

Jarosław MAKAL
Politechnika Białostocka
Zakład Metrologii

O MOŻLIWOŚCI ZWIĘKSZENIA DOKŁADNOŚCI POMIARU W KOMPUTEROWYM SYSTEMIE POMIARU TEMPERATURY O STRUKTURZE OTWARTEJ¹

Streszczenie. W niniejszej pracy opisano tor pomiarowy systemu komputerowego do pomiaru temperatury i obliczono niepewność pomiaru, przy założeniu że znane są parametry metrologiczne elementów toru. Na podstawie sporządzonego tzw. budżetu niepewności przeanalizowano możliwość zwiększenia dokładności pomiaru poprzez zastosowanie dokładniejszych elementów.

ON POSSIBILITY OF INCREASE IN THE ACCURACY IN THE COMPUTER OPEN SYSTEM FOR TEMPERATURE MEASUREMENT

Summary. In this paper metrological estimation of real model of computer measuring system is described. Uncertainties of individual elements of the measuring track are taken into consideration and the law of propagation is applied. Real results are calculated and the analysis of respective components determining the possibilities and limits in decreasing the uncertainty of the mentioned system is presented.

1. WSTĘP

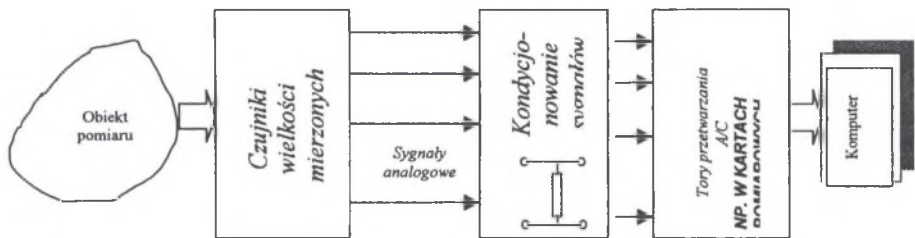
Rozważania zawarte w niniejszej pracy dotyczą systemu pomiarowego o strukturze scentralizowanej, tzn. takiej, w której wszystkie zadania programowe są wykonywane w jednym komputerze. Schemat blokowy takiego systemu pomiarowego przedstawiono na rys. 1.

Dokładność systemu pomiarowego jest zazwyczaj jednym z najważniejszych parametrów decydujących o jego wyborze do konkretnego zastosowania. Uniwersalność większości komputerowych systemów pomiarowych sprawia, iż najczęściej wielkością mierzoną jest napięcie (w różnych zakresach) lub prąd (w standardzie 4-20 mA lub innym). Sygnały te mogą pochodzić bezpośrednio od czujników bądź od przetworników, w których czujnik jest

¹ Praca wykonana w ramach projektu W/WE/10/98

podstawowym elementem. Częste zastosowanie znajdują też karty pomiarowe przystosowane do czujników parametrycznych, których wielkościami wyjściowymi są: rezystancja, indukcyjność i pojemność zależne od wielkości wejściowej. Z punktu widzenia oceny niedokładności takie systemy są „niedekomponowalne”. Oznacza to, iż:

- o system może posiadać właściwości nie będące funkcją cech, jakie ma każdy jego element z osobna rozważany poza układem;
- o posiadanie przez elementy systemu określonych cech nie wystarcza, aby miał je układ powstały w wyniku złożenia tych elementów.



Rys. 1. Ogólny schemat blokowy systemu pomiarowego o strukturze scentralizowanej
Fig. 1. General block diagram of measuring system with centralized structure

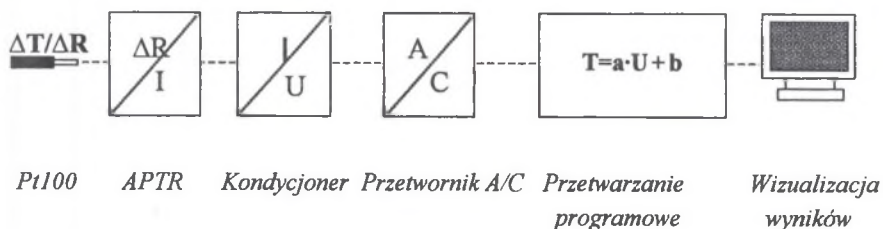
Najprostszym sposobem wyznaczenia dokładności systemu jest jego kalibracja, czyli wzorcowanie. Wymaga ona jednak posiadania wzorca wielkości mierzonej, co w wielu przypadkach jest trudne do spełnienia lub powoduje wzrost kosztów tej czynności. Jeśli system jest zamknięty, to czynność tę przeprowadza jego producent. Najczęściej użytkownik (projektant) zbudowanego przez siebie systemu pomiarowego zna jedynie parametry metrologiczne poszczególnych elementów systemu i powinien na ich podstawie oszacować niepewność pomiaru. Zadanie to wymaga wiedzy o sposobie i naturze przetwarzania sygnałów pomiarowych w rozpatrywanym systemie. Należy też odpowiedzieć na pytanie, czy zastosowanie np. innego (droższego) elementu o lepszych własnościach metrologicznych wpłynie znacząco na zwiększenie dokładności całego systemu.

2. TOR POMIAROWY

W każdym miejscu toru pomiarowego, począwszy od czujnika, a skończywszy na wizualizacji wyniku w postaci wydruku lub na ekranie monitora, zachodzą procesy, które mają wpływ na wynik, a nie są uwzględniane w trakcie samego pomiaru. W tzw. części analogowej systemu (od obiektu do przetwornika A/C) są to: niedokładność przetwarzania natury sygnału w samym czujniku (np. temperatury na zmianę rezystancji w termorezystorze lub temperatury na napięcie w termoelemencie), niestabilność źródła odniesienia (zasilania) dla sygnałów elektrycznych, niedokładność elementów kondycjonujących (np. wysokostabilnych rezystorów pomiarowych) itd. W części cyfrowej systemu głównymi

źródłami niedokładności są: przetwarzanie analogowo-cyfrowe [1], a w nim np. błędy kwantowania, błędy wynikające ze skończonej długości słowa przetwornika itd. oraz w przypadku pomiarów pośrednich niedokładności wyznaczania parametrów funkcji przetwarzania. Nie wymieniono tutaj wszystkich źródeł błędów, lecz jedynie te, które projektant czy użytkownik może zmniejszyć przy zachowaniu odpowiedniej relacji pomiędzy ceną i jakością.

Dalsze rozważania dotyczyć będą toru pomiarowego (rys.2) składającego się z kaskadowego połączenia czujnika temperatury, przetwornika wejściowego APTR, układu kondycjonowania sygnału (rezystor pomiarowy) i właściwego układu pomiarowego (np. komputera z kartą pomiarową zawierającą przetwornik A/C). Tor ten może być przeznaczony do pomiaru temperatury w obiektach rozproszonych (stąd pętla prądowa).



Rys.2. Elementy toru do pomiaru temperatury

Fig.2. Exemplary track for temperature measurement

Rozpatrywano pomiar statyczny temperatury. Uwzględniono tutaj przede wszystkim te elementy, które mają zasadniczy wpływ na niedokładność pomiaru. Zakłada się, że zastosowano wszelkie środki zapewniające ograniczanie wpływu otoczenia i samego systemu (np. zmiana napięcia zasilania, rezystancja połączeń itp.) na wynik pomiaru.

3. PARAMETRY TORU POMIAROWEGO

Elementy toru pomiarowego mają następujące wartości parametrów (dane katalogowe):

- Czujnik Pt 100: zakres $- 50 \div 500^{\circ}\text{C}$, niedokładność $\delta T = 0,2\%$ (całego zakresu), $\alpha = 0,00385$;
- Przetwornik APTR: zakres $0 \div 200^{\circ}\text{C}$, klasa dokładności $k = 0,25$, $I_{wy} = 4+20 \text{ mA}$;
- Kondycjoner: rezystor pomiarowy wysokostabilny $R_p = 249 \Omega$, tolerancja $0,1\%$, współczynnik temperaturowy $TC = 15 \text{ ppm}$ (przyjęto maksymalną zmianę temperatury otoczenia o 20°C więc $\frac{\delta R_p}{R_p} = 0,001 + 3 \cdot 10^{-4} = 0,0013$);
- Przetwornik A/C: AD 774BJN, 12-bitowy, o dokładności przetwarzania $0,1\% \pm 1 \text{ LSB}$ (wynika stąd, iż dokładność przetwornika jest równa $0,001 \cdot 2^{12} + 1 \approx 5 \text{ bitów}$);

- Przetwarzanie programowe: przyjęto równanie odtwarzania o postaci

$$T = aU_X + b, \quad (1)$$

gdzie:

T – wartość wielkości mierzonej, U_X – wartość wielkości wejściowej przetwornika A/C,
 a , b – współczynniki wyznaczone wg zależności

$$a = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}}, \quad b = T_{\max} - aU_{\max}, \quad (2)$$

T_{\max} , T_{\min} – wartość maksymalna i minimalna wielkości mierzonej (zakres),

U_{\max} , U_{\min} – wartość maksymalna i minimalna wielkości wejściowej (napięcia).

Uwaga: Wyznaczenie współczynników a , b (skalowanie) można przeprowadzić na różne sposoby [10] zależnie od wyposażenia laboratorium i umiejętności użytkownika.

Trzeba jednak pamiętać, że ma to bezpośredni wpływ na wartość obliczanej niepewności (patrz p. 4.1).

4. OBLICZANIE NIEPEWNOŚCI POMIARU

Estymatę wartości wielkości mierzonej (temperatury) wyznacza się z równania

$$\hat{T} = \hat{a}\hat{U}_X + \hat{b}, \quad (3)$$

gdzie:

\hat{U}_X – estymata wartości prawdziwej wielkości wejściowej (napięcia),

\hat{a} , \hat{b} – estymaty wartości wyznaczonych współczynników a i b (dane spoza pomiaru).

Równanie pomiaru będące podstawą do obliczenia niepewności pomiaru ma więc postać

$$\hat{T} = f(\bar{U}_X + \xi, \hat{a}, \hat{b}). \quad (3a)$$

Ponieważ U_X jest mierzone bezpośrednio (i przetwarzane na wynik końcowy), więc jego estymata \hat{U}_X jest równa średniej arytmetycznej N pomiarów dokonanych w warunkach powtarzalności skorygowanej poprawką ξ o nieznaną wartość korygującą oddziaływania systematyczne na wyniki pomiarów (teoria niepewności unika używania pojęcia błędu systematycznego)

$$\bar{U}_X = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N U_X(n), \quad (4)$$

$U_X(n)$ – wynik pojedynczego pomiaru.

Zakłada się, że wielkości występujące w równaniu (3a) nie są ze sobą skorelowane. Do obliczenia niepewności standardowej $u(\hat{T})$ estymaty \hat{T} stosuje się prawo propagacji niepewności [3], [8], [9], [11], z którego otrzymuje się (ściślej jest to jej wariancja)

$$u^2(\hat{T}) = G_1^2 [u^2(\bar{U}_X) + u^2(\xi)] + G_2^2 u^2(\hat{a}) + G_3^2 u^2(\hat{b}), \quad (5)$$

gdzie:

$$G_1 = \frac{\partial T}{\partial U_X} = \hat{a} \text{ - współczynnik wrażliwości funkcji pomiaru (3) na wielkość wejściową } U_X,$$

$$G_2 = \frac{\partial T}{\partial a} = \hat{U}_X \text{ - współczynnik wrażliwości funkcji pomiaru (3) na wielkość } a,$$

$$G_3 = \frac{\partial T}{\partial b} = 1 \text{ - współczynnik wrażliwości funkcji pomiaru (3) na wielkość } b,$$

$u(\bar{U}_X)$ - niepewność standardowa średniej arytmetycznej serii pomiarów U_X (liczona metodą typu A),

$u(\xi)$ - niepewność standardowa poprawki ξ (jest to inaczej niepewność standardowa typu B napięcia U_X),

$u(\hat{a}), u(\hat{b})$ - niepewności standardowe wartości a i b danych spoza pomiaru (również liczone metodą typu B).

4.1. Składowe niepewności standardowej

W zależności (5) można wyróżnić dwie składowe:

niepewność liczoną metodą typu A

$$u_A^2(\bar{T}) = G_1^2 u^2(\bar{U}_X) = s^2(\bar{T}) \quad (5a)$$

oraz niepewność liczoną metodą typu B

$$u_B^2(\bar{T}) = G_1^2 u^2(\xi) + G_2^2 u^2(\hat{a}) + G_3^2 u^2(\hat{b}). \quad (5b)$$

4.1.1. Niepewność standardowa średniej arytmetycznej serii pomiarów U_X

Komputerowy system pomiarowy umożliwia przeprowadzenie dużej ilości pomiarów bezpośrednich przy spełnieniu założenia o niezmienności warunków pomiaru (powtarzalności), stąd

$$u^2(\bar{U}_X) = s^2(\bar{U}_X) = s^2(U_X) / N, \quad (6)$$

$$s^2(U_X) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [U_X(n) - \bar{U}_X]^2, \quad (7)$$

N - ilość dokonanych pomiarów.

Dla dużych N , np. $N = 10^4 + 10^6$ wartość $u^2(\overline{U}_X)$ jest niewielka i można ją zaniedbać, jeśli w relacji do niepewności $u_B^2(\overline{T})$ nie wniesie znaczącego wkładu do zależności (5).

4.1.2. Niepewność standardowa liczona metodą typu B

- Dla toru pomiarowego z rys.2 ξ jest nieznaną poprawką wynikającą z niedokładności wyznaczenia napięcia U_X . Poprawkę tę traktuje się jako zmienną losową o rozkładzie prostokątnym [9] w przedziale $(-\delta U_{Xm}, +\delta U_{Xm})$ i wariancji

$$u^2(\xi) = \sigma^2(\xi) = \frac{\delta^2 U_{Xm}}{3}. \quad (8)$$

Ponieważ napięcie U_X jest „produktem” działania przetwornika wejściowego i układu kondycjonowania, więc należy uwzględnić tu niedokładności tych elementów toru pomiarowego

$$U_x = R_p i, \quad (9)$$

R_p – rezystancja precyzyjnego rezystora pomiarowego wysokostabilnego,
 i – prąd z przetwornika wejściowego (tutaj: temperatura/zmiana rezystancji/prąd).

W przetworniku APTR zachodzi przetwarzanie sygnału zmiany rezystancji czujnika termorezystancyjnego Pt 100 na sygnał prądowy wg zależności

$$i = \frac{U_{wz}}{R_{Pt100}}, \quad (10)$$

gdzie U_{wz} – napięcie źródła odniesienia w przetworniku, R_{Pt100} – rezystancja czujnika Pt100 zależna od mierzonej temperatury $R_{Pt100} = R_0 (1 + \alpha T)$ (ale niezależna od U_{wz}).

Na podstawie (9) i (10) otrzymujemy

$$U_X = R_p \frac{U_{wz}}{R_{Pt100}}. \quad (11)$$

Górne ograniczenie δU_{Xm} można obliczyć z następującej zależności

$$\frac{\delta U_{Xm}}{U_X} = \frac{\delta R_p}{R_p} + \frac{\delta U_{wz}}{U_{wz}} + \frac{\delta R_{Pt100}}{R_{Pt100}}, \quad (12)$$

gdzie:

$$\frac{\delta R_p}{R_p}, \frac{\delta U_{wz}}{U_{wz}}, \frac{\delta R_{Pt100}}{R_{Pt100}}$$

maksymalne błędy względne: rezystora pomiarowego (w kondycjonerze), przetwornika temperatura/prąd i czujnika Pt100 (ich wartości przyjmuje się jako równe klasom dokładności tych elementów).

- Niepewności standardowe wyznaczania estymat \hat{a} i \hat{b} .

Oblicza się je z błędów granicznych δa i δb jako:

$$u(\hat{a}) = \frac{\delta a}{\sqrt{3}}, \quad u(\hat{b}) = \frac{\delta b}{\sqrt{3}}. \quad (13)$$

Na podstawie wzoru (2) względne błędy graniczne wyznaczania wartości a i b są dane zależnościami:

$$\frac{\delta a}{a} = \frac{\delta T_{\max} + \delta T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} + \frac{\delta U_{\max} + \delta U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}}, \quad (14)$$

$$\frac{\delta b}{b} = \frac{\delta T_{\max} + U_{\max} \delta a + a \delta U_{\max}}{T_{\max} - a U_{\max}}, \quad (15)$$

gdzie: δT_{\max} , δT_{\min} , δU_{\max} , δU_{\min} - błędy graniczne określenia odpowiednio wartości T_{\max} , T_{\min} , U_{\max} , U_{\min} w procesie wyznaczania estymat współczynników a i b .

Uwaga:

- przy tej czynności można np. ustawić wartości napięcia U_{\max} i U_{\min} za pomocą woltomierza. W takim przypadku δU_{\max} będzie granicznym błędem wskazań użytego przyrządu (do skalowania toru pomiarowego opisanego w niniejszej pracy użyto woltomierza magnetoelektrycznego ze wskazówką świetlną, klasie dokładności 0,2 i zakresach 1 V i 5 V. Wartości napięć U_{\max} , U_{\min} wynikają z iloczynu wartości rezystancji R_p i prądu i (20 mA, 4 mA):

$$U_{\max} = 4,980 \text{ V}, \quad U_{\min} = 0,996 \text{ V}, \quad \delta U_{\max} = 0,010 \text{ V}, \quad \delta U_{\min} = 0,002 \text{ V}.$$

- wartości δT_{\max} , δT_{\min} można obliczyć znając błąd przetwarzania przetwornika A/C. Zwykle podaje się go dla całego zakresu przetwarzania +/- najmniej znaczący bit (dokładność rozpatrywanego przetwornika jest równa 5 bitów), więc $\delta T_{\max} = 5 \frac{T_{\max} - T_{\min}}{4095 - 819}$, liczba 819 odpowiada $T_{\min} = 0$). Pomija się inne źródła błędów w tym elemencie.

5. WYNIKI OBLICZEŃ

W opisanym torze pomiarowym wyszczególniono (tabela 1) wpływ poszczególnych elementów na wartość niepewności standardowej liczonej metodą typu B (wartość składnika $u_A^2(\bar{T}) = a^2 u^2(\bar{U}_X)$ jest mniejsza od $0,01^\circ\text{C}$, więc można go zaniedbać).

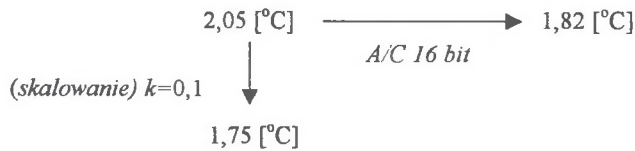
Tabela 1

$u_B^2(\hat{T}) = a^2 u^2(\xi) + U_x^2 u^2(\hat{a}) + u^2(\hat{b})$	niepewność standardowa $u(\hat{T}) = u_B(\hat{T})$
$a^2 u^2(\xi)$	składnik zależny od: - dokładności czujnika Pt 100, - dokładności przetwornika APTR, - dokładności kondycjonera
$U_x^2 u^2(\hat{a}) + u^2(\hat{b})$	składnik zależny od: - dokładności wyznaczenia (skalowania) współczynników a i b , - dokładności i rozdzielczości przetwornika A/C

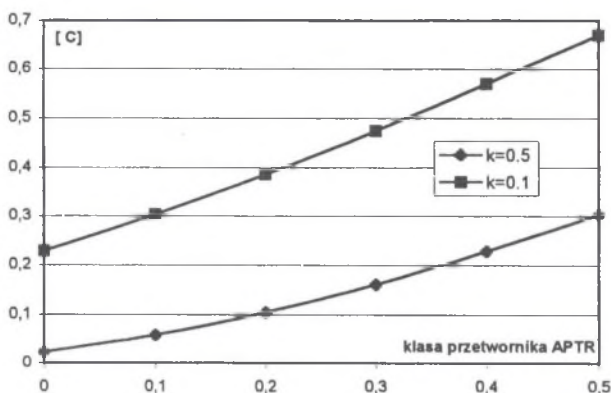
Niepewność standardową $u(\hat{T}) = 2,05^\circ\text{C}$ obliczono wg zależności (5), przyjmując podane wcześniej wartości parametrów (m.in.: $\frac{\delta U_{wz}}{U_{wz}} = 0,002$, $\frac{\delta R_{Pt100}}{R_{Pt100}} = 0,005$).

Następnie sprawdzono, jak zmienia się wartość $u(\hat{T})$, jeżeli:

- zastosuje się przetwornik A/C 16-bitowy o dokładności przetwarzania $0,1\% \pm 1\text{LSB}$;
- do skalowania wykorzystany zostanie np. woltomierz o klasie dokładności 0,1;



W celu zilustrowania wpływu wartości klasy dokładności przetwornika APTR i czujnika obliczono $u(\hat{T}) = 1,62^\circ\text{C}$ dla idealnych elementów, a następnie przy różnych wartościach $\frac{\delta U_{wz}}{U_{wz}}$ [0,1; 0,5%] i $\frac{\delta R_{Pt100}}{R_{Pt100}}$ [0,1; 0,5%]. Przyrost (zwiększenie) wartości $u(\hat{T})$ w funkcji tych parametrów przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Wpływ klasy dokładności czujnika ($k = 0,1$ i $k = 0,5$) i przetwornika APTR na bezwzględny przyrost wartości niepewności standardowej (oś pionowa)

Fig.3. Influence of sensor and transducer accuracy on arbitrary increment of uncertainty

6. WNIOSKI

W każdym systemie pomiarowym znajdują się elementy, które przetwarzają wielkość mierzoną i odpowiadający jej sygnał z ograniczoną dokładnością. Dokładność toru pomiarowego będącego połączeniem kaskadowym poszczególnych elementów nie będzie lepsza niż dokładność „najgorszego” (najmniej dokładnego) z nich. Obliczone wartości niepewności potwierdzają tę zasadę. Wybór sposobu zmniejszenia niepewności należy do użytkownika, który musi zdecydować, czy uzyskany rezultat uzasadni koszt zastosowania (kupna) lepszego elementu. Na przykład w rozważonych przypadkach otrzymuje się przecież zmniejszenie niepewności o ułamki stopnia. Analiza sumy $u^2(\hat{T})$ wskazuje, iż podczas skalowania układu pomiarowego następuje wielokrotnienie niedokładności przez wartość współczynnika α (pierwsze dwa składniki sumy w tabeli 1). Ponieważ nie można uniknąć tej czynności, więc należy przede wszystkim dążyć do jak najlepszego dostosowania zakresów pomiarowych elementów toru do mierzonych wartości.

LITERATURA

1. Betta G., Liguori C.,Pietrovento A.: Propagation of uncertainty in a discrete Fourier transform algorithm. Measurement 27 (2000) p.231-239.
2. Gajda J., Szyper M.: Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych. Kraków 1998.
3. Jaworski J.M: Błąd i niepewność pomiarów pośrednich. Pomiary, Automatyka, Robotyka 1999, nr 10.
4. Jakubiec J.: Systemy pomiarowe w świecie informacji. XXXII MKM, Rzeszów 2000.

5. Makal J.: Błąd i niepewność na przykładzie pomiaru temperatury. Materiały XXXI Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów, Białystok 1999.
6. Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.: Termometria. Przyrządy i metody. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 1998.
7. Piotrowski J., Kostyrko K.: Wzorcowanie aparatury pomiarowej. PWN, Warszawa 2000.
8. Taylor J.R.: Wstęp do analizy błęd pomiarowych. PWN, Warszawa 1995.
9. Turzeniecka D.: Podstawowe zagadnienia oceny niepewności. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 1998, nr 9.
10. Wawrzyniak M.: Ocena metrologiczna komputerowego systemu pomiarowego do zdalnego pomiaru temperatury. Materiały konferencji naukowej: Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemśle, WSI, Zielona Góra 1996;
11. Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. GUM, 1999.

Recenzent: Dr hab. inż. Tadeusz Skubis
prof. Politechniki Śląskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 stycznia 2001 r.

Abstract

Most measurements in computer systems begin with a transducer, a device that converts a measurable physical quality, such as temperature, strain, etc. to an electrical signal. Sometimes we can prefer a sensor and actuator singly in this device. The next element is a module for signal conditioning which converts a transducer's signal so that an analog-to-digital converter (AD) can measure the signal. The AD output digital signal is transferred to the computer for processing, graphing and storage. In this paper a system for temperature measurement is described and its uncertainty is calculated. The following process equation is taken into consideration.

$$T = aU_x + b$$

The coefficients a , b are calculated in the process of standardization. User or designer of such a system usually knows the parameters of individual element of measuring track and his work is to estimate the uncertainty of this track and on the base of this result to determine if a replacement of any element is necessary or not. For calculation of uncertainty the law of propagation is applied.

$$u^2(\hat{T}) = G_1^2 u^2(\bar{U}_x) + G_1^2 u^2(\xi) + G_2^2 u^2(\hat{a}) + G_3^2 u^2(\hat{b}).$$

Each component of this sum depends on various parameters. The influence of real values of the accuracy of sensor, actuator, AD converter and the process of standardization on the total uncertainty is precised. The analysis of respective components determining the possibilities and limits in decreasing the uncertainty of the mentioned system is presented in this paper.