

Sterowanie piecem rezystancyjnym do wyżarzania rdzeni ze stopów amorficznych

Jerzy Kurek¹, Roman Szewczyk², Jacek Salach², Rafał Kłoda²

¹Instytut Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej

²Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej

Streszczenie: W referacie przedstawiono teoretyczne i praktyczne aspekty sterowania piecem rezystancyjnym przeznaczonym do wyżarzania rdzeni magnetycznych ze stopów amorficznych w warunkach laboratoryjnych. Proces wyżarzania rdzeni wymaga zapewnienia specyficznych warunków zarówno z punktu widzenia wartości temperatury, jak i z punktu widzenia szybkości jej zmian. Przedstawione w referacie rozwiązania w zakresie regulacji umożliwiają uzyskanie niewielkiej odchyłki regulacji wartości temperatury w trakcie wyżarzania oraz szybkie dochodzenie do wartości zadanej.

Słowa kluczowe: regulator PI, piec rezystancyjny, układ regulacji temperatury

1. Wprowadzenie

Najnowszej klasy materiały magnetycznie miękkie – stopy amorficzne na bazie żelaza, niklu i kobaltu stwarzają zupełnie nowe możliwości w zakresie konstrukcji rdzeni komponentów indukcyjnych [1], sensorów pola magnetycznego [2] i sensorów magneto-mechanicznych [3] oraz urządzeń do transportu ciepła [4]. Jednak proces wytwarzania rdzeni z magnetyków amorficznych wymaga realizacji precyzyjnej relaksacji termicznej (wyżarzania rdzenia) [5]. Proces ten, realizowany typowo przez czas jednej godziny, powinien zachodzić w argonowej atmosferze ochronnej, aby uniknąć gwałtownej korozji powierzchni rdzenia. W rezultacie relaksacji termicznej znacznie rośnie przenikalność magnetyczna rdzenia, a maleje jego koercja. Prawidłowo wykonana relaksacja termiczna stopu amorficznego umożliwia wytworzenie rdzeni o względnej przenikalności amplitudowej przekraczającej $2 \cdot 10^6$. Należy podkreślić, że tak wysoka przenikalność amplitudowa lokuje stopy amorficzne wśród magnetyków o najwyższej, możliwej do uzyskania w skali makro, przenikalności magnetycznej.

W pracy opisano sposób sterowania piecem rezystancyjnym do wyżarzania rdzeni magnetycznych ze stopów amorficznych prowadzonego w laboratorium badawczym w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej.

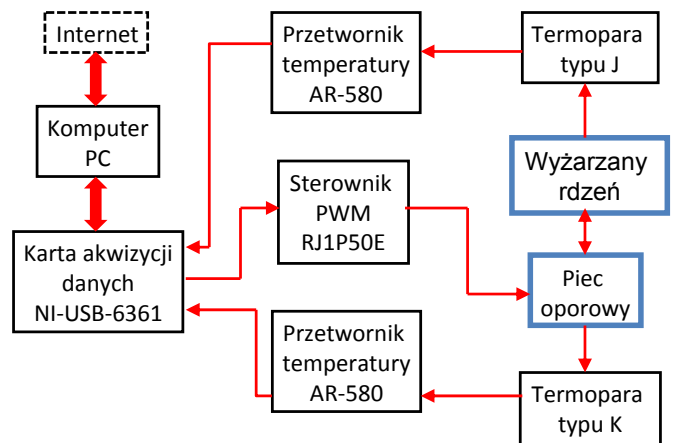
2. Obiekt regulacji, układ pomiarowy i układ sterowania

Do realizacji procesu relaksacji termicznej wykorzystano piec oporowy o masie około 3 kg. Piec ten posiada uzwo-

wienie kantowe umieszczone wewnątrz szamotowego korpusu pokrytego izolacją termiczną z wełny mineralnej. W piecu umieszczono rurę kwarcową o średnicy 40 mm, która na czas relaksacji termicznej wypełniana jest argonem pod ciśnieniem nieznacznie większym od ciśnienia atmosferycznego.

Proces wyżarzania rozpoczyna się od nagrzania pieca do temperatury wyżarzania. Następnie do pieca wprowadzana jest kapsuła z wyżarzaniem rdzeniem i jest ogrzewana w piecu przez zadany czas w temperaturze wyżarzania; dla rdzeni z magnetyków amorficznych temperatura wyżarzania wynosi $345 \text{ }^\circ\text{C}$, a czas wyżarzania 60 min. Po zakończeniu relaksacji termicznej kapsuła jest wyciągana z rdzenia i studzona w zimnej części rury kwarcowej, co zapewnia, że także chłodzenie rdzenia odbywa się w argonowej atmosferze ochronnej.

Schemat blokowy stanowiska do relaksacji termicznej rdzeni z magnetyków amorficznych został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska do relaksacji termicznej rdzeni z magnetyków amorficznych

Fig. 1. Block diagram of installation for thermal relaxation of amorphous magnetic cores

Temperatura pieca i temperatura wyżarzania rdzenia są mierzone za pomocą termopary typu K współpracującej z przetwornikiem do pomiaru temperatury typu AR-580 firmy Apar. Na wyjściu uzyskiwane jest napięcie w zakresie od 0 do 10 V, liniowo proporcjonalne do temperatury wyrażonej w stopniach Celsjusza, przy czym 10 V odpowiada temperaturze $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Piec zasilany jest poprzez regulator mocy – sterownik PWM (ang. *Pulse Wide Modulation*) typu RJ1P50E firmy

Carlo Gavazzi. Sygnał sterujący regulator PWM zawiera się w przedziale od 0 do 10 V, zaś pełny okres sterowania wynosi 3 sekundy. Całość stanowiska została zintegrowana z wykorzystaniem komputera PC wyposażonego w kartę akwizycji danych NI-USB-6361 firmy National Instruments. Oprogramowanie stanowiska wykonano z użyciem systemu LabVIEW, w którym zaimplementowano regulator typu PI oraz PID.

Aby ułatwić monitorowanie procesu wyżarzania, komputer PC wyposażono dodatkowo w oprogramowanie TightVNC, zapewniające zdalny dostęp do komputera przez internet (ang. *remote desktop*).

3. Wymagania stawiane procesowi regulacji

Jak przedstawiono w poprzedniej sekcji, obiektem regulacji są procesy w piecu elektrycznym (1) nagrzewania pieca i (2) wyżarzania rdzenia, gdzie sygnałem sterującym temperaturą pieca jest sygnał napięcia sterujący sterownikiem PWM, a sygnałem wyjściowym jest sygnał (1) temperatury mierzonej wewnątrz rury kwarcowej lub (2) temperatury wyżarzanego rdzenia.

Ze względu na specyfikę procesu relaksacji termicznej stopów amorficznych przyjęto następujące wymagania dla procesu regulacji temperatury rdzenia oraz ze względu na właściwości techniczne pieca przyjęto następujące wymagania procesu wyżarzania:

- odchyłka regulacji ± 5 °C w czasie wyżarzania,
- czas nagrzewania rdzenia do temperatury wyżarzania 345 °C w temperaturze powyżej 320 °C nie dłuższy niż 15 minut,
- aperiodyczny przebieg procesu przejściowego przy nagrzewaniu próbki do temperatury wyżarzania.
- szybki aperiodyczny przebieg procesu nagrzewania pieca do temperatury wyżarzania i ograniczenie amplitudy sygnału sterującego w celu zapewnienia bezawaryjnej pracy pieca, czas ustalania odpowiedzi skokowej wynosi ponad 3 godz.

Drugie z wymagań wynika z faktu, że typowo proces relaksacji termicznej zaczyna zachodzić w temperaturze powyżej 320 °C. Zbyt długie przebywanie rdzenia w temperaturze poniżej temperatury zadanej, a powyżej 320 °C prowadzi do nieokreśloności procesu relaksacji termicznej, co skutkuje znacznym rozrzutem parametrów rdzeni po wyżarzaniu.

4. Identyfikacja modelu obiektu

Identyfikacji modelu matematycznego obiektu regulacji dokonano na podstawie odpowiedzi skokowej pieca na zmianę napięcia sterowania układu PWM od 0 do 0,7 [V]. Przy wyznaczaniu modelu matematycznego obiektu regulacji przyjęto, że piec jest obiektem inercyjnym z opóźnieniem opisanym transmitancją

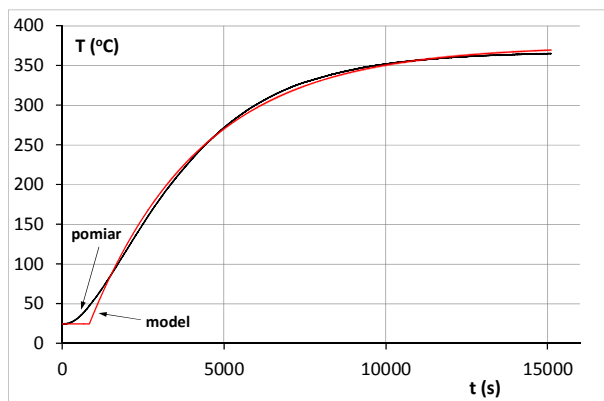
$$G(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-T_0 s} \quad (1)$$

gdzie: T_0 – czas opóźnienia obiektu, T – stała czasowa obiektu oraz k – wzmacnienie obiektu (°C/V). W wyniku

identyfikacji modelu wyznaczono następujące wartości parametrów modelu

$$T_0 = 840 \text{ (s)}, T = 3450 \text{ (s)}, k = 500 \text{ (°C/V)}$$

Na rys. 2 przedstawiono przebieg odpowiedzi pieca na wymuszenie skokowe oraz przebieg odpowiedzi wyznaczonej z wykorzystaniem modelu obiektu inercyjnego z opóźnieniem danego zależnością (1).



Rys. 2. Odpowiedź skokowa pieca: wyniki pomiaru i wyniki modelowania

Fig. 2. Furnace step response: measured response and model response

Należy podkreślić, że ze względu na znaczną wartość masy próbki w kapsule (0,25 kg) w stosunku do masy pieca (3 kg), wprowadzenie wyżarzanego rdzenia o temperaturze pokojowej ok. 20 °C do ogrzanego pieca o temperaturze 345 °C znacznie zaburza temperaturę w piecu.

5. Algorytm regulacji

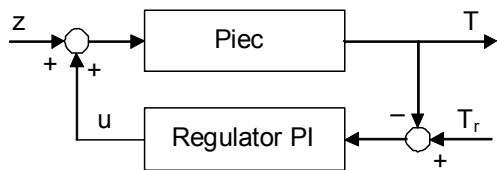
Doboru algorytmu regulacji dokonano przy założeniu (1) sterowania liniowego dla procesu nagrzewania pieca oraz (2) wykorzystania elementów sterowania nieliniowego z użyciem przebiegu arbitralnego sygnału sterującego dla procesu wyżarzania rdzenia. W obu przypadkach wykorzystywany jest regulator PI opisanym transmitancją

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (2)$$

Nastawy regulatora dobrano na podstawie wyznaczonego modelu obiektu regulacji (1). Wyznaczając nastawy w taki sposób aby uzyskać przebieg aperiodyczny [6], przeregulowanie $\chi = 0$ %, otrzymano:

$$k_p = 0.6 \frac{T}{kT_0} = 0.0049, \quad T_I = 0.8T_0 + 0.5T = 2397 \text{ (s)}$$

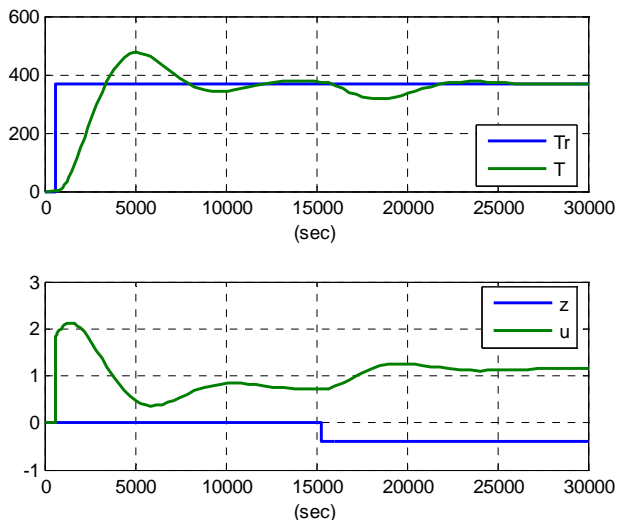
Następnie zamodelowano (rys. 3) układ regulacji pieca z regulatorem PI z wyznaczonymi nastawami. Niestety, mimo przyjętych założeń przeregulowania ($\chi = 0$ %) wyznaczone nastawy nie zapewniały przebiegu aperiodycznego przy skokowej zmianie sygnału zadanego (rys. 4). Jednak przebieg zmiany temperatury był zadowalający przy skokowej zmianie zakłócenia modelującego włożenia wyżarzanego rdzenia do pieca. Dlatego do regulacji temperatury w piecu zastosowano regulator PI z wyznaczonymi nastawami.



Rys. 3. Schemat blokowy układu regulacji temperatury w piecu:

T – temperatura w piecu, u – napięcie sterujące,
Tr – temperatura zadana, z – zakłócenie

Fig. 3. Block diagram of furnace temperature control system: T – furnace temperature, u – control voltage, Tr – reference temperature, z – disturbance



Rys. 4. Przebieg regulacji modelu pieca z regulatorem PI

Fig. 4. Furnace model control response with PI controller

Regulator PI zastosowano do regulacji procesu nagrzewania pieca do temperatury wyżarzania w celu (1) skrócenia tego czasu oraz (2) do regulacji procesu nagrzewania pieca w czasie wyżarzania rdzenia po włożeniu do pieca w celu zapewnienia właściwego przebiegu procesu.

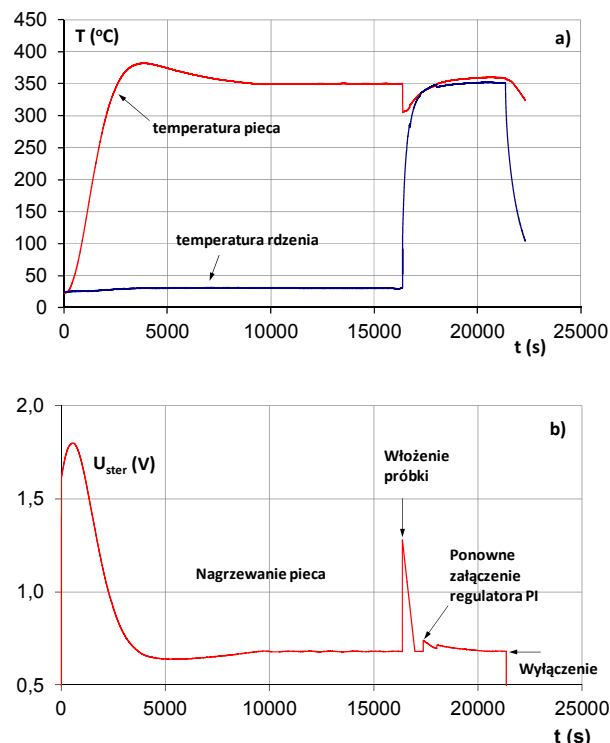
Ponadto do regulacji procesu nagrzewania pieca po włożeniu rdzenia w celu skrócenia czasu osiągnięcia temperatury wyżarzania połączono regulację automatyczną ze sterowaniem programowym:

1. przed włożeniem wyżarzane rdzenia do pieca wartość sterująca regulatorem PWM jest blokowana,
2. następnie, w momencie wkładania rdzenia do pieca, do wartości sterującej dodawany jest jeden okres przebiegu piłkowskiego o amplitudzie 0,6 V i czasie trwania jednego „zęba” równym 600 s,
3. po zakończeniu tego przebiegu ponownie włączany jest regulator PI, jednak tym razem sygnałem wyjściowym układu jest mierzona temperatura wyżarzane rdzenia.

W układzie regulacji nie zastosowano regulatora PID, gdyż w piecu, w którym prowadzone jest wyżarzanie rdzeni występują szybkozmienne zakłócenia pomiarowe o niedużej amplitudzie, które powodują duże oscylacje sygnału sterującego w wyniku działania akcji różniczkującej D.

6. Wyniki weryfikacji eksperymentalnej

Zaprojektowany układ regulacji zrealizowano do sterowania piecem do wyżarzania rdzeni w laboratoryjnym piecu rezystancyjnym w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. Na rys. 5 przedstawiono przebiegi temperatury w piecu, temperatury wyżarzane rdzenia oraz wartości napięcia sterującego regulatorem PWM z wykorzystaniem z regulatora PI uzupełnionym sterowaniem programowym w postaci „zęba” w momencie wprowadzenia wyżarzane rdzenia do pieca. W regulatorze PI ustawiono wyznaczone uprzednio nastawy.



Rys. 5. Nagrzewanie i wyżarzanie rdzenia z regulatorem PI i ze sterowaniem programowym: a) temperatura, b) napięcie sterujące

Fig. 5. Heating and annealing process with PI controller and programmed input: a) temperature, b) control voltage

W czasie sterowania procesem wyżarzania uzyskano maksymalną wartość odchylenia temperatury rdzenia od temperatury zadanej wynoszącą 2 °C. Czas, w którym rdzeń nagrzewał się od temperatury 320 °C do 345 °C wynosił 12 min, a czas wyżarzania w temperaturze 345 °C – 60 min.

7. Podsumowanie

Zastosowany układ regulacji pozwala prowadzić proces wyżarzania rdzenia w sposób zgodny z wymaganiami – szybko, w wymaganej temperaturze bez przeregulowania i w sposób automatyczny bez udziału operatora.

Ponadto dzięki zastosowaniu układu regulacji temperatury pieca w czasie nagrzewania pieca do temperatury wyżarzania udało się skrócić ten czas o ponad 2/3 w sto-

sunku do układu bez regulatora przy dopuszczalnej amplitudzie sygnału sterującego i prowadzić go automatycznie. Obecnie są prowadzone prace nad implementacją regulatora PID w układzie automatyki procesu wyżarzania rdzenia.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2012 jako projekt badawczy.

Bibliografia

1. O'Handley R.: *Modern magnetic materials – principles and applications*, John Wiley & Sons, 2000.
2. Ripka P.: *Magnetic Sensors and Magnetometers*, Artech, Boston 2001.
3. Bieńkowski A., Szewczyk R.: *The possibility of utilizing the high permeability magnetic materials in construction of magnetoelastic stress and force sensors*, "Sensors and Actuators", A113 (2004), 270.
4. Kolano-Burian A., Kowalczyk M., Kolano R., Szymczak R., Szymczak H., Polak M.: *Magnetocaloric effect in Fe-Cr-Cu-Nb-Si-B amorphous materials*, "J. Alloys Comp.", Vol. 479 (2009), 71.
5. Bieńkowski A., Szewczyk R., Salach J., Kolano R., Kolano-Burian A.: *Influence of thermo-magnetic treatment on magnetoelastic properties of Fe₈₁Si₄B₁₄ amorphous alloy*, "Journal of Physics – Conference Series" 144 (2009), 012070.
6. Pułaczewski J., *Układy regulacji z regulatorami typu PID*, *Poradnik Inżyniera Automatyka*, WNT, Warszawa 1973, 571–635. ■

Control of Resistive Furnace for Annealing of Amorphous Alloys

Abstract: Paper presents theoretical and practical aspects of automated control of resistive furnace for thermal annealing of magnetic cores made of amorphous alloys. Process of annealing requires specific conditions both from the point of view of temperature and its changes. Solutions presented in the paper creates possibility of both low value of error as well as fast achievement of set value.

Keywords: PI controller, resistive furnace, temperature control

prof. dr hab. inż. Jerzy Kurek

Absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej (obecnie Wydział Mechatroniki). Jest profesorem zwyczajnym Politechniki Warszawskiej. Jego zainteresowania naukowe dotyczą automatyki procesów i robotyki, m. in. wyznaczania nowych algorytmów sterowania, stabilności układów automatyki, wyznaczania modeli neuronowych układów dynamicznych, np. robotów. Jest członkiem Control System Society IEEE, Inc.
e-mail: jkurek@mchtr.pw.edu.pl



prof. nzw. dr hab. inż. Roman Szewczyk

Od 2000 roku pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów oraz Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. Zaangażowany w prace związane z modelowaniem zjawisk magnetomechanicznych, opracowaniem sensorów mechatronicznych, miernictwem elektrycznym oraz prognozowaniem rozwoju technologii (technological foresight).
e-mail: rszewczyk@piap.pl



dr inż. Jacek Salach

Od 2005 roku pracownik Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. Zaangażowany w prace związane z badaniem zjawisk magnetomechanicznych oraz opracowaniem sensorów i aktuatorów mechatronicznych, miernictwem elektrycznym.
e-mail: j.salach@mchtr.pw.edu.pl



mgr inż. Rafał Kłoda

Pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów oraz Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Specjalizuje się w informatycznych aspektach związanych z integracją i wdrażaniem nowych technologii w dziedzinie metrologii i multimediów, a także zajmuje się badaniami nad oceną jakości informacji audiowizualnej.
e-mail: r.kloda@mchtr.pw.edu.pl

