

Koncepcja i realizacja oprogramowania stanowiska do wyznaczania przewodności cieplnej materiałów termoprzewodzących

Concept and software implementation of a station for determining the thermal conductivity of thermally conductive materials

Streszczenie. W artykule opisano koncepcję i realizację oprogramowania stanowiska do wyznaczania przewodności cieplnej materiałów termoprzewodzących. Oprogramowanie to wykorzystywane jest na stanowisku opracowanym i skonstruowanym w Katedrze Techniki Ciepłej Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki. Stanowisko spełnia wymagania normy ASTM D5470. Z przeprowadzonych badań wynika, że umożliwia ono w obecnej formie poprawny pomiar przewodności cieplnej w zakresie do co najmniej 100 W/mK. W artykule zwięźle opisano metodę pomiaru, dla zrozumienia problemu, przy czym głównym celem jest omówienie systemu pomiarowo-sterującego oraz jego oprogramowania.

Abstract. The article describes the concept and implementation of the software for the station for determining the thermal conductivity of thermally conductive materials. This software is used in the station developed and constructed in the Department of Thermal Technology of the Faculty of Environmental and Energy Engineering. The stand meets the requirements of the ASTM D5470 standard. The tests carried out show that in the current form it enables correct measurement of thermal conductivity in the range of at least 100 W/mK. The article briefly describes the measurement method to understand the problem, but the main goal is to discuss the measurement and control system and the software.

Słowa kluczowe: przewodność cieplna, norma ASTM D5470, LabVIEW, CompactRIO.

Keywords: thermal conductivity, ASTM D5470 standard, LabVIEW, CompactRIO.

Wstęp

Szybko postępująca miniaturyzacja w ostatnich 20 latach w elektronice użytkowej (komputery, telefony komórkowe, kamery cyfrowe i wiele innych) oraz szybki wzrost wydajności spowodowały istotne problemy związane z chłodzeniem układów scalonych. Aby możliwym było odprowadzenie nadmiernych ilości ciepła stosuje się materiały termoprzewodzące w postaci past, padów, klei, taśm itd., będących najczęściej rodzajami kompozytów składających się z substancji nośnej, której przewodność cieplna jest zazwyczaj niska oraz wypełniacza o wysokiej przewodności cieplnej. Typowo do pomiaru przewodności cieplnej materiałów inżynierskich stosowane są metody wykorzystujące w swej zasadzie ustalony [1] lub nieustalony przepływ ciepła [2]. Podstawową zaletą metod bazujących na analizie nieustalonego przepływu ciepła jest krótki czas potrzebny na wykonanie pomiaru, ale warunki pomiarowe nie są zgodne z rzeczywistymi warunkami pracy materiałów termoprzewodzących, stąd do badań tych materiałów typowo wykorzystuje się metody bazujące na pomiarze ustalonego przepływu ciepła [3].

W Katedrze Techniki Ciepłej Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki opracowano stanowisko do wyznaczania przewodności cieplnej materiałów termoprzewodzących, spełniające wymagania normy ASTM D5470 [4]. Z przeprowadzonych badań wynika, że umożliwia ono poprawny pomiar przewodności cieplnej w zakresie do co najmniej 100 W/mK. Stanowisko zostało wyposażone w szereg elementów i czujników umożliwiających automatyzację pomiarów. Głównym elementem systemu kontrolno-pomiarowego jest urządzenie cRIO (CompactRIO) firmy National Instruments (NI), oprogramowane w LabVIEW. Urządzenie cRIO wykorzystywane jest przede wszystkim do rejestracji rozkładu temperatury wzdłuż bloków pomiarowych HFM (ang. Heat Flow Meter), o znanej wartości przewodności cieplnej, z których jeden jest nagrzewany a drugi chłodzony. Pomiedzy tymi blokami umieszczana jest próbka do badań, dla której wyznacza się współczynnik przewodzenia ciepła, poprzez analizę gradientu temperatury wzdłuż bloków.

Ponadto, z wykorzystaniem cRIO realizowane jest sterowanie przemieszczeniem i stabilizacja temperatury bloków HFM, sterowanie i pomiar siły nacisku na próbkę oraz pomiar jej grubości.

W artykule zwięźle opisano metodę pomiaru, dla zrozumienia problemu, ale głównym celem jest omówienie systemu pomiarowo-sterującego oraz jego oprogramowania.

Metoda wyznaczania przewodności cieplnej

Jedną z częściej stosowanych metod wyznaczania przewodności cieplnej materiałów termoprzewodzących jest metoda przedstawiona w normie ASTM-D5470 [4]. Metoda bazuje na pomiarze kontaktowego oporu przepływu ciepła oraz przewodności cieplnej materiałów termoprzewodzących o wartości współczynnika przewodzenia ciepła w zakresie od 0,1 do 10 W/mK.

Metoda polega na rejestracji spadku temperatury w warstwie badanego materiału, umieszczonego pomiędzy dwoma blokami HFM (Heat Flow Meter – blok pozwalający w dokładny sposób określić strumień ciepła przepływający przez badaną próbkę), wykonanymi z materiału o znanym i wysokim współczynniku przewodzenia ciepła. Bloki mogą mieć przekrój okrągły lub prostokątny. W przypadku omawianego stanowiska mają kształt prostopadłościanów o przekroju kwadratowym.

Na długości obu bloków znajdują się otwory, w których umieszczone są termoelementy typu T. Nagrzewanie górnego bloku oraz chłodzenie dolnego odbywa się w taki sposób, aby rozkład temperatury w blokach oraz badanej próbce był jednowymiarowy i ustalony w czasie. Pozwala to na określenie gradientu temperatury wzdłuż długości bloków, a co za tym idzie, gęstości strumienia ciepła przepływającego przez bloki oraz badaną próbkę.

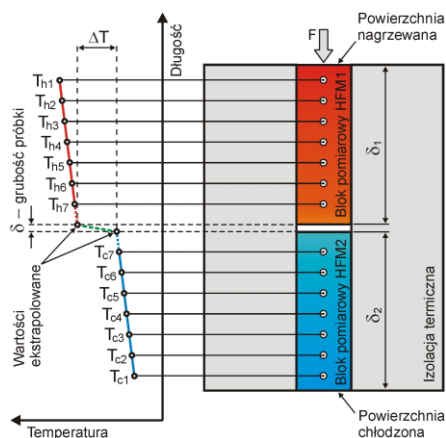
W czasie pomiaru rejestrowane są wartości temperatury wzdłuż długości boków oraz mierzona jest grubość badanej próbki, umieszczonej pomiędzy blokami. Na podstawie wartości tych wielkości jak i znanej wartości przewodności cieplnej bloków HFM wyznaczone są:

- gęstość strumienia ciepła przepływającego przez bloki oraz badaną próbkę,
- spadek temperatury wzdłuż grubości próbki,
- zastępczy opór przepływu ciepła,
- efektywny współczynnik przewodzenia ciepła materiału próbki,
- kontaktowy opór przepływu ciepła na granicy pomiędzy badaną próbką a blokiem HFM.

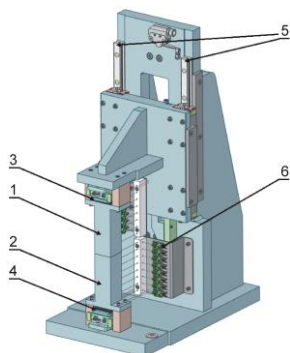
Omawianą metodę w postaci schematu pokazano na rysunku 1. Dokładny opis metody oraz stanowiska pomiarowego znaleźć można w [5, 6]. Na rysunku 2 pokazano model trójwymiarowy stanowiska badawczego opracowanego w Katedrze Techniki Ciepłej. Stanowisko zaprojektowano zgodnie z ogólnymi wytycznymi przedstawionymi w normie ASTM-D5470 i w literaturze [7, 8]. Rozwiązanie jest chronione patentem PL 238631 B1.

Element chłodzący dolny blok HFM (rysunek 2) jest przymocowany do podstawy urządzenia, natomiast element grzejący górny blok HFM znajduje się na ruchomej platformie z przewodnicami liniowymi, co pozwala na rozsuwanie bloków. W celu kontroli siły ściskającej, platforma została wyposażona w dwa tensometry, a szerokość szczeliny między blokami mierzona jest z wykorzystaniem liniowego enkodera absolutnego.

Pozycja ruchomej platformy kontrolowana jest przez śrubę pociągową i sprężynę, pełniącą rolę sprzęgła, które pozwala na precyzyjne dostosowanie siły ściskania badanej próbki. Śruba napędzana jest przez silnik krokowy poprzez dedykowany do niego sterownik.



Rys. 1. Schemat pomiaru rozkładu temperatury wzdłuż bloków



Rys. 2. Trójwymiarowy model urządzenia (widok z przodu).
1 – górny blok HFM, 2 – dolny blok HFM, 3 – górne (grzejące) ogniwo Peltiera, 4 – dolne (chłodzące) ogniwo Peltiera, 5 – przewodnice liniowe, 6 – termoelementy do rejestracji rozkładu temperatury w blokach HFM

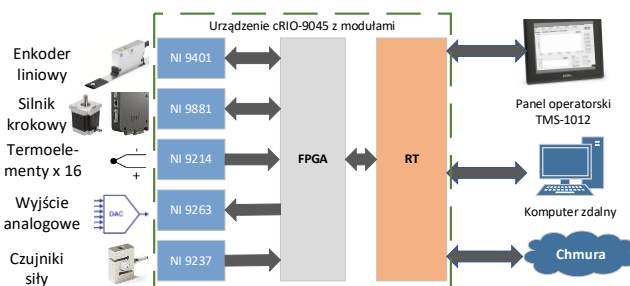
System pomiarowo-sterujący

Głównym elementem systemu pomiarowo-sterującego jest urządzenie cRIO-9045 firmy NI, oprogramowane z wykorzystaniem środowiska programowania LabVIEW. Urządzenie wyposażone jest w procesor Intel Atom o częstotliwości taktowania 1,3 GHz, 2 GB pamięci RAM, wbudowany dysk o pojemności 4 GB oraz układ FPGA Kintex-7 70T. W urządzeniu można zainstalować do 8 modułów wejścia-wyjścia, mogą to być wejścia/wyjścia analogowe, cyfrowe i układy kondycjonowania sygnałów do czujników pomiarowych.

Założenia co do systemu były następujące:

- sterowanie przemieszczeniem i stabilizacja temperatury bloków HFM,
- kontrola siły nacisku na próbkę,
- pomiar grubości próbki,
- rejestracja, wizualizacja i archiwizacja danych,
- wyliczanie przewodności cieplnej próbki.

Do każdego z tych zadań wybrano odpowiednie moduły. Na rysunku 3, w postaci schematu blokowego, przedstawiono opracowany system pomiarowo-sterujący.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu pomiarowego

Urządzenie cRIO-9045, bazujące na procesorze x64 oraz systemie czasu rzeczywistego Linux RT, umożliwia zaimplementowanie interfejsu użytkownika bezpośrednio w nim.

Oprogramowanie

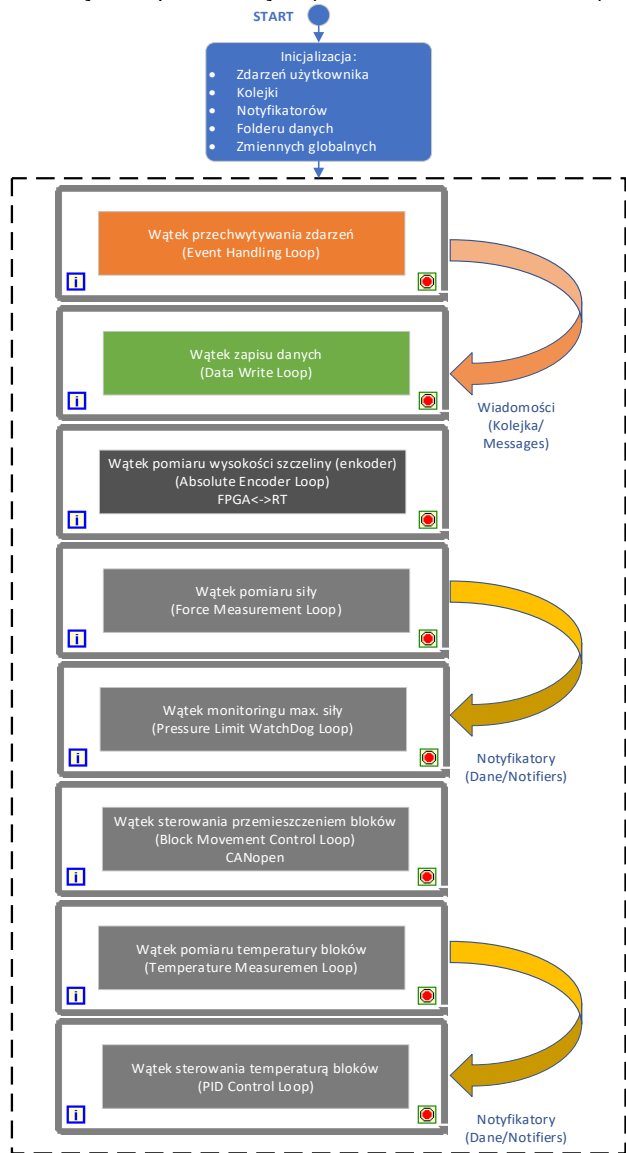
Oprogramowanie napisane zostało w całości w środowisku programowania LabVIEW. Architektura oprogramowania pokazano na rysunku 4. Po uruchomieniu inicjalizowane są:

- Zdarzenia użytkownika, pozwalające na programowe wyzwolenie struktury Event w wątku przechwytywania zdarzeń (Event Handling Loop), z dowolnego miejsca kodu programu.
- Kolejka (Queue), która wykorzystywana jest do przesyłania wiadomości (zleceń) z wątku przechwytywania zdarzeń (Event Handling Loop) do wątku zapisu danych (Data Write Loop). Kolejka zapewnia buforowanie danych, zabezpieczając tym samym przed ich utratą.
- Notyfikatory (notifiers), wykorzystywane do przesyłania danych pomiędzy wątkiem pomiaru siły (Force Measurement Loop) a wątkiem monitorowania osiągnięcia maksymalnej dopuszczalnej siły (Pressure Limit WatchDog Loop) oraz do przesyłania danych z wątku pomiaru temperatury (Temperature Measurement Loop) do wątku sterowania temperaturą bloku (PID Control Loop). Notyfikatory nie buforują danych, a przesyłają najbardziej aktualne wartości. W wymienionych wątkach nie ma potrzeby buforowania danych.

- Sprawdzenie czy istnieje i ewentualne utworzenie folderu dla rejestrowanych danych (lokalizacja folderu C:\dane) na dysku urządzenia cRIO.
- Zmienne globalne. Zmienne te przechowują stałe, wykorzystywane w różnych wątkach programu.

Poza wspomnianymi wyżej kolejkami i notyfikatorami, dane pomiędzy wątkami przesyłane są z wykorzystaniem zmiennych lokalnych.

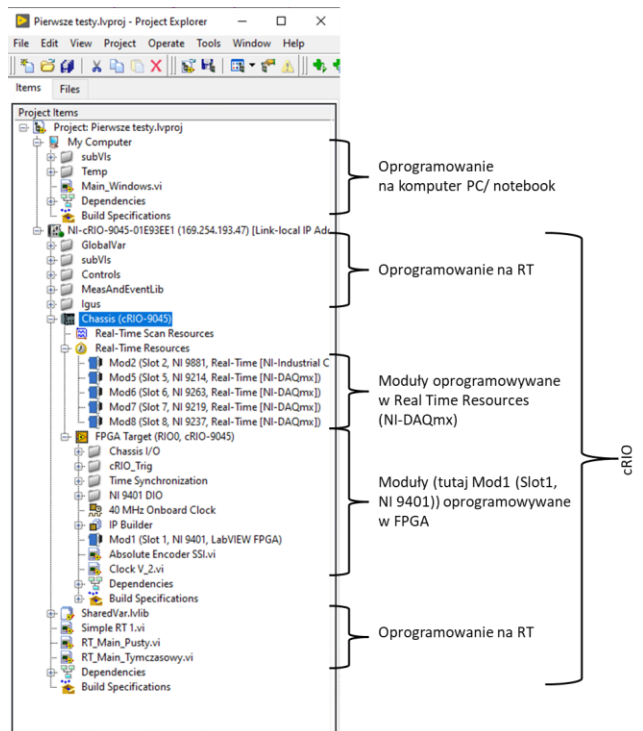
Oprócz zapisywania danych pomiarowych na wbudowanym w urządzenie cRIO dysku, są one również przesyłane do komputera PC z wykorzystaniem sieciowych zmiennych współdzielonych (Network Shared Variables).



Rys. 4. Architektura oprogramowania

Wybrano możliwie prostą architekturę i zdecydowano się na wykorzystanie funkcji Express w wątkach pomiaru temperatury oraz ciśnienia. Takie podejście daje możliwość dokonywania prostych zmian w kodzie programu jego użytkownikom, zaznajomionym z programowaniem w LabVIEW na podstawowym poziomie. Oprogramowanie realizowano z wykorzystaniem LabVIEW Project Explorera. Okno projektu pokazano na rysunku 5.

Aplikacja działająca na komputerze PC jest bardzo prosta i zapewnia zapisywanie aktualnych danych rejestrowanych na urządzeniu cRIO. Służy wyłącznie zabezpieczeniu danych na wypadek ich utraty na cRIO.



Rys. 5. Okno projektu LabVIEW Project explorer



Rys. 6. Fragment interfejsu użytkownika aplikacji

Niemal wszystkie moduły zainstalowane w cRIO skonfigurowane są do wykorzystania z biblioteką NI-DAQmx. Na rysunku 5 widać je umieszczone w sekcji Real-Time Resources. Wykorzystanie funkcji z biblioteki DAQmx, w tym wspomnianych wyżej funkcji Express, możliwe jest tylko w przypadku urządzeń serii cRIO-904x oraz cRIO-905x. Sekcję Real-Time oraz Real-Time Scan Resources umożliwiają oprogramowanie modułów bez konieczności tworzenia kodu na układ FPGA.

Jedynym modułem, który wymagał napisania kodu na układ FPGA jest NI-9401, moduł wejść/wyjść cyfrowych. Wykorzystywany jest do odczytu położenia bloków pomiarowych HFM, z wykorzystaniem absolutnego enkodera liniowego, tym samym realizowany jest w ten sposób pomiar grubości próbki. Komunikacja z enkoderem wymagała implementacji w układzie FPGA interfejsu SSI (Synchronous Serial Interface), w który wyposażony jest enkoder.

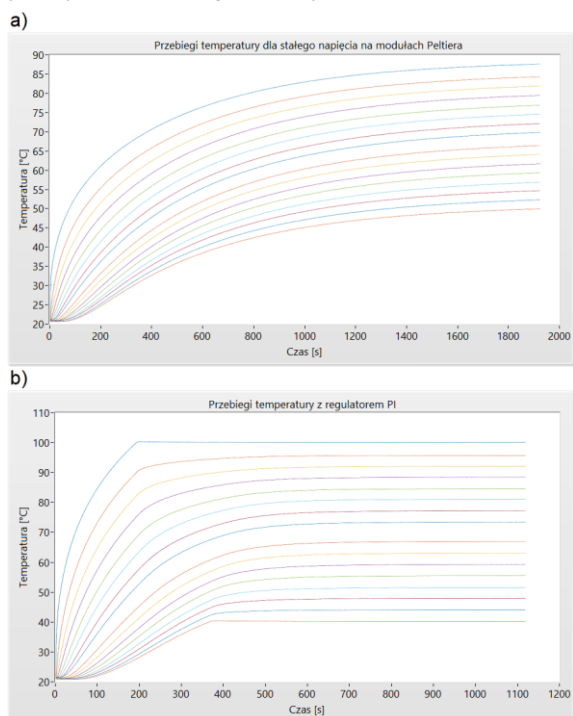
Prędkość przemieszczania bloków jest trzystopniowa i zależy od siły nacisku na próbkę, tj. dla pewnych zdefiniowanych wartości siły wywieranej na próbkę następuje zmniejszenie ich prędkości. Zapewnia to precyzyjne dozowanie siły docisku próbki przez bloki HFM.

Na rysunku 6 pokazano interfejs użytkownika aplikacji, na którym widać panel konfiguracyjny. Aplikacja została napisana na 12" panel dotykowy TMS-1012, który zabudowano w obudowie panelu sterującego stanowiskiem.

Panel dotykowy ma niewielką rozdzielczość: 1024x768 pikseli. Stanowi to dość poważny problem, przede wszystkim z uwagi na różnice w skalowaniu czcionek na interfejsie użytkownika – są istotne różnice w wyglądzie interfejsu w czasie jego tworzenia i edycji na ekranie komputera PC lub notebooka a uruchomionym na panelu dotykowym. Źródło tych różnic opisane jest w publikacji [9]. Przewiduje się rezygnację z panelu dotykowego na rzecz monitora o rozdzielczości Full HD.

Pomiary zapisywane są do pliku w formacie TDMS (ang. Technical Data Management Streaming) na urządzeniu cRIO. Oprogramowanie monitoruje zajętość wbudowanego dysku i informuje użytkownika o konieczności przeniesienia danych z cRIO na komputer PC. W krytycznym przypadku, kiedy pliki z danymi nie zostaną przeniesione, usuwane są najstarsze.

W ramach rozwoju oprogramowania stanowiska przewiduje się też umożliwienie dostępu zdalnego z wykorzystaniem usług sieciowych – Web Services [10]



Rys. 7. Przebiegi odpowiedzi temperaturowej bloków HFM na zadaną temperaturę: a) bez regulatora PID, b) z regulatorem PID

Sterowanie temperaturą bloków HFM

Jednym z zadań w ramach realizacji oprogramowania było zapewnienie szybkiej stabilizacji temperatury bloków HFM. Początkowo kontrola temperatury odbywała się przez ustawienie stałych napięć na elemencie grzewczym i chłodzącym. Takie podejście posiadało dwie wady:

- brak jednoznacznej zależności między napięciami zadanymi na elementach i wynikającymi z nich temperaturami,
- bardzo długi okres stabilizacji temperatury, w niektórych przypadkach przekraczający jedną godzinę.

Celem identyfikacji obiektu, zarejestrowano odpowiedzi temperaturowe bloków HFM na skokowe zmiany napięcia zasilania elementu grzewczego i chłodzącego. Pozwoliło to na stworzenie modelu sterowania temperaturą bloków. Model opracowano w środowisku Matlab Simulink. W oparciu o model dobrano parametry regulatora PID, który został następnie zaimplementowany w oprogramowaniu stanowiska. Przeprowadzone testy pokazały, że znacząco zmniejszył się czas stabilizacji temperatury bloków (zobrazowano to na rysunku 7, gdzie na rysunku 7a – bez regulacji PI, po niemal 33 minutach nie uzyskano jeszcze stanu ustalonego).

Podsumowanie

W pracy przedstawiono realizację oprogramowania stanowiska do pomiaru przewodności cieplnej materiałów termoprzewodzących. W zakres prac wchodziło również opracowanie programowego regulatora PI stabilizacji temperatury bloków HFM.

Sam czas stabilizacji temperatury bloków nie określa jeszcze momentu rozpoczęcia pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła. Głównym kryterium jego rozpoczęcia jest wyliczona różnica między strumieniami ciepła w obu blokach, która nie powinna przekraczać 1% wartości średniej strumieni. W praktyce, bez regulatora PID czas ten wynosił ponad godzinę, zaś z zaimplementowanym regulatorem wynosił około 35 minut.

Autorzy: dr inż. Roman Wyżgolik, Politechnika Śląska, Katedra Pomiarów i Systemów Sterowania, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: roman.wyzgolik@polsl.pl; inż. Krzysztof Spyra, Politechnika Śląska, Katedra Pomiarów i Systemów Sterowania, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice; dr hab. inż. Zbigniew Buliński, prof. Politechniki Śląskiej, Politechnika Śląska, Katedra Techniki Ciepłej, ul. Stanisława Konarskiego 22, 44-100 Gliwice, E-mail: zbigniew.bulinski@polsl.pl; dr inż. Sebastian Pawlak, Politechnika Śląska, Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, ul. Towarowa 7A, 44-100 Gliwice, Katedra Techniki Ciepłej, ul. Stanisława Konarskiego 22, 44-100 Gliwice, E-mail: sebastian.pawlak@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Xamán J., Lira L., Arce J., Analysis of the temperature distribution in a guarded hot plate apparatus for measuring thermal conductivity, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, Iss. 4, 2009, 617-623
- [2] 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, (1961), 1679–1684
- [3] Gwinn J.P., Webb R.L., Performance and testing of thermal interface materials, *Microelectronics Journal*, Vol. 34, Iss. 3, 2003, 215-222
- [4] ASTM D5470-06 Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thin Thermally Conductive Solid Electrical Insulation Materials, *ASTM International*, 2006
- [5] Buliński Z., Pawlak S., Białecki R., Adamczyk W., Krysiński T., Wyznaczanie przewodności cieplnej ciał stałych na podstawie normy ASTM D 5470, *STAL Metale & Nowe Technologie*, nr 3-4 (2019), 57-62
- [6] Buliński Z., Pawlak S., Krysiński T., Adamczyk W., Białecki R., Application of the ASTM D5470 standard test method for thermal conductivity measurements of high thermal conductive materials, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 95, Issue 2 (2019), 57-63
- [7] Culham J.R., Teertstra P., Savija I., Yovanovich M.M., Design, assembly and commissioning of a test apparatus for characterizing thermal interface materials, *Proceedings of the 8th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems "ITherm2002"*, San Diego, (2002), 128-135
- [8] Kempers R., Kolodner P., Lyons A., Robinson A.J., A high-precision apparatus for the characterization of thermal interface materials, *Review of Scientific Instruments*, 80/9 (2009)
- [9] Strona internetowa: Embedded User Interface Doesn't Look Like Host User Interface, <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019LZ9SAM&l> (dostęp 19.10.2024)
- [10] Wyżgolik R., Budzan S., Integracja LabVIEW z rozwiązaniami IoT, *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 99, nr 10 (2023), 216-219