

Synteza układu stabilizującego energię promieniowania cieplnego w zespołach uplastyczniających maszyn wytwarzających opakowania z PET

Stanisław Płaska, Paweł Stączek

Katedra Automatykacji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska

Streszczenie: Przedstawiono nowe rozwiązanie układu stabilizującego energię promieniowania cieplnego emitowanego w zespołach uplastyczniających preformy z PET. Typowymi elementami grzejnymi są lampowe promienniki podczerwieni zasilane z przekształtników elektrycznych, pracujących w torze otwartym. Takie rozwiązanie charakteryzuje się wrażliwością na zakłócenia powodowane zmianami napięcia w sieci energetycznej. Wpływ tych zakłóceń może być kompensowany przez układ regulacji ze sprzężeniem zwrotnym od temperatury uplastycznionych preform. Jednak metoda ta charakteryzuje się długimi czasami regulacji, spowodowanymi dużą inercją obiektu sterowania, opóźnieniem w torze pomiarowym temperatury a także dyskretnym (okresowym) charakterem pomiaru. Istotą zaproponowanego rozwiązania jest utworzenie wewnętrznego obwodu regulacji z pomiarem mocy emitowanego promieniowania oraz wewnętrznym regulatorem sterującym przekształtnikiem. Nowe rozwiązanie może stanowić autonomiczny układ wykorzystywany w zespołach grzewczych maszyn lub też tworzyć wewnętrzny obwód układu kaskadowego, sterującego temperaturą uplastycznianych preform w maszynach wytwarzających opakowania z PET.

Słowa kluczowe: sterowanie kaskadowe, synteza sterowania, uplastycznianie preform z PET

1. Sformułowanie problemu

Aktualnie można zaobserwować gwałtowny rozwój technologii formowania wyrobów z poli(tereftalanu etyleny) – PET metodą rozciągania z rozdmuchiwaniem (butelek, słoików itp.). Dla poprawnego przebiegu tej technologii podstawowe znaczenie ma faza nagrzewania (uplastyczniania) wstępnie uformowanych pojemników zwanych preformami [1]. Zazwyczaj w procesie uplastyczniania preform wykorzystywane jest promieniowanie elektromagnetyczne w paśmie podczerwieni. Uplastycznianie odbywa się w tunelu wyposażonym w elektryczne promienniki podczerwieni w kształcie prętów, umieszczonych prostopadle do osi podłużnej preformy. Pogrupowane elementy grzewcze tworzą od kilku do kilkunastu niezależnie sterowanych stref rozmieszczonych wzdłuż osi preformy. Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne wnętrza tunelu uplastyczniającego, z siedmioma strefami grzewczymi oraz z przenośnikiem łańcuchowym, zostało pokazane na rys. 1.

Istotą uplastyczniania w takim rozwiązaniu jest dostarczenie energii cieplnej do materiału preform przez promieniowanie. Aby nie dopuścić do przegrzania materiału na powierzchni zewnętrznej oraz elementów konstrukcyjnych tunelu, wne-

trze jest intensywnie schładzane przez wentylatory wyciągowe.

Elementy grzewcze zasilane są z reguły napięciem przemennym, a dostarczana moc elektryczna jest sterowana bezstopniowo w torze otwartym z wykorzystaniem przekształtników z modulacją fazową [2]. Jest to rozwiązanie ekonomiczne (brak kosztownych układów pomiaru mocy czynnej – sprzężeń zwrotnych) ale wrażliwe na czynniki zakłócające, przede wszystkim na niestabilność parametrów sieci energetycznej (napięcia).

W nowoczesnych zespołach uplastyczniających stosowane są układy regulacji ze sprzężeniem zwrotnym od temperatury uplastycznionych preform, mierzonej przetwornikami pirometrycznymi [3]. Wadami tego rozwiązania są długie czasy regulacji spowodowane dużą inercją obiektu sterowania, toru pomiarowego temperatury, czystym opóźnieniem układu transportowego preform, a także dyskretnym (okresowym) charakterem pomiaru [4].

Istotą zaproponowanego i opisanego w pracy rozwiązania jest utworzenie wewnętrznego obwodu regulacji mocy elektrycznej, ze sprzężeniem zwrotnym od zmierzonego natężenia promieniowania emitowanego przez promienniki. Rozwiązanie to może stanowić autonomiczny układ wykorzystywany w zespołach grzewczych różnych maszyn lub tworzyć obwód wewnętrz-



Rys. 1. Widok wnętrza zespołu ogrzewającego preformy

Fig. 1. Photo of interior of preforms reheating unit of stretch blow moulding machine

ny układu kaskadowego stabilizującego temperaturę uplastycznianych preform w maszynach wytwarzających opakowania z PET.

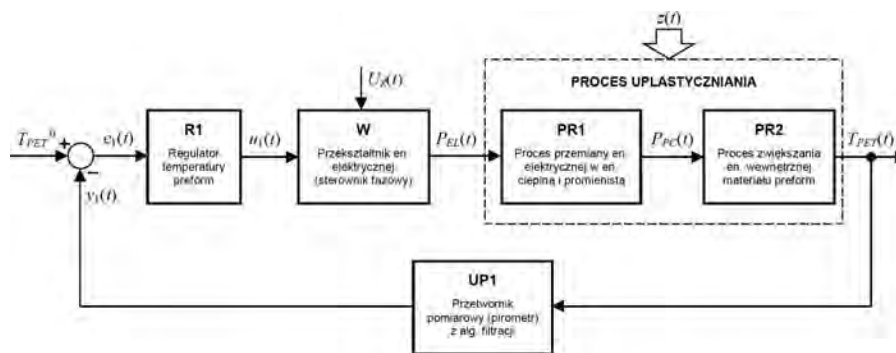
2. Obiekt sterowania

Na rys. 2. przedstawiony został schemat blokowy układu regulacji temperatury uplastycznianych preform. Obiektem sterowania jest proces transportu energii cieplnej do materiału ścian preform. Oznaczenia zamieszczone na rys. 2. określają:

- $PR1$ – proces przemiany energii elektrycznej głównie w energię promieniowania elektromagnetycznego,
- $PR2$ – proces absorpcji energii promienistej w materiale ścian uplastycznianych preform,
- W – urządzenie wykonawcze nastawiające moc prądu elektrycznego zasilającego elementy grzewcze (typowo przekształtniki elektryczne z modulacją fazową),
- $R1$ – regulator temperatury preform (z algorytmem PID),
- $U_Z(t)$ – napięcie w sieci energetycznej (wartość skuteczna),
- $u_1(t)$ – sygnał sterujący związany z nastawianiem mocy elektrycznej zasilającej elementy grzewcze,
- $P_{EL}(t)$ – moc prądu elektrycznego dostarczanego do elementów grzewczych (sygnał nastawiający wygenerowany przez urządzenie wykonawcze W),
- $P_{PC}(t)$ – moc energii promienistej wydzielonej w pasmach absorpcji materiału preform,
- T_{PET}^0 – wartość zadana temperatury uplastycznionej preformy,
- $T_{PET}(t)$ – temperatura materiału uplastycznionych preform,
- $e_1(t)$ – uchyb regulacji temperatury preform,
- $UP1$ – urządzenie pomiarowe określające temperaturę uplastycznionych preform (typowo pirometr),
- $y_1(t)$ – sygnał reprezentujący temperaturę ogrzanych preform,
- $z(t)$ – zakłócenia oddziałujące na proces uplastyczniania.

Głównym czynnikiem zakłócającym przebieg procesu uplastyczniania jest zmiana wartości skutecznej napięcia zasilającego $U_Z(t)$. Dodatkowo silnie odkształcony przebieg napięcia jest przyczyną zakłóceń w pracy przekształtnika W (sterownika tyrystorowego z modulacją fazową) i powoduje niepożądane skokowe zmiany mocy $P_{EL}(t)$, dostarczanej do promienników podczerwieni.

Negatywny wpływ niestabilności mocy elektrycznej $P_{EL}(t)$, dostarczanej do promienników a także innych zakłóceń $z(t)$ na proces uplastyczniania, jest kompensowany przez główny obwód regulacji z regulatorem $R1$ oraz sprzężeniem zwrotnym, utworzonym od temperatury uplastycznionych preform $T_{PET}(t)$. Jednak jakość dynamiczna sterowania tego obwodu regulacji jest niezadawalająca w przypadku zakłóceń $U_Z(t)$ o charakterze skokowym i amplitudzie przekraczającej 20 V (5 % napięcia znamionowego). Stosunkowo długie czasy regulacji wynikają z dużej inercji obiektu sterowania (zastępuje stała czasowa ponad 100 s), czystego opóźnienia związanego z transportem preform poza tunel (czas opóźnienia nawet do 15 s) oraz algorytmem uśredniania wyników pomiarów temperatury (zastępuje stała czasowa do 20 s) [4].



Rys. 2. Schemat blokowy układu regulacji temperatury uplastycznianych preform

Fig. 2. Block diagram of control system of temperature of reheated preforms

3. Pośredni pomiar mocy promieniowania cieplnego

Poprawę jakości dynamicznej sterowania temperaturą preform w procesie uplastyczniania można uzyskać przez wprowadzenie dodatkowego, wewnętrznego układu stabilizacji mocy elektrycznej, dostarczanej do elementów grzewczych zespołu uplastyczniającego. W tym celu mogą być zastosowane autonomiczne sterowniki mocy z układami pomiarowymi mocy czynnej, działające w torze zamkniętym [5]. Ponieważ w maszynach do wytwarzania pojemników z PET stosuje się nawet do 20 niezależnie sterowanych stref grzewczych (do 3 kW każda), łączny koszt takich regulatorów mocy jest znaczny (w stosunku do ceny kompletnej maszyny).

Autorzy zaproponowali metodę alternatywną, polegającą na utworzeniu wewnętrznego obwodu stabilizacji mocy promieniowania cieplnego, emitowanego przez promienniki podczerwieni. Ogólny schemat blokowy tego obwodu regulacji przedstawiono na rys. 3. Oznaczenia na rysunku określają: G_{RW} – właściwości regulatora obwodu wewnętrznego (regulatora mocy promieniowania), G_O – właściwości obiektu sterowania w obwodzie wewnętrznym (promiennika podczerwieni zasilanego sterownikiem tyrystorowym), G_H – właściwości toru sprzężenia zwrotnego (toru pomiarowego mocy promienistej), $u_1(t)$ – sygnał wartości zadanej dla mocy elektrycznej dostarczanej do promiennika podczerwieni (tożsamy z sygnałem na rys. 2), $y_2(t)$ – pośrednia miara mocy elektrycznej faktycznie dostarczanej do promiennika podczerwieni, $e_2(t)$ – uchyb regulacji mocy, $u_2(t)$ – sygnał sterujący (nastawiający) moc elektryczną.

W roli przetwornika pomiarowego G_H strumienia energii promienistej zastosowano termoparę listkową. Przeprowadzone próby wykazały, że właściwości dynamiczne takiego przetwornika mogą być opisane transmitancją członu inercyjnego pierwszego rzędu [6], ze stałą czasową wynoszącą około 11 s. Oznacza to, że wpływ zakłóceń na proces uplastyczniania (w szczególności zmian napięcia zasilającego $U_Z(t)$) może być „dostrzeżony” w sygnale $y_2(t)$ po czasie kilkukrotnie mniejszym niż w sygnale $T_{PET}(t)$. Przedstawiony na rys. 3 wewnętrzny obwód sterowania mocą, wraz z obwodem zewnętrznym z rys. 2, tworzą kaskadowy układ regulacji [6] temperatury uplastycznianych preform.

4. Synteza układu sterowania mocą promieniowania ciepłego

W syntezie wewnętrznego obwodu regulacji mocy promieniowania ciepłego (rys. 3) zastosowano metodę modelu [7]. Poszukiwano takich właściwości toru głównego oraz sprzężenia zwrotnego, dla których właściwości całego obwodu (transmitancja zastępcza G_{OW}) będą proporcjonalne lub o bardzo niewielkiej inercji. Rozpatrywano trzy rozwiązania.

Zgodnie z **rozwiązaniem pierwszym (A)**, w torze głównym znajdują się:

- obiekt, którym jest promiennik podczerwieni zasilany sterownikiem tyrystorowym, o transmitancji:

$$G_O(s) = k_O \tag{1}$$

- przetwornik pomiarowy w postaci termopary listkowej o transmitancji:

$$G_H(s) = \frac{k_P}{T_P s + 1} \tag{2}$$

gdzie: k_P – wzmocnienie statyczne przetwornika pomiarowego, T_P – stała czasowa przetwornika pomiarowego,

- algorytm sterowania o transmitancji:

$$G_{RW}(s) = k_R \frac{T_A s + 1}{T_i s + 1} \tag{3}$$

gdzie:

$$k_R = \frac{K(1 - K k_P)}{k_O} \tag{4}$$

$$T_i = \frac{T_A}{1 - K k_P} \tag{5}$$

K – całkowite wzmocnienie statyczne układu, T_A – dobierany parametr algorytmu sterowania (zwykle $T_A \approx T_P$),warunek dodatkowy $K k_P < 1$.

Rozwiązanie drugie (B). W torze sprzężenia zwrotnego zawarta jest transmitancja (2), a tor główny utworzono przez obiekt o transmitancji (1) oraz algorytm sterowania o transmitancji:

$$G_{RW}(s) = \frac{k_R(T_i s + 1)}{T_i s} \tag{6}$$

gdzie: T_i – czas całkowania, k_R – wzmocnienie statyczne.

Dla czasów całkowania:

$$T_i > \frac{4 K T_P}{(1 + K)^2} \tag{7}$$

układ będzie charakteryzował się aperiodyczną charakterystyką skokową o stałych czasowych:

$$T_{1,2} = \frac{T_i T_P}{T_i(1 + K) \pm \sqrt{T_i^2(1 + K)^2 - 4 T_i T_P K}} \tag{8}$$

Z kolei dla T_i :

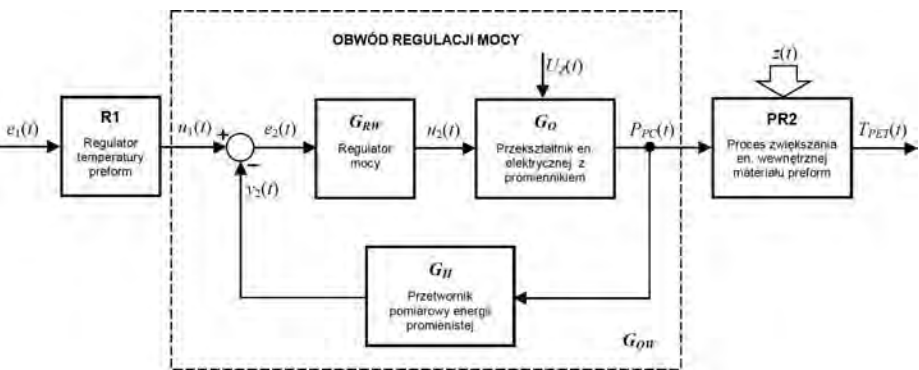
$$T_i < \frac{4 K T_P}{(1 + K)^2} \tag{9}$$

charakterystyka skokowa będzie miała przebieg oscylacyjny o tłumieniu ξ :

$$\xi = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \tag{10}$$

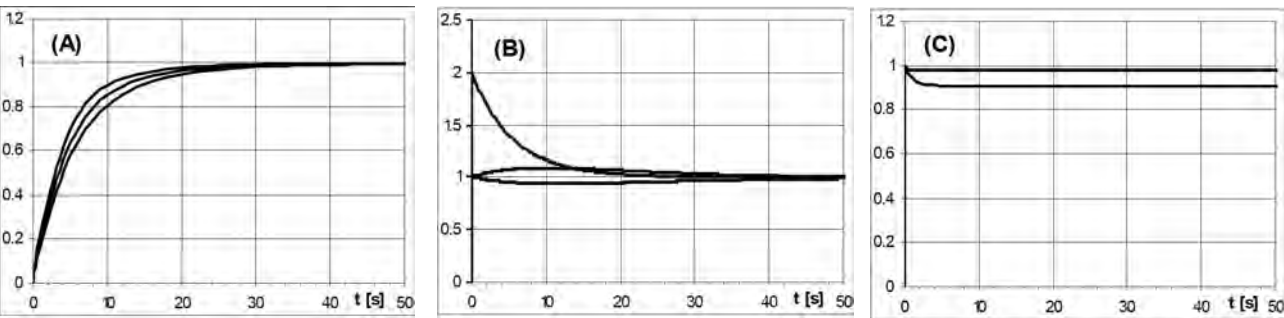
$$\alpha = \frac{1 + K}{T_P} \tag{11}$$

$$\beta = \frac{\sqrt{4 T_i T_P K - T_i^2(1 + K)^2}}{T_i T_P} \tag{12}$$



Rys. 3. Schemat blokowy wewnętrznego obwodu regulacji mocy promieniowania ciepłego

Fig. 3. Block diagram of internal loop of control system of heat radiation power



Rys. 4. Wybrane odpowiedzi skokowe układu regulacji mocy w wariantach (A), (B), (C)

Fig. 4. Chosen step responses of power control system for three different internal structures (A), (B), (C)

Częstość drgań własnych nietłumionych tego układu wyniesie:

$$\omega_0 = \frac{\alpha}{\xi} \quad (13)$$

natomiast okres oscylacji drgań tłumionych będzie miał wartość:

$$T_{osc} = \frac{2\pi}{\beta} \quad (14)$$

Rozwiązanie trzecie (C) charakteryzuje tor główny o transmitancjach:

$$G_{RW}(s) = k_R, G_O(s) = k_O \quad (15)$$

oraz sprzężenie zwrotne utworzone przez przetwornik (2) i element korygujący o transmitancji:

$$G_H(s) = \frac{k_p}{T_p s + 1} \frac{a(T_1 s + 1)}{a T_1 s + 1} \quad (16)$$

gdzie: T_1 – stała czasowa ($T_1 \approx T_p$), a – parametr o dobieranej wartości ($a = 0,05$ – $0,1$ lub $a = T_i/T_p$).

Na rys. 4. przedstawione zostały wybrane odpowiedzi skokowe wewnętrznego obwodu regulacji mocy o właściwościach G_{OW} według trzech omówionych rozwiązań (A), (B) i (C) dla wybranych wartości parametrów: k_R , T_p , T_A , a .

5. Wnioski

Zaproponowano i omówiono metodę automatycznej regulacji mocy cieplnej, wydzielanej w zespołach uplastyczniających preformy z poli(tereftalanu etyleny). Jej istotą jest utworzenie sprzężenia zwrotnego od strumienia energii promienistej emitowanej wewnątrz zespołu.

Przeanalizowano trzy różne warianty układu regulacji dla tych samych warunków technologicznych, z których:

- rozwiązanie pierwsze (A) charakteryzuje zerowy błąd statyczny położenia oraz czas regulacji zbliżony do trzykrotnej wartości stałej czasowej T_p przetwornika pomiarowego promieniowania (ok. 30 s),
- wariant drugi (B), z klasycznym regulatorem PI, jest najprostszy w realizacji technicznej. Cechuje go zerowy błąd statyczny a czas regulacji kształtuje się w zakresie od 15 s dla $T_i > T_p$ do 30 s dla $T_i < T_p$,
- rozwiązanie trzecie (C) charakteryzuje bardzo krótki czas regulacji, który wynosi 1 s dla $k_R = 2$. Jednak w rozwiązaniu tym występuje błąd statyczny położenia zależny od wzmocnienia statycznego k_R . Dla $k_R = 2$ błąd ten nie przekracza 3 %.

Z przedstawionego porównania wynika, że w przypadku szybkozmiennych (skokowych) zakłóceń napięcia zasilania, tak jak ma to miejsce w warunkach przemysłowych, najbardziej przydatne jest rozwiązanie trzecie (C).

Bibliografia

1. Brooks D.W., Giles G.A.: *PET Packaging Technology*, Wiley-Blackwell, New York 2002.
2. Frąckowiak L.: *Przekształtniki i łączniki energoelektroniczne o komutacji zewnętrznej*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.

3. Stączek P.: *Metoda pomiaru temperatury powierzchni preform z PET w procesie uplastyczniania*, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją, 2010, 14, 83–88.
4. Stączek P., Płaska S.: *Identyfikacja właściwości dynamicznych zespołu uplastyczniającego preformy z PET w maszynach rozdmuchowych*, „Archives of Mechanical Technology and Automation”, 2010, 30, 169–174.
5. [www.olicorp.ch/products/power/].
6. Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R.: *Podstawy teorii sterowania*, WNT, Warszawa 2006.
7. Larminat P.: *Automatyka – układy liniowe*. T. 3, *Sterowanie*, WNT, Warszawa 1983. ■

The Synthesis of Control System for Stabilization of Heat Radiation for Reheating Units in PET Stretch Blow Moulding Machines

Abstract: Paper presents the new solution of control system for stabilizing the intensity of infrared radiation inside PET preforms' reheating unit of stretch blow moulding machines. Heating energy is radiated by halogen lamps and is usually controlled by electric power controllers working in open loop. That is why, the reheating process is seriously affected by fluctuations of mains voltage. These disturbances may be compensated by closed loop control systems, where the temperature of heated preforms is the feedback signal. But this method has a low quality of dynamic response caused by a big inertia of reheating process, transportation delay in feedback line as well as discrete (periodic) measurements of preforms' temperature. The major point of proposed new method is internal closed loop control circuit, where the infrared radiation sensor provides the feedback signal. The new concept may be applied in heating units of many kinds of industrial machines. It also may be a part of cascade control system of preforms' temperature in stretch blow moulding machines.

Keywords: cascade control, control synthesis, reheating of PET preforms

prof. dr hab. inż. Stanisław Płaska

Ur. 1947 r., profesor nauk technicznych, od 1991 r. założyciel i kierownik Katedry Automatyki Politechniki Lubelskiej, specjalizuje się w metodach sterowania procesami technologicznymi, opisie matematycznym procesów, technikach monitorowania, diagnostyki i nadzorowania procesów, zarządzania jakością, komputerowej integracji wytwarzania.

e-mail: automat@pollub.pl



dr Paweł Stączek

Ur. 1972 r., doktor nauk technicznych w dyscyplinie Mechanika i Budowa Maszyn, adiunkt w Katedrze Automatyki Politechniki Lubelskiej, specjalizuje się w modelowaniu, optymalizacji oraz sterowaniu systemów wielowymiarowych.

e-mail: p.staczek@pollub.pl

