

# ADAPTIVE OPTIMAL CONTROLLERS WITH PRINCIPLES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

**Vladimír Burlak**

Master Degree Programme (2), FEEC BUT  
E-mail: xburla00@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Petr Pivoňka

E-mail: pivonka@feec.vutbr.cz

## ABSTRACT

This article considers adaptive optimal controllers. It shows principles of optimal controllers, recursive identification using least-mean squares method and identification based on neural network.

## 1. ÚVOD

Pro optimální regulaci dynamických soustav, jejichž parametry se v čase podstatným způsobem mění, je třeba použít takové řízení, které bude tyto změny respektovat. Tím lze dosáhnout výrazných energetických a ekonomických úspor. Řízení tohoto typu se nazývá adaptivní řízení. Adaptivní řízení se zpravidla skládá z části, která detekuje změny řízeného systému (identifikace) a z části řídicí. Řídicí část se realizuje optimálním regulátorem. U tohoto regulátoru vychází nastavení parametrů z extrému kriteriální funkce, kterou lze definovat požadované chování systému. Tento článek se zabývá modifikací dnes běžných kvadratických kriteriálních funkcí a jejím použitím v lineárním adaptivním zpětnovazebním řízení.

## 2. ROZBOR

Lineární kvadraticky optimální regulátor (dále LQ) využívá stavového popisu dynamických systémů. Ve své základní podobě je tvořen zpětnými vazbami od stavových proměnných a zesílení těchto zpětných vazeb umožňují úpravu chování řízeného systému a převádí systém do počátku stavového prostoru [1]. Pro praktické použití bylo řízení rozšířeno o vstup žádané hodnoty a člen s integračním (sumačním) charakterem [2]. Tím lze dosáhnout nulové ustálené regulační odchylky od referenční trajektorie při konstantní poruše působící na soustavu. Cenou za vložení sumačního členu bývá však zvýšení překmitu a větší kmitavost přechodného děje. Zde se nabízí otázka, zda rozšířením struktury regulátoru a následnou úpravou kritéria lze tyto nedostatky eliminovat.

### 2.1. LQ ŘÍZENÍ

Rozšíření algoritmu spočívá v přidání obdoby filtrované diferenční složky od výstupu diskrétní obdoby PI-D regulátoru. Na výstup regulované soustavy je přidán setrvačný členek. Stavové rovnice modifikovaného algoritmu přechází na tvar (1)

$$\begin{pmatrix} x(k+1) \\ w(k+1) \\ x_i(k+1) \\ x_d(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -C & 1 & 1 & 0 \\ (1-F)C & 0 & 0 & F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(k) \\ w(k) \\ x_i(k) \\ x_d(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u(k) \quad (1)$$

$$y(k) = (C \ 0 \ 0 \ 0)(x(k) \ w(k) \ x_i(k) \ x_d(k))^T$$

kde  $E$ ,  $B$  a  $C$  představují matice lineárního stavového modelu regulované soustavy,  $w(k)$  představuje žádanou hodnotu,  $x_i(k)$  je stavová proměnná sumačního členu,  $x_d(k)$  je stavová proměnná přidaného filtru a  $F$  je pevný koeficient tohoto filtru.

Kritérium bylo upraveno na tvar (2)

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (q_e (w(k) - y(k))^2 + q_u u(k)^2 + q_i x_i(k)^2 + q_d (x_d(k) - y(k))^2) \quad (2)$$

kde  $q_e$ ,  $q_u$ ,  $q_i$ ,  $q_d$  jsou penalizační koeficienty regulační odchylky, vstupu, sumačního členu a diference. Kritérium je výhodné přepsat na tvar (3), který zajišťuje transparentnost a snadné rozšíření [2]. Matice  $M$  po vynásobení se stavovým vektorem vytvoří vektor s vstupem a výstupem do řízené soustavy, stavem sumátoru a stavem přidaného filtru. Matice  $Q$  pak obsahuje pouze koeficienty  $q$  umístěné tak, aby vytvořily požadované veličiny (např. regulační odchylku) [2]. Vektor  $z(k)$  představuje stavový vektor systému popsaného stavovými rovnicemi (1). Výsledná zesílení lze určit řešením Riccatiový algebraické rovnice Kleinmannovým algoritmem. Detailní popis tohoto algoritmu lze nalézt v [1] a [2].

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (z(k)^T (M^T Q M) z(k)) \quad (3)$$

## 2.2. IDENTIFIKACE

Pro adaptivní řízení, které se má neustále přizpůsobovat aktuálním parametrům regulované soustavy je třeba provádět identifikaci neustále (online identifikace) [1]. Získané parametry jsou předány do matic  $E$ ,  $B$ ,  $C$  ze stavových rovnic (1). Tím je zajištěna, při neustálém řešení Riccatiový algebraické rovnice, adaptace zpětnovazebních zesílení. Pro účely této práce byly testovány dva přístupy k identifikaci. Prvním přístup představuje metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomináním, která byla aplikována v rekurzivní podobě na model ARX. Druhý přístup využívá jednoho neuronu s lineární přenosovou funkcí a učícím algoritmem Levenberg-Marquardt. Z pohledu rychlosti konvergence vychází v mnoha případech lepší identifikace neuronovou sítí. Detailní popis uvedených identifikačních algoritmů lze nalézt v [1].

## 2.3. SIMULAČNÍ APLIKACE

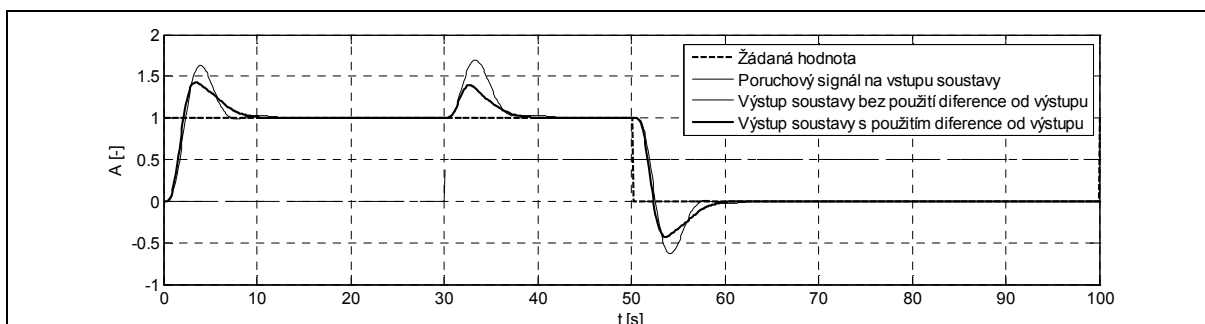
Pro ověření výše popsaných algoritmů byla vytvořena aplikace „Simulace LQ“ v prostředí Matlab/Simulink. Tato aplikace umožňuje zadání všech požadovaných parametrů pro nastavení kritéria LQ regulátoru a nastavení parametrů diskrétních ekvivalentů PID a PI-D, které slouží k porovnání výsledků. Dále je možno nastavit operátorový přenos regulované soustavy, vzorkovací periodu, parametry identifikace a parametry vstupních signálů (žádaná hodnota, poruchy).

Protože se lze často setkat s regulovanou soustavou, která nemá měřitelné stavové proměnné, lze použít aplikaci ve dvou režimech. První režim využívá stavové reprezentace, ve

keré je vektor stavových proměnných tvořen předchozími hodnotami vstupního a výstupního signálu (pseudostavová reprezentace). Druhý režim používá adaptivní stavový rekonstruktor. Tato varianta však představuje vyšší výpočetní náročnost, protože v každém kroku je třeba přepočítat vektor pro nastavení shody stavu rekonstruktoru se stavem regulované soustavy.

Touto aplikací byla provedena simulace se soustavou s operátorovým přenosem ve tvaru (4). Obrázek 1: zobrazuje simulační výsledky výstupu regulované soustavy s a bez rozšířené struktury při použití adaptivního stavového rekonstruktoru při stejně nastavených sobě odpovídajících penalizačních koeficientech  $q$ . Poruchový signál působí na vstup soustavy od třiceti sekund.

$$F_s(p) = \frac{2}{s(s^2 + s + 1)} \quad (4)$$



**Obrázek 1:** Výsledky simulace

### 3. ZÁVĚR

Tento článek se zabývá adaptivním optimálním řízením. Především je zde rozebrána úprava stávajícího algoritmu, která spočívá v rozšíření kritéria o penalizaci difference výstupu soustavy. Tato úprava umožňuje snížení překmitu přechodného děje s menším prodloužením, než je tomu v případě snižování překmitu úpravou penalizace akčního zásahu. Tato úprava je účinná pro poměrně vysokou hodnotu koeficientu  $q_d$ . Všechny zde popsané algoritmy jsou napsány v jazyce ANSI C a tím jsou připraveny pro přímou implementaci do řídicího systému od firmy B&R. Výše uvedenou variantu regulátoru lze považovat za originální, protože jsem ji nenalezl v žádné rešerši.

### PODĚKOVÁNÍ

Děkuji prof. Ing. Petru Pivoňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování tohoto článku.

### LITERATURA

- [1] PIVOŇKA, P.: *Optimalizace regulátorů*. VUT Brno, skriptum 2005.
- [2] ŠVANCARA, K.: *Adaptive optimal controller with identification based on neural networks*. Brno, 2004. Disertační práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně na Ústavu automatizace. Vedoucí disertační práce Prof. Petr Pivoňka.