

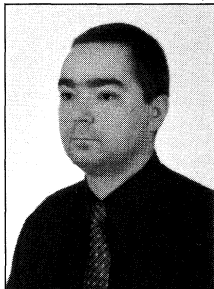
**Jakub WOJTURSKI, Adam KOWALCZYK**

ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH, POLITECHNIKA RZESZOWSKA

## Diagnostyka przemysłowych rezystancyjnych czujników temperatury za pomocą wymuszeń wewnętrznych

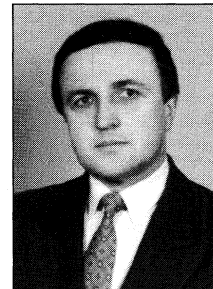
Mgr inż. Jakub WOJTURSKI

Urodził się w Rzeszowie w 1971 r. W 1995 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej na specjalności Automatyka i Metrologia. Od 1995 r. pracuje na stanowisku asystenta w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się pomiarami wielkości nieelektrycznych, swoje zainteresowania naukowe skupia na pomiarach temperatury. Główne kierunki badań dotyczą diagnostyki in-situ rezystancyjnych czujników temperatury.



Dr hab. inż. Adam KOWALCZYK, prof. PRz

Profesor nadzwyczajny Politechniki Rzeszowskiej. Kierownik Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych. Ukończył specjalność Miernictwo Elektryczne i Przyrządy Pomiarowe na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w 1973 roku. Stopień doktora uzyskał w 1983 r., a doktora habilitowanego w 1992 r. Dyscyplina i specjalność naukowa: elektronika, metrologia elektryczna i elektroniczna, miernictwo wielkości nieelektrycznych, przetwarzanie sygnałów stochastycznych. Jest autorem i współautorem ponad 100 prac naukowych i ponad 20 opracowań konstrukcyjnych zastosowanych w przemyśle. Członek organizacji, stowarzyszeń i rad naukowych.



### Streszczenie

W artykule przedstawiono podstawowe metody wyznaczania właściwości czujników temperatury za pomocą wymuszeń wewnętrznych. Omówiono główne właściwości rezystancyjnych czujników temperatury. Pokazano koncepcję diagnostyki statycznych właściwości przemysłowych platynowych czujników temperatury przy użyciu wewnętrznych wymuszeń prądowych. Przedstawiono budowę i zasadę działania układu pomiarowego. Opisano kolejne etapy eksperymentu diagnostycznego. Omówiono wstępne wyniki testowania czujników temperatury za pomocą skokowego oraz impulsowego wymuszenia prądowego.

### Abstract

In this article, basic methods of the determination of temperature sensors properties by the use of internal forcing are presented. Main information concerning Resistance Temperature Detectors (RTD) is discussed. Conception of the diagnostics of static properties of Industrial Platinum Resistance Thermometers (IPRT) by the use of internal current forcing is presented. The structure and the manner of measurement system work are shown. The next steps of the diagnostic experiment were described. Preliminary results of temperature sensors testing by the use of Loop Current Step Response (LCSR-test) and Current Pulse Response (CPR-test) are presented.

**Słowa kluczowe:** pomiary temperatury, rezystancyjny czujnik temperatury, przemysłowy rezystancyjny termometr platynowy, statyczna charakterystyka przetwarzania, diagnostyka in-situ

**Keywords:** temperature measurements, resistance temperature detector, industrial platinum resistance thermometer, static transfer function, in-situ diagnosis

## 1. Wprowadzenie

Wykonując pomiar temperatury niezbędne jest posiadanie pewnej wiedzy dotyczącej prawidłowego działania zainstalowanego czujnika. Wadliwe działanie czujnika może czasami nie mieć istotnego wpływu na całość procesu przemysłowego a spowodować jedynie np. pogorszenie jakości produkcji. Może też mieć o wiele groźniejsze skutki np. w przypadku awarii czujnika monitorującego stan cieczy chłodzącej w elektrowni jądrowej [1]. Informacja o poprawnym działaniu czujnika może być więc w niektórych przypadkach najważniejszą informacją dostarczaną obsłudze technicznej procesu. Parametry metrologiczne przemysłowego czujnika temperatury powinny więc podlegać okresowej kontroli. Istnieją dwie klasyczne metody sprawdzenia poprawności wskazań RTD:

- 1) umieszczenie czujnika w ośrodku o temperaturze  $\vartheta$  i porównaniu rezystancji czujnika badanego z rezystancją platynowego wzorcowego czujnika temperatury,
- 2) umieszczenie badanego czujnika w komorze odtwarzającej temperaturowy punkt stały Międzynarodowej Skali Temperatury MST-90.

Wadą opisanych metod jest konieczność demontażu czujnika z miejsca jego zainstalowania i przeprowadzenie czasochłonnego (i zazwyczaj drogiego) eksperymentu pomiarowego.

## 2. Metody in-situ wyznaczania właściwości czujników

W obecnych czasach dąży się do tego, aby ogół czynności diagnostycznych elementów toru pomiarowego był w pełni zautomatyzowany oraz aby nie powodował przerw w pracy monitorowanego procesu (głównie ze względów ekonomicznych). W przypadku czujników temperatury istnieją dobrze opracowane metody kontroli ich właściwości dynamicznych za pomocą wymuszeń wewnętrznych (metody in-situ) [2]. Zasadnicze zalety tych metod to brak konieczności demontażu czujnika z miejsca jego normalnej pracy oraz adekwatność wyznaczonej stałej czasowej do rzeczywistej stałej czasowej dla danych warunków pracy czujnika. Istnieją różne odmiany pomiarowe wspomnianych metod [3], jednak wszystkie charakteryzuje wspólna cecha: metoda wymuszeń wewnętrznych nie wymaga demontażu czujnika z miejsca jego zainstalowania, może więc być przeprowadzona w dowolnym czasie bez konieczności przerywania pracy czujnika. Wyniki testu są dostępne natychmiast i służą np. do poprawy nastaw korektora dynamicznego pracującego z czujnikiem [4].

W latach osiemdziesiątych zaproponowano jedną z pierwszych praktycznych metod pomiarowych opartych na prądowym wymuszeniu wewnętrznym (LCSR - test) [5]. LCSR-test zaczęto wykorzystywać do wyznaczania stałych czasowych termorezystancyjnych i termoelektrycznych czujników temperatury [6] a także do wyznaczania dynamiki czujników ciśnienia [1]. Kolejne lata przyniosły rozwój techniki komputerowej i pozwoliły na cyfrową generację przebiegów czasowych o dowolnym kształcie. Umożliwiło to opracowanie i praktyczne wykorzystanie do badania dynamiki czujników różnych przebiegów wymuszających [2]. Najdokładniejsza okazała się metoda z zastosowaniem wieloczęstotliwościowych sygnałów binarnych (ang. *MBS - Multifrequency Binary Signals*) [7]. Dla czujników opisanych transmitancją pierwszego rzędu (1), pierwszego rzędu z opóźnieniem (2) i drugiego rzędu (3) eksperymentalne wyniki MBS-testu pokrywają się z wynikami otrzymanymi dla skokowego wymuszenia zewnętrznego (plunge-testu).

$$G(s) = \frac{k}{(1 + Ts)} \quad (1)$$

$$G(s) = k \frac{\exp(-sT_M)}{(1 + sT_N)} \quad (2)$$

$$G(s) = \frac{k}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} \quad (3)$$

gdzie  $k$  - stała,  $T$ ,  $T_M$ ,  $T_N$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  - stałe czasowe czujnika.

W przypadku czujników temperatury niezbędne jest posiadanie informacji nie tylko o chwilowych właściwościach dynamicznych, ale również o właściwościach statycznych czujnika. Traktując czujnik jako uniwersalne i kompletne narzędzie służące do pomiaru temperatury, nie można odrębnie traktować właściwości statycznych i właściwości dynamicznych [1]. Obie właściwości są od siebie niezależne, ale równie ważne. Pogorszenie właściwości dynamicznych czujnika np. poprzez oszronienie czy oblodzenie [8] może w pewnych przypadkach nie mieć istotnego znaczenia i nie wpływać na dokładność pomiaru. Zmiana właściwości statycznych czujnika zawsze prowadzi do powstania błędu pomiaru temperatury.

### 3. Rezystancyjny czujnik temperatury

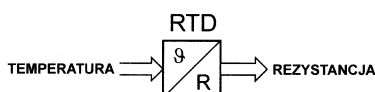
RTD są jednymi z najważniejszych i najczęściej wykorzystywanych w praktyce czujników do pomiaru temperatury. W przemyśle stosowane są prawie wyłącznie czujniki platynowe Pt100/0,00385 oraz w niektórych przypadkach Pt500/0,00385 lub Pt1000/0,00385. W oznaczeniu czujnika podano symbol chemiczny materiału z którego wykonany jest drut termoczuły opornika (Pt), rezystancję znamionową  $R_0$  (100  $\Omega$  w temperaturze  $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ ) oraz średni (w zakresie 0-100 $^\circ\text{C}$ ) temperaturowy współczynnik rezystancji  $\alpha$  a definiowany wg wzoru (4) [9, 10]:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad (4)$$

gdzie  $R_{100}$  - rezystancja czujnika w temperaturze 100 $^\circ\text{C}$

Popularność stosowania czujników platynowych wiąże się z ich dobrymi właściwościami metrologicznymi: dużą dokładnością pomiaru, szerokim zakresem mierzonej temperatury, dobrą stabilnością czasową i powtarzalnością właściwości fizycznych [11].

Na rys. 1 przedstawiono schematycznie model opisujący statyczne właściwości rezystancyjnego czujnika temperatury.



Rys. 1. Uproszczony model statycznej charakterystyki przetwarzania RTD;  $\vartheta$  - mierzona temperatura,  $R$  - rezystancja czujnika

Styczna charakterystyka przetwarzania czujnika Pt100 opisana jest równaniem (5)

$$R(\vartheta) = R_0(1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C(\vartheta - 100)\vartheta^3) \quad (5)$$

gdzie  $R(\vartheta)$  - rezystancja czujnika w temperaturze  $\vartheta$ ,  $R_0$  - rezystancja czujnika w temperaturze 0 $^\circ\text{C}$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  - współczynniki ( $C=0$  dla  $\vartheta > 0^\circ\text{C}$ ). Tolerancję temperaturową (dopuszczalną odchyłkę temperatury mierzonej od rzeczywistej) statycznej charakterystyki czujnika opisuje równanie (6)

$$\Delta_\vartheta(\vartheta) = \pm(a + b\vartheta) \quad (6)$$

gdzie  $a$ ,  $b$  - współczynniki. Odpowiadające jej dopuszczalne odchylenie rezystancji czujnika od rezystancji teoretycznej (opisanej równaniem 5) przedstawia wzór (7):

$$\Delta_R(\vartheta) = s \cdot \Delta_\vartheta = \pm R_0(A + 2B\vartheta)(a + b\vartheta) \quad (7)$$

gdzie  $s = dR/d\vartheta$  czułość opornika termometrycznego w temperaturze  $J$ .

W zastosowaniach przemysłowych korzysta się również z uproszczonego (liniowego) równania charakterystyki przetwarzania (8)

$$R(\vartheta) = R_0(1 + \alpha\vartheta) \quad (8)$$

definiując współczynnik kierunkowy prostej  $\alpha$  według wzoru (4).

W przypadku sprawdzania statycznej charakterystyki czujnika temperatury, uproszczenie zakładające liniowość charakterystyki

przetwarzania nie może być zastosowane. Mierzona temperatura  $\vartheta$  ( $\vartheta > 0^\circ\text{C}$ ) powinna być wyznaczona według wzoru (9) będącego rozwiązaniem równania (5), dla  $C=0$ .

$$\vartheta(R) = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B\left(\frac{R}{R_0} - 1\right)}}{2B} \quad (9)$$

gdzie  $R_0$ ,  $A$ ,  $B$  - współczynniki jak we wzorze (5). Współczynnik  $R_0$  może przyjmować wartość znamionową lub może zostać wyznaczony podczas kalibracji czujnika w punkcie topnienia lodu. Współczynniki  $A$ ,  $B$  przyjmuje się według normy [12] lub wyznacza indywidualnie dla danego termorezystora.

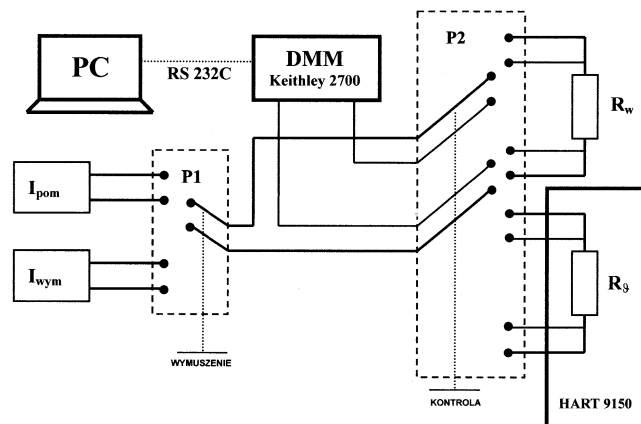
### 4. Koncepcja metody badawczej

Praca ma na celu opisanie możliwości sprawdzenia i przeprowadzenia ewentualnej korekcji statycznej charakterystyki przetwarzania rezystancyjnego czujnika temperatury bez konieczności demontażu czujnika z miejsca zainstalowania i przerwania na dłuższy czas jego pracy. Wynik testu ma odpowiedzieć na pytanie, czy czujnik jest sprawny i czy charakterystyka przetwarzania czujnika mieści się w dopuszczalnych granicach tolerancji odchylenia od charakterystyki nominalnej. Rezultatem przeprowadzonego testu diagnostycznego jest podanie informacji o utrzymaniu bądź nie utrzymaniu odpowiednich właściwości metrologicznych czujnika (określonych równaniami (5), (6), (7)) i ewentualnie wyznaczenie nowych współczynników definiujących wartości rezystancji  $R_0$  i współczynników  $A$ ,  $B$ .

Koncepcja metody badania właściwości statycznych czujnika przewiduje, że przed zamontowaniem w miejscu jego normalnej eksploatacji, czujnik nowy (działający prawidłowo) zostanie poddany testowi wstępnemu. Wyniki tego testu posłużą w przyszłości jako dane referencyjne do sprawdzenia zmian w charakterystyce statycznej czujnika. Czujnik temperatury dostarczony będzie do odbiorcy właśnie z takimi danymi. W razie wątpliwości co do jego prawidłowego działania, czujnik zostanie poddany ponownemu sprawdzeniu i porównując otrzymane wyniki z danymi odniesienia można będzie stwierdzić, czy charakterystyka przetwarzania jest zachowana w dopuszczalnych granicach tolerancji. Opisana metoda jest więc metodą umożliwiającą sprawdzenie właściwości statycznych rezystancyjnego czujnika temperatury bez konieczności jego demontażu z miejsca pracy.

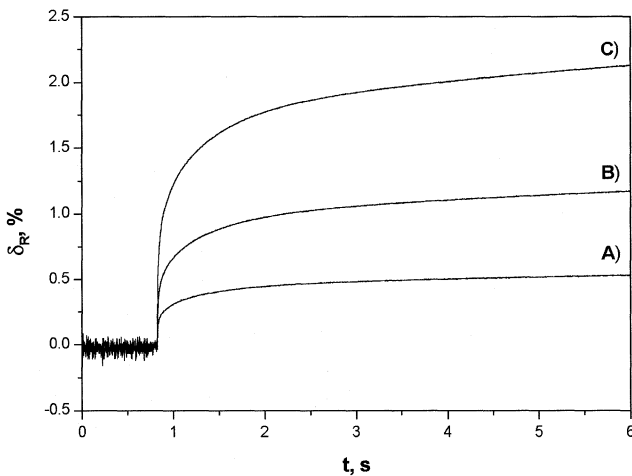
### 5. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy powinien zapewnić odpowiednią dokładność pomiaru oraz dostateczną czułość wykonywanego testu. Do przeprowadzenia wstępnych badań czujników zestawiono przedstawiony na rys. 2 układ pomiarowy.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

Układ pomiarowy składa się z dwóch stabilnych źródeł prądowych  $I_{pom}$ ,  $I_{wym}$ , rezystora wzorcowego  $R_w = (100 \pm 0,01) \Omega$ , termostatu HART 9150, multimetru Keithley 2700 oraz przełączników P1 i P2. W większości przypadków przemysłowy platynowy czujnik temperatury wykonywany jest w standardowo w czteroprzewodowym układzie połączeń [13]. W układzie badawczym zastosowano więc czteroprzewodowy pomiar rezystancji czujnika metodą Kelvina. W celu zapewnienia odpowiedniej dokładności, pomiar rezystancji czujnika odbywa się metodą porównania z rezystorem wzorcowym  $R_w$ . Prąd pomiarowy  $I_{pom} = 1$  mA ma wartość typową dla większości zastosowań IPRT. Zapewnia on dostateczną czułość pomiaru rezystancji oraz mały efekt samopodgrzewania się czujnika [14]. Na rys. 3 przedstawiono porównanie czasowych odpowiedzi czujnika Pt100 na wewnętrzne wymuszenie prądowe dla różnych wartości prądów wymuszających.



Rys. 3. Porównanie odpowiedzi czujnika Pt100 na LCSR-test dla różnych wartości prądu wymuszającego: A) 40 mA, B) 60 mA, C) 80 mA; t - czas,  $\delta_R$  - względny przyrost rezystancji czujnika

Przed rozpoczęciem testu diagnostycznego przełącznik P1 ustawiany jest w górnym położeniu a następnie mierzone są kolejno napięcia:  $U_{R_w}^{pom}$  (napięcie na rezystorze wzorcowym przy prądzie pomiarowym),  $U_{R_w}^{wym}$  (napięcie na rezystorze wzorcowym przy prądzie wymuszającym) oraz obliczane i adjustowane wartości prądu pomiarowego  $I_{pom}$  i prądu wymuszającego  $I_{wym}$ . Następnie przełącznik P2 podaje sygnał na rezystor termometryczny i mierzone jest napięcie  $U_{R_\theta}^{pom}$  (napięcie na czujniku przy prądzie pomiarowym). Po wykonaniu czynności przygotowawczych, przełącznikiem P1 podaje się na czas testu  $t$  prąd wymuszający i rejestrowana jest odpowiedź (10) w postaci ciągu próbek napięcia na czujniku w kolejnych punktach czasu  $t_i$ :

$$U_{R_\theta}^{wym} = [(t_0, U_0), \dots, (t_i, U_i), \dots] \quad (10)$$

przy czym spełniony jest warunek  $U_{R_\theta}^{wym}(t_0) = U_{R_\theta}^{pom}$ .

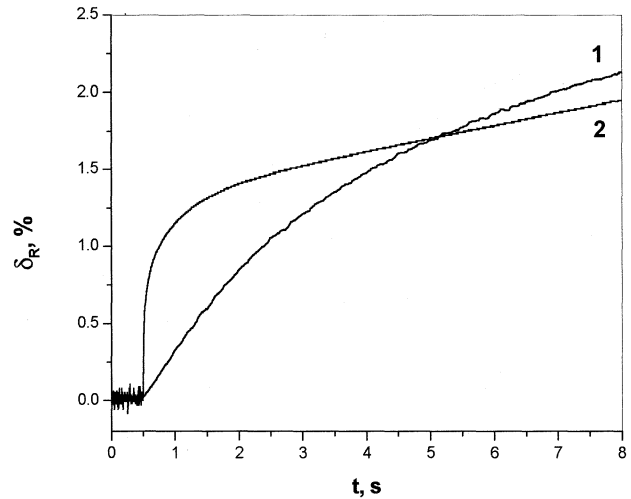
Po zakończeniu rejestracji przebiegu odpowiedzi czujnika obliczana jest jego rezystancja w stanie ustalonym (11)

$$R_\theta^{pom} = \frac{U_{R_\theta}^{pom}}{U_{R_w}^{pom}} R_w \quad (11)$$

oraz w stanie wymuszenia (12)

$$R_\theta^{wym}(t_i) = \frac{U_{R_\theta}^{wym}(t_i)}{U_{R_w}^{wym}} R_w \quad (12)$$

Na rys. 4 przedstawiono odpowiedź czujnika Pt100 na wewnętrzne wymuszenie prądowe. Dla porównania, na wykresie umieszczono również zarejestrowany przebieg odpowiedzi tego samego czujnika na skok temperatury. Oba pomiary przeprowadzono w zbliżonych warunkach pracy czujników (woda o temperaturze około 35°C).



Rys. 4. Porównanie odpowiedzi czujnika Pt100: 1 - wymuszenie zewnętrzne (skok temperatury), 2 - wymuszenie wewnętrzne (skok prądu)

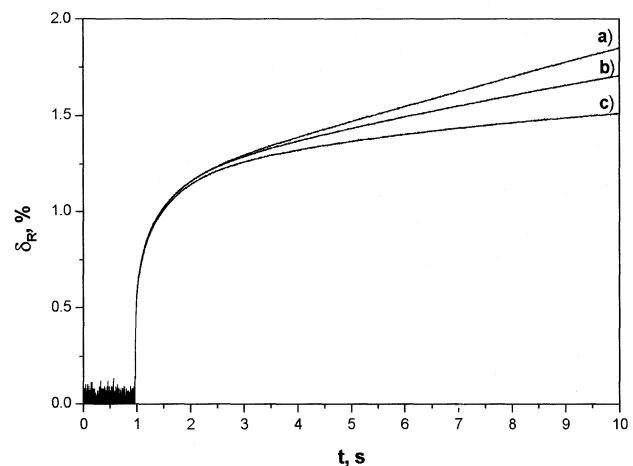
Dla porównania odpowiedzi różnych czujników konieczne jest uniezależnienie od temperatury ośrodka w którym umieszczony jest czujnik (czyli od rezystancji początkowej czujnika). Następuje więc przeliczenie rezystancji czujnika w stanie wymuszenia na względny przyrost rezystancji (13)

$$\delta_R(t_i) = \frac{R_\theta^{wym}(t_i) - R_\theta^{pom}}{R_\theta^{pom}} \quad (13)$$

lub stosunek rezystancji (14)

$$r(t_i) = \frac{R_\theta^{wym}(t_i)}{R_\theta^{pom}} \quad (14)$$

Przykładowe charakterystyki LCSR-testu dla różnych środowisk pracy czujnika Pt100 przedstawione są na rys. 5.



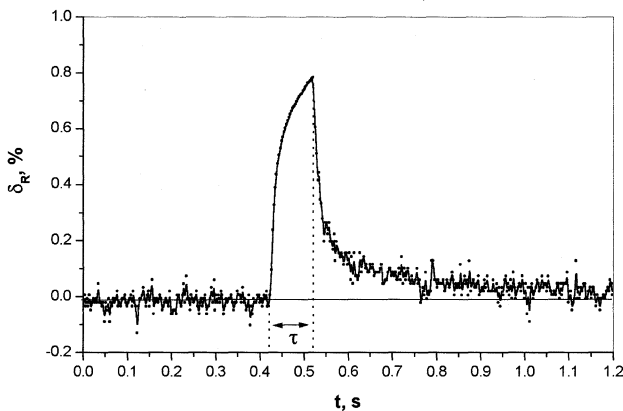
Rys. 5. Porównanie odpowiedzi czujnika Pt100 na skok prądu zasilającego dla różnych środowisk pracy: a) powietrze, b) olej, c) woda

## 6. Wyniki pomiarów

Porównując odpowiedzi czujników termorezystancyjnych na LCSR-test stwierdzono [15, 16], że początkowa część czasowej charakterystyki odpowiedzi czujnika na pobudzenie prądem o amplitudzie o wartości rzędu kilkudziesięciu mA nie zależy od rodzaju medium

otaczającego czujnik ani też od szybkości wymiany ciepła czujnika i otaczającego ośrodka. Dalsze prace [17] pozwalają stwierdzić, że przebieg odpowiedzi jest charakterystyczny tylko dla konkretnego czujnika. Pomiedzy czujnikami o różnych materiałach użytych do konstrukcji elementu termoczułego (Pt, Ni, Cu) a także o innych rozwiązaniach konstrukcyjnych występują różnice w odpowiedzi są znaczne.

Wstępne pomiary potwierdziły słuszność koncepcji zakładającej badanie odpowiedzi czujnika na wewnętrzny impuls prądowy. Na rys. 6 przedstawiono odpowiedź przemysłowego czujnika Pt100 na pobudzenie impulsem prądowym o amplitudzie  $A=100$  mA i czasie trwania  $\tau=100$  ms. Jak widać, czas trwania impulsu  $\tau$  jest względnie długi i w procesie przewodzenia ciepła przez termorezystor dominującą rolę zaczęły przejmować kolejne warstwy konstrukcyjne termopornika.



Rys. 6. Odpowiedź przemysłowego czujnika Pt100 na wewnętrzne wymuszenie impulsowe

Konieczność uniezależnienia od wpływu zmian warunków zewnętrznych medium otaczającego czujnik (zmiana współczynnika wnikania ciepła na powierzchni obudowy czujnika) narzuca warunki pobudzenia czujnika prądem o czasie znacznie krótszym niż czas potrzebny do rozpoczęcia kolejnych etapów rozprzestrzeniania się ciepła w termorezystorze.

Obecnie testowany jest układ pozwalający pobudzać czujnik impulsami prądowymi o dokładnie zdefiniowanym i powtarzalnym czasie trwania poniżej 1 ms i amplitudzie impulsu nastawianej od 100 do 1000 mA z odpowiednią rozdzielczością i możliwością dokładnej adjustacji wartości maksymalnej. Podczas badań zostaną wyznaczone charakterystyki względnego przyrostu rezystancji  $\delta_R$  w funkcji amplitudy prądu wymuszającego  $A$  przy stałym czasie trwania impulsu  $\tau$  (charakterystyki referencyjne). Następnie czujnik poddany zostanie sztucznemu starzeniu pod wpływem działania różnych czynników zewnętrznych mogących wywierać destrukcyjny skutek na statyczną charakterystykę przetwarzania [3, 17].

Do celów badawczych wybrano najbardziej prawdopodobne w przemyśle procesy destrukcyjne:

- termiczne (umieszczenie czujnika w temperaturze przekraczającej dopuszczalną temperaturę jego pracy, cykliczne ogrzewanie i szybkie chłodzenie termorezystora),
- mechaniczne (drżania mechaniczne o różnej częstotliwości i amplitudzie zadawane w osi poprzecznej i podłużnej czujnika),
- środowiskowe (umieszczenie czujnika w atmosferze chemicznie agresywnej - np. siarki, działanie promieni jonizujących).

Po zestarzeniu, czujnik poddany zostanie ponownemu testowi diagnostycznemu w celu sprawdzenia aktualnych właściwości statycznych i podjęcia decyzji o dopuszczeniu do dalszej eksploatacji.

## 7. Podsumowanie

Zaproponowana metoda umożliwi diagnostykę statycznych właściwości przemysłowego rezystancyjnego czujnika temperatury bez

konieczności jego demontażu z miejsca zainstalowania. Efektem przeprowadzonego testu będzie stwierdzenie, czy czujnik nie jest uszkodzony i czy zachowane są metrologiczne właściwości czujnika, zbliżone do tych jakie posiada czujnik przed rozpoczęciem eksploatacji. Podstawowe zadanie polega na sprawdzeniu, czy aktualna charakterystyka statyczna czujnika nie odbiega od charakterystyki nominalnej poza dopuszczalne granice tolerancji.

W praktyce, czujnik przed zamontowaniem poddany zostanie testowi diagnostycznemu i zostanie mu przypisana odpowiednia charakterystyka (dane referencyjne). Po kilku latach użytkowania, w razie podejrzenia, że dokładność przetwarzania związana z działającymi czynnikami destrukcyjnymi nie jest zachowana, czujnik zostanie ponownie poddany testowi. W zależności od jego wyniku podjęta zostanie decyzja o dopuszczeniu czujnika do dalszej eksploatacji lub o konieczności jego demontażu i poddaniu kalibracji w warunkach laboratoryjnych.

## Literatura

- [1] H. M. Hashemian: Effects of normal aging on calibration and response time of nuclear plant resistance temperature detectors and pressure sensors. Nuclear Safety 1994, no 2.
- [2] J. Wojturski, A. Kowalczyk: Diagnostyka rezystancyjnych czujników temperatury za pomocą wymuszeń wewnętrznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 192, seria Elektrotechnika, 2001, z. 22.
- [3] J. Wojturski, A. Kowalczyk: Dosлідження charakterystyk rezystancyjnych termopretworjuwacziv metodom ich wnutrisznoho zbudžennja. Wymirjuwalna Technika ta Metrolohija 2001, nr 58.
- [4] L. Jackowska-Strumiłło, J. Kucharski, D. Sankowski: On-line and in-situ identification of resistance temperature sensors dynamics by the use of multifrequency signals. Methods and Models in Automation and Robotics 1996.
- [5] T.W. Kerlin, H.M. Hashemian, K.M. Petersen: Response characteristics of temperature sensors installed in processes. Acta IMECO 1982.
- [6] H. M. Hashemian: In situ response time testing of thermocouples. ISA Transactions 1990, no 4.
- [7] L. Jackowska-Strumiłło, D. Sankowski, J. McGhee, I.A. Henderson: Modelling and MBS experimentation for temperature sensors. Measurement 1997, no 1.
- [8] A. Łukjaniuk, J. Makal: Analiza numeryczna dynamicznych właściwości czujnika temperatury w warunkach oblodzenia i szronienia. XXIX Międzynarodowa Konferencja Metrologów MKM'97, Nałęczów 1997.
- [9] J. G. Webster: The measurement, instrumentation and sensors handbook. CRC-Press, Boca Raton 1999.
- [10] R. E. Bentley: Handbook of Temperature Measurement, vol. 1-3. Springer-Verlag, Singapore 1998.
- [11] H. M. Hashemian, K. M. Petersen: Achievable accuracy and stability of industrial RTDs. Temperature, its measurement and control in industry and science. American Institute of Physics 1992.
- [12] Polska Norma PN-EN 60751+A2. Czujniki platynowe przemysłowych termometrów rezystancyjnych. Polski Komitet Normalizacyjny 1997.
- [13] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski: Termometria - Przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1998.
- [14] L. Olkuśnik: Efekt samopodgrzewania się termometrycznych czujników rezystancyjnych. Pomiary Automatyka Kontrola 1985, nr 5.
- [15] B. M. Atamanczuk, F. Bernhard, O. W. Sljusarenko, B. I. Stadnyk: Kontrol parametriv termopretworjuwacziv oporu w umowach eksploataciji. Wymirjuwalna Technika ta Metrolohija 1999, nr 54.
- [16] B. M. Atamanczuk: Perewirka statyčnoj charakterystyky termorezystywnych peretworjuwacziv szljachom nahriwu elektrycznym strumom. Dysertacja na zdobuttja naukowoho stupenja kandydata technicznych nauk. Lwiv 1997.
- [17] J. Wojturski, A. Kowalczyk: Zastosowanie impulsowego wymuszenia prądowego do diagnostyki rezystancyjnych czujników temperatury. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 192, seria Elektrotechnika, 2001, z. 22.

**Title:** Diagnosis of the industrial resistance temperature detectors by means of internal forcing

Artykuł recenzowany