

**Marek ORZYŁOWSKI, Tomasz KAŁUŻNIACKI,
Zbigniew RUDOLF, Grzegorz NOWICKI**

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT ELEKTRONIKI W WARSZAWIE

System automatycznego pomiaru i klasyfikacji czujników temperatury

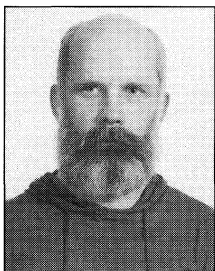
Dr hab. inż. Marek ORZYŁOWSKI

– profesor Przemysłowego Instytutu Elektroniki (PIE), Kierownik Samodzielnej Pracowni Sterowania i Regulacji w Instytucie. Studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej o specjalności telekomunikacja ukończył w 1966 roku. Do roku 1975 pracował w ZZEAP „Meratronik” jako konstruktor woltomierzy cyfrowych. W roku 1973 obronił na Politechnice Wrocławskiej pracę doktorską z zakresu miernictwa. Od roku 1975 pracuje w PIE, zajmując się problematyką komputerowych systemów przemysłowych oraz precyzyjnej regulacji temperatury złożonych obiektów termicznych. W roku 1996 Rada Wydziału Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej nadała mu tytuł doktora habilitowanego. Obecnie pracuje w PIE nad zagadnieniami precyzyjnych pomiarów i sterowania temperaturą oraz prowadzi wykłady w Politechnice Łódzkiej na temat zastosowania informatyki w przemyśle. Od roku 1991 jest członkiem rady naukowej PIE.



Mgr. inż. Tomasz KAŁUŻNIACKI

– studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej ukończył w 1972 roku, ze specjalnością „elektronika ciała stałego”. Od ukończenia studiów do chwili obecnej pracuje w Przemysłowym Instytucie Elektroniki. Początkowo zajmował się technologią układów cienkowarstwowych, następnie zagadnieniami związanymi z regulacją i pomiarami temperatury.



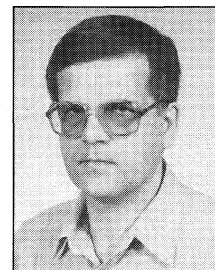
Mgr inż. Zbigniew RUDOLF

– absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1967) i Wydziału Matematyki Uniwersytetu Warszawskiego (1974). Pracuje w Przemysłowym Instytucie Elektroniki. Zajmuje się sterowaniem procesów cieplnych w urządzeniach konstruowanych w Instytucie.



Mgr inż. Grzegorz NOWICKI

– w 1980 ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej o specjalności „Automatyzacja procesów technologicznych”. Zajmował się projektowaniem mikroprocesorowych sterowników procesów technologicznych i systemów dozoru technicznego. Obecnie pracuje w Przemysłowym Instytucie Elektroniki i zajmuje się pisaniem oprogramowania do specjalistycznych systemów pomiarowych i zbierania danych.



Streszczenie

Artykuł omawia budowę i oprogramowanie automatycznego systemu do kalibracji użytkowych czujników termometrycznych. System powstał w wyniku prac badawczych, prowadzonych nad konstrukcją elektrycznego pieca rurowego o odpowiednim rozkładzie pola temperatury w bloku pomiarowym, umieszczonym w tym piecu, oraz prac nad precyzyjnym pomiarem i regulacją temperatury. Badania były prowadzone w Przemysłowym Instytucie Elektroniki we współpracy z Politechniką Warszawską. Artykuł poświęca szczególną uwagę zagadnieniu dokładności pomiaru temperatury.

Abstract

The paper describes the hardware and software of an automatic system for calibration of the thermometric sensors. The system is based on research works, connected with construction of the tubular electric furnace of proper distribution of temperature field in the measurement insert, located in this furnace, and works devoted to the precise measurements and control of the temperature. The works was conducted at Industrial Institute of Electronics in collaboration with Warsaw Technical University. The paper especially takes into consideration the problem of accuracy of temperature measurements.

Wstęp

Kalibracja użytkowych czujników temperatury staje się coraz ważniejszym zagadnieniem, zwłaszcza w obliczu europejskich procesów integracyjnych. Zapotrzebowanie na automatyczne systemy do kalibracji użytkowych czujników termometrycznych będzie stopniowo rosło w Polsce wraz z uzyskiwaniem przez przedsiębiorstwa certyfikatów ISO 9000. Na przykład w elektrowniach węglowych wymagany jest okresowy przegląd rzędu tysiąca czujników temperatury rocznie. Konieczny on jest ze względu na bezpieczeń-

stwo pracy, wydajność wytwarzania energii elektrycznej oraz zużycie urządzeń. Podobne potrzeby badania dużej liczby czujników temperatury występują między innymi w hutach, zakładach przemysłowych chemicznego, metalurgicznego, maszynowego oraz inżynierii materiałowej. Konieczność kalibracji tych czujników będzie występowała także w bardzo licznych przedsiębiorstwach przemysłu spożywczego, gdzie będzie wymagana ze względów technologicznych i dla kontroli sanitarnej. Niedostatki tej kontroli odczuły się przed jakimś czasem poprzez zakaz importu z Polski do Unii Europejskiej produktów mlecznych. Ponadto należy uwzględnić szybki rozwój automatyzacji procesów cieplnych, jako jedynej drogi spełnienia nowych wymagań jakościowych i ekonomicznych procesów produkcji w wielu dziedzinach przemysłu.

Urządzenia do kalibracji czujników temperatury produkuje na świecie stosunkowo niewiele specjalistycznych firm. Należą do nich: Isotech Technology z Wielkiej Brytanii, Hart Scientific i Omega z USA oraz Thermo Est z Francji. Ze względu na zawartą w tych urządzeniach myśl techniczną, wieloletnie doświadczenia wspomnianych firm w dziedzinie pomiarów i regulacji temperatury oraz konieczność zachowania wysokiej jakości, cena tych urządzeń jest znaczna. Np. automatyczne urządzenie Pegasus do kalibracji w zakresie 150°C÷1200°C firmy Isotech kosztuje ponad 40 tys. DM.

Również Przemysłowy Instytut Elektroniki (PIE) w Warszawie ma bogate doświadczenia z zakresu precyzyjnego pomiaru i regulacji temperatury, zaś jego potencjał produkcyjny umożliwia produkcję krótkoseryjną. W PIE między innymi opracowano i wdrożono do produkcji precyzyjne regulatory temperatury oraz system automatycznej kalibracji czujników termometrycznych SKCT-90/1300. Ponieważ urządzenie to spełniało wymagania jedynie części odbiorców, podjęto prace prowadzące do opracowania systemu automatycznego pomiaru i klasyfikacji czujników o znacznie lepszych parametrach metrologicznych i użytkowych. Przeprowadzono między innymi prace polegające na komputerowym mo-

delowaniu statycznych pól temperatury w tego rodzaju urządzeniach oraz weryfikacji wyników obliczeń numerycznych na specjalnie budowanych stanowiskach badawczych [1,11]. Pracami objęto również zagadnienie dynamicznego kształtowania tych pól za pośrednictwem wielopętlowych układów regulacji [6,8]. W wyniku prac powstało urządzenie SKCT-99.

Kształtowanie pól temperatury

Projektowanie konstrukcji urządzenia, takiego jak piec do kalibracji, oraz regulacja jego temperatury wymaga uwzględnienia wymiany ciepła w wyniku zjawisk fizycznych o różnej naturze, to jest: przewodzenia, konwekcji i radiacji. Rola tych zjawisk bardzo zależy od poziomu temperatury pracy. Szczególnie nieliniowa jest wymiana ciepła przez promieniowanie, której intensywność zależy od czwartej potęgi temperatury w skali bezwzględnej. Dokładny model matematyczny wymiany ciepła, zwłaszcza w przypadku złożonych kształtów urządzenia lub wsadu, powinien bazować także na równaniach różniczkowych cząstkowych, które opisują przewodnictwo cieplne.

W celu opracowania konstrukcji pieca z równomiernym rozkładem temperatury w obszarze, w którym umieszczony jest blok pomiarowy z czujnikami, posłużono się numerycznymi metodami symulacji rozkładu temperatury w obiektach cieplnych. W tym celu wykorzystano własne oprogramowanie w języku Pascal [11] oraz zastosowano pakiet oprogramowania specjalistycznego NISA-HEAT, opracowany w Engineering Mechanics Research Corporation (USA). Oprogramowanie NISA umożliwia obliczanie dynamicznych pól temperatury w trójwymiarowych złożonych przestrzeniach, z uwzględnieniem wszystkich zjawisk termicznych, w tym także radiacji, co na ogół nie jest spełnione w oprogramowaniu do obliczeń polowych.

Obliczenia objęły piece rurowe z blokiem pomiarowym w kształcie walca z otworami na czujniki temperatury [11, 1]. Rozpatrywano dwie podstawowe konstrukcje pieców:

- wyposażonych w pojedynczy grzejnik o zmiennej koncentracji mocy grzewczej, kształtowanej wzdłuż osi pieca,
- w grzejnik wielosekcyjny regulowany za pośrednictwem wielopętlowego regulatora temperatury.

W celu regulacji temperatury bloku pomiarowego z czujnikami zastosowano metody syntezy predykcyjnych wielopętlowych regulatorów obiektów z zastępczymi opóźnieniami, opracowane i rozwijane w PIE. Regulator temperatury bazuje na strukturze kaskadowej [6,8], przy czym jako pętlę pomocniczą tego regulatora wykorzystuje się pętlę regulacji grzejnika z regulatorem RT-921, produkcji PIE. Jako pętla nadrzędna została wykorzystana pętla zamknięta za pośrednictwem czujnika wzorcowego, umieszczonego w środkowym otworze bloku pomiarowego, układu pomiaru temperatury WSP-98/1 [5,7], komputera nadrzędnego oraz regulatora temperatury RT-921. Układ pomiaru temperatury WSP-98/1 został opracowany specjalnie dla potrzeb omawianego kalibratora. Komputer nadrzędny jest sprzężony z układem WSP-98/1 i regulatorem RT-921 za pośrednictwem interfejsu szeregowego RS-485. Zastosowanie regulacji kaskadowej znacznie polepsza parametry dynamiczne systemu [5,6] w stosunku do rozwiązań klasycznych, gdyż:

- znacznie skraca czas ustalania się temperatury w bloku pomiarowym,
- utrzymuje temperaturę pomiarową ze znacznie lepszą dokładnością i stabilnością.

Budowa systemu

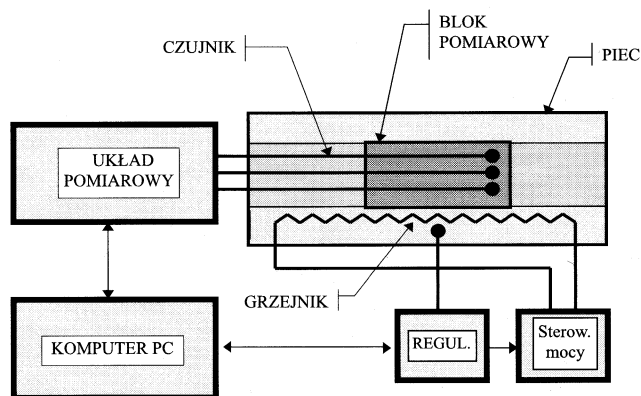
Przyjęto, że wielokanałowy kalibrator czujników termometrycznych będzie funkcjonował w dwóch układach:

- z piecem rurowym, pracującym w zakresie 200°C-1300°C,
- z ultratermostatem, pracującym w zakresie od 50°C do temperatury zależnej od użytej cieczy, maksymalnie do 200°C. Przy zasto-

sowaniu dodatkowego czynnika chłodzącego, np. wody, dolną granicę zakresu można przesunąć do 0-20°C.

Układ kalibratora czujników temperatury z piecem jest przedstawiony na rysunku. Kalibrator w tym układzie zawiera:

- poziomy piec rurowy z regulatorem temperatury i sterownikiem mocy,
- izotermiczny blok pomiarowy z otworami dla umieszczenia czujników temperatury,
- wielokanałowy układ pomiarów temperatury,
- komputer nadrzędny, sterujący procesem automatycznej kalibracji.



Rys. Schemat blokowy systemu do kalibracji czujników z piecem

Temperatura pieca rurowego jest zadawana z komputera nadrzędnego klasy PC, który steruje całością procesu kalibracji.

Izotermiczny blok pomiarowy ma za zadanie ujedynolicać rozkład temperatury w obszarze, w którym umieszczone są porównywane czujniki temperatury. Ze względu na różne zakresy temperatury pomiaru czujników termometrycznych, w systemie kalibracyjnym stosowane są bloki pomiarowe wykonane z miedzi, niklu i Kanthalu A1. Jak wspomniano, temperatura mierzona przez czujnik referencyjny jest także wykorzystywana przy regulacji kaskadowej.

Ograniczenia, związane z konstrukcją izotermicznego bloku pomiarowego oraz wymiarami czujników, spowodowały, że w układzie pomiaru temperatury systemu do kalibracji zastosowano sześć kanałów pomiarowych sygnałów z czujników temperatury oraz jeden kanał pomiaru temperatury przyłącza termoelementów. Pomiar temperatury przyłącza jest konieczny przy rezygnacji z użycia kłopotliwego zerostatu dla spoin odniesienia. W starszym systemie SKCT-90/1300 wykorzystywano wielokanałowy przetwornik analogowo-cyfrowy ADC-16 firmy Keithley. Dla zwiększenia dokładności pomiaru, w ramach opisywanych w referacie prac, skonstruowano moduł pomiarowy WSP-98/1.

W module WSP-98/1 kanały pomiarowe czujników zawierają izolowane wzmacniacze napięcia stałego, konieczne dla odseparowania się od wpływów prądów błądzących, pogarszających dokładność pomiaru, zwłaszcza przy wysokiej temperaturze kalibracji [2]. Ze względu na różne poziomy sygnałów napięciowych uzyskiwanych z różnych typów czujników temperatury, zastosowano 3 zakresy pomiarowe wzmacniaczy wejściowych: 25mV, 60mV i 100mV [2,3,7]. Wymagało to użycia stosunkowo rozbudowanego układu kluczy analogowych. W efekcie wprowadzono mikroprocesorowe sterowanie pracą układu kluczy. Zastosowanie mikroprocesora pozwoliło na wykorzystanie go dodatkowo do obliczania temperatury i obsługi komunikacji szeregowej z komputerem nadrzędnym, przewidzianym do sterowania automatycznym systemem do kalibracji czujników temperatury.

Automatyczne urządzenie do kalibracji czujników temperatury w wersji podstawowej wyposażone jest w piec i umożliwia kalibrację czujników stosunkowo długich - powyżej 450 mm, przy temperaturach wyższych od 200°C-300°C.

Do pomiarów niskich temperatur w przemyśle stosowane są zazwyczaj czujniki oporowe, najczęściej Pt100 lub Ni100. Kontrolują one temperaturę rurociągów, zbiorników, niskociśnieniowych wytwornic pary, itp. Zazwyczaj mierzą one temperatury z zakresu 10°C – 150°C . Są to z reguły krótkie lub dosyć krótkie czujniki obudowane (100 ± 250 mm). Do pomiarów kontrolnych takich czujników, można było uzupełnić stanowisko do kalibracji o opcję niskotemperaturową. Ten zestaw do kalibracji składa się z:

- ultratermostatu cieczowego,
- przystawki do ultratermostatu, z precyzyjnym regulatorem temperatury i tyrystorowym sterownikiem mocy,
- dodatkowego oprogramowania.

Kalibrowane czujniki i wzorcowy czujnik odniesienia - Pt100, mierzone są przez moduł pomiarowy WSP-98/1 umieszczony w stanowisku średniotemperaturowym. Jest on używany zamiennie do pomiaru czujników w piecu lub termostacie.

W urządzeniu zastosowano typowy laboratoryjny ultratermostat cieczowy typ UTU-4, w którym całkowicie wymieniono układ regulacji. Przeszary regulator elektroniczny włącz/wyłącz - sterowany termometrem kontaktowym, zastąpiono mikroprocesorowym regulatorem ciągłym PID, sprzężonym łączem szeregowym z komputerem sterującym. Termostat ten umożliwia kalibrację w zakresie temperatur 0°C – 95°C , przy zastosowaniu wody jako medium lub w zakresie do 200°C – 250°C - przy zastosowaniu oleju silikonowego o niskiej lepkości. Dolną granicę zakresu temperatur można obniżyć po zastosowaniu dodatkowego obiegu chłodzącego. Temperaturę cieczy kontroluje mikroprocesorowy regulator RT921, za pośrednictwem czujnika pomiarowego Pt100.

Błędy pomiarowe

Wymagania dotyczące pomiaru czujników użytkowych

Zarówno aparaturę jak i warunki wykonywania pomiarów kalibracyjnych metodą porównawczą określają stosowne instrukcje [9,10]. Do pomiaru termoelementów wymagane są:

- Urządzenie pomiarowe, zapewniające pomiar napięcia z dokładnością $1\mu\text{V}$
- Etalon kontrolny PtRh10-Pt
- Piec, o następujących parametrach:

– dokładność poziomu temperatury	10°C
– stałość temperatury podczas pomiaru	2°C
– gradient temperatury na długości 50mm	$<0,5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$
- Do pomiaru czujników oporowych, w zakresie do 200°C , wymagane są:
- Urządzenie pomiarowe, umożliwiające pomiar z dokładnością $0,01\%$ (oraz rozdzielczością co najmniej $10\text{m}\Omega$).
- Etalon kontrolny oporowy Pt100
- Termostat o głębokości 300mm i gradiencie temperatury $<0,05^{\circ}\text{C}/\text{cm}$

Uproszczona analiza podstawowych źródeł błędów przy pomiarach czujników

Zagadnienia dotyczące wyboru rozwiązania układu pomiarowego oraz problemów związanych z pomiarem czujników temperatury omawia szczegółowo opracowanie [11]. W dalszej części przedstawione i omówione zostaną skrótowo najważniejsze składowe błędy pomiarowe.

Na błąd całkowity pomiaru czujników, w zastosowanym rozwiązaniu, wpływają następujące składowe:

- różnica temperatury między czujnikami mierzonymi a czujnikiem wzorcowym,
- błędy wprowadzane przez linię pomiarową,
- błędy elektrycznego układu pomiarowego:

- błąd statyczny zera i skali,
- dryft temperaturowy zera i skali,
- dryft czasowy,
- szumy,
- liniowość pomiaru,
- rozdzielczość pomiaru,
- błąd linearyzacji charakterystyk,
- efekt samopodgrzewania się (tylko dla czujników oporowych),
- błąd pomiaru czujnika CJC (kompensacja „zimnych” końców termoelementów).

Pierwsze z przedstawionych źródeł błędów - **różnica temperatury pomiędzy czujnikiem wzorcowym a czujnikami mierzonymi**, wynika z ograniczonych możliwości wyrównywania temperatury, zwłaszcza dla czujników o większych gabarytach. W przypadku pomiaru czujników w wyższej temperaturze, dla zmniejszenia różnicy temperatury stosuje się bloki wyrównawcze, metalowe lub ceramiczne. W zależności od materiału i zakresu temperatury uzyskuje się różnicę temperatury, w otworach pomiarowych od $0,05^{\circ}\text{C}$ (miedź do 300°C) do $0,35^{\circ}\text{C}$ (ceramika, stop Kanthal AB 1300°C). Przy pomiarze czujników, zwłaszcza oporowych, w niższej temperaturze, stosuje się termostat cieczowy. Ciecz wyrównuje różnicę temperatury pomiędzy czujnikami, dzięki intensywnemu mieszaniu, z dokładnością rzędu $0,02\pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

Należy też pamiętać, że pomiar musi być wykonywany w warunkach ustabilizowania się różnicy temperatury pomiędzy wzorcem a mierzonymi czujnikami. W przeciwnym wypadku wystąpi dynamiczny błąd odczytu różnicy temperatury, który z czasem zanika.

Kolejnym źródłem błędów jest **linia pomiarowa**. W przypadku pomiarów termoelementów, czujniki użytkowe podłącza się najczęściej kablami kompensacyjnymi, wykonanymi z materiałów o charakterystyce termoelektrycznej zgodnej z wydajnością mierzonych termoelementów, w zakresie temperatury zbliżonym do temperatury otoczenia. Rezystancja tych przewodów nie wprowadza istotnego błędów, ze względu na dużą rezystancję wejściową współczesnych wzmacniaczy pomiarowych. Ważna natomiast jest zgodność charakterystyk termoelektrycznych kabla i badanego termoelementu. Kabel kompensacyjny wprowadza błąd temperatury proporcjonalny do różnicy temperatury pomiędzy jego końcami. Typowe kable wprowadzają błąd od 1:20 - dla kabli do termoelementów z metali szlachetnych (typ S, R), do 1:100 - dla kabli wykonanych z materiałów identycznych z mierzonym termoelementem (np. typ K, J ...). Niektóre termoelementy np. typ B, nie wymagają kabla kompensacyjnego.

W układzie pomiarowym jeden koniec kabla kompensacyjnego przyłączony jest do bloku izotermicznego, związanego z modułem pomiarowym, zaś drugi jego koniec dołączony jest do końców badanego termoelementu. Temperatura obu tych punktów powinna być wyrównana i stała. Błędy wnoszone przez skompensowane termicznie gniazda i wtyki termoelektryczne można pominąć gdyż, z powodu ich stosunkowo niewielkich wymiarów, różnice temperatury są nieznaczne i szkodliwe siły termoelektryczne są małe.

Z kolei czujniki oporowe dołączone są do układu pomiarowego przewodami miedzianymi. Szkodliwe siły termoelektryczne są tu zazwyczaj do pominięcia, wobec stosunkowo wysokiego poziomu mierzonych napięć i małej wydajności termoelektrycznej połączeń. Istotną rolę natomiast może odgrywać rezystancja przewodów, a więc ich długość i przekrój.

Zastosowanie 4-przewodowej metody pomiaru praktycznie eliminuje całkowicie wpływ rezystancji nie tylko linii pomiarowej, ale i wszystkich styków pośrednich. Wpływ zmian rezystancji linii w granicach $10\ \Omega$ nie powoduje zazwyczaj błędów większego od $0,01^{\circ}\text{C}$.

Sumaryczny **statyczny błąd zera** wynika z istnienia napięć niezrównoważenia wzmacniacza wstępnego, wzmacniacza izolacyjnego i bufora oraz przetwornika. W niewielkim stopniu, zwłaszcza przy pomiarze przy największym wzmocnieniu, na błąd zera mogą mieć wpływ pasożytnicze siły termoelektryczne w obwodach wej-

ściowych. **Statyczny błąd skali** wynika z niedokładności rezystorów ustalających wzmocnienie, niedokładności napięcia referencyjnego przetwornika A/C, a w przypadku pomiaru czujników oporowych, dodatkowo - z błędów prądu pomiarowego zasilającego czujnik. Obie te statyczne składowe błędy można niemal całkowicie wyeliminować, stosując procedurę kalibracji elektronicznej i wprowadzając odpowiednie poprawki zera i skali. Oczywiście, na dokładność kalibracji mają wpływ błędy źródła napięcia i rezystorów wzorcowych użytych do kalibracji.

Błędy termiczne zera i skali są praktycznie nie do skompensowania, ale można ich poziom obniżyć, przez zastosowanie wysokiej klasy elementów (rezystory, wzmacniacze, diody referencyjne). Zastosowanie autozera czyli cyklicznej, automatycznej operacji zerowania, pozwala na obniżenie dryftu termicznego zera do poziomu $0,1\mu V/^{\circ}C$.

Dryft czasowy dotyczy głównie zmian wzmocnienia wskutek zmian starzeniowych rezystorów, ustalających wzmocnienie oraz diod referencyjnych. Można go obniżyć stosując elementy testowane, starzone wstępnie. Stosowanie okresowej kalibracji zmniejsza wpływ tego błędu.

Szumy i zakłócenia generowane są głównie w czujniku, linii pomiarowej i wzmacniaczu wejściowym. Uzyskanie niskiego poziomu szumów zapewniają:

- zastosowanie izolacji obwodów wejściowych,
- filtracja na wejściu wzmacniacza wstępnego,
- stosowanie niskoszumnego wzmacniacza wstępnego,
- filtracja na wejściu przetwornika A/C,
- zastosowanie całkowitego przetwornika A/C.

Dalsze obniżenie szumów można uzyskać na drodze filtracji cyfrowej. Ze względu na stosunkowo długi dopuszczalny czas pomiaru, filtracja może być bardzo skuteczna.

Na **liniowość** układu pomiarowego wpływa głównie liniowość wzmacniacza izolującego. Nieliniowość rzędu $0,02\%$ jest osiągalna we wzmacniaczach o cenie około 50 USD. Obniżenie nieliniowości poniżej poziomu $0,01\%$ można uzyskać przez zmniejszenie poziomu wzmacnianego sygnału, z typowej wartości 5V, do poziomu około 1V. Na liniowość układu pomiarowego wpływa także, chociaż w mniejszym stopniu, przetwornik A/C. Dla większości scalonych przetworników, o rozdzielczości 15÷18 bitów, nieliniowość nie przekracza $0,005\%$.

Błąd rozdzielczości pomiaru wprowadza przetwornik analogowo-cyfrowy. Przy wymaganej rozdzielczości pomiaru $1\mu V$ przy pomiarze napięć i $0,01\Omega$ przy pomiarze rezystancji do około 400Ω , musi być zastosowany przetwornik minimum 15÷16 bitowy.

Błąd linearyzacji charakterystyk czujników temperatury ma bezpośredni wpływ na dokładność cyfrowych obliczeń temperatury, przeprowadzanych na podstawie zmierzonego napięcia lub rezystancji czujnika. Zakładając, że błąd linearyzacji nie powinien przekraczać 10% maksymalnej dokładności czujnika, otrzymuje się wartości:

- dla czujnika Pt100 - kl. A – maks. błąd $0,02^{\circ}C$
- dla czujnika S - kl. 1 – maks. błąd $0,1^{\circ}C$

Efekt **samopodgrzewania się** czujników, dotyczy wyłącznie czujników oporowych. Obniżenie prądu pomiarowego do poziomu $200\mu A$ zmniejsza błąd spowodowany przepływem prądu do zaledwie $0,01^{\circ}C$.

Błąd czujnika CJC wpływa wyłącznie na pomiar dokładności termocementów. Jeżeli stosowana jest porównawcza metoda pomiaru - względem wzorca, błąd ten jest eliminowany, ale pod warunkiem zrównania się temperatury przyłączy mierzonego czujnika i wzorca.

Wybrane parametry systemu kalibracyjnego

Poniżej podano wybrane parametry części składowych stanowiąca, mające istotny wpływ na dokładność pomiaru czujników w omawianym systemie kalibracji. Obszerniejsze dane znaleźć można w opracowaniach [11].

Piec

Długość otworów w bloku pomiarowym	100 mm
Gradient temperatury w bloku pomiarowym (blok niklowy, $1000^{\circ}C$):	
- poprzeczny (otwory skrajne w stosunku do środka)	$0,25^{\circ}C$
- podłużny	$<0,2^{\circ}C/cm$
Dokładność poziomu temperatury	$2^{\circ}C$
Wahania temperatury pieca (poziom $1000^{\circ}C$)	$\pm 0,25^{\circ}C$
Szybkość zmian temperatury bloku pomiarowego, przy której następuje pomiar	$0,05^{\circ}C/min$.

Termostat

Gradient temperatury cieczy w obszarze roboczym	$<0,015^{\circ}C/cm$
Wahania temperatury cieczy termostatycznej (woda, $90^{\circ}C$)	$\pm 0,02^{\circ}C/10min$

Moduł pomiarowy WSP-98/1

Błąd statyczny zera (zakres 10mV, 72 godz po kalibracji)	$<0,2\mu V$
Błąd statyczny skali (zakres 10mV, 72 godz po kalibracji)	$<0,01\%$
Dryft czasowy	
- zera	$<0,3\mu V$
- skali	ca. $0,02\%/3mies.$
Współczynnik termiczny	
- zera	$<0,1\mu V/^{\circ}C$
- skali	$<25ppm/^{\circ}C$

Szumy (zakres 10mV, filtr włączony)	ca. $\pm 0,2\mu Vpp$
Wpływ rezystancji linii pomiarowej:	
- przy pomiarze napięcia termoelementów	$1\mu V/10\Omega$
- przy pomiarze rezystancji (linia 4-przewodowa)	$0,01\Omega/4x10\Omega$
Rozdzielczość pomiaru	18 bitów
Rozdzielczość odczytu	$0,01^{\circ}C$
Prąd pomiarowy czujników oporowych	ca. $120\mu A$

Z analizy przedstawionych powyżej danych wynika, że omawiane urządzenie spełnia wymagania obowiązujących obecnie przepisów, określających warunki wykonywania pomiarów użytkowych czujników termometrycznych, niejednokrotnie z dużym zapasem.

Dobre parametry modułu pomiarowego uzyskano między innymi dzięki zastosowaniu:

- całkowicie elektronicznej kalibracji,
- elektronicznego przełączania wzmocnienia,
- automatycznego zerowania wejść pomiarowych, a także przez zastosowanie wysokiej klasy elementów.

Proces kalibracji czujników termometrycznych

Przystępując do kalibracji operator może wykorzystać zapisany na dysku dotychczasowy program, który określa wartości temperatury kalibracji czujników. W razie potrzeby może także zmienić lub zaprogramować szereg innych punktów temperaturowych kalibracji. Po uruchomieniu programu kalibracji następuje:

- programowy wzrost temperatury do kolejnego zaprogramowanego poziomu,
- badanie warunków ustalenia się temperatury w bloku pomiarowym,
- wykonanie pomiarów kalibracyjnych,
- określenie klasy badanych czujników.

Po zakończeniu cyklu pomiarowego wyniki pomiarów automatycznie zapisywane są na dysku. Na polecenia operatora może być wydrukowany protokół pomiarowy oraz archiwizowane wyniki pomiarów. Archiwizowane wyniki można w późniejszym czasie odczytać lub poddawać dalszej obróbce.

Autodiagnostyka systemu

Dla omawianego systemu do kalibracji czujników opracowano oprogramowanie autodiagnostyczne. System pracuje w zaprogramowanych cyklach zmian temperatury. Cykle te poprzedzają fazy przygotowawcze, zaś po właściwych pomiarach może nastąpić obróbka zarejestrowanych danych off-line. W związku z tym, zagadnienia autodiagnostyki rozważanych urządzeń można podzielić na następujące grupy:

1. Autodiagnostyka bloków wchodzących w skład urządzenia, która może być przeprowadzana przed pomiarem oraz w trakcie pomiaru;
2. Autodiagnostyka prawidłowości przesyłania sygnałów pomiędzy poszczególnymi blokami i elementami urządzenia;
3. Autodiagnostyka poprawności danych wprowadzanych przez operatora;
4. Autodiagnostyka poprawności przebiegu pomiarowego;
5. Autodiagnostyka poprawności uzyskanych danych.

Należy zwrócić uwagę na to, że autodiagnostyka poprawności przebiegu pomiarowego zachodzi w czasie ograniczonym fazami procesu pomiarowego. Ponadto nie może zakłócać przebiegu zasadniczego pomiaru. W trakcie przebiegu pomiaru wskazane jest także prowadzenie autodiagnostyki prawidłowości przesyłania sygnałów pomiędzy blokami i elementami urządzenia. Jest to szczególnie istotne dla urządzeń elektrotermicznych, w których w trakcie nagrzewania następują zmiany wymiarów i naprężenia części konstrukcyjnych oraz czujników temperatury, zamocowanych w urządzeniu.

Podsumowanie prac i dalsze plany

Przeprowadzone dotychczas prace polegały na polepszeniu metrologicznych i użytkowych parametrów komputerowego systemu do kalibracji użytkowych czujników termometrycznych, opracowanego poprzednio w PIE. W artykule omówione zostały zagadnienia:

- zastąpienia firmowego wielokanałowego przetwornika analogowo-cyfrowego modułem pomiarowym własnej konstrukcji,
- wprowadzenia regulacji kaskadowej.

Wprowadzenie własnego układu pomiarowego polepsza około dwukrotnie dokładność pomiaru temperatury. Zastosowanie kaskadowej regulacji temperatury bloku pomiarowego [5,6] polepsza własności dynamiczne systemu, znacznie skracając czas kalibracji. Dzięki pracom nad modelowaniem rozkładu pola temperaturowego w bloku pomiarowym [1,11], przeprowadzonym w ramach projektu badawczego KBN, możliwe było wprowadzenie korekt konstrukcyjnych pieca, służących dalszemu polepszeniu dokładności systemu kalibracyjnego.

Obecnie w PIE zostało zakończone testowanie najnowszej wersji programu kalibratora. Wykorzystując doświadczenia, zebrane u dotychczasowych użytkowników i w eksploatacji kalibratora będącego na wyposażeniu laboratorium PIE, wprowadzono w programie szereg zmian, między innymi:

- stały podgląd temperatur mierzonych przez kalibrowane czujniki i czujnik odniesienia,

- możliwość zmiany serwisowej różnych parametrów procesowych np. stopnia filtracji pomiarów, okresu próbkowania itp.,
- możliwość jednoczesnej kalibracji w każdym kanale innego rodzaju czujnika. W poprzedniej wersji kalibratora jednocześnie, kalibrowano czujniki tego samego typu, np. tylko czujniki typ S,
- pełną sygnalizację błędów, wraz ze skróconym opisem ich przyczyn,
- ciągłą, automatyczną rejestrację pomiarów czujników podczas kalibracji,
- automatyczną rejestrację błędów.

W najbliższym czasie przewiduje się zakończenie opracowania w PIE specjalizowanego stanowiska do kalibracji czujników, pracującego do temperatury maksymalnej 600°C. Znaczne ograniczenie górnej temperatury pracy pozwoli na skrócenie strefy czolowej grzejnika i umożliwi kalibrację czujników krótszych od 500 mm. Tego typu kalibrator znajdzie zastosowanie głównie w elektrowniach i elektrociepłowniach, gdzie większość termoelementów kontrolnych to czujniki typu K, pracujące przy pomiarach temperatur do 550°C.

W nieco dalszej perspektywie planowane jest opracowanie kalibratora z górną temperaturą pracy podwyższoną do 1600/1800°C, do kalibracji termoelementów stosowanych w hutnictwie.

Literatura

- [1] HERING M., OSTROWSKI P.: Symulacja pól temperatury w wielostrefowych piecach rurowych, V Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Gospodarka cieplna i eksploatacja pieców przemysłowych”, 6-20.10.1999r., Częstochowa
- [2] KAŁUŻNIACKI T.: Obwody wejściowe cyfrowego wielopętlowego regulatora temperatury CRT-88, Prace PIE, nr 114, 1991
- [3] KAŁUŻNIACKI T., ORZYŁOWSKI M., Rudolf Z., Wielokanałowy system pomiarów temperatury, Prace PIE, Nr 131, str. 106-116, 1997
- [4] MICHAŁSKI L., ECKERSDORF K., KUCHARSKI J.: Termometria: przyrządy i metody, Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej, 1998
- [5] ORZYŁOWSKI M., SANKOWSKI D., KAŁUŻNIACKI T., Rudolf Z., Temperature Measurement and Control System for T/C Calibrator, IMEKO TC-4 Technical Committee on Measurement of Electrical Quantities, ISDDMI '98, 17-18 September 1998, Naples, Italy
- [6] ORZYŁOWSKI M., KAŁUŻNIACKI T., RUDOLF Z., NOWICKI G.: Kaskadowa predykcja regulacja elektrotermicznych systemów pomiarowych, XI Conference - Application of Microprocessors in Automatic Control and Measurement, Warszawa, 13-14 October 1998, pp. 233-242
- [7] ORZYŁOWSKI M., KAŁUŻNIACKI T., RUDOLF Z., NOWICKI G., Komputerowy system do kalibracji użytkowych czujników termometrycznych, XI Conference - Application of Microprocessors in Automatic Control and Measurement, Warszawa, 13-14 October 1998, pp. 267-272
- [8] ORZYŁOWSKI M., KAŁUŻNIACKI T., RUDOLF Z., Precise Temperature Control for Measurement Purposes, The 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC'99, pp. 16-21, 24-26 May 1999, Venice, Italy
- [9] Instrukcja Nr 4 Prezesa PKNiM z dn. 26.04.1976r. o sprawdzaniu termoelementów użytkowych
- [10] Instrukcja nr 6 Prezesa PKNiM z dn. 22 kwietnia 1986r. o sprawdzaniu czujników termometrów oporowych metalowych użytkowych
- [11] Projekt badawczy KBN nr 8 T10C 011 13 pt. „Zastosowanie metod dynamicznego kształtowania trójwymiarowych pól temperatury w automatyzowanych systemach kalibracji czujników pomiaru temperatury dla potrzeb metrologii i laboratoriów badania jakości” - Raport końcowy, PIE, 1999