

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	7
WYKAZ OZNACZEŃ	9
1. WSTĘP	11
2. PROCES POZNAWCZY	15
2.1. <i>Obserwacja - pomiar</i>	17
2.2. <i>Obiekt badań i jego model</i>	25
3. JEDNOSTKI MIAR. SŁUŻBA MIAR	30
3.1. <i>Międzynarodowy układ jednostek SI</i>	32
3.1.1. Jednostki podstawowe układu SI	32
3.1.2. Jednostki pochodne układu SI.....	34
3.1.3. Jednostki krotne	35
3.1.4. Zasady zapisu wartości wielkości	38
3.1.5. Zapis wartości liczbowej (zaokrąglenie wyniku)	39
3.1.6. Równania wielkościowe i równania wartości liczbowych	43
3.2. <i>Międzynarodowa i krajowa służba miar</i>	43
4. PROCES POMIAROWY	50
4.1. <i>Struktura procesu pomiarowego</i>	50
4.1.1. Podstawowa struktura procesu pomiarowego	50
4.1.2. Ogólna struktura procesu pomiarowego	51
4.2. <i>Metody pomiarowe</i>	55
4.2.1. Bezpośrednie metody pomiarowe	57
4.2.2. Pośrednie metody pomiarowe	58
4.2.3. Wychyłowe metody pomiarowe.....	59
4.2.4. Zerowe metody pomiarowe.....	63
5. WYNIK POMIARU	66
5.1. <i>Dokładność wyniku pomiaru</i>	66
5.1.1. Oddziaływanie źródła mierzonego zjawiska	67
5.1.2. Oddziaływanie układu pomiarowego	69
5.1.3. Oddziaływanie otoczenia	73
5.1.4. Oddziaływanie człowieka zaangażowanego w proces pomiarowy	77
5.2. <i>Wielokrotne pomiary wielkości z założenia niezmiennej w czasie</i>	78
5.2.1. Podstawowe pojęcia statystyki matematycznej	78
5.2.2. Wybrane rozkłady zmiennej losowej	81
5.2.3. Statystyczne opracowanie wyników wielokrotnych pomiarów	90
5.3. <i>Niepewność wyniku pomiaru</i>	101
5.3.1. Podział niepewności	104
5.3.2. Podawanie wyniku pomiaru	105
5.3.3. Przykłady wyznaczenia wartości niepewności.....	106
6. OPRACOWANIE DANYCH EKSPERYMENTALNYCH	119
6.1. <i>Systemy opracowywania danych</i>	120
6.2. <i>Tabelaryczne przedstawienie wyników pomiarów</i>	122
6.3. <i>Graficzne przedstawienie wyników pomiarów</i>	122

6.4.	<i>Analityczne przedstawienie wyników pomiarów</i>	125
6.4.1.	Wybór postaci równania empirycznego.....	127
6.4.2.	Wyznaczenie stałych równania empirycznego i teoretycznego.....	127
6.4.3.	Dalsze doskonalenie równania empirycznego.....	137
6.5.	<i>Statystyczne opracowanie populacji n-wymiarowych</i>	137
7.	STRUKTURA PRZYRZĄDÓW POMIAROWYCH I ICH	
	WŁAŚCIWOŚCI	144
7.1.	<i>Właściwości statyczne przyrządów</i>	146
7.2.	<i>Właściwości dynamiczne przyrządów</i>	152
7.2.1.	Przyrządy zerowego rzędu.....	155
7.2.2.	Przyrządy pierwszego rzędu.....	156
7.2.3.	Przyrządy drugiego rzędu.....	162
7.2.4.	Błąd dynamiczny.....	166
7.2.5.	Przyrządy rzeczywiste.....	167
7.3.	<i>Przetworniki wielkości wejściowej</i>	169
7.3.1.	Podział przetworników.....	169
7.3.2.	Przetworniki mechaniczne.....	173
7.3.3.	Przetworniki pneumatyczne i hydrauliczne.....	178
7.3.4.	Przetworniki optyczne.....	180
7.3.5.	Elektryczne przetworniki generacyjne.....	182
7.3.6.	Elektryczne przetworniki parametryczne.....	193
7.3.7.	Układy mostkowe przetworników wejściowych.....	216
7.4.	<i>Przetwarzanie sygnału wyjściowego przetwornika</i>	221
7.4.1.	Przetwarzanie analogowe.....	221
7.4.2.	Przetwarzanie analogowo-cyfrowe.....	233
7.5.	<i>Ujawnianie i utrwalanie informacji wyjściowej</i>	237
7.5.1.	Mierniki analogowe.....	237
7.5.2.	Rejestratory analogowe.....	239
8.	AUTOMATYZACJA I KOMPUTERYZACJA PROCESU	
	POMIAROWEGO	250
8.1.	<i>Struktura cyfrowego systemu pomiarowego</i>	252
8.1.1.	Organizacja transmisji informacji.....	253
8.2.	<i>Techniczne realizacje systemów pomiarowych</i>	255
8.2.1.	Karty akwizycji danych (DAQ Boards).....	256
8.2.2.	Przyrządy pomiarowe z wyjściowym interfejsem szeregowym.....	257
8.2.3.	Przyrządy z interfejsem równoległym.....	259
8.2.4.	Inne standardy interfejsu.....	264
8.3.	<i>Oprogramowanie systemu pomiarowego</i>	265
8.4.	<i>Przyrządy wirtualne</i>	268
	LITERATURA	269
	ZAŁĄCZNIKI	272
	INDEKS	285

Metrologia jest interdyscyplinarnym obszarem wiedzy dotyczącym pomiarów i obejmuje wszystkie zagadnienia teoretyczne i praktyczne związane z miernictwem, niezależnie od dziedziny nauki oraz dyscypliny naukowej i gałęzi działalności gospodarczej.

Metrologia pełni służebną rolę wobec różnych dziedzin nauki i dyscyplin występujących nie tylko w naukach technicznych. Mierzy się bowiem cechy konkretnych obiektów fizycznych, dlatego sama znajomość ogólnych zasad mierzenia na ogół nie wystarcza do zaprojektowania i wykonania pomiaru, niezbędna jest wiedza przedmiotowa o badanych obiektach, ale należy stwierdzić równocześnie, że sama wiedza przedmiotowa bez wiedzy ogólnometrologicznej na ogół nie wystarcza inżynierowi do rozwiązywania zadań specjalistycznych. Uzasadnia to wprowadzenie do programu studiów technicznych zagadnień miernictwa i techniki eksperymentu.

Podręcznik jest przeznaczony dla studentów wszystkich specjalności pierwszego semestru Wydziału Mechanicznego oraz podobnych specjalności na innych wydziałach Politechniki Łódzkiej, a więc dla osób w większości posiadających niewielkie doświadczenie w realizacji nawet stosunkowo prostych pomiarów. Ma on być pomocny w utrwaleniu wiedzy przekazywanej w przedmiocie „Podstawy Metrologii” i wskazywać źródła naukowe stanowiące podstawy metrologii.

Koncepcja realizacji przedmiotu „Podstawy Metrologii” została oparta na trzech założeniach:

- lokalizacja przedmiotu: w początkowej fazie studiów (przed przystąpieniem do prac w innych laboratoriach specjalistycznych) jako podstawowego źródła informacji o świecie i otaczającej nas infrastrukturze przemysłowej, handlowej etc.,
- materiał przedmiotu nawiązuje do wiedzy studenta opanowanej w szkole średniej z zakresu fizyki i matematyki,
- pełna korelacja między 3 składowymi częściami przedmiotu (wykład, zajęcia seminaryjne/rachunkowe, laboratorium).

Obecna forma realizacji przedmiotu jest wynikiem wieloletnich (od roku akademickiego 1976/77) doświadczeń zespołu dydaktycznego stworzonego przez profesora W. R. Gundlacha¹ oraz ograniczeń narzucanych siatką godzin programów studiów. Została ona ukształtowana w toku szerokiej dyskusji prowadzonej w zespole prowadzącym te zajęcia, jak również przy wykorzystaniu wiedzy i praktyki zdobytej przy realizacji wielu eksperymentalnych prac naukowo-badawczych i pomiarów przemysłowych. Wykorzystano także doświadczenia innych krajowych ośrodków akademickich prezentowane na Kongresach Metrologii i corocznych Międzyuczelnianych Konferencjach Metrologów oraz na zebraniach naukowych Komisji Kształcenia Komitetu Metrologii PAN.

¹ Gundlach W. R. (1921-2007) – główne kierunki prac: maszyny i urządzenia przepływowe (prace projektowe, eksploatacyjne, eksperymentalne), metrologia, prekursor układu SI w Polsce, kierownik Katedry/Instytutu Maszyn Przepływowych (1955-1991), dziekan Wydziału Mechanicznego (1969-1971)

Przedmowa

Głównym zadaniem przedmiotu jest nauczenie podstawowych (wspólnych dla różnych dziedzin wiedzy) pojęć i procedur metrologicznych, zasad działania i właściwości wybranych typów aparatury, poznanie czynności pomiarowych oraz zasad opracowania wyników pomiarów. Nieodłączną częścią przedmiotu jest laboratorium [2] umożliwiające studentom samodzielne wykonanie zadań teoretycznych i eksperymentalnych, niekiedy pierwszych w życiu bardziej złożonych pomiarów.

Podręcznik jest zmodyfikowaną i uaktualnioną wersją wydania z 2005 roku. Wykorzystując zdobyte doświadczenie w bezpośrednich kontaktach z Czytelnikami oraz aktualnych osiągnięć naukowych wdrażanych w Metrologii, wprowadzono w nim szereg dodatkowych przykładów obliczeniowych i rozwiązań konstrukcyjnych przyrządów pomiarowych mających przybliżyć studentom przekazywane wiadomości, by stały się one dla nich bardziej zrozumiałe i przyjazne, a nie pozostały jedynie w sferze abstrakcji.

W pierwszych dwu rozdziałach omówiono podstawowe zadania metrologii oraz główne etapy procesu poznawczego. Obowiązujące, legalne jednostki, zasady zapisu i zaokrąglania wyników działań arytmetycznych na liczbach przybliżonych oraz organizacja służby miar zostały przedstawione w 3. rozdziale. Struktura procesu pomiarowego, stosowane metody pomiarowe, a także dokładność wyniku uzyskanego w zrealizowanym, pojedynczym wielokrotnym pomiarze zostały omówione w następnych dwu rozdziałach. Przy opracowaniu wielokrotnych pomiarów wielkości nieziennej w czasie wykorzystano elementy statystyki matematycznej, zwrócono szczególną uwagę na dokładność uzyskanego wyniku i metody określenia jego niepewności zgodnie z zaleceniami międzynarodowych organizacji metrologicznych [42], [46]. W 6. rozdziale omówiono sposoby prezentacji uzyskanych wyników, w szczególności przedstawienie ich w postaci równania analitycznego. W następnym rozdziale omówiono przyrządy pomiarowe, ich właściwości statyczne i dynamiczne, zasady pracy przetworników pomiarowych, przetwarzanie i rejestrację sygnałów pomiarowych. Podstawowe zasady pracy systemów pomiarowych, stosowanych obecnie dość powszechnie zarówno w przemyśle, jak i pracach badawczych, omówiono w ostatnim rozdziale.

W załączniku zamieszczono podstawowe pojęcia metrologii [43], kalendarium Polskiej Metrologii oraz w skróconej formie tablice statystyczne.

Podręcznik jest ilustrowany licznymi przykładami, rysunkami, tablicami, zadaniami: przykładowo rozwiązanymi oraz przewidzianymi do samodzielnego rozwiązania.

Serdecznie dziękuję recenzentom prof. prof. Krystynie Kostyrko i Zdzisławowi Kabzie za cenne uwagi i sugestie, które wpłynęły na ostateczny kształt podręcznika.

Mam nadzieję, że podręcznik ten pozwoli na zrozumienie podstawowych celów oraz zadań metrologii i techniki eksperymentu, będąc wprowadzeniem do różnego typu metrologii specjalistycznych (wielkości energetycznych, środowiskowej, wielkości geometrycznych i innych) realizowanych w dalszym toku studiów, a także stanie się przewodnikiem i inicjatorem samodzielnego projektowania i wykonywania eksperymentów oraz efektywnego ich opracowania zarówno w laboratorium, jak i zawodowej praktyce inżynierskiej.

WYKAZ OZNACZEŃ

- A* - pole powierzchni,
- B* - indukcja magnetyczna,
- C* - stała, pojemność,
- E* - energia, wartość oczekiwana, moduł Younga,
- F* - siła, dystrybuanta zmiennej losowej,
- G* - moduł sprężystości postaciowej,
- I* - prąd, moment bezwładności,
- K* - stała, zbiór liczbowy, wzmocnienie,
- L* - praca, tłumienie, indukcyjność,
- M* - moment siły,
- N* - liczba kwantów, impulsów, licznosc materii, liczba grup,
- P* - moc, prawdopodobieństwo, poziom ufności,
- Q* - ciepło, ładunek elektryczny,
- R* - stała gazowa, oporność,
- S* - entropia, rozrzut, empiryczne odchylenie standardowe zmiennej losowej,
- T* - temperatura w K (kelwinach),
- U* - napięcie, rozszerzona niepewność,
- V* - objętość, wariancja zmiennej losowej,
- W* - wielkość wzorcowa,
- X* - wielkość wejściowa, wielkość mierzona, oporność bierna,
- Y* - wielkość wyjściowa,
- Z* - wielkość zakłócająca, oporność pozorna,
- a* - przyspieszenie, stała równania,
- b* - szerokość przedziału klasowego,
- c* - prędkość, stała sprężystości, ciepło właściwe,
- d* - średnica,
- e* - sygnał elektryczny, podstawa logarytmów naturalnych,
- f* - funkcja, częstotliwość sygnału, liczba stopni swobody,
- g* - przyspieszenie ziemskie,
- h* - wysokość słupa cieczy, krok, interwał tablicy,
- k* - wskaźnik, konduktywność, stała, poprawka, liczba przedziałów klasowych, czułość przyrządu,
- l* - liczba, ilość, długość, ramię siły,
- m* - masa, licznosc przedziału klasowego,
- n* - częstość obrotów, liczba obrotów, liczba pomiarów, liczba bitów,
- p* - ciśnienie, pęd, gęstość prawdopodobieństwa zmiennej losowej,
- r* - promień, odległość, wskaźnik korelacji liniowej z próby,
- s* - przemieszczenie, droga,
- t* - czas, temperatura w °C, zmienna losowa Studenta,

Wykaz oznaczeń

- u - zmienna losowa standaryzowana, standaryzowana niepewność,
- v - uogólniona prędkość, różnica między wielkością obliczoną a otrzymaną z pomiaru, objętość właściwa,
- w - wartość wielkości wzorcowej W ,
- x - wartość wielkości wejściowej X , zmienna niezależna, położenie,
- \hat{x} - rzeczywista wartość mierzonej wielkości fizycznej X
- y - wartość wielkości wyjściowej Y , zmienna zależna, przemieszczenie,
- z - wartość wielkości zakłócającej Z , zakres,
- Δ - bezwzględny przyrost,
- Φ - strumień magnetyczny,
- α - kąt, wskazanie miernika, poziom istotności, współczynnik przejmowania ciepła, temperaturowy współczynnik zmiany oporu, rozszerzalność temperaturowa,
- γ - odchylenie od liniowości,
- δ - względny przyrost, grubość dielektryka, szczelina powietrzna,
- ϵ - odkształcenie, przenikalność elektryczna,
- η - sprawność,
- λ - długość fali, przewodność cieplna materiału,
- μ - wartość oczekiwana zmiennej losowej, niejednoznaczność względna,
- ν - współczynnik Poissona, lepkość kinematyczna,
- ρ - gęstość, oporność właściwa, gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej, wskaźnik korelacji dla populacji,
- σ - naprężenie, uogólniona entropia, odchylenie standardowe zmiennej losowej,
- τ - stała czasowa,
- φ - kąt,
- $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ - częstość kołowa, częstość radianów (prędkość kątowna w rad/s).

Indeksy:

- | | |
|-----------------------|---------------------------------|
| at - atmosferyczny, | |
| c - centralny, | max - maksymalny, |
| d - dolna, | min - minimalny, |
| dop - dopuszczalna, | n - normalny, |
| e - spiętrzenia, | ot - otoczenia, |
| el - elektryczna, | p - przypadkowa, porównawcza, |
| g - górna | s - systematyczny, |
| gr - graniczna, | u - umowny, |
| m - mierzona, masy, | w - wzorcowy, wskazywana, |
| | x - mierzona. |

WSTĘP

W dzisiejszym społeczeństwie istnieje obszerna, często niewidoczna, sieć infrastruktury usług, zaopatrzenia, transportu i przekazu informacji. Jej obecność jest przyjmowana za rzecz oczywistą, lecz jej istnienie i ciągłość działania są podstawowe dla codziennego życia [26]. Częścią tej ukrytej infrastruktury jest metrologia – nauka o pomiarach.

Nie jest przesadą, że życie człowieka przebiega w cieniu, a może w blasku, pomiarów. Jednym z pierwszych zabiegów czekających noworodka są pomiary: ważenie, mierzenie wzrostu i temperatury. Człowiek dorosły styka się z pomiarami codziennie w domu i poza domem, w sklepie, w zakładzie pracy, u lekarza, w samochodzie, a tok życia człowieka jest regulowany przez wskazania najpopularniejszego przyrządu pomiarowego – zegara. Człowiek zaczął liczyć, a potem mierzyć już we wczesnym stanie rozwoju intelektualnego. Potrzeba pomiaru długości, powierzchni, objętości, masy wynikała z jego codziennego życia.

Dzięki doświadczeniu – eksperymentowi, zdobywamy informacje. Zdobywanie informacji ilościowych o świecie materialnym jest zadaniem metrologii. Zadanie to jest rozumiane i akceptowane od dawna – można tu zacytować Leonarda da Vinci:

„Jeśli powiesz, że nauki poczynające i kończące się w umyśle zawierają prawdę, nie można się na to zgodzić, lecz trzeba zaprzeczyć z wielu przyczyn, a przede wszystkim dlatego, że w takich roztrząsaniach myślowych brak jest doświadczenia, bez którego nie poznajemy niczego z pewnością.”

Potrzeba pomiarów wynika z codziennej praktycznej działalności człowieka, dostarcza mu ilościowej informacji o otaczającym go świecie. Informacja ta jest szczególnie potrzebna inżynierowi, którego jednym z podstawowych zadań jest przetwarzanie wg określonego programu świata materialnego, czynienie go coraz bardziej przyjaznym dla człowieka.

Inżynier zależnie od swego działania musi posiadać umiejętność:

- projektowania procesów, obiektów technicznych i badawczych tak, by osiągnąć wymierny, optymalny efekt,
- ułożenia modeli i programów tak, by niezbędne wskaźniki empiryczne były jednoznacznie określone i mierzalne,
- konstruowania obiektów tak, aby można było je dostatecznie dokładnie wykonać i zmierzyć.

Zaufanie do pomiarów jest wprowadzane w nasze życie na mnóstwo sposobów.

Jest truizmem twierdzenie, że dokładność pomiaru jest wymagana dla wydajnej produkcji elementów różnych urządzeń, jak np. silniki spalinowe, turbiny gazowe, gdzie niezawodność i trwałość zależy od mikronowych tolerancji wykonania, czy też odtwarzaczach płyt kompaktowych, w których wbudowane soczewki do ogniskowania promienia laserowego są wykonane z dokładnością dziesiątych części mikrometra.

Rozdział 1. Wstęp

W produkcji wysokiej technologii lista wyrobów wymagających dokładnych pomiarów jest bez końca. Pomiary wykonywane są zdalnie, włączane w cykl produkcyjny, prowadzone w cyklu automatycznym metodą "on line", sterowane programem z komputera.

Systemy telekomunikacji pracują pewnie i wydajnie, lecz przy dużej szybkości transmisji danych skala czasu musi być ciągle korygowana. W uprzemysłowionym świecie, narodowe skale czasu są łączone z UTC (*Coordinated Universal Time*) – międzynarodową skalą czasu opartą na zegarach atomowych. UTC jest także skalą czasu utrzymywaną przez zegary atomowe na pokładach satelitów GPS (*Global Positioning System*) wojskowego i cywilnego systemu światowej nawigacji.

Praktyka medyczna wymaga ostrożnych i czasami trudnych pomiarów zarówno w diagnostyce, np. poziom cholesterolu we krwi, jak i w terapii, np. pomiar dawki promieniowania X w leczeniu niektórych form raka. W tych pomiarach pewność jest szczególnie ważna, błąd, jak wiemy, może w skrajnym przypadku oznaczać śmierć.

W rolnictwie: badania produktów żywności i ochrona środowiska – pomiar staje się coraz ważniejszym w dostarczaniu podstaw i środków do weryfikowania ich zgodności z obowiązującymi normami i ustawami. Wiele z nich zapewnia, że pestycydy i pozostałości ciężkich metali są utrzymywane na bezpiecznym poziomie.

Ciągłe dążenie do większej dokładności pomiarów jest napędzane przez wzrastające żądania przemysłu (wzrost wydajności i niezawodności działania wyrobów). Sukces na tym polu jest możliwy poprzez postęp w fizyce, który z kolei jest zależny od nowych technologii.

Pewność i dokładność pomiarów, zwłaszcza wymagających długoczasowej stabilności, może być tylko zapewniona przez system pomiarowy mocno związany z podstawami fizycznymi. Podstawy fizyki, na których oparta jest cała dzisiejsza zaawansowana technologia, mogą rozwijać się tylko poprzez co najmniej jakościowe testowanie ich dalszych hipotez (modeli). Testowanie fizycznych teorii przez eksperyment kontrolny wymaga coraz większych dokładności pomiaru i zestawu wiarygodnych urządzeń i podstawowych stałych fizycznych. Są one zasadniczymi składnikami postępu w nauce i częścią działalności zwanej metrologią.

Ten szeroki udział metrologii w nauce, technice oraz w życiu codziennym narzuca podział zadań Metrologii na 3 grupy:

- zadania naukowe,
- zadania urzędowo-prawne,
- zadania wynikające z udziału metrologii w procesach wytwórczych.

Do naukowych zadań metrologii można zaliczyć między innymi:

- ustalenie podstawowych pojęć metrologicznych, terminologii i symboliki oraz ich unifikacja,
- doskonalenie uniwersalnego spójnego układu jednostek miar odpowiadającego najlepiej potrzebom nauki i przemysłu oraz dogodnego przy praktycznym stosowaniu w kraju i w kontaktach międzynarodowych,

Rozdział 1. Wstęp

- realizacja, ochrona i doskonalenie podstawowych wzorców jednostek miar, zwanych etalonami które z najwyższą osiągalną dokładnością odtwarzają jednostki miar i służą do wzorcowania innych narzędzi pomiarowych,
- ustalanie hierarchii wzorców, systemu ich porównań, analiza mierzalności wielkości fizycznych,
- opracowanie ogólnych zależności określających warunki, jakim powinien odpowiadać układ, system lub metoda pomiarowa, aby po ich zastosowaniu można było uzyskać wynik o żądanej dokładności,
- opracowanie ocen statystycznych zbiorów obiektów badanych na podstawie pomiarów,
- opracowanie teorii niezawodności urządzeń i systemów pomiarowych oraz optymalizacja struktury obiektów badanych,
- opracowanie metod analizy wpływu struktury systemu na dokładność pomiaru oraz analiza dokładności pomiarów,
- opracowanie metod uzyskiwania informacji pomiarowej oraz jej przetwarzanie na sygnały dogodne do dalszej obróbki i przesyłania,
- opracowanie metod zwiększenia dokładności pomiaru poprzez zwiększenie czułości pomiarowej oraz udoskonalenie sposobów eliminacji zakłóceń wywołanych czynnikami zewnętrznymi i wewnętrznymi,
- udział w kształceniu kadr metrologów na studiach podyplomowych, w szkolnictwie wyższym i średnim oraz za pomocą publikacji naukowych i technicznych.

Zadaniami urzędowo-prawnymi jest działalność mająca na celu:

- zapewnienie jednolitości miar w nauce, technice i gospodarce,
- ustanawianie legalnego układu jednostek miar i przestrzeganie jego stosowania,
- ustalenie wymagań dotyczących metrologicznych i użytkowych cech narzędzi pomiarowych,
- legalizację narzędzi pomiarowych podlegających obowiązkowi legalizacji,
- ustalenie wymagań związanych z okresową kontrolą użytkowych narzędzi pomiarowych stosowanych w przemyśle, handlu, komunikacji itp.,
- badanie modeli i prototypów narzędzi pomiarowych w celu ich zatwierdzenia do produkcji seryjnej w kraju lub z przeznaczeniem na eksport oraz zezwolenie na ich import.

Wytwarzanie dóbr materialnych jest ciągłym celem działalności człowieka, a atrybutem tego jest osiągnięcie coraz lepszej jakości.

Pamiętając, że inżynier powinien tak konstruować obiekty i projektować procesy, aby można było je dostatecznie dokładnie wykonać i osiągnąć optymalny efekt, stwierdzimy, że udział metrologii w procesach wytwórczych wynika z tego, że informacje o ich przebiegu i o końcowym wyniku uzyskuje się właśnie przez pomiary. A oto niektóre zadania, jakie ma do wypełnienia metrologia w procesach produkcji przemysłowej:

- dostarczanie bieżących informacji niezbędnych do sterowania procesami produkcyjnymi i jakością oraz opracowanie metod kontroli jakości,

Rozdział 1. Wstęp

- przystosowanie aparatury do badania i śledzenia nowych procesów produkcyjnych, wyprzedzających istniejącą technologię i przystosowanie procesów do automatycznego sterowania,
- dążenie do kompleksowej normalizacji ważniejszych rodzajów produkcji, poczynając od surowców do gotowych wyrobów,
- rozwijanie produkcji aparatury pomiarowej zgodnie z potrzebami nowoczesnego przemysłu,
- organizacja placówek napraw sprzętu pomiarowego.

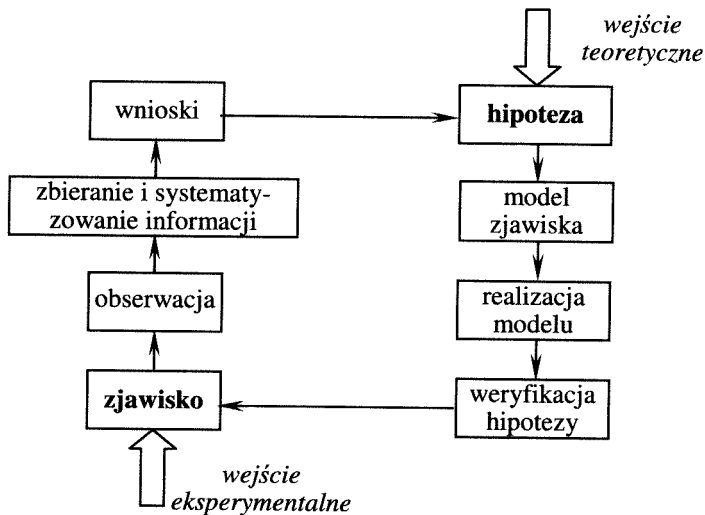
Metrologia jako nauka o pomiarach korzysta ze zdobyczy innych gałęzi nauki oraz determinuje ich rozwój. We wszystkich dziedzinach działalności eksperymentalnej w pierwszej kolejności muszą być rozwiązane problemy zdobywania informacji przez pomiar. W poszczególnych dziedzinach rozwiązuje się te zadania w zakresie własnych potrzeb. W tym świetle nadrzędnym zadaniem metrologii jako nauki jest rozwijanie podstaw i formułowanie ogólnych praw rządzących procesami pomiarowymi stosowanymi we wszystkich dziedzinach nauki i dziedzinach działalności technicznej i gospodarczej człowieka [31]. Metrologia jest dziedziną nauki i działalności technicznej, która zapewnia pomiarom:

- wiarygodność,
- dokładność,
- jednolitość w skali krajowej i międzynarodowej.

Sposoby zorganizowania służby miar i przeznaczone na ten cel fundusze są różne w różnych krajach. W krajach rozwiniętych przemysłowo na działalność metrologiczną przeznaczane jest (3÷6) % dochodu narodowego [26]. Nie we wszystkich jednak krajach na pytania: po co jest metrologia? dlaczego jest ona tak droga? i dlaczego warto ją mieć? jest pełna zrozumienia odpowiedź.

2. PROCES POZNAWCZY

Działanie poznawcze człowieka może wynikać np. z potrzeby rozeznania spostrzeżonego zjawiska w celu jego wykorzystania czy wpłynięcia na zmianę jego przebiegu. W takim przypadku proces badawczy rozpoczyna się od obserwacji tego zjawiska i przez zbieranie informacji o cechach zjawiska, ich selekcjonowanie i systematyzowanie prowadzi do sformułowania wniosków, a następnie do sformułowania próby objaśnienia zjawiska, a więc do wyrażenia przypuszczenia naukowego, zwanego hipotezą (greckie *hypothesis*) – (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Etapy procesu badawczego

Teraz należy sprawdzić słuszność postawionej hipotezy, a więc przeprowadzić dowód jej prawdziwości, dowieść, że objaśnia ona obserwowane zjawisko. W prostym przypadku słownie sformułowana hipoteza może pokrywać się z brzmieniem wniosku i być bezpośrednio przetłumaczalna na język matematyki. W bardziej złożonych przypadkach występują charakterystyczne etapy działania poznawczego.

Operując kategoriami logiki, należy stworzyć dla danej hipotezy model (patrz rozdz. 2.2) w oparciu o ściśle sformułowane założenia. Przede wszystkim tworzy się opisowy model myślowy zobrazowany następnie np. graficznie schematem strukturalnym, funkcyjnym lub grafem. Ten model myślowy zjawiska może być dalej upraszczany lub uściślany. Po uzupełnieniu wyrażeniami matematycznymi, np. opisującymi poszczególne znane właściwości i zależności, umożliwi sformułowanie modelu matematycznego.

Model matematyczny może mieć postać zamkniętą prostą lub skomplikowaną, może też pojawić się w postaci uwikłanych współzależności. Zależnie od tego należy wybrać najdogodniejszą drogę realizacji modelu matematycznego (analogowa, cyfrowa – ekspe-

Rozdział 2. Proces poznawczy

ryment komputerowy). Teraz można przeprowadzić weryfikację przyjętego modelu, a tym samym sprawdzić prawdziwość postawionej hipotezy przez porównanie zjawiska i wyników realizacji modelu matematycznego.

Może okazać się, że sformułowana hipoteza nie opisuje w stopniu zadowalająco wiernym zjawiska, tzn. że przyjęty model matematyczny jest błędny lub oparty na zbyt daleko idących uproszczeniach. W takim przypadku należy powtórzyć cykl, zaczynając od powtórzenia obserwacji, zbierania i systematyzowania informacji, wykorzystując oczywiście doświadczenia zdobyte w poprzednim cyklu. Wnioski powinny pozwolić na udoskonalenie hipotezy i następnie na uściślenie modelu myślowego i modelu matematycznego. Proces będzie mógł być uznany za zakończony w przypadku pomyślnego wyniku weryfikacji.

W powyższym przykładzie mieliśmy do czynienia z podejściem eksperymentalnym: wejściem do procesu badawczego było zjawisko. Często, szczególnie w naukach technicznych i ogólniej w badaniach stosowanych, a więc wykorzystujących wyniki badań podstawowych do określonych potrzeb praktycznych, występuje sytuacja przeciwna: w oparciu o posiadany zasób wiedzy, a także i intuicję zostaje sformułowana hipoteza, której prawdziwość musi być sprawdzona. Przede wszystkim należy doprowadzić do sformułowania modelu matematycznego, dochodząc doń z reguły przez ułożenie odpowiednich schematów (model myślowy – rys. 2.1) i następnie dokonać realizacji modelu w dogodny sposób (analogowy, cyfrowy...). Sprawdzenie prawdziwości hipotezy może ograniczać się do udowodnienia niesprzeczności wyników jej modelu (opisu) matematycznego z przyjętymi założeniami. Takie sprawdzenie zadowala jedynie w zakresie zależności ściśle matematycznych.

Natomiast o ile hipoteza dotyczy występujących rzeczywistych zjawisk, o tyle ostatecznym potwierdzeniem jej słuszności jest wykonanie eksperymentu odtwarzającego zjawiska opisane uproszczonym modelem w określonych w założeniu i ściśle kontrolowanych warunkach. Jest to weryfikacja hipotezy przez przeprowadzenie eksperymentu kontrolnego, którego wynik albo potwierdzi jej słuszność, albo w przypadku niepowodzenia może dostarczyć informacji istotnych dla udoskonalenia hipotezy.

W bardziej złożonych przypadkach koniecznym może być obmyślenie i przeprowadzenie całego zestawu eksperymentów kontrolnych, pozwalających na weryfikację poszczególnych członów modelu matematycznego. Weryfikacja może następować niekiedy przez odpowiednio obmyśloną obserwację zjawiska naturalnego bądź zarówno przez cząstkowe eksperymenty kontrolne, jak i obserwację zjawiska.

Jeśli wyniki działań poznawczych wzbogacają zastany dorobek wiedzy w danej dziedzinie, wówczas proces poznawczy prowadzi do odkrycia naukowego

Motywy działalności poznawczej jest zdobycie informacji niezbędnych do zrealizowania postawionego zadania i stanowiących konieczne uzupełnienie sumy informacji wejściowych czerpanych z pamięci i dostępnych zasobów wiedzy.

Ogólnie stosuje się podział badań naukowych w oparciu o kryterium ich bezpośredniego praktycznego wykorzystania na:

Rozdział 2.1. Obserwacja – pomiar

- badania podstawowe wolne – badania nad jakąś dziedziną rzeczywistości, zmierzające do wzbogacenia wiedzy, ale niestawiające sobie żadnych określonych celów praktycznych;
- badania podstawowe kierowane – w odróżnieniu od poprzednich jest tu wytyczony kierunek badań, którego zrealizowanie ma służyć za podstawę dla określonych potrzeb praktycznych;
- badania stosowane – tutaj proces badawczy jest inicjowany wytyczeniem celu praktycznego, a badania mają określić lub dostarczyć zespół środków do jego osiągnięcia;
- badania wdrożeniowe lub ogólniej prace wdrożeniowe - system badań teoretycznych i doświadczalnych, działań organizacyjnych i technicznych realizacji mających na celu wprowadzenie do praktyki (do produkcji przemysłowej) nowych rozwiązań lub udoskonalień poprzez odpowiednie stopnie rozwojowe (np. instalacja laboratoryjna, półtechniczna, instalacja produkcyjna lub prototyp, seria eksperymentalna, seria informacyjna, produkcja seryjna).

Właśnie z takimi złożonymi cyklami działań wdrożeniowych wiąże się typowa twórcza, poznawcza działalność inżyniera.

2.1. Obserwacja – pomiar

Obserwacja jest podstawowym członem procesu poznawczego [10]. Pod pojęciem obserwacji rozumiemy proces przejmowania przez obserwatora (rys. 2.2) sygnałów uzyskiwanych ze źródła interesującego go zjawiska/obiektu. W potocznym rozumieniu obserwacja kojarzy się z przejmowaniem sygnałów optycznych. Tu należy ją rozumieć szerzej.

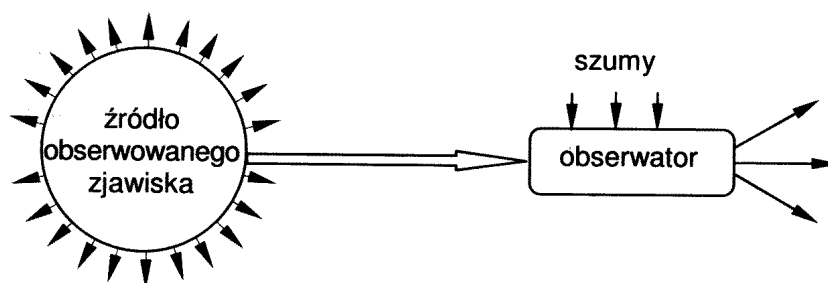
Źródło obserwowanego zjawiska wytwarza złożone pole zjawiskowe, na które może składać się:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| - pole promieniowania optycznego, | - pole temperatury, |
| - pole promieniowania cieplnego, | - pole gęstości, |
| - pole akustyczne, | - pole zapachowe, |
| - pole grawitacyjne, | - pole smakowe, |
| - pole elektrostatyczne, | - pole przemieszczeń, |
| - pole magnetyczne, | - pole prędkości, |
| - pole ciśnienia, | - pole... |

Pola te możemy pogrupować, np. pola promieniowania optycznego i cieplnego są frakcjami pola promieniowanie elektromagnetycznego. Pola zapachowe i smakowe mają wyraźnie nieciągły charakter itd.

Do obserwatora dociera tylko część sygnałów pola zjawiskowego. Ponieważ oprócz obserwowanego zjawiska dzieje się w otoczeniu wiele innych rzeczy i pełne wyizolowanie obserwowanego zjawiska, pola zjawiskowego i obserwatora jest praktycznie niemożliwe do zrealizowania, musimy zawsze liczyć się z zakłóceniami. Oddziaływania pochodzące z innych nakładających się pól zjawiskowych oraz z właściwości mediów, przez które przenikają sygnały pochodzące ze źródła, nazywamy szumami (rys. 2.2).

Rozdział 2. Proces poznawczy



Rys. 2.2. Schemat funkcyjny procesu obserwacyjnego

Do obserwatora docierają sygnały będące sumą sygnałów pola zjawiskowego i szumów. Należy starać się prowadzić proces obserwacyjny tak, aby przede wszystkim skutecznie unikać rozmazania przez szumy sygnałów pochodzących ze źródła, a w dalszej fazie zapewnić odpowiedni system selekcji i weryfikacji, pozwalający na odseparowanie nieużytecznej części przejmowanych sygnałów.

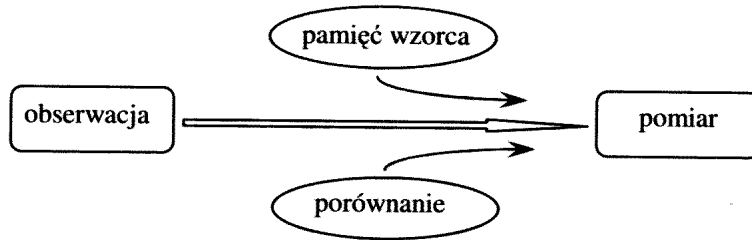
Bezpośrednia obserwacja nie wystarcza do tworzenia modeli zjawisk i rzeczy, jej wyniki są:

- subiektywne – zależne od predyspozycji obserwatora,
- niejednoznaczne – zależne od okoliczności, ten sam obserwator odnosi inne wrażenie w różnych warunkach prowadzenia obserwacji,
- niekompletne – zmysły reagują bezpośrednio tylko na niektóre cechy i zakresy zjawisk,
- pozbawione wskazówek, jaka część strumienia informacji dociera do obserwatora i jakim ulega skażeniom fizycznym, biologicznym i psychologicznym oraz jak obserwacja oddziałuje na samo zjawisko,
- jakościowe – brak ścisłych wartości, w najlepszym razie możliwość określenia: mniejsze, większe, ...
- pośrednie – obserwacja daje pośrednią informację o rzeczach i istotach poprzez bezpośrednią informację o zjawiskach, których źródłem są te rzeczy.

Określone zjawisko lub wielkość uznaje się za znane wówczas, gdy można je opisać obiektywnie ilościowo, a więc wówczas, gdy może nastąpić przyporządkowanie liczby przejawowi wielkości mierzalnej² [9]. Przejście z oceny jakościowej zjawiska (obserwacja) do jego oceny ilościowej (pomiar) wymaga użycia wzorca danej wielkości fizycznej (jednostkowego przejawu danej wielkości mierzalnej), ilustruje to rys. 2.3.

² wielkość mierzalna – cecha zjawiska, ciała lub substancji, którą można wyróżnić jakościowo i wyznaczyć ilościowo [43]

Rozdział 2.1. Obserwacja – pomiar

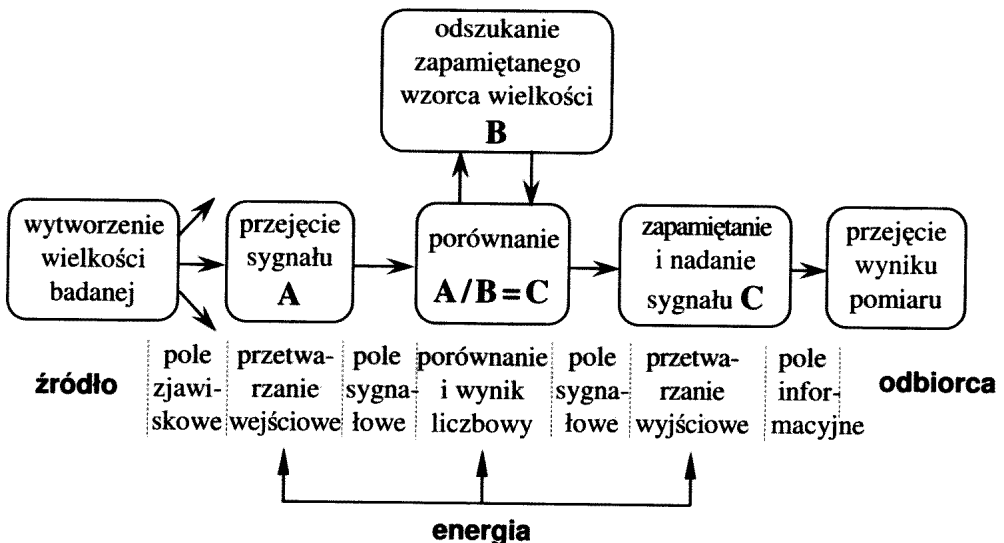


Rys. 2.3. Przejście z procesu obserwacyjnego do pomiarowego

Uogólniona definicja pomiaru ma postać „pomiar jest to jednoznaczne i izomorficzne (tj. wzajemnie jednoznaczne, o takiej samej strukturze) przyporządkowanie symboli abstrakcyjnych (np. liter, liczb) i związków między tymi symbolami wielkościom mierzalnym”. Pomiar jest więc przyporządkowaniem symboli (liczb) właściwości obiektów i zdarzeń. Jest on opisem właściwości obiektów i zdarzeń, a nie samych obiektów i zdarzeń. Mierzymy długość obiektu, temperaturę obiektu itd.

Według *Międzynarodowego słownika podstawowych i ogólnych terminów metrologii* [43] pomiar to zbiór operacji mających na celu wyznaczenie wartości wielkości.

W ten sposób dochodzimy do ogólnego schematu pomiaru (rys. 2.4). Sygnał A wielkości mierzonej musi być przejęty, zapamiętany, a następnie porównany z zapamiętanym sygnałem wzorcowym B. Oczywiście proces porównywania dotyczy wielkości tego samego rodzaju, tej samej klasy.



Rys. 2.4. Ogólny schemat procesu pomiarowego

Rozdział 2. Proces poznawczy

Wynik liczbowy porównania

$$C = A / B \quad (2.1)$$

zostaje zapamiętany. Zapamiętana informacja o wyniku jest przekazywana do dalszego wykorzystania.

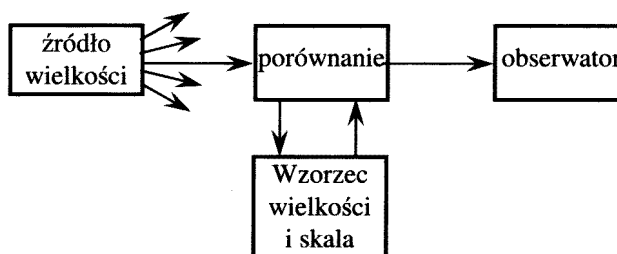
Realizacja procesu pomiarowego wymaga dostarczenia energii. Źródłem tej energii może być badany obiekt/zjawisko lub energia może być pobierana z zewnętrznego źródła. W pierwszym przypadku istotnym jest, aby pobrana energia nie zmieniała w istotny sposób przebiegu badanego zjawiska/objektu, tj. aby oddziaływanie przyrządu (zestawu przyrządów) na badany obiekt/zjawisko było pomijalnie małe (dokładniej omawiono to zagadnienie w rozdziale 5.1.2).

Pomiar jest tylko jednym z wielu sposobów opisywania symbolami obiektów i zdażeń, najpowszechniej stosowaną metodą ich symbolicznego opisu są słowa języka naturalnego. Kluczowa rola pomiaru w nauce wynika z następujących jego właściwości:

- obiektywność opisu,
- zwięzłość,
- precyzyjność i dokładność,
- możliwość wyrażania właściwości w formalnym języku matematyki.

Wartość pomiaru leży w wykorzystaniu informacji w nim zawartych. Wiedza nie jest prostym gromadzeniem danych liczbowych, jej wartość zależy od sposobu analizowania i organizowania danych.

Proces, w którym jest bezpośrednio porównywana wielkość mierzona z wzorcem tej wielkości, może być przedstawiony w najprostszym podstawowym schemacie procesu pomiarowego (rys. 2.5).

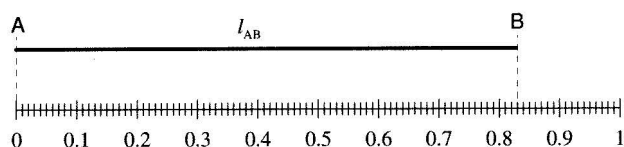


Rys. 2.5. Schemat bezpośredniego procesu pomiarowego

W celu realizacji tego pomiaru niezbędnym jest dokonanie podziału wzorca na odpowiednią liczbę części, a więc podjęcie decyzji odnośnie doboru skali użytego wzorca. Decyzja ta wiąże się z naturą odnośnej wielkości mierzalnej i jej modelem matematycznym.

Jeśli dla przykładu dokonujemy pomiaru długości odcinka AB (rys. 2.6) przymiarem w postaci pręta wzorcowego jednostki długości, niezbędnym jest przyjęcie sposobu podziału wzorca na części i naniesienie na przymiarze skali krotności. Odczyt wartości liczbowej długości odcinka AB następuje bezpośrednio ze skali przymiaru (wzorca).

Rozdział 2.1. Obserwacja – pomiar



Rys. 2.6. Bezpośredni pomiar długości odcinka

Rodzaj użytej w trakcie pomiaru skali jest zależny od mierzonej wielkości. W praktyce spotykamy skalę: nominalną, porządkową, przedziałową, ilorazową, naturalną.

Skala nominalna jest stosowana, gdy między stanami danej cechy może zachodzić jedynie relacja równoważności. Skalę definiuje skończona liczba N stanów odniesienia. Przykładem takiego rodzaju skali jest kod („gama”) kolorów. Jako stany odniesienia barw są drukowane atlasy barw zawierające N wzorców barwy opisanych nazwami lub kodami. Skali nominalnej nie traktuje się jako skali pomiarowej, ponieważ nie jest ona ilościowa, tj. nie ustala ona w danym zbiorze relacji podobnej do relacji: mniejszy, większy – na symbolach skali nie można wykonywać żadnych operacji matematycznych.

W skali porządkowej między stanami danej cechy zachodzą relacje równoważności i ścisłego uporządkowania stanów. Przykładem jest skala Beauforta³ używana do opisu intensywności wiatru, opartego głównie na stanie morza i rodzaju fal (tabela 2.1).

Tabela 2.1

Skala Beauforta

stopień	określenie polskie (<i>angielskie</i>)	m/s	Węzeł ⁴
0 °B	cisza (<i>calm</i>)	0,0 - 0,2	do 1
1 °B	powiew (<i>light air</i>)	0,2 - 1,5	1 - 3
2 °B	słaby wiatr (<i>light breeze</i>)	1,6 - 3,3	4 - 6
3 °B	łagodny wiatr (<i>gentle breeze</i>)	3,4 - 5,4	7 - 10
4 °B	umiarkowany wiatr (<i>moderate breeze</i>)	5,5 - 7,9	11 - 15
5 °B	dość silny wiatr (<i>fresh breeze</i>)	8,0 - 10,7	16 - 21
6 °B	silny wiatr (<i>strong breeze</i>)	10,8 - 13,8	22 - 27
7 °B	bardzo silny wiatr (<i>near gale</i>)	13,9 - 17,1	28 - 33
8 °B	sztorm (<i>gale</i>)	17,2 - 20,7	34 - 40
9 °B	silny sztorm (<i>strong gale</i>)	20,8 - 24,4	41 - 47
10 °B	bardzo silny sztorm (<i>storm</i>)	24,5 - 28,4	48 - 55
11 °B	gwałtowny sztorm (<i>violent storm</i>)	28,5 - 32,6	56 - 63
12 °B	huragan (<i>hurricane</i>)	> 32,6	> 63

³ Francis Beaufort (1774-1857), irlandzki fizyk i meteorolog, oficer floty brytyjskiej, utworzył skalę w 1806 r.

⁴ węzeł (ang. *knot*), w skrócie w (ang. *kn* lub *kt*) - jednostka prędkości morskich jednostek pływających, prędkości wiatrów, równa jednej mili morskiej na godzinę; 1 w = 0,514 m/s

Rozdział 2. Proces poznawczy

Na symbolach skali porządkowej nie można wykonywać żadnych operacji matematycznych (oczywiście $2^{\circ}\text{B} + 5^{\circ}\text{B} \neq 7^{\circ}\text{B}$).

Najwyższy poziom reprezentuje skala ilorazowa, skala przedziałowa i naturalna są jej uproszczonymi przypadkami. W skali tej zachodzi relacja równoważności i ścisłego uporządkowania ilorazów stanów danej cechy. Do jej zdefiniowania wystarcza jeden stan odniesienia, tzn. wzorzec jednostki miary danej wielkości fizycznej. Symbole skali mają postać liczb rzeczywistych dodatnich, na skali istnieje zero bezwzględne. Przykładami wielkości wyrażanych w skali ilorazowej są: temperatura bezwzględna, ciśnienie, masa, prędkość, siła, prąd.

W skali interwałowej nie zachodzą relacje równoważności i ścisłego uporządkowania ilorazów dla stanów danej cechy, ale relacje te zachodzą dla interwałów tych stanów. Do zdefiniowania skali interwałowej niezbędne są dwa stany odniesienia określające punkt zerowy skali i jednostkę miary tej wielkości. Są to wielkości addytywne, które można dodawać i odejmować. Przykładami są: pomiar temperatury w skali Celsjusza⁵, Fahrenheita⁶, pomiar czasu wg kalendarza gregoriańskiego, juliańskiego, przesunięcie, potencjał elektryczny (przy pomiarze temperatury: $\Delta t = 5^{\circ}\text{C} = 5\text{ K}$, ale $t = 5^{\circ}\text{C} = 278\text{ K}$).

Skala naturalna jest skalą ilorazową ograniczoną do liczb całkowitych. Występują w niej jednakowe interwały między dowolnymi parami sąsiednich stanów. Symbole ograniczone są do liczb całkowitych. Przykładami są: wielkości ziarniste zbioru, liczba cząstek, liczba impulsów.

Wiele czynników (omówiono je w rozdz. 5.1) wpływa na to, że wynik pomiaru x różni się od rzeczywistej wartości \dot{x} mierzonej wielkości. Różnica ta

$$\Delta\dot{x} = x - \dot{x} \quad (2.2)$$

jest bezwzględnym błędem pomiaru. Jego wartość nie jest znana, bo nieznana jest rzeczywista wartość \dot{x} mierzonej wielkości fizycznej. Wartość bezwzględnego błędu $\Delta\dot{x}$ odniesiona do wyniku pomiaru x

$$\delta\dot{x} = \frac{\Delta\dot{x}}{x} \quad (2.3)$$

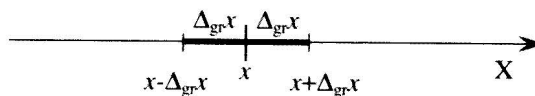
jest względnym błędem pomiaru. Do określenia dokładności pomiaru, zgodnie z zaleceniami [42] międzynarodowych organizacji metrologicznych, używa się niepewności pomiaru (patrz rozdz. 5.2). Jedną z jej składowych jest niepewność wynikająca z dokładności wskazań użytego przyrządu pomiarowego.

Dokładność wskazań przyrządu pomiarowego jest często podawana poprzez tzw. błąd graniczny $\Delta_{gr,x}$. Jest on określony jako pewien dwustronny przedział wokół zmierzonej wartości x (rys. 2.7), w którym prawdopodobieństwo wystąpienia wyniku pomiaru jest jednakowe dla wszystkich wartości.

⁵ Anders Celsjusz, (1701-1744), szwedzki fizyk i astronom, w 1742 opracował skalę temperatur

⁶ Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736) – gdański fizyk i inżynier, w 1725 opracował skalę temperatur

Rozdział 2.1. Obserwacja – pomiar



Rys. 2.7. Wynik pomiaru i błąd graniczny

Dokładność wskazań przyrządów analogowych jest określana poprzez klasę kl przyrządu (względny błąd graniczny odniesiony do zakresu pomiarowego i wyrażony w procentach)

$$kl = \frac{\Delta_{gr} \cdot x}{z} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.4)$$

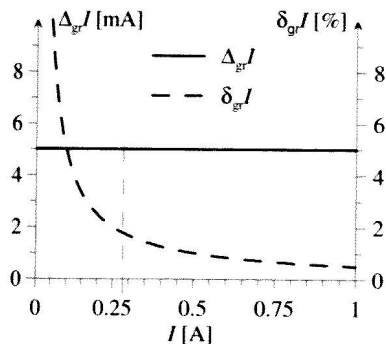
gdzie $z = x_{max} - x_{min}$ – zakres pomiarowy przyrządu.

Dla mierników analogowych są stosowane następujące klasy dokładności: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5.

Dla analogowych przyrządów pomiarowych przyjmuje się stałą wartość bezwzględnego błędu granicznego Δ_{gr} w całym zakresie pomiarowym, zaś dla przyrządów cyfrowych wielozakresowych (*multimetrów*) ma on na ogół trzy składowe:

- proporcjonalną do wartości wielkości mierzonej,
- wynikającą z zakresu pomiarowego,
- wynikającą z błędu dyskretyzacji⁷, błąd ten zwykle równa się najmniejszej jednostce (kwantowi) wskazań urządzenia odczytowego.

Przykład 2.1



Rys. 2.8. Zmiany bezwzględnego i względnego błędu granicznego dla przyrządu analogowego

Amperomierzem klasy 0,5 o zakresie 1 A zmierzono prąd płynący w obwodzie elektrycznym. Wynik pomiaru: $I = 280$ mA. Podaj wartość względnego i bezwzględnego błędu odczytu wyniku pomiaru.

Rozwiązanie

Wartości granicznych błędów wskazań użytego amperomierza wynoszą:

$$\Delta_{gr} I = \frac{kl \cdot z}{100} = \frac{0,5 \cdot 1}{100} = 0,005 \text{ A} = 5 \text{ mA}$$

$$\delta_{gr} I = \frac{\Delta_{gr} I}{I} = \frac{5}{280} = 0,0178 = 1,8\%$$

Wynik pomiaru zapisujemy w postaci:

$$I = (280 \pm 5) \text{ mA} \quad \text{lub} \quad I = 280 \text{ mA} \pm 1,8\%$$

⁷ przetworzenia analogowej wielkości wejściowej na cyfrową (patrz rozdz. 7.4.2)

Rozdział 2. Proces poznawczy

Jak wynika z (2.4), błąd graniczny $\Delta_{gr}x$ nie zależy od wartości x mierzonej wielkości X , ma on więc stałą wartość w całym zakresie przyrządu (rys. 2.8). Względny błąd graniczny $\delta_{gr}x$ jest odwrotnie proporcjonalny do wartości x mierzonej wielkości. Przyjmuje on najmniejszą wartość dla wskazania przyrządu równej jego zakresowi (równą klasie przyrządu), która rośnie wg zależności hiperbolicznej w miarę zmniejszania wartości x .

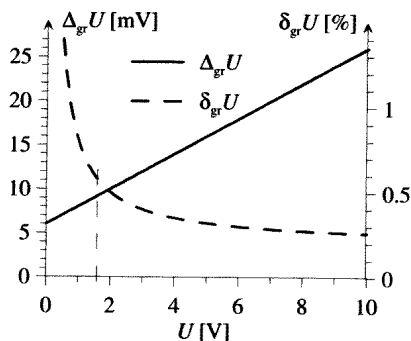
Przykład 2.2

Multimetrem cyfrowym V560 wykonano pomiar napięcia, uzyskując wynik $U = 1,568 \text{ V}$. Pomiar wykonano na zakresie 10 V. Składowe błędy granicznego wg instrukcji producenta wynoszą: $\pm 0,2\%$ wartości zmierzonej i $\pm 0,05\%$ zakresu pomiarowego. Podaj wartość względnego i bezwzględnego błędu odczytu wyniku pomiaru.

Rozwiązanie

Składowa wynikająca z błędu dyskretyzacji wynosi 0,001 V. Wartość granicznego błędu bezwzględnego wynosi

$$\Delta_{gr}U = 0,2\% \cdot U + 0,05\% \cdot z + 0,001 = 0,002 \cdot 1,568 + 0,0005 \cdot 10 + 0,001 = 0,009 \text{ V}$$



Rys. 2.9. Zmiany bezwzględnego i względnego błędów granicznych dla przyrządu cyfrowego

a względnego $\delta_{gr}U = 0,6\%$.

Wynik pomiaru zapisujemy w postaci:

$$U = (1,568 \pm 0,009) \text{ V} \text{ lub } U = 1,568 \text{ V} \pm 0,06\%$$

Na rys. 2.9 przedstawiono zmiany granicznych błędów bezwzględnego i względnego w funkcji wartości mierzonej W w tym przypadku błąd graniczny $\Delta_{gr}U$ ma dwie składowe:

- stałą, wynikającą z zakresu pomiarowego i błędu dyskretyzacji,
- zmienną, proporcjonalną do mierzonej wielkości.

Podobnie dwie składowe ma względny błąd graniczny $\delta_{gr}U$ (stałą i hiperbolicznie zmienną – ich źródła winny być oczywiste dla uważnego czytelnika).

W obu przytoczonych przykładach widoczny jest bardzo znaczny wzrost względnego błędów granicznych $\delta_{gr}x$ dla niewielkich wartości mierzonej wielkości x (początek zakresu pomiarowego przyrządu)

$$\text{dla } x \rightarrow 0 \quad \delta_{gr}x \rightarrow \infty.$$

Stąd wynika zalecenie, aby tak dobierać zakres przyrządu pomiarowego, by jego wskazania znajdowały się w końcowej części zakresu.

Przykład 2.3

Do pomiaru ciśnienia mamy do dyspozycji dwa manometry:

- pierwszy: klasa 0,5; zakres 0,6 MPa;
- drugi: klasa 2,5; zakres 0,1 MPa,

spodziewana wartość mierzonego ciśnienia $p = 80 \text{ kPa}$. Który z tych manometrów użyjesz, aby uzyskać mniejszą niepewność wyniku?

Rozdział 2.1. Obserwacja – pomiar

Rozwiązanie

Podane powyżej zalecenie doboru zakresu przyrządu do przewidywanego wyniku pomiaru w wielu przypadkach ze względu na brak odpowiednich przyrządów jest niemożliwe do spełnienia. Sytuacja taka występuje w tym przypadku: albo użyć przyrząd wysokiej klasy i dokonać pomiaru na początku skali, albo wybrać przyrząd mniej dokładny, ale dopasowany pod względem zakresu.

Wyznaczając z (2.4) błąd graniczny, otrzymujemy dla pierwszego manometru $\Delta_{gr}p = 3,0$ kPa, zaś dla drugiego $\Delta_{gr}p = 2,5$ kPa. Dla mierzonej wartości $p = 80$ kPa uzyskujemy w pierwszym przypadku względny błąd graniczny $\delta_{gr}p = 3,8\%$, w drugim $3,1\%$.

Bardziej optymalnym rozwiązaniem jest użycie do pomiaru 2. manometru, mającego mniejszą dokładność, ale dopasowanego pod względem zakresu.

2.2. Obiekt badań i jego model

Do opisu interesujących obserwatora właściwości obiektów realnie istniejącego świata stosuje się różnego rodzaju modele [21]. Pozwalają one na analizę obiektu w określonych warunkach bez konieczności ich odtwarzania.

Według *N. Wienera*⁸ model jest to reprezentacja procesu lub systemu (istniejącego w rzeczywistości lub planowanego do realizacji), która wyraża istotne cechy procesu czy systemu w postaci użytkowej.

Jest to zawsze uproszczony opis, gdyż dotyczy nie wszystkich, lecz tylko niektórych cech zjawiska lub obiektu, uznanych za istotne ze względu na przeznaczenie modelu. Ten sam obiekt może być opisywany różnymi modelami, każdy z nich opisuje inne właściwości rzeczywistego obiektu.

Rodzaje modeli stosowanych do opisu obiektów/zdarzeń:

- myślowe (lingwistyczne),
- graficzne,
- matematyczne,
- materialne.

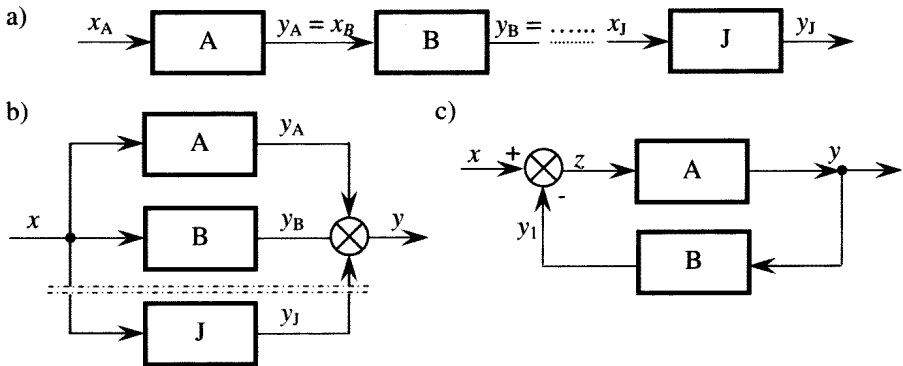
W oparciu o obserwację danego obiektu/zjawiska tworzony jest jego opisowy model myślowy, który poprzez użycie naturalnego mówionego języka przekształca się w model lingwistyczny. Wyraża on niezbędne parametry badanego obiektu i występujące między nimi związki w taki sposób, aby nastąpił odpowiedni przepływ informacji. W naukach doświadczalnych jest pierwszą i główną formą opisu rzeczywistości, jest pierwszym poziomem modelowania. Jego wadą jest mała dokładność i szybkość komunikacji.

W modelach graficznych przedstawianie pojęć następuje za pomocą rysunków lub figur. Są one bardzo popularne w nauce i technice (rysunek techniczny, schematy blokowe, wszelkiego rodzaju grafy, w tym przepływu sygnałów, wykresy charakterystyk itp.). Modele graficzne pobudzają inwencję projektanta i pomagają przy syntezie i analizie obiektów, w tym również układów pomiarowych. Schematy strukturalne zawierają

⁸ Wiener Norbert (1894–1964), matematyk amer., twórca podstaw cybernetyki, od 1932 prof. MIT, czł. Nar. Akad. Nauk w Waszyngtonie; autor prac z zakresu podstaw matematyki, fizyki teoret., analizy mat., teorii prawdopodobieństwa, teorii informacji i sterowania

Rozdział 2. Proces poznawczy

połączenia odpowiednich bloków reprezentujących poszczególne etapy rozpatrywanego procesu, np. pomiarowego. Bloki te oznacza się prostokątami. Doprowadza się do nich wielkość wejściową, oznaczaną zwykle symbolem X lub $X(t)$, jeśli jest funkcją czasu, a z wyjścia odbiera się wielkość wyjściową – oznaczenie Y lub $Y(t)$. Bloki są łączone szeregowo, równoległe lub ze sprzężeniem zwrotnym. Połączenia równoległe i ze sprzężeniem zwrotnym wymagają użycia węzłów rozgałęźnych i sumacyjnych. Węzeł rozgałęźny (informacyjny) pozwala na równoczesne przekazanie tej samej informacji do kilku bloków. W węzle sumacyjnym następuje algebraiczne sumowanie doprowadzanych wielkości. Poszczególne bloki są połączone cienką linią, kierunek przekazywania sygnałów mogą wskazywać strzałki (rys. 2.10). Znormalizowane międzynarodowe oznaczenia na schematach systemów pomiarowych i automatyki podaje norma PN/M-42007/01:1989 (równoważna ISO 3511).



Rys. 2.10. Schematy strukturalne: a) połączenie szeregowe, b) połączenie równoległe, c) połączenie ze sprzężeniem zwrotnym

Model matematyczny obiektu fizycznego umożliwia opis zjawiska lub obiektu w języku zmiennych wielkości fizycznych opisujących cechy obiektu oraz zbiorów ich wartości i równań wiążących zmienne. Dzięki temu pozwala na przewidywanie przebiegu zjawiska lub zachowania obiektu w różnych warunkach. Obiekt może być uważany jako poznany, jeżeli można go opisać modelem matematycznym na odpowiednim poziomie dokładności. Wysiłek potrzebny do skonstruowania modelu matematycznego, niekiedy bardzo duży, jest jednak często opłacalny. W wielu sytuacjach model matematyczny opisuje zachowanie się obiektu w sposób znacznie głębszy (symulacja komputerowa odpowiedzi modelu na różnego rodzaju zakłócenia, zmianę warunków pracy itp.), niż można to zrealizować w postaci układów praktycznych.

Modele materialne są to najczęściej wykonane w skali wybrane elementy danego obiektu odtwarzające lub dostarczające interesujące obserwatora właściwości zjawiska/obektu. Przykładem może być wykonany w skali model samochodu celem określenia w tunelu aerodynamicznym jego oporów i optymalizacji kształtu nadwozia – w modelu

Rozdział 2.2. Obiekt badań i jego model

tym wiernie odtworzone są zewnętrzne kształty samochodu, a nie obejmuje on konstrukcji silnika, przekładni, układu zasilania itp.

Przy wyborze rodzaju modelu potrzebne jest pewne doświadczenie, aby zdecydować, który z nich jest najlepszy pod względem poznawczym przy z góry zadanym nakładzie pracy. Ze względu na wartości poznawcze modele matematyczne są najczęściej ostatecznym celem poszukiwań.

Ciąg operacji mających na celu określenie modelu matematycznego obiektu nosi nazwę identyfikacji modelu obiektu. Obejmuje ona wybór:

- adekwatnej struktury modelu (identyfikacja strukturalna)
- wyznaczenie wartości jego parametrów (identyfikacja parametryczna).

W wyborze struktury modelu wykorzystujemy:

- wyniki obserwacji obiektu/zjawiska,
- posiadaną wiedzę i doświadczenie,
- intuicję.

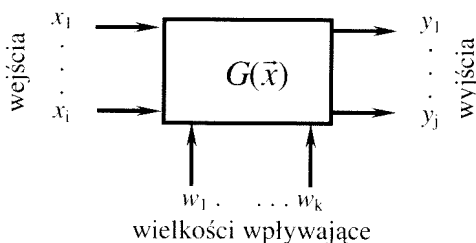
Jako wielkości modelujące obiekt przyjmuje się:

- wielkości wejściowe (inaczej – wymuszenie) – \bar{x}
- wielkości wyjściowe (inaczej – odpowiedź) – \bar{y}
- wielkości wpływające⁹ – \bar{w} .

Równanie modelu uproszczonego (bez zakłóceń) przyjmuje postać

$$F(\bar{x}, \bar{y}) = 0 \quad \text{lub} \quad \bar{y} = G(\bar{x}) \quad (2.5)$$

gdzie F, G – operatory modelujące związki między wielkościami x i y , określone dla ustalonych wartości wielkości wpływających w_1, w_2, \dots



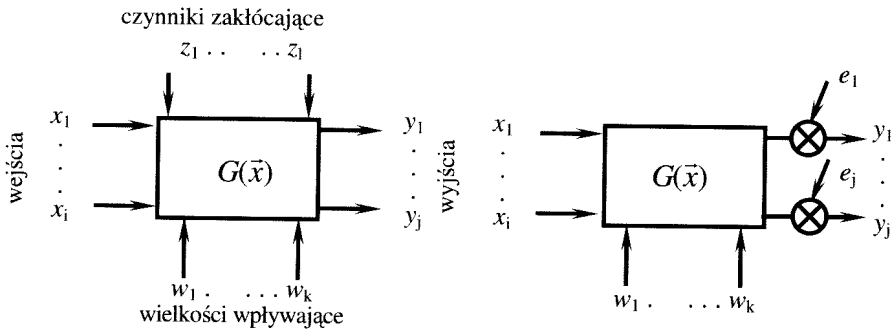
Rys. 2.11. Model obiektu bez zakłóceń

Model ten (rys. 2.11) pomija czynniki drugorzędne (ze względu na oddziaływanie na zachowanie obiektu) i/lub trudne do opisanego w języku wielkości i równań.

Konsekwencją przyjętych uproszczeń jest rozbieżność między odpowiedzią modelu $\bar{y} = G(\bar{x})$ i odpowiedzią obiektu na to samo wymuszenie \bar{x} . Jedną z metod korekty tej rozbieżności jest dodanie do sygnału wyjściowego \bar{y} wektora zmiennych losowych \bar{z} (będącego skutkiem oddziaływania wielu znanych i nieznanymi czynnikami zakłócającymi z), zwanego zakłóceniem addytywnym sprowadzonym do wyjścia modelu.

⁹ wielkość niebędąca wielkością mierzoną, która ma jednak wpływ na wynik pomiaru [43]

Rozdział 2. Proces poznawczy



Rys. 2.12. Model obiektu z zakłóceniami

Odpowiedź tak skorygowanego obiektu ma postać

$$\vec{y} = G(\vec{x}) + \vec{e} \quad (2.6)$$

Identyfikacja modelu matematycznego zjawiska wywołanego wielkościami x_1, x_2, \dots, x_n i scharakteryzowanego tylko jedną wielkością skalarną y wymaga wyznaczenia funkcji:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.7)$$

Funkcja ta może być dana tabelarycznie, graficznie lub analitycznie.

Wielkość (jako cecha obiektów fizycznych) może być rozłożona w czasie i przestrzeni. Czasowo-przestrzenny rozkład przejawów (danej wielkości) modeluje się funkcją rozkładu wartości

$$x = f(t, \vec{r}) \quad (2.8)$$

gdzie: t – czas,

\vec{r} – wektor położenia (modelujący położenie punktów w przestrzeni).

W niektórych przypadkach charakter przestrzenny i/lub czasowy może być nieistotny/nieobserwowalny – mamy wówczas rozkłady uproszczone:

- rozkład czasowy $x = f(t)$ wielkość niestacjonarna,
- rozkład przestrzenny $x = f(\xi, \psi, \zeta)$ wielkość polowa,
- powierzchniowy $x = f(\xi, \psi),$
- liniowy $x = f(\xi),$
- oraz wielkość skalarna $x = \text{const}(t, \xi, \psi, \zeta).$

Uwzględniając charakter wielkości wejściowych i wyjściowych, wyróżniamy modele:

- statyczne i dynamiczne,
- punktowe i polowe.

Modele statyczne to takie, w których wszystkie wielkości są niezmiennie w czasie. W modelach dynamicznych przynajmniej część wielkości zmienia się w funkcji czasu. Modele punktowe charakteryzują się niezależnością wielkości wejściowych i wyjściowych od współrzędnych przestrzennych, zależność taka występuje w modelach polowych. Modele polowe i punktowe mogą być zarówno statyczne, jak i dynamiczne.

Rozdział 2.2. Obiekt badań i jego model

Filozofia modelowania matematycznego może być w uproszczeniu przedstawiona jako oparta na trzech założeniach:

- model odwzorowuje tylko niektóre zjawiska lub właściwości obiektu (istotne z punktu widzenia przeznaczenia modelu), przedstawiając je w postaci równania modelu wiążącego wielkości wejściowe (modelujące przyczyny istotnych zjawisk zachodzących w obiekcie lub czynniki odpowiedzialne za jego istotne właściwości) z wielkościami wyjściowymi (modelującymi przejawy tych zjawisk lub właściwości),
- na zjawiska i właściwości istotne z punktu widzenia modelu mają także wpływ inne zjawiska zachodzące w obiekcie i jego otoczeniu, w celu uniezależnienia się od wpływu tych zjawisk ustala się ich natężenie, stabilizując wielkości wpływające,
- poznanie zjawisk w obiekcie ma zawsze ograniczony charakter i dlatego wielkości wpływające nie opisują wszystkich zjawisk, a ich stabilizacja nie eliminuje wpływu innych zjawisk na wyjścia, tę ograniczoną poznawalność obiektu modeluje się za pomocą czynników zakłócających.

Z punktu widzenia klasycznej teorii eksperymentu sposób uzyskania danych do identyfikacji parametrów modelu jest nieistotny.

Przy identyfikacji obiektów fizycznych dane te są pochodzenia empirycznego: ich źródłem są przede wszystkim pomiary. W badaniach naukowych pozyskiwanie danych do identyfikacji (nastawianie/pomiar wielkości wejściowych, pomiary wielkości wyjściowych i wpływających) oraz sama identyfikacja parametrów (obliczanie ich wartości) są coraz częściej zachodzącymi na siebie ogniwami spójnego procesu wykonywanymi przez ten sam system pomiarowy.

Niedokładność przyjętego modelu może wynikać z:

- nieadekwatności przyjętej struktury modelu,
- pominięcia, wśród wielkości modelujących obiekt, czynników istotnych dla przebiegu zjawisk w obiekcie i właściwości obiektu,
- niewłaściwej specyfikacji wielkości modelujących obiekt (wejściowych, wyjściowych, wpływających),
- przyjęcia niewłaściwego typu równania modelu.

Niedokładności wyznaczenia parametrów modelu są powodowane przez:

- błędy przyjętej metody identyfikacji parametrów modelu oraz błędy jej realizacji (np. błędy obliczeń),
- błędy danych użytych do identyfikacji parametrów modeli.