ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1984

Seria: AUTOMATYKA z. 73 Nr kol. 798

Jerzy MOŚCIŃSKI

DOBÓR WARTOŚCI POCZĄTKOWEJ JEDNEGO Z PARAMETRÓW REGULATORA W UKŁADZIE REGULACJI SAMONASTRAJAJĄCEJ

Streszczenie. W artykule omówiony został problem asymptotycznej nieidentyfikowalności parametrów regulatora w układzie uogólnionej samonastrajającej regulacji minimalnowariancyjnej. Opisano praktyczne metody doboru wartości początkowej jednego z parametrów regulatora i jego wpływ na jakość regulacji minimalnowariancyjnej. Przedstawiono także wyniki symulacji komputerowej układu regulacji samonastrajającej tego typu.

1. WSTĘP

W ostatnich latach dziedziną teorii sterowania, której poświęca się wiele uwagi, jest zagadnienie sterowania optymalnego w warunkach istnienia zakłóceń stochastycznych (Åström [1]). Najczęściej optymalizowanym wskaźnikiem jakości dla tego typu problemu jest wariancja wielkości wyjściowej obiektu przy pewnych ograniczeniach nałożonych na wartości przyjmowane przez jego wielkość sterującą. Ograniczenia te powodowane są tym, iż algorytm minimalnowariancyjny żądać może zbyt wielkich, przekraczających możliwości organu wykonawczego, wartości wielkości sterującej. Zakładając dodatkowo, że nakłada się wagę na optymalne w pewnym (określonym przez postać i parametry wielomianów $P(z^{-1})$ i $R(z^{-1})$) sensie nadążanie wielkości wyjściowej obiektu za jej wartością zadaną, można wprowadzić jako przedmiot optymalizacji następujący wskaźnik jakości (Clarke i in. [4]):

$$I_1 = E\left\{\left[P(z^{-1}) \cdot y(i+k) - R(z^{-1}) \cdot w(i)\right]^2 + \left[Q'(z^{-1}) \cdot u(i)\right]^2\right\}, \quad (1)$$

gdzie:

- $y(i)$ - wielkość wyjściowa obiektu,
- $u(i)$ - wielkość sterująca obiektu,
- $w(i)$ - wartość zadana wielkości wyjściowej obiektu,
- k - dyskretny czas opóźnienia w układzie regulacji.

$$P(z^{-1}) = p_0 + p_1 z^{-1} + \ldots + p_{n_p} z^{-n_p} \quad (2)$$

$$Q'(z^{-1}) = q'_0 + q'_1 z^{-1} + \ldots + q'_{n_q} z^{-n_q} \quad (3)$$

$$R(z^{-1}) = r_o + r_1 z^{-1} + \dots + r_{n_r} z^{-n_r} \tag{4}$$

Obiekt regulacji opisać można poniższym prostym modelem transmitancyjnym

$$y(i) = z^{-k} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot u(i) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot e(i), \tag{5}$$

gdzie:

$e(i)$ - dyskretny biały szum o zerowej wartości średniej i wariancji λ^2.

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \tag{6}$$

$$B(z^{-1}) = b_o + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n} \tag{7}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_n z^{-n} \tag{8}$$

Równanie (5) opisuje układ regulacji a nie obiekt w tym sensie, że zawarty w nim dyskretny czas opóźnienia k obejmuje zarówno właściwy czas opóźnienia wynikający z właściwości obiektu, jak i zwłokę czasową powstałą przy realizacji dyskretnego układu regulacji.

Problem sterowania optymalnego typu takiego jak przedstawiony powyżej może być rozwiązywany na drodze sprowadzenia go do równania Wienera-Hopfa i rozwiązania tego równania bądź też, operując modelem obiektu w postaci równań stanu, można problem ten sprowadzić do rozwiązania dyskretnej wersji równania Riccatiego. Obie metody są w sposób znaczący zaawansowane obliczeniowo i wymagają dokładnego modelu regulowanego obiektu, co może być niewygodne, zwłaszcza w przypadku istotnej niestacjonarności obiektu.

Clarke i in. [4] proponują wprowadzanie pojęcia uogólnionej wielkości wyjściowej obiektu $\phi(i)$ zdefiniowanej jak następuje:

$$\phi(i+k) = P.y(i+k) - R.w(i) + Q.u(i), \tag{9}$$

przy czym

$$Q(z^{-1}) = \frac{q_o'}{b_o} Q'(z^{-1}) \tag{10}$$

i pokazują, że minimalizacja wskaźnika jakości I_1 odpowiada minimalizacji następującego wskaźnika jakości I_2

$$I_2 = E\left\{\phi^2(i+k)\right\} \tag{11}$$

Autorzy ci proponują następnie, aby minimalizować nie wskaźnik jakości I_2, a pewną stowarzyszoną funkcję kosztu I_3

$$I_3 = \hat{\phi}^2(i+k|i), \tag{12}$$

przy czym

$$\hat{\phi}(i+k|i) = P.\hat{y}(i+k|i) - R.w(i) + Q.u(i), \tag{13}$$

gdzie

$\hat{y}(i+k|i)$ - k-krokowa predykcja wielkości wyjściowej obiektu dokonywana w chwili dyskretnej "i".

Funkcja kosztu I_3 jest tzw. bieżącym wskaźnikiem jakości, jako że minimalizacja dokonywana jest na "k" kroków naprzód w każdej chwili dyskretnej "i" w oparciu o stan obiektu regulacji wynikły z nadania wielkości sterującej obiektu określonych wartości w przeszłości. Algorytm ten nie zapewnia minimalizacji wariancji uogólnionej wielkości wyjściowej obiektu $\phi(i)$ w nieskończonym horyzoncie sterowania, jest więc algorytmem suboptymalnym w uogólnionym (obejmującym ograniczenia na wartości wielkości sterującej i wagę na optymalne nadążanie za wartością zadaną) minimalnowariancyjnym sensie (MacGregor i in. [8]).

Zasadniczą zaletą tego algorytmu jest to, że wykorzystując dodatkowo pojęcie tzw. modelu predykcyjnego układu regulacji (Niederliński [9]), można w każdym kroku sterowania identyfikować z tego modelu parametry szukanego algorytmu regulacji na drodze rekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów. W sposób prosty i szybki obliczeniowo można w takim układzie uzyskać minimalny wskaźnik jakości zwykle niewiele tylko większy (rzędu kilku %) od minimalnej wartości wskaźnika jakości I_1 (Mac Gregor i in. [8]).

W artykule dokonana zostanie analiza algorytmu regulacji opisanego przez Clarke'a i in. [4, 5] pod kątem możliwości identyfikacji parametrów opisujących ten algorytm.

2. ANALIZA UKŁADU REGULACJI Z UOGÓLNIONYM REGULATOREM MINIMALNOWARIANCYJNYM WG CLARKE'A I IN. [4, 5]

Zakłada się, że obiekt regulacji opisać można równaniem

$$A.y(i) = z^{-k}\, B.u(i) + C.e(i), \tag{20}$$

przy czym wielomiany A, B i C zmiennej z^{-1} opisane są równaniami (6) - (8).

Wprowadza się uogólnioną wielkość wyjściową obiektu regulacji opisaną zależnością

$$\phi(i+k) = P.y(i+k) - R.w(i) + Q.u(i), \tag{21}$$

przy czym wielomiany P, Q i R zmiennej z^{-1} zdefiniowane są odpowiednio równaniami (2), (3) i (10) oraz (4).

Równanie regulatora zapewniającego spełnienie celu uogólnionej regulacji minimalnowariancyjnej wg Clarke'a i in. [4, 5] posiada następującą strukturę:

$$H.u(i) + G.y(i) + E.w(i) = 0, \tag{22}$$

przy czym wielomiany H, G i E zmiennej z^{-1} zdefiniowane są poniższymi tożsamościami wielomianowymi wynikającymi z rozwiązania zagadnienia minimalizacji wskaźnika jakości z równania (12)

$$P.C = A.F + z^{-k} G \tag{23}$$

$$H = B.F + Q.C \tag{24}$$

$$E = -R.C \tag{25}$$

gdzie wielomiany F i G zmiennej z^{-1} mają postać następującą:

$$F(z^{-1}) = 1 + f_1 z^{-1} + \ldots + f_{k-1} z^{-(k-1)} \tag{26}$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \ldots + g_{n_g} z^{-n_g} \tag{27}$$

a stopień n_g wielomianu $G(z^{-1})$ określony jest zależnością:

$$n_g = \max\left\{(n_p+n-k),\ (n-1)\right\} \tag{28}$$

Zakłada się, że obiekt opisany równaniem (20) regulowany jest zgodnie z równaniem

$$\hat{H}_i(z^{-1}).u(i) + \hat{G}_i(z^{-1}).y(i) + \hat{E}_i(z^{-1}).w(i) = 0, \tag{29}$$

przy czym struktura wielomianów $\hat{H}_i$, $\hat{G}_i$ oraz $\hat{E}_i$ zmiennej z^{-1} określona jest równaniami (23) - (25), a ich parametry zostały wyznaczone za pomocą rekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów dla danych do kroku "i" włącznie.

Algorytm rekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów minimalizuje sumę kwadratów błędów identyfikacji o następującej postaci:

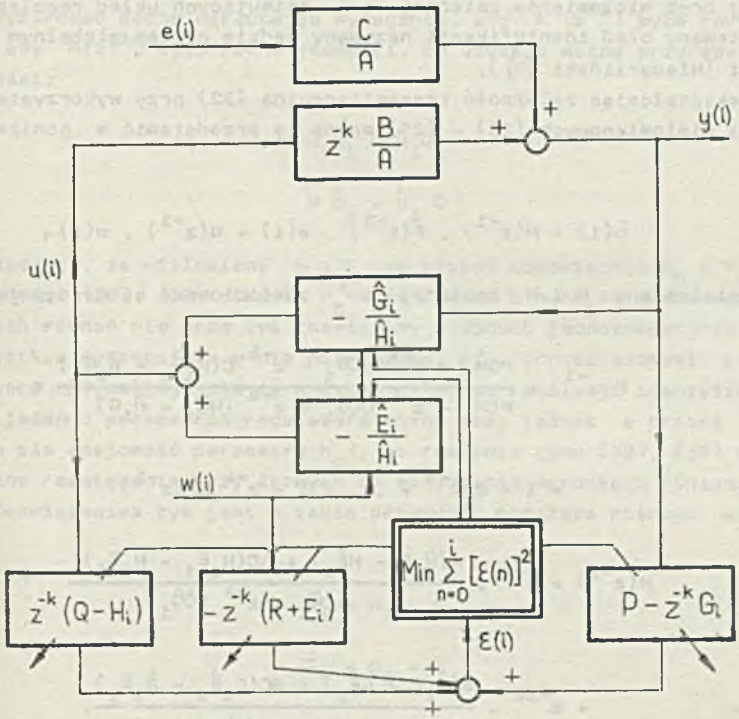
$$s_i = \sum_{n=0}^{i} \varepsilon^2(n), \tag{30}$$

przy czym wielkość $\varepsilon(n)$ jest określona wzorem:

$$\varepsilon(n) = \phi(n) - H_n(z^{-1}).u(n-k) - G_n(z^{-1}).y(n-k) - E_n(z^{-1}).w(n-k), \tag{31}$$

a struktura wielomianów H_n, G_n oraz E_n zmiennej z^{-1} określona jest równaniami (23) - (25).

Założenia powyższe pozwalają przedstawić układ uogólnionej regulacji minimalnowariancyjnej wg Clarke'a i in. [4, 5] w wersji samonastrajającej w postaci schematu blokowego zamieszczonego na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu uogólnionej samonastrajającej regulacji minimalnowariancyjnej

Schemat blokowy pozwala przedstawić błąd identyfikacji $\mathcal{E}(i)$ w postac poniższej zależności

$$\mathcal{E}(i) = \frac{C}{A} \cdot \frac{P - z^{-k} G_i - \frac{\hat{G}_i}{\hat{H}_i} z^{-k} (Q - H_i)}{1 + z^{-k} \frac{B}{A} \frac{\hat{G}_i}{\hat{H}_i}} \cdot e(i) - \left\{ z^{-k} \cdot (R+E_i) + \right.$$

$$\left. + \frac{\hat{E}_i}{\hat{H}_i} \cdot \frac{z^{-k} (Q-H_i) + z^{-k} \frac{B}{A} (P-z^{-k}G_i)}{1 + z^{-k} \frac{B}{A} \frac{\hat{G}_i}{\hat{H}_i}} \right\} \cdot w(i) \qquad (32)$$

Wielkość $\mathcal{E}(i)$ przedstawiona została jako funkcja tylko zakłócenia $e(i)$ oddziałującego na obiekt regulacji i wartości zadanej jego wielkości wyjściowej oraz wielomianów zmiennej z^{-1} opisujących układ regulacji. Tak zdefiniowany błąd identyfikacji nazywany będzie błędem globalnym identyfikacji (Niederliński [9]).

Przekształcając zależność transmitancyjną (32) przy wykorzystaniu tożsamości wielomianowych (23) - (25) można ją przedstawić w poniższej postaci:

$$\mathcal{E}(i) = M(z^{-1}) \cdot F(z^{-1}) \cdot e(i) + N(z^{-1}) \cdot w(i), \qquad (33)$$

gdzie wielomiany M i N zmiennej z^{-1} zdefiniowane są następująco:

$$M(z^{-1}) = \frac{PC\hat{H}_i - z^{-k} QC\hat{G}_i + z^{-k} C(H_i\hat{G}_i - \hat{H}_iG_i)}{PC\hat{H}_i - z^{-k} QC\hat{G}_i + z^{-k} (H\hat{G}_i - \hat{H}_iG)} =$$

$$= 1 + m_k z^{-k} + \ldots = 1 + z^{-k} M'(z^{-1}) \qquad (3$$

$$N(z^{-1}) = z^{-k} \cdot \frac{A(\hat{H}_iE - H\hat{E}_i) + AC(H_i\hat{E}_i - \hat{H}_iE_i)}{AC\hat{H}_i + z^{-k} BC\hat{G}_i} +$$

$$+ z^{-2k} \cdot \frac{B(\hat{G}_iE - G\hat{E}_i) + BC(G_i\hat{E}_i - \hat{G}_iE_i)}{AC\hat{H}_i + z^{-k} BC\hat{G}_i}, \qquad (3$$

przy czym $M'(z^{-1})$ jest wielomianem zmiennej z^{-1} stopnia skończonego lub nieskończonego.

Ze względu na stochastyczny charakter zakłócenia e(i) rozpatrzona zostanie minimalizacja wariancji błędu globalnego $\varepsilon(i)$

$$E\left\{[\varepsilon(i)]^2\right\} = E\left\{[F.e(i) + FM'.e(i-k) + N.w(i)]^2\right\} \tag{36}$$

Zakładając, że dla opisanego systemu zachodzi hipoteza ergodyczna, można stwierdzić, że minimalizacja wariancji błędu globalnego odpowiadać będzie minimalizacji sumy kwadratów błędów globalnych w nieskończonym horyzoncie czasowym.

Biorąc pod uwagę, że wielomian $F(z^{-1})$ jest stopnia k-1 i zakładając stochastyczną niezależność wielkości e(i) i w(i), równość (36) można przepisać w postaci:

$$E\left\{[\varepsilon(i)]^2\right\} = E\left\{[F.e(i)]^2\right\} + E\left\{[F.M'.e(i-k)]^2\right\} + E\left\{[N.w(i)]^2\right\} \tag{37}$$

Minimum wariancji wielkości $\varepsilon(i)$ można osiągnąć poprzez wyzerowanie drugiego i trzeciego składnika prawej strony zależności (37). Składnik drugi wyzerować można nakładając wymaganie, aby $M'(z^{-1})$ było równe zeru, a więc aby $M(z^{-1})$ było równe jedności, co uzyskać można przy spełnieniu zależności:

$$H_i\hat{G}_i = \hat{H}_i G_i \tag{38}$$

$$H\,\hat{G}_i = \hat{H}_i\,G \tag{39}$$

Zakładając, że wielomiany H i G są stopni odpowiednio n_h i n_g, każda z tożsamości (38), (39) określa n_h+n_g+1 równań z n_h+n_g+2 niewiadomymi. Zespół tych równań nie może być rozwiązany w sposób jednoznaczny ze względu na wszystkie występujące w nim niewiadome, tj., innymi słowami, parametry regulatora optymalnego nie są w takim układzie regulacji identyfikowalne. Jeżeli jeden z parametrów regulatora znany jest jednak a priori (zwykle zakłada się znajomość parametru h_o), to równania typu (38), (39) mają jednoznaczne rozwiązanie przy łatwych do spełnienia warunkach (Niederliński [9]). Rozwiązaniem tym jest w takim przypadku poniższa równość wielomianów:

$$\hat{H}_i = H_i = H \tag{40}$$

$$\hat{G}_i = G_i = G \tag{41}$$

pociągająca za sobą na drodze minimalizacji trzeciego składnika równania (37) następującą równość wielomianów:

$$\hat{E}_i = E_i = E$$

Z powyższych rozważań wyciągnąć można wniosek, że jeżeli procedura identyfikacji parametrów uogólnionego regulatora minimalnowariancyjnego i regulacji zgodnie z równaniem (29) przy parametrach regulatora równych ich ostatnim ocenom jest zbieżna w przestrzeni parametrów, to punktem zbieżności, odpowiadającym minimalizacji wariancji błędu globalnego identyfikacji, jest przy znajomości a priori wartości jednego parametru regulatora równość ocen parametrów wielomianów $\hat{H}_i$, $\hat{G}_i$ i $\hat{E}_i$ i parametrów wielomianów H, G i E regulatora optymalnego.

Zespół wszystkich parametrów wielomianów regulatora H, G i E jest w opisanym układzie ze sprzężeniem zwrotnym asymptotycznie nieidentyfikowalny.

3. DOBÓR WARTOŚCI POCZĄTKOWEJ PARAMETRU h_o REGULATORA

Jak wspomniano powyżej, układ uogólnionej regulacji minimalnowariancyjnej w wersji samonastrajającej przy zbieżności procesu estymacji parametrów regulatora przedstawia liniowy stacjonarny obiekt regulacji objęty liniowym asymptotycznie stacjonarnym sprzężeniem zwrotnym. Układ taki przy braku dodatkowego sygnału pobudzającego może być źródłem problemów związanych z identyfikowalnością opisujących go parametrów. Zwykle aby uniknąć tego typu niejednoznaczności, zakłada się znajomość parametru h_o wielomianu $H(z^{-1})$ regulatora, przy czym dobór jego wartości jest zagadnieniem krytycznym dla zbieżności procedury identyfikacji parametrów regulatora i regulacji zgodnie z założonym algorytmem.

Åström i in. [2] oraz Cegrell i in. [3] przeprowadzają uproszczoną analizę układu regulacji zawierającego samonastrajający regulator minimalnowariancyjny pod kątem doboru parametru h_o regulatora. Rozważają oni obiekt regulacji opisany równaniem:

$$y(i) = z^{-k}\frac{B}{A}\cdot u(i) + \frac{C}{A}\cdot e(i) \tag{43}$$

oraz regulator opisany równaniem

$$H.u(i) + G.y(i) = 0 \tag{44}$$

Wprowadźmy następujące wielkości wektorowe

$$\underline{b}^T = \left[h_1,\ldots,h_{n+k-1},\ g_o,g_1,\ldots,g_{n-1}\right] \tag{45}$$

$$\underline{x}^T(i) = \left[u(i-1),\ldots,u(i-n-k+1),y(i),y(i-1),\ldots,y(i-n+1)\right] \tag{46}$$

Załóżmy, że parametry wielomianów H i G regulatora estymowane są z poniższego równania modelu

$$\hat{y}(i) - h_o.u(i-k) - \underline{b}^T.\underline{x}(i-k) = 0 \tag{47}$$

na drodze rekurencyjnej MNK, przy czym założono, że znana jest prawdziwa (optymalna) wartość parametru h_o i oznacza się ją przez $\tilde{h}$. Równanie regulatora przepisać można przy tych założeniach w postaci:

$$u(i) = -\frac{\hat{\underline{b}}^T(i)}{\tilde{h}} . \underline{x}(i) , \tag{48}$$

gdzie $\hat{\underline{b}}^T(i)$ oznacza zespół ocen parametrów wielomianów regulatora uzyskanych do chwili dyskretnej "i" włącznie.

Załóżmy, że wyznaczone w danym kroku dyskretnym sterowanie u(i) utrzymywane jest dla nieskończenie długiego horyzontu sterowania, tj.

$$u(i) = -\frac{\hat{\underline{b}}_N^T}{\tilde{h}} . \underline{x}(i) \tag{49}$$

Można pokazać (Åström i in. [2] oraz Cegrell i in. [3]), że w tych warunkach wartość oczekiwana estymowanego zespołu parametrów $\hat{\underline{b}}^T(i)$ przedstawia się następująco:

$$E\left\{\hat{\underline{b}}^T(i)\right\} = \underline{b}^T + \hat{\underline{b}}_N^T \left(1 - \frac{h_o}{\tilde{h}}\right) \tag{50}$$

jeśli tylko układ regulacji jest stabilny, przy czym $\underline{b}^T$ oznacza zespół parametrów wielomianów H i G regulatora minimalnowariancyjnego odpowiadający prawdziwej (optymalnej) wartości h_o.

Biorąc następnie

$$\hat{\underline{b}}_{N+1}^T = E\left\{\hat{\underline{b}}^T(i)\right\} \tag{51}$$

otrzymujemy następujący ciąg ocen parametrów wielomianów H i G

$$\hat{\underline{b}}_{N+1}^T = \underline{b}^T + \left(1 - \frac{h_o}{\tilde{h}}\right) \hat{\underline{b}}_N^T, \tag{52}$$

czyli

$$\hat{\underline{b}}_N^T = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{h_o}{\tilde{h}}\right) z^{-1}} . \underline{b}^T \tag{53}$$

Z powyższych rozważań wyciągnąć można poniższe wnioski:

a) ciąg ocen parametrów wielomianów H i G regulatora jest zbieżny wtedy i tylko wtedy, gdy

$$\left|1 - \frac{h_o}{\tilde{h}}\right| < 1, \tag{54}$$

czyli

$$\frac{h_o}{\tilde{h}} \in (0, 2), \tag{55}$$

b) jeśli ciąg ocen parametrów wielomianów H i G regulatora jest zbieżny, to uzyskany układ regulacji zapewnia minimalnowariancyjną regulację wielkości wyjściowej obiektu,

c) szybkość zbieżności ocen parametrów wielomianów H i G regulatora zależy między innymi od doboru wartości $\tilde{h}$ jako oceny a priori parametru h_o regulatora optymalnego.

Przytoczone rozważania dotyczą regulatora minimalnowariancyjnego wg Åströma i in. [2], analogiczne wnioski można jednak wyciągnąć analizując układ regulacji samonastrajającej z regulatorem wg Clarke'a i in. [4]. Przedstawione uwagi wskazują na możliwe niebezpieczeństwa związane z niewłaściwym doborem wartości parametru $\tilde{h}$ regulatora. Przyjęcie zbyt dużej wartości $\tilde{h}$ jest powodem wolnej zbieżności ocen estymowanych parametrów regulatora optymalnego. Zbyt mała wartość $\tilde{h}$ może spowodować destabilizację procesu estymacji parametrów regulatora i regulacji w oparciu o ostatnie ich oceny, a szczególnie niebezpieczne może być przyjęcie niewłaściwego znaku parametru $\tilde{h}$. Wnioski te potwierdzone zostały w przeprowadzonych przez autora niniejszego opracowania badaniach symulacyjnych. Badania te wskazują, że destabilizacja opisywanego układu regulacji samonastrajającej jest zjawiskiem realnie groźnym w przypadku nieznajomości parametru h_o regulatora optymalnego, a więc przy braku możliwości zachowania warunku (55) dla regulatora minimalnowariancyjnego. Problem destabilizacji może się również pojawić w przypadku doboru zbyt dużej wartości parametru $\tilde{h}$ ze względu np. na możliwe wzajemnie niekorzystne wpływy wolnej zbieżności ocen estymowanych parametrów regulatora, wysokiego poziomu zakłóceń i istniejących ograniczeń na wartości wielkości sterującej obiektu. Możliwym wyjściem z sytuacji jest estymowanie w początkowej fazie procesu wszystkich parametrów regulatora, a więc również parametru h_o. W okresie tym parametry sprzężenia zwrotnego ze względu na proces dostrajania się parametrów regulatora są silnie zmienne w czasie, co daje dodatkowe stopnie swobody pozwalające na jednoznaczną estymację większej ilości parametrów w układzie (Harris i in. [7]). Próba estymacji wszystkich parametrów regulatora w dłuższym horyzoncie sterowania powodować może okresowe destabilizowanie się ocen estymowanych parametrów regulatora bez zna-

czącego pogorszenia jakości regulacji. Wystąpienie w takich warunkach zakłócenia o dużej wartości powoduje zwykle gwałtowne dostrajanie się parametrów regulatora do ich wartości optymalnych, przy czym okres ten związany jest ze zwiększonym błędem regulacji, co nakazuje unikanie tego typu zachowania się układu. Opisany proces rozstrajania się parametrów regulatora i ponownego ich dostrajania się ma charakter cykliczny, co przedstawia rys. 2.

Najczęściej stosowana procedura estymacji parametrów regulatora samonastrajającego obejmuje strojenie w początkowej fazie wszystkich parametrów regulatora, a następnie, gdy zgodnie z ustalonym kryterium zbieżności estymowany parametr h_0 osiągnął z pewnym błędem swoją wartość ustaloną w przestrzeni parametrów - zaprzestaje się jego estymacji. Jako proste kryterium zbieżności służyć może różnica najnowszej oceny parametru h_0 i wartości średniej tych ocen za ostatnie m kroków estymacji w stosunku do założonej różnicy granicznej r_{gr}, przy czym wartości m oraz r_{gr} mogą być dobierane eksperymentalnie. Biorąc pod uwagę, że procesy i obiekty przemysłowe będące potencjalnymi przedmiotami uogólnionej regulacji minimalnowariancyjnej w wersji samonastrajającej przejawiają często silną niestacjonarność także jeśli chodzi o znak wzmocnienia obiektu (Dumont [6]), istotna staje się możliwość wznowienia estymacji parametru h_0 regulatora w celu szybszej adaptacji parametrów sprzężenia zwrotnego do zmieniających się właściwości obiektu regulacji. Krok taki można podejmować np. wtedy, gdy błąd regulacji przekroczy pewną założoną w systemie wartość.

4. PRZYKŁAD

Na rys. 2 przedstawione zostały przykładowe przebiegi zmian ocen estymowanych parametrów regulatora dla obiektu opisanego równaniem

$$y(i) = 0{,}8.y(i-1) + 2.u(i-1) + 1{,}2.u(i-2) + e(i) - 0{,}3.e(i-1)$$

oraz minimalizowanego wskaźnika jakości w formie następującej:

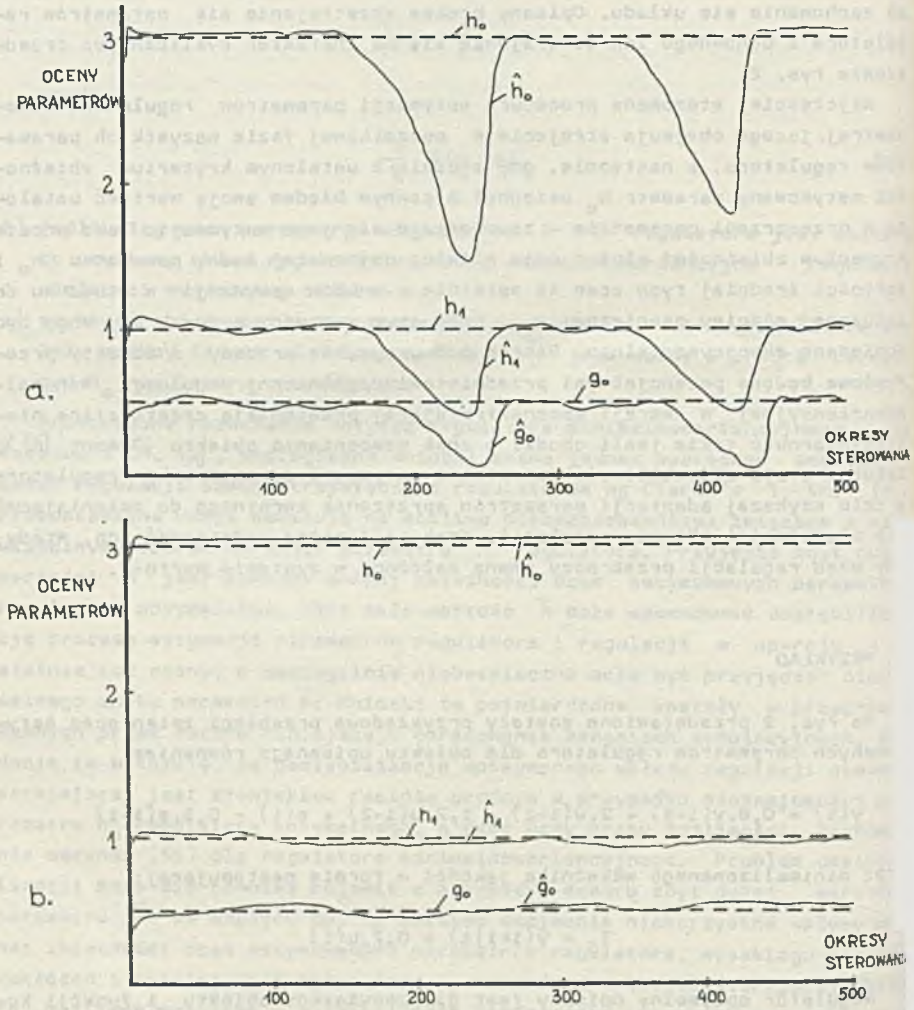
$$I_3 = y(i+1|i) + 0{,}7.u(i)$$

Regulator optymalny opisany jest dla powyższego obiektu i funkcji kosztu poniższą tożsamością:

$$3.u(i) + 0{,}99.u(i-1) + 0{,}5.y(i) = 0$$

Na drodze symulacji komputerowej badany był układ regulacji opisany powyższymi założeniami, a więc symulowano obiekt regulacji zakłócany na wyjściu przefiltrowanym białym szumem o zerowej wartości średniej oraz re-

gulator, którego parametry wyznaczane były w każdym kroku sterowania za pomocą rekurencyjnej MNK. Wykorzystywano metodę faktoryzacji macierzy kowariancji w rekurencyjnej MNK na iloczyn macierzy trójkątnej górnej $\underline{U}$, macierzy diagonalnej $\underline{D}$ oraz macierzy trójkątnej górnej $\underline{U}$ transponowanej.



Rys. 2. Przebieg estymacji parametrów regulatora samonastrajającego (w przypadku b zatrzymano estymację parametru h_o po ustaleniu się wartości jego oceny)

Część a rysunku 2 pokazuje estymację wszystkich parametrów regulatora w nieskończonym horyzoncie sterowania. Część b opisuje przypadek, gdy estymacja parametru h_o wstrzymana została po 21 okresach sterowania, a

dalszym ciągu estymowane były jedynie pozostałe parametry regulatora. Przedstawione przebiegi potwierdzają podane powyżej wnioski i twierdzenia dotyczące asymptotycznej nieidentyfikowalności parametrów regulatora w układzie uogólnionej samonastrajającej regulacji minimalnowariancyjnej.

LITERATURA

[1] Åström K.J.: Introduction to stochastic control theory. Academic Press New York 1970.

[2] Åström K.J., Wittenmark B.: On self-tuning regulators. Automatica, vol. 9, 1973, pp. 185-199.

[3] Cegrell T., Hedqvist T.: Successful adaptive control of paper machines. Automatica, vol. 11, 1975, pp. 53-59.

[4] Clarke D.W., Gawthrop B.A.: Self-tuning controller. Proc. IEE, vol. 122, 1975, pp. 929-934.

[5] Clarke D.W., Gawthrop B.A.: Self-tuning control. Proc. IEE, vol. 126, no 6, 1979.

[6] Dumont G.A.: Self-tuning control of a chip refiner motor load. Automatica, vol. 18, no 3, 1982.

[7] Harris T.J., MacGregor J.F., Wright J.D.: Self-tuning and adaptive controllers: an application to catalytic reactor control. Technometrics, vol. 22, no 2, 1980.

[8] MacGregor J.F., Tidwell P.W.: Discrete stochastic control with input constraints. Proc. IEE, vok. 124, no 8, 1977.

[9] Niederliński A.: Kompleksowa automatyka procesów przemysłowych. Aspekty funkcjonalne. Skrypt Pol. Śl. nr 900, Gliwice 1977.

Recenzent: Prof. dr inż. Tadeusz Kaczorek

Wpłynęło do Redakcji: kwiecień 1983 r.

ВЫБОР НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ОДНОГО ИЗ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА В САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Р е з ю м е

В статье рассматриваются проблемы асимптотической неидентифицированности параметров самонастраивающегося минимальновариационного регулятора. Описаны некоторые практические методы выбора начального значения одного из параметров регулятора и влияние этого выбора на качество минимальновариационного регулирования. Приведены примеры машинного эксперимента систем автоматического управления такого же типа.

CHOICE OF THE INITIAL VALUE OF ONE OF THE SELF-TUNING REGULATOR PARAMETERS

S u m m a r y

This paper deals with the problem of asymptotic unidentifiability o the controller parameters in the self-tuning regulation system. Some prac tical methods of choosing the initial value of the self-tuning regulato leading coefficient h_0 and the implications of this choice are described A simulation example is used to illustrate some of the stated concepts.