

*XIV Seminarium*  
**ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2004**  
Oddział Gdański PTETiS

**POMIARY TEMPERATURY W BADANIACH  
DIAGNOSTYCZNYCH**

**Mariusz DĄBKOWSKI<sup>1</sup>, Jacek ZAWALICH<sup>2</sup>**

1. Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-925 Gdańsk  
tel: (058) 347 2139 fax: (058) 347 1802 e-mail: mardab@ely.pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-925 Gdańsk  
tel: (058) 347 2585 fax: (058) 347 1802 e-mail: j.zawalich@ely.pg.gda.pl

Podczas badań obiektów, jedną z ważnych wielkości fizycznych jest temperatura, która w sposób szczególnie odróżnia się od innych cech mierzalnych. Do określenia jej jednostki niezbędne jest ustalenie skali temperatur na podstawie stałych punktów termometrycznych. Pomiary, prowadzone w ramach diagnostyki weryfikacyjnej, służą do określenia zdolności danego urządzenia do wykonywania założonych zadań. Przedmiotem badań może być zarówno dany obiekt cieplny, jak również sam przyrząd pomiarowy, któremu postawiono zadanie wykonania wiarygodnych pomiarów o dokładności przydatnej do dalszej analizy. Wówczas można ocenić dany czujnik temperatury, zastosowaną metodę pomiarową oraz wybrany przyrząd. W artykule opisano specyfikę pomiarów temperatury do celów diagnostycznych. Przedstawiono również przykład realizacji takich pomiarów dla laboratoryjnego obiektu cieplnego.

## 1. WPROWADZENIE

W badaniach obiektów fizycznych człowiek posługuje się różnymi wielkościami fizycznymi, czyli cechami mierzalnymi, które w sposób ilościowy można określić za pomocą liczby mianowanej otrzymanej w wyniku pomiaru, będącego czynnością porównania z jednostką danej wielkości. Zbiór właściwości fizycznych, rozumianych jako oznaczone wielkości fizyczne, jest reprezentacją chwilowego stanu badanego obiektu. Jedną z takich wielkości jest temperatura, która wyróżnia się w sposób szczególnie tym, iż do określenia jej jednostki niezbędne jest ustalenie odpowiedniej skali temperatur na bazie stałych punktów termometrycznych.

Pojęcie temperatury jest znane już od bardzo dawna. W II wieku p.n.e. rzymski lekarz C. Galen wprowadził cztery stopnie gorąca i cztery stopnie zimna w odniesieniu do ludzkiego ciała oraz neutralny stopień zerowy zależny od szerokości geograficznej [1].

Kolejne próby określenia skali temperatur doprowadziły w roku 1989 do przyjęcia przez Międzynarodowy Komitet Miar i Wag *Międzynarodowej Skali Temperatur 1990* (MST-90) (ang. *International Temperature Scale 1990* (ITS-90)), która definiuje kilkanaście odtwarzalnych punktów stałych i przypisuje im określone wartości temperatury. Sto-

sowana obecnie termodynamiczna skala temperatur, wykorzystuje punkt potrójny wody jako jedyny punkt stały, któremu przyporządkowano wartość 273,16 K (kelwinów). Jednostkę kelwin (K) Międzynarodowy Układ Jednostek SI określa jako  $1/273,16$  temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody i przedkłada do wyrażania temperatury termodynamicznej  $T$  oraz występującej różnicy temperatur [2].

## 2. POMIARY A DIAGNOSTYKA

Diagnostyka techniczna jest szybko rozwijającą się nauką, która zajmuje się badaniem stanu technicznego danej części. Zaliczana jest do nauk eksploatacyjnych, a ze względu na sposób badania cech diagnozowanego obiektu można ją podzielić na diagnostykę uszkodzeniową, której obszarem zainteresowań jest identyfikacja i lokalizacja uszkodzeń oraz diagnostykę weryfikacyjną zajmującą się określaniem zdolności danego urządzenia do wykonania założonych lub postawionych zadań.

Diagnostyczną reprezentacją stanu obiektu, czyli wybranego zbioru wartości cech tego obiektu, może być punkt w wielowymiarowej przestrzeni, której poszczególne wymiary są w danym przypadku istotnymi wielkościami fizycznymi. Zadania takiego obiektu będą wówczas podprzestrzenią ograniczoną warunkami ich wykonania. Badania diagnostyczne o charakterze weryfikacyjnym będą polegały na wykonaniu kontroli poszczególnych cech tego obiektu tworzących jego stan techniczny. Kontrola danej cechy obiektu jest specyficznym pomiarem tej cechy w celu zweryfikowania, czy jej wartość zawiera się w przedziale dopuszczalnym.

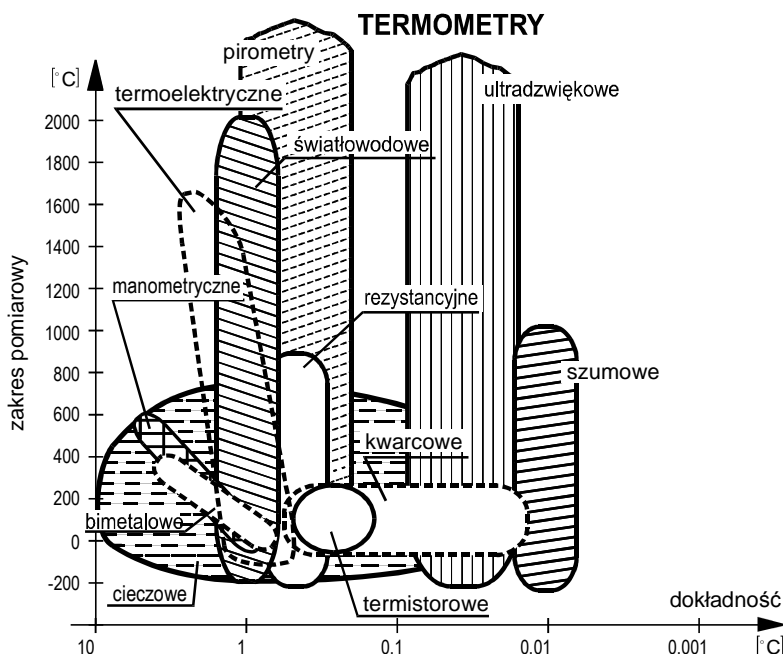
W diagnostyce uszkodzeniowej definiowane są wtórne cechy obiektu, zwane symptomami, zdeterminowane występowaniem uszkodzenia prostego lub pojedynczego zdarzenia uszkodzonego. Wartość symptomu jest różna od zera, gdy występuje uszkodzenie, natomiast w przeciwnym przypadku zwykle otrzymuje się wartość zerową. Bardzo często dopiero uszkodzenie złożone ma wpływ na niezdatność obiektu i konieczność jego naprawy. Pojedyncze symptomy są oznaką, że rozpoczął się proces uszkodzenia i można wcześniej zapobiec jego wystąpieniu.

Badania symptomów polegają na ich pomiarze metodami klasycznymi. Natomiast przy kontroli pierwotnych cech obiektu w badaniach diagnostycznych o charakterze weryfikacyjnym, poszukiwana jest różnica między wartością tej cechy a dopuszczalnymi wartościami granicznymi. W rezultacie mierzony zakres z punktu widzenia pomiaru zmniejsza się co najmniej dziesięciokrotnie, a to wymusza konieczność zwiększenia dokładności pomiaru [4]. Między pomiarem symptomu i pomiarem kontrolnej cechy obiektu diagnozowanego występuje zasadnicza różnica. Symptom zwykle występuje wówczas, gdy rozpoczyna się proces uszkodzenia i dopiero wtedy można zmierzyć jego wartość. Natomiast cecha obiektu, istotna pod względem diagnostyki weryfikacyjnej, jest stale dostępna i jej występowanie nie jest oznaką uszkodzenia.

Badania diagnostyczne o charakterze weryfikacyjnym dla obiektu termicznego wymagają znajomości określonych zadań tego obiektu. Zwykle znana jest średnia temperatura urządzenia oraz dopuszczalne zmiany tej temperatury. Takie informacje pozwalają wybrać czujnik temperatury, zastosowaną metodę pomiarową oraz odpowiedni przyrząd pomiarowy dostępny na rynku aparaturowym. W tym przypadku diagnostyka zostaje wtórnie zastosowana do weryfikacji prowadzenia badań diagnostycznych. Do pytania: czy dany obiekt spełnia założone funkcje lub przypisane zadania? dodaje się wtórne pytanie: czy przyrząd użyty do odpowiedzi na pierwotne pytanie jest w stanie wykonać wiarygodne pomiary? Czy w przypadku obiektu termicznego wyniki pomiaru gwarantują sprawdzenie temperatu-

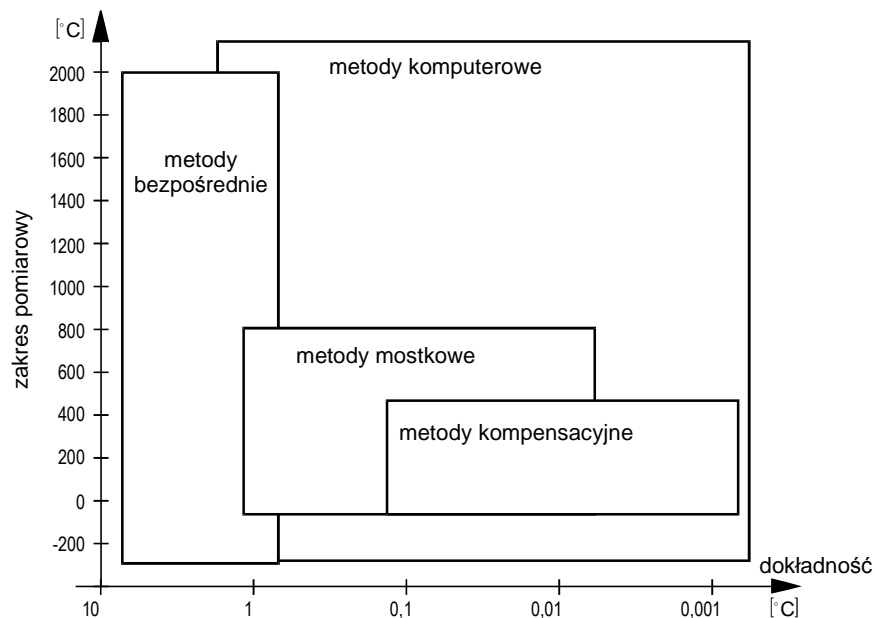
ry badanego układu ze względu na zawieranie się jej wartości w dopuszczalnym zakresie? W takim przypadku należy wybrać przyrząd, który zapewni taką dokładność wykonanych pomiarów, aby były wykrywalne różnice zmian temperatury w przedziale dopuszczalnym [4]. Konsekwencją takiego warunku jest w praktyce konieczność stosowania przyrządów pomiarowych, których dokładność jest co najmniej 10 razy większa od pomiarów średniej temperatury badanego elementu [3].

Wymagania na dużą dokładność pomiarów diagnostycznych powodują konieczność wyboru odpowiedniego czujnika pomiarowego dostosowanego jednocześnie do zakresu pomiarowego, np. dla temperatur 0-100°C można stosować czujniki rezystancyjne Pt-1000 lub termopary Cu-konstantan otrzymując dokładność do  $\pm 0,1$  °C. Na rys. 1 przedstawiono dostępne przedziały zakresów pomiarowych i osiąganych dokładności dla różnych czujników. Zagęszczenie rodzajów czujników pomiarowych występuje dla dokładności w przedziale 0,1÷1,0 °C. Najbardziej elastyczne pod tym względem są jednak nadal czujniki wykorzystujące właściwości cieczy termometrycznych



Rys. 1. Zakresy i dokładności przyrządów do pomiaru temperatury

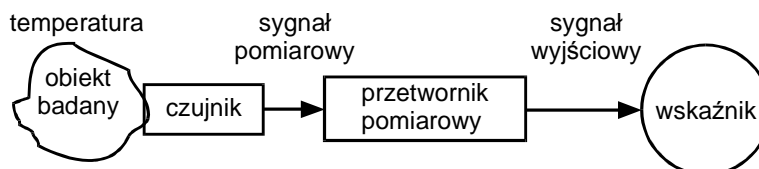
Niezbędne jest również wybranie odpowiedniej metody pomiarowej (rys. 2), np. kompensacyjnej, lub różnicowej – często wspomaganą komputerowo, aby tor pomiarowy nie wprowadzał błędów większych od błędów powodowanych przez czujnik pomiarowy. Wybór czujnika pomiarowego ma związek z samym pomiarem, gdyż każdy wprowadzony element do pracującego urządzenia powoduje zakłócenie w pracy całego urządzenia badanego i wówczas badane jest w istocie inne urządzenie – takie, które posiada dodatkowo element pomiarowy. Ten aspekt pomiarów należy uwzględnić przede wszystkim w metodzie inwazyjnej, która zakłada wprowadzanie do układu dodatkowych elementów w postaci czujników termometrycznych.



Rys. 2. Dokładności pomiaru w zależności od zastosowanej metody

Na wynik pomiaru temperatury ma również wpływ to, w jakich warunkach i w jaki sposób będą wykonywane same pomiary. Najlepiej, aby pomiary temperatury były wykonywane w otoczeniu, którego parametry są niezmiennie w czasie, a więc przy stałej wartości temperatury i wilgotności. Te same warunki pomiaru gwarantują powtarzalność wyników, a w przypadku pogłębiających się symptomów diagnostycznych dają możliwość wcześniejszego przewidywania powstawania uszkodzeń, lub niespełnienia założonych zadań. Przy pomiarach kontrolnych na użytek diagnostyki ważna jest również powtarzalność wyników, czyli zgodność wyników pomiarów tej samej wielkości w tych samych warunkach pomiarowych.

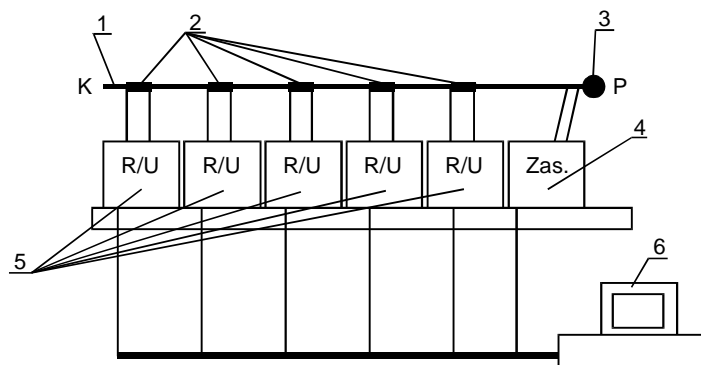
Standardowy układ pomiarowy można przedstawić w postaci modelu składającego się z czujnika, przetwornika pomiarowego oraz wskaźnika wybranego dla potrzeb danego eksperymentatora. Czujnik mający bezpośrednią styczność z wielkością mierzoną, przejmuje informacje o temperaturze badanego obiektu i przekształca ją na inną wielkość fizyczną w postaci sygnału pomiarowego [1]. W realizowanym w przetworniku procesie wzorcowania, uzyskany sygnał pomiarowy jest przetwarzany do postaci wyjściowej, którą może być np. wartość napięcia, wartość rezystancji itp. reprezentowana w postaci obrazu szeregu cyfr na wskaźniku (rys. 3).



Rys. 3. Ogólny schemat układu do pomiaru temperatury

Współczesne metody określania błędu pomiarowego łączą w sobie zagadnienia niedokładności oraz oszacowania niepewności całego układu pomiarowego. Analizuje się błędy pomiarowe, w których wyróżnia się część odpowiedzialną za błędy przypadkowe i za błędy systematyczne oraz część związaną z występowaniem zakłóceń losowych. Sposoby określania niedokładności pomiaru bazują na szczegółowym określaniu źródeł błędów, jak również ich kwalifikacji do grupy A – gdy wartości błędu zmieniają się losowo w kolejnych pomiarach – oraz do grupy B – gdy wartości błędu w kolejnych pomiarach pozostają stałe [6, 7].

Pomiary temperatury do celów diagnostycznych wykonano na stanowisku laboratoryjnym z obiektem cieplnym w postaci pręta miedzianego o średnicy 7,9 mm i długości 505 mm (rys. 4).



Rys. 4. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania obiektu cieplnego: 1 – pręt miedziany; 2 – czujniki temperatury; 3 – tranzystor grzejny; 4 – zasilacz; 5 – przetworniki rezystancja-napięcie (R/U); 6 – komputer; P – początek pręta; K – koniec pręta

Wykorzystano 4 rezystancyjne czujniki pomiarowe nawinięte bezpośrednio na zewnętrzną powierzchnię badanego pręta. W badaniach zastosowano kartę pomiarową typu PCL 711B umieszczoną w komputerze klasy PC oraz specjalistyczną aplikację w programie Matlab-Simulink, umożliwiającą akwizycję danych pomiarowych w czasie rzeczywistym. Uzyskano możliwość zapisywania do pliku (z zadaną częstotliwością) wartości binarnych odpowiadających mierzonym temperaturom oraz śledzenia ich przebiegów na ekranach wirtualnych oscyloskopów.

Oszacowana wartość niepewności pomiaru w istotny sposób wpływa na jakość prowadzonych badań diagnostycznych. W powyższym układzie pomiarowym, wykorzystującym czujnik rezystancyjny oraz mostkową metodę pomiaru napięcia, rozszerzona niepewność pomiaru  $u(\hat{T})$  estymaty temperatury  $\hat{T}$  wynosi  $1,68\text{ }^{\circ}\text{C}$ , więc w myśl zasad prowadzenia pomiarów kontrolnych, przedział dopuszczalnych zmian wartości temperatury równa się  $33,6^{\circ}\text{C}$  [5]. Tego typu układ pomiarowy jest zadawalający dla pomiarów technicznych, lecz nie stanowi skutecznego narzędzia w badaniach diagnostycznych, a otrzymując takie wyniki jest obawa stawiania niewiarygodnych ocen względem badanych obiektów termicznych. Prowadzenie pomiarów komplikuje wpływ wielkości zewnętrznych działających w sposób przypadkowy z najbliższego otoczenia. Uzasadniona jest więc potrzeba stosowania w badaniach diagnostycznych obiektów termicznych wysokiej klasy sprzętu pomiarowego o dużej dokładności, co pozwoli w efekcie na miarodajną ocenę ich stanu technicznego.

### 3. PODSUMOWANIE

W artykule poruszono problem pomiarów temperatury z punktu widzenia badań diagnostycznych. Opisano specyfikę tych pomiarów z podkreśleniem faktu, iż stosowane przyrządy pomiarowe muszą mieć bardzo wysoką dokładność – przynajmniej o rząd większą od wartości dopuszczalnego przedziału zmian wielkości kontrolowanej. Na przykładzie szacowania błędu wskazań toru pomiarowego temperatury pokazano, jak ważna jest dokładność pomiarów temperatury przy przeprowadzaniu badań diagnostycznych obiektów termicznych. Zwrócono przy tym uwagę również na duże znaczenie jakości sprzętu pomiarowego w badaniach diagnostycznych. Pomiarzy temperatury obciążone małymi błędami pozwalają na wiarygodne określenie stanu technicznego obiektu i umożliwiają rzetelną odpowiedź na pytanie, czy badany obiekt spełnia oczekiwane zadania. W artykule zawarto przykład wspomaganą komputerowo realizację pomiarów temperatury rzeczywistego obiektu cieplnego oraz oszacowania niepewności układu pomiarowego.

### 4. BIBLIOGRAFIA

1. Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.: Termometria. Przyrządy i metody. Łódź Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 1998.
2. Massalski J. M., Studnicki J.: Legalne jednostki miar i stałe fizyczne. Warszawa PWN 1988.
3. Zawalich J.: Diagnostyka układów automatycznej synchronizacji prądnic. Gdańsk Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki 2001. Rozprawa doktorska.
4. Zawalich J.: Wybrane zagadnienia automatycznych synchronizatorów prądnic. Artykuł naukowy. PAK nr 12/2003 s. 39-41.
5. Dąbkowski M.: Diagnostyka obiektu jednowymiarowego o parametrach rozłożonych. Gdańsk Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki 2002. Praca magisterska.
6. Piotrowski J., Kostryko K.: Wzorcowanie aparatury pomiarowej. Warszawa PWN 2000.
7. Makal J.: Niepewność pomiaru wielokanałowego systemu pomiarowego. Artykuł naukowy PAK nr 9/2001 s. 5-7.

### TEMPERATURE MEASUREMENTS IN DIAGNOSTIC TESTS

Temperature is one of the most important physical parameter, which differs in a specific way from plant features. Technical diagnostic as a part of operating science can be subdivided into fault diagnostic, which identifies and localizes damages and verification diagnostic, which describes abilities of device to perform tasks. A measure device which task is to make reliable measurements useful in further diagnostic analysis can be also an object of a verification diagnosis. In cases of thermal measurements in such way is possible to asses a given temperature sensor, applied measurement method and chosen device. Thus a question arises: whether a given device is able to make reliable measurements? The paper describes specific features of temperature measurement stressing that used measurement devices should work with high accuracy. The problem considered in the study is illustrated by an example of a measurement process of a thermal plant.