

Andrzej Marcyniuk  
Instytut Metrologii  
i Maszyn Elektrycznych

#### BŁĄD POMIARU W ŚWIETLE TEORII POZNANIA

**Streszczenie.** Naświetlono ograniczenia indukcyjnego i dedukcyjnego poznania zjawisk fizycznych. Pokazano jak z ograniczeń poznawczych wynika nieuchronność istnienia błędów oraz jak z pojęcia "podstawowego układu warunków" wynika w naturalny sposób zastosowanie probabilistycznego modelu eksperymentu pomiarowego.

#### Wstęp

W procesie pomiarowym poszukujemy odpowiedniości pomiędzy interesującym nas stanem badanego obiektu fizycznego a elementami odpowiedniego zbioru miar tego samego rodzaju stanów. Wymieniony zbiór tworzy skalę wartości danej wielkości fizycznej, za pomocą której charakteryzowany jest stan obiektu. Uporządkowanie elementów (punktów) tego zbioru według wartości jest najogólniejszą i podstawową właściwością zbioru. Z kolejnymi punktami skali wartości są związane odpowiednie dla danego obiektu systemy ocen ze względu na sam w sobie lub w stosunku do innych obiektów tego samego rodzaju. System ocen powstaje w toku pierwotnych badań obiektu i gromadzenia wyników doświadczeń. Gdy więc w toku pomiaru interesującemu nas stanowi obiektu badanego przyporządkujemy odpowiedni punkt skali wartości, to możemy uruchomić związany z tym punktem system ocen. W tym tkwi obiektywność i znaczenie poznawcze procesu pomiarowego. Np. stwierdzenie za pomocą pomiaru, że temperatura powietrza w pomieszczeniu wynosi  $20^{\circ}\text{C}$  uruchamia system ocen związanych z daną temperaturą powietrza w pomieszczeniu.

Odpowiedność, o której tu mowa, nie może być z natury wyznaczona jednoznacznie. Potrafimy co najwyżej określić dostatecznie mały przedział w otoczeniu pewnego punktu na skali wartości, przedział, wewnątrz którego znajduje się poszukiwany punkt. Im przedział ten jest mniejszy, to mówimy że pomiar jest dokładniejszy. Błąd pomiaru jest bezpośrednio związany z granicami przedziału. W konsekwencji system ocen związanych z danym punktem skali może być tylko w przybliżeniu przydatny.

W praktyce metrologicznej jako przyczynę występowania błędów podaje się niedoskonałość narzędzi pomiarowych. Jest to tłumaczenie niepełne choć praktyczne i względnie konkretne. Naświetlenie tzw. natury przyczyn w kategoriach ogólnopoznawczych ograniczonej dokładności pomiarów - jest celem tego artykułu.

### 1. Poznanie indukcyjne

Przedmioty materialne, zjawiska fizyczne, jako obiekty obserwacji i pomiarów są bardzo złożone i wykazują nieskończoną, różnorodność. Nawet makroskopowy opis jakiegoś obiektu byłby złożony i niekomunikatywny, gdyby zmierzał do wyczerpującego określenia tego obiektu. Opis cząsteczkowej struktury byłby niewykonalny ze względu na liczebność i nieskończoną liczbę stanów tych cząstek. Z tego względu poznanie indukcyjne jest jedynym rozwiązaniem zagadnienia. Wyróżnia się cechy wspólne obiektów podobnych i nadaje się im sens ogólny, tworzy się kategorie ogólne, takie jak np. wielkości fizyczne. Za pomocą utworzonych pojęć przedstawia się ogólne prawidłowości obiektów fizycznych. Obiekty fizyczne o wybranych wspólnych cechach jednakowych tworzą klasę obiektów, a stwierdzenia i formułowane prawa odnoszą się ściśle nie do konkretnego obiektu, lecz do klasy jako całości. Dla konkretnego obiektu należącego do klasy stwierdzenia są prawdziwe w przybliżeniu. W ten sposób od rzeczywistych obiektów przechodzimy do ich modeli, reprezentujących wyłącznie cechy ważne dla klasy. Przez model - w teorii poznania - rozumie się nie tylko przedmiot materialny, odtwarzający jakieś wybrane właściwości obiektu fizycznego, ale przede wszystkim system pojęć, układ równań fizycznych lub schemat funkcjonalny przedstawiający wybrany aspekt obiektu fizycznego. Model jest układem fizycznym odpowiadającym obiektowi realnemu.

W indukcyjnym poznaniu tkwi ryzyko błędów. Na podstawie ograniczonego materiału doświadczalnego, zebranego w ograniczonym zakresie zmian warunków fizycznych i przy ograniczonej wrażliwości obserwacji, formułuje się ogólne stwierdzenia ważne dla całej klasy zjawisk. Uogólnia się wnioski na obszary lub na obiekty bezpośrednio nie przebadane lub przebadane niedostatecznie dokładnie. Historia fizyki dostarcza wielu przykładów. Definiując np. długość 1 m jako odstęp między znakami na pręcie platyno-irydowym podano zdawało się pełny rozbudowany zespół warunków, dla których odstęp ma określoną długość. Po latach stwierdzono, że pręt zmienia długość samoistnie, prawdopodobnie na skutek naprężeń w materiale. Podobnie sformułowane przez Newtona prawo mechaniki okazało się po wiekach badań przybliżeniem, gdy próbowano stosować go do dużych prędkości cząstek materii. Po prostu przy uogólnieniu w procesie indukcyjnego poznania pewne istotne czynniki mogą być niedostrzeżone, a granice klasy obiektów, do których stwierdzenia mają się odnosić, stają się fałszywe.

Zachowanie się obiektów fizycznych w toku doświadczeń np. pomiarowych może być przewidywane tylko z dokładnością (wiernością) modeli, za pomocą których te obiekty są przedstawione. Tylko dla modelu możemy przewidywać

ściśle wynik doświadczenia, ponieważ wszystkie czynniki określające model zawarte są w jego definicji. Inaczej jest z realnym obiektem fizycznym. Kontrolujemy w nim czynniki uznane za istotne, natomiast niekontrolowane czynniki nieistotne mogą wywołać odchylenia przebiegu doświadczenia, w stosunku do oczekiwanych z założeń modelowych. Nie ma więc jednoznacznego związku między skutkiem a przyczyną. Z błędem, wynikającym z uproszczeń modelowych, nie możemy być pewni przyczyny obserwując skutek (wynik doświadczenia). Np. zaobserwowane zmiany wskazań amperomierza nie mają podstaw przypisywać wyłącznie zmianom natężenia prądu przepływającego przez ten amperomierz. Przyczynowo-skutkowy obraz rzeczywistości jest prawdziwy tylko w przybliżeniu.

## 2. Poznanie dedukcyjne a rzeczywistość

Nauczanie matematyki oraz sukcesy zmatematyzowanego sposobu nauczania fizyki, i nie tylko fizyki, wpoily w nas zasady ścisłego rozumowania dedukcyjnego do tego stopnia, że gotowi jesteśmy stosować go powszechnie, a wyniki uzyskane tym sposobem identyfikować z rzeczywistością: wnioskiem wynikającym ze ścisłego rozumowania dedukcyjnego przypisujemy moc faktów. Choć bezsporne są zalety dedukcyjnego sposobu poznania rzeczywistości, to konieczny jest krytycyzm i świadomość sytuacji. W pierwszej kolejności metodolog musi zdawać sobie sprawę z istniejącej sytuacji.

Dedukcyjne poznanie rzeczywistości jest wynikiem badania logicznego i formalnego pierwotnie zdefiniowanych modeli (układów fizycznych). Ścisłe wnioski wyciągnięte z badań i ścisłe dedukcyjne dowody prawdziwości wniosków, odnoszą się wyłącznie do modeli, dla których były formułowane. Przeniesienie stwierdzeń uzyskanych dedukcyjnie na obiekty rzeczywiste wymaga weryfikacji i fizyczna ich prawdziwość zależy od stopnia wierności modelu. Z dedukcyjnych badań uzyskujemy ścisłe zależności i eleganckie prawa, tak że z oporami uświadamiamy sobie ich dedukcyjny rodowód i stąd ograniczone, przybliżone zastosowanie do fizycznych obiektów.

Różne obiekty fizyczne mogą być przedstawiane za pomocą tego samego modelu i odwrotnie, dla jednego i tego samego obiektu fizycznego możemy mieć wiele różnych modeli zależnie od tego, jaki zespół cech obiektu uznajemy w danej chwili za istotny, tzn. jakim aspektem obiektu interesujemy się. Z tego względu masa punktowa zawieszona na nierozciągliwej nici nie powinna być traktowana jako jedyny model wahadła i odwrotnie, za pomocą takiego modelu możemy opisywać nie tylko wahadło, lecz inne obiekty np. elektryczny obwód zawierający L i C.

Jeżeli więc są podane bezwzględnie dokładne oceny, formułowane ścisłe stwierdzenia, wskazujące jednoznaczne związki przyczyna-skutek lub odwrotne, to możliwe jest w procesie dedukcyjnego poznania, a takie odnosi się do a priori zdefiniowanych modeli (układów fizycznych). Gdy jednak oceny, stwierdzenia, związki przyczyna-skutek przenosimy na konkretne obiekty fizyczne, modelowane w procesie dedukcji, to stają się one przybliżeniem za-

leżnym od stopnia wierności modelu, ponieważ w rzeczywistym obiekcie występuje duża liczba czynników nieznanych lub nawet znanych, które w swoim zakresie różnią między sobą każdy obiekt danej klasy i jako takie nie są cechami klasy, nie wchodzą do cech modelu.

### 3. Układ warunków fizycznych. Podstawowy układ warunków

Metrolog ma do czynienia przede wszystkim z konkretnymi obiektami fizycznymi i w najprostszych przypadkach interesuje się wybraną cechą lub wybranym stanem badanego obiektu, tj. wielkością mierzoną. Wielkość mierzona jest konkretnym stanem jednej z wielkości fizycznych, za pomocą których definiowany jest model dedukcyjny danego obiektu fizycznego a definicja wielkości mierzonej wynika z definicji modelu. Obserwator rozpatruje taki model obiektu, którym najlepiej ujawnia interesujący go aspekt obiektu. Wielkości fizyczne i czynniki, które określają model obiektu, również określają wielkość mierzoną, a ona sama jest jedną z wielkości określających obiekt. Poza tym istnieje nieskończona liczba czynników nieuwzględnionych w modelu lub w jego powiązaniach z otoczeniem, a oddziałujących na stan wielkości mierzonej. Uwzględniając tylko elementy modelu nie jesteśmy w stanie przewidzieć w kolejnych chwilach stanu wielkości mierzonej. Czynniki, które określają stan wielkości mierzonej nie muszą mieć natury wielkości fizycznej, a więc pewnych zmiennych, mogą być pewnymi warunkami lub zastrzeżeniami. Np. czynniki określające wzorcową długość prototypu metra, to nie tylko temperatura, wilgotność, ale również sposób usytuowania prototypu w ziemskim polu grawitacyjnym oraz sposób podparcia. Możemy ostatecznie stwierdzić, że istnieje układ warunków fizycznych, określający dokładnie stan wielkości mierzonej i że ten układ ogólnie jest bardzo złożony: nie możemy, a często nie potrzebujemy całego takiego układu kontrolować. Ograniczamy się do czynników występujących w modelu obiektu badanego, czynników, za pomocą których wystarczająco kontrolujemy stan wielkości mierzonej. Ten zespół czynników nazywa się podstawowym układem warunków fizycznych określających wielkość mierzoną. Dla każdej realizacji podstawowego układu warunków fizycznych nie możemy oczekiwać identycznego stanu wielkości mierzonej, ponieważ układ ten nie w pełni określa wielkość mierzoną. W ten sposób pojawia się pewna nieokreśloność stanu wielkości fizycznej. Ta nieokreśloność wynika z naszych ograniczeń poznawczych. Skoro istnieje nieokreśloność stanu, to wyjściem praktycznym jest interesowanie się pewnymi charakterystykami wszystkich możliwych stanów, np. wartością średnią i charakterystykami rozproszenia, np. błędem średniokwadratowym. W ten sposób dochodzimy do momentu rozumowania, w którym probabilistyczne modele doświadczeń i środki formalne probabilistyki stają się użytecznym narzędziem do opisywania określonych aspektów zachowania się obiektów fizycznych. Jeżeli nie chcemy przewidzieć lub nie chcemy zajmować się konkretnymi stanami wielkości mierzonej, kierujemy uwagę na

pewne charakterystyki statystyczne wielkości mierzonej. Z tego względu nie możemy mówić o wyniku pomiaru jako o konkretnym punkcie na skali wielkości, lecz mówimy o pewnym przedziale w otoczeniu określonego punktu. W metrologii tę nieokreśloność tradycyjnie nazywamy błędem przypadkowym. Wiadźmy, że błąd przypadkowy w najogólniejszym przypadku tkwi już w samym obiekcie, dlatego że jesteśmy w stanie tylko kontrolować i to w przybliżeniu podstawowy układ warunków fizycznych, a nie układ zupełny. Mówimy, że powstaje błąd systematyczny, jeżeli zostanie naruszony podstawowy układ warunków, opisujący wielkość mierzoną, tzn. jeżeli którykolwiek z czynników określających wielkość mierzoną zmienia się istotnie w stosunku do stanu definiowanego. Praktycznie oznacza to, że mierzymy nie tę wielkość, którą zamierzaliśmy zmierzyć.

Rozumowanie, które powyżej przedstawiliśmy stosuje się również do opisu właściwości narzędzi pomiarowych, ponieważ one są również obiektami fizycznymi, z tym że w procesie pomiarowym odgrywają specyficzną, metrologiczną funkcję. Stan na tzw. wyjściu narzędzia pomiarowego określony jest przez odpowiedni układ warunków, w którym stan na tzw. wejściu jest warunkiem dominującym. Jeżeli ograniczymy nasze zainteresowanie do podstawowego układu warunków charakteryzującego wyjście, to również istnieje pewna nieokreśloność stanu na wyjściu przy danym stanie na wejściu. Mówimy wówczas, że narzędzie jest źródłem błędów przypadkowych. Błędy systematyczne powstają wówczas, gdy naruszony zostanie podstawowy układ warunków albo, gdy przy wyznaczaniu zależności wejście-wyjście zostały wprowadzone błędy do podstawowego układu warunków.

Połączenie obiekt badany-narzędzie pomiarowe daje nowy układ fizyczny, określony nowym podstawowym układem warunków. Ten nowy podstawowy układ w części dotyczącej obiektu lub w części dotyczącej narzędzia, może być zmieniony w stosunku do stanu sprzed połączenia. Taka zmiana prowadzi do powstawania błędów systematycznych pomiaru. Praktycznie najczęściej polega ona na zmianie równowagi energetycznej w obiekcie badanym lub narzędziu, np. włączenie amperomierza zmienia natężenie prądu w obwodzie badanym. Nieokreśloność wyniku pomiarowego powstaje jako złożenie nieokreśloności obiektu i narzędzia i nie sumuje się algebraicznie: nieokreśloność ta w szczególnym przypadku może być nawet mniejsza od nieokreśloności składników (współczynnik korelacji jest ujemny).

Jeżeli podstawowy układ warunków określający obiekt i narzędzie pomiarowe jest stabilny w czasie, to powtarzanie pomiarów daje nam więcej danych o charakterystyce probabilistycznej tego układu, a pośrednio możliwość zawężenia obszaru niepewności wyniku pomiarowego. Istnieje teoretyczna możliwość osiągnięcia wyniku pomiarowego granicznie bezbłędnego w sensie statystycznym.

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ В СВЕТЕ ТЕОРИИ ПОЗНАНИЯ

## Р е з ю м е

Освещено ограничение индуктивного и дедуктивного познания физических явлений. Показано как из познавательных ограничений вытекает неизбежность наличия погрешности, и как из понятия "основной системы физических условий" вытекает естественным образом применение вероятного модели измерительного эксперимента.

## MEASUREMENTS ERROR IN THE LIGHT OF THE THEORY OF THE COGNITION

## S u m m a r y

Some limitation of the inductive and deductive cognition of the physical phenomena are presented. It is also presented how the inevitability of the errors existence arises from the cognitive limitations and how a natural way the application of the probabilistic model of the measurement experiment arises from the conception of "the fundamental complex of the physical conditions".