Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Instytut Technologii Mechanicznej

Laboratorium metrologii

Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych

Temat ćwiczenia: Wzorcowanie (kalibracja) czujnika przemieszczeń

Opracował: Paweł Majda
Szczecin 2019

Spis Treści

Wprowadzenie 2
1. Cel ćwiczenia 2
2. Spójność pomiarowa [3] 2
3. Wzorcowanie (kalibracja) wyposażenia pomiarowego [3] 3
4. Podstawowe charakterystyki metrologiczne czujników przemieszczenia [2,3] 6
5. Elementy składowe stanowiska pomiarowego 10
6. Przebieg ćwiczenia 13
7. Sprawozdanie 14
8. Pytania kontrolne 14
Literatura 15

Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie powstało, jako pomoc do ćwiczeń laboratoryjnych z miernictwa warsztatowego, metrologii i systemów pomiarowych, metrologii oraz podstaw metrologii odrabianych przez studentów Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki ZUT w Szczecinie. Opracowanie obejmuje zagadnienia związane z wzorcowaniem wyposażenia pomiarowego oraz spójnością pomiarową. Zakłada się, że pojęcia z zakresu szacowania niepewności pomiaru, estymowania parametrów modelu metodą najmniejszych kwadratów, podstaw pomiaru wielkości elektrycznych są studentom znane.

1. Cel ćwiczenia

- Utrwalenie pojęć z zakresu spójności pomiarowej i wzorcowania wyposażenia pomiarowego,
- przeprowadzenie procedury wzorcowania refleksyjnego czujnika przemieszczeń z użyciem cyfrowej śruby mikrometrycznej - wyznaczenie tzw. statycznej charakterystyki przetwarzania,
- wyznaczenie wybranych charakterystyk metrologicznych wzorcowanego czujnika.

2. Spójność pomiarowa [3]

Spójność pomiarowa (powiązanie z wzorcami pomiarowymi) (*ang. traceability*) to właściwość wyniku pomiaru, przy której wynik może być związany z odniesieniem (na ogół z wzorcami państwowymi lub międzynarodowymi jednostki miary) poprzez udokumentowany, nieprzerwany łańcuch wzorcowań, z których każde wnosi swój udział do niepewności pomiaru [PKN ISO/IEC Guide 99:2010]

W rozumieniu tej definicji odniesieniem może być definicja jednostki miary poprzez jej praktyczną realizację, procedura pomiarowa zawierająca jednostkę miary wielkości lub wzorzec pomiarowy.

Przy pomiarach z więcej niż jedną wielkością wejściową w modelu pomiaru każda z wejściowych wartości wielkości sama powinna być spójna pomiarowo, a hierarchia wzorcowania może w tym przypadku mieć strukturę rozgałęzioną lub sieciową. Wysiłek włożony w ustanowienie spójności pomiarowej każdej wielkości wejściowej powinien być współmierny z jej względnym udziałem w wyniku pomiaru. Spójność pomiarowa wyniku

pomiaru nie zapewnia, aby niepewność pomiaru była adekwatna dla danego celu lub że wykluczone zostały pomyłki.

Hierarchia wzorcowań to ciąg wzorcowań od odniesienia do końcowego układu pomiarowego, gdzie wynik każdego wzorcowania zależy od wyniku poprzedniego wzorcowania [PKN-ISO/IEC Guide 99:2010]

Elementami hierarchii wzorcowania są: jeden lub więcej wzorców pomiarowych oraz układy pomiarowe działające zgodnie z procedurą pomiarową. Niepewność pomiaru w nieunikniony sposób wzrasta w kolejnych wzorcowaniach.

3. Wzorcowanie (kalibracja) wyposażenia pomiarowego [3]

Wzorcowanie i kalibracja to synonimy. Termin wzorcowanie jest zdefiniowany w dwóch ważnych dokumentach.

Według [PKN-ISO/IEC Guide 99:2010]: **wzorcowanie** (*ang. calibration*) to działanie, które w określonych warunkach, w pierwszym kroku ustala zależność pomiędzy odwzorowywanymi przez wzorzec pomiarowy wartościami wielkości wraz z ich niepewnościami pomiaru, a odpowiadającymi im wskazaniami wraz z ich niepewnościami, a w drugim kroku wykorzystuje tę informację do ustalenia zależności pozwalającej uzyskać wynik pomiaru na podstawie wskazania

Według [PN-EN ISO 14978:2007+AC:2009] (punkt 3.8): **wzorcowanie** to zbiór operacji ustalających, w określonych warunkach, relację między wartościami wielkości mierzonej, wskazanymi przez przyrząd pomiarowy lub układ pomiarowy albo wartościami reprezentowanymi przez wzorzec miary lub przez materiał odniesienia, a odpowiednimi wartościami wielkości realizowanymi przez wzorce jednostki miary

Łatwo zauważyć, że w zasadniczej części definicje te są równoważne. W pierwszej definicji wyraźnie zwraca się uwagę na fakt, że wynik wzorcowania, jak każdego pomiaru, jest obarczony niepewnością pomiaru.

Z pojęciem wzorcowania związane jest pojęcie „sprawdzanie" jak również pojęcie „weryfikacja". Termin sprawdzanie został wprowadzony do [PN-EN ISO 9001:2006] jako tłumaczenie słowa „verification". Termin „verification" występuje w tej normie wielokrotnie i wszędzie jest tłumaczony, jako „weryfikacja", a jedynie w punkcie 7.6 użyto terminu „sprawdzanie".

W normie terminologicznej dotyczącej zarządzania jakością [PN-EN ISO 9000:2006], w pkt. 3.8.4: **weryfikacja**, a więc i „sprawdzanie" w rozumieniu normy [PN-EN ISO 9001:2009], to potwierdzenie, przez przedstawienie dowodu obiektywnego, że zostały spełnione wyspecyfikowane wymagania

Podobnie według [PKN-ISO/IEC Guide 99:2010] (pkt. 2.44): „weryfikacja" to „(...) zapewnienie obiektywnego dowodu, że dany przedmiot spełnia określone wymagania".

W definicji „wzorcowania" nie występuje problem „spełniania wymagań" (osoba wykonująca wzorcowanie nie musi znać wymagań), tak więc jedno ze znaczeń terminu „sprawdzanie" to wzorcowanie i porównanie z wymaganiami. Jednak „sprawdzanie" niekoniecznie musi być poprzedzone wzorcowaniem – może dotyczyć charakterystyki metrologicznej, która nie może być oceniona ilościowo (zmierzona).

Warto zwrócić również uwagę, że w Polsce termin „sprawdzanie” jest używany od bardzo dawna. Dla przykładu w wydawanych dawniej przez Główny Urząd Miar Dziennikach Urzędowych Miar i Probiernictwa spotykamy „Instrukcje sprawdzania” przeróżnych wzorców (np. płytek wzorcowych) i przyrządów pomiarowych (np. suwmiarkowych czy mikrometrycznych) (patrz np. [DzUiMP nr 12 1996]).

W [PN-EN ISO 9000:2006], a także w [ISO 10012-2:1997] oprócz pojęcia „wzorcowanie” pojawia się pojęcie „potwierdzenie metrologiczne”.

Według [ISO 10012-2:1997]: **potwierdzenie metrologiczne** (*ang. metrological confirmation*) to zbiór operacji wymaganych do zapewnienia, że wyposażenie pomiarowe jest zgodne z wymaganiami związanymi z jego zamierzonym użyciem

Tak więc pojęcia „potwierdzenie metrologiczne” i „sprawdzenie” są sobie bardzo bliskie. Pojęcie „potwierdzenie metrologiczne” jest jednak szersze, bowiem w ISO 9000 (podobnie w ISO 10012) znajduje się wyjaśnienie, że „potwierdzenie metrologiczne obejmuje zwykle wzorcowanie lub weryfikację, wszelkie niezbędne adiustacje lub naprawy i późniejsze ponowne wzorcowanie, porównanie z wymaganiami metrologicznymi związanymi z zamierzonym użyciem wyposażenia, jak też wszelkie wymagane plombowanie i etykietowanie”.

W ISO 14978 pojawiają się kolejne pojęcia kojarzące się z wzorcowaniem lub sprawdzaniem. W punkcie 3.43 znajdujemy, że:

Badanie odbiorcze (*ang. acceptance test*) to zbiór operacji uzgodnionych przez producenta przyrządu pomiarowego i użytkownika w celu sprawdzenia, czy działanie przyrządu pomiarowego jest takie, jak określił producent

a w punkcie 3.44:

Badanie okresowe (*ang. verification test*) to badanie w celu sprawdzenia, czy działanie przyrządu pomiarowego jest takie, jak określone przez użytkownika, wykonane według takich samych procedur, jak badanie odbiorcze

Kolejne ważne pojęcie to „adiustacja”. W [PN-IEC 60050-301:2000] (pkt. 09-01 i 09-02) występują dwa rodzaje adiustacji:

Adiustacja wstępna (*ang. preliminary adjustment*) to czynności, podane przez wytwórcę, które należy wykonać przed użytkowaniem przyrządu, aby mógł on działać z podaną dokładnością

Adiustacja robocza (*ang. readjustment*) to czynności, podane przez wytwórcę, które należy wykonywać podczas użytkowania przyrządu, aby działał z podaną dokładnością

Inną definicję zawarto [PKN-ISO/IEC Guide 99:2010] (pkt. 3.11):

Adiustacja to zbiór czynności wykonanych przy układzie pomiarowym zapewniających, że wartościom wielkości, które mają być mierzone, odpowiadają odpowiednie wskazania

W tym samym punkcie znajdują się uwagi, że „(...) adiustacji nie należy mylić z wzorcowaniem, które jest jej wstępnym warunkiem” oraz, że „(...) po adiustacji układu pomiarowego zazwyczaj musi on zostać poddany ponownemu wzorcowaniu”. Ponadto

w [PKN-ISO/IEC Guide 99:2010], w punkcie dotyczącym wzorcowania, znajduje się uwaga, że „(...) wzorcowania nie należy mylić z adiustacją układu pomiarowego, często mylnie nazywaną samowzorcowaniem, ani z weryfikacją wzorcowania".

Ostatnie ważne pojęcia związane z wzorcowaniem to „charakterystyka metrologiczna" i „wymaganie metrologiczne".

W [PN-EN ISO 14978:2007+AC:2009] (punkt 3.12): **charakterystyka metrologiczna** *(ang. metrological characteristic)* to charakterystyka sprzętu pomiarowego, która może wpływać na wyniki pomiaru

W tym samym punkcie normy znajdują się uwagi, że „(...) sprzęt pomiarowy ma zwykle kilka charakterystyk metrologicznych" oraz, że „(...) charakterystyki metrologiczne mogą podlegać wzorcowaniu".

W ISO 14978 (punkt 3.14) zdefiniowano **wymaganie metrologiczne**, jako wymaganie dotyczące charakterystyki metrologicznej. W uwagach do tego punktu znajdują się stwierdzenia, że „(...) wymagania metrologiczne wynikają z zawartych w specyfikacji wymagań dotyczących wyrobu/elementu mierzonego, albo można je ustalić na ogólnych zasadach" oraz, że „(...) wymaganie metrologiczne można przedstawić jako błąd graniczny dopuszczalny (MPE) albo jako wartości graniczne dopuszczalne (MPL)".

Podstawowy cel wzorcowania wzorców i przyrządów pomiarowych to zapewnienie spójności pomiarowej. Z tego powodu oczywistymi charakterystykami metrologicznymi podlegającymi wzorcowaniu są te, które bezpośrednio odnoszą się do mierzonej wielkości, czyli w przypadku wyposażenia do pomiaru długości są to np.:

- dla płytek wzorcowych – odchyłka długości względem długości nominalnej w dowolnym punkcie (patrz ISO 3650),
- dla czujników tarczowych mechanicznych – błędy wskazania w przedziale 1/10 obrotu wskazówki, 1/2 obrotu wskazówki, 1 obrotu wskazówki i w całym zakresie pomiarowym (patrz ISO 463),
- dla przyrządów mikrometrycznych – błąd wskazań (patrz ISO 3611),
- dla współrzędnościowej maszyny pomiarowej – błąd wskazania CMM podczas pomiaru wymiaru (patrz 10360-1).

Obecnie normy dotyczące konkretnego sprzętu pomiarowego, z wyjątkiem kilku przypadków tzn. ISO 3650 dotyczącej płytek wzorcowych i ISO 1938 dotyczącej sprawdzianów, nie powinny zawierać wartości liczbowych błędu granicznego dopuszczalnego MPE ani wartości granicznych dopuszczalnych MPL. Wartości liczbowe MPE i MPL dla celów badań odbiorczych, ustala producent, a dla celów badań okresowych – użytkownik.

Wzorcowanie charakterystyk metrologicznych przyrządów pomiarowych powinno być wykonane przy wystarczającej liczbie zróżnicowanych wartości. W przypadku pomiarów długości wzorcowanie powinno dotyczyć od kilku do kilkunastu długości nominalnych i/lub położeń. I tak, np. w przypadku błędów wskazań suwmiarek wzorcowanie wykonuje się przy użyciu kilku płytek wzorcowych. Wzorcowanie powinno obejmować wszystkie elementy przyrządu, dlatego np. odpowiednie dokumenty dotyczące wzorcowania przyrządów suwmiarkowych z noniuszem zalecały używanie płytek (lub stosów płytek) wzorcowych o wymiarach niebędących pełnymi milimetrami, np. 41,3, 131,4, 243,5, 281,2 i 481,2 mm.

Każdy sprzęt pomiarowy, a w szczególności sprzęt do pomiarów wielkości geometrycznych ma zwykle wiele charakterystyk metrologicznych ISO 14978. Wpływ poszczególnych charakterystyk metrologicznych na niepewność pomiaru zależy od procesu pomiarowego. Znajomość wartości charakterystyk metrologicznych może być podstawą projektowania procesu pomiarowego i wyboru sprzętu pomiarowego. Dość powszechną

praktyką jest ograniczanie wzorcowania do wyznaczenia błędów wskazań lub innej równoważnej charakterystyki metrologicznej. Takie postępowanie nie jest właściwe. Na wyniki pomiaru mają wpływ również inne charakterystyki metrologiczne. Dla typowych wzorców długości i przyrządów są na przykład:

- dla płytek wzorcowych – odchyłki płaskości i odchyłki równoległości, ale być może również współczynnik rozszerzalności cieplnej, stabilność wymiarowa czy odchyłki prostopadłości,
- dla czujników tarczowych mechanicznych – histereza błędu wskazania czy nacisk pomiarowy,
- dla przyrządów mikrometrycznych – odchyłki płaskości i odchyłka równoległości powierzchni pomiarowych (w [DzUMiP nr 12] używa się terminów „odchylenie od płaskości" i „odchylenie od równoległości"), a może również nacisk pomiarowy,

Ogólnie, przy wyborze charakterystyk do wzorcowania należy kierować się tymi samymi zasadami, co przy tworzeniu budżetu niepewności pomiaru. Należy postawić sobie pytanie, które charakterystyki mają wpływ na niepewność pomiaru, bowiem wartości tych charakterystyk, a także niepewność ich wyznaczenia będą stanowiły dane do budżetu niepewności wzorcowania.

Każda procedura (instrukcja) wzorcowania (sprawdzania) zaczyna się od oględzin zewnętrznych mających na celu upewnienie się czy wzorzec lub przyrząd nie jest uszkodzony, czy nie ma śladów korozji itp. Sprawdza się czy oznaczenia, np. kresy i opisy podziałki są czytelne (nie uległy starciu), czy szczęki nie są namagnesowane itp. W czasie oględzin można również ocenić ślady zużycia, szczególnie powierzchni stykających się w czasie pomiaru z przedmiotem. W przypadku braku możliwości oceny liczbowej lub w przypadku braku kryteriów oceny, decyzja o ewentualnym wycofaniu lub naprawy wyposażenia należy do osoby wykonującej wzorcowanie.

4. Podstawowe charakterystyki metrologiczne czujników przemieszczenia [2,3]

Do przekształcenia mierzonej wielkości nieelektrycznej (np. przemieszczenia) na dogodny do pomiaru sygnał elektryczny służy czujnik zawierający przetwornik sygnału wejściowego. Czujniki dzielimy na:

- czujniki parametryczne (bierne) - pod wpływem wielkości nieelektrycznej ulega zmianie parametr elektryczny taki jak np.: oporność, indukcyjność, pojemność,
- czujniki generacyjne (czynne) - pod wpływem zjawisk fizycznych powstają się siły elektromotoryczne, których wartość jest proporcjonalna do mierzonej wielkości np. akcelerometry piezoelektryczne.

Zarówno czujnik jak i przetwornik pomiarowy służy do przetwarzania jednej wielkości, która jest odwzorowaniem wielkości mierzonej, na inną wielkość, która wytwarzana jest przez nie, jako sygnał wyjściowy. Każdy przyrząd, układ a także system pomiarowy posiada szereg parametrów, które określają jego przydatność do pomiarów. Przydatność tę cechują charakterystyki metrologiczne. Podstawowe dla czujników przemieszczeń to:

- maksymalny błąd graniczny MPE,
- zakres pomiarowy,
- rozdzielczość,
- czułość i jej odwrotność, czyli stała przetwarzania,
- histereza,
- liniowość,
- dryft termiczny,

- błąd zera i in.

Dokładne definicje powyższych można odnaleźć w [2].

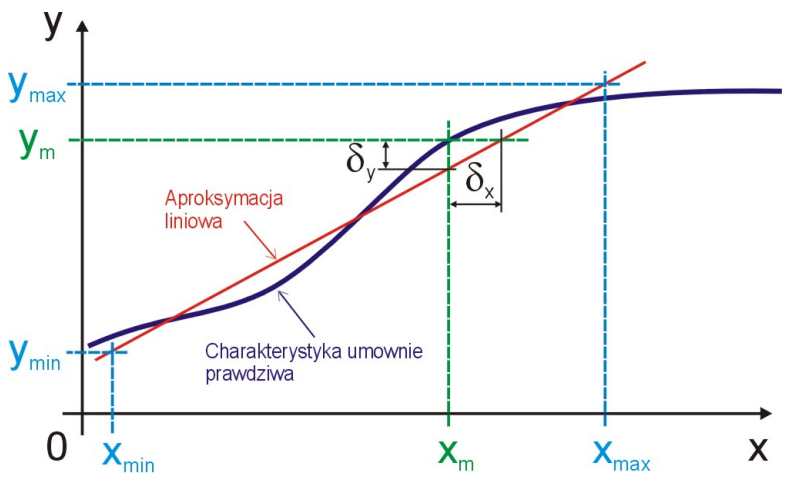
Współczesne przyrządy, zwłaszcza do pomiaru wielkości elektrycznych, są najczęściej wielofunkcyjne i wielozakresowe. Wielofunkcyjność oznacza możliwość pomiaru kilku wielkości np. napięcia, prądu, rezystancji. Przyrządy mają określoną minimalną (dolną) i maksymalną (górną) wartość wielkości mierzonej, dla przyrządów wielozakresowych dla każdego zakresu. Mierząc nieznaną wartość zawsze należy ustawić zakres pomiarowy o największej wartości maksymalnej, także dla przyrządów pomiarowych, które posiadają funkcję automatycznego doboru zakresu. W takim przypadku należy zwrócić uwagę na podzakres mierzonych wielkości. Dla woltomierza mierzącego napięcie w dwóch podzakresach mV (0÷0,4; 0÷4 i 0÷400) i V (0÷4; 0÷40 i 0÷400) należy wybrać większy, tj. V.

Ważnymi parametrami czujników i przetworników są ich charakterystyki przetwarzania. Najważniejszą z nich, charakterystyka statyczna, która nie zależy od czasu. Opisuje ona własności przetwornika w stanie ustalonym i można ją przedstawić w postaci zależności pomiędzy sygnałem wejściowym X a odpowiadającym mu sygnałem wyjściowym Y:

$$Y=f(X) \qquad (1)$$

Charakterystyki statyczne tradycyjnie dzieli się na: liniowe i nieliniowe. Analizując wszystkie zjawiska, które towarzyszą przetwarzaniu sygnałów, można szybko dojść do wniosku, że wszystkie charakterystyki są nieliniowe. Wystarczy uwzględnić fakt ograniczonego zakresu sygnału wyjściowego. Postać liniowa charakterystyki statycznej jest jednak najbardziej pożądaną jej postacią.

Charakterystykę nazywa się liniową, gdy w ograniczonym zakresie wartości $<X_{min};X_{max}>$ wielkości wejściowe X i odpowiadającej jej wartości $<Y_{min};Y_{max}>$ wielkości wyjściowej Y z określoną niepewnością U(Y) zachodzi liniowy związek. Przykładowo dla charakterystyki przedstawionej na rys. 1, aproksymacja liniowa może być wystarczająco dobra, gdy różnicę δ_x pomiędzy wartością uzyskaną z pomiaru a wartością umownie prawdziwą uzna się za dopuszczalną.



Rys. 1. Aproksymacja liniowa charakterystyki przetwornika pomiarowego

W takim przypadku przebieg charakterystyki statycznej można opisać jednym podstawowym parametrem nazywanym **czułością K** układu, opisaną równaniem:

$$Y = K \cdot X + Y_0 \qquad (2)$$

Interpretacją graficzną czułości jest nachylenie charakterystyki. Im większe nachylenie (tangens kąta nachylenie) tym większa jest czułość układu. Jest to pożądana cecha każdego czujnika. Stanowi ona jednak problem, gdy jednocześnie należy uzyskać duży zakres pomiarowy, a zakres zmienności sygnału wyjściowego jest ograniczony. Rozwiązaniem jest wtedy duża rozdzielczość układu pomiarowego.

Dla niektórych przetworników zerowa wartość sygnału wejściowego nie odpowiada zerowej wartości sygnału z przetwornika (tak jest dla przykładu rozpatrywanego w tym ćwiczeniu), którą w równaniu przypisano wartość Y_0 i nazywa się **błędem zera**. Klasycznym przykładem może być standardowy sygnał z przetworników o wyjściu prądowym 4÷20 mA. Wartości prądu 4 mA odpowiada minimalna, zwykle zerowa, wartość wielkości mierzonej.

Obok pojęcia czułości występuje w metrologii jeszcze inna wielkość, będąca jej odwrotnością, nazywana **stałą przetwarzania C**.

$$C=K^{-1} \qquad (3)$$

Jej funkcjonowanie wynika z uproszczenia przeliczania wielkości mierzonej na postawie sygnału z przetwornika. W wielu przypadkach wystarczy pomnożyć stałą przetwarzania przez wartość sygnału wyjściowego z przetwornika (pomniejszoną o Y_0 o ile występuje jej niezerowa wartość), aby uzyskać wielkość mierzoną.

$$X = C\cdot (Y - Y_0) \qquad (4)$$

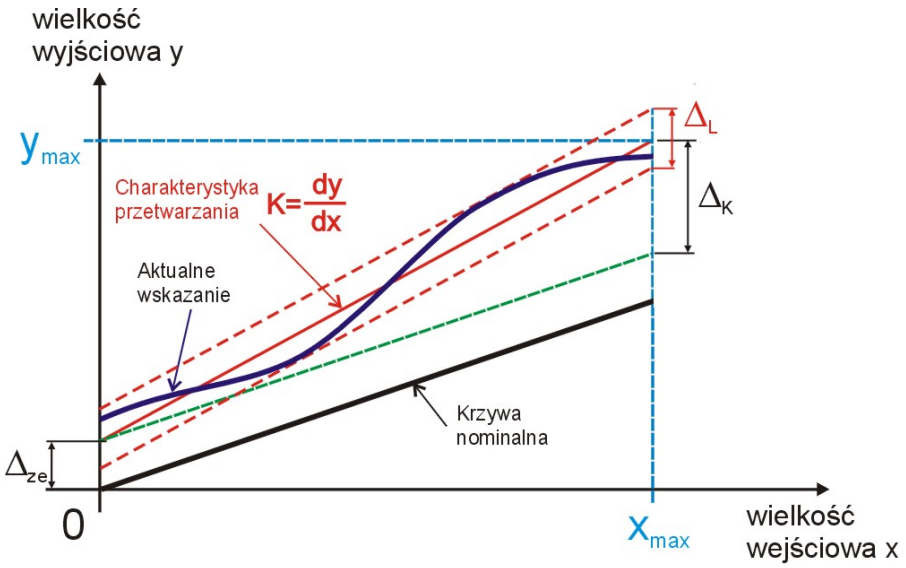
Obie wielkości są przeważnie wielkościami wymiarowymi, o określonych jednostkach. Wyjątkiem jest np. tensometr, czyli rezystancyjny czujnik do pomiaru zmiany długości, dla którego stałą przetwarzania, nazywaną stałą tensometru, podaje się bez jednostek. Wynika to jednak z faktu, że z definicji wielkości wejściowych i wyjściowych tensometru, które są wielkościami względnymi: względna zmiana długości i względna zmiana rezystancji.

Jak już wspomniano, pożądane są liniowe charakterystyki statyczne czujników i przetworników. Lecz bardzo często, czy to z powodu konieczności uzyskania małej niepewności pomiaru, czy to z nieliniowości wykorzystywanego zjawiska fizycznego, chemicznego etc. charakterystyka statyczna przetwarzania ma charakter nieliniowy. Również w takim przypadku można definiować proste estymaty ją opisujące jak czułość, czy stałą przetwarzania w funkcji sygnału wejściowego. Dla odróżnienia i jednocześnie zaznaczania, że mamy do czynienia z charakterystyką nieliniową określa się je, jako parametry dynamiczne. O ile czułość układu liniowego jest stała, to czułość dynamiczna jest zmienna i definiowana w punkcie pomiaru i zwykle jego niewielkim otoczeniu.

Czujniki przemieszczeń (zarówno mechaniczne tarczowe jak i elektroniczne) są przyrządami pomiarowymi o zmiennym zerze i z tego powodu procedura wyznaczania błędów wskazań jest czasochłonna a jej wyniki wymagają specyficznego opracowania. Co oznacza pojęcie „zmienne zero”? Otóż czujniki używane są praktycznie zawsze w pomiarach różnicowych – do zmierzenia, zwykle niewielkiej, różnicy miedzy znanym a nieznanym. Na przykład czujnik, jako element składowy średnicówki jest przed użyciem zamontowany w taki sposób by wskazywał dowolną wartość w pobliżu środka swojego zakresu pomiarowego, a jego wskazanie zerowe jest ustawiane przez obrót tarczy w sytuacji, kiedy średnicówka jest „wstawiona” do otworu pierścienia wzorcowego o znanej średnicy. Następnie, po „wstawieniu” średnicówki do mierzonego otworu, z czujnika odczytuje się wartość różnicy między średnicą otworu mierzonego i wzorcowego. Przy prawidłowym pomiarze różnica ta zwykle nie przekracza 0,5 mm. Procedura wzorcowania musi dać informację o możliwych do popełnienia błędach pomiaru niezależnie od tego, w którym

punkcie zakresu pomiarowego pomiar się rozpoczyna i w którym kończy. Opracowanie wyników wzorcowania jest odnoszone do liczby obrotów (1/10 obrotu, 1/2 obrotu, 1 obrót) wskazówki czujnika po pierwsze dlatego, że przy wykorzystaniu mniejszego fragmentu zakresu pomiarowego błąd powinien być mniejszy niż przy wykorzystaniu większego zakresu. Po drugie, największy potencjalnie składnik błędu pomiaru czujnika tarczowego, pochodzi od odchyłki współśrodkowości środka tarczy z podziałką względem osi obrotu wskazówki.

Na rys. 2 przedstawiono typowe charakterystyki metrologiczne czujnika przemieszczeń.



Rys. 2. Interpretacja graficzna wybranych charakterystyk metrologicznych czujnika przemieszczeń
(Uwaga: dla polepszenia czytelności rysunku bardzo mocno przeskalowano prezentowane charakterystyki)

Interpretacja charakterystyk czujnika przemieszczeń przedstawiona na rys. 2 jest następująca:

- Charakterystyka przetwarzania jest to zależność sygnału wyjściowego od wejściowego w warunkach określonych. Może być teoretyczna lub doświadczalna i jest wyrażana w postaci równania, tabeli, wykresu lub odpowiedniego oprogramowania.
- Czułość K (*ang. sensivity)* jest podstawowym parametrem charakteryzującym przetworniki pomiarowe. Definiuje się ją, jako stosunek przyrostu sygnału wyjściowego przyrządu pomiarowego do przyrostu odpowiedniego sygnału wejściowego. Dla liniowego modelu czułość jest współczynnikiem kierunkowym charakterystyki przetwarzania. Automatycy zamiennie używają pojęcia wzmocnienie (*ang. gain*).
- Z czułością bezpośrednio jest związane pojęcie błędu czułości Δ_K. Samej wartości błędu czułości raczej nie znajdziemy w katalogach producentów wyposażenia metrologicznego, ale bez wątpienia znajdziemy miarę jego rozrzutu mylnie nazywaną *ang. gain error*. Rozrzut ten wyraża się najczęściej w procentach wartości mierzonej lub procentach maksymalnego zakresu wskazań. Koniecznie parametr ten musi być brany pod uwagę przy szacowaniu niepewności wzorcowania.
- Liniowość wyraża stopień podobieństwa aktualnych wskazań czujnika do charakterystyki przetwarzania (najczęściej modelu liniowego). Definiowana jest, jako przedział wartości, jakie może przyjmować sygnał wyjściowy w otoczeniu krzywej linearyzującej charakterystykę przetwarzania. W ujęciu takim liniowość jest wyrażona bezpośrednio w jednostce wielkości mierzonej przez przyrząd wzorcowany. Jednak

producenci wyposażenia metrologicznego definiują liniowość najczęściej w procentach liczonych odpowiednio w odniesieniu do maksymalnego zakresu wskazań. W ujęciu takim, dla oznaczeń zastosowanych na rys. 2 liniowość można policzyć z następującego wzoru:

$$Liniowość = \frac{\Delta_L}{Y_{max}} \cdot 100\% \qquad (5)$$

W języku angielskim odpowiednikiem maksymalnego zakresu jest FSO (*ang. Full scale output*).

- Błąd zera Δ_{ze} definiowany w punkcie kontrolnym dla wartości wielkości mierzonej równej zero. Podobnie jak dla błędu czułości nie znajdziemy w katalogach wartości błędu zera. Znajdziemy natomiast miary jego rozrzutu zazwyczaj mylnie nazywane *ang. zero error* lub *offset error*. Przedział rozrzutu podawany jest najczęściej, jako procent maksymalnego zakresu pomiarowego. Zmienne zero w czujnikach elektronicznych sprowadza się do zresetowania wskazań czujnika, czego efektem jest wskazywanie zera w dowolnym ustawieniu jego elementów wykonawczych. Oczywiście warunkiem koniecznym jest zerowanie czujnika w dopuszczalnym zakresie pomiarowym. Powszechną praktyką jest zerowanie czujników elektronicznych w środkowym obszarze jego zakresu pomiarowego. Należy mieć świadomość, że po zerowaniu czujnika, pomimo że wskazanie wynosi zero, to i tak jest ono obarczone błędem zerowania. Ten fakt trzeba uwzględnić przy szacowaniu niepewności wzorcowania w postaci składnika charakteryzującego ten rozrzut.

5. Elementy składowe stanowiska pomiarowego

Stanowisko pomiarowe umożliwia sztywne pozycjonowanie i adjustację wzorcowanego czujnika przemieszczeń oraz cyfrowej śruby mikrometrycznej - rys. 3. Czujnik mierzy sygnał (wielkości wyjściowej Y w woltach) proporcjonalny do względnego przemieszczenie końcówki trzpienia śruby mikrometrycznej (sygnał wielkości wejściowej X w milimetrach). Dokonując odczytów i akwizycji wartości sygnałów pomiarowych dla różnych wartości przemieszczenia zadanego śrubą uzyskuje się zbiór punktów na podstawie, którego należy wyznaczyć charakterystykę statyczną przetwarzania wzorcowanego czujnika przemieszczenia.

Rys. 3. Widok stanowiska pomiarowego

W układzie zastosowano kartę pomiarową firmy National Instruments NI9234 - rys. 4. Rozdzielczość 24 Bit = 2^{24} = 16777216 co w zakresie pomiarowym ±5 V odpowiada rozdzielczości sygnału wielkości mierzonej: 10V/16777216 = 5,9e-7 V = 0,6 µV.

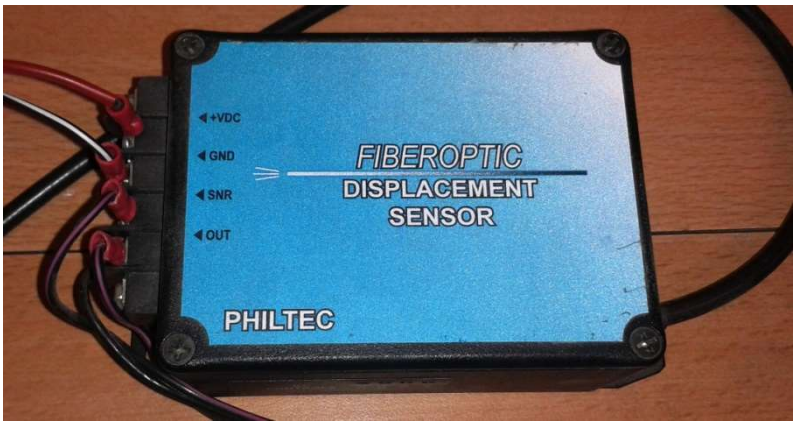
Rys. 4. Karta pomiarowa firmy National Instruments NI9234 w adapterze umożliwiającym jej podłączenie do komputera z użyciem złącza USB

Dane katalogowe (producenta) karty pomiarowej NI9234:

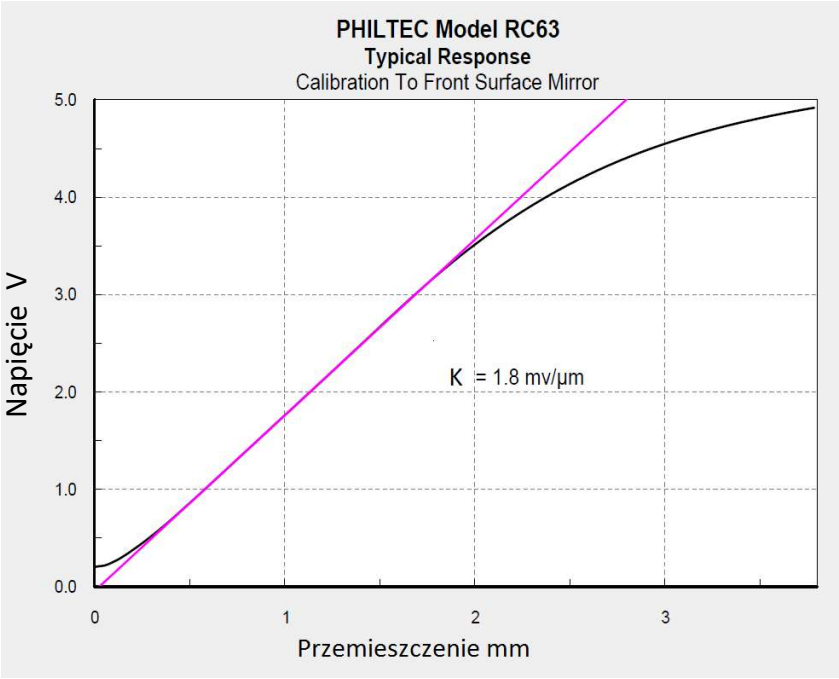
Measurement Conditions		Percent of Reading (Gain Error)	Percent of Range[2] (Offset Error)
Calibrated	Maximum (-40 °C to 70 °C)	0.34%, ±0.03 dB	±0.14%, 7.1 mV
	Typical (25 °C ±5 °C)	0.05%, ±0.005 dB	±0.006%, 0.3 mV
Uncalibrated[3]	Maximum (-40 °C to 70 °C)	1.9%, ±0.16 dB	±0.27%, 13.9 mV
	Typical (25 °C ±5 °C)	0.48%, ±0.04 dB	±0.04%, 2.3 mV

Gain drift	
Typical	0.14 mdB/°C (16 ppm/°C)
Maximum	0.45 mdB/°C (52 ppm/°C)
Offset drift	
Typical	19.2 µV/°C
Maximum	118 µV/°C

Wzorcowaniu podlega analogowy, refleksyjny czujnik przemieszczeń firmy Philtec RC63. Czujnik jest bezpośrednio zintegrowany światłowodem z układem zasilania i kondycjonowania sygnału pomiarowego - rys. 5. Zasada działania polega na pomiarze intensywności światła odbitego od powierzchni docelowej. Czujnik posiada automatyczną kompensację refleksyjności powierzchni docelowej dając na wyjściu napięciowy sygnał proporcjonalny do odległości czujnika od badanej powierzchni.



Rys. 5. Widok układu kondycjonowania sygnałów czujnika przemieszczeń RC63



Rys. 6. Typowa charakterystyka przetwarzania statycznego czujnika RC63

Wg danych katalogowych producenta (grudzień 2010) dane czujnika RC63 o numerze seryjnym 2089 są następujące:

- czułość K=1,894 mV/µm (brak danych o niepewności),
- liniowośc ±1% w zakresie wskazań 0,67÷1,78 mm
- błąd zera 0,022 V.

Jako wzorzec miary zastosowano odwzorowanie długości z użyciem cyfrowej śruby mikrometrycznej firmy Mahr 46EX - rys. 7. Jej rozdzielczość wynosi 0,001 mm a maksymalny błąd graniczny MPE=±0,003 mm.

Rys. 7. Widok śruby mikrometrycznej zamocowanej w uchwycie do wzorcowania czujników przemieszczeń

6. Przebieg ćwiczenia

- Korzystając z pomocy prowadzącego skonfigurować i podłączyć elementy stanowiska wzorcującego.
- Uruchomić elementy zasilania przyrządów pomiarowych i stabilizować je termicznie przez 15 minut.
- Korzystając z pomocy prowadzącego opanować obsługę akwizycji oraz wizualizacji danych pomiarowych z karty pomiarowej.
- Zanotować warunki, w jakich przeprowadzone będzie wzorcowanie.
- Zanotować parametry wzorcowania producenta dla czujnika przemieszczeń (w sprawozdaniu dokonać porównania z otrzymanymi rezultatami).
- Przeprowadzić wzorcowanie czujnika w zakresie do 3,5 mm z rozdzielczością 0,2 mm. Zachować jednostronność testu tj. przeprowadzić go tylko dla malejących lub rosnących wartości wielkości zadanej. Wzorcowanie powtórzyć pięć razy. Wyniki wzorcowania zestawić w tabeli:

L.p.	Wartość wielkości wejściowej X czyli odczyty ze śruby mikrometrycznej w mm					Wartość wielkości wyjściowej Y czyli odczyty wskazań czujnika przemieszczeń w V				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1										
2										
3										
. . . .										
n										

- Odpowiednio wyłączyć zasilanie elementów stanowiska pomiarowego.
- Pozostawić porządek na stanowisku pracy.

7. Sprawozdanie

Sprawozdanie oprócz ogólnych wymagań wg [4] powinno zawierać:

- Wyznaczenie charakterystyki przetwarzania, metodą najmniejszych kwadratów, wzorcowanego czujnika przemieszczeń dla dwóch zakresów pomiarowych; 0÷3,5 oraz 0,6÷1,8 mm (czyli w zakresie prostoliniowym).
- Dla powyższych zakresów wyznaczyć czułość, stałą przetwarzania, liniowość oraz błąd zera. Obliczenia powtórzyć pięć razy dla każdej z serii pomiarów wzorcujących. Dla liczebności pięć obliczyć wartości średnie i powtarzalności dla czułości, stałej przetwarzania, błędu zera oraz liniowości. Powtarzalność rozumiana jest, jako podwojona wartość odchylenia standardowego dla średniej arytmetycznej (czyli wyznaczamy ją dla ponad 95% przedziału ufności).
- Porównać uzyskane rezultaty z wartościami charakterystyk podanymi przez producenta czujnika przemieszczeń.
- Skomentować uzyskane rezultaty.

Dla ambitnych Studentów, by otrzymać ocenę lepszą od 3,0 powyższe punkty należy zrealizować z uwzględnieniem pełnej analizy niepewności wzorcowania tj. wyznaczyć wymienione wyżej charakterystyki metrologiczne wzorcowanego czujnika wraz z ich niepewnościami. W budżetowaniu niepewności należy wziąć pod uwagę MPE śruby mikrometrycznej, niepewność czułości i błędu zera dla karty pomiarowej oraz inne, jeśli zostaną zdefiniowane. Prowadzący pozostaje do dyspozycji w przedmiotowym zakresie i zaprasza do współpracy.

8. Pytania kontrolne

- Wyjaśnij pojęcie, wzorcowania, charakterystyki metrologicznej przyrządu pomiarowego, adjustacji oraz spójności pomiarowej.
- Czym różni się czujnik parametryczny od generacyjnego?
- Omów wzorzec jednostki długości.
- Scharakteryzuj zasadę działania czujnika przemieszczeń; indukcyjnego, pojemnościowego lub innego.
- Jak powstaje charakterystyka przetwarzania przyrządu pomiarowego i do czego można ją użyć?
- Omów pojęcia, czułości, stałej przetwarzania, liniowości, błędu zera, histerezy, dryftu termicznego.
- Ze względu na uzyskiwane dokładności pomiaru omów związek pomiędzy rozdzielczością a zakresem pomiarowym przyrządu pomiarowego.
- Dlaczego wzorcowanie nie pozwala uzyskać bezbłędnych pomiarów?
- Dlaczego kolejne wzorcowania w hierarchii wzorcowań wnoszą nowe składowe niepewności?

Literatura

[1] Humienny Z., Osanna P.H., Tamre M., Weckenmann A., Jakubiec W.: *Specyfikacje geometrii wyrobów. Podręcznik europejski*, WNT, Warszawa 2004.
[2] Jakubiec W., Malinowski J.: *Metrologia wielkości geometrycznych*, WNT, Warszawa 2004.
[3] Jakubiec W., Zator S., Majda P.: *Metrologia*, PWE, Warszawa 2014.
[4] Majda P.: *Laboratorium metrologii ITM ZUT, Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych, Temat: Ogólna instrukcja sporządzania sprawozdania z ćwiczeń laboratoryjnych*, Szczecin 2010.
[5] P. Majda*, Laboratorium metrologii ITM ZUT, Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych,,* Temat ćwiczenia – Wyznaczanie niepewności pomiaru, Szczecin 2010.