

**Marek STENCEL, Dominik OSIŃSKI**

KATEDRA METROLOGII AGH

**System pomiaru przewodności cieplnej****dr inż. Marek STENCEL**

Dyplom magistra inżyniera uzyskał w 1990 roku na Wydziale Elektrycznym AGH. Od 1992 r. jest pracownikiem Katedry Metrologii AGH, gdzie w 1998 r. uzyskał stopień doktora. Zajmuje się cyfrowymi systemami pomiarowymi, techniką mikroprocesorową i DSP. Autor szeregu prac teoretycznych i wdrożeniowych dotyczących pomiarów ruchu drogowego.



e-mail: masten@agh.edu.pl

**mgr inż. Dominik OSIŃSKI**

Dyplom magistra inżyniera uzyskał w 2006 roku na Wydziale Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki AGH. Aktualnie jest doktorantem w Zakładzie Informatyki Przemysłowej na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z tworzeniem endoprotez metodami implantacji jonowej.



e-mail: dosin@agh.edu.pl

**Streszczenie**

Przewodność cieplna metalu jest jednym z ważniejszych parametrów określających jego właściwości metalurgiczne. W pracy przedstawiono automatyczny system pomiaru przewodności cieplnej metali. W systemie wykorzystano oryginalną [2], niestacjonarną metodę pomiaru przewodności cieplnej. Wymuszenie sygnału temperatury w próbce dokonywane jest za pomocą lampy łukowej o regulowanej mocy oraz zespołu luster. Pomiar temperatury na podstawie którego dokonuje się wyznaczenia wartości przewodności cieplnej dokonywany jest za pomocą termopar typu K. Poza wymienionymi elementami system pomiarowy zawiera układ kondycjonowania i transmisji danych firmy National Instruments. W pracy przedstawiono także wyniki eksperymentów pomiarowych potwierdzające poprawną pracę systemu.

**Słowa kluczowe:** przewodność cieplna, przyrząd wirtualny, system pomiarowy

**Thermal conductivity measurement system****Abstract**

Thermal conductivity of metal is one of the most significant parameters characterizing its metallurgical properties. The paper describes automatic measurement system destined to thermal conductivity measurements. Such system implements a new original nonstationary method of conductivity determination. The system consists of thermocouple type K, conditioning and transmitting modules: FP-TC 120 and FP 1000 series FieldPoint of National Instruments. It was integrated by LabView environment of NI. Apart of description of system the paper includes results of its test and measurement experiments.

**Keywords:** thermal conductivity, virtual instrument, measurement system

**1. Wstęp**

Wyznaczanie przewodności cieplnej należy do zagadnień odwrotnych przewodzenia ciepła. Zapis matematyczny tych zagadnień posiada cechę złego uwarunkowania. Oznacza to, że małe błędy danych wejściowych mogą generować duże niedokładności wyników obliczeń. Zaproponowany sposób obliczeń przewodności cieplnej pozwala na uniknięcie skomplikowanych procedur rozwiązywania równania Fouriera-Kirchoffa. W celu pomiaru przewodności cieplnej zbudowano i przetestowano wirtualny system pomiarowy wykorzystujący komponenty sprzętowe firmy National Instruments oraz oprogramowanie integracyjne LabView tej samej firmy.

W systemie zaimplementowano dwie metody służące wyznaczaniu przewodności cieplnej: metodę różnicową oraz metodę aproksymacji wielomianowej. Zaletą wykorzystanych metod jest możliwość wyznaczenia charakterystyki przewodności cieplnej dla szerokiego przedziału temperatury już po przeprowadzeniu pojedynczego eksperymentu pomiarowego.

Do testów wykorzystano dane zebrane podczas eksperymentów pomiarowych przeprowadzonych na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH.

Wykonano pomiary pola temperatury walcowej próbki o znanej charakterystyce przewodności cieplnej w funkcji temperatury. Na podstawie wyników pomiarów zbudowany system wyznacza zależność współczynnika przewodności cieplnej w funkcji temperatury. Otrzymane wyniki porównano z charakterystyką wzorca. Zbadano wpływ zmiany parametrów algorytmów na dokładność wyznaczania przewodności cieplnej.

Zrealizowany wirtualny przyrząd pomiarowy umożliwia wykonanie pomiarów jak też symulacji eksperymentu pomiarowego z wykorzystaniem zapisanych wcześniej danych. Pozwala na obserwację przebiegów temperatury, pochodnej temperatury po czasie oraz umożliwia użytkownikowi łatwe wprowadzanie danych termofizycznych badanego ciała. Przyrząd ten posiada także opcje zapisu zmierzonych danych do pliku tekstowego lub w formacie zgodnym z arkuszem kalkulacyjnym Excel.

**2. Metody pomiaru przewodności cieplnej**

Metody pomiaru przewodności cieplnej można najogólniej podzielić na metody stacjonarne i niestacjonarne. Do oznaczania przewodności cieplnej wykorzystuje się rozwiązanie równania przewodzenia ciepła, przy czym dla metod stacjonarnych przyjmuje się warunek:  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ .

Metody stacjonarne wyróżniają się niezmiennością pola temperatury w badanej próbce. Metody te pozwalają na bezpośrednie wyznaczenie współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$ . Wyróżnić można metody stacjonarne porównawcze, oraz absolutne.

Pierwsze z tych metod potrzebują wzorca o znanej przewodności cieplnej. Takimi wzorcami dla ciał stałych są np. żelazo elektrolityczne i grafit. Metody absolutne wymagają znajomości gęstości strumienia ciepła przepływającego przez próbkę. Metody pomiaru przewodności cieplnej można także podzielić ze względu na sposób nagrzewania badanego

materiału na metody z: nagrzewaniem zewnętrznym oraz wewnętrznym gdy nagrzewanie próbki zachodzi w wyniku przepływu prądu elektrycznego.

Kryterium podziału może być także rodzaj występujących pól temperatury w badanej próbce. Możemy je podzielić na pola o izotermach: płaskich, promieniowych lub kulistych. Wymienione rodzaje izoterm są izotermami teoretycznymi. Wystąpienie tego rodzaju izoterm w rzeczywistości wymaga spełnienia założenia o jednokierunkowości przepływu ciepła. Obliczanie przewodności cieplnej za pomocą wymienionych wyżej metod odbywa się poprzez wyznaczenie strumienia cieplnego oraz pomiar odległości pomiędzy umieszczonymi w próbce czujnikami temperatury i odpowiadających im temperatur.

Osobną grupę stanowią metody pomiaru przewodności cieplnej, w których źródłem ciepła jest przepływający przez próbkę prąd elektryczny. Przy zastosowaniu tych metod pole temperatury nie musi być jednowymiarowe, jak w omówionych uprzednio przypadkach. Przewodność cieplną wyznacza się z rozwiązań analitycznych stacjonarnego równania przewodzenia ciepła dla ciała ogrzewanego elektrycznie. Ze względu na nazwiska badaczy, którzy je opracowali wyróżnia się metody [1]: Kolrauscha, Worthinga oraz Callendar.

Metody niestacjonarne nazywane są metodami pośrednimi. Korzystając z równania:

$$\frac{dT}{dt} = a \nabla^2 T \quad (2.1)$$

można wyznaczyć dyfuzyjność cieplną  $a$  która określa zdolność ciała do przewodzenia ciepła w warunkach niestacjonarnych. Następnie można wyznaczyć przewodność cieplną:

$$\lambda = a \cdot \rho \cdot c_p \quad (2.2)$$

gdzie:  $c_p$  – ciepło właściwe,  $\rho$  – gęstość.

Do metod niestacjonarnych pomiaru przewodności cieplnej zalicza się metody:

- impulsową [3].
- skoku jednostkowego [4].
- „gorącego drutu” (THW) [5].
- „gorącej taśmy” (THS) [6].
- fal cieplnych.

## 2.1 Metoda zaimplementowana w systemie

Do obliczeń przewodności cieplnej w opisywanym systemie wykorzystano oryginalne wyniki pracy [2] gdzie wykorzystano równanie Fouriera-Kirchoffa. Przy założeniu, że ciało pozostaje w spoczynku, przepływ ciepła występuje tylko w kierunku osi  $z$  oraz w układzie nie występują wewnętrzne źródła ciepła równanie stanowiące podstawę obliczeń przewodności cieplnej przybiera postać:

$$\lambda = \rho c_p \frac{\frac{\partial T}{\partial t}}{\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}} \quad (2.3)$$

Powyższe równanie opisuje przepływ ciepła w ciele półnieskończonym, którego przybliżeniem może być długi walec o izolowanej poboczniczy. Wymóg jednokierunkowego przepływu ciepła realizuje się za pomocą nagrzewania walcowej próbki przez jedną z powierzchni czołowych. W systemie obliczenie przewodności cieplnej nie polegało na rozwiązaniu powyższego równania i wyznaczeniu pola temperatury jak ma to miejsce w odwrotnych zagadnieniach przewodzenia ciepła. Przewodność cieplną wyznacza się poprzez numeryczne obliczenie odpowiednich pochodnych oraz wartości ciepła właściwego w funkcji temperatury. Sformułowanie problemu wyznaczenia przewodności cieplnej w ten sposób uwalnia od

znużających obliczeń rozwiązania równania różniczkowego (2.3) oraz od problemów z określeniem warunków jednoznaczności rozwiązania równania przewodzenia ciepła. Zaletą powyższej metody jest możliwość wyznaczenia przewodności cieplnej ciała w szerokim zakresie temperatury po przeprowadzeniu jednego eksperymentu pomiarowego. Obliczenia przewodności cieplnej przeprowadza się przyjmując następujące założenia dotyczące własności termofizycznych ciała:

- ciepło właściwe  $c_p$  jest opisane wielomianem drugiego stopnia w funkcji temperatury,

$$c_p(T) = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 \quad (2.4)$$

- gęstość  $\rho$  jest niezależna od temperatury.

$$\rho(T) = c \quad (2.5)$$

Podstawą zbudowania modelu numerycznego jest równanie (2.3). Głównym problemem wyznaczenia przewodności cieplnej było obliczenie pochodnych występujących w tym równaniu. Pochodne wyznaczono na dwa sposoby:

- metodą różnicową – stosując iloraz różnicowy wprzód,
- metodą regresji wielomianowej – wyznaczając na podstawie danych pomiarowych przybliżoną funkcję analityczną opisującą zmiany temperatury, a następnie analitycznie obliczając jej pochodne.

Zastosowana metoda różnicowa polega na numerycznym obliczeniu pochodnej za pomocą ilorazu różnicowego wprzód. Pochodną temperatury po czasie obliczono korzystając z wzoru:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(t_i) = \frac{T(t_{i+1}) - T(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (2.6)$$

Pamiętać należy, że iloraz różnicowy wprzód daje dokładną wartość pochodnej jedynie dla wielomianu stopnia pierwszego. Podobnym sposobem obliczono drugą pochodną temperatury po współrzędnej przestrzennej. Obliczenia dokonano w oparciu o wzór:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}(z_2) = \frac{\frac{T(z_2) - T(z_1)}{z_2 - z_1} - \frac{T(z_3) - T(z_2)}{z_3 - z_2}}{z_2 - z_1} \quad (2.7)$$

gdzie:

$z_1, z_2, z_3$  - odległości punktów pomiaru temperatury od

brzegu próbki.

$T(z_1), T(z_2), T(z_3)$  - temperatury w punktach  $z_1, z_2, z_3$ ,

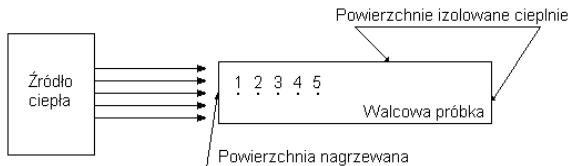
W prezentowanym systemie do obliczania pochodnych metodą ilorazową wykorzystano ulepszoną na jego potrzeby wersję funkcji bibliotecznej Derivative x(t) pakietu LabView. Wadą funkcji oryginalnej jest fakt, że do wyznaczenia pochodnej potrzeba argumentów funkcji równo od siebie odległych. W wersji adaptowanej zmienne wejściowe tej funkcji stanowią dwa wektory danych. Wektor argumentów funkcji X i wektor, odpowiadających im, wartości funkcji Y.

## 3. Stanowisko pomiarowe

Głównym założeniem dotyczącym stanowiska pomiarowego jest warunek jednokierunkowości przepływu ciepła. We współrzędnych cylindrycznych może to być przepływ w kierunku osi walca. Należy zminimalizować przepływ ciepła w pozostałych kierunkach. Realizuje się to poprzez stosowanie izolacji cieplnych oraz zmniejszenie czasu wykonywania eksperymentu. Skrócenie czasu wykonywania eksperymentu skutkuje dużymi wartościami przepływu ciepła ze źródła do walcowej próbki. Pomiarów temperatury powinno dokonywać się w osi próbki.

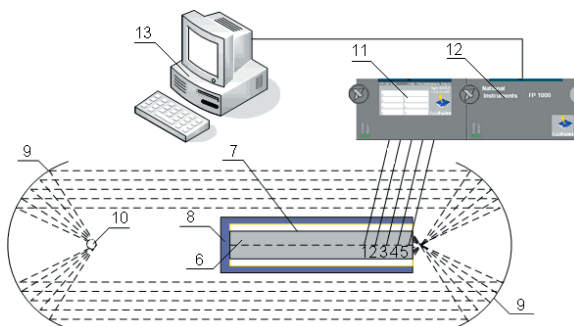
Stanowisko pomiarowe składa się z walcowej próbki o promieniu 4 mm i długości ok. 50 mm. W próbce w równych odległościach od siebie nawiercone zostały otwory średnicy 0,5 mm, w których umieszczono czujniki termoelektryczne. Każdy

następny otwór jest obrócony o  $60^\circ$  w płaszczyźnie prostopadłej do osi próbki względem poprzedniego otworu. Takie rozmieszczenie ma na celu minimalizację wpływu czujników na zakłócenie pola temperatury w próbce. W otworach umieszczono termoelementy płaszczonego typu K o średnicy zewnętrznej płaszcza 0,5 mm. Próbkę z czujnikami umieszczono w kwarcowej rurze pokrytej obustronnie złotem, zaizolowanej na zewnątrz kilkumilimetrową warstwą z włóknistego materiału izolacyjnego. Próbka jest także izolowana na nieogrzewanej powierzchni tylnej.



Rys. 3.1 Schemat stanowiska do wyznaczania pola temperatury w nagrzewanej próbce. 1, 2, 3, 4, 5 numery punktów pomiaru temperatury  
Fig. 3.1 Scheme of measurement system; 1, 2, 3, 4, 5 point of temperature measurement

Źródło ciepła stanowi lampa łukowa o regulowanej mocy, której promieniowanie kierowane jest za pomocą dwóch zwierciadeł na powierzchnię czołową próbki. Położenie próbki względem zwierciadła reguluje się tak, by natężenie promieniowania było równomiernie rozłożone na nagrzewanej powierzchni. Regulowana moc lampy łukowej pozwala na takie dostosowanie prędkości nagrzewania płyty czołowej próbki, aby nie następowało jej nadtopienie [2]. Jako układu kondycjonowania i akwizycji danych użyto modułu pomiarowego firmy National Instruments FP-TC 120 współpracującego z modułem komunikacyjnym FP-1000 służącym do komunikacji z komputerem PC.



Rys 3.2. Schemat stanowiska do pomiaru przewodności cieplnej. 1, 2, 3, 4, 5 – termoelementy, 6 – badana próbka, 7 – kwarcowa rura pokryta złotem, 8 – izolacja z safitu, 9 – zwierciadła, 10 – radiacyjne źródło ciepła, 11 – moduł pomiarowy FP-TC 120, 12 – moduł komunikacyjny FP 1000, 13 – komputer PC  
Fig. 3.2 Scheme of measurement system 1, 2, 3, 4, 5 – thermoelements, 6 – tested sample, 7 – pipe of quartz, 8 – isolation, 9 – mirrors, 10 – source of heat, 11, 12 – measurement system, 13 – PC computer

## 4. Program obsługi eksperymentu pomiaru przewodności cieplnej

Program realizujący obliczanie przewodności cieplnej pozwala na prowadzenie obliczeń zarówno na podstawie danych otrzymanych bezpośrednio z eksperymentu pomiarowego jak i na korzystanie z danych uprzednio zapisanych do programu Excel.

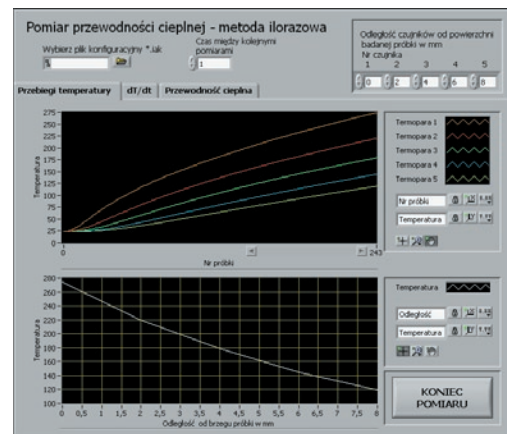
Po uruchomieniu programu użytkownik ma możliwość wyboru trybu pracy programu obliczeniowego. Może także dokonać wyboru sposobu wyznaczenia przewodności cieplnej. Przewodność cieplna, zależnie od wyboru trybu pracy programu, obliczana jest metodą ilorazową lub metodą aproksymacji wielomianowej. W każdym przypadku, po zakończeniu pomiarów lub wczytywania danych z pliku użytkownik ma możliwość wprowadzenia parametrów wielomianu określającego zależność ciepła właściwego od

temperatury, oraz wartość gęstości badanego ciała. Niezależnie od wyboru trybu pracy programu należy wprowadzić dane dotyczące odległości czujników termoelektrycznych od nagrzewanej powierzchni próbki.

### 4.1 Interfejs pomiarowy

Interfejs programu służącego do obliczania przewodności cieplnej na podstawie bezpośrednio zmierzonych danych tylko nieznacznie różni się od interfejsu programu korzystającego z danych zapisanych uprzednio w pliku arkusza kalkulacyjnego. Zamiast ścieżki dostępu do pliku Excela znajduje się w nim ścieżka dostępu do pliku konfiguracyjnego \*.iak oraz kontrolka pozwalająca na określenie czasu pomiędzy kolejnymi pomiarami (rys. 4.1).

Po zakończeniu obliczania przewodności cieplnej użytkownik może zapisać dane pomiarowe w pliku tekstowym lub w pliku programu Excel. Dane zapisane w pliku arkusza kalkulacyjnego są tak sformatowane, by przy ich użyciu można było wykonywać powtórne obliczenia przewodności cieplnej dla innych parametrów obliczeniowych.



Rys. 4.1 Interfejs programu pomiarowego.  
Fig. 4.1 Program's interface

Po wybraniu opcji *symulacja eksperymentu*, użytkownik może dokonać obliczeń korzystając z zapisanego wcześniej pliku z danymi w formacie Excel [8]. Zależnie od wyboru trybu pracy programu przewodność cieplna może być obliczona przy wykorzystaniu zgromadzonych danych metodą ilorazową lub metodą aproksymacji wielomianowej.

Podprogram służący do wyznaczenia przewodności cieplnej posiada kilka przełączanych paneli. Na pierwszym z nich tworzone są wykresy przebiegów temperatury w czasie oraz zmian temperatury w punktach pomiarowych. Wykresy posiadają własne menu, możliwość powiększenia lub skalowania przebiegów. Po przełączeniu panelu na zakładkę „dT/dt” użytkownik może prześledzić krzywą temperatury oraz jej pochodną na tym samym wykresie posiadającym różne skale.

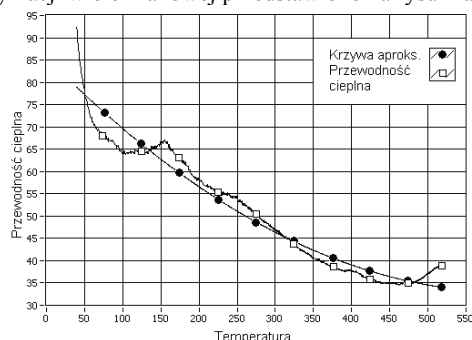
Trzeci panel przedstawia wyniki obliczeń przewodności cieplnej oraz równanie aproksymujące funkcję współczynnika przewodności cieplnej. Wyświetlany jest także błąd średniokwadratowy pomiędzy danymi obliczonymi a wielomianem aproksymującym. Po zmianie wartości rzędu wielomianu aproksymującego można zaobserwować zmianę charakterystyki przewodności cieplnej.

## 5. Wyniki eksperymentów

W celu określenia dokładności pomiarów i obliczeń wykonano badania materiału o znanej przewodności cieplnej. Wzorzec stanowiły próbki walcowe o średnicy 4mm i długości 50mm wykonane z żelaza elektrolitycznego SRM 8420

wyprodukowanego przez Dział Technologiczny Narodowego Instytutu Standardów i Technologii (Technology Services of the National Institute of Standards and Technology), Gaithersburg, USA [7]. Prostopadle do osi próbki nawiercono otwory, w których umieszczono czujniki termoelektryczne typu K. Odległość pomiędzy osiami nawierconych otworów była stała i wynosiła 2 mm [2]. Do obliczeń przewodności cieplnej przyjęto założenia że ciepło właściwe próbki jest opisane równaniem drugiego rzędu (wzór 2.4) oraz jej gęstość nie zależy od temperatury (wzór 2.5). Na podstawie [7] wyznaczono, użyte we wzorach 2.4 i 2.5 parametry termofizyczne badanego materiału, które wynosiły:  $b_0 = 443.45$ ,  $b_1 = 389.61$ ,  $b_2 = 195.95$ ,  $\rho = 7350$ . Przewodność cieplną żelaza elektrolitycznego wyznaczono wykorzystując metodę ilorazową oraz metodę aproksymacji wielomianowej.

Wynik obliczenia przewodności cieplnej metodą aproksymacji wielomianowej przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1 Przewodność cieplna żelaza elektrolitycznego obliczona za pomocą metody aproksymacji wielomianowej.  
Fig. 5.1 Thermal conductance of iron by fitting method

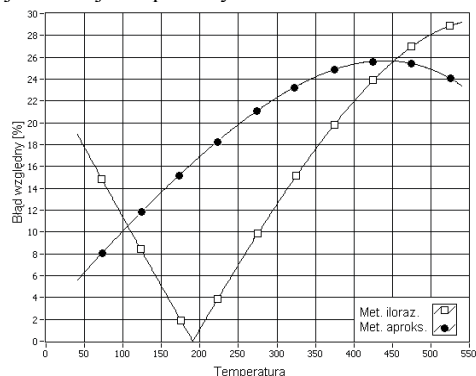
Równanie aproksymujące powyższą krzywą jest wielomianem drugiego stopnia postaci:

$$y = 77,97 - 150,58 \cdot 10^{-3} T + 122,53 \cdot 10^{-6} T^2$$

Dokonano także porównania obydwu metod obliczania przewodności cieplnej z krzywą odniesienia wyznaczoną na podstawie [7] w zakresie temperatury od  $-23^{\circ}\text{C}$  do  $727^{\circ}\text{C}$ . Zakładając, że przewodność cieplna żelaza elektrolitycznego w podanym wyżej zakresie temperatur jest wielomianem drugiego stopnia otrzymano równanie aproksymowanej krzywej postaci:

$$\lambda(T) = 78,915 - 89,64 \cdot 10^{-3} T + 36,738 \cdot 10^{-6} T^2$$

Raport [7] szacuje dokładność wyznaczenia przewodności cieplnej w badaniach wzorca na 3%. Moduł błędu, wyznaczonej proponowaną metodą, przewodności cieplnej nie przekroczył 26% dla metody aproksymacyjnej oraz 30% dla metody ilorazowej (rys. 5.2). Przy wyznaczaniu błędu założono, że krzywa odniesienia dokładnie opisuje zależność przewodności cieplnej w funkcji temperatury.



Rys. 5.2 Względny błąd wyznaczenia przewodności cieplnej  
Fig. 5.2 Relative error of thermal conductance determination

Wpływ na błędy oznaczania przewodności cieplnej mają błędy założonego modelu zjawiska:

- brak uwzględnienia wymiany ciepła pomiędzy izolowanymi cieplnie powierzchniami bocznymi próbki,
  - błąd oszacowania ciepła właściwego materiału,
  - błąd oszacowania gęstości próbki,
  - błędy generowane przez algorytm obliczeniowy,
  - dobór rzędu wielomianu aproksymacyjnego.
- Pełna analiza błędów znajduje się w pracy [8].

## 6. Podsumowanie

Opisane w pracy stanowisko pomiarowe oraz wykonane eksperymenty spełniają wszystkie postawione na wstępie cele, którymi były:

- opracowanie algorytmów obliczania przewodności cieplnej,
- zbudowanie wirtualnego przyrządu pomiarowego realizującego pomiar przewodności cieplnej
- wzajemne porównanie zaimplementowanych algorytmów wyznaczania przewodności cieplnej,
- wyznaczenie błędów zbudowanego systemu.

Opracowane algorytmy zaimplementowano za pomocą środowiska LabVIEW. Błędy wyznaczania przewodności cieplnej dla optymalnego doboru współczynników algorytmu mieszczą się w granicach 25%. Warto wspomnieć, że tak duża wartość błędu występuje dla temperatur rzędu  $450^{\circ}\text{C}$ . Jest to wartość satysfakcjonująca biorąc po uwagę fakt że podobną wartość notują prace autorów zagranicznych, co potwierdza poprawność stosowanych metod i rozwiązań technicznych. Zaletą wykorzystanych algorytmów jest możliwość wyznaczenia charakterystyki przewodności cieplnej badanego materiału po wykonaniu pojedynczego eksperymentu pomiarowego.

Zbudowany wirtualny przyrząd pomiarowy jest narzędziem umożliwiającym sprawny pomiar temperatury, wizualizację jej przebiegów, wyznaczenie funkcji przewodności cieplnej jedną z wybranych metod oraz zapis zmierzonych danych. Przyrząd posiada opcję obliczania przewodności cieplnej przy wykorzystaniu zapisanych wcześniej danych. Umożliwia to zmianę parametrów algorytmu obliczeniowego bez konieczności wykonywania kolejnych pomiarów.

## 7. Literatura

- [1] Flynn D.R.: *Measurements of the Thermal Conductivity by Steady-State Method in which the Sample is Heated Directly by Passage of an Electric Current*. Thermal Conductivity, Tye R.P., vol. 1, London, N.York, Academic Press 1969
- [2] Telejko T. *Oznaczanie przewodności cieplnej ciała stałego z wykorzystaniem rozwiązania zagadnienia odwrotnego przewodzenia ciepła*. Kraków, Wydawnictwa AGH 2005
- [3] Carslaw H. S., Jaeger J. C.: *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford, Oxford University Press 1959
- [4] Kubciar L.: *Pulse method of measuring thermophysical parameters*. High Temperatures-High Pressures, vol 23, 1991
- [5] Knibbe P.G.: *An accurate instrument for fast thermal-conductivity and thermal diffusivity measurements at elevated temperatures and pressures*. Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 20 No.6, 1987
- [6] Sabuga W., Hammerschmidt U.: *A new method for the evaluation of thermal conductivity and thermal diffusivity from transient hot strip measurements*. International Journal of Thermophysics, vol.16, No. 2, 1995
- [7] Hust J.G., Lankford A.B.: *Report of Investigation Research Materials 8420 and 8421*. National Bureau of Standards, Gaithersburg, May 1984
- [8] Osiński D. *Wirtualny przyrząd pomiarowy wykorzystujący pakiet oprogramowania LabView* Praca magisterska 2006 Katedra Metrologii AGH

Artykuł recenzowany