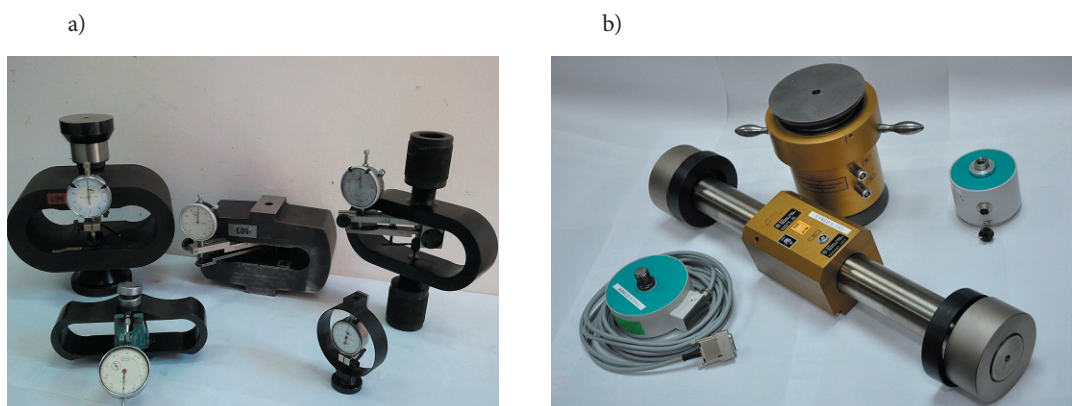


Wzorcowanie siłomierzy i przetworników siły

Mikołaj Woźniak

1. Wstęp

Siłomierze, zwane też czasem dynamometrami, wykorzystywane są do pomiarów jednostki miary siły w wielu dziedzinach nauki i przemysłu, głównie w celu określenia wytrzymałości materiałów, wyrobów i konstrukcji na działanie sił ściskających, rozciągających lub zginających. Podstawowym elementem każdego siłomierza jest odpowiednio zaprojektowany przetwornik siły, który pod wpływem działania siły odkształca się. Pomiar tego odkształcenia przeprowadza się mechanicznie, elektrycznie lub optycznie przy pomocy urządzenia wskazującego, które może być analogowe (np. czujnik zegarowy w siłomierzach pałkowych i pierścieniowych) lub cyfrowe (np. miernik rejestrujący sygnał elektryczny z tensometrycznego przetwornika siły). Można wyróżnić różnego rodzaju przyrządy do pomiaru siły, przy czym w Laboratorium Siły i Ciśnienia Głównego Urzędu Miar najczęściej wzorcowane są siłomierze pałkowe i siłomierze z tensometrycznym przetwornikiem siły, przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Różne rodzaje siłomierzy: a) pałkowe i pierścieniowe, b) tensometryczne przetworniki siły

Ze względu na charakter zastosowania oraz swoją budowę, siłomierze mają różne udźwigi (do 500 N lub do 100 kN) i wymiary. Siłomierze do pomiaru sił rozciągających o udźwigu 10 MN mogą mieć długość nawet 2 m i ważyć pół tony, podczas gdy wagowe przetworniki siły mają przeważnie rozmiary rzędu kilku centymetrów. Lepsza rozdzielczość, ułatwione wykonywanie pomiarów, doskonalsze konstrukcje i parametry tensometrycznych przetworników siły powodują, że stopniowo wypierają one z użytkowania siłomierze pałkowe i im podobne.

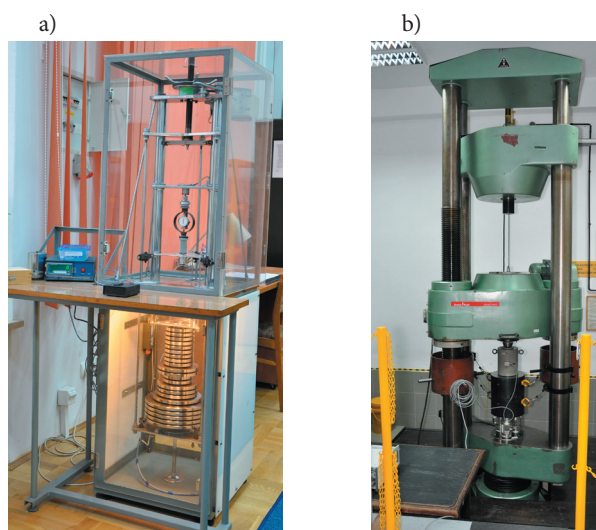
2. Wzorzec jednostki miary siły w Głównym Urzędzie Miar

Do wzorcowania siłomierzy w Laboratorium Siły i Ciśnienia Głównego Urzędu Miar wykorzystuje się cztery maszyny obciążnikowe i trzy zestawy obciążników wchodzące w skład wzorca pierwotnego oraz maszynę hydrauliczną z układem trzech przetworników odniesienia, który pełni rolę wzorca wtórnego.

Maszyny obciążnikowe i zestawy obciążników odtwarzają jednostkę miary siły poprzez zastosowanie quasi statycznej siły ciężenia obciążników i umożliwiają bezpośrednie obciążanie wzorcowanego przyrządu siłami rozciągającymi i siłami ściskającymi w kierunku pionowym. Realizują zatem konkretne wartości siły z przedziału 10 N ÷ 500 kN dla maszyn obciążnikowych oraz (0,02 ÷ 500) N dla zestawów obciążników. Wartość siły odtwarzanej przez obciążniki wyraża się zależnością:

$$F = m \cdot g \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \quad (1)$$

gdzie: m – masa obciążnika, g – wartość przyspieszenia ziemskiego w miejscu stosowania obciążnika, ρ_p – gęstość powietrza, ρ_m – gęstość materiału obciążnika.



Rys. 2. Maszyny wzorca jednostki miary siły w Głównym Urzędzie Miar: a) maszyna obciążnikowa stanowiska wzorcowego siły do 500 N, b) maszyna hydrauliczna stanowiska wzorcowego siły do 3000 kN

Z kolei maszyna hydrauliczna, o zakresie pomiarowym (100 ÷ 3000) kN, posiada tzw. układ *build-up* – trzy tensometryczne przetworniki siły, o udźwigu 1 MN każdy, zamontowane równolegle wokół osi maszyny w przestrzeni roboczej. Siła generowana jest przez układ hydrauliczny tłok/cylinder i mierzona jest jako suma sił mierzonych przez pojedyncze przetworniki. Względna niepewność rozszerzona wartości zadawanej siły tego stanowiska wynosi 0,05 % i jest dużo gorsza niż w przypadku maszyn obciążnikowych, które najczęściej są wykorzystywane jako wzorce jednostki miary siły, charakteryzując się najlepszą dokładnością i stabilnością pomiarową (względna niepewność rozszerzona około 0,006 %). Wynika to z faktu, że obciążniki wykonane są najczęściej ze stopów stali niemagnetycznej, których dokładnie znana masa ulega niewielkim zmianom przez wiele lat. Problemem jest jednak bardzo duży koszt i rozmiary maszyny obciążnikowej w przypadku dużych zakresów sił (powyżej 100 kN).

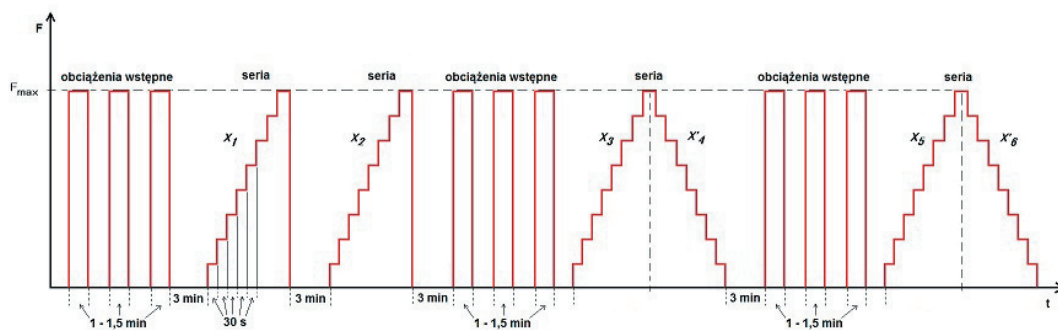
3. Wzorcowanie siłomierzy

W Laboratorium Siły i Ciśnienia Głównego Urzędu Miar wykonuje się pomiary siłomierzy wg kilku podobnych do siebie metod, w tym najczęściej wzorcowanie na zgodność z normą PN-EN ISO 376 [1]. Wzorcowania wykonywane są z reguły dla Okręgowych

Urzędów Miar i akredytowanych laboratoriów wzorcujących, które za pomocą swoich wzorców roboczych (tj. siłomierzy kontrolnych) przenoszą dalej jednostkę siły, poprzez wzorcowanie maszyn wytrzymałościowych.

Przed przystąpieniem do wzorcowania należy przeprowadzić oględziny wstępne siłomierza, które głównie mają na celu wykrycie usterek mechanicznych. W zależności od kierunku działania sił, jakie mają być stosowane podczas wzorcowania, przyrząd umieszcza się we właściwej przestrzeni roboczej maszyny i wyposaża w zestaw koniecznych elementów łącznikowych lub przegubów. Należy także zapewnić, aby podczas obciążania przyrządu pomiarowego siła była przykładana osiowo (oś przyrządu zgodna z osią maszyny).

Pomiary przeprowadza się zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3. Wykonywane są cztery serie pomiarowe dla ustalonych wartości sił wzorcowych F , poprzedzone, z wyjątkiem serii drugiej, trzema obciążeniami wstępnymi, polegającymi na zadaniu maksymalnej siły wzorcowej. Pierwsza i druga seria wykonywane są dla obciążeń rosnących w tej samej pozycji siłomierza. W wyniku tych pomiarów uzyskuje się przyrosty wskazań, odpowiednio X_1 i X_2 . Następnie wykonuje się obrót siłomierza wokół osi o kąt 120° i w tej pozycji przeprowadza się serię pomiarów dla obciążeń rosnących oraz malejących (o ile jest to możliwe). W wyniku tych pomiarów uzyskuje się przyrosty wskazań odpowiednio X_3 i X'_4 . Wyniki ostatniej serii pomiarów należy odczytać po kolejnym obrocie siłomierza o kąt 120° dla obciążeń rosnących oraz malejących. W wyniku tych pomiarów uzyskuje się przyrosty wskazań odpowiednio X_5 i X'_6 . W przypadkach, gdy ustawienie siłomierza w pozycjach 120° i 240° jest niemożliwe, np. ze względu na budowę siłomierza, dopuszcza się zastosowanie pozycji obrotowych 180° oraz 360° . Wartości przyrostów wskazań odczytywane są z urządzenia wskazującego po upływie 30 s po obciążeniu siłomierza daną wartością siły. Wartość wskazania zerowego odczytuje się także po upływie 30 sekund od momentu całkowitego usunięcia obciążenia. Wzorcowanie siłomierza przeprowadza się dla około dziesięciu uzgodnionych wartości sił wzorcowych, równomiernie rozłożonych w zakresie wzorcowania, jednakowych dla wszystkich serii pomiarowych.



Rys. 3. Schemat obciążeń wykonywanych podczas wzorcowania siłomierza

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów, do oceny siłomierza wykorzystuje się obliczenia wartości następujących błędów:

- 1) względnego błędu powtarzalności b' ,
- 2) względnego błędu odtwarzalności b ,
- 3) względnego błędu interpolacji f_c ,
- 4) względnego błędu wskazania zerowego f_0 ,
- 5) względnego błędu histerezy v , który jest obliczany tylko wtedy, gdy wykonano pomiary z obciążeniami malejącymi.

Błędy powyższe oblicza się dla każdej wartości siły wzorcowej F , stosując następującą zależność:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \cdot 100 \% \quad (2)$$

gdzie \bar{X}_{wr} jest wartością średnią wskazań otrzymanych z pierwszych dwóch serii pomiarowych:

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (3)$$

$$b = \left| \frac{X_{max} - X_{min}}{\bar{X}_r} \right| \cdot 100 \% \quad (4)$$

gdzie X_{max} i X_{min} to maksymalny i minimalny przyrost wskazania siłomierza z serii obciążeń wzrastających z obrotem (tj. X_1 , X_3 i X_5), a \bar{X}_r jest wartością średnią wskazań otrzymanych z tych serii:

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} \quad (5)$$

$$f_c = \left| \frac{\bar{X}_r - X_a}{X_a} \right| \cdot 100 \% \quad (6)$$

gdzie X_a to wartość przyrostu wskazania obliczona przy zastosowaniu krzywej interpolacji – równania przyrostu wskazań pierwszego, drugiego lub trzeciego stopnia, jako funkcji siły wzorcowej F . Względny błąd interpolacji nie wyznacza się przeważnie w przypadku wzorcowania siłomierzy pałkowych, które często charakteryzują się dużymi nieliniowościami w zależności wskazania od siły wzorcowej.

$$f_0 = \left| \frac{i_f - i_0}{X_N} \right| \cdot 100 \% \quad (7)$$

gdzie i_0 i i_f to wartości wskazań siłomierza przed i po przyłożeniu serii obciążeń, a X_N to przyrost wskazania odpowiadający maksymalnej sile wzorcowej. Do dalszych analiz i obliczeń należy uwzględnić wartość maksymalną f_0 ze wszystkich serii pomiarowych.

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \cdot 100 \% \quad (8)$$

gdzie:

$$v_1 = \left| \frac{X'_4 - X_3}{X_3} \right| \quad (9)$$

$$v_2 = \left| \frac{X'_6 - X_5}{X_5} \right| \quad (10)$$

Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń, dla każdej wartości siły wzorcowej F , można dokonać klasyfikacji siłomierza pod względem zgodności z wymaganiami normy PN-EN ISO 376 [1]. Wyróżniamy dwa rodzaje klasyfikacji: dla określonych sił i dla interpolacji.

Dla siłomierzy zaklasyfikowanych dla określonych sił należy wziąć pod uwagę względny błąd odtwarzalności, powtarzalności, wskazania zerowego i histerezy. Siłomierze zakla-

syfikowane dla określonych sił mogą być stosowane tylko dla tych sił, w których zostały wywzorcowane, a wartością siły wzorcowej przez nie odtwarzanej jest przyrost wskazania \bar{X}_r obliczony na podstawie serii wyników wzorcowania.

Dla siłomierzy zaklasyfikowanych dla interpolacji brany jest pod uwagę względny błąd odtwarzalności, powtarzalności, interpolacji, wskazania zerowego i histerezy. Siłomierze zaklasyfikowane do interpolacji mogą być stosowane dla dowolnych sił w zakresie interpolacji. Wartość siły wzorcowej odtwarzanej przez takie siłomierze to z kolei przyrost wskazania X_a obliczony z krzywej interpolacji.

W tab. 1. podano wartości graniczne poszczególnych parametrów i niepewności zastosowanej siły wzorcowej U_{wzorca} niezbędne do uzyskania odpowiedniej klasy dokładności siłomierza [1].

Tabela 1. Wartości graniczne charakterystyk metrologicznych siłomierzy

| Klasa | Względny błąd siłomierza (%) | | | | | Niepewność wartości zastosowanej siły wzorcowej ($k = 2$) U_{wzorca} |
|------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|------------------|--|
| | powtarzalności b' | odtwarzalności b | interpolacji f_c | zera f_0 | histerezy v | |
| 00 | 0,025 | 0,05 | 0,025 | 0,012 | 0,07 | 0,01 % |
| 0,5 | 0,05 | 0,10 | 0,05 | 0,025 | 0,15 | 0,02 % |
| 1 | 0,10 | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,30 | 0,05 % |
| 2 | 0,20 | 0,40 | 0,20 | 0,10 | 0,50 | 0,10 % |

Rodzaj i jakość układu pomiarowego odkształcenia decyduje o tym, czy siłomierz jest klasyfikowany dla określonych sił, czy dla interpolacji. Na ogół siłomierze z czujnikami zegarowymi klasyfikowane są dla określonych sił. Wzorcowanie tensometrycznych przetworników siły odbywa się przy pomocy urządzeń wskazujących, należących do klienta lub Laboratorium Siły i Ciśnienia Głównego Urzędu Miar. Zamiana wskaźnika na inny jest dopuszczalna, gdy pomiar wykonywany jest w jednostkach elektrycznych, a zamienny wskaźnik spełnia kilka dodatkowych warunków.

4. Niepewność pomiaru siłomierzy

Niepewność pomiaru siłomierzy szacowana jest w oparciu o dokument EA-10/04 [2], który w 2010 roku został zastąpiony przez przewodnik EURAMET/cg-04 [3]. Na wartość niepewności złożonej pomiaru siłomierza u_{sil} składają się wartości niepewności związanych z błędami przedstawionymi w rozdziale 3. oraz składowe związane z wartością siły wzorcowej $u(F)$ i rozdzielczością $u(a)$, gdzie a to rozdzielczość siłomierza. Rozkłady prawdopodobieństwa tych niepewności standardowych przedstawione zostały w przykładowym budżecie niepewności (tab. 2). Generalnie przyjmuje się, że składowe w budżecie są wartościami nieskorelowanymi, współczynniki wrażliwości przyjmują wartość 1, a równanie niepewności pomiaru przyjmuje postać:

$$u_{\text{sil}}^2 = u^2(F) + u^2(b') + u^2(b) + u^2(f_c) + u^2(v) + u^2(f_0) + u^2(a) \quad (11)$$

gdzie:

$$u(F) = \frac{U_{\text{wzorca}}}{2} \quad (12)$$

$$u(b') = \frac{b'}{2\sqrt{3}} \quad (13)$$

$$u(b) = \frac{b}{2\sqrt{2}} \quad (14)$$

$$u(f_c) = \frac{f_c}{2\sqrt{6}} \quad (15)$$

$$u(v) = \frac{v}{2\sqrt{3}} \quad (16)$$

$$u(f_0) = \frac{f_0}{2\sqrt{3}} \quad (17)$$

$$u(a) = \frac{a}{2\sqrt{3}} \quad (18)$$

Tabela 2. Przykładowy budżet niepewności pomiaru siłomierza zaklasyfikowanego do interpolacji

| Symbol wielkości | Estymata wielkości | Niepewność standardowa | Rozkład prawdopodobieństwa | Współczynnik wrażliwości | Udział niepewności |
|------------------|--------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|
| F | 20 kN | 0,005 % | normalny | 1 | 0,005 % |
| b' | 0 % | 0,000865 % | prostokątny | 1 | 0,000865 % |
| b | 0 % | 0,00318 % | kształtu U | 1 | 0,00318 % |
| f_c | 0 % | 0,003945 % | trójkątny | 1 | 0,003945 % |
| v | 0 % | 0,003751 % | prostokątny | 1 | 0,003751 % |
| f_0 | 0 % | 0,00035 % | prostokątny | 1 | 0,00035 % |
| a | 0 % | 0,000144 % | prostokątny | 1 | 0,000144 % |
| X_a | 2,00079 mV/V | | | | 0,008101 % |

W przypadkach, gdy względny błąd interpolacji lub histerezy nie są wyznaczane, to podczas szacowania niepewności składowe, pochodzące od tych wielkości, nie są brane pod uwagę. Względna niepewność rozszerzona pomiaru siłomierza, dla każdej wartości siły wzorcowej F , wyraża się zależnością:

$$U = k \cdot u_{\text{sił}} \quad (19)$$

gdzie współczynnik rozszerzenia przyjmuje wartość $k = 2$, a $u_{\text{sił}}$ oblicza się ze wzoru (11).

Podczas zaklasyfikowania siłomierza do jednej z klas dokładności zdefiniowanych w tab. 1 dodatkowo przeprowadza się analizę. W tab. 3, w ostatniej kolumnie, pokazano maksymalne możliwe wartości niepewności rozszerzonej dla wszystkich czterech klas z tab. 1. Zostały one wyznaczone przy pomocy maksymalnych błędów dopuszczalnych dla danej klasy, pobranych z tej tabeli jako wielkości wejściowe do równań (12) i (19). W środku-

wej kolumnie podano odpowiednie wartości minimalne dla każdej z klas. Są one identyczne z wartościami maksymalnymi niepewności wyższej klasy dokładności, przy czym dla klasy 00 minimalna niepewność nie może być wyższa niż U_{wzorca} stanowiska wzorcowego siły. Jeżeli wartość niepewności pomiaru wyliczona ze wzoru (19) jest mniejsza niż wartość minimalna dla danej klasy, podana w tab. 3, to należy ją zastąpić tą wartością z tabeli. Użytkownik siłomierza powinien wziąć pod uwagę także pozostałe wielkości wpływające na wyniki pomiarów przeprowadzanych tym siłomierzem (np. niestabilność długoterminowa, wpływ temperatury) [2].

Tabela 3. Wartości graniczne względnej niepewności rozszerzonej dla różnych klas dokładności

| klasa | minimalna | maksymalna |
|-------|--------------|------------|
| 00 | U_{wzorca} | 0,06 % |
| 0,5 | 0,06 % | 0,12 % |
| 1 | 0,12 % | 0,24 % |
| 2 | 0,24 % | 0,45 % |

Dla danego zakresu klasyfikacji za wartość niepewności pomiaru przyjmuje się największą wartość U spośród wszystkich punktów pomiarowych tego zakresu.

5. Świadectwo wzorcowania

Fakt przeprowadzenia wzorcowania potwierdzany jest świadectwem wzorcowania, które zawiera następujące informacje:

- 1) data i wyniki wzorcowania,
- 2) błędy i niepewność pomiaru,
- 3) równanie przyrostu wskazań i funkcja do niej odwrotna (o ile są wyznaczone),
- 4) temperatura, w której przeprowadzono wzorcowanie,
- 5) identyfikacja wszystkich elementów siłomierza i stanowiska wzorcowego,
- 6) kierunek zastosowanych sił (rozciągające/ściskające),
- 7) klasa siłomierza i zakres klasyfikacji (w przypadku siłomierzy klasyfikowanych).

W przypadku wzorcowania na zgodność z normą PN-EN ISO 376 maksymalny okres ważności świadectwa nie powinien przekraczać 26. miesięcy [1].

6. Podsumowanie

W większości przypadków wzorcowanie siłomierzy w Laboratorium Siły i Ciśnienia Głównego Urzędu Miar przeprowadza się na zgodność z normą PN-EN ISO 376. Siłomierze te, zwane siłomierzami kontrolnymi, służą do sprawdzania jednoosiowych maszyn wytrzymałościowych na zgodność z normą PN-EN ISO 7500 [4]. W związku z wydaniem przewodnika EURAMET/cg-04 oraz nowej edycji normy PN-EN ISO 376 przedstawiona powyżej metoda zostanie nieco zmodyfikowana. Pojawia się tam nowy błąd do oceny siłomierza, stosowany zamiennie z błędem histerezy. Zmienione również zostało podejście do szacowania niepewności pomiaru poprzez uwzględnienie nowych rozkładów prawdopodobieństwa i nowych składowych niepewności.

Literatura

1. PN-EN ISO 376:2006 *Metale – Wzorcowanie siłomierzy kontrolnych stosowanych do sprawdzania jednoosiowych maszyn wytrzymałościowych.*
2. Dokument EA-10/04 (EAL-G22) *Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements.*
3. Dokument EURAMET cg-04 *Uncertainty of Force Measurements.*
4. PN-EN ISO 7500-1:2005 *Metale – sprawdzanie statycznych jednoosiowych maszyn wytrzymałościowych – Część 1: Maszyny wytrzymałościowe rozciągające/ściskające – Sprawdzanie i wzorcowanie układu pomiarowego siły.*