

**ADAM CIEŚLAK<sup>1</sup>, GRZEGORZ LISOWSKI<sup>2</sup>  
JERZY ZGRAJA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej

<sup>2</sup>Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki

## **WYKORZYSTUJĄCE NAGRZEWANIE INDUKCYJNE STANOWISKO DO SZACOWANIA CIEPLNYCH PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH**

*Opracowanie przedstawia opis stanowiska laboratoryjnego do szacowania cieplnych parametrów materiałowych indukcyjnie nagrzewanego wsadu oraz aspekty związane z wdrożeniem układów i procedur sterujących, pomiarowych oraz obróbki danych. Przedstawiono rezultaty przeprowadzonych badań oraz wnioski praktyczne wynikające z analizy trudności napotkanych w realizacji zadania.*

### **WPROWADZENIE**

W procesach przemysłowych związanych z obróbką cieplną materiału szczególnie istotna jest znajomość parametrów materiałowych badanego obiektu, wsadu. W pracy przedstawiono stanowisko laboratoryjne zbudowane w celu wdrożenia i weryfikacji metod służących określaniu cieplnych parametrów materiałowych wsadów z wykorzystaniem metody nagrzewania indukcyjnego. Budowane stanowisko ma charakteryzować się docelowo zarówno dużą autonomicznością, jak i zautomatyzowaniem pomiarów. Prowadzi to do potrzeby silnego zintegrowania wewnętrznych układów pomiarowych oraz systemów zbierania i przetwarzania danych z procedurami sterującymi, wspomaganymi dodatkowo obliczeniami symulacyjnymi i bazą wiedzy. Przy tego typu podejściu można oczekiwać, że złożony proces określania charakterystyk materiałowych (początkowo parametrów cieplnych) będzie można prowadzić przy ograniczonym udziale wysoko wykwalifikowanych specjalistów, w praktyce na hali produkcyjnej z wykorzystaniem obsługi stanowisk produkcyjnych, szczególnie stanowisk do nagrzewania indukcyjnego.

W fazie uruchomieniowej stanowiska, w celu ograniczenia kosztownych prób laboratoryjnych, szereg wykonywanych prac wspierano obliczeniami symulacyjnymi, opartymi o wykorzystanie oprogramowania do polowej analizy sprężonych zjawisk elektromagnetyczno-cieplnych.

# 1. WYKORZYSTANE METODY NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO DO SZACOWANIA CIEPLNYCH PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH

Jedną z funkcji stanowiska laboratoryjnego, które zostanie omówione w niniejszym opracowaniu jest oszacowanie (z możliwie dużą dokładnością) zestawu cieplnych parametrów materiałowych indukcyjnie nagrzewanego wsadu, tj. przewodności cieplnej właściwej, dyfuzyjności cieplnej oraz ciepła właściwego. Wymienione parametry są powiązane ze sobą zależnością:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

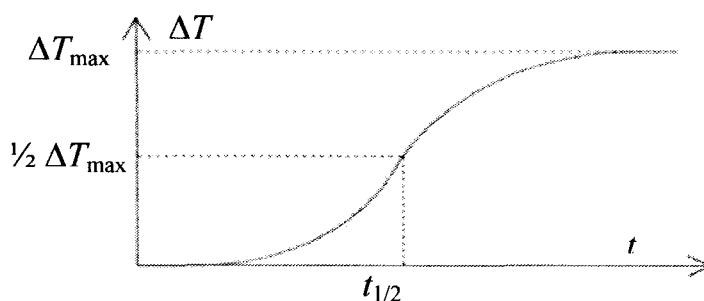
gdzie:  $a$  – dyfuzyjność cieplna  $\lambda$  – przewodność cieplna właściwa,  $c$  – ciepło właściwe,  $\rho$  – gęstość.

Do określenia dyfuzyjności cieplnej wykorzystano metodę impulsową [1] polegającą na skierowaniu impulsu promieniowania elektromagnetycznego o charakterze możliwie bliskim impulsowi Diraca na podstawę walcowego wsadu i rejestracji temperatury w dziedzinie czasu po stronie przeciwnej. W metodzie tej istotne jest, aby poziom dostarczonej energii był dostatecznie duży oraz była ona równomiernie rozłożona na powierzchni. W odróżnieniu od wcześniejszych, znanych z literatury [1], zastosowań lampy promiennikowej, czy też lasera jako źródła impulsu promieniowania elektromagnetycznego, na omawianym stanowisku podjęto unikalną próbę wykorzystania generatora wysokiej częstotliwości do nagrzewania indukcyjnego jako źródła dostarczanej energii.

W omawianej metodzie dyfuzyjność cieplna wsadu określana jest na podstawie zarejestrowanego czasowego przebiegu temperatury na przeciwnej do nagrzewanej stronie próbki (rys. 1) poprzez wyznaczenie czasu osiągnięcia temperatury połowicznej  $t_{1/2}$  (połowa wartości temperatury maksymalnej  $1/2\Delta T$ ), według zależności:

$$a = 1,38 \frac{L^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (2)$$

gdzie:  $L$  – wysokość(grubość) próbki wsadu.



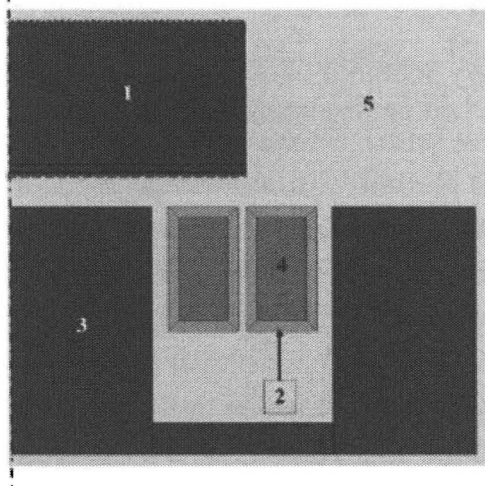
Rys. 1. Czasowy przebieg temperatury powierzchni próbki (przeciwnej do nagrzewanej)

Do określenia ciepła właściwego wykorzystano metodę bazującą na badaniu pochodnej temperatury po czasie w indukcyjnie nagrzewanej próbce, co sprowadza się do poszukiwania stałej wartości badanej pochodnej temperatury. W rzeczywistości oznaczało to konieczność wyszukania wartości pochodnej temperatury po czasie w punkcie, w którym przyrost temperatury ma charakter możliwie bliski liniowemu. W metodzie tej źródło (generator w. cz.) generuje impuls prądowy (prostokątny RMS) o określonym czasie trwania. Czas ten ściśle zależy od uprzednio wyznaczonego czasu połowicznego i jest od niego dłuższy o około 5-6 razy. Po upływie tego czasu pochodna stabilizuje się, osiągając wartość maksymalną. Przy założeniu równomierności rozkładu temperatury w próbce, ciepło właściwe można wyznaczyć z zależności:

$$c = \frac{P_{wsad}}{m \cdot \frac{dT}{dt}} \quad [c] = \frac{J}{kg \cdot K} \quad (3)$$

gdzie:  $P_{wsad}$  – moc wydzielona we wsadzie,  $m$  – masa wsadu,  $dT/dt$  – wartość maksymalna pochodnej temperatury po czasie.

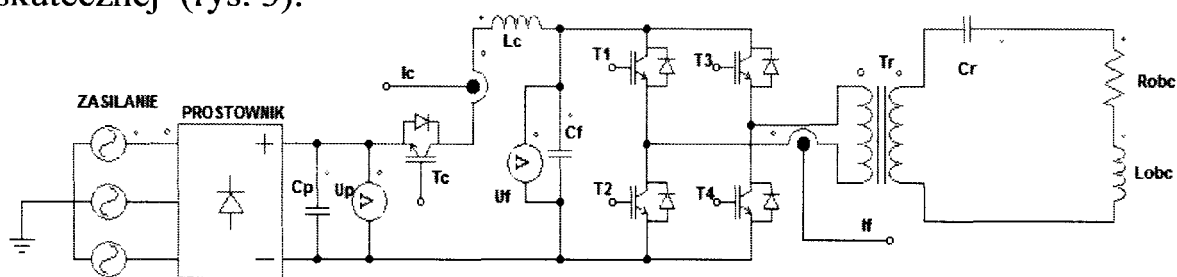
Przedstawione powyżej metody zostały przeanalizowane (początkowo symulacyjnie) w układzie nagrzewania „od czoła” dla próbek walcowych o średnicy 30 mm i wysokości 10 mm wykonanych z: stali magnetycznej, stali niemagnetycznej, miedzi, mosiądzu i aluminium. Przykładowy, symulacyjny model obliczeniowy przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Układ nagrzewania „od czoła”: 1 – wsad, 2 – wzбудnik, 3 – rdzeń magnetyczny, 4 – płyn chłodzący, 5 – otoczenie

## 2. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Na potrzeby weryfikacji przedstawionych powyżej metod oraz obliczeń, zaprojektowane oraz wykonane zostało laboratoryjne stanowisko badawcze. Głównym elementem stanowiska jest dedykowany generator o mocy 10 kW firmy ENIKA, w którym wykorzystano zjawisko rezonansu szeregowego. Został on przystosowany specjalnie na potrzeby przeprowadzania prób o charakterze impulsowym służącym zarówno do wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej, jak i ciepła właściwego. W tym stanowisku zastosowano falownik na bazie mostka H, z czterema tranzystorami IGBT do wymuszania napięciowej fali prostokątnej o amplitudzie  $U_f$  z wypełnieniem 50% i zmiennej częstotliwości (od 20 do 50 kHz). Nastawa wartości  $U_f$  jest realizowana w układzie przetwornicy typu BUCK z tranzystorem chopperowym  $T_C$  i dławikiem  $L_C$  obniżającym wyprostowane z sieci 3\*400V napięcie  $U_p$ . Transformator  $T_r$  o przekładni 25:1 podwyższa prąd w obwodzie wzbudnika w stosunku do prądu falownika  $I_f$ , co pozwala na osiąganie prądów w układzie grzejnym na poziomie do 1,5 kA wartości skutecznej (rys. 3).



Rys. 3. Poglądowy schemat układu mocy w generatorze testowym do nagrzewania indukcyjnego

Układ sterowania do generatora oparto o procesor DSP firmy Microchip i układ programowalny serii CPLD firmy Lattice. Aby spełnić wymagania stanowiska, należało odpowiednio dobrać elementy o charakterze indukcyjnym i pojemnościowym oraz zastosować odpowiednie sterowanie. Najlepszym rozwiązaniem jest tu oczywiście zastosowanie kondensatorów w obwodzie falownika o bardzo dużej pojemności, sumarycznie rzędu nawet kilkunastu milifaradów. Jest to jednak rozwiązanie bardzo drogie, kondensatory zajmują dużo miejsca, co rzutuje na rozmieszczenie szyn zasilających w generatorze, a w konsekwencji prowadzi do pojawienia się zjawisk związanych z indukcyjnościami elementów doprowadzających zasilanie.

Uwzględniając powyższe, w stanowisku zastosowano kondensator  $C_f$  o pojemności 4, 7 mF. Ważnym elementem sterowania jest również wykorzystanie dławika  $L_C$  jako elementu wygładzającego prąd dostarczany do falownika. Zbyt mały dławik powodował, po pierwsze, zjawisko nieciągłości prądu przy małych mocach dostarczanych do układu i związane z tym problemy ze

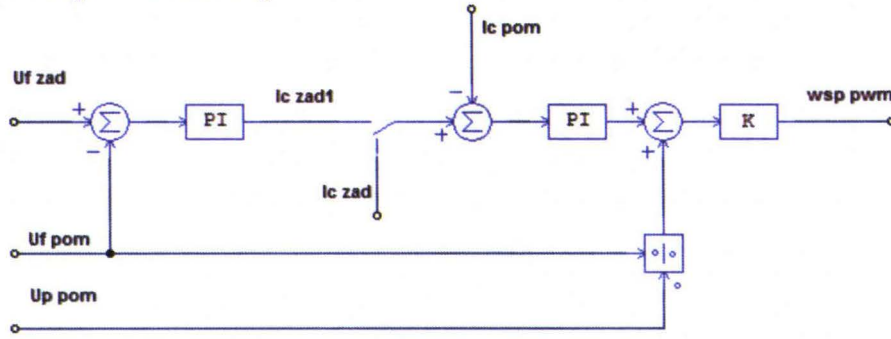
stabilnym utrzymaniem odpowiedniego napięcia, po drugie – duże tętnienie prądu w trakcie krótkich prób dużej mocy, co prowadziło do silnego nasycania dławika i niekontrolowanego wzrostu prądu. Zbyt duża indukcyjność dławika prowadziła do nadmiernego wzrostu stałej czasowej przebiegu prądu w stosunku do oczekiwań związanych z długością trwania impulsu załączenia generatora. Jej wartość ostatecznie dobrano na poziomie 10 mH, przy prądzie znamionowym dławika 40 A.

Zadaniem układu sterowania było zrealizowanie stałej amplitudy prądu falownika w trakcie wykonywanych prób, czy to krótkich kilkumilisekundowych impulsów silnoprądowych, czy też długich kilkusekundowych przebiegów, ale o zdecydowanie mniejszej amplitudzie. Wiązało się to z koniecznością utrzymywania stałej wartości napięcia  $U_f$  w obwodzie falownika w trakcie próby. Parametry eksperymentu zadawane były przez komputer nadrzędny PC, sterujący pracą stanowiska, w tym generatora. W układzie istnieje możliwość ustawienia częstotliwości rezonansowej, napięcia  $U_{f\text{ zad}}$  zadawanego w trakcie pracy falownika, przewidywanej wartości prądu falownika  $I_{c\text{ zad}}$  oraz czasu próby  $t_o$  z rozdzielczością 1 ms.

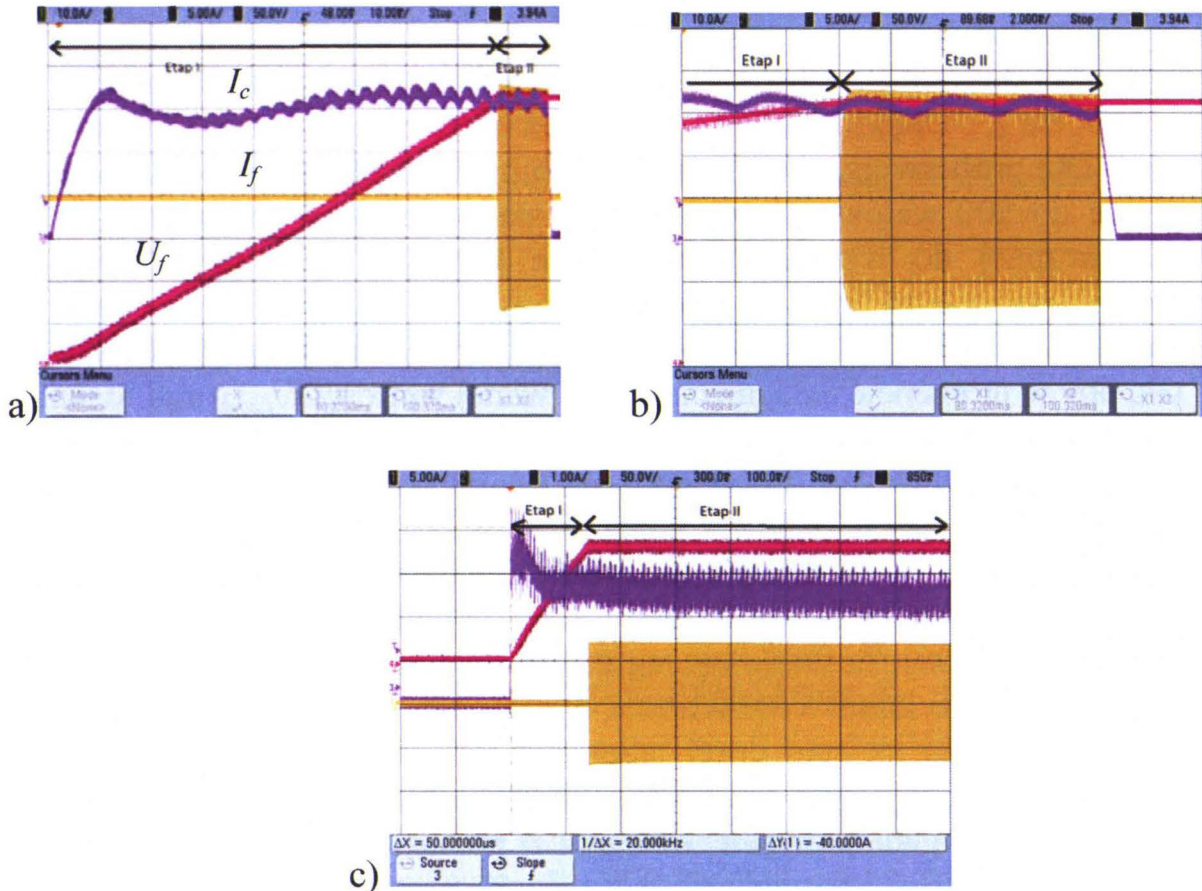
Poprawność zrealizowania eksperymentu nagrzewania stałym impulsem mocy wymaga rozpoczęcia procesu nagrzewania przy odpowiednio (dla danej wartości mocy) dobranych wartościach napięcia fali prostokątnej falownika  $U_f$  i prądu choppera  $I_c$ . Dla krótkich prób moc chwilowa osiąga wartość kilkunastu kilowatów. Dla prób związanych z realizacją impulsu jednostkowego moc jest na poziomie do 500 watów. Ważnym celem sterowania jest utrzymanie stałej mocy dostarczanej do wzbudnika w trakcie każdej z tych prób. Dlatego realizację eksperymentu podzielono na etapy. Pierwszy ma za zadanie naładować kondensator  $C_f$  do wartości  $U_{f\text{ zad}}$  zadanej z komputera PC. Realizuje się go tak, aby w momencie osiągnięcia oczekiwanej wartości  $U_{f\text{ zad}}$  prąd dławika  $L_c$  miał jednocześnie wartość  $I_{c\text{ zad}}$ . W rzeczywistości prąd dławika osiąga swoją wartość przed naładowaniem kondensatora. Realizowane jest to przez układ z regulatorem PI dającym liniowe narastanie prądu do wartości ustalonej, a następnie trzymanie jej na stałej wartości do momentu włączenia falownika, które następuje po przekroczeniu napięcia  $U_{f\text{ zad}}$ . W drugim etapie sterowanie przełącza się na regulację kaskadową: regulator napięcia z wyjściem prądowym, regulator prądu z wyjściem PWM. Wartość części całkującej regulatora napięcia w momencie przejścia na etap drugi ładowana jest wartością bieżącą prądu dławika. Układ na tym etapie ma za zadanie utrzymywać napięcie na stałym poziomie. Ponieważ generator jest zasilany z prostownika trójfazowego, na napięciu  $U_p$  obserwuje się tętnienia 300 Hz, które mocno wpływają na jakość sterowania. By skutki tego zjawiska ograniczyć, zastosowano dodatkowo układ korekcji feed-forward wynikający z warunku zera dla średniego napięcia na dławiku za okres PWM ( $t_{pwm}/T_{pwm} = U_f/U_p$ , gdzie  $t_{pwm}$  czas wysterowania

tranzystora, a  $T_{pwm}$  okres PWM). Schemat ideowy układu sterowanie przedstawiono na rys. 4.

Na rys. 5 przedstawiono przebiegi napięcia  $U_f$  kolor czerwony i prądów  $I_c$  – kolor fioletowy oraz  $I_f$  – kolor żółty dla dwóch przypadków. Na rys. 5a i 5b przedstawiono realizację impulsu mocy zbliżonego do impulsu Diraca, natomiast na rys. 5c realizację impulsu znacznie dłuższego, nazwanego wymuszeniem jednostkowym.

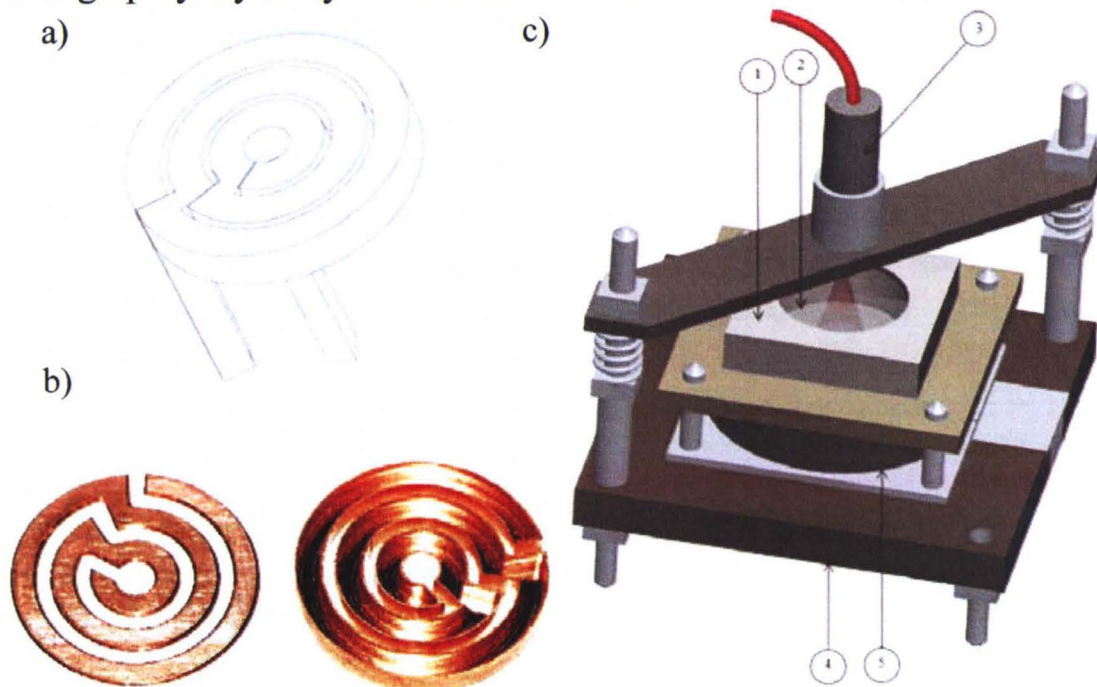


Rys. 4. Schemat regulatora zastosowanego w stanowisku badawczym



Rys. 5. Przebiegi napięcia falownika  $U_f$ , prądu dławika  $I_c$  i prądu falownika  $I_f$  dla eksperymentu realizującego impuls Diraca (a) i (b) oraz eksperymentu realizującego przebieg jednostkowy (c)

W dalszym etapie prac rozważono możliwości wykorzystania generatora do wyznaczenia zestawu cieplnych parametrów materiałowych. Integralną częścią generatora jest specjalnie zaprojektowany wzbudnik oraz zestaw elementów odpowiadających za pozycjonowanie próbki oraz pozostałych elementów stanowiska, tj. rdzeń magnetyczny czy izolacja termiczna. Na rys. 6b przedstawiono fragment stanowiska związanego z wzbudnikiem. W pierwszej fazie budowy stanowiska zaprojektowano płaski wzbudnik spiralny, jako 3-zwojny (rys. 6a) o średnicy zewnętrznej 39 mm i średnicy wewnętrznej równej 2 mm. Ze względu na małe gabaryty oraz dla zachowania dużej precyzji wykonano go przy wykorzystaniu obrabiarki CNC.



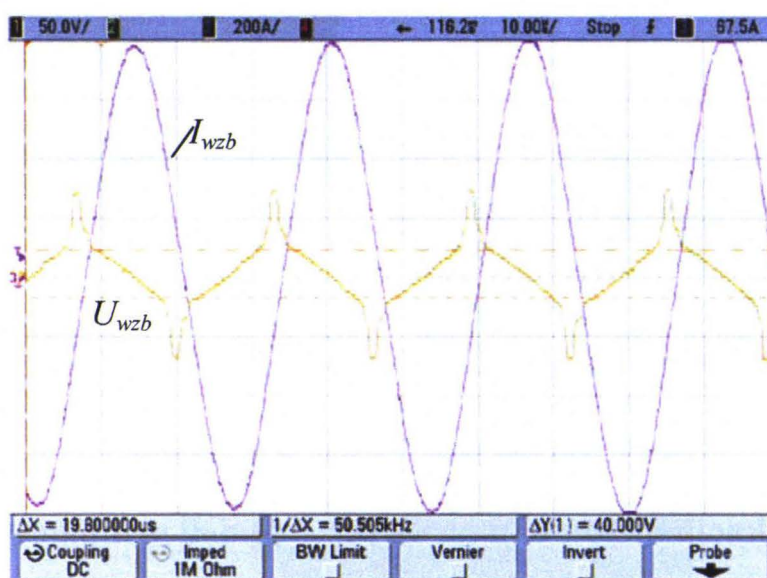
Rys. 6. Stanowisko badawcze: a) szkic wzbudnika, b) wykonane elementy wzbudnika, c) widok stanowiska: 1 – izolacja termiczna, 2 – wsad, 3 – układ pomiaru temperatury, 4 – materiał elektroizolacyjny, 5 – rdzeń magnetyczny

## Wstępna weryfikacja metod pomiarowych i modeli symulacyjnych

Przy wykorzystaniu wyżej przedstawionego stanowiska dokonano prób mających na celu wstępną weryfikację zarówno poprawności przyjętych modeli w realizowanych wcześniej obliczeniach symulacyjnych, jak i przyjętych metod pomiarowych, poprzez zestawienie wyników pomiarów i obliczeń symulacyjnych. Na wstępie podjęto próbę wygenerowania impulsu prądowego o czasie trwania 10 ms i możliwie wysokiej wartości skutecznej (uzyskano ok. 1,5 kA) z uwagi na konieczność uzyskania mierzalnych przyrostów temperatury. Uzyskane pomiarowo rezultaty przyrostów temperatury były dalekie od oczekiwanych na podstawie obliczeń symulacyjnych. Dla próbki stalowej oczekiwana wartość była na poziomie 7 K, a uzyskana pomiarowo

wynosiła około 1-2 K. Rozbieżności te wymusiły konieczność poszukiwania przyczyny problemu. Analizę rozpoczęto od konfrontacji warunków rzeczywistych z założonymi w symulacjach, np. wpływ przyjętych warunków brzegowych wymiany ciepła.

Na podstawie licznych symulacji stwierdza się, że w rozważanych przypadkach przebieg temperatury we wsadzie zależy w bardzo małym stopniu od intensywności chłodzenia jego powierzchni: podstaw i bocznych. Dalszym etapem weryfikacji poprawności modelu symulacyjnego była weryfikacja założonych parametrów materiałowych. Uwagę skupiono przede wszystkim na przyjętym w symulacjach założeniu stałej wartości przenikalności magnetycznej dla materiału rdzenia magnetycznego, tj. założeniu pracy na zbliżonej do liniowej początkowej części charakterystyki magnesowania. W celu potwierdzenia występowania w trakcie pomiarów zjawiska silnego nasycania fragmentów rdzenia magnetycznego wzbudnika dokonano pomiaru napięcia na zaciskach wzbudnika, przy przepływie prądu roboczego. Przedstawiony na rys. 7 przebieg prądu  $I_{wzb}$  (kolor fioletowy) oraz napięcia (żółty)  $U_{wzb}$  na wzbudniku doskonale obrazuje zjawisko nasycania się obwodu magnetycznego.



Rys. 7. Przebieg prądu po pierwotnej stronie transformatora zasilającego wzbudnik i przebieg napięcia na wzbudniku

Dla małych wartości prądu (w pobliżu zera) obserwowany jest wyraźny wzrost napięcia (wzrost indukcyjności układu) i następnie jego radykalne zmniejszenie przy wzrastającej wartości prądu. Świadczy to o silnym nasycaniu układu, prowadzącym do zmiany indukcyjności zastępczej. To silne nasycanie należy upatrywać w nasycaniu głównie fragmentu rdzenia znajdującego się w osi wzbudnika, średnica jedynie 2 mm. Na podstawie przedstawionych doświadczeń zdecydowano o konieczności zaprojektowania i wykonania nowego wzbudnika, który umożliwi zastosowanie rdzenia (w osi wzbudnika)

o większej objętości czynnej. Zaproponowano wzbudnik 2-zwojny o średnicy zewnętrznej 39 mm i wewnętrznej 20 mm. Wzbudnik wykonano z giętej rurki o profilu prostokątnym.

### Pomiar temperatury

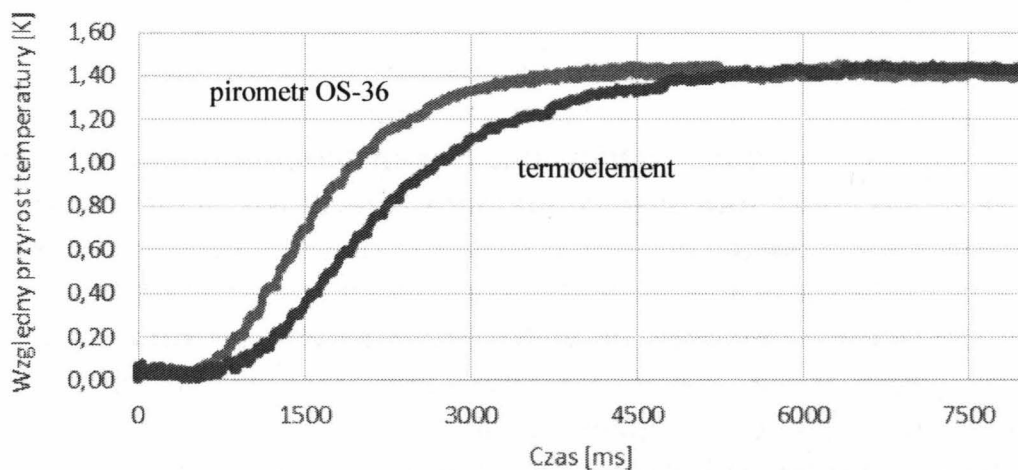
W celu wyznaczenia cieplnych parametrów materiałowych np. dyfuzyjności cieplnej niezbędne jest dokonanie pomiaru przebiegu temperatury próbki w czasie. Istotne z punktu widzenia układu pomiarowego temperatury jest możliwie dobre odwzorowanie dynamiki zmian temperatury. W trakcie ustalania wstępnych założeń do projektu przyjęto dwa specyficzne rodzaje czujników temperatury, jakie mogą zostać wykorzystane: stykowe oraz bezstykowe. W rzeczywistym układzie ze względu na łatwość montażu oraz dostępność jako pierwszą podjęto próbę wykorzystania czujnika stykowego – termoelementu typu K (płaszczowego z izolowaną spoiną) o średnicy 0,5 mm firmy OMEGA. Do przetworzenia sygnału napięciowego z termoelementu na standardowy sygnał stałoprądowy 4-20 mA wykorzystano dedykowany do pomiarów temperatury przetwornik LUMEL P20. Generator został przystosowany do odbioru i przetwarzania sygnału ze wspomnianego przetwornika. Układ pomiaru temperatury został zsynchronizowany z układem sterowania generatora, umożliwiając jednoczesne wyzwolenie impulsu oraz start pomiaru temperatury. Wszelkie próby pomiaru temperatury zostały przeprowadzone podczas impulsowego nagrzewania próbki stalowej, tj. czas impulsu 100 ms, wartość skuteczna prądu 1500 A, częstotliwość 38100 Hz.

Pierwsze próby pomiaru odpowiedzi temperaturowej termoelementem okazały się być obarczone dużym błędem w stosunku do obliczeń symulacyjnych. Dynamika przebiegu temperatury odbiegała od oczekiwanej. Przykładowo czas połowiczny dla próbki stalowej wyniósł 2120 ms zamiast oczekiwanych 1200 ms. Dla zlokalizowania źródła problemu, podjęto próbę mającą na celu zbadanie czasu odpowiedzi wykorzystanego termoelementu. W tym celu wykorzystano układ wzmacniający (100-krotnie) sygnał napięciowy i czujnik podłączono do oscyloskopu z pominięciem przetwornika temperatury. Na podstawie prób doświadczalnych oszacowano czas odpowiedzi czujnika (czas osiągnięcia 90% wartości ustalonej) na ok. 80 ms. W związku z powyższym wykluczono czujnik jako źródło problemu i uznano, że źródłem opóźnienia i utraty sygnału jest głównie przetwornik temperatury. Cechuje się on katalogowym czasem uśredniania na poziomie 300 ms, przez co nie może on mieć zastosowania w układzie wymagającym dobrego odwzorowania dynamiki zmian temperatury.

Czujnikiem bezstykowym, jaki wykorzystano, był czujnik pirometryczny OMEGA OS-36. Czujnik cechuje się stosunkowo krótkim nominalnym czasem odpowiedzi, tj. 80 ms. Podjęto próbę porównania rezultatów uzyskanych przy

użyciu obu czujników i zbudowanego układu wzmacniającego. Na rys. 8 przedstawiono przykładowe przebiegi odpowiedzi temperaturowej.

Porównanie termoelement 0,5mm- pirometr OS-36



Rys. 8. Przebieg odpowiedzi temperaturowych z wykorzystaniem dwóch czujników temperatury

Zarejestrowane przebiegi wskazują, że w rzeczywistych warunkach pomiarowych (powierzchnia ciała stałego) czujnik bezstykowy pozwalał na uzyskanie mniejszych czasów opóźnień pomiaru temperatury próbki oraz wykazał się mniejszą wrażliwością na czynniki zewnętrzne i łatwością w montażu. Wymaga on jednak odpowiedniego przygotowania badanej próbki (poczernienia) oraz precyzyjnej lokalizacji i doboru optyki, aby pomiar był realizowany w określonym obszarze próbki.. Podjęto decyzję o zastosowaniu w dalszych badaniach wyłącznie czujnika bezstykowego. Finalnie do pomiaru temperatury na stanowisku wykorzystano kamerę termowizyjną A655 firmy FLIR, która cechuje się krótkim czasem odpowiedzi – poniżej 8 ms, co gwarantuje uzyskanie wyników o dynamice zgodnej z oczekiwaniami. Kamera ta, sprzężona z dedykowanym oprogramowaniem komputerowym, umożliwia rejestrowanie przebiegów oraz rozkładów temperatury na całej powierzchni górnej podstawy walca. Dane wyjściowe z kamery są poddawane obróbce w programie MATLAB, a następnie analizowane za pomocą arkusza kalkulacyjnego MS Excel. Przykładowe wyniki uzyskane przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej zostały przedstawione w następnym rozdziale.

### Porównanie wyników symulacji i pomiarów

W celu weryfikacji poczynionych symulacji wykonano szereg doświadczeń z wykorzystaniem opisywanego generatora oraz próbek wykonanych z kilku rodzajów materiału: miedź, aluminium, mosiądz, stal magnetyczna i stal niemagnetyczna. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry materiałowe, które wykorzystano do symulacji.

Tabela 1. Parametry materiałowe analizowanych wsadów

| Materiał/parametr   | $\mu_r$ | $\rho$           | $\lambda$ | $c \cdot \rho_v$    | Gęstość $\rho_v$  |
|---------------------|---------|------------------|-----------|---------------------|-------------------|
|                     | -       | $\Omega\text{m}$ | W/m/K     | J/m <sup>3</sup> /K | kg/m <sup>3</sup> |
| Al.                 | 1,000   | 2,65E-08         | 237       | 2 430 000           | 2 700             |
| Cu.                 | 0,999   | 1,68E-08         | 401       | 3 389 600           | 8 920             |
| Mosiądz             | 1,500   | 0,075E-06        | 110       | 3 223 350           | 8 550             |
| Stal niemagnetyczna | 1,008   | 7,2E-7           | 16,2      | 4 000 000           | 8 000             |
| Stal magnetyczna    | krzywa  | 1,43E-7          | 65,2      | 3 510 000           | 7 800             |

Szacowanie dyfuzyjności cieplnej

Próba oszacowania dyfuzyjności cieplnej wsadu została przeprowadzona w układzie: ze wzбудnikiem 2-zwojnym (ograniczono problem nasycenia się układu magnetycznego), próbką o średnicy 30 mm i wysokości 10 mm. Ze względu na promieniowe nierównomierności rozkładu temperatury ustalono, że pomiar temperatury odpowiedzi będzie realizowany nie w osi próbki, a w strefie odległej o 10 mm od osi (co odpowiada położeniu wewnętrznej krawędzi wzбудnika; promień wewnętrzny wzбудnika był równy 10 mm). Porównanie dyfuzyjności cieplnych dla badanych materiałów uzyskanych zarówno drogą symulacji, jak i pomiarów przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie wyników obliczeń symulacyjnych z rzeczywistymi pomiarami na stanowisku badawczym – dyfuzyjność cieplna

| Materiał     | Dyfuzyjność założona | Dyfuzyjność (symulacja) | Błąd (symulacja) | Dyfuzyjność (pomiar) | Błąd (pomiar) |
|--------------|----------------------|-------------------------|------------------|----------------------|---------------|
|              | m <sup>2</sup> /s    | m <sup>2</sup> /s       |                  | m <sup>2</sup> /s    |               |
| Aluminium    | 9,75E-05             | 8,96E-05                | -8%              | 7,77E-05             | -20%          |
| Miedź        | 1,18E-04             | 1,08E-04                | -8%              | 1,08E-04             | -9%           |
| Mosiądz      | 3,41E-05             | 3,39E-05                | -1%              | 3,78E-05             | 11%           |
| Stal mag.    | 1,86E-05             | 2,04E-05                | 10%              | 2,01E-05             | 8%            |
| Stal niemag. | 4,10E-06             | 4,09E-06                | 0%               | 4,16E-06             | 1%            |

Wyniki uzyskane symulacyjnie są obarczone błędem nie większym niż 10%, a pomiarowe 20%.

Szacowanie ciepła właściwego

Próba oszacowania ciepła właściwego została wykonana w tym samym układzie jak w rozdziale powyżej. Prądowy impuls wymuszający miał wartość rzędu kilkuset amperów i trwał około 5-6 wielokrotności czasu połowicznego danego materiału. Zestawienie wyników pomiarowych wraz z symulacyjnymi zaprezentowano w tabeli 3.

Tabela 3. Porównanie wyników uzyskanych z rzeczywistych pomiarów na stanowisku z założonymi wartościami – ciepło właściwe

| Materiał     | c [J/(kgK)] |            | Błąd |
|--------------|-------------|------------|------|
|              | Przyjęte    | Pomierzone |      |
| Aluminium    | 900         | 1062       | 18%  |
| Miedź        | 380         | 454        | 19%  |
| Mosiądz      | 377         | 404        | 7%   |
| Stal mag.    | 450         | 496        | 10%  |
| Stal niemag. | 500         | 470        | -6%  |

Wyniki pomiarowe wykazują się błędem poniżej 20% w stosunku do wartości referencyjnych. Na tej podstawie stwierdza się, że możliwe jest wykorzystanie niniejszych wyników jako danych wejściowych do procedur optymalizacyjnych, mających na celu dokładne wyznaczenie określonych cieplnych parametrów materiałowych.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wskazały na kilka istotnych warunków, które należy spełnić, aby ograniczyć błędy przy realizacji opisanych doświadczeń do szacowania cieplnych parametrów materiałowych. Biorąc pod uwagę, że w metodzie impulsowej szacowania dyfuzyjności cieplnej są stosowane duże wartości amplitudy prądu wzbudnika, należy szczególnie starannie rozważyć zagadnienie ewentualnego nasycania się boczników magnetycznych wzbudnika, choć pracują one w układzie magnetycznie otwartym. Przydatne może się tu okazać rejestrowanie i analizowanie kształtu napięcia na wzbudnika. Przy realizowanych procedurach pomiarowych bardzo ważne jest również zapewnienie stałości amplitudy prądu w trakcie całego impulsu pomiarowego. W przypadku krótkich, rzędu 10 ms, trwających impulsów o mocy kilkunastu kilowatów nie jest to zadanie proste i wymaga stosowania specjalnych procedur załączania falownika, jak ta z wykorzystaniem regulatora prądu z rysunku 4. Przy zapewnieniu odpowiednich procedur załączania falownika możliwe jest uzyskanie w układzie krótkich, nawet milisekundowych impulsów prądu

będącego źródłem fali elektromagnetycznej o energii znacznie przekraczającej 20 J, co można uznać za konkurencyjne w stosunku do znanych z literatury wymuszeń w metodzie Flash, uzyskiwanych z wykorzystaniem lasera. Przy realizowanych badaniach szczególną uwagę należy również skupić na dobrze aparatury pomiaru temperatury, aby miał ona dostatecznie krótki czas odpowiedzi, tj. na poziomie poniżej 10 ms.

## LITERATURA

- [1] Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbott G.L.: Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity, J. Appl. Phys. 32, 1679, 1961.
- [2] Hering M.: Termokinetika dla elektryków, WNT, Warszawa 1980.

*Praca finansowana ze środków NCBiR w ramach projektu Badań Stosowanych nr umowy PBS1/A4/2/2012.*

## VARIOUS METHODS FOR ESTIMATION THERMAL PROPERTIES OF INDUCTION HEATED CHARGE

### Summary

*The study was devoted to analysis of possibility of using the impulse Flash method in real implementation for determination thermal diffusivity and time derivative of temperature method for determination heat capacity of induction heated charge. Various experiences from implementation process was presented.*

Keywords: dyfuzyjność cieplna, ciepło właściwe, metoda flash, metody odwrotne, thermal diffusivity, flash method, indirect method, heat capacity determination.