

Wpływanie kształtem trajektorii referencyjnej na działanie układów regulacji predykcyjnej

Robert Nebeluk, Piotr Marusak

Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

Streszczenie: Zastosowanie algorytmów regulacji predykcyjnej MPC do regulacji wielu procesów nieliniowych, o różnym stopniu trudności, często umożliwia osiągnięcie bardzo dobrej jakości regulacji. Jest to możliwe ze względu na odpowiednie uwzględnienie w strukturze algorytmu informacji uzyskanych z modelu procesu. Do formułowania zadania optymalizacji dla algorytmów regulacji predykcyjnej najczęściej zakładana jest stała trajektoria referencyjna dla całego horyzontu predykcji. W artykule przedstawiono możliwości poprawy jakości regulacji przez zastosowanie trajektorii referencyjnej zmiennej na horyzoncie predykcji. Podczas porównywania jakości regulacji z wykorzystaniem trajektorii referencyjnych o różnej postaci, wzięto pod uwagę dwie wielkości. Pierwszą z nich jest czas narastania wyjścia obiektu regulacji, a drugą – przeregulowanie. Badania prowadzono w układach regulacji dwóch obiektów: nieminimalnofazowego obiektu liniowego oraz nieliniowego reaktora polimeryzacji. Do regulacji w przypadku pierwszego obiektu, zastosowano algorytm DMC, a w przypadku drugiego – algorytm bazujący na modelu nieliniowym, z nieliniową predykcją i linearyzacją (NDMC-NPL). Przedstawione wyniki dobrze ilustrują możliwości wpływania, za pomocą trajektorii referencyjnych o różnych kształtach, na poprawę jakości regulacji oferowanej przez algorytmy predykcyjne.

Słowa kluczowe: trajektoria referencyjna, regulacja predykcyjna, regulacja nieliniowa, obiekty nieliniowe, jakość regulacji

1. Wprowadzenie

Algorytmy regulacji predykcyjnej MPC (ang. *Model Predictive Control*) są algorytmami, które wykorzystują model procesu do predykcji jego zachowania w przyszłości. W przypadku silnie nieliniowych obiektów regulacji, z dużym opóźnieniem, ograniczonymi sterowaniami lub wyjściami, zastosowanie algorytmów MPC zwykle przynosi dobrą jakość regulacji, co wynika z dostępu algorytmów do informacji o dynamice procesu. Algorytmy regulacji predykcyjnej również znają trajektorię zadaną wartości wyjść regulowanych oraz mają możliwość wprowadzenia trajektorii referencyjnej, która jest w stanie modyfikować działanie algorytmu w celu poprawy jakości regulacji. Pojęcie trajektorii referencyjnej pojawiało się już we wczesnych artykułach dotyczących regulacji predykcyjnej [10]. W niniejszym artykule ta ostatnia cecha algorytmów regulacji predykcyjnej będzie poddana szerszym badaniom. Algorytmy rozważane w artykule to wersje analityczne, mające mniejsze, w porów-

naniu z algorytmami numerycznymi, możliwości wpływania na zachowanie układu regulacji. Stąd wynika zainteresowanie autorów użyciem mechanizmu trajektorii referencyjnej jako dodatkowej możliwości strojenia takich algorytmów, rozszerzającej oferowane przez nie funkcjonalności.

Znalezienie optymalnej trajektorii referencyjnej jest częstym problemem w robotyce. W artykule [4] jest to znalezienie trajektorii ruchu robota z punktu A do punktu B minimalizującej czas i wydatek energetyczny do wykonania przemieszczenia. Do wyznaczenia trajektorii referencyjnej jest użyte odpowiednio sformułowane zadanie optymalizacji z ograniczeniami. Istnieją publikacje, w których generacja trajektorii referencyjnej dla robota jest wykonana na podstawie zdjęć otrzymanych przy pomocy kamery zainstalowanej na robocie [6] lub uporządkowanej listy punktów [9]. Rozwiązywane są również problemy związane z testowaniem utworzonego modelu robota przy wprowadzeniu wygenerowanej trajektorii referencyjnej [7]. Możliwości wykorzystania wspomnianego mechanizmu w układach automatycznej regulacji liniowych obiektów są opisane w pracy [5]. Ponadto opisywana jest generacja trajektorii referencyjnej przez rozwiązanie problemu znalezienia najkrótszej ścieżki, stosując algorytm Dijkstry, którą później można zastosować w algorytmach MPC [8].

Podczas badań przetestowano różne typy trajektorii referencyjnych. Eksperymenty przeprowadzono dla trajektorii o różnym kształcie. W pierwszej kolejności zastosowano typowe trajektorie o postaci inercyjnej, a następnie – trajektorie nietypowe, skokowo zmienne, odpowiednio dobrane do każdego z obiektów.

Autor korespondujący:

Piotr Marusak, P.Marusak@ia.pw.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 04.02.2019 r., przyjęty do druku 28.03.2019 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

Użycie przedstawionych trajektorii ma za zadanie pokazanie możliwości wpływu na cechy sygnału wyjściowego. Eksperymenty przeprowadzono dla obiektu liniowego oraz obiektu nieliniowego (reaktora polimeryzacji).

W rozdziale 2 przedstawiono algorytmy regulacji predykcyjnej DMC oraz algorytm typu DMC bazujący na modelu nieliniowym, z nieliniową predykcją i linearyzacją (NDMC-NPL). W rozdziale 3 omówiono pierwszy obiekt regulacji – obiekt liniowy o trudnej dynamice oraz wyniki badań działania układu regulacji z zaimplementowanymi zmiennymi trajektoriami referencyjnymi. W rozdziale 4 przedstawiono nieliniowy obiekt regulacji (reaktor polimeryzacji) wraz z eksperymentami z wykorzystaniem trajektorii referencyjnych o różnym kształcie, jak w rozdziale 3. Artykuł kończy podsumowanie otrzymanych wyników i wnioski z eksperymentów.

2. Algorytmy regulacji predykcyjnej

Algorytmy regulacji predykcyjnej w danej chwili k przewidują zachowanie procesu na wiele chwil do przodu, liczbę tych chwil nazywa się horyzontem predykcyjnym N ; natomiast ile zmian sterowania może nastąpić na tym horyzoncie określane jest jako horyzont sterowania N_u . Algorytmy MPC wykorzystują do predykcyjnego modelu obiektu regulacji, stąd skrót nazw grup tych algorytmów. Przyszłe sterowania obliczane są na podstawie rozwiązywania zadania optymalizacji, czyli minimalizacji następującego wskaźnika jakości [1]:

$$\min_{\Delta u} \left\{ \sum_{i=1}^N (y_{k+i|k}^{ref} - y_{k+i|k})^2 + \lambda \sum_{i=0}^{N_u-1} \Delta u_{k+i|k}^2 \right\} \quad (1)$$

gdzie Δu jest wektorem przyszłych (szukanych) przyrostów sterowania $\lambda u_{k+i|k}$, $y_{k+i|k}$ jest przewidywaną w bieżącej chwili k wartością wyjścia obiektu dla przyszłej chwili $k+i$, wyznaczaną na podstawie modelu obiektu regulacji, $\lambda \geq 0$ jest współczynnikiem ważącym przyszłe przyrosty sterowania, $y_{k+i|k}^{ref}$ to elementy trajektorii referencyjnej.

Dokonywana jest więc minimalizacja sumy przyszłych uchybów regulacji wyznaczonych na podstawie różnicy między założoną trajektorią referencyjną a trajektorią przewidywanych wartości wyjść procesu, na horyzoncie predykcyjnym, z uwzględnieniem kary za zmiany sygnału sterującego (drugi składnik minimalizowanego wskaźnika jakości). Podczas badań sprawdzano wpływ zmiennej trajektorii referencyjnej y^{ref} na horyzoncie predykcyjnym na jakość regulacji. Trajektorja referencyjna będzie zatem wprowadzana do wskaźnika jakości jako następujący wektor:

$$y^{ref} = \begin{bmatrix} y_1^{ref} \\ y_2^{ref} \\ \vdots \\ y_N^{ref} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Kryteria porównawcze, według których będzie oceniana jakość regulacji, to przeregulowanie oraz czas narastania przebiegów wielkości regulowanych. Wielkość przeregulowania jest obliczana ze wzoru [11]:

$$y_p = \frac{y(t_m) - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie: $y(\infty)$ – wartość wyjścia w stanie ustalonym, t_m – czas wystąpienia maksimum, czyli czas potrzebny, aby wyjście osiągnęło pierwszy szczyt, $y(t_m)$ – maksymalna wartość wyjścia.

Przyjęto, że czas narastania t_n jest czasem potrzebnym, aby wyjście wzrosło od 0 do 100% swojej wartości końcowej [12].

2.1. Algorytm regulacji DMC

Algorytm regulacji predykcyjnej DMC (ang. *Dynamic Matrix Control*) po raz pierwszy został zastosowany w przemyśle petrochemicznym i tam odniósł największy sukces. Regulator DMC używa liniowego modelu obiektu regulacji w postaci rzędnych odpowiedzi skokowej. Model ten opisany jest więc równaniem [1]:

$$y_k^M = \sum_{i=1}^{D-1} s_i \cdot \Delta u_{k-1} + s_D \cdot u_{k-D} \quad (4)$$

gdzie y_k^M – wyjście modelu regulacji w chwili k , s_i – rzędne odpowiedzi skokowej obiektu ($i = 1, 2, \dots, D$), D – horyzont dynamiki obiektu, który jest równy liczbie okresów próbkowania, po upływie których można odpowiedź obiektu uznać za ustaloną.

Przewidywane wartości wyjścia obiektu są obliczane ze wzoru [1]:

$$y_{k+i|k} = \sum_{n=1}^i s_n \cdot \Delta u_{k-n+1} + \sum_{n=i+1}^{D-1} s_n \cdot \Delta u_{k-n+1} + s_D \cdot \Delta u_{k-D+i} + d_k \quad (5)$$

gdzie $d_k = y_k - y_k^M$ jest błędem typu DMC i uwzględnia niedokładność modelowania oraz działanie zakłóceń niemierzalnych.

Przewidywane wartości wyjścia można zapisać w postaci wektorowo-macierzowej [1]:

$$y = y^0 + M \cdot \Delta u \quad (6)$$

gdzie $M \cdot \Delta u$ – odpowiedź wymuszona obiektu regulacji zależna od przyszłych przyrostów sygnału sterującego Δu , M jest macierzą dynamiczną:

$$M = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ s_2 & s_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ s_N & s_{N-1} & \dots & s_{N-N_u+2} & s_{N-N_u+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

y^0 to odpowiedź swobodna, która zawiera wartości wyjścia obiektu otrzymane przy założeniu braku zmian sterowania na horyzoncie predykcyjnym, y – przewidywane wartości wyjścia obiektu na horyzoncie predykcyjnym.

Odpowiedź swobodna obiektu można obliczyć ze wzoru [1]:

$$y^0 = y_k + M^P \cdot \Delta u^P \quad (8)$$

gdzie

$$M^P = \begin{bmatrix} s_2 - s_1 & s_3 - s_2 & \dots & s_{D-1} - s_{D-2} & s_D - s_{D-1} \\ s_2 - s_1 & s_4 - s_2 & \dots & s_D - s_{D-2} & s_D - s_{D-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ s_{N+1} - s_1 & s_{N+2} - s_2 & \dots & s_D - s_{D-2} & s_D - s_{D-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Δu^P – wektor przeszłych przyrostów sterowania:

$$\Delta u^P = \begin{bmatrix} \Delta u_{k-1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k-D+1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

\mathbf{y}_k – N -elementowy wektor wyjścia:

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} y_k \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} \quad (11)$$

Analityczne rozwiązanie zadania optymalizacji (1) można przedstawić dla regulatora DMC następująco [1]:

$$\Delta \mathbf{u} = \left(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M} + \lambda \cdot \mathbf{I} \right)^{-1} \cdot \mathbf{M}^T \cdot \left(\mathbf{y}^{ref} - \mathbf{y}^0 \right) \quad (12)$$

gdzie: \mathbf{I} – macierz jednostkowa.

W wyniku rozwiązania powyższego zadania, otrzymany zostanie wektor przyszłych zmian sterowania $\Delta \mathbf{u}$. Pierwszy element tego wektora służy do wyznaczenia sterowania u_k , następnie optymalizacja jest powtarzana w kolejnej chwili próbkowania. Uwzględnienie ograniczeń w algorytmie analitycznym jest stosunkowo proste ze względu na możliwość wykorzystania mechanizmu rzutowania sterowań na zbiór ograniczeń, który opiera się na następujących regułach [1]:

dla przyrostów sterowania:

– jeśli $u_{k/k} < u_{\min}$, to $u_{k/k} = u_{\min}$;

– jeśli $u_{k/k} > u_{\max}$, to $u_{k/k} = u_{\max}$;

oraz dla wartości sterowania:

– jeśli $u_{k-1} + u_{k/k} < u_{\min}$, to $u_{k/k} = u_{\min} - u_{k-1}$;

– jeśli $u_{k-1} + u_{k/k} > u_{\max}$, to $u_{k/k} = u_{\max} - u_{k-1}$.

W zaprezentowany sposób można łatwo zmodyfikować przyrosty sterowania generowane przez regulator predykcyjny.

2.2. Algorytm regulacji NDMC-NPL

W układzie regulacji nieliniowego reaktora polimeryzacji zastosowano, bazujący na modelu nieliniowym, algorytm typu DMC z nieliniową predykcją i linearyzacją (NDMC-NPL). Zasada działania algorytmu jest podobna do algorytmu DMC z tą różnicą, że w każdej iteracji dokonywana jest linearyzacja modelu nieliniowego, służąca do otrzymania macierzy dynamicznej, oraz wyznaczana jest odpowiedź swobodna obiektu na podstawie modelu nieliniowego.

Macierz dynamiczna \mathbf{M}^k zmienia się więc w każdej iteracji algorytmu i jest otrzymywana ze wzoru:

$$\mathbf{M}^k = \begin{bmatrix} s_1^k & 0 & \dots & 0 & 0 \\ s_2^k & s_1^k & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ s_N^k & s_{N-1}^k & \dots & s_{N-N_a+2}^k & s_{N-N_a+1}^k \end{bmatrix} \quad (13)$$

gdzie s_i^k – rzędne odpowiedzi skokowej zlinearyzowanego w bieżącej chwili k obiektu.

Odpowiedź swobodna jest obliczana iteracyjnie w następujący sposób:

$$y_{k+1|k}^0 = g(y_k, y_{k-1}, \dots, y_{k-n_A}, u_{k-\tau}, u_{k-n_B}) + d_k$$

$$y_{k+2|k}^0 = g(y_{k+1|k}^0, y_k, \dots, y_{k-n_A+1}, u_{k-\tau+1}, u_{k-n_B+1}) + d_k$$

⋮

$$y_{k+N|k}^0 = g(y_{k+N-1|k}^0, y_{k+N-2|k}^0, \dots, y_{k-n_A+N-1}, u_{k-\tau+N-1}, u_{k-n_B+N-1}) + d_k$$

(14)

gdzie τ jest opóźnieniem sygnału sterującego. Pierwszy element trajektorii swobodnej jest więc obliczany na podstawie aktualnego pomiaru wyjścia y_k , wartości wyjścia i sterowania w przeszłych chwilach próbkowania oraz błędu typu DMC. Kolejne elementy są wyznaczane podobnie z tą różnicą, że zamiast wartości wyjścia w przyszłych chwilach próbkowania (z horyzontu predykcji), wykorzystywane są odpowiednie, już wyznaczone elementy trajektorii swobodnej z poprzednich chwil z horyzontu predykcji.

Poszczególne kroki algorytmu można przedstawić następująco:

1. Inicjalizacja;
2. Linearyzacja modelu nieliniowego;
3. Wyznaczenie macierzy dynamicznej na podstawie modelu zlinearyzowanego;
4. Obliczenie odpowiedzi swobodnej na podstawie modelu nieliniowego;
5. Sformułowanie zadania optymalizacji kwadratowej (1) oraz rozwiązanie go metodą analityczną, korzystając ze wzoru:

$$\Delta \mathbf{u} = \left(\left(\mathbf{M}^k \right)^T \cdot \mathbf{M}^k + \lambda \cdot \mathbf{I} \right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{M}^k \right)^T \cdot \left(\mathbf{y}^{ref} - \mathbf{y}_k^0 \right)$$

gdzie

$$\mathbf{y}_k^0 = \begin{bmatrix} y_{k+1|k}^0 \\ \vdots \\ y_{k+N|k}^0 \end{bmatrix}$$

6. Wyznaczenie nowego sterowania:

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k \quad (15)$$

3. Eksperymenty w układzie regulacji obiektu nieminimalnofazowego

3.1. Opis obiektu

Model obiektu liniowego opisany jest następującą transmitancją operatorową [2]:

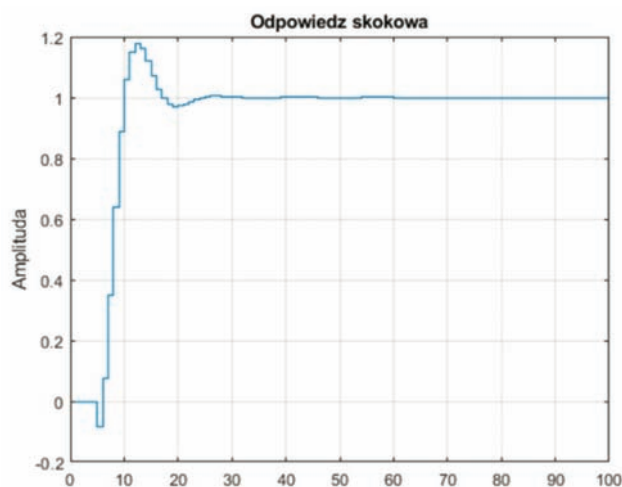
$$G(s) = \frac{-s+1}{4s^2+2s+1} e^{-4s} \quad (16)$$

Przez zastosowanie transformaty Z przy założonym okresie próbkowania $T_p = 1$ s, otrzymano model obiektu o postaci:

$$G(z) = \frac{-0,08427z + 0,277}{z^2 - 1,414z + 0,6065} z^{-4} \quad (17)$$

Na rys. 1 przedstawiono pozyskaną odpowiedź skokową obiektu regulacji, którą wykorzystano w algorytmie DMC. Cechami charakterystycznymi obiektu regulacji jest opóźnienie $\tau = 4$ s, przejściowe dążenie odpowiedzi w przeciwnym kierunku do kierunku dążenia za wartością zadaną spowodowane dodatnim zerem oraz oscylacyjny charakter odpowiedzi. Ze względu na te właściwości obiekt jest stosunkowo trudny do regulacji mimo braku nieliniowości. W przypadku realizacji układu regulacji dla tego obiektu pomijany będzie błąd modelowania, zatem jako obiekt regulowany będzie przyjęty model liniowy, który wyznaczony został z dyskretniej postaci transmitancji modelu obiektu (17):

$$y(k) = -0,0843u(k-5) + 0,277u(k-6) + 1,4138y(k-1) - 0,6065y(k-2) \quad (18)$$



Rys. 1. Odpowiedź skokowa obiektu liniowego
Fig. 1. Step response of the linear control plant

3.2. Badanie wpływu kształtu trajektorii referencyjnej na jakość regulacji

Regulator DMC dla obiektu regulacji został zaimplementowany w wersji analitycznej, przedstawionej w rozdz. 2.1. Przyjęto następujące parametry regulatora: $N = 20$, $N_u = 10$, $\lambda = 2$. Dobre parametry regulatora umożliwiły uzyskanie najkrótszego czasu ustalenia. Eksperymenty ze zmianą kształtu trajektorii referencyjnej będą przeprowadzone dla skoku wartości zadanej $y^{zad} = 10$.

Pierwsza rozważana postać trajektorii referencyjnej jest następująca:

$$G_{ref}(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (19)$$

Jest to inercja I rzędu, gdzie K jest równe różnicy między wartością zadaną y^{zad} a wartością początkową wyjścia obiektu y^p , natomiast będzie prowadzona analiza zmiany jakości regulacji dla różnych wartości stałej czasowej T . W tabeli 1 zamieszczono wyniki z tego badania.

Tab. 1. Porównanie jakości regulacji dla różnych parametrów trajektorii referencyjnej (19)

Tab. 1. Comparison of control quality for different parameters of reference trajectory (19)

Rodzaj trajektorii	y_p [%]	t_n [s]	Parametry
stała	3,3405	12	-
zmienna (19)	3,3404	12	$T = 0,1$ s
zmienna (19)	3,0482	12	$T = 0,5$ s
zmienna (19)	2,8201	12	$T = 0,6$ s
zmienna (19)	2,5083	13	$T = 0,7$ s
zmienna (19)	1,81	13	$T = 1$ s
zmienna (19)	0,0679	24	$T = 1,6$ s

Czas narastania zwiększał się wraz ze wzrostem stałej czasowej T , ale malała również wielkość przeregulowania. Najmniejszą wielkość przeregulowania uzyskano dla największej stałej czasowej równej $T = 1,6$ s. Zauważmy, że do pewnego stopnia jest możliwe zmniejszenie wielkości przeregulowania przy braku zmiany czasu narastania, co można obserwować do wartości stałej czasowej $T = 0,6$ s.

Następna rozważana trajektoria to inercja II rzędu:

$$G_{ref}(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (20)$$

W tej trajektorii K również jest równe wartości zadanej y^{zad} oraz są dwie stałe czasowe T_1 oraz T_2 , które będą zmieniane podczas badań. W tabeli 2 przedstawiono wyniki otrzymane dla tego przypadku.

Badania dla tej trajektorii zaczęto od stałej czasowej $T_1 = 0,6$ s ze względu na poprawę jakości regulacji, która miała miejsce przy omawianiu trajektorii (19). Zastosowanie $T_2 = 0,1$ s zmniejszyło dodatkowo wielkość przeregulowania w porównaniu z zastosowaniem trajektorii (19). Czas narastania nie zmienił się.

Tab. 2. Porównanie jakości regulacji dla różnych parametrów trajektorii referencyjnej (20)

Tab. 2. Comparison of control quality for different parameters of reference trajectory (20)

Rodzaj trajektorii	y_p [%]	t_n [s]	Parametry
stała	3,3405	12	-
zmienna (20)	2,7161	12	$T_1 = 0,6$ s, $T_2 = 0,1$ s
zmienna (20)	2,5640	13	$T_1 = 0,6$ s, $T_2 = 0,2$ s
zmienna (20)	2,3696	13	$T_1 = 0,7$ s, $T_2 = 0,1$ s
zmienna (20)	2,9752	12	$T_1 = 0,5$ s, $T_2 = 0,1$ s
zmienna (20)	2,8588	12	$T_1 = 0,5$ s, $T_2 = 0,2$ s
zmienna (20)	2,6831	13	$T_1 = 0,5$ s, $T_2 = 0,3$ s

Następnie przeprowadzono eksperymenty dla pierwszej nietypowej postaci trajektorii, w celu zmniejszenia czasu narastania:

$$y_{(k)}^{ref} = \begin{cases} K \cdot y^{zad} & \text{dla } k < m \\ y^{zad} & \text{dla } k \geq m \end{cases} \quad (21)$$

W tym przypadku K jest parametrem nałożonym na wartość zadaną dla określonych chwil k . W tej trajektorii będą zmieniane parametry K oraz m , gdzie m jest zmienną określającą zakres elementów, które będą zmieniane w zależności od wartości parametru K . Wyniki uzyskane przy zastosowaniu tej postaci trajektorii referencyjnej zostały zamieszczone w tabeli 3. Celem tych testów było sprawdzenie, jak zmiana wartości oraz liczby zmienionych pierwszych elementów trajektorii referencyjnej wpłynie na jakość regulacji. Dla $m = 2$ i $K = 0,1$ uzyskano wydłużenie czasu narastania przy jednoczesnym zmniejszeniu wielkości przeregulowania. W przypadku zwiększenia wartości parametru K uzyskano lepszą jakość regulacji, więc kolejne eksperymenty wykonano ze zmienianym parametrem m . Dla $m = 3$ przeregulowane było najmniejsze, przy niezmienionym czasie narastania, więc przeprowadzono dla tego parametru dodatkowy eksperyment dla $K > 1$.

Tab. 3. Porównanie jakości regulacji dla różnych parametrów trajektorii referencyjnej (21)

Tab. 3. Comparison of control quality for different parameters of reference trajectory (21)

Rodzaj trajektorii	y_p [%]	t_n [s]	Parametry
stała	3,3405	12	–
zmienna (21)	3,2324	13	$K = 0,1, m = 2$
zmienna (21)	3,2245	12	$K = 0,9, m = 2$
zmienna (21)	2,6817	12	$K = 0,9, m = 3$
zmienna (21)	1,7089	13	$K = 0,9, m = 4$
zmienna (21)	3,9993	12	$K = 1,1, m = 3$

Dla tej trajektorii, mimo możliwości dodatkowego zmniejszenia wielkości przeregulowania dla parametrów $K = 0,9$ i $m = 3$ w porównaniu z zastosowaniem trajektorii (20), nie udało się skrócić czasu narastania. Nietypowa postać trajektorii pokazuje jednak dalsze możliwości poprawy jakości regulacji.

Ostatnia badana trajektoria referencyjna to:

$$y_{(k)}^{ref} = \begin{cases} K_1 \cdot y^{zad} & \text{dla } k < m \\ K_2 \cdot y^{zad} & \text{dla } k = m \\ y^{zad} & \text{dla } k > m \end{cases} \quad (22)$$

Podczas badań nad trajektoria (21) zmieniano wielkość przewidywanych uchybów regulacji z pierwszych chwil działania algorytmu. Obecnie rozważana jest postać trajektorii, w której następuje zwiększenie przewidywanych uchybów regulacji w określonym przedziale czasu, a następnie zmniejszenie uchybu regulacji w pojedynczej chwili z horyzontu predykcji. Zmieniane parametry trajektorii to K_1 i K_2 . Przyjęto parametr $m = 3$, w związku z poprawą jakości regulacji przy eksperymentach z trajektoria (21). W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań po zastosowaniu trajektorii (22). Podczas badań z wykorzystaniem tej trajektorii starano się wpłynąć korzystnie na czas narastania przez nadanie większej wartości parametrowi K_1 , w porównaniu z wartością parametru K_2 . W związku z tym, że dla trajektorii (21) uzyskano lepsze rezultaty przy zwiększaniu wartości parametru K , to analogicznie postanowiono zwiększać parametr K_1 trajektorii (22). Dla $K_1 = 1,2$ otrzymano pierwszy wynik ze skróceniem czasu narastania. Okazało się, że dopiero odpowiednio duże K_1 i odpowiednio małe K_2 daje najlepszą jakość regulacji, również pod względem redukcji przeregulowania. Niestety skrócenie czasu narastania może odbywać się kosztem zwiększenia przeregulowania, dlatego dobór parametrów powinien być wykonywany stopniowo w kolejnych eksperymentach.

Najkrótszy czas narastania, równy $t_n = 10$ s, uzyskano dla $K_1 = 1,9, K_2 = 0,1$. Wielkość przeregulowania przy zastosowaniu tej trajektorii również była mniejsza niż przy zastosowaniu stałej trajektorii referencyjnej. Najmniejsza wielkość przeregulowania została otrzymana dla parametrów $K_1 = 1,8, K_2 = 0,1$.

Zastosowanie typowych i nietypowych kształtów trajektorii referencyjnych dla obiektu liniowego pokazało możliwości wpływania na czas narastania oraz przeregulowanie. Najskuteczniejszymi trajektoriami pod względem zmniejszenia wielkości przeregulowania są typowe trajektorie inercyjne (19) i (20).

Tab. 4. Porównanie jakości regulacji dla różnych parametrów trajektorii referencyjnej (22)

Tab. 4. Comparison of control quality for different parameters of reference trajectory (22)

Rodzaj trajektorii	y_p [%]	t_n [s]	Parametry
stała	3,3405	12	–
zmienna (22)	0,4541	16	$K_1 = 0,9, K_2 = 0,1, m = 3$
zmienna (22)	1,1660	13	$K_1 = 0,9, K_2 = 0,8, m = 3$
zmienna (22)	2,8476	12	$K_1 = 1,1, K_2 = 0,9, m = 3$
zmienna (22)	3,7466	11	$K_1 = 1,2, K_2 = 0,9, m = 3$
zmienna (22)	2,3548	12	$K_1 = 1,2, K_2 = 0,8, m = 3$
zmienna (22)	1,8989	11	$K_1 = 1,8, K_2 = 0,2, m = 3$
zmienna (22)	2,5422	10	$K_1 = 1,9, K_2 = 0,1, m = 3$
zmienna (22)	0,1604	20	$K_1 = 1,8, K_2 = 0,1, m = 3$

Natomiast jest to również możliwe przy zastosowaniu trajektorii nietypowych jak (22). Ponadto trajektorie typu (22) umożliwiają skuteczną redukcję czasu narastania.

4. Eksperymenty w układzie regulacji reaktora polimeryzacji

4.1. Opis obiektu

Drugim obiektem regulacji jest reaktor chemiczny, w którym zachodzi proces polimeryzacji, czyli zamiany związków chemicznych o małej masie cząsteczkowej (monomery) na związki o większej masie cząsteczkowej (polimery). Uzyskiwane polimery są powszechnie stosowane w produkcji tworzyw sztucznych, a także produktów chemicznych takich jak: farby, lakiery, oleje przemysłowe, środki smarujące czy kleje.

Reaktor opisany jest następującymi równaniami [3]:

$$\dot{x}_1 = 10(6 - x_1) - 2,4568x_1\sqrt{x_2} \quad (23)$$

$$\dot{x}_2 = 80u - 10,1022x_2 \quad (24)$$

$$\dot{x}_3 = 0,0024121x_1\sqrt{x_2} + 0,112191x_2 - 10x_3 \quad (25)$$

$$\dot{x}_4 = 245,978x_1\sqrt{x_2} - 10x_4 \quad (26)$$

a równanie wyjścia obiektu jest dane jako:

$$y = \frac{x_4}{x_3} \quad (27)$$

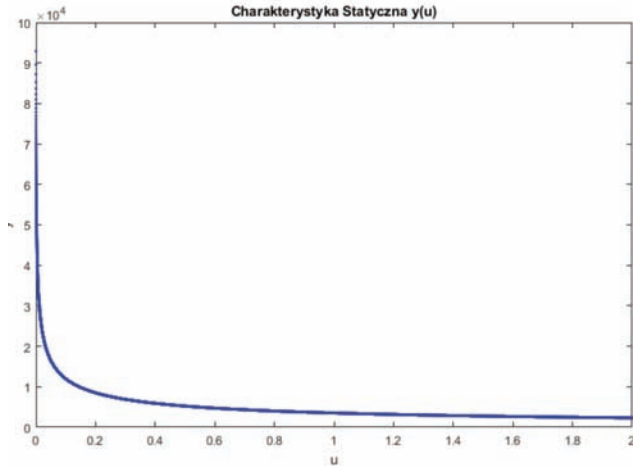
Wartości poszczególnych zmiennych w punkcie pracy są następujące [3]:

$$x_{10} = 5,50677 \text{ kmol/m}^3, x_{20} = 0,132906 \text{ kmol/m}^3,$$

$$x_{30} = 0,0019752 \text{ kmol/m}^3, x_{40} = 49,3818 \text{ kmol/m}^3,$$

$$u_0 = 0,016783 \text{ m}^3/\text{h}, y_0 = 25000,5.$$

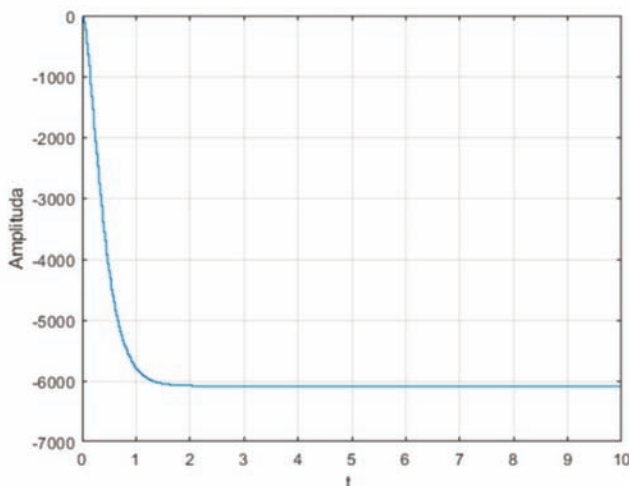
Zadanie regulacji polega na sterowaniu przepływem inicjującym monomerów u tak, aby regulować ciężar molowy produktu y . Charakterystyka statyczna obiektu regulacji jest przedstawiona na rys. 2 i ilustruje nieliniowy charakter obiektu.



Rys. 2. Charakterystyka statyczna reaktora polimeryzacji
Fig. 2. Steady-state characteristic of the polymerization reactor

4.2. Badanie wpływu kształtu trajektorii referencyjnej na jakość regulacji

Dla przedstawionego obiektu regulacji zaprojektowano regulator NDMC-NPL. Dobrano następujące wartości parametrów: $N = 50$, $N_u = 10$, $\lambda = 2e12$, oferujące najkrótszy czas ustalenia przebiegu wyjściowego. Założono okres próbkowania $T_p = 0,01$ h. Dla tak dobranych parametrów dokonano porównania działania regulatorów. Ze względu na uzyskany najkrótszy czas ustalenia oraz najmniejszą wielkość przeregulowania, do eksperymentów z różnymi kształtami trajektorii referencyjnych, wybrano regulator NDMC-NPL zaimplementowany w wersji analitycznej z uwzględnionym ograniczeniem dolnym wartości sterowania $u_{\min} = 0$. Na rys. 3 przedstawiono odpowiedź skokową uzyskaną po linearyzacji modelu opisanego równaniami (23)–(27). Przedstawiona odpowiedź skokowa obiektu ma charakter inercyjny i ma stosunkowo krótki czas ustalenia.



Rys. 3. Odpowiedź skokowa zlinearyzowanego modelu obiektu
Fig. 3. Step response of the linearized polymerization reactor model

Dla przedstawionego nieliniowego obiektu regulacji również przeprowadzono eksperymenty z zastosowaniem trajektorii typowych (inercyjnych) jak i nietypowych.

Oprócz trajektorii (19), (20) i (22), zastosowano również trajektorię o postaci:

$$y_{(k)}^{ref} = \begin{cases} K \cdot y^{zad} & \text{dla } k \leq m \\ y^{zad} & \text{dla } k > m \end{cases} \quad (28)$$

Parametrami trajektorii są K i m , które pełnią tę samą rolę w projektowaniu trajektorii, jaką pełnią w przypadku trajektorii (21). Eksperymenty przeprowadzono też dla trajektorii o postaci wyznaczonej na podstawie trajektorii (22):

$$y_{(k)}^{ref} = \begin{cases} K_1 \cdot y^{zad} & \text{dla } k < m \\ K_2 \cdot y^{zad} & \text{dla } k = \{m, m + 1\} \\ y^{zad} & \text{dla } k > m + 1 \end{cases} \quad (29)$$

W tym przypadku parametry trajektorii K_1 i K_2 zmieniają wielkość przewidywanego uchybu w zależności od parametru m . Parametr m w przeciwieństwie do trajektorii (22) definiuje przedział czasowy, w którym dwa przewidywane uchyby regulacji mają mniejszą wartość od wcześniejszych. Wyniki badań dla opisanych trajektorii zostały przedstawione w tab. 5. Podano w niej wartość czasu narastania i przeregulowania dla wartości zadanych najbardziej oddalonych od punktu pracy. Wielkości y_p^1 , t_n^1 zatem dotyczą przebiegów dla wartości zadanej równej 29 500,5 a y_p^2 , t_n^2 – dla wartości zadanej równej 20 500,5.

Dla trajektorii (19) zmniejszenie przeregulowania wiąże się ze wzrostem czasu narastania, tak jak w przypadku poprzedniego obiektu regulacji. Zaczynając od stałej czasowej $T = 0,02$ i zwiększając ją, zmniejszono wartość przeregulowania y_p^1 i y_p^2 wraz ze zwiększaniem czasów narastania t_n^1 i t_n^2 . Dla $T = 0,5$ uzyskano brak przeregulowania. Przebiegi wyjścia i sterowania z zastosowaniem trajektorii (19) z parametrem $T = 0,5$ przedstawiono na rys. 4.

Podobnie jak w przypadku poprzedniego obiektu regulacji, trajektorie inercyjne najskuteczniej minimalizowały wielkość przeregulowania. Dla trajektorii (20), jak w badaniach nad obiektem liniowym, przyjęto $T_1 = 0,02$, gdzie czas narastania był prawie taki sam, jak przy zastosowaniu stałej trajektorii, a przeregulowanie było mniejsze. Przystąpiono do stopniowego zwiększania drugiej stałej czasowej T_2 . Otrzymano wydłużenie czasu narastania oraz niewielkie zmniejszenie przeregulowania. W przeciwieństwie do obiektu liniowego nie ma wyraźnej poprawy jakości regulacji w wyniku zastosowania tej trajektorii.

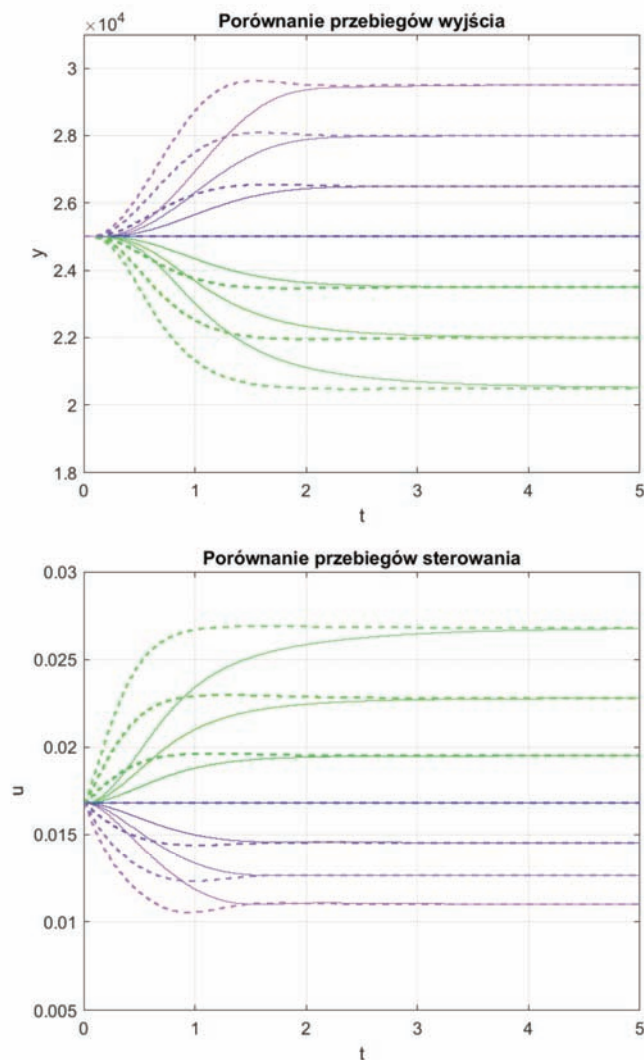
W przypadku trajektorii (28) istotny był dobór parametrów m i K . Na podstawie badań nad obiektem liniowym, w początkowych eksperymentach przyjęto wartość parametru K bliską 1. Parametr m zwiększano stopniowo i analizowano zmieniającą się jakość regulacji. W związku z tym, że okres próbkowania $T_p = 0,01$, to dopiero dla $m = \{25, 50\}$ było widoczna różnica w jakości regulacji. Wybrano $m = 50$ do dalszych badań, bo powodowało zadowalające zmniejszenie wielkości przeregulowania kosztem zwiększenia czasu narastania. Dla $m = 100$ uzyskano największą redukcję wielkości przeregulowania.

Stosując trajektorię (22), podobnie jak przy poprzednim obiekcie regulacji, próbowano skompensować zwiększenie przewidywanych uchybów regulacji przez parametr K_1 przez odpowiednie zmniejszenie uchybu z chwili określonej przez parametr m , wykorzystując parametr K_2 tak, aby uzyskać krótszy czas narastania. Dla mniejszych wartości parametru K_2 czas narastania wydłużał się. Najkrótszy czas narastania otrzymano dla tej trajektorii przy $m = 50$, $K_1 = 1,1$ i $K_2 = 0,9$. Stopniowe zwiększenie

Tab. 5. Porównanie jakości regulacji przy zastosowaniu trajektorii referencyjnej o różnym kształcie

Tab. 5. Comparison of control quality for different shapes of reference trajectories

Rodzaj trajektorii	y_p^1 [%]	y_p^2 [%]	t_n^1 [h]	t_n^2 [h]	Parametry
stała	0,4203	0,1141	1,31	1,92	–
(19)	0,4201	0,1122	1,32	1,94	$T = 0,02$
(19)	0,4192	0,1006	1,35	2,01	$T = 0,05$
(19)	0,4131	0,0597	1,41	2,23	$T = 0,10$
(19)	0,1928	0	1,72	–	$T = 0,30$
(19)	0	0	–	–	$T = 0,50$
(20)	0,4201	0,1120	1,33	1,95	$T_1 = 0,02, T_2 = 0,005$
(20)	0,4201	0,1116	1,33	1,95	$T_1 = 0,02, T_2 = 0,01$
(20)	0,4200	0,1100	1,34	1,97	$T_1 = 0,02, T_2 = 0,02$
(20)	0,4190	0,0985	1,37	2,04	$T_1 = 0,02, T_2 = 0,05$
(28)	0,4202	0,1141	1,32	1,93	$K = 0,1, m = 2$
(28)	0,4203	0,1141	1,31	1,92	$K = 0,9, m = 2$
(28)	0,4203	0,1140	1,31	1,92	$K = 0,9, m = 3$
(28)	0,4203	0,1137	1,31	1,93	$K = 0,9, m = 4$
(28)	0,4203	0,1134	1,31	1,93	$K = 0,9, m = 5$
(28)	0,4199	0,1103	1,32	1,94	$K = 0,9, m = 10$
(28)	0,4174	0,0835	1,33	2,05	$K = 0,9, m = 25$
(28)	0,3978	0,0046	1,37	2,99	$K = 0,9, m = 50$
(28)	0,1787	0	1,62	–	$K = 0,9, m = 100$
(22)	0,4596	0,3667	1,24	1,51	$K_1 = 1,1, K_2 = 0,9, m = 50$
(22)	0,4238	0,1521	1,28	1,81	$K_1 = 1,1, K_2 = 0,9, m = 25$
(22)	0,4341	0,2642	1,26	1,61	$K_1 = 1,1, K_2 = 0,1, m = 50$
(29)	0,4076	0,1627	1,28	1,76	$K_1 = 1,1, K_2 = 0,1, m = 50$
(29)	0,4566	0,5197	1,21	1,37	$K_1 = 1,2, K_2 = 0,1, m = 50$
(29)	0,4049	0,1525	1,29	1,78	$K_1 = 1,1, K_2 = 0,05, m = 50$
(29)	0,4526	0,5034	1,21	1,38	$K_1 = 1,2, K_2 = 0,05, m = 50$



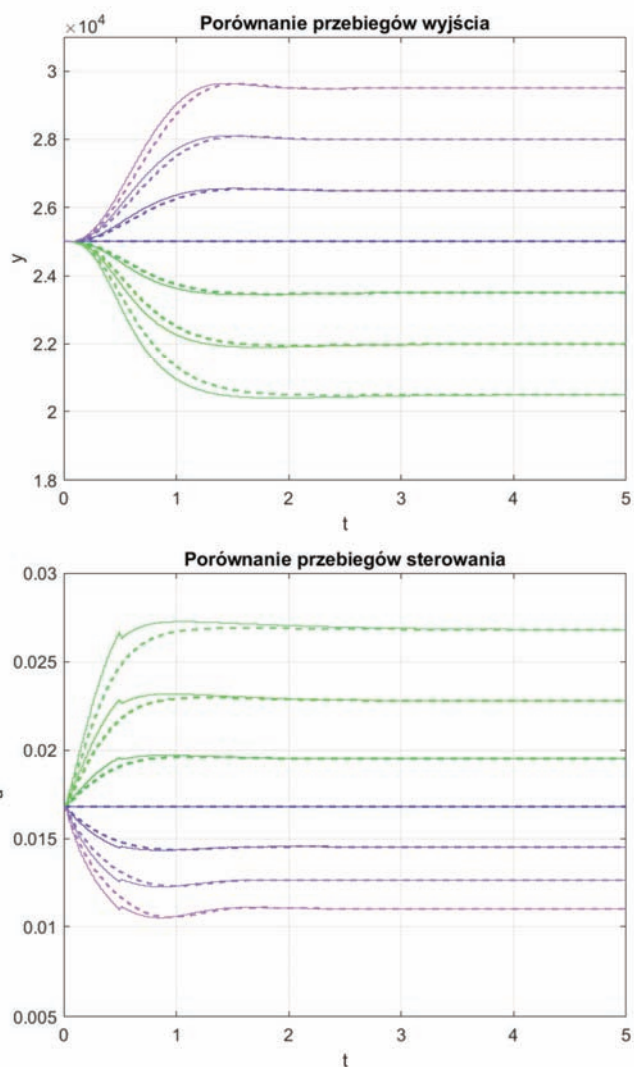
Rys. 4. Odpowiedzi układu regulacji z regulatorem NDMC-NPL na zmiany wartości zadanej $y^{zad} = \{20\ 500,5; 22\ 000,5; 23\ 500,5; 25\ 000,5; 26\ 500,5; 28\ 000,5; 29\ 500,5\}$; z zastosowaniem trajektorii referencyjnej (19) dla $T = 0,5$ – linia ciągła; z zastosowaniem stałej trajektorii referencyjnej – linia przerywana; góra – wyjście, dół – sterowanie

Fig. 4. Responses of the control system with NDMC-NPL algorithm to set-point changes to $y^{zad} = \{20\ 500,5; 22\ 000,5; 23\ 500,5; 25\ 000,5; 26\ 500,5; 28\ 000,5; 29\ 500,5\}$; with reference trajectory (19) for $T = 0,5$ – solid line, with constant reference trajectory – dashed line; above – output, below – control

szanie parametru K_1 i jednocześnie zmniejszanie parametru K_2 doprowadziło więc do osiągnięcia celu.

Celem implementacji trajektorii (29) było uzyskanie dodatkowego zmniejszenia czasu narastania przez zmianę liczby przewidywanych uchybów regulacji objętych wpływem zmiany parametru K_2 . W sumie dwa uchyby były objęte tą zmianą. Podobnie jak w trajektorii (22) stopniowo zwiększono parametr K_1 i jednocześnie zmniejszono parametr K_2 . Wykonane eksperymenty doprowadziły do otrzymania wartości parametrów, dla których został uzyskany najkrótszy czas narastania. Dla $K_1 = 1,2$ i $K_2 = 0,1$ otrzymano najkrótszy czas narastania, jednak z większym przeregulowaniem w porównaniu ze stałą trajektorią referencyjną. Przebiegi wyjścia i sterowania z zastosowaniem trajektorii (29) oraz parametrów $K_1 = 1,2$ i $K_2 = 0,1$, przedstawiono na rys. 5.

Dla nieliniowego obiektu regulacji zastosowanie typowych (inercyjnych) i nietypowych trajektorii referencyjnych wskazało wiele możliwości wpływania na jakość regulacji. W przypadku minimalizacji wielkości przeregulowania, trajektorie



Rys. 5. Odpowiedzi układu regulacji z regulatorem NDMC-NPL na zmiany wartości zadanej $y^{zad} = \{20\ 500,5; 22\ 000,5; 23\ 500,5; 25\ 000,5; 26\ 500,5; 28\ 000,5; 29\ 500,5\}$; z zastosowaniem trajektorii referencyjnej (29) dla $K_1 = 1,2$ i $K_2 = 0,1$ – linia ciągła; z zastosowaniem stałej trajektorii referencyjnej – linia przerywana; góra – wyjście, dół – sterowanie

Fig. 5. Responses of the control system with NDMC-NPL algorithm to set-point changes to $y^{zad} = \{20\ 500,5; 22\ 000,5; 23\ 500,5; 25\ 000,5; 26\ 500,5; 28\ 000,5; 29\ 500,5\}$; with reference trajectory (29) for $K_1 = 1,2$ and $K_2 = 0,1$ – solid line, with constant reference trajectory – dashed line; above – output, below – control

inercyjne dawały najlepsze rezultaty. Dzięki trajektoriom o nietypowym kształcie możliwe było natomiast skuteczne skracanie czasu narastania.

Aby uzyskać jeszcze lepszą jakość regulacji, zwłaszcza pod kątem skrócenia czasu narastania, można stosować nietypowe trajektorie referencyjne i dalej modyfikować trajektorię (29) do bardziej skomplikowanych postaci. Można m.in. rozważyć zwiększenie zakresów wyznaczanych przez parametr m lub dodawanie nowych.

5. Podsumowanie

Podsumowując, w artykule zostały przeprowadzone badania z zastosowaniem różnych kształtów trajektorii referencyjnych w układach regulacji predykcyjnej dwóch obiektów: nieminimalnofazowego obiektu liniowego oraz nieliniowego reaktora polimeryzacji. Dla obu obiektów przetestowano trajektorie inercyjne, które wspomniane są w literaturze [1, 5] jako trajektorie mogące wpływać na działanie układów regulacji. Ponadto

zostały zaproponowane i przetestowane trajektorie o nietypowym kształcie.

Badania wykazały, że trajektorie inercyjne są najprostsze do wyznaczenia i stosując je można skutecznie zredukować wielkość przeregulowania, kosztem wydłużenia lub braku zmiany czasu narastania, w zależności od przyjętych stałych czasowych. Aby poprawić jakość regulacji należy stopniowo zwiększać jedną ze stałych czasowych i analizować wpływ zmiany na obie wielkości. Preregulowanie będzie wraz ze wzrostem stałej czasowej maleć. W chwili wydłużenia się czasu narastania należy zaprzestać tego działania. W ten sposób zostanie wyznaczona wartość stałej czasowej, dla której otrzymamy mniejszą wartość przeregulowania przy braku zmiany czasu narastania.

Zastosowanie trajektorii nietypowych, jak opisane w artykule lub podobnych, może przynieść skrócenie czasu narastania lub wielkości przeregulowania. Dla trajektorii (21) należy przyjąć parametr K bliski wartości 1, aby zmniejszyć wielkość przeregulowania bez zmiany czasu narastania. W przypadku trajektorii (22), (28) i (29) należy stopniowo zwiększać parametr K_1 oraz jednocześnie zmniejszać parametr K_2 , aby znaleźć wartości parametrów, dla których zostanie otrzymany krótszy czas narastania.

Bibliografia

1. Tatjewski P., *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy. Wydanie drugie zmienione.*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2016.
2. Marusak P., *Regulatory predykcyjne z założoną trajektorią przyrostów sterowania i uwzględnianiem ograniczeń sygnału sterującego*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 12, Nr 2, 2008, 581–590.
3. Doyle F.J., Ogunnaike B.A., Pearson R.K., *Nonlinear Model-based Control Using Second order Volterra Models.*, „Automatica”, Vol. 31, No. 5, 1995, 697–714.
4. Ardakani M.G., Olofsson B., Robertsson A., Johansson R., *Real-Time Trajectory Generation using Model Predictive Control*, „2015 IEEE Conference on Automation Science and Engineering(CASE)”, 2015, 942–948.
5. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., *Process dynamics and control*, John Wiley & Sons, 2011.
6. Burlacu A., Lazar C., *Reference Trajectory-Based Visual Predictive Control*, „Advanced Robotics”, Vol. 26, No. 8–9, 2012, 1035–1054.
7. Krasnanský R., Valach P., Soós D., Zarbakhsh J., *Reference trajectory tracking for a multi-DOF robot arm*, „Archives of Control Sciences”, Vol. 25, No. 4, 2015, 513–527, DOI: 10.1515/acsc-2015-0033.
8. Wu Q., Xi Y., Nagy Z., Li D., *Economic optimization in transient processes for model predictive control with a dynamic reference trajectory*, „Computers and Chemical Engineering”, Vol. 121, 2019, 224–231, DOI: 10.1016/j.compchemeng.2018.11.006.
9. Haghghat S., Di Cairano S., Bortoff S.A., *Method for computing reference trajectory to position machine*, 2015.
10. Richalet J., Rault A., Testud J.L., Papon J., *Model algorithmic control of industrial processes*, „IFAC Proceedings Volumes”, Vol. 10, No. 16, 1977, 103–120, DOI: 10.1016/S1474-6670(17)69513-2.
11. Ahmetzyanov I.Z., Dem'yanov D.N., *Determination of the Overshoot Scalar Control Systems with Transfer Zero and Binomial Law of Poles Distribution*, „Indian Journal of Science and Technology”, Vol. 10, No. 1, 2017, DOI: 10.17485/ijst/2017/v10i1/109928.
12. Aly A.A., Salem F.A., *A New Accurate Analytical Expression for Rise Time Intended for Mechatronics Systems Performance Evaluation and Validation*, „International Journal of Automation, Control and Intelligent Systems”, Vol. 1, No. 2, 2015, 51–60.

Influencing Predictive Control System Performance by Reference Trajectory Shaping

Abstract: Applying model predictive control (MPC) algorithms to control many processes, of different difficulty level, often allows improving control quality. It is possible by including information received from a process model in the algorithm structure. When defining the optimization problem for the predictive control algorithms most often a time-constant reference trajectory is assumed. Possibilities of improving the control quality by applying a time reference trajectory variable on the prediction horizon are presented in the paper. Two quantities are considered when comparing control quality: the rise time of the control plant output, and the overshoot. The experiments were conducted in the control systems of two control plants: a linear nonminimumphase plant and a nonlinear polymerization reactor. In the control system of the first control plant the DMC predictive control algorithm was used. For the nonlinear reactor the NDMC-NPL algorithm based on a nonlinear model was applied. It is demonstrated that by using the reference trajectories of different shapes it is possible to improve control quality offered by the MPC control algorithms.

Keywords: reference trajectory, predictive control, nonlinear control, nonlinear plants, control quality

mgr inż. Robert Nebeluk

R.Nebeluk@stud.elka.pw.edu.pl

Urodzony w Warszawie w 1992 r. Dyplom inżyniera uzyskał w 2015 r. na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej, a magistra inżyniera – w 2019 r. na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej, obydwie na kierunku Automatyka i Robotyka. Pracuje w Zakładzie Automatyki i Inżynierii Oprogramowania w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Jego zainteresowania naukowe to: zaawansowane algorytmy regulacji procesów przemysłowych, w szczególności algorytmy regulacji predykcyjnej oraz zagadnienia modelowania i sterowania rozmytego.



dr inż. Piotr Marusak

P.Marusak@ia.pw.edu.pl

Urodzony w Warszawie w 1974 r. Dyplom magistra inżyniera uzyskał w 1997 r. a doktora nauk technicznych w 2003 r., obydwie na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Pracuje w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują: sterowanie obiektów nieliniowych, algorytmy regulacji predykcyjnej, modelowanie i sterowanie rozmyte, układy regulacji odporne na uszkodzenia, układy sterowania z optymalizacją punktu pracy.

