Tutoriál pre klasické adaptívne riadenie

Cieľom tutoriálu pre klasické adaptívne riadenie bude:

1. *Klasické adaptívne riadenie.*
2. *Metódy syntéz riadenia používaných v adaptívnom riadení*
3. *Aplikovať adaptívne riadenie na zvolený simulačný model.*

Úlohy:

1. **Zostavte matematicko-fyzikálny model nelineárneho dynamického systému M6 s využitím analytickej identifikácie**
2. **Navrhnite klasické adaptívne riadenie hydraulického systému v prostredí Matlab/Simulink:**

   2.a Navrhnite algoritmus rekurzívnej metódy najmenších štvorcov

   2.b Navrhnite algoritmy riadenia pre metódy syntézy používané v adaptívnom riadení.

   2.b.1 Metóda Ziegler-Nichols

   2.b.2 Metóda rozloženia pólov

3. **Aplikujte adaptívne riadenie na simulačný model hydraulického systému.**

Úloha č.1 Zostavne matematicko-fyzikálny model nelineárneho dynamického systému M6 s využitím analytickej identifikácie

Odvodenie matematického popisu modelu M6 s využitím postupova analytickej identifikácie sa nachádza na stránke predmetu *Optimálne a nelineárne systémy* v časti *Simulačné modely*.

http://matlab.fei.tuke.sk/ons/pdfModely/M6_dveNadobyInter.pdf

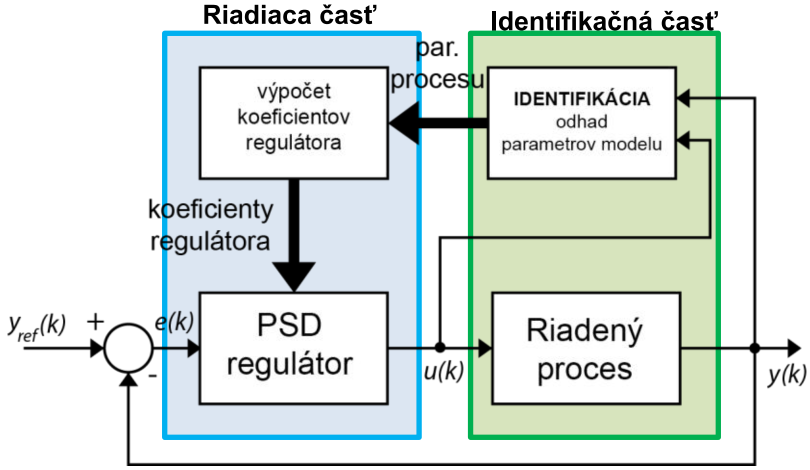
Úloha č.2 Navrhnite klasické adaptívne riadenie hydraulického systému v prostredí Matlab/Simulink

Pre navrhnutie klasického adaptívneho riadenia hydraulickhé systému v prostredí Matlab/Simulink je potrebné sa oboznámiť s problematikou adaptívneho riadenia.

Podstatou adaptívneho systému je, že mení spracovanie regulačnej odchýlky, to znamená, že zákon riadenia sa adaptuje na neznáme podmienky. Adaptívny spôsob regulácie volíme ak parametre riadeného procesu sú vplyvom šumu a iných porúch premenlivé alebo neurčité. Jeden zo spôsobov adaptívneho riadenia je založený na priebežnom odhadovaní vlastností sústavy, postupné spresňovanie a tým aj sledovanie možných zmien. Regulátor založený na identifikácii neznámeho procesu s následnou syntézou riadenia je označovaný ako samočinne sa nastavujúci regulátor (STC). Adaptívny číslicový regulátor pracuje s pevne zadanou periódou vzorkovania T_{vz} a s touto periódou generuje postupnosť číselných hodnôt akčného zásahu. Použitím adaptívneho riadenia s priebežnou identifikáciou, podľa povahy riadeného procesu sledujeme splnenie nasledujúcich cieľov:

- automatické nastavenie číslicového regulátora
- zlepšenie regulácie za prítomnosti nestacionárnych porúch
- zachytenie zmien parametrov riadenej sústavy, ktoré môžu byť spôsobené technologickými príčinami
- následné zlepšenie regulačných pochodov daného procesu vhodnou zmenou parametrov číslicového regulátora

Vnútorná algoritmická štruktúra samočinne sa nastavujúceho regulátora je na nasledujúcom obrázku:



Obr. 1 Algoritmická štruktúra STC regulátora

V každej periόde vzorkovania prebehne daný algoritmus pre výpočet nového akčného záasahu $u(k)$. V identifikačnej časti sa vykonáva priebežný odhad parametrov modelu reprezentujúceho proces. V riadiacej časti sa nachádza blok výpočtu parametrov regulátora, ktoré sa počítajú pomocou hodnôt odhadu parametrov procesu.

Úloha č. 2.a Navrhnite algoritmus rekurzívnej metódy najmenších štvorcov

Pre potreby návrhu adaptívneho riadenia je nutné sa oboznámiť s metódou pre odhad koeficientov prenosovej systému. Táto metóda sa nazýva rekurzivnou metódou najmenších štvorcov a je nutné sa s ňou oboznámiť a s rovnicami pre odhad parametrov, ktoré následne je potrebné naprogramovať v prostredí Matlab/Simulink. Rekurzívna metóda najmenších štvorcov (RMNŠ) s technikou exponenciálneho zabúdania patrí medzi metódy priebežnej identifikácie. RMNŠ s technikou exponenciálneho zabúdania sa používa v adaptívnom riadení nelineárnych systémov s časovo premenlivými parametrami. Pre definíciu vzorcov potrebných pre odhad parametrov metódou RMNŠ je nutné definovať niekoľko pojmov.

Jednorozmerný autoregresný model je definovaný nasledovne:

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

resp.

$$y(k) = -\sum_{i=1}^{m} a_i y(k-i) + \sum_{i=1}^{n} b_i u(k-i) + e_s(k), \tag{2}$$

ktorý ma vo vektorovej forme tvar:

$$\boxed{y(k) = \Theta^T(k-1)\phi(k-1) + e_s(k),} \tag{3}$$

kde $\Theta^T(k-1)$ je vektor odhadovaných parametrov, $\phi(k-1)$ je regresný vektor odhadujúci hodnoty vstupov *u(k-i)* a výstupov *y(k-i)* modelu v predošlých krokoch výpočtu a $e_s(k)$ je nemerateľná náhodná zložka. Predpokladá sa, že náhodná veličina má nulovú strednú hodnotu a konštantný rozptyl. Vektor odhadovaných parametrov a regresný vektor majú tvar:

$$\boxed{\Theta^T(k-1) = [a_1, a_2, ..., a_m, b_1, b_2, ..., b_n]} \tag{4}$$

$$\boxed{\phi^T(k-1) = [-y(k-1), -y(k-2), ..., y(k-m), u(k-1), u(k-2), ...u(k-n)]} \tag{5}$$

Pri rekurzívnej metóde najmenších štvorcov s exponenciálnym zabúdaním sa vektor odhadu parametrov (4) aktualizuje podľa rekurzívneho vzťahu

$$\hat{\Theta}(k)=\hat{\Theta}(k-1)+\frac{C(k-1)\phi(k-1)}{\varphi+\phi^{T}(k-1)C(k-1)\phi(k-1)}e(k), \qquad (6)$$

kde *e(k)* je chyba odhadu, ktorá sa počíta nasledovne:

$$e(k)=y(k)-\hat{\Theta}^{T}(k-1)\phi(k-1) \qquad (7)$$

a kovariančná matica *C(k)* sa aktualizuje podľa vzťahu:

$$C(k)=\frac{1}{\varphi}\left(C(k-1)-\frac{C(k-1)\phi(k-1)\phi^{T}(k-1)C(k-1)}{\varphi+\phi^{T}(k-1)C(k-1)\phi(k-1)}\right), \qquad (8)$$

kde φ je faktor exponenciálneho zabúdania, ktorý sa volí z intervalu <0.95 – 0.99> . Ak by faktor exponenciálneho zabúdania mal hodnotu 1 tak by sa jednalo len o rekurzívnu metódu najmenších štvorcov.

Algoritmus pre RMNŠ s exponenciálnym zabúdaním

1) Inicializácia algoritmu. Nastavenie počiatočných hodnôt kovariančnej matice *C(0)*, faktor zabúdania $\varphi(0)$, vektora odhadu parametrov $\hat{\Theta}(0)$ a vynulovanie regresného vektora $\phi(0)$
2) Načítanie vstupov a aktualizovanie regresného vektora $\phi(k-1)$ ich novými hodnotami
3) Výpočet chyby odhadu parametrov procesu *e(k)*
4) Výpočet nového odhadu parametrov procesu $\hat{\Theta}(k)$
5) Aktualizácia kovariančnej matice *C(k)*
6) Uloženie hodnôt matice *C(k)*, parametrov procesu $\hat{\Theta}(k)$ a regresného vektora $\phi(k-1)$ pre nasledujúci krok *(k+1)*výpočtu algoritmu a skok na bod 2, alebo ukončenie algoritmu

Pre štart algoritmu sa osvedčilo zvoliť nasledujúce počiatočné podmienky:

Prvky hlavnej diagonály kovariančnej matice $C(0) = 10^7$, počiatočná hodnota faktora smerového zabúdania $\varphi(0)=0.99$. Počiatočný odhad parametrov $\hat{\Theta}(0)$ je volený na základe apriórnej informácie o systéme. Uvedený algoritmus je nutné naprogramovať v prostredí Matlab/Simulink.

Algoritmus adaptívneho riadenia

1. Inicializácia simulácie
2. Nastavenie prvotného dohadu parametrov systému
3. Voľba metódy syntézy riadenia
4. Spustenie simulácie
5. Načítanie vstupov a výstupov nelineárneho dynamického systému
6. Odhad nových parametrov systému metódou RMNŠ
7. Výpočet nového akčného zásahu zvolenou metódou syntézy
8. Ak je čas simulácie rovný konečnému času tak ukončiť simuláciu inak skok na bod 5

Úloha č. 2.b Navrhnite algoritmy riadenia pre metódy syntézy riadenia používané v adaptívnom riadení

Pre návrh adaptívneho riadenia je potrebné navrhnúť metódu syntézy riadenia. Úlohou je navrhnúť algoritmy pre uvedené metódy riadenia používané v adaptívnom riadení. Najčastejšie metódy syntézy riadenia využívané v adaptívnom riadení sú metóda Ziegler-Nichols založená na výpočte parametrov regulátora z kritických konštánt a metóda rozmiestnenia pólov. Ďalej budú uvedené vzorce pre výpočet parametrov regulátora pre metódu Ziegler-Nichols a vzorce pre výpočet parametrov regulátora navrhnutého metódou rozmiestnenia pólov.

2.b.1 Metóda Ziegler-Nichols

Klasická metóda Ziegler-Nichols vychádza pri určení parametrov regulátora z kritického proporcionálneho zosilnenia K_{PK} a kritickej periódy kmitov T_K uzavretého regulačného obvodu. Z určných kritických parametrov sa konštanty PSD regulátora vypočítajú z nasledujúcich vzťahov:

$$K_P = 0{,}6K_{PK}\ ,\ T_I = 0{,}5T_K\ ,\ T_D = 0{,}125T_K\ . \tag{9}$$

Výpočet koeficientov PSD regulátora z kritických koeficientov K_{PK} a T_k je nasledovný:

$$K_P = 0{,}6K_{PK}\left(1-\frac{T_{vz}}{T_K}\right),\ T_I = \frac{K_P T_K}{1{,}2K_{PK}}\ ,\ T_D = \frac{3K_{PK}T_K}{40K_P}\ , \tag{10}$$

kde T_{vz} je perióda vzorkovania. Nevýhodou experimentálneho určovania parametrov spočíva v tom, že sústavu môžme uviesť do nestabilného stavu a že vyhľadávanie medze stability pri systémoch s veľkými časovými konštantami je náročné.

V tutoriály budú uvedené algoritmy pre výpočet kritických konštánt pre procesy druhého a tretieho rádu.

Majme diskrétny systém lineárnej štruktúry popísaný nasledovne:

$$G_P(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}\ , \tag{11}$$

s polynómami

$$A(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n} a_i z^{-1} = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \ldots + a_n z^{-n} \tag{12}$$

$$B(z^{-1}) = \sum_{i=1}^{n} b_i z^{-i} = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \ldots + b_n z^{-n} \ , \tag{13}$$

Ďalej uvažujeme diskrétnu prenosovú funkciu proporcionálneho regulátora:

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_p \,, \tag{14}$$

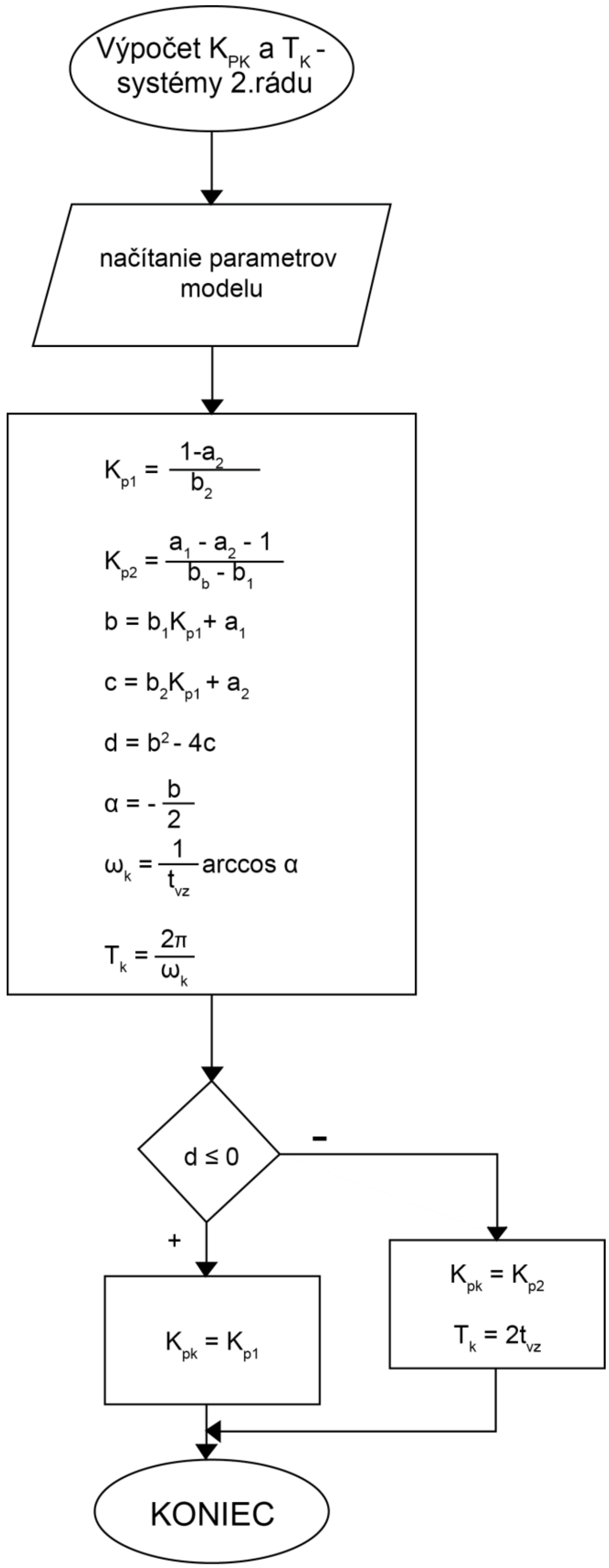
Potom prenosova funkcia uzavretého regulačného obvodu je nasledovná:

$$G_W(z) = \frac{Y(z)}{W(z)} = \frac{G_P(z) G_R(z)}{1 + G_P(z) G_R(z)} = \frac{K_p B(z^{-1})}{A(z^{-1}) + K_p B(z^{-1})} \,, \tag{15}$$

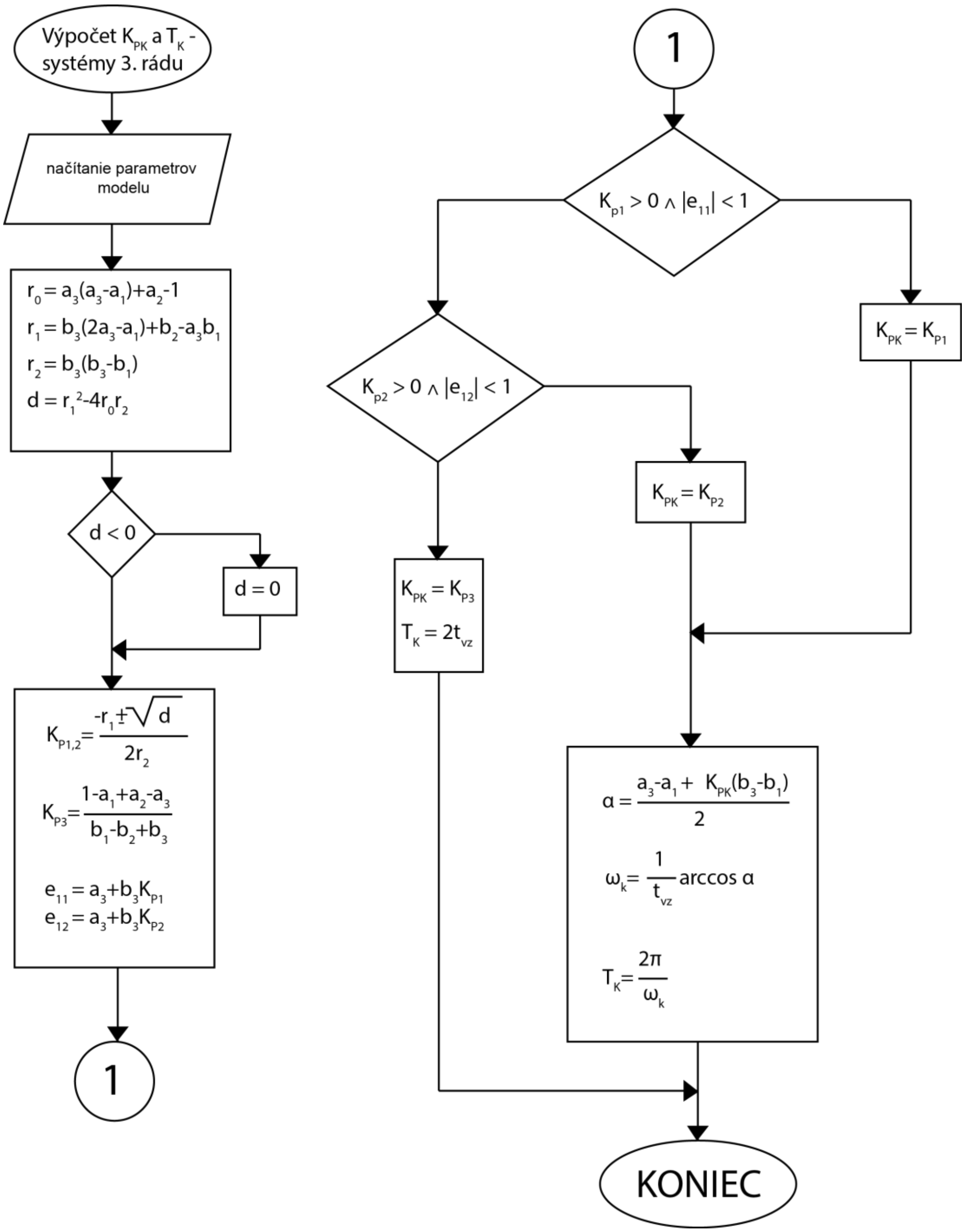
Menovateľ prenosovej funkcie (15) je charakteristickým polynómom

$$D(z^{-1}) = A(z^{-1}) + K_p B(z^{-1}) \,, \tag{16}$$

ktorého póly určujú dynamické vlastnosti uzavretého regulačného obvodu. Ďalej budú uvedené algoritmy pre výpočet kritických koeficientov K_{PK} a T_K pre procesy druhého a tretieho rádu. Vypočítané kritické koeficienty sú použité v rovnici (10) pre výpočet parametrov PSD regulátora. Uzavretý regulačný obvod bude na hranici stability práve vtedy keď aspoň jeden pól charakteristického polynómu bude umiestnený na jednotkovej kružnici a ostatné póly budú umiestnené v jednotkovej kružnici.



Obr. 2 Vývojový diagram pre výpočet koeficientov K_{PK} a T_K pre procesy druhého rádu



Obr. 3 Vývojový diagram pre výpočet koeficientov K_{PK} a T_K pre procesy tretieho rádu

2.b.2 Metóda rozloženia pólov

Cieľom metódy rozloženia pólov je posun pólov uzavretého regulačného obvodu do polohy, ktorá zabezpečí požadované vlastnosti uzavretej riadiacej štruktúry. Pri návrhu koeficientov riadenia uvažujeme uzavretý regulačný obvod s prenosovou funkciou procesu definovanou nasledovne:

$$G_P(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1} + \ldots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \ldots + a_m z^{-m}} z^{-d} \tag{17}$$

A prenosovou funkciou regulátora definovanou nasledovne:

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{Q(z^{-1})}{P(z^{-1})} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \ldots + q_\upsilon z^{-\upsilon}}{1 + p_1 z^{-1} + \ldots p_\mu z^{-\mu}} \tag{18}$$

Charakteristický polynóm uzavretého regulačného obvodu vyzerá nasledovne:

$$N(z) = B(z)Q(z) + A(z)P(z) \tag{19}$$

Dynamické vlastnosti uzavretého regulačného obvodu sú určené pólmi charakteristického polynómu *N(z)*. Žiadaný charakteristický polynóm vypočítame zo vzťahu:

$$\tilde{N}(z) = (z - z_1)(z - z_2)\ldots(z - z_r) \tag{20}$$

kde z_i sú nami zvolené žiadané póly uzavretého regulačného obvodu. Neznáme koeficienty regulátora p_i, q_i môžeme určiť z rovnosti $N(z) = \tilde{N}(z)$. Pre určenie koeficientov p_i, q_i regulátora máme „r“ rovníc, ktoré dostaneme porovnaním koeficientov pri rovnakých mocninách z uvedenej rovnosti a rovnicu vyplývajúcu z trvalej nulovej regulačnej odchýlky: $\sum_{i=1}^{\mu} p_i = -1$.

Stupne polynómov $Q(z)$,$P(z)$ sú určené nasledovne:

$$\mu = m + d \qquad \upsilon = n \tag{21}$$

<u>Úloha č.3</u> Aplikujte adaptívne riadenie na simulačný model hydraulického systému

Model hydraulického systému bol vytvorený v úlohe č.1. Model bude použitý pre overenie navrhnutých algoritmov v predchádzajúcich úlohách.

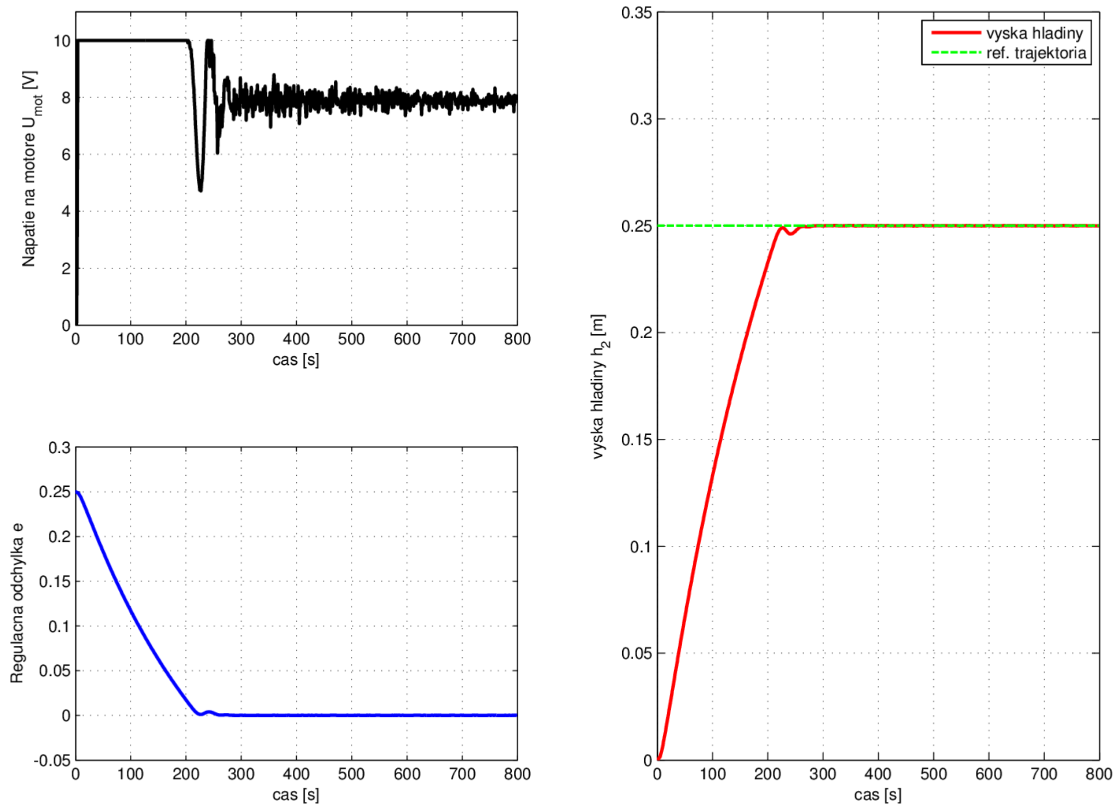
Pri adaptívnom riadení je potrebné mať prvotný odhad parametrov modelu, z toho dôvodu bolo nutné diferenciálne rovnice získané v úlohe č.1 linearizovať vo zvolenom pracovnom bode. Po linearizácii sme získali prenosovú funkciu druhého rádu v tvare:

$$F(s)=\frac{b_0}{a_2 s^2+a_1 s+a_0} \tag{22}$$

Prvotný odhad parametrov je však nutné získať z diskrétnej prenosovej funkcie systému tak danú spojitú prenosovú funkciu bolo nutné diskretizovať so zvolenou periódou vzorkovania a dostali sme diskrétnu prenosovú funkciu systému v tvare:

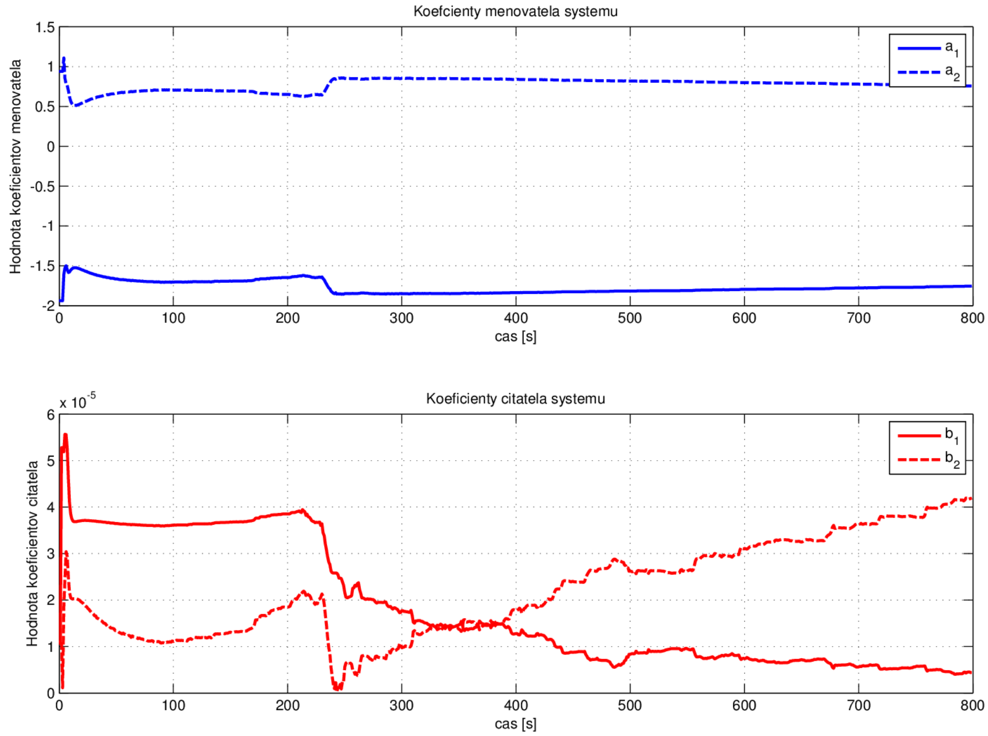
$$G(z^{-1})=\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}\frac{b_1 z^{-1}+b_2 z^{-2}}{1+a_1 z^{-1}+a_2 z^{-1}} \tag{23}$$

Z danej diskrétnej prenosovej funkcie máme prvotný odhad parametrov modelu systému, použitý v rekurzívnej metóde najmenších štvorcov. Pre adaptívne riadenie hydraulického systému je potrebné naprogramovať rovnice (4 až 8) pre výpočet nového odhadu parametrov modelu. Ďalej je potrebné naprogramovať jednu z vyššie spomenutých syntéz riadenia či už Ziegler-Nichols alebo metódu rozloženia pólov. Keďže adaptívne riadenie je vhodné pre riadenie nelineárnych systémov s časovo premenlivými parametrami a diferenciálne rovnice získané vúlohe č.1 predstavujú nelineárne rovnice s konštantnými parametrami je vhodné zapracovať do simulácie šum na výstupnom signály. Na nasledujúcom obrázku sú zobrazené výsledky adaptívneho riadenia hydraulického systému s časovo premenlivými parametrami na konštantnú hodnotu metódou rozloženia pólov.



Obr. 4 Adaptívne riadenie hydraulického systému na požadovanú hodnotu metódou rozloženia pólov

Ako na obrázku vidno vhodnou voľbou pólov sme docielili to, že priebeh regulovanej veličiny bol bez prekmitu nad požadovanú hodnotu. Z obrázku tiež vidno, že priebeh akčného zásahu je kmitavý čo bolo spôsobené pridaním šumu na výstupe systému. Dané hodnoty akčného zásahu sa pohybovali v malom okolí jednej hodnoty akčného zásahu. Premenlivosť parametrov prechodovej funkcie je zobrazená na nasledujúcom obrázku.



Obr. 5 Odhad koeficientov prenosovej funkcie systému

Koeficienty menovateľa systému mali prevažne ustálenú hodnotu a priebeh vývoja koefincientov čitateľa prenosovej funkcie je kmitavý, kvôli vysokofrekvenčnému šumu pridanému na výstupe nelineárneho systému.