

Implementacja rozmytego algorytmu DMC z ograniczeniami na sterowniku PLC

W referacie przedstawiono przykład wykorzystania sterownika logicznego PLC do implementacji wielowarunkowego predykcyjnego rozmytego algorytmu DMC. Zaprezentowano zastosowany algorytm regulacji. Przedstawiono przykładowy układ regulacji z nieliniowym obiektem z dużym opóźnieniem. Działanie układu regulacji testowano na stanowisku badawczym złożonym ze sterownika PLC z zaimplementowanym regulatorem oraz z komputera PC z symulatorem obiektu regulacji. Oba elementy tego stanowiska były połączone interfejsem analogowym.

Implementation of the fuzzy DMC algorithm with constraints on the PLC controller

An example of a long-range predictive fuzzy DMC algorithm implementation on a PLC controller is presented in the paper. The applied control algorithm is first discussed. The exemplary control system with a nonlinear control plant with huge time delay is presented. The operation of the control system was tested on a simulation system, which was assembled from the PLC controller and PC computer with control plant simulator. Both elements of the simulation system were connected with an analog interface.

1. WSTĘP

Algorytm regulacji DMC (Dynamic Matrix Control) został zaprojektowany przez C.R. Cutlera i B.L. Remarkera pod koniec lat 70-tych [1]. Dzięki swoim zaletom, jest on chętnie stosowany w praktyce, szczególnie w przemyśle petrochemicznym, dla potrzeb którego został opracowany. Algorytm DMC należy do grupy tzw. predykcyjnych wielowarunkowych algorytmów regulacji. Nazwa ta oznacza, że podczas wyznaczania sterowania bierzemy pod uwagę nie tylko informacje z bieżącej chwili, ale także staramy się przewidzieć zachowanie układu regulacji w przyszłości na wiele chwil do przodu. Predykcji dokonujemy na podstawie dostępnych informacji o obiekcie regulacji i warunkach jego pracy (istniejące ograniczenia, przyszłe zakłócenia i inne informacje mogące poprawić jakość prognozy). Innymi słowy staramy się użyć całą dostępną nam wiedzę podczas opracowywania regulatora, a algorytmy wielowarunkowe, dzięki sposobowi ich formułowania oraz ich strukturze pozwalają nam uczynić to możliwie efektywnie [2].

W przypadku niektórych nieliniowych obiektów regulacji, może być zasadne użycie bardziej skomplikowanych, rozmytych algorytmów DMC. Przykład takiego obiektu jest rozpatrywany w niniejszym referacie. Regulator DMC dobrany tak, aby pracował zadowolająco w obszarze dużych wartości zadanych, działał bardzo powoli dla małych wartości zadanych. Z kolei w przypadku dostrojenia regulatora w taki sposób, aby działał on szybciej w zakresie małych

wartości zadanych, przebiegi uzyskane dla dużych wartości zadanych były niedopuszczalne. Problem ten został rozwiązany w zadowalający sposób poprzez zastosowanie rozmytych algorytmów DMC. Algorytmy te łączą w sobie zalety obydwu zastosowanych w nich technik – wielowarunkowych algorytmów regulacji oraz modeli rozmytych Takagi–Sugeno. Mogą więc być z powodzeniem stosowane do silnie nieliniowych obiektów regulacji z dużymi opóźnieniami, w sytuacji ograniczenia sterowań lub wyjść obiektu regulacji. Umożliwiają one ponadto poprawienie działania regulatora, gdy można przewidzieć przyszłe zmiany wartości zadanej, a także, gdy jest możliwe przewidzenie działania zakłóceń. Poruszone w niniejszym akapicie zagadnienia zostały szczegółowo opisane w referacie [3].

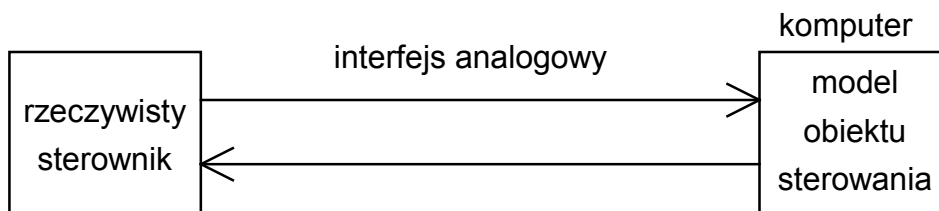
Algorytmy DMC wymagają dość dużych mocy obliczeniowych. Dlatego ich zastosowanie jest zwykle połączone z potrzebą użycia komputera (sugeruje to tytuł artykułu twórców oryginalnej wersji algorytmu). Dotyczy to w szczególności wersji algorytmu DMC opartych na jego sformułowaniu jako zadanie optymalizacji kwadratowej z ograniczeniami, znanym pod nazwą QDMC [4]. Jednak algorytm DMC w wersji analitycznej [2, 5] i bazujący na niej rozmyty algorytm DMC [3] pozwalają ominąć to ograniczenie.

Algorytmy DMC w wersji analitycznej (zarówno konwencjonalny, jak i rozmyty) zostały szczegółowo omówione w rozdz. 4. Jednak już w tym miejscu warto zaznaczyć zalety proponowanego podejścia. Sekret stosunkowo małych wymagań analitycznych algorytmów DMC kryje się w tym, że główna i najbardziej pracochłonna część obliczeń jest wykonywana raz, off-line. Następnie w każdym kroku pracy, regulator bazuje na uprzednio wyznaczonych współczynnikach i dlatego jest stosunkowo szybki i wymaga mniejszych mocy obliczeniowych niż inne odmiany regulatorów DMC. Ta cecha analitycznej odmiany algorytmu DMC pozwoliła na jego implementację (w wersji konwencjonalnej) na sterowniku PLC, przykład ten czytelnik znajdzie w pracy [6]. Niniejszy artykuł dotyczy implementacji rozmytego algorytmu DMC, a więc algorytmu bardziej złożonego. Jednak nadal jest on na tyle prosty, że można go zastosować wykorzystując do tego celu sterownik PLC.

W dalszej części niniejszego referatu (rozdz. 2.) zostało opisane stanowisko laboratoryjne użyte do testowania zaimplementowanego na sterowniku PLC algorytmu DMC. W rozdz. 3. został przedstawiony nieliniowy obiekt regulacji, do którego dobrano rozmyty regulator DMC. Opis tego regulatora został zamieszczony w rozdz. 4. razem z przykładowymi wynikami badań symulacyjnych. Rozdz. 4. Rozpoczyna przedstawienie podstawowej wersji regulatora. Następnie opisano sposób uwzględniania ograniczeń w rozważanym algorytmie. Omówiono także pokrótce sposób uwzględniania zakłócenia mierzalnego w zaimplementowanym algorytmie DMC. Artykuł zamyka krótkie podsumowanie oraz wykaz cytowanej literatury wśród której znajdują się głównie pozycje dokładniej opisujące poruszone zagadnienia, które ze względu na ograniczoną objętość artykułu zostały przedstawione tylko w zarysie.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Niniejszy rozdział zawiera krótki opis stanowiska użytego podczas badań. Dodatkowe informacje na jego temat, jak również przykłady innych jego zastosowań, czytelnik znajdzie w pracach [6, 7]. Użyte stanowisko jest złożone z dwóch elementów. Pierwszym z nich jest komputer PC z symulatorem obiektu. Maszyna ta jest połączona interfejsem analogowym z rzeczywistym urządzeniem sterującym w postaci przemysłowego sterownika programowalnego PLC (rys. 1.). Zauważmy, że dzięki takiej konfiguracji jest możliwe przetestowanie regulatora, który został zaprogramowany w pamięci sterownika PLC, na stanowisku z rys. 1. Następnie, jeśli uznamy działanie tego regulatora za zadowalające, możemy podłączyć ten sterownik do rzeczywistego obiektu.

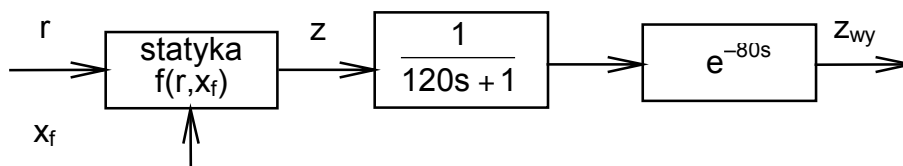


Rys. 1. Struktura stanowiska laboratoryjnego z komputerem i sterownikiem PLC

Podczas prowadzonych badań, obiekt regulacji był symulowany na komputerze PC klasy Pentium wyposażonym w kartę wejść/wyjść analogowych PCL-812 firmy Advantech. Urządzeniem sterującym był sterownik PLC firmy Allen-Bradley SLC-500, przy czym wykorzystano następujące jego moduły: • procesor 5/04, • moduł wejść/wyjść analogowych NIO4V oraz • moduł BASIC. Obliczenia wykonuje moduł BASIC (algorytm regulacji został napisany w Basic-u), zaś procesor pośredniczy w przekazywaniu danych pomiędzy modułem BASIC a komputerem z symulatorem obiektu regulacji.

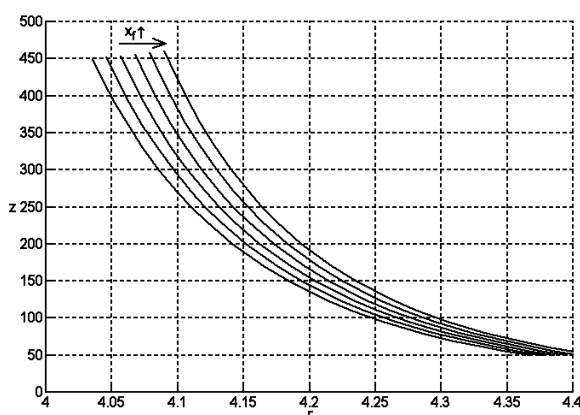
3. OBIEKT REGULACJI

Niniejszy rozdział zawiera opis przykładowego obiektu regulacji, który był wykorzystany podczas badań. Obiektem tym jest kolumna etylenowa z układami regulacji, której model, zaprezentowany pokrótce poniżej, jest owocem prac prowadzonych w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej PW wspólnie z zespołem specjalistów z Instytutu Chemii Przemysłowej [8].



Rys. 2. Schemat blokowy modelu obiektu regulacji

Przyjęto, że model ten ma postać Hammerstein'a, tzn. składa się z nieliniowej statyki poprzedzającej liniową dynamikę. Struktura tego modelu została pokazana na rys. 2. W dalszej części referatu będą używane oznaczenia jak na rysunku: r – sygnał sterujący, z_{wy} – wyjście obiektu regulacji (zanieczyszczenie produktu liczone w ppm), x_f – zakłócenie mierzalne, zaś



Rys. 3. Charakterystyki statyczne obiektu regulacji

z – wyjście modelu statyki. Stałe czasowe podano w minutach, a podczas badań przyjęto stosunkowo długi okres próbki $T_p = 20$ min. Ponadto założono, że sygnał sterujący jest ograniczony i może się zmieniać w granicach $4,05 \leq r \leq 4,4$.

Rozważany obiekt ma znaczne opóźnienie oraz jest silnie nieliniowy, co dobrze ilustrują jego charakterystyki statyczne pokazane na rys. 3. Zostały one sporządzone na podstawie otrzymanych przez autora próbek z modelu fizykochemicznego kolumny. Dane te posłużyły następnie do opracowania modeli statyki kolumny etylenowej.

W dalszej części raportu będą rozpatrywane

dwa spośród opracowanych modeli statyki kolumny. Pierwszy z modeli – wielomianowy został wyznaczony metodą najmniejszych kwadratów i ma postać opisaną wzorem (1):

$$\begin{cases} z = b_0 + b_1 \cdot r + b_2 \cdot r^2 + b_3 \cdot r^3 + b_4 \cdot r^4 + b_5 \cdot r^5 \\ b_i = (a_{0i} + a_{1i} \cdot x_f + a_{2i} \cdot x_f^2) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie z – wielkość wyjściowa modelu statyki, r – wielkość wejściowa modelu statyki, x_f – wielkość zakłócająca, a_{ji} – stałe współczynniki z tabl. 1.

Tablica 1. Wartości współczynników a_{ji} ze wzoru (1) (należy pomnożyć przez $1,0e+011$)

	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
j=0	0,3996	-0,4518	0,2044	-0,0462	0,0052	-0,0002
j=1	-1,0167	1,1494	-0,5199	0,1176	-0,0133	0,0006
j=2	0,6485	-0,7332	0,3316	-0,0750	0,0085	-0,0004

Model wielomianowy posłużył następnie w badaniach symulacyjnych jako część obiektu regulacji. Drugi z modeli jest połączeniem modelu wielomianowego z modelem wieloobszarowym (Takagi–Sugeno). Jest on mniej dokładny niż model wielomianowy i został wykorzystany do opracowania rozmytego regulatora DMC. Następny rozdział zawiera opis struktury tego regulatora i przykładowe wyniki badań symulacyjnych układu regulacji z przedstawionym obiektem regulacji.

4. ROZMYTY ALGORYTM DMC (WERSJA ANALITYCZNA)

W niniejszym rozdziale, zamieszczono krótkie przypomnienie konwencjonalnego i rozmytego algorytmu DMC w wersji analitycznej. Więcej informacji na temat tych oraz innych wersji algorytmu DMC a także ich rozszerzeń, czytelnik znajdzie w pracach [2, 3, 5]. Jak już wspomniano we wstępie, w algorytmie DMC jako algorytmie wielowarunkowym, przyszłe zmiany sygnału sterującego są wyznaczane z uwzględnieniem przewidywanego zachowania układu regulacji na wiele chwil do przodu. Przyszłe wartości wyjścia obiektu regulacji są obliczane na podstawie historii układu regulacji oraz na podstawie naszej wiedzy o przyszłych warunkach jego działania. Sygnał sterujący jest przy tym wyznaczany w taki sposób, aby były spełnione założone kryteria. Najczęściej żąda się minimalizacji wskaźnika jakości o następującej postaci:

$$J = \sum_{i=1}^p (y_k^{zad} - y_{k+i}^{pred})^2 + \lambda \cdot \sum_{i=0}^s (\Delta u_{k+i})^2, \quad (2)$$

gdzie p – horyzont predykcji, s – horyzont sterowania, y_k^{zad} – wartość zadana, Δu_{k+i} – przyszły przyrost sterowania w chwili $k+i$, $\lambda \geq 0$ – współczynnik kary za zmienność sygnału sterującego, y_{k+i}^{pred} – wartość wyjścia przewidywana dla chwili $k+i$, zależna od przeszłych i przyszłych sterowań i opisana wzorem:

$$y_{k+i}^{pred} = y_k + w_{k+i} + \Delta y_{k+i}, \quad i=1, \dots, p, \quad (3)$$

gdzie y_k – bieżąca wartość wyjścia obiektu, w_{k+i} – czynnik zależny od przeszłych przyrostów sterowań (Δu_{k-j} , $j=1, \dots, l$), Δy_{k+i} – czynnik zależny od przyszłych przyrostów sterowań (Δu_{k+i} , $i \geq 0$); ponieważ algorytm DMC bazuje na modelu obiektu w postaci odpowiedzi skokowej, czynniki te mają postać:

$$\Delta y = A \cdot \Delta u, \quad (4)$$

gdzie $\Delta \mathbf{y}$ – wektor złożony czynników Δy_{k+i} ze wzoru (3) zależnych od przyszłych przyrostów sterowań, \mathbf{A} – macierz dynamiczna złożona ze współczynników odpowiedzi skokowej obiektu regulacji, $\Delta \mathbf{u}$ – przyszłe (wyznaczane) przyrosty sterowania.

Reasumując, chcemy aby odchylenia wartości wyjściowej obiektu regulacji od wartości zadanej w przyszłych p chwilach były minimalne (pierwszy człon wskaźnika jakości) oraz aby sterowanie nie było zanadto zmienne (stąd wprowadzenie kary za przyrosty sterowania).

Tak postawiony problem ma rozwiązanie analityczne, dane wzorem:

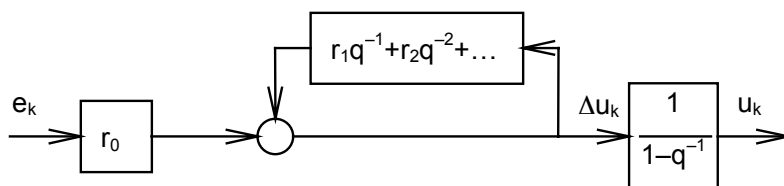
$$\Delta \mathbf{u} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} + \lambda \cdot \mathbf{I})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot (\mathbf{e} - \mathbf{w}), \quad (5)$$

gdzie \mathbf{A} – macierz dynamiczna, \mathbf{I} – macierz jednostkowa, λ – współczynnik kary (parametr dostrajalny), $\Delta \mathbf{u}$ – wektor przyszłych sterowań, \mathbf{e} – wektor, którego składowe są równe uchybowi regulacji w bieżącej chwili, \mathbf{w} – wektor wyrazów zależnych od poprzednich przyrostów sterowania, złożony z czynników w_{k+i} ze wzoru (3).

Na podstawie otrzymanego rozwiązania, można określić strukturę regulatora, ponieważ do sterowania wykorzystywane jest tylko pierwsze z ciągu sterowań. W takim razie, po kolejnych przekształceniach otrzymujemy:

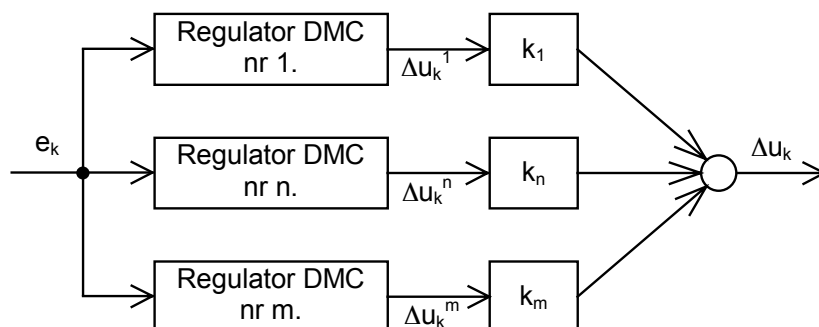
$$u_k = u_{k-1} + r_0 \cdot e_k + \sum_{i=1}^n r_i \cdot \Delta u_{k-i} \quad (6)$$

gdzie r_i ($i=0, \dots, n$) – współczynniki otrzymane po przekształceniu pierwszej wiersza macierzy $(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} + \lambda \cdot \mathbf{I})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T$, Δu_{k-i} – poprzednie przyrosty sterowania. Schemat struktury regulatora opisanego wzorem (6) pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy regulatora DMC opisanego wzorem (6), u_k – sterowanie w chwili k , e_k – uchyb regulacji w chwili k , r_i ($i=0, \dots, n$) – współczynniki ze wzoru (6), Δu_k – przyrost sterowania w chwili k , q^{-1} – operator opóźnienia

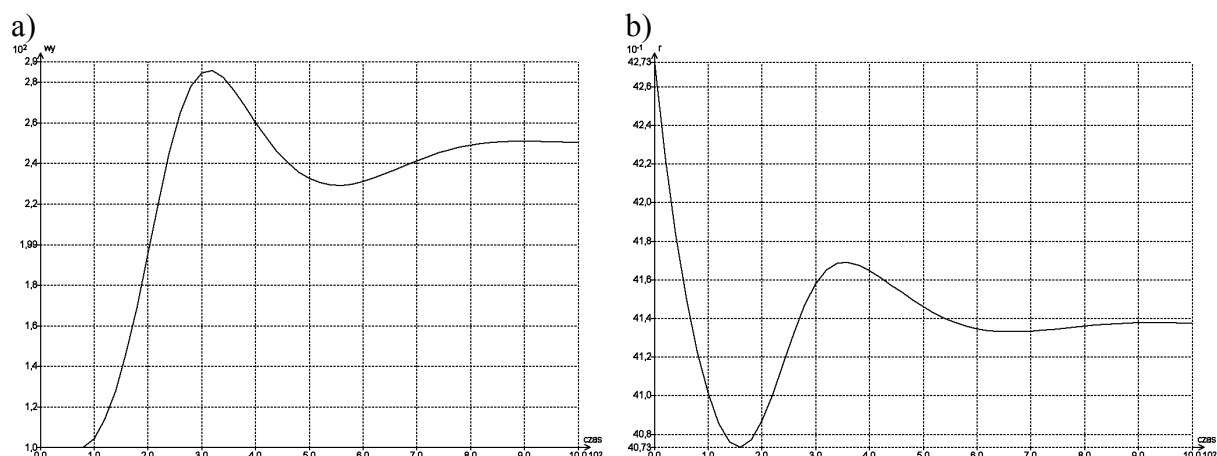
Jak zaznaczono we wstępie artykułu, zastosowanie wyżej przedstawionego, „konwencjonalnego” algorytmu DMC do silnie nieliniowego obiektu może nie przynieść zadowalających wyników lub działanie układu regulacji można poprawić poprzez zastosowanie rozmytego regulatora DMC. Idea polega na tym, aby w poszczególnych obszarach uzyskać odpowiedzi skokowe obiektu regulacji dla różnych punktów pracy. Następnie na ich podstawie wyznaczyć współczynniki regulatorów lokalnych, z których każdy ma postać taką, jak na rys. 4.



Rys. 5. Schemat blokowy rozmytego regulatora DMC; e_k – uchyb regulacji, Δu_k – przyrost sterowania, k_n ($n=1, \dots, m$) – wagi, Δu_k^n ($n=1, \dots, m$) – wyjścia regulatorów lokalnych

Warto zauważyć, że obliczenia, o których jest tu mowa wystarczy wykonać tylko raz off-line, zaś w każdym kroku pracy algorytmu wystarczy obliczyć, na podstawie bieżącego punktu pracy, wagi poszczególnych regulatorów lokalnych, a następnie zsumować ich współczynniki pomnożone przez te wagi. W wyniku tych działań otrzymuje się jeden zestaw współczynników regulatora, na podstawie którego jest obliczana szukana wartość sterowania. Na rys. 5. pokazano schemat blokowy omawianego regulatora rozmytego DMC.

Regulator o opisanej wyżej strukturze dobrano do obiektu regulacji przedstawionego w rozdz. 3. Następnie zasymulowano układ regulacji na stanowisku badawczym, które przedstawiono w rozdz. 2. Przypomnijmy, że regulator został zaimplementowany na sterowniku logicznym PLC, zaś obiekt regulacji był symulowany na komputerze PC. Przykładowe odpowiedzi tego układu regulacji zostały pokazane na rys. 6 (czas podano w minutach).



Rys. 6. Odpowiedź układu regulacji z rozmytym regulatorem DMC na skok wartości zadanej z $z_0 = 100$ do $z_{ad} = 250$; a) przebieg wyjścia, b) przebieg sterowania

Ponieważ w przypadku istnienia w układzie regulacji ograniczeń na wartości sterowań lub na wartości wyjścia obiektu regulacji, ich pominięcie podczas doboru regulatora może mieć negatywne skutki dla działania układu regulacji, algorytm regulacji powinien dysponować mechanizmem uwzględniania tych ograniczeń. W przypadku regulatorów DMC w wersji analitycznej mechanizm ten jest stosunkowo prosty i polega na rzutowaniu sterowań na zbiór ograniczeń. Zasadę tę można zapisać w postaci:

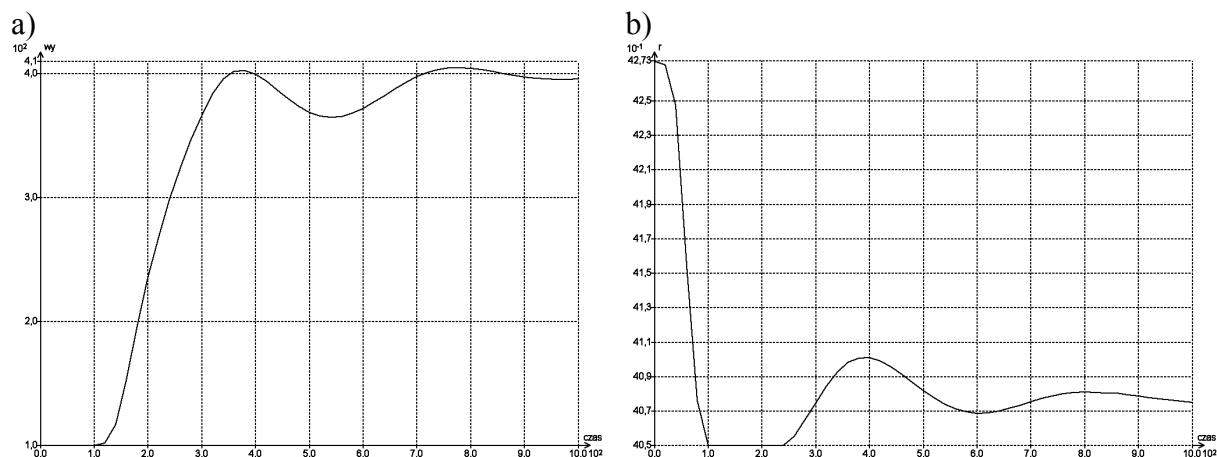
$$\begin{aligned} \text{jeśli } \Delta u_k + u_{k-1} > u_{max} & \text{ to } \Delta u_k = u_{max} - u_{k-1}, \\ \text{jeśli } \Delta u_k + u_{k-1} < u_{min} & \text{ to } \Delta u_k = u_{min} - u_{k-1}. \end{aligned}$$

Korzystając z podanej modyfikacji można również zapewnić spełnienie ograniczeń nałożonych na wyjście obiektu. Idea polega na takim ograniczeniu wartości sterowań, aby wyjścia obiektu nie mogły przekroczyć zadanych wartości, przy określonej niepewności modelowania.

Przedstawiona modyfikacja jest prosta i skuteczna, o czym świadczą przebiegi pokazane na rys. 7. Jednak pojawia się pytanie, jak dalece otrzymane rezultaty różnią się od optymalnego rozwiązania. Aby odpowiedzieć na to pytanie, w przypadku układu regulacji z rozważanym obiektem, zasymulowano go, tym razem na jednym komputerze, najpierw z regulatorem w wersji analitycznej, a następnie z regulatorem w wersji numerycznej (z rozwiązywaniem zadania optymalizacji kwadratowej z ograniczeniami w każdym kroku pracy algorytmu, przy czym była to odmiana podstawowa tej wersji algorytmu [3]). Otrzymane w obu układach regulacji odpowiedzi były bardzo podobne, dlatego zrezygnowano z zamieszczenia kolejnych ilustracji (dla wartości zadanej $z_{ad} = 400$ ppm uzyskane przebiegi były bardzo zbliżone do tych z rys. 7.).

O tym, jak bardzo zbliżone były uzyskane wyniki świadczy to, że wartość wskaźnika jakości w postaci sumy kwadratów różnic wartości wyjściowych od wartości zadanej i kwadratów

wartości przyrostów sterowania pomnożonych przez współczynnik kary λ była, dla $z_{zad} = 400$ ppm, w przypadku układu regulacji z regulatorem w wersji analitycznej większa o 0,55% od wartości wskaźnika dla układu regulacji z regulatorem z optymalizacją. Z rozważanego przykładu wynika, że w przypadku niektórych obiektów regulacji, zastosowanie regulatora w wersji analitycznej daje rozwiązanie bardzo bliskie optymalnego.



Rys. 7. Odpowiedź układu regulacji z rozmytym regulatorem DMC na skok wartości zadanej $z z_0 = 100$ do $z_{zad} = 400$; a) przebieg wyjścia, b) przebieg sterowania; aktywne dolne ograniczenie wartości sterowania

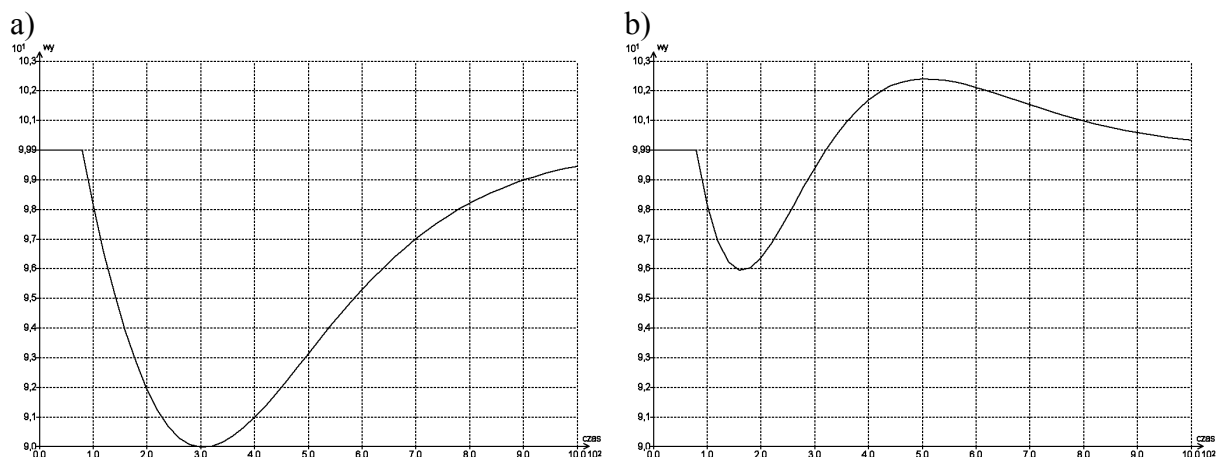
Kolejnym istotnym zagadnieniem, a jednocześnie dużą zaletą algorytmu DMC jest możliwość uwzględniania w nim zakłócenia mierzalnego. Odpowiednie rozszerzenie algorytmu zostało dokładnie opisane w [2, 5]. Dlatego jego idea zostanie opisana tylko w zarysie. Zauważmy, że we wzorze (3) można wydzielić, jak było to już wspomniane, dwa czynniki. Pierwszy czynnik zależy od przeszłości układu regulacji, a drugi od dopiero wyznaczanych sterowań.

Pierwszy z wymienionych czynników jest nazywany odpowiedzią swobodną, ponieważ taka byłaby odpowiedź układu regulacji, gdyby sygnały sterujące zostały w bieżącej chwili zamrożone. Odpowiedź swobodna zależy od aktualnej wartości wyjścia oraz od czynników określających wpływ poprzednich przyrostów sterowań. Jeśli chcemy uwzględnić wpływ zakłócenia, o którym mamy jakieś informacje (uzyskane na przykład dzięki zastosowaniu pomiaru pośredniego), na rozważany obiekt, to wystarczy dodać do odpowiedzi swobodnej wyrazy opisujące ten wpływ.

Algorytm regulacji poddany opisanej modyfikacji będzie niestety bardziej skomplikowany, gdyż pojawią się w nim dodatkowe parametry. Wzrost liczby parametrów może w skrajnym przypadku sprawić, że konieczne będzie rozszerzenie pamięci użytego sterownika. Nie było to jednak konieczne w rozpatrywanym w niniejszym artykule przykładzie, w którym liczba parametrów regulatora wzrosła dwukrotnie.

Drugą niedogodnością jest wydłużenie się czasu wykonania jednego kroku pracy regulatora, w naszym przypadku było ono około dwukrotne. Może to być problemem podczas implementacji algorytmu na sterowniku logicznym. Jednak jeśli obiekt regulacji ma stosunkowo wolną dynamikę (obiekty występujące w przemyśle chemicznym. np. obiekt opisany w rozdz. 3.), to sterownik zdąży wykonać potrzebne obliczenia. Jedna iteracja najbardziej rozbudowanej wersji regulatora dobranej do rozważanego w artykule obiektu trwała mniej niż 3s.

Opisana modyfikacja pomimo swoich wad przynosi znaczącą korzyść, gdyż działanie regulatora może ulec zdecydowanej poprawie, co dobrze ilustrują przykładowe przebiegi symulacyjne pokazane na rys. 8. Łatwo jest zauważyć, że po użyciu w algorytmie regulacji pomiaru zakłócenia, zdecydowanemu zmniejszeniu uległo przeregulowanie odpowiedzi układu na skok tego zakłócenia.



Rys. 8. Odpowiedź układu regulacji z rozmytym regulatorem DMC na skok zakłócenia mierzalnego
a) brak pomiaru zakłócenia, b) pomiar natychmiastowy

5. PODSUMOWANIE

W referacie przedstawiono implementację rozmytego regulatora DMC na sterowniku PLC. Najpierw opisano stanowisko badawcze użyte podczas eksperymentów. Następnie przedstawiono nieliniowy obiekt regulacji z dużym opóźnieniem. Obiekt ten był symulowany na komputerze PC połączonym ze sterownikiem PLC za pośrednictwem interfejsu analogowego. Przedstawiono rozmyty regulator DMC w wersji analitycznej, w której główna część obliczeń jest wykonywana off-line. Wymaga on więc stosunkowo małych mocy obliczeniowych.

Do przykładowego obiektu regulacji zaprojektowano rozmyty regulator DMC o najbardziej rozbudowanej strukturze (z uwzględnianiem zakłócenia mierzalnego i ograniczeń istniejących w układzie regulacji). Uzyskane wyniki były zadowalające, co świadczy o możliwości stosowania rozmytego algorytmu regulacji DMC dla obiektów nieliniowych o stosunkowo wolnej dynamice, bez konieczności użycia do tego celu komputera, który można zastąpić sterownikiem logicznym.

LITERATURA

- [1] C.R. Cutler, B.L. Remaker: *Dynamic Matrix Control – a computer control algorithm*, Proc. Of the JACC, San Francisco, Aug. 13–15, 1979.
- [2] P. Marusak, J. Pułaczewski: *Szczególne zalety algorytmu regulacji Dynamic Matrix Control (DMC)*, Pomiary Automatyka Kontrola 12'99.
- [3] P. Marusak, P. Tatjewski: *Fuzzy Dynamic Matrix Control algorithms for nonlinear plants*; konferencja międzynarodowa MMAR 2000, Międzyzdroje sierpień 2000.
- [4] C.E. Garcia, A.M. Morshedi (1986). *Quadratic programming solution of Dynamic Matrix Control (QDMC)*, Chem. Eng. Comm., 46, pp. 73–78.
- [5] J. Pułaczewski: *Algorytm regulacji DMC. Przypadek obiektu z opóźnieniem o jednym wejściu i jednym wyjściu*, raport IAiS PW nr 98–02, Warszawa, styczeń 1998.
- [6] P. Marusak: *System wspomagania projektowania i badania algorytmów regulacji ze sterownikami PLC i symulatorami obiektów*. Prace X konferencji Symulacja Procesów Dynamicznych SPD–10, Zakopane–Kościelisko 15–19 czerwiec 1998.
- [7] P. Marusak: *Zastosowanie systemu wspomagania projektowania algorytmów regulacji do testowania regulatorów nieliniowych*, Automation 2000, Warszawa, kwiecień 2000.
- [8] M. Ławryńczuk: *Modele z wydzielonym członem statycznym – identyfikacja i wykorzystanie w sterowaniu*, raport IAiS PW nr 00–03, Warszawa, kwiecień 2000.