

Poprawa dokładności regulacji temperatury w urządzeniu do badania parametrów węgla koksujących

Streszczenie. Zagadnienia związane z precyzyjną regulacją temperatury są zazwyczaj skomplikowane z uwagi na nieliniowość obiektów elektrotermicznych. W niniejszej pracy analizie poddano proces nagrzewania stosowany przy pomiarze jakościowych parametrów węgla i koksów, wymagający utrzymywania stałego tempa nagrzewania. Wykonane modele i obliczenia numeryczne umożliwiły porównanie rezultatów uzyskiwanych przy wykorzystaniu typowych technik nagrzewania pośredniego, z charakterystykami uzyskiwanymi przy nagrzewaniu indukcyjnym. Analiza wyników umożliwiła podanie zasad konstrukcji i eksploatacji urządzeń analizowanej klasy, ze szczególnym uwzględnieniem współpracy z układami regulacji temperatury. Podane rozważania mają charakter ogólny i mogą stanowić podstawę do tworzenia podobnych rozwiązań.

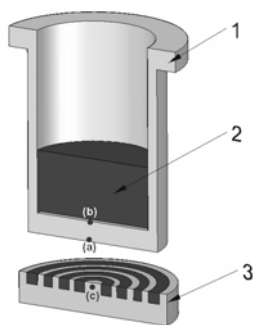
Abstract. Realization of many technologies requires a precise temperature control systems, as fixed as following. Such issues are difficult in many cases as many parameters and models are nonlinear. In the article the heating process of hard coal requiring constant heat rate was analyzed. Numerical models and analysis allow to compare results of indirect and direct heating methods, in relation to temperature control accuracy. Some rules of design of such devices and temperature controllers were described. Presented considerations can be described as general and they can be used in similar devices and processes. (**Improvement of temperature control accuracy in tyhe device for determination of quality parameters of hard coal**).

Słowa kluczowe: regulacja temperatury, modelowanie, nagrzewanie pośrednie, nagrzewanie indukcyjne

Keywords: temperature control, modeling, induction heating, indirect heating

Wstęp

W wielu technologiach realizowanych w urządzeniach elektrotermicznych, istotne są nie tylko wartości temperatur procesowych, lecz również sposób nagrzewania. Szczególnie wysokie wymagania w zakresie jakości nagrzewania spotykane są w technologiach półprzewodnikowych oraz szeroko rozumianym przemyśle nanotechnologicznym, gdzie stosunkowo niewielkie odchyłki od wytycznych technologicznych prowadzą do negatywnych rezultatów. W niniejszym artykule analizie poddano proces nagrzewania analitycznej próbki węglowej podczas pomiaru ciśnienia rozprężania. Zgodnie z obowiązującą normą [1], nagrzewanie próbki powinno odbywać się ze stałą szybkością wynoszącą 10 K/min. Istniejące modyfikacje metody pomiarowej zakładają odmienne szybkości nagrzewania, przy zachowaniu wymogu stałego tempa przyrostu temperatury. Na rysunku 1 pokazano uproszczony schemat układu grzejnego stosowanego do realizacji wspomnianego procesu. Układ składa się z elementu grzejnego oraz tygla zawierającego próbkę węglową. Pozostałe elementy układu zostały pominięte ze względu na brak ich wpływu na proces nagrzewania.



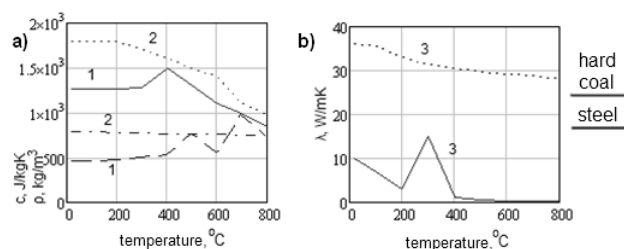
Rys. 1. Układ grzejny wykorzystywany w pomiarze ciśnienia rozprężania. 1- tygiel; 2- wsad; 3- element grzejny

Realizacja wymaganego procesu nagrzewania ze stałą szybkością jest w analizowanym przypadku zagadnieniem o wysokim stopniu komplikacji. Nieliniowość parametrów materiałowych, przemiany fazowe zachodzące w rozpatrywanym przedziale temperatur (200 - 1000°C) oraz

nieliniowość modelu matematycznego wymiany ciepła, utrudniają wybór regulatora temperatury oraz racjonalny dobór jego nastaw. W niniejszym artykule zaprezentowano podstawowe zagadnienia związane z problematyką regulacji temperatury w układach tej klasy, z uwzględnieniem nieliniowości modelu matematycznego oraz parametrów materiałowych. Opracowano model matematyczny układu grzejnego oraz autorskie modele numeryczne charakteryzujące się wysoką dokładnością. Dokonano oceny możliwości doboru układu regulacji w klasycznym układzie zgodnym z rysunkiem 1 [1] oraz wyznaczono błędy regulacji przy stosowaniu zróżnicowanych wymuszeń. Wyniki symulacji procesu nagrzewania pośredniego porównano z indukcyjnym układem grzejnym, w którym element grzejny (poz. 3 na rys. 1) zastąpiono wzbudnikiem o podobnych wymiarach.

Model matematyczny układu grzejnego

Wszystkie obliczenia wykonane zostały przy wykorzystaniu metody elementów skończonych z krokiem w przód, umożliwiającej łatwą analizę przemian fazowych [2]. Autorskie algorytmy zostały zaimplementowane w programie MathCAD [3]. Nieliniowości parametrów materiałowych uwzględniono, poprzez wprowadzenie danych tablicowych, uśrednianych dla aktualnej temperatury węgla. Na rysunku 2 pokazano zakres zmian parametrów stali i węgla.



Rys. 2. Parametry materiałowe węgla i stali. 1- ciepło właściwe, 2- gęstość, 3- przewodność cieplna właściwa

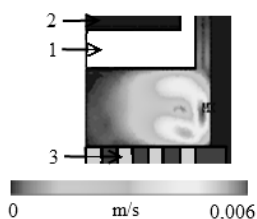
W zakresie modelowania procesu przewodzenia ciepła w obszarach ciał stałych wykorzystano podstawowe równanie Fouriera – Kirchoffa (1), z warunkami brzegowymi

trzeciego rodzaju. Uwzględniano oddawanie ciepła na drodze konwekcji i radiacji z górnej powierzchni tygla i próbki węglowej. Gęstość mocy (p_V) uwzględniano tylko w obszarze elementu grzejnego.

$$(1) \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{p_V}{c\rho} + \frac{1}{c\rho} [\nabla(\lambda \nabla t)]$$

gdzie: t - temperatura, c - ciepło właściwe, λ - przewodność cieplna właściwa, τ - czas. ρ

W obszarze szczeliny powietrznej pomiędzy powierzchnią elementu grzejnego oraz dnem tygla, wymiana ciepła zachodzi na drodze konwekcji i radiacji. Zagadnienia konwekcyjnej wymiany ciepła wymagają w ogólnym przypadku rozwiązywania sprzężonych równań z zakresu mechaniki płynów, co jest zagadnieniem czasochłonnym. Wstępne analizy wykonane przy wykorzystaniu obliczeń CFD w programie ANSYS [3] umożliwiły określenie pola prędkości płynu w szczelinie. Wyniki pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Rozkład prędkości płynu w szczelinie pomiędzy elementem grzejnym (3) a tygłem pomiarowym (1). Oznaczenia zgodne z rys. 1

Z uwagi na niewielkie wymiary szczeliny, prędkości płynu podczas nagrzewania były niewielkie i nie przekraczały 0,006 m/s. Możliwa była realizacja konwekcyjnej wymiany ciepła w sposób uproszczony, przy wykorzystaniu zastępczej przewodności cieplnej [4] w postaci charakterystycznej dla układów zamkniętych (2). Zastępcza przewodność cieplna (2) została wprowadzona do równania (1) w obszarze szczeliny powietrznej.

$$(2) \quad \lambda_e = 1 + \frac{C_1 Ra_s^n}{Ra_s + C_2} \cdot \lambda_s$$

gdzie: Ra - liczba Rayleigha, λ_s - przewodność cieplna właściwa płynu, C_1 , C_2 , n - współczynniki zależne od charakteru przepływu płynu.

Radiacyjna wymiana ciepła została uwzględniona poprzez wprowadzenie oporu radiacyjnego pomiędzy element grzejny oraz dno tygla (3). Do obliczeń przyjęto model ciała szarego. Zjawisko niecałkowitego pochłaniania promieniowania padającego na powierzchnię uwzględniono w obliczeniach zastępczego współczynnika konfiguracji.

$$(3) \quad W_R = \frac{1}{\sigma_0 \cdot \varphi_{G-T}^* \cdot (T_G^2 + T_T^2) (T_G + T_T)}$$

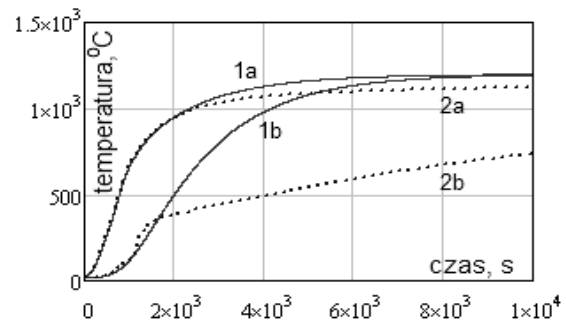
Gdzie: φ_{G-T}^* - zastępczy współczynnik konfiguracji, σ_0 - stała Stefana – Boltzmana; T_G - temperatura elementu grzejnego; T_T - temperatura tygla

Podany model został wykorzystany do analiz procesu nagrzewania pośredniego, charakterystycznego dla rozwiązań klasycznych urządzeń do pomiaru ciśnienia rozprężania.

Identyfikacja układu element grzejny - wsad

Kompletny model układu grzejnego, o określonej geometrii, parametrach materiałowych oraz mocy grzejnej charakteryzuje się identyfikowalnymi parametrami

umożliwiającymi dobór układu regulacji temperatury. Zagadnienie to jest jednak w wielu przypadkach utrudnione, ze względu na cechy obiektów elektrotermicznych charakteryzujących się znacznymi perturbacjami oraz nieliniowością parametrów materiałowych. W celu identyfikacji obiektu opisanego w poprzednim rozdziale wykorzystano prostą metodę skoku jednostkowego. W celu prezentacji problematyki wykorzystano zarówno pełny, jak i uproszczony model charakteryzujący się uśrednionymi parametrami materiałowymi. Przebiegi temperatur w charakterystycznych punktach (według rys. 1) pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Przebiegi temperatury w funkcji czasu w modelu uproszczonym (1) oraz pełnym (2), w odpowiedzi na jednostkowy skok mocy. (a), (b) – lokalizacje według rys. 1

Model uproszczony, pomimo nieliniowości wynikających z modelu matematycznego, może być przybliżony elementem inercyjnym pierwszego rzędu z opóźnieniem (4). W tym przypadku identyfikacja ogranicza się do wyznaczenia trzech parametrów: stałej czasowej, czasu opóźnienia oraz stałego wzmocnienia. Wykorzystana metoda umożliwiła dobór nastaw regulatora PID przy wykorzystaniu tradycyjnego kryterium podanego w Tabeli 1.

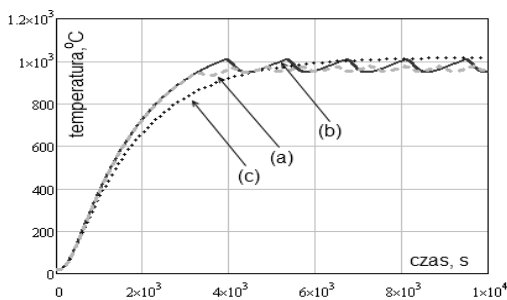
$$(4) \quad O(s) = \frac{x_m e^{-s\tau_0}}{1 + sL}$$

gdzie: L - stała czasowa, τ_0 - czas opóźnienia, x_m - wzmocnienie

Tabela 1. Dobór nastaw regulatora PID

| Wzmocnienie proporcjonalne | Czas różniczkowania | Czas całkowania |
|----------------------------|---------------------|----------------------|
| $K \cdot x_m$ | τ_d/L | τ_i/L |
| $1/(\Delta L)$ | $(\Delta L)/2$ | $2 \cdot (\Delta L)$ |

Opis pełnego modelu, uwzględniającego nieliniowości materiałowe, jest bardziej skomplikowany i wymaga stosowania członów wyższego rzędu [5]. Należy dodatkowo zaznaczyć, że w zależności od lokalizacji, przebiegi temperatury w obu modelach charakteryzują się odmiennymi czasami opóźnienia i stałymi czasowymi. Lokalizacja przetwornika temperatury regulatora jest zatem kolejnym czynnikiem decydującym o całkowitej dokładności układu regulacji temperatury. Efekt ten pokazano na rysunku 4. przedstawiającym efekty działania regulatora proporcjonalnego, z przetwornikami temperatury umieszczonymi w różnych miejscach (a, b, c) modelu (wg rys. 1). Badano regulację stałowartościową, przy temperaturze zadanej na poziomie 1000°C. W analizowanym przypadku najlepsze rezultaty osiągnięto przy umieszczeniu czujnika temperatury w okolicy elementu grzejnego. Własności uśredniające układu tygiel-wsad oraz znikomy czas opóźnienia czujnika względem temperatury elementu grzejnego umożliwiły praktyczną eliminację rozrzutu temperatury wokół wartości zadanej. Tym niemniej wydłużeniu uległ czas nagrzewania. W zagadnieniach regulacji nadążnej rozwiązanie to nie musi być zatem racjonalne.

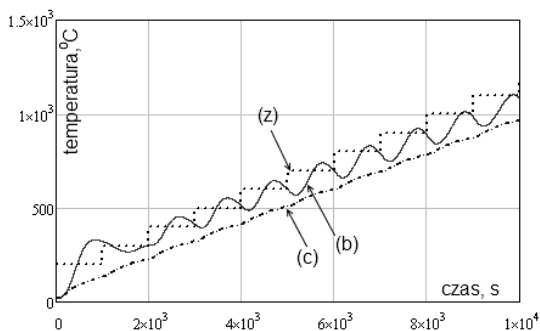


Rys. 5. Przebiegi temperatury w funkcji czasu dla regulatora proporcjonalnego z przetwornikiem temperatury umieszczonym w różnych lokalizacjach. (a, b, c) – lokalizacja przetwornika wg rys. 1

Wymienione czynniki, łącznie z przemianami fazowymi zachodzącymi w procesie nagrzewania węgla oraz stali do temperatur przewyższających 1000°C, utrudniają racjonalny dobór typu i nastaw regulatora temperatury. W niniejszej pracy ograniczono się do prezentacji podstawowych typów regulatorów typu dwustawnego, P oraz PID.

Modelowanie nagrzewania pośredniego

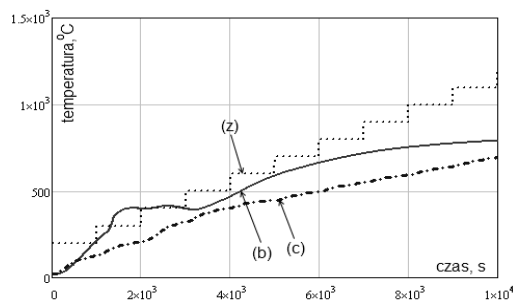
Zagadnienia związane z identyfikacją obliczeniową zostały zakończone doбором nastaw regulatora PID. Nastawy te były stałe w całym zakresie analizowanych temperatur. Celem obliczeń podanych w niniejszym rozdziale było sprawdzenie dokładności odwzorowania przebiegu temperatury w analizowanych modelach. Założono, zgodnie z obowiązującymi zaleceniami [1], że temperatura powinna wzrastać liniowo, z szybkością 10 K/min. Wykorzystano schodkowy przebieg temperatury zadanej, który umożliwia lepsze odwzorowanie błędów regulacyjnych. W początkowej chwili obliczeń zadana temperatura wynosiła 200°C i była inkrementowana z okresem 600 s. Na rysunku 6 pokazano przebieg temperatury w p.(b) (wg rys. 1), przy stosowaniu przetwornika temperatury zlokalizowanego w p.(b) oraz p.(c) (wg rys. 1). Wyniki uzyskano przy wykorzystaniu modelu uproszczonego.



Rys. 6. Przebiegi temperatury w funkcji czasu dla nadążnej regulacji PID, z przetwornikiem temperatury umieszczonym w różnych lokalizacjach. (b, c) – lokalizacja przetwornika wg rys. 1, (z) – temperatura zadana

Umieszczenie przetwornika temperatury bezpośrednio w tyglu (p.(b)), pomimo globalnie mniejszych błędów regulacji, charakteryzuje się brakiem stałej szybkości nagrzewania próbki. Pod tym względem dominujący jest przypadek z przetwornikiem umieszczonym bezpośrednio przy elemencie grzejnym. Znacznie lepsze sprzężenie pomiędzy źródłem ciepła i czujnikiem oraz własności uśredniające układu spowodowały, że uzyskano niemal stałe tempo nagrzewania. W końcowej części charakterystyk, w obu przypadkach zmniejsza się tempo nagrzewania wywołane zwiększeniem ciepła traconego do

otoczenia [4] oraz temperaturą graniczną elementu grzejnego (1250°C). Na rysunku 7 pokazano odpowiadające charakterystyki dla modelu pełnego. Oznaczenia odpowiadają oznaczeniom z poprzedniego przypadku.



Rys. 7. Przebiegi temperatury w funkcji czasu dla nadążnej regulacji PID, z przetwornikiem temperatury umieszczonym w różnych lokalizacjach. (b, c) – lokalizacja przetwornika wg rys. 1, (z) – temperatura zadana

W przypadku modelu pełnego, uzyskane charakterystyki nie odpowiadają wymaganiom stawianym układowi regulacji. Z uwagi na zmienność parametrów modelu oraz występowanie przemian fazowych (w węglu oraz stali), nie jest możliwe opracowanie regulatora o stałych nastawach, umożliwiającego uzyskanie zadowalających dokładności. Zagadnienia te są możliwe do rozwiązania przy wykorzystaniu regulatorów adaptacyjnych, z nastawami zmienianymi w funkcji temperatury [5]. Rozwiązania te, w analizowanym przypadku nie mogą być jednak uznane za racjonalne, z uwagi na niepowtarzalność charakterystyk przy zmianie materiału wsadowego (typu węgla) oraz ograniczoną temperaturą maksymalną elementu grzejnego, powodującą ograniczenie dynamiki nagrzewania w końcowej fazie.

Modelowanie nagrzewania bezpośredniego

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki analiz dla układu umożliwiającego bezpośrednie nagrzewanie tygla (według rys. 1). Prezentowane rozważania są słuszne dla metody indukcyjnej. Obliczenia wykonano przy założeniu zmiany elementu grzejnego (poz. 3 na rys. 1), na wzbudnik o czterech zwojach, wykonany z rurki miedzianej ϕ 6/4 mm. Model numeryczny opracowano przy wykorzystaniu podanych zależności (1) – (3). Istotną różnicą było wyznaczenie rozkładu oraz gęstości mocy grzejnych. Z uwagi na stosowanie stali niemagnetycznej 1H18N9T, możliwe jest zachowanie wysokiej sprawności procesu grzejnego przy stałej częstotliwości prądu we wzbudniku. Na podstawie zależności obowiązującej dla układów z polem poprzecznym (5), określono częstotliwość układu na poziomie 5 kHz. W tych warunkach głębokość wnikania wynosiła około 3.5 mm i była niemal trzykrotnie mniejsza niż dno tygla.

$$(5) \quad f = 2.1 \cdot 10^6 \cdot \frac{\rho}{D^2} \cdot \frac{gS}{0.5s} \cdot \left(\frac{2gS}{D} \right) k$$

gdzie: ρ - rezystywność, D- średnica podziałowa wzbudnika, gS- grubość szczeliny powietrznej, s- grubość wsadu, k- współczynnik korekcyjny przyjmujący wartości z zakresu 0,42 – 1,9.

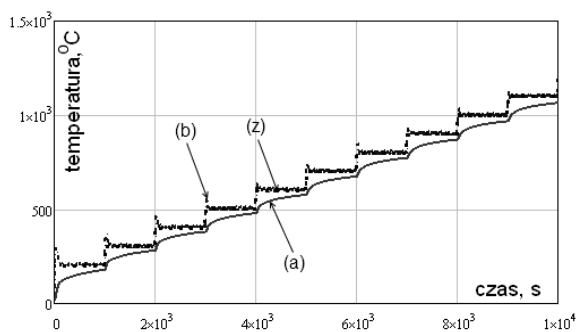
Rozkład gęstości mocy wyznaczono na drodze analitycznej (6) [6]. Uzyskane wyniki uśredniano dla każdego z elementów dyskretnych i wprowadzono do równania (1) umożliwiającego wyznaczenie pola temperatury w stanie nieustalonym.

$$(6) \quad p_v(x) = H_0^2 \rho_s \left| \frac{\sinh \left(\sqrt{j \frac{\omega \mu}{\rho_s}} \cdot x \right)}{\cosh \left(\frac{\sqrt{j \frac{\omega \mu}{\rho_s}} \cdot g}{2} \right)} \right|$$

gdzie: H_0 - natężenie pola magnetycznego na powierzchni; ρ_s - rezystywność stali, x - współrzędna przestrzenna ($x=0$ – g), g - grubość dna tygla.

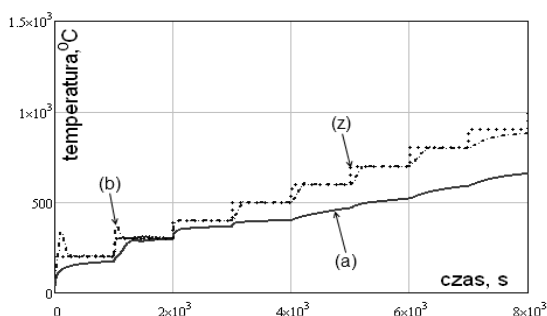
Obliczenia wykonano dla przypadków analogicznych do zaprezentowanych w rozdziale dotyczącym nagrzewania pośredniego. Założono wyidealizowane działanie regulatora temperatury. Wartości maksymalnych mocy grzejnych (5) wyznaczano przez współczynniki wynikające z aktualnego stanu pracy regulatora, co nie we wszystkich przypadkach odpowiada warunkom współpracy z rzeczywistymi źródłami energii [6]. Dla celów niniejszej pracy przybliżenie to nie wnosi znaczących błędów.

Przetwornik pomiarowy regulatora umieszczono w p.(a) oraz p.(b) (wg rys. 1). Przebiegi temperatury w p.(c) (wg rys. 1), dla modelu uproszczonego, pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Przebiegi temperatury w funkcji czasu dla nadążnej regulacji PID, z przetwornikiem temperatury umieszczonym w różnych lokalizacjach. (a, b) – lokalizacja przetwornika wg rys. 1, (z) – temperatura zadana

W przypadku nagrzewania indukcyjnego, jakość regulacji uległa znaczącej poprawie w stosunku do urządzeń o działaniu pośrednim. Zarówno czas działania układu regulacji, jak i moc były wystarczające do realizacji założonego procesu. W podobny sposób dokonano obliczeń modelu pełnego. Wyniki pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Przebiegi temperatury w funkcji czasu dla nadążnej regulacji PID, z przetwornikiem temperatury umieszczonym w różnych lokalizacjach. (a, b) – lokalizacja przetwornika wg rys. 1, (z) – temperatura zadana

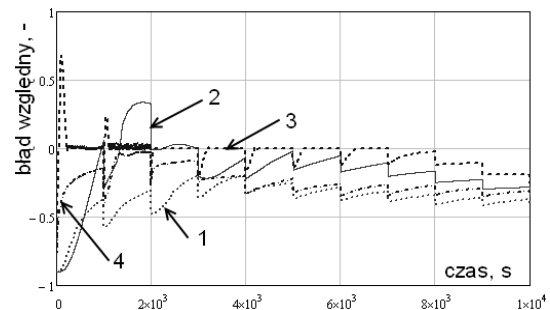
Dla pełnego modelu obejmującego wszystkie źródła nieliniowości, jakość regulacji uległa pogorszeniu. Tym niemniej, w przypadku w którym czujnik temperatury umieszczono w dnie tygla, uzyskano bardzo wysoką zgodność z temperaturą zadaną. Fakt ten bezpośrednio

świadczy o przewadze nagrzewania bezpośredniego w urządzeniach klasy, której dotyczy niniejsza praca.

Podsumowanie

W pracy omówiono podstawowe problemy dotyczące regulacji temperatury w układzie wymagającym utrzymania stałej szybkości nagrzewania. Poruszone zagadnienia dotyczyły zarówno podstawowych problemów związanych z identyfikacją, jak i rzeczywistymi charakterystykami nagrzewania. Wykazano, iż przyjmowanie powszechnie wykorzystywanych uproszczeń w postaci liniowości modeli opisujących proces nagrzewania prowadzi do znacznych błędów, często uniemożliwiających prawidłowy dobór układów regulacji temperatury.

Główną częścią pracy było porównanie rezultatów obliczeń uzyskanych przy wykorzystaniu pośredniej metody nagrzewania, z metodą bezpośrednią, w ujęciu charakterystycznym dla nagrzewania indukcyjnego. Wykonane analizy umożliwiły stwierdzenie, znacznej przewagi metody bezpośredniej, umożliwiającej redukcję błędów regulacji, nawet o 60 %. Na rysunku 10 pokazano charakterystyki błędów dla modeli uwzględniających nieliniowości, w funkcji czasu nagrzewania.



Rys. 10. Charakterystyki błędów względnych regulacji w funkcji czasu. 1, 2- nagrzewanie pośrednie; 3, 4- nagrzewanie indukcyjne.

W układach rozpatrywanej klasy, stosowanie nagrzewania indukcyjnego zamiast rezystancyjnego pośredniego umożliwia, przy tej samej mocy grzejnej, bardziej wierne odwzorowanie wymaganych programów nagrzewania w szerokim zakresie temperatur. Szybsze czasy regulacji oraz możliwość kształtowania rozkładów mocy grzejnych czynią ten sposób znacznie efektywniejszym. Dodatkowo, całkowita sprawność procesu nagrzewania indukcyjnego przekraczała 70 % i była o 12 % wyższa od nagrzewania rezystancyjnego.

Autor: dr inż. Marcin Wesolowski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-695 Warszawa, E-mail: Marcin.Wesolowski@ien.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] PN-73/G-04522, „Węgiel kamienny. Oznaczanie ciśnienia rozprężania”
- [2] Wesolowski M., Niedbała R., Czaplicki A.: Modelowanie numeryczne w procesie projektowania urządzeń do wytwarzania materiałów półprzewodnikowych, Elektronika nr 2/2011
- [3] <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad> (dostęp 11.07.2015)
- [4] Hering M.: Termodynamika dla Elektryków, WNT 1981.
- [5] Skoczowski S.: Technika Regulacji Temperatury, PAK, 2000
- [6] Zgraja J.: Współpraca Indukcyjnego Układu Grzejnego z Szeregowym Falownikiem Rezonansowym, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, nr 1165/2013