

Piotr MARUSAK, Jerzy PUŁACZEWSKI

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

INSTYTUT AUTOMATYKI I INFORMATYKI STOSOWANEJ

## Szczególne zalety algorytmu regulacji Dynamic Matrix Control (DMC)

### Streszczenie

Przedstawiono nowe, łatwiejsze do zrozumienia wyprowadzenie algorytmu DMC, należącego do grupy algorytmów predykcyjnych wielowarunkowych, oparte na koncepcji pośredniego pomiaru niemierzalnego wprost zakłócenia. Omówiono rolę parametru dostrajalnego, pozwalającego uzyskać wymagany kompromis między szybkością i odpornością regulacji. Przedstawiono także dwa najważniejsze warianty projektowania algorytmu DMC:

- z pomiarem i prognozą głównego zakłócenia oraz
- wariant dotyczący regulacji wielowymiarowej.

Pokazano również, bardzo ważny dla zastosowań przemysłowych, sposób osiągnięcia odporności algorytmu na ograniczenia wartości sygnałów sterujących.

### Abstract

In the paper a new and easier to understand way of deriving DMC algorithm is presented. This algorithm belongs to the group of multiconditional, predictive algorithms. The process of deriving is based on indirect measurement of unmeasurable disturbance. The role of tuning parameter is discussed. This parameter allows to achieve required compromise between speed and robustness of control. In the paper, two most important variants of DMC algorithm design are presented:

- the first, involving measurement and prediction of the main disturbance and
- the second related to multivariable control.

The way of improvement of the algorithm robustness in the case of control signal saturation, so important in industry, is given.

### 1. Wstęp

Algorytm regulacji o nazwie DMC (Dynamic Matrix Control) został opracowany dla potrzeb przemysłu petrochemicznego w końcu lat 70-tych i zapoczątkował szybki rozwój nowej grupy tzw. wielowarunkowych algorytmów regulacji predykcyjnej [1]. Szczególne zalety algorytmu DMC sprawiły, że obecnie jest on chętnie stosowany w przemyśle, zwłaszcza w przypadkach trudnych obwodów regulacyjnych.

DMC jest kolejnym etapem rozwoju algorytmów regulacji automatycznej. Jego poprzednik - regulator PID odznacza się prostotą przy jednoczesnym zadowalającym działaniu w większości zastosowań. Jego ograniczenia ujawniają się jednak w przypadku obiektów o dużych opóźnieniach. Rozwiązaniem przynoszącym w tej sytuacji szczególnie dobre rezultaty są al-

gorytmy predykcyjne IMC (Internal Model Control), które można właściwie nazwać algorytmami predykcyjnymi jednowarunkowymi. Obecnie coraz częściej stosuje się jednak (szczególnie w przemyśle chemicznym) algorytmy predykcyjne wielowarunkowe. Ich nazwa bierze się stąd, że przy wyznaczaniu prawa sterowania uwzględniamy nie tylko chwilę obecną, ale wykorzystujemy również informacje o obiekcie regulacji, o ograniczeniach w nim występujących oraz o przyszłych zakłóceniach (jeśli taka informacja jest dostępna) i na ich podstawie przewidujemy zachowanie się układu regulacji na wiele chwil do przodu.

Algorytm DMC warto więc stosować w następujących przypadkach:

- obiekt zawiera duże opóźnienia (np. w przemyśle chemicznym analizator składu substancji może wprowadzać opóźnienie pomiarowe),
- sterowania są silnie ograniczone (np. zawór ma nieliniowość typu nasycenia, a ponadto szybkość zmian jego otwarcia jest ograniczona ze względu na szybkość działania napędu),
- wyjście obiektu jest ograniczone (np. w otrzymywanym produkcie nie może zostać przekroczona pewna ilość zanieczyszczeń),
- istnieją silne interakcje w obiekcie wielowymiarowym (algorytm DMC ma właściwości odsprężające),
- można przewidzieć przyszłe zmiany wartości zadanej (np. w regulacji programowej),
- można przewidzieć zmiany ograniczeń (np. zależność od dostaw jakiejś substancji),
- można przewidzieć działanie zakłóceń (sterowanie feed-forward).

Badania algorytmu DMC rozpoczęto w Instytucie Automatyki PW w połowie lat 80-tych. Od tego czasu zgromadzono wiele przykładów stosowania tego algorytmu, poznano jego właściwości oraz sposoby projektowania. W niniejszym referacie zaprezentowano najnowsze wyniki tych badań. Prezentację rozpoczęła zawarty w rozdz. 2 opis wyprowadzenia algorytmu DMC, znacznie łatwiejszego do zrozumienia od dotychczas znanego. Następnie omawia się dwa najważniejsze warianty projektowania algorytmu DMC nazywane „scenariuszami DMC”. Pierwszy wariant opisany w rozdz. 3 zakłada pomiar i (ewentualnie) prognozę głównego zakłócenia. W rozdz. 4 przedstawiono drugi wariant, który dotyczy regulacji wielowymiarowej zilustrowanej przykładem dwuwymiarowym. Rozdz. 5 dotyczy wyjątkowej i cennej właściwości algorytmu DMC jaką jest możliwość, uodpornienia regulatora na

**Mgr inż. Piotr MARUSAK**

– doktorant w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Ukończył studia w tym samym Instytucie na kierunku informatyka w specjalności systemy sterowania i wspomaganie decyzji. Do jego zainteresowań należą cyfrowe algorytmy regulacji oraz sterowanie rozmyte.

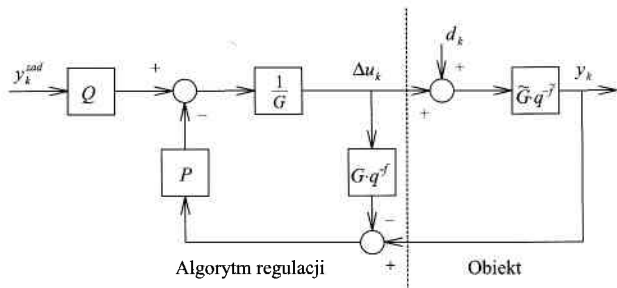
**Doc. dr inż. Jerzy PUŁACZEWSKI**

– na Politechnice Warszawskiej od 1956 r. Zajmuje się automatyką przemysłową, modelowaniem, dynamiką procesów i podstawami sterowania cyfrowego.

ograniczenia amplitudy sygnałów sterujących. Został opisany stosunkowo łatwy do realizacji sposób osiągnięcia tej odporności. W końcowej części referatu zamieszczono opis specjalistycznego oprogramowania w języku Matlab, służącego do projektowania algorytmu oraz do symulacji komputerowej stanów niestabilnych zachodzących w układzie regulacji (rozdz. 6). Referat kończy podsumowanie oraz wykaz cytowanej i zalecanej literatury.

## 2. Wyprowadzenie algorytmu regulacji DMC

Rozważmy schemat blokowy algorytmu regulacji cyfrowej z rys. 1, gdzie:  $y$  - wielkość regulowana,  $d$  - zakłócenie,  $\Delta u$  - przyrost sterowania,  $G$  - operator opisujący inercyjną część obiektu,  $q^{-f}$  - operator opóźnienia o  $f \cdot T_p$ , ( $T_p$  - okres próbkowania),  $\tilde{G}$  i  $\tilde{f}$  - parametry modelu obiektu.



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu regulacji cyfrowej

Jeśli założymy, że  $\tilde{G} = G$  i  $\tilde{f} = f$ , z rys. 1 otrzymamy:

$$\Delta u_k = \frac{Q \cdot y_k^{zad} - P \cdot y_k}{G \cdot (1 - P \cdot q^{-f})} \quad (1)$$

Wzór (1) jest równaniem algorytmu regulacji znanego pod nazwą IMC (Internal Model Control). Wyjaśnijmy w tym momencie rolę członów  $Q$  i  $P$ . Otóż, jak to wynika z rys. 1, człon  $Q$  służy do kształtowania odpowiedzi układu regulacji dla zmian wartości zadanej, zaś człon  $P$  oprócz stabilizacji układu regulacji decyduje o stopniu kompensacji zakłóceń.

Algorytm DMC można wyprowadzić z równania (1) zakładając  $Q=I$ ,  $P=I$ . Ponadto zakładamy stałą wartość zadaną  $y_k^{zad}$  i występowanie zakłóceń wolnozmiennych ( $d_k \approx d_{k+1} \approx \dots$ ).

Wtedy:

$$y_k^{zad} = G \cdot \Delta u_k + (y_k - G \cdot q^{-f} \cdot \Delta u_k) \quad (2)$$

Zauważmy, że z modelu obiektu mamy następujące zależności:

$$y_k^M = G \cdot q^{-f} \cdot \Delta u_k \quad \rightarrow \quad y_{k+f}^M = G \cdot \Delta u_k \quad (3)$$

W takim razie wyrażenie znajdujące się w nawiasie we wzorze (2) jest zakłóceniem  $d_k$  wyznaczonym w sposób pośredni. Ze wzorów (2) i (3) otrzymujemy:

$$y_k^{zad} = y_{k+f}^M + d_k \quad (4)$$

Równość ta wyraża warunek, że przewidywany sygnał wyjściowy obiektu regulacji w chwili  $(k+f) \cdot T_p$  powinien być równy wartości zadanej. Warunek wyrażony równością (4) obowiązuje dla kolejnych chwil. Po wykorzystaniu założenia o wolnej

zmienności zakłócenia otrzymujemy więc układ równań (5) będący podstawą algorytmu DMC:

$$\begin{cases} y_k^{zad} = y_{k+f}^M + d_k \\ \dots \\ y_k^{zad} = y_{k+f+p}^M + d_k \end{cases} \quad (5)$$

Przyjęcie założeń o członach  $Q$  i  $P$  wymaga pewnych wyjaśnień. Wynikiem założenia, że  $Q=1$  jest możliwość wystąpienia dużych wartości sygnału sterowania. Z kolei przyjęcie, że  $P=1$  prowadzi nie tylko do możliwości wystąpienia nadmiernych przyrostów sterowań, ale również do wewnętrznej niestabilności algorytmu regulacji. W takim razie potrzebne jest zastosowanie w algorytmie dodatkowego mechanizmu ograniczającego przyrosty sterowania  $\Delta u$ . Mechanizmem tym jest, omówione dalej, wprowadzenie kar za wartość przyrostów  $\Delta u$ .

Jedną z zalet algorytmu regulacji DMC jest bardzo prosty opis dynamiki obiektu oparty na jego odpowiedzi skokowej. W dalszej części wyprowadzenia posłużymy się przykładem. Załóżmy następujący model obiektu regulacji:

$$y_k = (a_1 \cdot q^{-1} + \dots + a_{10} \cdot q^{-10} + a_{10} \cdot q^{-11} + \dots) \cdot q^{-2} \cdot \Delta u_k \quad (6)$$

współczynniki  $a_j$  są rzędnymi odpowiedzi skokowej obiektu. Rzędna  $a_{10}$  jest równa współczynnikowi wzmocnienia statycznego obiektu. Opóźnienie rozpatrywanego obiektu wynosi  $2 \times T_p$ . Wypisując układ równań (5) dla kolejnych 10 chwil, otrzymujemy:

$$\begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{10} & a_9 & a_8 & a_7 & a_6 & a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+9} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_k - w_1 \\ e_k - w_2 \\ \vdots \\ e_k - w_{10} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Macierz utworzona z rzędnych odpowiedzi skokowej obiektu regulacji (ozn. A) jest nazywana macierzą dynamiczną (Dynamic Matrix),  $e_k = y_k^{zad} - y_k$ , zaś symbolami  $w_i$  oznaczono wyrazy zależne od uprzednich przyrostów sterowań:

$$w_i = \sum_{j=1}^i (a_{j+i} - a_{j-f}) \Delta u_{k-j} \quad (8)$$

Zauważmy, że wyrazy  $w_i$  mają postać skończonych sum, gdyż dalsze wyrazy we wzorze (8) mają wartości zerowe np. dwunasty czynnik w wyrazie  $w_1$  wynosi  $(a_{10} - a_{10}) \cdot \Delta u_{k-12}$ .

Do układu równań (7) wprowadza się warunek, że dalsze przyrosty sterowań są równe zero. Oznacza to, że układ dochodzi do stanu ustalonego po skończonej liczbie kroków. Zwykle przyjmuje się tyle równań w układzie (7), ile uwzględnia się rzędnych odpowiedzi skokowej w modelu obiektu, zaś liczbę niezerowych przyrostów sterowania równą połowie wypisanych równań. W naszym konkretnym przypadku przyjmujemy więc 10 równań i 5 niezerowych przyrostów sterowania. W takim razie:

$$A \cdot \Delta u = (e - w) \quad (9)$$

gdzie:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{10} & a_9 & a_8 & a_7 & a_6 & a_5 \end{bmatrix}, \quad \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \vdots \\ \Delta u_{k+4} \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} e_k \\ \vdots \\ e_k \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_{10} \end{bmatrix}$$

Układ równań (9) rozwiązuje się metodą najmniejszych kwadratów. Szukany wektor  $\Delta u$  minimalizuje więc sumę kwadratów błędów dla poszczególnych równań, czyli wskaźnik jakości:

$$J_1 = (a_1 \cdot \Delta u_k - (e_k - w_1))^2 + \dots + (a_{10} \cdot \Delta u_k + \dots + a_6 \cdot \Delta u_{k+4} - (e_k - w_{10}))^2 \quad (10)$$

Aby ograniczyć przyrosty sterowań  $\Delta u$ , do wskaźnika jakości (10) wprowadza się karę za przyrosty sterowań:

$$J_2 = J_1 + \lambda \cdot \left( (\Delta u_k)^2 + \dots + (\Delta u_{k+4})^2 \right) \quad (12)$$

Tak postawiony problem ma rozwiązanie analityczne:

$$\Delta u = (A^T A + \lambda I)^{-1} A^T \cdot (e - w) \quad (13)$$

przy czym

$A^T$  - macierz transponowana,  $I$  - macierz jednostkowa,  $(\cdot)^{-1}$  - macierz odwrotna.

Warto podkreślić, że:

- do sterowania wybieramy tylko pierwsze z ciągu wyznaczonych sterowań, a więc  $\Delta u_k$ ,
- dysponujemy bardzo wygodnym parametrem dostrajalnym  $\lambda$  zapewniającym możliwość uzyskania kompromisu pomiędzy jakością regulacji, a odpornością układu regulacji,
- macierz  $A^T A + \lambda I$  wystarczy policzyć raz off-line, zaś w każdym kroku musimy zmierzyć jedynie bieżący uchyb i obliczać współczynniki  $w_i$ ,
- w takim ujęciu, możliwe jest zaimplementowanie algorytmu w sterowniku programowanym.

### 3. Algorytm DMC z pomiarem i predykcją zakłóceń

Niektóre zakłócenia mogą być mierzone, a czasami ich wartości mogą być przewidywane. Jedną ze szczególnych zalet algorytmu regulacji DMC jest możliwość prostego wykorzystania pomiaru i prognozy zakłóceń. Przyjmijmy zatem następujące równanie obiektu regulacji:

$$y_k = (a_1 \cdot q^{-1} + a_2 \cdot q^{-2} + \dots) \cdot q^{-2} \cdot \Delta u_k + (c_1 \cdot q^{-1} + c_2 \cdot q^{-2} + \dots) \cdot q^{-2} \cdot \Delta p_k \quad (14)$$

Parametry  $a_i$  i  $c_i$  są rzędnymi odpowiedzi skokowych,  $p_k$  - mierzalne zakłócenie. W torze oddziaływania zakłócenia przyjęto opóźnienie  $2 \cdot T_p$  - takie samo, jak w torze sterowania. Korzystniejsza sytuacja ma miejsce wtedy, gdy opóźnienie w torze zakłócenia jest większe od opóźnienia w torze sterowania, mniej korzystna jest sytuacja odwrotna.

Postępując analogicznie, jak w rozdz. 2, otrzymujemy następujący układ równań:

$$\begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_0 & a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \\ \Delta u_{k+4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 - a_2 \cdot \Delta u_{k-1} + \dots + (a_5 - a_0) \cdot \Delta u_{k-1} - c_1 \cdot \Delta p_k + \dots + (c_5 - c_0) \cdot \Delta p_{k-1} \\ e_1 - a_2 \cdot \Delta u_{k-1} + \dots + (a_5 - a_0) \cdot \Delta u_{k-1} - c_1 \cdot \Delta p_{k+1} + \dots + (c_5 - c_0) \cdot \Delta p_{k-1} \\ \vdots \\ e_1 - a_0 \cdot \Delta u_{k+1} + \dots + (a_5 - a_0) \cdot \Delta u_{k-1} - c_1 \cdot \Delta p_{k+3} + \dots + (c_5 - c_0) \cdot \Delta p_{k-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

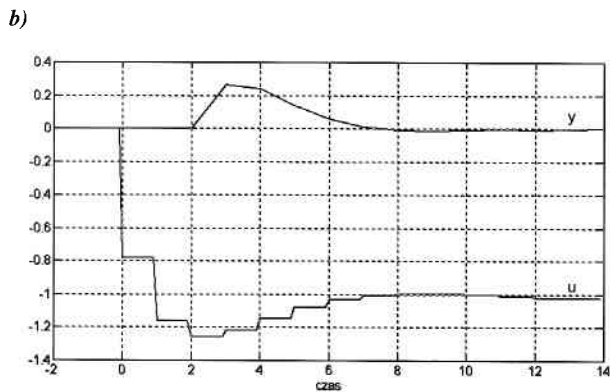
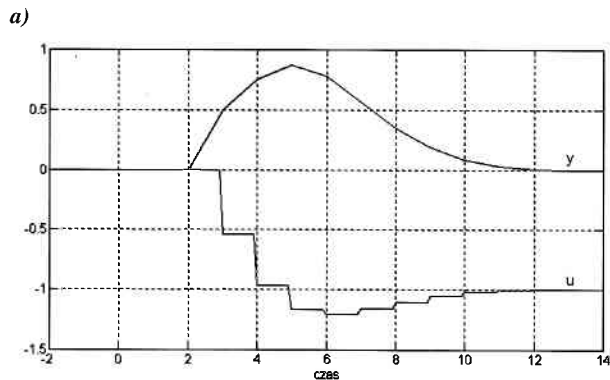
i ostatecznie algorytm regulacji wyrażony następującym równaniem:

$$\Delta u_k = r_0 \cdot e_k + (s_1 \cdot \Delta u_{k-1} + s_2 \cdot \Delta u_{k-2} + \dots) + (s_5 \cdot \Delta p_k + s_1 \cdot \Delta p_{k-1} + \dots) + (t_1 \cdot \Delta p_{k+1} + t_2 \cdot \Delta p_{k+2} + \dots) \quad (16)$$

przy czym:  $r_i, s_i, t_i$  - parametry algorytmu.

Tabela 1. Rzędne odpowiedzi skokowych obiektu regulacji

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a_i$	0,3	0,51	0,657	0,76	0,832	0,882	0,918	0,942	0,960	0,980
$c_i$	0,5	0,75	0,875	0,938	0,969	0,984	0,992	0,996	0,998	0,999



Rys. 2. Odpowiedź układu regulacji na skok jednostkowy zakłócenia mierzalnego  $p_k$  w chwili czas=0; parametar dostrajalny  $\lambda=0,4$ ; a) brak pomiaru zakłócenia, b) natychmiastowy pomiar zakłócenia

Zauważmy, że w powyższym algorytmie można wyróżnić części zależne od:

- bieżącego uchybu regulacji,
- poprzednich sterowań,
- bieżącej wartości i historii zakłócenia  $p_k$ ,
- prognozy zakłócenia  $p_k$ .

W celu zbadania działania układu regulacji zaprojektowanego w zaprezentowany sposób, przeprowadzono eksperymenty z obiektem o danych odpowiedziach skokowych (tabl. 1) z opóźnieniem wynoszącym w obu torach  $2 \cdot T_p$ . Otrzymane wyniki badań pokazano na rys. 2.

Warto poświęcić parę słów komentarza do uzyskanych wyników. Zauważmy, jak dużą poprawę działania układu regulacji uzyskujemy mogąc uwzględnić w algorytmie informację o zakłóceniu. Możliwość ta wpływa na znaczne skrócenie czasu regulacji i zmniejszenie przeregulowania. Dzieje się tak dlatego, że informacja o zakłóceniu jest natychmiast wykorzystywana przez regulator, co widać na rys. 2b - sterowanie zmienia się na dwa kroki przed zmianą wartości regulowanej.

### 4. Wielowymiarowy algorytm DMC

Kolejną zaletą algorytmu DMC jest możliwość jego zastosowania do regulacji obiektów wielowymiarowych. Informacjami o obiekcie niezbędnymi na etapie projektowania są odpowiedzi skokowe, ze wszystkich torów. Ponadto jeśli wyjść z obiektu jest mniej niż wejść, możemy oprócz regulacji, próbować minimalizo-

wać dodatkowy, np. ekonomiczny, wskaźnik jakości. Wyprowadzenie algorytmu jest analogiczne do zaprezentowanego w rozdz. 2. Wyjaśnione ono zostanie na przykładzie obiektu o dwóch wejściach i dwóch wyjściach.

Załóżmy następujące równania obiektu:

$$y_k = (a_1 \cdot q^{-1} + a_2 \cdot q^{-2} + \dots) \cdot \Delta u_k + (b_1 \cdot q^{-1} + b_2 \cdot q^{-2} + \dots) \cdot \Delta v_k \quad (17)$$

$$w_k = (c_1 \cdot q^{-1} + c_2 \cdot q^{-2} + \dots) \cdot \Delta u_k + (f_1 \cdot q^{-1} + f_2 \cdot q^{-2} + \dots) \cdot \Delta v_k$$

gdzie:  $y, w$  – wyjście nr 1 i nr 2.,  $u, v$  – wejście nr 1 i nr 2.,  $a_i, b_i, c_i, f_i$  – rzędne odpowiedzi skokowych.

Formułując dla każdego z wyjść układ równań (5) i dokonując przekształceń jak w rozdz. 2, przy założeniu horyzontu równego 10 i czasu trwania działań regulacyjnych równego 5, otrzymujemy:

$$\begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 0 & 0 & 0 & b_2 & b_1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{10} & a_9 & a_8 & a_7 & a_6 & b_{10} & b_9 & b_8 & b_7 & b_6 \\ c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 & c_1 & 0 & 0 & 0 & f_2 & f_1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{10} & c_9 & c_8 & c_7 & c_6 & f_{10} & f_9 & f_8 & f_7 & f_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \vdots \\ \Delta u_{k-4} \\ \Delta v_k \\ \vdots \\ \Delta v_{k-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y^{zad} - y_k \\ \vdots \\ y^{zad} - y_k \\ w^{zad} - w_k \\ \vdots \\ w^{zad} - w_k \end{bmatrix} + W \begin{bmatrix} \Delta u_{k-1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k-9} \\ \Delta v_{k-1} \\ \vdots \\ \Delta v_{k-9} \end{bmatrix} \quad (18)$$

gdzie:  $W$  – macierz współczynników zależnych od  $a_i$  i  $b_i$  w górnej połowie oraz od  $c_i$  i  $f_i$  w dolnej połowie (tak, jak Dynamic Matrix z lewej strony równania).

Ostatecznie otrzymujemy algorytm regulacji opisany następującymi równaniami:

$$\Delta u_k = p_a \cdot e_k + p_b \cdot ee_k + (r_{a1} \cdot \Delta u_{k-1} + r_{a2} \cdot \Delta u_{k-2} + \dots) + (r_{b1} \cdot \Delta v_{k-1} + r_{b2} \cdot \Delta v_{k-2} + \dots)$$

$$\Delta v_k = p_c \cdot e_k + p_d \cdot ee_k + (r_{c1} \cdot \Delta u_{k-1} + r_{c2} \cdot \Delta u_{k-2} + \dots) + (r_{f1} \cdot \Delta v_{k-1} + r_{f2} \cdot \Delta v_{k-2} + \dots)$$

gdzie:  $e_k = y^{zad} - y_k$ ,  $ee_k = w^{zad} - w_k$ .

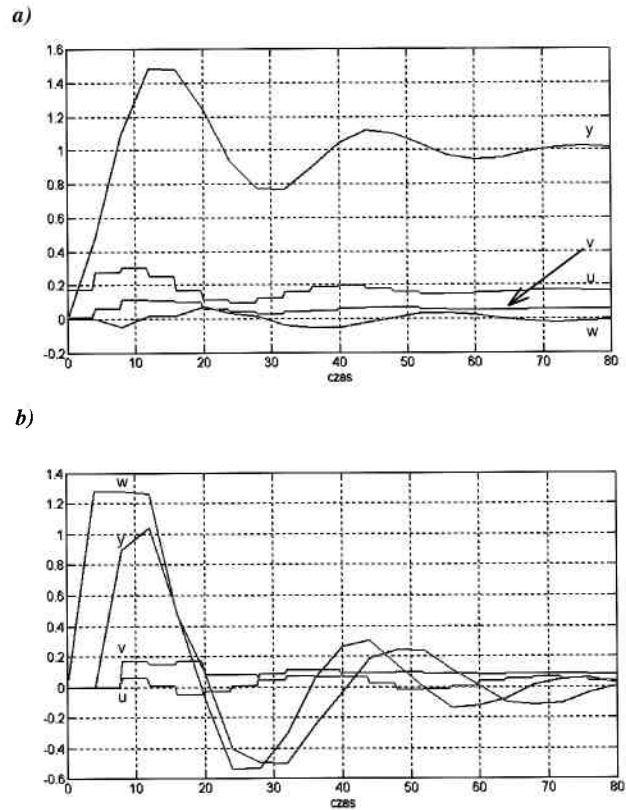
Działanie tego algorytmu sprawdzono w układzie regulacji z obiektem opisanym transmitancjami odpowiednio dla sterowania i dla zakłócenia:

$$G(s) = \begin{bmatrix} 12,8 / (16,7s + 1) & -18,9e^{-4s} / (21s + 1) \\ 6,6e^{-3s} / (10,9s + 1) & -19,4e^{-4s} / (14,4s + 1) \end{bmatrix}, G_z = \begin{bmatrix} 3,8e^{-4s} / (14,9s + 1) \\ 4,9 / (13,2s + 1) \end{bmatrix}$$

Wyniki badań symulacyjnych ilustruje rys. 3. Zwróćmy uwagę na właściwości odprężające algorytmu DMC, widoczne szczególnie wyraźnie na rys. 3a.

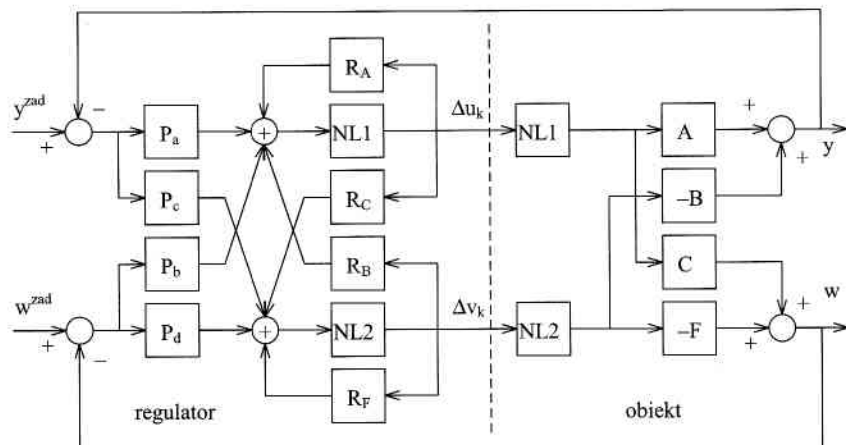
## 5. Algorytm DMC a ograniczenia sygnałów sterujących

Rzeczywisty obiekt regulacji ma ograniczone amplitudy sygnałów sterujących. Wynika to z istnienia nieliniowości typu nasyczeń np. w elementach wykonawczych. Wspomniane ograniczenia nie powinny być pomijane podczas projektowania regulatorów, szczególnie w przypadku wielowymiarowych układów regulacji, w których mogą one negatywnie wpływać zarówno na jakość regulacji, jak i na dokładność odsprężania.



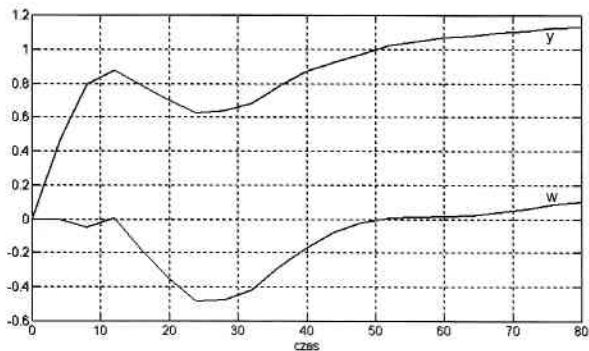
Rys. 3. Odpowiedź dwuwymiarowego układu regulacji na:  
a) skok wartości zadanej dla wyjścia nr 1,  
b) skok jednostkowy zakłócenia;  $\lambda=10$

W dalszej części tego rozdziału będziemy rozpatrywać obiekt dwuwymiarowy (taki, jak w rozdz. 4) z dodanymi ograniczeniami wartości sterowań. Jeśli fakt istnienia tych ograniczeń nie zostanie uwzględniony w algorytmie regulacji, uzyskane w układzie regulacji przebiegi mogą być niedopuszczalne (rys. 5a). Jednak w stosunkowo prosty sposób możemy uodpornić algorytm DMC na istnienie tych ograniczeń przez wprowadzenie ich (nieliniowości typu nasyczeń) do algorytmu DMC. Schemat blokowy tak zmodyfikowanego układu regulacji pokazano na rys. 4.

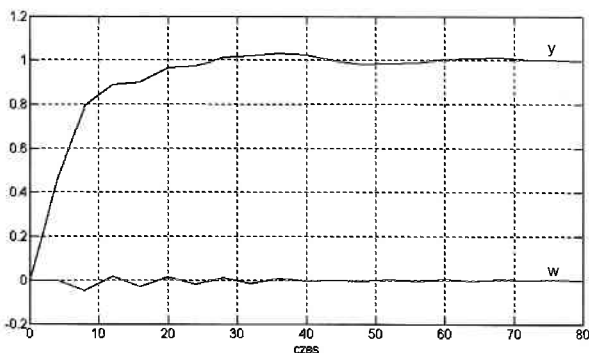


Rys. 4. Schemat blokowy zmodyfikowanego układu regulacji z algorytmem DMC

a)



b)



Rys. 5. Odpowiedź dwuwymiarowego układu regulacji z ograniczeniami sterowań;  $y^{zad} = 1$ ;  $w^{zad} = 0$ ; ograniczenia:

a) nie są uwzględniane,

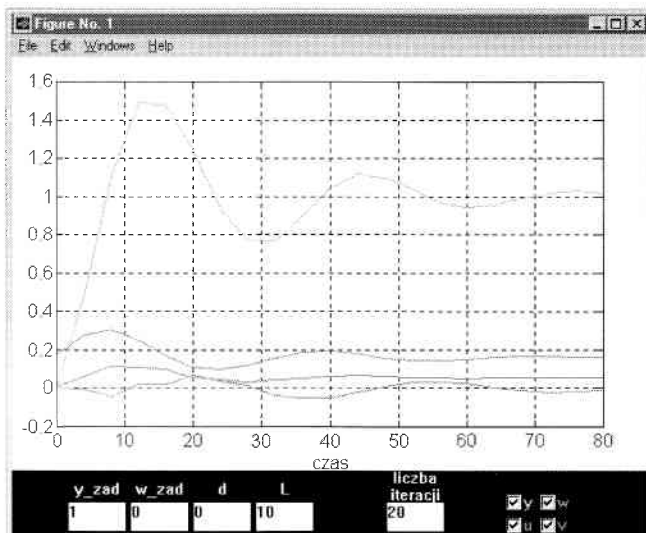
b) są uwzględniane w algorytmie regulacji;

W symulowanym układzie przyjęto następujące ograniczenia wartości sterowań:  $0 \leq u \leq 0,17$  i  $0 \leq v \leq 0,11$ . Po dokonaniu w układzie regulacji proponowanej w tym rozdziale zmiany, otrzymano poprawę działania układu regulacji, co pokazano na rys. 5b. Wyjście nr 1. (y) osiąga wartość zadaną, zaś wyjście nr 2. (w) cały czas pozostaje blisko wartości 0.

## 6. Opis opracowanego oprogramowania

W niniejszym referacie zamieszczono wyniki badań otrzymane za pomocą funkcji zawierających implementację algorytmu sterowania DMC (Dynamic Matrix Control). Do tych funkcji dodano interfejs użytkownika integrujący je i działający w środowisku języka *Matlab*. Interfejs ten jest przyjazny i łatwy w obsłudze. Umożliwia on łatwe porównanie działania różnych wariantów algorytmu regulacji. W tym celu wprowadzono możliwość wyboru tych wariantów za pomocą przycisków. Parametry wejściowe algorytmów podaje się natomiast w oknie dialogowym lub w oknie wykresu, w odpowiednich polach (rys. 6).

Informacje uzyskane w wyniku obliczeń są dostępne zarówno w formie wykresów, jak w formie liczbowej. Wykresy można skalować i kopiować w standardowy sposób. Ponadto zapewniono możliwość wyboru przez użytkownika wielkości, których przebiegi mają znaleźć się na ekranie.



Rys. 6. Przykładowy ekran użytkownika

Opracowane funkcje w połączeniu z intuicyjnym interfejsem użytkownika są wygodnym narzędziem do badania różnych odmian algorytmu DMC. Wykorzystanie programu *Matlab* daje duże możliwości późniejszego rozwoju tych funkcji i ich integracji z innymi pakietami procedur.

## 7. Podsumowanie

W referacie przedstawiono wyniki badań algorytmu DMC, które potwierdzają jego szczególne zalety. Przedstawiono przejrzyste wyprowadzenie algorytmu oparte na strukturze IMC. Nowe wyprowadzenie algorytmu DMC umożliwia pełniejsze uzasadnienie doboru jego parametrów.

Przedstawiono również wyniki badań dwóch istotnych wariantów projektowania algorytmu DMC (tzw. „scenariuszy”):

- z kompensacją mierzalnych i/lub prognozowanych zakłóceń oraz
- scenariusz dla obiektów wielowymiarowych.

Zwróćmy uwagę, że te dwa scenariusze można w prosty sposób połączyć i wyprowadzić algorytm dla obiektów wielowymiarowych z kompensacją mierzalnych zakłóceń.

Ponadto przedstawiony został sposób skutecznego przeciwdziałania niekorzystnym skutkom nieliniowości typu nasyczeń występujących na wejściach obiektu regulacji. Zaproponowana modyfikacja polegająca na wprowadzeniu nieliniowości do wnętrza algorytmu okazuje się bardzo skuteczna, pomimo swojej prostoty. Użytkowano lepszą regulację i dokładniejsze odsprężanie obiektu.

## Literatura

- [1] C. R. CUTLER, B. L. REMARKER:  
Dynamic Matrix Control – a computer control algorithm, Proc. Of the JACC, San Francisco, Aug. 13-15, 1979.
- [2] JERZY PUŁACZEWSKI:  
Algorytm regulacji DMC. Przypadek obiektu z opóźnieniem o jednym wejściu i jednym wyjściu, raport IAiS PW, Warszawa, 1998.
- [3] JERZY PUŁACZEWSKI:  
Algorytm regulacji DMC. Przypadek obiektu o dwóch wejściach i dwóch wyjściach, raport IAiS PW, Warszawa, 1998.
- [4] PIOTR MARUSAK:  
Opracowanie algorytmu DMC jednowymiarowego i wielowymiarowego, raport IAiS PW, Warszawa, 1998.