

UMĚLÉ NEURONOVÉ SÍTĚ – ZÁKLADY TEORIE A APLIKACE (18)

I. TAUFER, O. DRÁBEK, P. DOLEŽEL

Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra řízení procesů, ivan.taufer@upce.cz

V příspěvku jsou uvedeny výsledky simulačních výpočtů prediktivního řízení zvolené nelineární soustavy s využitím jejího adaptivního modelu ve tvaru umělé neuronové sítě. Jsou analyzovány vlivy velikosti horizontu predikce, velikosti horizontu řízení a velikosti penalizační konstanty.

18 Vliv parametrů prediktivního řízení na kvalitu regulačního pochodu při sledování žádané hodnoty regulované veličiny

18.1 Úvod

Jak již bylo uvedeno v předcházejících příspěvcích [1], [2], na kvalitu prediktivního řízení má vliv několik parametrů. Určujícím vztahem pro výpočet akčních zásahů při prediktivním řízení je kritériální funkce [1]

$$J_{kr} = \sum_{i=N_1}^{N_2} [r(k+i) - y_{mp}(k+i)]^2 + \lambda \sum_{i=1}^{N_2} [u_{mp}(k+i-1) - u_{mp}(k+i-2)]^2 \quad (18.1)$$

Variabilní parametry funkce jsou:

N_1 – dolní horizont predikce,

N_2 – horní horizont predikce,

N_u – horizont řízení,

λ – váhová (penalizační) konstanta.

18.2 Cíle řešení

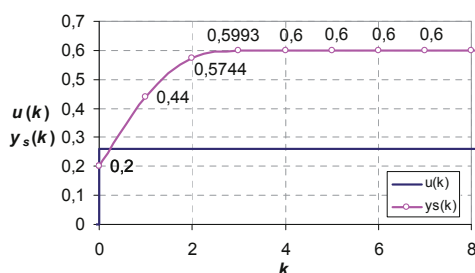
Cílem řešení je stanovit takové hodnoty výše uvedených variabilních parametrů, aby:

- 1) při skokové změně žádané hodnoty byl zajištěn co nejrychlejší plynulý přechod do nového ustáleného stavu bez překmitu, případně s definovaným maximálním přípustným překmitem,
- 2) řízení začalo s maximálně možným efektivním předstihem před předpokládanou změnou žádané hodnoty.

18.3 Objekt řízení

I dále budeme předpokládat řízení soustavy, jejíž podrobný popis a vlastnosti byly uvedeny v [2]. Jedná se o soustavu nelineární v ustálených stavech i v dynamických vlastnostech a její pracovní rozsah je v rozmezí vstupní veličiny $u \in (0; 1)$ a výstupní veličiny $y_s \in (0,2; 1)$. Necht' je požadovaný pracovní bod \mathbf{P} umístěn uprostřed rozsahu výstupní veličiny, tj. $y_s = 0,6$. Této žádané ustálené hodnotě výstupní veličiny pak odpovídá skoková změna hodnoty vstupní veličiny, tj. $u = 0,2581$, viz obr. 18.1. Potom pracovní bod bude $\mathbf{P}[u; y_s] = \mathbf{P}[0,2581; 0,6]$.

Obr. 18.1 – Průběh odezvy soustavy na skok $u = 0,2581$



Jak bude dále uvedeno, lze algoritmus řízení aktivovat v okamžiku startu simulačního programu, nebo s definovaným posunem po tomto startu.

18.4 Volba parametrů kritériální funkce

Nastavení optimálních parametrů kritériální funkce bylo simulováno

při přechodu soustavy z počátečních podmínek řešení ($u(k-1) = 0$; $y(k) = 0,2$ pro $k \leq 0$) do výše definovaného pracovního bodu \mathbf{P} , tj. $r(k) = 0,6$ pro $0 \leq k < 25$ a následně při změně žádané hodnoty na hodnotu horního pracovního rozsahu, $r(k) = 1,0$ pro $k \geq 25$.

18.4.1 Dolní horizont predikce N_1

Je definován vztahem [3]

$$N_1 = p + 1, \quad (18.2)$$

kde p je diskretní hodnota dopravního zpoždění.

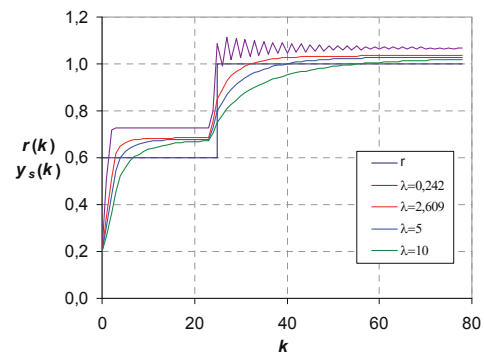
V našem případě, soustavy bez dopravního zpoždění, tak bude $N_1 = 1$.

18.4.2 Horní horizont predikce N_2

Hodnota horního horizontu predikce je dána minimálním počtem kroků, potřebných k ustálení odezvy na vstupní signál $u(k) = 0,2581$, $k \geq 0$, (viz obr. 18.1); v našem případě je tedy $N_2 \geq 4$.

Tato minimální hodnota horního horizontu predikce, jak je dále ilustrativně uvedeno na obr. 18.2, však nezajišťuje požadovanou kvalitu a průběh regulačního pochodu. Na obrázku jsou zobrazeny průběhy pro horizont řízení $N_u = 2$ a experimentálně nastavené hodnoty váhové konstanty λ .

Obr. 18.2 – Průběhy regulačních pochodů při změnách λ pro $N_2 = 4$



Plynulý přechod na ustálenou hodnotu $y_s = 0,7278$ zajišťuje $\lambda = 0,242$ v 8. kroku řízení s výraznou trvalou regulační odchylkou $e = 21,31\%$. Při další následné změně žádané hodnoty na $r(25) = 1,0$ je navíc regulační pochod tlumeně kmitavý.

Kmitání po skoku na žádanou hodnotu $r(25) = 1,0$ se podařilo odstranit až při $\lambda = 2,609$. K ustálení při náběhu do pracovního bodu však v tomto případě dochází až ve 20. kroku řízení s trvalou regulační odchylkou $e = 14,04\%$ a po dalším skoku na $r(25) = 1,0$ až v 35. kroku od této změny, s regulační odchylkou $e = 3,44\%$.

K zlepšení regulačního pochodu nevede ani další zvyšování hodnoty váhové konstanty λ . Jako příklad jsou na obr. 18.2 uvedeny průběhy regulačního pochodu pro $\lambda = 5$ a 10 . Je vidět, že nevyznamně klesá trvalá regulační odchylka, značně se však prodlužuje doba ustálení regulačního pochodu.

Horizont predikce $N_2 = 4$ je tedy nepoužitelný a volíme $N_2 = 5$.

Pro tento horizont byly provedeny simulační výpočty v následujících režimech:

- a) s povoleným překmitem regulované veličiny při náběhu do pracovního bodu o velikosti 2%,

- b) s plynulým průběhem bez překmitu regulované veličiny,
- c) s plynulým průběhem bez překmitu regulované veličiny a s průběžnou adaptací modelu regulované soustavy (dopředné neuronové sítě).
- d) s posunem náběhu do pracovního bodu po startu algoritmu řízení bez a s adaptací.

Postupně byly určeny odpovídající hodnoty horizontu řízení N_u a optimální váhové konstanty λ .

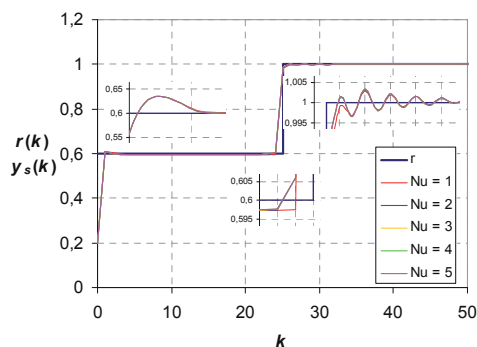
18.4.3 Výsledky simulačních výpočtů

a) náběh do pracovního bodu s povoleným překmitem

Byl sledován, podobně jako ve výše uvedeném případě, regulační pochod při náběhu do pracovního bodu $r(0) = 0,6$ a následném skoku žádané veličiny v regulačním kroku $k = 25$ na hodnotu $r(25) = 1,0$.

Získané průběhy regulované veličiny pro hodnoty horizontu řízení $N_u = 1, 2, 3, 4$ a 5 jsou souhrnně uvedeny na obr. 18.3, základní charakteristiky pak v tab. 18.1.

Obr. 18.3 – Regulační pochod s překmitem



Získané výsledky lze shrnout takto:

- 1) minimální hodnota váhové konstanty λ , povolující překmit regulované veličiny při náběhu do pracovního bodu 2% žádané hodnoty, je pro horizont řízení $N_u = 2, \dots, 5$ konstantní. O málo vyšší hodnota je jenom pro $N_u = 1$.
- 2) k ustálení v pracovním bodě dochází v $k_1 = 4$ kroku řízení s trvalou regulační odchylkou $e_{r1} = -0,43\%$, resp. $e_{r1} = -0,42\%$. Tato trvalá regulační odchylka je způsobena nepřesností výchozího modelu soustavy ve tvaru DNS.
- 3) do hodnoty horizontu řízení $N_u = 1, 2, 3$ je předstih k_p v řízení při změně žádané hodnoty v 25. kroku řízení roven těmto hodnotám, $k_p = 1, 2, 3$. Od $N_u = 3$ se tento předstih nemění a zůstává konstantní a roven $k_p = 3$. Z toho plyne, že další zvyšování hodnoty N_u již není účinné.
- 4) regulační pochod je po skoku na žádanou hodnotu $r(25) = 1,0$ tlumeně kmitavý s počáteční amplitudou $A_e = 0,6\%$ a koeficientem tlumení $\delta = 0,23$. K ustálení dochází v rozmezí $k_2 = 19-23$ regulačních kroků s nevýraznou, ale přesto trvalou regulační odchylkou $e_{r2} = 0,03\%$.

b) asymptotický náběh do pracovního bodu bez překmitu

Simulační výpočty byly provedeny pro $N_u = 3$. Získané výsledky lze shrnout takto:

- 1) optimální hodnota váhové konstanty, zajišťující asymptotický přechod do pracovního bodu bez překmitu, obr. 18.4, je $\lambda = 1,193$.
- 2) ostatní charakteristiky průběhu regulované veličiny, tj. doby ustálení regulačního pochodu a stálé regulační odchylky, zůstávají beze změny a jsou shodné s předcházejícím režimem, viz tab. 18.2.
- 3) při skoku žádané hodnoty na $r(25) = 1,0$ již nedochází ke kmitání regulované veličiny, viz obr. 18.4.

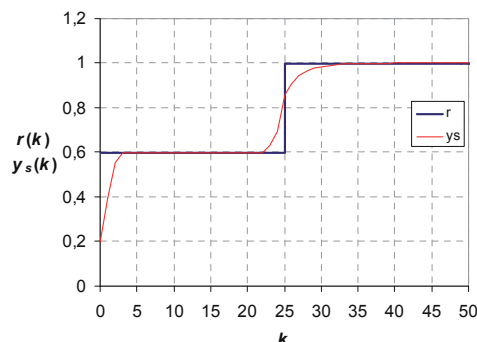
c) regulační pochod s adaptací modelu (DNS) řízené soustavy

Při adaptaci modelu řízené soustavy (DNS) došlo v průběhu jejího řízení k odstranění trvalé regulační odchylky. Při změnách žádané

Tab. 18.1 – Charakteristiky regulačních průběhů a)

N_u	1	2	3	4	5
λ	0,0283	0,0198	0,0198	0,0198	0,0198
k_1	4	4	4	5	4
$e_{r1}, \%$	-0,42	-0,43	-0,43	-0,43	-0,42
k_p	1	2	3	3	3
k_2	20	21	19	23	22
$e_{r2}, \%$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Obr. 18.4 – Regulační pochod bez překmitů



veličiny se však prodloužila doba ustálení regulačního pochodu. Charakteristiky regulačního pochodu jsou pro možnost porovnání s předcházejícím režimem uvedeny rovněž v tab. 18.2.

Tab. 18.2 – Charakteristiky regulačních pochodů b) a c)

	λ	k_{p1}	$e_{r1}, \%$	k_p	k_2	$e_{r2}, \%$
b)	1,193	4	-0,42	3	19	0,03
c)	0,611	7	0	3	22	0

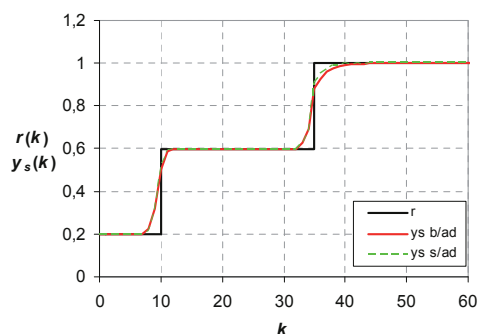
d) náběh do pracovního bodu s posunem od startu programu simulace

V tomto režimu simulace je přechod do pracovního bodu **P** posunutý do 10. kroku řízení. Cílem tohoto režimu je zajistit predikci již při přechodu do pracovního bodu. Výsledné průběhy pro variantu bez a s adaptací modelu řízené soustavy jsou uvedeny na obr. 18.5 a příslušné charakteristiky v tab. 18.3. Hodnoty těchto charakteristik jsou podobné jako v předcházejícím režimu (tab. 18.2). Předstihy řízení jsou $k_p = 3$ a odpovídají hodnotě horizontu řízení $N_u = 3$. Při adaptaci modelu (DNS) řízené soustavy jsou odstraněny trvalé regulační odchylky, ustálení regulačního pochodu je však podle očekávání prodlouženo o 3 kroky řízení.

Tab. 18.3 – Charakteristiky regulačních pochodů d)

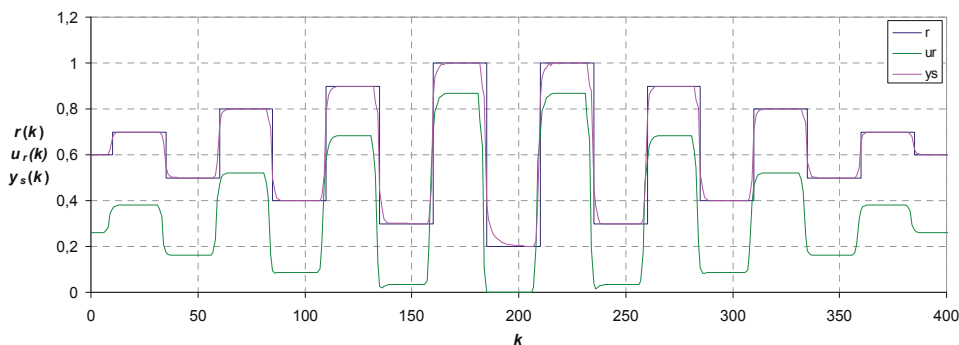
	λ	k_{p1}	$e_{r1}, \%$	k_p	k_2	$e_{r2}, \%$
bez adaptace	1,193	4	-0,42	3	19	0,03
s adaptací	0,611	7	0	3	22	0

Obr. 18.5 – Průběhy regulačních pochodů d)



Dokončení na další straně

Obr. 18.6 – Průběhy prediktivního řízení



Poznámka. Protože pro urychlení výpočtu byl pro každý nový optimalizační cyklus výpočtu predikovaných hodnot akční veličiny použit ve funkci *fminsearch* jako startovací vrchol simplexu optimální vrchol získaný v předcházejícím cyklu výpočtu, viz vývojový diagram na obr. 17.6 [2], má vrchol nového startovacího simplexu ve druhém kroku řízení nulové souřadnice. Zde se však negativně projevila nevhodná koncepce algoritmu funkce *fminsearch*, kde je výpočet prvků vektorů dalších vrcholů simplexu odvozen od hodnot startovacího vrcholu. Při nulových hodnotách souřadnic startovacího vrcholu jsou tak i hodnoty souřadnic dalších vrcholů nulové. To vede k tomu, že hodnota kritériální funkce (18.1) má ve všech vrcholech stejnou (nebo zanedbatelně odlišnou) hodnotu a simplex tak ztrácí schopnost „pohybu“ a hledání optimálního řešení. Z uvedeného důvodu bylo nutné ve funkci *fminsearch* provést programové úpravy, které tento nedostatek odstranily.

18.5 Příklad prediktivního řízení

Pro ilustraci prediktivního řízení byl zvolen režim d) s adaptací modelu řízené soustavy a parametry: $N_1 = 1, N_2 = 5, N_u = 3, \lambda = 0,522$. Zároveň je respektován pracovní rozsah akční veličiny uvedený v úvodu a přijato omezení $0 \leq u(k) \leq 1$. Průběh žádané hodnoty je ve tvaru stupňovité funkce s postupným růstem a poklesem žádané hodnoty kolem pracovního bodu $\mathbf{P}[u; y_s] = \mathbf{P}[0,2581; 0,6]$. Průběhy simulačních výpočtů jsou uvedeny na obr. 18.6.

Z uvedených průběhů lze konstatovat, že

- při každé předpokládané změně žádané hodnoty je předstih v řízení tři kroky řízení,
- k ustálení regulačního pochodu dochází, kromě dále uvedených,

v rozmezí 5–10 kroků řízení,

c) při velkých změnách z $r(k) = 0,3$ a $r(k) = 0,2$ na hraniční hodnotu $r(k) = 1$ dochází ke kmitání procesu řízení,

d) k podobnému mírnějšímu kmitání dochází při poklesu žádané hodnoty na $r(k) = 0,3$,

e) k omezení akčního signálu dochází jenom v případě změny žádané hodnoty na $r(k) = 0,2$. To se pochopitelně projeví na prodloužení doby ustálení regulačního pochodu.

Literatura

- [1] TAUFER, I.; DRÁBEK, O.; DOLEŽEL, P. Umělé neuronové sítě – teorie a aplikace (16). *CHEMAGAZÍN*, 2 (XXI), 2011, s. 45–47. ISSN 1210-7409.
- [2] TAUFER, I.; DRÁBEK, O.; DOLEŽEL, P. Umělé neuronové sítě – teorie a aplikace (17). *CHEMAGAZÍN*, 4 (XXI), 2011, s. 36–39. ISSN 1210-7409.
- [3] LAZAR, M.; PASTRAVANU, O. A neural predictive controller for non-linear system. *Mathematics and Computers in Simulation*, 60 (2002), pp. 315–324.

Problematika je řešena v rámci výzkumného záměru MŠM 0021627505 „Řízení, optimalizace a diagnostika složitých systémů“, programu vědeckovýzkumné spolupráce ČR a SR KONTAKT MŠMT č. MEB 0810003 „Identifikace a řízení složitých nelineárních soustav s využitím metod umělé inteligence“ a projektu Univerzity Pardubice SGFE106/2011 „Artificial Intelligence Control Toolbox pro MATLAB“.

Věnováno památce prof. Ing. Oldřicha DRÁBKÁ, CSc.

Abstract:

THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS – BASIC THEORY AND APPLICATION

Summary: *There are introduced simulation results of nonlinear plant predictive control in this contribution, whereas adaptive neural model is used as plant model. There is analyzed influence of prediction horizon length, control horizon length and penalization parameter value.*

Key words: predictor, predictive control, artificial neural network.