

Mgr inż. Paweł Fotowicz  
Dr Albin Czubla  
Główny Urząd Miar

## ZAGADNIENIE SPÓJNOŚCI POMIAROWEJ WE WSPÓŁCZESNEJ METROLOGII

*Przedstawiono zasady realizacji spójności pomiarowej. Omówiono związane z nią pojęcia takie jak: wartość odniesienia porównania kluczowego, stopień równoważności państwowego wzorca jednostki miary oraz porównania kluczowe państwowych wzorców jednostek miar. Opisano rolę wzorcowania przyrządów pomiarowych przy przekazywaniu jednostki miary. Przedstawiono schemat przekazywania jednostki miary od jej definicji poprzez łańcuch porównań do użytkowego przyrządu pomiarowego.*

### THE PROBLEM OF TRACEABILITY IN PRESENT METROLOGY

*The principle of realization of traceability is presented. The terms connected with traceability such as key comparison reference value, degree of equivalence of national measurement standard and key comparison of national measurement standards are discussed. The role of measuring instrument calibration in dissemination of measurement unit is described. The scheme of dissemination of measurement unit through an unbroken chain of comparisons is presented.*

### 1. WPROWADZENIE

Spójność pomiarowa to właściwość wyniku pomiaru lub wzorca jednostki miary polegająca na tym, że można ją powiązać z określonymi odniesieniami, na ogół z wzorcami państwowymi lub międzynarodowymi jednostki miary, za pośrednictwem nieprzerwanego łańcucha porównań, z których wszystkie mają określone niepewności [1]. Innymi słowy jest to powiązanie każdego wyniku pomiaru z właściwym dlań odniesieniem. Tym ostatecznym odniesieniem powinna być definicja jednostki miary, którą odtwarza przyrząd pomiarowy lub wzorzec miary. Realizacja tego zadania może odbywać się jedynie na drodze teoretycznej, gdyż definicje jednostek miar mają charakter abstrakcyjny i w praktyce na ogół nie mogą być realizowane. Przykładem może być definicja metra, która mówi, że jest to długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie  $1/299792458$  sekundy [2]. Nie odnosi się do konkretnie istniejącego artefaktu lub stanowiska badawczego, a więc zawsze obciążonego niepewnością i niestabilnością jej odtwarzania, lecz ma znamiona wartości prawdziwej: dokładnej i niezmiennej. Powstaje zatem pytanie jak zachować spójność do tak przedstawionej definicji jednostki miary.

## 2. BŁĄD POMIARU

Powiązanie pomiędzy wynikiem pomiaru a wartością prawdziwą przedstawia definicja błędu pomiaru

$$e = y - \dot{y} \quad (1)$$

gdzie  $y$  to wynik pomiaru, a  $\dot{y}$  to wartość prawdziwa. Aby zrealizować to powiązanie należy określić najlepsze przybliżenie wartości prawdziwej. Jest nią wartość odniesienia porównania kluczowego [3], którą uważa się za najbliższą definicyjnej jednostki miary. Wartość ta nie jest ostateczna, gdyż w miarę postępu cywilizacyjnego odtwarzanie jednostek miar odbywać się będzie z coraz większą dokładnością. Wartości odniesienia będzie zatem podlegała modyfikacjom, jak również niepewność z nią związana. Wartości odniesienia uzyskuje się na drodze porównań między-laboratoryjnych wykonywanych w placówkach o najwyższych kompetencjach metrologicznych, tzn. takich które dysponują stanowiskami charakteryzującymi się długoterminową stabilnością, np. wzorcami opartymi na wykorzystaniu efektu kwantowego.

## 3. PORÓWNANIE KLUCZOWE

Wartość odniesienia porównania kluczowego określa się jako średnią ważoną wyników pomiarów uzyskanych we wszystkich laboratoriach uczestniczących w porównaniach kluczowych i posiadających swoje własne wzorce pierwotne

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i / U_i^2)}{\sum_{i=1}^N (1 / U_i^2)} \quad (2)$$

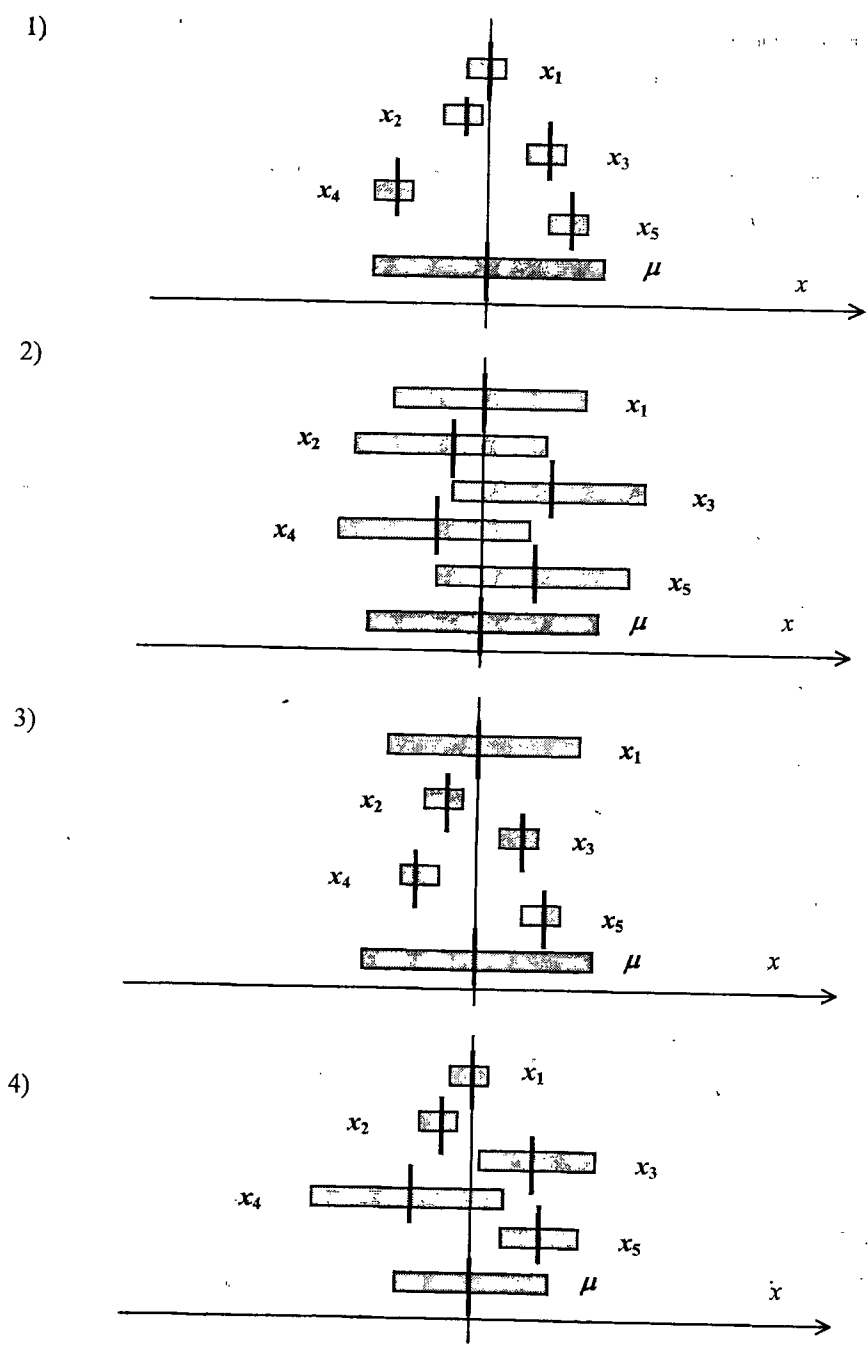
gdzie:  $x_i$  – wynik wzorcowania  $i$ -tego laboratorium

$U_i$  – niepewność wyniku  $i$ -tego laboratorium

Niepewność rozszerzoną wyznaczenia wartości odniesienia porównania kluczowego wyraża się formułą

$$U_{\mu}^2 = 4 \sum_{i=1}^N \left[ (x_i - \mu)^2 / U_i^2 \right] / \sum_{i=1}^N (1 / U_i^2) \quad (3)$$

Właściwości przyjętego sposobu obliczania niepewności wartości odniesienia porównania kluczowego ilustrują wykresy na rys. 1. Symbole  $x_1$  do  $x_5$  przedstawiają wyniki pomiarów uzyskane przez laboratoria uczestniczące wraz z naniesionymi wokół nich wartościami niepewności. Najniżej położone na wykresach oznaczenie  $\mu$  reprezentuje wartość odniesienia wraz z jej niepewnością. Niepewność obliczona formułą (3) pozostaje taka sama niezależnie od wartości niepewności uzyskanych w poszczególnych laboratoriach pod warunkiem, że są one do siebie zbliżone co do wartości (wykres 1 i 2).



Rys. 1. Właściwości metody obliczania niepewności wartości odniesienia

Jeżeli w jednym laboratorium wynik opisany będzie niepewnością znacznie większą od pozostałych to nie będzie to miało istotnego wpływu na niepewność związaną z wielkością  $\mu$  (wykres 3). Jedyne znaczne zróżnicowanie niepewności wyznaczonych w poszczególnych laboratoriach wpływa na wartość niepewności przypisanej wynikowi porównania kluczowego (wykres 4).

Niepewność wyniku pomiaru uzyskana w laboratorium biorącym udział w porównaniach kluczowych wyrażona jest formułą

$$U_i^2 = U_{0i}^2 + U_{wp}^2 \quad (4)$$

gdzie:  $U_{0i}$  – niepewność deklarowana przez laboratorium

$U_{wp}$  – niepewność wzorca przenośnego

Niepewność wzorca przenośnego wyznacza laboratorium pilotujące porównanie kluczowe na podstawie wzorcowań przeprowadzonych przed i po przeprowadzonym cyklu porównawczym.

Gdy porównanie kluczowe przeprowadzane jest w więcej niż jednym cyklu porównawczym, jak przedstawiono na rys. 2, przy wyznaczaniu niepewności wyniku pomiaru należy uwzględnić dodatkowo niepewność laboratorium pośredniczącego w obu cyklach

$$U_{i,j}^2 = U_{0i}^2 + U_{wp1}^2 + U_{Ak}^2 + U_{0j}^2 + U_{wp2}^2 \quad (5)$$

gdzie:  $U_{0i}$  i  $U_{0j}$  – niepewności deklarowane odpowiednio przez  $i$ -te i  $j$ -te laboratorium

$U_{wp1}$  i  $U_{wp2}$  – niepewność wzorca przenośnego użytego w pierwszym i drugim cyklu porównawczym

$U_{Ak}$  – niepewność laboratorium pośredniczącego wyznaczona na drodze analizy statystycznej

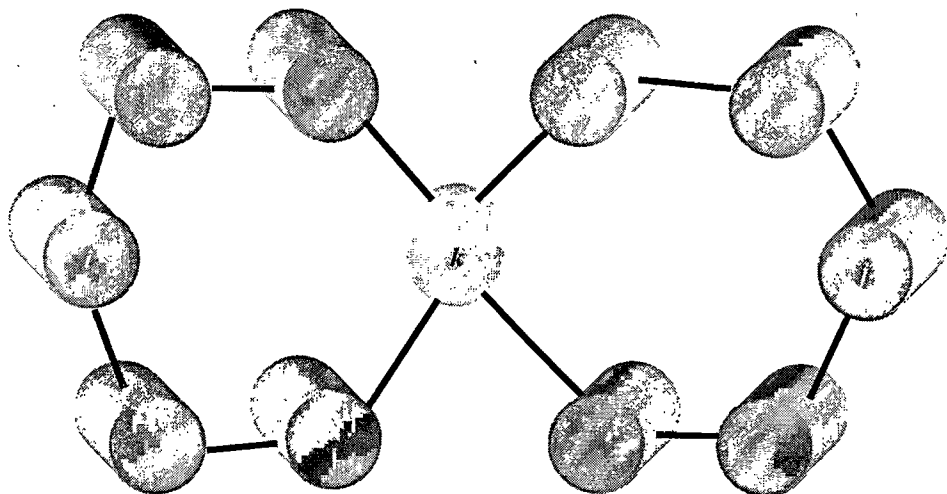
Porównania kluczowe dotyczą na ogół wzorców o statusie państwowych wzorców jednostek miar. Dla każdego takiego wzorca określa się jego stopień równoważności. Stopień równoważności wzorca wyrażony jest poprzez jego odchylenie od tej wartości odniesienia i niepewność tego odchylenia. Stopień równoważności pomiędzy dwoma wzorcami państwowymi z kolei wyrażony jest poprzez różnicę ich odchylenia od wartości odniesienia i niepewność tej różnicy.

Stopień równoważności wyników pomiaru określa wzór

$$E_i = (x_i - \mu) / \sqrt{U_i^2 + U_\mu^2} \quad (6)$$

Zazwyczaj przy poziomie ufności 95% wynik pomiaru uzyskany w  $i$ -tym laboratorium jest uznawany za równoważny jeżeli

$$-1 \leq E_i \leq 1 \quad (7)$$



Rys. 2. Porównania kluczowe w dwóch cyklach porównawczych

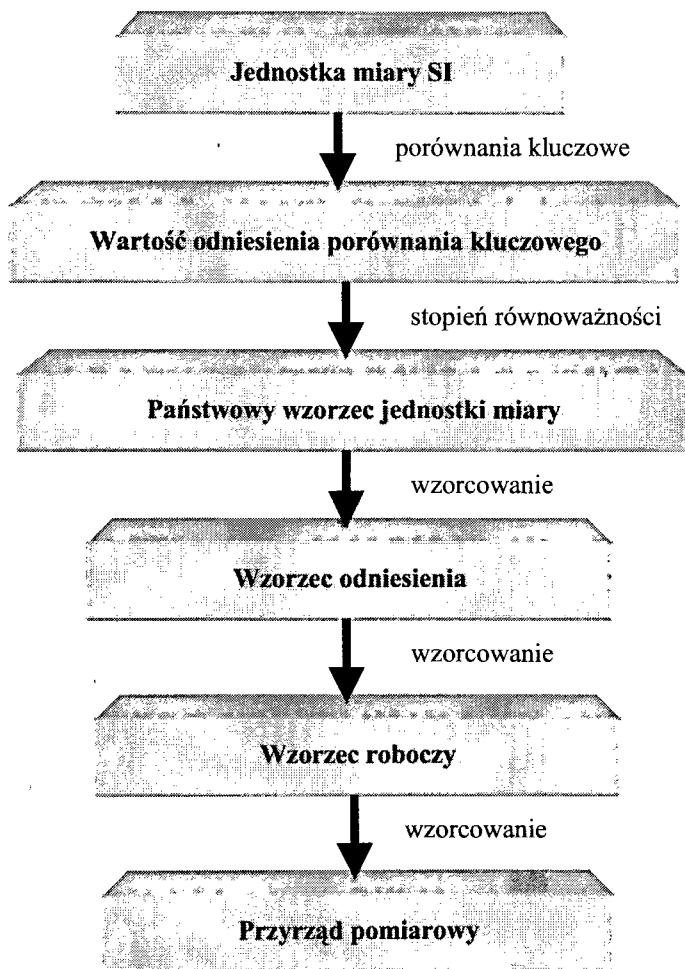
#### 4. WZORCOWANIE

Przekazywanie jednostki miary odbywa się drogą pośrednią poprzez system wzorców odniesienia i roboczych do przyrządu pomiarowego. Czynność ta nazywana jest wzorcowaniem. Wzorcowanie to zbiór operacji ustalających, w określonych warunkach, relację między wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy lub układ pomiarowy albo reprezentowanymi przez wzorec miary lub materiał odniesienia, a odpowiednimi wartościami wielkości realizowanymi przez wzorce jednostki miary [1]. Ustalenie powyższej relacji na ogół odbywa się na drodze wyznaczenia błędu pomiaru wzorca lub przyrządu pomiarowego. Wyznaczeniu błędu towarzyszy zawsze określenie niepewności jego wyznaczenia. Niepewność ta powinna określić przedział ufności, wewnątrz którego z dużym prawdopodobieństwem znajduje się wartość prawdziwa, czyli wartość zgodna z definicją odtwarzanej jednostki miary. Poszczególne etapy wzorcowania tworzą pewien łańcuch powiązań określający spójność pomiarową.

#### 5. SPÓJNOŚĆ POMIAROWA

Schemat spójności pomiarowej we współczesnej metrologii przedstawia rys. 3. Na szczyte tego schematu znajduje się definicja jednostki miary SI. Zgodnie z zasadami wynikającymi z Konwencji Metrycznej spójność odnosi się do międzynarodowo przyjętych jednostek miar [4]. Ich definicje określają uchwały Międzynarodowego Komitetu Miar. Ponieważ dokładna realizacja definicji jednostki miary nie jest możliwa to w wyniku porównania kluczowego określa się wartość odniesienia wraz z jej niepewnością wyznaczającą przedział ufności wokół wartości definicyjnej. Wraz z

wartością odniesienia wyznacza się stopnie równoważności państwowych wzorców jednostek miar, które służą do odtwarzania jednostek miar w poszczególnych krajach członkowskich, które ratyfikowały Konwencję Metryczną. Wzorce te są podstawowymi odniesieniami w danym kraju dla pozostałych wzorców jednostek miar w postaci wzorców materialnych, przyrządów i układów pomiarowych oraz materiałów odniesienia.



Rys. Schemat realizacji spójności pomiarowej

Przekazywanie jednostki miary poprzez wzorcowanie odbywa się zgodnie z hierarchicznymi układami sprawdzeń właściwymi dla danej wielkości mierzonej. Układy te obejmują system wzorców jednostek miar od wzorca odniesienia poprzez

wzorcy robocze poszczególnych rzędów aż do użytkowych przyrządów pomiarowych. Na każdym etapie przekazywanie odbywa się poprzez określenie odchylenia wartości danego wzorca od wartości wzorca odniesienia, znajdującego się wyżej w układzie hierarchicznym, wraz z niepewnością tego odchylenia obejmującą z dużym prawdopodobieństwem wartość definicyjną. Na samym dole omawianego schematu znajduje się zawsze użytkowy przyrząd pomiarowy, dla którego wyznacza się w procesie wzorcowania błąd wskazania wraz z niepewnością jego wyznaczenia. To ona właśnie określa ostatecznie przedział ufności, w którym powinna znajdować się wartość prawdziwa wyniku pomiaru. W ten sposób wzorcowanie zapewnia wynikowi pomiaru spójność z definicyjną jednostką miary SI, którą przyrząd pomiarowy odtwarza przy każdym swoim wskazaniu.

## 6. PODSUMOWANIE

Zapewnienie spójności pomiarowej to ważne zagadnienie dla współczesnej metrologii. Przyjęcie jednolitego metrycznego systemu jednostek miar i ratyfikowanie go przez większość liczących się państw dla gospodarki światowej umożliwiło zdefiniowanie podstawowych jednostek miar i stworzenie zasad ich przekazywania do przyrządów pomiarowych. Zasadniczą rolę odgrywają tu porównania kluczowe, których celem jest ustalenie wartości odniesienia i stopni równoważności państwowych wzorców jednostek miar. Równie ważną rolę odgrywają wzorcowania, które zgodnie z hierarchicznymi układami sprawdzają, umożliwiają przekazywanie jednostki miary do użytkowego przyrządu pomiarowego. Obie te czynności znalazły odbicie w międzynarodowej umowie MRA [5], będącej podstawą zapewnienia spójności pomiarowej w skali ogólnoświatowej.

## LITERATURA

- [1] Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii. Wydawnictwo GUM 1996
- [2] Wielkości fizyczne i jednostki miar. Przestrzeń i czas. Polska norma PN-ISO 31-1
- [3] P. Fotowicz: Ogólnoświatowe i regionalne porównania kluczowe. PAR nr 4/2001
- [4] Przewodnik SI. Międzynarodowy Układ Jednostek Miar. Wydawnictwo PKN 2003
- [5] Wzajemne uznawanie państwowych wzorców jednostek miar oraz świadectw wzorcowania wydawane przez krajowe instytucje metrologiczne. Umowa międzynarodowa z 14 października 1999 r. Tłumaczenie GUM 2000