

Michał LISOWSKI

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, INSTYTUT PODSTAW ELEKTROTECHNIKI I ELEKTROTECHNOLOGII,
INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI, ODDZIAŁ TECHNOLOGII I MATERIAŁOZNAWSTWA ELEKTROTECHNICZNEGO

Wpływ niepewności odczytu z wzorcowanego przyrządu na niepewność jego wzorcowania

Dr hab. inż. Michał LISOWSKI

W 1968 r. ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej. Stopień doktora n.t. uzyskał w 1975 r., a doktora habilitowanego w 1990 r. Jest profesorem nadzwyczajnym Politechniki Wrocławskiej. W swoich pracach naukowych zajmuje się problemami wzorcowania przyrządów pomiarowych, systemami pomiarowymi do badania nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego, badaniami materiałów elektroizolacyjnych, a także normalizacją i prawem technicznym.



e-mail: lisowski@iel.wroc.pl

Streszczenie

Celem wzorcowania przyrządów pomiarowych jest wyznaczenie ich błędów wskazań. Niepewność przyrządu wzorcowego i niepewność odczytu z przyrządu wzorcowanego są głównymi źródłami niepewności wzorcowania. Ta niepewność odczytu jest często pomijana podczas oceny niepewności wzorcowania, a przeważnie ma ona największy udział w bilansie niepewności. Na te problemy zwrócono szczególną uwagę.

Słowa kluczowe: wzorcowanie przyrządów, niepewność wzorcowania, niepewność odczytu.

Influence of the uncertainty of read-out with the calibrating meter in its the calibration uncertainty

Abstract

Delimitation of indications errors is the aim of calibration of the measuring instruments. The uncertainty of standard instrument and the uncertainty of read-outs with the calibrating meter are the main sources of calibration uncertainty. This uncertainty of read-out is often omitted during estimation of the calibration uncertainty, thought it has often the largest contribution in the balance of uncertainty. These problems are addressed with a special attention.

Keywords: calibration of meters, calibration uncertainty, uncertainty of read-out.

1. Wstęp

Celem wzorcowania przyrządów pomiarowych jest przypisanie wskazaniom przyrządu pomiarowego poprawnych wartości. Można to osiągnąć przez porównanie wskazań przyrządu z wartościami, które można uznać za poprawne. Nośnikami tych poprawnych wartości są wzorce wielkości fizycznych lub przyrządy wzorcowe, których niepewności są znacznie mniejsze niż dopuszczalne granice błędów wzorcowanych przyrządów. Wzorcowanie przyrządów pomiarowych ma więc na celu wyznaczenie systematycznych błędów wskazań przyrządów pomiarowych i porównanie ich z dopuszczalnymi wartościami błędów podstawowych.

Błąd bezwzględny wskazań wzorcowanego przyrządu pomiarowego oblicza się ze wzoru:

$$\Delta X = X_m - X_w, \quad (1)$$

w którym X_m jest wartością wskazaną przez przyrząd pomiarowy, a X_w - wartością wzorcową. Natomiast błąd względny:

$$\delta X = \frac{\Delta X}{X_w} 100 = \frac{X_m - X_w}{X_w} 100 \cong \frac{X_m - X_w}{X_m}. \quad (2)$$

Błąd systematyczny wskazania przyrządu pomiarowego można wyeliminować przez wprowadzenie poprawki:

$$p = -\Delta X. \quad (3)$$

Poprawka dodana do wartości odczytanej daje skorygowany wynik wskazania, równy wartości poprawnej:

$$X_p = X + p. \quad (4)$$

Wyznaczona wartość błędu ΔX lub poprawki p jest jednak obciążona niepewnością, którą należy podać w świadectwie wzorcowania zgodnie z dokumentem EA-4/02 [1]. Dokument ten jest rozszerzeniem przewodnika do wyrażania niepewności pomiarów [2]. Podczas szacowania niepewności pomiarów może być pomocna literatura książkowa [3-5] oraz liczne na ten temat publikacje w czasopismach naukowo-technicznych i referaty na konferencjach. Nie precyzują one jednak jasno jak uwzględniać czynniki wpływające na niepewność wzorcowania. Do często pomijanych składowych niepewności należy niepewność odczytu z przyrządu wzorcowanego, a może ona być decydującą składową, znacznie większą niż niepewność wzorca, czy przyrządu wzorcowego. Prawidłowe uwzględnienie tej składowej jest problemem, który rozważa tutaj autor.

2. Szacowanie niepewności wyznaczonych błędów wskazań

2.1. Szacowanie niepewności wyznaczania błędów metoda bezpośrednią

Wzorcowanie przyrządów pomiarowych wykonuje się najczęściej metodą bezpośredniego porównania wskazań przyrządu wzorcowanego z wzorcowym źródłem wielkości mierzonej (kalibratorem) lub ze wskazaniami przyrządu wzorcowego. Podczas szacowania niepewności należy przeprowadzić analizę niepewności pomiarów uwzględniając wszystkie źródła niepewności występujące podczas wzorcowania. Głównymi składowymi niepewności wzorcowania przyrządów analogowych są: niepewność wartości wzorcowej i niepewność odczytu z wzorcowanego przyrządu, wynikająca z niepewtarzalności wyników pomiarów.

Do wartości wyjściowej z kalibratora lub wskazań przyrządu wzorcowego można dodać poprawkę i wówczas niepewność wartości wzorcowej będzie określona niepewnością tej poprawki. Ale jeżeli nie jest to konieczne, to tej poprawki się nie uwzględnia i jeżeli wiadomo, że błędy wzorca mieszczą się w granicach dopuszczalnych podanych przez producenta, to przyjmuje się, że mają one rozkład prostokątny i niepewność standardową wartości wzorcowej oblicza się ze wzoru:

$$u(X_w) = \frac{\Delta_g X_w}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

w którym $\Delta_g X_w$ - błąd graniczny przyrządu wzorcowego.

Jeżeli wskazania przyrządów wzorcowanego i wzorcowego są stabilne (niezmieniające się w czasie), to niepewność odczytu z wzorcowego przyrządu jest pomijalnie mała w porównaniu do jego błędu podstawowego lub wkałkulowana w ten błąd, natomiast niepewność odczytu z przyrządu wzorcowanego może mieć znaczące niepomijalne wartości. W tym przypadku standardowa niepewność odczytu $u(X_{odcz})$ odpowiada rozdzielczości przyrządu pomiarowego ΔX_{odcz} i jeżeli ma rozkład prostokątny, to można ją obliczyć z zależności:

$$u(X_{odcz}) = \frac{\Delta X_{odcz}}{\sqrt{3}}. \quad (6)$$

Dla przyrządów analogowych z lusterkiem lub plamką świetlną wartość ΔX_{odcz} często wynosi 0,1 dz. Nie powinna ona być większa niż 1/3 dopuszczalnego błędu granicznego wynikającego z klasy przyrządu pomiarowego.

Dla przyrządów cyfrowych, jeżeli wskazania wszystkich cyfr na polu odczytowym są stabilne, jako ΔX_{odcz} przyjmuje się jedną cyfrę. Jeżeli przyrząd ma opcje zaokrąglania ostatniej cyfry zgodnie z zasadami matematycznymi, to jako wartość ΔX_{odcz} można przyjąć połowę wartości ostatniej wyświetlanej cyfry.

Natomiast jeżeli wskazania przyrządu nie są stabilne, to należy powtórzyć odczyt n -krotnie (co najmniej dziesięciokrotnie) i z otrzymanych wyników X_i obliczyć wartość średnią:

$$X_{odcz} = \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (7)$$

a niepewność standardową wynikającą z tej niestabilności $u(X_{odcz})$ przyjąć równą odchyleniu standardowemu wartości średniej, obliczoną ze wzoru:

$$u(X_{odcz}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}. \quad (8)$$

Można ewentualnie określić przedział zmian wartości wskazywanej i przyjąć wartość wielkości odczytanej z zależności:

$$X_{odcz} = \frac{X_+ + X_-}{2}, \quad (9)$$

a błąd graniczny odczytu, równy połowie przedziału, z zależności:

$$\Delta X_{odcz} = \frac{X_+ - X_-}{2}, \quad (10)$$

gdzie X_+ i X_- są górną i dolną granicą odczytanych wartości.

Zakładając prostokątny rozkład wyników pomiarów, niepewność standardową odczytu oblicza się ze wzoru (6), który po uwzględnieniu zależności (10) przyjmie postać:

$$u(X_{odcz}) = \frac{X_+ - X_-}{2\sqrt{3}}. \quad (11)$$

Zależność (11) jest identyczna jak zależność (3.7) w dokumencie EA-4/02 [1].

Jeżeli inne składowe niepewności mają pomijalnie małe wartości, to niepewność złożona standardowa:

$$u(\Delta X) = \sqrt{u^2(X_w) + u^2(X_{odcz})}, \quad (12)$$

a niepewność rozszerzona:

$$U(\Delta X) = k \times u(\Delta X). \quad (13)$$

Jeżeli składowe niepewności mają rozkład prostokątny i jedna ze składowych niepewności ma wartość nie większą niż 0,3 drugiej składowej, to można przyjąć, że wypadkowy rozkład jest prostokątny, dla którego współczynnik rozszerzenia dla poziomu ufności 0,95 przyjmuje wartość $k = 1,65$. Gdy jedna ze składowych niepewności ma wartość większą niż 0,3 drugiej składowej, to wypadkowy rozkład będzie rozkładem trapezowym i współczynnik rozszerzenia dla poziomu ufności 0,95 oblicza się ze wzoru [1]:

$$k = \frac{1 - \sqrt{0,05(1 - \beta^2)}}{\sqrt{\frac{1 + \beta^2}{6}}} \quad \text{dla } \beta \leq 0,90 \quad (14)$$

lub

$$k = \frac{0,95(1 + \beta)}{2\sqrt{\frac{1 + \beta^2}{6}}} \quad \text{dla } \beta \geq 0,90, \quad (15)$$

gdzie β jest parametrem brzegowym wyrażonym zależnością:

$$\beta = \frac{|u(x) - u(x_{odcz})|}{u(x) + u(x_{odcz})}. \quad (16)$$

Jeżeli znane są błędy graniczne odczytu i wzorca, które mają rozkłady prostokątne, to niepewność rozszerzoną na poziomie ufności 0,95 i przy współczynniku rozszerzenia $k = 2$ można również obliczyć w prosty sposób z uproszczonego wzoru:

$$U(\Delta X) = 1,15 \sqrt{(\Delta X_{odcz})^2 + (\Delta_g X_w)^2}. \quad (17)$$

2.2. Szacowanie niepewności wyznaczania błędów metoda interpolacyjną

Dla analogowych przyrządów uniwersalnych o liniowej wspólnej podziałce (magnetoelektrycznych) wzorcowanie można ograniczyć do wyznaczenia błędów wskazań dla jednego zakresu pomiarowego, a dla pozostałych zakresów pomiarowych wyznaczyć błędy wskazań nastawiając wskazówkę na wskaz podziałki odpowiadający górnej granicy zakresu pomiarowego. Wartości błędów wskazań dla pozostałych punktów podziałki można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta \alpha_{b_i} = \Delta \alpha_{a_i} + (\Delta \alpha_{b_m} - \Delta \alpha_{a_m}) \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_m}, \quad (18)$$

w którym:

$\Delta \alpha_{a_i}$ - błąd w działkach dla i -tego wskazu na zakresie pomiarowym „a”, dla którego wyznaczono błędy dla wszystkich wskazów podziałki,

$\Delta \alpha_{b_m}$ - błąd dla wskazu odpowiadającego górnej granicy zakresu pomiarowego „b”,

$\Delta\alpha_{am}$ - błąd dla wskazu odpowiadającego górnej granicy zakresu pomiarowego „a”,

α_i - wskazanie przyrządu dla wzorcowanego i -tego wskazu,

α_m - wskazanie przyrządu dla wzorcowanego m -tego wskazu, odpowiadającego górnej granicy zakresu pomiarowego.

Niepewność standardową oblicza się wówczas ze wzoru:

$$u(\alpha_{bi}) = \sqrt{u^2(\alpha_{ai}) + \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_m}\right)^2 [u^2(\alpha_{bm}) + u^2(\alpha_{am})]}, \quad (19)$$

w którym:

$u(\alpha_{ai})$ - niepewność standardowa wzorcowanego zakresu „a” dla wskazów i ,

$u(\alpha_{am})$ - niepewność standardowa wzorcowanego zakresu „a” dla wskazu m ,

$u(\alpha_{bm})$ - niepewność standardowa wzorcowanego zakresu „b” dla wskazu m .

Błędy wskazań, jak również niepewności wyrażone w działkach, łatwo zamienia się na błędy i niepewności wyrażone w jednostkach wartości mierzonej mnożąc ich wartości przez stałą przyrządu ($X_i = c \cdot \alpha_i$, $\Delta X_i = c \cdot \Delta \alpha_i$, gdzie c jest stałą przyrządu).

Niepewność odczytu z wzorcowanego przyrządu i tu ma decydujące znaczenie. Należy zwrócić uwagę, że niepewność wyznaczenia błędów metodą interpolacyjną na zakresie „b” jest znacznie większa niż metoda bezpośrednią na zakresie „a”.

Podczas wzorcowania analogowych mierników rezystancji wykorzystuje się również metodę interpolacyjną, ale wówczas operacje matematyczne wykonuje się na względnych błędach wskazań [6]. Niepewność wzorcowania na zakresie „b” metodą interpolacyjną jest również znacznie większa niż na zakresie „a”.

2.3. Szacowanie niepewności wyznaczania błędów metodą pośrednią

Jeżeli wzorcowanie wykonuje się metodą pośrednią i wyznaczony błąd ΔX jest funkcją wielu składowych X_i , czyli

$$\Delta X = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n), \quad (20)$$

a składowe te nie są skorelowane, to niepewność złożoną standardową oblicza się ze wzoru:

$$u(\Delta X) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(X_i)}, \quad (21)$$

w którym c_i są współczynnikami wrażliwości, a $u(X_i)$ - niepewnościami standardowymi poszczególnych składowych.

Dla przykładu rozważmy, że podczas wzorcowania amperomierza, pomiaru wartości poprawnej (wzorcowej) prądu I_n dokonano

metodą pośrednią poprzez pomiar napięcia U_n na rezystorze wzorcowym R_n . Wartość błędu wskazań prąd I_m przez amperomierz oblicza się z zależności:

$$\Delta I = I_m - I_n = I_m - \frac{U_n}{R_n}, \quad (22)$$

a niepewność standardową wyznaczonych błędów amperomierza oblicza się ze wzoru:

$$u(\Delta X_i) = \sqrt{u^2(I_{odcz}) + c_n^2 u^2(U_n) + c_R^2 u^2(R_n)}, \quad (23)$$

w którym współczynniki wrażliwości:

$$c_n = \frac{\partial I_n}{\partial U_n} = \frac{1}{R_n},$$

$$c_R = \frac{\partial I_n}{\partial R_n} = \frac{U_n}{R_n^2}.$$

W tym przypadku niepewność odczytu z wzorcowanego przyrządu może mieć największy wpływ na niepewność wzorcowania.

3. Wnioski

Podczas szacowania niepewności wzorcowania przyrządów pomiarowych, zarówno analogowych jak i cyfrowych, należy dokładnie przeanalizować wszystkie czynniki mające wpływ na niepewność wzorcowania i uwzględnić w bilansie (budżecie) wszystkie składowe wnoszące swój udział $\geq 10\%$. W przeciętnych laboratoriach wzorcujących, o niezbyt wysokim poziomie dokładności, głównymi składowymi niepewności są: niepewność wartości wzorcowej i niepewność odczytu z przyrządu wzorcowanego. Inne niepewności przez zachowanie odpowiednich warunków środowiskowych i stabilnych źródeł zasilających mogą być pomijalnie małe. Należy jednak prawidłowo ocenić niepewność odczytu z przyrządu wzorcowanego i jeżeli nie jest ona pomijalnie mała, to ją uwzględnić.

4. Literatura

- [1] Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu. Dokument EA-4/02, European cooperation for Accreditation. Tłumaczenie Główny Urząd Miar, Warszawa, 2001.
- [2] Wyrażenie niepewności pomiaru. Przewodnik. International Organization for Standardization. Tłumaczenie: Główny Urząd Miar, 1999.
- [3] Skubis T.: Podstawy metrologicznej interpretacji wyników pomiarów. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004.
- [4] Arendarski J.: Niepewność pomiarów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
- [5] Turzeniecka D.: Ocena niepewności wyników pomiarów. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1997.
- [6] Lisowski M.: Metody wzorcowania analogowych mierników bardzo dużych rezystancji. PAK 2003, nr 6, s. 10-14