Michał ŁUKASIK, Zbigniew EMIRSAJŁOW
ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, KATEDRA STEROWANIA I POMIARÓW
ul. 26-Kwietnia 10, 71-126 Szczecin

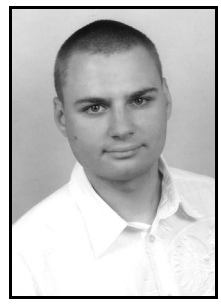
Identyfikacja modelu dynamiki procesu spieniania polistyrenu

Prof. dr hab. inż. Zbigniew EMIRSAJŁOW

Jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Szczecińskiej, gdzie w latach 1993-2009 kierował Zakładem Teorii Sterowania i Technik Symulacyjnych. Od 2010 roku kieruje Katedrą Sterowania i Pomiarów Wydziału Elektrycznego Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Jest autorem około 90 prac naukowych z zakresu teorii sterowania i systemów poświęconych głównie liniowym układom o parametrach rozłożonych, nieskończenie wymiarowym równaniom Sylvestera i Lapunowa.

e-mail: zbigniew.emirsajlow@zut.edu.pl

Mgr inż. Michał ŁUKASIK



Jest absolwentem kierunku automatyka i robotyka na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej (2008 r.). Obecnie jest doktorantem w Katedrze Sterowania i Pomiarów Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Zajmuje się nieliniową teorią sterowania oraz zagadnieniami związanymi z automatyzacją produkcji wyrobów styropianowych,

e-mail: michal.lukasik@zut.edu.pl

Streszczenie

W artykule omówiono zagadnienie modelowania procesu spieniania polistyrenu w potokowym węźle spieniania. Część wstępna zawiera wprowadzenie do problematyki procesu spieniania polistyrenu. W dalszej części omówiono metodę pomiaru gęstości spienionego polistyrenu, a zebrane dane pomiarowe wykorzystano do opisu matematycznego procesu z pomocą modelu Wienera oraz identyfikacji opóźnienia transportowego obiektu.

Słowa kluczowe: polistyren spienialny, EPS, model Wiener'a, opóźnienie transportowe, identyfikacja, styropian.

Dynamics model identification of polystyrene expanding process

Abstract

The paper presents the problem of blowing the expandable polystyrene in a continuous pre-expander. The first part of the paper introduces the problem and describes all physical phenomena involved in the expanding of raw polystyrene beads and in particular it explains the way the continuous pre-expander operates. The next part presents the method for measuring the expanded polystyrene density (system output) which uses a dedicated automatic weighing system. This weighing system has been installed in a real-life plant manufacturing the polystyrene foam at the industrial scale. It allows collecting the measurement data to identify the transportation delay in the process. The influence of the pre-expander chamber volume on the delay is examined. In the main part of the paper the dynamics of the polystyrene expanding process is identified. For this purpose the Wiener model containing an input linear dynamical part and output static nonlinearity is used. Computations are performed by means of the System Identification Toolbox of Matlab. The obtained model reasonably agrees with the real process data.

Keywords: expanded polistyrene, Wiener model, transport delay, Styrofoam, identification.

1. Wprowadzenie

Styropian został opatentowany w 1951 r. przez niemiecką firmę BASF [1] i od tamtej pory zaczął być szeroko stosowany do produkcji opakowań i wyrobów termoizolacyjnych. Niska przenikalność cieplna, dobra wytrzymałość mechaniczna i stosunkowo niski koszt wytwarzania to tylko niektóre z wielu zalet styropianu.

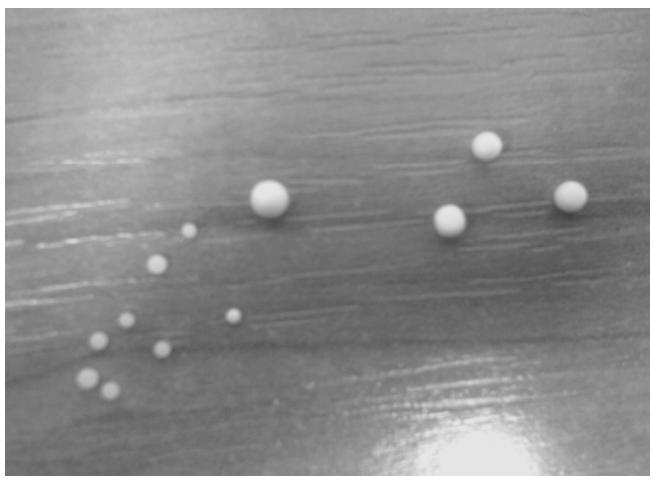
Problematyka omówiona w niniejszej pracy dotyczy identyfikacji procesu spieniania polistyrenu. Rozważania dotyczą rzeczywistego procesu przebiegającego w maszynie pracującej na co dzień w jednej z fabryk styropianu, i mają na celu poprawę efektywności pracy tego urządzenia.

W chwili obecnej, sterowanie potokowym węzłem spieniania, odbywa się zazwyczaj ręcznie tzn. większość sygnałów sterujących ustawiana jest przez operatorów maszyn. Powoduje to znaczne wydłużenie czasu reakcji na wszelkie zaburzenia występujące w układzie, oraz w sposób istotny pogarsza jakość gotowego wyrobu.

Celem prowadzonych badań jest opracowanie układu automatycznej regulacji, który zwalniałby operatora z konieczności ciągłej kontroli procesu, sprowadzając jego funkcję jedynie do reakcji na ewentualne awarie.

1.1. Opis procesu spieniania polistyrenu

Spienianie polistyrenu spienialnego jest pierwszym etapem produkcji wyrobów styropianowych. Surowcem niezbędnym do produkcji styropianu jest polistyren spienialny (Extrudered Polistyrene – EPS). W celu spieniania polistyrenu należy podgrzać go do temperatury mięknienia polistyrenu, tj. około 90 °C. Wówczas na skutek wrzenia zawartego w poroforach gazu spieniającego (np. pentanu, izobutanu) następuje „rozpychanie" granulek polistyrenowych, co zmniejsza ich gęstość nasypową z 630 kg/m^3 do około 15 kg/m^3.



Rys. 1. Polistyren spienialny na różnych etapach produkcji
Fig. 1. Expanded polystyrene for various stages of production

Jeśli polistyren spienialny zostanie podgrzany zbyt gwałtownie lub przetrzymany w wysokiej temperaturze przez zbyt długi okres czasu, struktura granulki ulegnie zniekształceniu, pomarszczy się i „zapadnie się w sobie". Wpłynie to na ponowny wzrost gęstości gotowego wyrobu oraz pozbawi granulkę czynnika spieniającego, niezbędnego w dalszych etapach produkcji styropianu. Jeśli ilość przegrzanych granulek będzie zbyt duża, wpłynie to negatywnie na właściwości fizyko-chemiczne produktów obniżając ich wartość handlową. Charakterystyka wzrostu polistyrenu została pokazana w pracy [2].

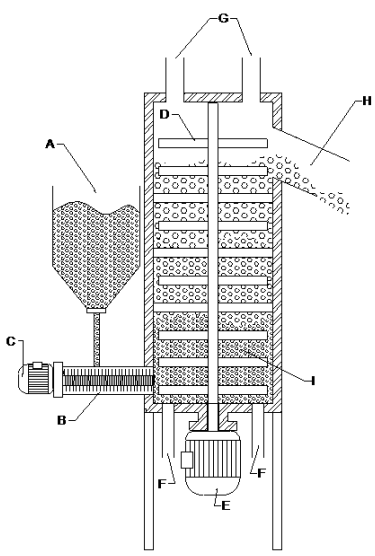
1.2. Opis pracy potokowego węzła spieniania

Do produkcji styropianu na skalę przemysłową wykorzystuje się między innymi potokowe węzły spieniania. Na rysunku 2

został przedstawiony przykładowy węzeł spieniania z widoczną komorą spieniania, suszarką fluidalną, zasobnikami na surowiec oraz innymi elementami wspomagającymi pracę urządzenia.

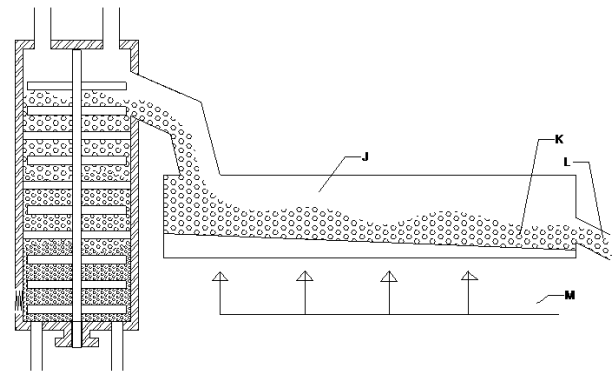
Rys. 2. Potokowy węzeł spieniający
Fig. 2. Continous pre-expander

Natomiast, na rysunku 3 został schematycznie przedstawiony proces spieniania. Polistyren spienialny o odpowiedniej granulacji – zależnej od pożądanej gęstości wyrobu – umieszczany jest w zbiorniku pośrednim (A). Z tego zbiornika, przy pomocy napędu ślimakowego (B) o prędkości obrotowej regulowanej przy pomocy silnika (C), surowiec wprowadzany jest do, uprzednio nagrzanej do temperatury około 90 °C, komory spieniania (I). Komora spieniania nagrzewana jest przy pomocy pary technologicznej, wprowadzanej przy pomocy wejścia (F). Wylot zużytej pary, która oddała już energię jest wypuszczana do atmosfery przy pomocy wyjścia (G). Gdy objętość surowca w komorze będzie większa od objętości roboczej komory następuje opuszczenie spienionego polistyrenu poprzez otwór wysypu (H). Jego poziom może być stały bądź regulowany przy pomocy odpowiednich żaluzji. Mieszadło (D), sterowane przy pomocy silnika (E), zapewnia równomierne spienienie granulek styropianowych oraz uniemożliwia sformowanie się polistyrenu w monolityczny blok. Zamontowane łopatki, znajdujące się na wysokości wysypu, powodują wyrzucenie znajdującego się najwyżej spienionego surowca, do suszarki fluidalnej przedstawionej schematycznie na rysunku 3.



Rys. 3. Schematyczne przedstawienia węzła spieniania
Fig. 3. Schematic of the pre-expander

W suszarce, na skutek nadmuchu powietrza o temperaturze otoczenia (M), następuje osuszenie polistyrenu (z wody powstałej ze skroplenia się pary wykorzystanej do podgrzania komory spieniania) oraz jego wstępna stabilizacja. Następuje również wstępne schłodzenie wyrobu. Ciśnienie powietrza musi być ustawiona na odpowiednim poziomie. Zbyt słabe ciśnienie nie wysuszy polistyrenu wystarczająco, co znacząco zwiększy jego masę zaburzając pomiar gęstości oraz utrudni transport surowca przy pomocy systemu pneumatycznego. Natomiast zbyt duże ciśnienie pozbawi granulki styropianowe pentanu, który jest niezbędny w następnych etapach produkcji styropianu (II spienianie, formowanie bloków, etc.).



Rys. 4. Suszarka fluidalna
Fig. 4. Fluid dryer

Na skutek działania powietrza i naporu nowych granulek styropianowych następuje stopniowe przesuwanie się spienionego polistyrenu do wyjścia (L), skąd jest on transportowany do silosów zapewniających jego dalszą stabilizację.

W celu kontroli gęstości wyrobu pobierane są próbki polistyrenu o stałej objętości i ważone w punkcie (K).

W opisywanej maszynie, główną wartością regulowaną jest gęstość wyrobu, która z jednej strony powinna być jak najniższa, a z drugiej nie można dopuścić do przegrzania granulek polistyrenowych. Zmiany wartości regulowanej są osiągane głównie poprzez intensywność dozowania surowca, regulowaną za pomocą prędkości obrotowej dozownika, oraz poprzez ustawianie objętości komory spieniania przy pomocy żaluzji. Zmienne te mają wpływ na czas przebywania surowca w komorze spieniania, a przez to na ilość energii cieplnej odebranej przez granulki styropianowe. Temperatura zadana w komorze spieniania jest z reguły ustawiona na stałym poziomie 90 °C i regulowana jest przy pomocy regulatora PID zwiększającego lub zmniejszającego, zależnie od potrzeb (np. na skutek zwiększenia szybkości dozowania surowca), ilość podawanej pary.

2. Metoda pomiaru gęstości

Do pomiaru gęstości gotowego wyrobu opracowano automatyczny układ wagowy pracujący w trybie cyklicznym (rys. 5). Układ ten, przy pomocy wentylatora, pobiera za każdym razem stałą objętość wyrobu (około 10 dm3) do zbiornika pośredniego. Po odmierzeniu zadanej ilości kulek styropianowych, co jest sygnalizowane przy pomocy czujnika podczerwieni, następuje przesypanie wyrobu do wagi. Następnie, po dokonaniu pomiaru (rozdzielczość wynosi 0,1 kg/m^3) i wysłaniu danych do sterownika PLC, następuje odessanie zważonego wyrobu z powrotem do suszarki. Proces ważenia odbywa się ponownie. Ze względu na cykliczną pracę układu ważącego, czas próbkowania wagi jest dość znaczny i wynosi około 75 sekund. Czas ten nie jest stały, a jego wartość jest zdeterminowana okresem czasu potrzebnym do napełnienia zbiornika pośredniego, który z kolei jest zależny od gęstości oraz wilgotności mierzonego surowca.

Rys. 5. Automatyczny układ wagowy
Fig. 5. Automatic weighting device

3. Identyfikacja procesu

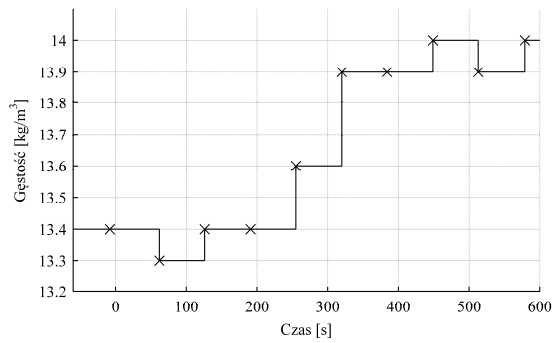
Przeprowadzone badania miały na celu określenie odpowiedzi obiektu tj. gęstości wyrobu wyrażonej w kg/m^3, na wymuszenie tj. prędkością obrotową ślimaka dozującego wyrażonej jako % jej wartości maksymalnej. Relacja między tymi sygnałami jest kluczową zależnością charakteryzującą proces spieniania polistyrenu, i na niej opiera się cała regulacja procesu technologicznego.

3.1. Opóźnienie obiektu

W obiekcie występuje opóźnienie transportowe związane z czasem potrzebnym do pokonania drogi surowca z podajnika, poprzez komorę spieniania i suszarkę do punktu wagowego. Czas ten jest więc zdeterminowany objętością roboczą komory spieniania oraz intensywnością dozowania.

Ponieważ badania były prowadzone na pracującej maszynie, więc nie było możliwości identyfikacji opóźnienia za pomocą eksperymentu. Na potrzeby identyfikacji opóźnienia obiektu, zarejestrowano wszystkie zmienne procesowe, tj. gęstość wyrobu, temperaturę w komorze spieniania, intensywność dozowania i objętość roboczą komory, a następnie pomiary te wykorzystano do przeprowadzenia analizy. Po zebraniu wystarczającej liczby pomiarów wyselekcjonowano te, w których wystąpiła zmiana wartości dozowania surowca przy stałych wartościach pozostałych zmiennych procesowych. Jeśli przez przynajmniej 6 minut przed i po wystąpieniu zmiany dozowania pozostałe zmienne procesowe były w stanie ustalonym, ciąg próbek pomiarowych wybierany był do identyfikacji i traktowany jako skok wartości sterującej. Zmiana intensywności dozowania mogła wpłynąć na zmianę temperatury w komorze spieniania, jednak wykorzystany wewnętrzny regulator kompensował tą zmianę zmieniając ilość podawanej pary. Dynamika zmian temperatury została potraktowana jako część identyfikowanego obiektu.

Na rysunku 6 została przedstawiona przykładowa odpowiedź gęstości produktu na zmianę prędkości obrotowej ślimaka dozującego surowiec z 25% do 30%, co odpowiada skokowi intensywności dozowania z 1348 kg/h na 1587 kg/h. Pomiar został przeprowadzony przy objętości komory spieniania wynoszącej 7,2 m^3. Z przeprowadzonej analizy wynika, że zakłócenia losowe istniejące w układzie, mieszczą się w zakresie ±0,2 kg/m^3. Tak więc zmianę gęstości większą niż 0,2 kg/m^3 traktowano jako odpowiedź na zmianę dozowania, a nie jako efekt zakłóceń. Przy tych założeniach, opóźnienie układu, widoczne na rysunku 6, wyniosło około 255 sekund.



Rys. 6. Odpowiedź na skok jednostkowy dozowania
Fig. 6. Process response for dosing step

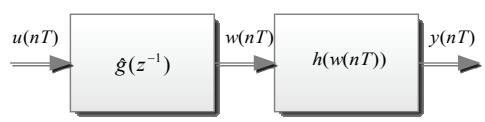
Mając do dyspozycji 16 skoków spełniających te kryteria, określono średnie wartości opóźnienia dla 3 różnych objętości roboczych (tab. 1). Z tabeli tej widać, że średnie opóźnienie obiektu rośnie wraz z objętością roboczą komory, co jest spowodowane dłuższą drogą pokonywaną przez surowiec.

Tab. 1. Opóźnienie transportowe dla różnych objętości roboczej komory
Tab. 1. Transport delay for various chamber volumes

Objętość	5,4 m^3	6,3 m^3	7,2 m^3
Opóźnienie	136 s	151 s	202 s
Ilość cykli wagi	2 cykle	2 cykle	3 cykle

3.2. Model dynamiki obiektu

Jako model dynamiki obiektu przyjęto model Wienera opisany m. in. w [3, 4, 5]. Model ten składa się z dynamicznej części liniowej na wejściu oraz statycznej nieliniowości wyjściowej (rys. 7). Zastosowanie tego modelu pozwoliło uwzględnić nieliniowość procesu spieniania związaną z krzywą wzrostu granulek polistyrenu.



Rys. 7. Schemat blokowy modelu Wienera
Fig. 7. Block diagram of the Wiener model

Wejście modelu $u(nT)$ odpowiada intensywności dozowania surowca, $y(nT)$ są to kolejne pomiary układu wagowego, a sygnał $w(nT)$ jest wewnętrznym stanem układu.

Przyjęto, że część liniową $\hat{g}(z^{-1})$ modelu opisuje transmitancja o następującej strukturze:

$$\hat{g}(z^{-1}) = \frac{\hat{w}(z^{-1})}{\hat{u}(z^{-1})} = \frac{b_2 z^{-2} + b_1 z^{-1} + b_0}{a_2 z^{-2} + a_1 z^{-1} + 1} z^{-k} \tag{1}$$

Funkcja nieliniowa $h(w(nT))$ została aproksymowana funkcją przedziałami liniową (ang. piecewise linear). Jako czas próbkowania T przyjęto średni czas cyklu pracy układu wagowego.

Do identyfikacji modelu wykorzystano pomiary zebrane w fabryce styropianu. Do parametryzacji modelu wybrano tylko te pomiary, które charakteryzowały się stałą objętością roboczą oraz ograniczonymi wahaniami temperatury w komorze, a czas ich trwania nie był mniejszy od 20 minut.

W celu określenia parametrów a_i oraz b_j funkcji liniowej i nieliniowości wyjściowej modelu posłużono się zestawem narzędziowym System Identification Toolbox środowiska programowego Matlab [6]. Dla opóźnienia k przyjęto wartości wyznaczone metodą opisaną w punkcie 3.1.

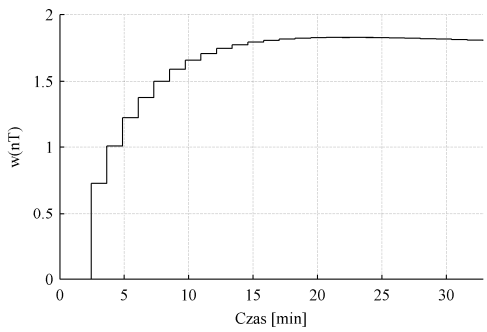
Metodyka ta pozwoliła wyznaczyć parametry modelu dla różnych objętości roboczych komory (tab. 2). W tabeli 2 zestawiono również informacje o ilości przebiegów czasowych użytych do estymacji.

Tab. 2. Opóźnienie transportowe dla różnych objętości roboczej komory
Tab. 2. Delay for various chamber value

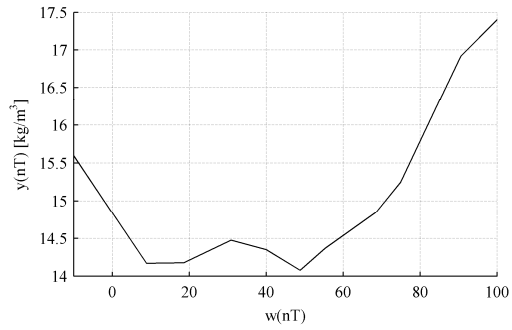
Objętość	b_0	b_1	b_2	a_1	a_2	k	Próba
5.4 m^3	1	-0,55	-0,44	-1,34	0,35	2	8
6.3 m^3	-0,73	1	-0,27	-1,76	0,76	2	18
7.2 m^3	1	-0,44	-0,5	-1,19	0,23	3	12

Podczas produkcji styropianu najczęściej stosowano objętość komory wynoszącą 6.3 m^3, co było podyktowane kompromisem między dużą wydajnością maszyny (pozwalającą na zwiększenie intensywności dozowania nie zmniejszając przy tym czasu przetrzymywania surowca w komorze spieniania), a łatwością regulacji procesem.

Na rysunku 8 przedstawiona została odpowiedź skokowa transmitancji $\hat{g}(z^{-1})$ obliczonej dla objętości roboczej 6,3 m^3.



Rys. 8. Odpowiedź liniowego modelu na skok jednostkowy dozowania
Fig. 8. Dispensing step response

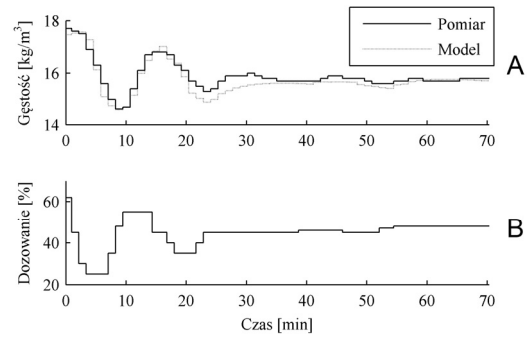


Rys. 9. Nieliniowość wyjściowa modelu
Fig. 9. Output nonlinearity

Na charakterystyce nieliniowości wyjściowej (rys. 9) można zaobserwować minimum w okolicach gęstości równej 14,1 kg/m^3. Jest to wartość krytyczna gęstości nasypowej, jaką można uzyskać podczas pierwszego spieniania polistyrenu. Po osiągnięciu tego punktu dalsze wydłużanie czasu przetrzymania w komorze spieniania spowoduje wzrost gęstości wskutek przegrzania granulek styropianowych. Producenci zakładają [7, 8], że minimalna wartość gęstości wynosi 15 kg/m^3 co w tym przypadku jest spełnione z zapasem.

4. Weryfikacja modelu

Porównanie wyników symulacji opartej na modelu z przykładowym rzeczywistym przebiegiem procesu zostało przedstawione na rysunku 10. Dla tego eksperymentu model charakteryzował się dokładnością na poziomie 9,4% [6], co biorąc pod uwagę szereg zakłóceń występujących w układzie, w szczególności rodzaj surowca [2], który nie został uwzględniony w tych badaniach, jest wartością zadowalającą.



Rys. 10. Porównanie odpowiedzi modelu i procesu (A), na wymuszenie (B)
Fig. 10. Comparison of the model with real process responses

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania, zaprezentowane w niniejszym artykule, pozwoliły na wstępną identyfikację procesu spieniania polistyrenu. Pokazano relację pomiędzy wejściem a wyjściem obiektu wykorzystując do tego celu nieliniowy model Wienera. Pokazano również wpływ objętości roboczej komory spieniania na opóźnienie transportowe procesu.

Model ten będzie wykorzystany podczas syntezy regulatora sterującego procesem spieniania polistyrenu, zarówno na etapie projektowania jak i weryfikowania jakości regulacji.

Badany proces, co wykazano w niniejszej publikacji, charakteryzuje się istotną nieliniowością oraz zmiennym opóźnieniem transportowym. Dodatkowo, na układ działa szereg innych zaburzeń, tj. rodzaj i jakość surowca, właściwości pary technologicznej, temperatura otoczenia. Właściwości te również trzeba będzie uwzględnić przy projektowaniu układu sterowania procesem spieniania polistyrenu.

6. Literatura

[1] http://www.energyefficiency.basf.com/ecp1/EnergyEfficiency/en/function/conversions:/publish/upload/pdf/neopor_br_e.pdf
[2] Łukasik M.: Identyfikacja procesu spieniania polistyrenu EPS, OWD Wisła 2010.
[3] Guo F.: A new identyfication method for Wiener and Hammerstein systems. Advances in Soft Computing, 2006, Volume 34, 619-632.
[4] Fan D., Lo K.: Identification for disturbed MIMO Wiener system. Nonlinear Dyn (2009) 55: 31–42.
[5] Bai E.W.: An Optimal Two-stage Identification Algorithm for Hammerstein–Wiener Nonlinear Systems. Automatica Volume 38, Issue 5, May 2002, Pages 853-860.
[6] Ljung L.: System Identification Toolbox™ 7 User's Guide, MathWorks 2010.
[7] Polimeri Europa: TECHNICAL DATA SHEET A 5000AE.
[8] Owipian® FS: Karta informacyjna o produkcie, Synthos Dwory.

otrzymano / received: 18.12.2010
przyjęto do druku / accepted: 02.02.2011 *artykuł recenzowany*