n_t = 0$. Potom počet parametrov regulátora je $n_r + n_s + 1 + n_t + 1$. Teda $1 + 1 + 1 + 0 + 1 = 4$. Zákon riadenia je možné zapísať aj v tvare diferenčnej rovnice:

$$u(k) = -r_1 u(k-1) - s_0 y(k) - s_1 y(k-1) + t_0 r(k) \tag{42}$$

Uvažujme zákon riadenia v tvare (40), ktorého parametre budeme počítať pomocou metódy rozmiestňovania pólov. Najprv odvodíme rovnicu uzavretého obvodu (URO).

4.1 Rovnica URO

Model riadeného systému je

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) \tag{43}$$

Dosadením (7) do (43) máme

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})\left(\frac{T(z^{-1})}{R(z^{-1})}r(k) - \frac{S(z^{-1})}{R(z^{-1})}y(k)\right) \tag{44}$$

Úpravou

$$Ay(k) = \frac{BT}{R}r(k) - \frac{BS}{R}y(k) \tag{45a}$$

$$RAy(k) = BTr(k) - BSy(k) \tag{45b}$$

$$(RA + BS)\, y(k) = BTr(k) \tag{45c}$$

$$y(k) = \frac{BT}{(AR + BS)}r(k) \tag{45d}$$

$$\frac{y(k)}{r(k)} = \frac{BT}{(AR + BS)} \tag{45e}$$

Charakteristický polynóm uzavretého regulačného obvodu je:

$$A(z^{-1})R(z^{-1}) + B(z^{-1})S(z^{-1}) \tag{46}$$

Nech želaný polynóm je

$$P(z^{-1}) = 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \ldots + p_{n_p} z^{-n_p} \tag{47}$$

potom diofantická rovnica, z ktorej sa vypočítajú koeficienty polynómov R a S je

$$A(z^{-1})R(z^{-1}) + B(z^{-1})S(z^{-1}) = P(z^{-1}) \tag{48}$$

V tomto prípade máme

$$A = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} \tag{49a}$$
$$B = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} \tag{49b}$$
$$R = 1 + r_1 z^{-1} \tag{49c}$$
$$S = s_0 + s_1 z^{-1} \tag{49d}$$

a nech želaný polynóm pre tento prípad je

$$P = 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} \tag{50}$$

Diofantická rovnica pre tento prípad

$$\begin{aligned} &\left(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}\right)\left(1 + r_1 z^{-1}\right) + \left(b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}\right)\left(s_0 + s_1 z^{-1}\right) \\ &= 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} \end{aligned} \tag{51}$$

Roznásobením

$$\begin{aligned} &1 + r_1 z^{-1} + a_1 z^{-1} + a_1 r_1 z^{-2} + a_2 z^{-2} + a_2 r_1 z^{-3} \\ &+ b_1 s_0 z^{-1} + b_1 s_1 z^{-2} + b_2 s_0 z^{-2} + b_2 s_1 z^{-3} \\ &= 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} \end{aligned} \tag{52}$$

Na ľavej strane ponecháme členy, v ktorých sa nachádzajú neznáme koeficienty polynómov zo zákona adaptácie a ostatné členy presunieme na pravú stranu

$$\begin{aligned} &r_1 z^{-1} + a_1 r_1 z^{-2} + a_2 r_1 z^{-3} + b_1 s_0 z^{-1} + b_1 s_1 z^{-2} + b_2 s_0 z^{-2} + b_2 s_1 z^{-3} \\ &= 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} - 1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} \end{aligned} \tag{53}$$

Po úprave

$$\begin{aligned} &\left(r_1 + b_1 s_0\right) z^{-1} + \left(a_1 r_1 + b_1 s_1 + b_2 s_0\right) z^{-2} + \left(a_2 r_1 + b_2 s_1\right) z^{-3} \\ &= \left(p_1 - a_1\right) z^{-1} + \left(p_2 - a_2\right) z^{-2} \end{aligned} \tag{54}$$

Porovnaním koeficientov pri rovnakých mocninách získame rovnice

$$r_1 + b_1 s_0 = p_1 - a_1 \tag{55a}$$
$$a_1 r_1 + b_2 s_0 + b_1 s_1 = p_2 - a_2 \tag{55b}$$
$$a_2 r_1 + b_2 s_1 = 0 \tag{55c}$$

V maticovom zápise:

$$\begin{bmatrix} 1 & b_1 & 0 \\ a_1 & b_2 & b_1 \\ a_2 & 0 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 - a_1 \\ p_2 - a_2 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{56}$$

Maticový zápis vyplývajúci z diofantickej rovnice v prípade, keď stupne polynómov R, S a P sú všeobecné, je v tvare

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & b_2 & b_1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_2 & a_1 & 1 & \cdots & 0 & b_3 & b_2 & b_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n_a} & \vdots & \vdots & \cdots & 1 & b_{n_b} & \vdots & \vdots & \cdots & b_1 \\ 0 & \ddots & \vdots & \cdots & a_1 & 0 & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n_a} & 0 & 0 & 0 & \cdots & b_{n_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{n_r} \\ s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{n_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 - a_1 \\ p_2 - a_2 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{57}$$

Takáto sústava rovníc bude mať riešenie ak

$$n_r = n_b - 1 \tag{58a}$$
$$n_s = n_a - 1 \tag{58b}$$

4.2 Polynóm T

Zatiaľ sme vypočítali koeficienty polynómov R a S. Otázkou ostáva, ako určiť polynóm T. Je potrebné určiť jeho stupeň a vypočítať koeficienty. V úvode sme „zvolili“, že stupeň polynómu T je $n_t = 0$. Teda jediným koeficientom bude t_0. Ukážme teraz, že jednou z možností, ako určiť polynóm T, je žiadať nulovú regulačnú odchýlku v ustálenom stave. Dostaneme tak polynóm T práve nultého stupňa a aj výpočet koeficientu t_0.

Keďže charakteristická rovnica URO je rovnaká ako želaný polynóm P, je možné písať rovnicu uzavretého obvodu v tvare

$$y(k) = \frac{BT}{P} r(k) \tag{59}$$

Aby platilo

$$y(\infty) = r(\infty) \tag{60}$$

musí byť

$$BT = P \tag{61a}$$

$$T = \frac{P}{B} \tag{61b}$$

A keďže „donekonečna“ je v diskrétnej doméne „dojednotky“, teda $z = 1$, potom

$$T = \frac{P(1)}{B(1)} \tag{62}$$

čo v tomto prípade znamená

$$T(z^{-1}) = \frac{1 + p_1 + p_2}{b_1 + b_2} = t_0 \tag{63}$$

4.2.1 Alternatívy spôsob určenia polynómu T

Alternatíva 1

Ďalší spôsob ako určiť koeficienty polynómu T je nasledovný. Nájdeme obraz referenčného signálu tak, že jeho časovú formu pretransformujeme pomocou Z-transformácie. Totiž v mnohých prípadoch je možné dopredu určiť časový priebeh referenčného signálu a navyše sa referenčný signál skladá zo skokov, rámp a podobných, pomocou Z-transformácie, ľahko transformovateľných signálov. Obraz referenčného signálu je

$$\{r(t)\}_q = \frac{F\left(q^{-1}\right)}{G\left(q^{-1}\right)} \tag{64}$$

Tento obraz použijeme vo vzťahu pre regulačnú odchýlku:

$$e = r - y = r - \frac{BT}{P} r = \frac{F}{G} - \frac{BT}{P}\frac{F}{G} = \frac{F(P - BT)}{GP} = \frac{FN}{P} \tag{65}$$

kde sme označili

$$\frac{P - BT}{G} = N \tag{66}$$

Z tohto označenia môžeme písať diofantickú rovnicu, ktorá doplní (48), a vznikne tak sústava.

$$GN + BT = P \tag{67}$$

Z tejto rovnice sa dá určiť aj polynóm vyššieho ako nultého stupňa.

Alternatíva 2

Ďalší spôsob ako určiť koeficienty polynómu T je takýto: ak bude polynóm T obrátenou hodnotou polynómu B, teda $T = 1/B$, zaistí sa tak nie len nulová regulačná odchýlka v ustálenom stave, ale aj to, že polynóm B nebude mať žiadny vplyv na dynamiku URO. Dynamika URO bude daná len želaným charakteristickým polynómom P, takto:

$$y(t) = \frac{1}{P} r(t) \tag{68}$$

Zákon riadenia potom môžeme uvažovať v tvare

$$Ru(t) = \frac{1}{B} r(t) - Sy(t) \quad \Rightarrow \quad r = BRu + BSy \tag{69}$$

Ale ak $B = q^{-D}\tilde{B}$, tak aby sme mohli napísať predchádzajúcu rovnicu musíme dať q^{-D} na druhú stranu k r. Teda:

$$rq^D = \tilde{B}Ru + \tilde{B}Sy \tag{70}$$

Ak potom vyjadríme akčný zásah, je zrejmé, že bude závisieť od budúcich hodnôt referenčného signálu $u(t) = r(t + D) - \ldots$ Toto však nemusí byť prekážkou, pretože v mnohých prípadoch je referenčný signál dopredu známy.

4.3 Súhrn pre tento prípad

Zhrňme výpočty potrebné pre určenie parametrov regulátora pre tento prípad.

Hodnoty parametrov modelu a_1, a_2, b_1 a b_2 sú po identifikácii (v danej perióde vzorkovania) známe a prirodzene sú známe aj hodnoty koeficientov želaného polynómu P. Hodnoty parametrov regulátora získame riešením

$$\begin{bmatrix} 1 & b_1 & 0 \\ a_1 & b_2 & b_1 \\ a_2 & 0 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 - a_1 \\ p_2 - a_2 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{71}$$

a

$$t_0 = \frac{1 + p_1 + p_2}{b_1 + b_2} \tag{72}$$

4.4 Rýchlostný algoritmus metódy rozmiestňovania pólov

Táto subsekcia je tu len pre ilustráciu širších obzorov týkajúcich sa oblasti používania metódy rozmiesňovania pólov v prípadoch podobných tomuto.

Keďže ide o rýchlostný algoritmus, je potrebné vyjadriť prírastok akčnej veličiny:

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) = (1 - q^{-1})u(t) \tag{73}$$

$$u(t) = \frac{\Delta u(t)}{(1 - q^{-1})} \tag{74}$$

Riadený systém a jeho ARX model (s nulovým šumom):

$$Ay(t) = Bu(t) \tag{75}$$

do ktorého dosadíme $u(t)$ a upravíme...

$$Ay(t) = B\frac{\Delta u(t)}{(1 - q^{-1})} \tag{76a}$$

$$(1 - q^{-1})Ay(t) = B\Delta u(t) \tag{76b}$$

Zákon riadenia uvažujeme v tvare:

$$\Delta u(t) = \frac{S}{R}(r(t) - y(t)) \tag{77}$$

Rovnica URO potom bude mať tvar

$$(1-q^{-1})Ay(t) = B\Delta u(t) \tag{78a}$$

$$(1-q^{-1})Ay(t) = B\frac{S}{R}(r(t)-y(t)) \tag{78b}$$

$$(1-q^{-1})ARy(t) = BS(r(t)-y(t)) \tag{78c}$$

$$(1-q^{-1})ARy(t) = BSr(t) - BSy(t) \tag{78d}$$

$$((1-q^{-1})AR + BS)y(t) = BSr(t) \tag{78e}$$

$$y(t) = \frac{BS}{(1-q^{-1})AR + BS}r(t) \tag{78f}$$

Takže charakteristický polynóm je

$$P = \left(1-q^{-1}\right)AR + BS \tag{79}$$

Ale veď potom

$$BS = P - \left(1-q^{-1}\right)AR \tag{80}$$

a tak rovnica URO:

$$y(t) = \frac{P-(1-q^{-1})AR}{P}r(t) \tag{81a}$$

$$y(t) = \left(\frac{P}{P} - \frac{(1-q^{-1})AR}{P}\right)r(t) \tag{81b}$$

$$y(t) = r(t) - \frac{(1-q^{-1})AR}{P}r(t) \tag{81c}$$

Ak sa teraz opýtame aká bude regulačná odchýlka v ustálenom stave t.j. $y(\infty)$, $r(\infty)$ a čo je najdôležitejšie $q = 1$ potom:

$$\begin{aligned} y(\infty) &= r(\infty) - \frac{(1-1)AR}{P}r(\infty) \\ y(\infty) &= r(\infty) \end{aligned} \tag{82}$$

Teda regulačná odchýlka v ustálenom stave bude nulová (pretože sa zhodujú hodnoty referenčného signálu a výstupnej veličiny).

5 Cvičenie tretie

1. Zrealizujte (v simulačnom prostredí) samonastavujúci sa regulátor tak ako to predpokladá uvažovaný konkrétny príklad.

   Nech želaným charakteristickým polynómom (pre uvažovaný konkrétny príklad) je $P(z^{-1}) = 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}$ pričom $p_1 = -1,6$ a $p_2 = 0,64$, teda dvojnásobný koreň $z_{1,2} = 0,8$.

   Alternatívne, nech v želanom charakteristickom je $p_1 = -0,8$ a $p_2 = 0,16$, teda dvojnásobný koreň $z_{1,2} = 0,4$.

   Pozn: pre uvažovaný príklad sa odporúča perióda vzorkovania $T_{vz} = 0,1$ [čas].

5.1 Konkrétny príklad samonastavujúceho sa regulátora

V predchádzajúcom bola prezentovaná simulačná schéma, v ktorej bol implementovaný algoritmus RMNŠ.

Tu je cieľom doplniť do simulačnej schémy výpočet, ktorý na základe priebežne identifikovaných parametrov riadeného systému vypočíta hodnoty parametrov daného zákona riadenia a následne vypočíta samotný akčný zásah.

Výpočet parametrov zákona riadenia využíva matódu rozmiestňovania pólov URO a je dplnený výpočtom pre zabezpečenie nulovej trvalej regulačnej odchýlky.

Nech želaným charakteristickým polynómom (pre uvažovaný konkrétny príklad) je $P(z^{-1}) = 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}$ pričom $p_1 = -1,6$ a $p_2 = 0,64$, teda dvojnásobný koreň $z_{1,2} = 0,8$.

Pozn: pre uvažovaný príklad sa odporúča perióda vzorkovania $T_{vz} = 0,1$ [čas].

V tomto konkrétnom príklade uvažovaný zákon riadenia je možné zapísať v tvare diferenčnej rovnice:

$$u(k) = -r_1 u(k-1) - s_0 y(k) - s_1 y(k-1) + t_0 r(k) \tag{83}$$

Hodnoty parametrov modelu a_1, a_2, b_1 a b_2 sú po identifikácii (v danej perióde vzorkovania) známe a prirodzene sú známe aj hodnoty koeficientov želaného polynómu P. Hodnoty parametrov regulátora získame riešením

$$\begin{bmatrix} 1 & b_1 & 0 \\ a_1 & b_2 & b_1 \\ a_2 & 0 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 - a_1 \\ p_2 - a_2 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{84}$$

a

$$t_0 = \frac{1 + p_1 + p_2}{b_1 + b_2} \tag{85}$$

Aj tu platí, že diferenciálne rovnice riadeného systému ostávajú samozrejme rovnaké ako sme ich realizovali v predchádzajúcom, teda aj tu („na začiatku skriptu“) platí výpis kódu 1 a 2.

Ďalej nech simulačnú schému realizuje nasledujúca funkcia:

Výpis kódu 24: Súbor `ar03_pr04.py`

```
def fcn_simSch_05_STR(t_start, T_s, finalIndex, sig_r_ext):

    #----------------------------------------
    t_log = np.zeros([finalIndex, 1])
    t_log[0,:] = t_start

    #----------------------------------------
    x_0 = np.array([0, 0])

    x_log = np.zeros([finalIndex, len(x_0)])
    x_log[0,:] = x_0
    #----------------------------------------

    RMNS_theta_0 = np.array([[ -1.5],
                             [ 0.5],
                             [ -2e-5],
                             [ 1.5e-3]])

    RMNS_theta_log = np.zeros([finalIndex, len(RMNS_theta_0)])
    RMNS_theta_log[0,:] = RMNS_theta_0.reshape(1,-1)

    RMNS_P_0 = np.diag([10*2, 10**2, 10**5, 10**5])

    RMNS_P_log = np.zeros([finalIndex, RMNS_P_0.size])
    RMNS_P_log[0,:] = RMNS_P_0.reshape(1,-1)

    RMNS_y_predict_log = np.zeros([finalIndex, 1])

    #----------------------------------------

    u_log = np.zeros([finalIndex, 1])
        # v tomto bode by sa dalo vypocitat u_0, ale tu na to kasleme

    #----------------------------------------
    timespan = np.zeros(2)
    for idx in range(1, int(finalIndex)):

        timespan[0] = t_log[idx-1,:]
        timespan[1] = t_log[idx-1,:] + T_s

        odeOut = odeint(fcn_difRovnice,
                        x_log[idx-1,:],
                        timespan,
                        args=(u_log[idx-1,:],)
```

```
                        )

        x_log[idx,:] = odeOut[-1,:]
        t_log[idx,:] = timespan[-1]

        #--------------------
        # ALGORITMUS RMNS
        y_k = x_log[idx,0]

        h_k = np.array([[-x_log[idx-1,0]],
                        [-x_log[idx-2,0]],  # pozor na idx-2 !!!
                        [u_log[idx-1,0]],
                        [u_log[idx-2,0]],  # pozor na idx-2 !!!
                        ])

        theta_km1 = RMNS_theta_log[idx-1,:].reshape(4,-1)
        P_km1 = RMNS_P_log[idx-1,:].reshape(4,4)

        #----------
        lambdaKoef = 0.95

        e_k = y_k - np.matmul(h_k.T, theta_km1)

        Y_k =  np.matmul(P_km1, h_k) / (lambdaKoef + np.matmul(np.matmul(h_k.T, P_km1), h_k))

        P_k = (1/lambdaKoef) * (P_km1 - np.matmul(np.matmul(Y_k, h_k.T), P_km1))
        theta_k = theta_km1 + Y_k * e_k

        #----------

        RMNS_theta_log[idx,:] = theta_k.reshape(1,-1)
        RMNS_P_log[idx,:] = P_k.reshape(1,-1)

        RMNS_y_predict_log[idx,:] = np.matmul(h_k.T, theta_km1)

        #--------------------
        # Vypocty pre parametre zakona riadenia a akcny zasah

        # koeficienty zelaneho polynomu:

        par_p1 = -1.6
        par_p2 = 0.64

        # parametre riadeneho systemu

        par_a1 = RMNS_theta_log[idx-1,0]
        par_a2 = RMNS_theta_log[idx-1,1]
        par_b1 = RMNS_theta_log[idx-1,2]
        par_b2 = RMNS_theta_log[idx-1,3]

        # Parametre RST regulatora

        matrix_A = np.array([[     1, par_b1,      0],
                             [par_a1, par_b2, par_b1],
                             [par_a2,      0, par_b2],
                             ])

        matrix_b = np.array([[par_p1 - par_a1],
                             [par_p2 - par_a2],
                             [0],
                             ])

        params_r1_s0_s1 = np.linalg.solve(matrix_A, matrix_b)

        par_t0 = (1 + par_p1 + par_p2)/(par_b1 + par_b2)

        # vypocita sa akcny zasah u(k)

        par_RST = np.array([params_r1_s0_s1[0,0], params_r1_s0_s1[1,0], params_r1_s0_s1[2,0], par_t0])
        vekt_omega = np.array([-u_log[idx-1,0], -x_log[idx,0], -x_log[idx-1,0], sig_r_ext[idx,0]])

        u_log[idx,:] = np.dot(par_RST, vekt_omega)

        #--------------------

    return [t_log, x_log, u_log, RMNS_y_predict_log, RMNS_theta_log]
```

V uvedenej simulačnej schéme je implementovaný RMNŠ algoritmus rovnako ako v predchádzajúcom...

Všimnime si však, že faktor zabúdania λ (premenná `lambdaKoef`) je nastavený na hodnotu $\lambda = 0,95$.

Tiež je potrebné všimnúť si, že štartovacie hodnoty RMNŠ algoritmu sú:

`RMNS_theta_0 = np.array([[-1.5], [0.5], [-2e-5], [1.5e-3]])`

a

`RMNS_P_0 = np.diag([10*2, 10**2, 10**5, 10**5])`

Nastavenia potrebné pre samotnú simuláciu a vygenerovanie signálov, ktoré sa používajú pri simulácii (ktoré sú dopredu známe - dané):

Výpis kódu 25: Súbor `ar03_pr04.py`

```python
# Nastavenia simulacie

sim_t_start = 0
sim_t_final = 38
sim_T_s = 0.1
sim_finalIndex = int(((sim_t_final - sim_t_start)/sim_T_s) + 1)


# Preddefinovane signaly

period_time = 40
period_tab = np.array([
                      [0, 1],
                      [10, 0],
                      [20, -1],
                      [30, 0],
                      ])

sig_vysl = np.zeros([sim_finalIndex, 1])

for period in range(int(sim_t_final/period_time) + 1):

    for idx in range( int((period*period_time)/sim_T_s), int((period*period_time + period_time)/sim_T_s)):

        lastValue = period_tab[:,1][(period_tab[:,0] + (period*period_time))<=idx*sim_T_s ][-1]
        try:
            sig_vysl[idx] = lastValue
        except:
            break

sig_r_ext = sig_vysl

```

Spustenie simulácie:

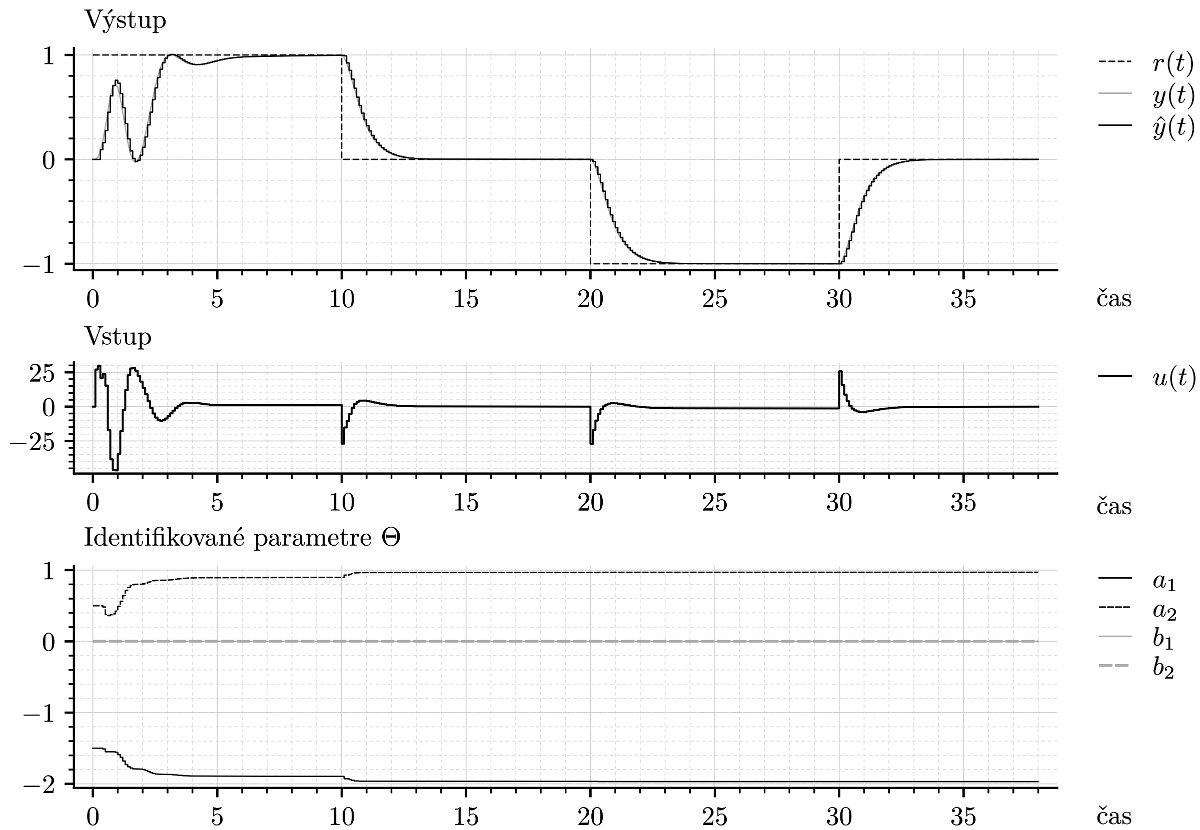
Výpis kódu 26: Súbor `ar03_pr04.py`

```python
# Spustenie simulacie

t_log, x_log, u_log, RMNS_y_predict_log, RMNS_theta_log = fcn_simSch_05_STR(
    sim_t_start,
    sim_T_s,
    sim_finalIndex,
    sig_r_ext,
    )
```

Nakreslenie obrázka:

Výpis kódu 27: Súbor `ar03_pr04.py`

```python
# Obrazok

figName = 'figsc_ar03_fig04'
figNameNum = 0

exec(open('./figjobs/' + figName + '.py', encoding='utf-8').read())

```

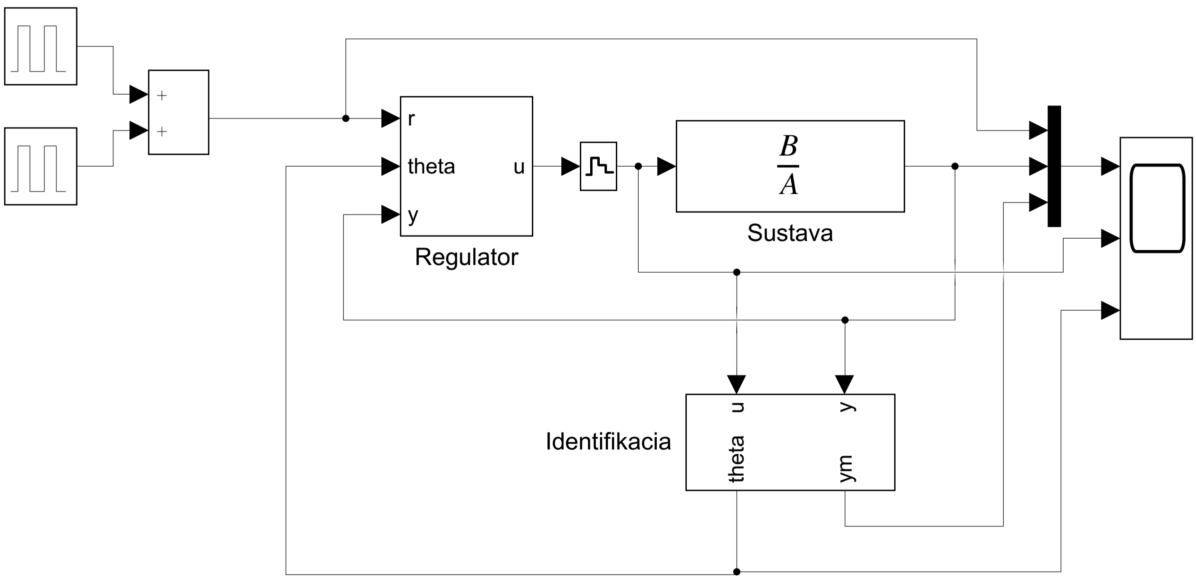


Obr. 8

5.2 Simulácia v Simulinku

V tejto časti sa použije Simulink pre riešenie úloh ako v predchádzajúcom.

Máme riadený systém, ku ktorému sme v predchádzajúcom vyrobili blok pre priebežnú identifikáciu. Teraz pridajme blok, ktorý bude realizovať výpočet akčného zásahu. Schematicky znázornené:



Obr. 9

Pred spustením schémy (v Simulinku) je samozrejme potrebné inicializovať parametre riadeného systému (sústavy) a ako sa ukáže aj iné veci (v tomto prípade). Je to realizované v skripte:

Výpis kódu 28: Súbor `ar03_spustima_STR.m`

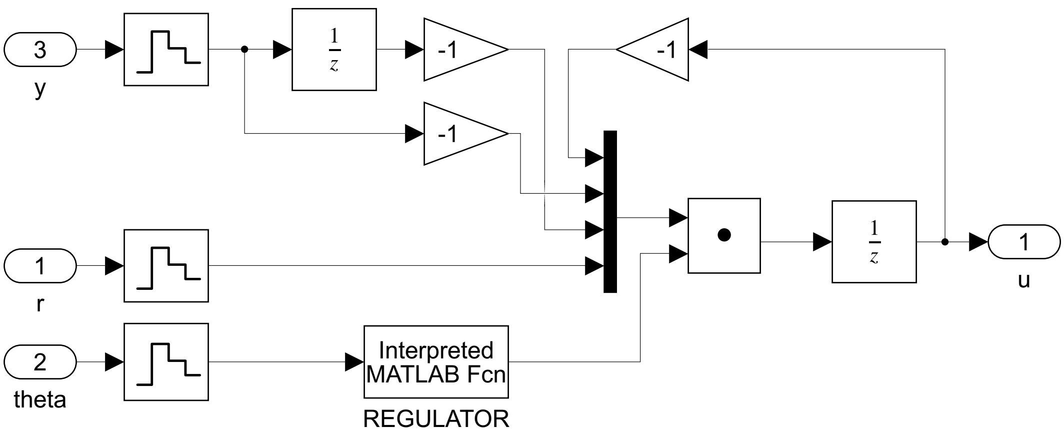
```
clear all;
clc

global P ZP lambdaKoef

% Perioda vzorkovania
Tvz = 0.1;

% Identifikovana sustava
B = [0 0.15];
A = [1 0.3 0.2];

% Zelany polynom
ZP = conv([1 -0.8],[1 -0.8]);

lambdaKoef = 0.95

% Startovacia matica P
P = diag([20, 10^2, 10^5, 10^5]) ;
```

Blok Identifikácia je realizovaný ako na obr. 7 a používa funkciu:

Výpis kódu 29: Súbor `MNSvRST.m`

```
function odhadTheta = MNSvRST(vst)
global P lambdaKoef

P_n = P;

theta = vst(6:9);

h_n1 = [vst(2:5)];
y_n1 = vst(1);

e_n1 = y_n1 - h_n1' * theta;
Y_n1 = (P_n*h_n1)/(lambdaKoef + h_n1'*P_n*h_n1);
P_n1 = (1/lambdaKoef) * (P_n - Y_n1*h_n1'*P_n);
odhadTheta = theta + Y_n1*e_n1;

P = P_n1;
```

Blok Regulátor je realizovaný nasledovne:



Obr. 10

Funkcia, ktorú používa blok Regulátor je nasledovná:

Výpis kódu 30: Súbor `REGULATOR.m`

```
function vyst = REGULATOR(theta)

global ZP

a1 = theta(1);
a2 = theta(2);
b1 = theta(3);
b2 = theta(4);

MATICA = [1 b1 0; a1 b2 b1; a2 0 b2];
```

```
PRAVASTRANA = [ZP(2) - a1; ZP(3) - a2; 0];
RS = MATICA\PRAVASTRANA;

T = (1 + ZP(2) + ZP(3))/(b1 + b2);

vyst = [RS' T]';
```

6 Otázky a úlohy

1. Stručne vysvetlite princíp rekurzívnej metódy najmenších štvorcov.
2. Napíšte Gaussov vzorec a podrobne vysvetlite jednotlivé prvky
3. Vyjadrite ARX model v tvare diskrétnej prenosovej funkcie alebo v tvare diferenčnej rovnice.
4. Odvoďte Gaussov vzorec a ukážte, že nájdený extrém je minimum.
5. Aké (ktoré) prvky obsahuje signálny vektor pri priebežnej identifikácii metódou najmenších štvorcov? (Čo tvorí prvky signálneho vektora pri priebežnej identifikácii metódou najmenších štvorcov?)
6. Modelom riadeného systému je ARX model. Zákon riadenia má tvar $R(z^{-1})u(k) = T(z^{-1})r(k) - S(z^{-1})y(k)$. Nájdite charakteristický polynóm URO.
7. Modelom riadeného systému je ARX model. Zákon riadenia má tvar $u(k) = \Delta u(k)/(1 - z^{-1})$, kde
$$\Delta u(k) = \frac{S(z^{-1})}{R(z^{-1})}(r(k) - y(k))$$
   Nájdite charakteristický polynóm URO.
8. Stručne vysvetlite výpočet parametrov regulátora metódou pole-placement.
9. Vysvetlite podstatu metód návrhu polynómu $T(z^{-1})$ pri STR.