

PAWEŁ STĄCZEK^{*)}, STANISŁAW PŁASKA

Politechnika Lubelska
Katedra Automatykacji
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

Sterowanie uplastycznianiem preform w procesie wytwarzania pojemników z PET

Cz. II. IDENTYFIKACJA WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH OBIEKTU STEROWANIA

Streszczenie — Praca jest drugą częścią cyklu publikacji dotyczących badań zmierzających do opracowania układu automatycznej regulacji temperatury preform z poli(tereftalanu etylenu) (PET) w procesie ich uplastyczniania. Opisano metody oraz wyniki identyfikacji właściwości dynamicznych obiektu sterowania. Omówiono utworzone modele dynamiczne oraz zweryfikowano ich zgodność (adekwatność) z danymi doświadczalnymi. Stwierdzono, że procesy zachodzące podczas uplastyczniania preform cechuje względnie duża inercja, co stanowi główną przyczynę niskiej jakości sterowania manualnego, realizowanego przez operatora. Przedstawiono wyniki statystycznej oceny jakości przykładowego procesu uplastyczniania przebiegającego w torze otwartym. Otrzymane rezultaty wskazują jednoznacznie na potrzebę opracowania automatycznego układu regulacji temperatury w procesie ogrzewania preform. Przedyskutowano także oryginalny pomysł wykorzystania nowej miary, określającej pośrednio warunki termiczne panujące w tunelu grzewczym, do poprawy jakości dynamicznej sterowania.

Słowa kluczowe: uplastycznianie preform z PET, modelowanie procesów, statystyczna ocena jakości.

AUTOMATED CONTROL OF THE PREFORM REHEATING PROCESS IN THE MANUFACTURING OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) CONTAINERS. Part II. IDENTIFICATION OF THE DYNAMICAL PROPERTIES OF CONTROLLED OBJECT

Summary — The paper is the second part of a series presenting the research work focused on the development of automatic temperature control system for poly(ethylene terephthalate) (PET) preforms in the reheating process. The methods and results of the identification of dynamical properties of the controlled object were described. The constructed dynamical models were presented and their consistency with the experimental data was verified. It was found that the processes which occur during reheating of preforms are characterized by a relatively high inertia, which is the main reason of low quality of manual control by an operator. The results of the statistical quality assessment of an exemplary reheating process running in open-loop mode were presented. They show that it is necessary to develop an automated temperature control system for the process of heating the preform. An original concept of supplemental signal, as an indirect measure of thermal conditions inside the heating oven, which can increase a dynamical quality of automatic control, was discussed.

Keywords: reheating of PET preforms, modelling of processes, statistical quality assessment.

W Cz. I pracy [1] opisano proces uplastyczniania preform z poli(tereftalanu etylenu) (PET), przebiegający w tunelu grzewczym, w sposób charakterystyczny dla syntezy układów sterowania. Omówiono strukturę wewnętrzną procesu jako obiektu sterowania w ujęciu przyczynowo-

wo-skutkowym (por. rys. 4 w [1]). Podano charakterystyki statyczne wybranych elementów obiektu dla rzeczywistego procesu technologicznego. W Cz. II przedstawiono, m.in. wyniki doświadczalne oraz opracowane modele matematyczne opisujące właściwości dynamiczne procesu, które stanowią podstawę syntezy automatycznego sterowania temperaturą uplastycznionych preform.

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: p.staczek@pollub.pl

PROCESY CIEPLNE ZACHODZĄCE W TRAKCIE UPLASTYCZNIANIA PREFORM

Istotą fazy uplastyczniania preform z PET, w procesie formowania przez rozdmuchiwanie z rozciąganiem, jest zwiększenie temperatury materiału ścianki preformy do wartości powyżej temperatury zeszklenia T_g . W przypadku preform wytworzonych techniką wtryskiwania (postać amorficzna PET) przyjmuje się $T_g \approx 80$ °C [2, 3]. Zakres dopuszczalnych wartości temperatury uplastyczniania preform jest jednak ograniczony skłonnością PET do samoistnej krystalizacji, przebiegającej w temperaturze od ok. 140 °C, z maksymalną prędkością przypadającą na 160 °C. W praktyce przemysłowej dąży się do tego, aby temperatura materiału w ściance uplastycznionej preformy, przed fazą rozdmuchu przybierała wartość z przedziału 90–120 °C [2, 4].

W najbardziej rozpowszechnionej obecnie na świecie metodzie uplastyczniania preform z PET, wykorzystującej halogenowe promienniki podczerwieni emitujące energię w paśmie średniej podczerwieni (ang. MIR), ciepło jest dostarczane do materiału preform trzema sposobami:

- a) na drodze promieniowania elektromagnetycznego (podczerwonego),
- b) w wyniku konwekcji, tj. „omywania” zimnych preform powietrzem nagrzanym w sąsiedztwie promienników,
- c) na skutek przewodzenia ciepła zaabsorbowanego na zewnętrznej powierzchni preformy w kierunku wewnętrznych warstw jej ścianki.

Dominującą rolę odgrywa transport energii przez radiację a), gdyż taki sposób przekazywania ciepła jest najefektywniejszy, energia bowiem jest absorbowana także przez materiał „w głębi” ścianki a nie tylko na powierzchni jak ma to miejsce w przypadku konwekcji.

Poli(tereftalan etylenu) charakteryzuje się dużą wartością współczynnika absorpcji promieniowania o długości fali 5–15 μm (średnia podczerwień) [2, 5]. Właściwy dobór źródła promieniowania, z ekstremum widma przypadającym w tym zakresie długości fal, zapewnia największą efektywność przekazywania energii cieplnej.

W przypadku uplastyczniania preform z PET, o grubości ścianki wynoszącej nawet 6 mm (np. preformy do produkcji butli o poj. 20 dm³), duże natężenie promieniowania o długości fali z zakresu odpowiadającego największej absorpcji (5–15 μm) jest jednak przyczyną przegrzewania przypowierzchniowych warstw preformy. Większa część energii jest pochłaniana w zewnętrznej warstwie o grubości kilkuset mikrometrów, a względnie małe przewodnictwo cieplne PET skutkuje wytworzeniem niekorzystnego gradientu temperatury w ściance preformy.

Aby nie dopuścić do nadmiernego wzrostu temperatury powierzchni preformy, powodującego niepożądaną krystalizację PET, schładza się preformę wykorzystując wymuszony wentylatorami ruch powietrza, czerpanego

na ogół z otoczenia maszyny [2, 4, 6]. Stosowane są także wielostopniowe zespoły uplastyczniające, w których celowo wydzielono przestrzenie pozbawione elementów grzewczych [7–9]. W nieogrzewanych strefach dochodzi do samoistnego zmniejszenia wartości gradientu temperatury w ściance preformy, jednak wpływa to w istotnym stopniu na wydłużenie czasu uplastyczniania (zmniejszenie wydajności procesu produkcyjnego).

Innym rozwiązaniem, wykorzystywanym w wysoko-wydajnych zespołach uplastyczniających, są promienniki z ekstremum natężenia widma emisji w paśmie bliskiej podczerwieni 0,8–1,5 μm (ang. NIR) [10, 11]. Duża wartość współczynnika transmisyjności PET (ok. 90 %) w tym fragmencie widma, pozwala na głęboką penetrację materiału preformy przez promieniowanie [2]. Dzięki większej gęstości mocy promieniowania NIR niż promieniowania MIR oraz równomiernemu ogrzewaniu materiału preformy, praktycznie biorąc, w całej objętości, czas uplastyczniania preformy może być skrócony kilkukrotnie w porównaniu z czasem uplastyczniania w technologiach wykorzystujących promieniowanie w paśmie średniej podczerwieni.

Wysoką wydajność oraz największą sprawność energetyczną uplastyczniania preform z PET osiąga się używając promieniowania mikrofalowego [12, 13] albo światła laserowego w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR) [14]. Jednak koszty wytworzenia zespołów uplastyczniających z zastosowaniem tych technologii są bardzo duże.

Wraz ze wzrostem temperatury materiału preformy nasilają się procesy przeciwne — czyli wypromieniowywanie energii oraz ochładzanie przez powietrze wentylujące wnętrze zespołu uplastyczniającego. Wymienione procesy absorpcji, emisji oraz przewodzenia ciepła w materiale preform zachodzą równocześnie i są zróżnicowane przestrzennie.

Z punktu widzenia celu prowadzonych przez autorów badań, obejmującego opracowanie układu automatycznej regulacji temperatury uplastycznianych preform, nieistotna jest ani wykorzystana technika uplastyczniania ani ilościowy opis cząstkowych procesów cieplnych oraz fizykochemicznych, zachodzących w materiale preform. Na potrzeby syntezy automatycznego sterowania, dzięki któremu proces uplastyczniania staje się, praktycznie biorąc, bezobsługowy, wystarcza utworzenie modeli przyczynowo-skutkowych obserwowalnych zmiennych procesu uplastyczniania (wielkości: sterujących, sterowanych, zakłóceń), sprowadzające się do aproksymowania poszukiwanych zależności równaniami różniczkowymi [15].

OBIEKT BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Opisane prace doświadczalne przeprowadzono w procesie formowania butelek z PET metodą rozdmuchiwania z rozciąganiem. Proces przebiegał na zautomatyzowanej maszynie wydmuchowej typu HS3000 [16],

produkcji SMF Maschinenfabrik GmbH, przeznaczonej do wytwarzania butelek o pojemności od 0,5 dm³ do 3,0 dm³ i o nominalnej wydajności 2500 butelek o poj. 1,5 dm³ na godzinę. W zespole uplastyczniającym zastosowano halogenowe promienniki podczerwieni z maksimum natężenia promieniowania w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni (w zależności od poziomu wystawiania).

Półproduktem w badanym procesie były preformy transparentne wykonane z poli(tereftalanu etylenu) techniką wtryskiwania, o masie nominalnej 36 g, z szyjką PCO-1810 o średnicy 28 mm (typową dla butelek do napojów nasycanych CO₂) i nominalną grubością ścianki preformy 2,95 mm. Lepkość właściwa tworzywa wynosiła 0,8 dl/g. Preformy nagrzewano promieniowaniem podczerwonym w sześciu wirtualnie wydzielonych strefach rozmieszczonych wzdłuż osi preformy. Nominalne wartości temperatury powierzchni zewnętrznej, poprawnie uplastycznionych preform, mieściły się w przedziale 100–135 °C, w zależności od usytuowania strefy grzewczej (pomiaru wykonywano pirometrami, uwzględniając współczynnik emisyjności PET). Uplastycznione preformy rozdmuchiwało za pomocą powietrza pod ciśnieniem 2,0–2,5 MPa, a jednocześnie rozciągano wzdłuż ich osi, do gniazda formującego o objętości 1,5 dm³.

CHARAKTERYSTYKA PROCESU NAGRZEWANIA POWIETRZA W TUNELU GRZEW CZYM

Model procesu nagrzewania powietrza w tunelu grzewczym (a także elementów jego konstrukcji), oznaczony przez G_{O2} (por. rys. 4 w [1]), został określony jako zależność sygnału $y_2(t)$, będącego wynikiem pomiaru temperatury powietrza odciganego z wnętrza tunelu, od dwóch zmiennych: wielkości sterującej $u_2(t)$ – intensywności wentylacji oraz $P_{PC}(t)$ – mocy emitowanej z promienników energii, zależnej od sygnału sterującego $u_1(t)$. Identyfikację właściwości obiektu G_{O2} przeprowadzono rejestrując w stanie ustalonym proces, tj. dla $u_2(t) = \text{const}$, odpowiedź zmiennej $y_2(t)$ na skokową zmianę sygnału $u_1(t)$. Stwierdzono zależność inercyjną pierwszego rzędu [15, 17] o postaci:

$$y_2(t) = \Delta u_1 \cdot k_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{O2}}} \right) + y_2(0) \quad (1)$$

gdzie: Δu_1 – wartość skoku sygnału sterującego u_1 , k_1 – wzmocnienie statyczne obiektu G_{O2} ; $k_1 = \Delta y_2 / \Delta u_1$, T_{O2} – stała czasowa obiektu G_{O2} .

Zatem transmitancja operatorowa obiektu G_{O2} ma postać:

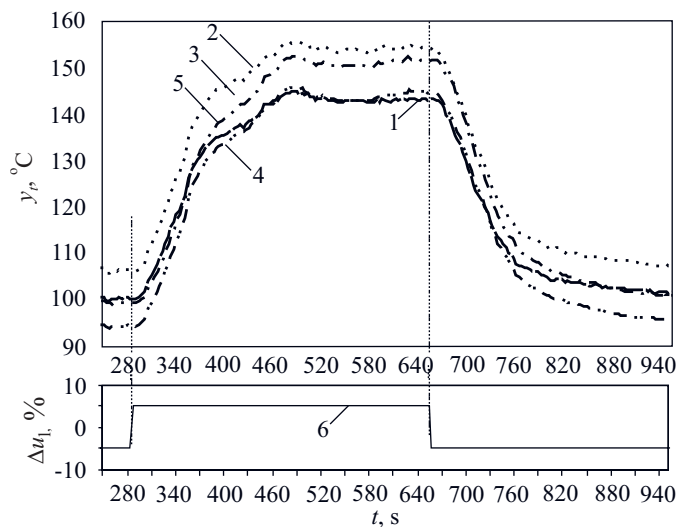
$$G_{O2}(s) = \frac{k_1}{T_{O2}s + 1} \quad (2)$$

Wartość stałej czasowej T_{O2} wyznaczonej dla badanego procesu uplastyczniania wynosi 128 s, co oznacza, że nowy stan równowagi termodynamicznej w przykładowym zespole uplastyczniającym jest osiągany dopiero po

upływie czasu wynoszącym co najmniej $3T_{O2} \approx 400$ s (odpowiedź na poziomie 95 % kolejnego stanu ustalonego) od zmiany sygnału sterującego $u_1(t)$, w szczególności od chwili włączenia maszyny do pracy.

CHARAKTERYSTYKA PROCESU NAGRZEWANIA (UPLASTYCZNIANIA) PREFORM

Proces uplastyczniania preform G_{O1} zdefiniowano jako zależność sygnału $y_1(t)$, reprezentującego temperaturę powierzchni preform, od sygnałów $u_1(t)$ oraz $T_{PW}(t)$ zależnego od $u_2(t)$ (por. rys. 4 w [1]). Identyfikację właściwości obiektu G_{O1} wykonano doświadczalnie, analizując odpowiedź sygnału $y_1(t)$ na skokową zmianę zmiennej sterującej $u_1(t)$, dla $u_2(t) = \text{const}$. Badania przeprowadzono dla przypadku wzrostu a następnie spadku wartości sygnału $u_1(t)$, podczas uplastyczniania transparentnych preform o masie 36 g, z dwiema różnymi wydajnościami (prędkościami przenośnika preform v). Modele rozpatrywano niezależnie dla 5 wirtualnie wyróżnionych stref (fragmentów) preformy, rozmieszczonych równomiernie wzdłuż jej osi i zgodnych z układem przestrzennym stref grzewczych zespołu uplastyczniającego.



Rys. 1. Odpowiedź y_1 obiektu G_{O1} w pięciu strefach grzewczych (linie 1–5) na skokowe zmiany sygnału sterującego u_1 (linia 6); punkty na krzywych reprezentują temperaturę zmierzoną na powierzchni kolejnych preform

Fig. 1. Response y_1 of the object G_{O1} for five heating zones (curves 1–5) as a result of step changes of control signal u_1 (curve 6); the points on the graphs represent surface temperature of subsequent preforms

Na rys. 1 przedstawiono zarejestrowane odpowiedzi skokowe obiektu G_{O1} w pięciu strefach preformy. Sygnał sterujący $u_1(t)$ zmieniano skokowo w zakresie od $u_1^0 - 5\%$ do $u_1^0 + 5\%$ a następnie od $u_1^0 + 5\%$ do $u_1^0 - 5\%$, gdzie u_1^0 jest wartością odniesienia dla sygnału sterującego u_1 .

Na podstawie charakteru odpowiedzi skokowych obiektu G_{O1} , określono jego transmitancje operatorowe o dwóch różnych postaciach:

$$G_{O1}(s) = \frac{k_0}{(T_1' s + 1)(T_2' s + 1)} e^{-Ts} \quad (3)$$

$$G_{O1}(s) = \frac{k_0}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (4)$$

Model obiektu G_{O1} o ogólnej postaci (3) uwzględnia:

– inercyjne właściwości procesu cząstkowego G_{PR2} (rys. 4, [1]) określone stałą czasową T_1' ;

– opóźniające właściwości zastosowanej metody pomiaru temperatury i urządzenia pomiarowego G_{UP1} , opisane czasem opóźnienia T ;

– inercyjne właściwości algorytmu filtracji wyników pomiarów bloku G_F (algorytm EWMA [18, 19]), określone stałą czasową T_2' .

Model o postaci przedstawionej równaniem (4) jest nieco inną aproksymacją badanego procesu, porównywalną ilościowo z modelem (3), lecz niezawierającą czystego opóźnienia transportowego (tj. członu e^{-Ts}).

W pracy [20] także opisano wyniki aproksymacji obiektu G_{O1} modelem o jeszcze prostszej postaci niż (3) i (4), tj. inercyjnym pierwszego rzędu z opóźnieniem.

Współczynnik k_0 w równaniach (3) i (4) jest całkowitym wzmocnieniem obiektu G_{O1} , określa przyrost temperatury uplastycznionej preformy Δy_1 odpowiadający zmianie sygnału sterującego mocą promienników Δu_1 o jeden procent mocy maksymalnej, w otoczeniu punktu

pracy procesu. Właściwości pozostałych członów G_W oraz G_{PR1} , będących w strukturze obiektu, można uznać za bezinercyjne, a ich wzmocnienia uwzględniono we współczynniku k_0 .

Na rys. 2 pokazano wyniki aproksymacji zarejestrowanej odpowiedzi skokowej obiektu G_{O1} za pomocą modeli (3) oraz (4), w wybranej strefie grzewczej. Model (3) o parametrach $k_0 = 5,1$ ($^{\circ}\text{C}/\%$), $T_1' = 53$ s, $T = 11$ s, $T_2' = 15$ s, cechuje się mniejszym błędem aproksymacji niż model (4), jednak wyrażenie e^{-Ts} w modelu (3) implikowałoby trudności o charakterze obliczeniowym w trakcie dalszej analizy właściwości układu sterowania (w rachunku symbolicznym). Dlatego też, dla potrzeb projektowania algorytmu regulacji procesu uplastyczniania preform, przyjęto model $G_{O1}(s)$ o właściwościach inercyjnych drugiego rzędu (4), z zastępczymi stałymi czasowymi $T_1 = 52$ s oraz $T_2 = 25$ s (wartości uśrednione z modeli dla wszystkich stref). W tabeli 1 podano parametry wyznaczonych doświadczalnie modeli obiektu sterowania $G_{O1}(s)$ (4), niezależnie dla każdej ogrzewanej strefy transparentnej preformy o masie 36 g, dla procesu o wydajności 2160 preform/h (odpowiadającej prędkości przenośnika preform $v^0 = 56$ %).

T a b e l a 1. Zestawienie parametrów modelu G_{O1} o ogólnej postaci (4) dla poszczególnych stref grzewczych (wydajność procesu 2160 butelek/h)

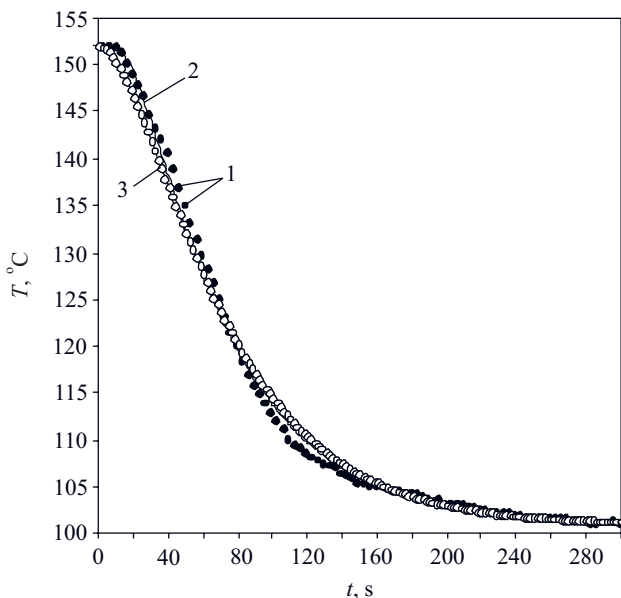
T a b l e 1. Parameters of the model G_{O1} of general form (4) for subsequent heating zones (production output 2160 bottles/h)

| Nr strefy i | Wymuszenie $\Delta u_1 = -5\% \rightarrow +5\%$ | | | Wymuszenie $\Delta u_1 = +5\% \rightarrow -5\%$ | | | Wartość średnia dla strefy | | |
|--------------------------------------|---|------------------|------------------|---|------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|
| | $k_0^{(i)}$ $^{\circ}\text{C}/\%$ | $T_1^{(i)}$ s | $T_2^{(i)}$ s | $k_0^{(i)}$ $^{\circ}\text{C}/\%$ | $T_1^{(i)}$ s | $T_2^{(i)}$ s | $k_0^{(i)}$ $^{\circ}\text{C}/\%$ | $T_1^{(i)}$ s | $T_2^{(i)}$ s |
| 1 | 4,5 | 52 | 20 | 4,3 | 50 | 25 | 4,4 | 51 | 23 |
| 2 | 4,9 | 55 | 20 | 4,7 | 52 | 22 | 4,8 | 54 | 21 |
| 3 | 5,4 | 54 | 21 | 5,1 | 51 | 25 | 5,3 | 53 | 23 |
| 4 | 5,1 | 54 | 21 | 4,9 | 52 | 25 | 5,0 | 53 | 23 |
| 5 | 5,6 | 52 | 23 | 5,1 | 50 | 25 | 5,4 | 51 | 24 |
| Wartości średnie ze wszystkich stref | | | | | | | 5,0 | 52 | 23 |

T a b e l a 2. Zestawienie parametrów modelu G_{O1} o ogólnej postaci (4), dla poszczególnych stref grzewczych (wydajność procesu 1400 butelek/h)

T a b l e 2. Parameters of the model G_{O1} of general form (4) for subsequent heating zones (production output 1400 bottles/h)

| Nr strefy i | Wymuszenie $\Delta u_1 = -5\% \rightarrow +5\%$ | | | Wymuszenie $\Delta u_1 = +5\% \rightarrow -5\%$ | | | Wartość średnia dla strefy | | |
|--------------------------------------|---|------------------|------------------|---|------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|
| | $k_0^{(i)}$ $^{\circ}\text{C}/\%$ | $T_1^{(i)}$ s | $T_2^{(i)}$ s | $k_0^{(i)}$ $^{\circ}\text{C}/\%$ | $T_1^{(i)}$ s | $T_2^{(i)}$ s | $k_0^{(i)}$ $^{\circ}\text{C}/\%$ | $T_1^{(i)}$ s | $T_2^{(i)}$ s |
| 1 | 5,2 | 85 | 29 | 5,1 | 72 | 36 | 5,2 | 79 | 33 |
| 2 | 6,9 | 88 | 33 | 7,6 | 80 | 38 | 7,3 | 84 | 36 |
| 3 | 6,5 | 82 | 38 | 7,2 | 82 | 44 | 6,9 | 82 | 41 |
| 4 | 6,3 | 88 | 35 | 6,4 | 78 | 42 | 6,4 | 83 | 39 |
| 5 | 7,0 | 96 | 35 | 7,5 | 87 | 41 | 7,3 | 92 | 38 |
| Wartości średnie ze wszystkich stref | | | | | | | 7,0 | 84 | 37 |



Rys. 2. Aproksymacja zarejestrowanej odpowiedzi skokowej obiektu G_{O1} w trzeciej strefie grzewczej (krzywa 1) za pomocą dwóch modeli: krzywa 2 — o ogólnej postaci (3), krzywa 3 — o postaci (4); wydajność procesu 2160 butelek/h

Fig. 2. Approximation of step response of the object G_{O1} for the third heating zone (curve 1) by use of two models: curve 2 — of general form (3), curve 3 — of the form (4); production output 2160 bottles/h

Doświadczalną identyfikację właściwości obiektu sterowania powtórzone dla procesu uplastyczniania przebiegającego z wydajnością 1400 preform/h ($v^0 = 37\%$). Stwierdzono, że wartości wszystkich parametrów modeli (3) oraz (4) różnią się znacznie od odpowiednich wartości odnoszących się do modeli procesu o wydajności 2160 preform/h (tabela 2). Oznacza to, że właściwości obiektu sterowania mogą w istotnym stopniu zmieniać się w czasie. Opracowywany układ sterowania powinien zatem posiadać mechanizmy adaptacyjne lub mieć odpowiednio duży zapas stabilności, niestety kosztem pogorszenia jakości regulacji. Rozważania te są przedmiotem analiz opisanych w kolejnych częściach pracy.

CZAS ODPOWIEDZI OBIEKTU STEROWANIA

Czas odpowiedzi obiektu określa jego reakcję na skokową zmianę sygnału sterującego lub zakłócenia i z reguły jest określony przez czas t_0 upływający do chwili osiągnięcia przez sygnał wyjściowy co najmniej 95 % wartości kolejnego stanu ustalonego [15, 17]. Decydujący wpływ na wartość czasu odpowiedzi mają stałe czasowe T_1 i T_2 (4), dla których czas odpowiedzi t_0 obiektu G_{O1} można określić równaniem:

$$t_0 = 3(T_1 + T_2) \quad (5)$$

co dla badanego procesu daje wartość $t_0 \approx 230$ s.

Oszacowany czas odpowiedzi obiektu jest stosunkowo duży (blisko 4 min), wynika z niego, że istotne zakłócenie procesu uplastyczniania sterowanego w torze otwartym może być powodem nieprawidłowego uplastyczniania nawet kilkuset preform, pomimo dokonania przez operatora korekty procesu (z reguły spóźnionej). Dlatego znajomość dynamiki obiektu sterowania jest niezmiernie ważna dla poprawnego prowadzenia procesu uplastyczniania preform.

ANALIZA WRAŻLIWOŚCI OBIEKTU STEROWANIA NA ZAKŁÓCENIA

W celu ilościowej oceny jakości procesu uplastyczniania sterowanego w torze otwartym (sporadycznie korygowanego manualnie), wykonano testy obejmujące rejestrację temperatury preform y_1 , podczas produkcji opakowań z PET w warunkach przemysłowych. Przeprowadzono kilka testów, każdy trwający ok. 1 h, w trakcie których wytworzono kilka tysięcy opakowań (butelek). Jako kryterium poprawności przebiegu procesu uplastyczniania przyjęto dwustronną symetryczną tolerancję wartości temperatury uplastycznionych preform, wynoszącą:

$$T_{ol} = \pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C} = 5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

W butelkach wyprodukowanych z preform, których temperatura powierzchni po uplastycznieniu wykroczyła poza tolerancję (6), widoczne były zmatowienia („zabielenia”) fragmentów ścianki, występujące najczęściej poniżej szyjki oraz w dnie butelki.

Miarą jakości procesu uplastyczniania była zdolność potencjalna c_p oraz zdolność uzyskana c_{pk} [18, 19]. Stwierdzono, że niecentryczność procesu uplastyczniania

$$e = y_1^0 - \bar{y}_1 \quad (7)$$

gdzie: y_1^0 – celowa (zadana) wartość temperatury powierzchni preformy, \bar{y}_1 – wartość średnia temperatury uzyskana w teście,

zmieniała się w granicach $e = 0,6 - 3,3 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Zdolność potencjalna c_p w badanym procesie:

$$c_p = \frac{T_{ol}}{6\sigma} \quad (8)$$

gdzie: σ – odchylenie standardowe temperatury y_1 w próbie, zmieniała się w granicach $c_p = 0,38 - 0,8$, w zależności od testu.

Uzyskany wynik oznacza, że jakość sterowania procesem uplastyczniania w torze otwartym jest bardzo niska. Dla zerowej niecentryczności procesu ($e = 0$), w przeliczeniu na 1 000 000 sztuk uplastycznionych preform, nawet 150 000 sztuk ($c_p = 0,38$) będzie miało temperaturę niemieszczącą się w polu tolerancji (6). W odniesieniu natomiast do najgorszego wyniku w teście (niecentryczność $e = 3,3 \text{ } ^\circ\text{C}$, $c_{pk} = -1,66$) ilość niewłaściwie uplastycznionych preform przekroczy 50 %. Wyniki te, w podobnych proporcjach, mogą przekładać się na występowanie wad w końcowych produktach (opakowaniach), co w procesie produkcyjnym jest niedopuszczalne.

DODATKOWY, POŚREDNI POMIAR WARUNKÓW TERMICZNYCH W TUNELU GRZEWCZYM

Przeprowadzone testy oraz wyniki identyfikacji właściwości dynamicznych obiektu sterowania wskazują na dużą inercję procesu uplastyczniania preform. Ponadto oceny temperatury uplastycznionej preformy można dokonać dopiero po opuszczeniu przez nią wnętrza tunelu, co wprowadza dodatkowe opóźnienie w torze pomiarowym (opóźnienie transportowe). Dla badanego procesu uplastyczniania czas opóźnienia T w modelu (3) wynosi 11 s i wzrasta ze zmniejszaniem prędkości przENOŚNIKA preform v (wydajności procesu). Dlatego autorzy postanowili znaleźć dodatkowy nośnik informacji o warunkach termicznych panujących wewnątrz tunelu, reagujący „szybko” na ewentualne zakłócenia w przebiegu procesu uplastyczniania.

Schemat blokowy (rys. 4 w [1]) zawiera dodatkowe urządzenie pomiarowe G_{UP3} , którego zadaniem jest pomiar mocy promieniowania cieplnego $P_{PC}(t)$ emitowanego przez elementy grzejne o właściwościach $G_{PR1}(s)$. Jeżeli inercja urządzenia G_{UP3} będzie znacznie mniejsza od sumy stałych czasowych i czasu opóźnienia łańcucha utworzonego przez bloki G_{PR2} , G_{UP1} i G_P to sygnał $y_3(t)$ może być wykorzystany w strukturze sterowania i przyczynić się do poprawy jakości dynamicznej opracowywanego układu regulacji temperatury $y_1(t)$.

Próby przeprowadzone z detektorem promieniowania cieplnego w roli przetwornika G_{UP3} , zbudowanego na

bazie termopary listkowej umieszczonej w pobliżu promiennika podczerwieni strefy grzewczej wykazały, że właściwości dynamiczne bloku G_{UP3} mogą być opisane transmitancją członu inercyjnego pierwszego rzędu ze stałą czasową wynoszącą 11 s. Oznacza to, że wpływ zakłóceń na proces uplastycznienia [w szczególności zmian napięcia zasilającego $U_Z(t)$] może być „dostrzeżony” w sygnale $y_3(t)$ po czasie ponad dziesięciokrotnie krótszym niż w sygnale $y_1(t)$.

Metoda sterowania procesem uplastycznienia preform, wykorzystująca dodatkową informację z detektora promieniowania cieplnego, została zgłoszona przez autorów pracy do ochrony patentowej [21]. Propozycję rozwiązania technicznego tej metody opisano w kolejnej części niniejszego cyklu publikacji.

PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonej analizy dynamiki przykładowego procesu uplastycznienia preform z PET wynika, że ten obiekt sterowania charakteryzuje się właściwościami inercyjnymi co najmniej drugiego rzędu, a suma stałych czasowych (75 s) jest dwukrotnie większa niż czas przebywania preformy w tunelu grzewczym. Oznacza to, że wpływ zakłócenia na przebieg procesu prowadzonego w torze otwartym (nadzorowanym przez operatora) jest zauważany zwykle zbyt późno, nawet po kilku minutach. Z tego samego powodu efekty działań korygujących, podejmowanych przez człowieka odnoszą skutek po upływie podobnego czasu. Dlatego właściwe manualne sterowanie procesem uplastycznienia cechuje niska jakość, co potwierdzają przeprowadzone testy (duża wadliwość produktów) a także doniesienia technologów i użytkowników maszyn. Ponadto, obiekt sterowania nie jest niezmienny w czasie, co potencjalnie komplikuje strukturę układu oraz praw (algorytmów) sterowania.

Zastosowane w pracy metody oceny jakości procesu uplastycznienia, w postaci wskaźników zdolności potencjalnej c_p i rzeczywistej c_{pk} są standardowymi i ważnymi elementami zarządzania jakością w technikach wytwarzania opakowań z PET. Umożliwiają one nieskomplikowaną i szybką ocenę przydatności rozwiązań technicznych zastosowanych w maszynie do realizacji określo-

nych zadań technologicznych, eliminując zbędne problemy i koszty.

W następnych częściach pracy omówiono kolejne etapy syntezy automatycznego układu sterowania temperaturą uplastycznionych preform.

LITERATURA

1. Stączek P., Płaska S.: *Polimery* 2011, **56**, 758.
2. Brooks D. W., Giles G. A.: „PET Packaging Technology”, Wiley-Blackwell, New York 2002.
3. Dege N.: „Technology of Bottled Water”, John Wiley & Sons, New York 2011.
4. Selke S.: „Understanding plastics packaging technology”, Hanser Gardner Publications, New York 1997.
5. Lee N.: „Understanding blow molding”, Hanser Gardner Publications, Ohio 2007.
6. Rosato D., Rosato A., Di Mattia D.: „Blow molding handbook: technology, performance, markets, economics”, Hanser Gardner Publications, Ohio 2004.
7. *Pat. USA* 6 906 290 (2005).
8. *Pat. USA* 5 006 222 (1991).
9. *Zgłosz. pat.* P-393 543 (2010).
10. *Pat. USA* 7 820 991 (2010).
11. *Pat. DE* 100 51 641 (2002).
12. *Zgłosz. pat. USA* 2010/0 181 309 (2010).
13. *Zgłosz. pat. USA* 2011/0 253 708 (2011).
14. *Zgłosz. pat. USA* 2008/0 099 961 (2008).
15. Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R.: „Podstawy teorii sterowania”, WNT, Warszawa 2006.
16. www.smfgmbh.com/uploads/HS_ENG.pdf
17. Gessing R.: „Podstawy automatyki”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
18. Płaska S.: „Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
19. Montgomery D.: „Introduction to Statistical Quality Control”, John Wiley & Sons, New York 2005.
20. Stączek P., Płaska S.: *Archiv. Mech. Technol. Automation* 2010, **30**, 169.
21. *Zgłosz. pat.* P-393 535 (2010).

Wersja skorygowana 28 V 2012 r.