

Jerzy KASPRZYK

PEWNE ASPEKTY PRAKTYCZNEJ IDENTYFIKACJI MODELU DYNAMICZNEGO
DYSKRETNEGO W CZASIE DLA REAKTORA POLICHLORKU WINYLU

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób i wyniki identyfikacji modelu matematycznego autoklawu PCW przy wykorzystaniu metody zmiennej instrumentalnej. Oprócz opisu metody szczególную uwagę zwrócono także na następujące problemy: identyfikacja w torze zamkniętym, wybór okresu próbkowania i wybór struktury modelu.

1. CEL IDENTYFIKACJI

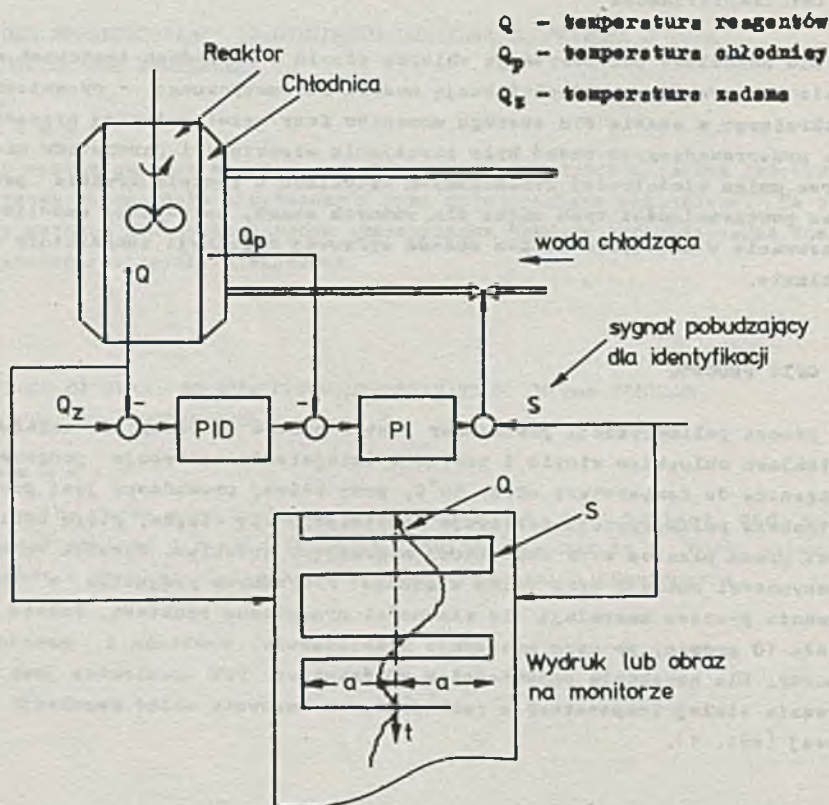
Dla autoklawu polimeryzacji chlorku winylu w Zakładach Azotowych w Tarnowie przeprowadzono identyfikację modelu matematycznego, dynamicznego, dyskretnego w czasie dla szeregu momentów fazy egzotermicznej procesu. Celem przeprowadzonych badań było określenie struktury i parametrów modelu, ocena zmian właściwości dynamicznych autoklawu w trakcie trwania procesu oraz powtarzalności tych zmian dla różnych szarż, co powinno umożliwić opracowanie w następnym etapie układu cyfrowej regulacji temperatury w autoklawie.

2. OPIS PROCESU

Proces polimeryzacji prowadzony jest w sposób szarżowy. Po załadowaniu autoklawu chlorkiem winylu i zestawem inicjatorów następuje podgrzewanie reagentów do temperatury około 50°C , przy której prowadzony jest proces. W trakcie polimeryzacji następuje wydzielanie się ciepła, które odbierane jest przez płaszcz wody chłodzącej otaczający autoklaw. Wskutek zmiany intensywności reakcji oraz zmian własności fizycznych reagentów w trakcie trwania procesu zmieniają się własności dynamiczne reaktora. Proces trwa około 10 godzin, po czym następuje wychłodzenie reaktora i zakończenie szarży. Dla uzyskania odpowiednich właściwości PCW konieczne jest utrzymywanie stałej temperatury w reaktorze, co zapewnia układ regulacji kaskadowej (rys. 1).

3. IDENTYFIKACJA OBIEKTU ZE SPRZĘŻENIEM ZWROTNYM I WYBÓR SYGNAŁU POBUDZAJĄCEGO

Ponieważ celem identyfikacji jest wyznaczenie modelu reaktora dla małych odchyłek od punktu równowagi określonego przez wartość zadaną temperatury, a w przypadku przeprowadzenia eksperymentu w torze otwartym istnieje niebezpieczeństwo "wygaszenia" lub "rozbiegnięcia" się procesu, identyfikacja musi być przeprowadzona w warunkach działania układu regulacji temperatury stabilizującego wymieniony punkt pracy. Dlatego też dla celów identyfikacji należy wprowadzić sygnał pobudzający s w miejsce zaznaczone na rys. 1. Zaproponowano stosowanie sygnału dwupołożeniowego, przyjmującego wartości $+a$ i $-a$, w chwilkach czasu wybieranych przez osobę prowadzącą eksperyment. Amplitudę a należy dobrać doświadczalnie tak, aby zmiany temperatury wywołane sygnałem s nie ginęły w poziomie szumów i



Rys. 1. Miejsce wprowadzenia sygnału pobudzającego s i sposób prowadzenia eksperymentu w oparciu o wydruk lub obraz na monitorze

zakłóceń oraz aby nie zakłócać nadmiernie procesu. Natomiast zmianę wartości sygnału pobudzającego należy wykonać w chwili zauważenia wystarczająco dużej odchyłki temperatury reaktora od wartości zadanej.

4. WYBÓR METODY IDENTYFIKACJI

Dla celów identyfikacji przyjęto model obiektu o postaci:

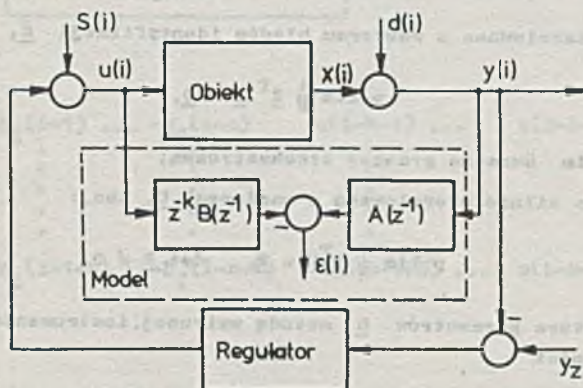
$$y(i) = z^{-k} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(i) + d(i), \quad (1)$$

gdzie zakłócenie
$$d(i) = \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})} e(i) \quad (2)$$

stanowi wynik filtracji białego szumu $e(i)$ przez element o nieznannej strukturze i parametrach, natomiast wielomiany $A(z^{-1})$ i $B(z^{-1})$ mają postać:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \quad (3)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n-1} z^{-(n-1)} \quad (4)$$



Rys. 2. Definicja błędu identyfikacji dla modelu toru sterowania

Aby uzyskać nieobciążone oceny parametrów toru sterowania obiektu w warunkach nieznanności struktury i parametrów toru zakłócenia, zaproponowano zastosowanie metody zmiennej instrumentalnej. Definiując błąd identyfikacji dla tego modelu jak na rys. 2 otrzymuje się dla N wyników próbkowania zależność:

$$\begin{bmatrix} y(1) \\ \vdots \\ y(1+N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y(1-1) \dots -y(1-n) & u(1-k-1) \dots u(1-k-n+1) \\ \vdots & \vdots \\ -y(1-1+N) \dots -y(1-n+N) & u(1-k-1+N) \dots u(1-k-n+1+N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \\ b_0 \\ \vdots \\ b_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon(1) \\ \vdots \\ \varepsilon(N) \end{bmatrix} \quad (5)$$

lub w zapisie wektorowo-macierzowym

$$\underline{y} = \underline{U} \underline{b} + \underline{\varepsilon} \quad (6)$$

Oceń \underline{b} wg metody najmniejszych kwadratów dana wyrażeniem

$$\underline{b} = (\underline{U}^T \underline{U})^{-1} \underline{U}^T \underline{y} \quad (7)$$

będzie w rozpatrywanym przypadku oceną obciążoną, co wynika z istnienia korelacji pomiędzy elementami macierzy \underline{U} i wektora $\underline{\varepsilon}$.

Dla uzyskania oceny nieobciążonej wprowadza się macierz zmiennych instrumentalnych \underline{Z} o wymiarach takich samych jak macierz \underline{U} , która:

- nie jest skorelowana z wektorem błędów identyfikacji $\underline{\varepsilon}$, tzn.

$$p \lim \frac{1}{N} \underline{Z}^T \underline{\varepsilon} = \underline{0}, \quad (8)$$

gdzie: $p \lim$ oznacza granicę stochastyczną;

- jest bardzo silnie skorelowana z macierzą \underline{U} , tzn.:

$$p \lim \frac{1}{N} \underline{Z}^T \underline{U} = \underline{R}, \quad \det \underline{R} \neq 0. \quad (9)$$

Oceń wektora parametrów \underline{b} metodą zmiennej instrumentalnej wyznacza się z zależności

$$\underline{b}^{\#} = (\underline{Z}^T \underline{U})^{-1} \underline{Z}^T \underline{y} \quad (10)$$

Ponieważ

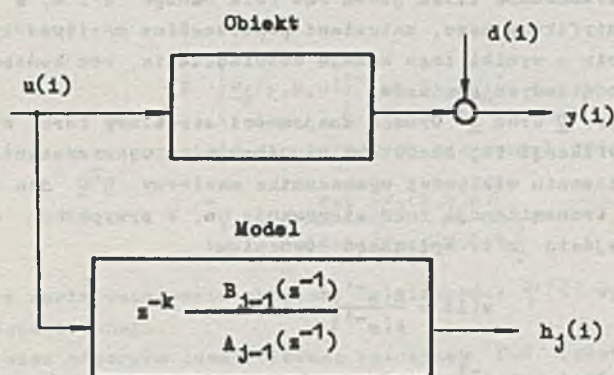
$$\underline{b}^{\#} = (\underline{Z}^T \underline{U})^{-1} \underline{Z}^T \underline{y} = (\underline{Z}^T \underline{U})^{-1} \underline{Z}^T \underline{U} \underline{b} + (\underline{Z}^T \underline{U})^{-1} \underline{Z}^T \underline{\varepsilon} = \underline{\hat{b}} + (\underline{Z}^T \underline{U})^{-1} \underline{Z}^T \underline{\varepsilon},$$

to

$$p \lim \underline{b}^{\#} = \underline{\hat{b}} + p \lim \frac{1}{N} (\underline{Z}^T \underline{U})^{-1} p \lim \frac{1}{N} \underline{Z}^T \underline{\varepsilon} = \underline{\hat{b}},$$

a więc ocena \underline{b}^{M} jest nieobciążoną i zgodną oceną wektora β rzeczywistych parametrów toru sterowania obiektu.

Podstawową trudnością metody zmiennej instrumentalnej jest generacja odpowiedniej macierzy \underline{Z} . Gdyby model obiektu był znany, to można by generować optymalne zmienne instrumentalne w postaci macierzy wejść i wyjść niezakłóconego modelu, przy czym budowa tej macierzy powinna być taka sama jak macierzy \underline{U} ; tak bowiem wyznaczona macierz \underline{Z} byłaby nieskorelowana z $\underline{\epsilon}$ i maksymalnie skorelowana z \underline{U} . Nieznajomość modelu obiektu zmusza do rekurencyjnego generowania najlepszej macierzy zmiennych instrumentalnych w sposób przedstawiony na rys. 3.



$$\underline{Z}_j = \begin{bmatrix} -h_j(i-1) & \dots & -h_j(i-n) & u(i-k-1) & \dots & u(i-k-n+1) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -h_j(i-1+N) & & -h_j(i-n+N) & u(i-k-1+N) & \dots & u(i-k-n+1+N) \end{bmatrix}$$

$$\underline{b}_j^{\text{M}} = (\underline{Z}_j^T \underline{Y})^{-1} \underline{Z}_j^T \underline{Y}, \quad \underline{b}_j^{\text{M}} \rightarrow A_j(z^{-1}), B_j(z^{-1})$$

Rys. 3. Sposób generacji macierzy zmiennych instrumentalnych

- W pierwszym kroku zmienne instrumentalne generowane są w postaci wejść obiektu i wyjść modelu, dla którego wielomiany $A_o(z^{-1})$ i $B_o(z^{-1})$ wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów, umożliwia to wyznaczenie oceny $\underline{b}_j^{\text{M}}$;

- W oparciu o ocenę \underline{b}_1^m obliczane są parametry wielomianów $A_1(z^{-1})$ i $B_1(z^{-1})$ oraz korzystając z poprzednio zarejestrowanej sekwencji wejść $u(1)$, generowana jest nowa sekwencja wyjść modelu $h_2(i)$ wchodzących w skład nowej macierzy \underline{Z}_2 ; umożliwia to wyznaczenie nowej oceny \underline{b}_2^m ;
- W oparciu o ocenę \underline{b}_2^m obliczane są parametry wielomianów $A_2(z^{-1})$ i $B_2(z^{-1})$ i korzystając z zarejestrowanej sekwencji wejść $u(1)$ generowana jest nowa sekwencja wyjść $h_3(i)$ wchodzących w skład nowej macierzy \underline{Z}_3 , co umożliwia wyznaczenie oceny \underline{b}_3^m .

W wyniku przeprowadzenia kilku iteracji otrzymuje się ocenę \underline{b}_j^m nie zmieniającą swojej wartości przy następnych iteracjach. Należy podkreślić, że macierz \underline{U} jest wyznaczona tylko jeden raz (dla danego k i n) w trakcie doświadczenia identyfikacyjnego, natomiast poszczególne macierze \underline{Z}_j są generowane w oparciu o wyniki tego samego doświadczenia, bez konieczności przeprowadzenia dodatkowych pomiarów.

Utworzenie macierzy \underline{U} oraz \underline{Z} wymaga znajomości struktury toru sterowania. W celu identyfikacji tej struktury zaproponowano wykorzystanie metody opartej na obliczaniu wielkości wyznacznika macierzy $\underline{U}^T \underline{U}$ dla różnych założonych rzędów transmitancji toru sterowania \hat{n} . W przypadku obiektu o niezakłóconym wyjściu $x(i)$ opisanego równaniem:

$$x(i) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(i), \quad (11)$$

gdzie: A i B - wielomiany z^{-1} rzędu odpowiednio n i $n-1$, macierz $\underline{P}_{\hat{n}}(x, u) = \underline{U}^T(x, u) \underline{U}(x, u)$ utworzona dla założonego rzędu \hat{n} obiektu będzie rzędu

$$2 \hat{n} \quad \text{dla} \quad \hat{n} \leq n$$

$$n + \hat{n} \quad \text{dla} \quad \hat{n} > n, \quad \text{co wynika z liniowej zależności } \hat{n}-n \text{ ko-}$$

lumn w macierzy $\underline{U}(x, u)$.

Tak więc obliczając wartość wyznacznika

$$\det \left[\underline{P}_{\hat{n}}(x, u) \right] \quad \text{dla} \quad \hat{n} = 1, 2, 3, \dots,$$

można wykazać, że rzeczywisty rząd obiektu n jest równy największej z wartości \hat{n} , dla której $\det \left[\underline{P}_{\hat{n}}(x, u) \right] \neq 0$.

W podobny sposób definiując stosunek wyznaczników dla kolejnych rzędów \hat{n} :

$$\varphi(\hat{n}) = \frac{\det \left[\underline{P}_{\hat{n}}(x, u) \right]}{\det \left[\underline{P}_{\hat{n}+1}(x, u) \right]} \quad (12)$$

przyjmuje się, że n jest równe temu \hat{n} , dla którego wartość $\varphi(\hat{n})$ dąży do nieskończoności.

Ponieważ jednak nie dysponujemy wyjściem niezakłóconym $x(i)$, więc obliczona na podstawie $y(i)$ wartość

$$\varphi(\hat{n}) = \frac{\det [P_{\hat{n}}(y, u)]}{\det [P_{\hat{n}+1}(y, u)]} \quad (13)$$

będzie w zależności od poziomu zakłóceń $d(i)$ wykazywała mniejszą tendencję do gwałtownego wzrostu dla $\hat{n} = n$.

Wprowadzając zmienną instrumentalną h , mamy odpowiednio

$$P_{\hat{n}}(y, h, u) = Z^T(h, u) U(y, u) \quad (14)$$

Można wykazać, że

$$E \left\{ P_{\hat{n}}(y, h, u) \right\} = E \left\{ P_{\hat{n}}(x, h, u) \right\} .$$

Stąd stosunek wyznaczników dla kolejnych założonych rzędów \hat{n}

$$\varphi(\hat{n}) = \frac{\det [P_{\hat{n}}(y, h, u)]}{\det [P_{\hat{n}+1}(y, h, u)]} \quad (15)$$

będzie w swoim zachowaniu zbliżony do wielkości $\varphi(\hat{n})$ wyznaczonej dla wyjścia niezakłóconego.

Tak więc algorytm identyfikacji autoklawu PCW będzie przebiegał następująco:

1. Identyfikacja metodą zmiennej instrumentalnej w 5-6 iteracjach parametrów wielomianów $A(z^{-1})$ i $B(z^{-1})$ toru sterowania dla założonych rzędów $\hat{n} = 1, 2, 3$.
2. Przeprowadzenie testu rzędu toru sterowania dla $\hat{n} = 1, 2, 3$ i wybranie odpowiedniego $\hat{n} = n$, dla którego przyjmuje się parametry wielomianów A i B obliczone w poprzednim kroku.

5. WYBÓR OKRESU PRÓBKOWANIA

Ponieważ poszukujemy modelu dyskretnego dla obiektu ciągłego w osie wybór okresu próbkowania ma bardzo istotne znaczenie dla osiągnięcia dobrych rezultatów identyfikacji. Przy wyborze okresu próbkowania kierować się następującymi zasadami:

- a) częstotliwość próbkowania ω_p musi spełniać warunki wynikające z twierdzenia Kotelnikowa-Shannona,

b) okres próbkowania T_p musi spełniać nierówność

$$T_p \leq T_m,$$

przy czym czas martwy T_m powinien być wielokrotnością okresu próbkowania,

- c) T_p nie może być zbyt małe ze względu na niebezpieczeństwo słabego warunkowania macierzy $\underline{U}^T \underline{U}$,
- d) ze względu na dokładność modelu T_p nie może być ani zbyt małe, ani za duże.

Dla malejących T_p wartości współczynników a_i wielomianu $A(z^{-1})$ wzrastają, natomiast współczynniki b_i wielomianu $B(z^{-1})$ maleją. Tak więc np. dla modelu o wzmożeniu

$$k_o = \frac{\sum b_i}{1 + \sum a_i} = 1$$

mamy dla bardzo małych T_p

$$|b_i| \ll |a_i| \quad \text{i} \quad \left| \sum b_i \right| = \left| 1 + \sum a_i \right| \ll |a_i|$$

Czyli niewielkie błędy w określeniu parametrów mogą powodować duże różnice w zachowaniu wejściowo-wyjściowym modelu.

Z kolei dla zbyt dużych okresów próbkowania T_p dynamika modelu redukuje się do pierwszego rzędu, ponieważ zanikają współczynniki wielomianów $A(z^{-1})$ i $B(z^{-1})$ przy wyższych potęgach.

Literatura [3] podaje, że dobre rezultaty osiąga się przy wyborze T_p , zgodnie z regułą

$$\frac{T_u}{T_p} = 5 \dots 15,$$

gdzie T_u oznacza czas ustalania się odpowiedzi obiektu na skok jednostkowy do 95% wartości w stanie ustalonym.

Na ogół dane z obiektu zbiera się częściej niż to wynika z powyższej zależności, natomiast właściwego wyboru T_p dokonuje się w trakcie identyfikacji poprzez opuszczenie pomiarów.

6. WYNIKI IDENTYFIKACJI

W lipcu 1981 r. w Zakładach Azotowych w Tarnowie przeprowadzono eksperymenty identyfikacyjne dla autoklawu PCW nr 74. Zbieranie i rejestrację danych wykonano przy wykorzystaniu systemu minikomputerowego MERA 400 z kanałem przemysłowym Inteldigit PI. W trakcie eksperymentu przebieg wiel-

kości rejestrowanych wyprowadzany był na drukarkę mozaikową, natomiast zapamiętywanie danych odbywało się poprzez zapis do odpowiednio zorganizowanych zbiorów na dysku. Dane rejestrowane były co minutę, tak aby można było przez zwykłe opuszczenie pomiarów wybrać w trakcie identyfikacji odpowiedni okres próbkowania, będący wielokrotnością 1 minuty.

Identyfikację przeprowadzono metodą zmiennej instrumentalnej w 6 iteracjach, przy czym dla ostatniej obliczono także wariancję błędu predykcji wielkości wyjściowej ε^2 . Na podstawie wcześniejszych obserwacji obiektu przyjęto, że struktura modelu odpowiada elementowi inercyjnemu pierwszego, drugiego lub trzeciego rzędu z opóźnieniem. Przeprowadzone badania dla modeli rzędu drugiego i trzeciego dla różnych okresów próbkowania i czasów opóźnień nie dały pozytywnych rezultatów (np. model niestabilny, wariancja ε^2 zbyt duża, uzyskane parametry nie odpowiadały warunkom fizycznym).

W tabeli 1 przedstawiono wybrane wyniki identyfikacji dla jednej z szarzy dla modelu o transmitancji

$$H(z^{-1}) = z^{-k} \frac{b_0}{1 - a_1 z^{-1}} \hat{=} K(a) = \frac{k_0 e^{-sT_m}}{1 + sT} \quad (16)$$

Tabela 1

Wyniki identyfikacji dla szarzy z dnia 21.07.81

Lp.	T_p	k	a_1	b_0	T_m	k_0	T	ε^2	Uwagi
1	2	4	0.724	2.053	6	7.5	6.2	0.171	okres początkowy procesu
2	3	3	0.462	2.769	6	5.2	3.9	0.194	
3	2	4	0.762	1.894	6	8.0	7.4	0.144	okres środkowy procesu
4	3	3	0.570	2.529	6	5.9	5.4	0.151	
5	2	4	0.861	1.405	6	10.0	13.4	0.286	okres końcowy procesu
6	3	3	0.716	1.963	6	6.9	9.0	0.300	

Jak łatwo zauważyć w procesie występuje stały wzrost wartości parametru a_1 (co odpowiada wzrostowi stałej czasowej) oraz zmniejszanie się wartości b_0 . Jedną z przyczyn tych zmian jest pogarszanie się warunków chłodzenia w miarę wzrostu kryształków polimeru.

7. WNIOSKI

Istnienie powtarzającego się trendu parametrów wskazuje na możliwość rozwiązania regulacji temperatury reaktora na drodze adaptacji w torze otwartym w funkcji czasu. Złe właściwości dynamiczne obiektu (duży stosunek czasu martwego do dominującej stałej czasowej) uzasadniają wybór takiej struktury układu regulacji, która umożliwiałaby modyfikację tych właściwości, a więc regulacji kaskadowej z dodatkowym pomiarem temperatury płaszcza wody ochładzającej. Natomiast przyczyn niepowodzeń w przypadku identyfikacji modeli rzędów wyższych niż pierwszy należy doszukiwać się w zbyt małej dokładności pomiarów. Ze względu na poszukiwania modeli dla niewielkich odchyień od zadanego punktu pracy obliczone były różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi a średnimi. Tak więc dokładność pomiaru rzędu $0,1^{\circ}\text{C}$ wystarczająca dla temperatur około 50°C była zbyt mała dla odchyłek rzędu 1 do 3°C .

LITERATURA

- [1] Wong K.Y., Polak E.: Identification of linear discrete time systems using an instrumental variable method. IEEE Trans. Aut. Control AC-12, 707-719 (1967).
- [2] Wellstead P.E.: An Instrumental Product Moment Test For Model Order Estimation. Automatica vol. 14, 89-91 (1978).
- [3] Isermann R.: Practical Aspects of Process Identification. Automatica vol. 16, 575-598 (1980).
- [4] Niederliński A., Kasprzyk J., Zgorzelski P.: Opracowanie samonastawiającego się regulatora temperatury w autoklawie polimeryzacji chlorku winylu. Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej, Gliwice 1981 (praca NB-92/RAu-1/81 nie publikowana).

Recenzent: Doc. dr inż. Jerzy Pułaczewski

Wpłynęło do Redakcji 6.01.1983 r.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ РЕАКТОРА ПОЛИХЛОРОВИНИЛА

Р е з ю м е

В статье представлено метод и результаты идентификации математической модели реактора полихлоровинила при использовании метода оперативной переменной. Особое внимание уделено проблемам идентификации в замкнутой системе управления, выбору интервала измерений и выбору структуры модели.

SOME ASPEKTS IN PRACTICAL IDENTIFICATION OF A DYNAMICAL,
TIME DISCRETE MODEL FOR A VINYL POLICHLORIDE REACTOR

Summary

This paper presents the instrumental variable method and the results of identification of a mathematical model for a vinyl polychloride reactor. Moreover the following problems are presented: identification in closed-loop, choice of the sampling period and choice of the model structure.

1. INTRODUCTION

The identification of a discrete-time model for a vinyl polychloride reactor is presented. The instrumental variable method is used for the identification of the model structure. The choice of the sampling period and the choice of the model structure are discussed. The results of the identification are presented.

The identification of a discrete-time model for a vinyl polychloride reactor is presented. The instrumental variable method is used for the identification of the model structure. The choice of the sampling period and the choice of the model structure are discussed. The results of the identification are presented.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (1.1)$$

$$y(k) = \sum_{i=0}^{n-1} b_{i+1} u(k-i) + b_0 u(k) - \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) \quad (1.2)$$

$$y(k) = \sum_{i=0}^{n-1} b_{i+1} u(k-i) + b_0 u(k) - \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) \quad (1.3)$$

The identification of a discrete-time model for a vinyl polychloride reactor is presented. The instrumental variable method is used for the identification of the model structure. The choice of the sampling period and the choice of the model structure are discussed. The results of the identification are presented.

$$y(k) = \sum_{i=0}^{n-1} b_{i+1} u(k-i) + b_0 u(k) - \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) \quad (1.4)$$