

SZACOWANIE NIEPEWNOŚCI KALIBRACJI WZORCÓW WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH METODĄ PODSTAWIENIA NA PRZYKŁADZIE KALIBRACJI KONDENSATORA WZORCOWEGO

Marta Rępańska

Centralny Wojskowy Ośrodek Metrologii

1. Wstęp

Centralny Wojskowy Ośrodek Metrologii (CWOM) w Warszawie jest najwyższego szczebla laboratorium metrologicznym resortu Obrony Narodowej (ON). Pełni ono kluczową rolę w zakresie zapewnienia spójności pomiarowej i jednolitości zdecydowanej większości pomiarów, wykonywanych w jednostkach organizacyjnych resortu ON. Do głównych zadań CWOM należy utrzymanie wojskowych wzorców odniesienia jednostek miar wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, powiązanych z międzynarodowymi i państwowymi wzorcami jednostek miar, do których odnoszone są, poprzez okresową kontrolę metrologiczną, wzorce jednostek miar niższego rzędu, wykorzystywane w strukturach organizacji metrologicznych resortu ON [1].

Kalibracja, obok sprawdzenia, stanowi podstawową formę kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych, realizowaną w ramach działalności metrologicznej resortu ON [1].

Pod pojęciem kalibracji przyrządów pomiarowych, przeznaczonych na cele obronności, należy rozumieć „... zespół czynności wykonywanych przez upoważnione wojskowe laboratoria metrologiczne w celu ustalenia relacji między wartościami wielkości mierzonej, wskazanymi przez przyrząd pomiarowy, a odpowiednimi wartościami wielkości realizowanymi przez wzorce jednostki miary oraz stwierdzenia na tej podstawie i poświadczenia przydatności przyrządu pomiarowego do stosowania zgodnie z przeznaczeniem” [1].

Wyniki kalibracji wzorców, realizowanych w CWOM, dostarczane są ich użytkownikom wraz z odpowiednimi niepewnościami pomiaru. Postępowanie tego rodzaju daje użytkownikowi podstawę dla właściwej interpretacji wyników pomiaru, a ponadto stanowi źródło informacji odnośnie zdolności pomiarowych CWOM w zakresie kalibracji odpowiednich wzorców wielkości elektrycznych i nieelektrycznych.

Metody szacowania niepewności, uwzględniające zalecenia zawarte w dokumentach [2, 3], ujęte są w odpowiednich procedurach szacowania niepewności. System zarządzania jakością, wdrożony w CWOM, nadzoruje i koordynuje proces tworzenia, wprowadzania do użytku, stosowania oraz aktualizacji tychże procedur.

W dalszym ciągu, w sposób syntetyczny, zostaną zaprezentowane zagadnienia związane z problematyką kalibracji wzorców wielkości elektrycznych metodą podstawienia. Rozważania teoretyczne poparto odpowiednimi przykładami praktycznymi, dotyczącymi kalibracji kondensatora wzorcowego.

Na potrzeby niniejszego opracowania przyjmuje się, że kondensator wzorcowy, wykorzystywany w trakcie pomiarów jako wzorzec pojemności elektrycznej nazywany będzie „kondensatorem odniesienia”, zaś pod pojęciem „kondensator kalibrowany” należy rozumieć kondensator wzorcowy stanowiący obiekt kalibracji.

2. Warunki środowiskowe

Podczas kalibracji wzorców wielkości elektrycznych i nieelektrycznych wymagane jest zachowanie właściwych warunków środowiskowych w pomieszczeniu laboratoryjnym, a mianowicie: temperatury i wilgotności względnej powietrza, ciśnienia atmosferycznego, dopuszczalnego poziomu zapylenia powietrza, dopuszczalnego poziomu zakłóceń elektromagnetycznych oraz parametrów sieci elektroenergetycznej. Wydajny system klimatyzacyjny, pracujący w sposób ciągły i systematycznie poddawany konserwacji, umożliwia utrzymanie wymaganych warunków klimatycznych w pomieszczeniach laboratoryjnych CWOM. Ponadto, temperatura, wilgotność względna powietrza oraz ciśnienie atmosferyczne są monitorowane i rejestrowane przy wykorzystaniu scentralizowanego w CWOM systemu informatycznego nadzoru klimatu. Aktualne zmiany temperatury i wilgotności powietrza kontrolowane są w trakcie wykonywania pomiarów. Możliwa jest także analiza historii zachowania się tych parametrów i ich ewentualnego wpływu na aktualny stan wzorców i obiektów kalibracji. Sytuacje, gdy zostają przekroczone wartości graniczne parametrów klimatycznych, skutkują odroczeniem procesu kalibracji do momentu ustabilizowania się sytuacji klimatycznej i usunięcia przyczyn zaburzających warunki środowiskowe w pomieszczeniu laboratoryjnym.

3. Metoda pomiaru

Dobre rezultaty, o czym świadczą przeprowadzane ekspertyzy metrologiczne, oraz prostota metody podstawienia, skutkują, iż wykorzystywana jest ona powszechnie w procesie kalibracji wzorców R , L , C w laboratoriach Zespołu Wzorców Odniesienia Wielkości Elektrycznych (ZWOWE) CWOM.

Główną zaletą metody podstawienia jest bezpośrednie odniesienie parametrów obiektu kalibracji do stałego wzorca odniesienia odpowiedniej wielkości elektrycznej, przy czym obydwa wzorce powinny cechować się zbliżonymi właściwościami metrologicznymi (wzorce o zbliżonej konstrukcji, najlepiej tego samego typu i o tych samych wartościach nominalnych wielkości odtwarzanej).

Metoda podstawienia polega na wykonaniu pomiaru wartości wielkości wzorca odniesienia $X_{\text{odn zm}}$, a następnie obiektu kalibracji $X_{\text{x zm}}$ w tych samych, niezmiennych warunkach pracy przyrządu pomiarowego. Jednocześnie należy dążyć do maksymalnego skrócenia czasu pomiędzy pomiarami, które należy poprzedzić aklimatyzacją obydwu wzorców w tych samych warunkach środowiskowych.

Zakładając, iż znana jest wartość poprawna X_{odn} wielkości X (np. uzyskana w wyniku wzorcowania w Głównym Urzędzie Miar (GUM)), odtwarzana przez wzo-

rzec odniesienia, wartość poprawną X_x tej samej wielkości, odtwarzaną przez obiekt kalibracji, można obliczyć korzystając z równania:

$$X_x = X_{x\text{ zm}} \cdot \frac{X_{\text{odn}}}{X_{\text{odn zm}}} \quad (1)$$

Ogólne zasady kalibracji wzorców wielkości elektrycznych metodą podstawienia, na przykładzie kalibracji kondensatora wzorcowego, pokazano w **Przykładzie 1**.

Przykład 1

Rozpatrzmy kondensator wzorcowy typu R597/15 o wartości nominalnej pojemności elektrycznej 100 nF. Na potrzeby realizacji kalibracji wybranego obiektu metodą podstawienia przygotowano odpowiedni wzorec odniesienia, w postaci kondensatora wzorcowego tego samego typu i posiadającego taką samą wartość nominalną pojemności elektrycznej oraz mostek *RLC* QuadTech 1693. Pomiary poprzedzono aklimatyzacją wzorca, obiektu kalibracji oraz przyrządu pomiarowego w tych samych warunkach klimatycznych pomieszczenia laboratoryjnego przez okres 24 h.

W pierwszej kolejności wykonano, metodą pomiaru bezpośredniego, pomiar pojemności kondensatora odniesienia $C_{\text{odn zm}}$, a następnie, stosując tę samą metodę pomiarową, przystąpiono do pomiaru pojemności kondensatora kalibrowanego $C_{x\text{ zm}}$. Pomiary pojemności obydwu kondensatorów przeprowadzano wykorzystując te same nastawy mostka *RLC*, przy czym poprzedzono je wykonaniem jednego wspólnego zerowania przewodów pomiarowych bezpośrednio przed pomiarami pojemności. Przedział czasu pomiędzy dwiema, wykonanymi seriami pomiarowymi maksymalnie skrócono i wynikał on jedynie z potrzeby zmian połączeń układu. Szukaną wartość pojemności C_x kondensatora kalibrowanego wyznaczano korzystając z zależności:

$$C_x = \bar{C}_{x\text{ zm}} \cdot \frac{C_{\text{odn}}}{\bar{C}_{\text{odn zm}}} \quad (2)$$

gdzie: $\bar{C}_{\text{odn zm}}$ – wartość pojemności odtwarzanej przez kondensator odniesienia (średnia arytmetyczna z serii pomiarów pojemności $C_{\text{odn zm}}$ kondensatora odniesienia), $\bar{C}_{x\text{ zm}}$ – wartość pojemności odtwarzanej przez kondensator kalibrowany (średnia arytmetyczna z serii pomiarów pojemności $C_{x\text{ zm}}$ kondensatora kalibrowanego), C_{odn} – wartość poprawna pojemności odtwarzanej przez kondensator odniesienia (uzyskana ze wzorcowania kondensatora odniesienia w GUM).

Podczas pomiarów pojemności kondensatorów odniesienia i kalibrowanego poziom sygnału pomiarowego wynosił 1 V, zaś jego częstotliwość była równa 1 kHz.

W trakcie przeprowadzonej kalibracji metodą podstawienia błąd „transferu” (przeniesienia) mostka (ang.: *transfer accuracy*) wynosił $20 \cdot 10^{-6}$ F/F. Wartość tę uzyskano w sposób doświadczalny, na podstawie wielokrotnie powtarzanych serii pomiarowych, wykonany w tych samych, co kalibracja, warunkach pomiaru.

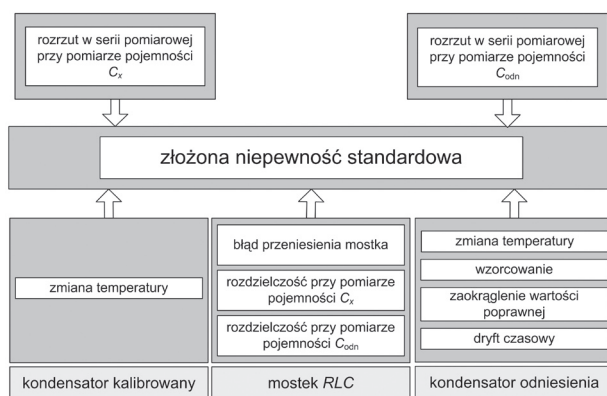
4. Źródła niepewności i składniki złożonej niepewności standardowej

W przypadku metody podstawienia składniki złożonej niepewności standardowej pochodzą od trzech głównych źródeł, którymi są: wzorzec odniesienia, przyrząd pomiarowy (na przykład: mostek RLC , multimetr, komparator) oraz obiekt kalibracji. Podstawowe składniki złożonej niepewności standardowej, których źródłem jest wzorzec odniesienia dotyczą jego wzorcowania, zmiany jego parametrów w czasie (dryftu) oraz wpływu warunków środowiskowych na wzorzec. Składniki pochodzące od przyrządu pomiarowego związane są przede wszystkim z jego błędem przeniesienia i skończoną rozdzielczością odczytu, zarówno przy pomiarze wzorca odniesienia, jak i obiektu kalibracji. Zakłada się, że zarówno obiekt kalibracji, jak i wzorzec odniesienia, poddane są działaniu tych samych czynników środowiskowych, zmieniających się w tym samym zakresie i stąd też, w złożonej niepewności standardowej, uwzględnia się wpływ tych czynników w odniesieniu do obydwu wzorców.

Problematykę identyfikacji źródeł niepewności, podczas kalibracji wzorca wielkości elektrycznej metodą podstawienia, zaprezentowano w **Przykładzie 2**.

Przykład 2

Rozpatrzmy ponownie proces kalibracji kondensatora wzorcowego omawiany w **Przykładzie 1**. Składniki złożonej niepewności standardowej kalibracji pochodzą w tym przypadku od trzech źródeł, jak pokazano to na schemacie z rys. 1.



Rys.1. Źródła i składniki złożonej niepewności standardowej w procesie kalibracji kondensatora wzorcowego metodą podstawienia

5. Model matematyczny pomiaru – równanie pomiaru

Podstawą dla analizy niepewności kalibracji, realizowanych w CWOM, są odpowiednio konstruowane modele matematyczne pomiaru (równania pomiaru) [2, 3, 4].

Formułowanie równania pomiaru, na potrzeby szacowania niepewności kalibracji, polega na określeniu odpowiedniej funkcji matematycznej, której przeciwie-

dzinę Y może stanowić: błąd pomiaru, poprawka pomiaru lub wartość poprawna. Pochodzące od wyznaczonych źródeł niepewności składniki reprezentowane są w tego rodzaju równaniu w postaci wielkości wejściowych $X_1, X_2, \dots, X_N$, mających wpływ na wielkość wyjściową Y . W ogólnym przypadku model matematyczny stanowi zatem zależność:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3)$$

gdzie: Y – wielkość wyjściowa, $X_1, \dots, X_N$ – zdefiniowane wielkości wejściowe.

Budowę modelu matematycznego, związanego z kalibracją kondensatora wzorcowego metodą podstawienia, pokazano w **Przykładzie 3**.

Przykład 3

Wróćmy do kalibracji kondensatora wzorcowego, szczegółowo omówionej w **Przykładzie 1**. Biorąc pod uwagę ogólną zależność (3) oraz wskazane w **Przykładzie 2** źródła i składniki złożonej niepewności standardowej, dla omawianego przykładu kalibracji, której wynikiem jest wyznaczenie wartości poprawnej pojemności kondensatora kalibrowanego, równanie pomiaru zapiszemy w postaci:

$$C_x = \frac{C_{x\text{ zm}} \cdot r_{x\text{ rozd}} \cdot r_{\text{mostek}} \cdot (C_{\text{odn}} + p_{\text{odn zaokr}} + p_{\text{dryft}} + p_{\text{odn temp}})}{r_{\text{odn rozd}} \cdot C_{\text{odn zm}}} - p_{x\text{ temp}} \quad (4)$$

gdzie: C_x – wyznaczana wartość poprawna pojemności kondensatora kalibrowanego, $C_{x\text{ zm}}$ – pojemność kondensatora kalibrowanego zmierzona mostkiem RLC , $r_{x\text{ rozd}}$ – współczynnik poprawkowy związany ze skończoną rozdzielczością mostka przy pomiarze pojemności kondensatora kalibrowanego, r_{mostek} – współczynnik poprawkowy związany z błędem przeniesienia mostka przy pomiarze metodą podstawienia, C_{odn} – pojemność kondensatora odniesienia podana w świadectwie wzorcowania GUM, $p_{\text{odn zaokr}}$ – poprawka związana z operacją zaokrąglenia wartości poprawnej kondensatora odniesienia w świadectwie wzorcowania GUM, p_{dryft} – poprawka na dryft czasowy pojemności kondensatora odniesienia, $p_{\text{odn temp}}$ – poprawka na zmianę pojemności kondensatora odniesienia pod wpływem zmiany jego temperatury, $r_{\text{odn rozd}}$ – współczynnik poprawkowy związany ze skończoną rozdzielczością mostka przy pomiarze pojemności kondensatora odniesienia, $C_{\text{odn zm}}$ – pojemność kondensatora odniesienia zmierzona mostkiem RLC , $p_{x\text{ temp}}$ – poprawka na zmianę pojemności kondensatora kalibrowanego pod wpływem zmiany jego temperatury.

6. Szczegółowa analiza składników niepewności złożonej, współczynniki wrażliwości, budżet niepewności, złożona niepewność standardowa kalibracji

Jak już wcześniej podano, podstawą dla określenia złożonej niepewności standardowej kalibracji wzorca jest model matematyczny pomiaru. Jest on budowany w oparciu o metodę pomiaru oraz wskazane źródła i składniki złożonej niepewności standardowej. W kolejnym etapie przeprowadza się szczegółową analizę składników

niepewności złożonej wbudowanych w model matematyczny pomiaru. Ponadto, konieczne jest wyznaczenie współczynników wrażliwości $c_1, c_2, \dots, c_N$, opisujących stopień wpływu niepewności standardowych poszczególnych wielkości wejściowych $X_1, \dots, X_N$ na złożoną niepewność standardową $u(y)$. Współczynniki wrażliwości wyznaczane są jako pochodne cząstkowe równania pomiaru (3) po wielkościach wejściowych, zgodnie z zależnością [3, 4]:

$$c_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \bigg|_{i=1 \dots N} \quad (5)$$

gdzie: Y – wielkość wyjściowa, X_i – i -ta wielkość wejściowa.

Wartości oszacowanych niepewności standardowych wielkości wejściowych oraz odpowiadające im rozkłady prawdopodobieństwa, współczynniki wrażliwości oraz składowe niepewności należy zestawzić w odpowiedniej tabeli, tworząc tym samym budżet niepewności. Następnie, oblicza się złożoną niepewność standardową kalibracji, wykorzystując do tego celu równanie propagacji niepewności [3, 4]:

$$u(y) = \sqrt{c_1^2 \cdot u^2(x_1) + c_2^2 \cdot u^2(x_2) + \dots + c_N^2 \cdot u^2(x_N)} \quad (6)$$

gdzie: $c_1, \dots, c_N$ – współczynniki wrażliwości, $u(x_1), \dots, u(x_N)$ – niepewności standardowe.

Równanie (6) obowiązuje w sytuacji, gdy wielkości wejściowe nie są ze sobą skorelowane w istotnym stopniu [4], co z reguły ma miejsce w przypadku kalibracji wzorców R, L, C , realizowanych w CWOM.

Niepewność rozszerzoną kalibracji wzorca ostatecznie opisuje zależność [3, 4]:

$$U = k \cdot u(y) \quad (7)$$

gdzie: k – współczynnik rozszerzenia, $u(y)$ – złożona niepewność standardowa.

Szczegóły wyznaczania niepewności rozszerzonej kalibracji wzorca wielkości elektrycznej, na podstawie wcześniej skonstruowanego modelu matematycznego pomiaru, ilustruje **Przykład 4**.

Przykład 4

Dany jest proces kalibracji kondensatora wzorcowego metodą podstawienia, omówiony w **Przykładzie 1**, wraz z odpowiadającym mu modelem matematycznym pomiaru, pokazanym w **Przykładzie 3**.

Szczegółową analizę składników niepewności złożonej przedstawiono poniżej [3, 4, 5].

a) Niepewności związane z rozrzutami w seriach pomiarowych pojemności kondensatora kalibrowanego $u(C_{xzm})$ oraz kondensatora odniesienia $u(C_{odnzm})$

Wykonano serię $n = 30$ pomiarów pojemności kondensatora kalibrowanego. Z otrzymanych wyników pomiaru obliczono wartość średnią arytmetyczną pojemności, która wynosi:

$$\overline{C_{xzm}} = 100,03141 \text{ nF}$$

Dla serii wykonanych pomiarów pojemności kondensatora kalibrowanego wyznaczono również odchylenie standardowe eksperymentalne:

$$s(C_{x\text{ zm}}) = 0,00072 \text{ nF}$$

oraz odchylenie standardowe eksperymentalne średniej, stanowiące niepewność standardową:

$$u(C_{x\text{ zm}}) = s(\overline{C_{x\text{ zm}}}) = \frac{s(C_{x\text{ zm}})}{\sqrt{n}} = \frac{0,00072 \text{ nF}}{\sqrt{30}} = 0,00013 \text{ nF} \quad (8)$$

Analogicznie, dla kondensatora odniesienia, po wykonaniu serii $n = 30$ pomiarów pojemności została wyznaczona wartość średnia arytmetyczna:

$$\overline{C_{\text{odn zm}}} = 99,99133 \text{ nF}$$

oraz odchylenie standardowe eksperymentalne średniej równe niepewności standardowej:

$$u(C_{\text{odn zm}}) = s(\overline{C_{\text{odn zm}}}) = \frac{s(C_{\text{odn zm}})}{\sqrt{n}} = \frac{0,00084 \text{ nF}}{\sqrt{30}} = 0,00015 \text{ nF} \quad (9)$$

b) Niepewności związane z rozdzielczością wskazań mostka $u(r_{x\text{ rozd}})$ i $u(r_{\text{odn rozd}})$

Współczynnik poprawkowy związany ze skończoną rozdzielczością wskazań mostka określany jest w ten sam sposób dla kondensatora odniesienia jak i kalibrowanego, a jego estymata w obu przypadkach wynosi 1. Korzystając z opcji DELTA mostka RLC 1693, pomiary wykonano z najlepszą możliwą rozdzielczością równą 0,00001 nF. Niepewność standardowa współczynnika poprawkowego rozdzielczości względnej (przy założeniu rozkładu prostokątnego) wynosi:

$$u(r_{x\text{ rozd}}) = u(r_{\text{odn rozd}}) = \frac{0,00001 \text{ nF}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 100 \text{ nF}} = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ F} \quad (10)$$

c) Niepewność pochodząca od błędu przeniesienia mostka $u(r_{\text{mostek}})$

Dla współczynnika poprawkowego r_{mostek} przyjęto estymatę równą 1. Wyznaczony doświadczalnie błąd przeniesienia używanego mostka RLC 1693, przy pomiarze metodą podstawienia, nie przekracza $20 \cdot 10^{-6} \text{ F/F}$. Przy założeniu rozkładu prostokątnego niepewność standardowa współczynnika poprawkowego od błędu przeniesienia mostka RLC jest równa

$$u(r_{\text{mostek}}) = \frac{20 \cdot 10^{-6} \text{ F}}{\sqrt{3}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ F} \quad (11)$$

d) Niepewność związana z wzorcowaniem kondensatora odniesienia $u(C_{\text{odn}})$

Wartość poprawna pojemności kondensatora odniesienia i jej niepewność pochodzą ze świadectwa wzorcowania GUM. Niepewność rozszerzona podana jest w świadectwie wzorcowania, dla poziomu ufności 95 % i współczynnika rozszerzenia $k = 2$. Na tej podstawie została wyznaczona niepewność standardowa wzorcowania kondensatora odniesienia, przy założeniu rozkładu normalnego:

$$u(C_{\text{odn}}) = \frac{U}{2} = \frac{0,007 \text{ nF}}{2} = 0,0035 \text{ nF} \quad (12)$$

e) Niepewność związana z operacją zaokrąglenia wartości poprawnej kondensatora odniesienia w świadectwie wzorcowania $u(p_{\text{odn zaokr}})$

Dla kondensatora R597/15 wartość poprawna odtwarzanej pojemności i jej niepewność podane są w świadectwie wzorcowania GUM w sposób następujący:

$$C = (99,993 \pm 0,007) \text{ nF}$$

Ze względu na skończoną rozdzielczość zapisu wartości poprawnej, maksymalny błąd zaokrąglenia jest równy połowie najmniej znaczącej cyfry, z jaką zapisany jest wynik wzorcowania. Dla poprawki addytywnej od zaokrąglenia wartości poprawnej kondensatora odniesienia została przyjęta estymata równa 0. Przy założeniu rozkładu prostokątnego niepewność od zaokrąglenia wartości poprawnej wynosi:

$$u(p_{\text{odn zaokr}}) = \frac{0,001 \text{ nF}}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00029 \text{ nF} \quad (13)$$

f) Niepewność związana z dryfem czasowym kondensatora odniesienia $u(p_{\text{dryft}})$

Analizując wyniki z kilku poprzednich wzorcowań kondensatora odniesienia w GUM można stwierdzić, że nie istnieje jednoznaczny trend zmian jego pojemności. Przyjęto więc poprawkę addytywną równą 0. Na podstawie historii wzorcowań można określić również maksymalną zmianę wartości poprawnej między dwoma kolejnymi wzorcownikami. Dla analizowanego przykładu wynosi ona 0,01 nF. Stąd też można wyznaczyć niepewność poprawki na dryft pojemności kondensatora odniesienia, przy założeniu rozkładu prostokątnego:

$$u(p_{\text{dryft}}) = \frac{0,01 \text{ nF}}{\sqrt{3}} = 0,0058 \text{ nF} \quad (14)$$

g) Niepewności wynikające ze zmian pojemności kondensatorów odniesienia i kalibrowanego pod wpływem zmian temperatury $u(p_{\text{odn temp}})$ i $u(p_{\text{x temp}})$

System klimatyzacyjny w pomieszczeniu laboratoryjnym utrzymuje temperaturę w granicach $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Można zatem przyjąć założenie, że zmiana temperatury otoczenia w tych granicach skutkuje zmianą temperatury kondensatora w przedziale $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Dla kondensatora odniesienia jak i kalibrowanego przyjęto wartości poprawek addytywnych równe 0. Kondensatory kalibrowany i odniesienia są tego samego typu (R597/15). Producent określa ich współczynniki temperaturowe jako „równe klasie kondensatora na każde $10 ^\circ\text{C}$ zmian temperatury”. Klasa kondensatora typu R597/15 wynosi 0,1 %, a zatem współczynnik temperaturowy ϑ równy jest:

$$\vartheta = \text{klasa} \cdot \frac{\text{wartość nominalna}}{10 ^\circ\text{C}} = \frac{0,1}{100} \cdot \frac{100 \text{ nF}}{10 ^\circ\text{C}} = 0,01 \frac{\text{nF}}{^\circ\text{C}} \quad (15)$$

Przy założeniu rozkładu prostokątnego niepewność pojemności, związana ze zmianą temperatury kondensatora R597/15 o $\Delta t = 1^\circ\text{C}$, wynosi więc:

$$u(p_{\text{odn temp}}) = u(p_{x \text{ temp}}) = \frac{\vartheta \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} = \frac{0,01 \frac{\text{nF}}{^\circ\text{C}} \cdot 1^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,0058 \text{ nF} \quad (16)$$

Po uwzględnieniu przyjętych założeń, iż wszystkie, występujące w równaniu (4), poprawki addytywne posiadają estymaty równe 0, zaś estymaty multiplikatywnych współczynników poprawkowych równe są 1, poszukiwane współczynniki wrażliwości można wyrazić jako:

c_1 – pochodna cząstkowa po $C_{x \text{ zm}}$

$$c_1 = \frac{\partial C_x}{\partial C_{x \text{ zm}}} = \frac{C_{\text{odn}}}{C_{\text{odn zm}}} \left[\frac{\text{F}}{\text{F}} \right] \quad (17)$$

c_2 – pochodna cząstkowa po $r_{x \text{ rozd}}$

$$c_2 = \frac{\partial C_x}{\partial r_{x \text{ rozd}}} = \frac{C_{x \text{ zm}} \cdot C_{\text{odn}}}{C_{\text{odn zm}}} [\text{F}] \quad (18)$$

c_3 – pochodna cząstkowa po r_{mostek}

$$c_3 = \frac{\partial C_x}{\partial r_{\text{mostek}}} = \frac{C_{x \text{ zm}} \cdot C_{\text{odn}}}{C_{\text{odn zm}}} [\text{F}] \quad (19)$$

c_4 – pochodna cząstkowa po C_{odn}

$$c_4 = \frac{\partial C_x}{\partial C_{\text{odn}}} = \frac{C_{x \text{ zm}}}{C_{\text{odn zm}}} \left[\frac{\text{F}}{\text{F}} \right] \quad (20)$$

c_5 – pochodna cząstkowa po $p_{\text{odn zaokr}}$

$$c_5 = \frac{\partial C_x}{\partial p_{\text{odn zaokr}}} = \frac{C_{x \text{ zm}}}{C_{\text{odn zm}}} \left[\frac{\text{F}}{\text{F}} \right] \quad (21)$$

c_6 – pochodna cząstkowa po p_{dryft}

$$c_6 = \frac{\partial C_x}{\partial p_{\text{dryft}}} = \frac{C_{x \text{ zm}}}{C_{\text{odn zm}}} \left[\frac{\text{F}}{\text{F}} \right] \quad (22)$$

c_7 – pochodna cząstkowa po $p_{\text{odn temp}}$

$$c_7 = \frac{\partial C_x}{\partial p_{\text{odn temp}}} = \frac{C_{x \text{ zm}}}{C_{\text{odn zm}}} \left[\frac{\text{F}}{\text{F}} \right] \quad (23)$$

c_8 – pochodna cząstkowa po $r_{\text{odn rozd}}$

$$c_8 = \frac{\partial C_x}{\partial r_{\text{odn rozd}}} = - \frac{C_{x \text{ zm}} \cdot C_{\text{odn}}}{C_{\text{odn zm}}^2} \left[\frac{\text{F}}{\text{F}} \right] \quad (24)$$

c_9 – pochodna cząstkowa po $C_{\text{odn zm}}$

$$c_9 = \frac{\partial C_x}{\partial C_{\text{odn zm}}} = -\frac{C_{x \text{ zm}} \cdot C_{\text{odn}}}{C_{\text{odn zm}}^2} \left[\frac{F}{F} \right] \quad (25)$$

c_{10} – pochodna cząstkowa po $p_{x \text{ temp}}$

$$c_{10} = \frac{\partial C_x}{\partial p_{x \text{ temp}}} = -1 \left[\frac{F}{F} \right] \quad (26)$$

Wyniki oszacowania niepewności wielkości wejściowych oraz odpowiadające im współczynniki wrażliwości zamieszczono w tabeli budżetu niepewności (Tab. 1).

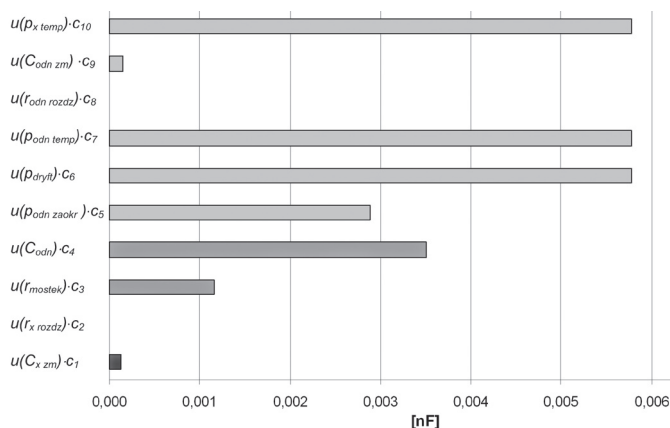
Tabela 1. Tabela budżetu niepewności

Wielkość wejściowa X_i	Estymata x_i	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział niepewności $u_i(C_x)$
$C_{x \text{ zm}}$	100,03141 nF	0,00013 nF	normalny	1,000017 F/F	0,00013 nF
$r_{x \text{ rozd}}$	1	$2,9 \cdot 10^{-8}$ F/F	prostokątny	100,033081 nF	$2,9 \cdot 10^{-6}$ nF
r_{mostek}	1	$12 \cdot 10^{-6}$ F/F	prostokątny	100,033081 nF	0,0012 nF
C_{odn}	99,993 nF	0,0035 nF	normalny	1,000401 F/F	0,0035 nF
$p_{\text{odn zaokr}}$	0	0,00029 nF	prostokątny	1,000401 F/F	0,00029 nF
p_{dryft}	0	0,0058 nF	prostokątny	1,000401 F/F	0,0058 nF
$p_{\text{odn temp}}$	0	0,0058 nF	prostokątny	1,000401 F/F	0,0058 nF
$r_{\text{odn rozd}}$	1	$2,9 \cdot 10^{-8}$ F/F	prostokątny	-1,000418 nF	$-2,9 \cdot 10^{-8}$ nF
$C_{\text{odn zm}}$	99,99133 nF	0,00015 nF	normalny	-1,000418 F/F	-0,00015 nF
$p_{x \text{ temp}}$	0	0,0058 nF	prostokątny	-1 F/F	-0,0058 nF
C_x	100,03308				0,01067 nF

Udziały poszczególnych niepewności standardowych w złożonej niepewności standardowej, rozpatrywanej kalibracji kondensatora wzorcowego, przedstawiono na rys. 2.

Złożoną niepewność standardową wyznaczono z równania propagacji niepewności, przy założeniu, że wielkości wejściowe nie są ze sobą skorelowane w istotnym stopniu:

$$u(C_x) = \sqrt{u^2(C_{x \text{ zm}}) \cdot c_1^2 + u^2(r_{x \text{ rozd}}) \cdot c_2^2 + u^2(r_{\text{mostek}}) \cdot c_3^2 + u^2(C_{\text{odn}}) \cdot c_4^2 + u^2(p_{\text{odn zaokr}}) \cdot c_5^2 + u^2(p_{\text{dryft}}) \cdot c_6^2 + u^2(p_{\text{odn temp}}) \cdot c_7^2 + u^2(r_{\text{odn rozd}}) \cdot c_8^2 + u^2(C_{\text{odn zm}}) \cdot c_9^2 + u^2(p_{x \text{ temp}}) \cdot c_{10}^2} \quad (27)$$



Rys. 2. Oszacowane udziały niepewności standardowych

Dla składników złożonej niepewności standardowej przyjęto rozkłady normalne lub prostokątne [3, 4, 5]. Z analizy zestawienia podanego w tab. 1 wynika, iż w budżecie niepewności dominują składniki o rozkładzie prostokątnym, pochodzące od zmian temperatury kondensatora odniesienia i kondensatora kalibrowanego oraz od dryftu kondensatora odniesienia. Na drugim miejscu, pod względem udziału w złożonej niepewności standardowej, występuje składnik pochodzący od wzorcowania kondensatora odniesienia w GUM. Ostatecznie dla niepewności rozszerzonej przyjęto współczynnik rozszerzenia $k = 2$, przy poziomie ufności 95 %, co można zapisać jako:

$$U = k \cdot u(C_x) = 2 \cdot 0,01067 \text{ nF} = 0,02134 \text{ nF} \quad (28)$$

Wynik realizowanej kalibracji ostatecznie zapisano w sposób następujący:

$$C_x = (100,033 \pm 0,022) \text{ nF}$$

7. Podsumowanie

Jak wynika z doświadczeń CWOM metoda podstawienia, mimo swojej prostoty, daje dobre rezultaty w zakresie kalibracji wzorców R , L , C .

Wykorzystanie tej metody w procesie kalibracji wzorca o charakterze reaktancyjnym wiąże się z koniecznością odpowiedniego dopasowania wzorca odniesienia do obiektu kalibracji, tzn.: wymagane są tu zbliżone właściwości metrologiczne obydwu wzorców. Istotnym zagadnieniem jest również zbieżność konstrukcji zacisków, odpowiednio wzorca odniesienia oraz kalibrowanego, co ma znaczenie z punktu widzenia zapewnienia niezmienności połączeń w trakcie pomiarów parametrów obydwu wzorców.

Zysk w budżecie niepewności, uzyskany w związku ze znaczącym wyeliminowaniem udziału wpływu właściwości metrologicznych przyrządu pomiarowego na jakość kalibracji, uwidacznia się jedynie wówczas, gdy zapewni się wysoką jakość

wzorcowania wzorca odniesienia. Innymi słowy, wymaga się w tej sytuacji małej niepewności rozszerzonej wzorcowania wzorca odniesienia, co jest czynnikiem decydującym o wyborze metody podstawienia.

Podstawowym sposobem minimalizacji wpływu temperatury, tak na obiekt kalibracji, jak i wzorzec odniesienia, jest ich umieszczenie we wspólnej komorze termicznej. Ponadto, celowe jest przeanalizowanie możliwości występowania korelacji pomiędzy zmianami wartości parametrów wzorców, wynikających ze zmian temperatury w laboratorium.

Literatura

- [1] Opracowanie „Zapewnienie spójności pomiarowej w działalności wojskowych laboratoriów metrologicznych”, zatwierdzone Decyzją Nr 17/WCM/2008 Dyrektora Wojskowego Centrum Metrologii z dnia 21.03.2008 r.
- [2] *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik*, GUM 1999.
- [3] *Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu*. EA-4/02, GUM 2001.
- [4] T. Skubis: *Podstawy metrologicznej interpretacji wyników pomiarów. Monografia*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
- [5] J. Jaworski: *Niepewność pomiaru, rozkłady zmiennych losowych modelujących błędy pomiaru*. XXXVI Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, Ustroń, 21 – 24 czerwca 2004, Materiały konferencyjne, s. 267-276.