

ALGORYTMY REGULACJI DMC Z UWZGLĘDNIENIEM OGRANICZEŃ STEROWANIA

Piotr Marusak*, Jerzy Pułaczewski**, Piotr Tatjewski***

*Politechnika Warszawska, e-mail: marusak@ia.pw.edu.pl

**Politechnika Warszawska, e-mail: pulaczewski@ia.pw.edu.pl

***Politechnika Warszawska, e-mail: tatjewski@ia.pw.edu.pl

Streszczenie: W niniejszym referacie przedstawiono wyniki badań algorytmu DMC dotyczących jego działania w warunkach ograniczeń sterowania. Rozpatrywano przy tym dwa rodzaje ograniczeń: szybkości sterowania oraz wartości sterowania. Pokazano kilka sposobów uwzględniania tych ograniczeń w algorytmie DMC: pierwszy, klasyczny, polegający na dodaniu kary zależnej od przyrostów sterowań do wskaźnika jakości w pierwotnej wersji algorytmu; drugi dotyczący wprowadzenia do wnętrza regulatora nieliniowości typu nasycień, jakie istnieją na wejściu obiektu oraz trzeci wykorzystujący ujęcie algorytmu DMC jako zadania programowania kwadratowego z ograniczeniami, powtarzanego w każdym kroku algorytmu.

Słowa kluczowe: regulacja predykcyjna wielowarunkowa, regulacja z ograniczeniami

1. WSTĘP

Algorytm regulacji DMC został opracowany pod koniec lat 70-tych przez C.R.Cutlera i B.L.Remarkera dla potrzeb przemysłu chemicznego (1979). Jest to algorytm predykcyjny wielowarunkowy (Long-Range Predictive Control) z przesuwającym horyzontem (Receding-Horizon Control). Pomysł twórców algorytmu spotkał się z pozytywnym przyjęciem i w stosunkowo krótkim czasie pojawiło się wiele publikacji prezentujących udoskonalenia algorytmu regulacji DMC oraz jego praktyczne zastosowania przemysłowe.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań algorytmu regulacji DMC, prowadzonych w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, a dotyczących jego działania w warunkach ograniczeń sygnału sterującego. Warto w tym miejscu podkreślić dużą zaletę algorytmu regulacji DMC, jaką jest możliwość uwzględniania wspomnianych ograniczeń na etapie projektowania regulatora.

Podczas badań rozpatrywano dwa rodzaje ograniczeń: ograniczenia wartości przyrostów sterowania (sytuacja taka ma miejsce np. w przypadku zaworów regulacyjnych, w których szybkość działania napędu jest ograniczona) oraz ograniczenia wartości sterowania (odpowiada to nasyceniom istniejącym w urządzeniach wykonawczych).

W referacie przedstawiono kilka sposobów uwzględniania rozpatrywanych ograniczeń w algorytmie regulacji DMC. Pierwszy, klasyczny, polega na modyfikacji wskaźnika jakości w oryginalnej wersji algorytmu poprzez dodanie kary za przyrosty sterowań. Rozwiązanie to charakteryzuje się dużą prostotą, a jednocześnie, w widoczny sposób, wpływa korzystnie na działanie układu regulacji. Ponadto dysponujemy wygodnym parametrem dostrajalnym, jakim jest współczynnik kary.

Drugi wariant dotyczy wprowadzenia nieliniowości typu nasycień takich, jakie istnieją w obiekcie, do wnętrza regulatora. Zastosowanie tego pomysłu, przynosi wyraźną poprawę działania układu regulacji

przy istniejących ograniczeniach sterowania szczególnie w układzie wielowymiarowym, w którym istniejące ograniczenia negatywnie wpływają na jakość odsprężania. Tego typu działanie zostało zilustrowane odpowiednim przykładem.

Ostatnie z badanych rozwiązań wykorzystuje ujęcie algorytmu regulacji DMC jako zadania programowania kwadratowego z ograniczeniami (zarówno na wartości przyrostów sterowań, jak i na wartości samych sterowań). Takie sformułowanie znane jest pod nazwą QDMC i zostało przedstawione przez C. Garcia i A. Morshedi (1986). W tym przypadku otrzymane rozwiązania są optymalne przy danych ograniczeniach, z punktu widzenia przyjętego wskaźnika jakości. Niestety, w takim ujęciu problemu, konieczne jest pracochłonne przeliczanie zadania optymalizacji w każdym kroku działania regulatora.

Niniejszy referat rozpoczyna rozdz. 2 zawierający opis idei i ogólnej postaci algorytmu regulacji DMC. W rozdz. 3 zamieszczono opis algorytmu DMC w wersji zwartej, która może zostać zastosowana np. w sterowniku programowanym PLC. W rozdz. 4 zaprezentowano sposoby uwzględniania ograniczeń przy takim ujęciu algorytmu. Przedstawienie algorytmu DMC jako zadania programowania kwadratowego z ograniczeniami zawiera rozdz. 5. Referat zamyka podsumowanie (rozd. 6) oraz wykaz zalecanej literatury (rozd. 7).

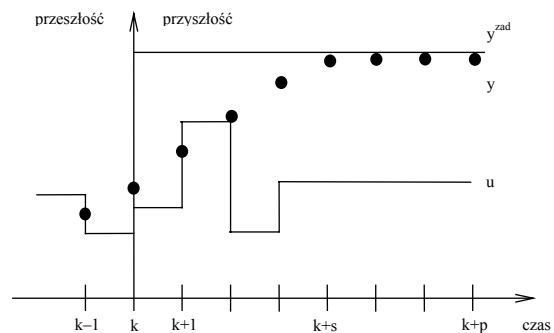
2. IDEA I OGÓLNA POSTAĆ ALGORYTMU REGULACJI DMC

Jak już zaznaczono we wstępie, algorytm regulacji DMC jest algorytmem predykcyjnym wielowarunkowym. Oznacza to, że podczas wyznaczania kolejnych sterowań brane jest pod uwagę przewidywane zachowanie się układu regulacji na wiele chwil do przodu.

Przyszłe wyjścia obiektu są obliczane na podstawie historii układu, a przyszłe sterowania są wyznaczane tak, aby przewidywane zachowanie się układu regulacji spełniało pewne kryteria (np. aby był minimalizowany przyjęty wskaźnik jakości, aby sygnały sterujące oraz wyjściowe nie naruszały ograniczeń itd.).

Ogólny schemat formułowania i obliczania zadania sterowania w algorytmie DMC jest przedstawiony poniżej:

1. Określenie trajektorii planowanej.
2. Przyjęcie postaci wskaźnika jakości sterowania.
3. Wyznaczenie przyszłych sterowań.
4. Wykorzystanie do sterowania pierwszego z ciągu sterowań.
5. Powrót do kroku 3 w kolejnej chwili.



Rys. 1. Ilustracja pojęć horyzontu predykcji (p) i horyzontu sterowania (s); sytuacja dla bieżącej chwili k ; u – sterowanie, y – przewidywane wyjście obiektu, y^{zad} – wartość zadana

W niniejszym artykule przyjęto w punkcie 1 stałą wartość zadaną, zaś w punkcie 2 wskaźnik jakości w postaci sumy kwadratów różnic między wartością zadaną a przewidywaną na p chwil do przodu, gdzie p jest tzw. horyzontem predykcji. Na tej podstawie wyznaczany jest ciąg sterowań o długości s (punkt 3), gdzie $s \leq p$ jest tzw. horyzontem sterowania, tzn. dla pozostałych sterowań (w chwilach od $k+s$) przyjmuje się zerowe przyrosty sterowania (wartość sterowania nie zmienia się). Ilustrację pojęć horyzontu predykcji i horyzontu sterowania pokazano na rys. 1.

W dalszej części referatu opisane zostaną dwie wersje algorytmu regulacji DMC: w rozdz. 3 i 4 – wersja zwarta z uwzględnieniem ograniczeń na przyrosty i wartości sterowania oraz w rozdz. 5 – algorytm DMC w postaci zadania programowania kwadratowego z ograniczeniami.

3. PRZEKSZTAŁCENIE SCENARIUSZA ALGORYTMU DO POSTACI ZWARTEJ

Algorytm regulacji DMC ma szereg zalet. Należy do nich między innymi bardzo prosty opis dynamiki obiektu oparty na jego odpowiedzi skokowej. Na podstawie rzędnych tej odpowiedzi tworzona jest tzw. macierz dynamiczna (Dynamic Matrix), która jest następnie wykorzystywana do wyznaczania kolejnych sterowań na podstawie układu równań (1):

$$A \cdot \Delta u = (e - w) \quad (1)$$

gdzie $A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{10} & a_9 & a_8 & a_7 & a_6 \end{bmatrix}$ – macierz dyna-

miczna; a_1, \dots, a_{10} – rzędne odpowiedzi skokowej

obektu; $\Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \vdots \\ \Delta u_{k+4} \end{bmatrix}$ – wektor przyszłych stero-

wań; $\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_k \\ \vdots \\ e_k \end{bmatrix}$; e_k – uchyb regulacji w chwili k ;

$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_{10} \end{bmatrix}$ – wektor wyrazów zależnych od poprzed-

nich przyrostów sterowania. Przy określaniu przykładowych postaci powyższych oznaczeń (macierzy \mathbf{A} oraz wektorów $\Delta \mathbf{u}$, \mathbf{e} , \mathbf{w}), przyjęto, że obiekt jest jednowymiarowy, że bierze się pod uwagę 10 rzędnych odpowiedzi skokowej (dalsze rzędne niewiele się od siebie różnią) oraz że horyzont predykcji $p=10$, a horyzont sterowania $s=5$. Wyprowadzenie tego algorytmu na podstawie struktury IMC opisano w artykule P. Marusaka i J. Pułaczewskiego (1999).

Wektor przyszłych sterowań $\Delta \mathbf{u}$ otrzymany z równania (1) metodą najmniejszych kwadratów minimalizuje wskaźnik jakości:

$$J_1 = \sum_{i=k+1}^{k+p} (y^{zad} - y_i^{pred})^2 \quad (2)$$

gdzie y^{zad} – wartość zadana, y_i^{pred} – wartość przewidywana dla chwili i (zależna od przeszłych i przyszłych sterowań), p – horyzont predykcji, k – chwila bieżąca.

Tak postawiony problem ma rozwiązanie analityczne następującej postaci:

$$\Delta \mathbf{u} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{e} - \mathbf{w}) \quad (3)$$

gdzie \mathbf{A} , $\Delta \mathbf{u}$, \mathbf{e} , \mathbf{w} – macierz dynamiczna i wektory jak we wzorze (1). Dla tak postawionego problemu można określić strukturę regulatora. Zostało to opisane poniżej.

Ponieważ do sterowania wykorzystywane jest tylko pierwsze z ciągu sterowań, przyjmując oznaczenie $\mathbf{B} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T$, można napisać:

$$\Delta u_k = \mathbf{B}_1 \cdot (\mathbf{e} - \mathbf{w}) \quad (4)$$

gdzie \mathbf{B}_1 – pierwszy wiersz macierzy \mathbf{B} , \mathbf{e} , \mathbf{w} – wektory takie, jak we wzorze (1).

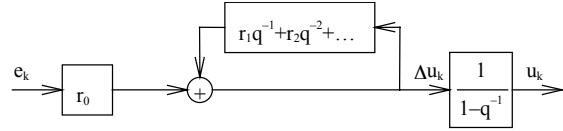
W takim razie:

$$u_k = u_{k-1} + \sum_{i=1}^p b_{1i} \cdot (e_k - w_i) \quad (5)$$

Wzór (5) można z kolei przekształcić do postaci:

$$u_k = u_{k-1} + r_0 \cdot e_k + \sum_{i=1}^n r_i \cdot \Delta u_{k-i} \quad (6)$$

gdzie r_i ($i=0 \dots n$) – współczynniki otrzymane po przekształceniu, Δu_{k-i} – poprzednie przyrosty sterowania. Schematyczne przedstawienie wzoru (6) pokazano na rys. 2. Takie ujęcie algorytmu regulacji DMC pozwala na jego zastosowanie np. w sterownikach programowanych PLC.

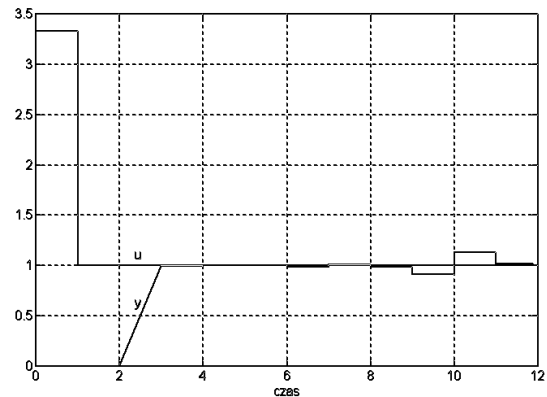


Rys. 2. Schemat blokowy regulatora DMC opisanego wzorem (6), e_k – uchyb w chwili k , u_k – sterowanie w chwili k , r_i ($i=0 \dots n$) – współczynniki ze wzoru (6), Δu_k – przyrost sterowania w chwili k , q^{-1} – operator opóźnienia

Przykładowe wyniki działania układu sterowania z regulatorem DMC zaprojektowanym w powyższy sposób pokazano na rys. 3. Symulowano obiekt o opóźnieniu równym $2 \cdot T_p$ (gdzie T_p – okres próbkowania) i o rzędnych odpowiedzi skokowej zestawionych w tabl. 1.

Tablica 1 Rzędne odpowiedzi skokowej symulowanego obiektu

i	1	2	3	4	5
a_i	0,3	0,51	0,657	0,76	0,832
i	6	7	8	9	10
a_i	0,882	0,918	0,942	0,960	0,980



Rys. 3. Wyniki badania układu regulacji dla $y^{zad}=1$; u – przebieg sterowania y – wyjście obiektu

Wyznaczone w powyższy sposób przyrosty sterowań, mogą więc być bardzo duże, wręcz mało realistyczne. Ma to miejsce na przykład, gdy w układzie regulacji mamy do czynienia z ograniczeniem na wartość tych przyrostów wprowadzającym przez urządzenie wykonawcze. Sytuacja taka występuje, gdy w układzie regulacji zastosowany jest zawór regulacyjny, którego napęd ma ograniczoną szybkość działania.

4. PRZYKŁADOWE WERSJE ALGORYTMU DMC Z OGRANICZENIAMI

4.1 Regulacja DMC z ograniczeniami z wykorzystaniem współczynnika kary

W celu ograniczenia przyrostów sterowań, do wskaźnika jakości (2) dodawana jest kara za ich wielkość. Wówczas zmodyfikowany wskaźnik jakości ma postać:

$$J_2 = J_1 + \lambda \cdot \sum_{i=0}^s (\Delta u_{k+i})^2 \quad (7)$$

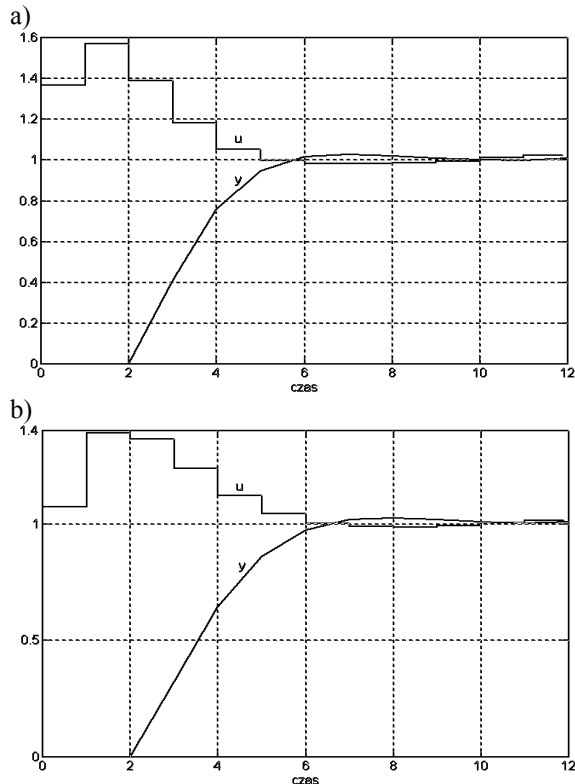
gdzie J_1 – wskaźnik jakości ze wzoru (2), λ – współczynnik kary (parametr dostrajalny), Δu_{k+i} – przyszłe sterowania, s – horyzont sterowania.

Problem postawiony powyżej ma rozwiązanie analityczne, którego postać jest określona wzorem (8):

$$\Delta u = (A^T \cdot A + \lambda \cdot I)^{-1} \cdot A^T \cdot (e - w) \quad (8)$$

gdzie A , Δu , e , w – macierz dynamiczna i wektory jak we wzorze (1), I – macierz jednostkowa, λ – współczynnik kary (parametr dostrajalny).

Przyjmując tym razem $B = (A^T \cdot A + \lambda \cdot I)^{-1} \cdot A^T$ i postępując jak poprzednio, otrzymuje się taką samą strukturę jak na rys. 2. Różnica występuje w wartościach współczynników r_i ($i=0 \dots n$).



Rys. 4. Wyniki badania układu regulacji dla $y_{zad}=1$; a) $\lambda=0,2$; b) $\lambda=0,4$; u – przebieg sterowania y – wyjście obiektu

Przykładowe wyniki badań symulacyjnych układu regulacji z obiektem o odpowiedzi skokowej z tabl. 1 i regulatorem opracowanym przy wskaźniku jakości J_2 pokazano na rys. 4.

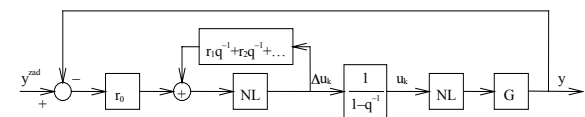
Przedstawiony przykład dobrze ilustruje, jaką rolę spełnia parametr λ . Jego wprowadzenie przyniosło zamierzony efekt – zmienność sygnału sterującego w rozsądnych granicach. W sytuacji z rys. 3 mamy do czynienia z gwałtownymi zmianami sterowania na początku odpowiedzi. Dodanie kary za przyrosty sterowań daje spokojniejsze i bardziej realistyczne przebiegi. Z rys. 4 wynika, że im łagodniejsze przebiegi mają być otrzymane, tym większa powinna być wartość parametru λ .

4.2 Regulacja DMC z ograniczeniami z wykorzystaniem dodatkowego członu nieliniowego

Oprócz ograniczeń na szybkość narastania sterowania, można się spotkać również z ograniczeniami wartości samych sterowań. Ograniczenia te mogą być wprowadzane do układu regulacji przez nieliniowości typu nasycień istniejące w urządzeniach wykonawczych.

Pominięcie wspomnianych ograniczeń podczas projektowania regulatora prowadzi do pogorszenia jakości regulacji a nawet do niedopuszczalnego zachowania układu regulacji. Dobrą ilustracją takiego przypadku jest przykład zamieszczony w artykule P. Marusaka i J. Pułaczewskiego (1999) i przytoczony pod koniec niniejszego rozdziału, a dotyczący regulacji dwuwymiarowej.

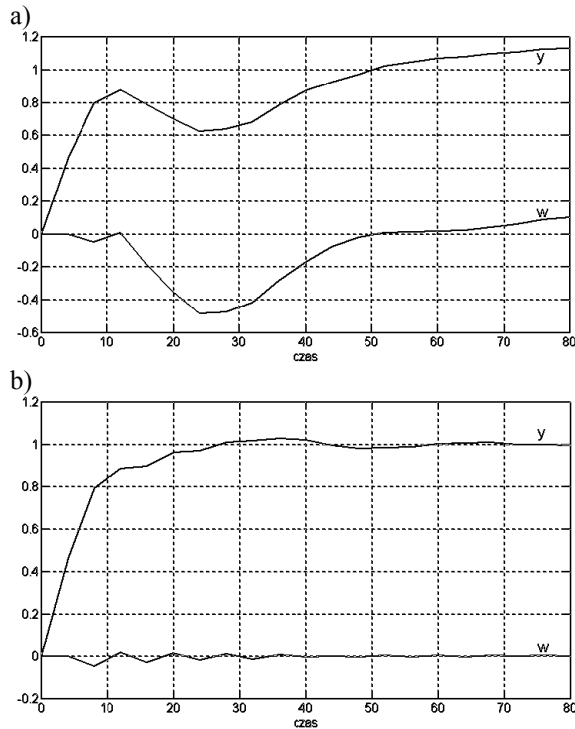
Sposób uodpornienia układu sterowania z regulatorem o strukturze pokazanej na rys. 2 jest stosunkowo prosty. Polega on na wprowadzeniu wspomnianych nieliniowości do wnętrza regulatora DMC. Schemat blokowy odpowiednio zmodyfikowanego układu regulacji zamieszczono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat blokowy układu regulacji z nieliniowościami uwzględnionymi w regulatorze

Jako przykład skuteczności opisaney metody, niech posłuży wspomniany już przypadek układu dwuwymiarowego. Odpowiednie modyfikacje występują w miejscach analogicznych jak na rys. 5, w obu torach sterowań. Rozważany był obiekt opisany macierzą transmitancji (9):

$$G(s) = \begin{bmatrix} 12,8 / (16,7s + 1) & -18,9e^{-4s} / (21s + 1) \\ 6,6e^{-8s} / (10,9s + 1) & -19,4e^{-4s} / (14,4s + 1) \end{bmatrix} \quad (9)$$



Rys. 6. Odpowiedź dwuwymiarowego układu regulacji z ograniczeniami sterowań; $y^{zad}=1$; $w^{zad}=0$; ograniczenia: a) nie są uwzględniane, b) są uwzględniane w algorytmie regulacji; y – wyjście pierwsze; w – wyjście drugie

Przyjęto następujące ograniczenia wartości sterowań: $0 \leq u \leq 0,17$ i $0 \leq v \leq 0,11$ (gdzie u – sterowanie pierwsze, v – sterowanie drugie). Wyniki badania działania układów regulacji bez modyfikacji i z modyfikacją pokazano na rys. 6. Działanie układu w sytuacji, gdy ograniczenia nie zostały uwzględnione w regulatorze, jest niedopuszczalne (rys. 6a). Jednak dokonanie proponowanej zmiany przynosi zdecydowaną poprawę działania układu regulacji (rys. 6b) – oba wyjścia osiągają swoje wartości zadane.

5. REGULACJA DMC Z OGRANICZENIAMIS JAKO ZADANIE OPTIMALIZACJI KWADRATOWEJ

W poprzednim rozdziale przedstawiono zwięzłą postać algorytmu regulacji DMC. Dzięki temu algorytm ten można stosować np. w sterownikach programowanych, ponieważ główną część obliczeń wykonuje się tylko raz. Prostota takiego ujęcia algorytmu jest więc jego dużą zaletą. Niestety, uwzględnianie w algorytmie ograniczeń nie daje w tym przypadku rozwiązań optymalnych, przy danych wskaźniku jakości i ograniczeniach. Ponadto, ograniczenia np. szybkości narastania sterowania mogą być naruszone.

Rozwiązanie przynosi sformułowanie algorytmu DMC jako zadania programowania kwadratowego (znane pod nazwą QDMC). W podejściu tym również jest minimalizowany wskaźnik jakości, będący sumą kwadratów przyszłych uchybów (różnic między

dzy wartością wyjścia planowaną a wartością przewidywaną na daną chwilę) względem przyrostów sterowań – taki, jak we wzorze (2), ale przy określonych ograniczeniach. Po dokonaniu optymalizacji, otrzymywany jest wektor tych przyrostów, z którego wybierany jest pierwszy element i używany do regulacji, a następnie optymalizacja jest powtarzana itd. (tak, jak to zostało opisane w rozdz. 2).

Sformułowanie algorytmu regulacji DMC jako zadania optymalizacji kwadratowej z ograniczeniami jest następujące:

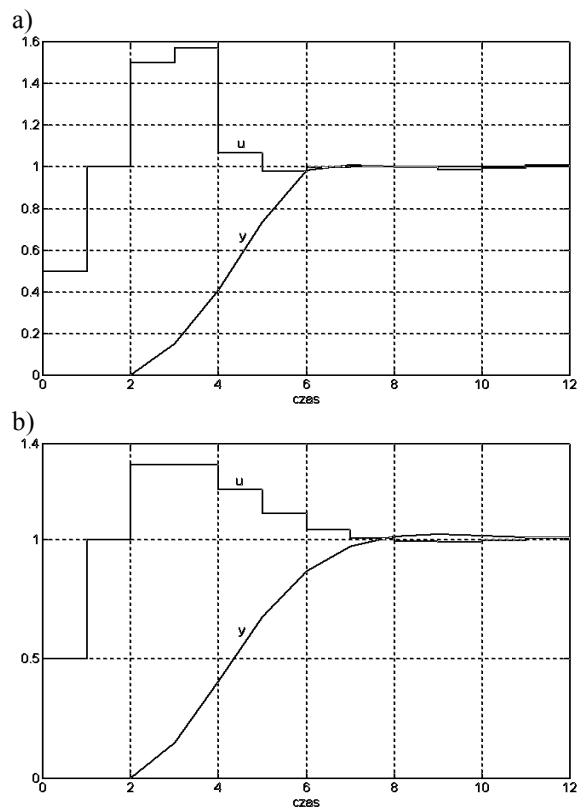
$$\min_{\Delta u} \sum_{i=k+1}^{k+p} (y^{zad} - y_i^{pred})^2 + \lambda \cdot \sum_{i=0}^s (\Delta u_{k+i})^2 \quad (10)$$

przy ograniczeniach:

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{max}$$

$$u_{min} \leq u \leq u_{max}$$

Zaletą opisanego wyżej ujęcia algorytmu DMC jest możliwość łatwego uwzględniania ograniczeń przyrostów i wartości sterowań (jak również wartości wyjść modelu, co nie jest rozważane w tym artykule). Wadą tego rozwiązania jest konieczność dokonywania optymalizacji w każdym kroku algorytmu, co może być pracochłonne.



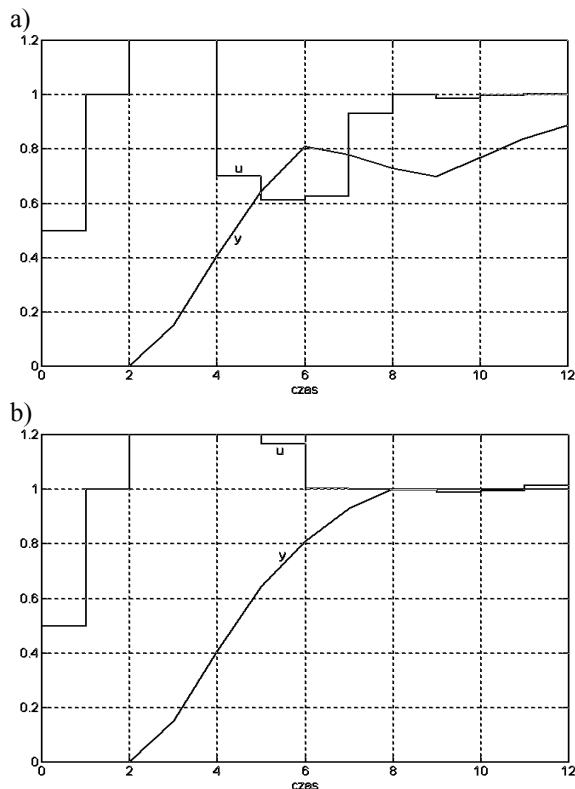
Rys. 7. Wyniki badania układu regulacji z uwzględnieniem ograniczeń na przyrosty sterowań: $-0,5 \leq \Delta u \leq 0,5$; a) $\lambda=0$; b) $\lambda=0,4$

Dla wyżej opisanego podejścia przeprowadzono szereg badań symulacyjnych. Przykładowe rezultaty dla przypadku, gdy wprowadzono tylko ograniczenia szybkości zmian sterowania, pokazano na rys. 7. Rzędne odpowiedzi skokowej obiektu były takie, jak w rozdz. 3. (ujęte w tabl. 1).

Przyjęte ograniczenia nie zostały naruszone. Na początku działania regulator nie wygenerował dużego sygnału sterującego tak, jak miało to miejsce dla sytuacji z rozdz. 4.1 (rys. 4a i b). Mimo tego czas regulacji (rys. 7a) nie uległ wydłużeniu w stosunku do przypadku z rozdz. 4.1 (rys. 4a).

Przeprowadzono także eksperyment z dodaniem do zadania (10) kary za zmienność sterowania. W tym przypadku (rys. 7b) – tak jak przy zmianie współczynnika kary w rozdz. 4.1 – uzyskany przebieg jest łagodniejszy jednak za cenę wolniejszego działania układu.

Przeprowadzono także eksperymenty, gdy oprócz ograniczenia na szybkość sterowania, istniały w obiekcie także ograniczenia jego wartości (sytuacja jak, w rozdz. 4.2). Uzyskane wyniki badań przedstawiono na rys. 8. Uzasadniają one potrzebę uwzględnienia istniejącego ograniczenia w algorytmie regulacji. Podobnie, jak w przykładzie z rozdz. 4.2, także w rozpatrywanym przypadku, zignorowanie istniejącego ograniczenia, prowadzi do złego działania układu regulacji (rys. 8a).



Rys. 8. Wyniki badania układu regulacji z ograniczeniem wartości sterowań $-1,2 \leq u \leq 1,2$ w obiekcie a) nieuwzględnionym b) uwzględnionym w algorytmie regulacji; $-0,5 \leq \Delta u \leq 0,5$

6. PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule opisano sposoby uwzględniania ograniczeń szybkości i wartości sygnału sterującego w przypadku dwóch ujęć algorytmu DMC.

Pierwsze ujęcie (postać zwarta) może zostać zastosowane np. w sterowniku programowanym, ponieważ nie wymaga powtarzania skomplikowanych obliczeń. Jednak wyznaczone sterowania nie są optymalne przy danych ograniczeniach i przyjętym wskaźniku jakości. Nie można też zagwarantować spełnienia ograniczeń na szybkość sterowania.

Drugie ujęcie (jako zadanie optymalizacji kwadratowej) pozwala na wyznaczenie sterowań optymalnych w danej chwili i przy danych warunkach. Niestety, zaleta ta jest okupiona przez dużą złożoność obliczeniową tego algorytmu (optymalizacja musi być powtarzana w każdym kroku działania regulatora). Co wymaga zastosowania sterowników o większych mocach obliczeniowych.

7. LITERATURA

- C.R. Cutler, B.L. Remarker (1979). *Dynamic Matrix Control – a computer control algorithm*. Proc. of the JACC, San Francisco, Aug. 13–15, 1979.
- C.E. Garcia, A.M. Morshedi (1986). *Quadratic programming solution of Dynamic Matrix Control (QDMC)*. Chem. Eng. Comm., 46, pp. 73–78.
- P. Marusak, J. Pułaczewski (1999). *Szczególne zalety algorytmu regulacji Dynamic Matrix Control (DMC)*. Automation '99, Warszawa, 21–24 marca 1999 ss. 98–105

DMC CONTROL ALGORITHMS IN THE CASE OF CONTROL SIGNAL CONSTRAINTS

Summary

In this paper results of a research of the DMC algorithm are presented. These results concern cases with constraints on manipulated variables in the control system. Two types of the constraints are considered: the first one concerns the rate of change of the control signal value and the second one concerns the magnitude of the control signal. In the paper three methods of taking these constraints into consideration with the DMC algorithm are discussed. The first method consists in adding a penalty function on the control signal values to the quality index. In the second one nonlinearities are included into the regulator structure. The third method consists in solution of a quadratic programming problem with constraints, at each step of the algorithm.

Keywords: Long-Range Predictive Control, Constrained Control