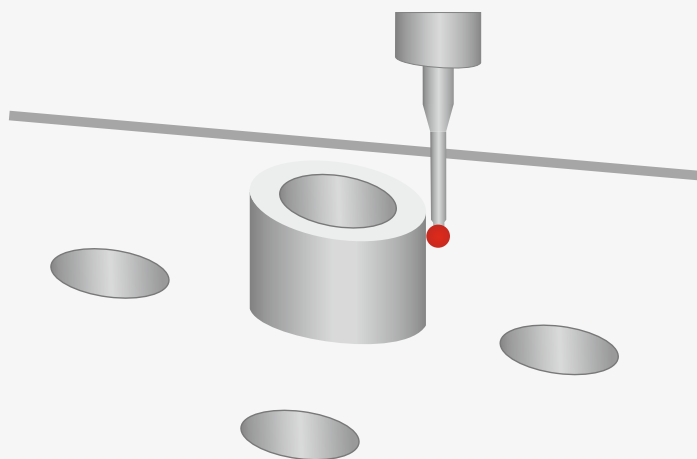


JÓZEF ZAWADA



METROLOGIA WIELKOŚCI GEOMETRYCZNYCH

ZAGADNIENIA WYBRANE



POLITECHNIKA ŁÓDZKA

ŁÓDŹ 2011

POLITECHNIKA ŁÓDZKA

JÓZEF ZAWADA

**METROLOGIA WIELKOŚCI
GEOMETRYCZNYCH
ZAGADNIENIA WYBRANE**

ŁÓDŹ 2011

Recenzent: **prof. dr hab. inż. Jan Szadkowski**

**KOMITET REDAKCYJNY
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ**

Przewodniczący: **prof. dr hab. inż. Piotr Wodziński**
Redaktor Naukowy Wydziału: **prof. dr hab. inż. Tomasz Kapitaniak**

Projekt graficzny okładki: **dr inż. Józef Zawada**

© Copyright by Politechnika Łódzka 2011

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
90-924 Łódź, ul. Wólczańska 223
tel./fax 42-684-07-93
e-mail: zamowienia@info.p.lodz.pl
www.wydawnictwa.p.lodz.pl

ISBN 978-83-7283-458-4

Nakład 200 egz. Ark. druk. 13. Papier offset. 80 g, 70 x 100
Druk ukończono w grudniu 2011 r.
Wykonano w Drukarni Quick-Druk, 90-562 Łódź, ul. Łąkowa 11
Nr 2000

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE.....	5
2. WYBRANE ZAGADNIENIA Z PODSTAW METROLOGII.....	9
2.1. Modelowanie obiektów i zdarzeń	9
2.2. Podstawowe pojęcia metrologiczne	10
2.3. Układy wielkości. Układy jednostek. Układ SI.....	16
2.4. Błędy pomiarów	19
2.4.1. Definicje i klasyfikacje błędów	19
2.4.2. Zasady szacowania wartości błędów wypadkowych.....	26
2.5. Ogólna charakterystyka środków pomiarowych.....	28
2.5.1. Klasyfikacja środków pomiarowych	28
2.5.2. Użytkowe narzędzia pomiarowe	29
2.6. Metody pomiarowe	33
2.7. Pomiary wielokrotne	40
3. CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW OPISUJĄCYCH KSZTAŁTY ELEMENTÓW MATERIALNYCH	43
3.1. Wymiary liniowe – rodzaje i parametry	43
3.2. Wymiary kątowe	49
3.3. Odchyłki kształtu i położenia.....	51
3.4. Parametry opisujące strukturę geometryczną powierzchni	51
4. PRZEGLĄD UNIWERSALNEGO SPRZĘTU DO POMIARÓW WIELKOŚCI GEOMETRYCZNYCH.....	52
4.1. Wzorce długości	52
4.1.1. Płytki wzorcowe długości	53
4.1.2. Szczelinomierze	62
4.1.3. Wałeczki pomiarowe	64
4.1.4. Kulki pomiarowe	66
4.2. Wzorce kąta	67
4.2.1. Pryzmy wielościenne	67
4.2.2. Płytki wzorcowe kąta	68
4.2.3. Kątowniki	71
4.3. Wzorce prostoliniowości i płaskości.....	74
4.4. Przyrządy suwmiarkowe	77
4.5. Przyrządy mikrometryczne	84
4.6. Czujniki.....	92
4.6.1. Czujniki mechaniczne.....	92
4.6.2. Czujniki optyczne	100
4.6.3. Czujniki elektryczne	102
4.6.4. Czujniki pneumatyczne.....	114

4.7. Kątomierze.....	118
4.8. Poziomnice.....	121
4.9. Elektroniczne narzędzia pomiarowe	125
4.9.1. Elektroniczne przetworniki położenia	125
4.9.2. Elektroniczne przyrządy pomiarowe	138
4.9.3. Elementy systemów automatycznego przetwarzania danych pomiarowych.....	142
4.9.4. Systemy przetwarzania danych pomiarowych	146
4.10. Mikroskopy warsztatowe	149
4.11. Projektory pomiarowe.....	155
4.12. Długościomierze	160
4.13. Maszyny współrzędnościowe.....	168
4.13.1. Informacje ogólne.....	168
4.13.2. Zasada pomiaru	168
4.13.3. Podstawowe zespoły i układy maszyn współrzędnościowych	170
4.13.4. Zespoły nośne	170
4.13.5. Zespół układów pomiarowych	175
4.13.6. Głowice pomiarowe.....	176
4.13.7. Napęd i sterowanie	180
4.13.8. Zespoły obliczeniowe	181
5. WYBRANE ZAGADNIENIA Z ZAKRESU PROJEKTOWANIA ZADAŃ KONTROLNO-POMIAROWYCH.....	184
5.1. Optymalna dokładność kontroli	184
5.2. Dobór metod i narzędzi pomiarowych.....	192
6. LABORATORIA – RODZAJE, ZADANIA, WYMAGANIA.....	195
6.1. Rodzaje laboratoriów	195
6.2. Zadania laboratoriów	196
6.3. Wymagania dotyczące laboratoriów	196
6.4. Warunki uznawania wyników badań.....	204
LITERATURA	205
Pozycje drukowane [Lxx]	205
Strony internetowe [Sxx]	206

1. WPROWADZENIE

Czytelnikowi skryptu należą się na wstępie dwa wyjaśnienia. Pierwsze to w miarę precyzyjna odpowiedź na pytania: co to jest występująca w tytule „metrologia wielkości geometrycznych”, jaka jest jej rola i znaczenie, dlaczego zasługuje na uwagę. Drugie dotyczy samego skryptu: celów, jakie postawił sobie autor decydując się na jego opracowanie, kryteriów wyboru poruszanych zagadnień, konstrukcji skryptu, a także sugestii dotyczących sposobu jego wykorzystania. Wyjaśnienia te stanowią zawartość tego rozdziału.

Co to jest metrologia wielkości geometrycznych?

Odpowiedź na pytanie, co to jest „metrologia wielkości geometrycznych” wymaga uprzedniego zdefiniowania pojęcia „metrologia”, a ponieważ w definicji metrologii występuje pojęcie „pomiaru”, zacznijmy od tego terminu.

Termin „pomiar”, bardziej szczegółowo przedstawiony w rozdziale 2.2, możemy określić jako „zespół działań i doświadczeń mających na celu wyznaczenie wartości wielkości” charakteryzującej interesujący nas przedmiot czy zjawisko (tzw. obiekt pomiaru) [L19]. Należy dodać, że pomiary są głównym źródłem obiektywnych informacji o otaczającej nas rzeczywistości. Informacje te są najczęściej wykorzystywane do:

- lepszego poznania rzeczy lub zjawisk;
- kontroli i sterowania przebiegiem różnych procesów;
- kontroli i oceny wyników ww. procesów (badania zgodności wyrobów).

Poprawne wykonanie pomiaru wymaga spełnienia szeregu warunków, w szczególności posiadania odpowiedniej wiedzy i umiejętności praktycznych. Zagadnieniami tymi zajmuje się dział nauki zwany metrologią.

„Metrologia jest to nauka o zabezpieczeniu środkami technicznymi i organizacyjnymi poprawności pomiarów we wszystkich dziedzinach nauki, techniki i gospodarki” [L31].

„Metrologia to dziedzina nauki i techniki zajmująca się pomiarami i wszystkimi czynnościami niezbędnymi do wykonywania pomiarów” [L19].

Tak zdefiniowana metrologia obejmuje bardzo szerokie spektrum różnych zagadnień. Grupując odpowiednio poszczególne zagadnienia, możemy podzielić metrologię na mniejsze obszary. Tradycyjnie dzieli się ją na metrologię ogólną, metrologię prawną oraz dość liczną grupę metrologii stosowanych.

Metrologia ogólna (zwana dość często podstawami metrologii) jest to dział metrologii zajmujący się zagadnieniami wspólnymi dla wszystkich rodzajów wielkości mierzonych, niezależnymi od natury tych wielkości. Obejmuje ona takie zagadnienia, jak teoria wielkości, jednostki miar, skale pomiarowe, błędy pomiarów, metody i algorytmy pomiarów, ogólna teoria pomiaru czy ogólna teoria narzędzi i systemów pomiarowych.

„Metrologia prawna jest to dział metrologii odnoszący się do jednostek miar, metod pomiarowych i narzędzi pomiarowych z punktu widzenia urzędowo ustalonych wymagań technicznych i prawnych, mających na celu zapewnienie bezpieczeństwa i należytej dokładności pomiarów” [L18].

Metrologia stosowana (zwana również niekiedy miernictwem) jest to dział metrologii dotyczący pomiarów określonej wielkości fizycznej, grupy wielkości pokrewnych lub grupy wielkości występujących w określonej dziedzinie działalności człowieka. Jako przykłady metrologii dotyczących pojedynczych wielkości wymienić można metrologię długości, metrologię czasu (chronometrię) czy metrologię temperatury (termometrię). Z kolei jako przykłady metrologii dotyczących grup wielkości pokrewnych wymienić można metrologię elektryczną, metrologię akustyczną czy fotometrię¹. I wreszcie jako przykłady metrologii dotyczących grupy wielkości występujących w określonej dziedzinie wymienić można metrologię (miernictwo) przemysłowe, metrologię biomedyczną czy metrologię astronomiczną.

Zgodnie z przedstawionymi wyżej kryteriami metrologię wielkości geometrycznych należy zaliczyć do metrologii stosowanych, zajmujących się zagadnieniami związanymi z pomiarami grupy wielkości pokrewnych. W przypadku metrologii wielkości geometrycznych są to wielkości charakteryzujące rozmiary i kształty elementów materialnych, czyli długość, kąt, odchyłki kształtu i położenia oraz parametry określające strukturę geometryczną powierzchni (jej chropowatość i falistość).

Ranga i znaczenie metrologii wielkości geometrycznych wynikają z faktu, że właściwa postać geometryczna produktów jest bardzo często jednym z najważniejszych warunków zapewnienia ich odpowiedniej wartości użytkowej. Chcąc produkować wyroby o odpowiedniej wartości użytkowej, a zwłaszcza chcąc w dalszym ciągu podnosić ich jakość, musimy w większości przypadków coraz dokładniej kształtować ich geometrię. A to wymaga coraz dokładniejszych pomiarów wielkości geometrycznych, pomiarów, które w procesie wytwarzania dostarczają informacji niezbędnych zarówno do prawidłowego sterowania procesem, jak i do oceny wyników tego procesu. Z powyższego wynika, że bardzo często odpowiedni poziom pomiarów wielkości geometrycznych jest warunkiem uzyskania odpowiedniej jakości produktów².

Dodatkowym czynnikiem zwiększającym znaczenie metrologii wielkości geometrycznych w grupie metrologii stosowanych jest fakt, że wielkości będące przedmiotem jej zainteresowania (zwłaszcza długość) występują w bardzo wielu dziedzinach działalności człowieka. W związku z powyższym metrologia wielkości geometrycznych znajduje stosunkowo szeroki zakres zastosowań.

¹ Fotometria – dział optyki zajmujący się pomiarem wielkości charakteryzujących promieniowanie świetlne.

² Metrologia wielkości geometrycznych jest „najbardziej bezpośrednio i organicznie związana z kontrolą jakości produkcji” [L 31].

O tym skrypcie

Skrypt jest adresowany przede wszystkim do tych studentów Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej, którzy w swoich programach studiów mają przedmioty: Metrologia wielkości geometrycznych lub Miernictwo warsztatowe.

Głównym powodem napisania niniejszego skryptu była konieczność uzupełnienia treści przekazywanych słuchaczom w ramach prowadzonych zajęć. Wymiar godzinowy tych zajęć (15 godzin wykładu + 15 godzin zajęć laboratoryjnych na studiach dziennych oraz 10 godzin wykładu + 10 godzin zajęć laboratoryjnych na studiach zaocznych) nie pozwala bowiem na przekazanie wszystkich najistotniejszych zagadnień wchodzących w zakres metrologii wielkości geometrycznych.

Poza treściami uzupełniającymi wykład skrypt zawiera również treści przekazywane w ramach wykładu. Dla osób uczestniczących w zajęciach stanowi to istotne ułatwienie, ogranicza bowiem w znacznym stopniu ilość wykonywanych notatek, co pozwala na lepszą percepcję przekazu. Dla osób mających trudności z percepcją przekazu werbalnego i nieuczestniczących z tego powodu w zajęciach wykładowych oraz dla osób, które opuściły wykład z przyczyn losowych, skrypt stanowi swego rodzaju substytut wykładu.

Ze względu na niewielki wymiar czasu, który studenci zobowiązani są poświęcić na naukę przedmiotu, konieczna okazała się ostra selekcja wykładanych zagadnień. Przy ich wyborze kierowano się zasadą, że wykladać należy przede wszystkim te zagadnienia, z którymi słuchacze mają największe szanse zetknięcia się w praktyce zawodowej. Dlatego np. przy prezentacji sprzętu większą uwagę poświęcono powszechnie stosowanemu, drobnemu i tanim przyrządom, jak suwmiarki, mikrometry, różnego rodzaju czujniki czy tradycyjne mikroskopy warsztatowe, a znacznie mniejszą zaawansowanym technologicznie, drogim i w związku z tym znacznie rzadziej spotykanym urządzeniom, jak maszyny do pomiaru w układzie trzech współrzędnych, interferometry laserowe, profilografy, konturografy czy mikroskopy z komputerową analizą obrazu. Z zakresu prezentowanych treści zdecydowano się także usunąć cały kompleks zagadnień związanych z pomiarami chropowatości i falistości powierzchni³. Aby wyraźnie zasygnalizować przyjęte ograniczenia, planowany początkowo tytuł skryptu – „Metrologia wielkości geometrycznych” zastąpiono bardziej adekwatnym – „Metrologia wielkości geometrycznych. Zagadnienia wybrane”.

Skrypt składa się z siedmiu rozdziałów. Zadanie pierwszego z nich, czyli „Wprowadzenia” zostało już przedstawione. Rozdział drugi – „Wybrane zagadnienia z podstaw metrologii” stanowi krótkie kompendium wiedzy z zakresu metrologii ogólnej ze wskazaniem źródeł zawierających bardziej szczegółowe informacje. Rozdział ten

³ Tak „okrojony” przedmiot może nie satysfakcjonować wszystkich słuchaczy; osobom interesującym się zaawansowaną techniką pomiarową i/lub chcącym poznać pełniejszy zakres zagadnień zostanie zaproponowany stosowny przedmiot obieralny.

zamieszczono dlatego, że nie wszyscy studenci, do których adresowany jest niniejszy skrypt, uczestniczyli w zajęciach z „Podstaw metrologii”. Dla tych, którzy uczestniczyli, rozdział ten może stanowić pomoc w „odświeżeniu sobie” poznanych wcześniej wiadomości.

W rozdziale trzecim – „Charakterystyka parametrów opisujących kształty elementów materialnych” zamieszczono elementarne wiadomości dotyczące modeli wielkości geometrycznych. Ze względu na ograniczoną objętość skryptu również w tym przypadku konieczne okazało się odesłanie czytelników do materiałów źródłowych (głównie norm) zawierających bardziej szczegółowe informacje na ten temat.

W rozdziale czwartym zawarto informacje dotyczące najbardziej popularnych grup narzędzi do pomiaru długości i kąta. Informacje te są z reguły podawane w układzie: definicja grupy, klasyfikacja wewnątrz grupy, zasady działania poszczególnych odmian, przykłady istniejących w praktyce rozwiązań wraz z ich podstawowymi parametrami metrologicznymi. Głównym celem zamieszczenia tego rozdziału było podanie informacji umożliwiających podjęcie właściwych decyzji przy doborze narzędzi do realizacji różnego rodzaju zadań pomiarowych.

W rozdziale piątym przedstawiono zagadnienia związane z projektowaniem pomiarów. Wyjaśniono pojęcie optymalnej dokładności kontroli, podano sposób praktycznego wyznaczania odpowiadającej jej niepewności pomiaru oraz wykorzystania wyznaczonej wartości niepewności w celu doboru właściwych narzędzi pomiarowych.

W rozdziale szóstym przedstawiono wymagania, które muszą spełniać laboratoria pomiarowe, aby wyniki ich badań mogły być uznawane w skali międzynarodowej.

Ostatni, siódmy rozdział zawiera wykaz wykorzystanej literatury: książek, artykułów, norm, aktów prawnych i stron internetowych.

Mam nadzieję, że skrypt pomoże jego Czytelnikom w lepszym zrozumieniu istoty pomiarów, ułatwi ich projektowanie, przeprowadzanie i właściwą interpretację uzyskanych wyników.

Na zakończenie chciałbym serdecznie podziękować recenzentom – panu prof. dr hab. inż. Janowi Szadkowskiemu i panu dr hab. inż. Ryszardowi Wójcikowi, za szereg cennych uwag i sugestii, które przyczyniły się do podniesienia poziomu niniejszego opracowania.

Łódź, październik 2011

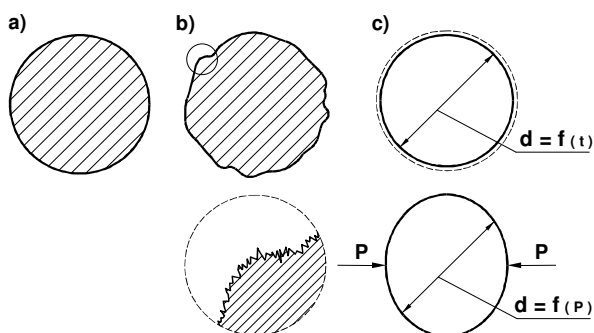
Józef Zawada

2. WYBRANE ZAGADNIENIA Z PODSTAW METROLOGII

2.1. MODELOWANIE OBIEKTÓW I ZDARZEŃ

Zarówno otaczająca nas rzeczywistość, jak i poszczególne jej elementy są bardzo złożone, a pełny ich opis musiałby zawierać niezwykle dużą ilość informacji. Uzyskiwanie tych informacji, ich przekazywanie czy przetwarzanie byłoby niezmiernie trudne, o ile wogóle możliwe. Dlatego przy analizowaniu obiektów rzeczywistych ograniczamy się do pewnego, możliwie małego podzbioru informacji najbardziej istotnych. Na podstawie tych informacji tworzymy w swej świadomości uproszczony obraz obiektu rzeczywistego, czyli tzw. model tego obiektu.

Jeżeli kryterium istotności informacji o jakimś obiekcie nie będzie u poszczególnych obserwatorów tego obiektu jednakowe, to mogą oni utworzyć różne podzbiory informacji istotnych i na ich podstawie utworzyć różne modele tego samego obiektu. Możliwość taką pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Różne modele wałka rzeczywistego: a) idealny wałek o przekroju kołowym; b) model uwzględniający odchyłki kształtu oraz chropowatość i falistość powierzchni; c) model uwzględniający zależność geometrii wałka od siły nacisku pomiarowego i temperatury

Wybór modelu obiektu ma wpływ na stosowane metody i uzyskiwane wyniki przeprowadzonych pomiarów czy analiz. Dlatego, aby uniknąć nieporozumień, grono osób współpracujących (np. producent i jego kooperant) winno korzystać z takich samych modeli obiektów rzeczywistych. Zaleca się, o ile to możliwe, stosowanie modeli wzorcowych przedstawionych w stosownych dokumentach normatywnych (np. normy dotyczące gwintów, stożków, kół zębatach itp.) czy prawnych (np. zarządzenia Prezesa GUM).

Należy podkreślić, że modelowanie powinno poprzedzać mierzenie, tzn. najpierw należy przyjąć model mierzonego obiektu, dopiero potem można przystąpić do jego pomiaru. Bardziej szczegółowe informacje nt. modelowania można znaleźć w [L8, L16].

2.2. PODSTAWOWE POJĘCIA METROLOGICZNE

W niniejszym podrozdziale przedstawiono tylko te pojęcia, które mają charakter pojęć pierwotnych (wyjściowych). Do grupy tej zaliczono pojęcia wielkości mierzalnej, jednostki miary, skali pomiarowej i pomiaru.

Wielkość mierzalna – każda właściwość ciała lub zjawiska, którą można wyznaczyć jakościowo i ilościowo [L18].

Jakościowe wyznaczenie właściwości polega na przyjęciu ścisłej i jednoznacznej definicji tej właściwości. Utworzenie takiej definicji nie zawsze jest proste i oczywiste. Np. średnicę kulki posiadającej istotne odchyłki kształtu można definiować m.in. jako:

- średnicę idealnej kulki opisanej na rzeczywistej;
- średnicę idealnej kulki o tej samej co rzeczywista objętości;
- średnią odległość przeciwnych punktów powierzchni obliczoną na podstawie kilku pomiarów dokonanych w ściśle określonych kierunkach.

Mimo iż powyższe definicje dotyczą tej samej właściwości, to jednak tworzą różne jej modele i mogą istotnie wpłynąć zarówno na przyjęty sposób pomiaru, jak i na jego wynik.

Ilościowe wyznaczenie właściwości wymaga, aby:

- rozważana właściwość posiadała układ wartości odniesienia (żeby mierzony obiekt było z czym porównać);
- istniała możliwość eksperymentalnego porównywania ze sobą różnych obiektów pod względem tej właściwości.

Liczba wielkości mierzalnych jest praktycznie nieograniczona, a pomiędzy poszczególnymi wielkościami występują pewne, dość istotne różnice. Wyróżnia się np. wielkości addytywne i nieaddytywne, analogowe i dyskretne czy statyczne i dynamiczne.

Mówimy, że wielkość jest **addytywna**, jeżeli jej wartość odpowiadająca całemu obiektowi równa jest sumie wartości odpowiadających poszczególnym częściom tego obiektu przy dowolnym jego podziale. Przykładowo, objętość całej bryły równa jest sumie objętości części, na które bryłę tę można podzielić. Jako przykłady innych wielkości addytywnych służyć mogą masa, długość czy energia. Wielkości nieposiadające tej właściwości są nazywane **wielkościami nieaddytywnymi**. Jako przykłady wielkości nieaddytywnych wymienić można temperaturę, twardość czy lepkość.

Wielkość nazywamy **analogową**, gdy jej wszystkie hipotetycznie możliwe wartości tworzą zbiór ciągły (odcinek na osi wartości). Jeżeli natomiast wielkość może przyjmować tylko niektóre wartości (pojedyncze punkty na osi wartości), to określa się ją

mianem **dyskretnej**. Jako przykłady wielkości analogowych wymienić można długość, objętość czy masę, a jako przykłady wielkości dyskretnych – ładunek elektryczny wyrażany liczbą elektronów, natężenie promieniowania korpuskularnego wyrażane liczbą cząstek czy wielkość produkcji określaną liczbą wyprodukowanych detali.

Wielkość statyczna to wielkość, której zmiany wartości z punktu widzenia celu prowadzonych rozważań można uznać za nieistotne. W takich przypadkach przyjmuje się założenie, że w rozpatrywanym przedziale czasu wartość wielkości jest stała ($x = \text{const}$). Natomiast w przypadku, gdy zmiany wartości wielkości są istotne, to określana jest ona mianem **wielkości dynamicznej**. Jako przykłady wielkości statycznych wymienia się masę ciała stałego czy powierzchnię gruntu, a jako przykłady wielkości dynamicznych – prędkość w ruchu zmiennym czy natężenie prądu przemiennego.

Wielkość mierzalna odpowiadająca konkretnemu obiektowi posiada wartość, która wynika z relacji zachodzących pomiędzy tym obiektem a innymi obiektami. Wartość tę ustala się w drodze eksperymentalnego porównywania obiektów, a jednym z warunków jej wyznaczenia jest istnienie układu wartości odniesienia. Postać tego układu oraz sposób jego wykorzystania zależy od rodzaju wielkości. Dla wielkości addytywnych wystarczy tylko jedna wartość odniesienia. Rolę tę pełni **jednostka miary**.

Jednostką miary danej wielkości nazywa się ściśle określoną wartość tej wielkości, której w drodze umowy nadano wartość liczbową równą jedności.

Określenie jednostki miary musi zapewnić jednoznaczne, powtarzalne i możliwie najdokładniejsze jej odtwarzanie. Zgodnie z tym określeniem wykonywane są obiekty odtwarzające wartość jednostki. Noszą one nazwę **wzorców tej jednostki**.

Z definicji wielkości addytywnych wynika, że obiekt uzyskany z połączenia dwóch wzorców jednostki będzie odtwarzał wartość wielkości równą dwu jednostkom, zaś podział wzorca jednostki na dwa obiekty równoważne pozwoli uzyskać obiekty odtwarzające wartość równą połowie jednostki. Przez odpowiedni podział i łączenie można zatem uzyskać dowolny zbiór wartości odniesienia i odpowiadający mu zbiór obiektów wzorcowych.

Dzięki wprowadzeniu jednostki miary wartość każdej wielkości addytywnej można zapisać w postaci iloczynu

$$A = \{ A \} \cdot [A] \quad (2.1)$$

gdzie:

A – wartość wielkości;

$\{ A \}$ – wartość liczbowa tej wielkości;

$[A]$ – jednostka miary tej wielkości.

Przykłady: długość $L = 15,2$ metra, napięcie $U = 18$ woltów czy czas $T = 14$ dni.

Przekształcając odpowiednio zależność (2.1), można dowolnej wartości wielkości A przypisać odpowiadającą jej wartość liczbową $\{A\}$, a mianowicie:

$$\{A\} = A / [A] \quad (2.2)$$

czyli zbiór możliwych wartości wielkości można odwzorować za pomocą zbioru liczb rzeczywistych: $A \rightarrow \{A\}$, dla ustalonego $[A]$.

Zbiór liczbowy odwzorowujący wielkość mierzalną nazywamy skalą pomiarową.

Skala pomiarowa utworzona przy pomocy zależności (2.2) nosi nazwę **skali pomiarowej addytywnej**. Poza skalą pomiarową addytywną istnieją jeszcze inne rodzaje skal, jak np. skala pomiarowa interwałowa czy skala pomiarowa klasyfikacyjna⁴.

Skala pomiarowa interwałowa jest związana z pojęciem tzw. **interwału**. Interwał, nazywany również przyrostem czy odstępem, to różnica dwóch wartości tej samej wielkości. Istotną cechą interwału jest jego addytywność, przy czym addytywność ta nie zależy od charakteru wielkości, co oznacza, że addytywne mogą być również interwały wielkości nieaddytywnych.

Jeżeli interwał wielkości nieaddytywnej ma sens fizyczny, to można dla niego utworzyć jednostkę miary. Wartość interwału określać będzie wtedy zależność:

$$\Delta A = \{\Delta A\} \cdot [\Delta A] \quad (2.3)$$

gdzie:

ΔA – wartość interwału, $\Delta A = A_2 - A_1$;

$\{\Delta A\}$ – wartość liczbową interwału, przyjmuje się, że $\{\Delta A\} = \{A_2\} - \{A_1\}$;

$[\Delta A]$ – jednostka interwału przyjmowana również za jednostkę wielkości ($[\Delta A] \equiv [A]$).

Równanie (2.3) wraz z równaniem definicyjnym interwału stanowią podstawę formowania **skali interwałowej**. Do utworzenia tej skali potrzebny jest układ wartości odniesienia zawierający dwa elementy. Mogą nimi być:

- wartość odniesienia A_0 (zwana wartością początkową) wraz z odpowiadającą jej wartością liczbową (najczęściej 0) i jednostka miary interwału $[A]$ lub
- dwie wartości odniesienia A_1 i A_2 wraz z odpowiadającymi im wartościami liczbowymi $\{A_1\}$ i $\{A_2\}$.

W przypadku pierwszym funkcja odwzorowująca wielkość jest postaci:

$$\{A\} = \{A_0\} + \frac{A - A_0}{[A]} \quad (2.4)$$

⁴ Termin ten jest odpowiednikiem angielskiego „ranking scale”, tłumaczonego również jako „skala uszeregowana” [L22] lub „skala porządkowa” [L12, L35].

w drugim:

$$\{A\} = \{A_1\} + \frac{A - A_1}{A_2 - A_1} \cdot (\{A_2\} - \{A_1\}) \quad (2.5)$$

Jako przykłady wielkości nieaddytywnych, których interwał ma sens fizyczny, wymienić można czas, potencjał elektryczny, energię potencjalną czy współrzędną punktu na prostej. Interwały tych wielkości to odpowiednio – odstęp czasu, różnica potencjałów (napięcie), praca i przesunięcie (długość).

Jako przykłady skali pomiarowych interwałowych służyć mogą skale temperatur (Celsjusza, Fahrenheita i Reaumura) czy skale czasu (kalendarz gregoriański, kalendarz juliański, kalendarz muzułmański itp).

Jeżeli interwał wielkości nie ma sensu fizycznego i niemożliwe jest utworzenie dla niego jednostki miary, ale istnieje doświadczenie umożliwiające porządkowanie obiektów pod względem wartości tej wielkości, to dla wielkości tej można utworzyć skalę pomiarową klasyfikacyjną.

W celu utworzenia **skali klasyfikacyjnej** należy określić zbiór obiektów wzorcowych dobranych tak, by wartości reprezentowanych przez te obiekty wielkości określonych tworzyły odpowiedni zakres. Następnie za pomocą wspomnianego wyżej doświadczenia ustawia się te obiekty w szereg, uporządkowany wg wartości ich wielkości. Poszczególnym wzorcom przyporządkowuje się liczby, przy czym porządek liczb winien odpowiadać porządkowi w szeregu. Liczby te, najczęściej naturalne, określone są mianem stopni skali.

Jako przykład skali pomiarowej klasyfikacyjnej wymienić można skalę twardości Mohsa. Skala ta oparta jest na dziesięciu minerałach, które ustawiono w szereg w taki sposób, że każdy poprzedzający może być zarysowany następnym, sam nie mogąc go zarysować. Poszczególnym minerałom przypisano liczby naturalne od 1 do 10. Skala ta wygląda następująco:

talk	– 1	ortoklaz	– 6
gips	– 2	kwarc	– 7
kalcyt	– 3	topaz	– 8
fluoryt	– 4	korund	– 9
apatyt	– 5	diamant	– 10

Bardziej szczegółowe informacje na temat skal pomiarowych zawarte są w [L8, L12 i L22].

Ostatnim z pojęć definiowanych w tym podrozdziale jest **pomiar**.

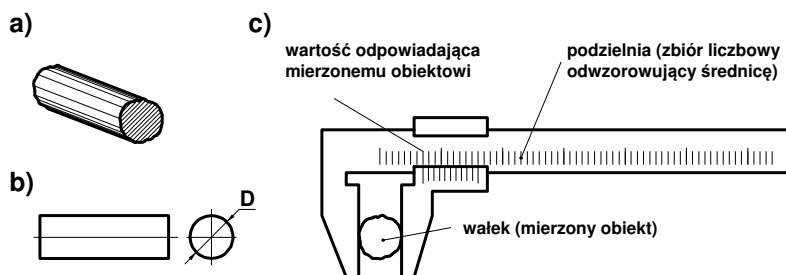
Pomiarem nazywamy zbiór operacji mających na celu wyznaczenie jednej lub więcej wartości wielkości, które w zasadny sposób mogą być przypisane wielkości mierzonej.

Pomiar składa się z dość licznej sekwencji czynności, które można pogrupować w pewne operacje. W szczególności wyróżnić należy:

- określenie wielkości mierzonej (polega na utworzeniu bądź przyjęciu już istniejącego modelu matematycznego tej wielkości; model ten jest tworzony w oparciu o posiadaną wiedzę dotyczącą mierzonego obiektu z uwzględnieniem wymagań wynikających z celu, w jakim chcemy wyznaczyć wartość wielkości);
- zaprojektowanie pomiaru (dobór metody i narzędzi pomiarowych);
- przeprowadzenie pomiaru (doprowadzenie obiektu mierzonego i ewentualnie jego otoczenia do stanu określonego przez przyjęty model matematyczny wielkości mierzonej, testowanie i ew. regulacja układu pomiarowego, pobranie wielkości mierzonej, odczyty bądź rejestracja wskazań);
- opracowanie uzyskanych informacji (w szczególności ustalenie wartości, którą można przypisać mierzonej wielkości i miary charakteryzującej dokładność przeprowadzonego pomiaru).

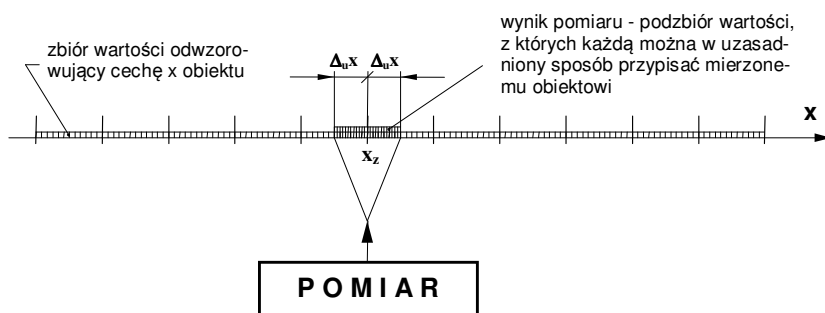
Każdy pomiar ma charakter doświadczalny, tzn. opiera się na przeprowadzeniu pewnego eksperymentu. Warunkiem poprawnego przeprowadzenia tego eksperymentu jest wcześniejsze utworzenie modelu wzorcowego obiektu mierzonego. Celem pomiaru jest obiektywne przyporządkowanie wartości określonej właściwości obiektu mierzonego.

Istotę zależności pomiędzy obiektem, jego modelem i pomiarem przedstawiono na przykładzie pomiaru średnicy wałeczka za pomocą suwmiarki (rys. 2). W przypadku tym obiekt rzeczywisty (rys. 2a) jest bryłą materiału o kształcie zbliżonym do geometrycznego walca. Model wzorcowy (rys. 2b) jest idealnym walcem. Rozpatrywaną cechą jest średnica tego walca. Średnica to szczególny przypadek długości, wielkości ściśle zdefiniowanej i posiadającej swoją skalę wartości. W analizowanym przykładzie materialnym wyrazem tej skali jest podzielnia suwmiarki. Pomiar sprowadza się do odpowiedniego ustawienia szczęk suwmiarki względem mierzonego wałka. Po ustawieniu szczęk zespół kres noniusza wskazuje na podzielną (*zbiór liczbowy odwzorowujący długość*) wartość (*element zbioru liczbowego*) odpowiadającą mierzonemu wałkowi (*obiekt*).



Rys. 2. Pomiar średnicy wałeczka za pomocą suwmiarki: a) wałek; b) model wzorcowy wałka; c) pomiar wałka

Różne przyczyny, jak np.: niepowtarzalność wskazań przyrządów, ograniczona rozdzielczość wzroku obserwatorów czy przypadkowe zakłócenia zewnętrzne, sprawiają, że pomiar nie pozwala na jednoznaczne ustalenie, która z wartości zbioru liczbowego modelu odpowiada mierzonemu obiektowi. Umożliwia on jedynie wyznaczenie pewnego podzbioru wartości, z których każdą można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej. Podzbiór ten, charakteryzujący się odpowiednio dużym prawdopodobieństwem, że zawarta jest w nim rzeczywista wartość wielkości mierzonej, nosi nazwę **wyniku pomiaru**⁵ (rys. 3).



Rys. 3. Wynik pomiaru – graficzna interpretacja pojęcia

Wartość środkowa podzbioru (x_z) nazywana jest **wartością zaobserwowaną**⁶, a połowa różnicy wartości granicznych podzbioru ($\Delta_u x$) – **niepewnością pomiaru**.

Wynik pomiaru zapisuje się najczęściej w postaci:

$$x_i = x_z \pm \Delta_u x \quad \text{lub} \quad (2.6a)$$

$$a \leq x_i \leq b \quad (2.6b)$$

gdzie:

x_i – wartość wielkości odpowiadająca i-temu obiektowi;

$a = x_z - \Delta_u x$ – kres dolny zbioru wartości prawdopodobnych;

$b = x_z + \Delta_u x$ – kres górny tego zbioru.

Istotnym uzupełnieniem wyniku pomiaru mogą okazać się informacje dotyczące czasu przeprowadzenia pomiaru, warunków, w jakich był on przeprowadzony oraz środków, które w tym celu wykorzystano.

⁵ W bardziej zaawansowanych rozważaniach przyjmuje się, że wynik pomiaru jest zmienną losową, a zadanie pomiarowe sprowadza się do możliwie najlepszego oszacowania postaci i parametrów rozkładu prawdopodobieństwa tej zmiennej.

⁶ Wielu autorów, w tym autorzy prac [L20] i [L21], zamiast „wartość zaobserwowana” używa określenia „wynik pomiaru” przyznając jednocześnie, że „wynik pomiaru jest pełny tylko wtedy, gdy jest podany wraz z niepewnością” [L21].

2.3. UKŁADY WIELKOŚCI. UKŁADY JEDNOSTEK. UKŁAD SI

W różnych dziedzinach nauki, techniki czy gospodarki mamy do czynienia z pewnymi zbiorami wielkości charakterystycznych dla tych dziedzin. Wielkości te są przeważnie wzajemnie ze sobą powiązane, a w zależności od charakteru tych powiązań dzieli się je na podstawowe i pochodne. Wielkościami podstawowymi nazywa się te, które w danym zbiorze wielkości przyjęto za niezależne. Wielkości pochodne to wielkości zależne, które definiuje się jako określone funkcje wielkości podstawowych lub innych, wcześniej zdefiniowanych, wielkości pochodnych.

Zbiór wszystkich występujących w danej dziedzinie wielkości, po odpowiednim uporządkowaniu, polegającym na wyborze wielkości podstawowych i zdefiniowaniu za ich pomocą wielkości pochodnych, nosi nazwę **układu wielkości**. Jeśli dla każdej wielkości tego układu zostanie określona jednostka, to automatycznie powstanie **układ jednostek**, przy czym jednostki wielkości podstawowych noszą nazwę **jednostek podstawowych**, a jednostki wielkości pochodnych – **jednostek pochodnych**.

Ponieważ wartość wielkości przyjęta za jednostkę jest sprawą umowy, więc dla każdej wielkości można utworzyć wiele różnych jednostek, a dla danego układu wielkości wiele różnych układów jednostek. Ta różnorodność możliwości spowodowała, że i w praktyce powstało wiele różnych układów jednostek. Np. w dziedzinie mechaniki dość powszechnie stosowane były układy CGS (centymetr, gram, sekunda), MKS (metr, kilogram, sekunda), techniczny (metr, kilogram siły, sekunda) czy angielski (jard, funt angielski, sekunda).

W miarę rozwoju nauki i techniki, charakteryzującego się m.in. integracją różnych dziedzin, a także w miarę rozwoju naukowej, technicznej i gospodarczej współpracy międzynarodowej (kooperacja, licencje itp.) lawinowo rosła ilość pracy związanej z koniecznością ciągłej zamiany jednostek. Trudności i straty z tym związane zrodziły ideę jednego, uniwersalnego i ogólnie stosowanego układu jednostek miar. Prace nad realizacją tej idei doprowadziły do stworzenia Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, określanego w skrócie układem SI.

Do najważniejszych charakterystycznych cech układu SI należą uniwersalność, spójność i zasada jednej jednostki dla każdej wielkości.

Uniwersalność układu polega na możliwości stosowania tego układu w różnych dziedzinach. Twórcy układu SI przyjęli założenie, że winien on nadawać się do stosowania w każdej dziedzinie nauki, techniki i gospodarki. Konsekwencją tego założenia było włączenie w ramy układu wszystkich znanych wielkości fizycznych. Zdefiniowanie tak dużej liczby najrozmaitszych wielkości wymagało z kolei przyjęcia dużej liczby wielkości podstawowych. W układzie SI wielkości tych jest aż siedem. Zestawiono je w tabeli 1.

Tabela 1. Wielkości podstawowe układu SI i ich jednostki			
Lp.	Wielkość podstawowa	Jednostka miary	Oznaczenie jednostki
1	Długość	metr	m
2	Masa	kilogram	kg
3	Czas	sekunda	s
4	Prąd elektryczny	amper	A
5	Temperatura termodynamiczna	kelwin	K
6	Światłość	kandela	cd
7	Liczność materii	mol	mol

Wybór wielkości zestawionych w tabeli 1 został podyktowany głównie względami praktycznymi. Z jednej strony wielkości te dobierano tak, aby za ich pomocą dało się zdefiniować wszystkie włączone do układu wielkości pochodne, z drugiej o wyborze wielkości decydowała łatwość i dokładność, z jaką można było odtwarzać jej wartości.

Jednostki podstawowe układu SI zostały wybrane spośród znanych i wcześniej stosowanych jednostek miar. Jednym z istotniejszych praktycznych problemów okazało się odtwarzanie i przekazywanie ich wartości. Ze względu na ciągły wzrost wymagań odnośnie dokładności zarówno definicje jednostek, jak i metody odtwarzania ich wartości ulegały w czasie różnym zmianom, stawały się coraz bardziej precyzyjne. Zarysowała się przy tym tendencja do odchodzenia od sztucznych wzorców jednostek miar i opierania definicji jednostek na niezmiennych zjawiskach natury.

Spójność układu jednostek polega na tym, że jednostka każdej wielkości pochodnej wyrażona jest za pomocą jednostek podstawowych równaniem postaci:

$$[X] = 1 \cdot [A]^{\alpha} \cdot [B]^{\beta} \cdot [C]^{\gamma} \dots; \quad (2.7)$$

gdzie:

[X] – jednostka wielkości pochodnej;

[A], [B], [C] – jednostki podstawowe;

α , β , γ – wykładniki potęgowe o wartościach należących do zbioru liczb wymiernych.

Aby uzyskać takie równanie, należy wszystkie wielkości wchodzące do wzoru definicyjnego rozważanej wielkości pochodnej wyrazić za pomocą wielkości podstawowych. Następnie zamiast symboli wielkości podstawowych należy podstawić oznaczenia ich jednostek miar, a dowolny współczynnik równania definicyjnego zastąpić jednością.

Prawa strona równania (2.7) bywa nazywana wymiarem jednostki lub wymiarem wielkości. Wymiar jednostki bywa czasem określany przez jej nazwę.

Nazwy jednostek układu SI można podzielić na proste i złożone. Do nazw prostych zalicza się nazwy własne, które posiadają wszystkie jednostki podstawowe, nazwy własne podniesione do potęgi (np. metr sześcienny (m^3)) oraz nazwy specjalne nadane niektórym jednostkom pochodnym. Nazwy złożone mają postać wyrażeń utworzonych z nazw jednostek prostych, np.: metr na kwadrat sekundy (m/s^2), metr sześcienny na kilogram (m^3/kg), wat na metr i kelwin ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Można je utworzyć dla jednostek wszystkich wielkości pochodnych na podstawie równań definicyjnych tych wielkości.

Niektórym jednostkom pochodnym zostały nadane nazwy i oznaczenia specjalne. Przykładowo jednostkę siły, której nazwa złożona brzmiała kilogram razy metr na kwadrat sekundy, nazwano niutonem (N), jednostkę ciśnienia – niuton na metr kwadratowy – paskalem (Pa), jednostkę pracy – niutonometr – dżulem (J) itp. Aktualnie nazwy i oznaczenia specjalne posiada dwadzieścia jednostek pochodnych [L13].

Zasada, aby każda wielkość układu SI posiadała **tylko jedną jednostkę**, stwarzała pewne trudności w przypadkach wyrażania wartości wielkości bardzo dużych albo bardzo małych w porównaniu z tą jednostką. Aby uniknąć kłopotów związanych z używaniem bardzo wielkich lub bardzo małych liczb, twórcy układu zaproponowali stosowanie dziesiętnych wielokrotności i podwielokrotności przyjętych jednostek. Nazwa krotności każdej jednostki składa się z nazwy tej jednostki i określającego krotność przedrostka. Podobnie jest w przypadku oznaczeń – oznaczenie krotności jednostki składa się z oznaczenia jednostki, przed którym bezpośrednio umieszcza się oznaczenie przedrostka. Krotności jednostek, odpowiadające im przedrostki i oznaczenia tych przedrostków zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Układ SI. Wielokrotności i podwielokrotności jednostek miar [L13]					
Wielokrotność	Przedrostek	Oznaczenie przedrostka	Podwielokrotność	Przedrostek	Oznaczenie przedrostka
10^1	deka-	da	10^{-1}	decy-	d
10^2	hekto-	h	10^{-2}	centy-	c
10^3	kilo-	k	10^{-3}	mili-	m
10^6	mega-	M	10^{-6}	mikro-	μ
10^9	giga-	G	10^{-9}	nano-	n
10^{12}	tera-	T	10^{-12}	piko-	p
10^{15}	peta-	P	10^{-15}	femto-	f
10^{18}	eksa-	E	10^{-18}	atto-	a
10^{21}	zetta-	Z	10^{-21}	zepto-	z
10^{24}	jotta-	Y	10^{-24}	jokto-	y

Zastosowanie przedrostków z tabeli 2 pozwala na wyrażenie każdej wartości wielkości za pomocą liczb z przedziału 1-1000. Przykładowo wartość mocy równą 23 700 000 000 W można wyrazić jako 23,7 GW, a wartość pojemności elektrycznej 0,000 000 000 25 F jako 250 pF.

Zasada jednej jednostki dla każdej wielkości nie sprawdziła się w pełni w praktyce. Podczas wprowadzania układu SI do nauki, techniki i gospodarki okazało się, że nie zawsze jego jednostki są w stanie zastąpić jednostki wcześniej stosowane. Przykładowo naturalnych jednostek czasu, jak dzień, tydzień, miesiąc czy rok nie dało się zastąpić dziesiętnymi wielokrotnościami sekundy, a używana w konstrukcji i technologii naturalna jednostka kąta – kąt pełny, okazała się znacznie bardziej wygodna aniżeli wynikający z zasady spójności radian.

Aby zasady układu SI nie kolidowały ze względami praktycznymi, zdecydowano się na dopuszczenie do stosowania wybranych jednostek nienależących do tego układu. Nazywa się je **legalnymi jednostkami pozaukładowymi**. Jako przykłady takich jednostek można wymienić: jednostkę masy – tonę; jednostki czasu – minutę, godzinę, dobę, dzień, tydzień, miesiąc, kwartał, rok; jednostkę temperatury – stopień Celsjusza; jednostki kąta płaskiego – kąt pełny, zwany często obrotem, i jego podwielokrotności: stopień, minutę i sekundę kątową; jednostkę powierzchni – hektar; jednostkę prędkości – kilometr na godzinę; jednostkę prędkości obrotowej – obrót na minutę czy jednostkę energii – kilowatogodzinę.

Bardziej szczegółowe informacje na temat układów jednostek można znaleźć w [L3, L9 i L13].

2.4. BŁĘDY POMIARÓW

2.4.1. Definicje i klasyfikacje błędów

Celem pomiaru jest wyznaczenie wartości odpowiadającej mierzonemu obiektowi, czyli wartości, która jest zgodna z definicją rozpatrywanej właściwości tego obiektu przyjętą w trakcie tworzenia jego modelu wzorcowego. Wartości tej, którą nazywać będziemy **wartością rzeczywistą** i oznaczać symbolem x_r , nie można jednak ustalić jednoznacznie. Pomiar pozwala jedynie na wyznaczenie zbioru wartości, z których każdą można w uzasadniony sposób uznać za rzeczywistą lub, innymi słowy, zbioru wartości, w którym z określonym prawdopodobieństwem powinna znajdować się nieznana wartość rzeczywista. Zbiór ten (p. rozdział 2.2) charakteryzuje się za pomocą dwóch parametrów – wartości zaobserwowanej x_z i niepewności pomiaru $\Delta_u x$. Wartość zaobserwowana stanowi najlepsze⁷ oszacowanie (estymatę) wartości rzeczywistej, natomiast niepewność pomiaru charakteryzuje rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać mierzonemu obiektowi.

⁷ W granicach możliwości przeprowadzonego pomiaru.

Chociaż wartość zaobserwowana stanowi możliwie najlepsze oszacowanie wartości rzeczywistej, to jednak wartości te prawie nigdy nie są jednakowe. Ich różnica nosi nazwę **błędu pomiaru**.

Definicję błędu pomiaru można wyrazić w postaci zależności matematycznej:

$$\Delta_r x = x_z - x_r \quad (2.8)$$

gdzie $\Delta_r x$ oznacza rzeczywistą wartość błędu pomiaru. Ze względu na nieznajomość rzeczywistej wartości mierzonej wielkości – x_r nie można zależności (2.8) wykorzystać do obliczenia rzeczywistej wartości błędu. Można jednak z praktycznie wystarczającym przybliżeniem oszacować granice, w których rzeczywista wartość błędu się mieści. Granice te, które oznaczać będziemy symbolami $\Delta_{\min} x$ i $\Delta_{\max} x$, noszą nazwę **błędów granicznych**.

$$\Delta_{\min} x \leq \Delta_r x \leq \Delta_{\max} x \quad (2.9)$$

Dość często zdarza się, że błędy graniczne są symetryczne względem zera, czyli $\Delta_{\min} x = -\Delta x$ i $\Delta_{\max} x = \Delta x$. Wtedy $|\Delta_r x| \leq \Delta x$.

Na wynik pomiaru, a zatem i na jego błąd, wpływa wiele czynników. Ich różnorodność sprawia, że charakter błędu pomiaru jest złożony. Z tego względu w różnego rodzaju analizach traktuje się go często jako superpozycję (wypadkową) różnego rodzaju błędów cząstkowych.

Błędem cząstkowym nazywać będziemy składową błędu pomiaru pochodzącą z określonego źródła, spowodowaną określoną przyczyną czy pochodzącą z określonej operacji. Można go zdefiniować jako różnicę pomiędzy wynikiem uzyskanym a wynikiem, który zostałby uzyskany, gdyby przyczyna błędu cząstkowego nie wystąpiła. Np. błąd odtwarzania wzorca, stanowiący składową błędu pomiaru w pomiarach metodą różnicową czy zerową (patrz rozdział 3.6), jest różnicą pomiędzy wartością rzeczywiście odtwarzaną przez wzorzec a jego wartością nominalną. Podobnie błąd opracowania wyniku, spowodowany przyjęciem przybliżonej metody obliczeń, jest różnicą pomiędzy uzyskanym wynikiem tych obliczeń a wynikiem obliczeń dokładnych.

Błędy cząstkowe mają charakter przechodni. Oznacza to, że suma błędów cząstkowych odpowiada sumie przyczyn powstania każdego z nich i może być traktowana jako błąd cząstkowy wyższego rzędu. I odwrotnie, jeśli przyczynę powstania błędu cząstkowego można rozłożyć na bardziej elementarne składowe, to błędy spowodowane poszczególnymi składowymi stanowią błędy cząstkowe niższego rzędu.

W odróżnieniu od błędu pomiaru, który jest spowodowany wieloma bardzo różnymi przyczynami, poszczególne błędy cząstkowe, jako skutki ściśle określonej przyczyny (lub znacznie ograniczonej liczby przyczyn), mają charakter bardziej jednorodny, w związku z czym łatwiej poddają się różnego rodzaju analizom i łatwiej można wyznaczyć ich wartości graniczne.

Przy klasyfikacji błędów wykorzystywane są różne kryteria. Do najczęściej stosowanych należą:

- postać, w jakiej błąd jest podawany;
- charakter (natura) błędu;
- operacja (etap procesu pomiarowego), w trakcie której błąd powstaje;
- warunki pomiaru;
- przyczyna powstania błędu.

Ze względu na postać, w jakiej błędy są podawane, dzieli się je na bezwzględne i względne.

Błąd bezwzględny (błąd w postaci bezwzględnej) jest to różnica pomiędzy wartością uzyskaną a wartością, która zostałaby uzyskana, gdyby przyczyna błędu nie wystąpiła

$$\Delta x = x - x_e \quad (2.10)$$

gdzie:

Δx – błąd bezwzględny;

x – wartość uzyskana;

x_e – wartość, która zostałaby uzyskana, gdyby przyczyna błędu nie wystąpiła.

Błąd względny jest to błąd w postaci bezwymiarowej, określony zależnością:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x_e} \equiv \frac{\Delta x}{x} \quad (2.11)$$

gdzie δx oznacza błąd względny.

Błąd bezwzględny jest wyrażany w tych samych jednostkach co wielkość mierzona. Błąd względny podaje się najczęściej w procentach. Jego zastosowanie umożliwia porównywanie dokładności pomiarów różnych wielkości fizycznych.

Charakter (naturę) błędu określa jego zachowanie przy kolejnym powtarzaniu doświadczenia pomiarowego. Ze względu na to kryterium wyróżnia się błędy systematyczne, błędy przypadkowe i błędy nadmierne (grube).

Błędem systematycznym jest błąd, którego wartość, przy wielokrotnym powtarzaniu pomiarów tej samej wielkości określonej w warunkach praktycznie niezmiennych, jest stała lub zmienia się wg ściśle określonego prawa wraz ze zmianą tych warunków.

Jako przykłady błędów systematycznych wymienić można błędy spowodowane zjawiskiem rozszerzalności cieplnej, błędy wynikające z ugięć sprężystych mierzonych elementów pod wpływem nacisku pomiarowego, błędy spowodowane odchyłkami położenia kres podzielnicy przyrządu itp.

Ze względu na deterministyczny charakter błędów systematycznych ich wartości można często obliczyć bądź wyznaczyć doświadczalnie. W takich przypadkach błędy te nie muszą obciążać wyniku pomiaru, ponieważ można się od nich uwolnić poprzez odpowiednią korekcję wartości zaobserwowanej.

Błąd przypadkowy to błąd, którego wartość przy wielokrotnym powtarzaniu pomiarów tej samej wielkości określonej, w warunkach praktycznie niezmiennych, zmienia się w sposób nieprzewidywany na skutek różnych zjawisk przypadkowych.

Jako przykłady błędów przypadkowych wymienić można błąd kwantowania (zaokrąglania) wartości odczytywanej z przyrządu, błędy wynikające z luzów przyrządu, błąd paralaksy itp.

Wartość błędu przypadkowego charakteryzuje się poprzez podanie wartości granicznych, wewnątrz których z odpowiednio dużym prawdopodobieństwem jest ona zawarta⁸.

Błędy nadmierne (grube) są to błędy wynikające z nieprawidłowego wykonania pomiaru. Ich przyczynami najczęściej są nieujawnione pomyłki przy odczycie (zapisie) wskazań przyrządu, wystąpienie nieprzewidywanych zjawisk zakłócających istotnie przebieg pomiaru, usterki w układzie pomiarowym czy niewłaściwe zastosowanie narzędzi lub metod pomiarowych.

Wynik obarczony błędem grubym jest przeważnie bezwartościowy i nie powinien być brany pod uwagę. Niestety, wystąpienie błędu grubego pozostaje często niezauważone.

Wyznaczanie wartości wielkości mierzonej odbywa się poprzez realizację sekwencji czynności, które można pogrupować (p. str. 12) w pewne operacje. Operacje te, nazywane też niekiedy etapami procesu pomiarowego, stanowią kolejne kryterium podziału błędów. Przy klasyfikacji błędów bierze się najczęściej pod uwagę następujące operacje:

- pobieranie wielkości mierzonej;
- przetworzenie wielkości mierzonej przez układ pomiarowy;
- obserwację sygnału wyjściowego układu pomiarowego (np. odczyt wskazania przyrządu, obserwacja zachowania detektora itp.) i jego rejestrację;
- opracowanie wyniku pomiaru.

W trakcie poszczególnych operacji informacja o wartości wielkości mierzonej ulega różnym zakłóceniom. Pociąga to za sobą powstanie określonych błędów. W zależności od operacji, w trakcie której powstały, błędy te dzieli się na błędy pobrania, błędy przyrządu, błędy odczytu i błędy opracowania wyniku.

⁸ Przy bardziej zaawansowanych technikach analizy zakłada się, że błąd przypadkowy jest zmienną losową o określonym rozkładzie statystycznym (najczęściej normalnym) i charakteryzuje się go za pomocą parametrów tego rozkładu.

Jako przykłady **błędów pobrania** wymienić można błędy wynikające z niemożności osiągnięcia idealnego kontaktu pomiędzy obiektem mierzonym a układem pomiarowym (np. z powodu zanieczyszczenia powierzchni czy ograniczonej dokładności ustawienia końcówek pomiarowych) oraz błędy wynikające z oddziaływania przyrządu na obiekt mierzony (np. odkształcenia sprężyste zachodzące pod wpływem nacisku pomiarowego). Do błędów pobrania zalicza się niekiedy również błędy wynikające z operacji wcześniejszych (p. rozdział 2.2), tj. modelowania obiektu mierzonego i projektowania pomiaru (np. błędy wynikające z rozbieżności pomiędzy modelem wzorcowym a obiektem rzeczywistym).

Jako przykłady **błędów przyrządu** służyć mogą błędy wzorcowania, błędy histerezy, błędy wynikające z wpływu warunków otoczenia na charakterystykę przyrządu, błędy wynikające ze zmiennych sił tarcia pomiędzy ruchomymi elementami przyrządu oraz luzów w układzie mechanicznym (np. niepowtarzalność wskazań).

Błędy odczytu wynikają najczęściej z zaokrągleń (błąd kwantowania), ograniczonych możliwości oceny położenia wskazówki pomiędzy kresami (błąd interpolacji) czy też patrzenia na element wskazujący pod niewłaściwym kątem (błąd paralaksy). Przyczyną błędu odczytu może być również pomyłka; bardzo często jest to wtedy błąd grubych.

Błędy opracowania wyniku mają miejsce w przypadku korzystania z uproszczonych zależności pomiędzy wielkościami mierzonymi (ma to miejsce zwłaszcza przy pomiarach metodami pośrednimi) oraz przybliżonych danych odnośnie właściwości fizycznych mierzonych obiektów czy narzędzi pomiarowych (np. współczynników rozszerzalności cieplnej przy obliczaniu błędów temperaturowych czy modułów sprężystości przy obliczaniu odkształceń sprężystych).

Ze względu na warunki pomiaru błędy dzieli się na podstawowe i dodatkowe.

Błąd podstawowy jest to błąd popełniony przez przyrząd przy pomiarze w warunkach odniesienia.

Warunkami odniesienia nazywa się zespół umownie przyjętych wartości wielkości fizycznych, które mają często istotny wpływ na wyniki pomiarów. Do wielkości tych zalicza się przede wszystkim temperaturę (wartość odniesienia 20°C), ciśnienie (wartość odniesienia 101,325 kPa) i wilgotność – (wartość odniesienia 55%).

Błędem dodatkowym nazywa się zmianę wskazań przyrządu spowodowaną różnicą pomiędzy warunkami pomiaru a warunkami odniesienia.

Przy pomiarze w warunkach różnych od warunków odniesienia błąd pomiaru jest równy sumie błędu podstawowego i błędu dodatkowego.

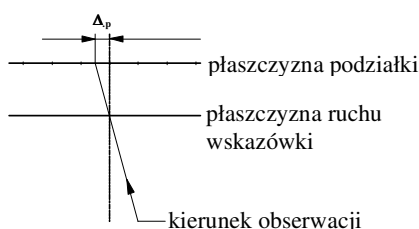
Przyczyn powstawania błędów jest w zasadzie nieskończenie wiele, dlatego podział błędów w zależności od przyczyny ich powstania ma charakter otwarty. Jako

przykłady błędów wyodrębnionych wg tego kryterium wymienić można błędy interpolacji, błędy kwantowania, błędy paralaksy, błędy temperaturowe (odkształceń termicznych), błędy odkształceń sprężystych itd, itd.

Błąd interpolacji występuje w przypadkach, gdy podczas odczytu działka elementarna podziałki jest dzielona na części. Wynika on z ograniczonych możliwości oceny położenia wskazówki pomiędzy dwoma sąsiednimi kreskami. Wg [L7] można przyjąć, że w większości przypadków wartość tego błędu mieści się w granicach $\pm 0,1$ wartości działki elementarnej.

Błąd kwantowania jest to błąd wynikający z zaokrąglania wartości wskazywanej przez przyrząd pomiarowy. W przyrządach cyfrowych proces zaokrąglania jest realizowany przez układ wskazujący przyrządu, a wielkość kwantu (różnicy sąsiednich wskazań) wynika z konstrukcji tego układu. W przyrządach analogowych zaokrąglania dokonuje osoba odczytująca wskazanie, a wielkość kwantu (różnicy sąsiednich odczytów) zależy od jej uznania. W praktyce wielkości kwantów wartości odczytywanych z przyrządów analogowych wynoszą 0,1; 0,2; 0,5 lub 1,0 wartości działki elementarnej. Można przyjąć, że wartość błędu kwantowania Δ_k nie przekracza połowy wartości kwantu k , czyli $\Delta_k \leq \pm 0,5 k$.

Błąd paralaksy jest to błąd występujący wyłącznie w przyrządach analogowych i wynikający z patrzenia na element wskazujący pod niewłaściwym kątem. Błąd ten występuje wtedy, gdy płaszczyzna ruchu wskazówki (rys. 4) nie pokrywa się z płaszczyzną podziałki, a obserwator dokonuje odczytu patrząc na te płaszczyzny pod kątem różnym od 90° .



Rys. 4. Powstanie błędu paralaksy

Błędy temperaturowe powstają przy pomiarach długości i wielkości pochodnych od niej zależnych, jak powierzchnia czy objętość. Spowodowane są faktem, że na skutek zjawiska rozszerzalności cieplnej wymiary liniowe obiektów są funkcjami temperatury. Przykładowo, długość L pręta określa zależność:

$$L = L_0 \cdot [1 + \alpha (t - t_0)] \quad (2.12)$$

gdzie:

L – długość pręta w temperaturze t ;

L_0 – długość pręta w temperaturze t_0 (np. w temperaturze odniesienia);

α – współczynnik rozszerzalności liniowej materiału, z którego wykonany jest rozważany pręt.

Zjawisku rozszerzalności cieplnej podlega także przyrząd pomiarowy. W przypadku pomiarów długości może to być nawet korzystne, ponieważ błędy temperaturowe przyrządu i mierzonego przy jego pomocy obiektu mogą się wzajemnie kompensować.

Wartości błędów temperaturowych określa zależność:

$$\Delta_t L = L \cdot [\alpha_p \cdot (t_p - t_n) + (\alpha_p - \alpha_n) \cdot (t_n - 20^\circ \text{C})] \quad (2.13)$$

gdzie:

α_p – współczynnik rozszerzalności liniowej materiału mierzonego przedmiotu;

α_n – współczynnik rozszerzalności liniowej materiału narzędzia pomiarowego;

t_p – temperatura mierzonego przedmiotu;

t_n – temperatura narzędzia pomiarowego.

Z powyższej zależności wynika, że błąd temperaturowy ma dwie składowe. Pierwsza z nich, najczęściej bardziej istotna, powstaje w przypadku, gdy pomiędzy przedmiotem mierzonym a narzędziem pomiarowym wystąpi różnica temperatur. Druga, przeważnie mniej istotna, jest spowodowana wykonywaniem pomiaru w temperaturze różnej od temperatury odniesienia, a jej wartość jest proporcjonalna do różnicy wartości współczynników rozszerzalności liniowej materiałów przedmiotu i narzędzia. W praktyce wartość pierwszej składowej ogranicza się poprzez odpowiednio długie przetrzymanie mierzonego przedmiotu w pomieszczeniu, w którym znajduje się narzędzie pomiarowe, a drugiej poprzez stabilizację temperatury w tym pomieszczeniu na poziomie zbliżonym do poziomu odniesienia.

Błędy odkształceń sprężystych. Przy pomiarach wielkości geometrycznych końcówka pomiarowa przyrządu winna zajmować właściwe położenie względem mierzonego przedmiotu. Jednym z warunków osiągnięcia tego celu jest odpowiednie dociśnięcie do siebie obu tych elementów. Siła tego dociśnięcia, czyli tzw. **nacisk pomiarowy**, spełnia w procesie pomiaru szereg pożytecznych funkcji. W szczególności pozwala na przebicie otaczającej mierzone przedmioty cienkiej warstewki tłuszczów, umożliwia odsunięcie na bok drobnych zanieczyszczeń i likwiduje ewentualną szczelinę powietrzną na powierzchni styku. Dodatkowo nacisk pomiarowy powoduje pokonanie oporów tarcia oraz kasowanie luzów występujących w ruchomych częściach przyrządu. Niestety, poza spełnianiem ww. pożytecznych funkcji nacisk pomiarowy powoduje jeszcze odkształcenia stykających się elementów. Odkształcenia te mają charakter odkształceń sprężystych i występują najczęściej w postaci spłaszczeń lub ugięć. Powodują one powstanie kolejnego składnika błędu pomiaru – tzw. błędu odkształceń sprężystych. Poza naciskiem pomiarowym przyczyną powstania błędów sprężystych może być również ciężar własny mierzonych obiektów.

Ze względu na systematyczny charakter, błędy odkształceń sprężystych można, przy dysponowaniu odpowiednim zestawem danych, obliczyć i poprzez odpowiednią korekcję wartości zaobserwowanej wyeliminować. Bardziej szczegółowe informacje na ten temat są zawarte w [L7, L28, L31].

2.4.2. Zasady szacowania wartości błędów wypadkowych

Błędem wypadkowym będziemy nazywać sumę dwu lub więcej błędów cząstkowych, przy założeniu, że suma tych błędów ma sens fizyczny.

Błędy cząstkowe sumują się zgodnie z zasadami algebry, co oznacza, że rzeczywista wartość ich sumy $\Delta_r x$ jest równa sumie ich wartości rzeczywistych.

$$\Delta_r x = \sum_i (\Delta_{r,i} x) \quad (2.14)$$

gdzie $\Delta_{r,i} x$ oznacza rzeczywistą wartość i-tego błędu cząstkowego.

Obliczenie rzeczywistej wartości błędu wypadkowego z zależności (2.14) nie jest jednak możliwe, bo nieznane są rzeczywiste wartości błędów cząstkowych.

W celu obliczenia (oszacowania) rzeczywistej wartości błędu wypadkowego zaleca się następujące postępowanie:

- 1) dla każdego z błędów cząstkowych $\Delta_i x$ określamy jego wartości graniczne $\Delta_{\min,i} x$ i $\Delta_{\max,i} x$ (gdzie i – wyróżnik błędu cząstkowego);
- 2) dla każdego z błędów cząstkowych $\Delta_i x$ obliczamy jego wartość średnią $\Delta_{m,i} x$ i niepewność wyznaczenia tej wartości – $\Delta_{u,i} x$, przy czym:

$$\Delta_{m,i} x = \frac{\Delta_{\min,i} x + \Delta_{\max,i} x}{2} \quad \text{oraz} \quad \Delta_{u,i} x = \frac{\Delta_{\max,i} x - \Delta_{\min,i} x}{2} \quad (2.15)$$

- 3) obliczamy wartość średnią błędu wypadkowego – $\Delta_m x$

$$\Delta_m x = \sum_{i=1}^n (\Delta_{m,i} x) \quad \text{gdzie } n - \text{ilość sumowanych błędów cząstkowych} \quad (2.16)$$

- 4) obliczamy niepewność wyznaczenia wartości średniej błędu wypadkowego – $\Delta_u x$

$$\Delta_u x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_{u,i} x)^2} \quad (2.17)$$

- 5) obliczamy wartości graniczne błędu wypadkowego:

$$\Delta_{\min} x = \Delta_m x - \Delta_u x \quad \text{oraz} \quad \Delta_{\max} x = \Delta_m x + \Delta_u x \quad (2.18)$$

i ostatecznie możemy zapisać, że rzeczywista wartość błędu wypadkowego:

$$\Delta_r x = \Delta_m x \pm \Delta_u x \quad \text{lub} \quad \Delta_r x \in (\Delta_{\min} x, \Delta_{\max} x) \quad (2.19)$$

Podana wyżej procedura obliczania błędu wypadkowego ma charakter uproszczonej. Opiera się ona na założeniu, że poszczególne błędy cząstkowe są wzajemnie niezależne oraz że wartości graniczne tych błędów szacowano w taki sposób, aby prawdopodobieństwa zdarzeń, iż $\Delta_{r,i} x \in (\Delta_{i,\min} x, \Delta_{i,\max} x)$ były dla wszystkich błędów cząstkowych

jednakowe (zbliżone). Ten sam poziom prawdopodobieństwa ma zdarzenie określone zależnościami (2.19).

W przypadku bardziej zaawansowanych analiz zakłada się, że poszczególne błędy cząstkowe są zmiennymi losowymi o określonych rozkładach i parametrach. Obliczanie błędu wypadkowego sprowadza się do określenia rozkładu i parametrów sumy tych zmiennych przy wykorzystaniu aparatu statystyki matematycznej. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w [L21, L32].

Błąd wypadkowy może być błędem cząstkowym wyższego rzędu lub, w przypadku uwzględnienia wszystkich przewidywanych przyczyn, całkowitym błędem pomiaru. W tym drugim przypadku szacowaną wartość średnią błędu wykorzystuje się do skorygowania wartości zaobserwowanej. Korekcji dokonuje się zgodnie z zależnością:

$$x_{z,p} = x_z - \Delta_m x \quad (2.20)$$

gdzie:

$x_{z,p}$ – skorygowana wartość zaobserwowana, zwana najczęściej **wartością zaobserwowaną poprawną**;

x_z – nieskorygowana wartość zaobserwowana, zwana najczęściej **wartością zaobserwowaną surową**.

W przypadku gdy obliczany błąd wypadkowy jest całkowitym błędem pomiaru, niepewność oszacowania jego wartości średniej jest równa niepewności pomiaru. Wynik pomiaru można wtedy zapisać w tradycyjnej postaci:

$$x_r = x_{z,p} \pm \Delta_u x \quad (2.21)$$

choć z matematycznego punktu widzenia bardziej poprawny jest zapis:

$$x_{z,p} - \Delta_u x \leq x_r \leq x_{z,p} + \Delta_u x \quad (2.22)$$

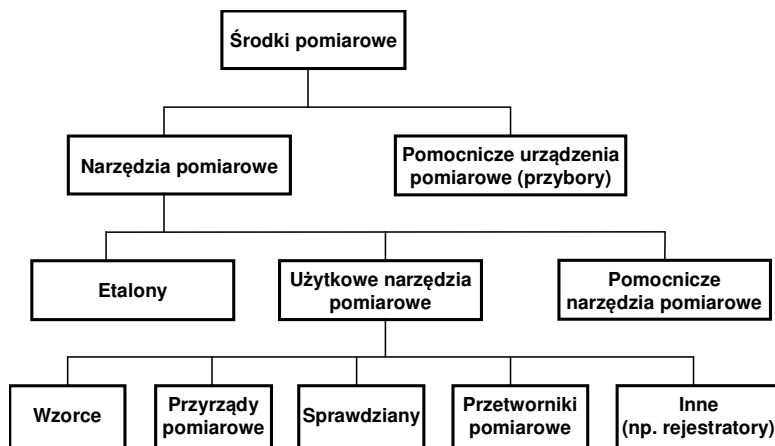
W ostatecznej postaci wyniku pomiaru wartość niepewności $\Delta_u x$ należy zaokrąglić do jednej cyfry znaczącej, przy czym zmiana wartości spowodowana zaokrągleniem nie powinna przekraczać 20%. W przypadku niemożności spełnienia tego warunku zaleca się pozostawienie drugiej cyfry znaczącej. Wartość zaobserwowana poprawna (lub wartości podawane w zależności 2.22) powinny być podane z tym samym co niepewność rzędem dokładności.

Podana wyżej zasada zaokrąglania nie dotyczy wyników przejściowych, które należy podawać z dokładnością przynajmniej o jeden rząd wyższą.

2.5. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ŚRODKÓW POMIAROWYCH

2.5.1. Klasyfikacja środków pomiarowych

Przy pomiarach wykorzystywane są różne urządzenia techniczne. Określa się je ogólnymi nazwami – **środki pomiarowe**, **sprzęt pomiarowy** lub **urządzenia pomiarowe**. Funkcje pełnione przez poszczególne urządzenia są zróżnicowane i stanowią najczęściej przyjmowane kryterium ich klasyfikacji. Podział środków pomiarowych w zależności od pełnionych w procesie pomiaru funkcji pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Klasyfikacja środków pomiarowych w zależności od pełnionych przez nie funkcji

W zależności od pełnionych funkcji wszystkie środki pomiarowe można podzielić na takie, które w procesie pomiaru pełnią rolę podstawową, tzn. służą do określania wartości mierzonych wielkości oraz takie, które w procesie pomiaru pełnią rolę pomocniczą (np. zapewniają właściwe warunki pomiaru, ustalają odpowiednie położenie mierzonego przedmiotu, chronią aparaturę pomiarową przed wstrząsami itp.). Pierwszą grupę środków będziemy dalej nazywać **narzędziami pomiarowymi**, drugą – **pomocniczymi urządzeniami pomiarowymi**. Jako przykłady pomocniczych urządzeń pomiarowych, zwanych również niekiedy **przyborami pomiarowymi**, można wymienić stoły pomiarowe, uchwyty, przyzmy, statywy, klimatyzatory, urządzenia zasilające itp.

Narzędzia pomiarowe dzieli się zazwyczaj na etalony, narzędzia pomiarowe użytkowe i narzędzia pomiarowe pomocnicze.

Zadaniem **etalonów** jest definiowanie, przechowywanie i odtwarzanie jednostki miary wielkości fizycznej lub krotności tej jednostki (wartości odniesienia) w celu przekazywania jej poprzez porównanie innym narzędziom pomiarowym. Etalonów używa się więc nie do pomiarów, lecz do sprawdzania innych narzędzi pomiarowych.

Narzędzia pomiarowe użytkowe są przeznaczone do wykonywania pomiarów różnych wielkości określonych. W ich skład wchodzi głównie wzorce miar i przyrządy pomiarowe. Niektóre źródła wyróżniają ponadto sprawdziany [L7], przetworniki pomiarowe [L18] i rejestratory [L28].

Narzędzia pomiarowe pomocnicze służą do pomiaru wielkości wpływowych (tzn. innych wielkości, które mogą mieć istotny wpływ na wynik pomiaru) lub wielkości charakteryzujących własności metrologiczne narzędzi pomiarowych użytkowych. Jako przykłady narzędzi pomiarowych pomocniczych można wymienić termometr, higrometr i barometr zastosowane w celu określenia warunków otoczenia, w jakim przeprowadzano pomiary, bądź poziomnicę użytą w celu wypoziomowania wagi [L7, L18].

2.5.2. Użytkowe narzędzia pomiarowe

W podrozdziale tym zostaną przedstawione podstawowe informacje dotyczące wzorców miar i przyrządów pomiarowych.

Wzorcem miary nazywa się narzędzie pomiarowe odtwarzające jedną lub więcej znanych wartości danej wielkości. Wzorce odtwarzające jedną wartość wielkości (jak np. płytką wzorcowa długości czy odważnik) będziemy nazywać **wzorcami jednomiarowymi**, a wzorce odtwarzające więcej niż jedną wartość wielkości (jak np. przymiar kreskowy czy menzurka) – **wzorcami wielomiarowymi**.

Od wzorców wymaga się niezmienności własności w czasie oraz łatwości i możliwie wysokiej dokładności odtwarzania.

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi określony wzorec są:

- nominalna wartość wzorca – W_n ;
- niepewność odtwarzania wzorca – ΔW (ewentualnie graniczne dopuszczalne wartości błędów odtwarzania $\Delta_{\min} W$, i $\Delta_{\max} W$);
- okres wiarygodności wzorca – T .

Nominalna wartość wzorca W_n – to wartość, którą wzorec winien odtwarzać. Jest to stanowiąca element odniesienia teoretyczna wartość, którą nanosi się bezpośrednio na wzorcu ewentualnie podaje w jego metryczce. Wartość nominalną określa się niekiedy jako "**wskazanie wzorca**".

Wskutek różnych przyczyn wartość rzeczywiście odtwarzana przez wzorec – W_r różni się od jego wartości nominalnej, przy czym różnicę $\Delta_r W = W_n - W_r$ nazywa się **błędem (wskazania) wzorca** miary [L18].

Ze względu na dokładność prowadzonych pomiarów wartość błędu wzorca nie może być zbyt duża, dlatego nakłada się na nią ograniczenie:

$$\Delta_{\min}W \leq \Delta_r W \leq \Delta_{\max}W \quad (2.23)$$

gdzie: $\Delta_{\min}W$, $\Delta_{\max}W$ – graniczne dopuszczalne wartości błędu wzorca.

Jeżeli $\Delta_{\max}W$ i $\Delta_{\min}W$ są symetryczne względem zera, czyli zachodzi $\Delta_{\max}W = -\Delta_{\min}W = \Delta W$, to zależność (2.23) przyjmuje postać:

$$|\Delta_r W| \leq \Delta W \quad (2.24)$$

Ponieważ wartość rzeczywiście odtwarzana przez wzorec, podobnie jak wartości wszystkich innych wielkości określonych, ulega w czasie pewnym zmianom, więc zmianom ulega również wartość błędu wzorca. Dlatego konieczne jest okresowe sprawdzanie wzorców w celu stwierdzenia, czy warunek (2.23) pozostaje spełniony.

Okresowe sprawdzanie wzorców⁹ poza aspektem merytorycznym może mieć również aspekt prawny. Określa się je wtedy mianem **legalizacji okresowej**. Legalizacji tej dokonują wyspecjalizowane organy państwowej służby metrologii prawnej¹⁰, a okresy wiarygodności poszczególnych wzorców zostają określone poprzez stosowne zarządzenia tych służb.

Przedstawione wyżej parametry charakteryzujące wzorce miar bywają często uzupełniane parametrami określającymi warunki użytkowania i przechowywania wzorca.

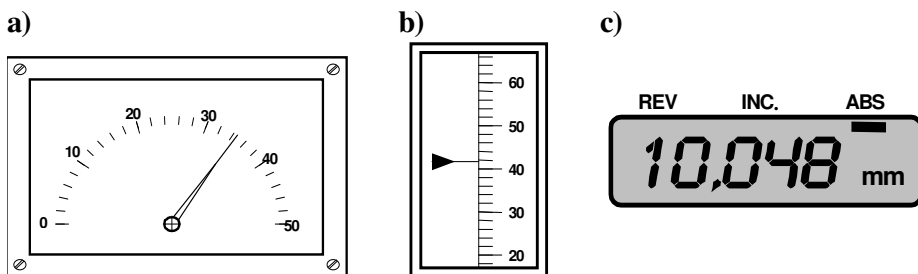
Przyrządem pomiarowym nazywa się narzędzie pomiarowe służące do przetwarzania wielkości mierzonej (lub innej wielkości z nią związanej) na informację o wartości tej wielkości. W zależności od metody przetwarzania wielkości mierzonej przyrządy pomiarowe można podzielić na trzy grupy:

- **przyrządy z bezpośrednim odczytem** (wskazują bezpośrednio wartość wielkości mierzonej, jak np.: amperomierz, suwmiarka czy termometr);
- **przyrządy pomiarowe różnicowe** (umożliwiają pomiar małej różnicy między wartością wielkości mierzonej i znaną wartością tej samej wielkości, w związku z czym posiadają z reguły niewielkie zakresy pomiarowe. Jako przykłady przedstawicieli tej grupy można wymienić m.in. różne odmiany czujników mechanicznych, optycznych czy elektrycznych);
- **przyrządy pomiarowe porównawcze** (wskazują, że wartość wielkości mierzonej jest równa znanej wartości odtwarzanej w procesie pomiaru przez zespół wzorców. Jako przykłady przyrządów porównawczych można wymienić wagę dźwigniową (laboratoryjną) i galwanometr zerowy).

⁹ Dotyczy to również innych narzędzi pomiarowych.

¹⁰ W Polsce – wyspecjalizowane laboratoria Głównego Urzędu Miar.

W zależności od sposobu wskazywania wyniku przyrządy pomiarowe dzielą się na analogowe (rys. 6a i 6b) oraz cyfrowe (rys 6c).



Rys. 6. Pola odczytowe przyrządów analogowych i cyfrowych

W **przyrządach analogowych** wartość wielkości mierzonej jest określona poprzez położenie wskazówki względem podzielnicy. W celu ułatwienia odczytu na podzielnicy nanoszone są zespoły kres, zwane **podziałkami**. Każdej kresie podziałki odpowiada określona wartość mierzonej wielkości. Dwie sąsiednie kresy określają tzw. **działkę elementarną**, którą charakteryzują dwa parametry:

- **długość działki elementarnej** (liniowa odległość pomiędzy sąsiednimi kresami);
- **wartość działki elementarnej** (różnica wartości wielkości odpowiadających wyznaczającym działkę elementarną kresom).

W **przyrządach cyfrowych** wartość wielkości mierzonej określa liczba pojawiająca się w polu odczytowym przyrządu. Liczba ta składa się przeważnie z kilku cyfr tworzących układ dziesiętny oraz znaku określającego początek tego układu.

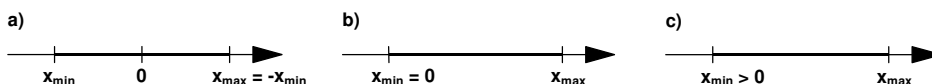
Przyrządy pomiarowe charakteryzuje wiele różnych parametrów. W szczególności wyróżnić można: rozdzielczość urządzenia wskazującego, zakres wskazań, zakres pomiarowy, klasę dokładności, czułość (przełożenie), czułość na wielkości wpływające, rezystancję, parametry charakteryzujące własności dynamiczne i cechy użytkowe przyrządu, masę, gabaryty czy parametry zasilania.

Rozdzielczość urządzenia wskazującego jest to najmniejsza różnica wskazania, która może być zauważona w wyraźny sposób [L20]. W przypadku przyrządów cyfrowych jest to różnica wskazań odpowiadająca zmianie o jednostkę najmniej znaczącej cyfry. W przypadku przyrządów analogowych rozdzielczość jest funkcją wartości działki elementarnej i zależy od sposobu dokonywania odczytu. Jeżeli zaokrąglamy odczytywane wartości do całkowitych działek to rozdzielczość jest równa wartości działki elementarnej. Jeżeli przy odczycie jesteśmy w stanie podzielić działkę elementarną na 2, 5 czy (maksimum) 10 części, to rozdzielczość wyniesie wtedy odpowiednio 0,5; 0,2 lub 0,1 wartości działki elementarnej.

Zakresem wskazań nazywa się zbiór wartości wskazywanych przez urządzenie odczytowe przyrządu. Zbiór ten jest ograniczony dwoma wartościami skrajnymi, zwanymi odpowiednio **granica dolną** i **granica górną zakresu wskazań**. Z pojęciem zakresu wskazań związane jest dość ściśle pojęcie zakresu pomiarowego.

Zakresem pomiarowym przyrządu nazywa się zbiór wartości wielkości mierzonej, dla których wskazania przyrządu pomiarowego, przy pomiarze w warunkach odniesienia, nie powinny być obciążone błędem większym od dopuszczalnego. Zbiór ten ograniczony jest dwoma wartościami – minimalną, którą określa się mianem **granicy dolnej zakresu pomiarowego**, i maksymalną, nazywaną **granica górną zakresu pomiarowego**.

Ze względu na wzajemną relację zachodzącą pomiędzy wartościami granicznymi zakresów oraz zerem wyróżnia się zakresy symetryczne względem zera, zakresy jednostronne oraz zakresy bezzerowe. Przykłady takich zakresów pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Różne rodzaje zakresów pomiarowych (zakresów wskazań):
a) symetryczny względem zera, b) jednostronny, c) bezzerowy

Klasa dokładności – klasa przyrządów pomiarowych spełniających określone wymagania metrologiczne, których błędy zawarte są w określonych granicach [L20]. Klasę dokładności oznacza się na ogół liczbą, znakiem lub etykietą przyjętymi umownie i nazywanymi **oznaczeniem klasy**. Np w dziedzinie pomiarów wielkości elektrycznych przyrządy pomiarowe posiadają oznaczenie liczbowe k , gdzie k jest wyrażonym w procentach stosunkiem granicznego dopuszczalnego błędu przyrządu do jego zakresu pomiarowego.

$$k = \frac{\Delta_{\text{dop}}}{z} \cdot 100 \% \quad (2.25)$$

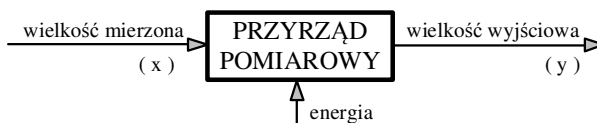
gdzie:

Δ_{dop} – dopuszczalny błąd przyrządu;

z – zakres pomiarowy (różnica wartości granicznych).

Pojęcie klasy dokładności jest używane również w przypadku wzorców. Np.: klasy dokładności płytek wzorcowych (0, 1, 2 – p. rozdz. 4.1.1) czy klasy dokładności przyrządów wielkościennych (referencyjna, kalibracyjna, kontrolna – p. rozdz. 4.2).

W uproszczeniu przyrząd pomiarowy można przedstawić w postaci bloku, do którego doprowadzona jest wielkość mierzona x i z którego wychodzi informacja o wartości tej wielkości (rys. 8). Nośnikiem tej informacji jest jakaś wielkość wyjściowa y (np. kąt wychylenia wskazówki, długość łuku, który zatoczył jej koniec, wysokość słupka rtęci w termometrze itp.). Zależność wielkości wyjściowej y od wielkości mierzonej x , czyli funkcja $y = f(x)$, nosi nazwę charakterystyki przyrządu.



Rys. 8. Schemat blokowy przyrządu pomiarowego

Czułość przyrządu pomiarowego nazywa się stosunek zmiany wielkości wyjściowej do wywołującej ją zmiany wielkości mierzonej, czyli:

$$C = dy / dx \quad (2.26)$$

gdzie:

- C – czułość przyrządu;
- dx – zmiana wielkości mierzonej;
- dy – zmiana wielkości wyjściowej.

W przyrządach analogowych wielkością wyjściową jest wychylenie wskazówki. Zmiana wielkości mierzonej o wartość działki elementarnej (w_e) powinna spowodować przemieszczenie wskazówki o długość tej działki (l_e), czyli czułość przyrządu można określać jako stosunek długości działki elementarnej do jej wartości ($C = l_e / w_e$).

Jeżeli wielkość wyjściowa i wielkość mierzona są tego samego rodzaju, to czułość jest bezwymiarowa (nie posiada jednostki). Nazywamy ją wtedy **przełożeniem**.

Więcej informacji na temat parametrów charakteryzujących przyrządy pomiarowe można znaleźć w [L7, L31, L37].

2.6. METODY POMIAROWE

Istota każdego pomiaru sprowadza się do eksperymentalnego porównywania nieznanej wartości wielkości ze znanymi wartościami wielkości tego samego rodzaju. Zastosowany przy pomiarze sposób tego porównywania nosi nazwę **metody pomiarowej**.

Istnieje wiele różnych metod pomiarowych. W zasadzie, poza pewnymi wyjątkami, można podzielić je na metody pomiarowe bezpośrednie i metody pomiarowe pośrednie.

Metody pomiarowe bezpośrednie charakteryzują się tym, że nieznana wartość wielkości mierzonej porównywana jest ze znanymi wartościami wielkości tego samego rodzaju. Te znane wartości są odtwarzane przez wzorce, które mogą uczestniczyć w pomiarze bezpośrednio lub pośrednio. W pierwszym przypadku, np. przy pomiarze masy na wadze dźwigniowej, mamy do czynienia z tzw. **metodą bezpośredniego porównania** (masy mierzonego obiektu z masą odważników). W przypadku drugim rola wzorców ogranicza się do przekazania odtwarzanych przez nie wartości przyrządowi pomiarowemu (tzw. wzorcowanie). W procesie pomiaru, np. ważenia na wadze sprężynowej, porównujemy zachowanie się przyrządu (np. wychylenie wskazówki) pod wpływem wielkości mierzonej z jego uprzednim zachowaniem pod wpływem wzorców.

Metody pomiarowe bezpośrednie można podzielić na wychyłowe, różnicowe i zerowe.

Metoda wychyłowa to taki sposób pomiaru, w którym wartość wielkości mierzonej x wyznacza się poprzez ustalenie miejsca x w uporządkowanym według wartości zbiorze wielkości w . W przyrządach analogowych miejsce to jest określone położeniem wskazówki względem podzielnicy, a w przyrządach cyfrowych przez wartość ukazującą się w polu odczytowym przyrządu. Jako przykłady tej metody można wymienić:

- pomiar ciśnienia za pomocą manometru ze wskazówką;
- pomiar napięcia woltomierzem uniwersalnym;
- pomiar ciepłoty ciała termometrem lekarskim;
- pomiar masy ciała na wadze łazienkowej (sprężynowej).

Wyniki pomiarów dokonanych metodą wychyłową podajemy w postaci $x_{z,p} \pm \Delta_u x$, przy czym:

$$\begin{cases} x_{z,p} = \alpha - \Delta_m \alpha \\ \Delta_u x = \Delta_u \alpha \end{cases} \quad (2.27a)$$

$$(2.27b)$$

gdzie:

$x_{z,p}$ – wartość zaobserwowana poprawna wielkości mierzonej;

$\Delta_u x$ – niepewność wyniku pomiaru;

α – odczyt wskazania przyrządu (układu) pomiarowego;

$\Delta_m \alpha$ – szacowana wartość średnia całkowitego błędu pomiaru;

$\Delta_u \alpha$ – niepewność oszacowania wartości średniej błędu pomiaru.

Metoda różnicowa charakteryzuje się tym, że wartość wielkości mierzonej x ustala się na podstawie wyniku pomiaru różnicy tej wartości i zbliżonej do niej, znanej wartości wzorcowej w . Idea metody różnicowej polega na znacznym zmniejszeniu wartości mierzonych wielkości, co pozwala na stosowanie przyrządów o małych zakresach pomiarowych i małych w związku z tym błędach. Jako przykłady pomiaru tą metodą mogą służyć:

- pomiar średnicy wałka za pomocą czujnika i stosu płytek wzorcowych;
- pomiar napięcia za pomocą woltomierza różnicowego.

Przy opracowaniu wyników pomiarów dokonanych metodą różnicową obowiązują zależności:

$$\begin{cases} x_{z,p} = w - \Delta_m w + \alpha - \Delta_m \alpha - \Delta_m z \\ \Delta_u x = \sqrt{(\Delta_u \alpha)^2 + (\Delta_u w)^2 + (\Delta_u z)^2} \end{cases} \quad (2.28a)$$

$$(2.28b)$$

gdzie:

- $x_{z,p}$ – wartość zaobserwowana poprawna wielkości mierzonej;
- $\Delta_u x$ – niepewność wyniku pomiaru;
- α – odczyt wskazania przyrządu (układu) pomiarowego przy bezpośrednim pomiarze różnicy $x - w$;
- $\Delta_m \alpha$ – szacowana wartość średnia błędu pomiaru różnicy $x - w$;
- $\Delta_u \alpha$ – niepewność wyniku pomiaru różnicy $x - w$;
- w – nominalna wartość wzorca;
- $\Delta_m w$ – szacowana wartość średnia błędu wskazania wzorca;
- $\Delta_u w$ – niepewność wzorca;
- $\Delta_m z$ – szacowana wartość średnia błędu zerowania (najczęściej równa zero);
- $\Delta_u z$ – niepewność zerowania.

Aby zastosowany do pomiaru metodą różnicową przyrząd mierzył rzeczywiście różnicę $x - w$, musi dla $x = w$ wskazywać $\alpha = 0$. Osiąga się to poprzez odpowiednią regulację właściwych elementów przyrządu w trakcie pomiaru wybranej wartości wzorcowej w . Zabieg ten nosi nazwę **zerowania**. Ponieważ idealne wyregulowanie przyrządu jest niemożliwe, powstaje z tego powodu błąd Δz , zwany błędem zerowania.

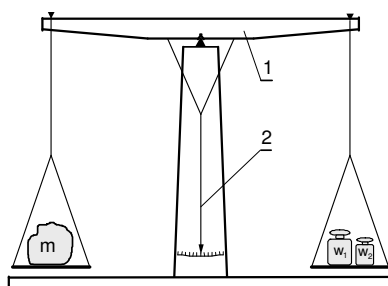
Aby uwzględnić błąd zerowania, przy opracowywaniu wyniku pomiaru musimy oszacować jego wartości graniczne i przedstawić go w postaci scentralizowanej: $\Delta z = \Delta_m z \pm \Delta_u z$. Najczęściej czynność zerowania przeprowadzamy w taki sposób, aby wartość średnia błędu zerowania była równa zero. Wtedy $\Delta z = \pm \Delta_u z$. Może się jednak zdarzyć, zwłaszcza w przypadku pojedynczego pomiaru i trudnego lub pracochłonnego zerowania, że rezygnuje się z precyzyjnego przeprowadzenia tej czynności. Zamiast tego wyznacza się wartość średnią błędu zerowania $\Delta_m z = \alpha_{x=w}$ i fakt ten uwzględnia przy opracowywaniu wyniku (zależność 2.28a). Wartość średnia $\Delta_m z$ zostaje wyznaczona z niepewnością $\Delta_u z$, która zwiększa odpowiednio niepewność pomiaru (zależność 2.28b).

Metody zerowe to taka grupa metod pomiarowych, w których różnicę wartości dwóch wielkości: jednej, zależnej od wielkości mierzonej x , i drugiej, zależnej od wielkości wzorcowej w , sprowadza się do zera. Do badania wartości różnicy $f(x) - g(w)$ służy element funkcjonalny przyrządu zwany **detektorem**. Sprowadzanie wartości $f(x) - g(w)$ do zera jest najczęściej dokonywane odpowiednimi zmianami wielkości wzorcowej w realizowanymi za pomocą tzw. **urządzenia równoważącego**. Zdarza się, że rolę detektora bądź urządzenia równoważącego, bądź też obu tych urządzeń równocześnie pełni osoba dokonująca pomiaru. Ze względu na ograniczone możliwości zarówno człowieka (np. ograniczona rozdzielczość wzroku), jak i detektora (luzy, tarcie, odkształcenia itp.) sprowadzenie różnicy $f(x) - g(w)$ dokładnie do zera nie jest możliwe. W praktyce czynność sprowadzania do zera zostaje zakończona w momencie, gdy $|f(x) - g(w)| \leq \Delta_D$, gdzie Δ_D oznacza tzw. **próg nieczułości detektora**, czyli najmniejszą wartość wytrącającą detektor ze stanu równowagi.

Do najczęściej stosowanych metod zerowych należą metoda zerowa kompensacyjna, metoda zerowa komparacyjna i metoda zerowa „przez podstawienie”.

W przypadku pomiaru metodą **zerową kompensacyjną** obie wielkości, mierzona x i wzorcowa w , oddziałują na detektor jednocześnie i przeciwnie. W efekcie następuje kompensacja tego oddziaływania (i stąd nazwa metody). Pomiar sprowadza się do regulacji wartości wzorcowej w , tak aby detektor osiągnął stan równowagi. Ma to miejsce, gdy $|x - w| \leq \Delta_D$.

Jako przykład pomiaru metodą zerową kompensacyjną może służyć pomiar masy na wadze szalkowej (p. rys. obok). W trakcie tego pomiaru na belkę poziomą „1” wagi działa siła ciężkości obiektu mierzzonego, która stara się obrócić belkę w lewo. Przeciwdziała temu siła ciężkości odważników, która stara się obrócić belkę w stronę przeciwną. Funkcję detektora pełni wskazówka „2”, a funkcję urządzenia równoważącego – osoba dokonująca pomiaru.



Rys. 9. Przykład pomiaru metodą zerową kompensacyjną

Wynik pomiaru przeprowadzonego metodą zerową kompensacyjną określają zależności:

$$x_{z,p} = w - \Delta_m w \quad (2.29a)$$

$$\Delta_u x = \sqrt{(\Delta_u w)^2 + (\Delta_D)^2} \quad (2.29b)$$

gdzie:

$x_{z,p}$ i $\Delta_u x$ – jak w przypadku poprzednich metod;

w – nominalna wartość wzorca, przy którym osiągnięty został stan równowagi;

$\Delta_m w$ – szacowana wartość średnia błędu wskazania tego wzorca;

$\Delta_u w$ – niepewność wzorca;

Δ_D – próg nieczułości detektora.

W metodzie **zerowej komparacyjnej** wielkość mierzona x jest porównywana z wielkością w^* , będącą efektem wcześniejszego przetworzenia wielkości wzorcowej w . Przetworzenie wielkości wzorcowej zachodzi zgodnie z zależnością $w^* = k \cdot w$, gdzie k oznacza współczynnik wzmocnienia („przełożenie”) członu przetwarzającego. W metodzie tej osiągnięcie stanu równowagi detektora, który ma miejsce gdy $|x - k \cdot w| \leq \Delta_D$, jest możliwe zarówno poprzez zmiany wartości wielkości wzorcowej w , jak i poprzez zmiany wartości współczynnika k . Idea i praktyczne znaczenie metody sprowadza się do tego, że w zamian za zastosowanie najczęściej prostego urządzenia, pozwalającego na uzyskiwanie różnych wartości k , można znacznie ograniczyć ilość odtwarzanych wartości wzorcowych. W szczególności może to być nawet jedna wartość.

Po osiągnięciu stanu równowagi, dla którego $lx - k \cdot wl \leq \Delta_D$, spełniające ten warunek wartości k i w stanowią podstawę opracowania wyniku pomiaru. Obowiązują zależności:

$$\begin{cases} x_{z,p} = (w_n - \Delta_m w) \cdot (k - \Delta_m k) & (2.30a) \\ \Delta_u x = \sqrt{(w \cdot \Delta_u k)^2 + (k \cdot \Delta_u w)^2 + (\Delta_D)^2} & (2.30b) \end{cases}$$

gdzie:

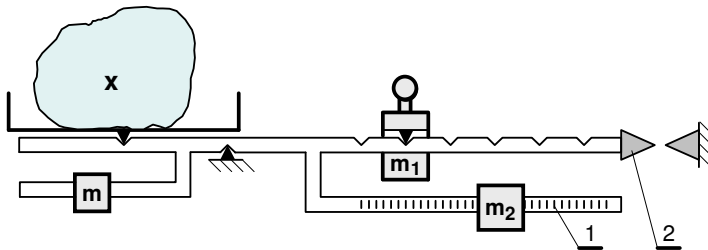
k – nominalna wartość współczynnika wzmocnienia;

$\Delta_m k$ – szacowana wartość średnia błędu współczynnika wzmocnienia;

$\Delta_u k$ – niepewność oszacowania wartości średniej błędu współczynnika wzmocnienia;

pozostałe oznaczenia są identyczne jak przy metodzie zerowej kompensacyjnej.

Jako przykład przyrządu pomiarowego działającego zgodnie z metodą zerową komparacyjną może służyć dźwigniowa waga kuchenna, której schemat zamieszczono na rys. 10. Pomiar na tej wadze sprowadza się do zrównoważenia momentu siły pochodzącego od ciężaru mierzonego obiektu przez moment pochodzący od ciężaru odważników o masach wzorcowych m_1 i m_2 . Wartość tego momentu można regulować poprzez przesuwanie odważników po odpowiednich prowadnicach. Odważnik o masie m_1 przemieszcza się skokowo, a najmniejsza różnica jego położenia jest równoważna zmianie wartości wielkości mierzonej o 500 g. Odważnik o masie m_2 może być przesuwany w sposób ciągły. Maksymalna różnica jego położenia odpowiada zmianie wartości wielkości mierzonej również o 500 g. Interpolację wewnątrz przedziału możliwych położenia i odpowiadającego mu zakresu $0 \div 500$ g umożliwia podziałka kreskowa 1. Zrównoważenie obu momentów sygnalizuje odpowiednie położenie wskaźnika 2. Masa m służy do tarowania (równoważenia) wagi przed pomiarem.



Rys. 10. Schemat przyrządu pomiarowego działającego zgodnie z metodą zerową komparacyjną

W metodzie **zerowej „przez podstawienie”** wielkość mierzoną x porównuje się z wielkością wzorcową w nie bezpośrednio, lecz po uprzednim ich przetworzeniu. W trakcie pomiaru najpierw przetworzona zostaje wielkość mierzona. Wynik tego przetworzenia – $f(x)$, zostaje zapamiętany przez detektor. Następnie, w identyczny

sposób, przetwarza się arbitralnie dobraną wartość wielkości wzorcowej, a wynik tego przetworzenia – $f(w)$ również trafia do detektora. Detektor porównuje obie przetworzone wartości i jeżeli $|f(x) - f(w)| > \Delta_D$ sygnalizuje brak równowagi. Równoważenia przyrządu dokonuje się poprzez odpowiednie zmiany wartości wielkości wzorcowej. Po osiągnięciu stanu równowagi, dla którego $|f(x) - f(w)| \leq \Delta_D$, spełniająca ten warunek wartość w stanowi podstawę opracowania wyniku pomiaru.

W odróżnieniu od przedstawionych wcześniej metod zerowych, w metodzie zerowej „przez podstawienie” obie porównywane wielkości $f(x)$ i $f(w)$ nie oddziałują na detektor jednocześnie. W czasie równoważenia przyrządu charakterystyka przetwornika P_x może pod wpływem zakłóceń zewnętrznych ulec pewnym zmianom. Powstały z tego powodu błąd określa się mianem **błędu niestałości przetwarzania**.

Należy zwrócić uwagę, że wartości błędu niestałości przetwarzania oraz błędu detekcji określa się dla wartości przetworzonych. Aby dokonać konwersji błędu wielkości przetworzonej na błąd wielkości mierzonej, należy przemnożyć go przez pochodną funkcji odwrotnej do funkcji przetwarzania.

Wynik pomiaru przeprowadzonego metodą zerową przez podstawienie określają zależności:

$$\begin{cases} x_{z,p} = w_n - \Delta_m w \\ \Delta_u x = \sqrt{(\phi'_{(y)} \cdot \Delta_D)^2 + (\phi'_{(y)} \cdot \Delta_n)^2 + (\Delta_u w)^2} \end{cases} \quad \begin{matrix} (2.31a) \\ (2.31b) \end{matrix}$$

gdzie:

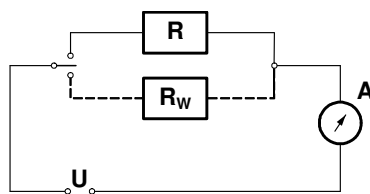
$\phi_{(y)}$ – funkcja odwrotna względem funkcji przetwarzania $y = f(x)$;

$\phi'_{(y)}$ – pochodna (różniczka) funkcji $\phi_{(y)}$;

Δ_n – błąd niestałości przetwarzania;

pozostałe oznaczenia identyczne jak w przypadku poprzednich metod.

Jako przykład metody zerowej „przez podstawienie” może służyć metoda pomiaru rezystancji oporników, której zasadę przedstawiono na rys. 11. W celu wyznaczenia rezystancji r_x mierzonego opornika R podłącza się go do obwodu i odczytuje wartość i_x prądu wskazywaną przez znajdujący się w obwodzie amperomierz A . Następnie wyłącza się mierzony opornik i w jego miejsce podłącza wzorcowy opornik dekadowy R_w . Na oporniku tym ustawia się taką wartość rezystancji r_w , aby uzyskać wskazanie i_w amperomierza identyczne jak poprzednio, czyli ujmując rzecz dokładniej, by różnica pomiędzy i_x oraz i_w była pomijalnie mała. Z równości prądów wynika wniosek o równości rezystancji.



Rys. 11. Przykład pomiaru metodą zerową „przez podstawienie”

W podanym wyżej przykładzie wielkością mierzoną jest rezystancja, wielkością przetworzoną natężenie prądu, równanie przetwarzania ma postać $\mathbf{I} = \mathbf{U} / \mathbf{R}$, funkcja odwrotna $\mathbf{R} = \mathbf{U} / \mathbf{I}$, jej pochodna $\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{I}} = -\frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}^2}$. Niestalość przetwarzania mogą powodować wahania napięcia ($\Delta \mathbf{U}$), a błąd z tego powodu wynikający $\Delta_n \mathbf{I} = \Delta \mathbf{U} / \mathbf{R}$.

Porównując ze sobą przedstawione wyżej odmiany metod pomiarowych bezpośrednich, można stwierdzić, że najłatwiejsza w realizacji jest metoda wychyłowa, następnie metoda różnicowa, a na końcu metody zerowe. Natomiast jeśli chodzi o dokładność pomiaru, to kolejność ww. metod jest dokładnie odwrotna.

Metody pomiarowe pośrednie charakteryzują się tym, że wartość wielkości mierzonej wyznacza się na podstawie bezpośrednich pomiarów innych wielkości związanych z wielkością mierzoną znaną zależnością. Zależność ta bywa nazywana **równaniem definicyjnym pomiaru**.

Jeżeli wielkość $\mathbf{x}$ jest związana z wielkościami $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \dots$ zależnością:

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \dots)$$

to pomiar metodą pośrednią polegać będzie na uprzednim pomiarze wartości wielkości $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \dots$ i obliczeniu na podstawie równania definicyjnego wartości wielkości $\mathbf{x}$.

Wynik pomiaru przeprowadzonego metodą pośrednią określają zależności:

$$\begin{cases} x_{z,p} = f(a_{z,p}, b_{z,p}, \dots) & (2.32a) \\ \Delta_u x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial a} \Delta_u a\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b} \Delta_u b\right)^2 + \dots} & (2.32b) \end{cases}$$

gdzie:

$x_{z,p}$ – wartość zaobserwowana poprawna wielkości mierzonej metodą pośrednią;

$a_{z,p}, b_{z,p}, \dots$ – wartości zaobserwowane poprawne wielkości określających wielkość mierzoną, które zostały ustalone na drodze uprzednich pomiarów;

$\Delta_u x$ – niepewność pomiaru pośredniego;

$\Delta_u a, \Delta_u b, \dots$ – niepewności pomiaru wielkości określających wielkość mierzoną;

$\left| \frac{\partial x}{\partial a} \Delta_u a \right|, \left| \frac{\partial x}{\partial b} \Delta_u b \right|, \dots$ – niepewności cząstkowe, tj. składowe niepewności pomiaru wielkości x wynikające z niepewności pomiarów wielkości $a, b, \dots$.

Jako przykłady pomiaru metodą pośrednią mogą służyć:

- a) pomiar średniej prędkości pojazdu poprzez bezpośrednie pomiary drogi i czasu, w jakim droga ta została przez pojazd przebyta;
- b) pomiar gęstości ciała na podstawie uprzednich pomiarów jego masy i objętości;
- c) pomiar oporu właściwego przewodnika poprzez uprzednie pomiary jego oporu elektrycznego i wymiarów geometrycznych (długość, pole przekroju).

Więcej informacji na temat metod pomiarowych i opracowywania wyników pomiarów dokonanych tymi metodami znaleźć można w [L37].

2.7. POMIARY WIELOKROTNE

Pomiary wielokrotne polegają na powtarzaniu operacji pomiarowych w stosunku do tej samej wielkości mierzonej. Ze względu na zakłócenia oddziałujące na proces pomiaru wyniki poszczególnych powtórzeń mogą różnić się między sobą.

Pomiary wielokrotne pozwalają na:

- a) wyznaczenie wartości wielkości mierzonej z dokładnością większą niż miałyby to miejsce w przypadku stosowania takich samych pomiarów pojedynczych;
- b) określenie niepewności sumy wszystkich błędów cząstkowych o charakterze przypadkowym, co ułatwia ocenę zastosowanej metody i narzędzi pomiarowych pod kątem ich przydatności dla realizowanych celów;
- c) wykrycie ewentualnych wyników pomiaru obarczonych błędami grubymi, co pozwala na ich odrzucenie.

Podstawy teoretyczne i szereg aspektów praktycznych związanych z pomiarami wielokrotnymi można znaleźć w [L37]. W książce tej przedstawiono jedynie procedurę opracowania wyników pomiaru wielokrotnego.

Opracowanie wyniku pomiaru wielokrotnego można podzielić na trzy etapy. Są to:

- I. Analiza statystyczna uzyskanych wyników;
- II. Oszacowanie wartości błędu systematycznego;
- III. Ustalenie ostatecznej postaci wyniku pomiaru wielokrotnego.

Na etap I (analizę statystyczną uzyskanych wyników) składają się następujące działania:

- weryfikacja uzyskanych wyników pod kątem wystąpienia błędu grubego; wyniki istotnie różniące się od pozostałych należy poddać odpowiednim testom statystycznym (np. kryterium Chauvenet'a [L30, L37]) i w zależności od wyników tych testów odrzucić jako niewiarygodne lub uznać za możliwe do przyjęcia;

- obliczenie wartości średniej arytmetycznej $\bar{x}$ i średniego odchylenia kwadratowego s uzyskanych wyników (bez wyników, które odrzucono jako niewiarygodne);

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.33)$$

gdzie:

x_i – wartość zaobserwowana poprawna i -tego powtórzenia pomiaru;
 N – liczba wyników uznanych za wiarygodne;

- przyjęcie właściwego dla rozwiązywanego problemu poziomu ufności p (o ile cel, w jakim przeprowadzamy pomiary nie wymaga innej wartości, zaleca się przyjmowanie $p = 95\%$);
- obliczenie niepewności przypadkowej pojedynczego pomiaru:
 - jeżeli błąd przypadkowy posiada rozkład normalny o znanym odchyleniu standardowym σ :
 1. Obliczamy wartość $F_{(t)}$ dystrybucyjny rozkładu normalnego odpowiadającego przyjętemu poziomowi ufności. Obowiązuje zależność $F_{(t)} = (p + 1)/2$;
 2. Na podstawie tabeli rozkładu normalnego znajdujemy taką wartość zmiennej standaryzowanej t , dla której wartość dystrybucyjny jest równa wyżej policzonej;
 3. Obliczamy wartość niepewności przypadkowej pojedynczego pomiaru:

$$\Delta_u^p x = t \cdot \sigma \quad (2.34)$$

- jeżeli błąd przypadkowy posiada rozkład normalny o nieznanym odchyleniu standardowym σ :
 1. Obliczamy średnie odchylenie kwadratowe s uzyskanych wartości zaobserwowanych x_i . Obowiązuje druga z zależności (2.33);
 2. Dla przyjętego poziomu ufności p (i liczby wiarygodnych wyników N) określamy na podstawie tablic rozkładu Studenta odpowiadającą mu wartość graniczną t_g zmiennej t . Wartość ta winna spełniać warunek: $p_{(-t_g \leq t \leq t_g)} = p$
 3. Obliczamy wartość niepewności przypadkowej pojedynczego pomiaru:

$$\Delta_u^p x = t_g \cdot s \quad (2.35)$$

- obliczenie niepewności przypadkowej średniej arytmetycznej:

$$\Delta_u^p \bar{x} = \frac{\Delta_u^p x}{\sqrt{N}} \quad (2.36)$$

II etap opracowania wyniku – oszacowanie wartości błędu systematycznego wymaga przeprowadzenia szczegółowej analizy procesu pomiarowego. W ramach tej analizy należy zidentyfikować najbardziej istotne źródła błędów systematycznych.

Następnie szacuje się wartości błędów pochodzących z tych źródeł (błędów cząstkowych) i sprowadza je do postaci scentralizowanej:

$$\Delta_j^s x = \Delta_{m,j}^s x \pm \Delta_{u,j}^s x \quad (2.37)$$

gdzie:

$\Delta_j^s x$ – wartość błędu systematycznego pochodzącego z j-tego źródła;

$\Delta_{m,j}^s x$, $\Delta_{u,j}^s x$ – szacowana wartość średnia oraz niepewność oszacowania tej wartości dla błędu systematycznego pochodzącego z j-tego źródła.

W ostatnim kroku obliczamy wartość średnią i niepewność wypadkowego błędu systematycznego:

$$\Delta_m^s x = \sum_{j=1}^k (\Delta_{m,j}^s x) \quad \Delta_u^s x = \sqrt{\sum_{j=1}^k (\Delta_{u,j}^s x)^2} \quad (2.38)$$

gdzie k – ilość uwzględnionych w analizie źródeł błędów systematycznych.

W ostatnim, III etapie opracowania wyniku pomiaru wielokrotnego należy:

1. Obliczyć wartość zaobserwowaną poprawną:

$$x_{z,p} = \bar{x} - \Delta_m^s x \quad (2.39)$$

2. Obliczyć niepewność całkowitą średniej arytmetycznej, która jest jednocześnie niepewnością pomiaru wielokrotnego:

$$\Delta_u \bar{x} = \sqrt{(\Delta_u^s \bar{x})^2 + (\Delta_u^p \bar{x})^2} = \sqrt{(\Delta_u^s x)^2 + (\Delta_u^p \bar{x})^2} \quad (2.40)$$

3. Obliczoną wartość niepewności całkowitej zaokrąglić do pierwszej cyfry znaczącej, a jeżeli tą cyfrą jest jeden, to do dwóch cyfr znaczących. Do tego samego rzędu należy zaokrąglić wartość zaobserwowaną poprawną.

4. Zapisać wynik pomiaru w postaci:

$$x_r = x'_{z,p} \pm \Delta_u x' \quad \text{lub} \quad (x_{z,p} - \Delta_u x)' \leq x_r \leq (x_{z,p} + \Delta_u x)' \quad (2.41)$$

gdzie znacznik (') oznacza wartości zaokrąglone.

3. CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW OPISUJĄCYCH KSZTAŁTY ELEMENTÓW MATERIALNYCH

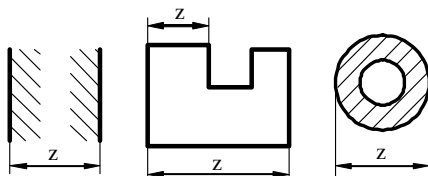
Do zbioru wielkości używanych do opisu kształtów elementów materialnych zalicza się najczęściej długość (wymiary liniowe), kąt (wymiary kątowe), odchyłki kształtu i położenia oraz chropowatość i falistość powierzchni.

3.1. WYMIARY LINIOWE – RODZAJE I PARAMETRY

Długością nazywamy wzajemną odległość dwóch elementów geometrycznych, przy czym termin "element geometryczny" oznaczać może punkt, linię, płaszczyznę, profil lub powierzchnię mierzonego przedmiotu.

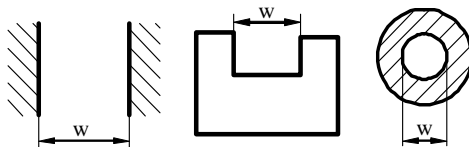
Do określania wartości długości używa się pojęcia **wymiar liniowy**. Pojęcie to, w zależności od kontekstu, w jakim zostało użyte, należy rozumieć jako jedno lub wieloelementowy zbiór wartości długości. Pojęcie „wymiar liniowy”, a o ile nie budzi to nieporozumień po prostu „wymiar”, bywa używane w bardzo wielu różnych znaczeniach. Inaczej mówiąc, w praktyce mamy do czynienia z wieloma rodzajami wymiarów. I tak np. w zależności od wzajemnego usytuowania wymiaru i określających go elementów geometrycznych wymiary dzieli się na zewnętrzne, wewnętrzne, mieszane i pośrednie.

Wymiarem zewnętrznym nazywamy odległość elementów powierzchni, między którymi bezpośrednio ich otoczenie wypełnione jest materiałem (wymiar obejmuje elementy).



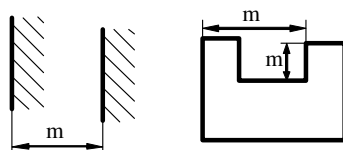
Rys. 12. Wymiar zewnętrzny

Wymiarem wewnętrznym nazywamy odległość elementów powierzchni, na zewnątrz których bezpośrednio ich otoczenie wypełnione jest materiałem (elementy obejmują wymiar).



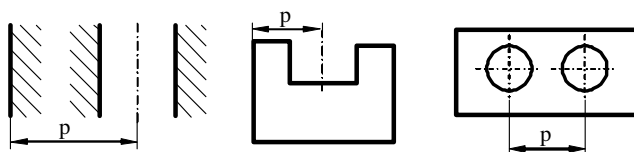
Rys. 13. Wymiar wewnętrzny

Wymiarem mieszanym nazywamy odległość elementów powierzchni, między którymi bezpośrednio otoczenie jednego z nich wypełnione jest materiałem, a bezpośrednio otoczenie drugiego wypełnione jest materiałem na zewnątrz.



Rys. 14. Wymiar mieszany

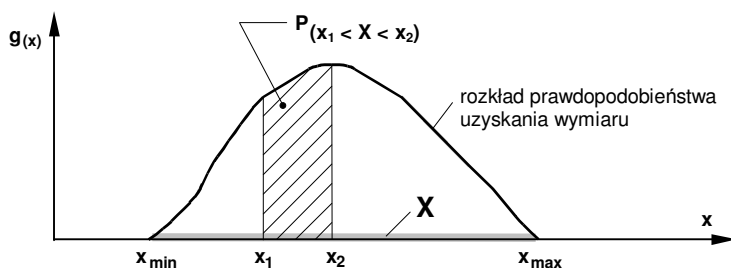
Wymiarem pośrednim nazywamy odległość elementów, z których co najmniej jeden jest elementem teoretycznym (oś lub płaszczyzna symetrii).



Rys. 15. Wymiar pośredni

Innym podziałem wymiarów jest podział na wymiary rzeczywiste i wymiary wymagane.

Wymiarem rzeczywistym nazywamy wymiar, który jest realnie istniejącym lub teoretycznie możliwym wynikiem procesu wytwarzania. Ponieważ na proces wytwarzania oddziałuje wiele różnych, przeważnie wzajemnie niezależnych zakłóceń, więc właściwości poszczególnych egzemplarzy wyrobu, w tym ich wymiary, różnią się pomiędzy sobą, a występujące różnice mają najczęściej charakter przypadkowy. Z tego względu wymiar rzeczywisty można traktować jako zmienną losową ciągłą. Do charakteryzowania zmiennych losowych ciągłych wykorzystuje się funkcję gęstości prawdopodobieństwa. Przykład takiej funkcji pokazano na rys. 16. Parametry funkcji gęstości opisujących powstające wymiary zależą od parametrów procesu wytwarzania i mogą wraz z nimi ulegać zmianom w czasie.

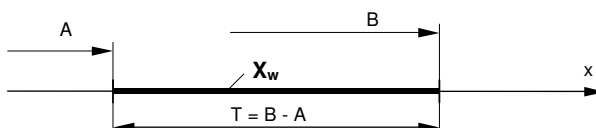


Rys. 16. Wymiar rzeczywisty jako zmienna losowa X (zakreskowane pole przedstawia prawdopodobieństwo zdarzenia, że wymiar będzie miał wartość zawartą w przedziale $x_1 \div x_2$)

Zasady funkcjonowania różnych konstrukcji, a także dość powszechnie stosowana zasada zamienności części nie pozwalają, aby wymiary rzeczywiste poszczególnych egzemplarzy wyrobu osiągały dowolne wartości. Dlatego dla każdego wymiaru rzeczywistego określony zostaje pewien zbiór wartości dopuszczalnych i tylko wyroby, których wymiary mieszczą się w zbiorze wartości dopuszczalnych, są uważane za wykonane poprawnie.

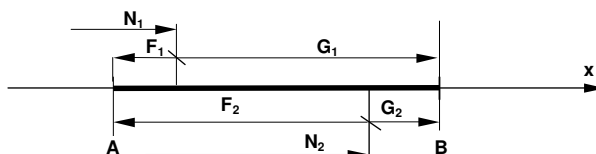
Zbiór wartości dopuszczalnych dla wymiaru rzeczywistego X będziemy nazywać **wymiarem wymaganym** i oznaczać symbolem X_w .

W odróżnieniu od wymiaru rzeczywistego, który ma charakter zmiennej losowej, wymiar wymagany jest zbiorem wartości określonym wartościami granicznymi – dolną A i górną B . Różnica tych wartości $B - A = T$ nosi nazwę tolerancji wymiaru wymaganego. Na osi liczbowej (rys. 17) wymiar wymagany przyjmuje postać odcinka AB . Długość tego odcinka odpowiada wartości tolerancji.



Rys. 17. Wymiar wymagany (zbiór wartości dopuszczalnych)

Zamiast wartości granicznych A i B do określenia wymiaru wymaganego używa się częściej trzech parametrów: wartości nominalnej N , odchyłki dolnej F i odchyłki górnej G .



Rys. 18. Różne sposoby określenia tego samego wymiaru wymaganego

Przy pomocy wartości nominalnej i odchyłek granicznych ten sam wymiar wymagany można określić na wiele różnych sposobów, przy czym:

$$N_1 + F_1 = N_2 + F_2 = \dots = N_i + F_i = A \quad \text{oraz} \quad (3.1a)$$

$$N_1 + G_1 = N_2 + G_2 = \dots = N_i + G_i = B \quad (3.1b)$$

Z powyższych równań wynika, że tolerancja wymiaru wymaganego

$$T = B - A = (N + G) - (N + F) = G - F \quad (3.2)$$

jest równa różnicy jego odchyłek granicznych.

Wymiary wymagane zostały znormalizowane. Normalizacji poddano zarówno tolerancje wymiarów wymaganych, jak i ich odchyłki graniczne. Szczegółowe informacje na ten temat zawierają normy:

PN – EN ISO 286-1:2011 „Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Układ kodowania ISO tolerancji wymiarów liniowych. Część 1: Podstawy tolerancji, odchyłek i pasowań”;

PN – EN ISO 286-2:2010 „Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). System kodowania ISO dla tolerancji wymiarów liniowych. Część 2: Tablice klas tolerancji normalnych oraz odchyłek granicznych otworów i wałków”.

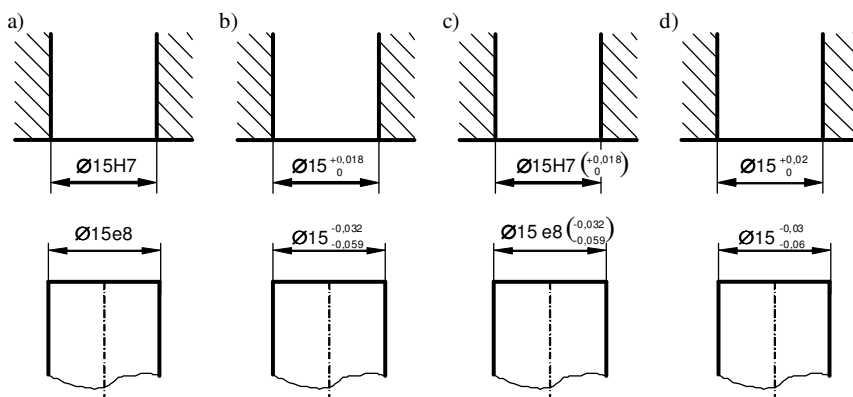
Ze względu na sposób zapisu wymiary wymagane można podzielić na:

- ♦ wymiary z indywidualnymi tolerancjami;
- ♦ wymiary bez indywidualnych tolerancji.

W grupie wymiarów posiadających indywidualne tolerancje wyróżnia się:

- wymiary tolerowane normalnie (czyli zgodnie z ww. normami), przy czym istnieją trzy odmiany tego tolerowania:
 - tolerowanie symbolowe (pokazane na rys. 19a);
 - tolerowanie liczbowe (pokazane na rys. 19b);
 - tolerowanie mieszane (pokazane na rys. 19c);
- wymiary tolerowane swobodnie.

Wymiary tolerowane swobodnie to wymiary, w których wartości odchyłek granicznych dobierane są wg uznania konstruktora (czy technologa). Jest to zawsze tolerowanie liczbowe (rys. 19d). Przy tolerowaniu swobodnym zaleca się stosowanie zasady „w głąb materiału”, czyli aby wymiar nominalny był równy temu z wymiarów granicznych, przy którym ilość materiału jest większa.



Rys. 19. Przykłady tolerowania: a) tolerowanie normalne symbolowe; b) tolerowanie normalne liczbowe; c) tolerowanie normalne mieszane; d) tolerowanie swobodne

W przypadku wymiarów bez indywidualnych tolerancji na rysunku podaje się tylko ich wartości nominalne. Z tego względu nazywane są one często „wymiarami nietolerowanymi”. Nazwa ta jest wysoce niefortunna, sugeruje bowiem, że wymiary te nie mają tolerancji, co jest oczywiście nieprawdą.

Dla wymiarów i odchyłek geometrycznych, dla których nie zaznaczono na rysunku tolerancji indywidualnych mają zastosowanie tzw. tolerancje ogólne. Wartości tych tolerancji odpowiadają tzw. dokładności warsztatowej, tj. dokładności charakterystycznej dla danego zakładu i wynikającej z rodzaju i stanu wykorzystywanych w tym zakładzie obrabiarek, stosowanej technologii, oprzyrządowaniu, narzędziom itp.

Tolerancje ogólne zostały znormalizowane, a zasady ich stosowania określają normy:

PN-EN 22 768-1:1999 „Tolerancje ogólne. Tolerancje wymiarów liniowych i kątowych bez indywidualnych oznaczeń tolerancji”;

PN-EN 22 768-2:1999 „Tolerancje ogólne. Tolerancje geometryczne elementów bez indywidualnych oznaczeń tolerancji”;

Zgodnie z normą PN-EN 22 768-1:99 wymiary liniowe bez indywidualnych tolerancji mogą być wykonywane w czterech klasach:

- dokładnej – oznaczenie **f** (od angielskiego *fine*);
- średniodokładnej – oznaczenie **m** (od angielskiego *medium*);
- zgrubnej – oznaczenie **c** (od angielskiego *coarse*);
- bardzo zgrubnej – oznaczenie **v** (od angielskiego *very coarse*).

Wartości tolerancji odpowiadających poszczególnym klasom dokładności zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości tolerancji ogólnych wg PN-EN 22 768-1:1999						
Klasa tolerancji	Przedział wymiarów liniowych, mm					
	0,5 do 3	ponad 3 do 6	ponad 6 do 30	ponad 30 do 120	ponad 120 do 400	ponad 400 do 1000
f	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6
m	0,2	0,2	0,4	0,6	1,0	1,6
c	0,4	0,6	1,0	1,6	2,4	4
v	-	1,0	2,0	3	5	8

Ogólną zasadą jest, że podane wyżej tolerancje rozmieszczone są symetrycznie względem wymiaru nominalnego (przykładowo dla tolerancji $T = 0,4$ mm odchyłki graniczne będą wynosić odpowiednio $-0,2$ mm i $+0,2$ mm). Jeżeli chcemy od tej zasady odstąpić, na rysunku należy zamieścić stosowną uwagę (np.: tolerancje ogólne: wymiary wewnętrzne tolerować zgodnie z zasadą „w głąb materiału”).

Zgodnie z normą PN-EN 22 768-2:99 odchyłki geometryczne nieposiadające indywidualnych tolerancji mogą być wykonywane w trzech klasach:

- dokładnej – oznaczenie **H**;
- średniodokładnej – oznaczenie **K**;
- zgrubnej – oznaczenie **L**.

Tolerancje ogólne geometryczne dotyczą wszystkich rodzajów odchyłek za wyjątkiem odchyłki walcowości, odchyłki kształtu zarysu lub powierzchni, odchyłki nachylenia, odchyłki współosiowości, odchyłki pozycji i bicia całkowitego.

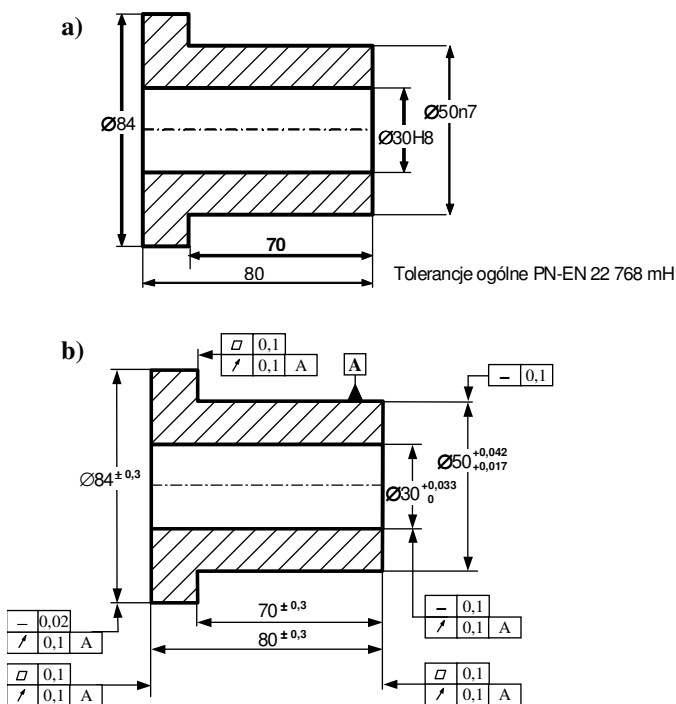
Wartości tolerancji ogólnych dla wybranych odchyłek geometrycznych:

Tabela 4. Tolerancje ogólne prostoliniowości i płaskości					
Klasa tolerancji	Wartość odniesienia: dla prostoliniowości – długość linii, dla płaskości – długość dłuższego boku lub średnica okręgu [mm]				
	do 10	pow. 10 do 30	pow. 30 do 100	pow. 100 do 300	pow. 300 do 1000
H	0,02	0,05	0,1	0,2	0,4
K	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8
L	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6

Tabela 5. Tolerancje ogólne bicia promieniowego i osiowego	
Klasa tolerancji	Wartości tolerancji [mm]
H	0,1
K	0,2
L	0,5

Tabela 6. Tolerancje ogólne prostopadłości [mm]				
Klasa tolerancji	Wartość odniesienia: długość nominalna krótszego ramienia kąta prostego [mm]			
	do 100	pow. 100 do 300	pow. 300 do 1000	pow. 1000 do 3000
H	0,2	0,3	0,4	0,5
K	0,4	0,6	0,8	1,0
L	0,6	1,0	1,5	2,0

Uwzględniając wymagania obu arkuszy normy PN-EN 22 768, wymiarowanie pokazane na rys. 20a należy interpretować w sposób pokazany na rys. 20b.

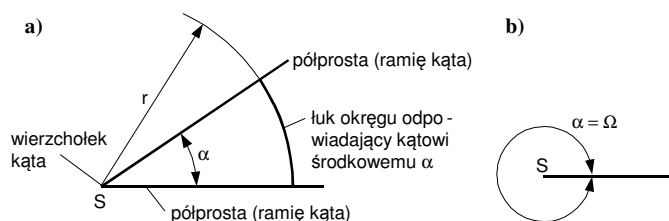


Rys. 20. Interpretacja wymagań w przypadku wystąpienia tolerancji ogólnych

3.2. WYMIARY KĄTOWE

Kątem, w najbardziej ogólnym rozumieniu tego słowa, nazywa się odpowiednio ograniczoną część przestrzeni lub płaszczyzny. W zależności od sposobu tego ograniczenia kąty można podzielić na płaskie, dwuścienne i bryłowe. Przedmiotem dalszych rozważań będą wyłącznie kąty płaskie.

Kątem płaskim nazywa się część płaszczyzny ograniczoną parą półprostych o wspólnym początku. Półproste te nazywa się ramionami kąta, a ich wspólny punkt – wierzchołkiem kąta. Wartość liczbową kąta można określać stosunkiem $\alpha = L / r$, gdzie L – długość łuku okręgu o środku w wierzchołku kąta odpowiadająca kątowi środkowemu α , a r – promień tego okręgu. Wartość liczbową kąta można również określać poprzez porównanie go z kątem pełnym (tj kątem występującym w przypadku, gdy obie półproste pokrywają się – rys. 21b), przy czym kątowi pełnemu przypisuje się pewną liczbę umownych jednostek, np. 360 stopni kątowych lub 400 gradusów.



Rys. 21. Kąt płaski: a) elementy użyte w definicji; b) kąt płaski pełny

Do określania wartości kąta używa się pojęcia **wymiar kątowy**. Pojęcie to, w zależności od kontekstu, w jakim zostało użyte, należy rozumieć jako jedno lub wieloelementowy zbiór wartości kąta.

Wymiary kątowe mają cechy zbliżone do wymiarów liniowych. W szczególności zachowuje dla nich sens podział wymiarów na zewnętrzne, wewnętrzne, mieszane i pośrednie oraz podział na wymiary rzeczywiste i wymiary wymagane.

Podobnie jak to miało miejsce w przypadku wymiarów liniowych, wymiary wymagane kątowe zostały znormalizowane. Normalizacji poddano zarówno tolerancje wymiarów wymaganych, jak i ich odchyłki graniczne. Szczegółowe informacje na ten temat zawierają normy:

- PN-EN ISO 1119:2004** Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Szeregi kątów i zbieżności stożków;
- PN – 77 / M – 02136** Układ tolerancji kątów.

Ze względu na sposób zapisu wymiary kątowe, podobnie jak to było w przypadku wymiarów liniowych, można podzielić na wymiary mające tolerancje indywidualne i wymiary mające tolerancje ogólne. Wartości tych ostatnich zostały określone w przywoływanej już normie **PN-EN 22 768-1:1999** „Tolerancje ogólne. Tolerancje wymiarów liniowych i kątowych bez indywidualnych oznaczeń tolerancji”. Zestawiono je w tabeli 7.

Tabela 7. Tolerancje ogólne wymiarów kątowych wg PN-EN 22 768-1:1999					
Klasa tolerancji	Długości krótszego ramienia kąta [mm]				
	do 10	ponad 10 do 50	ponad 50 do 120	ponad 120 do 400	ponad 400
f	$\pm 1^\circ$	$\pm 30'$	$\pm 20'$	$\pm 10'$	$\pm 5'$
m					
c	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 1^\circ$	$\pm 30'$	$\pm 15'$	$\pm 10'$
v	$\pm 3^\circ$	$\pm 2^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 30'$	$\pm 20'$

3.3. ODCHYLEKI KSZTAŁTU I POŁOŻENIA

Tematyce odchyłek kształtu i położenia poświęcone są następujące normy:

PN-EN ISO 1101:2006	Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Tolerancje geometryczne – Tolerancje kształtu, kierunku, położenia i bicia;
PN-EN ISO 2692:2008	Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Tolerancje geometryczne – Wymaganie maksimum materiału (MMR), wymaganie minimum materiału (LMR),;
PN-EN ISO 12180:2011	Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Walcowość;
PN-EN ISO 12181:2011	Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Okrągłość;
PN-EN ISO 12780:2011	Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Prostoliniowość;
PN-EN ISO 12781:2011	Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Płaskość.

Tolerancje odchyłek kształtu i położenia, podobnie jak tolerancje wymiarów, mogą mieć charakter indywidualny lub ogólny. W pierwszym przypadku ich wartości są każdorazowo nanoszone na rysunkach, w drugim określa się je na podstawie normy **PN-EN 22 768-2:1999** „Tolerancje ogólne. Tolerancje geometryczne elementów bez indywidualnych oznaczeń tolerancji”. Aby to jednak można było uczynić, rysunek musi zawierać odwołanie do ww. normy oraz informację, którą klasę dokładności warsztatowej należy brać pod uwagę.

3.4. PARAMETRY OPISUJĄCE STRUKTURĘ GEOMETRYCZNĄ POWIERZCHNI

Modele struktury geometrycznej powierzchni, a w szczególności definicje i opisy parametrów pozwalających na ilościowe określenie tej struktury, zawierają niżej wymienione normy:

PN-EN ISO 4287:1999	Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni;
PN-EN ISO 4287:1999/ /A1:2010	Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni;
PN-87/M-04251	Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Wartości liczbowe parametrów;
PN-74/M-04255	Struktura geometryczna powierzchni. Falistość powierzchni. Określenia podstawowe i parametry.

4. PRZEGLĄD UNIWERSALNEGO SPRZĘTU DO POMIARÓW WIELKOŚCI GEOMETRYCZNYCH

Środki pomiarowe stosowane w dziedzinie metrologii wielkości geometrycznych dzielą się, podobnie jak to ma miejsce w przedstawionym w rozdz. 2.5.1 przypadku ogólnym, na dwie podstawowe grupy, tj. narzędzia pomiarowe i pomocnicze urządzenia pomiarowe (przybory pomiarowe). W grupie narzędzi pomiarowych wyróżnia się etalony, użytkowe narzędzia pomiarowe i pomocnicze narzędzia pomiarowe. W niniejszym rozdziale ograniczono się w zasadzie do przedstawienia podstawowych informacji dotyczących najczęściej stosowanych grup użytkowych narzędzi pomiarowych przeznaczonych do pomiarów długości i kąta.

Jak już wspomniano w rozdz. 2.5.1, narzędzia pomiarowe użytkowe składają się w głównej mierze z wzorców i przyrządów pomiarowych. Metrologia wielkości geometrycznych zajmuje się wzorcami długości, kąta, prostoliniowości, płaskości i chropowatości powierzchni oraz wzorcami zarysów. Jeśli chodzi o przyrządy, to do pomiarów wielkości geometrycznych wykorzystuje się bardzo wiele różnych przyrządów pomiarowych. Dokładna ich klasyfikacja ze względu na brak uniwersalnego kryterium jest raczej niemożliwa. Dlatego w niniejszym opracowaniu ograniczono się do przedstawienia wybranych, najbardziej typowych grup narzędzi pomiarowych. Zostaną one przedstawione w kolejnych podrozdziałach.

4.1. WZORCE DŁUGOŚCI

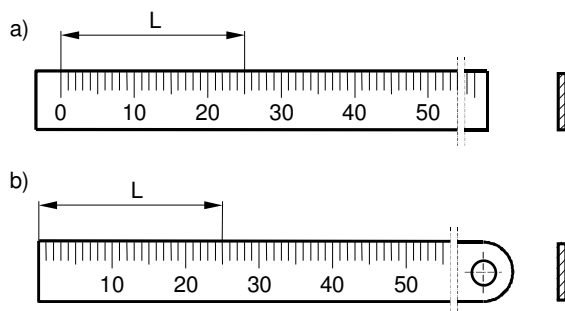
Wzorce długości są to ciała lub zjawiska fizyczne odtwarzające w sposób praktycznie niezmienny jedną lub kilka miar długości. Ze względu na sposób odtwarzania miary można podzielić je na końcowe, kreskowe i falowe.

Wzorce końcowe są wzorcami jednomiarowymi. Mają postać brył materialnych, które żadaną wartość długości odtwarzają odległością dwóch równoległych płaszczyzn, dwóch tworzących, względnie odległością dwóch punktów. Wyróżnia się wśród nich:

- płytki wzorcowe;
- szczelinomierze;
- wałeczki pomiarowe;
- kulki pomiarowe;
- wzorce nastawcze.

Do wzorców końcowych zaliczyć można by również niektóre sprawdziany i przeciwspawdziany, jednak w zdecydowanej większości opracowań traktowane są one jako oddzielna grupa narzędzi pomiarowych.

Wzorce kreskowe odtwarzają wartości długości wzajemnymi odległościami kres naniesionych na płaskiej powierzchni wzorca (rys. 22a) lub też odległościami kres od krawędzi wzorca (rys. 22b). W tym drugim przypadku określa się je mianem wzorców końcowo-kreskowych. Wzorce kreskowe są prawie zawsze wzorcami wielomiarowymi. Należą do nich różnego rodzaju przymiary (sztywne, półsztywne, wstępowe, składane) oraz wzorce stanowiące integralne części przyrządów pomiarowych, bądź też elementy wyposażenia tych przyrządów.



Rys. 22. Wzorce długości: a) kreskowy; b) końcowo-kreskowy

Wzorce falowe odtwarzają wartości długości poprzez pewne wielokrotności długości fal promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez pewne pierwiastki w określonych warunkach. Najczęściej wykorzystywane jest promieniowanie takich pierwiastków, jak krypton 86, rtęć 198, kadm 114 oraz promieniowanie laserów typu He-Ne. Do odtwarzania wartości długości tą metodą służą specjalne przyrządy zwane interferometrami.

Porównując dokładność poszczególnych rodzajów wzorców długości, należy stwierdzić, że najdokładniejsze są wzorce falowe, następnie – wzorce końcowe, a najmniej dokładne – wzorce kreskowe. Natomiast jeśli chodzi o łatwość odtwarzania, kolejność jest dokładnie odwrotna.

4.1.1. Płytki wzorcowe długości

Płytki wzorcowe, wprowadzone w 1896 r w szwedzkiej firmie C.E. Johansson, dokonały przełomu w dziedzinie dokładnych pomiarów długości. Do dziś, mimo upływu ponad stu lat i praktycznie niezminionej postaci, odgrywają nadal bardzo istotną rolę. Wysokie miejsce płytek wzorcowych w hierarchii wzorców długości wynika z posiadanych przez nie zalet, zarówno metrologicznych (duża dokładność odtwarzania, możliwość bezpośredniego porównania z wzorcami falowymi, łatwość posługiwania się), jak i ekonomicznych (stosunkowo niski koszt zakupu i eksploatacji).

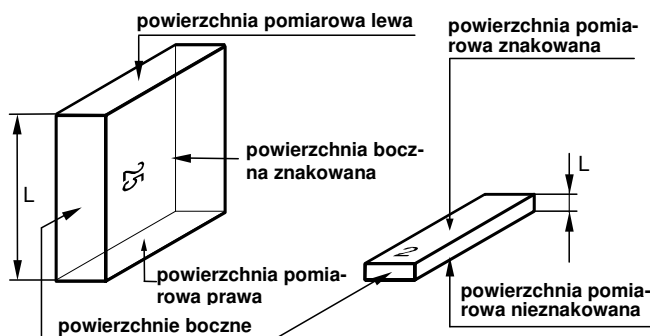
Płytki wzorcowe mają najczęściej kształt prostopadłościanów (rys. 23). Wartość długości odtwarzają dwie przeciwległe powierzchnie zwane powierzchniami pomiarowymi. Są one wykonane znacznie dokładniej niż pozostałe powierzchnie prostopadłościanu, zwane powierzchniami bocznymi. Dokładność wykonania powierzchni pomiarowych płytek wzorcowych jest tak wysoka, że posiadają one zdolność do adhezyjnego łączenia się z innymi, podobnie wykonanymi, powierzchniami płaskimi wynikającą z działania sił międzycząsteczkowych. Zdolność taką nazywamy przywieralnością. Dzięki przywieralności płytki wzorcowe można łączyć w zwarte stosy bez dodatkowego oprządkowania.

Wymagania odnośnie cech konstrukcyjnych i metrologicznych płytek wzorcowych, a także metod ich sprawdzania zawiera norma PN-EN ISO 3650. W szczególności w zakresie formułowania wymagań oraz oceny dokładności wykonania powierzchni pomiarowych płytek wzorcowych norma ta przewiduje następujące kryteria:

- odchyłka długości płytki;
- odchyłka płaskości powierzchni pomiarowej;
- zmienność długości płytki (odchyłka złożona równoległości i płaskości);
- przywieralność powierzchni pomiarowej.

Odchyłka długości płytki wzorcowej (oznaczenie f_L^{11}), jest to różnica pomiędzy rzeczywistą długością płytki i jej długością nominalną.

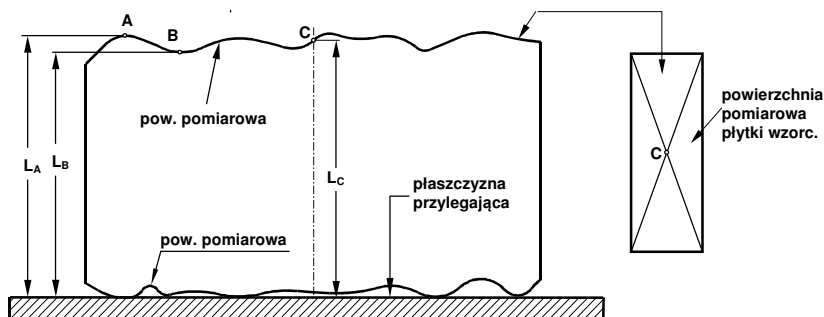
Nominalna długość płytki (oznaczenie L_n) to długość, którą płytka winna odtwarzać. W rzeczywistości jest to stanowiąca element odniesienia teoretyczna wartość, którą nanosi się na bocznej powierzchni płytki lub, w przypadku płytek mniejszych, w ściśle określonym miejscu powierzchni pomiarowej (rys. 23).



Rys. 23. Płytki wzorcowe długości

¹¹ Autor zdecydował się odejść od oznaczeń stosowanych w normie PN-EN ISO 3650, ponieważ uważa je, delikatnie mówiąc, za niedopracowane.

Rzeczywistą długość płytki określa wzajemna odległość jej powierzchni pomiarowych. Ze względu na błędy kształtu i położenia tych powierzchni jest ona w różnych miejscach płytki różna. Z tego powodu rzeczywistą długość płytki wiąże się zawsze z określonym punktem jej powierzchni pomiarowej (p. rys. 24).



Rys. 24. Długość płytki wzorcowej

Długość płytki w punkcie X jest to odległość tego punktu od powierzchni płaskiej, do której przywarta jest płytka swoją drugą powierzchnią pomiarową. Spośród wielu możliwych długości w normie wyróżniono jeden przypadek szczególny. Jest nią tzw. długość środkowa L_C płytki, tj. długość w punkcie C leżącym w środku powierzchni pomiarowej nieprzywartej.

Powiązanie rzeczywistej długości płytki z określonymi punktami jej powierzchni pomiarowej pociąga za sobą analogiczne przyporządkowanie odchyłek długości. Ujmuje to zależność:

$$f_{L,X} = L_X - L_n \quad (4.1)$$

gdzie:

$f_{L,X}$ – odchyłka długości płytki wzorcowej w punkcie X;

L_X – rzeczywista długość płytki w punkcie X;

L_n – nominalna długość płytki.

Wg PN-EN ISO 3650 rzeczywiste odchyłki długości płytki wzorcowej winny spełniać warunek:

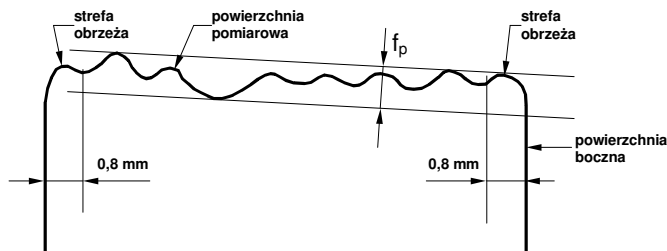
$$-F_L < f_{L,X} < F_L \quad (4.2)$$

gdzie

F_L – graniczna dopuszczalna wartość odchyłki długości.

Zależność (4.2), równoważna zależności $L_n - F_L < L_X < L_n + F_L$, oznacza, że długości płytek wzorcowych są tolerowane symetrycznie względem wymiaru nominalnego.

Odchyłka płaskości powierzchni pomiarowej płytki jest to odległość dwóch płaszczyzn równoległych tak usytuowanych, aby leżąc możliwie najbliżej siebie obejmowały wszystkie punkty tej powierzchni pomiarowej. Odchyłkę płaskości, którą oznaczamy symbolem f_p , pokazano na rys. 25.



Rys. 25. Odchyłka płaskości płytki wzorcowej

Odchyłka płaskości płytki winna spełniać warunek $f_p \leq F_p$, gdzie F_p oznacza graniczną dopuszczalną wartość odchyłki płaskości.

Zmienność długości płytki, którą oznaczamy symbolem f_v , jest to największa możliwa różnica pomiędzy długościami płytki w poszczególnych punktach jej powierzchni pomiarowej.

$$f_v = L_{X_{\max}} - L_{X_{\min}} \quad (4.3)$$

gdzie $X_{\max}$ oznacza punkt powierzchni pomiarowej, w którym długość płytki jest największa, a $X_{\min}$ punkt, w którym długość płytki jest najmniejsza.

Zmienność długości płytki wynika z błędów płaskości oraz błędów nierównoległości jej powierzchni pomiarowych. W poprzedniej edycji normy dotyczącej płytek wzorcowych parametr ten nazywano odchyłką złożoną równoległości i płaskości.

Zmienność długości winna spełniać warunek $f_v \leq F_v$, gdzie przez F_v oznaczono graniczną dopuszczalną wartość zmienności długości.

Graniczne dopuszczalne wartości odchyłek długości, zmienności długości oraz odchyłek płaskości zależą od klasy dokładności wykonania płytek oraz od odtwarzanych przez nie długości. Zestawiono je w tabelach 8 i 9.

PN-EN ISO 3650 przewiduje cztery klasy dokładności wykonania płytek wzorcowych oznaczone odpowiednio symbolami K, 0, 1 i 2. Klasa K dotyczy wyłącznie płytek przeznaczonych do sprawdzania i wzorcowania innych płytek wzorcowych. Charakteryzuje się bardzo wysokimi wymaganiami odnośnie kształtu (odchyłka płaskości, zmienność długości). Jeśli chodzi o pozostałe klasy to najdokładniejsza jest klasa 0, a najmniej dokładna klasa 2.

Tabela 8. Graniczne dopuszczalne wartości odchyłek długości F_L i zmienności długości F_v płytek wzorcowych długości $[\mu m]$									
L [mm]		K		0		1		2	
powyżej	do	F_L	F_v	F_L	F_v	F_L	F_v	F_L	F_v
0	10	0,2	0,05	0,12	0,10	0,2	0,16	0,45	0,3
10	25	0,3	0,05	0,14	0,10	0,3	0,16	0,6	0,3
25	50	0,4	0,06	0,20	0,10	0,4	0,18	0,8	0,3
50	75	0,5	0,06	0,25	0,12	0,5	0,18	1,0	0,35
75	100	0,6	0,07	0,30	0,12	0,6	0,20	1,2	0,35
100	150	0,8	0,08	0,4	0,14	0,8	0,20	1,6	0,4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
900	1000	4,2	0,25	2,00	0,40	4,2	0,60	8,0	1,0

Tabela 9. Graniczne dopuszczalne wartości odchyłek płaskości płytek wzorcowych					
L [mm]		F_p $[\mu m]$ dla klas dokładności:			
powyżej	do	K	0	1	2
0	150	0,05	0,10	0,15	0,25
150	500	0,10	0,15	0,18	
500	1000	0,15	0,18	0,20	

Wymagania określone w powyższych tabelach nie dotyczą tzw. strefy obrzeża, tj. punktów powierzchni pomiarowych płytki leżących w odległości mniejszej niż 0,8 mm od jej powierzchni bocznych (rys. 25). Punkty strefy obrzeża nie mogą wystawać poza płaszczyznę styczną do pozostałej części powierzchni pomiarowej.

Przy sprawdzaniu płytek cienkich ($L_n \leq 2,5$ mm) należy przywrzeć je do płytek pomocniczych o długości $L_n \geq 11$ mm w celu likwidacji ewentualnego wypaczenia.

Ostatnie z wcześniej wymienionych kryteriów – przywieralność powierzchni pomiarowych płytek, ocenia się na podstawie obserwacji interferencyjnych obrazów tych powierzchni uzyskanych przy oświetleniu światłem białym po przywarciu do nich płasko-równoległej płytki interferencyjnej (szklany wzorzec płaskości o odchyłce płaskości nieprzekraczającej 0,1 μm). Obraz powierzchni pomiarowej płytki powinien być pozbawiony prążków interferencyjnych oraz barwnych i jasnych plam. Tylko w przypadku płytek wzorcowych klas 1 i 2 dopuszcza się niewielkie jasne plamy lub szare odcienie.

Płytki wzorcowe wykonuje się z materiałów odpornych na ścieranie i korozję, charakteryzujących się dużą stabilnością wymiarową oraz umożliwiającymi uzyskanie powierzchni, które będą dobrze do siebie przywierać.

Najczęściej wykorzystywanym materiałem jest wysokogatunkowa stal stopowa o współczynniku rozszerzalności cieplnej $(11,5 \pm 1) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$. Wymaganą wysoką dokładność powierzchni pomiarowych płytek stalowych osiąga się poprzez ich szlifowanie i docieranie, natomiast wysoką twardość (min. 800 HV) i stabilność wymiarową zapewniają operacje hartowania, odpuszczania i sezonowania.

W ostatnim czasie coraz więcej płytek wykonuje się z materiału ceramicznego opartego na bazie tlenku cyrkonu (ZrO_2). Materiał ten w porównaniu ze stalą posiada cały szereg istotnych zalet. W szczególności jest bardziej odporny na ścieranie i uderzenia, niewrażliwy na korozję (odporny na działanie ługów, kwasów itp. substancji agresywnych), antystatyczny (nie przyciąga kurzów i pyłów) i antymagnetyczny (płytki mogą być stosowane w otoczeniu pola magnetycznego). Posiada zdecydowanie większą twardość (1350 HV) oraz nieco niższy współczynnik rozszerzalności cieplnej – $(9,5 \div 10) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$.

Jeszcze innym rodzajem materiału wykorzystywanym do wykonywania płytek wzorcowych są węgliki spiekane. Z węglików wykonuje się przede wszystkim tzw. płytki ochronne, tj. płytki przywierane na krańcach wielokrotnie używanych stosów płytek stalowych w celu ochrony pozostałych płytek stosu przed zużyciem. Twardość węglików spiekanych wynosi ok. 1650 HV, współczynnik rozszerzalności – $(5,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$.

Producenci płytek wzorcowych oferują je pojedynczo lub w kompletach. Kompletów można podzielić na uniwersalne i specjalne. W grupie kompletów uniwersalnych wyróżnia się komplety podstawowe i uzupełniające. Komplety podstawowe zawierają płytki umożliwiające budowę stosów o szerokim zakresie długości ($\sim 3 \text{ mm} \div \sim 200 \text{ mm}$) z właściwym dla danego kompletu stopniowaniem. Przykład takiego kompletu pokazano na rys. 26.



Rys. 26. Przykładowy komplet podstawowy produkcji szwajcarskiej firmy TESA

Komplety uzupełniające przeznaczone są głównie do wspomagania kompletów podstawowych i w zależności od swego składu mogą:

- umożliwiać drobniejsze stopniowanie długości budowanych stosów;
- rozszerzać zakresy pomiarowe kompletów podstawowych w stronę wartości małych ($L < 3 \text{ mm}$) lub dużych ($L > 200 \text{ mm}$);
- zwiększać trwałość płytek kompletów podstawowych.

Komplety specjalne przeznaczone są do ściśle określonych zadań metrologicznych i w zasadzie tylko do tych zadań się nadają. Przykładem kompletu tego typu może być komplet płytek wzorcowych do sprawdzania mikrometrów. Komplet ten zawiera 10 płytek o wymiarach 2,5/5,1/7,7/10,3/12,9/15,0/17,6/20,2/22,8/25,0 mm, czyli wartościach, w których zgodnie ze stosownymi przepisami metrologicznymi należy sprawdzać dokładność wskazań mikrometru. Dzięki temu skraca się czas (nie ma potrzeby budowy stosów) i zwiększa dokładność sprawdzania.

Komplety podstawowe płytek wzorcowych mogą różnić się ilością płytek wchodzących w skład kompletu, zestawem wartości nominalnych tych płytek, klasą dokładności ich wykonania oraz stopniowaniem długości budowanych z nich stosów. Bardziej szczegółowe informacje na ten temat zawiera tabela 10, w której jako przykłady służą komplety podstawowe płytek wzorcowych produkcji krajowej.

Tabela 10. Komplety podstawowe płytek wzorcowych produkcji krajowej					
Nazwa kompletu / oznacz.	Wymiar nominalny lub zakres wymiarów nominalnych	Stopniowanie wymiarów w zakresie	Ilość płytek w:		Klasy dokładności wykonania
			zakresie	komplecie	
Mały MLAa	1,005	-	1	47	0, 1 i 2
	1,01 - 1,09	0,01	9		
	1,1 - 1,9	0,1	9		
	1 - 24	1	24		
	25 - 100	25	4		
Średni MLAb	1,005	-	1	76	0, 1 i 2
	1,01 - 1,49	0,01	49		
	0,5 - 24,5	0,5	19		
	10 - 50	10	5		
	25, 100	-	2		
Duży MLAc	1,005	-	1	103	0, 1 i 2
	1,01 - 1,49	0,01	49		
	0,5 - 24,5	0,5	49		
	25 - 100	25	4		
Duży rozszerzony MLAr	1,0005	-	1	112	0 i 1
	1,001 - 1,009	0,001	9		
	1,01 - 1,49	0,01	49		
	0,5 - 24,5	0,5	49		
	25 - 100	25	4		

Porównując cechy techniczne i użytkowe kompletów podstawowych przedstawionych w tabeli 10, można stwierdzić, że:

- zakresy pomiarowe wszystkich czterech kompletów są zbliżone;
- stopniowanie wartości długości odtwarzanej przez stopy budowane z płytek kompletów małego, średniego i dużego jest jednakowe i wynosi 5 μm . Wyjątek stanowi komplet duży rozszerzony, z którego można budować stopy stopniowane co 0.5 μm ;
- stopy budowane z kompletów większych składają się najczęściej z mniejszej liczby płytek niż stopy budowane z kompletów mniejszych;
- kompletem większym może posługiwać się równocześnie więcej osób, ponieważ prawdopodobieństwo jednoczesnego zapotrzebowania na tę samą płytkę jest przy nich mniejsze;
- w przypadku kompletu większego określony wymiar stopy można uzyskać na więcej różnych sposobów niż w przypadku kompletu małego. Wiąże się z tym bardziej równomierne zużycie płytek i w konsekwencji większa trwałość kompletu.

Informacje dotyczące przykładowych kompletów uzupełniających płytek wzorcowych zamieszczono w tabeli 11. Jako przykłady wybrano również komplety produkcji krajowej.

Tabela 11. Komplety uzupełniające płytek wzorcowych produkcji krajowej					
Nazwa kompletu	Wymiar nominalny / zakres wymiarów nominalnych	Stopniowanie w zakresie	Ilość płytek w:		Klasy dokładności wykonania
			zakresie	komplecie	
Mikrometryczny	0,991 - 0,999	0,001	9	18	0 i 1
	1,001 - 1,009	0,001	9		
Centymilimetry	0,90 - 0,99	0,01	10	10	0, 1 i 2
Uzupełniający poniżej 1 mm	0,41 - 0,49	0,01	9	18	0, 1 i 2
	0,2 - 0,9	0,1	8		
	0,405	-	1		
Uzupełniający powyżej 100 mm	125 - 200	25	4	8	0, 1 i 2
	250 - 300	50	2		
	400 - 500	100	2		
Komplet płytek ochronnych	1	-	2	2	0, 1 i 2
	lub 2	-	2	2	

Pierwszy z ww. kompletów umożliwia drobniejsze stopniowanie długości stosów budowanych z płytek kompletu małego średniego lub dużego, dwa kolejne ułatwiają budowę stosów o małych długościach (poniżej dolnej granicy zakresu pomiarowego kompletu podstawowego, czwarty umożliwia budowę stosów o dużych długościach, a zadaniem ostatniego jest ochrona płytek stalowych w wielokrotnie używanych stosach.

Dzięki przywieralności powierzchni pomiarowych składane płytki można łączyć w zwarte stosy bez żadnego dodatkowego oprzyrządowania. Pomiędzy przywartymi płytkami występuje warstewka płynów o grubości szacowanej na $0,005 \div 0,020 \mu\text{m}$. Ponieważ grubość taka nie ma praktycznego znaczenia, przyjmuje się, że wymiar odtwarzany przez stos jest równy sumie wymiarów odtwarzanych przez składające się nań płytki. Natomiast błąd wymiaru odtwarzanego przez stos i wynikającego z odchyłek długości poszczególnych płytek stosu oblicza się z zależności:

$$\Delta L = \sqrt{\sum_i (F_{L,i})^2} \quad (4.4)$$

gdzie:

ΔL – graniczna wartość błędu wymiaru odtwarzanego przez stos;

$F_{L,i}$ – graniczne wartości odchyłek długości poszczególnych płytek stosu.

Ze względu na błąd wymaganą długość stosu należy uzyskać za pomocą możliwie najmniejszej liczby płytek. Osiąga się to dobierając kolejne płytki w taki sposób, aby wartość długości pozostałej części stosu maksymalnie zaokrąglić. Przykładowo, budując stos o długości $L = 68,785 \text{ mm}$ z płytek kompletu małego, dobieramy kolejno:

1) 68,785	2) 67,78	3) 66,7	4) 65	5) 50
<u>-1,005</u>	<u>-1,08</u>	<u>-1,7</u>	<u>-15</u>	<u>-50</u>
67,780	66,70	65,0	50	0

Używając w tym samym celu płytek z kompletu dużego i stosując tę samą zasadę, mamy:

1) 68,785	2) 67,78	3) 66,5	4) 50
<u>-1,005</u>	<u>-1,28</u>	<u>-16,5</u>	<u>-50</u>
67,780	66,50	50,0	0

Wybrane płytki należy odkonserwować, odłuszczyć poprzez umycie w benzynie, wytrzeć do sucha w czystą lnianą lub bawełnianą szmatkę i nasunąć na siebie z lekkim poprzecznym dociskiem. W celu eliminacji ewentualnego paczenia płytek cienkich należy umieszczać je pomiędzy płytkami grubszyymi. W przypadku wielokrotnego używania stosu na jego krańcach należy przywrzeć płytki ochronne.

W celu zwiększenia możliwości wykorzystania płytek wzorcowych, a także dla ułatwienia posługiwania się nimi, produkowane jest specjalne oprzyrządowanie w postaci uchwytów, wkładek płasko-walcowych, rysików itp. Komplet takiego oprzyrządowania przedstawiono na rys. 27.



Rys. 27. Komplet oprzyrządowania pomocniczego do płytek wzorcowych

W niektórych krajach, jak np. Japonii czy USA, poza płytkami wzorcowymi o przekroju prostokątnym, produkowane są płytki wzorcowe o przekroju kwadratowym (square gauge blocks). Podstawowa różnica pomiędzy nimi a płytkami o przekroju prostokątnym polega na tym, że płytki kwadratowe łączy się w stosy za pomocą śrub – każda płytka posiada w tym celu odpowiedni otwór. Skręcanie płytek ułatwia budowę stosów, chociaż prawdopodobnie obniża nieco ich dokładność.

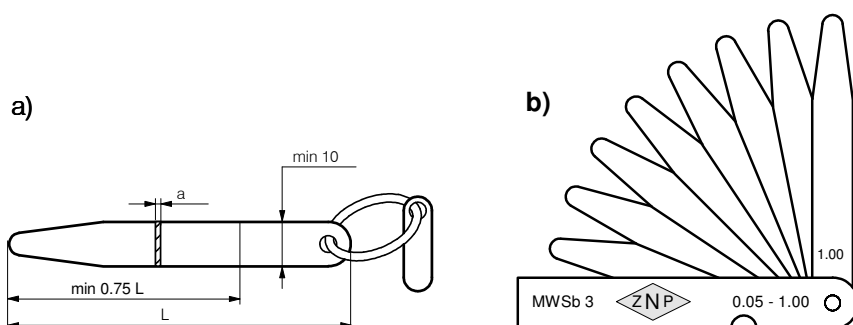
Płytki kwadratowe są produkowane w trzech klasach dokładności – 0, 1 i 2, a wymagania odnośnie kształtu i położenia powierzchni pomiarowych są dla nich identyczne jak w przypadku płytek wzorcowych prostokątnych.

4.1.2. Szczelinomierze

Szczelinomierze – wzorce końcowe w kształcie cienkich płytek (rys. 28), odtwarzają wartości długości odległością dwóch równoległych płaszczyzn (swoimi grubościami). Odtwarzane wartości długości, mieszczące się w przedziale $0,03 \text{ mm} \div 1,00 \text{ mm}$, winny być zachowane z wymaganą dokładnością na co najmniej trzech czwartych długości płytki.

Szczelinomierze są oferowane pojedynczo lub w kompletach. Wycofana już norma PN-75/M-53390 określała trzy rodzaje kompletów oznaczonych numerami 1, 2 i 3 różniących się między sobą stopniowaniem i ew. zakresami odtwarzanych wartości. Podstawowe dane metrologiczne tych szczelinomierzy zawiera tabela 12.

Szczelinomierze są używane do ustawiania i pomiarów luzów, szczelin itp. przy montażu i kontroli różnego rodzaju mechanizmów.



Rys. 28. Szczelinomierze: a) pojedynczy, b) komplet

Tabela 12. Podstawowe dane metrologiczne szczelinomierzy produkcji krajowej			
Rodzaj zestawu	Wymiary nominalne grubości szczelinomierzy wchodzących w skład zestawu [mm]	Ilość szczelinomierzy w zestawie	Długość szczelinomierzy L
Szczelinomierze pojedyncze	0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; 1,00;	1	100 mm i 200 mm
Komplet nr 1	0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40;	14	100 mm 200 mm
Komplet nr 2	0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; 0,95; 1,00;	20	100 mm 200 mm
Komplet nr 3	0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90; 1,00;	11	100 mm 200 mm
Dopuszczalne wartości odchyłek grubości części pomiarowej szczelinomierzy			
Grubość szczelinomierza [mm]	Dopuszczalna wartość odchyłki grubości	Grubość szczelinomierza [mm]	Dopuszczalna wartość odchyłki grubości
$0,03 \leq L \leq 0,06$	3 μm	$0,30 < L \leq 0,45$	7 μm
$0,06 < L \leq 0,10$	4 μm	$0,45 < L \leq 0,60$	8 μm
$0,10 < L \leq 0,20$	5 μm	$0,60 < L \leq 0,80$	10 μm
$0,20 < L \leq 0,30$	6 μm	$0,80 < L \leq 1,00$	12 μm

4.1.3. Wałeczki pomiarowe

Wałeczki pomiarowe wykorzystuje się przeważnie do pomiarów metodami pośrednimi, jak np. pomiary zbieżności stożków metodą dwóch wałeczków, pomiary grubości zębów w kole zębatym czy pomiary średnicy podziałowej gwintów. Mogą służyć również do sprawdzania i regulacji przyrządów pomiarowych.

Wałeczki pomiarowe odtwarzają wartość długości swoją średnicą (odległością dwóch tworzących). Występują przeważnie w kompletach, które można podzielić na uniwersalne i specjalne.

Komplety uniwersalne składają się z wałeczków, których średnice posiadają wartości rozłożone w miarę regularnie w pewnym, z reguły dość szerokim zakresie. Jako przykład takiego kompletu może służyć komplet oferowany przez firmę Mitutoyo [L10]. Komplet ten zawiera 91 sztuk wałeczków o średnicach od 1 do 10 mm stopniowanych co 0,1 mm. Dopuszczalna odchyłka wymiaru zależy od klasy wykonania wałeczków i wynosi $\pm 0,001$ mm dla klasy dokładności 1 i $\pm 0,002$ mm dla klasy dokładności 2.

W grupie kompletów specjalnych wyróżnia się wałeczki do sprawdzania innych narzędzi pomiarowych (etalony), wałeczki pomiarowe do gwintów i wałeczki pomiarowe do kół zębatych.

Jako przykład kompletu **wałeczków przeznaczonych do sprawdzania innych narzędzi pomiarowych** (np. sprawdzianów) służyć może komplet oferowany przez firmę Mahr. Komplet ten zawiera wałeczek bazowy o średnicy 5 mm i 76 wałeczków o średnicach różniących się od średnicy wałeczka bazowego o wartości podane w tabeli 13.

Tabela 13. Wymiary średnic wałeczków w komplecie firmy Mahr – nr kat. 425; różnice w stosunku do średnicy bazowej w μm [S16]												
± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8	± 9	± 10	± 11	± 12	± 13
± 15	± 17	± 18	± 19	± 20	± 22	± 25	± 28	± 30	± 32	± 35	± 38	± 40
± 45	± 50	± 55	± 60	± 65	± 70	± 75	± 80	± 85	± 90	± 95	± 100	

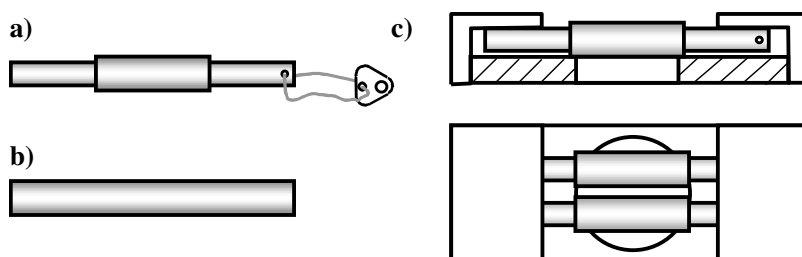
Ze względu na swe przeznaczenie wałeczki powyższego kompletu są wykonane bardzo dokładnie. Dopuszczalna odchyłka średnicy wynosi $\pm 0,0003$ mm. W części chwytowej każdy wałeczek jest zaopatrzony w nasadkę z tworzywa sztucznego, na której naniesiona jest jego nominalna odchyłka względem wałeczka bazowego. Aby utrudnić popełnienie pomyłki, nasadkę wałeczka bazowego, nasadki wałeczków o odchyłkach dodatnich i nasadki wałeczków o odchyłkach ujemnych wykonano w różnych kolorach.

Waleczki pomiarowe do gwintów wykorzystuje się głównie do pomiaru średnic podziałowych gwintów zewnętrznych. Można je również zastosować do pomiarów innych wielkości, np. niektórych parametrów kół zębatych, kątów rozwarcia stożków zewnętrznych czy promieni łuków.

Według PN-79/M-53 088 na komplet waleczków pomiarowych do gwintów składa się 21 trójek waleczków o średnicach dobranych tak, by stykały się z gwintem na jego średnicy podziałowej (tabela 14).

Tabela 14. Średnice waleczków pomiarowych do gwintów wg PN-79/M-53 088 [mm]					
0,170	0,195	0,220	0,250	0,290	0,335
0,390	0,455	0,530	0,620	0,725	0,895
1,100	1,350	1,650	2,050	2,550	3,200
4,000	5,050	6,350			

Wyróżnia się trzy odmiany waleczków pomiarowych do gwintów: waleczki z zaczepami, waleczki bez zaczepów i waleczki w oprawkach. Ich kształty pokazano na rys. 29.



Rys. 29. Waleczki pomiarowe do gwintów: a) z zaczepami; b) bez zaczepów; c) w oprawkach

Według wspomnianej wyżej normy dopuszczalna odchyłka wymiaru średnicy pomiarowej waleczków do gwintów wynosi $\pm 0,0005$ mm, dopuszczalne wartości błędów kształtu: kołowości – 0,0005 mm, prostoliniowości tworzącej – 0,0015 mm. Dopuszczalna wartość chropowatości – $R_a \leq 0,04$ μ m. Twardość powierzchni pomiarowych winna wynosić minimum 700 HV (ok. 59 HRC).

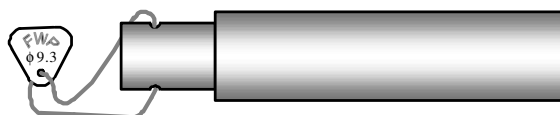
Znanymi producentami waleczków pomiarowych do gwintów są niemieckie firmy Mahr i Gimex.

Kształt waleczków pomiarowych do kół zębatych pokazano na rys 30. Wykonywane są one z wysokogatunkowej stali stopowej. Część pomiarowa (powierzchnia walcowa o większej średnicy) jest szlifowana i docierana, a jej twardość winna wynosić

minimum 700 HV. W związku z powyższym proces technologiczny wałeczków zawiera operacje hartowania, odpuszczania i sezonowania.

Przykładowy komplet wałeczków do kół zębatach (producent VIS Sp. z o. o.) zawiera wałeczki o 23 różnych średnicach. Ich wartości wynoszą: 1,7; 2,1; 2,5; 3,0; 3,4; 3,8; 4,2; 4,6; 5,1; 5,5; 5,9; 6,3; 6,8; 7,2; 7,6; 8,5; 9,3; 10,2; 11,0; 11,9; 13,6; 15,3 i 17,0 mm, przy czym odchyłka wymiaru nie może przekroczyć wartości $\pm 1,5 \mu\text{m}$.

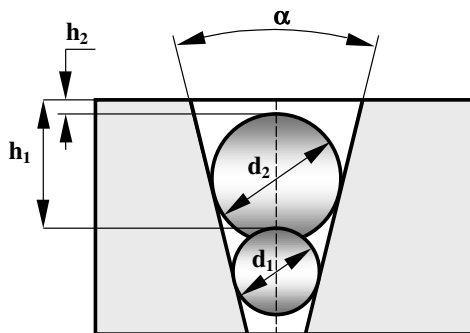
Wałeczki do kół zębatach wykorzystuje się przeważnie do pomiarów grubości zębów. Ze względu na metodę pomiaru, która wymaga zastosowania dwóch wałeczków o tej samej średnicy, oferowane są parami. Można kupić komplet zawierający tylko jedną parę wałeczków o wymaganej średnicy lub pełny komplet.



Rys. 30. Wałeczek pomiarowy do kół zębatach (z przywieszka)

4.1.4. Kulki pomiarowe

Kulki pomiarowe wykorzystuje się przeważnie do pomiarów metodami pośrednimi, np. kąta rozwarcia stożka wewnętrznego (rys. 31), kąta rozwarcia rowka wzdłużnego, parametrów ślimacznic. Można ich również użyć do zerowania przyrządów pomiarowych przy pomiarach elementów o kształtach kulistych.



Rys. 31. Przykład wykorzystania kulek do pomiaru kąta rozwarcia stożka wewnętrznego
 $\alpha = f(d_1, d_2, h_1, h_2)$

Kulki pomiarowe są oferowane w zestawach. Najmniejszy zestaw zawiera przeważnie trzy kulki o tej samej średnicy. Większe zestawy zawierają kilkanaście (lub nawet kilkadziesiąt) trójek o średnicach stopniowanych co 0,5 lub 1 mm. Np. firma TESA oferuje dwa zestawy kulek pomiarowych metrycznych. Pierwszy z nich zawiera 25 trójek kulek o wymiarach od 1 do 25 mm stopniowanych co 1 mm. Drugi, mniejszy zestaw, zawiera 12 trójek kulek o średnicach od 1,5 do 12,5 mm stopniowanych również co 1 mm. Każdy z ww. zestawów jest dostarczany wraz ze świadectwem sprawdzenia, w którym rzeczywista średnica każdej kulki określona jest z niepewnością $\pm 0,0005$ mm. Średnice kulek należących do tej samej trójki mogą różnić się między sobą maksymalnie o 0,001 mm. Również 0,001 mm wynosi graniczna dopuszczalna wartość odchyłki kulistości.

4.2. WZORCE KĄTA

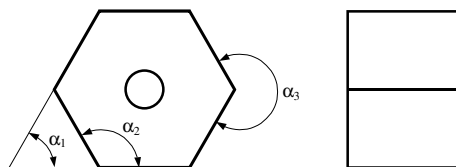
Naturalnym wzorcem kąta jest kąt pełny zawierający 360° lub 2π radianów. Poprzez odpowiedni jego podział uzyskuje się wzorce innych wartości kąta. Wzorce te mogą odtwarzać wartości kąta za pomocą kres naniesionych na obwodzie koła, walca lub stożka (wzorce kreskowe) lub odpowiednio nachylonych względem siebie dokładnie wykonanych płaszczyzn (wzorce końcowe).

Wzorce kreskowe rzadko występują samodzielnie – najczęściej stanowią integralne części różnych przyrządów pomiarowych (np.: wzorec kreskowy kąta naniesiony na korpusie kątomierza uniwersalnego, wzorec kreskowy kąta na płytce głowicy gonio-metrycznej mikroskopu warsztatowego itp.).

W grupie wzorców końcowych wyróżnia się pryzmy wielościenne, płytki wzorcowe kąta i kątowniki.

4.2.1. Pryzmy wielościenne

Pryzmy wielościenne są używane przeważnie jako etalony, tj. do kontroli i ewentualnej adiustacji innych narzędzi pomiarowych. Mają one kształt graniastosłupa o podstawie wielokąta foremnego (rys. 32). Odtwarzana wartość kąta jest zawarta pomiędzy dwoma powierzchniami bocznymi tego graniastosłupa.



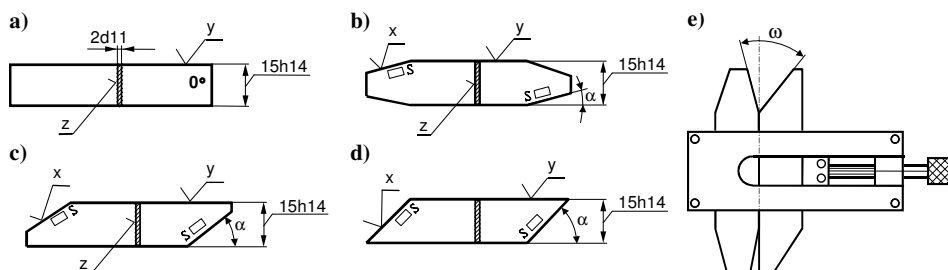
Rys. 32. Pryzma wielościenne o podstawie sześciokąta foremnego.
Odtwarza kąt 60° i jego krotności

Jako przykład tego rodzaju wzorców można wskazać pryzmy wielościennie produkcji firmy TESA. Firma ta oferuje pryzmy w trzech klasach dokładności określonych opisowo jako „referencyjna”, „kalibracyjna” i „kontrolna” [L15]. Podstawowe dane metrologiczne tych wzorców zestawiono w tabeli 15.

Tabela 15. Podstawowe dane metrologiczne pryzm wielościennych produkcji firmy TESA [L15]			
Parametr	Klasa		
	referencyjna	kalibracyjna	kontrolna
Płaskość pow. pomiarowych	0,05 μm	0,05 μm	0,125 μm
Dopuszczalna odchyłka kąta	$\pm 5''$	$\pm 10''$	$\pm 15''$
Ilość powierzchni pomiarowych	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 lub 12		

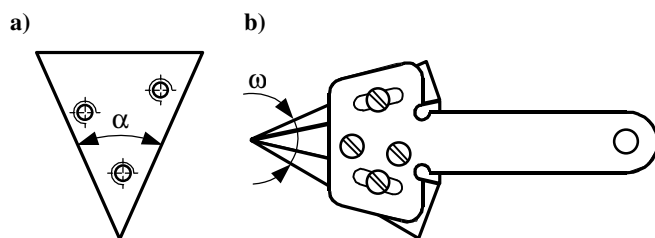
4.2.2. Płytki wzorcowe kąta

Wyróżnia się trzy odmiany płytek wzorcowych kąta: płytki kątowe Johanssona, płytki kątowe Kuszniowa oraz płytki kątowe przywieralne. Dwie pierwsze z ww. odmian, które pokazano na rys 33 i 34, wychodzą już z użytkowania. Zastępowane są przez znacznie bardziej dokładne płytki kątowe przywieralne.



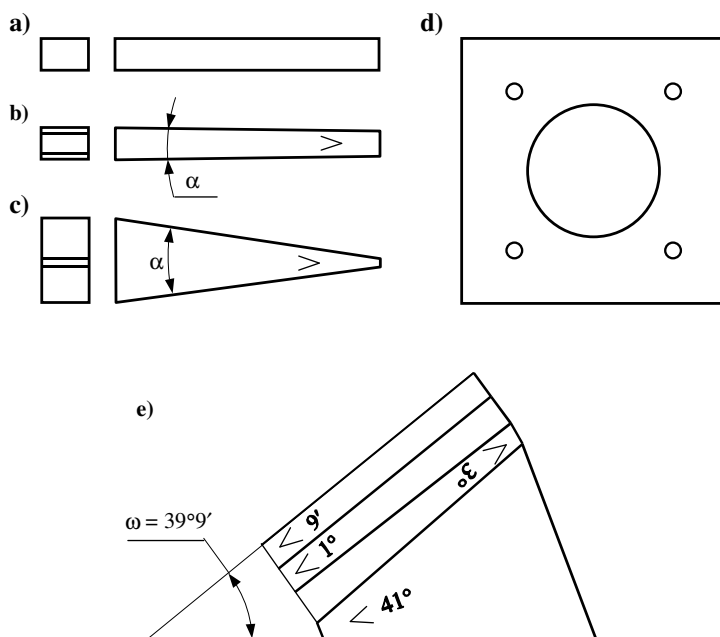
Rys. 33. Płytki kątowe Johanssona: a) równoległa (0°); b) z czterema kątami pomiarowymi $\leq 24^\circ$; c) z dwoma kątami pomiarowymi $\leq 45^\circ$; d) z dwoma kątami pomiarowymi $> 45^\circ$; e) uchwyt do składania płytek kątowych Johanssona

ω – kąt wzorcowy; x – powierzchnia pomiarowa skośna; y – powierzchnia pomiarowa równoległa; z – powierzchnia pomiarowa boczna; S – wierzchołek kąta; □ – miejsce znakowania wymiaru nominalnego



Rys. 34. Płytki kątowe Kusznikowa: a) widok pojedynczej płytki; b) uchwyt z przykręconymi płytkami odtwarzającymi żadaną wartość kąta wzorcowego ω

Płytki kątowe przywieralne mają kształty pokazane na rys. 35. W odróżnieniu od dwóch poprzednich odmian posiadają one większą grubość i dokładniej wykonane powierzchnie pomiarowe. Dzięki temu można łączyć je z sobą bez dodatkowego oprzyrządowania, wykorzystując w tym celu jedynie siły przyciągania międzycząsteczkowego (rys. 35e).



Rys. 35. Płytki kątowe przywieralne: a) równoległa ($\alpha = 0^\circ$); b) odtwarzająca małe kąty ($\alpha \leq 5^\circ$); c) odtwarzająca większe kąty ($\alpha > 5^\circ$); d) kwadratowa ($\alpha = 90^\circ$); e) kąt wzorcowy ω utworzony z czterech płytek przywieralnych

Jak wynika z rys. 35e, kąt wzorcowy ω jest równy sumie kątów odtwarzanych przez użyte do jego utworzenia płytki. Każdą z płytek można przy tym wykorzystać na dwa różne sposoby: dodając odtwarzany przez nią kąt (płytki 41°, 1° i 9') lub go odejmując (płytką 3°). Błąd kąta wzorcowego zależy od błędów poszczególnych płytek, a jego graniczną wartość określa zależność:

$$\Delta\omega = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_i\alpha)^2} \quad (4.5)$$

gdzie:

n – ilość płytek użytych do utworzenia kąta wzorcowego;

$\Delta_i\alpha$ – dopuszczalny błąd odtwarzania i -tej płytki ($i = 1, 2, \dots, n$).

Płytki kątowe przywieralne są wykonywane z wysokogatunkowej stali stopowej odpornej na ścieranie i korozję. Wysoką twardość (ok. 800 HV) i dokładność ich powierzchni pomiarowych osiąga się poprzez hartowanie, odpuszczanie, szlifowanie i bardzo precyzyjne docieranie. Płytki kątowe przywieralne są oferowane pojedynczo lub w odpowiednio zaprojektowanych zestawach. Wymagania odnośnie dokładności płytek są określane zwykle za pomocą dwóch parametrów: odchyłki płaskości powierzchni pomiarowych Δ_p i odchyłki wartości odtwarzanego kąta $\Delta\alpha$. Graniczne dopuszczalne wartości tych parametrów są z reguły niezależne od wartości kątów odtwarzanych przez poszczególne płytki (jednakowe dla wszystkich płytek wchodzących w skład określonego kompletu).

Jedną z firm produkujących płytki kątowe przywieralne jest szwajcarska TESA¹². Firma ta oferuje kilka zestawów płytek oznaczonych w katalogu [S27] symbolami A27, A16, A15, A13 i A6 (liczba stojąca przy symbolu oznacza liczbę płytek w komplecie) oraz A i B. Komplet A6 i A13 umożliwiają uzyskanie kątów wzorcowych o wartościach stopniowanych co 1°, komplety A15, A16 i A27 zapewniają stopniowanie wartości kąta wzorcowego co 10". Jeszcze drobniejsze stopniowanie umożliwiają komplety A (3") i B (6"), z tym że zakresy możliwych do uzyskania wartości kąta wzorcowego są w ich przypadku ograniczone do przedziału 0°÷81°.

W skład zestawu A wchodzi trzynaście płytek kątowych odtwarzających wartości: 3", 6", 18", 30", 1', 3', 9', 27', 1°, 3°, 9°, 27° i 41°, płytka kwadratowa oraz liniał krawędziowy. Zestaw B zawiera te same elementy za wyjątkiem płytki odtwarzającej kąt 3". Płytki posiadają powierzchnie pomiarowe o długości 50 mm i szerokości 9 mm. Dopuszczalna wartość odchyłki płaskości $\Delta_p \leq 0,2 \mu\text{m}$. Dopuszczalna wartość błędu odtwarzanego kąta: $-2'' \leq \Delta\alpha \leq +2''$.

Ze względu na swą dokładność płytki kątowe przywieralne są używane do dokładnych pomiarów kątów i stożków, a także do kontroli i ew. adjustacji narzędzi do pomiaru kątów (kątomierzy, podzielnic, stołów obrotowych itp.).

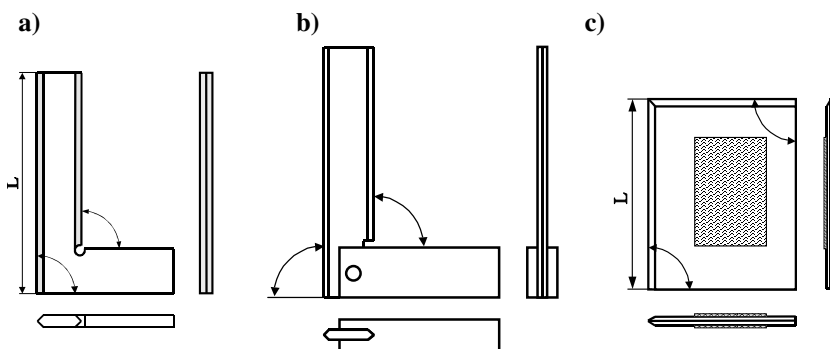
¹² Wchodzi w skład międzynarodowego koncernu Brown & Sharpe.

4.2.3. Kątowniki

Kątowniki są wzorcami kąta prostego powszechnie używanymi zarówno w warsztatach produkcyjnych, jak i laboratoriach wielkości geometrycznych. Wyróżnia się następujące ich rodzaje:

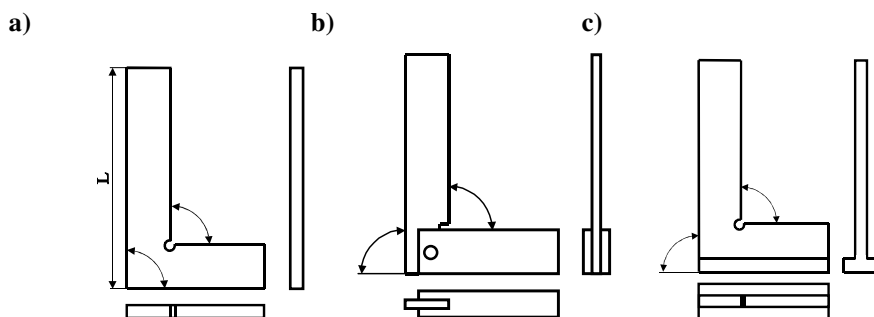
- a) kątowniki krawędziowe;
- b) kątowniki powierzchniowe;
- c) kątowniki walcowe.

W kątownikach krawędziowych odtwarzana wartość kąta jest zawarta pomiędzy prostoliniową krawędzią a płaszczyzną pomiarową. Kątowniki te występują w trzech odmianach, które pokazano na rys. 36.



Rys. 36. Kątowniki krawędziowe: a) płaski; b) z grubym ramieniem; c) pełny

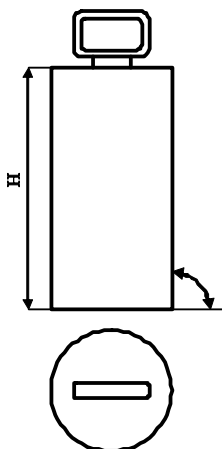
W kątownikach powierzchniowych odtwarzana wartość kąta jest zawarta pomiędzy dwoma powierzchniami pomiarowymi. Kątowniki te również wykonywane są w trzech odmianach. Pokazano je na rys. 37.



Rys. 37. Kątowniki powierzchniowe: a) płaski; b) z grubym ramieniem; c) ze stopą

Kątowniki walcowe mają kształt walca (rys. 38). Odtwarzana wartość kąta zawarta jest pomiędzy dowolną tworzącą tego walca a płaszczyzną jego podstawy.

Poza rodzajem i odmianą kątowniki mogą różnić się jeszcze wielkością. W przypadku kątowników krawędziowych i powierzchniowych wielkość kątownika określa wymiar L dłuższego z jego ramion, natomiast w przypadku kątowników walcowych – wysokość H części walcowej (rys. 38). Typowe, występujące w ofertach producentów, wartości tych parametrów zestawiono w tabeli 16.



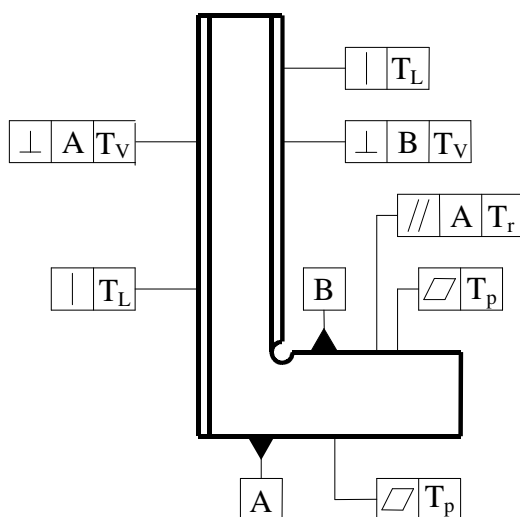
Rys. 38. Kątownik walcowy

Istotną cechą kątowników jest dokładność ich wykonania. Polska Norma PN-86/M-53160 przewiduje cztery klasy dokładności wykonania oznaczone symbolami 00, 0, 1 i 2, przy czym najdokładniejsza jest klasa 00. Poszczególne odmiany kątowników są wykonywane tylko w niektórych spośród wyżej wymienionych klas. Informacje na ten temat zamieszczono w tabeli 16.

Wymagania dotyczące dokładności wykonania kątowników przedstawiono na rysunku 39. Najogólniej rzecz ujmując, sprowadzają się one do tego, by krawędzie pomiarowe kątowników krawędziowych i tworzące kątowników walcowych były prostoliniowe, powierzchnie pomiarowe – płaskie, elementy odtwarzające kąt prosty – wzajemnie prostopadłe, a płaszczyzny podstaw – równoległe.

Dopuszczalne wartości odchylek kształtu i położenia elementów pomiarowych zależą wg PN od klasy dokładności wykonania oraz wielkości kątownika. Przykładowe wartości tych odchylek podano w tabeli 17.

Tabela 16. Rozmiary i klasy dokładności wykonania kątowników			
Rodzaj kątownika		Wielkość (L lub H [mm])	Klasy dokł. wg PN
Krawędziowe	płaski	25 ÷ 300	00, 0
	z grubym ramieniem	40 ÷ 200	00, 0
	pełny	50 ÷ 80	00, 0
Powierzchniowe	płaski	40 ÷ 500	0, 1, 2
	z grubym ramieniem	40 ÷ 400	00, 0
	ze stopą	50 ÷ 500	0, 1, 2
Walcowe		150 ÷ 700	00, 0



Rys. 39. Wymagania dotyczące dokładności wykonania kątownika krawędziowego

T_L – graniczna dopuszczalna wartość odchyłki prostoliniowości, T_p – graniczna dopuszczalna wartość odchyłki płaskości, T_V – graniczna dopuszczalna wartość odchyłki prostopadłości, T_r – graniczna dopuszczalna wartość odchyłki nierównoległości

Tabela 17. Dopuszczalne odchyłki kształtu i położenia elementów pomiarowych kątowników wg PN-86/ M-53 160		
Klasa dokładności wykonania kątownika	Dopuszczalne wartości odchyłek kształtu $T_L = T_p$ [μm]	Dopuszczalne wartości odchyłek położenia $T_V = T_r$ [μm]
00	2 ÷ 3	2 ÷ 6
0	3 ÷ 6	4 ÷ 12
1	6 ÷ 40	10 ÷ 30
2	10 ÷ 80	20 ÷ 60
Uwaga! Większe wartości odchyłek odpowiadają większym rozmiarom kątowników		

Kątowniki wykonuje się przeważnie ze stali narzędziowych stopowych do pracy na zimno lub stali antykorozyjnych.

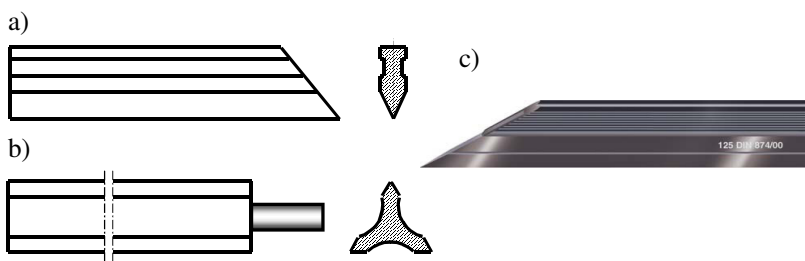
4.3. WZORCE PROSTOLINOWOŚCI I PŁASKOŚCI

Wzorce prostoliniowości można podzielić na materialne (np.: liniały krawędziowe, trzpienie i walce kontrolne czy liniały strunowe) i optyczne (wiązka światła).

Liniały krawędziowe dzielą się na jednokrawędziowe i trójkrawędziowe. Szczegółowe informacje na ich temat zawiera norma PN-74/M-53 180. Według ww. normy płaszczyzny tworzące krawędź pomiarową liniału powinny być pochylone pod kątem 30° w przypadku liniału jednokrawędziowego i 60° w przypadku liniału trójkrawędziowego. Maksymalny promień zaokrąglenia krawędzi w każdym z ww. liniałów nie powinien przekraczać 0,2 mm. Parametrami charakteryzującymi liniał jest jego wielkość (długość krawędzi pomiarowej) i klasa dokładności wykonania. Norma przewiduje dwie klasy dokładności oznaczone symbolami „0” i „1”. Dopuszczalne wartości odchyłki prostoliniowości krawędzi pomiarowych liniałów zestawiono w tabeli 18.

Tabela 18. Dopuszczalne wartości odchyłki prostoliniowości liniałów krawędziowych wg PN-74/M-53180				
Wielkość liniału (długość krawędzi pomiarowej)	T ₁ [μm]			
	Liniały jednokrawędziowe		Liniały trójkrawędziowe	
	Klasy dokładności			
	0	1	0	1
50	-	-	1	3
75	0,5	2		
100				
150	1	3	-	-
200				
300	1,5	4		
400				
500	2,5			

Wzorce optyczne są wykorzystywane w bardziej złożonych urządzeniach pomiarowych, jak np.: luneta (liniał optyczny) czy laserowych układach do pomiaru prostoliniowości.

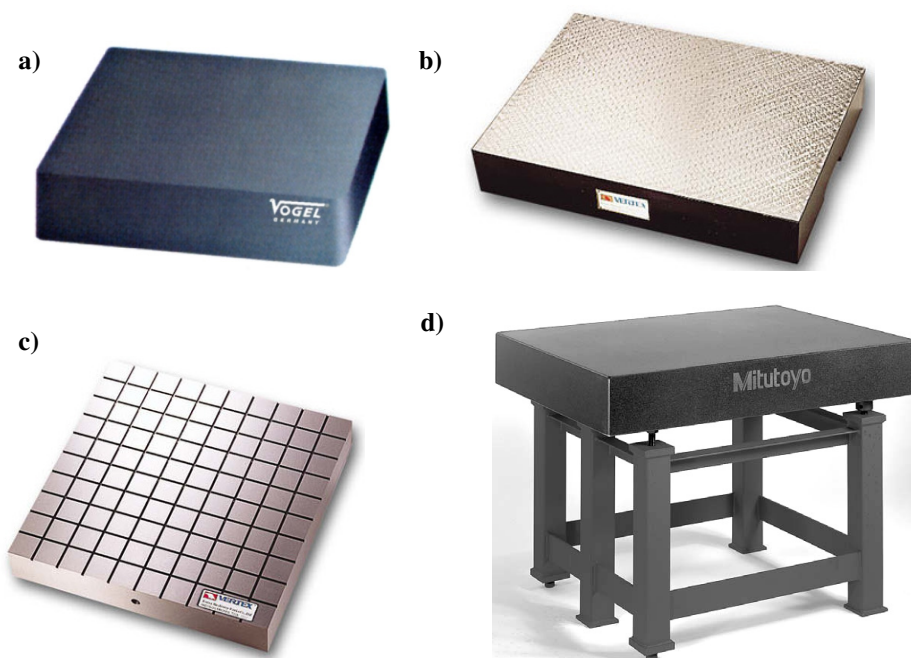


Rys. 40. Liniały krawędziowe: a) szkic liniału jednokrawędziowego; b) szkic liniału trójkrawędziowego; c) widok liniału jednokrawędziowego produkcji firmy ROCH

W grupie wzorców płaskości wyróżnia się płyty miernicze, liniały powierzchniowe i płytki interferencyjne.

Płyty pomiarowe (rys. 41) wykonuje się najczęściej z żeliwa szarego, stali, granitu, bazaltu, a ostatnio również z materiałów ceramicznych (np. Al_2O_3). Poza materiałem płyty pomiarowe mogą różnić się rozmiarami oraz dokładnością wykonania. Rozmiary oferowanych przez producentów płyt, określone długością większego boku, wahają się najczęściej od 0,25 m do 2 m. Za główne kryterium oceny dokładności płyty przyjmuje się odchyłkę płaskości. Graniczna dopuszczalna wartość tej odchyłki jest uzależniona od rozmiarów płyt i klas dokładności ich wykonania. Polska norma PN-ISO 8512 przewiduje cztery klasy dokładności wykonania płyt, oznaczone symbolami „0”, „1”, „2” i „3”, przy czym najdokładniejsza jest klasa „0”.

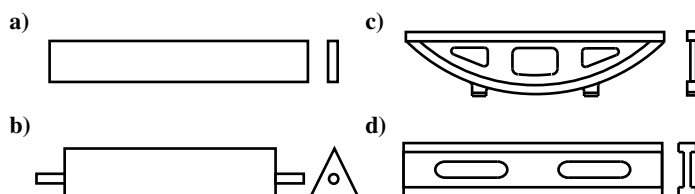
Tabela 19. Dopuszczalne wartości odchyłek płaskości dla płyt wg PN-ISO 8512 [μm]				
Wielkość płyty/klasa dokł.	„0”	„1”	„2”	„3”
250 mm x 250 mm	3,5	7	15	30
400 mm x 400 mm	4,5	9	17	34
1000 mm x 630 mm	6	12	24	49
2000 mm x 1000 mm	9,5	19	38	75



Rys. 41. Płyty pomiarowe: a) ceramiczna – Al_2O_3 (firmy Vogel); b) żeliwna (firmy Vertex); c) stalowa (firmy Vertex); d) granitowa (firmy Mitutoyo)

Liniały powierzchniowe mają, w porównaniu z płytami, wąską powierzchnię pomiarową. Występują w różnych odmianach konstrukcyjnych, które pokazano na rys. 42.

Poza konstrukcją liniały powierzchniowe różnią się jeszcze wielkością i dokładnością wykonania. Wielkość liniałów jest określana długością ich powierzchni pomiarowych. Długość ta wynosi najczęściej od 0,25 m do 2 m. Jeśli chodzi o dokładność, to liniały powierzchniowe wykonywane są w czterech klasach dokładności, oznaczonych w kierunku malejącej dokładności symbolami „00”, „0”, „1” i „2”. Liniały prostokątne i dwuteowe wykonuje się w klasach „00”, „0” i „1”, liniały uzebrowane w klasach „0”, „1” i „2”, a liniały trójkątne w klasach „0” i „1”. Przy ocenie dokładności wykonania liniałów powierzchniowych brane są pod uwagę: odchyłka płaskości i chropowatość powierzchni pomiarowych. Bardziej szczegółowe informacje na ten temat zawiera norma PN-74 / M-53180.



Rys. 42. Odmiany konstrukcyjne liniałów powierzchniowych: a) liniały powierzchniowe prostokątne; b) liniały powierzchniowe uzebrowane; c) liniały powierzchniowe trójkątne; d) liniały powierzchniowe dwuteowe

Płytki interferencyjne (rys. 43) mają postać krążków (walców) szklanych o średnicach mieszczących się najczęściej w przedziale 45 mm ÷ 100 mm. Dzielą się na płaskie i płasko-równoległe.

Szczegółowe informacje na temat płytek interferencyjnych płaskich zawiera norma PN-74 / M-54602. Wg tej normy płytki płaskie dzielą się na jednostronne (typ A), dwustronne (typ 2A) i ze skosem (typ B). Wykonywane są w dwóch klasach dokładności, oznaczonych odpowiednio symbolami „I” i „II”. Podstawowym kryterium oceny dokładności jest odchyłka płaskości powierzchni pomiarowych płytki. Dopuszczalne wartości tych odchylek zestawiono w tabeli 20.



Rys. 43. Płytki interferencyjne

Tabela 20. Dopuszczalne wartości odchyłki płaskości pow. pomiarowych płytek interferencyjnych płaskich wg PN-74/M-54602 w μm

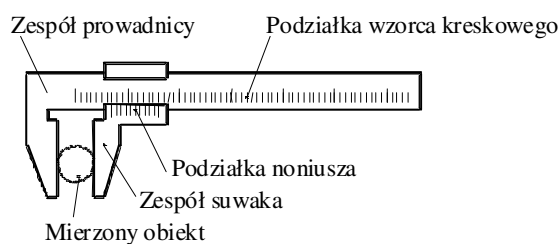
Klasa	Średnica płytki [mm]				
	45	60	80	100	130
I	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05
II	0,10	0,10	0,15	0,15	0,20

Płytki interferencyjne płasko-równoległe mają dwie dokładnie równoległe płaszczyzny pomiarowe. Służą do sprawdzania równoległości płaskich powierzchni końcówek pomiarowych przyrządów (np. mikrometrów). Oferowane są w kompletach zawierających najczęściej cztery płytki.

4.4. PRYZRZĄDY SUWMIARKOWE

Przyrządy suwmiarkowe to grupa przyrządów najczęściej stosowanych do pomiarów wielkości geometrycznych. Prosta konstrukcja, łatwość obsługi, niezawodność działania, mała wrażliwość na zakłócenia zewnętrzne oraz stosunkowo niewysoka cena sprawiają, że przyrządy te cieszą się powszechnym uznaniem przede wszystkim w praktyce warsztatowej. Często i chętnie są one stosowane również w laboratoriach pomiarowych.

Zasada działania przyrządów suwmiarkowych jest oparta na wykorzystaniu kreskowych wzorców długości. Zilustrowano ją na rys. 44.



Rys. 44. Zasada działania przyrządów suwmiarkowych

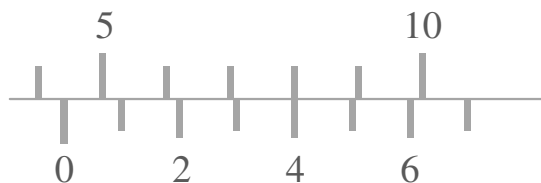
Każda ze szczęk (końcówek) pomiarowych przyrządu suwmiarkowego jest związana z jednym z dwu wzajemnie przesuwnych zespołów – zespołem prowadnicy bądź zespołem suwaka¹³. Na prowadnicy naniesiona jest podziałka kreskowego wzorca długości, określana mianem podziałki głównej. Na suwaku natomiast wykonana jest charakterystyczna dla wszystkich przyrządów suwmiarkowych¹⁴ dodatkowa podziałka, zwana noniuszem. Wzajemne usytuowanie kres podziałki głównej i noniusza stanowi podstawę odczytu.

W porównaniu ze zwykłymi wzorcami kreskowymi (np. różnego rodzaju przymiarami) przyrządy suwmiarkowe mają około dziesięciokrotnie wyższą rozdzielczość odczytu. Zawdzięczają ją zastosowaniu noniusza, który wykorzystuje większą predys-

¹³ W głębokościomierzach suwmiarkowych rolę suwaka pełni tzw. poprzeczka.

¹⁴ Nie dotyczy suwmiarek elektronicznych, które ze względu na zasadę działania zaliczane są do zupełnie innej grupy przyrządów, a mianowicie do elektronicznych przyrządów pomiarowych. Informacje na temat elektronicznych przyrządów pomiarowych przedstawiono w rozdziale 4.9.

pozycję wzroku ludzkiego do stwierdzania stanu koincydencji kres¹⁵ niż do podziału działki elementarnej na części (interpolacji). Objaśnia to rys. 45.



Rys. 45. Zasada działania noniusza (łatwiej określić, która z kres noniusza jest najbliższa stanu koincydencji, niż ocenić, na jakie części dzieli działkę 4 – 5 kresa zerowa)

Działki noniusza mają inną długość niż działki wzorca, a ich ilość decyduje o rozdzielczości odczytu. Ujmują to poniższe zależności:

$$\begin{aligned} n &= a_p / \Delta \\ a_n &= M \cdot a_p - \Delta \\ L_n &= n \cdot a_n = a_p (M \cdot n - 1) \end{aligned} \quad (4.6)$$

gdzie:

a_p – długość działki elementarnej podziałki głównej;

a_n – długość działki noniusza;

n – liczba działek noniusza;

Δ – rozdzielczość odczytu;

M – moduł;

L_n – całkowita długość podziałki noniusza.

Wskazanie noniusza suwmiarkowego odczytuje się w dwu etapach; w pierwszym ustala się liczbę całkowitych milimetrów, a w drugim wartość ułamkowej części milimetra.

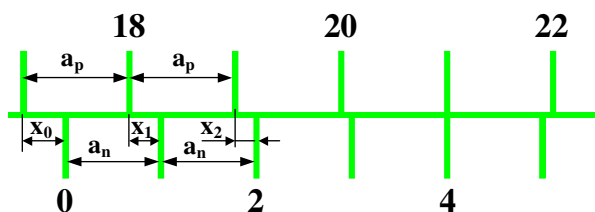
Liczbę całkowitych milimetrów wyznacza na podziałce głównej kresa zerowa noniusza. Informację o wartości części ułamkowej x_0 (p. rys. 46) zawiera numer tej kresy noniusza, która jest najbliższa stanu koincydencji.

Z rys. 46 wynika, że:

$$\begin{aligned} x_1 + a_p &= x_0 + a_n \\ \text{czyli: } x_1 &= x_0 - (a_p - a_n) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Dla przypadku pokazanego na rys. 46 wartość modułu $M = 1$. Uwzględniając ten fakt w drugiej spośród zależności (4.6) i dokonując stosownych przekształceń, mamy:

¹⁵ Zlewania się, wzajemnego przedłużania, przechodzenia jednej kresy w drugą.



Rys. 46. Schemat wymiarów do ustalenia zależności pomiędzy wartością x_0 , a numerem kresy noniusza będącej w stanie koincydencji (wskazanie noniusza – 17,4)

$$a_p - a_n = \Delta \quad (4.8)$$

a po podstawieniu (4.8) do (4.7):

$$x_1 = x_0 - \Delta \quad (4.9)$$

Dokonując analogicznych obliczeń dla odcinka x_2 , mamy:

$$x_2 + a_p = x_1 + a_n$$

$$\text{skąd: } x_2 = x_1 - (a_p - a_n)$$

$$\text{i } x_2 = x_1 - \Delta \quad (4.10)$$

Uwzględnienie w (4.10) równania (4.9) prowadzi do zależności:

$$x_2 = x_0 - 2 \cdot \Delta \quad (4.11)$$

Analogiczne obliczenia dla kolejnych kres noniusza pozwalają na sformułowanie zależności ogólnej:

$$x_i = x_0 - i \cdot \Delta \quad (4.12)$$

Jeżeli kresa jest w stanie koincydencji, to odpowiadający jej odcinek x_i jest równy zero. W takim razie z założenia, że najbliższa stanu koincydencji jest kresa 'j', wynika:

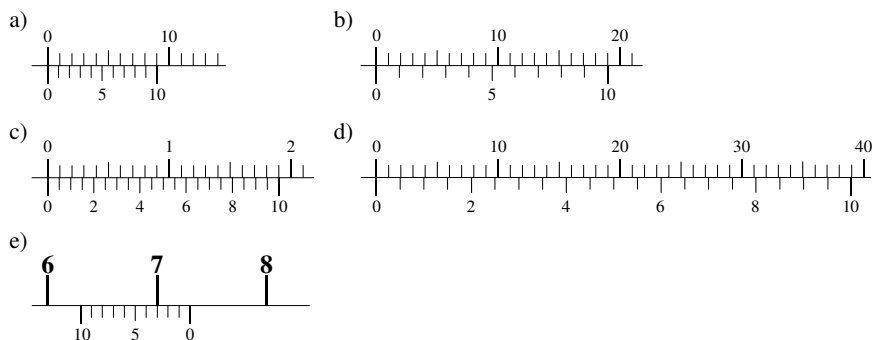
$$x_j = x_0 - j \cdot \Delta \approx 0 \quad \text{czyli:}$$

$$x_0 \approx j \cdot \Delta \quad (4.13)$$

Z zależności (4.13) wynika, że odczytywana za pomocą noniusza ułamkowa część milimetra jest równa iloczynowi rozdzielczości odczytu Δ i numeru kresy noniusza będącej najbliższej stanu koincydencji. Aby wyeliminować przeliczanie, wytwórcy przyrządów suwmiarkowych oznaczają od razu kresy noniusza wartością tego iloczynu.

Posługiwanie się noniuszem nie jest zbyt wygodne, wymaga dużego natężenia uwagi i przy większej liczbie pomiarów powoduje znaczne zmęczenie wzroku. Wygodę odczytu można nieco poprawić poprzez rozsuniecie kres noniusza. Parametrem regulującym odległość sąsiednich kres noniusza, a więc i jego długość, jest tzw. moduł. Może on

przyjmować tylko wartości liczb naturalnych. W praktyce najczęściej występuje $M = 1$ i $M = 2$. Bardzo rzadko spotyka się inne wartości modułu, jak np. moduł $M = 0$ w głowicach goniometrycznych mikroskopów warsztatowych. Przykłady noniuszy z różnymi wartościami modułu pokazano na rys. 47.



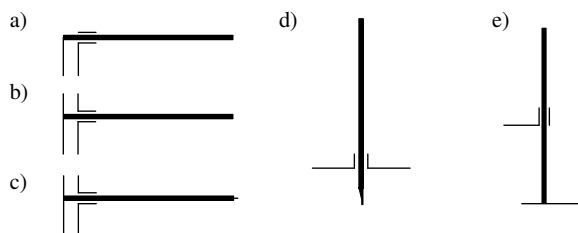
Rys. 47. Noniusze suwmiarkowe dla różnych rozdzielczości odczytu Δ i różnych wartości modułu a) $\Delta = 0,1$; $M = 1$; b) $\Delta = 0,1$; $M = 2$; c) $\Delta = 0,05$; $M = 1$; d) $\Delta = 0,05$; $M = 2$; e) $\Delta = 0,1$; $M = 0$ (do obserwacji ostatniego noniusza używa się układu optycznego, dlatego został on narysowany w odpowiednim, w stosunku do pozostałych, powiększeniu)

Przyrządy suwmiarkowe służą do bezpośredniego pomiaru wymiarów liniowych: zewnętrznych, wewnętrznych i mieszanych. Można podzielić je na przyrządy suwmiarkowe ogólnego przeznaczenia, przyrządy suwmiarkowe specjalizowane i przyrządy suwmiarkowe specjalne, z tym, że granice tego podziału nie są zbyt ostre.

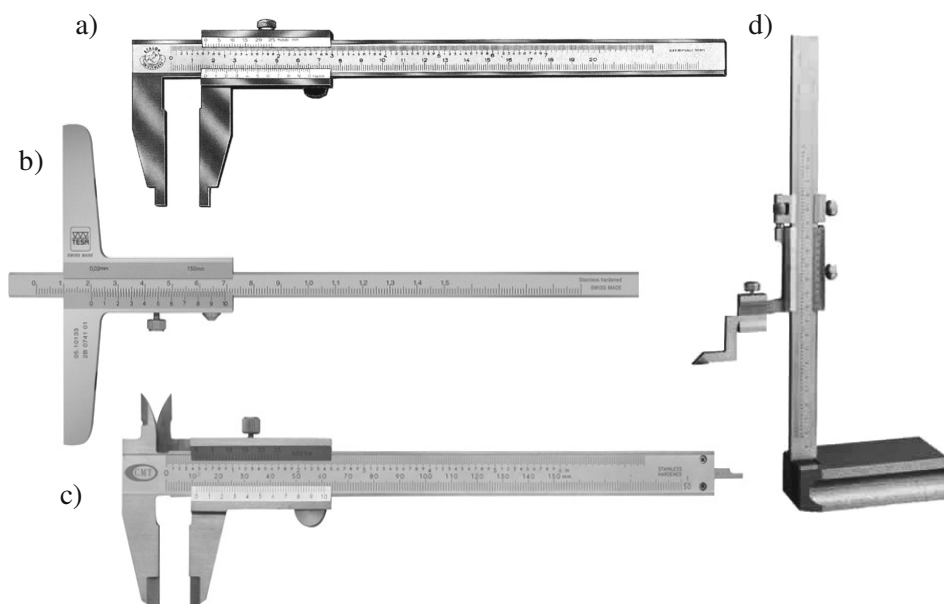
Wśród przyrządów suwmiarkowych ogólnego przeznaczenia wyróżnić można:

- suwmiarki (jednostronne, dwustronne i uniwersalne);
- głębokościomierze suwmiarkowe;
- wysokościomierze suwmiarkowe.

Schematy ww. przyrządów pokazano na rys. 48, a wybranych przedstawicieli na rys. 49.



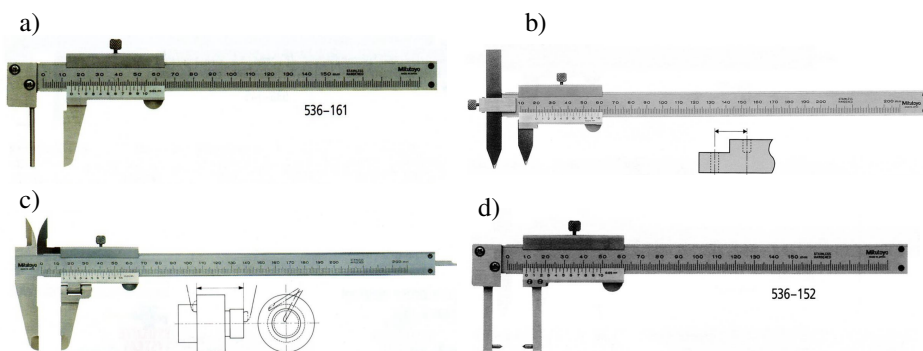
Rys. 48. Schematy przyrządów suwmiarkowych ogólnego przeznaczenia: a) suwmiarka jednostronna; b) suwmiarka dwustronna; c) suwmiarka uniwersalna; d) głębokościomierz suwmiarkowy; e) wysokościomierz suwmiarkowy; grubą linią zaznaczono prowadnicę z podziałką główną)



Rys. 49. Wybrane przykłady przyrządów suwmiarkowych ogólnego przeznaczenia: a) suwmiarka jednostronna; b) głębokościomierz suwmiarkowy; c) suwmiarka uniwersalna; d) wysokościomierz suwmiarkowy

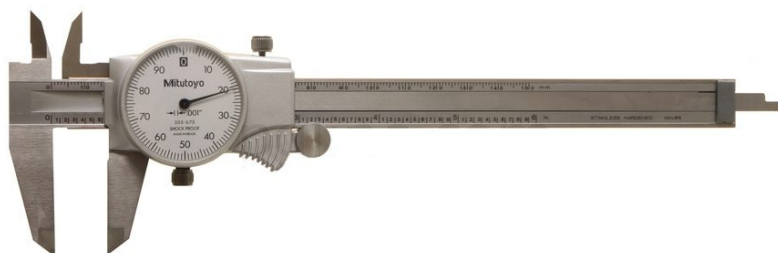
Ze względu na dużą różnorodność kształtów mierzonych detali wykonywanie pomiarów za pomocą przyrządów suwmiarkowych ogólnego przeznaczenia nie zawsze jest możliwe. Przyczyną tego stanu rzeczy są najczęściej trudności z pobraniem mierzonego wymiaru. Pokonanie tych trudności umożliwiają przyrządy suwmiarkowe specjalizowane bądź specjalne.

Specjalizacja przyrządów suwmiarkowych polega na dostosowaniu ich konstrukcji do specyfiki pewnego określonego podzbioru mierzonych kształtów, bądź też do specyfiki pewnych, mniej typowych, zadań pomiarowych. Specjalizacja przyrządów powoduje spadek ich uniwersalności. W przypadku gdy spadek ten nie jest zbyt duży, mówimy o przyrządach suwmiarkowych specjalizowanych, natomiast w przypadku znacznej utraty uniwersalności – o przyrządach suwmiarkowych specjalnych. Przykłady przyrządów suwmiarkowych specjalizowanych i specjalnych pokazano na rys. 50. Z zamieszczonych przykładów wynika, że specjalizację przyrządów suwmiarkowych osiąga się głównie poprzez odpowiednią modyfikację kształtu ich szczęk pomiarowych.



Rys. 50. Przykłady przyrządów suwmiarkowych specjalizowanych i specjalnych: a) suwmiarka do pomiaru grubości ścianek rur; b) suwmiarka do pomiaru rozstawu osi otworów; c) suwmiarka z odchylną szczęką suwaka; d) suwmiarka z ostrzami pomiarowymi do wymiarów zewnętrznych

Jak już wspomniano, posługiwanie się noniusem nie jest wygodne i szybko męczy wzrok, dlatego niektórzy wytwórcy zaopatrują swoje przyrządy w urządzenia odczytowe wskazówkowe. Przykład takiego przyrządu pokazano na rys. 51.



Rys. 51. Przyrząd suwmiarkowy ze wskazówkowym urządzeniem odczytowym

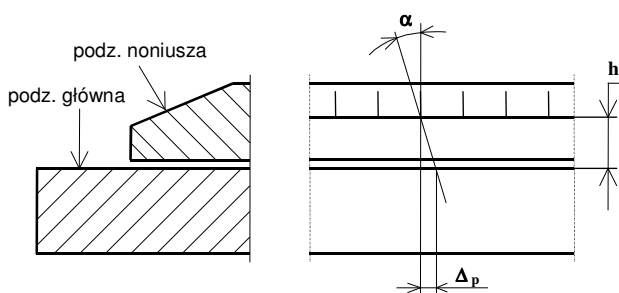
W tradycyjnych rozwiązaniach konstrukcyjnych przyrządów suwmiarkowych płaszczyzna podziałki noniusza nie pokrywa się z płaszczyzną podziałki głównej. W przypadku obserwacji podziałek pod kątem różnym od 90° powoduje to powstanie błędu paralaksy, którego wartość Δ_p (p. rys. 52) określa zależność $\Delta_p = h \cdot \operatorname{tg} \alpha$

Przyjmując typową dla przyrządów suwmiarkowych wartość $h = 0,3 \text{ mm}$ i dopuszczając odchylenie kierunku obserwacji α do 15° , uzyskujemy:

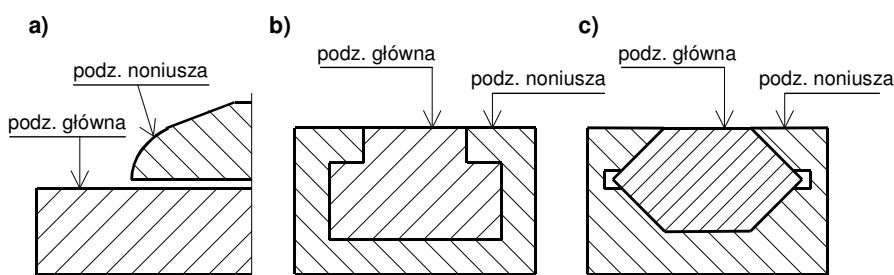
$$h = 0,3 \text{ mm} \cdot \operatorname{tg} 15^\circ = 0,08 \text{ mm} = 80 \mu\text{m}$$

Wynika stąd, że błąd paralaksy może stanowić bardzo istotny składnik błędu pomiaru.

Z tego względu producenci przyrządów suwmiarkowych zaczęli stosować rozwiązania konstrukcyjne kompensujące częściowo lub całkowicie błąd paralaksy. Przykłady takich rozwiązań przedstawiono na rys. 53.



Rys. 52. Powstawanie błędu paralaksy przy odczycie wskazania przyrządu suwmiarkowego



Rys. 53. Różne sposoby kompensacji błędu paralaksy: a) zmniejszenie h poprzez zaokrąglenie krawędzi suwaka; b) i c) usytuowanie obu podziałek w jednej płaszczyźnie

Należy podkreślić, że ze względu na większą trudność wykonania przyrządy suwmiarkowe bezparalaksowe są nieco droższe od konwencjonalnych.

Przyrządy suwmiarkowe wykonuje się ze stali węglowej narzędziowej lub stali antykorozyjnej. W pierwszym przypadku twardość powierzchni pomiarowych winna wynosić minimum 700 HV (ok. 59 HRC), w drugim co najmniej 550 HV (ok. 52 HRC). W celu zwiększenia odporności powierzchni pomiarowych na zużycie stosuje się powłoki ochronne lub nakładki z węglików spiekanych.

Dokładność przyrządów suwmiarkowych ocenia się za pomocą płytek wzorcowych długości. Jako błąd przyrządu przyjmuje się różnicę pomiędzy jego wskazaniem a długością nominalną użytej do sprawdzania płytki.

Dopuszczalne błędy przyrządów suwmiarkowych dla niepewności pomiarowej $\pm 2s$ określa zależność:

$$\Delta = 50 + 0,1 \cdot L \quad (4.14)$$

gdzie:

Δ – dopuszczalna wartość błędu przyrządu suwmiarkowego w μm ;

L – wartość mierzonego wymiaru w mm.

Szczegółowe informacje o wymaganiach dotyczących przyrządów suwmiarkowych zawierają normy:

- **PN-80/M-53130** Narzędzia pomiarowe – Przyrządy suwmiarkowe – Wymagania
- **PN-M-53130/A1:1996** Narzędzia pomiarowe – Przyrządy suwmiarkowe – Wymagania (Zmiana A1)
- **PN-80/M-53130/Az2:2000** Narzędzia pomiarowe – Przyrządy suwmiarkowe – Wymagania (Zmiana Az2)
- **PN-79/M-53131** Narzędzia pomiarowe – Przyrządy suwmiarkowe

4.5. PRYZRZĄDY MIKROMETRYCZNE

Przyrządy mikrometryczne to grupa przyrządów pomiarowych, w których funkcję wzorca pełni dokładnie wykonana śruba. Skok tej śruby, zwanej mikrometryczną, odtwarza znaną wartość długości wynoszącą najczęściej 0,5 mm lub 1 mm.

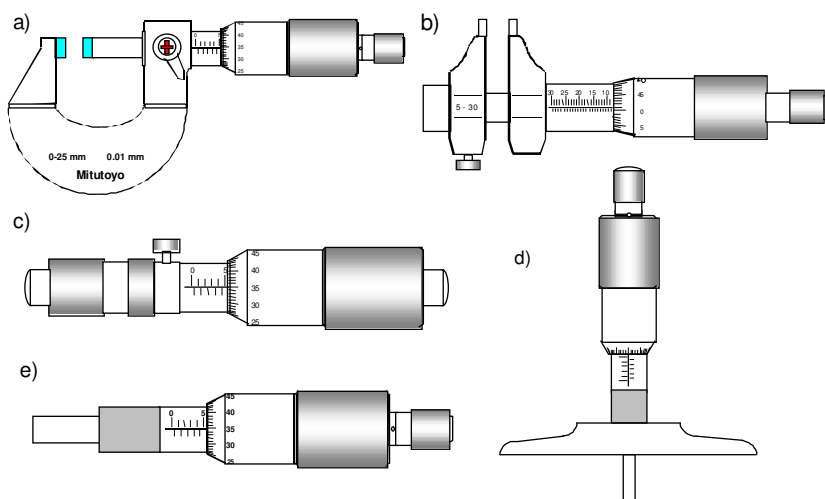
Przyrządy mikrometryczne służą do bezpośrednich pomiarów wymiarów liniowych: zewnętrznych, wewnętrznych i mieszanych. Można je podzielić na przyrządy mikrometryczne ogólnego przeznaczenia oraz przyrządy mikrometryczne specjalne.

W grupie przyrządów mikrometrycznych ogólnego przeznaczenia wyróżnić można następujące odmiany:

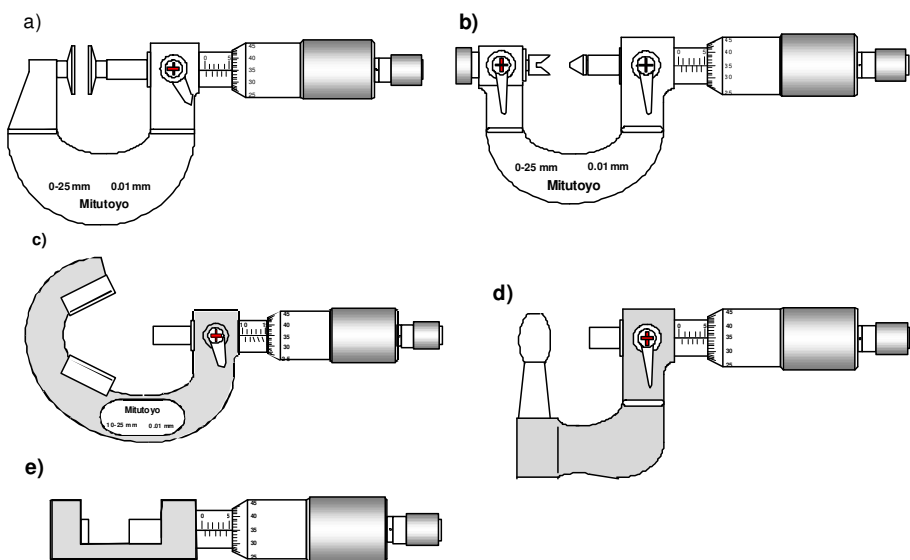
- mikrometry do wymiarów zewnętrznych (mikrometry zewnętrzne);
- mikrometry szczękowe (mikrometry wewnętrzne);
- głębokościomierze mikrometryczne;
- średnicówki mikrometryczne:
 - a) dwustykowe;
 - b) trójstykowe;
- głowice i wkładki mikrometryczne.

Wybrane przykłady przyrządów mikrometrycznych ogólnego przeznaczenia przedstawiono na rys. 54.

Przyrządy mikrometryczne specjalne służą do realizacji ściśle określonych zadań pomiarowych. Najczęściej zadania takie sprowadzają się do pomiaru jednego z wymiarów określonego typu detali (np. grubości zęba koła zębatego, grubości ścianki rury czy średnicy podziałowej gwintu). Jako przykłady przyrządów mikrometrycznych należących do tej grupy można wymienić:



Rys. 54. Przykłady różnych odmian przyrządów mikrometrycznych ogólnego przeznaczenia: a) mikrometru do wymiarów zewnętrznych; b) mikrometru szczękowego; c) średnicówki dwustykowej; d) głębokościomierza mikrometrycznego; e) głowicy mikrometrycznej

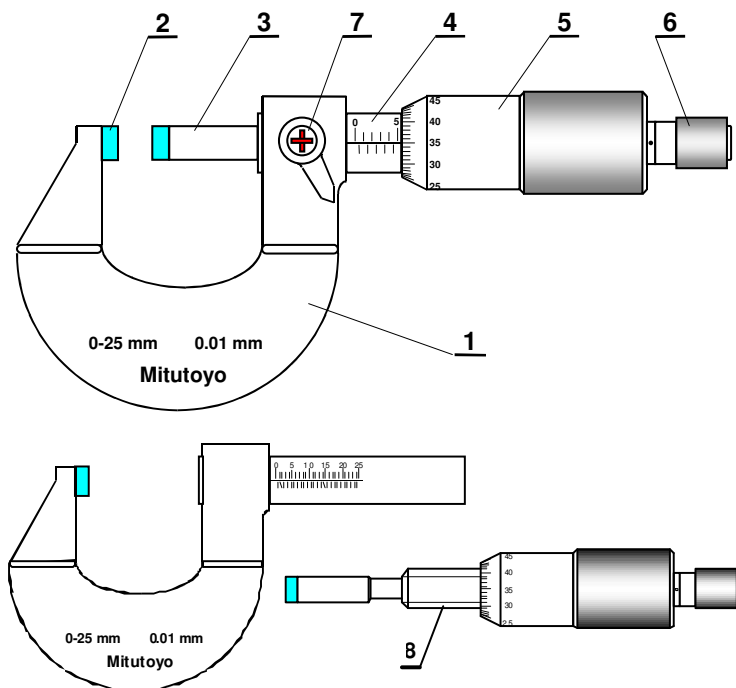


Rys. 55. Przykłady różnych odmian przyrządów mikrometrycznych specjalnych: a) mikrometru do kół zębatach; b) mikrometru do gwintów; c) mikrometru do powierzchni obrotowych nieciągłych; d) mikrometru do rur; e) mikrometru do drutu

- mikrometry do gwintów;
- mikrometry do kół zębanych;
- mikrometry do rur;
- mikrometry do drutu;
- mikrometry do narzędzi skrawających o powierzchniach obrotowych nieciągłych.

Wybrane przykłady przyrządów mikrometrycznych specjalnych pokazano na rys. 55.

Budowa i zasada działania przyrządów mikrometrycznych zostanie przedstawiona na przykładzie mikrometru do wymiarów zewnętrznych, pokazanego na rys. 56.



Rys. 56. Podstawowe elementy mikrometru do wymiarów zewnętrznych

1 – kabłąk; 2 – kowadełko; 3 – wrzeciono; 4 – tuleja; 5 – bęben,
6 – sprzęgiełko; 7 – zacisk; 8 – śruba mikrometryczna

Mikrometr ten składa się z kabłąka 1, w którym zamocowana jest stała lub wymienna nieruchoma końcówka pomiarowa 2, zwana kowadełkiem. Z drugiej strony kabłąka zamocowana jest tuleja 4, wewnątrz której znajduje się nakrętka mikrometryczna. Z nakrętką tą współpracuje śruba mikrometryczna 8 zakończona ruchomą końcówką pomiarową 3, zwaną wrzecionem. Do śruby mikrometrycznej przymocowany jest bęben 5. Do obrotu bębna i związanej z nim śruby mikrometrycznej służy sprzęgło 6. Jest to sprzęgło przeciążeniowe (cierne lub zapadkowe), którego zadaniem jest zapewnienie

stabilizacji nacisku pomiarowego. Zacisk 7 służy do unieruchomienia wrzeciona względem kabłąka i utrwalenia w ten sposób wyniku pomiaru. W mikrometrze tym, podobnie jak w zdecydowanej większości innych przyrządów mikrometrycznych (wyjątek stanowią jedynie mikrometry szczękowe), jest spełniony postulat Abbe'go. Postulat ten dotyczy pokrywania się osi pomiarowej z osią wzorca, a jego spełnienie eliminuje pewne składniki błędu pomiaru, zwiększając w ten sposób jego dokładność.

Tuleja mikrometru jest trwale połączona z kabłąkiem, w związku z czym w trakcie pomiaru zachowuje stałe położenie względem kowadełka. Osiowe przemieszczenia wrzeciona i bębna są jednakowe, ponieważ oba te elementy są połączone ze śrubą mikrometryczną. Ponadto osiowe przemieszczenia bębna są proporcjonalne do kąta jego obrotu. Wszystko to sprawia, że do precyzyjnego ustalenia wzajemnego położenia końcówek pomiarowych można wykorzystać współrzędną kątowego położenia bębna względem tulei. Współrzędną tę określa się poprzez obserwację położenia podziałki naniesionej na obwodzie bębna.

Przemieszczenia obwodowe bębna są znacznie większe niż odpowiadające im przemieszczenia osiowe. Wzajemny stosunek wielkości tych przemieszczeń:

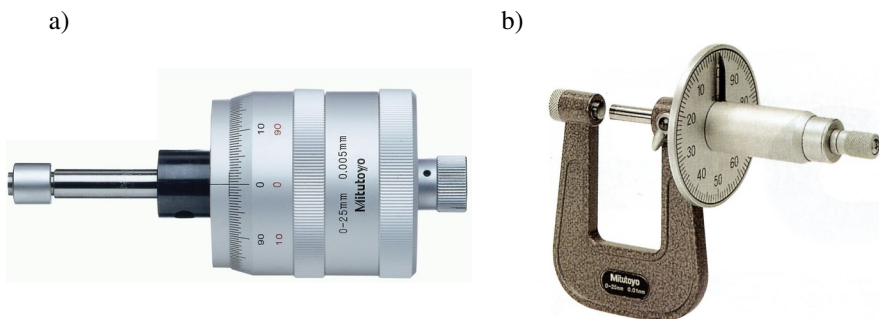
$$k = \pi \cdot D / h$$

gdzie:

D – średnica bębna;

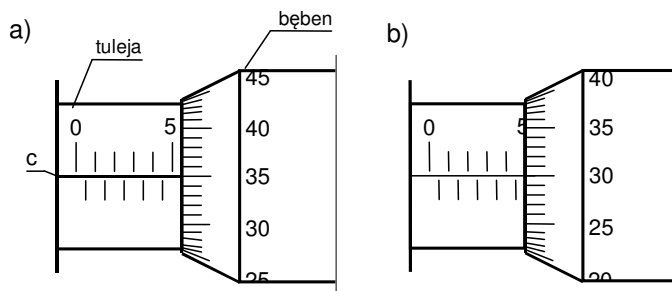
h – skok śruby mikrometrycznej.

określa się mianem przełożenia mikrometru. W praktyce, w większości istniejących rozwiązań, wartość przełożenia $k = 100 \div 200$, chociaż spotyka się konstrukcje, gdzie poprzez zwiększenie średnicy bębna lub zmniejszenie skoku śruby mikrometrycznej, wartość ta jest powiększona. Powiększenie wartości przełożenia pozwala na zwiększenie rozdzielczości odczytu. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych o powiększonym przełożeniu pokazano na rys. 57.



Rys. 57. Rozwiązania konstrukcyjne przyrządów mikrometrycznych o zwiększonym przełożeniu: a) śruba mikrometryczna o zwiększonej średnicy bębna (tzw. typ ciężki) [S12]; b) mikrometr z podziałką naniesioną na tarczy [S5]

W przypadku przyrządów mikrometrycznych dość istotnym problemem jest konstrukcja części odczytowej tych przyrządów. Klasyczne rozwiązanie tego problemu przedstawiono na rys. 58.



Rys. 58. Typowa konstrukcja części odczytowej mikrometru (odczyty: 5,35 mm w przypadku a, 4,80 mm w przypadku b)

W przedstawionym wyżej przypadku całkowite milimetry odczytuje się z podziałki naniesionej na tulei powyżej linii c. Przeciwwskaźnikiem jest lewa krawędź bębna. Setne części milimetra odczytuje się z podziałki umieszczonej na bębnie – rolę przeciwwskaźnika pełni tym razem linia c. Jeżeli skok śruby mikrometrycznej wynosi 0,5 mm (tak jest w tym przypadku), to podziałka na bębnie zawiera 50 działek elementarnych, a na tulei nanosi się pomocniczą podziałkę (w prezentowanym przypadku jest to podziałka znajdująca się poniżej linii c). Jeżeli podczas odczytu stwierdzimy, że najbliższa lewej krawędzi bębna jest kreska podziałki pomocniczej, to wartość odczytaną z podziałki bębna należy skorygować, dodając do niej 50.

Przedstawione wyżej rozwiązanie odznacza się dużą prostotą i ze względów ekonomicznych jest często spotykane w praktyce. Posiada ono jednak kilka istotnych wad. Najpoważniejszą z nich jest możliwość popełnienia błędu grubego, zwanego „błędem półmilimetrowym”. Błąd ten można popełnić na dwa różne sposoby:

- nie korygując odczytu z bębna w sytuacji, gdy korekta powinna być dokonana;
- korygując odczyt (dodając 50) w sytuacji, gdy korekty dokonywać nie należy.

Brak wymaganej korekty odczytu z bębna wynika najczęściej z roztargnienia mierzącego, natomiast niepotrzebna korekta wynika z błędnej oceny momentu „odsłonięcia kresy”.

Kresy naniesione na tulei mają pewną grubość (wg PN-82/M-53200 grubość ta może dochodzić do 0,25 mm). Z tego powodu lewy brzeg kresy zaczyna być odsłaniany, zanim kreska c wskaże na bębnie wartość 0. Przykładowo kreska o grubości 0,25 mm, przy idealnym wyregulowaniu osiowego położenia bębna, zacznie się pokazywać już przy wskazaniu 38, natomiast momentem jej odsłonięcia jest wskazanie 0. Dlatego też przy braku należytej koncentracji można uznać, że kreska została odsłonięta, chociaż w rzeczywistości fakt ten jeszcze nie nastąpił. Trudności interpretacyjne mogą się jeszcze zwiększyć w przypadku niezbyt precyzyjnego wyregulowania osiowego położenia bębna.

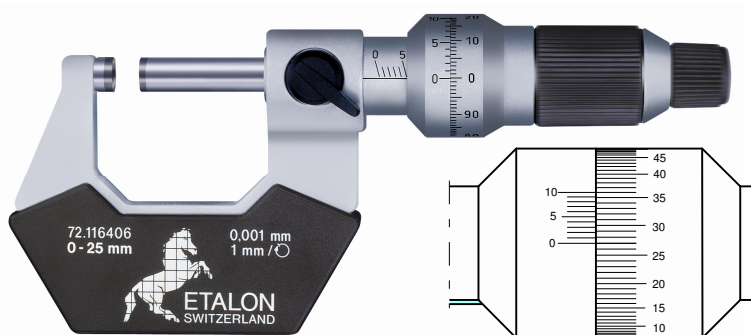
Przykład wskazania mikrometru, przy którym łatwo popełnić błąd półmilimetrowy, pokazano na rys. 59.



Rys. 59. Przykład wskazania mikrometru przy którym łatwo popełnić błąd półmilimetrowy (odczyt 3,96 zamiast poprawnego 3,46) [S7]

Poza możliwością popełnienia błędu półmilimetrowego, omawiane rozwiązanie nie eliminuje błędu paralaksy (kresy podziałki znajdują się w pewnej odległości od kresy odniesienia) oraz daje niezbyt dużą rozdzielczość odczytu.

Żadnej z ww. wad nie posiada rozwiązanie konstrukcyjne mikrometru pokazanego na rys. 60.



Rys. 60. Mikrometr do wymiarów zewnętrznych produkcji szwajcarskiej firmy ETALON

Rozwiązanie to charakteryzuje się tym, że bęben mikrometru podzielony jest na dwie części. Na prawej z nich, która porusza się identycznie jak śruba mikrometryczna, naniesiono podziałkę obwodową. Odpowiednie powiększenie średnicy bębna umożliwiło naniesienie na jego obwodzie 100 działek elementarnych. Dzięki temu możliwe było zastosowanie śruby mikrometrycznej o skoku $h = 1 \text{ mm}$ i wyeliminowanie w ten sposób możliwości wystąpienia błędu półmilimetrowego.

Lewa część bębna jest pozbawiona możliwości obrotu i przemieszcza się tylko w kierunku osiowym. Naniesiono na niej noniusz umożliwiający określenie współrzędnej położenia kąowego prawej części bębna ze zdolnością rozdzielczą równą 0,1 działki (czyli 0,001 mm). Umieszczenie kres noniusza i podziałki obwodowej na tej samej powierzchni walcowej (obie części bębna mają takie same średnice) wyeliminowało możliwość wystąpienia błędu paralaksy.

Wadą przedstawionego wyżej rozwiązania jest znacznie wyższy poziom trudności wykonania, co wpływa w istotny sposób na ceny przyrządów.

Przyrządy mikrometryczne winny spełniać szereg warunków, które szczegółowo przedstawione są w PN-82 / M-53 200 „Przyrządy mikrometryczne. Wymagania”. Jednym z podstawowych warunków jest spełnienie wymagań dotyczących dokładności.

Według ww. normy za błąd przyrządu mikrometrycznego f_i przyjmuje się różnicę pomiędzy wartością x_i wskazywaną przez przyrząd a wartością poprawną $x_{0,i}$, za którą przyjmuje się wartość nominalną użytego do sprawdzania mikrometru stosu płytek wzorcowych. Tak zdefiniowany błąd przyrządu mikrometrycznego stanowi wypadkową błędów spowodowanych różnymi czynnikami, w szczególności błędami skoku gwintu mikrometrycznego, błędami naniesienia kres podziałek, błędami wynikającymi z ugięcia kabłąka i nierównoległości powierzchni pomiarowych.

W trakcie sprawdzania dokładności przyrządu mikrometrycznego wyznacza się błędy tego przyrządu dla określonych wartości $x_{0,i}$. Wartości te dobiera się tak, aby były w przybliżeniu równomiernie rozłożone w zakresie pomiarowym przyrządu, a bęben przy odczycie zajmował różne położenia kątowe. Np. dla mikrometru o zakresie pomiarowym $0 \div 25$ mm zalecanymi wartościami są $\{0; 2,5; 5,1; 7,7; 10,3; 12,9; 15; 17,6; 20,2; 22,8; 25\}$. Dla przyrządów o większych zakresach można stosować powyższe wartości powiększone o dolną granicę zakresu pomiarowego sprawdzanego przyrządu.

Na podstawie wyznaczonych wartości błędów f_i sporządza się wykres błędów jak na rys. 61a i ustala wartości trzech parametrów:

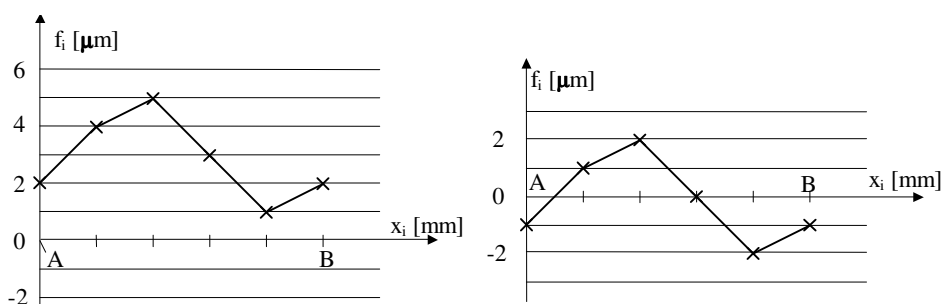
- błędu wskazania zerowego f_A (dla $x_i = A$, gdzie A oznacza dolną granicę zakresu pomiarowego przyrządu);
- maksymalnego (co do wartości bezwzględnej) błędu f_i ;
- maksymalnej różnicy wartości błędów F ($F = f_{i,max} - f_{i,min}$).

Dla powyższych parametrów norma PN - 82 / M - 53 200 ustala wartości dopuszczalne:

$$|f_A| \leq (2 + A/50) \mu\text{m}; \quad |f_i| \leq (4 + A/50) \mu\text{m}; \quad F \leq 3 \mu\text{m};$$

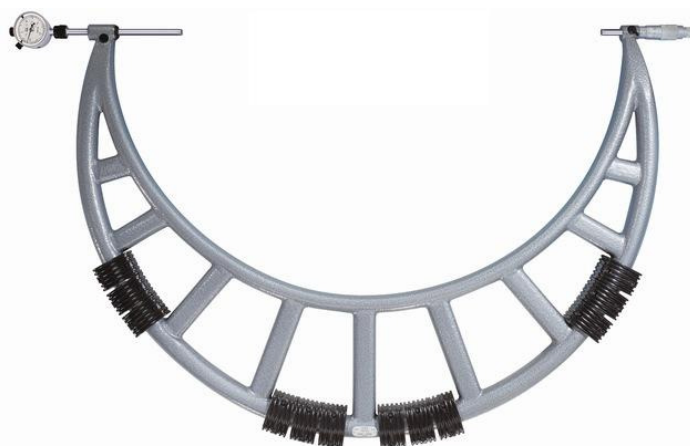
Uwaga!

Ponieważ konstrukcja przyrządów mikrometrycznych umożliwia regulację wartości wskazań, więc uzyskany wykres błędów można poprawić poprzez symetryzację błędów ekstremalnych (względem linii zerowej). Przypadek ten pokazano na rys. 61b.



Rys. 61. Wykres błędów przyrządu mikrometrycznego: a) przed regulacją ($f_A = 2 \mu\text{m}$, $f_{i,\text{max}} = 5 \mu\text{m}$, $F = 4 \mu\text{m}$); b) po regulacji ($f_A = -1 \mu\text{m}$, $f_{i,\text{max}} = 2 \mu\text{m}$, $F = 4 \mu\text{m}$)

Ze względu na łatwość posługiwania się, względnie niski koszt zakupu i eksploatacji oraz dużą niezawodność przyrządy mikrometryczne są chętnie i często stosowane zarówno w praktyce warsztatowej, jak i laboratoriach pomiarowych. Należą do przyrządów średniokładnych. Ich standardowa zdolność rozdzielcza wynosi 0,01 mm, choć spotyka się rozwiązania o zdolności rozdzielczej 0,001 mm (rys. 60), a nawet 0,0001 mm¹⁶. Długość przesuwu śruby mikrometrycznej wynosi najczęściej 25 mm, a zakresy pomiarowe dochodzą do 2000 mm.

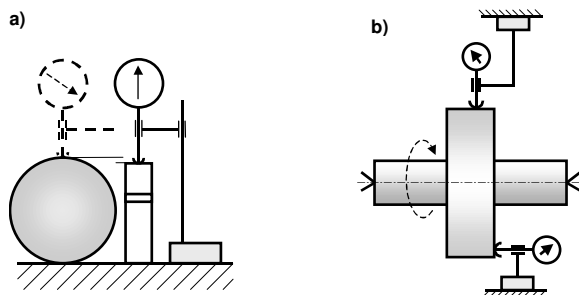


Rys. 62. Mikrometr do wymiarów zewnętrznych o dużym zakresie pomiarowym

¹⁶ Mikrometry japońskiej firmy MITUTOYO o numerach katalogowych 110-102, 110-106 i 110-108 (z gwintem mikrometrycznym różnicowym o wypadkowym skoku równym 0,05 mm i noniuszem).

4.6. CZUJNIKI

Czujniki to nazwa, pod którą w metrologii wielkości geometrycznych¹⁷ rozumie się dość liczną grupę przyrządów służących do pomiarów długości metodą stykową. Przyrządy tej grupy posiadają na ogół¹⁸ mały zakres pomiarowy i z tego względu znajdują najczęściej zastosowanie przy pomiarach metodą różnicową oraz przy pomiarach odchyłek kształtu i położenia (rys. 63).



Rys. 63. Typowe zastosowania czujników: a) pomiar metodą różnicową; b) pomiar odchyłek kształtu i położenia

Ze względu na zasadę działania czujniki najczęściej dzieli się na:

- ♦ mechaniczne;
- ♦ optyczne (mechaniczno-optyczne);
- ♦ elektryczne;
- ♦ pneumatyczne.

4.6.1. Czujniki mechaniczne

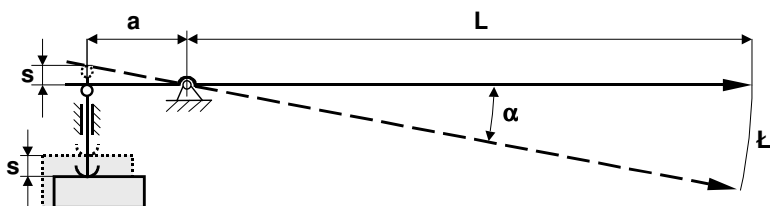
Czujniki mechaniczne to grupa czujników, w których powiązanie przemieszczenia końcówki pomiarowej z odpowiadającym temu przemieszczeniu wychyleniem wskazówki odbywa się poprzez różnego rodzaju przekładnie mechaniczne. W zależności od rodzaju tych przekładni czujniki mechaniczne dzieli się na różne odmiany. Do najczęściej spotykanych odmian należą:

- a) czujniki dźwigniowe;
- b) czujniki zębate;
- c) czujniki dźwigniowo-zębate;
- d) czujniki sprężynowe.

¹⁷ Pojęcie „czujnik” jest pojęciem wieloznacznym. W podstawach metrologii oznacza ono element przyrządu pomiarowego służący do odbierania informacji o wielkości mierzonej (pierwszy przetwornik łańcucha pomiarowego).

¹⁸ Są wyjątki, np. niektóre odmiany czujników zębatach czy też czujniki działające w oparciu o przetworniki położenia (patrz 4.9.1) posiadają zakresy pomiarowe dochodzące do 100 mm.

Zasadę działania czujników dźwigniowych przedstawiono na rys. 64.



Rys. 64. Uproszczony schemat czujnika dźwigniowego

L , a – parametry konstrukcyjne czujnika, s – przesunięcie końcówki pomiarowej, α – wychylenie wskazówki, $\mathbb{L}$ – przemieszczenie obwodowe końca wskazówki

Czujniki dźwigniowe działają na zasadzie dźwigni nierównoramiennej. Krótszy koniec tej dźwigni współpracuje z końcówką pomiarową, dłuższy stanowi wskazówka. Przesunięciu końcówki pomiarowej o wartość s odpowiada przemieszczenie obwodowe końca wskazówki o wartość $\mathbb{L} = L \cdot \alpha$. Dokładną zależność pomiędzy przesunięciem trzpienia pomiarowego a wychyleniem wskazówki ujmuje wzór:

$$\mathbb{L} = L \cdot \arctg(s/a)$$

Z powyższej zależności wynika, że charakterystyka czujnika nie jest liniowa, w związku z czym powinien on posiadać podziałkę niejednostajną¹⁹. W praktyce wykorzystuje się fakt, że dla małych wartości kąta α istnieje dobre przybliżenie:

$$\arctg \alpha = \sin \alpha = \alpha \quad (\text{w mierze łukowej})$$

i dla celów skalowania korzysta się z zależności przybliżonej $\mathbb{L}' = L \cdot s / a$, która pozwala na wykonanie podziałki jednostajnej, znacznie prostszej technologicznie. Przyjęte uproszczenie powoduje powstanie systematycznego błędu skalowania, którego wartość:

$$\delta = \frac{\mathbb{L}' - \mathbb{L}}{\mathbb{L}} = \frac{\frac{L}{a} \cdot s - L \cdot \alpha}{L \cdot \alpha} = \frac{\frac{s}{a} - \alpha}{\alpha} = \frac{\arctg \alpha - \alpha}{\alpha}$$

szybko narasta wraz ze wzrostem kąta wychylenia wskazówki (p. tabela 21). Z tego względu czujniki dźwigniowe mają małe zakresy pomiarowe²⁰.

Tabela 21. Zależność błędu skalowania czujnika od wychylenia wskazówki							
Kąt wychylenia wskazówki	1°	2°	3°	4°	5°	10°	20°
Błąd skalowania [%]	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	1,03	4,27

¹⁹ O różnych długościach działek elementarnych.

²⁰ Problem ten występuje również w niektórych innych typach czujników.

Zasadę działania **czujników zębatych**, w praktyce zwanych częściej czujnikami zegarowymi, przedstawiono na rysunku 65a. Zmiana położenia końcówki pomiarowej powoduje identyczne przesunięcie sztywno z nią połączonej listwy zębatej "5", która obraca koło zębate "1" oraz sztywno z nim powiązane koło zębate "2" i wskazówkę do odczytu zgrubnego "7". Koło zębate "2" wymusza z kolei obrót koła zębatego 3 i związanej z nim wskazówki do odczytu dokładnego "6". Z drugiej strony na koło "3" oddziałuje napędzana spiralną sprężyną "8" koło zębate "4", którego zadaniem jest likwidacja luzów zwrotnych w układzie.

Z zamieszczonego schematu wynika, że związek pomiędzy przemieszczeniem "x" trzpienia pomiarowego a odpowiadającym mu obwodowym przemieszczeniem końca wskazówki "6" określa zależność:

$$L = \frac{2 \cdot L \cdot z_2}{m \cdot z_1 \cdot z_3} \cdot x$$

gdzie:

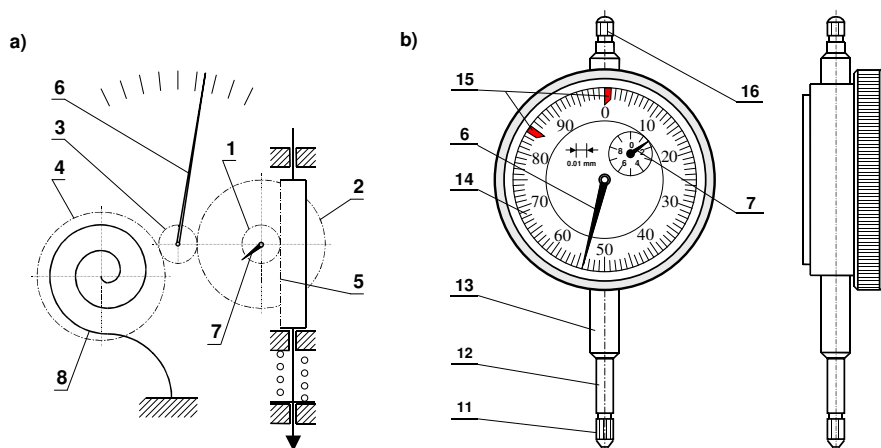
L – obwodowe przemieszczenie końca wskazówki "6";

L – długość wskazówki "6";

z_1, z_2, z_3 – liczby zębów kół zębatych, odpowiednio "1", "2" i "3";

m – moduł uzębienia.

Z przedstawionej wyżej zależności wynika, że charakterystyki czujników zębatych są liniowe. Dzięki temu czujniki te mogą posiadać duże zakresy pomiarowe²¹.



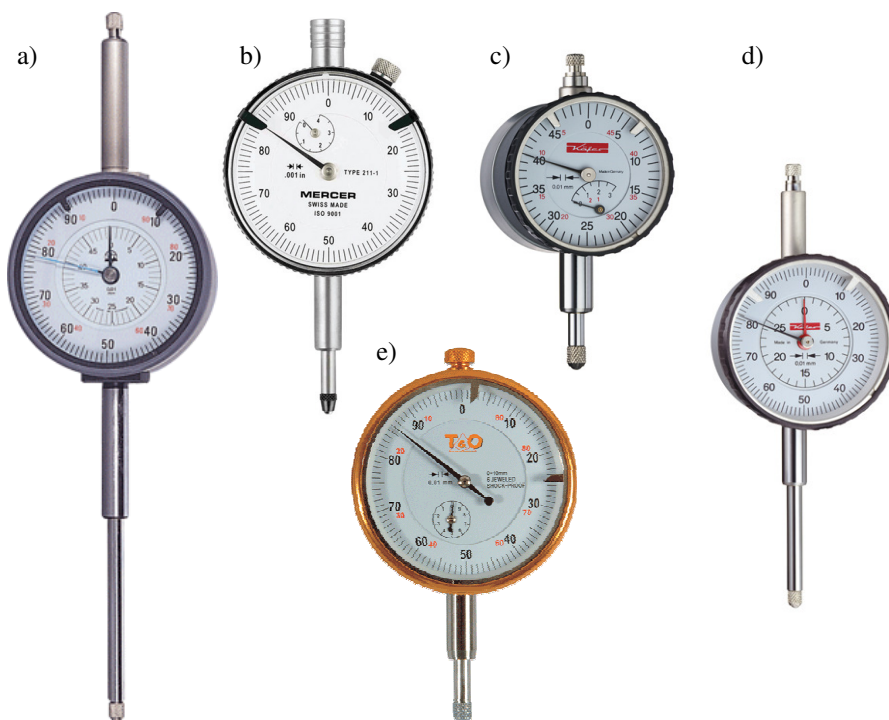
Rys. 65. Czujnik zębaty: a) zasada działania; b) widok czujnika

²¹ Czujniki zegarowe mają największe zakresy pomiarowe spośród wszystkich czujników mechanicznych. Dochodzą one nawet do 100 mm (np. czujnik firmy MITUTOYO o numerze katalogowym 3062 E [S18]).

Przykładowy czujnik zegarowy pokazano na rys. 65b. W jego skład wchodzi m.in.:

- wymienna końcówka pomiarowa "11" zakończona kuliście, zamiast niej można stosować końcówki pomiarowe o innych kształtach, np. płaskie, pryzmatyczne itp.
- trzpień pomiarowy "12";
- chwyt "13" o znormalizowanej średnicy $\phi 8H7$ służący do mocowania czujnika w różnego rodzaju uchwytach i statywach;
- obrotowa tarcza z podziałką "14", która umożliwia wyzerowanie czujnika przy dowolnym położeniu wskazówki "6". Możliwości wyzerowania nie ma natomiast podziałka milimetrowa współpracująca ze wskazówką "7";
- nastawne wskaźniki pola tolerancji "15" ułatwiające ocenę mierzonych wymiarów;
- uchwyt "16" do podnoszenia i opuszczania trzpienia pomiarowego.

Czujniki zębate (zegarowe) są najbardziej popularnym typem czujników mechanicznych. Produkowane są w wielu odmianach przez bardzo wielu producentów. Wybrane przykłady z tej grupy czynników pokazano na rys. 66.



Rys. 66. Wybrane przykłady czujników zębatych: a) firmy Kafer o zakresie pomiarowym 50 mm; b) firmy Mercer o zakresie 4"; c) firmy Kafer o zakresie pomiarowym 3 mm; d) firmy Kafer o zakresie 30 mm; e) firmy T&O o zakresie pomiarowym 10 mm [S20]

Wartość działki elementarnej czujników zębatych wynosi najczęściej 0,01 mm, a ich zakresy pomiarowe mieszczą się przeważnie w przedziale od 3 mm do 100 mm.

Wymagania dotyczące charakterystyk metrologicznych czujników zębatych są określone w normie PN-EN ISO 463:2007 (zgodnie z tą normą należy określać wymagania również dla czujników dźwigniowo-zębatych).

Zgodnie z normą ISO 463 producent czujników ma obowiązek określić maksymalne dopuszczalne wartości histerezy wskazań i powtarzalności wskazań czujnika. Ponadto powinna zostać określona maksymalna dopuszczalna wartość błędu wskazań czujnika w całym jego zakresie i, o ile ma to zastosowanie, w stosownych częściach tego zakresu (zalecane wielkości podzakresów to 1/10, 1/2 i 1 pełny obrót wskazówki).

Histerezą wskazań czujnika nazywa się różnicę wskazań przy pomiarze tej samej wielkości wzorcowej zadawanej w różny sposób (poprzez wzrost i poprzez spadek wartości; p. rys. 67).

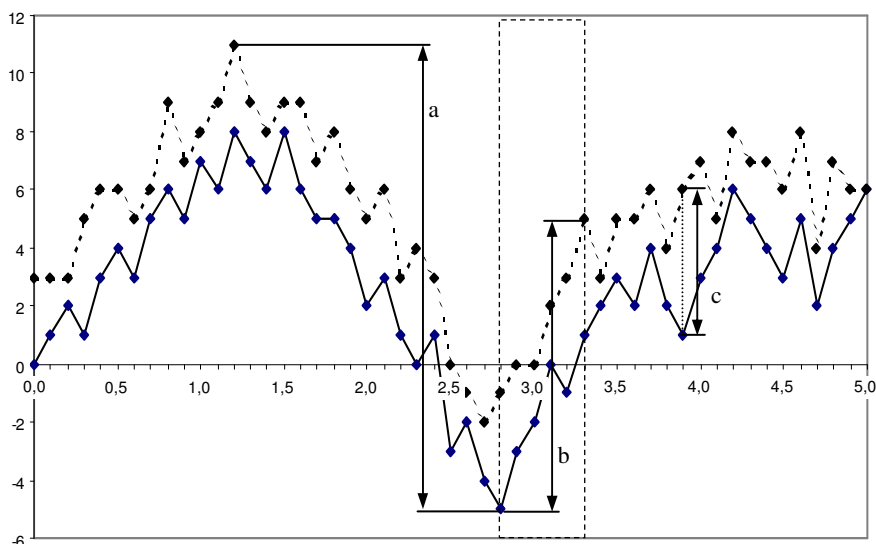
Powtarzalność wskazań (zakres rozrzutu wskazań) określa się, dokonując kilku pomiarów tej samej wielkości wzorcowej. Miarą powtarzalności jest największa różnica między wskazaniami. Badania należy przeprowadzić w trzech różnych miejscach zakresu pomiarowego.

Błędem wskazań czujnika jest różnica pomiędzy wskazaniem a mierzoną przez czujnik wartością długości. Ponieważ jednak wskazania czujnika można regulować (zmieniając tym samym błędy jego wskazań), więc w celu wyznaczenia błędów wskazań trzeba przyjąć jakieś odniesienie. Odniesieniem tym jest wskazanie zerowe czujnika. Przyjmuje się, że wskazanie zerowe, uzyskane przez taką regulację, przy której wskazania narastają, jest wskazaniem bezbłędnym.

Po wyzerowaniu czujnika mierzy się nim odpowiednio stopniowane wartości wzorcowe, które zmienia się narastająco od zera aż do górnej granicy zakresu pomiarowego, a następnie malejąco (z powrotem do zera). Na podstawie uzyskanych wartości błędów w poszczególnych punktach zakresu tworzy się wykres jak na rys. 67 i na jego podstawie wyznacza błąd w całym zakresie i wybranych podzakresach.

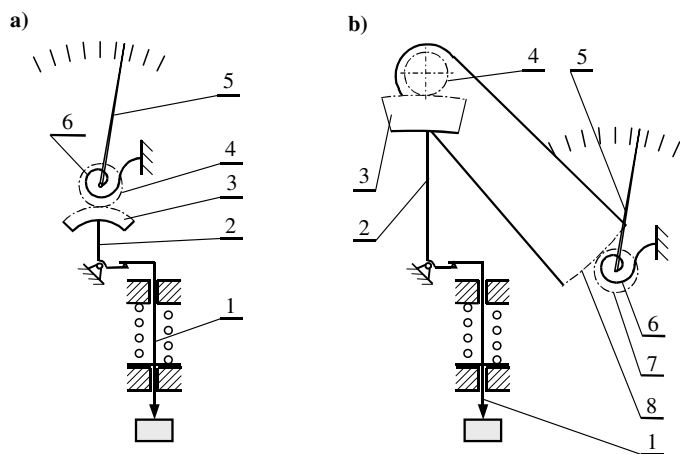
W normie PN-EN ISO 463 zawarte jest również wymaganie, aby producent podawał dane dotyczące nacisku pomiarowego (wartość maksymalną, minimalną i histerezę).

Zasadę działania **czujników dźwigniowo-zębatych** pokazano na rys. 68. Trzpień pomiarowy "1", którego położenie zależy od wymiaru mierzonego przedmiotu, ustala położenie kątowne dźwigni "2". Dłuższe ramię tej dźwigni jest zakończone segmentem zębatym "3", który obraca koło zębate "4". Z kołem tym jest sztywno powiązana wskazówka "5". Sprężyna "6" służy do kasowania luzów w układzie czujnika. Rozwiązanie przedstawione na rys. b posiada dodatkową parę elementów uzębionych ("7" i "8"), która pozwala na zwiększenie przełożenia czujnika.



Rys. 67. Wykres błędów czujnika o zakresie pomiarowym 5 mm, w którym jednemu obrotowi wskazówki odpowiada wartość 0,5 mm

linia ciągła – wartości wzorcowe narastają, linia przerywana – wartości wzorcowe maleją
a – błąd wskazań w całym zakresie (odległość pomiędzy najwyższym i najniższym położonym punktem);
b – błąd w zakresie 1 obrotu (pozioma odległość pomiędzy punktami odpowiadającymi jednemu obrotowi wskazówki);
c – histereza wskazań (maksymalna odległość pomiędzy punktami odpowiadającymi tej samej wartości wzorcowej)



Rys. 68. Zasada działania czujnika dźwigniowo-zębatego: a) z pojedynczą; b) z podwójną przekładnią zębatą

Analiza schematu pokazanego na rys. 68a prowadzi do wniosku, że pomiędzy przemieszczeniem trzpienia pomiarowego x a przemieszczeniem obwodowym końca wskazówki L istnieje zależność:

$$\angle = L \cdot \frac{r_s}{r_k} \arcsin \frac{x}{a},$$

gdzie:

L – długość wskazówki,

r_s – promień podziałowy segmentu zębatego "3",

r_k – promień podziałowy koła zębatego "4",

a – długość krótszego ramienia dźwigni kątowej "2".

Z przytoczonej wyżej zależności wynika, że charakterystyka czujnika dźwigniowo-zębatego nie jest liniowa. W praktyce przy skalowaniu czujników korzysta się z zależności przybliżonej $\angle = \frac{L}{a} \cdot \frac{r_s}{r_k} \cdot x$. Ponieważ przybliżenie to jest wystarczająco dobre tylko dla małych kątów wychylenia dźwigni, więc zakresy czujników tego typu nie mogą być zbyt duże.



Jako przykład czujnika należącego do grupy dźwigniowo-zębatych może służyć czujnik produkcji firmy Mahr o handlowej nazwie Millimess 1003 (rys. 69). Posiada on zakres pomiarowy $\pm 50 \mu\text{m}$, wartość działki elementarnej $1 \mu\text{m}$, nacisk pomiarowy – 1N oraz standardową średnicę chwytu $\phi 8\text{h}6$.

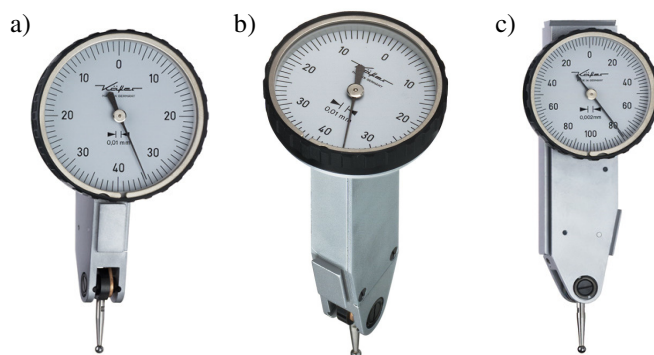
Innymi przykładami czujników należących do grupy dźwigniowo-zębatych są diatesty (różne odmiany) oraz transametry.

Diatesty charakteryzują się wychylną końcówką pomiarową. Dzieli się na szereg odmian, przy czym kryterium podziału stanowi położenie osi korpusu czujnika oraz płaszczyzny ruchu jego końcówki pomiarowej względem płaszczyzny podziałki. Cechy charakterystyczne poszczególnych odmian zestawiono

Rys. 69. Czujnik Millimess 1003

w tabeli 22, a ich widok pokazano na rys. 70.

Tabela 22. Klasyfikacja diatestów		
Odmiana diatestów	Położenie osi korpusu czujnika względem płaszczyzny podziałki	Położenie pł. ruchu końcówki pom. względem płaszczyzny podziałki
poziome	równoległe	prostopadłe
pionowe	prostopadłe	prostopadłe
równoległe	równoległe	równoległe
uniwersalne	równoległe	dowolne (nastawne)



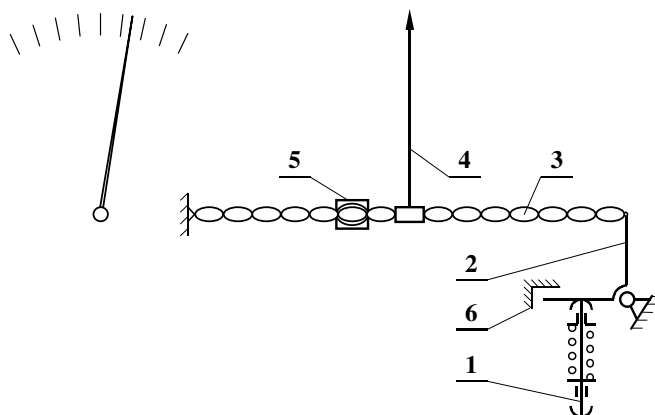
Rys. 70. Diatęsty firmy Kafer: a) poziomy; b) pionowy; c) równoległy [S20]

Podstawowe dane metrologiczne diatęstów:

- zakresy pomiarowe mieszczą się przeważnie w przedziale $(0,2 \div 1)$ mm, a najczęściej spotykaną wartością jest $0,8$ mm ($\pm 0,4$ mm);
- wartości działek elementarnych wahają się od $0,002$ mm do $0,01$ mm; najczęściej spotykaną jest wartość $0,01$ mm;
- błąd przyrządu nie przekracza z reguły wartości działki elementarnej.

Diatęsty są przeznaczone do kontroli wymiarów metodą porównania z wymiarem wzorcowym. W szczególności nadają się do kontroli wymiarów w miejscach trudno dostępnych, np. w szczelinach czy rowkach, jak również do kontroli odchyłek kształtu i położenia, a także powtarzalności kolejnych ustawień elementów konstrukcji.

Ostatnią przedstawianą w niniejszym opracowaniu odmianą czujników mechanicznych są czujniki sprężynowe. Zasadę ich działania pokazano na rys. 71.



Rys. 71. Zasada działania czujnika sprężynowego

Wciśnięcie końcówki pomiarowej "1" powoduje stosowny obrót dźwigni kątowej "2" i rozciągnięcie śrubowo skręconej sprężyny taśmowej "3". Sprężyna ta stanowi główny przetwornik czujnika. Wykonana jest w ten sposób, że na jednej połowie swojej długości posiada zwoje lewoskrętne, a na drugiej połowie – prawoskrętne. Z tego względu rozciąganie sprężyny powoduje obrót jej środka i związanej z nim wskazówki "4". Zaletą tego rozwiązania jest brak w układzie przetwarzania jakichkolwiek połączeń trących, dzięki czemu wyeliminowany został niemal całkowicie błąd histerezy. Odpowiednią stabilność wskazań czujnika zabezpiecza tłumik drgań skrętnych sprężyny, który na rysunku 55 oznaczono numerem "5". Do zabezpieczenia delikatnej sprężyny taśmowej przed ewentualnym przeciążeniem służy zderzak "6".

Znanym producentem czujników sprężynowych jest firma C.E. Johansson. Oferuje ona szeroką gamę tych czujników znanych pod firmową nazwą mikrokator. Zdjęcie jednego z mikrokatorów firmy C.E. Johansson przedstawiono na rys. 72, a podstawowe dane metrologiczne wybranych przedstawicieli tej rodziny zestawiono w tabeli 20.



Rys. 72. Mikrokator firmy C.E. Johansson

Tabela 23. Parametry metrologiczne mikrokatorów [S4, S17]				
Rodzaj czujnika	Zakres pomiar. [μm]	Wartość dz. element. [μm]	Średnica chwyty [mm]	Nacisk pomiarowy [N]
500A-2	400	5	8	1
500A-4	100	1	8	0,75
500A-5	50	0,5	8	0,75
500A-7	30	0,2	8	0,75
510-9	6	0,1	30	2,5

Ze względu na duże przełożenia ($k = 1000 \div 5\,000$) oraz eliminację błędu histerezy czujniki sprężynowe wyróżniają się w grupie czujników mechanicznych największą dokładnością. Ich wady to bardzo małe zakresy pomiarowe i duża wrażliwość na oddziaływania zewnętrzne.

4.6.2. Czujniki optyczne

W czujnikach optycznych (mechaniczno-optycznych) przeniesienie ruchu końcówki pomiarowej na urządzenie wskazujące odbywa się za pomocą różnego rodzaju elementów optycznych, takich jak lustra, soczewki czy pryzmaty, współpracujących z elementami przekładni mechanicznych (dźwignie, sprężyny, etc.).

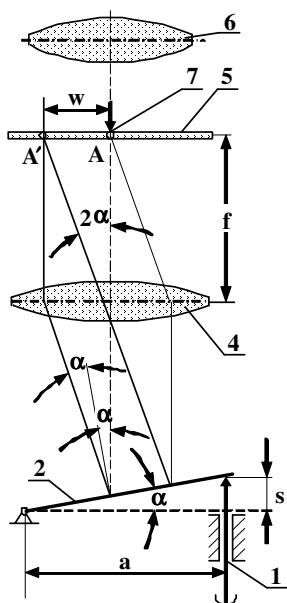
W grupie czujników optycznych wyróżnia się:

- ♦ optymetry: poziome, pionowe, projekcyjne oraz ultraoptymetry;
- ♦ optikatory;
- ♦ czujniki interferencyjne ($k = 100\,000$).

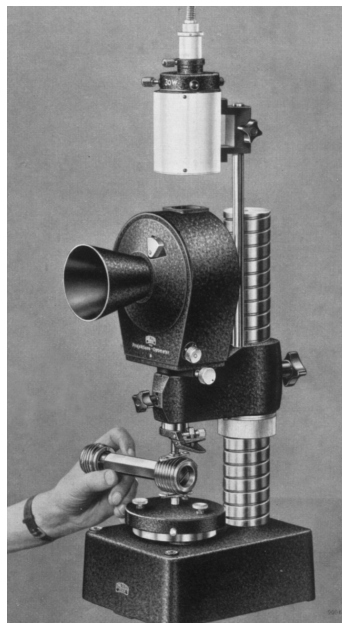
Czujniki mechaniczno-optyczne charakteryzują się z reguły dużą dokładnością, wysokimi przełoženiami (do 10 000x) i małymi wartościami działek elementarnych ($0,1 \mu\text{m} \div 1 \mu\text{m}$).

Czujniki mechaniczno-optyczne są przeznaczone do dokładnych pomiarów długości, w szczególności są wykorzystywane do sprawdzania wzorców długości (np. płytek wzorcowych).

Najbardziej popularną odmianą czujników optycznych są optometry. Zasadę działania optimetru pionowego przedstawiono na rys. 73.



Rys. 73. Zasada działania optimetru



Rys. 74. Optometr projekcyjny MOP 1/100

W polu widzenia okularu „6” znajduje się płytka „5” z niewidocznym przez okular wzorcem kreskowym (skalą) i widocznym przeciwwskaźnikiem „7”. Punkt A wzorca znajduje się w ognisku obiektywu „4”. Dlatego wysłane z tego punktu promienie światła po przejściu przez obiektyw będą zawsze równoległe i po odbiciu się od pochylnego lustra „2” nadal równoległe, lecz pod kątem 2α wpadają do obiektywu. Po skupieniu w obiektywie tworzą obraz kreski A w punkcie A’ leżącym w płaszczyźnie ogniskowej – tej samej, w której leży płytka „5” z widocznym przeciwwskaźnikiem „7”. W związku z tym w okularze widać przeciwwskaźnik na tle obrazu skali. Położenie obrazu skali zależy od kąta wychYLENIA zwierciadła „2”, które z kolei zależy od położenia końcówki pomiarowej „1”.

Jako przykład czujnika mechaniczno-optycznego może służyć optometr projekcyjny MOP1/100 produkcji niemieckiej firmy Carl Zeiss, którego widok pokazano na rys. 74.

Podstawowe dane metrologiczne tego przyrządu:

- wartość działki elementarnej – $1\text{ }\mu\text{m}$;
- zakres wskazań – $\pm 100\text{ }\mu\text{m}$;
- zakres pomiarowy – $0 \div 200\text{ mm}$;
- graniczna wartość błędu przyrządu – $\pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$.

4.6.3. Czujniki elektryczne

Czujniki elektryczne to przyrządy, w których zmiana położenia końcówki pomiarowej powoduje odpowiednią zmianę określonej wielkości elektrycznej. Zmiana tej wielkości decyduje z kolei o postaci i parametrach elektrycznego sygnału wyjściowego.

Elektryczna postać sygnału wyjściowego jest bardzo dogodna, umożliwia bowiem:

- a) łatwą zamianę tego sygnału na impulsy sygnalizacyjne, sterownicze bądź informacyjne;
- b) przesyłanie sygnału na odległość, co pozwala na rozdzielenie i dość znaczne oddalenie od siebie czujnika, przetwornika i urządzenia wyjściowego;
- c) łatwą zmianę czułości przyrządu w bardzo szerokich granicach.

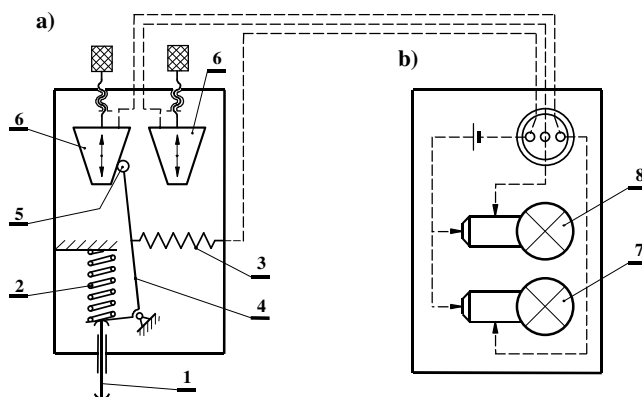
Czujniki elektryczne posiadają jeszcze szereg innych zalet, jak np.: korzystne charakterystyki dynamiczne (mała bezwładność) czy zdolność do osiągania małych wymiarów.

W zależności od rodzaju wielkości elektrycznej, zmieniającej się wraz ze zmianą położenia końcówki pomiarowej, czujniki elektryczne dzielimy na:

- a) elektrostatyczne;
- b) indukcyjne;
- c) pojemnościowe;
- d) fotoelektryczne.

Czujniki elektrostatyczne

Zasada działania czujników elektrostatycznych opiera się na skokowej zmianie oporności obwodu elektrycznego. Wyjaśnia ją schemat zamieszczony na rys. 75. Wciśnięcie końcówki pomiarowej 1 pokonuje opór sprężyny 2 i umożliwia sprężynie 3 obrócenie dźwigni 4. Odpowiednio ukształtowany koniec tej dźwigni, zwany zwieraczem (5), odchodzi wtedy od lewego styku nastawnego 6, co powoduje rozwarcie obwodu elektrycznego zasilającego żarówkę 7 sygnalizującą wymiar zbyt mały. Dalsze przesuwanie końcówki pomiarowej umożliwia takie wychylenie dźwigni 4, że zwieracz zetknie



Rys. 75. Zasada działania czujnika elektrostatycznego: a) głowica pomiarowa; b) urządzenie sygnalizujące

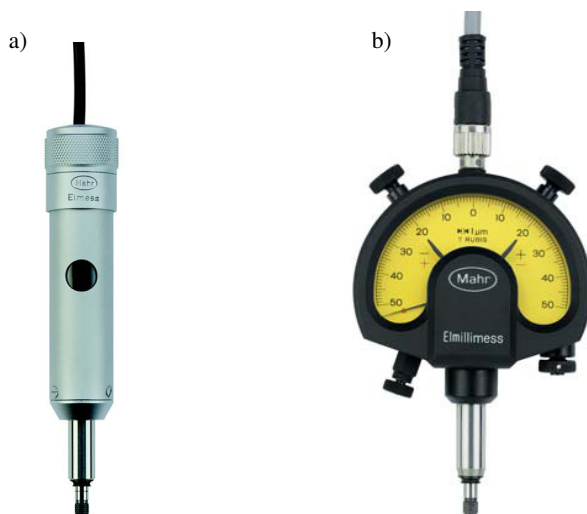
się z prawym stykiem nastawnym 6. Spowoduje to zamknięcie obwodu z żarówką 8 sygnalizującą wymiar zbyt duży. Nastawy położenia dźwigni 4, w których ma nastąpić skokowa zmiana oporności obwodów elektrycznych i związana z nimi zmiana sygnalizacji, dokonuje się poprzez wkręcanie i wykręcanie styków nastawnych 6. Regulacja ta umożliwia kontrolę wymiarów o różnych wartościach tolerancji.

Czujniki elektrostatyczne są przeznaczone do kontroli wymiarów liniowych i kątowych metodą porównania z wzorcowymi wymiarami granicznymi. Nie wskazują one wartości wielkości mierzonych, lecz nadają im jeden z trzech statusów: „wartość za małą”, „wartość dobra” (mieszcząca się w polu tolerancji) lub „wartość za duża”. Wynika stąd, że czujniki elektrostatyczne, podobnie jak sprawdziany, generują tylko dane alternatywne. A ponieważ do sterowania procesami znacznie bardziej przydatne są dane liczbowe (wartości mierzonych wielkości), więc prawdopodobnie z tego powodu popularność czujników elektrostatycznych nie jest zbyt duża i ciągle się zmniejsza. Ich funkcje przejmują inne czujniki elektryczne (np. indukcyjne), a nawet specjalne konstrukcje czujników mechanicznych (rys. 76b).

Klasyczny czujnik elektrostatyczny o fabrycznej nazwie Elmess 1100 pokazano na rys. 76a. Jego producentem jest niemiecka firma Mahr. Czujnik ten posiada zakres pomiarowy $\pm 0,4$ mm, średnicę chwytu 8 mm oraz nacisk pomiarowy 1,5 N. Pokazany obok (rys. 76b) czujnik Elzentimes 1110N stanowi specjalną konstrukcję czujnika mechanicznego. Od konstrukcji typowej różni się częścią elektryczną, której podstawowym elementem są styki elektryczne o regulowanym położeniu i przewód wyprowadzający sygnał pomiarowy.

Sygnały pomiarowe z urządzeń elektrostatycznych są wizualizowane za pomocą urządzeń sygnalizacyjnych (wskaźników). Typowy wskaźnik (np. wskaźnik 1141 SN produkcji firmy Mahr) posiada trzy lampki sygnalizujące wymiary za małe, dobre i za duże lub dobre, złe naprawialne i złe nienaprawialne (w tym drugim przypadku należy

odpowiednio ustawić przełącznik rodzaju mierzonego wymiaru). Wskaźniki urządzeń elektrostrykowych mogą również, jak to ma miejsce w przypadku wskaźnika MDNa produkcji OBR VIS, sterować pracą urządzeń elektrycznych poprzez otwieranie i zamykanie trzech obwodów elektrycznych tych urządzeń odpowiadających poszczególnym elementom sygnalizacji świetlnej.



Rys. 76. Czujniki z funkcją oceny mierzonych wymiarów produkcji firmy Mahr: a) głowica elektrostrykowa Elmess 1100; b) specjalna konstrukcja czujnika mechanicznego [S16]

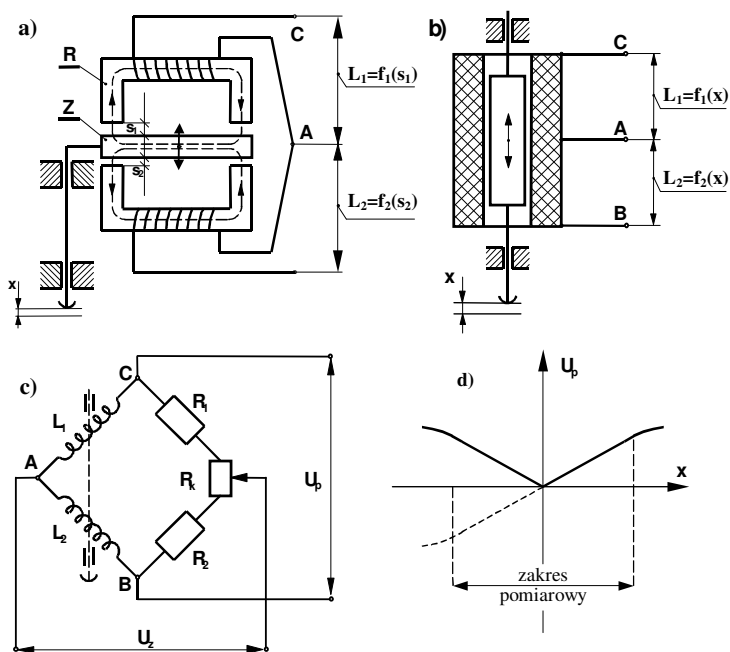
Czujniki elektrostrykowe stosuje się przeważnie w kontroli międzyoperacyjnej lub końcowej części maszyn produkowanych seryjnie.

Czujniki indukcyjne

Zasada działania czujników indukcyjnych jest oparta na zależności zachodzącej pomiędzy indukcyjnością własną (lub wzajemną) cewek przetworników a położeniem końcówki pomiarowej. Istnieją różne sposoby powiązania tych wielkości. Np. w czujniku indukcyjnym dławikowym (rys. 77a) na dwóch U-kształtnych ferromagnetycznych rdzeniach R nawinięte są cewki przetworników pomiarowych. Cewki te wytwarzają przemienne pole magnetyczne, którego linie sił zamykają się poprzez ferromagnetyczną zworę Z. Zwora ta jest połączona z końcówką pomiarową. Od położenia układu końcówka pomiarowa – zwora zależą wielkości szczelin s_1 i s_2 , które mają bardzo istotny wpływ na oporność magnetyczną obu obwodów, a w konsekwencji i na indukcyjności poszczególnych cewek. W czujniku indukcyjnym solenoidalnym (rys. 77b) końcówkę pomiarową powiązano z ferromagnetycznym rdzeniem, który przesuwają się wewnątrz dwóch jednakowych, nawiniętych jedna po drugiej cewek. Położenie końcówki pomiarowej decyduje o położeniu rdzenia, to zaś z kolei o indukcyjności poszczególnych cewek.

W każdym z prezentowanych rozwiązań konstrukcyjnych zachodzące w obu cewkach zmiany indukcyjności są ściśle ze sobą powiązane. Wzrostowi indukcyjności jednej z cewek odpowiada spadek indukcyjności drugiej i odwrotnie. Tego rodzaju układy określa się mianem różnicowych.

Zmiany indukcyjności cewek zostają następnie przekształcone w sygnał pomiarowy. W tym celu wykorzystuje się mostek Wheatstone'a (rys. 77c). Mostek ten jest zasilany napięciem zmiennym U_z z generatora. Przy równości indukcyjności L_1 i L_2 oraz rezystancji R_1 i R_2 spadki napięć w gałęziach AB i AC są jednakowe i pomiędzy punktami B i C nie występuje różnica potencjałów. Stan taki określa się mianem równowagi mostka.



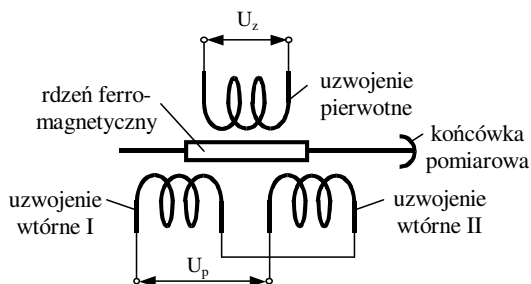
Rys. 77. Zasada działania czujnika indukcyjnego: a) czujnik indukcyjny dławikowy; b) czujnik indukcyjny solenoidalny; c) układ mostkowy; d) charakterystyka układu

Przesunięcie końcówki pomiarowej zmienia indukcyjność poszczególnych gałęzi. Pomiedzy wierzchołkami B i C powstaje zmienna różnica potencjałów U_p , której amplituda zależy od wielkości przesunięcia końcówki pomiarowej (rys. 77d). Przy przechodzeniu przez stan równowagi następuje zmiana fazy napięcia U_p o 180° . Pozwala to na określenie usytuowania końcówki pomiarowej w stosunku do położenia równowagi i zapewnienie wskazaniom czujnika odpowiedniego znaku (+ lub -). Potencjometr R_k (rys. 77c) służy do dodatkowej kompensacji zera.

Na nieco innej zasadzie, którą pokazano na rysunku 78, działają czujniki indukcyjne transformatorowe (zwane częściej czujnikami LVDT). Przetworniki tych czujników

składają się z trzech cewek nawiniętych na cienką tuleję wykonaną z materiału diamagnetycznego i przemieszczającego się wewnątrz tej tulei ferromagnetycznego rdzenia połączonego sztywno z końcówką pomiarową. Środkowa cewka, zasilana prądem przemiennym z generatora wzbudza w pozostałych dwóch cewkach siły elektromotoryczne indukcji. Cewki skrajne, jednakowe i symetrycznie rozmieszczone względem środkowej, są połączone przeciwsośnie, co oznacza, że sygnał pomiarowy jest różnicą sił elektromotorycznych indukowanych w każdej z nich. Wielkość siły elektromotorycznej indukowanej w cewkach zależy od położenia rdzenia; jego przemieszczanie powoduje, że siła elektromotoryczna w jednej z cewek rośnie, a w drugiej maleje. Położenie trzpienia, przy którym siły elektromotoryczne indukowane w obu cewkach są równe, nosi nazwę zera konstrukcyjnego przetwornika.

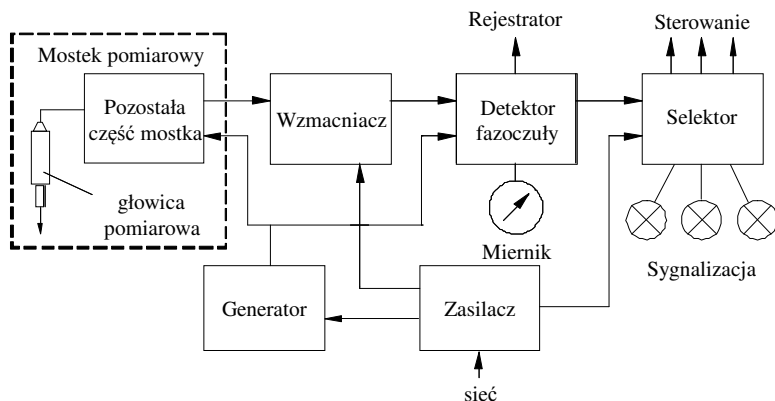
Charakterystyki amplitudowa i fazowa sygnału pomiarowego czujników LVDT są podobne jak w przypadku omawianych wcześniej rozwiązań.



Rys. 78. Zasada działania czujnika indukcyjnego transformatorowego (LVDT)

U_z – napięcie zasilające; U_p – sygnał pomiarowy

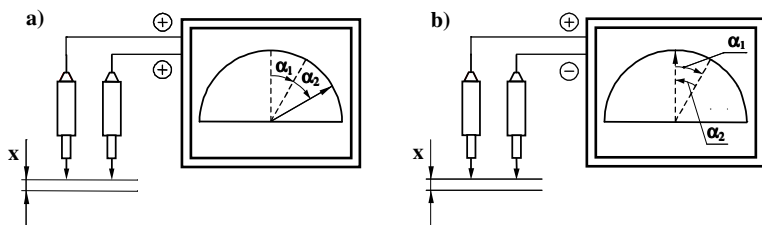
Zawierający informację o wielkości mierzonej sygnał pomiarowy U_p jest przetwarzany dalej w sposób zależny od budowy i funkcji wskaźnika. Przykładowy schemat blokowy wskaźnika przedstawiono na rys. 79.



Rys. 79. Schemat blokowy czujnika indukcyjnego

Mostek pomiarowy, którego część (cewki) znajduje się w głowicy pomiarowej, a pozostała część we wskaźniku, jest zasilany napięciem zmiennym z generatora. Sygnał pomiarowy, po uprzednim wzmocnieniu, jest przekazywany do detektora fazoczułego. W detektorze fazoczułym następuje porównanie fazy sygnału zasilającego i sygnału pomiarowego. W zależności od wyniku tego porównania, które umożliwia określenie, w którym kierunku względem zera konstrukcyjnego jest przesunięty rdzeń, sygnał pomiarowy po uprzednim wyprostowaniu otrzyma odpowiedni znak (+ lub -). Następnie sygnał pomiarowy jest doprowadzany do miernika i selektora (opcjonalnie również do rejestratora). Miernik, wyskalowany w jednostkach długości, wskazuje wartość wielkości mierzonej. Selektor to urządzenie sterujące sygnalizacją. Składa się z zespołu przetrzutników elektronicznych o nastawnych napięciach zadziałania. Przekraczanie tych napięć powoduje otwieranie i zamykanie obwodów elektrycznych. Mogą to być obwody zasilające elementy sygnalizacyjne (np. żarówki) lub różnego rodzaju urządzenia wykonawcze. W tym drugim przypadku mamy do czynienia z funkcją sterowania.

Realizacja niektórych zadań pomiarowych wymaga dodawania lub odejmowania dwóch różnych wyników pomiaru. W przypadku zastosowania czujników indukcyjnych operacji tych można dokonywać automatycznie poprzez odpowiednie łączenie sygnałów przychodzących jednocześnie z dwóch głowic pomiarowych. W zależności od sposobu łączenia tych sygnałów wyróżnia się układy sumujące i układy różnicowe głowic pomiarowych. Działanie poszczególnych układów przedstawiono na rys. 80, a przykłady ich wykorzystania w praktyce pomiarowej na rys. 81.

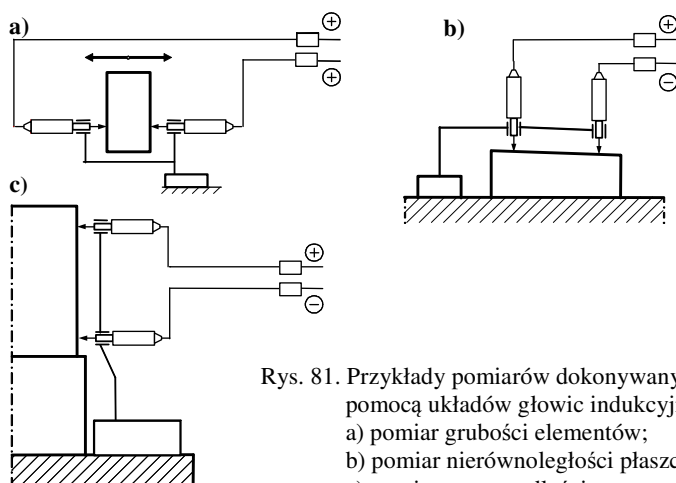


Rys. 80. Zasada działania układów głowic pomiarowych: a) sumującego; b) różnicowego

Poza automatycznym sumowaniem wyników układy głowic indukcyjnych mogą mieć jeszcze inne istotne zalety. Przykładowo, przedstawiony na rys. 81b różnicowy układ do pomiaru równoległości płaszczyzn jest mało wrażliwy na wpływy zewnętrzne (np. wpływ temperatury), ponieważ dochodzi w nim do kompensacji tych wpływów. Z kolei przedstawiony na rys. 81a sumujący układ do pomiaru grubości elementów jest mało wrażliwy na błędy ustawienia tych elementów w kierunku osi pomiaru.

Czujniki indukcyjne stanowią najbardziej rozpowszechnioną odmianę czujników elektrycznych. Wytwarzane są przez wielu producentów i w wielu różnych konfiguracjach. Najprostsze konfiguracje składają się z głowicy indukcyjnej oraz prostego typu wskaźnika (bez selektora). Najbardziej złożone mają postać elektronicznych wielowy-

miarowych systemów pomiarowych wyposażonych w wiele głowic indukcyjnych, przełączniki wielopozycyjne, mierniki, selektory, liczniki, monitory, drukarki, a nawet specjalizowane mikrokomputery.

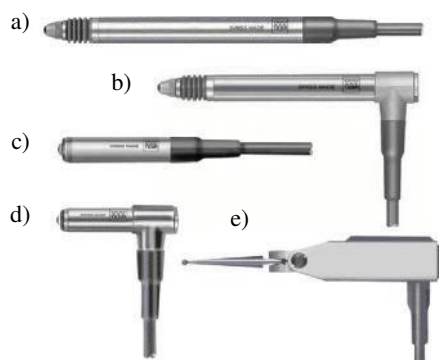


Rys. 81. Przykłady pomiarów dokonywanych za pomocą układów głowic indukcyjnych:
a) pomiar grubości elementów;
b) pomiar nierównoległości płaszczyzn;
c) pomiar prostokątności tworzącej.

Przykłady typowych, najczęściej występujących w praktyce rozwiązań konstrukcyjnych czujników indukcyjnych zaczerpnięto z katalogu jednego z bardziej znanych producentów tych czujników – szwajcarskiej firmy TESA. Firma ta produkuje kilka typów indukcyjnych głowic pomiarowych, kilkanaście typów wskaźników oraz wyposażone w głowice indukcyjne, modułowe, wielowymiarowe, elektroniczne systemy pomiarowe (TESAMODUL), a także różnego rodzaju akcesoria (końcówki pomiarowe, podnośniki trzpieni pomiarowych itp.).

Wybrane przykłady indukcyjnych głowic pomiarowych firmy TESA pokazano na rys. 82, a ich podstawowe dane metrologiczne zestawiono w tabeli 24.

Tabela 24. Podstawowe dane metrologiczne niektórych głowic pomiarowych firmy TESA					
Rodzaj głowicy	GT 21	GT 22	GT 31	GT 41	GT 42
Zakres pomiarowy	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 0,3 \text{ mm}$	$\pm 0,3 \text{ mm}$	$\pm 0,3 \text{ mm}$
Powtarzalność odczytu [μm]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Łożyskowanie trzpienia pom.	kulkowe	kulkowe	kulkowe	membranowe	membranowe
Długość głowicy	92 mm	81,5 mm	90 mm	47 mm	36 mm



Rys. 82. Indukcyjne głowice pomiarowe firmy TESA a) uniwersalna, z osiowym ruchem trzpienia pomiarowego i osiowym wyprowadzeniem przewodu (GT 21); b) jak a, tylko z bocznym wyprowadzeniem przewodu (GT 22); c) jak a, tylko miniaturowa (GT 41); d) jak c, tylko z bocznym wyprowadzeniem przewodu (GT 42); e) z poprzecznym ruchem trzpienia pomiarowego (GT 31)

Wskaźniki firmy TESA to przede wszystkim wskaźniki wchodzące w skład szeregu konstrukcyjnego o firmowej nazwie TESATRONIC, w szczególności wskaźniki TT10, TT20, TT60, TT80 i TTA20. Pokazano je na rys. 83.



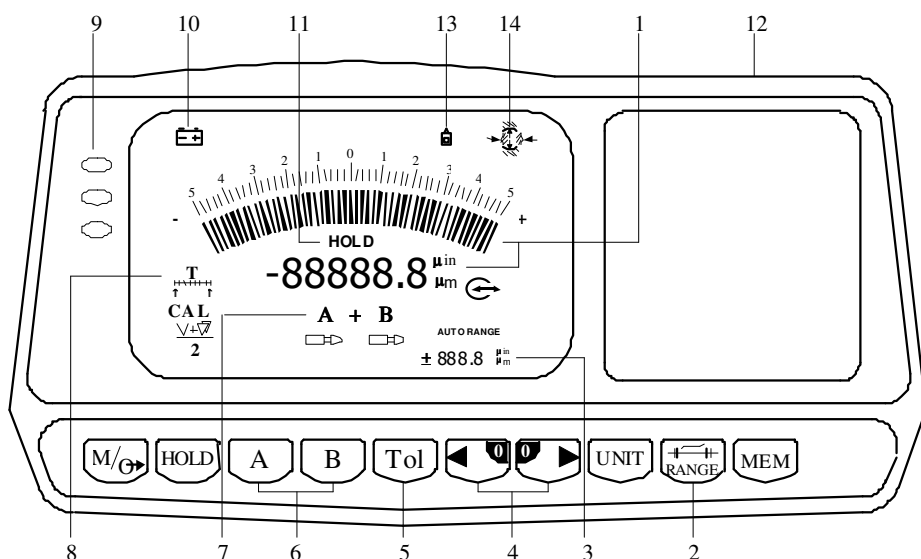
Rys. 83. Przykłady wskaźników czujników indukcyjnych produkcji firmy TESA należących do szeregu konstrukcyjnego TESATRONIC [S27]

TT10 – to zasilany bateryjnie, przenośny („kieszonkowy”) wskaźnik, który współpracuje z jedną głowicą pomiarową (każda standardowa głowica firmy TESA lub z nią kompatybilna). Posiada trzy przełączalne zakresy pomiarowe w układzie metrycznym i trzy w układzie calowym z możliwością automatycznego wyboru właściwego zakresu.

Niepewność wskazań wynosi 1,5% używanego zakresu, wskazanie w wersji cyfrowej i pseudoanalogowej, możliwość transmisji danych (złącze szeregowe RS-232).

TT20, TT60 i TT80 to wskaźniki stacjonarne, zasilane z sieci. Każdy z nich może współpracować z jedną lub dwoma (układ sumujący lub różnicowy) głowicami pomiarowymi. Posiadają po 7 (TT80 – 9) przełączalnych zakresów pomiarowych z możliwością automatycznego wyboru właściwego zakresu oraz możliwość wyboru jednostki (cale/milimetry). Posiadają możliwość klasyfikacji mierzonych wielkości (TT20 na trzy klasy, pozostałe nawet do 42 klas), wizualną sygnalizację poprawności wykonania sprawdzonego wymiaru, możliwość transmisji danych (złącze szeregowe RS-232). Wskazanie cyfrowe (zdolność rozdzielcza 0,1 μm , a w TT80 nawet 0,01 μm) i pseudoanalogowe (zdolność rozdzielcza w zależności od wybranego zakresu). Wskaźniki TT60 i TT80 posiadają pamięć pozwalającą zachować wartość maksymalną, wartość minimalną, ich średnią oraz różnicę dla wybranego zbioru położzeń końcówki pomiarowej. Ułatwia to bardzo przeprowadzenie niektórych pomiarów (np. pomiaru średnicy wałeczka).

Bardziej szczegółowy widok płyty przedniej wskaźnika TT60 pokazano na rys. 84.



Rys. 84. Widok wskaźnika TT60

1 – wyświetlacz analogowy i cyfrowy; 2 – klawisz przełącznika analogowych zakresów pomiarowych; 3 – wskaźnik skali analogowej; 4 – klawisze elektronicznej korekcji wartości wskazania; 5 – klawisz przełącznika trybu oceny; 6 – klawisze wyboru funkcji pomiarowej; 7 – wskaźnik funkcji pomiarowej; 8 – wskaźnik uaktywnienia trybu oceny; 9 – optyczny wskaźnik poprawności sprawdzonego wymiaru; 10 – wskaźnik poprawności zasilania; jego pojawienie się sygnalizuje, że napięcie zasilania wykracza poza dopuszczalne granice; 11 – wskaźnik trybu zachowania; 12 – obudowa ze składanym pod spód wspornikiem, umożliwiającym dwa różne pochylenia przyrządu; 13 – wskaźnik blokady klawiatury; 14 – wskaźnik rodzaju mierzonego wymiaru

TTA60 jest wskaźnikiem stacjonarnym, zasilanym z sieci, analogowym. Może współpracować z jedną lub dwoma (układ sumujący lub różnicowy) głowicami pomiarowymi. Posiada 6 przełączalnych zakresów pomiarowych (od $\pm 3 \mu\text{m}$, $w_e = 0,1 \mu\text{m}$; do $\pm 1000 \mu\text{m}$, $w_e = 50 \mu\text{m}$), przełącznik wyboru jednostki (cale / milimetry). Posiada możliwość klasyfikacji mierzonych wielkości (trzy klasy – dobre, złe naprawialne, złe nienaprawialne) oraz wizualną sygnalizację wyników tej klasyfikacji. Niepewność wskazania wynosi 1,5% używanego zakresu pomiarowego.

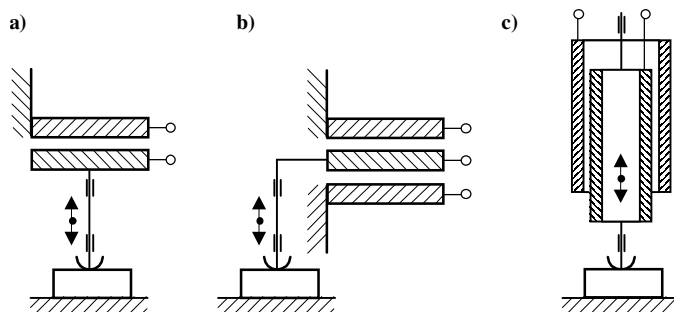
Idea bazującego na czujnikach indukcyjnych elektronicznego systemu pomiarów długości TESAMODUL sprowadza się do wytwarzania zbioru zunifikowanych jednostek, z których w zależności od potrzeb można tworzyć najrozmaitsze zwarte układy pomiarowe. System obejmuje ponad trzydzieści jednostek podstawowych, które w zależności od pełnionych funkcji można podzielić na zasilające, zasilająco-wskazujące, wskazujące, pomiarowe, klasyfikujące, zliczające, drukujące itd... Dobór jednostek wchodzących w skład tworzonego układu pomiarowego zależy od realizowanego przez ten układ zadania metrologicznego oraz od wymaganych od niego funkcji. Dzięki modułowej budowie i znormalizowanym wymiarom dobrane jednostki można wbudowywać w odpowiednie kasety z tworzyw sztucznych lub zunifikowane metalowe ramy typu regałowego.

Ważną zaletą systemu TESAMODUL jest jego elastyczność polegająca na możliwości rozbudowywania tworzonych układów poprzez wymianę lub dostawienie odpowiednich jednostek podstawowych. Wymiana taka z reguły nie wymaga przeprowadzania dodatkowych regulacji. System może współpracować z mikrokomputerem lub innymi urządzeniami peryferyjnymi, dzięki czemu możliwe jest automatyczne przetwarzanie uzyskiwanych wyników pomiarów oraz współpraca z układami sterującymi (np. pracą sortownika).

Czujniki pojemnościowe

Podstawowym elementem czujników pojemnościowych jest kondensator elektryczny. Okładki tego kondensatora są powiązane z końcówką pomiarową przyrządu tak, że przemieszczanie się końcówki wywołuje zmiany odległości pomiędzy okładkami bądź też zmiany czynnej ich powierzchni (rys. 85). W efekcie zmienia się również pojemność kondensatora. Zmiany pojemności kondensatora są w odpowiednim układzie elektrycznym (np. mostkowym czy rezonansowym) przetwarzane na sygnał pomiarowy.

Czujniki pojemnościowe, w porównaniu z czujnikami elektrostatycznymi czy indukcyjnymi mają bardziej rozbudowany układ elektryczny oraz większe wymiary. Są one również bardziej wrażliwe na zakłócenia zewnętrzne. Z tego względu nie znajdują szerszego praktycznego zastosowania.

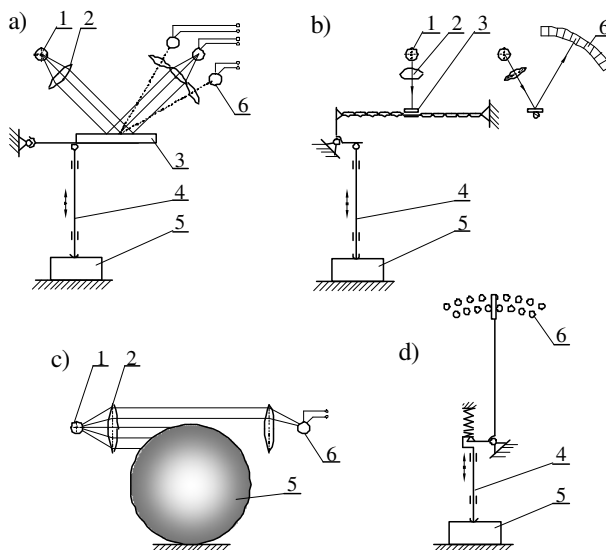


Rys. 85. Zasada działania czujników pojemnościowych: a) zmiana odległości pomiędzy okładkami, układ prosty; b) zmiana odległości pomiędzy okładkami, układ różnicowy; c) zmiana czynnej powierzchni okładek

Czujniki fotoelektryczne

Zasada działania czujników fotoelektrycznych jest oparta na powiązaniu mierzonego wymiaru z natężeniem lub kierunkiem wiązki światła padającego na układ odpowiednio rozmieszczonych fotoelementów. Za ich pośrednictwem padająca wiązka zostaje zamieniona na sygnał elektryczny, a zawarta w niej informacja o wartości wielkości mierzonej znajduje odbicie w postaci tego sygnału.

Przykładowe schematy rozwiązań konstrukcyjnych czujników fotoelektrycznych pokazano na rys. 86.



Rys. 86. Przykładowe schematy rozwiązań konstrukcyjnych czujników fotoelektrycznych

W rozwiązaniu konstrukcyjnym przedstawionym na rys. 86a źródło światła 1 emituje promienie, które poprzez układ optyczny 2 zostają uformowane w odpowiednią wiązkę. Wiązka ta pada na umieszczone na obrotowej dźwigni zwierciadło 3. Położenie dźwigni jest powiązane z położeniem końcówki pomiarowej 4, dzięki czemu położenie katowe zwierciadła 3, a więc i kierunek odbijanej przez nie wiązki świetlnej, zależy od wielkości mierzonej. Odbita wiązka pada na jeden z zespołu fotoelementów 6. Oświetlenie fotoelementu włączonego w odpowiedni układ elektroniczny powoduje powstanie właściwych dla mierzonego wymiaru impulsów sygnalizacyjnych i sterowniczych.

Na zbliżonej zasadzie działa czujnik fotoelektryczny określany mianem fotooptikatora (rys. 86b). Zwierciadło odbijające wiązkę jest w nim umieszczone na płaskiej, podwójnie skręconej sprężynie. Rozciąganie tej sprężyny powoduje obrót zwierciadła i zmianę kierunku odbijanej przez nie wiązki. Odbita wiązka pada na podziałkę, wskazując wynik. Jednocześnie oświetla ona jeden z rozmieszczonych wzdłuż podziałki fotoelementów, co powoduje powstanie stosownych impulsów sygnalizacyjnych i sterowniczych.

W rozwiązaniu przedstawionym na rys. 86c padająca na fotoelement wiązka świetlna jest przesłaniana bezpośrednio przez przedmiot mierzony. Od wymiaru tego przedmiotu zależy, jaka część wiązki dotrze do fotoelementu, i jaki w związku z tym będzie sygnał pomiarowy. Rozwiązanie to bywa wykorzystywane głównie w przyrządach do kontroli czynnej przy bezdotykowych metodach pomiaru.

W ostatnim z prezentowanych rozwiązań przesuw trzpienia pomiarowego powoduje obrót katowej dźwigni nierównoramiennej. Płasko ukształtowany koniec dłuższego ramienia tej dźwigni przemieszcza się nad zespołem odpowiednio rozmieszczonych fotoelementów i zakrywa (zaciemnia) jeden z nich. Stan oświetlenia fotoelementów zostaje przez układ elektroniczny czujnika przetworzony na stosowny sygnał pomiarowy. Rozwiązanie takie zastosowano m.in. w czujniku wyprodukowanym przez firmę KOPROTECH. Czujnik ten umożliwiał podział kontrolowanych przedmiotów na 23 grupy selekcyjne, z których każda posiadała pole tolerancji równe $1\text{ }\mu\text{m}$ [L11].

Czujniki fotoelektryczne znalazły zastosowanie głównie w automatach kontrolno-sortujących oraz niektórych przyrządach do kontroli czynnej. Ze względu na duże wymiary głowic nie cieszą się zbyt dużą popularnością.

4.6.4. Czujniki pneumatyczne

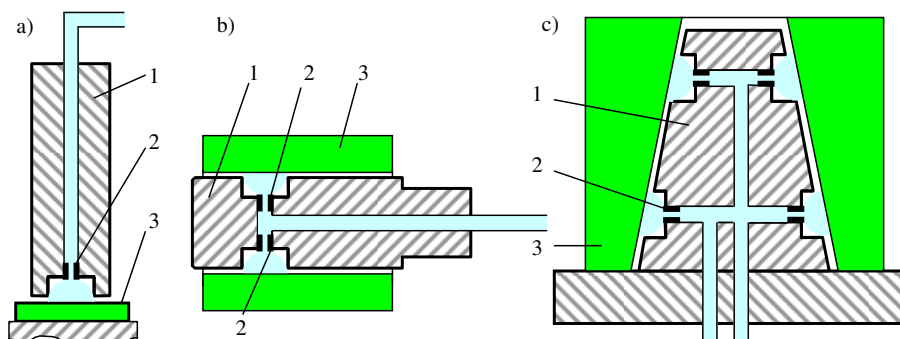
Czujniki pneumatyczne to czujniki, w których przez układ pomiarowy przepływa sprężone powietrze. Działanie tych czujników jest oparte na zależności parametrów przepływającego powietrza od wielkości szczeliny wylotowej, która z kolei zależy od mierzonego wymiaru.

Parametrami wykorzystywanymi przy konstruowaniu czujników pneumatycznych są ciśnienie, prędkość lub ilość przepływającego powietrza. W zależności od parametru, na którym oparto zasadę działania, czujniki pneumatyczne dzielą się na:

- a) ciśnieniowe
 - niskociśnieniowe;
 - wysokociśnieniowe;
- b) przepływowe (parametrem jest prędkość);
- c) natężeniowe (parametrem jest ilość).

Czujnik pneumatyczny (podobnie jak elektryczny) składa się z głowicy pomiarowej i wskaźnika. Połączone są one elastyczną rurką doprowadzającą sprężone powietrze. Głowica pomiarowa jest zwykle dostosowana do mierzonego przedmiotu (specjalnie dla tego przedmiotu zaprojektowana). Z tego względu czujniki pneumatyczne stosuje się przeważnie w produkcji wielkoseryjnej i masowej.

Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych głowic pomiarowych pokazano na rys. 87, a ich widok na rys. 88.



Rys. 87. Schematy głowic pomiarowych czujników pneumatycznych: a) do pomiaru wysokości (grubości); b) do pomiaru średnicy otworu; c) do pomiaru zbieżności stożka

1 – korpus głowicy; 2 – dysza; 3 – przedmiot mierzony

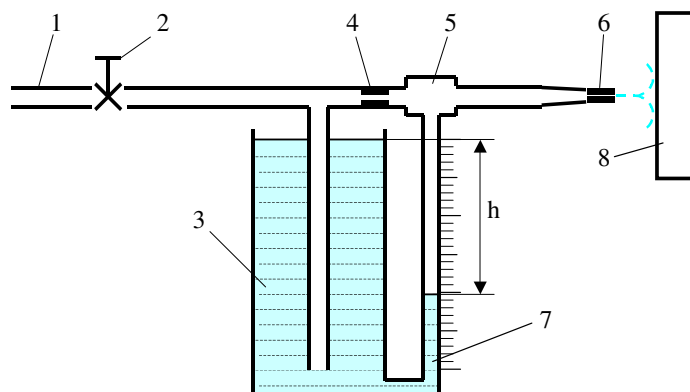
Najbardziej popularną odmianą czujników pneumatycznych są czujniki ciśnieniowe. Działają w oparciu o zależność $p = f(s)$, gdzie p oznacza ciśnienie panujące w komorze pomiarowej, a s – wielkość szczeliny zależną od mierzonego wymiaru.



Rys. 88. Głowice czujników pneumatycznych firmy Mahr do pomiaru: a) średnicy otworu; b) stożka wewnętrznego; c) stożka zewnętrznego; d) rozstawu osi otworów [S16]

W zależności od wielkości nadciśnienia sprężonego powietrza czujniki ciśnieniowe dzielą się na niskociśnieniowe (do 12 kPa) i wysokociśnieniowe (zwykle od 50 do 450 kPa).

Zasadę działania czujnika niskociśnieniowego przedstawiono na rys. 89.



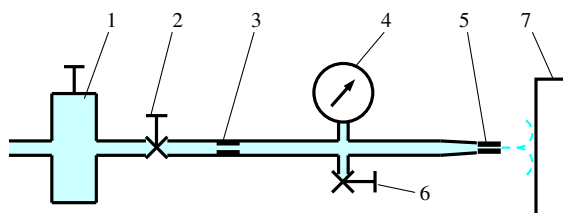
Rys. 89. Zasada działania czujnika pneumatycznego niskociśnieniowego

1 – przewód doprowadzający sprężone powietrze; 2 – zawór odcinający; 3 – zbiornik z wodą; 4 – element sterujący przepływem powietrza (dysza lub zawór); 5 – komora z ciśnieniem pomiarowym; 6 – dysza wylotowa; 7 – rurka manometru; 8 – przedmiot mierzony; h – wskazanie manometru

Otwarcie zaworu 2 doprowadza sprężone powietrze do pionowej, otwartej rurki zanurzonej na odpowiednią głębokość w zbiorniku z wodą 3. Rurka ta stabilizuje ciśnienie powietrza (gdy ciśnienie powietrza przekracza ciśnienie panujące w zbiorniku na poziomie końca rurki, nadmiar powietrza ulatnia się dnem rurki poprzez wodę zbiornika do atmosfery). Następnie powietrze przechodzi przez element 4 (dysza lub zawór iglicowy), który steruje wielkością jego przepływu i trafia do komory pomiarowej 5. Ciśnienie panujące w komorze 5 zależy od wielkości wypływu przez dyszę wylotową 6. Wielkość wypływu zależy od szczeliny pomiędzy dyszą 6 a przedmiotem mierzonym 8, a ta z kolei od mierzonego wymiaru. Od ciśnienia w komorze pomiarowej 5 zależy wysokość

słupa cieczy w rurce manometru 7, który wyskalowany jest w jednostkach wielkości mierzonej. Ponieważ ze względów praktycznych długości rurek manometrów nie przekraczają zazwyczaj wartości 1200 mm, więc nadciśnienie powietrza w omawianym rozwiązaniu nie przekracza wartości 1200 mmH₂O, czyli 12 kPa.

Większe wartości ciśnienia powietrza są stosowane w czujnikach pneumatycznych wysokociśnieniowych. Zasadę ich działania pokazano na rys. 90.



Rys. 90. Zasada działania czujnika pneumatycznego wysokociśnieniowego

1 – regulator ciśnienia wejściowego; 2 – zawór odcinający; 3 – element sterujący przepływem powietrza; 4 – manometr mechaniczny; 5 – dysza wylotowa; 6 – dodatkowy zawór pozwalający regulować wskazania manometru; 7 – przedmiot mierzony

Po otwarciu zaworu odcinającego powietrze o ciśnieniu ustabilizowanym na określonej wysokości w regulatorze 1 dociera do elementu 3 (dysza lub zawór) sterującego jego przepływem. Po przejściu elementu sterującego wypływa przez dyszę wylotową 5 na zewnątrz układu. Wskazania manometru 4 zależą od wielkości wypływu, ta zaś od szczeliny pomiędzy dyszą 5 a przedmiotem mierzonym 7. Szczelina z kolei zależy od mierzonego wymiaru. Dodatkowy zawór 6 służy do regulacji wskazań manometru. Manometr jest wyskalowany w jednostkach wielkości mierzonej. Ciśnienie powietrza stosowane w tej odmianie czujników posiada na ogół wartości od 50 kPa do 1000 kPa.

Parametrem dobrze charakteryzującym możliwości przyrządów pomiarowych jest ich czułość (p. rozdz. 2.5.2). W przypadku przyrządów do pomiaru długości czułość jest bezwymiarowa, czyli można ją określić mianem przełożenia. Przełożenie k czujników ciśnieniowych określa zależność :

$$k = \partial l / \partial s$$

gdzie:

∂l – zmiana położenia elementu wskazującego (przesunięcie obwodowe wskazówki manometru mechanicznego lub zmiana wysokości słupa wody w manometrze wodnym);

∂s – zmiana szczeliny pomiędzy głowicą pomiarową a przedmiotem.

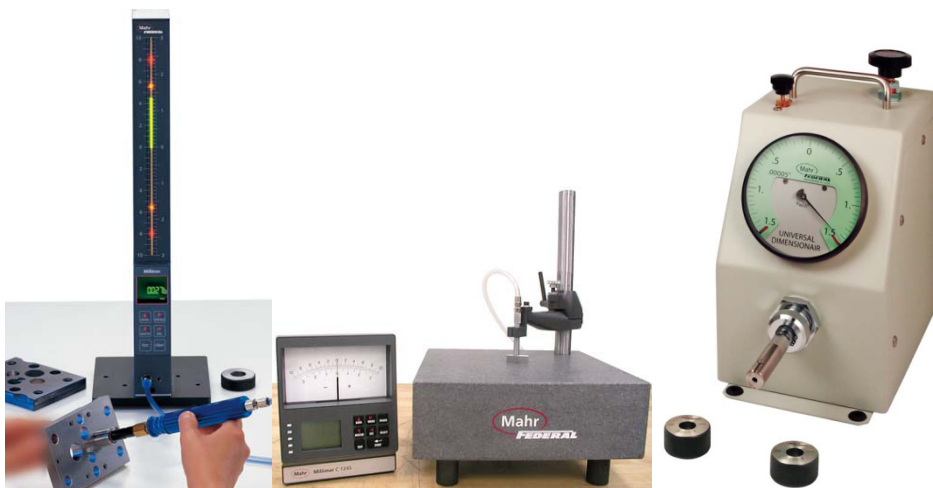
Przełożenia czujników pneumatycznych są stosunkowo duże, najczęściej $k = 2500 \div 10000$. Umożliwia to osiąganie bardzo wysokich rozdzielczości (niektóre czujniki pneumatyczne potrafią rozróżniać wielkości różniące się tylko o 0,05 μm).

Zakresy pomiarowe większości czujników pneumatycznych mieszczą się w przedziale od 5 μm do 200 μm .

Czujniki pneumatyczne posiadają szereg istotnych zalet. Do najważniejszych należą:

- sposób pobierania wielkości mierzonej (praktycznie bezdotykowy sposób pomiaru może być ważną zaletą przy pomiarze przedmiotów delikatnych lub mało sztywnych);
- samooczyszczanie (wypływające z głowicy powietrze zdmuchuje zanieczyszczenia z mierzonych powierzchni);
- odporność na zużycie (głowice pomiarowe nie mają kontaktu mechanicznego z mierzonymi przedmiotami);
- możliwość tworzenia różnych układów pomiarowych z większej ilości dysz wylotowych (np. układ sumujący, układ różnicowy, układ złożony z czterech dysz dający na wyjściu rozstaw osi dwóch otworów, p. rys. 88d);
- małe wymiary głowic pomiarowych oraz możliwość ich stosowania w miejscach trudno dostępnych.

Do wad czujników pneumatycznych należy zaliczyć konieczność dysponowania przez ich użytkowników sprężonym powietrzem oraz konieczność dostosowywania głowic pomiarowych do specyfiki mierzonych przedmiotów.



Rys. 91. Czujniki pneumatyczne produkcji firmy Mahr [S16]

4.7. KĄTOMIERZE

Kątomierze to grupa przyrządów przeznaczonych do bezpośredniego pomiaru wymiarów kątowych, powszechnie używana zarówno w praktyce warsztatowej, jak i w laboratoriach pomiarowych. Kątomierze wykorzystuje się również do odtwarzania żądanych wartości kątów względnie przenoszenia ustawionej wartości kąta na przedmiot sprawdzany.

Przy klasyfikacji kątomierzy stosuje się zwykle dwa kryteria ich podziału: zastosowanie i zasadę działania.

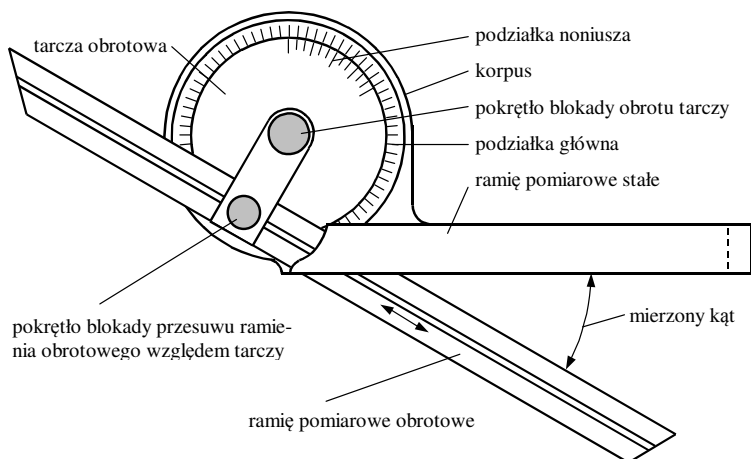
Ze względu na zastosowania kątomierze dzieli się na:

- ♦ kątomierze uniwersalne;
- ♦ kątomierze specjalne (jako przykład kątomierzy specjalnych mogą służyć tzw. kątomierze narzędziowe przystosowane do pomiaru kątów skrawania w narzędziach skrawających).

Ze względu na zasadę działania kątomierze dzieli się na:

- ♦ kątomierze mechaniczne;
 - noniuszowe;
 - zegarowe;
- ♦ kątomierze optyczne;
- ♦ kątomierze elektroniczne.

Budowę i zasadę działania kątomierza mechanicznego noniuszowego pokazano na rys. 92.

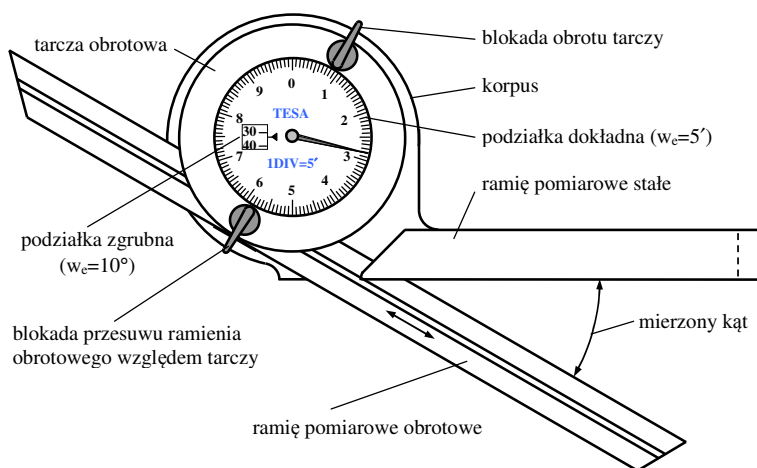


Rys. 92. Budowa i zasada działania kątomierza noniuszowego

Na pełnym obwodzie cylindrycznej części korpusu naniesiona jest podziałka kątowa o wartości działki elementarnej 1° . W środku zamontowana jest obrotowa tarcza, na obwodzie której naniesiona jest podziałka noniusza (24 działki, po 12 działek na lewo i prawo od kresy zerowej). Do płaskiego ścięcia tej tarczy dociskane jest za pomocą zacisku mimośrodowego ramię pomiarowe obrotowe. Po zaciśnięciu ramię to stanowi z tarczą jedną sztywną całość, po zwolnieniu zacisku można je przemieszczać względem tarczy w kierunku zaznaczonym na rysunku strzałkami. Drugie ramię pomiarowe jest sztywno powiązane z korpusem lub wręcz stanowi jego fragment. Do regulacji sił tarcia związanych z obrotem tarczy służy umieszczone w jej środku pokrętko, którym w skrajnym przypadku obrót tarczy można zablokować całkowicie. Do tarczy bardzo często montowana jest umieszczona tuż nad kresami noniusza lupka, której zadaniem jest ułatwienie odczytu wskazań. W wyposażeniu przyrządu znajdują się dwa wymienne ramiona pomiarowe o różnych długościach, liniał do pomiaru małych kątów ($\alpha \leq 15^\circ$) oraz podstawa służąca do zamocowania kątomierza (przy pomiarach na płycie mierniczej).

Zakres pomiarowy kątomierza noniuszowego wynosi $4 \times 90^\circ$ ($0^\circ \div 90^\circ$; $90^\circ \div 0^\circ$; $0^\circ \div 90^\circ$ i $90^\circ \div 0^\circ$), zdolność rozdzielcza odczytu – $5'$, a graniczna wartość błędu pomiaru – $\pm 5'$.

Budowę i zasadę działania kątomierza mechanicznego zegarowego pokazano na rys. 93. Jego konstrukcja jest bardzo podobna do konstrukcji kątomierza noniuszowego. Istotne różnice występują w zasadzie tylko w części wskazującej. Na obrotowej tarczy naniesiona jest podziałka kątowa zgrubna, o wartości działki elementarnej $w_e = 10^\circ$. Mały fragment tej podziałki widać w oknie wyciętym w nieruchomej tarczy zegara. Na obwodzie tej tarczy naniesiona jest podziałka dokładna (120 działek tej podziałki odpowiada jednej działce elementarnej podziałki zgrubnej). Wskazówka jest napędzana przez obrotową tarczę za pośrednictwem przekładni zębatej o przełożeniu 36:1.

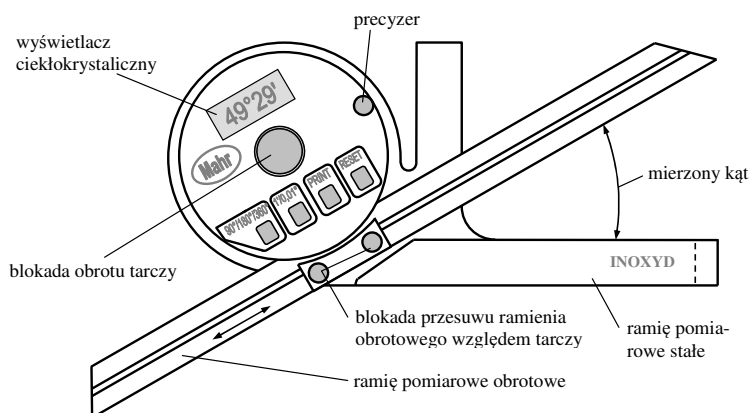


Rys. 93. Budowa i zasada działania kątomierza zegarowego produkcji firmy TESA

Zakres pomiarowy kątomierza zegarowego wynosi $4 \times 90^\circ$, wartość działki elementarnej – $5'$ (dzieląc działkę elementarną na części, można bez większego trudu odczytywać wynik ze zdolnością rozdzielczą $1'$), graniczna wartość błędu przyrządu – $\pm 5'$.

Kątomierze optyczne działają w oparciu o kreskowy wzorec kąta naniesiony na płycie szklanej znajdującej się wewnątrz obudowy przyrządu. Do odczytu wskazania służy okular o powiększeniu $(16 \div 40) \times$. Okular może być zaopatrzony w przeciwwskaznik (wtedy podziałka kątowa wzorca jest gęsta, wartości działek elementarnych wynoszą od $2,5'$ do $10'$) albo w noniusz (wtedy podziałka wzorca kreskowego posiada wartość działki elementarnej $w_e = 1'$, a noniusz umożliwia odczyt ze zdolnością rozdzielczą $5'$). Kątomierze optyczne produkowały m.in. Polskie Zakłady Optyczne oraz niemiecka firma Mahr. Obecnie w ofertach producentów sprzętu pomiarowego raczej nie występują.

Ostatnią z przedstawionych w tym opracowaniu odmian kątomierzy stanowią kątomierze elektroniczne. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego takiego kątomierza pokazano na rys. 94.



Rys. 94. Widok kątomierza elektronicznego produkcji niemieckiej firmy MAHR

Podstawowe dane metrologiczne kątomierzy elektronicznych:

- ◆ zakres $0 \div 360^\circ$, który w razie potrzeby można przełączyć na $2 \times 180^\circ$ lub $4 \times 90^\circ$;
- ◆ wartość działki elementarnej – $1'$ (z możliwością przełączenia na $0,01^\circ$);
- ◆ graniczna wartość błędu przyrządu $\pm 2'$;
- ◆ powtarzalność wskazań $1'$;
- ◆ możliwość wyzerowania wskazań dla dowolnego położenia ramion pomiarowych (istotna zaleta przy pomiarach porównawczych);
- ◆ możliwość precyzyjnego ustawiania wartości kąta pochylenia ramienia obrotowego (tzw. precyzer).

Z powyższych danych wynika, że kątomierze elektroniczne mają w stosunku do kątomierzy mechanicznych i optycznych cały szereg zalet. Niestety, są również znacznie droższe.

4.8. POZIOMNICE

Poziomnice są przyrządami służącymi do pomiaru bardzo małych kątów odchylenia od poziomu lub pionu. W zasadzie można je uznać za detektory poziomu (lub pionu).

Ze względu na zasadę działania poziomnice można podzielić na ampułkowe i wahadełkowe. Jedne i drugie wykorzystują jako odniesienie kierunek linii sił pola grawitacyjnego ziemskiego (rys. 95).



Rys. 95. Poziomnice: a) poziomnica ampułkowa; b) poziomnica wahadełkowa [S26]

Zasadę działania poziomnicy ampułkowej przedstawiono na rys. 96. Zamknięta, kołowo wygięta rurka szklana jest wypełniona niemal całkowicie cieczą (najczęściej jest to zabarwiony alkohol). Pozostałą część rurki zajmuje pęcherzyk powietrza, który ze względu na mniejszy ciężar właściwy jest wypierany przez ciecz w położenie najwyższe.

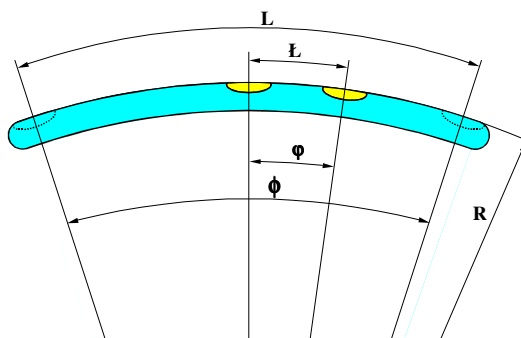
Równanie przetwarzania poziomnicy ampułkowej jest postaci:

$$L = \frac{2 \cdot \pi}{\Omega} \cdot R \cdot \varphi \quad (4.15)$$

gdzie:

- L – przemieszczenie pęcherzyka spowodowane zmianą pochylenia rurki o kąt φ ;
- R – promień wygięcia rurki;
- Ω – kąt pełny (360° lub $2 \cdot \pi$ radianów).

W takim razie czułość poziomnicy $C = \frac{\partial L}{\partial \varphi} = \frac{2 \cdot \pi}{\Omega} \cdot R$ (4.16)



Rys. 96. Zasada działania poziomnicy ampułkowej: zmiana kąta pochylenia rurki spowoduje liniowe przemieszczenie pęcherzyka

Oznaczając maksymalną możliwą zmianę kąta pochylenia rurki (zakres pomiarowy poziomnicy) przez Φ oraz odpowiadające mu przemieszczenie pęcherzyka (całkowita długość podziałki) przez L i wykorzystując zależność (4.16) otrzymamy:

$$L = C \cdot \Phi \quad \text{lub równoważne} \quad \Phi = L / C$$

Z powyższych zależności wynika, że zakres pomiarowy poziomnicy jest odwrotnie proporcjonalny do jej czułości, czyli że chcąc zwiększyć czułość, musimy proporcjonalnie ograniczyć zakres pomiarowy (i odwrotnie).

Ponieważ stosowane w praktyce czułości poziomnic są przeważnie dość duże, więc ich zakresy pomiarowe osiągają bardzo małe wartości. Przykładowo, poziomnica o czułości $C = 1 \text{ mm} / 10'' = 6 \text{ mm} / 1'$ i długości rurki $L = 12 \text{ cm}$ będzie miała zakres:

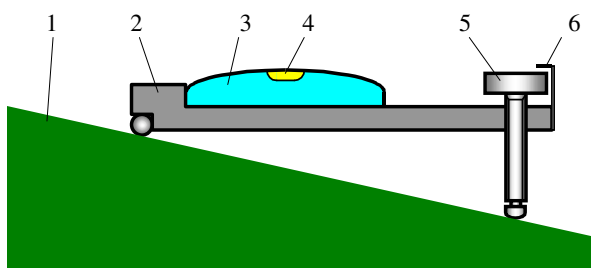
$$\Phi = 120 \text{ mm} / 6 \text{ mm} / 1' = 20' (\pm 10').$$

Ponieważ użytkownikom przyrządów zależy najczęściej i na wysokiej czułości, i na możliwie dużym zakresie pomiarowym, więc producenci stworzyli konstrukcje, w których do pomiaru kąta wykorzystywany jest kątomierz, a dokładna poziomnica pełni jedynie rolę detektora poziomu (służy do ustawienia kątomierza). Rozwiązania takie określa się mianem kątomierzy poziomnicowych.

Schemat rozwiązania umożliwiającego uzyskanie stosunkowo wysokiej czułości, przy znacznie rozszerzonym w stosunku do zwykłej poziomnicy zakresie, pokazano na rysunku 97. W rozwiązaniu tym ampułka poziomnicy 3 jest sztywno powiązana z korpusem 2 przyrządu. W celu pomiaru kąta pochylenia powierzchni obiektu mierzonego 1 należy tak ustawić śrubę mikrometryczną 5, aby pęcherzyk 4 poziomnicy zajął położenie zerowe. Śruba mikrometryczna jest zakończona tarczą z podziałką obwodową, na której wskaźnik 6 wskazuje wartość mierzonej wielkości.

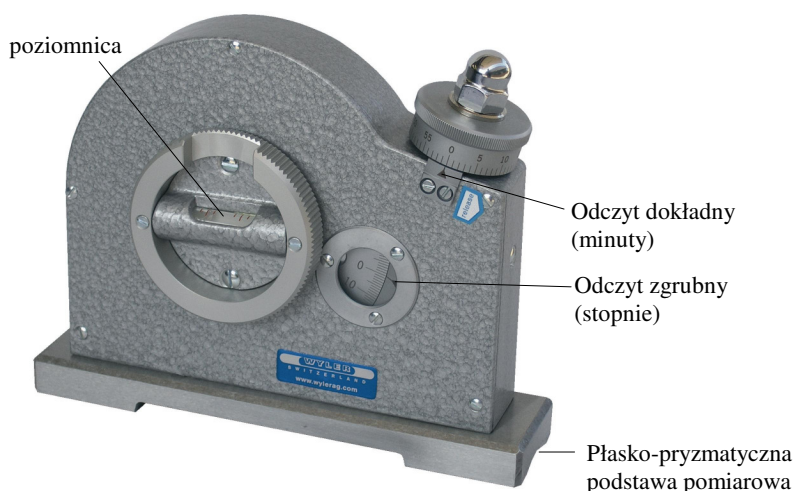
Przedstawione wyżej rozwiązanie można dodatkowo wyposażać w układ optyczny, który znacznie zwiększa precyzję ustawienia pęcherzyka. Rozwiązania posiadające taki układ noszą nazwę poziomnic koincydencyjnych. Poziomnice koincydencyjne

posiadają zakres pomiarowy $\pm 5^\circ$, przy wartości działki elementarnej $w_e = 0,01 \text{ mm/1 m}$ (około $2''$). Bardziej szczegółowe informacje na temat poziomnic koincydencyjnych można znaleźć w [L7, L28].



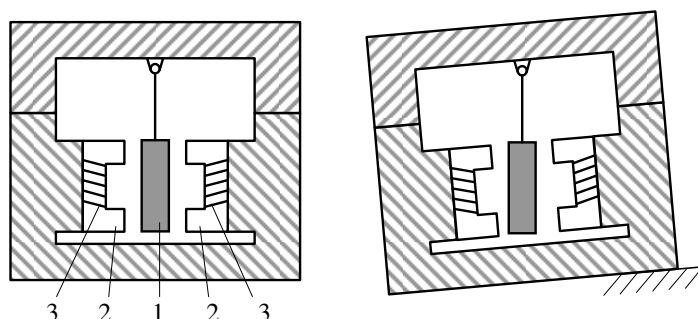
Rys. 97. Schemat rozwiązania konstrukcyjnego rozszerzającego zakres pomiarowy poziomnicy

Przykład kątomierza poziomnicowego pokazano na rys. 98. Kątomierz ten, produkcji firmy Wyler, posiada zakres pomiarowy $\pm 45^\circ$ i wartość działki elementarnej $1'$.



Rys. 98. Kątomierz poziomnicowy produkcji szwajcarskiej firmy Wyler [S29]

Poziomnice wykorzystujące wahadełko to najczęściej poziomnice elektroniczne. Zasadę ich działania pokazano na rys. 99. W górnej części korpusu przyrządu zawieszona jest ferromagnetyczna zwora 1, która przy pochylaniu korpusu poziomnicy przemieszcza się (na zasadzie wahadła) pomiędzy dwoma ukształtowanymi ferromagnetycznymi rdzeniami 2. Na rdzenie te nawinięte są dwie identyczne cewki 3 zasilane prądem przemiennym. Układ przetwarzania kąta jest analogiczny jak w przedstawionych w rozdziale 4.6.3 czujnikach indukcyjnych, z tą różnicą, że urządzenie wskazujące jest wyskalowane w jednostkach kąta.



Rys. 99. Schemat przedstawiający zasadę działania poziomnicy elektronicznej

Przykładową poziomnicę elektroniczną pokazano na rysunku 100. Jest to poziomnica produkcji szwajcarskiej firmy WYLER AG o fabrycznej nazwie CLINO 2000. CLINO 2000 może wyświetlać mierzone kąty w wielu różnych jednostkach, przykładowo: w stopniach i dziesiętnych częściach stopnia; w stopniach, minutach i sekundach; w milimetrach na metr; w calach na 10 cali; w miliradianach. Sposób podania informacji o zakresie i zdolności rozdzielczej zależy od wyboru jednostki. Dla jednostki „stopnie, minuty i sekundy” wartość zakresu pomiarowego wynosi $\pm 45^\circ$, a zdolność rozdzielcza – 5". Clino 2000 jest zaprojektowana jako samodzielny przyrząd, ale może również pracować w układzie z innym przyrządem tego samego typu. Może również współpracować bezpośrednio z komputerem (ma wbudowany interfejs RS 232C). Zasilanie bateryjne.



Rys. 100. Poziomnica elektroniczna CLINO 2000 [S29]

4.9. ELEKTRONICZNE NARZĘDZIA POMIAROWE

4.9.1. Elektroniczne przetworniki położenia

Szeroki rozwój automatyzacji różnych procesów wytwórczych, uwarunkowany m.in. możliwością automatycznego sterowania ruchem bądź pozycjonowania różnych zespołów maszyn i urządzeń stworzył duże zapotrzebowanie na automatyczne pomiary położenia. Zapotrzebowanie to spowodowało rozwój specjalnych przetworników pomiarowych długości i kąta charakteryzujących się dużą szybkością działania, wysoką dokładnością, dość dużym zakresem pomiarowym oraz wygodną, elektryczną postacią sygnału wyjściowego. Ze względu na przetwarzaną wielkość przetworniki te można podzielić na liniowe i kątowe, a ze względu na zasadę działania na przetworniki położenia przyrostowe i przetworniki położenia absolutne.

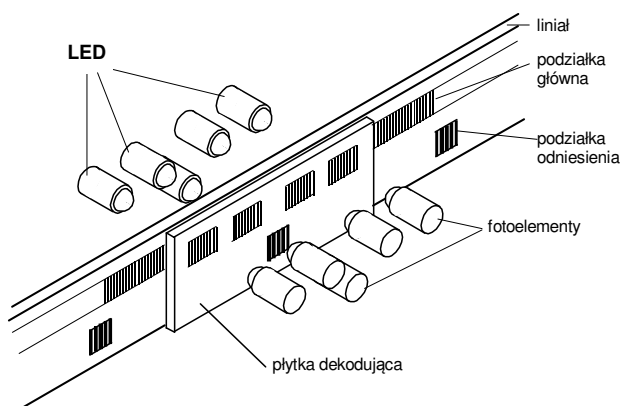
Przetworniki przyrostowe, nazywane również przetwornikami impulsowymi bądź przetwornikami inkrementalnymi, generują w trakcie ruchu mierzonego elementu ciąg impulsów elektrycznych. Ilość tych impulsów, określana przez znajdujący się w układzie pomiarowym licznik, jest miarą wielkości przemieszczenia względem dowolnie wcześniej obranego punktu odniesienia.

Zasada działania przetworników przyrostowych jest oparta na materialnych wzorach, w których na określonej odległości liniowej bądź kątowej występują bardzo regularne zmiany właściwości fizycznych: optycznych, magnetycznych lub elektrycznych.

W zależności od rodzaju zmieniającej się właściwości oraz sposobu wykorzystania tych zmian w grupie przetworników przemieszczeń wyróżniamy:

- przetworniki optoelektroniczne;
- przetworniki elektromagnetyczne;
- przetworniki pojemnościowe;
- przetworniki z wzorcami falowymi.

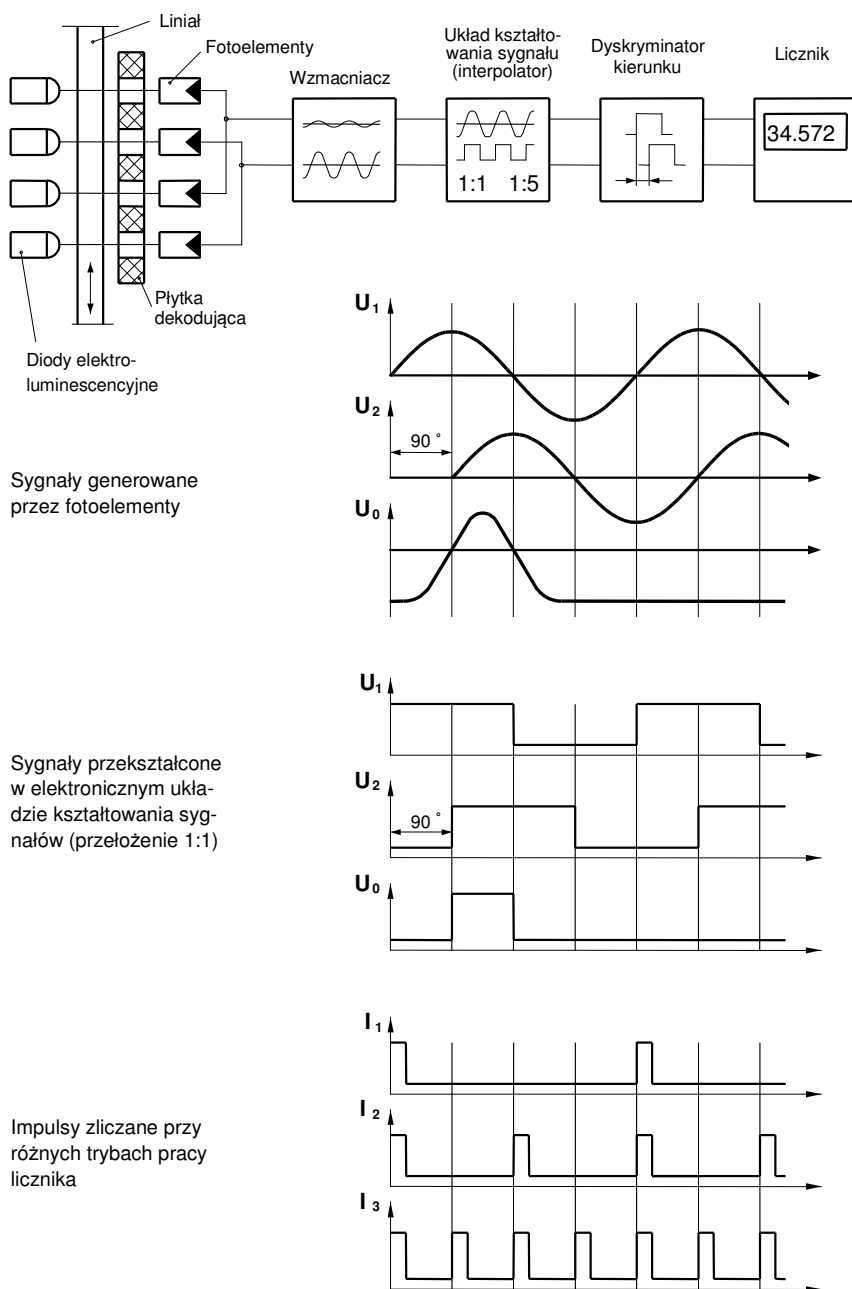
W przetwornikach optoelektronicznych zmiany położenia mierzonego zespołu wywołują zmiany natężenia światła padającego na jakiś fotelement (fotoogniwo, fotodiode, fotorezystor czy fototranzystor). W efekcie zmieniają się parametry elektryczne tego fotelementu, co powoduje, że w obwodzie elektrycznym, do którego jest on włączony, powstaje sygnał elektryczny zawierający informację o wielkości mierzonej. Rozwiązania konstrukcyjne przetworników optoelektronicznych są dość zróżnicowane. Jedno z nich, dość powszechnie stosowane w pomiarach przemieszczeń, pokazano na rysunkach 101 i 102. Podstawowym elementem tego przetwornika jest stanowiący wzorec długości szklany linał, na którym naniesiona jest siatka z na przemian po sobie następujących przezroczystych i nieprzezroczystych pasków o jednakowej szerokości. W większości istniejących rozwiązań podziałka tej siatki waha się od 8 do 40 μm , a jej długość



Rys. 101. Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne przetwornika optoelektronicznego (opracowano na podstawie [L24])

od 100 mm do 6000 mm [S19]. W dolnej części liniału naniesionych jest kilka analogicznych pasków, przeważnie o mniejszej podziałce. Stanowią one element odniesienia umożliwiające korekcję błędów licznika lub odtworzenie pozycji odniesienia po nagłym przerwaniu pracy układu.

Wzdłuż opisanego wyżej liniału przemieszcza się głowica odczytowa, której głównymi elementami są: źródło światła, płytka dekodująca i fotoelementy. Płytkę dekodującą ma pięć okien odczytowych zaopatrzonych w identyczne siatki pasków jak liniał. Cztery z nich służą do obserwacji skali głównej liniału a piąte do obserwacji skali odniesienia. Umieszczone naprzeciwko okien odczytowych fotoelementy są oświetlane przez znajdujące się po drugiej stronie liniału źródło światła – miniaturową żarówkę lub diody elektroluminescencyjne. Aby dotrzeć do fotoelementów, promienie światła muszą przejść zarówno przez liniał, jak i przez płytkę dekodującą. Ponieważ promienie mogą przechodzić tylko przez paski przezroczyste, natężenie oświetlenia fotoelementów zależy od wzajemnego położenia siatek liniału i głowicy i zmienia się w trakcie ich wzajemnego przemieszczania. Maksymalne oświetlenie wystąpi w przypadku, gdy przezroczyste paski liniału pokryją się dokładnie z przezroczystymi paskami okna, a minimalne, gdy przezroczyste paski liniału zostaną całkowicie przysłonięte. Wynika stąd, że pełny okres zmian intensywności oświetlenia fotoelementu odpowiada podziałce siatki. Zmiany intensywności oświetlenia zostają przez poszczególne fotoelementy zamienione na sygnały elektryczne. Ponieważ siatki pasków w kolejnych oknach płytki dekodującej są przesunięte względem siebie o $1/4$ podziałki, więc poszczególne sygnały elektryczne będą miały przesunięte fazy, odpowiednio o 90° , 180° i 270° , względem sygnału pochodzącego z pierwszego okna. Sygnały z fotoelementów mających wzajemne przesunięcie fazowe równe 180° są połączone różnicowo. W efekcie uzyskuje się dwa sygnały U_1 i U_2 (rys. 102), które są symetryczne względem zera, mają kształt zbliżony do sinusoidy i są przesunięte względem siebie, w zależności od kierunku ruchu liniału, o 90° lub o -90° . Sygnały te



Rys. 102. Zasada działania przetwornika optoelektronicznego

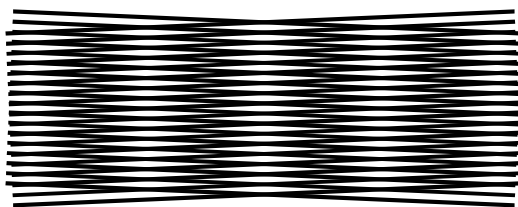
oraz pochodzący z piątego fotoelementu pojedynczy impuls odniesienia U_0 zostają po uprzednim wzmacnieniu przesłane do specjalnego układu elektronicznego, zwanego interpolatorem. Interpolator, którego zasadę działania przedstawiono w [L7], przetwarza sygnały wejściowe, zmieniając zarówno ich kształt, jak i częstotliwość. Z jednej sinusoidy tworzone jest najczęściej 5, 10 lub 25 przebiegów prostokątnych. Przetworzone sygnały zostają skierowane kolejno do dyskryminatora kierunku i licznika. Dyskryminator określa znak przesunięcia fazowego obu sygnałów i ustala na tej podstawie kierunek zliczania licznika. Licznik może pracować w jednym z następujących trybów:

- zliczać zbocza rosnące jednego z sygnałów (przełożenie 1:1);
- zliczać zbocza rosnące i zbocza malejące jednego z sygnałów (przełożenie 2:1, dwukrotny wzrost rozdzielczości odczytu);
- zliczać oba rodzaje zboczy w obu sygnałach (przełożenie 4:1, czterokrotny wzrost rozdzielczości odczytu).

Rozdzielczość przetwornika optoelektronicznego zależy od podziałki liniału, przełożenia układu kształtującego sygnał oraz rodzaju pracy licznika. Dysponując przykładowo liniałem o podziałce $20\text{ }\mu\text{m}$, układem przekształcającym, dającym pięć impulsów prostokątnych zamiast jednej sinusoidy i stosując trzeci rodzaj pracy licznika, uzyskujemy rozdzielczość odczytu równą $1\text{ }\mu\text{m}$.

Istotną barierą wzrostu rozdzielczości odczytu jest dokładność naniesienia siatki liniału. Błędy położenia poszczególnych pasków siatki nie powinny bowiem przekraczać wartości rozdzielczości, a ta już często osiąga wartości poniżej $1\text{ }\mu\text{m}$ [S11].

Niektóre z firm, np. amerykańska firma Bendix, stosują nieco inną, prostszą technologicznie konstrukcję płytki dekodującej. Zamiast okien odczytowych z przesuniętymi względem siebie siatkami pasków, płytka posiada jedną siatkę pasków skróconą względem siatki liniału pod niewielkim kątem. Uzyskany w ten sposób efekt optyczny pokazano na rys. 103.

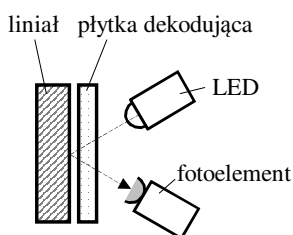


Rys. 103. Efekt nałożenia na siebie dwóch siatek skróconych pod niewielkim kątem

W wyniku nałożenia na siebie dwóch siatek skróconych pod niewielkim kątem, powstaje pole o zmiennym natężeniu oświetlenia. Usytuowane prostopadłe do pasków obu siatek, równomiernie rozłożone, jaśniejsze i ciemniejsze pasma tego pola przemieszczają się w trakcie ruchu liniału względem głowicy. Kierunek przemieszczania

pasm jest również prostopadły do kierunku ruchu liniału, a podziałce liniału odpowiada odległość między pasmami. Można więc uważać te pasma za wielokrotnie powiększoną, optyczną replikę siatki liniału. Kąt pomiędzy siatkami dobierany jest tak, aby na szerokości siatek (długości poszczególnych pasków) występowały minimum cztery ciemne pasma. Odpowiednie rozmieszczenie fotoelementów, tym razem wzdłuż szerokości płytki, pozwala na uzyskanie sygnałów analogicznych jak w przypadku płytki z oknami odczytowymi.

Przedstawione wyżej rozwiązanie konstrukcyjne przetwornika optoelektronicznego charakteryzuje się tym, że źródło światła jest po przeciwnej stronie liniału niż fotoelementy i z tego powodu światło musi przechodzić przez liniał. Ten typ przetworników, nazywany przetwornikami pracującymi w świetle przechodzącym, wymaga liniałów szklanych. Istnieją również rozwiązania (rys. 104), w których źródło światła i fotoelementy znajdują się po tej samej stronie liniału, wykorzystujące światło odbijające się od liniału. W przetwornikach tych, nazywanych przetwornikami pracującymi w świetle odbitym, stosuje się liniały stalowe z podziałką złożoną z rozmieszczonych na przemian pasków odbijających światło i pasków, które je rozpraszają lub pochłaniają. Powstawanie sygnałów pomiarowych i dalsze ich przetwarzanie jest w obu typach przetworników w zasadzie takie same.



Rys. 104. Przebieg światła w przetworniku optoelektronicznym pracującym w świetle odbitym

Przetworniki optoelektroniczne wykorzystuje się również do pomiaru przemieszczeń kątowych. Najprostsze rozwiązanie konstrukcyjne przetwornika kątowego stanowi perforowana tarcza umieszczona pomiędzy źródłem światła a fotoelementem. Każdemu obrotowi tej tarczy odpowiada ściśle określona, proporcjonalna do wielkości obrotu liczba impulsów świetlnych, które docierają do fotoelementu i zostają przez niego zamienione na quasi-sinusoidalny sygnał elektryczny. Określenie kierunku obrotu tarczy umożliwia zastosowanie dwóch fotoelementów, przesuniętych względem siebie o $1/4$ podziałki naciętej na tarczy perforacji. Obróbka sygnałów pochodzących z tych fotoelementów jest analogiczna jak w przypadku przetworników liniowych.

Bardziej zaawansowane optoelektroniczne przetworniki kąta posiadają wzorce w postaci szklanych tarczy lub pierścieni ze stali nierdzewnej. Na szklanych tarczach nanoszone są współśrodkowo nieprzezroczyste paski (najczęściej cienkie warstewki chromu),

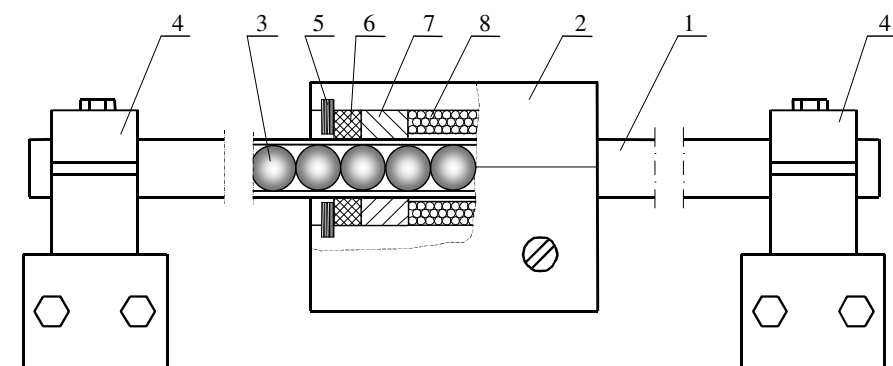
przy czym szerokość tych pasków musi być równa odległości pomiędzy nimi. Ilość naniesionych pasków jest związana z rozdzielczością przetwornika. Przykładowo w przypadku przetworników produkowanych przez firmę Heidenhain waha się ona od 9 000 (wzorec RON 225) do nawet 36 000 (wzorec RON 905) [L1]. W tym drugim przypadku układ pomiarowy może osiągnąć rozdzielczość równą nawet $0,00001^\circ$ ($0,036''$). Stosowanie jednak tak wysokiej rozdzielczości przy błędach przetwornika, których graniczna wartość szacowana przez producenta wynosi $\pm 0,4''$, nie wydaje się zbyt zasadne.

W przypadku wzorców stalowych, które najczęściej mają kształt pierścieni, podziałka nanoszona jest na ich obwodzie. Składa się ona z rozmieszczonych na przemian pasków odbijających światło i pasków, które je rozpraszają lub pochłaniają, przy czym szerokości pasków obu rodzajów są jednakowe. Ilość pasków na obwodzie pierścienia zależy od jego średnicy i najczęściej tak jest dobierana, aby podziałka wzorca (suma szerokości dwóch kolejnych pasków) wynosiła od 8 do 40 μm . Przykładowo firma Renishaw stosuje pierścienie o średnicach zawartych w przedziale 52 mm ÷ 550 mm. Liczba podziałek naniesionych na ich obwodzie wynosi odpowiednio od 4096 do 86400, a graniczna wartość błędu położenia poszczególnych pasków szacowana jest na $\pm 0,5''$ (dla pierścienia o średnicy 417 mm) [L14].



Rys. 105. Optoelektroniczny przetwornik kąta z wzorcem stalowym produkcji firmy Renishaw [L14]

Przykładowy przetwornik magnetoelektryczny przedstawiono na rys. 106. Wzorcem długości jest w nim cienkościenna stalowa rura wypełniona dokładnie wykonanymi, selekcyjonowanymi wymiarowo stalowymi kulkami. Poprzez odpowiedni dobór średnic kulek oraz ich napięcie wstępne w kierunku osi rury układ jest pozbawiony wszystkich możliwych luzów. Wzdłuż rury przemieszcza się odpowiednio łożyskowana głowica odczytowa. Podstawowym elementem tej głowicy jest uzwojenie elektryczne mające postać cewki. Uzwojenie to wytwarza pole magnetyczne, którego natężenie zależy od położenia głowicy względem znajdującej się wewnątrz rury kulki, a więc zmienia się w trakcie przemieszczania głowicy.

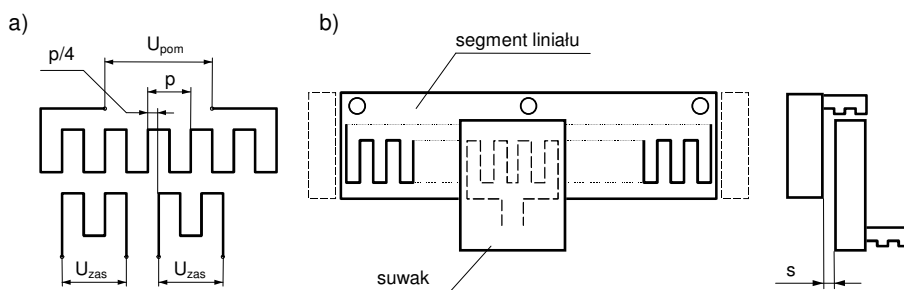


Rys. 106. Zasada działania przetwornika magnetoelektrycznego (opracowano na podstawie [L2])

Zmiany natężenia pola magnetycznego zostają w odpowiednim układzie elektrycznym przetworzone na ciąg impulsów elektrycznych. Dzięki wysokiej dokładności wykonania wzorca i uśrednieniu odczytów dokonywanych nad większą liczbą kul można w prezentowanym przetworniku osiągnąć rozdzielczość rzędu dziesiątych części mikrometra [L2].

Do grupy magnetoelektrycznych przetworników przemieszczeń zalicza się również przetworniki, których działanie oparte jest na zjawisku indukcji zachodzącej pomiędzy dwoma zespołami przewodów, oddzielonych od siebie małą szczeliną powietrzną. Przetworniki te określane są mianem przetworników indukcyjnych lub krócej – indukcyjnych.

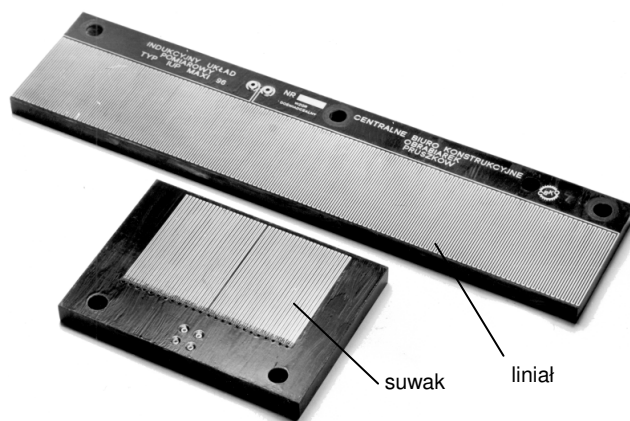
Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne indukcyjnego pokazano na rys. 107. Jest to tzw. indukcyjny segmentowy przeznaczony do pomiaru przemieszczeń liniowych. Składa się on z dwóch podstawowych elementów – linału i suwaka. Stalowy linał pełni rolę wzorca długości. Na jego powierzchni, na cienkiej warstwie izolacyjnej umieszczone jest odpowiednio ukształtowane, płaskie uzwojenie miedziane. Dwa analogiczne, ale znacznie krótsze uzwojenia znajdują się na powierzchni suwaka. Suwak może przemieszczać się



Rys. 107. Indukcyjny segmentowy: a) zasada działania; b) schemat rozwiązania konstrukcyjnego (sporządzono w oparciu o [L6])

wzdłuż liniału i jest usytuowany tak, że jego uzwojenia znajdują się w bezpośrednim pobliżu uzwojeń liniału – najczęściej spotykana nominalna odległość uzwojeń suwaka i liniału wynosi 0,25 mm. Po zasileniu prądem elektrycznym (prąd zmienny o częstotliwości $2 \div 10$ kHz) uzwojenia suwaka wytwarzają zmienne pole magnetyczne, które w uzwojeniu liniału generuje siłę elektromotoryczną indukcji. Wielkość i kierunek tej siły zależą od położenia liniału względem suwaka, a więc zmieniają się przy jakichkolwiek zmianach tego położenia. Ponieważ drugie uzwojenie suwaka jest przesunięte geometrycznie względem pierwszego o $1/4$ podziałki, więc jego oddziaływanie na uzwojenie liniału jest przesunięte w fazie o 90° . Pozwala to na określenie kierunku przemieszczania się suwaka.

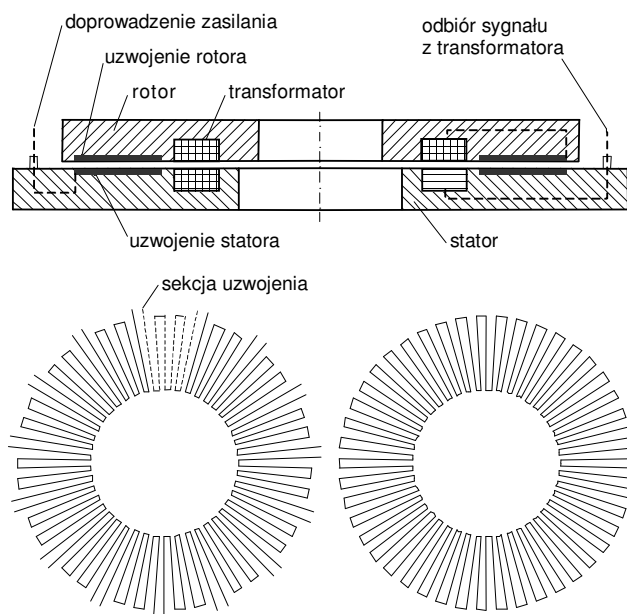
Przykład induktosynu działającego wg opisanej wyżej zasady pokazano na rysunku 108. Podziałka uzwojenia tego liniału wynosi 2 mm, jego długość 250 mm, a maksymalna wartość błędu na całej długości liniału – $1,5 \mu\text{m}$ [L6]. Zakres pomiarowy prezentowanego induktosynu można powiększać, montując obok siebie dwa lub więcej liniałów i łącząc ich uzwojenia. Wzajemne położenia kolejnych liniałów muszą być wtedy bardzo dokładnie wyjustowane.



Rys. 108. Induktosyn segmentowy JVP-Max196 produkcji CBKO Pruszków [S1]

Przetworniki induktosynowe mogą również służyć do pomiaru przemieszczeń kątowych. Schemat rozwiązania konstrukcyjnego takiego przetwornika, zwanego induktosynem obrotowym, przedstawiono na rys. 109.

Podstawowymi elementami induktosynu obrotowego są dwie stalowe tarcze, na powierzchni których, oddzielone od metalu warstwą izolacyjną, znajduje się odpowiednio ukształtowane, płaskie uzwojenie miedziane. Przewody wzbudzające strumień magnetyczny są umieszczone na nieruchomej tarczy zwanej statorem, natomiast przewody, w których indukuje się sygnał wyjściowy – na obrotowej tarczy określanej mianem roto-



Rys. 109. Schemat rozwiązania konstrukcyjnego indukcyjnego obrotowego produkcji CBKO Pruszków

ra. Przekazywanie sygnału z ruchomego rotora odbywa się bezstykowo, poprzez transformator, dzięki czemu rotor może wykonywać nieograniczoną liczbę obrotów.

Podziałka prezentowanego indukcyjnego wynosi 1° , odległość pomiędzy uzwojeniami rotora i statora $s = 0,18 \text{ mm}$, a osiągnięta dokładność przetwarzania dochodzi do $1,5''$ [L6].

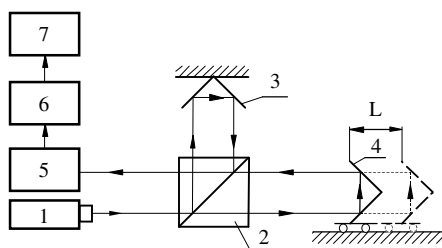
Zasada działania pojemnościowego przetwornika przemieszczeń zostanie przedstawiona na przykładzie rozwiązania konstrukcyjnego opracowanego w szwajcarskiej firmie SYLVAC SA.

Przetwornik tej firmy, podobnie jak przedstawiane wcześniej przetworniki innych rodzajów, składa się z tworzącego wzorec długości liniału i przemieszczającego się względem tego liniału czytelnika. Liniał ma kształt paska i składa się z trzech warstw. Dwie zewnętrzne warstwy liniału są wykonane z materiałów izolacyjnych. Osłaniają one warstwę środkową wykonaną z cienkiej mosiężnej blachy wyciętej w kształcie prostokątnego grzebienia o podziałce równej $4''$ (10.16 mm). Na czytniku, po stronie stykającej się z liniałem, jest szereg równomiernie rozmieszczonych, przepuszczających prąd pasków o szerokości równej $1/4$ szerokości pól liniału. W trakcie ruchu czytelnika paski te wraz z warstwą środkową liniału tworzą zespoły zmiennych pojemności, które poprzez specjalny układ scalony zostają zamienione na cyfrową postać przesunięcia [L17].

Opisane wyżej odmiany przetworników przemieszczeń wykorzystywały materialne wzorce długości w postaci różnego rodzaju liniałów o bardzo wysokiej geometrycznej dokładności wykonania. Trudności technologiczne związane z osiąganiem tej dokładności, występujące zwłaszcza przy większych zakresach pomiarowych przetworników, zwróciły uwagę producentów na naturalny wzorec długości, jakim jest długość fali świetlnej.

Wykorzystanie światła jako wzorca długości uwarunkowane jest jego spójnością, czyli przestrzenno-czasowym uporządkowaniem oscylacji elektromagnetycznych. Problemy z uzyskiwaniem spójnych wiązek światła o odpowiednio dużej mocy stanowiły przez długi czas istotną barierę w szerszym wykorzystaniu wzorców falowych do pomiaru przemieszczeń, zwłaszcza przemieszczeń o większych wartościach. Dopiero wynalezienie i rozpowszechnienie laserów usunęło tę przeszkodę.

Przyrząd, w którym wzorcem długości jest długość fali świetlnej emitowanej przez laser, wykorzystujący w swym działaniu zjawisko interferencji światła, nosi nazwę interferometru laserowego. Zasadę działania takiego przyrządu pokazano na rys. 110.



Rys. 110. Przetwornik przemieszczeń liniowych z wzorcem falowym – interferometr laserowy (opracowano na podstawie [L19])

Wiązka światła lasera gazowego 1 jest rozdzielana przez pryzmat dzielący 2 na dwie wiązki biegnące do zwierciadeł odbijających (retroreflektorów) 3 i 4. Zwierciadło 3 jest umieszczone w stałej odległości od pryzmatu, natomiast zwierciadło 4 związane jest z przemieszczającym się elementem. Po odbiciu od zwierciadeł i ponownym przejściu przez pryzmat 2 obie wiązki interferują ze sobą, tworząc prążki interferencyjne w płaszczyźnie układu fotodetekcyjnego 5. Każde przesunięcie elementu ruchomego i związanego z nim zwierciadła 4 powoduje wielokrotnie zwiększone przesunięcie prążków interferencyjnych. Ruch prążków interferencyjnych (zaciemnień) jest przetwarzany za pomocą odpowiedniego zespołu fotoelementów na sinusoidalnie zmienne, elektryczne sygnały pomiarowe. Sygnały te, po przekształceniu w układzie formowania impulsów 6 na prostokątne, trafiają do rewersyjnego licznika impulsów 7. Wskazanie tego licznika jest związane z przemieszczeniem zwierciadła 4 zależnością:

$$L = k \cdot \lambda / n \quad (4.17)$$

gdzie:

L – przemieszczenie zwierciadła 4;

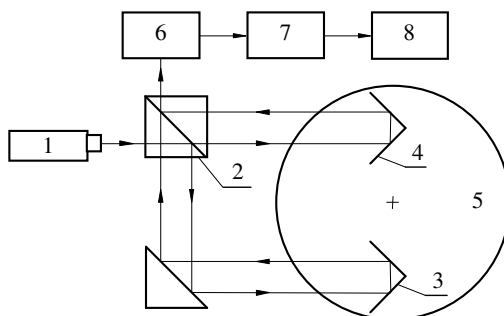
k – liczba impulsów zliczona przez licznik;

λ – długość fali świetlnej;

n – stała zależna od konstrukcji interferometru ($n \in \{4, 8, 16\}$).

Rozdzielczość prezentowanego przetwornika wynosi $\lambda/4 \div \lambda/16$, co odpowiada $(0,16 \div 0,04) \mu\text{m}$, a jego zakres pomiarowy może dochodzić do 10 m.

Wzorce falowe są wykorzystywane również przy pomiarach przemieszczeń kątowych. Przykładowy sposób ich wykorzystania przedstawiono na rys. 111.



Rys. 111. Zasada działania przetwornika przemieszczeń kątowych z wzorcem falowym (opracowano na podstawie [L19])

Wiązka światła z lasera gazowego 1 jest rozdzielana przez pryzmat dzielący 2 na dwie części, które kierowane są do zwierciadeł odbijających 3 i 4. Zwierciadła te, umieszczone na obrotowym stole 5, pracują w układzie różnicowym. Po odbiciu od zwierciadeł i ponownym przejściu przez pryzmat obie części wiązki interferują ze sobą, dając prążki interferencyjne w płaszczyźnie układu fotodetekcyjnego 6. Dowolny obrót stołu i związane z nim przesunięcie zwierciadeł powodują wielokrotnie zwiększone przemieszczenie układu prążków interferencyjnych. Ruch prążków interferencyjnych jest przetwarzany za pomocą fotodetektora 6, układu formowania impulsów 7 i licznika rewersyjnego 8 w sposób analogiczny jak w poprzednim przykładzie.

Wskazania licznika z obrotami stołu wiąże zależność:

$$k = 16 \cdot r \cdot (\sin \phi + c) / \lambda \quad (4.18)$$

gdzie:

k – wskazanie licznika;

r – promień, na którym rozmieszczone są retroreflektory 3 i 4;

ϕ – kąt obrotu stołu;

c – stała układu;

λ – długość fali świetlnej.

Zależność (4.18) pozwala na wyznaczenie wartości kąta obrotu stołu.

Prezentowane rozwiązanie przetwornika przemieszczeń kątowych umożliwia uzyskanie rozdzielczości odczytu 0,1" przy zakresie pomiarowym dochodzącym do 70° [L19].

Przy pomiarach opartych na zjawisku interferencji istotne znaczenie ma stan fizyczny ośrodka, w którym zjawisko to zachodzi. Dlatego przetworniki z wzorcami falowymi wyposaża się dodatkowo w mierniki ciśnienia, temperatury i wilgotności powietrza. Pozwalają one na wprowadzenie poprawek uwzględniających warunki fizyczne w trakcie pomiaru.

Dokładność przetworników z wzorcami falowymi jest wielokrotnie wyższa od dokładności przetworników przemieszczeń z innymi rodzajami wzorców.

Spójne wiązki światła laserowego są obecnie najwyższym osiągnięciem metrologii w dziedzinie wzorców długości. Wykorzystywane są one w szeregu nowych technik pomiarowych. Jedną z nich jest interferometria laserowa heterodynowa, która opiera się na zdudnianiu częstotliwości optycznych (wytwarzaniu różnicowej częstotliwości dwóch fal świetlnych). Pozwala ona na pomiary przemieszczeń z błędem rzędu $\lambda/100$, a więc umożliwia uzyskanie rozdzielczości dochodzącej do $0,01 \div 0,001 \mu\text{m}$ [L25].

Przetworniki położenia absolutne, nazywane również przetwornikami kodowymi, generują sygnał wyjściowy zależny od położenia mierzonego obiektu względem ściśle określonego, stałego punktu odniesienia. Z tego względu nie tracą one informacji o położeniu w przypadku nagłej przerwy w zasilaniu, jak ma to miejsce w przypadku przetworników przyrostowych. Zasada ich działania wykorzystuje najczęściej wpływ położenia mierzonego obiektu na indukcyjność własną lub wzajemną obwodu elektrycznego względnie na natężenie światła padającego na odpowiedni układ fotoelementów.

Podstawowym elementem przetworników absolutnych jest pełniący rolę wzorca długości liniał kodowy (względnie tarcza kodowa). Przykład takiego liniału pokazano na rys. 112. Liniał 1 jest wykonany ze szkła. Na jego powierzchni występuje kilka ścieżek, a w ramach każdej z nich przezroczyste (3) i nieprzezroczyste (2) paski o jednakowej długości. Układ pasków w poszczególnych ścieżkach stanowi zakodowaną informację o współrzędnej położenia. Kodowanie polega najczęściej na zapisie wartości współrzędnej w układzie dwójkowym, tj:

$$w = \sum_{i=1}^n a_i \cdot 2^i; \quad a_i \in \{0, 1\}$$

gdzie:

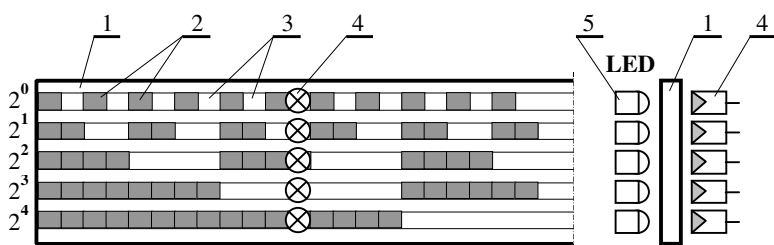
w – wartość współrzędnej położenia;

k – kwant długości (długość najkrótszego paska);

a – współczynnik;

i – numer ścieżki liniału;

n – ilość ścieżek liniału.



Rys. 112. Fotoelektryczny liniał kodowy

Wartościom współczynnika $a_i = 0$ odpowiadają paski nieprzezroczyste, a wartościom $a_i = 1$ – paski przezroczyste. Na pierwszej ścieżce liniału, odpowiadającej wg kodu dwójkowego wartości 2^0 , długości poszczególnych pasków wynoszą $5 \mu\text{m}$. Na każdej następnej ścieżce są one dwukrotnie większe niż na poprzedniej. Układ dekodujący składa się ze źródła światła (diody elektroluminescencyjne 5) i zespołu odpowiednio rozmieszczonych²² fotoelementów 4. Ponieważ źródło światła i fotoelementy są usytuowane po przeciwnych stronach liniału, natężenie oświetlenia poszczególnych fotoelementów zależy od położenia liniału względem dekodera. Należy podkreślić, że rzeczywiste konstrukcje przetworników fotoelektrycznych są znacznie bardziej złożone od przedstawionego wyżej schematu ideowego. Np. do odczytu ścieżek o bardzo małych podziałkach używa się przesłon analogicznych jak w przypadku przetworników optoelektrycznych, fotoelementy nie są rozmieszczone wzdłuż linii prostej, lecz wg specjalnego systemu, tzw. logiki V, a zamiast zwykłego kodu dwójkowego są stosowane często jego pochodne, jak np. kod Gray'a²³.

W odróżnieniu od powtarzalnych, okresowo zmiennych właściwości liniałów przetworników przemieszczeń, właściwości liniałów kodowych są niepowtarzalne w żadnym ich fragmencie. Niepowtarzalność ta pozwala przypisać każdemu fragmentowi liniału kodowego inną współrzędną.

Niepowtarzalność właściwości liniałów kodowych w powiązaniu z koniecznością bardzo wysokiej dokładności wykonania sprawia, że koszt ich wytworzenia jest większy niż w przypadku przetworników przyrostowych. Z tego względu są one rzadziej stosowane. Wykorzystuje się je głównie w układach pomiarowych kontrolujących położenie ruchomych zespołów obrabiarek sterowanych numerycznie.

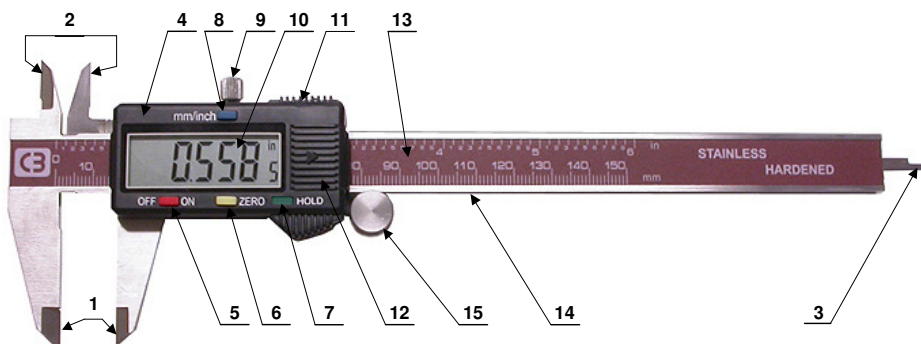
²² Każdy fotoelement jest przyporządkowany do swojej ścieżki.

²³ Kod charakteryzujący się zmianą stanu tylko jednej ścieżki w każdym kolejnym kroku pomiarowym.

4.9.2. Elektroniczne przyrządy pomiarowe

Na bazie elektronicznych przetworników przemieszczeń powstała nowa generacja przyrządów pomiarowych, które określa się mianem elektronicznych lub cyfrowych. W niniejszym podrozdziale zostaną przedstawione niektóre spośród nich.

Suwmiarka elektroniczna, której widok pokazano na rys. 113, działa w oparciu o przetwornik pojemnościowy. Linią przetwornika jest naklejony na prowadnicy, czytnik umieszczony jest na suwaku.



Rys. 113. Suwmiarka elektroniczna

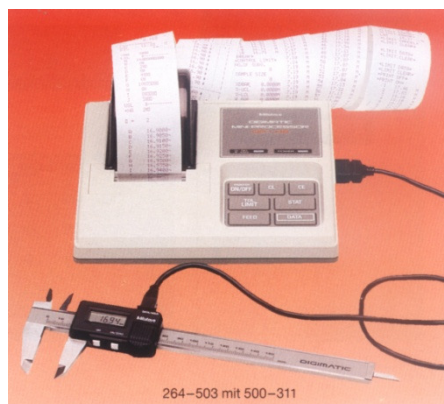
1 – powierzchnie pomiarowe zewnętrzne; 2 – powierzchnie pomiarowe wewnętrzne; 3 – wysuwka głębokościomierza; 4 – suwak; 5 – klawisz ON/OFF (włączający); 6 – klawisz ZERO (zerujący wskazanie suwmiarki); 7 – klawisz HOLD (blokada wskazania); 8 – klawisz wyboru jednostek; 9 – śruba zaciskowa; 10 – wyświetlacz ciekłokrystaliczny; 11 – pokrywa gniazda wyjścia; 12 – pokrywa gniazda baterii; 13 – powierzchnia, na której naklejono linię przetwornika; 14 – prowadnica główna; 15 – rolka

W porównaniu z konwencjonalnymi suwmiarkami elektroniczne posiadają cały szereg istotnych zalet. Należą do nich:

- znacznie łatwiejszy odczyt wyniku pomiaru;
- możliwość wyzerowania wyświetlacza przy dowolnym położeniu szczęk pomiarowych, co pozwala na pomiary porównawcze;
- lepsze parametry metrologiczne (rozdzielczość – 0,01 mm, graniczna wartość błędu przyrządu – $0,02 \div 0,03$ mm, powtarzalność – 0,01 mm);
- możliwość wyprowadzania danych pomiarowych w celu dalszego ich przetwarzania (p. rys. 114).

Wadą suwmiarek elektronicznych jest ich wyższa w porównaniu z konwencjonalnymi cena. Pewnym utrudnieniem jest także konieczność baterijnego zasilania.

Suwmiarki elektroniczne występują w wielu różnych odmianach. Ich klasyfikacja jest analogiczna jak w przypadku suwmiarek konwencjonalnych.



Rys. 114. Współpraca suwmiarki elektronicznej ze specjalizowanym mikroprocesorem DP-1HS [L24]

W wersji elektronicznej wytwarzane są również przyrządy mikrometryczne. Niektóre z nich przedstawiono na rys. 115.

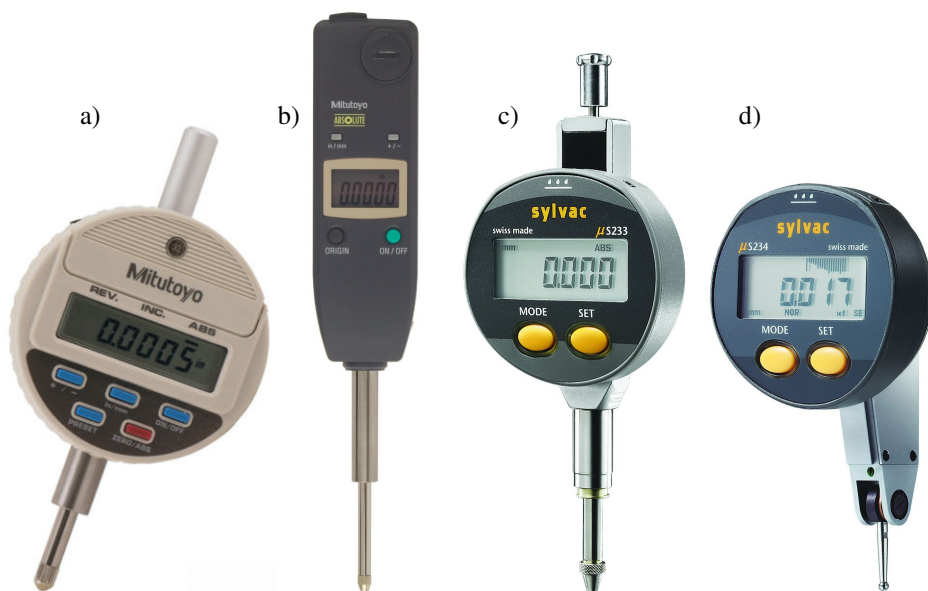
Mikrometr zewnętrzny japońskiej firmy MITUTOYO (rys. 115a) posiada rozdzielczość odczytu równą 0,001 mm. Niepewność przyrządu wg danych producenta wynosi $\pm 0,001$ mm. Do tego należy doliczyć błąd zliczania (również $\pm 0,001$ mm). Przyrząd może pracować zarówno w trybie bezwzględnym, jak i porównawczym. Dzięki funkcji wstępnego nastawiania wartości odniesienia (ORIGIN) do jego kalibracji można



Rys. 115. Wybrane przykłady elektronicznych przyrządów mikrometrycznych

używać wzorców o dowolnych długościach. Posiada możliwość wyprowadzania danych pomiarowych. Zasilany jest jedną baterią tlenkowo-srebrową (SR 44), której trwałość przy normalnej eksploatacji wynosi około jednego roku. Ma wbudowaną funkcję samoczynnego wyłączania zasilania (autosleep).

Kolejną grupę przyrządów elektronicznych stanowią czujniki cyfrowe. Ich przykłady pokazano na rys. 116.



Rys. 116. Przykłady czujników elektronicznych produkcji firm Mitutoyo (a, b) i Sylvac (c i d)

Czujnik cyfrowy pokazany na rys. 116a działa w oparciu o pojemnościowy przetwornik przemieszczeń. Posiada możliwość wyprowadzania danych pomiarowych, co przy współpracy z cyfrowym przetwornikiem danych pomiarowych pozwala na ich rejestrację bądź przetwarzanie. Funkcja wstępnego nastawiania wskazań (PRESET) umożliwia pracę czujnika w zakresach bezzerowych bez konieczności korygowania uzyskiwanych wyników²⁴. Dzięki możliwości wyzerowania wskazań przy dowolnym położeniu trzpienia pomiarowego (ZERO/ABS) czujnik może służyć do pomiarów porównawczych. Możliwa jest również zmiana kierunku pomiaru (+/-) i wybór jednostki (in/mm).

Podstawowe parametry metrologiczne niektórych czujników cyfrowych z przetwornikami pojemnościowymi produkcji firmy MITUTOYO zestawiono w tabeli 25.

²⁴ Np.: ustawiając wstępnie wskazanie czujnika na 90.000 i używając do jego kalibracji stosu płytek o wysokości 90 mm, uzyskujemy przyrząd o zakresie wskazań $90 \div 102$ mm.

Tabela 25. Podstawowe parametry metrologiczne niektórych czujników cyfrowych z przetwornikami pojemnościowymi produkcji firmy MITUTOYO [L27]				
Typ czujnika (numer katalogowy)	ID-C 543-257B	ID-C 543-277B	ID-F 543-551D	ID-H 543-561D
Zakres pomiarowy	12 mm	12 mm	25 mm	30 mm
Rozdzielczość odczytu	0,001	0,01	0,01/0,001	0,001/0,0005
Błąd graniczny przyrz.	0,003	0,02	0,003	0,002
Funkcja oceny	nie	nie	tak	tak
Wyświetlacz	Ciekłokrystaliczny (LCD), 6 cyfr + znak			
Zasilanie	1 bateria SR 44. (trwałość ok. 5000 godzin)		Zasilacz sieciowy	

Firma MITUTOYO wyprodukowała również serię czujników cyfrowych wykorzystujących przetworniki optoelektroniczne. Jeden z nich (Digimatic ID-U) pokazano na rysunku 116b. Czujnik ten posiada możliwość wyprowadzania danych pomiarowych oraz zmiany kierunku zliczania (+/-). Jego zakres pomiarowy wynosi 25 mm, zdolność rozdzielcza 0,01 mm, graniczna wartość błędu 0,02 mm. Dopuszczalna prędkość przesuwu trzpienia pomiarowego – 1600 mm/s; wyświetlacz ciekłokrystaliczny, czteropozycyjny; zasilanie – 1 bateria SR 44.

Elektroniczne przetworniki przemieszczeń wykorzystano również w przyrządach do pomiaru kątów. Jako przykład może tu służyć kątomierz cyfrowy, który pokazano na rys. 117. W porównaniu z konwencjonalnymi, kątomierz ten posiada szereg istotnych zalet. W szczególności wymienić należy łatwy i wygodny odczyt, który zapewnia wyświetlacz ciekłokrystaliczny o dużych, bo niemal pięciomilimetrowej wysokości znakach. Wyświetlacz ten może wskazywać wartości mierzonych kątów w układzie sześćdziesiątkowym (stopnie, minuty) z rozdzielczością odczytu 1', lub w układzie dziesiętnym (stopnie, dziesiętne części stopnia) z rozdzielczością 0,01°. Wskazania wyświetlacza można wyzerować przy dowolnym położeniu ramion pomiarowych. Dzięki temu możliwe



Rys. 117. Kątomierz cyfrowy 106E produkcji firmy MAHR [L5]

są pomiary porównawcze. Można również dokonać precyzyjnego ustawienia ramion pod żądanym kątem. Wtedy po wyzerowaniu kątomierz będzie wskazywał odchyłki od uprzednio nastawionej wartości. Przyrząd posiada możliwość wyprowadzania danych pomiarowych. Za pośrednictwem interfejsu RS 232C można go podłączyć do standardowej drukarki czy mikrokomputera. Zasilany dwoma tlenkowo-srebrowymi bateriami o napięciu znamionowym 1.5 V, które wystarczają na około dwa lata eksploatacji. Posiada funkcję automatycznego wyłączania zasilania (autosleep).

4.9.3. Elementy systemów automatycznego przetwarzania danych pomiarowych

Możliwość wyprowadzania danych, którą charakteryzuje się większość elektronicznych przyrządów pomiarowych, pozwala na wykorzystanie tych przyrządów w systemach automatycznego przetwarzania i rejestracji danych pomiarowych. Poza elektronicznymi przyrządami pomiarowymi w systemach tych występują również inne elementy, w szczególności:

- specjalizowane mikroprocesory (mikrokomputery);
- multipleksery;
- rejestratory danych pomiarowych;
- przekaźniki danych pomiarowych;
- elementy pomocnicze (interfejsy, jednostki zasilające, przełączniki wielopozycyjne, przewody itp.).

Mikroprocesory pomiarowe są to specjalizowane mikroprocesory służące do bezpośredniego przetwarzania danych wysyłanych przez elektroniczne przyrządy pomiarowe. Przykłady mikroprocesorów pomiarowych pokazano na rys. 114 i 118.

Mikroprocesor "DP-1HS" (rys. 114) może jednorazowo wczytać do tysiąca danych pomiarowych. Na danych tych realizuje on ściśle określone, podporządkowane wymogom statystycznej kontroli jakości (SKJ), funkcje. W szczególności:

- przypisuje wczytywanym danym liczby porządkowe;
- wyszukuje dane o ekstremalnych wartościach ($x_{\max}$ i $x_{\min}$) oraz oblicza różnicę pomiędzy nimi;
- oblicza wartość średnią i odchylenie standardowe wczytanych danych;
- sprawdza, czy wczytane dane spełniają warunek $A < x < B$, gdzie A i B oznaczają wprowadzone uprzednio granice tolerancji; oblicza, jaki procent danych nie spełnia tego warunku;
- grupuje wczytane dane w dwunastu przedziałach wartości: dziesięciu równych przedziałach obejmujących pole tolerancji oraz przedziałach $(-\infty, A)$ i $(B, +\infty)$; oblicza liczbę danych pomiarowych mieszczących się wewnątrz każdego przedziału (histogram);

- oblicza współczynniki zdolności procesu C_p i C_{pk} ²⁵;
- oblicza wartości parametrów potrzebne do sporządzenia karty kontrolnej $\bar{x}$, R metodą stabilizacyjną.

Wczytywanie danych pomiarowych może być sterowane przez operatora lub odbywać się automatycznie. W pierwszym przypadku wczytanie danej następuje po naciśnięciu stosownego przycisku, w drugim dane wczytywane są w ściśle określonych odstępach czasu, a procesem wczytywania steruje zegar. Operator ustala jedynie wartość odstępu czasowego pomiędzy kolejnymi pomiarami, która w przypadku prezentowanego mikroprocesora może się zmieniać od 0,3 s do 60 min.

Integralną częścią mikroprocesora "DP-1HS" jest drukarka igłowa o matrycy znaku 5x7. Wysokość drukowanych znaków wynosi 2,5 mm, prędkość drukowania – 1 linia (maks.18 znaków) na sekundę. Przykłady wydruków uzyskanych za pomocą mikroprocesora "DP-1HS" przedstawiono na rysunku 119.

Pokazany na rysunku 118 mikroprocesor pomiarowy DP-1VR jest kompaktowym urządzeniem przenośnym służącym do:

- drukowania wyników pomiarów uzyskanych za pomocą elektronicznych narzędzi pomiarowych (drukarka termiczna o rozdzielczości 8 punktów na mm i prędkości druku 6,5 mm/s);



Rys. 118. Specjalizowany procesor pomiarowy DP-1VR [S5]

²⁵ Pojęcia z zakresu SKJ – współczynniki charakteryzujące zdolność określonego procesu technologicznego do wytworzenia wyrobów spełniających stawiane im wymagania.

```

*MODE-1*

*NEW LIMIT DATA*
LSL 15.950 M
USL 16.000 M
TOL 0.050 M

1 15.989 M
2 15.981 M
3 15.976 M
4 15.959 M
5 15.949 M
6 15.949 M
7 15.957 M

PART NO.
DATE/TIME
NAME

*RESULT*
N 25
MAX 16.006 M
MIN 15.948 M
R 0.058 M
x 15.97424 M
σn 0.01546 M
σn-1 0.01578 M

-NG 3
+NG 1
P 16.000 %
Cp 0.527
Cpk 0.511

*HISTOGRAM*
LSL 15.950 M
USL 16.000 M
DIV 10

-NG 31000
LSL 11-----
A 110
B 2100
C 110
D 110
E 410000
F 31000
G 410000
H 2100
I 2100
J 110
USL 11-----
+NG 110

D = 1

A 15.95000~
B 15.95500~
C 15.96000~
D 15.96500~
E 15.97000~
F 15.97500~
G 15.98000~
H 15.98500~
I 15.99000~
J 15.99500~
16.00000

```

```

*MODE-2*

*NEW LIMIT DATA*
LSL 15.950 M
USL 16.000 M
TOL 0.050 M

L C U
15.986 | . |
15.977 | . |
15.986 | . |
16.003 | . |
15.997 | . |
15.953 | . |
15.975 | . |
16.000 | . |
16.001 | . |
15.984 | . |
10
15.966 | . |
15.985 | . |
15.972 | . |
15.968 | . |
15.977 | . |

PART NO.
DATE/TIME
NAME

*RESULT*
N 26
MAX 16.003 M
MIN 15.948 M
R 0.055 M
x 15.97600 M
σn 0.01606 M
σn-1 0.01638 M

-NG 1
+NG 2
P 11.538 %
Cp 0.588
Cpk 0.488

*HISTOGRAM*
LSL 15.950 M
USL 16.000 M
DIV 10

-NG 110
LSL 11-----
A 31000
B 110
C 2100
D 2100
E 110
F 5100000
G 2100
H 410000
I 110
J 2100
USL 11-----
+NG 2100

D = 1

```

```

*MODE-3*

SUBG. 1
1 15.996 M
2 15.988 M
3 15.966 M
4 15.972 M
5 15.983 M

x 15.98100 M
R 0.030 M

PART NO.
DATE/TIME
NAME

SUBG. 2
1 15.973 M
2 15.980 M
3 15.990 M
4 16.001 M
5 15.954 M

x 15.97960 M
R 0.047 M

PART NO.
DATE/TIME
NAME

SUBG. 3
1 15.960 M
2 15.951 M
3 15.982 M
4 15.993 M
5 15.984 M

x 15.97400 M
R 0.042 M

PART NO.
DATE/TIME
NAME

*CONTROL LIMIT*
NO. OF SUBG. 3
SAMPLE SIZE 5
x-BAR 15.97820M
x-UCL 16.00188M
x-LCL 15.95331M
R-BAR 0.03966M
R-UCL 0.08384M

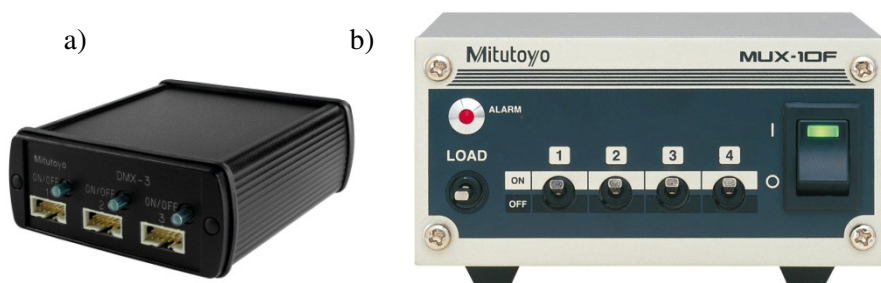
```

Rys. 119. Przykładowe wydruki mikroprocesora "DP-1HS"

- dokonywania analiz statystycznych wprowadzonych danych; można wprowadzić do 9999 danych ręcznie (przycisk) bądź automatycznie (zegar, interwały czasu od 1s do 60 min);
- przekazywania wprowadzonych do niego danych do komputera (złącze RS 232C).

Urządzenie jest zasilane baterią (LR6) lub za pomocą zasilacza sieciowego (6V).

Kolejnym elementem układów automatycznego przetwarzania i rejestracji danych pomiarowych jest multiplekser. Jest to układ elektroniczny o wielu wejściach i jednym wyjściu wybierający za pomocą sygnałów sterujących jeden z sygnałów wejściowych i przesyłający go na wyjście. Przykłady urządzeń pełniących funkcje multiplekserów pokazano na rysunku 120.

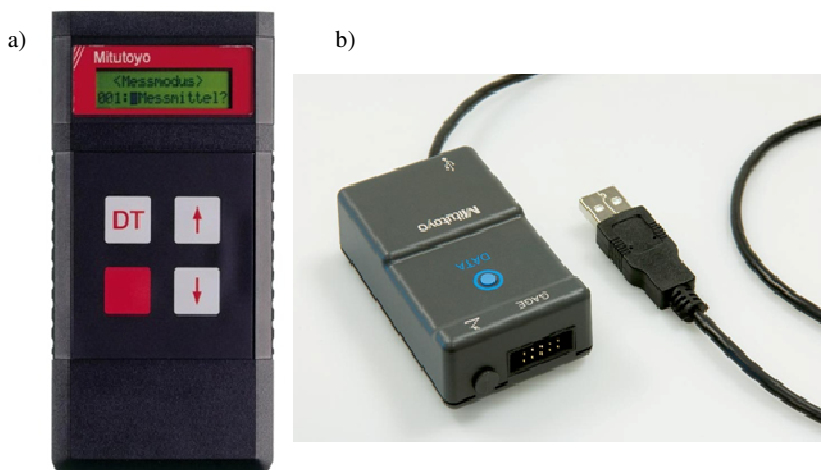


Rys. 120. Przykładowe multipleksery produkcji firmy Mitutoyo: a) DMX-3; b) MUX-10F

Urządzenie DMX-3 (rys. 120a) jest w zasadzie interfejsem, do którego można podłączyć trzy elektroniczne przyrządy pomiarowe posiadające wyjście typu DIGIMATIC. DMX-3 łączy wybrany przyrząd z komputerem za pomocą kabla RS 232C lub kabla USB [S18].

Do multipleksera MUX-10F (rys.120b) można podłączyć jednocześnie cztery elektroniczne przyrządy pomiarowe posiadające wyjście typu DIGIMATIC. Dane z wybranego przyrządu zostają wysłane do komputera złączem RS 232C po wciśnięciu przycisku DATA w przyrządzie lub przycisku LOAD w multiplekserze [S18].

Rejestratory danych pomiarowych to urządzenia służące do przyjmowania i zapamiętywania danych wysyłanych przez elektroniczne przyrządy pomiarowe. Jako przykład tej grupy urządzeń może służyć rejestrator "DIGIMATIC DL 1000", którego widok pokazano na rys. 121a. Rejestrator ten może przyjąć i zapamiętać do tysiąca danych klasyfikowanych wg maksimum stu różnych cech. Dane wprowadza się przyciskiem DATA przyrządu pomiarowego lub odpowiadającym mu przyciskiem DT rejestratora. Zgromadzone dane można przesłać do komputera za pomocą interfejsu (np. „DIGIMATIC USB”) lub do drukarki posiadającej złącze DIGIMATIC.



Rys. 121. Elementy systemów automatycznego przetwarzania danych pomiarowych: a) rejestrator danych pomiarowych DIGIMATIC DL 1000; b) interfejs DIGIMATIC USB [S18]

4.9.4. Systemy przetwarzania danych pomiarowych

Pojęcie "system przetwarzania danych" jest używane w różnych znaczeniach. W niniejszym opracowaniu przez "system przetwarzania danych pomiarowych" należy rozumieć kompleksowy zestaw urządzeń do przetwarzania i rejestracji danych pomiarowych.

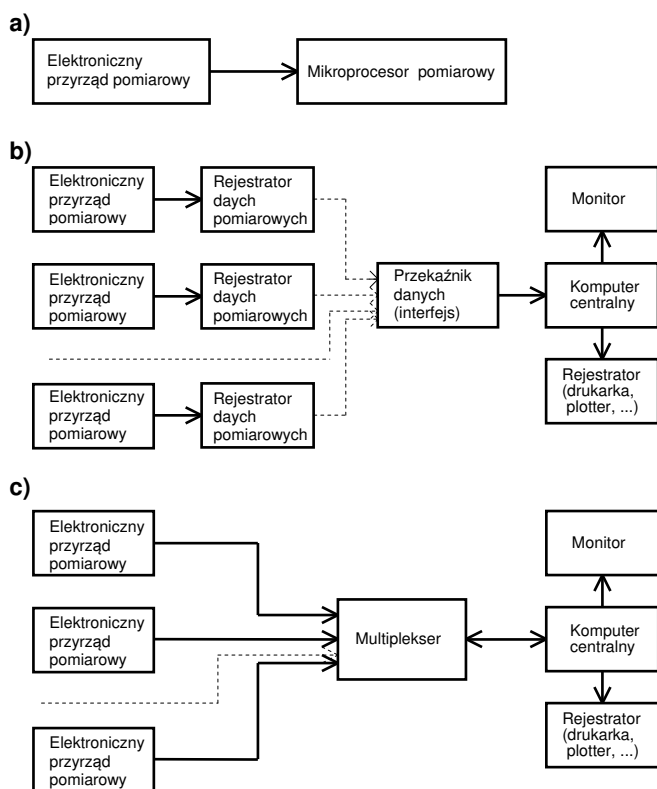
Skład zestawu urządzeń do przetwarzania i rejestracji danych zależy od zasięgu działania systemu oraz od sposobu przetwarzania danych pomiarowych. Jeśli chodzi o zasięg, to może on obejmować jedno lub więcej (czasem bardzo wiele) różnych stanowisk pomiarowych. Natomiast jeśli chodzi o przetwarzanie danych, to można je podzielić na przetwarzanie wsadowe i przetwarzanie w czasie rzeczywistym.

Przetwarzanie wsadowe polega na uprzednim zgromadzeniu kompletu danych przeznaczonych do przetwarzania (czyli tzw. wsadu), a następnie wprowadzeniu tych danych do pamięci komputera i przetworzeniu ich w ramach jednego, ściśle określonego ciągu przetwarzania.

Przy przetwarzaniu w czasie rzeczywistym nie występuje uprzednie gromadzenie danych, lecz każda z nich jest opracowywana bezpośrednio po wprowadzeniu. Przetwarzanie to wymaga tzw. bezpośredniej transmisji danych, tj. takiej transmisji, w której przesyłane dane są wprowadzane z łącza transmisji danych bezpośrednio do komputera, albo też z komputera bezpośrednio do tego łącza. Najczęściej komputer jest powiązany z łączem poprzez odpowiednie urządzenia transmisji danych.

W przypadku gdy system przetwarzania danych pomiarowych obejmuje swym zasięgiem tylko jedno stanowisko pomiarowe, w jego skład wchodzi najczęściej tylko dwa elementy: elektroniczny przyrząd pomiarowy i procesor pomiarowy (patrz rys. 122a). System ten, prosty i względnie tani, jest jednak mało elastyczny, ponieważ zarówno algorytm przetwarzania, jak i postać uzyskiwanych wydruków są praktycznie narzucone przez użyty mikroprocesor. Wady tej nie ma układ, w którym zamiast mikroprocesora występuje mikrokomputer, jednakże przy małym zasięgu systemu rozwiązanie takie jest niezbyt ekonomiczne.

Przy większym zasięgu systemu koszt komputera rozkłada się na poszczególne stanowiska pomiarowe, w związku z czym jego użycie staje się bardziej uzasadnione. Pozostałe elementy wchodzące w skład systemu zależą od przyjętego sposobu przetwarzania danych.



Rys. 122. Typowe systemy przetwarzania i rejestracji danych pomiarowych: a) jednostanowiskowy; b) wielostanowiskowy przy przetwarzaniu wsadowym; c) wielostanowiskowy przy przetwarzaniu w czasie rzeczywistym

W przypadku przetwarzania wsadowego typowy system przetwarzania danych składa się z części lokalnych (elektroniczny przyrząd pomiarowy + rejestrator danych pomiarowych) oraz części centralnej (komputer i jego peryferia). System ten działa następująco. Dane z elektronicznych przyrządów pomiarowych są gromadzone w pamięciach rejestratorów. Po zgromadzeniu kompletu danych poszczególne rejestratory zostają podłączane, najczęściej za pośrednictwem odpowiednich interfejsów, do komputera. W oparciu o posiadane oprogramowanie komputer steruje procesem przesyłu danych, przetwarza je zgodnie z zawartym w programie algorytmem oraz redaguje wyniki i przesyła je na swoje urządzenia wyjściowe (drukarka, plotter, pamięć zewnętrzna itp.). Schemat takiego systemu przedstawiono na rys. 122b.

W przypadku przetwarzania w czasie rzeczywistym przyrządy pomiarowe muszą być cały czas połączone z komputerem. Połączenie to jest realizowane za pomocą multipleksera. Za pomocą sygnałów sterujących pracą multipleksera komputer zbiera dane z poszczególnych przyrządów pomiarowych (w kolejności i czasie określonym przez uruchomiony program), analizuje je, przetwarza, redaguje wyniki i wysyła je na urządzenia wyjściowe. Schemat takiego systemu pokazano na rys. 122 c.

Systemy przetwarzania i rejestracji danych pomiarowych można łączyć w sieci.

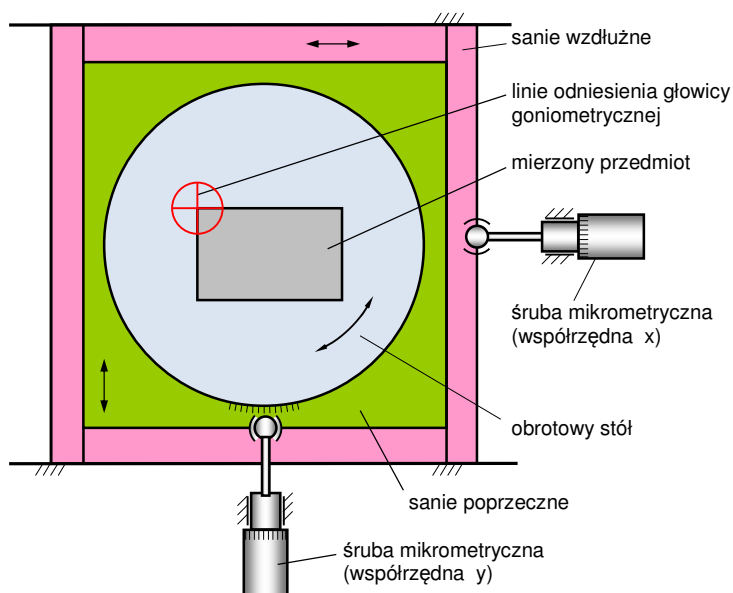
4.10. MIKROSKOPY WARSZTATOWE

Mikroskopy warsztatowe są to optyczne przyrządy pomiarowe przeznaczone do bezstykowych pomiarów wymiarów liniowych i kątowych w drobnych częściach maszyn. Pomiary te przeprowadza się przeważnie w płaskim układzie współrzędnych prostokątnych – x, y lub biegunowych – r, φ .

Pomiar za pomocą mikroskopu polega najczęściej na wyznaczeniu współrzędnych odpowiadających wybranym elementom geometrycznym mierzonego przedmiotu i obliczeniu na podstawie tych współrzędnych interesujących nas wymiarów.

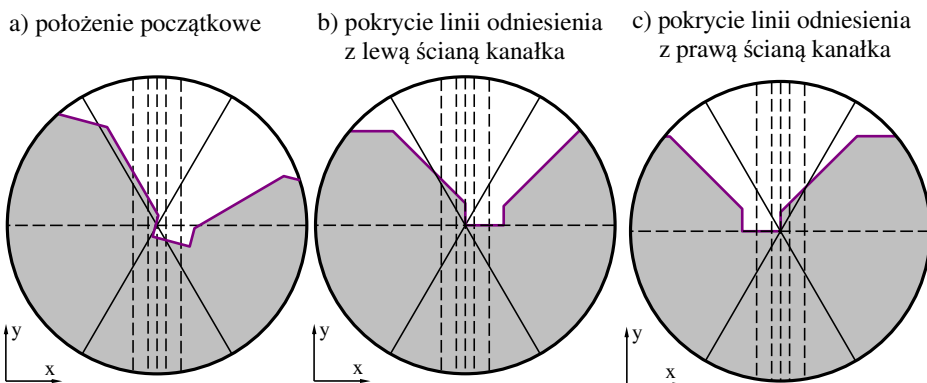
Wyznaczenie wartości współrzędnych odbywa się po odpowiednim ustawieniu powiększonego obrazu lub zarysu mierzonego przedmiotu względem widocznych w okularze mikroskopu linii odniesienia. Ustawienie to jest możliwe dzięki ruchomemu stołowi mikroskopu, który można przesuwac w dwóch poziomych, wzajemnie prostopadłych kierunkach i (w niektórych rozwiązaniach) obracać wokół osi pionowej (rys. 123).

Ruchome zespoły stołu mikroskopu (sanie wzdłużne, sanie poprzeczne, stół obrotowy) są zaopatrzone w układy pomiarowe (śruby mikrometryczne, podziałki z noniusem, elektroniczne przetworniki położenia) umożliwiające określenie współrzędnych ich aktualnego położenia. Współrzędne te określają położenie zamocowanego na stole przedmiotu.



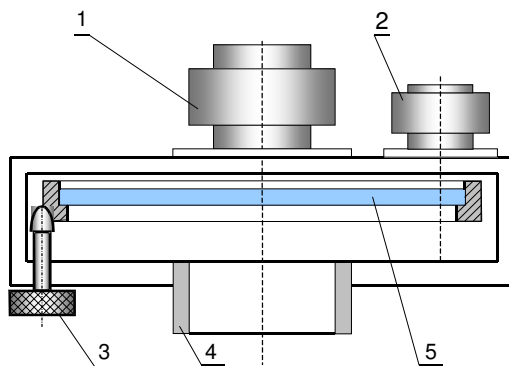
Rys. 123. Możliwe przemieszczenia przedmiotu zamocowanego na stole mikroskopu

Zasadę pomiaru za pomocą mikroskopu wyjaśnia pokazany na rys. 124 przykład pomiaru szerokości kanałka w pryzmie. Po zamocowaniu pryzmy na stole mikroskopu jej obraz zajmuje względem linii odniesienia położenie przypadkowe (rys. 124a). Za pomocą mechanizmów przesuwu i obrotu stołu należy ustawić pryzmę tak, aby dno kanałka pokryło się z poziomą linią odniesienia (ustawienie kierunkowe), a lewy brzeg kanałka z pionową linią odniesienia (rys. 124b). Po takim ustawieniu odczytujemy na bębnie śruby mikrometrycznej przesuwu wzdłużnego wartość x_1 współrzędnej x . Następnie przesuwamy sanie przesuwu wzdłużnego tak, aby z pionową linią odniesienia pokrył się prawy brzeg kanałka (rys. 124c). Odczytujemy wartość x_2 współrzędnej x . Szerokość kanałka b obliczamy z zależności $b = |x_2 - x_1|$.



Rys. 124. Przykład pomiaru za pomocą mikroskopu warsztatowym

Jednym z podstawowych zespołów mikroskopu warsztatowego jest głowica goniometryczna. Schemat jej budowy pokazano na rys. 125.

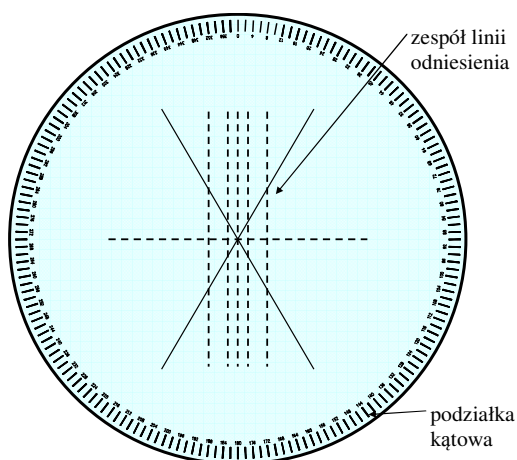


Rys. 125. Budowa głowicy goniometrycznej mikroskopu warsztatowego

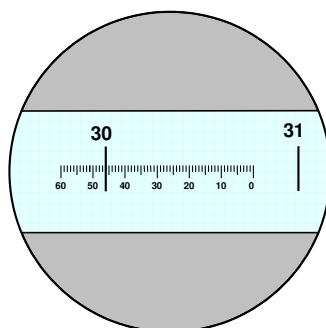
Wewnątrz obudowy głowicy znajduje się obrotowa płytki szklana 5, na której naniesione są linie odniesienia (w centrum) i podziałka obwodowa (na obrzeżu – rys. 126). Do obracania płytki służy pokrętko 3. Oś obrotu płytki powinna pokrywać się z osią optyczną mikroskopu. Zapewnia to tuleja 4, która ustala położenie głowicy w korpusie mikroskopu. Kresy naniesione na płytce są widoczne w dwóch okularach:

- w okularze 1, który jest nazywany okularzem głównym, widać linie odniesienia na tle obrazu lub zarysu mierzonego przedmiotu (rys. 124);
- w okularze 2, który nosi nazwę okularu pomocniczego, możemy odczytać współrzędną kąтового położenia płytki 5 (rys. 127).

Obrót płytki głowicy goniometrycznej nie tylko ułatwia ustawianie przedmiotu względem linii odniesienia, ale również umożliwia łatwe pomiary kątów.

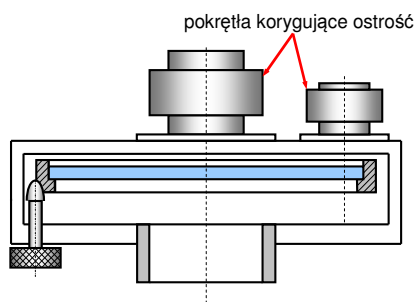


Rys. 126. Płytki głowicy goniometrycznej mikroskopu warsztatowego



Rys. 127. Widok w okularze pomocniczym mikroskopu (wskazanie $30^{\circ}46'$)

Dokładne ustawienie przedmiotu względem linii odniesienia wymaga uprzedniej regulacji ostrości widzenia. Dotyczy to zarówno obrazu mierzonego przedmiotu, jak i widoku samych linii. Regulacji ostrości linii odniesienia w okularze głównym oraz podziałki kątowej w okularze pomocniczym dokonuje się za pomocą pokręteł korekcyjnych okularów (rys. 128). Regulacji ostrości widzenia przedmiotu dokonuje się poprzez ustawienie obiektywu w odpowiedniej odległości od mierzonego przedmiotu.



Rys. 128. Elementy regulacji ostrości widzenia linii odniesienia i podziałki kątowej

Istotnym czynnikiem wpływającym na pomiar za pomocą mikroskopu jest powiększenie układu optycznego. Wzrost powiększenia ułatwia ustawienie mierzonego przedmiotu i zwiększa na ogół dokładność tego ustawienia. Z drugiej strony wzrost powiększenia sprawia, że w polu widzenia znajduje się mniejsza część mierzonego przedmiotu, co czasem może utrudniać poszukiwanie kolejnych punktów. Powiększenie mikroskopu jest równe iloczynowi powiększenia okularu i powiększenia obiektywu. Powiększenie okularu jest stałe i wynosi najczęściej 10x. Inne, rzadziej występujące powiększenia to 15x i 20x. Powiększenie obiektywu też jest stałe, ale mikroskopy mają w wyposażeniu po kilka wymiennych obiektywów. Najczęściej spotykane powiększenia obiektywów to 1x, 1,5x, 3x i 5x, rzadziej 10x i 20x. Z powyższego wynika, że najczęściej stosowane całkowite powiększenia mikroskopów to 10x, 15x, 30x i 50x. W praktyce zmiany powiększenia mikroskopu dokonuje się poprzez wymianę obiektywu. Teoretycznie można by zmienić powiększenie przez wymianę okularu, ale najczęściej w wyposażeniu mikroskopu jest tylko jedna głowica goniometryczna.

Niepewność pomiaru za pomocą mikroskopu warsztatowego szacuje się w oparciu o wzory empiryczne podawane przez ich producentów. Postać tych wzorów zależy od rodzaju pomiaru. Np. w przypadku pomiaru długości L przedmiotów płaskich niepewność pomiaru oblicza się z zależności $\Delta_u L = C_1 + \frac{L}{C_2} + \frac{H \cdot L}{C_3}$, w przypadku pomiaru średnicy

podziałowej d_p gwintu $\Delta_u d_p = C_4 + \frac{C_5}{\sin(\alpha/2)} + \frac{d_p}{C_6}$, a w przypadku pomiaru kąta β za

pomocą obrotu płytki głowicy goniometrycznej $\Delta_u \beta = C_7 + \frac{C_8}{f}$, gdzie H oznacza

wysokość mierzonego przedmiotu w mm, α – kąt zarysu gwintu, f – długość krótszego ramienia kąta w mm, a symbole $C_1, C_2, \dots, C_8$ – stałe liczbowe zależne od rodzaju użytego mikroskopu.

Mikroskopy warsztatowe służą do średniokładnych pomiarów wymiarów liniowych i kątowych drobnych części maszyn. Szczególnie użyteczne są one w przypadkach:

- kontroli złożonych zarysów definiowanych w układzie współrzędnych prostokątnych lub biegunowych. W ten sposób definiuje się i sprawdza np.: noże kształtowe, wykrojniki czy krzywki;
- pomiarów niektórych parametrów gwintów (np. średnicy podziałowej, średnicy den, podziałki czy półkąatów zarysu);
- pomiarów porównawczych (porównanie powiększonego zarysu z wykonanym w odpowiedniej skali rysunkiem wzorcowym).

Podane wyżej informacje dotyczą tzw. tradycyjnych mikroskopów warsztatowych. Mikroskopy, działające wg opisanej wyżej zasady produkowane były m.in. przez Polskie Zakłady Optyczne z Warszawy czy firmę Carl Zeiss z Jeny. Wiele egzemplarzy tych przyrządów wciąż jest jeszcze wykorzystywanych w naszym kraju. Oferowane są również współcześnie, jako przykład może służyć pokazany na rys. 129 mikroskop TM 500 produkcji japońskiej firmy Mitutoyo.



Rys. 129. Mikroskop TM 500 produkcji japońskiej firmy Mitutoyo [S2]

Obecnie mikroskopy tradycyjne wypierane są przez coraz częściej stosowane mikroskopy nowej generacji. Mikroskopy te są w zasadzie optycznymi maszynami do pomiaru w układzie dwóch (a czasem nawet trzech) współrzędnych. Wyposażone są

w mikrokomputery z oprogramowaniem podobnym do stosowanego we współrzędnościowych maszynach pomiarowych. Oprogramowanie to umożliwia nie tylko opracowanie i utrwalenie uzyskanych wyników, lecz pozwala na zwiększenie dokładności prowadzonych pomiarów (np. poprzez obliczanie położenia elementów geometrycznych z większej niż minimalna liczby punktów czy kompensację błędów). Oprogramowanie może również sterować ruchami stolika, jeśli ten wyposażony jest w napęd CNC, lub wskazywać operatorowi orientacyjne położenie kolejnych punktów, których współrzędne należy wyznaczyć.

Zastosowanie elektronicznej techniki obliczeniowej czyni zbędnym wstępne (kierunkowe) ustawianie przedmiotu, co pozwala na uproszczenie konstrukcji mechanicznej stołu (nie jest już potrzebna możliwość jego obrotu). Można również zrezygnować z możliwości obrotu linii odniesienia.

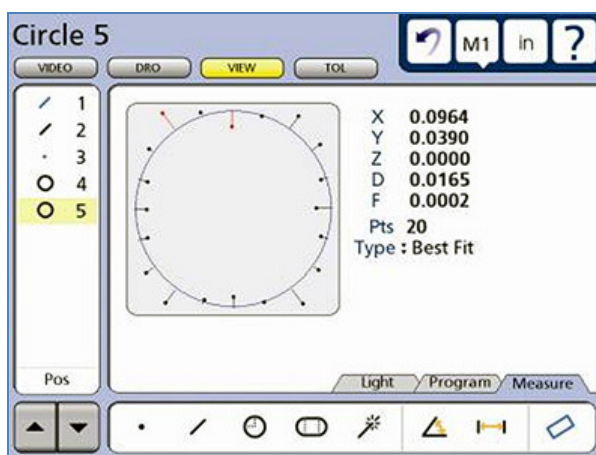
Jako przykład mikroskopu nowej generacji może służyć mikroskop Peregrine produkcji firmy Vision Engineering (rys. 130). Mikroskop Peregrine poza pomiarowym układem optycznym wyposażony w bezokularowy system Dynascope (ekran zamiast tradycyjnego okularu) jest wyposażony dodatkowo w kamerę wideo. Układ optyczny jest używany w przypadkach pomiaru ważnych (np. ze względów bezpieczeństwa) detali, w przypadkach, gdy wymagana jest wyższa dokładność lub gdy obraz z kamery jest niedostatecznie kontrastowy. W pozostałych przypadkach stosuje się znacznie wygodniejszy i szybszy pomiar obrazu wideo. Obraz ten można obmierzać ręcznie (za pomocą układu linii odniesienia) lub półautomatycznie (za pomocą sensora krawędziowego).



Rys. 130. Mikroskop Peregrine produkcji firmy Vision Engineering [S8]

Zastosowanie sensora krawędziowego skraca czas pomiaru i na ogół zwiększa jego dokładność. W trakcie pomiaru wyznaczane są wartości współrzędnych x i y wybranych

punktów mierzonego przedmiotu. Na podstawie tych wartości oprogramowanie pomiarowe wyznacza parametry zadeklarowanych wcześniej elementów geometrycznych oraz oblicza interesujące nas wymiary liniowe i kątowe. Uzyskane z pomiarów i obliczeń dane mogą być prezentowane zarówno w formie numerycznej, jak i graficznej na dotykowym ekranie wyświetlacza (rys 131), przekazane na drukarkę lub komputer (bezpośrednio do programu Excel).



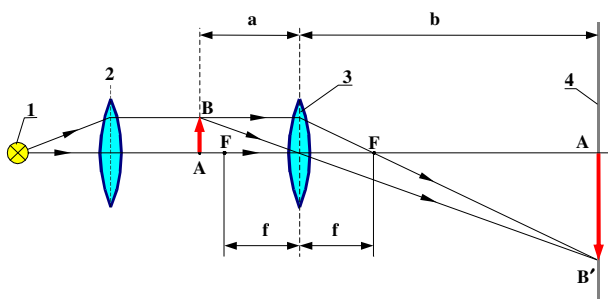
Rys. 131. Graficzna forma prezentacji wyników pomiaru okręgu na mikroskopie Peregrine [S28]

4.11. PROJEKTORY POMIAROWE

Projektory pomiarowe są to przyrządy optyczne o zasadzie działania podobnej do zasady działania mikroskopu. Różnica między nimi polega głównie na tym, że powiększony obraz mierzonego przedmiotu w mikroskopach obserwujemy w okularze, a w projektorach jest on rzucany na ekran.

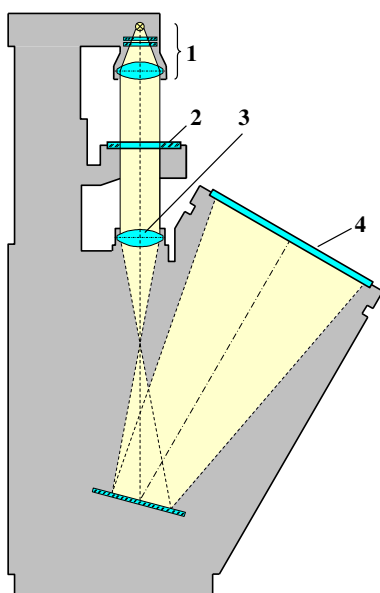
Stanowiący odpowiednik płytki głowicy goniometrycznej mikroskopu obrotowy ekran projektora jest wyposażony w linie odniesienia. W celu dokonania pomiaru należy odpowiednio ustawić wybrane elementy geometryczne obrazu mierzonego przedmiotu względem tych linii. Ustawienie to jest możliwe dzięki ruchomemu stolikowi projektora, który umożliwia przemieszczanie przedmiotu, a w konsekwencji również jego obrazu, w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Obrotowy ekran pozwala na zmianę kąta pochylenia linii odniesienia. Zarówno stół, jak i ekran są wyposażone w układy pomiarowe (śruby mikrometryczne, podziałki z noniusem, elektroniczne przetworniki położenia) umożliwiające określenie współrzędnych ich aktualnego położenia. Po dokonaniu odpowiedniego ustawienia odczytujemy współrzędne potrzebne do obliczenia interesujących nas wymiarów (analogicznie jak w przykładzie pokazanym na rys. 124).

Zasadę odwzorowania mierzonego przedmiotu na ekranie wyjaśnia schemat pokazany na rysunku 132. Możliwe są dwa rodzaje odwzorowania. Pierwszy, który jest pokazany na schemacie, ma miejsce przy pomiarze w świetle przechodzącym, gdy na ekran jest rzucany cień przedmiotu. Drugi sposób odwzorowania wymaga oświetlenia przedmiotu z przeciwnej strony. Na ekran trafia wtedy światło odbite od przedmiotu, czyli jego obraz. Mówi się wtedy o pomiarze w świetle odbitym.



Rys. 132. Schemat układu optycznego projektora pomiarowego

1 – źródło światła; 2 – kondensor; 3 – obiektyw; 4 – ekran; AB – mierzony przedmiot; A'B' – zarys mierzonego przedmiotu; a, b – parametry konstrukcyjne projektora; f – ogniskowa obiektywu

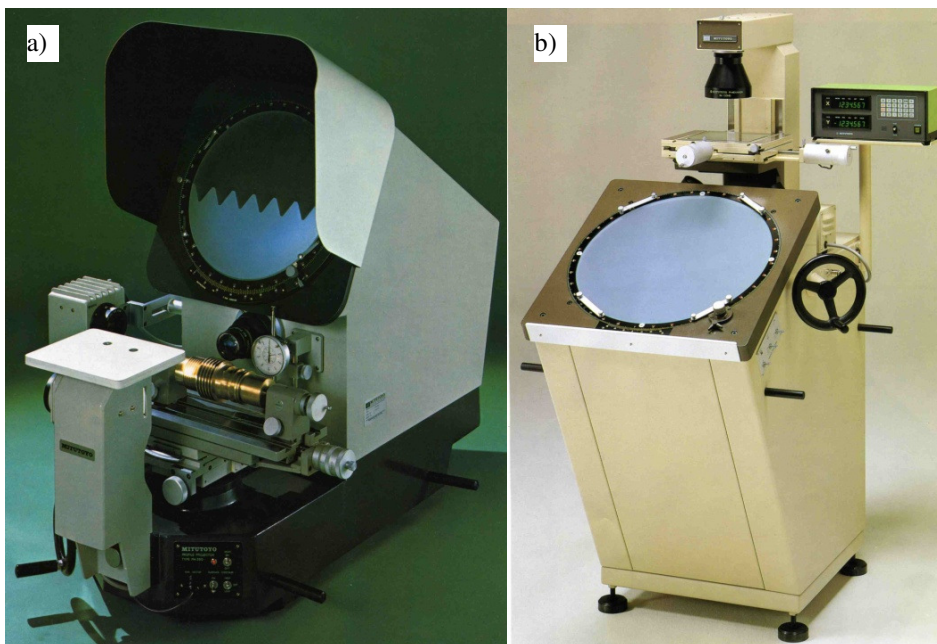


Rys. 133. Przebieg wiązki świetlnej w projektorze pionowym

1 – kondensor; 2 – stolik pomiarowy; 3 – obiektyw; 4 – ekran

Ponieważ pokazany na rys. 132 parametr konstrukcyjny **b** osiąga często duże wartości, więc w celu uzyskania zwartej (kompaktowej) konstrukcji projektorów kierunek wiązki świetlnej niosącej odwzorowanie przedmiotu przeważnie jest zmieniany. Wyjaśnia to schemat pokazany na rys. 133.

Ze względu na kierunek wiązki świetlnej wychodzącej z kondensora projektory pomiarowe dzielą się na poziome i pionowe.



Rys. 134. Projektory pomiarowe produkcji firmy Mitutoyo: a) poziomy (PH-350);
b) pionowy (PV 500) [L23]

Istotnym parametrem projektora jest powiększenie odwzorowania mierzonego przedmiotu. Wzrost powiększenia pozwala na bardziej precyzyjne „domierzanie” (ustawianie przedmiotu względem linii odniesienia), co zwiększa dokładność pomiaru. Jednakże przy dużych powiększeniach odwzorowanie przedmiotu przestaje mieścić się na ekranie, co znacznie utrudnia nawigację (znalezienie wybranych elementów geometrycznych).

Powiększenie projektora zależy wyłącznie od zastosowanego obiektywu. W wyposażeniu każdego projektora znajduje się przeważnie kilka wymiennych obiektywów, a ich najczęściej spotykane powiększenia to 5x, 10x, 20x, 50x i 100x.

Wcześniejsze rozwiązania konstrukcyjne projektorów pomiarowych miały stoły przemieszczane za pomocą śrub mikrometrycznych. Do odczytu współrzędnej kątowej położenia ekranu służyła w nich podziałka kątowa z noniusem. Współrzędne położenia stołu i ekranu były odczytywane i przetwarzane przez operatora. Dokładność pomiaru zależała od precyzji ustawienia obrazu mierzonego przedmiotu względem linii odniesienia, które było czynnością męczącą i czasochłonną.

Współczesne konstrukcje projektorów pomiarowych znacznie różnią się od tradycyjnych. Zamiast analogowych urządzeń określających położenie ruchomych zespołów projektora zastosowano w nich elektroniczne przetworniki położenia mające funkcję automatycznego wyprowadzania danych. Eliminuje to konieczność dokonywania odczytów i związane z tą czynnością pomyłki. Męczącą i czasochłonną czynność domierzania znacznie ułatwiono przez zastosowanie fotooptycznych detektorów krawędzi. W największym jednak stopniu możliwości współczesnych projektorów pomiarowych zwiększyło komputerowe wspomaganie procesu pomiarowego. Włączenie do konfiguracji projektorów specjalizowanych mikroprocesorów wyposażonych w odpowiednie oprogramowanie umożliwiło stosowanie bardziej złożonych niż uprzednio strategii pomiarowych, eliminację niektórych rodzajów błędów systematycznych, automatyczne przetwarzanie danych pomiarowych i dokumentowanie uzyskanych wyników.

Przykład projektora pomiarowego nowej generacji pokazano na rys. 135. Jest to projektor pionowy VB12-1510 produkcji firmy Sinowon Instrument Co. Ekran tego projektora o średnicy 300 mm jest wyposażony w przetwornik położenia kątowego. Stolik



Rys. 135. Projektor VB12-1510 produkcji firmy Sinowon Instrument Co. [S25]

pomiarowy o możliwości przesuwu krzyżowego 150x100 mm jest wyposażony w przetworniki położenia liniowego. Oba rodzaje przetworników mają funkcję automatycznego wyprowadzania danych i są połączone ze specjalizowanym mikroprocesorem pomiarowym DP300. Mikroprocesor jest wyposażony w oprogramowanie pomiarowe uwzględniające specyfikę optycznych pomiarów wielkości geometrycznych (QM1.0). W wyposażeniu projektora znajduje się także detektor krawędzi SED300, który steruje przekazywaniem danych z przetworników położenia do mikroprocesora. Wyniki pomiaru, odpowiednio przetworzone przez mikroprocesor mogą być w postaci raportu przekazane na drukarkę.

Rozwój technik wideo oraz próby ich wykorzystania w pomiarach wielkości geometrycznych zaowocowały rozwiązaniami, w których obraz uzyskiwany za pomocą tradycyjnych układów optycznych jest zastępowany obrazem z kamery wideo, co zostało już zasygnalizowane przy omawianiu rozwiązania konstrukcyjnego mikroskopu Peregrine (rozdz. 4.10, rys. 130). Wideosystemy pomiarowe znalazły również zastosowanie w przypadku projektorów. Przykład takiego rozwiązania pokazano na rys. 136.



Rys. 136. Wideoprojektor VTC2515 produkcji firmy Sinowon Instrument Co [S25]

Pokazany wyżej projektor działa w oparciu o obraz uzyskany z przemysłowej kamery CCD wysokiej rozdzielczości i zaawansowane oprogramowanie do optycznych pomiarów wielkości geometrycznych QM2.0. Jest wyposażony w dotykowy 19" ekran LCD. Możliwe powiększenia obrazu: 20÷120x, zakres pomiarowy 250x150 mm, niepewność – (3÷4) μm , powtarzalność – 5 μm .

4.12. DŁUGOŚCIOMIERZE

Zasada działania długościomierzy jest oparta na umieszczonych w osi pomiaru ruchomych wzorcach długości. Wzorce te, ściśle powiązane z końcówką pomiarową, przemieszczają się wraz z nią, zajmując położenie zależne od mierzonego wymiaru. Ocena wartości wymiaru odbywa się poprzez określenie położenia wzorca.

W zależności od usytuowania osi pomiarowej w przestrzeni długościomierze dzielą się na poziome i pionowe, zaś w zależności od sposobu pobierania wymiaru – na stykowe i optyczne.

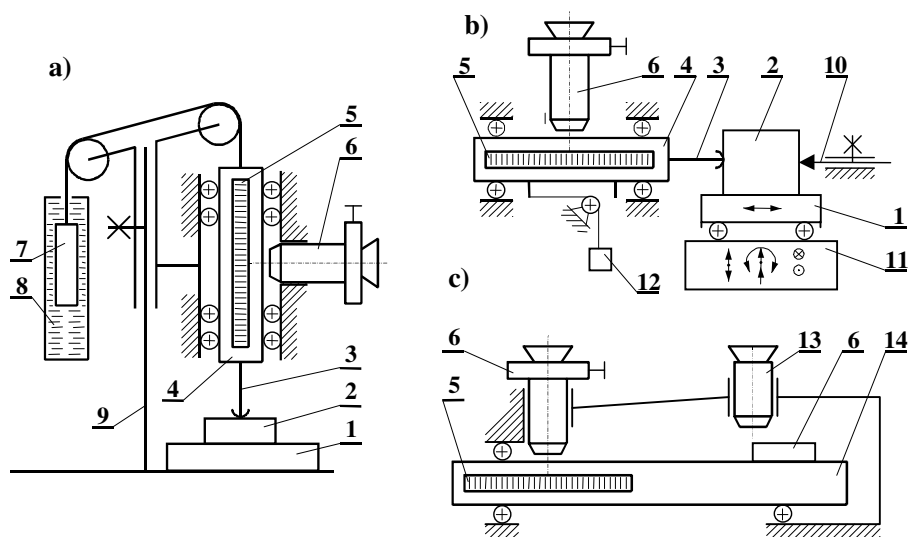
Początkowo rozwiązania konstrukcyjne długościomierzy zostały oparte na kreskowych wzorcach długości oraz na umożliwiających precyzyjne określenie położenia tych wzorców specjalnych układach optycznych. Obecnie coraz częściej wzorce kreskowe i układy optyczne są zastępowane przedstawionymi w rozdziale 4.9 elektronicznymi przetwornikami położenia.

Przykładem długościomierzy działających w oparciu o kreskowe wzorce długości mogą być tzw. długościomierze Abbe'go. W skład tej rodziny przyrządów wchodzi:

- długościomierz pionowy;
- długościomierz poziomy (zwany także uniwersalnym) oraz
- długościomierz optyczny (zwany też komparatorem Abbe'go).

Schematy przedstawiające zasadę działania poszczególnych odmian długościomierzy Abbe'go zamieszczono na rys. 137.

W przedstawionym na schemacie „a” pionowym długościomierzu Abbe'go, końcówka pomiarowa „3” jest sztywno powiązana z łożyskowanym tocznie, ruchomym trzpieniem pomiarowym „4”. W osi tego usytuowanego pionowo trzpienia jest wbudowany kreskowy wzorec długości „5”. Pod wpływem swojego ciężaru, skompensowanego w znacznej części przez obciążnik „7”, trzpień opuszcza się aż do momentu zetknięcia końcówki pomiarowej z powierzchnią przedmiotu mierzonego „2”. Prędkość opuszczania się trzpienia jest ograniczana za pomocą tłumika olejowego „8”. Położenie trzpienia podczas styku końcówki pomiarowej z powierzchnią mierzonego przedmiotu określa się za pomocą mikroskopu odczytowego „6”. Mikroskop ten jest wyposażony w specjalny noniusz, nazywany noniuszem Abbe'go, który umożliwia odczyt współrzędnej położenia wzorca z rozdzielczością równą 0,2 lub 1 μm . Zasada działania noniusza Abbe'go zostanie przedstawiona w dalszej części rozdziału. Zakres pomiarowy długościomierza zależy od długości zainstalowanego w nim wzorca kreskowego i sposobu zerowania przyrządu. Przy zerowaniu długościomierza na poziomie płyty stolika „1” uzyskuje się zakres pomiarowy ograniczony wartościami 0 i L_w , przy czym L_w oznacza długość wzorca kreskowego. Używając do zerowania płytki wzorcowej o długości L_0 i podnosząc odpowiednio zespół trzpienia na kolumnie „9”, można uzyskać przesunięcie zakresu



Rys. 137. Zasada działania dłuгоściomierzy Abbe'go: a) dłuгоściomierz pionowy; b) dłuгоściomierz poziomy; c) dłuгоściomierz optyczny

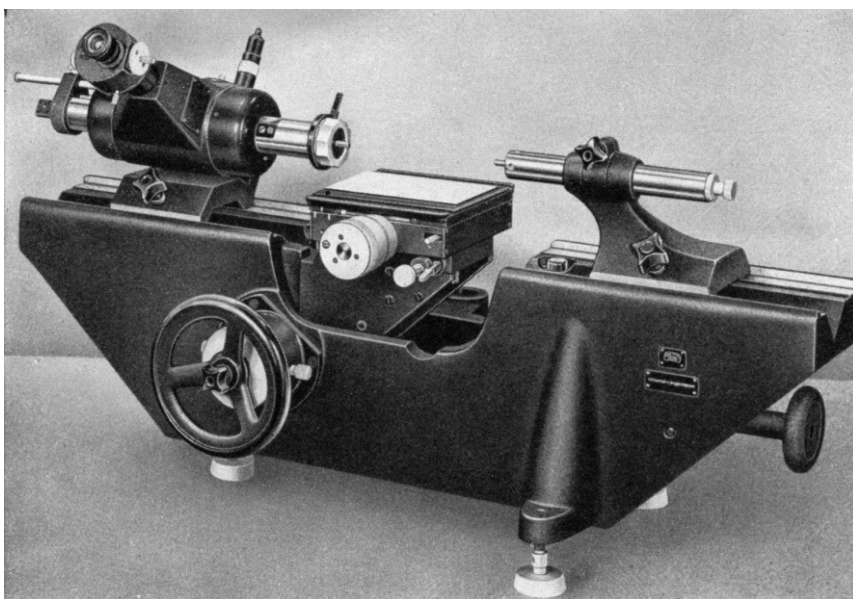
pomiarowego w obszar bezzerowy ograniczony wartościami L_0 i $L_0 + L_w$. Omawiany przyrząd służy do pomiaru wymiarów zewnętrznych.

Przykładem przyrządów zbudowanych wg przedstawionego wyżej schematu może być dłuгоściomierz pionowy produkcji zakładu Carl Zeiss z Jeny. Dłuгоściomierz ten ma zakres pomiarowy $0 \div 100 \text{ mm}$ ($100 \div 200 \text{ mm}$), przy wartości działki elementarnej $w_e = 1 \text{ }\mu\text{m}$. Graniczną wartość błędu przyrządu określa zależność $\Delta_G = \pm (1,5 + L/100) \text{ }\mu\text{m}$, gdzie L oznacza dłuгоść mierzoną w mm.

W dłuгоściomierzu poziomym (schemat „b”) występuje podobny trzpień pomiarowy jak w przypadku dłuгоściomierza pionowego. Trzpień ten jest usytuowany poziomo, a dosunięcie końcówki pomiarowej do przedmiotu oraz zabezpieczenie właściwego nacisku pomiarowego realizowane jest za pomocą dodatkowego obciążnika „12”. Obciążnik ten, o regulowanej skokowo masie, jest połączony z trzpieniem pomiarowym za pomocą cięgna. Ponieważ kierunek przesuwu trzpienia zależy od wyboru zaczepu cięgna, na dłuгоściomierzu tym można mierzyć zarówno wymiary zewnętrzne, jak i wewnętrzne. Mierzony przedmiot „2” jest mocowany na stoliku pomiarowym „1”. Stolik ten ma możliwość dowolnego ustawiania się („pływania”) w kierunku osi pomiaru. Wywierając nacisk na przedmiot mierzony, końcówka pomiarowa przesuwa go wraz ze stolikiem aż do zetknięcia z nieruchomą końcówką pomiarową „10”. Położenie końcówki „10” można regulować, co wykorzystywane jest przy zerowaniu przyrządu. Stolik

pomiarowy jest umieszczony na ruchomym podeście „11”. Za pomocą śrub mikrometrycznych podest ten może być przemieszczany w kierunku góra – dół oraz w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku. Można go również obracać wokół osi pionowej (zaznaczonej na schemacie podwójną strzałką) oraz wokół osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku. Ruchy te dają możliwość poprawnego ustawienia przedmiotu mierzonego w trakcie pomiaru. Do określania położenia wzorca służy mikroskop odczytowy „6”.

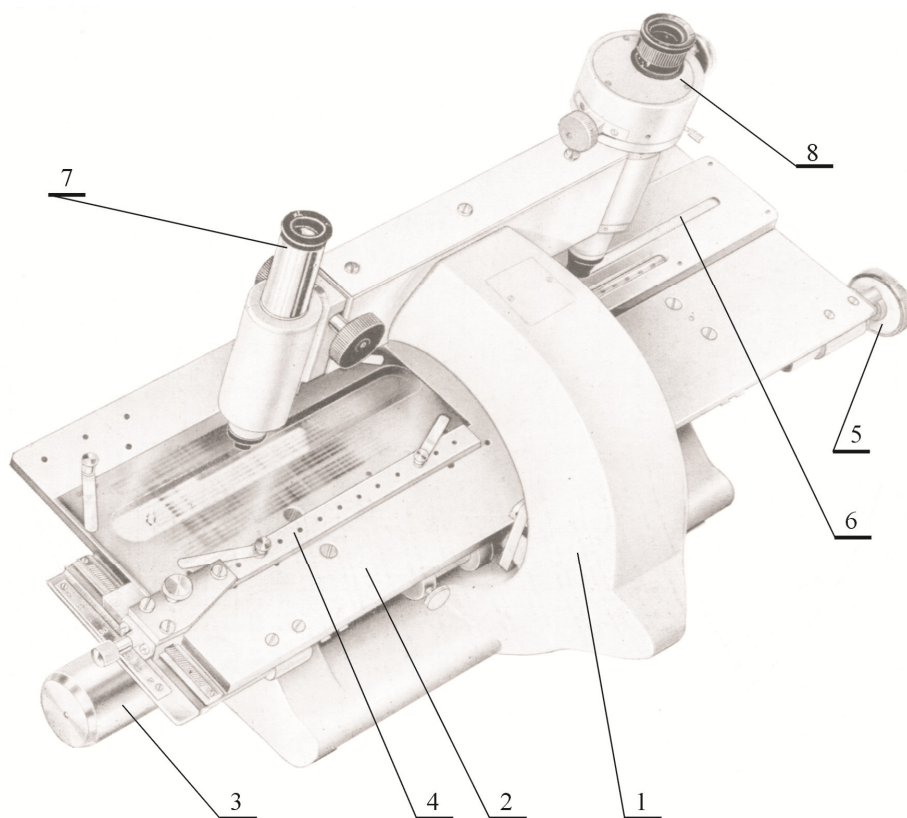
Zgodnie z opisanym wyżej schematem wykonany jest długościomierz poziomy produkcji firmy Carl Zeiss Jena, który pokazano na rys. 138. Długościomierz ten ma zakres pomiarowy $0 \div 100$ mm (maks. $350 \div 450$ mm), przy wartości działki elementarnej $0,2 \mu\text{m}$ lub $1 \mu\text{m}$. Graniczna wartość błędu przyrządu zależy od rodzaju pomiaru oraz wybranego zakresu pomiarowego i waha się w granicach od $1 \mu\text{m}$ do $3 \mu\text{m}$.



Rys.138. Długościomierz poziomy produkcji firmy Carl Zeiss Jena [L33]

W przedstawionym na schemacie 137c optycznym długościomierzu Abbe'go kre-skowy wzorec długości „5” jest zainstalowany w ruchomym stole pomiarowym „14”. Na stole tym mocowany jest również przedmiot mierzony „2”. Stół wraz z przedmiotem ustawiany jest tak, aby określające mierzony wymiar elementy charakterystyczne przedmiotu (punkty, krawędzie itp.) pokryły się z odpowiednimi kresami mikroskopu ustawczego „13”. Odpowiadające poszczególnym ustawieniom i stanowiące podstawę do obliczenia mierzonego wymiaru współrzędne położenia stołu są odczytywane za pomocą wyposażonego w noniusz Abbe'go mikroskopu odczytowego „6”.

Jako przykład długościomierza optycznego służyć może tzw. komparator Abbe'go, którego widok pokazano na rys. 139. Zakres pomiarowy tego przyrządu wynosi $0 \div 200$ mm, rozdzielczość odczytu – 0,001 mm, całkowite powiększenie mikroskopu ustawczego – 35x. Jego producentem, podobnie jak w przypadku wcześniej przedstawionych wersji, są Zakłady Carl Zeiss z Jena.

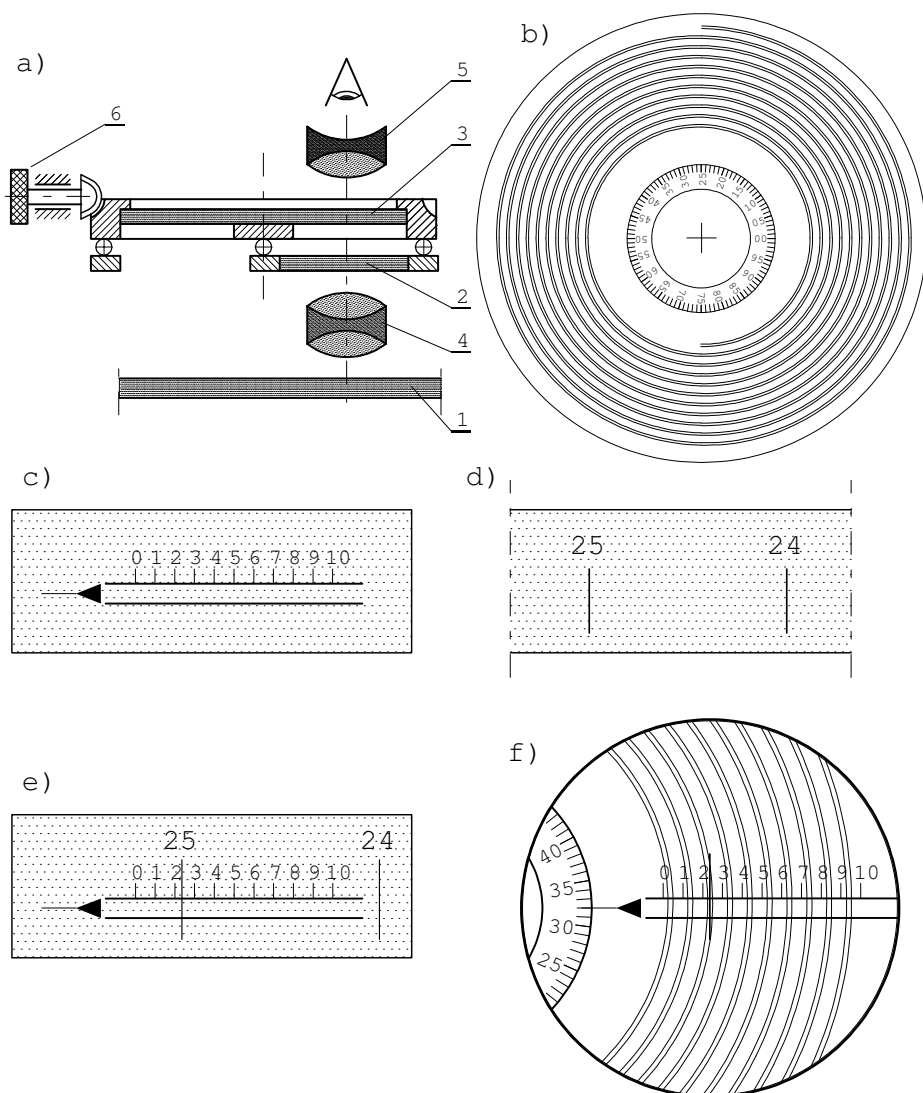


Rys.139. Długościomierz optyczny produkcji firmy Carl Zeiss Jena

1 – korpus; 2 – przesuwny stół; 3 – prowadnica stołu; 4 – listwa ustalająca położenie mierzonych przedmiotów; 5 – pokrętko precyzyjnego przesuwu stołu; 6 – płytka szklana z wzorcem kreskowym; 7 – mikroskop ustawczy; 8 – mikroskop odczytowy z noniuszem Abbe'go

W długościomierzach z wzorcami kreskowymi istotnym problemem konstrukcyjnym jest uzyskanie odpowiednio dużej rozdzielczości odczytu współrzędnej położenia wzorca. Jedno z rozwiązań tego problemu, znane pod nazwą noniusza Abbe'go, pokazano na rys. 140. W rozwiązaniu tym wzorec kreskowy "1" obserwujemy przez mikroskop odczytowy, w skład którego wchodzi: obiektyw "4", płytka dziesiętna "2", płytka obrotowa "3" i okular "5". Na płycie dziesiętnej, której widok przedstawiono na rys. 140c,

jest naniesiona podziałka o działkach elementarnych długości 0,1 mm i całkowitej długości równej 1 mm. Dzięki tej podziałce oraz powiększeniu układu optycznego można łatwo określić położenie wzorca kreskowego z rozdzielczością do 0,1 mm. Np. w przypadku przedstawionym na rys. 140e widać, że kresa 25 wzorca znajduje się pomiędzy



Rys. 140. Budowa i zasada działania noniusza Abbe'go: a) budowa noniusza; b) widok płytki obrotowej; c) widok płytki dziesiątnej; d) fragment wzorca kreskowego; e) kresy wzorca na tle podziałki płytki dziesiątnej; f) widok w okularze

kresami 2 i 3 podziałki płytki dziesiętnej, co oznacza, że współrzędna położenia wzorca zawarta jest pomiędzy 25,2 i 25,3 mm.

Dalszy wzrost rozdzielczości odczytu wymaga bardziej precyzyjnego określenia położenia kresy wzorca względem kres podziałki (w prezentowanym przykładzie – odległości kresy 25 od kresy 2). Do tego celu służy obrotowa płytka "3". W centralnej części tej płytki (rys. 140b) znajduje się podziałka kątowa obejmująca kąt pełny i zawierająca 100, 200 lub 500 działek elementarnych. Na zewnątrz podziałki kątowej naniesiona jest podwójna linia w kształcie spirali Archimedeasa o skoku równym 0,1 mm.

Obrót płytki "3", za pomocą pokrętki "6", sprawia, że w pole widzenia okularu (rys. 140f) wchodzi punkty spirali o coraz to innych promieniach. Widocznym efektem tego zjawiska jest przemieszczanie się zwojów spirali wzdłuż podziałki płytki dziesiętnej. Wielkość przemieszczenia zwojów jest proporcjonalna do kąta obrotu płytki, a pełnemu obrotowi odpowiada przemieszczenie równe skokowi spirali, czyli 0,1 mm. Płytki noniusza są tak ustawione, że w momencie gdy trójkątny wskaźnik płytki dziesiętnej pokazuje na podziałce kątowej kresę 00, linie podziałki płytki dziesiętnej znajdują się dokładnie pośrodku podwójnej linii spirali. Aby określić położenie kresy wzorca względem podziałki, wystarczy więc tylko tak ustawić płytkę obrotową, by kresa wzorca znalazła się dokładnie pośrodku podwójnej linii spirali i odczytać współrzędną kątową położenia płytki obrotowej. Jeżeli współrzędna ta jest równa n działek elementarnych, to ze wspomnianej wyżej proporcjonalności wynika, że odległość kresy wzorca od najbliższej jej lewej kresy podziałki wynosi $n \cdot 0,1 \text{ mm}/N$, gdzie N jest liczbą wszystkich działek elementarnych podziałki kątowej. W prezentowanym przykładzie $N = 100$, a zatem odległość kresy 25 od kresy 2 wynosić będzie $n \cdot 0,001 \text{ mm}$. Ponieważ $n = 32$, więc prawidłowym odczytem wskazania noniusza jest w tym przypadku 25,232 mm.

W nowszych konstrukcjach długościomierzy kreskowe wzorce długości są zastępowane przez elektroniczne przetworniki położenia. Zastosowanie tych przetworników nie tylko ułatwia odczyt wyniku pomiaru, ale również dalsze jego przetwarzanie i rejestrację.

Jako przykład długościomierza nowej generacji może służyć uniwersalna maszyna pomiarowa produkcji firmy Mahr, oznaczona w katalogu producenta symbolem ULM 600. Pokazano ją na rys. 141.

ULM 600 składa się z poziomego granitowego łoża, które ustala położenie dwóch zespołów pomiarowych: zespołu głowicy pomiarowej i zespołu konika. Zespół głowicy zawiera ruchomą końcówkę pomiarową, położenie której określa optoelektroniczny przetwornik położenia. W zespole konika zamontowana jest nieruchoma końcówka pomiarowa. Pomiędzy karetką a konikiem umieszczony jest stolik, na którym mocowane są mierzone przedmioty. Stolik ten ma pięć stopni swobody (trzy przesuwu i dwa obroty). Wykorzystuje się go do ustawiania mierzonych przedmiotów. Położenie stolika w kierunku

pionowym jest określane przez optoelektroniczny przetwornik położenia. Dzięki niemu na maszynie ULM 600 można przeprowadzać pomiary w układzie dwóch współrzędnych (2D).



Rys. 141. Maszyna pomiarowa ULM 600 produkcji firmy Mahr [S16]

Podobnie jak w przypadku nowoczesnych mikroskopów czy projektorów procesy pomiarowe realizowane na maszynie ULM 600 są wspomagane komputerowo. Specjalne oprogramowanie (828 Win) pracujące pod systemem operacyjnym MS Windows ułatwia i przyspiesza wykonywanie pomiarów, a także pozwala na zwiększenie ich dokładności.

W szczególności oprogramowanie to pozwala m.in. na:

- automatyczne pobieranie danych;
- detekcję tzw. punktów zwrotnych;
- komputerowe wspomaganie typowych zadań pomiarowych (np. sprawdzania sprawdzianów tłoczkowych, szczękowych czy pierścieniowych; sprawdzania mikrometrów zewnętrznych, czujników zegarowych, wzorców inkrementalnych czy płytek wzorcowych) wraz z opracowaniem uzyskanych wyników;
- sporządzanie raportów z przeprowadzonych pomiarów;
- stabilizację zera;
- korekcję błędów systematycznych maszyny;
- kompensację błędów wynikających z odkształceń sprężystych spowodowanych naciskiem pomiarowym oraz stabilizację tego nacisku;
- kompensację odkształceń termicznych na podstawie sygnałów przekazywanych przez zestaw czujników temperatury.

Maszyna pomiarowa ULM 600 należy do dość licznej rodziny maszyn do pomiaru długości produkowanych przez firmę Mahr pod firmową nazwą PRECIMAR. Podstawowe dane metrologiczne maszyn należących do tej rodziny zestawiono w tabeli 26.

Tabela 26. Podstawowe parametry metrologiczne maszyn do pomiaru długości produkcji firmy MAHR [S16]				
Rodzaj maszyny	Zakres pomiarowy [mm]	Rozdzielczość odczytu [μm]	Dopuszczalna wartość błędu [μm]	Rodzaj przetwornika położenia
ULM 300	0-305 (z) 0,5-150 (w)	Do wyboru 0,01 lub 0,1	Dla wersji standardowej: 0,3 + L/1500	Optoelektroniczny o zakresie pomiarowym 0-100 mm; (w pozostałej części zakresu pomiar metodą różnicową)
ULM 600	0-640 (z) 0,5-485 mm (w)		Dla wersji o podwyższonej dokładności: 0,1 + L/2000	
ULM 1000	0-1060 (z) 0,5-905 (w)			
ULM 1500	0-1560 (z) 0,5-1405 (w)			
ULM 520S	0-520 (z) 0,5-365 (w)	0,1	W zakresie 0-100mm: 0,1 + L/2000	Optoelektroniczne końcówki pomiarowe, korpusu głowicy i konika
ULM 1000S	0-1025 (z) 0,5-870 (w)		W pozostałym: 0,6+L/1000	
ULM 800 L	0-830 (z) 0,5-670 (w)	Do wyboru 0,01 lub 0,1	0,1+L/2000	interferometr laserowy
ULM 1500 L	0-1620 (z) 0,5-1465 (w)		0,1+L/2000	interferometr laserowy
(z) – przy pomiarze wymiarów zewnętrznych (w) – przy pomiarze wymiarów wewnętrznych				

Maszyny ULM 300/600/1000/1500 są wykonywane w dwóch wersjach: wersji standardowej i wersji o podwyższonej dokładności. Wersja standardowa jest przeznaczona do kontroli technicznej w produkcji, wersja o podwyższonej dokładności do sprawdzania przyrządów pomiarowych (mikrometry, czujniki), wzorców i sprawdzianów. Wszystkie ww. maszyny spełniają tzw. postulat Abbe'go, tzn. oś wzorca pokrywa się w nich z osią pomiaru. Eliminuje to niektóre składniki błędu pomiaru, zwiększając jego dokładność. Korpusy głowicy pomiarowej i konika wszystkich maszyn (poza ULM 300) są wyposażone w prowadnice aerostatyczne, co zwiększa komfort obsługi i przyspiesza wykonanie pomiarów. Dalsze informacje na temat maszyn firmy Mahr można znaleźć w [S16].

4.13. MASZYNY WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWE

4.13.1. Informacje ogólne

W latach sześćdziesiątych dwudziestego wieku w przemyśle maszynowym krajów wysokorozwiniętych miał miejsce burzliwy rozwój technik wytwarzania. Wynikał on z wprowadzania do produkcji zautomatyzowanych linii i centrów obróbkowych oraz obrabiarek sterowanych numerycznie. Jednocześnie, w związku z tezą, że zastosowanie zautomatyzowanych środków produkcyjnych o dużej dokładności, wyposażonych dodatkowo we własne urządzenia pomiarowe, uczyni kontrolę wymiarową zbędną, mniejszą uwagę poświęcano w owym okresie zagadnieniom metrologicznym. Ponieważ wspomniana teza nie sprawdziła się w praktyce, a rozwój narzędzi pomiarowych i technik kontrolnych przestał nadążać za rozwojem technik wytwarzania, doszło pod koniec lat sześćdziesiątych do "kryzysu metrologicznego" [L4], który dotyczył zwłaszcza elementów o skomplikowanych kształtach i dużej liczbie kontrolowanych wymiarów. Pokonanie tego kryzysu było związane z powstaniem i rozwojem współrzędnościowych maszyn pomiarowych.

Maszyny współrzędnościowe umożliwiają pomiary i kontrolę wymiarów liniowych i kątowych dowolnie usytuowanych w przestrzeni. Za ich pomocą można kontrolować przedmioty o skomplikowanych, trójwymiarowych kształtach (karoserie samochodowe, łopatki turbin, koła zębate). Pozwalają również pomierzyć wartości odchyłek kształtu i położenia.

Maszyny współrzędnościowe mają szereg cennych zalet, a w szczególności:

- wysoką, w porównaniu z tradycyjnymi środkami pomiarowymi, wydajność pracy; (zastosowanie maszyn współrzędnościowych pozwala na skrócenie czasu kontroli w granicach (60÷90)%, przy czym wskaźnik wydajności rośnie przeważnie wraz ze złożonością kontrolowanego detalu);
- możliwość dokonywania pomiarów w sposób automatyczny;
- dużą uniwersalność pozwalającą na rozwiązywanie różnorodnych, skomplikowanych i często trudnych do wykonania za pomocą innych narzędzi zadań pomiarowych;
- możliwość przetwarzania danych pomiarowych, prowadzenia analiz statystycznych kontrolowanych wymiarów, materializowania uzyskanych wyników w postaci wydruków czy wykresów;
- możliwość współpracy z zautomatyzowanymi liniami i centrami obróbkowymi.

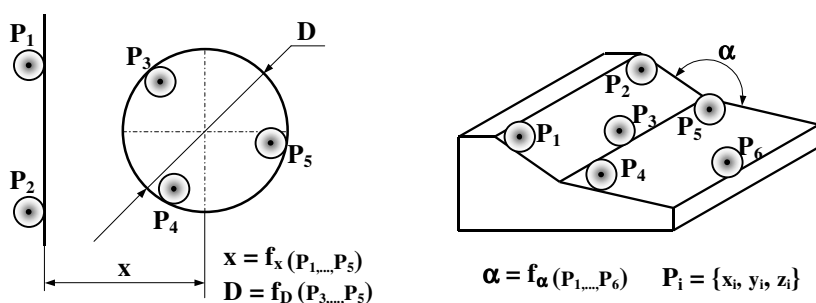
4.13.2. Zasada pomiaru

Jak już wspomniano, maszyny współrzędnościowe są przeznaczone do pomiarów i kontroli różnego rodzaju wymiarów. Wymiary te określają wzajemną odległość elementów geometrycznych kontrolowanego przedmiotu.

Pomiar na maszynie współrzędnościowej sprowadza się do:

- zastąpienia rzeczywistego kształtu mierzonego przedmiotu kształtem modelowym, utworzonym z idealnych elementów geometrycznych, takich jak punkt, prosta, okrąg, płaszczyzna, powierzchnia walcowa, powierzchnia stożkowa, powierzchnia kulista itp.;
- wyznaczenia wartości parametrów charakteryzujących wielkość i położenie elementów, z których zbudowany jest kształt modelowy (np. wartości współrzędnych środka i wartości promienia powierzchni kulistej); podstawą do wyznaczenia wartości tych parametrów jest zbiór współrzędnych punktów styku końcówki pomiarowej z powierzchnią mierzonego przedmiotu;
- obliczenia wartości interesujących nas wymiarów (np. znając wartości współrzędnych środków dwóch powierzchni kulistych, możemy obliczyć ich wzajemną odległość).

Upraszczając powyższe, można powiedzieć (niezbyt ściśle), że pomiar na maszynie współrzędnościowej sprowadza się do wyznaczenia wartości współrzędnych odpowiednio dobranych punktów mierzonego przedmiotu i obliczeniu na ich podstawie interesujących nas wymiarów liniowych lub kątowych (p. rys. 142). Poza wymiarami programy obliczeniowe maszyn współrzędnościowych umożliwiają również obliczenie wartości innych parametrów geometrycznych (np. odchyłek kształtu czy odchyłek położenia).



Rys. 142. Zasada pomiaru na maszynach współrzędnościowych

Do wyznaczania wartości współrzędnych wybranych punktów kontrolowanych przedmiotów wykorzystuje się specjalne głowice pomiarowe. Głowice te są przemieszczane w przestrzeni, a ich położenie jest w sposób ciągły śledzone przez automatyczne układy pomiarowe. Zadaniem głowicy jest sygnalizacja kontaktu z mierzoną powierzchnią. Położenia głowicy w momencie zasygnalizowania kontaktu są zapamiętywane i wykorzystywane jako dane wejściowe do obliczania kolejno: współrzędnych punktów styku końcówki pomiarowej z mierzoną powierzchnią, parametrów określających przyjęty model kształtu, wartości kontrolowanych wymiarów czy odchyłek.

4.13.3. Podstawowe zespoły i układy maszyn współrzędnościowych

Przeprowadzenie pomiaru na maszynie współrzędnościowej jest związane z realizacją szeregu różnych funkcji. Funkcje te realizowane są przez wyspecjalizowane podzespoły maszyny. Do najważniejszych z nich zalicza się:

- zespół nośny (nieruchomy korpus, elementy przesuwne, prowadnice, łożyska itp.), którego zadaniem jest precyzyjne przemieszczanie głowicy pomiarowej wewnątrz obszaru pomiarowego maszyny;
- zespół układów pomiarowych, których zadaniem jest określanie położenia ruchomych elementów nośnych w celu wyznaczenia współrzędnych położenia głowicy;
- zespół głowicy pomiarowej, którego zadaniem jest pobranie informacji o kształcie mierzonego przedmiotu;
- zespół obliczeniowy (komputer, urządzenia peryferyjne oraz odpowiednie oprogramowanie), którego zadaniem jest odpowiednie opracowanie uzyskanych w trakcie pomiaru informacji. Może on także wspomagać sterowanie przebiegiem pomiaru;
- układy napędzające elementy przesuwne maszyny;
- układy sterujące ruchem elementów przesuwnych.

4.13.4. Zespoły nośne

Głównym zadaniem zespołu nośnego jest przemieszczanie głowicy pomiarowej w przestrzeni tak, aby mogła ona zlokalizować wszystkie interesujące nas punkty mierzonego przedmiotu. W skład zespołu nośnego wchodzi najczęściej sztywna i nieruchoma podstawa oraz co najmniej trzy elementy przesuwne. Każdy z nich posiada jeden stopień swobody (możliwość przesuwu lub obrotu). Stół pomiarowy, na którym mocowane są mierzone przedmioty, może być sztywno powiązany z podstawą (tzw. stół nieruchomy), bądź też stanowić jeden z elementów przesuwnych (stół ruchomy mający możliwość przesuwu lub obrotu względem podstawy).

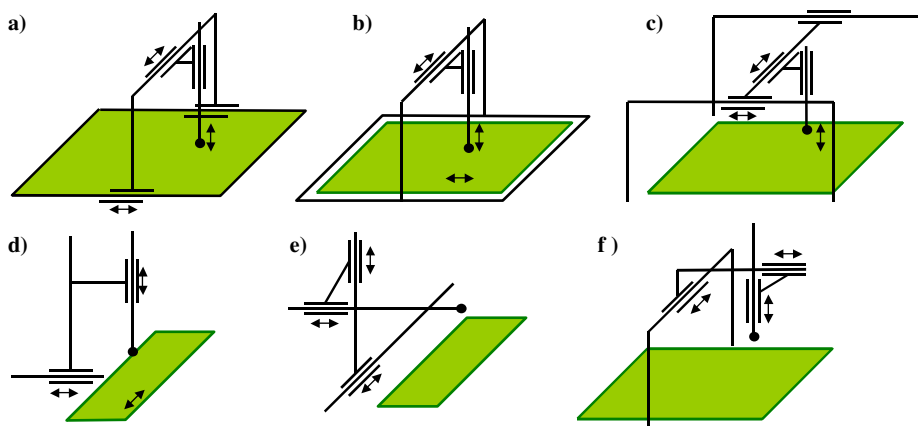
Podstawa maszyny poprzez swoje prowadnice, a także prowadnice znajdujące się w elementach przesuwnych, wyznacza odniesieniowy układ współrzędnych, zwany układem maszyny. Najczęściej jest to układ współrzędnych prostokątnych XYZ, choć spotyka się również maszyny pracujące w innych układach, np. w układzie współrzędnych walcowych.

Ze względu na rozwiązanie konstrukcyjne zespołu nośnego (usytuowanie i kierunki przemieszczeń elementów przesuwnych) maszyny współrzędnościowe dzielą się na kilka podstawowych typów. Wyróżnia się:

- a) maszyny portalowe (z ruchomym i nieruchomym portalem);
- b) maszyny mostowe;
- c) maszyny kolumnowe;

- d) maszyny wysięgnikowe;
- e) maszyny wspornikowe.

Schematy kinematyczne ww. typów maszyn współrzędnościowych pokazano na rys. 143. W praktyce spotyka się jeszcze inne rozwiązania konstrukcyjne, które albo stanowią formy pośrednie (hybrydy) wyżej wymienionych, albo zawierają elementy obrotowe. Przykłady tych ostatnich pokazano na rysunkach 147 i 148.



Rys. 143. Schematy kinematyczne maszyn współrzędnościowych: a) portalowej (z ruchomym portalem); b) portalowej (z nieruchomym portalem); c) mostowej; d) kolumnowej; e) wysięgnikowej; f) wspornikowej

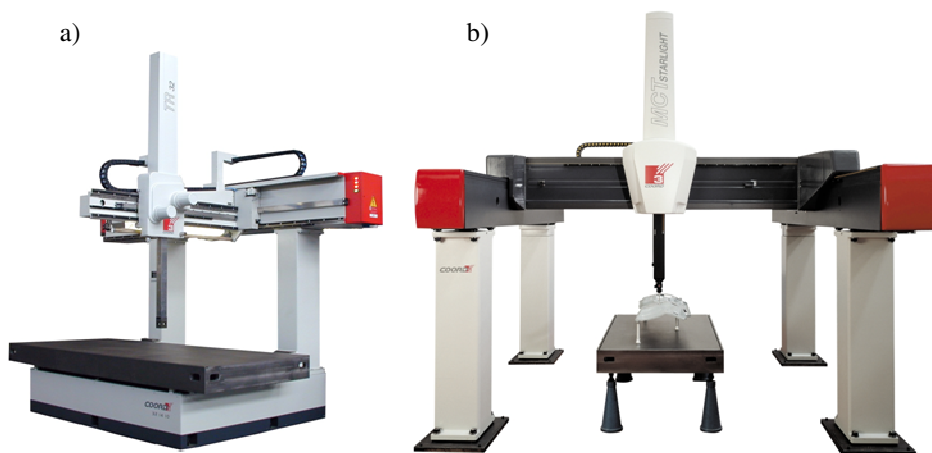
Najczęściej spotykaną odmianę maszyn podstawowych stanowią maszyny portalowe (bridge machines). Przykład maszyny tego typu pokazano na rys. 144. Posiada ona granitowy stół pomiarowy 2 powiązany sztywno z podstawą maszyny 1. Do podstawy tej przymocowane są również dwie równoległe prowadnice 3, wzdłuż których przemieszcza się ruchomy portal 4. Realizuje on przesuw głowicy pomiarowej wzdłuż osi Y. Górna pozioma belka portalu posiada prowadnice, wzdłuż których przemieszcza się karetki 7, realizując przesuw głowicy pomiarowej wzdłuż osi X. Do karetki przymocowana jest obudowa pinoli. Pinola 6, wraz z zamocowaną na niej głowicą pomiarową 5, może przemieszczać się wzdłuż swej obudowy w kierunku góra – dół, realizując w ten sposób przesuw głowicy wzdłuż osi Z.

W praktyce, poza przedstawioną powyżej odmianą, spotyka się jeszcze maszyny z nieruchomym portalem. Brakujący ruch wykonuje w nich stół przedmiotowy.

Powszechnie uważa się że typ portalowy daje największe możliwości pod względem dokładności. Stosowany jest w maszynach średniej wielkości oraz maszynach małych o podwyższonej dokładności.



Rys. 144. Maszyna podstawowa typu portalowego



Rys. 145. Maszyny współrzędnościowe: a) typu wspornikowego; b) typu mostowego

Konstrukcja wspornikowa (cantilever type) charakteryzuje się stosunkowo prostą budową, niskim kosztem, łatwością przestrzennego operowania głowicą oraz małą ilością zajmowanej powierzchni. Wadą jej jest natomiast zmienne, zależne od wielkości

mierzonej obciążenie wysięgnika. Z tego względu jest stosowana przeważnie w przypadku maszyn mniejszych. Maszyny większe muszą być wyposażone w drogie układy kompensacji zmiennych ugięć wysięgnika. Przykład maszyny tego typu pokazano na rys. 145a.

Konstrukcja mostowa (gantry type) jest stosowana w przypadku dużych maszyn współrzędnościowych wykorzystywanych przy produkcji pojazdów, samolotów, statków i innych dużych urządzeń. Zakresy pomiarowe maszyn mostowych dochodzą do 16 m. Konstrukcja ta umożliwia na ogół łatwy dostęp do kontrolowanych punktów oraz pozwala na minimalizację bezwładności ruchomych elementów maszyny przy zachowaniu przez nie wysokiej sztywności. Słupy maszyny są przeważnie mocowane bezpośrednio do podłogi pomieszczenia. Przedmiot może być umieszczany na stole pomiarowym wolno stojącym pomiędzy słupami. Fundament maszyny winien być bardzo sztywny i izolowany od otoczenia (np. betonowy blok "pływający" w piasku). Przykład maszyny tego typu pokazano na rys. 145b.

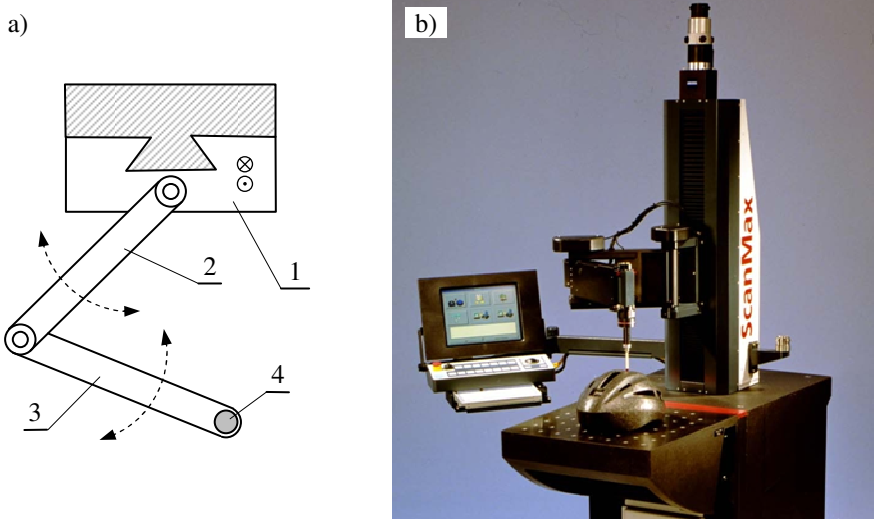
Przykład maszyny wysięgnikowej (horizontal arm CMM) pokazano na rysunku 146. Konstrukcja ta charakteryzuje się łatwością dostępu do mierzonego przedmiotu. Jednostronne podparcie wysięgnika sprzyja odkształceniom, które zwiększają niepewność pomiaru. Maszyny średniodokładne mają na ogół małe zakresy pomiarowe (do 700 mm), natomiast maszyny mniej dokładne mogą posiadać zakresy pomiarowe dochodzące nawet do 12 m (np. maszyna Prima RI 120.16.30 firmy DEA)). Są często stosowane do kontroli kształtu karoserii w przemyśle motoryzacyjnym oraz do pomiaru dużych elementów produkowanych w branży lotniczej, kolejowej czy stoczniowej.



Rys. 146. Maszyny współrzędnościowe wysięgnikowe

Maszyny kolumnowe (column CMMs) występują w dwu odmianach kinematycznych: pierwszą pokazano na rys. 143d, druga charakteryzuje się nieruchomą kolumną – oba ruchy w płaszczyźnie poziomej wykonuje stół. Maszyny te posiadają najczęściej niewielkie zakresy pomiarowe (do 500 mm). Charakteryzują się wysoką dokładnością pomiaru oraz wygodnym dostępem do mierzonych przedmiotów. Niektóre rozwiązania posiadają dodatkowo obrotowy stół, który umożliwia dokonywanie pomiarów w układzie współrzędnych walcowych.

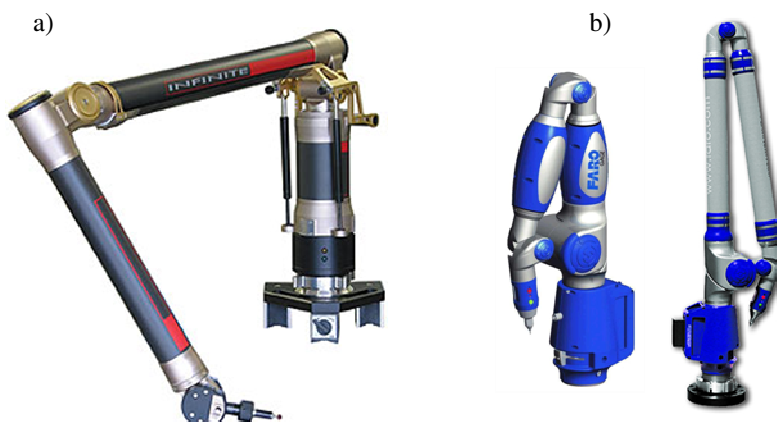
W prezentowanych do tej pory rozwiązaniach konstrukcyjnych zmiana położenia głowicy względem przedmiotu była realizowana wyłącznie za pomocą elementów przesuwnych (ew. obrotowy stół stanowił „wyposażenie dodatkowe”). W praktyce istnieją również takie rozwiązania, w których elementy przesuwne zostały zastąpione elementami obrotowymi. Jako przykład takiego rozwiązania może służyć maszyna współrzędnościowa ScanMax produkcji firmy Zeiss, którą pokazano na rysunku 147.



Rys. 147. Maszyna współrzędnościowa ScanMax produkcji firmy Zeiss: a) schemat kinematyczny; b) widok maszyny

W maszynie współrzędnościowej ScanMax przemieszczenia głowicy w płaszczyźnie poziomej (XY) są realizowane za pomocą dwóch szeregowo połączonych obrotowych ramion. Ramię zewnętrzne 3, w którego jednym końcu zamontowana jest głowica pomiarowa 4, jest połączone swoim drugim końcem z ramieniem wewnętrznym 2. Połączenie przegubowe o osi pionowej umożliwia obu ramionom obrót względem siebie. Z kolei ramię wewnętrzne jest połączone podobnym przegubem z karetką 1. Kierownica, przemieszczając się w prowadnicach pionowej kolumny, zapewnia zespołowi ramion przesuw wzdłuż osi Z.

Istnieją również rozwiązania, w których wszystkie elementy przesuwne zostały zastąpione elementami obrotowymi. Maszyny tego typu (rys. 148) są określane mianem ramion pomiarowych (portable CMMs). Posiadają one z reguły więcej stopni swobody ($5 \div 7$ przegubów) i z tego względu lepiej nadają się do pomiarów w miejscach trudno dostępnych. Wykonane z lekkich materiałów (włókna węglowe) mają najczęściej charakter urządzeń przenośnych. Ich dokładność w porównaniu z rozwiązaniami klasycznymi jest nieco niższa.



Rys. 148. Ramiona pomiarowe: a) produkcji firmy CimCore; b) produkcji firmy Faro Technologies

4.13.5. Zespół układów pomiarowych

Położenie głowicy pomiarowej zależy od położenia ruchomych elementów zespołu nośnego. Aby można je było wyznaczyć, każdy z ruchomych elementów zespołu nośnego wyposażony jest w układ pomiarowy, którego zadaniem jest określanie współrzędnej aktualnego położenia tego elementu. Zbiór wartości współrzędnych położenia poszczególnych elementów zespołu nośnego wraz z danymi wprowadzonymi do systemu obliczeniowego w trakcie kalibracji głowicy pozwala na wyznaczenie wartości współrzędnych środka końcówki pomiarowej.

Do wyznaczenia współrzędnych położenia ruchomych elementów zespołu nośnego wykorzystuje się przeważnie inkrementalne przetworniki przemieszczeń: liniowe dla elementów przesuwnych i kątowe dla elementów obrotowych. Najczęściej są to przetworniki optoelektroniczne, rzadziej indukcyjne, bardzo rzadko pojemnościowe. W maszynach bardzo dokładnych, zwłaszcza o większych zakresach pomiarowych, są niekiedy stosowane interferencyjne układy pomiarowe.

Zasadę działania, budowę i podstawowe parametry metrologiczne wspomnianych wyżej przetworników przemieszczeń przedstawiono w podrozdziale 4.9.1.

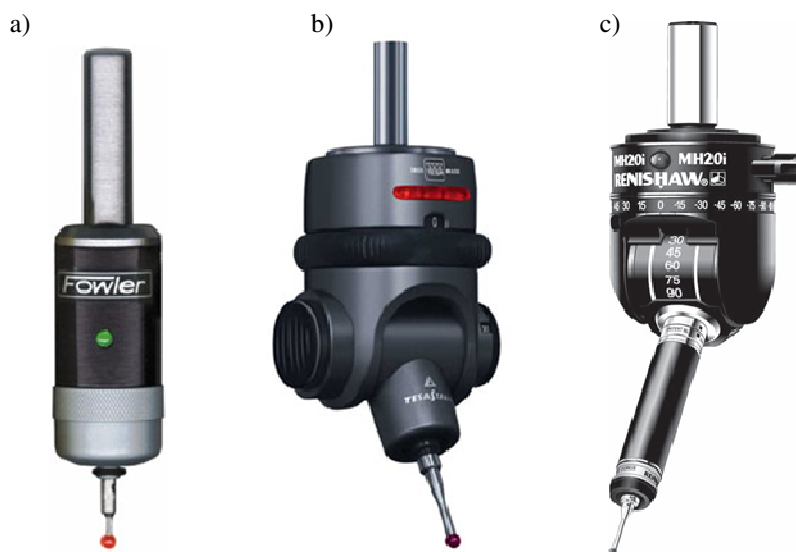
4.13.6. Głowice pomiarowe

Głowica pomiarowa (probe head) służy do identyfikacji przestrzennego położenia odpowiednio wybranych punktów kontrolowanego przedmiotu. W celu tej identyfikacji doprowadza się głowicę pomiarową do kontaktu z wybranym punktem i rejestruje współrzędne położenia elementów układu nośnego w chwili osiągnięcia kontaktu.

Za detekcję kontaktu odpowiedzialne jest urządzenie, które określane będzie dalej mianem sondy pomiarowej (probe). Jest to podstawowy, czasem jedyny, element składowy głowicy. Poza nim w skład głowicy pomiarowej mogą wchodzić:

- inne sondy (wraz z systemem ich wymiany);
- przedłużacze sond;
- trzpienie pomiarowe (wraz z systemem ich wymiany);
- przedłużacze trzpieni pomiarowych;
- urządzenie zmieniające położenie sondy względem elementu nośnego.

Przykładowe głowice pomiarowe pokazano na rysunku 149.



Rys. 149. Przykładowe głowice pomiarowe: a) P1-5BS firmy Fowler; b) Tesastar firmy Tesa; c) MH20i firmy Renishaw

Kontakt głowicy z przedmiotem może mieć charakter stykowy lub bezstykowy. Zależy to od rodzaju użytej sondy.

Sondy stykowe dzielą się na sztywne, sygnalizacyjne (impulsowe) i mierzące (skaningowe).

Sond sztywnych (hard probes) używa się najczęściej w małych maszynach współrzędnościowych bez napędu (manual machines). Lokalizacja punktu następuje poprzez doprowadzenie przez operatora końcówki pomiarowej głowicy do styku z mierzonym przedmiotem i zasygnalizowanie faktu osiągnięcia kontaktu za pomocą specjalnego przycisku. Ze względu na dużą zmienność nacisku pomiarowego ten sposób lokalizacji punktów nie jest zbyt dokładny.

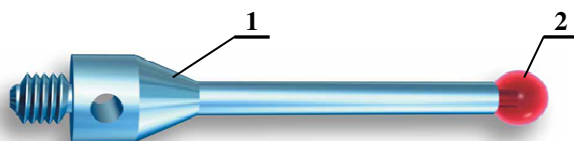
Sondy sygnalizacyjne (trigger probes) w momencie zetknięcia końcówki pomiarowej z powierzchnią mierzonego przedmiotu generują sygnał elektryczny, który powoduje rejestrację współrzędnych elementów zespołu nośnego. Ich zasada działania jest oparta na przetwornikach elektrostykowych (minimalne wychylenie końcówki powoduje przerwanie obwodu elektrycznego), przetwornikach piezoelektrycznych (minimalny nacisk pomiarowy rzędu 0,01N odkształca piezoelement, powodując powstanie impulsu) bądź przetwornikach indukcyjnych (przesunięcie końcówki zmienia indukcyjność cewki, co powoduje powstanie sygnału). Sondy sygnalizacyjne mają bardzo wysoką powtarzalność wskazań (wg [L26] rozrzut wskazań nie przekracza wartości 1 μm).

Sondy mierzące (scanning probes) poza sygnalizacją kontaktu z mierzonym przedmiotem pozwalają na określenie wielkości wychylenia (przesunięcia) swojej końcówki pomiarowej. Wielkość ta jest uwzględniana przy obliczaniu wartości współrzędnych lokalizowanych punktów. Zasada działania tych sond opiera się najczęściej na indukcyjnych lub optoelektrycznych przetwornikach pomiarowych. Sonda mierzy przesunięcie swojej końcówki w pięciu ($\pm X$, $\pm Y$ i $+Z$) lub sześciu ($\pm X$, $\pm Y$ i $\pm Z$) kierunkach. Zakresy pomiarowe sond wahają się najczęściej od $\pm 0,3\text{mm}$ do $\pm 2,5\text{ mm}$.

W odróżnieniu od sond sygnalizacyjnych, które dokonują pomiarów dynamicznych (sygnalizacja kontaktu i odczyt wartości współrzędnych odbywa się w trakcie ruchu głowicy), sondy mierzące umożliwiają pomiary statyczne (po sygnalizacji kontaktu elementy nośne zatrzymują się i dopiero wtedy zostają odczytane wartości ich współrzędnych oraz wartości charakteryzujące przesunięcie końcówki głowicy). Eliminuje to zakłócenia o charakterze dynamicznym, podwyższając w ten sposób dokładność pomiaru.

Sondy mierzące pozwalają ponadto na tzw. pomiary skaningowe. W trakcie tych pomiarów głowica przemieszcza się wzdłuż wybranego zarysu przedmiotu tak, aby ugięcie końcówki pomiarowej mieściło się wewnątrz zakresu pomiarowego sondy. Okresowo, z częstością dochodzącą nawet do 200 razy na sekundę, odczytywane są współrzędne elementów nośnych i ugięcie końcówki pomiarowej. Dzięki temu w stosunkowo krótkim czasie zostaje zebrana duża ilość informacji pozwalających na identyfikację i ewentualną ocenę przedmiotów nawet o bardzo złożonej geometrii.

Sondy stykowe kontaktują się z przedmiotami mierzonymi za pośrednictwem wymiennych trzpieni pomiarowych. Najczęściej stosowany trzpień, tzw. trzpień prosty, pokazano na rysunku 150. Składa się on z korpusu 1 i końcówki pomiarowej 2.

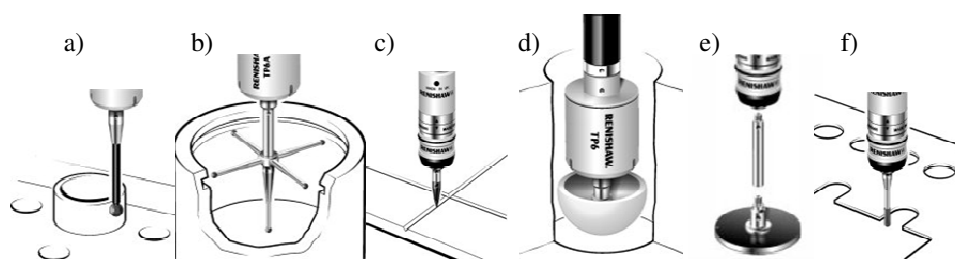


Rys. 150. Trzpień prosty (straight stylus)

1 – korpus trzpienia; 2 – końcówka pomiarowa

Korpusy trzpieni mogą mieć różne długości, można też zmieniać długość trzpienia za pomocą przedłużki. Korpusy trzpieni wykonuje się z materiałów odpornych na obciążenia mechaniczne i korozję, takich jak stal nierdzewna, węgliki spiekane, włókna węglowe, stopy aluminium, stopy tytanu czy niektóre materiały ceramiczne. Na końcówki pomiarowe stosuje się materiały o dużej odporności na obciążenia dynamiczne i ścieranie. Do najczęściej spotykanych należą końcówki wykonane z rubinu, tlenku cyrkonu i azotku krzemu.

Do optymalnej lokalizacji wybranych punktów mierzonych przedmiotów potrzebne są końcówki pomiarowe o różnych kształtach. Poza najczęściej występującym kształtem kulistym spotyka się końcówki stożkowe, walcowe, walcowo-kuliste, punktowe (ostrzowe), tarczowe i cały szereg innych. Wybrane przykłady trzpieni pomiarowych o różnych kształtach końcówek przedstawiono na rys. 151.

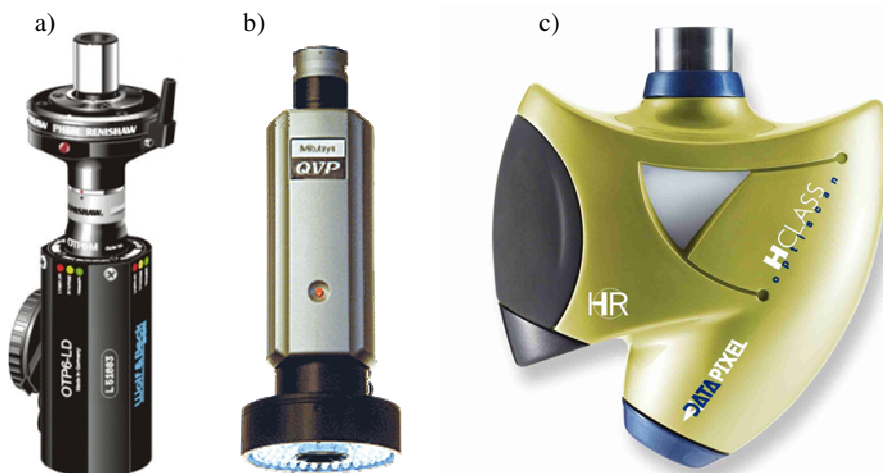


Rys. 151. Trzpień pomiarowe: a) trzpień prosty; b) układ trzpieni prostych tworzących tzw gwiazdę (star styli); c) trzpień pomiarowy z końcówką punktową (ostrzową); d) trzpień pomiarowy zakończony płożą kulistą o dużym promieniu; e) trzpień z końcówką tarczową; f) trzpień z końcówką walcową [S23]

Sondy do pomiarów bezstykowych (noncontact probes) wykorzystują przeważnie zjawiska optyczne. Do najczęściej stosowanych rodzajów sond bezstykowych zaliczyć można:

- laserowe sondy triangulacyjne;
- kamery wizyjne CCD;
- sondy skanujące (skanery).

Laserowe sondy triangulacyjne służą do lokalizacji wybranych punktów mierzonego przedmiotu. Mogą pracować zarówno jako sondy sygnalizacyjne, jak i mierzące. Kamery wizyjne generują obraz 2D wybranego obszaru mierzonego przedmiotu. Obraz ten o znanym usytuowaniu w przestrzeni i odpowiednio dobranym powiększeniu stanowi podstawę do wyznaczenia interesujących nas parametrów geometrycznych mierzonego przedmiotu. Sondy skanujące zwiększają znacznie możliwości maszyn współrzędnościowych. Generują one trójwymiarowe chmury punktów, które za pomocą odpowiedniego oprogramowania można wykorzystać nie tylko w celach pomiarowych, ale również do innych celów (np. różnych aplikacji inżynierii odwrotnej). Przykładowe sondy bezstykowe pokazano na rys. 152.



Rys. 152. Przykładowe sondy bezstykowe: a) laserowa sonda triangulacyjna OTP6M firmy Renishaw; b) kamera wizyjna QVP firmy Mitutoyo; c) skaner OptiScan firmy DataPixel

Aby ułatwić dostęp końcówki pomiarowej do wybranych punktów mierzonych przedmiotów, głowice pomiarowe są wyposażane w urządzenia zmieniające położenie sond względem elementu nośnego. Zmiana położenia sondy następuje najczęściej poprzez wykorzystanie dwóch przegubów, jednego o osi pionowej, drugiego o osi poziomej; głowice tego typu noszą nazwę głowic obrotowo-uchyłnych. Sonda może być ustawiana w wybranym położeniu ręcznie lub automatycznie.

Jako przykłady głowic obrotowo-uchyłnych mogą służyć głowice Tesastar-i (rys. 149b) i MH20-i (rys. 149c). Obie głowice są nastawiane ręcznie. Umożliwiają obrót sondy względem osi pionowej w zakresie $\pm 180^\circ$, skokowo co 15° (24 różne położenia) i względem osi poziomej w zakresie $0 \div 90^\circ$, również co 15° (7 różnych położzeń). Znacznie lepsze parametry posiada głowica RDS produkcji niemieckiej firmy Zeiss. Umożliwia ona obroty względem obu osi w zakresie $\pm 180^\circ$, ze skokiem $2,5^\circ$, co daje 20736 różnych możliwych kombinacji.

Główce o obrotach skokowych (indexed probe heads) zapewniają powtarzalność położenia końcówki pomiarowej, dlatego obrót sondy nie wymaga ponownej kalibracji głowicy.

4.13.7. Napęd i sterowanie

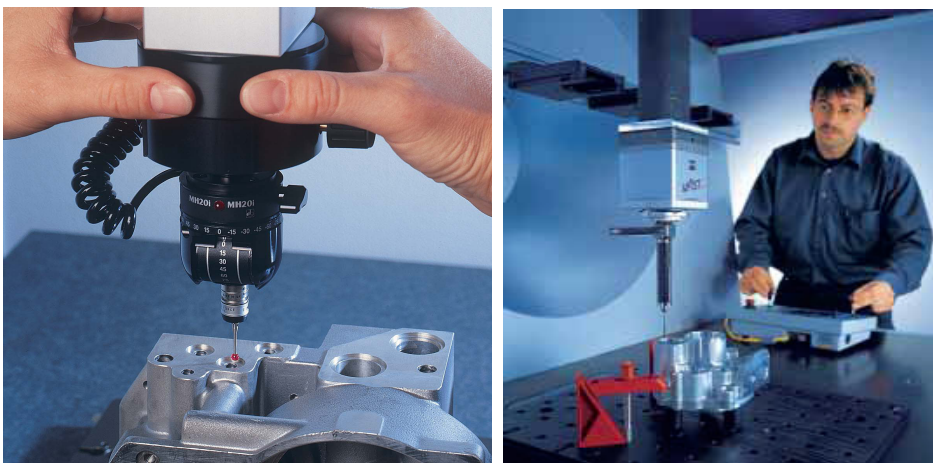
Pod względem napędu maszyny współrzędnościowe można podzielić na trzy rodzaje:

- maszyny bez napędu (manual machines);
- maszyny z napędem konwencjonalnym (motorized machines);
- maszyny posiadające napęd numerycznie sterowany (CNC machines).

Wyróżnia się dwa rodzaje sterowania ruchami głowicy pomiarowej – ręczne i automatyczne.

Sterowanie ręczne można stosować we wszystkich wyżej wymienionych rodzajach maszyn. W przypadku maszyn nieposiadających napędu sprowadza się ono do odpowiedniego przemieszczania głowicy pomiarowej siłą mięśni operatora (rys. 153a). W pozostałych przypadkach głowica jest przemieszczana za pomocą napędu sterowanego przez operatora z pulpitu (rys. 153b).

Sterowanie automatyczne, w odróżnieniu od sterowania ręcznego, nie wymaga bezpośredniego udziału operatora. Przemieszczenia głowicy są realizowane za pomocą napędu sterowanego przez mikrokomputer wykorzystujący w tym celu uprzednio przygotowany program. Ten rodzaj sterowania zapewnia najwyższą wydajność pracy maszyny. Jest możliwy tylko w maszynach posiadających napęd CNC.



Rys. 153. Różne rodzaje sterowania: a) ręczne – siłą mięśni; b) ręczne za pomocą pulpitu

4.13.8. Zespoły obliczeniowe

W skład zespołu obliczeniowego wchodzi komputer, jego urządzenia wyjściowe oraz odpowiednie oprogramowanie. Zadaniem tego zespołu jest, ogólnie rzecz ujmując, wspomaganie procesu pomiarowego poprzez odpowiednie przetwarzanie zdobywanych w trakcie tego procesu informacji.

Bezpośrednim powodem włączenia komputera do wyposażenia maszyn współrzędnościowych była duża pracochłonność opracowania uzyskiwanych wyników. Bardzo szybko okazało się jednak, że możliwości komputera znacznie przewyższają zwykłe opracowywanie danych pomiarowych i że może on spełniać szereg innych funkcji, zasadniczo wpływając zarówno na wydajność, jak i na dokładność maszyn współrzędnościowych.

Rozwój w dziedzinie sprzętu i oprogramowania mikrokomputerów sprawił, że możliwości zespołów obliczeniowych zależą aktualnie przede wszystkim od zastosowanego oprogramowania. Oprogramowanie to, opracowane w zdecydowanej większości przez producentów maszyn współrzędnościowych, można podzielić na podstawowe i specjalistyczne.

Oprogramowanie podstawowe ma charakter uniwersalny. Jego najważniejsze funkcje to:

- zarządzanie komunikacją pomiędzy operatorem, komputerem i maszyną pomiarową;
- wzorcowanie (kalibracja) trzpieni pomiarowych;
- definiowanie układów współrzędnych związanych z mierzonym przedmiotem;
- obliczenia związane z lokalizacją wybranych punktów mierzonego przedmiotu, prowadzące do określenia parametrów charakteryzujących wielkość i położenie elementów geometrycznych, z których utworzono kształt modelowy;
- obliczanie i ewentualna ocena wskazanych parametrów geometrycznych mierzonego przedmiotu, ewentualne analizy uzyskanych wyników;
- sporządzanie dokumentacji pomiarowej;
- programowanie pomiaru CNC i sterowanie jego przebiegiem.

Komunikacja operatora z komputerem i maszyną pomiarową odbywa się najczęściej za pomocą rozwijanego menu. Poszczególne pozycje menu można wybrać za pomocą myszy, klawiatury czy pulpitu sterującego maszyną.

Kalibracja trzpienia pomiarowego pozwala na określenie związku pomiędzy współrzędnymi końcówki pomiarowej a współrzędnymi charakteryzującymi położenie elementów nośnych. Przeprowadza się ją za pomocą specjalnych wzorców (kula lub sześciąt o znanych wymiarach). Jeżeli konstrukcja głowicy zapewnia odpowiednią powtarzalność położenia trzpieni, to ich wymiana w trakcie cyklu pomiarowego nie powoduje konieczności ponownej kalibracji.

Możliwość przyjęcia układów współrzędnych związanych z mierzonymi przedmiotami pozwala uniknąć problemów wynikających z konieczności dokładnego ich ustawiania. Dla każdego przedmiotu można przy tym przyjąć kilka wzajemnie niezależnych układów współrzędnych, co ułatwia i przyspiesza proces kontroli.

Na podstawie współrzędnych elementów nośnych odczytanych w stanie kontaktu głowicy z mierzonym przedmiotem, danych wprowadzonych do pamięci komputera w trakcie kalibracji głowicy oraz ew. danych określających przemieszczenie końcówki pomiarowej (dla sond mierzących) komputer oblicza parametry definiujące elementy geometryczne przyjętego modelu przedmiotu. Dzięki wykorzystaniu algorytmów obliczeń, opartych na metodzie najmniejszych kwadratów, elementy te (płaszczyzny, walce, stożki itp.) mogą być identyfikowane na podstawie większej ilości punktów, co nie tylko zwiększa dokładność pomiaru, ale pozwala również na ocenę błędów kształtu.

Zidentyfikowany model stanowi podstawę do wyznaczenia interesujących nas parametrów geometrycznych mierzonego przedmiotu. Po wprowadzeniu do pamięci wymagań dotyczących tych parametrów komputer może dokonać oceny poprawności wykonania mierzonego przedmiotu. Może także udokumentować wyniki przeprowadzonych pomiarów i kontroli na odpowiednich, wcześniej zaprojektowanych formularzach.

Oprogramowanie może również zawierać funkcje kompensujące (na drodze obliczeniowej) błędy systematyczne maszyny współrzędnościowej. W szczególności dotyczy to błędów systematycznych układu kinematycznego, błędów spowodowanych odkształceniami termicznymi oraz błędów wynikających z odkształceń sprężystych. Korzystanie z tych funkcji wymaga wprowadzenia do pamięci komputera stosownych danych (np. dane z wzorcowania maszyny, dane z czujników temperatury itp.).

Możliwości komputera w zakresie sterowania pracą maszyny współrzędnościowej zależą głównie od stopnia jej mechanizacji i automatyzacji. W maszynach nieposiadających napędu mechanicznego głowicy (manual machines), bądź też posiadających napęd mechaniczny bez układu CNC (motorized machines), komputer może jedynie wspomagać proces sterowania podpowiadając operatorowi kolejność i ew. sposób realizacji poszczególnych czynności. Natomiast w maszynach współrzędnościowych o wysokim stopniu automatyzacji, posiadających urządzenia wykonawcze wyposażone w napędy z układami CNC, mikrokomputer może sterować ruchami głowicy pomiarowej, automatyczną wymianą sond i trzpieni pomiarowych, a także automatycznym zakładaniem i zdejmowaniem mierzonych przedmiotów. Umożliwia to pracę maszyny w cyklu automatycznym, którą cechuje bardzo duża wydajność.

Komputer może sterować zarówno torem głowicy pomiarowej, jak i jej prędkością. Sterowanie ruchami głowicy jednocześnie wzdłuż wszystkich trzech osi umożliwia doprowadzanie końcówki pomiarowej pod kątem prostym do mierzonej powierzchni,

pozwała na dokładną i wydajną kontrolę złożonych powierzchni krzywoliniowych. Sterując prędkością głowicy, komputer ma możliwość zminimalizowania błędów dynamicznego układu.

Zaprogramowanie pomiaru CNC sprowadza się do wygenerowania sekwencji danych sterujących (np. poleceń przemieszczeń, poleceń obliczeń itp.), które dokładnie odtwarzają cykl pomiarowy. Istnieją różne sposoby programowania przebiegu pomiarowego. Do najczęściej stosowanych należy tzw. programowanie uczące (learn programming). Polega ono na wykonaniu pomiaru pierwszego egzemplarza wyrobu za pomocą sterowania ręcznego i zapamiętania przez komputer sekwencji wykonanych czynności. Są one następnie automatycznie powtarzane przy pomiarze kolejnych egzemplarzy. Programowanie uczące jest stosunkowo łatwe i mało pracochłonne. Uzyskane programy można dodatkowo modyfikować za pomocą klawiatury.

Inną możliwością programowania cyklu pomiarowego CNC jest programowanie off-line. Sekwencja czynności pomiarowych jest w tym przypadku projektowana wyłącznie w oparciu o rysunek mierzonego przedmiotu. Programowanie to, znacznie trudniejsze i bardziej pracochłonne ma jednak kilka zalet:

- nie wymaga dysponowania egzemplarzem wyrobu, może więc być realizowane nawet przed rozpoczęciem produkcji;
- nie blokuje maszyny współrzędnościowej;
- w trybie automatycznym może być mierzony już pierwszy przedmiot.

Oprogramowanie specjalistyczne, które najczęściej oferowane jest jako wyposażenie opcjonalne, może dotyczyć:

- wspomagania pomiarów złożonych geometrycznie części maszyn (takich jak np. koła zębate czy łopatki turbin);
- zaawansowanych opracowań statystycznych;
- zaawansowanych opracowań graficznych.

Zespoły obliczeniowe decydują w dużym stopniu o możliwościach i zakresie zastosowań maszyn współrzędnościowych. Z tego względu producenci tych maszyn przywiązują dużą wagę do funkcjonalności, uniwersalności i łatwości obsługi oferowanego przez siebie oprogramowania. Oprogramowanie to jest najczęściej kompatybilne (ma możliwość współpracy lub przynajmniej eksportu danych) z szeregiem innych popularnych pakietów oprogramowania (np. systemami operacyjnymi Unix czy Windows, programami graficznymi, Microsoft Office itp.).

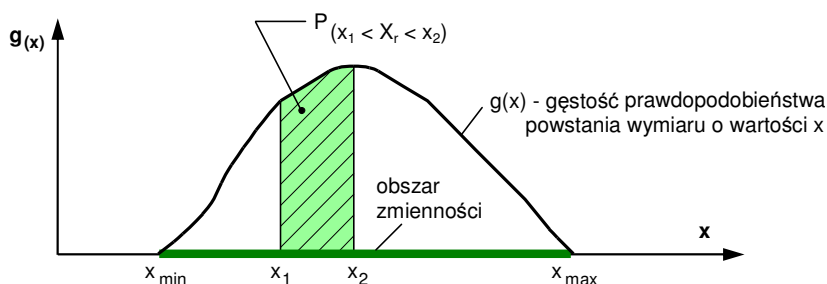
Więcej informacji na temat maszyn współrzędnościowych można znaleźć w [L7] i [L26].

5. WYBRANE ZAGADNIENIA Z ZAKRESU PROJEKTOWANIA ZADAŃ KONTROLNO-POMIAROWYCH

5.1. OPTYMALNA DOKŁADNOŚĆ KONTROLI

Właściwości wyrobu są kształtowane w trakcie określonego procesu wytwarzania. Na proces ten oddziałuje wiele różnych, często zupełnie przypadkowych zakłóceń. Z ich powodu właściwości poszczególnych egzemplarzy wyrobu różnią się pomiędzy sobą, a występujące różnice mają najczęściej przypadkowy charakter. Wynika stąd, że kształtowane w procesie wytwarzania właściwości wyrobu mają charakter zmiennych losowych.

Do kształtowanych w procesie wytwarzania właściwości wyrobu należą również jego wymiary. Wymiary te, zarówno realnie istniejące, jak i teoretycznie możliwe, nazwano w rozdziale 3.1 **wymiarami rzeczywistymi**, a do ich opisu wykorzystano pojęcie zmiennej losowej X_r (rys. 154).



Rys. 154. Model matematyczny wymiaru rzeczywistego X_r

Zbiór wartości x , dla których $g(x) > 0$, nosi nazwę **obszaru zmienności**. W obszarze tym leżą wszystkie możliwe realizacje wymiaru rzeczywistego X_r . Poszczególne realizacje, czyli wartości wymiaru posiadane przez poszczególne egzemplarze wyrobu, oznaczono symbolami x_i , gdzie i jest wyróżnikiem egzemplarza wyrobu.

Funkcje pełnione przez detal w konstrukcji sprawiają, że wymiary tego detalu nie mogą być zupełnie dowolne. Dlatego nakłada się na nie pewne ograniczenia, które formułuje się za pomocą wymiarów wymaganych.

Wymiar wymagany, który oznaczono symbolem X_w , jest to zbiór wartości, które ze względu na poprawność funkcjonowania konstrukcji winien przyjmować wymiar rzeczywisty. Sposoby charakteryzowania tego zbioru przedstawiono w rozdziale 3.1 (rysunki 17 i 18).

Pomiędzy wymiarem rzeczywistym X_r a wymiarem wymaganym X_w powinna zachodzić relacja:

$$X_r \subset X_w \quad (5.1)$$

Zapis ten oznacza, że zbiór możliwych wartości wymiaru rzeczywistego powinien być zawarty w zbiorze wartości wymaganych, czyli dla każdego i winno zachodzić:

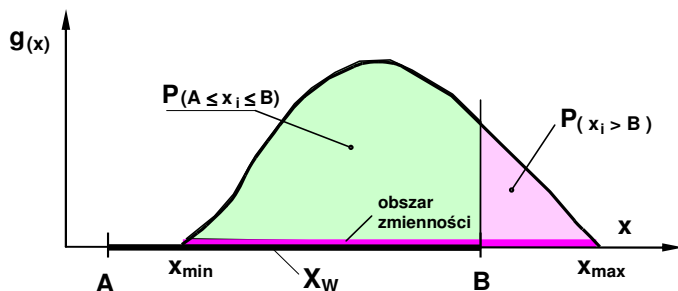
$$A \leq x_i \leq B \quad (5.2)$$

gdzie

x_i – wartość wymiaru x_r w i -tym detalu.

Wymiary spełniające warunek (5.2) nazywać będziemy dalej wymiarami zgodnymi.

W praktyce obszar zmienności wymiaru X_r nie zawsze mieści się wewnątrz zbioru X_w . Jednym z możliwych przypadków jest sytuacja przedstawiona na rys. 155.



Rys. 155. Przykład możliwej relacji pomiędzy wymiarem rzeczywistym i wymiarem wymaganym:

$$P(A \leq x_i \leq B) < 1$$

Z rys. 155 wynika, że istnieje pewne prawdopodobieństwo, iż powstający wymiar x_r nie będzie spełniał warunku (5.2). W związku z powyższym w procesach wytwarzania przewiduje się operacje kontroli technicznej. Ich celem jest identyfikacja tych egzemplarzy wyrobu, które nie spełniają wymagań i niedopuszczenia ich do kolejnego etapu procesu produkcyjnego.

Kontrolę techniczną można podzielić na częściową i całkowitą (stuprocentową). Celem kontroli częściowej jest ocena prawdopodobieństwa zdarzenia $x_r \in X_w$. Jeżeli na podstawie pomiarów pewnej części wyrobów (tzw. próbki) ocenia się, że prawdopodobieństwo zdarzenia $x_r \in X_w$ jest większe od przyjętej wartości kryterialnej p_k , całą partię wyrobów uznaje się za wykonaną poprawnie. W przeciwnym przypadku całą partię wyrobów poddaje się kontroli stuprocentowej.

Zadaniem kontroli stuprocentowej jest wychwycenie tych detali, których wymiary nie spełniają warunku $A \leq x_i \leq B$. Detale te, określane mianem niezgodnych (braków), zostają skierowane do naprawy (o ile jest możliwa), bądź też podlegają procesowi likwidacji.

Ponieważ kontrola techniczna nie zna wartości wymiarów rzeczywistych poszczególnych egzemplarzy wyrobu, dokonuje oceny poprawności ich wykonania w oparciu o wyniki pomiarów, a dokładniej – w oparciu o uzyskane w trakcie tych pomiarów wartości zaobserwowane x_z . Wymiar jest uznawany za zgodny, gdy:

$$A \leq x_z \leq B \quad (5.3)$$

Wymiar uznany przez kontrolę techniczną za zgodny będziemy dalej nazywać **"wymiarem odebrany"** i oznaczać symbolem X_o .

W celu lepszego zrozumienia funkcjonowania kontroli technicznej przeanalizujemy związek pomiędzy prawdopodobieństwem „odebrania” wymiaru a jego wartością rzeczywistą. Z definicji błędu pomiaru wynika, że:

$$x_z = x_r + \delta \quad (5.4)$$

gdzie:

x_z – wartość zaobserwowana wymiaru o wartości rzeczywistej x_r ;

δ – wartość rzeczywista błędu pomiaru.

Zgodnie z twierdzeniem Gaussa, nieznaną rzeczywistą wartość błędu pomiaru δ można traktować jako realizację zmiennej losowej Δ o rozkładzie $N(m_\Delta, \sigma_\Delta)$, gdzie:

N – oznaczenie rozkładu normalnego;

m_Δ – wartość oczekiwana rozkładu; zgodnie z tw. Gaussa $m_\Delta = 0$;

σ_Δ – odchylenie standardowe zmiennej Δ , zwane również [L21] standardową niepewnością pomiaru; wartość σ_Δ charakteryzuje dokładność pomiaru i zależy od przyjętej metody pomiaru oraz wykorzystanego sprzętu pomiarowego.

Zmienność możliwych wartości błędu pomiaru implikuje zmienność możliwych do uzyskania wartości zaobserwowanych ($\Delta \rightarrow X_z$), w związku z czym zależność 5.3 (właściwą dla konkretnego zaistniałego przypadku) możemy zapisać w postaci ogólnej (właściwej dla wszystkich hipotetycznie możliwych przypadków) następująco:

$$X_z = x_r + \Delta \quad (5.5)$$

Z zależności (5.5) wynika, że możliwy do uzyskania wynik pomiaru wymiaru o wartości rzeczywistej x_r , jest zmienną losową o rozkładzie normalnym wartości oczekiwanej $m_{xz} = x_r$ i odchyleniu standardowym $\sigma_{xz} = \sigma_\Delta$.

Warunek odebrania wymiaru o wartości rzeczywistej x_r (zależność 5.3) możemy teraz zapisać w postaci ogólnej:

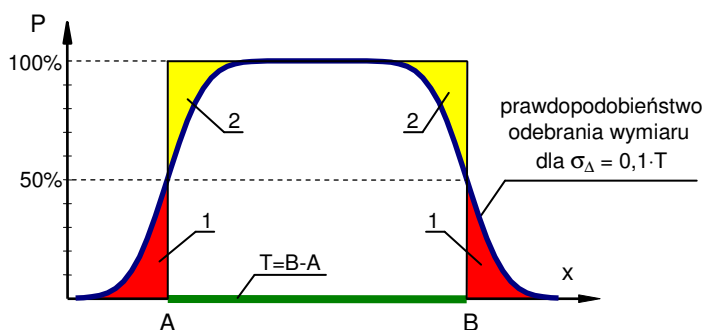
$$A \leq X_z \leq B \quad (5.6)$$

a prawdopodobieństwo spełnienia tego warunku wynosi:

$$P(A \leq X_z \leq B) = F(B) - F(A) \quad (5.7)$$

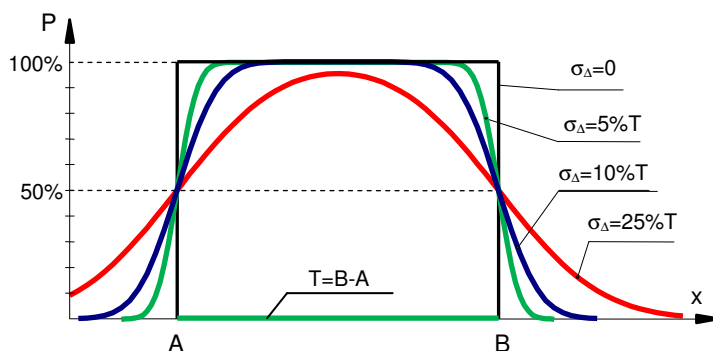
gdzie F oznacza dystrybuantę zmiennej losowej X_z .

Zależność (5.7) umożliwia obliczenie prawdopodobieństwa odebrania wymiaru o dowolnej wartości rzeczywistej x_r . Sporządzony na podstawie takich obliczeń wykres przedstawiono na rys. 156. Wynika z niego, że kontrola techniczna może odebrać wymiary niezgodne (pola czerwone) i odrzucić wymiary zgodne (pola żółte). Jeśliby obrazowo przyrównać kontrolę techniczną do filtru przepuszczającego detale o wymiarach zgodnych i zatrzymującego detale o wymiarach niezgodnych, to wykres ten przedstawia charakterystykę (przepustowość) takiego filtru.



Rys. 156. Zależność prawdopodobieństwa odebrania wymiaru od jego wartości rzeczywistej
1 – wymiary niezgodne odebrane; 2 – wymiary zgodne odrzucone

Prawdopodobieństwo odebrania wymiaru zależy nie tylko od jego wartości rzeczywistej, ale również od dokładności pomiaru. Przebiegi funkcji (5.7) dla różnych dokładności pomiarów przedstawiono na rys. 157. Wynika z nich, że ze wzrostem niepewności pomiaru rośnie prawdopodobieństwo przepuszczenia wymiaru o wartości nienależącej do przedziału (A, B) oraz maleje prawdopodobieństwo przepuszczenia wymiaru o wartości x należącej do tego przedziału.

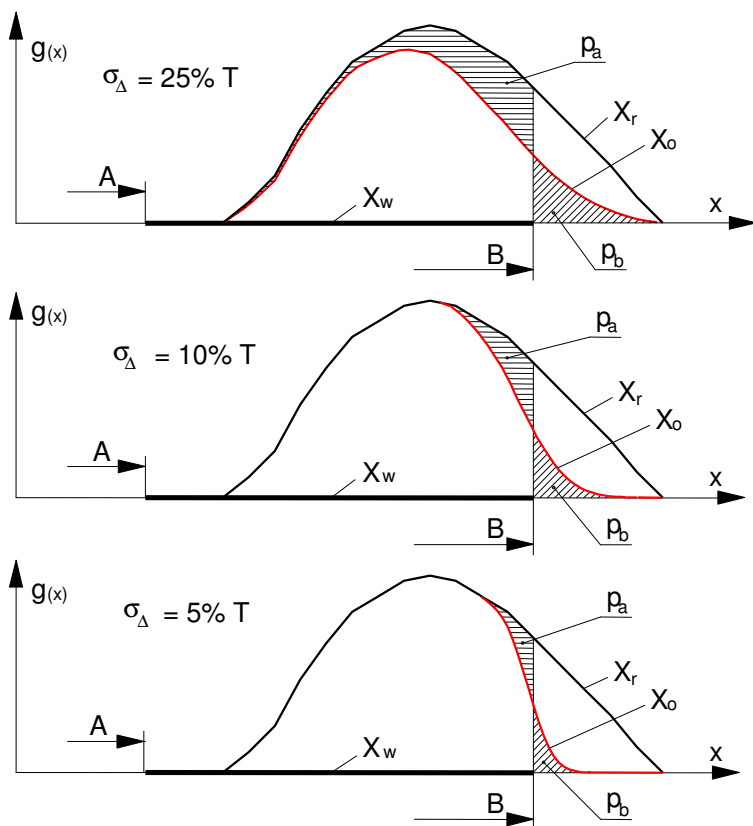


Rys. 157. Wpływ dokładności pomiarów na prawdopodobieństwo odebrania wymiaru o wartości rzeczywistej x

Odebranie przez kontrolę techniczną detalu o wartości rzeczywistej wymiaru równej x można potraktować jako iloczyn dwóch zdarzeń: pierwszego – że wymiar taki powstanie, i drugiego – że zostanie uznany za poprawny. Prawdopodobieństwo pierwszego zdarzenia określa rozkład wymiaru rzeczywistego, natomiast prawdopodobieństwo drugiego – zależność (5.7). Zakładając wzajemną niezależność obu tych zdarzeń można policzyć gęstość wymiaru odebranego. Wyniesie ona:

$$g_{x,o} = g_x \cdot [F(B) - F(A)] \quad (5.8)$$

Obliczony na podstawie wzoru (5.8) rozkład wymiaru odebranego X_o pokazano na rys. 158.



Rys. 158. Rozkłady wymiaru odebranego przy różnych dokładnościach pomiarów kontroli technicznej

Jak wynika z rys. 158, rozkład wymiaru odebranego może istotnie różnić się od rozkładu wymiaru rzeczywistego. Różnica powstaje wskutek eliminacji braków, a jej wielkość zależy od ilości tych braków.

Gdyby pomiary przeprowadzane przez kontrolę techniczną były bezbłędne ($\sigma_{\Delta} = 0$), wszystkie wartości należące do przedziału $[A, B]$ miałyby (p. rys. 157) 100% szans na odebranie, a wszystkie pozostałe zostałyby odrzucone (uznane za niezgodne). Rozkład wymiaru odebranego X_0 powstałby poprzez obcięcie rozkładu wymiaru rzeczywistego X wzdłuż prostych $x = A$ i $x = B$. Natomiast błędy pomiarów powodują, że nie wszystkie decyzje kontroli technicznej są prawidłowe. Możliwe są dwa rodzaje mylnych decyzji:

- a) uznanie wymiaru dobrego za zły i odrzucenie detalu jako braku, czyli tzw. brak pozorny. Prawdopodobieństwo tej pomyłki jest równe zakreskowanym polom oznaczonym symbolami p_a ;
- b) uznanie wymiaru niewłaściwego za poprawny, czyli przepuszczenie braku. Prawdopodobieństwo tej pomyłki jest równe zakreskowanym polom oznaczonym symbolami p_b .

Porównując wielkości zakreskowanych pól dla różnych dokładności kontroli, widzimy, że w miarę wzrostu niepewności pomiaru ($\Delta_u x = k \cdot \sigma_{\Delta}$)²⁶ prawdopodobieństwo mylnych decyzji szybko się powiększa²⁷.

Każda spośród przedstawionych wyżej pomyłek pociąga za sobą określone straty. Odrzucenie detalu dobrego to całkowita lub częściowa strata posiadanej przez ten detal wartości. Przepuszczenie braku może powodować jeszcze gorsze konsekwencje w postaci napraw gwarancyjnych czy pracy konstrukcji z zaniżonymi parametrami techniczno-ekonomicznymi, jak np.: dokładność, niezawodność czy pobór mocy.

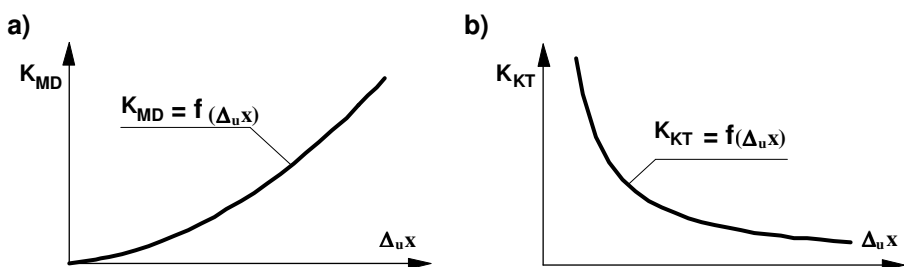
Koszty mylnych decyzji, które oznaczono symbolem K_{MD} , zależą od ilości tych decyzji, a ich przyrost jest progresywny (rys. 159a). Natomiast ilość mylnych decyzji, jak wynika z rys. 158, zależy od dokładności kontroli i rośnie wraz ze wzrostem niepewności pomiaru. Wynikałoby stąd, że w celu zmniejszenia kosztów mylnych decyzji należy zwiększyć dokładność kontroli.

Ale wzrost dokładności pomiarów powoduje:

- konieczność zastosowania dokładniejszych, a więc przeważnie droższych narzędzi pomiarowych;
- wydłużenie się czasu dokonywania pomiarów;
- konieczność zatrudnienia w kontroli technicznej pracowników o wyższych kwalifikacjach;
- konieczność stworzenia odpowiednich warunków do dokonywania pomiarów (wydzielone pomieszczenia, klimatyzacja itp.).

²⁶ $\Delta_u x$ – niepewność rozszerzona, k – współczynnik rozszerzenia najczęściej równy 2 [L21].

²⁷ Szczegółową matematyczną analizę tego problemu przedstawiono w [L36].

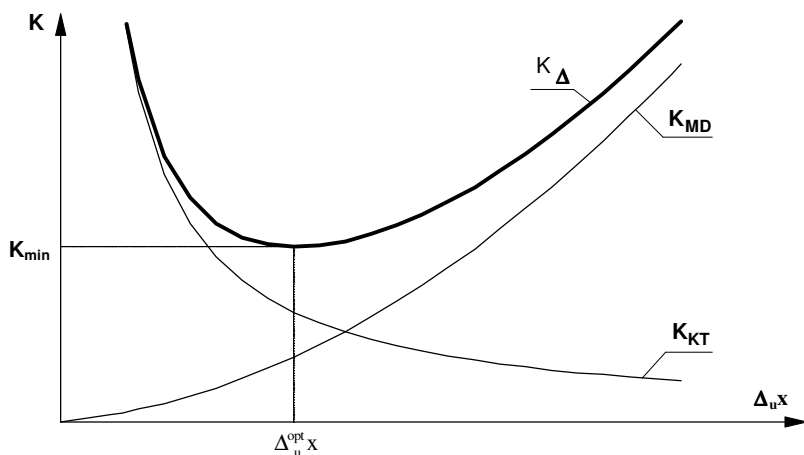


Rys. 159. Wpływ dokładności pomiarów: a) na koszty mylnych decyzji (K_{MD}); b) na koszty operacji kontroli technicznej (K_{KT}); $\Delta_u x$ – niepewność pomiaru

Wymienione wyżej czynniki powodują wzrost kosztów samej kontroli technicznej. Koszty te oznaczono symbolem K_{KT} , a ich zależność od dokładności prowadzonych pomiarów pokazano na rys. 159b.

Z rys. 159 wynika, że wpływ dokładności pomiarów na koszty kontroli technicznej jest przeciwny do jej wpływu na koszty mylnych decyzji. W tej sytuacji oba rodzaje kosztów należy rozpatrzeć łącznie.

Suma $K_{\Delta} = K_{MD} + K_{KT}$ zawiera w sobie wszystkie te składniki kosztu uzyskania wymiaru, które zależą od dokładności kontroli. Zależność sumy K_{Δ} od dokładności kontroli przedstawiono na rys. 160. Wynika z niego, że krzywa $K_{\Delta} = f(\Delta_u x)$ posiada minimum. Niepewność $\Delta_u x$, przy której krzywa osiąga minimum, określa tzw. optymalną dokładność kontroli, tj. dokładność, przy której koszt uzyskania wymiaru osiąga minimum.



Rys. 160. Zależność kosztów związanych z pomiarami od dokładności tych pomiarów

Aby stosować optymalną dokładność pomiarów, trzeba określić wartość $\Delta_u^{\text{opt}} x$. Wyznaczanie tej wartości z krzywej $K_\Delta = f(\Delta_u x)$ jest w konkretnych przypadkach albo bardzo trudne ze względu na konieczność przeprowadzania bardzo złożonych analiz, albo wręcz niemożliwe z powodu braku niezbędnych do tego celu danych. Dlatego w praktyce wartość $\Delta_u^{\text{opt}} x$ szacuje się w oparciu o znacznie prostsze metody. W przypadku wymiarów liniowych i kątowych udało się na podstawie stosownych badań i doświadczeń praktycznych sformułować prostą wytyczną [L7, L28]:

$$\Delta_u^{\text{opt}} x \cong c \cdot T \quad (5.9)$$

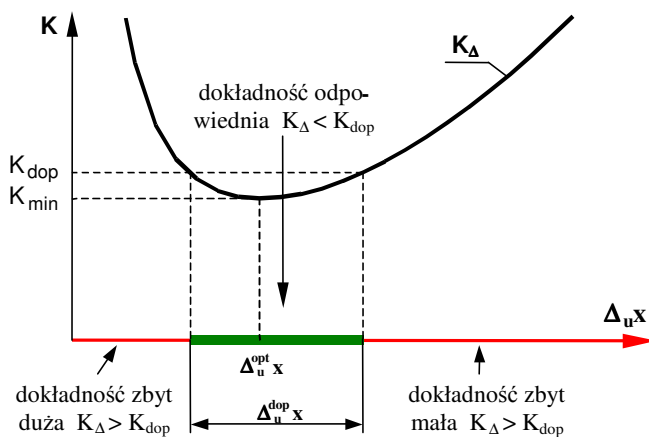
gdzie:

T – tolerancja sprawdzanego wymiaru;

c – współczynnik liczbowy, zależny od trudności pomiaru kontrolowanego wymiaru.

Dla pomiarów charakteryzujących się wysokim stopniem trudności zaleca się przyjmować wartość $c = 0,2$; przy średnim stopniu trudności przyjmuje się $c = 0,1$, zaś w przypadku niskiego stopnia trudności można przyjąć $c = 0,05$.

Należy podkreślić, że w praktyce wyznaczenie dokładnej wartości $\Delta_u^{\text{opt}} x$ nie jest konieczne, ponieważ w okolicach swego ekstremum krzywa $K_\Delta = f(\Delta_u x)$ ulega niewielkim zmianom (rys. 161). Dopuszczając więc niewielki wzrost kosztów (do poziomu K_{dop}), uzyskuje się dość szeroki przedział wartości $\Delta_u x$ spełniających warunek $f(\Delta_u x) \leq K_{\text{dop}}$ i wystarczy, aby obliczona z zależności (5.9) wartość $\Delta_u^{\text{opt}} x$ należała do tego przedziału.



Rys. 161. Możliwy do stosowania zakres dokładności kontroli

5.2. DOBÓR METOD I NARZĘDZI POMIAROWYCH

Po ustaleniu optymalnej dokładności pomiaru (oszacowaniu $\Delta_u^{\text{opt}}x$) można przystąpić do wyboru metody i narzędzi pomiarowych. W tym celu rozważa się przeważnie kilka wariantów, przy czym każdy z nich winien spełniać warunek:

$$\Delta_u x \cong \Delta_u^{\text{opt}} x \quad (5.10)$$

gdzie

$\Delta_u x$ – niepewność pomiaru dla rozważanej metody.

Analiza zależności (5.10) pozwala na uzyskanie informacji umożliwiających właściwy dobór narzędzi pomiarowych dla poszczególnych metod. W celu uzyskania tych informacji należy niepewność wypadkową $\Delta_u x$ rozważanej metody rozłożyć na charakterystyczne dla tej metody niepewności cząstkowe $\Delta_{u,i}x$. Na przykład w przypadku rozważania pomiaru metodą różnicową (p. rozdz. 2.6) będą to: niepewność wzorca, niepewność zerowania i niepewność pomiaru różnicy, w przypadku metody zerowej kompensacyjnej: niepewność wzorca i niepewność detekcji, a w przypadku pomiaru metodą pośrednią: niepewności wynikające z niepewności pomiarów wielkości mierzonych bezpośrednio. W ogólnym przypadku:

$$\Delta_u x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_{u,i} x)^2} \cong \Delta_u^{\text{opt}} x \quad (5.11)$$

Równanie (5.11) ma n niewiadomych. Aby je rozwiązać, należy przyjąć $n-1$ równań pomocniczych. Równania te winny optymalizować rozwiązanie (np. pod względem trudności przeprowadzenia pomiaru, bądź też jego kosztów). Do najczęściej przyjmowanych równań optymalizacyjnych należy równość niepewności cząstkowych:

$$\Delta_{u,1}x \cong \Delta_{u,2}x \cong \dots \cong \Delta_{u,n}x$$

Bardziej szczegółowe informacje dotyczące rozwiązywania równania (5.11) dla poszczególnych metod pomiarowych można znaleźć w [L37].

Znajomość niepewności cząstkowych umożliwia ustalenie klasy dokładności dobieranych przyrządów, wzorców, detektorów itp., pozwalając na eliminację narzędzi zbyt mało dokładnych bądź za dokładnych.

Po uwzględnieniu podstawowego wymogu, jakim jest odpowiednia dokładność projektowanego pomiaru, należy jeszcze zwrócić uwagę na inne czynniki, które mogą uniemożliwić jego przeprowadzenie. W szczególności należy sprawdzić, czy wybrane narzędzie posiada odpowiedni zakres pomiarowy (w przypadku przyrządu) bądź zakres odtwarzanych wartości (w przypadku wzorca), czy da się ono wykorzystać w rozpatrywanym przypadku (np. ze względu na możliwość pobrania wielkości z mierzonego obiektu), czy w czasie planowanego pomiaru będzie dla nas dostępne.

Jeżeli po uwzględnieniu wszystkich przedstawionych wyżej warunków pozostanie nam więcej niż jeden wariant projektu, to do ostatecznego wyboru można zastosować kryterium ekonomiczne.

Na zakończenie niniejszych rozważań należy stwierdzić, że każda wielkość mierzona posiada swoją specyfikę, do której m.in. zalicza się najczęściej i najchętniej stosowane metody pomiaru tej wielkości. Uwzględnienie tej specyfiki pozwala na znaczne ograniczenie liczby analizowanych wariantów. W szczególności może to być tylko jeden arbitralnie przyjęty wariant, który w ramach projektowania pomiaru weryfikuje się pod kątem spełnienia warunku (5.10). Taki sposób postępowania nie zapewnia jednak osiągnięcia optymalnego rezultatu.

Przykład doboru sprzętu pomiarowego

Średnica szlifowanych wałków posiada wymiar wymagany $\varnothing 24h6 = 24_{-0,013}$. Do kontroli poprawności wykonania wałków postanowiono zastosować metodę różnicową (pomiar średnicy czujnikiem wyzerowanym na stosie płytek o wysokości równej wartości nominalnej wymiaru wymaganego). Do dyspozycji mamy:

1. Trzy duże komplety płytek wzorcowych wykonane odpowiednio w klasach 0, 1 i 2;
2. Czujnik mechaniczny Hicador firmy Mitutoyo o zakresie pomiarowym $\pm 100 \mu\text{m}$, działce elementarnej $w_e = 2 \mu\text{m}$ i niepewności pomiaru równej $1,5 \mu\text{m}$;
3. Czujnik dźwigniowo-zębany Supramess firmy Mahr o zakresie pomiarowym $\pm 25 \mu\text{m}$, działce elementarnej $w_e = 0,5 \mu\text{m}$ i niepewności pomiaru równej $0,8 \mu\text{m}$;
4. Optimetr projekcyjny MOP 1/100 firmy Zeiss o zakresie podziałki $\pm 100 \mu\text{m}$, działce elementarnej $w_e = 1 \mu\text{m}$ i niepewności pomiaru $0,4 \mu\text{m}$ (dla wskazania nieprzekraczającego $\pm 20 \mu\text{m}$).

Aby odpowiednio dobrać wzorzec i przyrząd pomiarowy, obliczamy niepewność odpowiadającą optymalnej dokładności kontroli

$$\Delta_u^{opt} x = 0,1 \cdot T = 0,1 \cdot 13 \mu\text{m} = 1,3 \mu\text{m}$$

Przy analizie niepewności założono dla uproszczenia, że niepewność pomiaru różnicy $x - w$ jest równa niepewności przyrządu (pominięto dla uproszczenia niepewności wynikające z błędów kształtu mierzonego wałka, ewentualnych zanieczyszczeń, odkształceń sprężystych itp.). Założono ponadto, że niepewność zerowania nie przekracza połowy wartości działki elementarnej wybranego przyrządu.

Niepewność pomiaru metodą różnicową (p. rozdz.2.6) jest równa

$$\Delta_u x = \sqrt{(\Delta_u \alpha)^2 + (\Delta_u w)^2 + (\Delta_u z)^2}$$

gdzie:

$\Delta_u \alpha$ – niepewność wyniku pomiaru różnicy $x - w$ (u nas niepewność przyrządu);

$\Delta_u w$ – niepewność wzorca;

$\Delta_u z$ – niepewność zerowania.

Zakładając równość ww. niepewności: $\Delta_u \alpha = \Delta_u w = \Delta_u z = \Delta_u$, dostajemy:

$$\sqrt{(\Delta_u \alpha)^2 + (\Delta_u w)^2 + (\Delta_u z)^2} = \sqrt{3 \cdot (\Delta_u)^2} = \Delta_u^{\text{opt}} x$$

Skąd

$$\Delta_u \frac{\Delta_u^{\text{opt}} x}{\sqrt{3}} = \frac{1,3 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} = 0,75 \mu\text{m}$$

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że:

1. Do pomiaru możemy wykorzystać najmniej dokładny (najtańszy) komplet płytek wzorcowych (niepewność odtwarzania płytki wzorcowej o długości $L = 24 \text{ mm}$ wykonanej w drugiej klasie dokładności wynosi $0,6 \mu\text{m}$);
2. Do pomiaru powinniśmy wybrać czujnik Supramess, ponieważ jego niepewność jest najbardziej zbliżona do obliczonej wartości $\Delta_{u,i} x$; czujnik Hicator nie nadaje się ze względu na zbyt małą dokładność, natomiast optymetr należy odrzucić ze względów ekonomicznych (jest znacznie droższy od czujnika Supramess, a jego wysoka dokładność nie jest w tym przypadku konieczna).

Po dokonaniu wyboru narzędzi pomiarowych dobrze jest sprawdzić oczekiwaną niepewność pomiaru. W naszym przypadku należy oszacować jeszcze wartość błędu zerowania. Zgodnie z przyjętym założeniem wyniesie ona:

$$\Delta_u z = 0,5 \cdot w_e = 0,5 \cdot 0,5 \mu\text{m} = 0,25 \mu\text{m}$$

W takim razie

$$\begin{aligned} \Delta_u x &= \sqrt{(\Delta_u \alpha)^2 + (\Delta_u w)^2 + (\Delta_u z)^2} = \sqrt{(0,8 \mu\text{m})^2 + (0,6 \mu\text{m})^2 + (0,25 \mu\text{m})^2} = \\ &= 1,03 \mu\text{m} \approx 1 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Szacowana wartość $\Delta_u x$ jest nieco mniejsza od $\Delta_u^{\text{opt}} x$, co w naszym przypadku jest korzystne, ponieważ w trakcie analizy pominięto niektóre przyczyny niepewności.

Należy jeszcze podkreślić, że przyjęta w powyższym rozwiązaniu postać równań optymalizujących $\Delta_u \alpha = \Delta_u w = \Delta_u z = \Delta_u$ nie jest jedyną możliwą. W ogólnym przypadku zaleca się przyjmować $\Delta_{u,i} x = C_i \cdot \Delta_u$, a współczynniki C_i dobierać z uwzględnieniem specyfiki planowanej metody.

6. LABORATORIA – RODZAJE, ZADANIA, WYMAGANIA

6.1. RODZAJE LABORATORIÓW

Laboratoria można klasyfikować w oparciu o różne kryteria, np. w zależności od rodzaju wykonywanych w nich prac, powiązania organizacyjne, dziedzinę, w której działają itp.

Jeśli chodzi o rodzaje wykonywanych prac, to najczęściej wyróżnia się dwie kategorie:

- badanie;
- wzorcowanie.

Badanie jest to działanie polegające na określeniu jednej lub wielu właściwości wyrobu, materiału, sprzętu, zjawiska fizycznego, procesu lub usługi zgodnie z ustaloną procedurą. Najczęstszym celem badania jest sprawdzenie.

Sprawdzenie – potwierdzenie poprzez zbadanie i zabezpieczenie dowodu spełnienia lub niespełnienia określonych wymagań.

Wzorcowanie jest to zestaw czynności, w wyniku których zostaje ustalona zależność pomiędzy wartościami wskazanymi przez narzędzie pomiarowe a odpowiednimi znanymi wartościami mierzonych wielkości. Wzorcowanie pozwala na oszacowanie błędów wskazania narzędzia pomiarowego oraz przypisanie wartości znakom umieszczonym na przyjętych skalach.

Ze względu na rodzaje wykonywanych prac laboratoria dzieli się na:

- laboratoria badawcze (testing laboratories)
- (laboratoria sprawdzające zgodność wyrobów, materiałów, procesów, usług itp. z określonymi wymaganiami);
- laboratoria wzorcujące (calibration laboratories);
- (laboratoria wzorcujące i sprawdzające narzędzia pomiarowe).

Ze względu na powiązania organizacyjne laboratoria można podzielić na trzy grupy:

- a) laboratoria stanowiące integralne części przedsiębiorstw produkcyjnych, pracujące wyłącznie lub niemal wyłącznie w celu zaspokojenia ich potrzeb;
- b) laboratoria stanowiące samodzielne jednostki organizacyjne świadczące usługi pomiarowe dla innych podmiotów gospodarczych;
- c) laboratoria wchodzące w skład innych jednostek organizacyjnych, ale świadczące większość usług na rzecz podmiotów zewnętrznych (np. laboratoria badawcze jednostek certyfikujących wyroby).

6.2. ZADANIA LABORATORIÓW

Zadania każdego laboratorium zależą w pewnym stopniu od rodzaju wykonywanych w nim prac oraz od jego powiązań organizacyjnych. W najbardziej ogólnym przypadku wymienić można:

- ♦ umożliwienie stosowania nowoczesnych metod i narzędzi pomiarowych, a także zgodności postępowania z aktualnie obowiązującym prawem przez jednostki organizacyjne korzystające z usług laboratorium;
- ♦ sprawdzanie okresowe i bieżące narzędzi pomiarowych, zarówno własnych, jak i stosowanych przez klientów, legalizacja bądź uwierzytelnianie względnie zgłaszanie do legalizacji bądź uwierzytelnienia narzędzi pomiarowych podlegających takim obowiązkom;
- ♦ wykonywanie zadań pomiarowych zleconych przez zainteresowane komórki organizacyjne własnego przedsiębiorstwa lub klientów zewnętrznych;
- ♦ współudział przy zakupach wyposażenia kontrolno-pomiarowego (opiniowanie wniosków w sprawie zakupu, odbiory techniczne zakupionego sprzętu);
- ♦ współpraca w zakresie eksploatacji sprzętu pomiarowego (przeprowadzanie badań eksploatacyjnych nowych narzędzi pomiarowych i przekazywanie wniosków z tych badań zainteresowanym komórkom, wycofywanie z użytkowania narzędzi pomiarowych uszkodzonych bądź nierzetelnych i przekazywanie ich do naprawy bądź likwidacji, odbiór techniczny narzędzi po naprawie, nadzór nad konserwacją i składowaniem sprzętu pomiarowego).

6.3. WYMAGANIA DOTYCZĄCE LABORATORIÓW

Wyniki prowadzonych w laboratoriach pomiarów i badań, zwłaszcza tych, które związane są z zapewnianiem właściwej jakości wyrobów i usług, winny być na tyle wiarygodne, aby mogły być powszechnie uznawane. Brak uznania wyników uzyskanych w jednym laboratorium stwarza bowiem konieczność powtórzenia podobnych badań w innym laboratorium, co prowadzi do marnotrawstwa sił i środków. Nasilająca się międzynarodowa współpraca gospodarcza powoduje, że problem wzajemnego uznawania wyników badań jest coraz bardziej istotny i ma coraz większe znaczenie ekonomiczne.

Aby wyniki prowadzonych w laboratorium pomiarów i badań mogły być powszechnie uznane za wiarygodne, laboratorium to musi spełniać szereg różnych wymagań. Ze względu na wspomnianą wcześniej rangę zagadnienia wymagania te zostały unormowane w skali międzynarodowej.

Podstawowymi krajowymi dokumentami zawierającymi opis wymagań dotyczących laboratoriów są:

- norma PN-EN ISO/IEC 17025:2005 „Ogólne wymagania dotyczące laboratoriów badawczych i wzorcujących”;
- „Ustawa o systemie oceny zgodności z dnia 30 sierpnia 2002r” wraz z późniejszymi zmianami [L34].

Norma ISO/IEC jest adresowana do wszystkich laboratoriów, bez względu na ich zadania, wielkość czy branżę, w której działają. Jej podstawowe cele to [S15]:

- pomoc przy opracowaniu i wdrożeniu systemu zarządzania jakością;
- ustanowienie ogólnych wymagań dotyczących badań i wzorcowania;
- stworzenie podstawy do akredytacji laboratorium.

Norma ISO/IEC 17025 zawiera dwa rodzaje wymagań:

- wymagania dotyczące organizacji i zarządzania;
- wymagania związane z kompetencjami technicznymi.

Wymagania w zakresie organizacji i zarządzania (czwarty rozdział normy) dotyczą:

♦ Statutu laboratorium

(laboratorium – lub organizacja, której częścią jest laboratorium – powinno być jednostką, która może ponosić odpowiedzialność prawną).

♦ Personelu

Pracownicy laboratorium powinni m.in.:

- być niezależni od jakichkolwiek nacisków i wpływów zewnętrznych;
- mieć określoną odpowiedzialność, uprawnienia i wzajemne powiązania (w szczególności laboratorium winno mieć określoną strukturę organizacyjną, kierownictwo techniczne i kierownika ds. jakości, a prowadzone prace winny być nadzorowane przez osoby kompetentne w zakresie metod i procedur);
- unikać zaangażowania się w jakąkolwiek działalność, która mogłaby podważyć zaufanie co do bezstronności ich ocen i rzetelności działania (np. prowadzić badania metodą, która nie gwarantuje obiektywności wyników lub cechuje się małą wiarygodnością, upraszczać obowiązujące sposoby postępowania itp.);
- zapewniać klientom ochronę informacji poufnych i praw własności.

♦ Systemu zarządzania

W laboratorium winien być wdrożony i utrzymywany system zarządzania jakością. Dokumentacja tego systemu (Polityka Jakości, Księga Jakości, procedury i instrukcje) powinna być dostępna, zrozumiana i realizowana przez pracowników.

♦ Nadzoru nad dokumentami

Laboratorium powinno posiadać procedury nadzoru nad dokumentami (przepisami prawnymi, normami, procedurami, instrukcjami, metodami badań i wzorcowań, rysunkami, oprogramowaniem itp.). Procedury te winny określać wymagania formalne stawiane poszczególnym typom dokumentów oraz sposoby postępowania przy zatwierdzaniu dokumentów, ich dystrybucji, aktualizacji i archiwizacji.

♦ Przeglądu zapytań, ofert i umów

Laboratorium powinno dokonywać przeglądów zapytań, ofert i umów w celu upewnienia się, czy:

- wymagania klienta są właściwie określone, udokumentowane i zrozumiane;
- laboratorium ma możliwości i zasoby, aby te wymagania spełnić;
- wybrano właściwą metodę badania i/lub wzorcowania;

Działania składające się na przegląd oraz związane z nimi zapisy winny zostać określone w udokumentowanej procedurze.

♦ Podwykonawstwa badań i wzorcowań

Laboratorium, które podzleca pracę innemu podmiotowi, jest zobowiązane:

- poinformować o tym fakcie klienta i uzyskać jego zgodę;
- wybrać kompetentnego podwykonawcę;

Laboratorium jest odpowiedzialne za wyniki prac podwykonawcy, za wyjątkiem przypadku, kiedy podwykonawcę wskazał klient.

♦ Zakupów

W przypadku zakupu produktów mających wpływ na jakość prowadzonych badań i/lub wzorcowań laboratorium powinno:

- precyzyjnie i jednoznacznie określić zamawiany produkt (typ, klasa, gatunek, rysunki, parametry techniczne, ew. warunki techniczne odbioru);
- dokonać oceny potencjalnych dostawców i wybrać najlepszego z nich;
- sprawdzić zgodność zakupionych produktów z wyspecyfikowanymi wymaganiami;

Sposoby realizacji ww. czynności oraz towarzyszące im zapisy winny być przedstawione w udokumentowanej procedurze(-ach).

♦ Obsługi klientów

W ramach dobrej współpracy z klientem laboratorium powinno:

- umożliwić klientowi uczestniczenie, w charakterze świadka, w prowadzonych dla niego badaniach lub wzorcowaniach;
- interpretować uzyskane wyniki, przekazywać wynikające z nich opinie i sugestie w sprawach technicznych;
- przekazywać badane/wzorcowane obiekty w stanie umożliwiającym weryfikację uzyskanych wyników;
- dążyć do uzyskania informacji zwrotnych (opinii na temat wykonanej pracy);
- bezwzględnie informować klienta o ew. odstępstwach od poczynionych wspólnie ustaleń (np. opóźnienie prac, zmiana metody itp.).

♦ Reklamacji

Laboratorium powinno mieć procedurę dotyczącą reklamacji klientów lub innych stron zainteresowanych. Postępowanie reklamacyjne winno być dokumentowane.

♦ **Nadzorowania niezgodnych z wymaganiami badań i wzorcowań**

W przypadku stwierdzenia działań niezgodnych z przyjętymi przez laboratorium procedurami lub niespełniających uzgodnionych z klientem wymagań należy ustalić odpowiedzialność i uprawnienia za dalsze zarządzanie tą pracą. Osoby uprawnione winny dokonać oceny wyników działań niezgodnych (możliwości ich wykorzystania, konieczności korekcji bądź anulowania), podjąć decyzje odnośnie sposobu kontynuacji pracy oraz ocenić potrzebę poinformowania klienta.

Czynności związane z nadzorowaniem niezgodnych z wymaganiami badań i/lub wzorcowań winny być określone w udokumentowanej procedurze.

♦ **Doskonalenia**

Laboratorium winno ciągle doskonalić skuteczność i efektywność swoich działań. Może wykorzystać w tym celu politykę i cele jakości, wyniki przeprowadzonych audytów i przeglądów systemu zarządzania, analizy różnego rodzaju danych opisujących prowadzoną działalność, działania korygujące i zapobiegawcze.

♦ **Działan korygujących i zapobiegawczych**

W przypadku stwierdzenia działań niezgodnych z polityką i procedurami dotyczącymi systemu zarządzania lub działań technicznych w laboratorium winny zostać przeprowadzone działania korygujące. Działania te winna rozpoczynać analiza przyczyn problemu. Po ustaleniu przyczyn należy wybrać i wdrożyć działania eliminujące te przyczyny i zapobiegające ponownemu wystąpieniu problemu. Działania korygujące winny być dostosowane do wielkości problemu. Ich rezultaty winny być monitorowane.

Odpowiedzialność i uprawnienia do prowadzenia działań korygujących, sposoby ich przeprowadzania oraz zapisy związane z tymi działaniami winny być określone w udokumentowanej procedurze.

Działania zapobiegawcze polegają na określeniu potencjalnych źródeł niezgodności oraz opracowaniu i wdrożeniu działań obniżających prawdopodobieństwo wystąpienia niezgodności pochodzących z tych źródeł. Określenie potencjalnych źródeł niezgodności umożliwiają najczęściej przeglądy procedur, analizy danych (w tym analizy trendu i analizy ryzyka) oraz badania biegłości. Podobnie jak w przypadku działań korygujących, działania zapobiegawcze winny być określone w udokumentowanej procedurze.

♦ **Nadzoru nad zapisami**

Zapisy można podzielić na zapisy dotyczące zarządzania i zapisy techniczne. Do zapisów dotyczących zarządzania należą m.in.: raporty z audytów i przeglądów zarządzania, zapisy dotyczące działań korygujących i zapobiegawczych, zapisy dotyczące personelu laboratorium, jego kooperantów i dostawców.

Zapisy techniczne są zbiorem danych pochodzących z przeprowadzonych badań i/lub wzorcowań. Jako przykłady zapisów technicznych służyć mogą wewnętrzne i zewnętrzne

sprawozdania z badań, świadectwa wzorcowań, karty kontrolne, notatki robocze, wykresy, informacje zwrotne od klientów itp.

Laboratorium winno posiadać procedury określające zasady identyfikacji, oznaczania, przechowywania, katalogowania, dostępu oraz niszczenia zapisów.

Zapisy winny być przechowywane w taki sposób, aby można je było łatwo odszukać. Dla każdego rodzaju zapisu winien być ustalony okres przechowywania. Zasady dostępu winny zapewniać bezpieczeństwo i poufność przechowywanych informacji. W przypadku zapisów technicznych należy określić sposób poprawiania błędnych wpisów, zabezpieczający przed utratą lub zmianą danych pierwotnych. Problem ten jest szczególnie istotny w przypadku zapisów elektronicznych.

♦ **Audyty wewnętrznych**

Laboratorium powinno okresowo sprawdzać poprawność funkcjonowania poszczególnych elementów swego systemu zarządzania. Zalecaną metodą tego sprawdzania jest audyt wewnętrzny. Audyty powinny odbywać się zgodnie z wcześniej ustalonym programem, obejmującym wszystkie elementy systemu. Każdy element winien być audytowany przynajmniej jeden raz w roku. Audyty powinny być przeprowadzane przez odpowiednio przeszkolonych pracowników (audytorów wewnętrznych) dobie-ranych tak, aby w możliwie największym stopniu zrealizować zasadę niezależności (audytor nie powinien być powiązany z audytowanymi działaniami). Działania audytowe oraz związane z nimi zapisy winna określać udokumentowana procedura.

Jeżeli audyt wykazał niezgodność audytowanych działań lub ich wyników z przyjętymi w laboratorium ustaleniami, należy podjąć odpowiednie działania korygujące.

♦ **Przeglądów zarządzania**

Przynajmniej raz w roku kierownictwo laboratorium winno dokonać przeglądu systemu zarządzania oraz prowadzonej w laboratorium działalności badawczej i/lub wzorcującej. Celem tego przeglądu jest ocena skuteczności i efektywności prowadzonych działań oraz możliwości ich doskonalenia.

W ramach przeglądu należy poddać analizie aktualną politykę jakości, stosowane w laboratorium procedury, wyniki przeprowadzonych audytów, rodzaje i skuteczność działań korygujących i zapobiegawczych, zmiany w zakresie i rodzaju prowadzonych prac, informacje zwrotne od klientów (w tym reklamacje) i jeszcze kilka innych wymienionych w normie ISO/IEC 17025 czynników.

Wynikiem przeglądu winny być cele, zadania i plany działania na następny rok. Winny zostać również oszacowane zasoby niezbędne do prawidłowego funkcjonowania systemu zarządzania.

Norma ISO/IEC 17025 wymaga, aby przegląd kierownictwa i związane z nim zapisy (m.in. raport z przeglądu) zostały określone w udokumentowanej procedurze.

Na prawidłowość i wiarygodność prowadzonych w laboratoriach badań i/lub wzorcowań wpływa wiele różnych czynników. Wymagania dotyczące tych czynników zawiera piąty rozdział normy ISO/IEC 17025 zatytułowany „Wymagania techniczne”. Wymagania techniczne dotyczą:

◆ **Personelu laboratorium**

Kierownictwo laboratorium powinno zapewnić, aby każdy pracownik wykonujący zlecone mu zadanie posiadał odpowiednie kompetencje. Cel ten można osiągnąć poprzez odpowiedni dobór pracowników do realizacji poszczególnych zadań, odpowiednie programy szkoleń, ukierunkowane na bieżące i przewidywane zadania laboratorium oraz nadzór nad realizacją przydzielonych zadań połączony z ew. pomocą techniczną (dotyczy zwłaszcza pracowników będących w trakcie szkoleń). Każdy pracownik winien mieć aktualny opis obowiązków i uprawnień. Laboratorium powinno prowadzić zapisy dotyczące wykształcenia i umiejętności praktycznych, odbytych szkoleń, nabytych uprawnień oraz doświadczenia zawodowego swoich pracowników.

◆ **Warunków lokalowych**

Pomieszczenia laboratorium powinny umożliwiać prawidłowe przeprowadzanie badań i/lub wzorcowań, a w szczególności [L28]:

- chronić przed nadmiernym wpływem takich czynników, jak temperatura, wilgotność, zapylenie, opary, hałas, drgania, zakłócenia elektromagnetyczne itp.;
- być wystarczająco przestronne (w przypadku laboratoriów długości i kąta zaleca się 5 m²/stanowisko);
- mieć wyposażenie i źródła zasilania niezbędne do wykonywania pomiarów, w tym wyposażenie do monitorowania warunków otoczenia (termometry, higrometry, barometry itp.);
- być właściwie oświetlone; najkorzystniejsze jest oświetlenie bezcieniowe pośrednie lampami dającymi światło typu dziennego o natężeniu min. 300 Lx; zalecane kolory wnętrza – biały sufit, jasnozielone ściany;
- należy zapewnić odpowiednie środki do utrzymania laboratorium w czystości i porządku (pomieszczenie przygotowawcze, brak firanek i zasłon, odpowiednia wykładzina stołów i podłóg itp.);
- pomieszczenia laboratorium winny być wykorzystywane zgodnie ze swoim przeznaczeniem, a warunki wstępu poszczególnych osób, zwłaszcza osób spoza laboratorium, wyraźnie określone;

Techniczne wymagania dotyczące warunków mogących wpływać na wyniki badań i wzorcowań powinny być udokumentowane i monitorowane.

◆ **Metod badań i wzorcowań oraz ich walidacji**

Laboratorium powinno stosować metody badań, które są właściwe dla realizowanych zadań i spełniają wymagania klienta. Preferowane powinno być stosowanie metod badawczych opublikowanych w normach lub czasopismach naukowych względnie

zalecanych przez renomowane organizacje techniczne czy producentów wyposażenia badawczego.

W przypadku stosowania metod własnych (opracowanych w laboratorium) winne być one uprzednio poddane walidacji²⁸, odpowiednio udokumentowane i uzgodnione z klientem.

Wyniki badań i/lub wzorcowań winny zawierać informacje dotyczące niepewności przeprowadzonych pomiarów.

♦ Stosowanego wyposażenia

Każdy element wyposażenia używanego do badań i/lub wzorcowania winien spełniać określone dla niego wymagania. Każdy element mający istotny wpływ na wyniki badań winien mieć swój indywidualny identyfikator i związaną z nim dokumentację. Dokumentacja ta winna zawierać wszystkie istotne dla prawidłowego stosowania informacje, np.: parametry identyfikujące element wyposażenia, jego podstawowe parametry metrologiczne, daty i wyniki wzorcowań, instrukcje obsługi lub informacje o miejscu ich przechowywania, plany konserwacji, informacje o uszkodzeniach i naprawach, lokalizację itp.

Każde wykorzystywane w laboratorium narzędzie pomiarowe powinno być poddawane procesowi wzorcowania: doraźnie (np. przed włączeniem do eksploatacji) i okresowo (wg określonego harmonogramu).

Wypożyczenie powinno być obsługiwane tylko przez upoważniony, odpowiednio przeszkolony personel. W szczególności należy zabezpieczyć je przed nieuprawnionymi adiustacjami (regulacjami), które zmieniłyby wyniki wzorcowania.

Sposoby postępowania z wyposażeniem kontrolno-pomiarowym winny być określone w udokumentowanych procedurach.

♦ Spójności pomiarowej²⁹

Do wzorcowania narzędzi pomiarowych należy używać wzorców odniesienia (etalonów), które powinny być zgodne z wzorcami odniesienia wyższego rzędu (krajowymi lub międzynarodowymi). Zgodność ta powinna być zbadana i potwierdzona przez uprawnioną jednostkę (świadectwo wzorcowania). Wzorce odniesienia powinny być używane tylko i wyłącznie do wzorcowania.

²⁸ Walidacja jest badaniem mającym na celu udowodnienie, że walidowana metoda spełnia wymagania dotyczące zamierzonego zastosowania.

²⁹ Spójność pomiarowa (traceability) polega na tym, że wartość wskazywaną przez przyrząd lub wartość odtwarzaną przez wzorzec można powiązać z określonymi wartościami odniesienia. Wartościami odniesienia są najczęściej wartości odtwarzane przez krajowe lub międzynarodowe wzorce jednostek miar. Ponieważ bezpośrednie porównanie dowolnego wzorca z odpowiadającym mu wzorcem krajowym lub międzynarodowym nie jest raczej ze względów organizacyjnych możliwe, więc spójność realizuje się za pomocą łańcucha porównań.

♦ **Pobierania próbek**

Z pobieraniem próbek mamy do czynienia w przypadkach, gdy ocena całej partii wyrobów odbywa się na podstawie badań części tej partii, czyli tzw. próbki. Problemem jest taki dobór elementów próbki, aby była ona reprezentatywna (posiadała podobne właściwości jak cała partia).

Norma ISO/IEC wymaga, aby laboratorium miało plany i procedury pobierania próbek. Plany pobierania próbek, oparte na odpowiednich metodach statystycznych, winny zapewniać ich reprezentatywność. Procedury winny określać sposoby postępowania przy pobieraniu próbek i związane z tym zapisy.

♦ **Postępowania z obiektami do badań i wzorcowań**

Laboratorium winno mieć procedury określające sposoby postępowania z obiektami przyjmowanymi do badań, w szczególności ich transportem, przyjmowaniem na stan, zabezpieczaniem, magazynowaniem i zdejmowaniem ze stanu (zwrotami).

Laboratorium powinno mieć system identyfikacji obiektów gwarantujący rozróżnianie poszczególnych egzemplarzy i wiążący poszczególne egzemplarze z danymi ich dotyczącymi, zawartymi w dokumentach i zapisach. Stosowane identyfikatory winny funkcjonować przez cały czas przebywania obiektów w laboratorium (co umożliwia np. przeprowadzenie dodatkowych badań w późniejszym terminie).

W przypadku gdy przyjęte do badań obiekty nie są zgodne z wcześniejszym ich opisem lub gdy istnieją inne przyczyny wątpliwości, czy nadają się one do badań, należy o tym fakcie poinformować klienta i uzgodnić z nim dalsze postępowanie.

♦ **Zapewnienia odpowiedniej jakości wyników**

Laboratorium powinno podejmować działania sprawdzające wiarygodność uzyskiwanych w nim wyników. Jako przykłady takich działań wymienić można: udział w programach porównań międzylaboratoryjnych lub programach badania biegłości, powtarzanie badań z wykorzystaniem innych metod czy ponowne badanie lub wzorcowanie przechowywanych obiektów. Dane uzyskane w wyniku tych działań winny być analizowane i wykorzystywane do przeprowadzenia ew. działań korygujących.

♦ **Sprawozdań z badań**

Sprawozdania z badań/wzorcowań winny, poza danymi organizacyjnymi (tytuł i oznaczenie dokumentu, dane stron zainteresowanych, czas i miejsce przeprowadzenia badań, dane osoby autoryzujące sprawozdanie wraz z jej podpisem), zawierać:

- opis badanego obiektu;
- opis zastosowanej metody (z ew. informacją na temat sposobu pobierania próbek);
- dowód, że zapewniono spójność pomiarową (w przypadku wzorcowania);
- uzyskane wyniki podane zgodnie z wymaganiami zastosowanej procedury badawczej;
- informacje niezbędne do właściwej interpretacji uzyskanych wyników;
- inne niż ww. informacje wymagane przez klienta (uzgodnione w umowie).

Sprawozdanie może, o ile jest to właściwe, zawierać jeszcze inne informacje. Najczęściej mają one postać opinii, zaleceń i wytycznych (np. opinia dotycząca zgodności uzyskanych wyników z wymaganiami, zalecenie jak wykorzystać wyniki przeprowadzonych badań czy wytyczne przydatne do doskonalenia).

Sprawozdania z badań mogą być wydawane w postaci trwałego dokumentu lub w wersji elektronicznej. W tym drugim przypadku powinny być zabezpieczone przed wprowadzeniem nieuprawnionych zmian.

Zaleca się, aby laboratorium posiadało formularze sprawozdań dostosowane do każdego rodzaju prowadzonych prac. Dobrze opracowane formularze powinny ułatwić wykonywanie sprawozdań i poprawić jakość prezentacji uzyskiwanych wyników.

6.4. WARUNKI UZNAWANIA WYNIKÓW BADAŃ

Aby wyniki badań i/lub wzorcowań przeprowadzanych w laboratorium mogły być uznawane w obszarze całej Unii Europejskiej, laboratorium to musi zostać zgłoszone Komisji Europejskiej i państwom członkowskim Unii jako właściwe do wykonywania określonych w zgłoszeniu czynności. Zgłoszenie to nosi nazwę notyfikacji i dokonuje go, w myśl ustawy o systemie oceny zgodności, „minister właściwy do spraw gospodarki”.

Warunkiem notyfikacji jest autoryzacja. Autoryzacja jest to decyzja administracyjna ministra lub kierownika urzędu centralnego, właściwego ze względu na zakres działalności laboratorium, że laboratorium to można zakwalifikować do procesu notyfikacji.

Zgodnie z ustawą o systemie oceny zgodności uzyskanie autoryzacji uwarunkowane jest:

- posiadaniem certyfikatu akredytacji;
- ubezpieczeniem się od odpowiedzialności cywilnej w wysokości odpowiedniej do ryzyka związanego z prowadzoną działalnością;
- spełnieniem dodatkowych warunków określonych w rozporządzeniu do ustawy o systemie oceny zgodności lub w odrębnych ustawach.

Akredytacja jest to formalne uznanie kompetencji do wykonywania określonych działań. W przypadku laboratorium podstawą oceny kompetencji jest spełnienie wymagań normy PN-EN ISO/IEC 17025. Akredytacji dokonują upoważnione jednostki akredytujące. W Polsce taką jednostką, na mocy ustawy [L34] jest Polskie Centrum Akredytacji. Po złożeniu wniosku o akredytację, zawierającego określenie zakresu akredytowanych działań, i pozytywnym przejściu procesu oceny, laboratorium otrzymuje certyfikat akredytacji.

Ustawa o systemie oceny zgodności dotyczy uznawania wyników badań przez kraje członkowskie UE. Polskie Centrum Akredytacji podejmuje działania zwiększające obszar wzajemnego uznawania wyników badań. Przykładem takich działań może być podpisanie umowy o wzajemnym uznawaniu wyników badań laboratoriów akredytowanych przez członków ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation), organizacji o zasięgu ogólnosiwiatowym. Więcej informacji na ten temat można znaleźć na [S14] i [S21].

LITERATURA

Pozycje drukowane [Lxx]

- [1] Angle Encoders with Integral Bearing – katalog firmy Heidenhain, 2006 r.
- [2] Anthony D.M. – "Engineering metrology", Paragon Books Ltd, 1986 r.
- [3] Chodak B. i in. – „Wybrane zagadnienia metrologii ogólnej, prawnej i probierstwa”, ODKT RS NOT, Warszawa 1989.
- [4] Chuchro Z., Ostrowski K. – "Maszyny pomiarowe 3-koordynatowe Instytutu Obróbki Skrawaniem", Mechanik 9/1979.
- [5] DIMENSIONAL METROLOGY – katalog firmy MAHR, wersja 91E.
- [6] Induktosynowe układy pomiarowe - katalog firmy CBKO Pruszków.
- [7] Jakubiec W., Malinowski J. – „Metrologia wielkości geometrycznych”, wyd. 5, WNT, Warszawa 2005.
- [8] Jaworski Janusz – „Matematyczne podstawy metrologii”, WNT, Warszawa 1979 r.
- [9] Kałużko D., Szamotulski J. – „SI. Legalne jednostki miar. Podstawowe przepisy prawne ...”, Wyd. Normalizacyjne, Warszawa 1977 r.
- [10] Katalog narzędzi pomiarowych firmy Mitutoyo PL-12001.
- [11] Krawczuk E. – „Narzędzia do pomiaru długości i kąta”, WNT, Warszawa 1977.
- [12] Kubisa S. – „Podstawy metrologii”, skrypt Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1995 r.
- [13] Malinowski J. – „Międzynarodowy układ jednostek miar SI”, WSiP, Warszawa 2000 r.
- [14] Non-contact position encoders – katalog firmy Renishaw, wydanie 0707, 2005-2007.
- [15] Partnerstwo dla jakości – katalog firmy TESA, 1999 r.
- [16] Piotrowski J. – „Podstawy metrologii”, PWN, Warszawa 1979 r.
- [17] Płoszajski A. – „Nowoczesne narzędzia i przyrządy pomiarowe długości i kąta” – Biuletyn Informacyjny VIS-u, 1-2 / 1988 r.
- [18] PN - 71 / M - 02050 Metrologia. Nazwy i określenia (norma wycofana, ale cytowana w niniejszej pracy).
- [19] Praca zbiorowa – „Mała Encyklopedia Metrologii”, WNT, Warszawa 1989 r.
- [20] Praca zbiorowa – „Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane” wyd. PKN, Warszawa 2010.
- [21] Praca zbiorowa – „Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik”, wyd. Alfa-Wero, Warszawa 1999.
- [22] Praca zbiorowa pod red. P.H .Syndehama – „Podręcznik metrologii. Podstawy teoretyczne”, WKiŁ, Warszawa 1988 r.
- [23] Precision Measuring Instrument – katalog firmy Mitutoyo, wydanie GB-4001.
- [24] Precision Measuring Instruments – katalog nr E50 japońskiej firmy MITUTOYO.
- [25] Lasertex – Interferometr laserowy LSP30-3D. Podręcznik użytkownika; v.1.0.2 Wrocław 2009 r.
- [26] Ratajczyk E. – „Współrzędnościowa technika pomiarowa”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005 r.
- [27] Ręczne przyrządy pomiarowe i systemy przenoszenia danych – katalog firmy Mitutoyo 2010 r.
- [28] Sadowski A., Miernik E., Sobol J. – „Metrologia długości i kąta”, WNT, Warszawa 1978.

- [29] Skierczyński J. – „Wstęp do metrologii”, skrypt WSI, Lublin 1984 r.
- [30] Taylor J.R. – „Wstęp do analizy błęd pomiarowego”, PWN, Warszawa 1999 r.
- [31] Tomaszewski A. – „Podstawy nowoczesnej metrologii”, WNT, Warszawa 1978 r.
- [32] Turzeniecka D. – „Ocena niepewności wyniku pomiaru”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997 r.
- [33] Universal Langenmesser – instrukcja obsługi przyrządu firmy Carl Zeiss Jena.
- [34] Ustawa o systemie oceny zgodności z dnia 30 sierpnia 2002 r.” wraz z późniejszymi zmianami.
- [35] Zakrzewski J. – „Podstawy metrologii”, skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 1991.
- [36] Zawada J. – „Wpływ operacji kontroli technicznej na statystyczne rozkłady powstających wymiarów. Optymalna dokładność kontroli”, „Pomiary, Automatyka, Kontrola”, nr 10/1991.
- [37] Zawada J. – „Wybrane zagadnienia z podstaw metrologii”, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002 r.

Strony internetowe [Sxx]

- [1] <http://apw.ee.pw.edu.pl/tresc/ref/szafar/szafar.htm> rys. 102.
- [2] <http://catalogue.mitutoyo.fr/> rys. 129.
- [3] http://news.thomasnet.com/company_detail.html?cid=10061349 rys. 144.
- [4] <http://schroeter-lausen.de/messtechnik/cejohansson/mikrokator.html> [tabela 20].
- [5] <http://www.amazon.com/Mitutoyo-119-202-Micrometer-Spherical-Resolution/dp/B003UATCMY>
- [6] <http://www.cisimpex.ro/products.html> (rys. 145, 146).
- [7] <http://www.complore.com/using-vernier-calipers-and-micrometer-screw-gauge-0>
- [8] <http://www.directindustry.com/prod/vision-engineering/2-axis-non-contact-measuring-microscope-5580-54000.html> rys. 130.
- [9] <http://www.edmundsgages.com/pdfs/airgage.pdf> - informacje nt czujników pneumatycznych.
- [10] <http://www.europacprecision.com/products/length-and-angle-standards/gauge-blocks/gauge-block-sets-tesa-metric-32-piece-set.htm> - rys 26.
- [11] http://www.heidenhain.com/fileadmin/pdb/media/img/571_470-24.pdf -przetworniki przemieszczeń.
- [12] <http://www.hroberts-di.com/>.
- [13] http://www.hroberts-di.com/product_details.asp?product=HR516-601 – rys. 27.
- [14] <http://www.ilac.org/ilacarrangement.html> - strona ilac, treść i sygnatariusze układu o wzajemnym uznawaniu badań.
- [15] <http://www.iso.org.pl/iso-17025> - opis normy PN-EN ISO 17025.
- [16] <http://www.mahr.com> / 07.2005.
- [17] <http://www.messmittel-shop.de> – rys. 72.
- [18] <http://www.mitutoyo.pl>
- [19] http://www.mitutoyo.pl/pdf/linialy_pomiarowe_linear_scale_PL_14001.pdf
- [20] <http://www.oberon.com.pl/rozdzielczosc-0.002/czujnik-zegarowy-km-500-s-kafer-2.html>
- [21] http://www.pca.gov.pl/?page=porozumienie_ilac – wzajemne uznawanie wyników badań.
- [22] http://www.prenar.ee/failid/72_116406.jpg – rys. 60.

- [23] <http://www.renishaw.com/en/stylus-types--6627> - rys. 151.
- [24] <http://www.shop.yourtoolingstore.com/> - rys. 56.
- [25] <http://www.sinowon.com/> współczesne projektory.
- [26] <http://www.stanleylondon.com/inclinometer.htm> - rys. 79.
- [27] <http://www.tesabs.ch/en/products/>
- [28] <http://www.visioneng.com/> rys. 131.
- [29] <http://www.wylerag.com> , rys. 82 i rys. 84.

ISBN 978-83-7283-458-4