

PAWEŁ STĄCZEK^{*)}, STANISŁAW PŁASKA

Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Automatyki
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

Sterowanie uplastycznianiem preform w procesie wytwarzania pojemników z poli(tereftalanu etylenu)

Cz. I. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU ORAZ OPIS OBIEKTU STEROWANIA

Streszczenie — W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań własnych zmierzających do opracowania automatycznego układu sterowania temperaturą uplastycznionych preform z poli(tereftalanu etylenu) (PET), w technologii wytwarzania pojemników przez rozdmuchiwanie z rozciąganiem. Sformułowano problem i cel sterowania oraz omówiono obiekt sterowania w ujęciu przyczynowo-skutkowym, typowym dla syntezy sterowania. Zidentyfikowano i scharakteryzowano procesy cząstkowe, urządzenia wykonawcze, wielkości przyczynowe, skutkowe oraz czynniki zakłócające a także omówiono strukturę obiektu. Przedyskutowano właściwości statyczne wybranych elementów obiektu sterowania oraz możliwości kompensacji wpływu zmian obserwowalnych wielkości zakłócających na przebieg procesu uplastyczniania.

Słowa kluczowe: kształtowanie przez rozdmuchiwanie z rozciąganiem, sterowanie temperaturą, uplastycznianie preform z PET.

AUTOMATED CONTROL OF THE PREFORM REHEATING PROCESS IN THE MANUFACTURING OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) CONTAINERS.

Part I. DEFINITION OF THE PROBLEM AND DESCRIPTION OF THE CONTROLLED OBJECT

Summary — The paper presents selected results of the research work focusing on the development of automatic temperature control system for the reheated poly(ethylene terephthalate) (PET) preforms in the manufacturing of containers by stretch blow molding technology. The main problem was characterized, the objective of control was defined and the controlled object was described using the cause and effect relationship, typically applied in the synthesis of control systems. The following elements of the system were described: structure of the object, partial physical processes, actuators, causal and consequential variables as well as disturbance factors. The static properties of selected elements of the controlled object, as well as the ability to compensate for disturbances that influence the preform reheating process, were discussed.

Keywords: stretch blow molding, temperature control, PET preform reheating process.

FORMOWANIE POJEMNIKÓW Z PET PRZEZ ROZDMUCHIWANIE Z ROZCIĄGANIEM

Pojemniki wytwarzane z poli(tereftalanu etylenu) (PET) (butelki, słoiki) są wykonywane za pomocą zautomatyzowanych maszyn, m.in. na drodze rozdmuchiwania z rozciąganiem uplastycznionych wcześniej półproduktów nazywanych preformami. Proces wytwarzania obejmuje wówczas dwa zasadnicze etapy:

— etap I — uplastyczniania (nagrzewania) materiału preform, najczęściej z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego,

— etap II — kształtowania uplastycznionej preformy przez rozciąganie z jednoczesnym rozdmuchiwanym przy użyciu sprężonego gazu do gniazda formującego o docelowym kształcie pojemnika.

Warunkiem koniecznym wytworzenia produktów o wymaganej jakości jest zapewnienie powtarzalnego przestrzennego rozkładu temperatury w ścianie uplastycznionych preform (przed fazą rozdmuchiwania z rozciąganiem) [1, 2]. Znaczenie problemu powtarzalności uplastycznienia preform jest szczególnie ważne w tzw.

^{*)} Adres do korespondencji; e-mail: p.staczek@pollub.pl, wm.ka@pollub.pl

„trudnych technologiach”, tj. w przypadku opakowań o złożonych kształtach. W takich procesach zmiana temperatury materiału ogrzanej preformy zaledwie o 1 °C skutkuje wadami — najczęściej „zabieleniem” fragmentów pojemnika charakteryzujących się największym odkształceniem rozciąganego materiału.

W większości maszyn do produkcji pojemników wg opisywanej technologii sterowanie temperaturą ogrzewanych preform odbywa się w torze otwartym, tj. bez automatycznego pomiaru i sprzężenia zwrotnego od temperatury uplastycznionych preform. Taki rodzaj sterowania jest mało efektywny, ponieważ procesy cieplne zachodzące w zespole uplastyczniającym preformy podlegają wielu czynnikom zakłócającym. Działania korygujące przebieg procesu są podejmowane przez operatora maszyny zbyt późno — z reguły dopiero po dostrzeżeniu wad dyskwalifikujących część wyprodukowanych pojemników. Skuteczne sterowanie manualne uplastycznianiem ogranicza także znaczna inercja oraz nieliniowy charakter procesów cieplnych zachodzących w zespole uplastyczniającym [3].

Szczególnie trudne jest prowadzenie procesu wytwarzania pojemników w krajach tropikalnych (znaczące dobowe wahania temperatury powietrza) oraz w regionach z sieciami energetycznymi o niskiej jakości (np. w Afryce — zasilanie z agregatów prądotwórczych).

Z podanych powodów renomowani producenci maszyn (m.in. Nissei ASB Machine Co., SIPA SpA, SIG PET-tec GmbH) podjęli prace mające na celu zbudowanie urządzeń „bezobsługowych”, co wiązało się głównie z budową automatycznych układów regulacji rozkładu przestrzennego temperatury w ścianie uplastycznionej preformy.

W niniejszej publikacji przedstawiono wybrane elementy badań własnych i uzyskane, już wdrożone w maszynach produkowanych przez SMF Maschinenfabrik GmbH, własne rozwiązania układów automatycznego sterowania procesem uplastyczniania preform z PET. W Cz. I. zaprezentowano wyniki w typowym dla syntezy sterowania ujęciu ilościowym, tj. bez przytaczania związków fizykalnych.

CHARAKTERYSTYKA PROCESU UPLASTYCZNIANIA PREFORM Z PET

Uplastycznianie wiąże się ze zwiększeniem energii wewnętrznej materiału preform, tak by uzyskać ściśle określony rozkład przestrzenny temperatury w ścianie preformy. W wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych maszyn uplastycznianie odbywa się w tunelu grzewczym (zwanym piecem tunelowym), wyposażonym w elementy grzejne w postaci elektrycznych promienników podczerwieni. Promienniki mają kształt rurowy i są zorientowane prostopadle do osi podłużnej preform. Odpowiednio zgrupowane elementy grzejne tworzą od kilku do kilkunastu niezależnie sterowanych stref grzewczych rozmieszczonych wzdłuż osi preformy. Przykładowe roz-



Rys. 1. Wnętrze tunelu ogrzewającego preformy w maszynie do wytwarzania opakowań metodą rozdmuchiwania z rozciąganiem

Fig. 1. Interior of reheating unit of stretch blow molding machine

wiązanie konstrukcyjne wnętrza tunelu uplastyczniającego preformy, z siedmioma strefami grzewczymi oraz z przenośnikiem łańcuchowym przedstawia rys. 1.

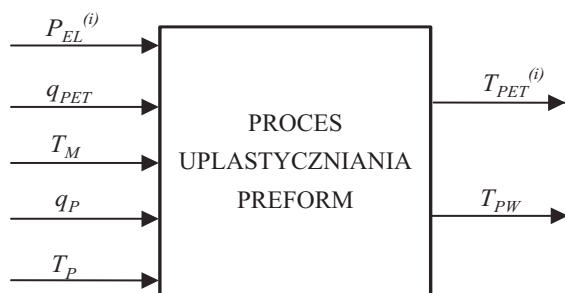
Preformy są transportowane przez wnętrze tunelu w pozycji pionowej, z częścią gwintową na górze lub na dole, za pomocą przenośnika łańcuchowego lub systemu wózków. W celu zapewnienia osiowej symetrii rozkładu temperatury w preformach wykonują one ruch obrotowy wokół swojej osi. Istotą uplastyczniania w takim rozwiązaniu jest dostarczenie do materiału preform energii cieplnej w wyniku napromieniania. Aby nie dopuścić do przegrzania zarówno materiału na powierzchni zewnętrznej, jak i elementów konstrukcyjnych tunelu, jego wnętrze schładza się intensywnie stosując wentylatory wyciągowe. Powietrze z otoczenia maszyny napływa do wnętrza tunelu przez specjalnie ukształtowane szczeliny w osłonach zewnętrznych oraz z okolic mechanizmu transportującego, od strony części preformy z gwintem.

Elementy grzewcze są z reguły zasilane napięciem przemiennym (sieciowym), a dostarczana moc elektryczna jest sterowana bezstopniowo w torze otwartym z wykorzystaniem przekształtników fazowych (sterowników tyrystorowych) [4].

PROCES UPLASTYCZNIANIA JAKO OBIEKT STEROWANIA

Model przyczynowo-skutkowy

W ujęciu przyczynowo-skutkowym proces uplastyczniania preform można przedstawić w postaci schematu blokowego (rys. 2), gdzie $P_{EL}^{(i)}$ — moc prądu elektrycznego



Rys. 2. Ogólny schemat blokowy procesu uplastyczniania preform, oznaczenia w tekście

Fig. 2. General scheme of preform reheating process, denotation in the text

dostarczana do i -tej strefy grzewczej, q_{PET} — wydatek masowy materiału preform, T_M — temperatura preform wprowadzanych do tunelu grzewczego, q_P — strumień masy powietrza wentylującego, T_P — temperatura powietrza zasysanego do tunelu, $T_{PET}^{(i)}$ — temperatura materiału w wirtualnie wydzielonej części preformy ogrzewanej w i -tej strefie grzewczej (wartość średnia temperatury materiału preformy w objętości ogrzewanej w strefie), T_{PW} — temperatura powietrza odsysanego z wnętrza tunelu.

Z punktu widzenia poprawności przebiegu procesu jest istotne uzyskanie zadanego rozkładu temperatury $T_{PET}^{(i)}$ w wirtualnie wydzielonych częściach preformy, ogrzewanych w K strefach grzewczych ($i = 1, 2, \dots, K$). Temperatura powietrza odsysanego T_{PW} nie jest istotna z punktu widzenia celu procesu, natomiast może być przydatnym w sterowaniu nośnikiem informacji o przebiegu procesu.

Moc elektryczna P_{EL} jest określona równaniem (1):

$$P_{EL}(t) = U(t) \cdot I(t) \quad (1)$$

gdzie: $I(t)$, $U(t)$ — odpowiednio, natężenie prądu płynącego przez element grzewczy oraz napięcie na jego zaciskach.

Strumień masy q_{PET} wynosi:

$$q_{PET} = \frac{m \cdot n}{t_1} \quad (2)$$

gdzie: m — masa jednej preformy, n — liczba preform znajdujących się jednocześnie w tunelu, t_1 — czas przebywania preformy w tunelu grzewczym.

W praktyce wydatek q_{PET} jest nastawiany w wyniku ustalenia względnej prędkości przenośnika preform v , wyrażonej procentowym udziałem maksymalnej wydajności q_{PET}^{MAX} :

$$v = \frac{q_{PET}}{q_{PET}^{MAX}} 100 \% \quad (3)$$

Zazwyczaj można przyjąć, że temperatura preform przed wprowadzeniem do tunelu grzewczego jest równa temperaturze powietrza otaczającego maszynę (w przypadku spełnienia zalecenia kondycjonowania preform):

$$T_M = T_P \quad (4)$$

Energia cieplna unoszona przez powietrze wentylujące (E_{WP}) wiąże wielkości T_{PW} , T_P i q_P w równaniu (5):

$$E_{WP} = c_p \int q_P (T_{PW} - T_P) dt \quad (5)$$

gdzie: c_p — ciepło właściwe powietrza wentylującego.

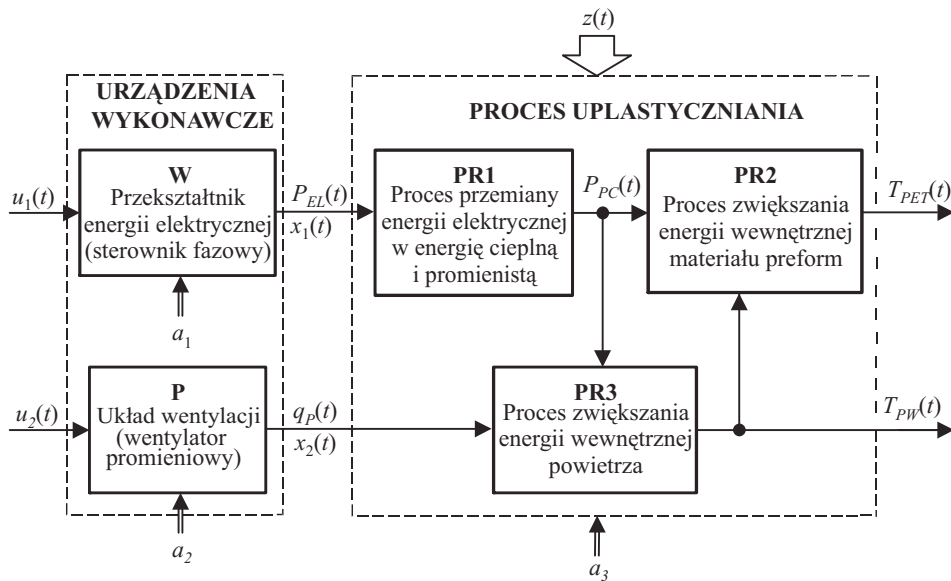
Strumień masy powietrza wentylującego q_P jest natomiast w przybliżeniu proporcjonalny do prędkości obrotowej wentylatora n_W (dla ograniczonego przedziału zmian prędkości):

$$q_P = k_W q_W n_W \quad (6)$$

gdzie: k_W — współczynnik proporcjonalności, q_W — masowa chłonność wentylatora.

Procesy cząstkowe oraz urządzenia wykonawcze

Na podstawie przeprowadzonej analizy zjawisk fizycznych zachodzących w zespole ogrzewającym preformy oraz sterowalności procesu uplastyczniania wyróżniono cząstkowe procesy cieplne a także urządzenia wykonawcze oddziałujące na przebieg tych procesów. Rysunek 3 przedstawia schemat blokowy uplastyczniania z uwzględnieniem sterowania, gdzie: PR1 — proces przemiany energii elektrycznej, głównie w energię promieniowania elektromagnetycznego, zachodzący w elementach grzewczych (typowo w halogenowych promiennikach podczerwieni), PR2 — proces absorpcji energii promienistej w materiale ścian uplastycznianych preform oraz wymiana ciepła w wyniku kontaktu z powietrzem wentylującym wewnątrz tunelu grzewczego, PR3 — proces ogrzewania powietrza wewnątrz tunelu grzewczego, W — urządzenie wykonawcze nastawiające moc prądu elektrycznego zasilającego elementy grzewcze tunelu (typowo przekształtniki elektryczne ze sterowaniem fazowym), P — urządzenie wykonawcze wymuszające przepływ powietrza przez wewnątrz tunelu grzewczego (typowo wentylatory wyciągowe), $u_1(t)$ oraz $u_2(t)$ — sygnały sterujące procesem uplastyczniania związane z, odpowiednio, nastawianiem mocy elektrycznej zasilającej elementy grzewcze oraz intensywnością wentylacji tunelu grzewczego (w praktyce zmienne te są wyrażane procentowym udziałem maksymalnych wartości mocy elementów grzewczych oraz prędkości obrotowej wentylatora), $P_{EL}(t)$ [także jako $x_1(t)$] — moc prądu elektrycznego dostarczanego do elementów grzewczych; w kontekście sterowania jest to sygnał nastawiający, wygenerowany przez urządzenie wykonawcze W, $q_P(t)$ [także jako $x_2(t)$] — strumień masy powietrza wentylującego tunel — sygnał nastawiający, wygenerowany przez urządzenie wykonawcze P, $P_{PC}(t)$ — moc energii promienistej wydzielonej w obszarach widma odpowiadających największej absorpcji przez materiał preform oraz powietrze wentylujące tunel, $T_{PET}(t)$ — temperatura materiału uplastycznianych preform, $T_{PW}(t)$ — temperatura powietrza odsysanego z wnętrza tunelu, a_1, a_2, a_3 — wielkości przyczynowe o przyjętych stałych wartościach, opisujące, odpowiednio, warunki dostarczania do promienników mocy elektrycznej wyrażonej przez sygnał $x_1(t)$ w zależności od sygnału sterującego $u_1(t)$, warunki schładzania wnętrza tunelu grzewczego wyrażone przez sygnał sterujący $u_2(t)$ i nastawiający $x_2(t)$, warunki dostarczania energii cieplnej do materiału preformy, $z(t)$ — zakłócenia oddziałujące na proces uplastyczniania.



Rys. 3. Schemat blokowy struktury wewnętrznej procesu uplastyczniania wraz z urządzeniami wykonawczymi, oznaczenia w tekście

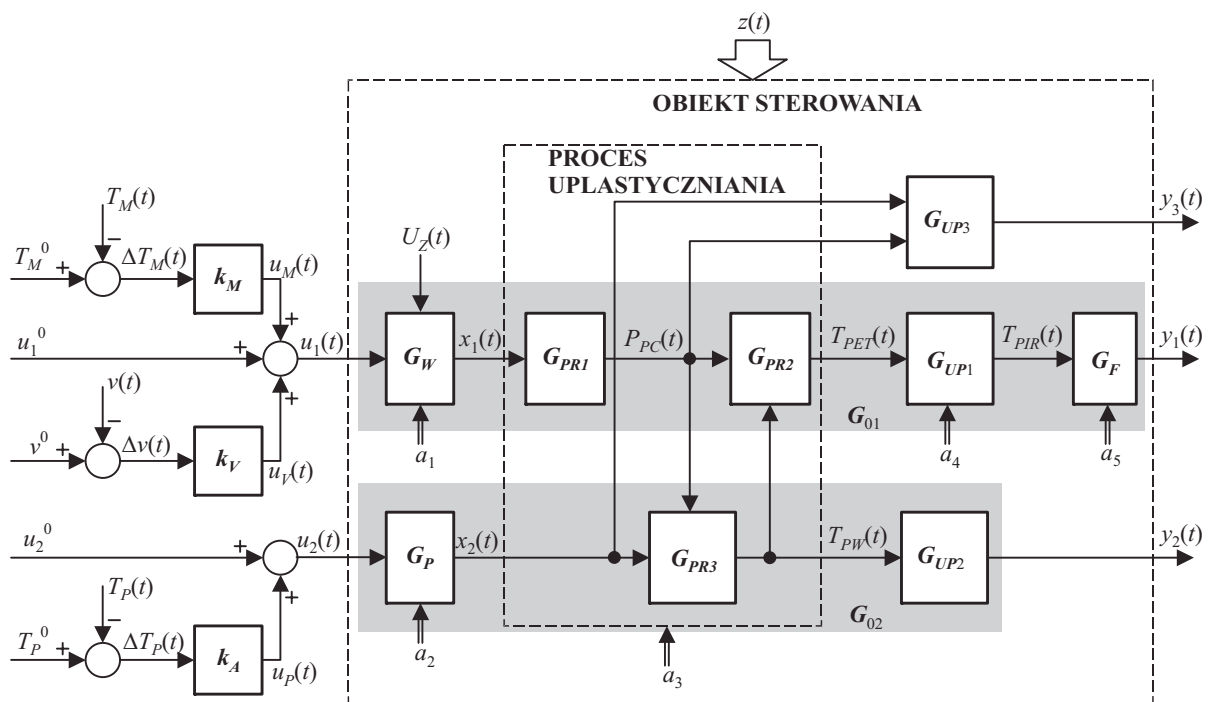
Fig. 3. Block diagram of the internal structure of reheating process including actuators, denotation in the text

Urządzenia pomiarowe, punkt pracy procesu, zakłócenia

W wyniku dalszej analizy sterowalności i obserwowalności procesu uplastyczniania preform, w strukturze obiektu sterowania wyróżniono kolejne bloki (m.in. urządzenia pomiarowe) oraz zidentyfikowane czynniki zakłócające. Na rys. 4 przedstawiono kompletny schemat blokowy obiektu sterowania z trzema torami kompensacji wpływu zakłóceń. Oznaczenia na rys. 4 są zgodne z oznaczeniami na rys. 3, a ponadto:

cji wpływu zakłóceń. Oznaczenia na rys. 4 są zgodne z oznaczeniami na rys. 3, a ponadto:

G_{PR1} , G_{PR2} , G_{PR3} – właściwości odpowiednich procesów cząstkowych określające związek zmiennej wyjściowej z wejściową (transmitancje operatorowe [5]), G_W , G_P – właściwości urządzeń wykonawczych, odpowiednio, W oraz P, G_{UP1} – właściwości urządzenia pomiarowego UP1 określającego temperaturę uplastycznionej preformy (typowo pirometrycznego przetwornika pomiarowego), $T_{PIR}(t)$ – sygnał wyjściowy z



Rys. 4. Szczegółowy schemat blokowy obiektu sterowania, oznaczenia w tekście

Fig. 4. Detailed block diagram of the control system, denotation in the text

urządzenia pomiarowego UP1 (wynik pomiaru temperatury), G_F — właściwości algorytmu przetwarzania i filtracji sygnału $T_{PIR}(t)$, $y_1(t)$ — sygnał sterowany procesu uplastyczniania reprezentujący temperaturę ogrzanych preform, a_4, a_5 — wielkości przyczynowe o przyjętych stałych wartościach opisujące, odpowiednio, warunki pozyskiwania przez urządzenie UP1 sygnału $T_{PIR}(t)$ reprezentującego temperaturę preformy oraz warunki filtracji zmierzonego sygnału temperatury $T_{PIR}(t)$, do postaci przydatnej do sterowania, tj. sygnału $y_1(t)$, G_{UP2} — właściwości urządzenia pomiarowego temperatury powietrza odciąganego z tunelu, $y_2(t)$ — sygnał sterowany procesu uplastyczniania reprezentujący temperaturę powietrza odciąganego z tunelu, G_{UP3} — właściwości urządzenia pomiarowego określającego pośrednio moc energii promienistej emitowanej przez elementy grzewcze oraz intensywność schładzania przez powietrze wentylujące, $y_3(t)$ — sygnał sterowany (pośredni) reprezentujący warunki termiczne panujące we wnętrzu tunelu, $T_M(t)$, $v(t)$, $T_p(t)$ — mierzalne czynniki zakłócające, odpowiednio, temperatura preform na wejściu do tunelu, rzeczywista prędkość przenośnika preform, temperatura powietrza zasysanego do tunelu, $U_Z(t)$ — napięcie w sieci energetycznej (wartość skuteczna); jeśli zmienia się w czasie to sygnał ten należy rozpatrywać jako zakłócenie, $u_1^0, v^0, u_2^0, T_M^0, T_p^0$ — ustalone wartości zmiennych sterujących oraz uśrednione poziomy czynniki zakłócających — tzw. punkt pracy procesu lub zbiór wartości odniesienia dla, odpowiednio, mocy elektrycznej dostarczanej do elementów grzejnych, prędkości przenośnika preform, intensywności wentylacji tunelu, temperatury preform na wejściu do tunelu, temperatury powietrza zasysanego do tunelu, k_M — współczynnik kompensacji zmian temperatury preform na wejściu do tunelu grzewczego, k_V — współczynnik kompensacji zmian prędkości przenośnika preform, k_A — współczynnik kompensacji zmian temperatury powietrza zasysanego do tunelu grzewczego, $u_M(t)$, $u_V(t)$ — wartości korygujące sygnał sterujący u_1^0 , tj. moc dostarczaną do elementów grzewczych, $u_P(t)$ — wartość korygująca sygnał sterujący u_2^0 , tj. intensywność wentylowania tunelu, G_{O1} — właściwości obiektu sterowania wyrażone przez sygnały $u_1(t)$ i $y_1(t)$, G_{O2} — właściwości obiektu sterowania wyrażone przez sygnały $u_2(t)$ i $y_2(t)$.

Obiekt sterowania pokazany na rys. 4. należy rozpatrywać oddzielnie dla każdej z K wyróżnionych wirtualnie stref grzewczych zespołu uplastyczniającego.

WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE OBIEKTU STEROWANIA

Oddziaływanie temperatury powietrza otaczającego maszynę na proces uplastyczniania

Jak wynika z wieloletnich doświadczeń producenta maszyn do wytwarzania pojemników z PET, temperatura powietrza T_p oraz temperatura „zimnych” preform T_M , przy założeniu określonym równaniem (4), w nieklimatyzowanej hali produkcyjnej może zmieniać się w zakresie od kilku do ponad 40 °C. Przeciętna temperatura uplastycznionych preform wynosi 110–130 °C [1, 6], dla

skrajnie zatem odmiennych warunków otoczenia ilość energii, którą należy dostarczyć do materiału preformy w tym samym czasie (stała wydajność produkcji), może różnić się nawet o 30 % (w dużym przybliżeniu, gdyż ciepło właściwe PET zmienia się wraz z temperaturą). Ta sama uwaga odnosi się do zjawisk cieplnych związanych z wentylacją wnętrza tunelu. Zmiany temperatury otoczenia maszyny $T_p(t)$ (na potrzeby sterowania utożsamianą także z T_M) uważa się więc za główny czynnik zakłócający proces uplastyczniania.

Pomimo dużej amplitudy zmian $T_p(t)$, ten czynnik zakłócający jest wolnozmienny i łatwy (tani) do zmierzenia. Dlatego też negatywny wpływ jego zmian na proces może być przewidywany i kompensowany w sposób pokazany na rys. 4.

Współczynnik kompensacji k_M (%/°C) (por. rys. 4) został zdefiniowany jako stosunek przyrostu sygnału sterującego elementami grzewczymi u_M i różnicy temperatury $\Delta T_M = T_M^0 - T_M$ w zależności (7):

$$k_M = \frac{u_M}{\Delta T_M} \quad (7)$$

gdzie: u_M — wyrażony w procentach udział maksymalnej mocy grzewczej.

Analogicznie, współczynnik kompensacji k_A (%/°C) został określony równaniem (8):

$$k_A = \frac{u_P}{\Delta T_P} \quad (8)$$

gdzie: u_P — przyrost prędkości obrotowej wentylatorów wyrażony jako udział procentowy prędkości maksymalnej.

W praktyce wpływ zmian temperatury powietrza T_p (preform T_M) na proces uplastyczniania kompensuje się wg równania (7) pozostawiając wydajność wentylacji u_2 na stałym poziomie.

Dla przykładowego procesu uplastyczniania preform transparentnych o masie 45 g, z wydajnością 1800 szt./h, współczynnik kompensacji k_M wynosi 0,25 %/°C (zależność wyznaczona doświadczalnie, po czym zlinearyzowana).

Oddziaływanie zmian prędkości przenośnika preform na proces uplastyczniania

Zmiana prędkości przenośnika preform v powoduje zmianę wydatku masowego q_{PET} [równania (2) i (3)] materiału preform wymagającego uplastyczniania. Zmiana wydatku q_{PET} może wynikać również ze zmiany liczby preform n znajdujących się w danej chwili w tunelu grzewczym, spowodowanej, np. rozpoczęciem lub zakończeniem procesu uplastyczniania (załadunku preform na przenośnik). Przedstawiony na rys. 4 współczynnik kompensacji k_V uwzględnia tylko zmiany prędkości przenośnika Δv , ale może być uogólniony dla wydatku masowego określanego według równania (2) i (3).

Współczynnik k_V (%/%) został zdefiniowany w następujący sposób:

$$k_V = \frac{u_V}{\Delta v} \quad (9)$$

Obie zmienne ilorazu zostały wyrażone w procentach, odpowiednio, maksymalnej mocy grzewczej oraz maksymalnej prędkości przenośnika preform.

Dla przykładowego procesu uplastyczniania preform transparentnych o masie 45 g z wydajnością 1800 szt./h, współczynnik kompensacji k_V wynosi 0,3 %/‰ (zależność wyznaczona doświadczalnie, po czym zlinearyzowana).

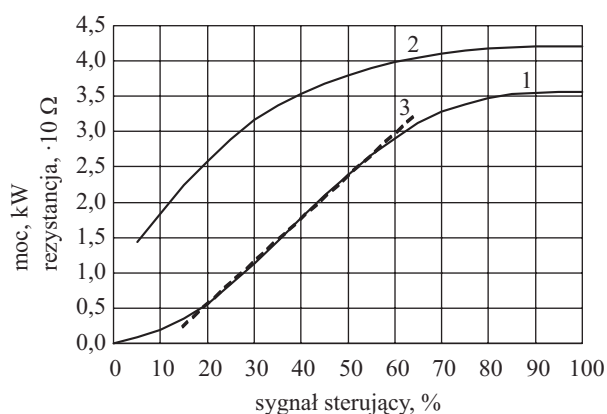
Oddziaływanie losowych zmian masy podawanych preform na proces uplastyczniania

Losowość zmian strumienia masy uplastycznianych preform jest powodowana brakiem jednej lub kilku preform na przenośniku wewnątrz tunelu grzewczego. Wówczas, w zależności (2) liczba preform n zmienia się, stąd q_{PET} nie jest stałe.

Stany takie powodują skokowe zmiany „obciążenia cieplnego” tunelu grzewczego, analogiczne jak w przypadku zmian prędkości przenośnika v . Uwzględnienie takich przypadków w sterowaniu nie jest jednak uzasadnione ze względu na koszty układu pomiaru rzeczywistego obciążenia tunelu grzewczego (detekcji braku preformy na przenośniku). Przedstawione zjawisko może być uwzględnione w zakłóceniu $z(t)$, a jego znaczenie zostanie przedyskutowane podczas analizy dynamiki układu sterowania.

Moc elektryczna pobierana przez tunel grzewczy

Urządzenie wykonawcze W (rys. 3) zamienia sygnał sterujący $u_1(t)$ na moc prądu elektrycznego $P_{EL}(t)$ przepływającego przez elementy grzejne. Na rys. 5 przedstawiona została zależność statyczna mocy P_{EL} od sygnału sterującego u_1 dla powszechnego rozwiązania konstruk-



Rys. 5. Zależność mocy elektrycznej P_{EL} [krzywa (1)] pobieranej przez strefę grzewczą oraz rezystancji promiennika [krzywa (2)] w funkcji sygnału sterującego u_1 , oraz wynik linearyzacji [krzywa (3)] krzywej (1) w zakresie wykorzystywanym w praktyce

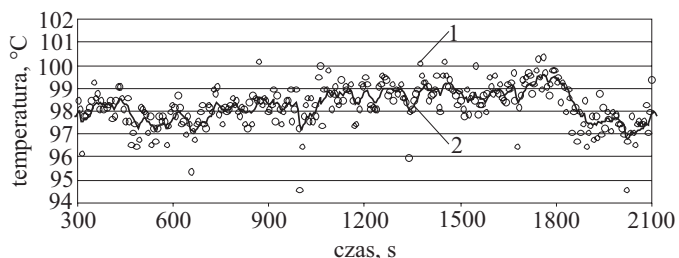
Fig. 5. Curves of the electrical power P_{EL} [curve (1)] consumed by heating zone and the resistance of radiant heater [curve (2)] vs. the control signal u_1 with linear approximation [curve (3)] of the relation curve (1) for common range of u_1

cyjnego, w którym halogenowy promiennik podczerwieni jest sterowany przez przekształtnik fazowy zasilany napięciem sieciowym (przemianym) [4]. Przebieg charakterystyki wskazuje, że w najczęściej stosowanym zakresie sygnału sterującego $15\% \leq u_1 \leq 65\%$, zależność $P_{EL} = f(u_1)$ można traktować jako liniową, o współczynniku kierunkowym 60 W/‰.

Gdy rolę urządzenia wykonawczego W pełni przekształtnik napięcia elektrycznego działający w torze otwartym, to rzeczywista moc $P_{EL}(t)$ dostarczana do elementu grzewczego zależy, oprócz sygnału sterującego u_1 , także od napięcia $U_Z(t)$ zasilającego przekształtnik. Niestabilność napięcia elektrycznego sieci stanowi bardzo istotny czynnik zakłócający przebieg procesu uplastyczniania, gdyż jest wielkością szybkozmienną a moc $P_{EL}(t)$ zależy od drugiej potęgi $U_Z(t)$.

Właściwości układu do pomiaru temperatury preform

W praktyce pomiar temperatury uplastycznionych preform T_{PET} opuszczających tunel grzewczy może być realizowany jedynie technikami bezkontaktowymi, tj. przy użyciu pirometrów lub rzadziej kamer termowizyjnych, przy czym ze względu na wysoki koszt kamer są one wykorzystywane na etapie badań i nie znajdują zastosowania w rozwiązaniach komercyjnych. Do celów budowy omawianego układu sterowania procesem uplastyczniania wykorzystano pirometry do zastosowań



Rys. 6. Przykładowy przebieg sygnału $T_{PIR}(t)$ — (1) z urządzenia pomiarowego UP1 (pirometru) oraz sygnału $y_1(t)$ — (2) będącego wynikiem przetworzenia $T_{PIR}(t)$ przez blok filtracji G_F z rys. 4 (punkty na wykresie odpowiadają wynikom pomiarów temperatury kolejnych preform)

Fig. 6. Exemplary time graph of $T_{PIR}(t)$ — (1) output signal from the measuring device UP1 (pyrometer) and signal $y_1(t)$ — (2) resulting from the processing of $T_{PIR}(t)$ by filtering block G_F (illustrated on Fig. 4). Points on the graph represent the temperature of subsequent preforms

stacjonarnych, pracujące w paśmie widma elektromagnetycznego 8–14 μm (średnia podczerwień). Szczegółowy opis opracowanej metody pomiaru temperatury preform zawiera praca [6]. Rysunek 6 przedstawia zarejestrowane przebiegi sygnału $T_{PIR}(t)$ w rzeczywistym procesie wytwarzania.

Sygnal użyteczny reprezentujący temperaturę preform

Nieprzetworzony sygnał wyjściowy $T_{PIR}(t)$ z pirometru $UP1$, w postaci przedstawionej na rys. 6, nie jest przydatny w procesie sterowania, ze względu na dużą zmienność spowodowaną, m.in.: zabrudzeniami, rysami i innymi defektami na powierzchni preform a także wrażliwością samej metody bezkontaktowego pomiaru temperatury na zakłócenia. Z tego powodu sygnał $T_{PIR}(t)$ jest poddawany przetwarzaniu w bloku G_F (rys. 4), polegającemu, m.in. na filtracji i uśrednianiu metodą EWMA [7, 8]. W ten sposób wypracowany zostaje sygnał wyjściowy $y_1(t)$ reprezentujący temperaturę powierzchni uplastycznionej preformy. Przykładowy przebieg obu sygnałów przedstawia rys. 6.

Formalnie, uzyskany sygnał $y_1(t)$ ma postać dyskretną o okresie próbkowania Δt równym okresowi przemieszczania kolejnych preform przed głowicą pirometru $UP1$ (typowo 2–5 s).

PODSUMOWANIE

W kontekście sterowania, proces uplastyczniania preform z PET, przebiegający w piecach tunelowych, jawi się jako złożony wielowymiarowy obiekt podlegający wpływowi licznych czynników zakłócających. Zjawiska cieplne zachodzące w trakcie procesu mają charakter nieliniowy oraz złożone właściwości dynamiczne, co utrudnia lub nawet uniemożliwia skuteczne sterowanie temperaturą uplastycznionych preform przez operatora.

Głównymi czynnikami zakłócającymi przebieg procesu są: zmiany temperatury powietrza do wentylowania wnętrza tunelu, niestabilność strumienia masy uplastycznianych preform oraz wahania parametrów sieci energetycznej.

Przedstawiono wybrane wyniki badań zmierzających do zbudowania automatycznego układu sterowania temperaturą w procesie uplastyczniania preform. Zidentyfikowano procesy cząstkowe, urządzenia wykonawcze, wielkości przyczynowe i skutkowe oraz czynniki zakłócające a także omówiono strukturę obiektu w ujęciu typowym dla syntezy sterowania. Przedyskutowano wybrane właściwości statyczne obiektu oraz możliwości kompensacji wpływu zmian obserwowalnych wielkości zakłócających na przebieg procesu uplastyczniania.

W kolejnych częściach pracy zostaną omówione właściwości dynamiczne obiektu sterowania oraz opracowane algorytmy regulacji.

LITERATURA

1. Brooks D. W., Giles G. A.: „PET Packaging Technology”, Wiley-Blackwell, New York 2002.
2. Stączek P.: *Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją* 2010, **13**, 109.
3. Stączek P., Płaska S.: *Archiv. Mech. Technol. Automat.* 2010, **30**, 169.
4. Frąckowiak L.: „Przekształtniki i łączniki energoelektroniczne o komutacji zewnętrznej”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
5. Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R.: „Podstawy teorii sterowania”, WNT, Warszawa 2006.
6. Stączek P.: *Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją* 2010, **14**, 83.
7. Płaska S.: „Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
8. Montgomery D.: „Introduction to Statistical Quality Control”, John Wiley & Sons, New York 2005.

Otrzymano 29 IV 2010 r.