

Programová podpora pro návrh adaptivního decentralizovaného řízení (3)

Petr Chalupa, Vladimír Bobál

3.2 Regulátor založený na minimalizaci rozptylu výstupu

Tento typ regulátoru je navržen tím způsobem, aby udržoval regulovanou veličinu anebo regulační odchylku na hodnotě danou velikostí žádané hodnoty a současně minimalizoval jejich rozptyl podle kritéria

$$J = E \left\{ [y(k)]^2 \right\} \quad \text{resp.} \quad J = E \left\{ [w(k) - y(k)]^2 \right\} \quad (23)$$

kde symbol E označuje operaci střední hodnoty. Jedná se o tzv. LQ jedнокrokové kritérium, návrh regulátoru použitím tohoto kritéria je značně jednodušší než použitím obecného více-krokového LQ kritéria. Je vhodné doplnit kritérium (23) o penalizaci přírůstků akční veličiny

$$J = E \left\{ [w(k) - y(k)]^2 + q[\Delta u(k)]^2 \right\} \quad (24)$$

kde q je penalizační faktor a $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ je přírůstek akční veličiny. Potom tento regulátor má velmi jednoduchý tvar

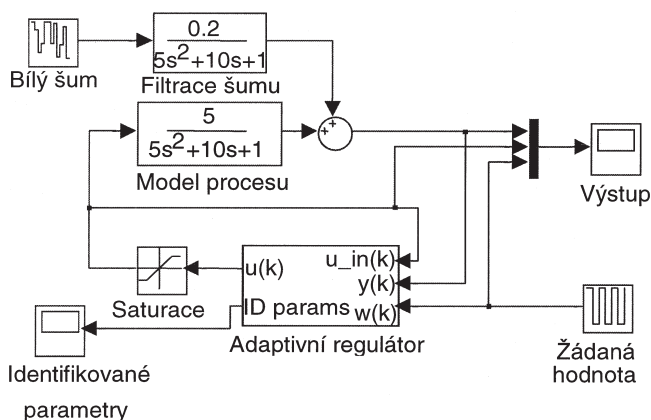
$$u(k) = \frac{1}{q} [a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) - b_1 u(k-1) - b_2 u(k-2) + w(k)] + u(k-1) \quad (25)$$

Vlivem penalizace se sice zvětší rozptyl regulační odchylky, ale je možnost stabilizovat regulační pochod i v případě neminimálních a nestabilních procesů.

4. Knihovna samočinně se nastavujících regulátorů

Na základě monografie [7] byla za účelem snadnějšího použití a testování vlastností samočinně se nastavujících regulátorů vytvořena knihovna v prostředí MATLAB Simulink, která je volně dostupná na internetových stránkách Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně – www.utb.cz/stctool [3]. Knihovna je vytvořena a testována v prostředí MATLAB verze 6.1 (Release 12.1), ovšem je možné ji po úpravách použít i pro nižší verze prostředí MATLAB. Regulátory obsažené v knihovně jsou implementovány jako samostatné bloky, což umožňuje jejich snadné začlenění do stávajících simulačních obvodů a jednoduchou tvorbu nových simulačních obvodů. Při tvorbě bloků regulátorů byly použity pouze standardní postupy prostředí Simulink, a proto pro práci s knihovnou postačuje pouze základní uživatelská znalost tohoto prostředí. Regulátory se do simulačních obvodů začleňují pouhým zkopírováním nebo přetažením myši a jejich parametry se nastavují pomocí dialogových oken. Další výhodou tohoto přístupu je relativně snadná možnost implementace vlastních regulátorů modifikováním některého ze stávajících bloků.

Knihovna v současné době obsahuje přes 30 jednoduchých jednorozměrových samočinně se nastavujících regulátorů, které pro průběžnou identifikaci řízeného procesu využívají diskretní modely druhého a třetího řádu. V jednotlivých regulátorech jsou použity diskretní zákony řízení, kdy výpočty parametrů regulátoru a následné hodnoty akční veličiny se provádějí podle rozličných



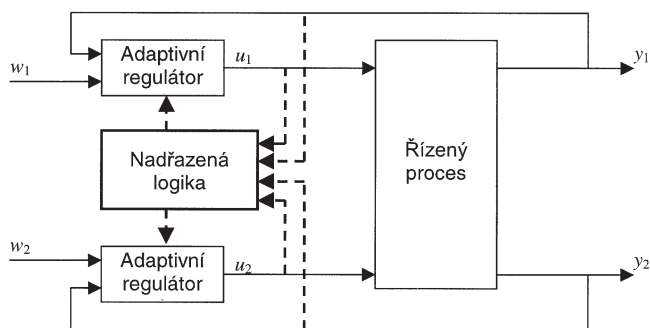
Obr.4 Schéma regulačního obvodu s adaptivním regulátorem

metod. První část regulátorů jsou číslicové regulátory typu PID, kdy syntéza regulátoru je založena na průběžném výpočtu kritických parametrů uzavřené regulační smyčky (metoda Ziegler-Nicholse) nebo na přiřazení pólů přenosu řízení uzavřeného regulačního obvodu. Druhá část regulátorů je odvozena na základě algebraické teorie řízení (konečný počet kroků regulace, obecná metoda přiřazení pólů, minimalizace kvadratického (LQ) kritéria [10]). Knihovna rovněž obsahuje další regulátory, které byly převzaty z literatury (např. regulátor založený na minimalizaci rozptylu výstupu aj.).

Typické zapojení libovolného regulátoru z knihovny je znázorněno na obr. 4. Každý samočinně se nastavující regulátor obsažený v knihovně používá 3 vstupní veličiny a poskytuje 2 dvě veličiny výstupní. Vstupy jsou žádaná hodnota výstupu regulovaného procesu (w) a jeho skutečná hodnota (y). Dalším vstupní veličinou je akční zásah, tedy veličina, kterou je proces řízen (u_{in}). Hodnota této veličiny nemusí být stejná jako výstup regulátoru, protože může dojít k omezení například vlivem saturace. Hlavním výstupem regulátoru je samozřejmě akční zásah, tedy veličina, která slouží k řízení regulovaného procesu. Druhým výstupem regulátorů jsou aktuální hodnoty identifikovaných parametrů, u regulátorů pracujících s modelem soustavy 2. řádu se jedná o 4 hodnoty (a_1, a_2, b_1, b_2) a u regulátorů používajících model 3. řádu se jedná o 6 hodnot ($a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$).

5. Návrh logického supervizoru

Při řízení MIMO obvodu je každý výstup řízeného procesu (y_i) ovlivňován kromě vlastního vstupu (u_i) i nevlastními vstupy ($u_1, \dots, u_{i-1}, u_{i+1}, \dots, u_n$). Míra tohoto ovlivňování je kromě přenosů v regulačním obvodu závislá i na průběžích vnějších vstupu do regulačního obvodu, tj. na průběžích žádaných hodnot regulovaných veličin. Je tedy zřejmé, že přenosové funkce v jednotlivých smyčkách při decentralizovaném přístupu se vlivem působení zbývajících podsystemů mění i v tom případě, že mnohorozměrový systém jako celek je lineární a stacionární. Je tedy třeba, aby použité regulátory byly schopny se přizpůsobit na změny v systému a proto po-



Obr.5 Schéma decentralizovaného regulačního obvodu včetně nadřazené logiky

užití adaptivních regulátorů je jednou z možností pro zvýšení kvality regulace v decentralizovaných systémech řízení. Vzhledem k charakteru změn v regulačním obvodu je třeba, aby v použitém algoritmu průběžné identifikace aktuálnější hodnoty vstupů a výstupů regulovaného procesu ovlivňovaly odhady parametrů modelu větší mírou, než hodnoty starší.

Průběžná identifikace všech subsystémů najednou může být zdrojem nestability, a proto je výhodné identifikovat v určitém čase vždy pouze jeden přenos. Identifikace ve vymezeném časovém intervalu je tedy realizována vždy jen v jednom podsystému a po jejím dokončení je přístupeno k identifikaci dalšího subsystému. Proces přepínání regulátorů mezi pasivním režimem s neměnnými parametry a aktivním adaptivním režimem zajišťuje nadřazená logika, která je další součástí decentralizovaného regulačního obvodu. Decentralizovaný regulační obvod včetně nadřazené logiky pro systém se dvěma regulovanými veličinami je uveden na obr. 5.

5.1 Funkce nadřazené logiky

Začlenění řídicí logiky, která zajišťuje, že v adaptivním režimu pracuje v určitém časovém intervalu vždy jen jeden regulátor, s sebou přináší dva základní problémy:

- způsob určení okamžiku, kdy má být adaptivní režim regulátoru ukončen,
- výběr strategie pro volbu následného regulátoru pracujícího adaptivním režimem.

5.1.1 Volba kritéria pro přepínání jednotlivých smyček do aktivního režimu

Pro rozhodování, kdy ukončit identifikaci v jednotlivých podsystémech je možné použít tři základní přístupy:

- pravidelné přepínání po předem stanoveném časovém intervalu průběžné identifikace,
- vyhodnocování kvality identifikačního procesu,
- sledování a vyhodnocování hodnot charakteristických veličin v jednotlivých subsystémech.

Dále je také možné použít kombinaci uvedených postupů. V dalších odstavcích budou popsány základní principy uvedených přístupů.

Pravidelné přepínání po uplynutí stanoveného časového intervalu

Jedná se o nejjednodušší metodu, při které řídicí logika neobstahuje prakticky žádný matematický aparát. Přepínání je realizováno po uplynutí určitého, předem daného času, po který byl regulátor v adaptivním režimu. Regulátor tedy určitou dobu pracuje v adaptivním režimu a po uplynutí této doby jsou aktuální hodnoty parametrů „zmrazeny“ a regulátor dále pracuje v režimu s neměnnými parametry. Jako adaptivní pak pracuje jiný regulátor. Výhodou tohoto přístupu je především jeho jednoduchost. Naopak velkou nevýhodou je, že adaptivní režim může být ukončen i v případě, kdy aktuální přenos ještě není dostatečně dobře zidentifikován, což může vést k destabilizaci regulačního obvodu.

Přepínání na základě vyhodnocování kvality identifikačního procesu

Při tomto přístupu jsou sledovány hodnoty charakteristických parametrů právě identifikovaného jednorozměrného regulačního odvodu, tedy aktivního subsystému. Poté, kdy hodnoty těchto parametrů jsou v mezích, které vyhovují předem zadanému kritériu, jsou výsledky identifikace pokládány za vyhovující a regulátor je přepnut z aktivního adaptivního režimu do režimu pasivního, tj. do regulačního pochodu s neměnnými parametry. Sledovanými parametry mohou být identifikované odhady parametrů přenosu soustavy nebo výstup soustavy, tj. regulovaná veličina y nebo regulační odchylka e .

Při přepínání na základě aktuálního výstupu je kritériem pro ukončení adaptivního režimu regulátoru ustálení regulovaného výstupu. Ustálení regulovaného výstupu je většinou posuzováno na základě směrodatné odchylky vypočítané z daného počtu posledních výstupních hodnot. Adaptivní režim je pak ukončen, pokud je splněna následující kritériální podmínka:

$$J_i < eps \quad J_i = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{j=0}^{m-1} [y_i(k-j) - \bar{y}_i]^2} \quad \bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} y_i(k-j)$$

kde eps je práh pro rozhodování, kdy ukončit adaptivní režim regulátoru, m je počet posledních hodnot, z nichž je počítáno kritérium a $y_i(k-j)$ představuje hodnotu sledovaného (i -tého) výstupu v $(k-j)$ -tém kroku.

Uvedené vzorce je možné použít v případě, kdy změny žádaná hodnoty regulované veličiny (referenční signál) mají skokový charakter, a tedy i výstup je v daných časových intervalech požadován konstantní. Jinak je možné obdobným způsobem namísto výstupu vyhodnocovat regulační odchylku ($e_i = w_i - y_i$). Adaptivní režim je pak ukončen poté, co se regulační odchylka ustálí – není tedy nutné, aby byla nulová, což může být výhodné při referenčním signálu odlišném, než na který byl regulátor navrhován (např. referenční signál ve tvaru rampy pro regulátor navržený jen pro skokové změny vstupu, kdy typicky dochází k trvalé konstantní regulační odchylce).

Jiným používaným kritériem je dosažení žádané hodnoty regulované veličiny. Adaptivní režim regulátoru je ukončen poté, co se regulační odchylka v daném počtu posledních kroků pohybuje v určitém pásmu v okolí nuly:

$$J_i < eps \quad J_i = \max |e_i(k-j)| \quad \text{pro } j = 0, 1, \dots, m$$

kde eps je práh pro rozhodování, kdy ukončit adaptivní režim regulátoru, m je počet posledních hodnot, z nichž je kritérium počítáno a $e_i(k-j)$ představuje hodnotu regulační odchylky sledovaného (i -tého) výstupu v $(k-j)$ -tém kroku.

Při sledování odhadů parametrů přenosu soustavy, tedy výstupů identifikační části regulátoru, je adaptivní režim ukončen poté, co se odhady parametrů přenosu ustálí. Jako kritérium se nejčastěji opět používá směrodatná odchylka průběhu odhadů parametrů v daném počtu posledních kroků s tím rozdílem, že sledovaných průběhů je více – je tedy třeba brát maximum ze všech parametrů. Kritérium má potom následující tvar:

$$J_i < eps \quad J_i = \max_r \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{j=0}^{m-1} [\hat{\Theta}_{ir}(k-j) - \bar{\Theta}_{ir}]^2}$$

$$\bar{\Theta}_{ir} = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \hat{\Theta}_{ir}(k-j)$$

kde eps je práh pro rozhodování, kdy ukončit adaptivní režim regulátoru, m je počet posledních hodnot, z nichž je počítáno kritérium a $\Theta_{ir}(k-j)$ představuje hodnotu r -tého parametru sledovaného (i -tého) přenosu v $(k-j)$ -tém kroku.

Z časového hlediska je výhodnější vyhodnocovat průběh odhadů parametrů než průběh výstupu, protože k ustálení odhadů para-

metrů dochází dříve, než k ustálení výstupu (regulační odchylky). Hlavní nevýhoda tohoto přístupu spočívá v jeho větší náročnosti jak výpočtové, tak i paměťové.

Přepínání na základě sledování hodnot charakteristických veličin z ostatních subsystémů

Při přepínání na základě vyhodnocování průběhu hodnot signálů z ostatních subsystémů, než je právě identifikovaný, je přístup opačný než v předchozím případě. Adaptace aktuálního přenosu je ukončena, pokud některý jiný výstup překročí zadané kritérium. Jako kritérium se používá absolutní hodnota regulační odchylky. Pokud tato u některého systému překročí danou mez, znamená to, že odpovídající regulátor není dobře nastaven. V tom případě je třeba přepnout odpovídající regulátor do adaptivního režimu.

Kromě absolutní hodnoty regulační odchylky je samozřejmě možné použít i složitější kritéria založená například na vyhodnocování jakosti regulačního pochodu na základě integrálních kritérií.

Vyhodnocování výstupů, jejichž přenosy nejsou právě identifikovány, nejlépe vystihuje inženýrskou praxi. Není třeba přesně dosáhnout žádaných hodnot, ale je nezbytné, aby se výstupy pohybovaly ve stanovených povolených tolerancích. Nevýhodou tohoto přístupu je, že na rozdíl od předchozího nemá tendenci předcházet problémovým stavům. To znamená, že adaptivní režim je ukončen, až když některý jiný výstup vybočí mimo stanovené meze.

5.1.2 Výběr strategie pro volbu následného regulátoru pracujícího adaptivním režimu

Poté, co je ukončen aktivní adaptivní režim určitého regulátoru, je třeba rozhodnout, který regulátor bude jako následující přepnut

do adaptivního režimu. Nejčastěji bývá tato úloha řešena pevně stanoveným pořadím, v jakém se mají regulátory přepínat. Tedy po ukončení identifikace přenosu prvního subsystému (přenos $u_1 - y_1$) se pokračuje identifikací druhého subsystému (přenos $u_2 - y_2$) a tak dále až do posledního subsystému (přenos $u_n - y_n$), po němž následuje opět přepnutí do prvního subsystému.

Výhodnější může být nedodržovat toto základní pořadí, ale určovat regulátor, který má být přepnut do adaptivního režimu, dynamicky za běhu regulačního pochodu. Typickým případem, kde se uplatňuje dynamický přístup, je ukončení adaptace na základě hodnot výstupů z ostatních subsystémů (viz výše). V tomto případě je do adaptivního režimu přepnut regulátor, který odpovídá výstupu, jenž způsobil ukončení aktuální adaptace.

Literatura

(vybrané tituly)

[10] DRÁBEK, O., MACHÁČEK, J.: Adaptivní řízení. Pardubice, Vysoká škola chemicko-technologická 1992.

Ing. Petr Chalupa
prof. Ing. Vladimír Bobál, CSc.

Ústav teorie řízení
Institut informačních technologií
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Nám. T. G. Masaryka 275
762 72 Zlín, ČR
Tel.: +420/57/603 3217
Fax: +420/57/603 3333
e-mail: chalupa@ft.utb.cz
bobal@ft.utb.cz

47