

Dr inż. Piotr Marusak
Instytut Automatyki i
Informatyki Stosowanej
Politechniki Warszawskiej

METODA SZYBKIEJ SYNTEZY ROZMYTYCH REGULATORÓW PREDYKCYJNYCH DMC – ZASTOSOWANIE DO NIELINIOWEGO OBIEKTU

W pracy przedstawiono metodę szybkiego i stosunkowo prostego projektowania rozmytych regulatorów DMC. Metoda ta wykorzystuje zaletę algorytmów DMC wynikającą z zastosowania w tego rodzaju algorytmach modelu w postaci odpowiedzi skokowych obiektu. Skuteczność metody zilustrowano na przykładzie układu sterowania nieliniowego obiektu. Pokazano przy tym, że dzięki użyciu zaproponowanej metody, można w pewnych przypadkach, w stosunkowo prosty sposób, poprawić funkcjonowanie układu regulacji w stosunku do przypadku, gdy używa się zwykłego algorytmu predykcyjnego (z modelem liniowym). Jest to szczególnie istotne, gdy regulator powinien dobrze funkcjonować w szerokim zakresie zmian punktu pracy np. w warstwowej strukturze sterowania.

METHOD OF FAST FUZZY DMC CONTROLLERS SYNTHESIS – APPLICATION TO A NONLINEAR CASE STUDY

A simple method of fuzzy DMC algorithms design is presented in the paper. It exploits the advantage of these algorithms implied by step response model used in them. The method is illustrated with an example of evaporator control. It is shown that using the method it is possible in some cases, in a relatively simple way, to improve control system operation comparing to the case, when conventional DMC algorithm (with linear model) was used in a control system. This feature is significantly important when the controller operates in a multilayer structure and it should work appropriately in a wide range of operating point changes.

1. WSTĘP

Algorytmy predykcyjne są obecnie szeroko stosowane w praktyce. Jednym z pierwszych algorytmów predykcyjnych zastosowanym w przemyśle jest algorytm DMC (Dynamic Matrix Control) [2]. Podstawową jego cechą jest użycie odpowiedzi skokowych jako modelu obiektu regulacji. Zastosowanie konwencjonalnego algorytmu (wykorzystującego liniowy model procesu) do nieliniowego obiektu może w pewnych przypadkach przynieść niezadowolające rezultaty. Jest to szczególnie istotne w przypadku, gdy regulator powinien zapewniać możliwość zmian punktu pracy procesu w

Praca naukowa częściowo finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005–2007 jako projekt badawczy

szerokim zakresie, w zależności od dyspozycji otrzymywanych z warstwy optymalizacji. Jest to przyczyna, dla której opracowuje się algorytmy predykcyjne bazujące na modelach nieliniowych, przy czym z praktycznego punktu widzenia, istotne znaczenie mają algorytmy wykorzystujące linearyzację obiektu (i następnie zastosowanie podejścia konwencjonalnego) w każdej iteracji algorytmu, co pozwala uniknąć problemów numerycznych przy wyznaczaniu sterowań [6, 8, 11, 13, 17].

W niniejszej pracy przedstawiono metodę szybkiej i uproszczonej syntezy rozmytych algorytmów DMC (FDMC – Fuzzy DMC). Algorytmy FDMC bazują na dwóch elementach: technice regulacji predykcyjnej DMC i modelowaniu rozmytym Takagi–Sugeno, dziedzicząc zalety obydwu tych podejść [6, 8]. Zastosowanie tych algorytmów przynosi zwykle zadowalające efekty także dla silnie nieliniowych obiektów regulacji z dużymi opóźnieniami. Zaletą algorytmów FDMC jest to, że przybliżony model obiektu jest w nich wyznaczany w stosunkowo prosty sposób wynikający z wnioskowania rozmytego.

W kolejnym rozdziale przedstawiono podstawową ideę algorytmów FDMC oraz proponowaną metodę ich projektowania. Rozdz. 3. zawiera przykład zastosowania metody do problemu sterowania wyparki. Pracę kończy krótkie podsumowanie.

2. ROZMYTE ALGORYTMY DMC

Podstawowa idea numerycznych wersji algorytmów typu DMC polega na rozwiązywaniu, w każdej iteracji, problemu minimalizacji wskaźnika jakości [1, 3]:

$$J = \sum_{j=1}^{l_o} \sum_{i=1}^p \kappa_j \cdot (\bar{y}_k^j - y_{k+i|k}^j)^2 + \sum_{j=1}^{l_i} \sum_{i=0}^{s-1} \lambda_j \cdot (\Delta u_{k+i|k}^j)^2 \quad (1)$$

przy ograniczeniach:

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{\max}, \quad u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \quad y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, \quad (1a)$$

gdzie \bar{y}_k^j – wartość zadana dla wyjścia j , $y_{k+i|k}^j$ – przewidywana, w bieżącej chwili k , wartość j -tego wyjścia obiektu regulacji dla przyszłej chwili $k+i$, zależna od przeszłych i przyszłych sterowań (sposób jej wyznaczania zależy od sposobu predykcji, a w szczególności od przyjętego modelu obiektu regulacji), $\kappa_j \geq 0$ to współczynniki ważące przyszłe uchyby na j -tym wyjściu, $\lambda_j \geq 0$ współczynniki ważące przyrosty sterowania dla j -tego wejścia, w składniku będącym karą za zmienność sterowania, $\Delta u_{k+i|k}^j$ – przyszłe

(szukane) przyrosty sterowania dla j -tego wejścia, p jest horyzontem predykcji, $s \leq p$ jest horyzontem sterowania, l_{wy} , l_{we} – liczba odpowiednio: wyjść i wejść obiektu regulacji, Δu jest wektorem przyszłych przyrostów sterowań, u jest wektorem przyszłych wartości sterowań, y jest wektorem przewidywanych wartości wyjść obiektu, Δu_{\min} , Δu_{\max} , u_{\min} , u_{\max} , y_{\min} , y_{\max} są wektorami dolnych i górnych ograniczeń nałożonych na odpowiednio: przyrosty i wartości sterowań oraz wartości wyjść. W wyniku rozwiązania powyższego problemu optymalizacji, otrzymuje się wektor Δu przyszłych sterowań, z którego elementy $\Delta u_{k+i|k}^j$ używa się do sterowania. W następnej iteracji algorytmu,

ponownie rozwiązuje się zadanie optymalizacji dla nowych wartości sygnałów.

W przypadku użycia, w algorytmie, modelu liniowego, powyższe zadanie optymalizacji staje się zadaniem liniowo–kwadratowym. Ponadto, jeśli nie jest potrzebne uwzględnianie ograniczeń, powyższy problem optymalizacji bez ograniczeń, można rozwiązywać analitycznie.

nianie ograniczeń, powyższy problem optymalizacji bez ograniczeń, można rozwiązywać analitycznie.

Wartości $y_{k+i|k}^j$ są wyznaczane na podstawie modelu obiektu regulacji. W klasycznym algorytmie DMC używa się w tym celu modelu w postaci odpowiedzi skokowych obiektu. (Ze względu na ograniczoną ilość miejsca oraz bogatą literaturę tematu, dokładny sposób formułowania algorytmu klasycznego nie jest tu zamieszczony, można go jednak znaleźć np. w [1, 3, 17].) Algorytmy FDMC wykorzystują natomiast modele rozmyte typu Takagi–Sugeno [15]. Przypomnijmy, że model tego typu wiążący wyjścia z wejściami obiektu ma następującą postać:

Reguła i : jeśli y_k jest B_1^i i ... i y_{k-n_p+1} jest $B_{n_p}^i$ i u_k jest C_1^i i ... i u_{k-m_p+1} jest $C_{m_p}^i$ to

$$y_{k+1}^i = \underbrace{b_1^i \cdot y_k + \dots + b_{n_p}^i \cdot y_{k-n_p+1}}_{\text{poprzednik}} + \underbrace{c_1^i \cdot u_k + \dots + c_{m_p}^i \cdot u_{k-m_p+1}}_{\text{następnik}} \quad (2)$$

gdzie $b_1^i, \dots, b_{n_p}^i, c_1^i, \dots, c_{m_p}^i$ – współczynniki i -tego modelu lokalnego, y_k – wyjście obiektu regulacji w chwili k , u_k – sterowanie w chwili k , $B_1^i, \dots, B_{n_p}^i, C_1^i, \dots, C_{m_p}^i$ – zbiory rozmyte, $i = 1, \dots, l$, l – liczba reguł. W celu obliczenia wartości wyjściowej modelu, należy określić dla każdej reguły, wartość wagi w_i zwanej poziomem aktywacji reguły. (Wartość ta zależy od wartości zmiennych z poprzedników reguł i tzw. funkcji przynależności, których przykład jest podany w następnym rozdziale.) Następnie należy obliczyć wartości każdego z następników oraz wyznaczyć sumę ważoną tych wartości. Szczegóły dotyczące modeli typu Takagi–Sugeno są przedstawione np. w [15, 17].

Bezpośrednie skorzystanie w algorytmie z modelu typu Takagi–Sugeno byłoby przyczyną jego dużej komplikacji, wynikającej z konieczności rozwiązywania zadania optymalizacji nieliniowej w każdej iteracji algorytmu. Aby tego uniknąć, sprowadza się problem do zadania optymalizacji kwadratowej z ograniczeniami. W tym celu należy na podstawie modelu nieliniowego wyznaczać w każdej iteracji algorytmu przybliżony model obiektu (używany następnie do formułowania konwencjonalnego algorytmu DMC). Różnica między różnymi wersjami algorytmów FDMC wynika właśnie z różnych sposobów otrzymywania modeli przybliżonych, które są następnie wykorzystywane do przewidywania zachowania procesu [6].

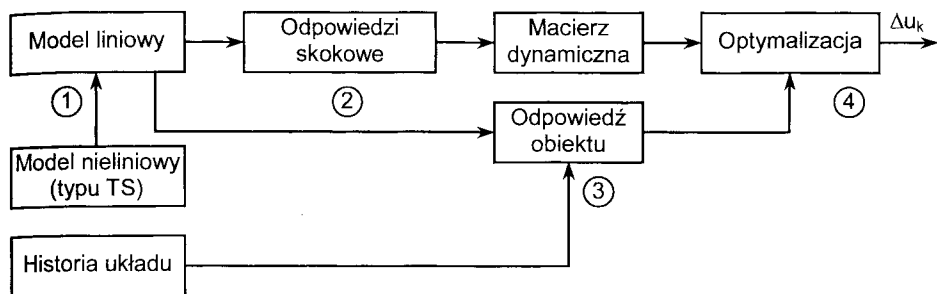
Przedmiotem zainteresowania niniejszej pracy jest najprostszy spośród algorytmów FDMC, który został użyty podczas eksperymentów opisanych w rozdz. 3. Algorytm ten, pomimo swojej prostoty, przyniósł w rozważanym przypadku poprawę jakości regulacji w stosunku do konwencjonalnego algorytmu DMC, co świadczy m.in. o tym, że lepiej nadaje się on do zastosowania w hierarchicznym układzie sterowania.

Zwykle algorytm ten formułuje się w następujący sposób (wynikający z użycia w nim modelu Takagi–Sugeno z modelami lokalnymi w postaci równań różnicowych; rys. 1):

1. Dla bieżących wartości wejść i wyjść procesu, w wyniku skorzystania z mechanizmu wnioskowania rozmytego, jest otrzymywany przybliżony liniowy model obiektu w bieżącej iteracji;

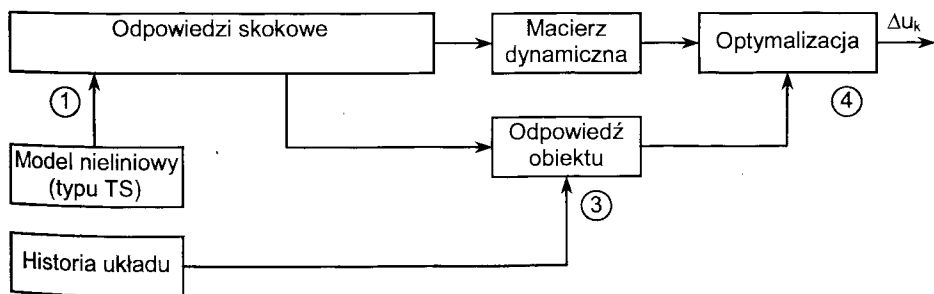
3. Korzystając z otrzymanej w poprzednim punkcie macierzy dynamicznej oraz odpowiedzi swobodnej (odpowiedzi jedynie na przeszłe wymuszenia, zob. np. [1, 17]), otrzymanej przy użyciu modelu liniowego z punktu 1 formułuje się liniowo-kwadratowy problem optymalizacji;

4. W wyniku rozwiązania zadania optymalizacji, otrzymuje się wektor przyszłych przyrostów sterowań. Z tego wektora wybierane są odpowiednie elementy i używane do regulacji. W następnej iteracji algorytmu, powyższa procedura jest powtarzana, zaczynając od punktu 1.



Rys. 1. Schemat podstawowej wersji algorytmu FDMC

Istnieje możliwość opracowania algorytmu FDMC w prostszy sposób. Jest bowiem wystarczające pozyskanie odpowiedzi skokowych obiektu z okolic kilku punktów pracy. Funkcje przynależności natomiast można dobrać korzystając z wiedzy eksperta. Gdy już dysponuje się odpowiedziami skokowymi, można je zastosować jako modele lokalne w rozmytym modelu obiektu. Wtedy, w każdej iteracji algorytmu, wystarczy otrzymać współczynniki odpowiedzi skokowych dla bieżących wartości wejść i wyjść obiektu korzystając z wnioskowania rozmytego. Punkt 2 uprzednio opisanego algorytmu nie więc jest już potrzebny, natomiast punkty 3 i 4 pozostają bez zmian (rys. 2).



Rys. 2. Schemat uproszczonego algorytmu FDMC

Metoda syntezy rozważanego algorytmu FDMC została więc znacznie uproszczona. Nie ma bowiem potrzeby otrzymywania skomplikowanego modelu obiektu regulacji, gdyż wystarczy pozyskanie kilku odpowiedzi skokowych. Sam algorytm działa zaś szybciej, ponieważ odpowiedź skokowa potrzebna do sformułowania problemu optymalizacji w każdej iteracji algorytmu, jest otrzymywana bezpośrednio po wykonaniu wnioskowania.

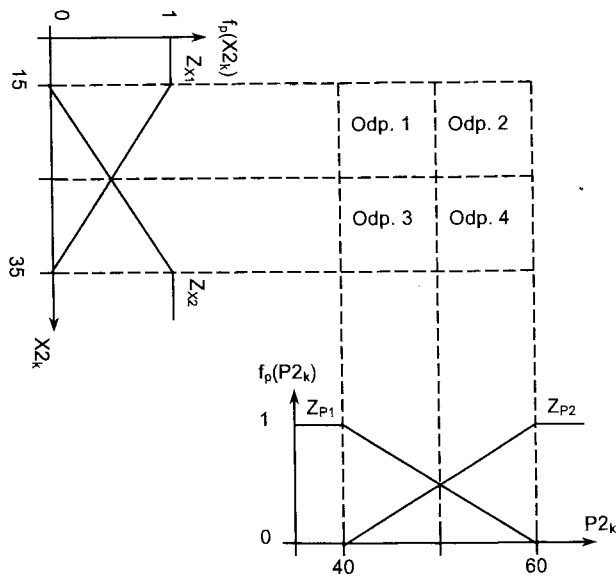
Uwaga: Ze względu na nieliniowość obiektu, po ewentualnym zastąpieniu modeli lokalnych w modelu (2) ich odpowiedziami skokowymi, nie otrzyma się algorytmu działającego w sposób identyczny z algorytmem pierwotnym (wykorzystującym model Takagi–Sugeno z modelami lokalnymi w postaci równań różnicowych).

Skuteczność zaproponowanego podejścia została przetestowana w układzie sterowania wyparki i porównana z przypadkiem zastosowania konwencjonalnego algorytmu DMC. Otrzymane wyniki przedstawiono w następnym rozdziale.

3. EKSPERYMENTY SYMULACYJNE

3.1. Obiekt regulacji

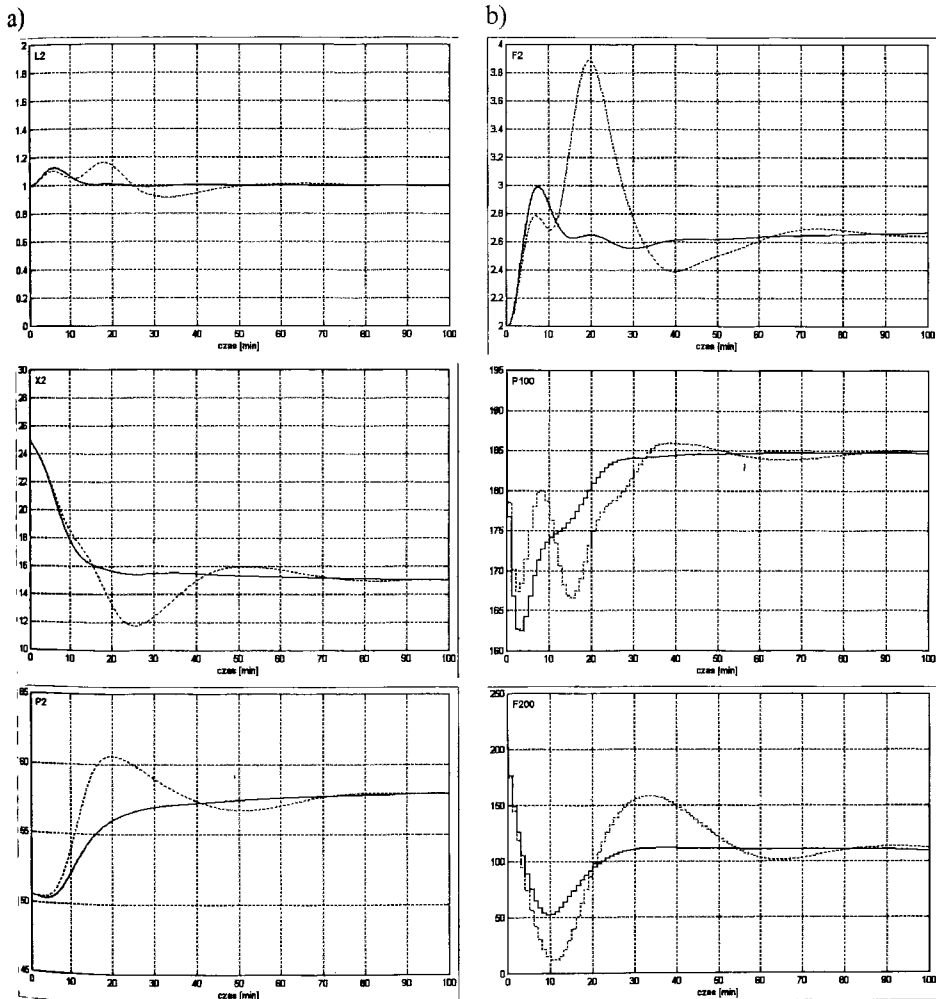
Obiektem regulacji jest wyparka opisana w [12], ze stabilizacją jednej z wielkości regulowanych regulatorem PI zaproponowanym w tej pracy. Obiekt ten był przedmiotem badań i został opisany w innych publikacjach, dlatego tutaj ograniczymy się do jego krótkiego przedstawienia. Wielkości regulowane obiektu to: $L2$ – poziom cieczy w separatorze (przyjęto, że jest on stabilizowany wokół wartości $L2_{zad} = 1,0$ m za pomocą regulatora PI o nastawach $K_p = 5,6$ oraz $T_i = 8,84$ min), $X2$ – skład produktu, $P2$ – ciśnienie w wyparce. Wielkości sterujące są następujące: $F2$ – przepływ produktu (jest to wielkość używana do stabilizacji poziomu $L2$), $P100$ – ciśnienie pary, $F200$ – przepływ wody chłodzącej. Wielkości zakłócające to: $F1$ – dopływ surowca, $X1$ – skład surowca, $T1$ – temperatura surowca, $F3$ – recykl, $T200$ – temperatura wody chłodzącej. Oznaczenia przyjęto takie same, jak w [12], a ponadto tak, jak w tamtej pracy, na wejściach sterujących oraz na wejściu zmiennej $F3$ dodano inercje o stałych czasowych $T_{in} = 1,2$ min. W niniejszej pracy, jeśli nie zasygnalizowano, że jest inaczej, przyjęto następujące stałe wartości zakłóceń: $F1_0 = 10$ kg/min, $X1_0 = 5$ %, $T1_0 = 40$ °C, $F3_0 = 50$ kg/min, $T200_0 = 25$ °C.



Rys. 3. Funkcje przynależności regulatora rozmytego

3.2. Porównanie działania regulatora FDMC i regulatora konwencjonalnego

Regulator konwencjonalny DMC został zaprojektowany dla odpowiedzi z okolicy punktu równowagi $X2 = 25\%$, $P2 = 50,5$ kPa. W przypadku rozmytego regulatora DMC, odpowiedzi otrzymano z okolic czterech punktów pracy: $X2 = 15\%$, $P2 = 40$ kPa; $X2 = 15\%$, $P2 = 60$ kPa; $X2 = 35\%$, $P2 = 40$ kPa; $X2 = 35\%$, $P2 = 60$ kPa. Przyjęte funkcje przynależności są pokazane na rys. 3. W przypadku obydwu regulatorów przyjęto takie same wartości parametrów dostrajalnych $\kappa_1 = \kappa_2 = 1$ i $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,1$.



Rys. 4. Odpowiedzi układów regulacji z regulatorami DMC (linia przerywana) i FDMC (linia ciągła) na skoki wartości zadanych do $X2_{zad} = 15\%$ i $P2_{zad} = 58$ kPa;
a) wyjścia od góry: $L2$, $X2$ i $P2$, b) sterowania od góry: $F2$, $P100$ i $F200$

W przypadku większości wymuszeń, jeśli nie powodowały one znacznego odejścia od punktu pracy $X2 = 25\%$, $P2 = 50,5$ kPa, odpowiedzi otrzymane w układach regulacji z regulatorem konwencjonalnym i z regulatorem rozmytym były podobne, a różnice były

dostrzegalne głównie w przebiegach sterowań. Inna sytuacja miała miejsce dla sytuacjach odchodzenia od punktu, dla którego został zaprojektowany regulator konwencjonalny.

Przypadek skoku wartości zadanej ciśnienia $P2$ w górę, przy jednoczesnym skokowym zmniejszeniu wartości zadanej składu $X2$ okazał się najbardziej wymagający dla regulatora konwencjonalnego. Prawdopodobnie dlatego właśnie on posłużył jako przykład w pracy [5]. Przebiegi otrzymane w tej sytuacji pokazano na rys. 4. Linią przerywaną oznaczono przebiegi uzyskane w układzie regulacji z regulatorem konwencjonalnym, zaś linią ciągłą – z regulatorem rozmytym. W przypadku regulatora konwencjonalnego występuje wyraźnie większe przeregulowanie, a ponadto większe są zmiany sterowań.

3.3. Użycie w warstwowym układzie sterowania

Sprawdzono także działanie regulatora w warstwowej strukturze sterowania, mając na celu zbadanie możliwości poprawy jakości sterowania w przypadku występowania zakłóceń o zmienności porównywalnej z dynamiką obiektu. Tej tematyce został poświęcony artykuł [4], w którym rozważane są różnego rodzaju modyfikacje klasycznej struktury warstwowej. W niniejszej pracy, ze względu na chęć zachowania prostoty regulatora, korzystano ze stosunkowo częstego (co 10 min) powtarzania optymalizacji ekonomicznego wskaźnika jakości. Ponadto zbadano możliwość poprawy jakości sterowania dzięki użyciu zmiennej wejściowej $F3$ jako dodatkowego sterowania. Poniżej zostały przedstawione szczegóły eksperymentów.

Przyjęto, że regulator działa w strukturze warstwowej, w której w warstwie optymalizacji jest minimalizowany ekonomiczny wskaźnik jakości:

$$Je = c_1 \cdot P100 - c_2 \cdot F2, \quad (3)$$

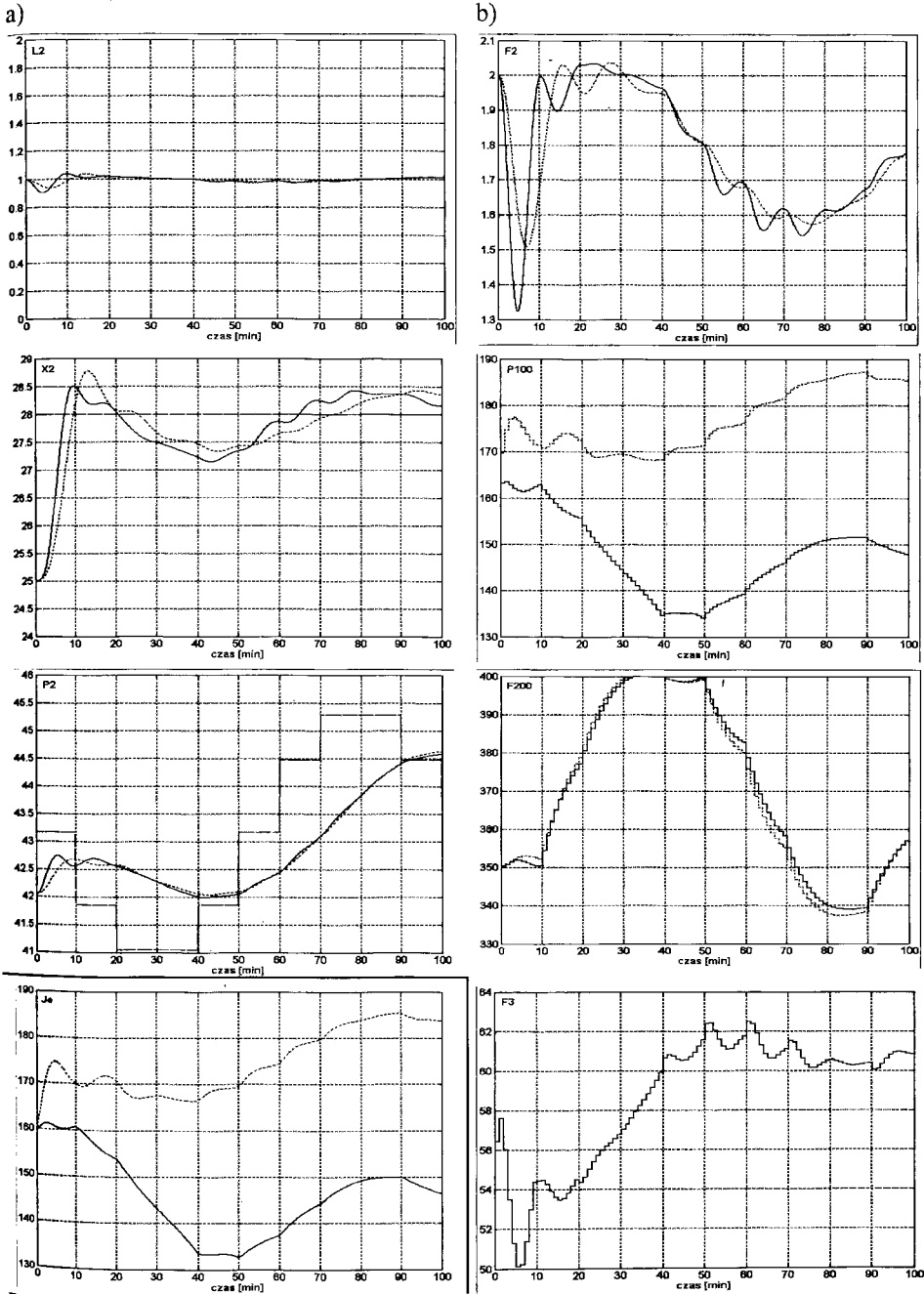
gdzie $c_1 = 1$ i $c_2 = 1$ są cenami, pierwszy składnik oznacza więc koszt energii dostarczonej do procesu, zaś drugi składnik – zysk z produkcji. Model użyty w warstwie optymalizacji jest nieliniowym modelem statycznym opracowanym na podstawie modelu dynamicznego podanego w [12]. Ponadto, w zadaniu optymalizacji zostały uwzględnione ograniczenia nałożone na wartości sterowań:

$$P100_{\min} \leq P100 \leq P100_{\max}, F200_{\min} \leq F200 \leq F200_{\max}, \quad (3a)$$

gdzie $P100_{\min} = 0$ kPa, $P100_{\max} = 400$ kPa, $F200_{\min} = 0$ kg/min, $F200_{\max} = 400$ kg/min [12]. Uwzględniono także ograniczenie nałożone na wartość stężenia $X2$ pożądanego składnika w strumieniu produktu:

$$X2_{\min} + R \leq X2, \quad (3b)$$

gdzie przyjęto $X2_{\min} = 25$ %; wartość ta wynika z wymagań odbiorcy produktu (jakość produktu nie może być gorsza niż założono), $R = 3$ % jest to rezerwa związana ze zmiennością sygnału $X2$, spowodowaną działaniem regulatora. Warto zauważyć, że gdyby rezerwy nie wprowadzono, trzeba byłoby uwzględniać odpowiednie ograniczenia w regulatorze, co doprowadziłoby do jego komplikacji (konieczności rozwiązywania zadania optymalizacji nieliniowej), a w obliczu błędów modelowania i tak nie gwarantowałyby uniknięcia przekroczenia ograniczenia.



Rys. 5. Odpowiedzi układów sterowania z regulatorami FDMC bez (linia przerywana) i ze (linia ciągła) zmienną $F3$ użytą do sterowania a) wyjścia od góry: $L2$, $X2$ i $P2$ oraz wskaźnik jakości Je , b) sterowania od góry: $F2$, $P100$, $F200$ i $F3$

W warstwie regulacji użyto z początku taki sam regulator rozmyty DMC, jak w rozdz. 3.2. Algorytm ten uwzględnia przy tym ograniczenia nałożone na wartości sterowań (3a) dla każdej chwili z horyzontu sterowania.

Podczas eksperymentów przyjęto, że skład surowca X_1 podlega wahaniom opisanym wzorem:

$$X_1 = X_{10} + 0,5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t / 1000). \quad (4)$$

Uzyskane wyniki zostały na rys. 5 oznaczone linią przerywaną. Otrzymana wartość wskaźnika jakości (wyznaczanego, jako suma jego wartości chwilowych podzielona przez liczbę iteracji) $J_e = 174,7448$.

W celu poprawienia efektywności ekonomicznej procesu, postanowiono wykorzystać zmienną wejściową F_3 jako dodatkowe sterowanie. Zauważmy, że konieczna modyfikacja regulatora jest w tym przypadku stosunkowo prosta i sprowadza się do pozyskania odpowiedzi skokowych obiektu na zmianę wartości zmiennej F_3 z okolic czterech punktów pracy oraz uwzględnieniu podczas formułowania problemu optymalizacji (1) dodatkowej zmiennej sterującej. Przebiegi otrzymane po przeprowadzeniu tej modyfikacji oznaczono na rys. 5 linią ciągłą. Tym razem wartość wskaźnika jakości $J_e = 145,9248$. Otrzymano więc znaczną poprawę działania układu sterowania.

4. PODSUMOWANIE

W zaprezentowanym przykładzie zastosowano najmniej skomplikowaną strukturę algorytmu rozmytego DMC i zaproponowaną metodę projektowania takiego regulatora. Metoda ta polega na pozyskaniu odpowiedzi skokowych z okolic kilku punktów pracy, a następnie zastosowaniu rozmytego algorytmu FDMC, opracowanego na podstawie otrzymanych odpowiedzi skokowych.

Warto zauważyć, że pomimo dużej prostoty zarówno samego regulatora, jak i metody jego projektowania, otrzymano poprawę jakości regulacji w stosunku do układu regulacji z regulatorem konwencjonalnym.

Algorytm FDMC z powodzeniem zastosowano także w układzie sterowania z optymalizacją punktu pracy. Algorytm ten może zostać użyty w różnych konfiguracjach, umożliwiając poprawę ekonomicznego wskaźnika produkcji i nie komplikując przy tym całej struktury sterowania. Korzystając z zaproponowanej metody, algorytm FDMC można w stosunkowo prosty sposób modyfikować. Jest to przydatne szczególnie jeśli jest możliwe użycie którejś ze zmiennych wejściowych jako dodatkowej zmiennej sterującej (a zabieg taki jest uzasadniony ekonomicznie).

LITERATURA

- [1] E.F. Camacho, C. Bordons: *Model Predictive Control in the process industry*; Springer, 1995.
- [2] C.R. Cutler, B.L. Ramaker: *Dynamic Matrix Control – a computer control algorithm*; Proc. JACC, San Francisco, Aug. 13–15, 1979.
- [3] C.E. Garcia, A.M. Morshedi: *Quadratic programming solution of Dynamic Matrix Control (QDMC)*; Chem. Eng. Comm., vol. 46, pp. 73–78, 1986.

- [4] M. Ławryńczuk, P. Marusak, P. Tatjewski: *Bieżąca optymalizacja punktu pracy procesów regulowanych algorytmem predykcyjnym*; Materiały XV Krajowej Konferencji Automatyki, str. 291–296, Warszawa 27-30 czerwca 2005.
- [5] J.M. Maciejowski: *Predictive Control with constraints*; Prentice Hall 2002.
- [6] P. Marusak: *Regulacja predykcyjna obiektów nieliniowych z zastosowaniem techniki DMC i modelowania rozmytego*; Rozprawa doktorska, Warszawa 2002.
- [7] P. Marusak, J. Pułaczewski: *Szczególne zalety algorytmu regulacji Dynamic Matrix Control (DMC)*; *Pomiary Automatyka Kontrola* 12'99, str. 39–43.
- [8] P. Marusak, P. Tatjewski: *Fuzzy Dynamic Matrix Control algorithms for nonlinear plants*; Proc. 6th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2000, pp. 749–754, Międzyzdroje 2000.
- [9] P. Marusak, P. Tatjewski: *Stability analysis of nonlinear control systems with fuzzy DMC controllers*; Proc. IFAC Workshop on Advanced Fuzzy and Neural Control AFNC'01, pp. 21–26, Valencia, Spain, 2001.
- [10] H. Michalska, D.Q. Mayne: *Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems*; *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 38, pp. 1623–1632, 1993.
- [11] M. Morari, J.H. Lee: *Model predictive control: past, present and future*; *Computers and Chemical Engineering*, 23, pp. 667–682, 1999.
- [12] R.B. Newell, P.L. Lee: *Applied process control – a case study*; Prentice Hall, 1989.
- [13] S.J. Qin, T. A. Badgwell: *A survey of industrial model predictive control technology*; *Control Engineering Practice*, vol. 11, pp. 733–764, 2003.
- [14] P.O. Scokaert, D.Q. Mayne, J.B. Rawlings: *Suboptimal Model Predictive Control (feasibility implies stability)*; *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 44, no. 3, pp. 648–654, 1999.
- [15] T. Takagi, M. Sugeno: *Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control*; *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 15, pp. 116–132, 1985.
- [16] K. Tanaka, M. Sugeno: *Stability analysis and design of fuzzy control systems*; *Fuzzy Sets and Systems* 45, pp. 135–156, 1992.
- [17] P. Tatjewski: *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*; Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2002.