

# Udoskonalenie metody wzorcowania mierników pola EM o pomiar tzw. strefy stabilnego wskazania

Mariusz Janeczko, dr Albin Czubla (Zakład Elektryczny, GUM)

Praca przedstawia dotychczasową, jak i nową metodę wzorcowania mierników pola, stosowaną w Głównym Urzędzie Miar. Prezentowane są różnice, w tym wady i zalety każdej z nich. Krótko omawiany jest także rachunek niepewności pomiaru.

This paper presents the current and new method for field meters calibration used in the Central Office of Measures. There are shown the differences, including their advantages and disadvantages. Measurement uncertainty calculation is also briefly discussed.

## Wprowadzenie

Stosowana od wielu lat w Laboratorium Mikrofalowym, Pola Elektromagnetycznego i Kompatybilności Elektromagnetycznej Zakładu Elektrycznego GUM metoda wzorcowania (zwana dalej metodą nr 1), oparta jest o  $n$ -krotny pomiar przypadkowo dobranych wartości pola wzorcowego, zawierających się w granicach rozdzielczości wskazania wzorcowanego miernika. Użycie przyrządów o wysokiej rozdzielczości nastawy natężenia prądu pozwoliło na opracowanie nowej procedury (zwanej dalej metodą nr 2), która, jak się okazało, znacznie rozszerzyła zakres zdobytych informacji o przyrządzie wzorcowanym.

Prezentowana praca ogranicza się tylko do omawiania stałego pola magnetycznego. Jednak rdzeń obu metod, a także wnioski wyciągnięte z porównań są słuszne również dla pól elektrycznych oraz dla pól przemiennych o częstotliwościach poniżej 100 kHz, jak i pośrednio do każdej innej wielkości mierzonej.

Pomiar natężenia pola  $H$  lub proporcjonalnej do niego indukcji magnetycznej  $B$ , w przypadku pól o natężeniu do 57 kA/m, polega na wygenerowaniu wzorcowego pola za pomocą cewek Helmholtza, a następnie zmierzeniu spadku napięcia na oporniku wzorcowym. Zmierzony spadek napięcia jest wprost proporcjonalny do prądu płynącego przez cewki, a ten z kolei do natężenia pola. Równanie pomiaru ma następującą postać:

$$H_{\text{pop}} = V \frac{K}{R} + \delta H_F + \delta H_A \quad (1)$$

gdzie:  $H_{\text{pop}}$  – natężenie pola magnetycznego,  $V$  – napięcie zmierzone woltomierzem,  $K$  – stała cewki (wzorca),  $R$  – opornik wzorcowy,  $\delta H_F$  – poprawka uwzględniająca niejednorodność pola,  $\delta H_A$  – poprawka uwzględniająca błąd dopasowania pola wzorcowego dożądanego wskazania na mierniku wzorcowanym.

W przypadku pola o natężeniu powyżej 60 kA/m (co odpowiada indukcji ok. 75 mT) źródłem jest elektromagnes o nieznanach bliżej parametrach. Wówczas wzorcowanie odbywa się poprzez jednoczesny pomiar nieznanego pola za pomocą wzorcowanego miernika oraz miernika indukcji magnetycznej opartego o rezonans magnetyczny (NMR).

W obydwu metodach przy wyznaczaniu niepewności rozszerzonej współczynnik rozszerzenia  $k$ , dla przedziału ufności ok. 95 %, wyznaczany jest ze wzoru (13), przedstawionego w publikacji [1] (uwzględniający składanie rozkładów prostokątnych) oraz zapisanego tamże wzoru (1) na współczynnik rozszerzenia dla rozkładu trapezowego.

## Metoda wzorcowania nr 1

Metoda polega na przeprowadzeniu przyrządem wzorcowanym  $n$ -krotnego pomiaru przypadkowo dobranych wartości pola wzorcowego w granicach

stałego wskazania przyrządu wzorcowanego zwane-  
go punktem pomiarowym, którego wartość ustalono  
z użytkownikiem przyrządu. Równanie błędu pomiaru  
ma następującą postać:

$$\Delta H = H_{ws} - H_{pop} = H_{ws} - V_{sr} \frac{K}{R} - \delta H_F - \delta H_A \quad (2)$$

gdzie:  $H_{ws}$  – wskazanie przyrządu wzorcowanego,  
 $H_{pop}$  – wartość natężenia pola wzorcowego,  $V_{sr}$  – war-  
tość średnia zmierzonego napięcia. Poprawkom  $\delta H_F$   
oraz  $\delta H_A$  przypisuje się wartość równą zero (ich rola  
ogranicza się jedynie do udziału w niepewności).

Ze względu na dominujący udział rozdzielczości  
i poprawki na niejednorodność pola, a także ograni-  
czenia czasowe przyjęto, że do wyznaczenia wartości  
średniej napięcia wystarczy przyjąć  $n = 3$ . Oznacza  
to, że pełna usługa wzorcowania wymagała wykonania  
trzech serii pomiarów we wszystkich punktach  
pomiarowych.

Dla zrozumienia dalszego toku postępowania wy-  
starczy informacja, że pełne równanie niepewności  
błędu pomiaru dla metody nr 1 zawiera składnik pro-  
porcjonalny do odchylenia standardowego pomiaru  
napięcia.

W budżecie niepewności wszystkie składowe,  
oprócz jednej, szacuje się metodą typu B, przyjmując,  
że liczby stopni swobody wszystkich tych składowych  
dążą do nieskończoności. Wyjątkiem jest składowa  
niepewności proporcjonalna do odchylenia stan-  
dardowego pomiaru napięcia, który szacuje się me-  
todą typu A, a jego liczbę stopni swobody określa  
równanie  $\nu = n-1$ . W ten sposób wypadkowa liczba  
stopni swobody potrzebna do obliczenia współczyn-  
nika rozszerzenia (w przypadku, gdy iloraz  $r$  zdefi-  
niowany w [1] jest mniejszy od 1), dla rozkładu  
 $t$ -Studenta, zgodnie z wzorem Welch-Salter-  
wate'a (równanie G.2b w publikacji [2]), sprowadza  
się do postaci:

$$\nu_{eff} = \frac{2 \cdot u_c^4}{u_6^4} \quad (3)$$

gdzie:  $u_c$  – złożona niepewność standardowa wyzna-  
czenia wartości pola wzorcowego,  $u_6$  – składowa nie-  
pewności związana z pomiarem napięcia.

## Metoda wzorcowania nr 2

W tej metodzie nie wykonuje się pomiarów w lo-  
sowych punktach w ramach stabilnego wskazania

przyrządu wzorcowanego, ale w punktach określo-  
nych granicami stałego wskazania (rys. 1). Definiujemy  
w ten sposób punkt  $H_d$  (zwany dolnym), określający  
wartość graniczną pola wzorcowego, przy której na-  
stępuje zmiana wskazania miernika cyfrowego na  
mniejsze, niż jest to określone przez punkt pomiaro-  
wy oraz punkt  $H_g$  (zwany górnym), określający war-  
tość graniczną pola wzorcowego, przy której nastę-  
puje zmiana wskazania na większe, niż jest to  
określone przez punkt pomiarowy. Dla przyrządów  
analogowych granicę przejścia wskazania trzeba przy-  
jąć umownie (np. punkt dolny może określać zetknię-  
cie się lewej krawędzi wskazówki z lewą krawędzią  
kreski na podziałce). Równanie błędu pomiaru dane  
jest wzorem:

$$\Delta H = H_{ws} - H_{pop} = H_{ws} - \left( \frac{H_d + H_g}{2} \right) \quad (4)$$

gdzie: dane  $H_d$  i  $H_g$  są równaniem (1) z wartościami  
 $V_d$  i  $V_g$ , określającymi dolną i górną granicę.

Można zauważyć, że wartość poprawna zdefinio-  
wana równaniem (1) dla tej metody nie jest już punk-  
tem, ale przedziałem, tak więc błąd również powin-  
nien być przedziałem. Ponieważ w świadectwach  
wzorcowania GUM podaje się błąd w postaci pojedy-  
nczej liczby, w równaniu (4) przyjęto arbitralnie,  
że wartością poprawną jest środek przedziału pomię-  
dzy  $H_d$  i  $H_g$ . Powoduje to, że do obliczania złożonej  
niepewności standardowej błędu należy podzielić  
składowe na dwie grupy, z których jedna będzie nie-  
zależna, a druga będzie zależna od pomiaru  $V$ .  
Należy również obliczać osobno niepewności rozsze-  
rzone wyznaczenia wartości  $H_d$  i  $H_g$ , a także niepew-  
ność błędu, która nie jest zwykłą średnią arytmetycz-  
ną niepewności rozszerzonych  $H_d$  i  $H_g$ , ale osobno  
policzoną dla średniej wartości pola. Składnik nie-  
pewności proporcjonalny do odchylenia standardo-  
wego został zastąpiony składnikiem proporcjonal-  
nym do rozdzielczości nastawy wartości wzorcowej  
(w tym przypadku jest to  $\Delta V$ , równa rozdzielczości  
zasilacza).

W budżecie niepewności dla tej metody wszyst-  
kie składowe mają rozkład prostokątny i można by je  
szacować tylko metodą typu B. Jednak, aby zagwa-  
rantować powtarzalność wyników, dodano nową skła-  
dową niepewności, proporcjonalną do szerokości mak-  
symalnego rozrzutu zmierzonych punktów. Włączenie  
metody typu A wymusza jednak wykonanie serii  $n$   
pomiarów dla dolnego i  $n$  dla górnego punktu,

co razem oznacza konieczność wykonania  $2n$  pomiarów na każdy punkt pomiarowy.

Podobnie jak w metodzie poprzedniej zakłada się, że liczby stopni swobody wszystkich składowych dążą do nieskończoności, z wyjątkiem składowej, proporcjonalnej do rozdzielczości nastawy wartości wzorcowej, której liczbę stopni swobody oblicza się z wzoru (G.3) przedstawionego w publikacji [2]. Ostatecznie wypadkowa liczba stopni swobody w metodzie nr 2 przyjmuje postać:

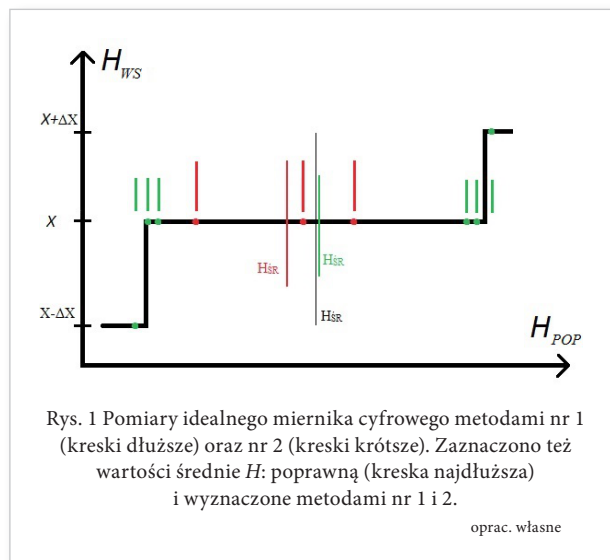
$$v_{\text{eff}}(x) = \frac{u_c^4(V_x) \cdot 2 \cdot \Delta V^2}{u_1^4 \cdot \Delta_{\text{wolt}}^2} \quad (5)$$

gdzie:  $x$  oznacza punkt dolny lub górny,  $u_1$  – składową niepewności związaną z  $\Delta V$ ,  $\Delta V$  – rozdzielczość nastawy wartości napięcia,  $\Delta_{\text{wolt}}$  – rozdzielczość woltomierza.

### Porównanie

Rys. 1 obrazuje różnicę dobierania punktów pomiarowych. Metodą nr 1 mierzy się  $n$  losowych punktów w granicach całej strefy stabilnego wskazania, a położenie środka przybliży się wartością oczekiwaną z rozkładu normalnego tych punktów. Jak widać błąd dla małych  $n$  może być duży. Metodą nr 2 mierzy się natomiast określone punkty leżące na skraju strefy, tak więc błąd nawet dla małych  $n$  (nawet równy jeden) będzie mniejszy.

W trakcie przygotowywania tej publikacji przeprowadzono pomiary na sześciu analogowych oraz czterech cyfrowych miernikach natężenia pola mag-

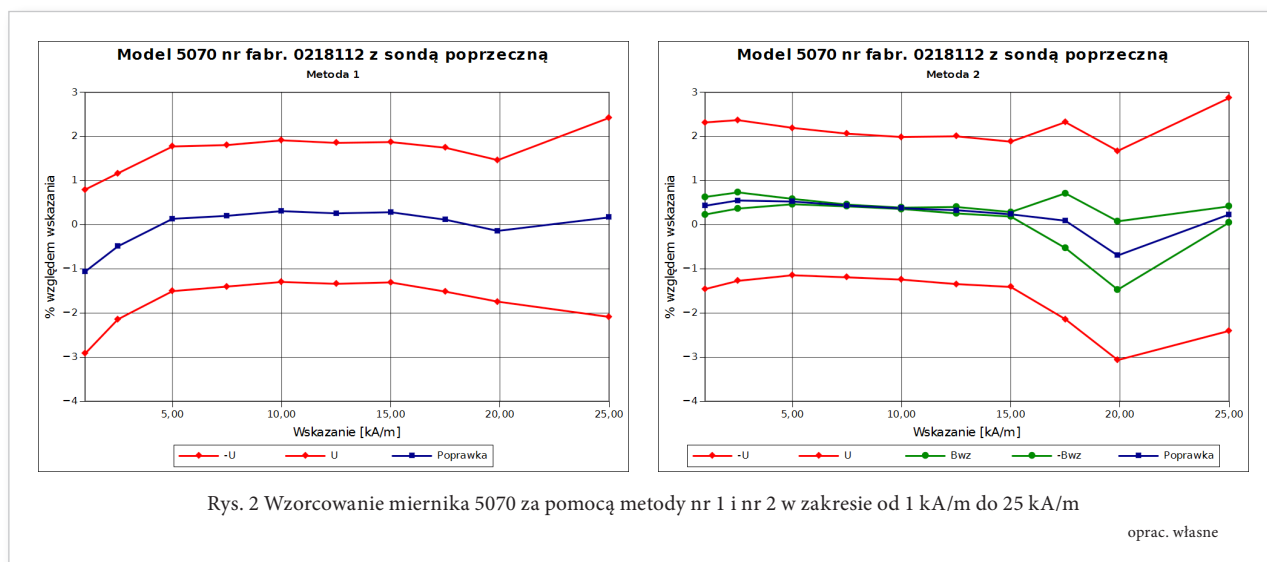


netycznego i indukcji, stosując obie metody, przeprowadzając pomiar 115 punktów pomiarowych. Dla porównania przeprowadzono test zgodności w granicach niepewności ze współczynnikiem równoważności  $E$ , danym wzorem:

$$E = \frac{H_{M2} - H_{M1}}{\sqrt{U_{M1}^2 + U_{M2}^2}} \quad (6)$$

gdzie:  $H_{M1}$  – wartość poprawna wyznaczona metodą nr 1,  $H_{M2}$  – wartość średnia z granic wartości poprawnych wyznaczonych metodą nr 2,  $U_x$  – niepewność wyznaczenia wartości poprawnej daną metodą.

Stwierdzono, że  $|E|$  nie przekracza wartości 0,66 (z czego 55 % wyników nie przekracza wartości 0,15), z wyjątkiem jednego punktu o wartości pola bliskiej



zeru. We wzorze (6) przyjęcie  $H_{M2}$  jako wartości średniej z granic przedziału wartości poprawnej jest równoznaczne z przyjęciem założenia, iż rozkład wartości mierzonej jest rozkładem symetrycznym względem środka strefy stabilnego wskazania. Ponadto przy poprawnie działającym przyrządzie szerokość strefy stabilnego wskazania powinna odpowiadać rozdzielczości. Te założenia nie zawsze są jednak spełnione, co daje się zaobserwować porównując obie metody. W takich przypadkach  $|E|$  może być większy niż 1, pomimo iż spełnione jest równanie  $H_{M2}^d < H_{M1} < H_{M2}^s$ . We wspomnianym wcześniej, zaobserwowanym tego typu przypadku, przyczyną okazała się, zaobserwowana metodą nr 2, strefa nieczułości mechanicznej miernika analogowego, wewnątrz której wartość wielkości mierzonej (w tym wypadku indukcji magnetycznej) była zbyt niska, aby pobudzić wskazówkę do ruchu. Spowodowało to, że wartość poprawna pola wyznaczona w metodzie nr 1 była bliska dolnej granicy strefy stabilnego wskazania, wyznaczonej metodą nr 2.

Na rys. 2 zaprezentowano pomiary cyfrowego miernika (model 5070 firmy F. W. Bell), przeprowadzone za pomocą obydwu metod. Widać na nich, że metoda nr 2 dostarcza informacje o przyrządzie, poszerzone o strefę stałego wskazania. Gdy szerokość tej strefy jest wąska, użytkownik przyrządu otrzymuje tyle samo informacji w przypadku obu metod. Jednak, gdy strefa ta jest szeroka, w świadectwie wzorcowania przy użyciu metody nr 1, nie ma informacji o tym, że wartość pola, którą będzie mierzył, może się zmieniać w granicach tej strefy, a jego przyrząd

nie poinformuje go o tym podczas pomiaru (z punktu widzenia wskazania przyrządu wartość pola będzie bowiem stała).

## Podsumowanie

Metoda nr 2 ma małą niepewność wyznaczenia środka strefy stabilnego wskazania, nawet dla małych prób statystycznych. Eliminuje przypadkowość doboru punktu i błąd wynikający z mało licznej próby statystycznej. Ponadto, nawet gdyby w metodzie nr 1 ilość pomiarów była równa nieskończoności, to i tak w przypadku zaistnienia sytuacji niesymetrycznego rozkładu wartości mierzonej względem środka strefy stabilnego wskazania, wynik metody byłby niedokładny, co znowu daje przewagę metodzie nr 2. Zaletą metody nr 1 jest to, że wymaga on mniejszej liczby pomiarów oraz to, że każdy pomiar jest wykonywany szybciej (nie jest potrzebna tak duża precyzja), jednak dla małych  $n$ , a takich właśnie używa się najczęściej, korzyść ta jest mało znacząca w porównaniu z metodą nr 1.

## Literatura

- [1] Fotowicz P., *A method of approximation of the coverage factor in calibration*. Measurement, vol. 35 (2004), s. 251–256.
- [2] *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik, Wydanie GUM 1999.
- [3] Instrukcje pomiarowe. Laboratorium pola elektromagnetycznego GUM.