

OGÓLNE ZASADY EKSPERYMENTOWANIA

Ustalenie ścisłych zasad przeprowadzania eksperymentu jest niemożliwe. Każdy eksperymentator powinien indywidualnie ćwiczyć swą pomysłowość, oryginalność i umiejętność wyboru metod optymalnych. Można mówić jedynie o pewnych ogólnych zasadach, które udało się ustalić w wyniku dotychczasowych prób stworzenia metodologii eksperymentu. W każdym razie teza W. George'a, że „prowadzenie badań jest jeszcze raczej sztuką niż nauką”, nie wydaje się już być aktualna.

Eksperyment w zasadzie służy dwóm celom:

- weryfikuje hipotezy;
- pozwala zaobserwować nowe fakty.

Weryfikacja hipotez sprowadza się albo do potwierdzenia przewidywań, co występuje np. przy badaniu konstrukcji prototypowej, albo też do rozstrzygnięcia, która z hipotez jest słuszna (*experimentum crucis*).

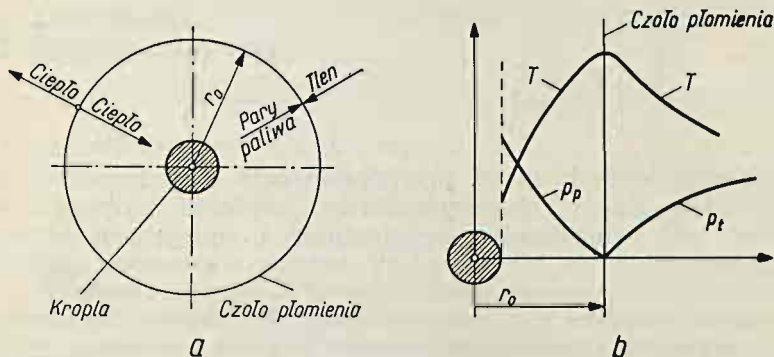
Obserwowanie nowych faktów może wystąpić w następujących przypadkach:

— chcemy dowiedzieć się, jak zjawisko będzie przebiegało w warunkach innych niż dotychczas. Ten przypadek zachodzi na przykład wtedy, gdy zamierzamy rozszerzyć zakres stosowalności jakiegoś urządzenia (chcemy go, powiedzmy, eksploatować w niższych temperaturach);

— chcemy zbadać proces złożony. Interesuje nas, które ze zjawisk jest zjawiskiem kontrolującym proces (to jest zjawiskiem, które rozstrzyga o szybkości procesu). Wymaga to wyodrębnienia zjawisk składowych oraz uporządkowania ich według następstw.

Rozważmy dla przykładu proces spalania kropli paliwa w atmosferze utleniającej. Zjawisko ilustruje model przedstawiony na rys. 10.1a. Temperatura kropli jest równa temperaturze wrzenia paliwa. Pary paliwa dyfundują w kierunku czoła płomienia, które ustala się w odległości r_0 od środka kropli. Podobnie w kierunku czoła płomienia (ale od zewnątrz) dyfunduje tlen. Wytworzone w miejscu zetknięcia się par paliwa i tlenu ciepło prze-

chodzi częściowo do kropli, częściowo zaś wraz ze spalinami na zewnątrz. Rozkład temperatur oraz rozkład ciśnień cząstkowych par paliwa i tlenu w warstwie powierzchniowej kropli przedstawia rys. 10.1b. W opisanym modelu szybkość palenia się jest związana ściśle z szybkością parowania, a ta z kolei z szyb-

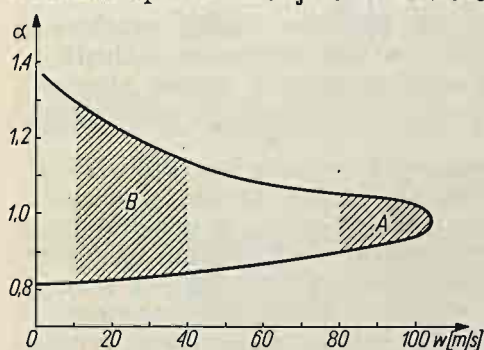


Rys. 10.1. Model spalania kropli paliwa ciekłego w gazowym ośrodku utleniającym:

p_p — ciśnienie cząstkowe par paliwa, p_t — ciśnienie cząstkowe tlenu, r_0 — odległość czoła płomienia od osi kropli, T — temperatura

kością przewodzenia ciepła między czołem płomienia i kroplą. Stąd wniosek, że zjawiskiem kontrolującym w tym procesie jest dyfuzja.

Badanie zawsze rozpoczyna się od opanowania zjawiska. Sprawdzianem opanowania jest możliwość wielokrotnego powtarzania.



Rys. 10.2. Zakres stateczności przykładowej komory spalania:

α — współczynnik nadmiaru powietrza, w — prędkość przepływu przez komorę (w przekroju wejściowym)

Potem dopiero można myśleć na przykład o sporządzaniu charakterystyk. Powtarzalność może początkowo występować nawet w bardzo wąskich granicach. Znaczy to, że jesteśmy na pograniczu warunków, w których przebieg zjawiska ma charakter ustalony. Stwierdzamy na przykład, że komora spalania, którą mamy zamiar badać, pracuje statecznie w bardzo wąskim zakresie współczyn-

ników nadmiaru powietrza. Znaczy to, że jej punkt pracy znajduje się na wykresie a — w gdzieś w obszarze A (rys. 10.2). A więc aby poszerzyć zakres statecznej pracy komory, należy przede wszystkim zmniejszyć prędkość przepływu (przechodząc do obszaru B).

Pierwsze próby powinny dotyczyć raczej całości zagadnienia lub problemów ogólnych. Roztrząsanie szczegółów zostawiamy na potem. Dlatego zaczynać należy od badań jakościowych, a i te najlepiej przeprowadzać w warunkach skrajnych, gdzie wpływy uzewnętrzniają się najsilniej (np. po zastosowaniu maksymalnych dawek).

Zakrojone na szerszą skalę badania eksperymentalne dobrze jest zapoczątkować prostym eksperymentem wstępnym. Zależnie od okoliczności wyróżniamy cały szereg rodzajów takich eksperymentów:

Eksperyment rozpoznawczy. Takim eksperymentem posługujemy się na przykład w biologii, gdy przedmiotem badania jest człowiek lub kosztowne zwierzę. Przeprowadza się wtedy doświadczenie w laboratorium na małą skalę, aby się przekonać, czy istnieje szansa prowadzenia eksperymentu w skali większej.

Do tego typu eksperymentów należą także wszelkiego rodzaju wstępne badania przeprowadzane na modelach oraz przyrządach analogowych.

Eksperyment kierunkowy. Wykonuje się go w celu zorientowania co do kierunku badania w doświadczeniu głównym. Najczęściej przeprowadza się eksperyment kierunkowy, gdy nie ma jeszcze wyraźnej drogi realizacji problemu. Wtedy za pomocą kilku prób staramy się wybrać drogę optymalną w istniejących warunkach. Nie wiemy na przykład, jaki przyjąć schemat działania komory spalania do projektowanego przez nas silnika turbinowego. Wykonujemy wówczas na podstawie naszej dotychczasowej wiedzy kilka uproszczonych modeli i sprawdzamy ich osiągi. Najlepszą ze zbadanych komór przyjmujemy jako podstawę dalszego rozwoju.

Eksperyment selekcyjny. Jest to proste doświadczenie wykonywane przeważnie na dużej ilości substancji w celu znalezienia spośród nich takiej, która będzie się najlepiej nadawała do dalszego badania. Substancją taką może być na przykład środek leczniczy lub paliwo użyte następnie w doświadczeniu głównym.

Po przeprowadzeniu badań wstępnych należy szczegółowo opracować metodę realizacji eksperymentu głównego.

Opracowanie to powinno obejmować precyzyjną odpowiedź na następujące pytania:

— co jest celem eksperymentu?

— jakie wielkości i w jaki sposób mają być w nim kontrolowane?

— które z wielkości kontrolowanych mają podlegać zmianom i w jaki sposób?

— co i w jaki sposób ma być podczas eksperymentu obserwowane?

Z punktu widzenia metod badania eksperymenty można podzielić na dwie grupy.

Do grupy pierwszej należą eksperymenty, mające na celu badanie urządzeń. W tym przypadku proces przebiega w ramach ustalonych przez konstrukcję urządzenia. Opracowując program badania, należy dostosować metody obserwacji i pomiaru do tej konstrukcji.

Druga grupa eksperymentów obejmuje przypadki, gdy celem jest badanie oderwanego zjawiska. Wtedy ramy eksperymentu można dostosować do wymogów techniki obserwacji i pomiarów. Podstawowa koncepcja realizacji eksperymentu powinna wynikać z hipotezy, a przede wszystkim z jej matematycznego opracowania. Daje ono bowiem odpowiedź wprost na pytanie dotyczące wielkości kontrolowanych: zmiennych i stałych.

Bardzo istotnym zagadnieniem jest tu wybór metody pomiaru tych wielkości. Zależać on będzie przede wszystkim od wymaganej dokładności. Starać się w każdym razie należy, aby wybrana metoda była jak najmniej pracochłonna zarówno podczas przeprowadzania pomiarów, jak i podczas opracowywania wyników. Na przykład średnią prędkość izotermicznego przepływu przez przewód można określić między innymi następującymi trzema sposobami:

— zwężką pomiarową (rys. 10.3);

— rurką Prandtla (rys. 10.4);

— rurkami Pitota umieszczonymi na $\frac{3}{4}$ promienia przewodu (rys. 10.5).

W przypadku zastosowania zwężki pomiarowej średnią prędkość przepływu określa się z zależności

$$\bar{w} = a\varepsilon \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\gamma}}$$

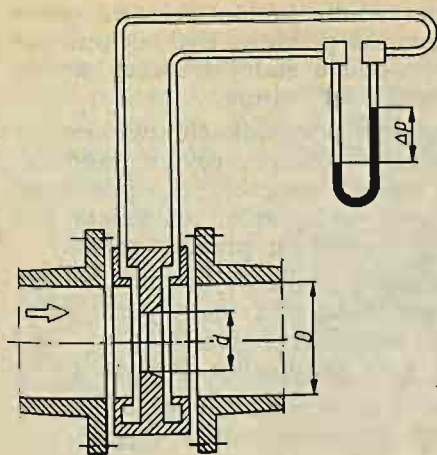
gdzie: ε — współczynnik zależny od kwadratu stosunku średnicy przewodu D do średnicy zwężki d (rys. 10.3) oraz Δp ;

a — współczynnik zależny od geometrii zwężki i liczby Reynoldsa;

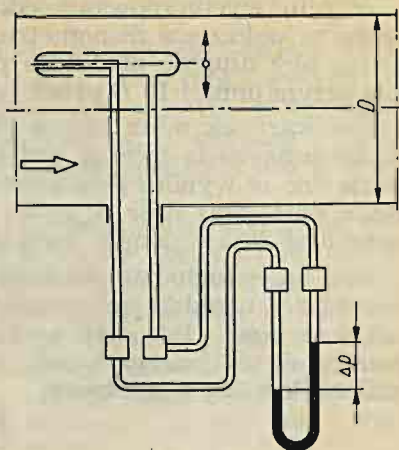
g — przyspieszenie ziemskie [m/s^2];

Δp — spadek ciśnienia na zwężce [kG/m^2];

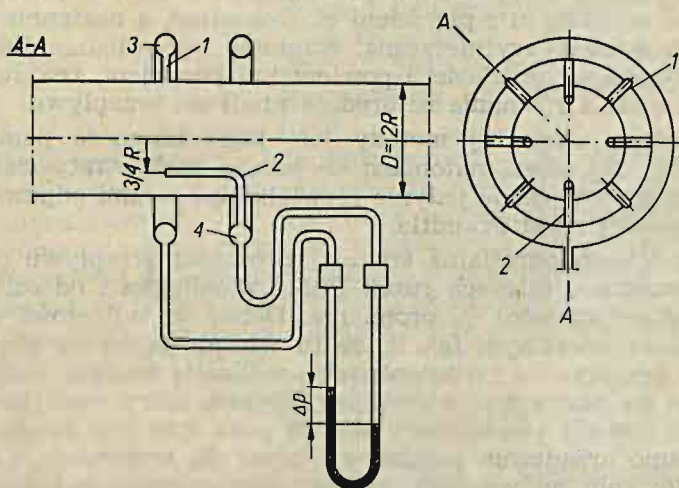
γ — ciężar właściwy przepływającego płynu [kG/m^3].



Rys. 10.3. Zwężka pomiarowa



Rys. 10.4. Pomiar prędkości przepływu za pomocą rurki Prandtla



Rys. 10.5. Pomiar prędkości przepływu za pomocą rurek Pitota rozmieszczonych na $3/4$ promienia przewodu:

1 — rurki doprowadzające ciśnienie statyczne do kolektora ciśnienia statycznego 3, 2 — rurki doprowadzające ciśnienie całkowite do kolektora ciśnienia całkowitego 4

W celu wyeliminowania oddziaływania zmian kształtu przewodu na wskazania manometru, zwężka powinna być tak umieszczona, aby długość gładkiego przewodu o stałej średnicy wynosiła przynajmniej $10 D$ przed zwężką i $5 D$ za nią.

Ten warunek może być w pewnych przypadkach uważany za wadę. Inną wadą zwężek jest znaczny opór przepływu, jaki stawiają one w wyniku gwałtownej zmiany poprzecznego przekroju strumienia, oraz dość poważny koszt wykonania. Ich zaletą jest natomiast łatwy pomiar związany z prostym przeliczeniem.

W drugiej metodzie pomiaru średnią prędkość przepływu wyznacza się „uśredniając” rozkład prędkości otrzymany przez przesuwanie rurki Prandtla wzdłuż średnicy, najczęściej w dwu prostopadłych płaszczyznach. W tym przypadku średnią prędkość oblicza się z zależności

$$\bar{w} = \frac{1}{F} \int_F w dF$$

gdzie: F — powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu;
 w — miejscowa prędkość przepływu.

Powierzchnię przewodu dzieli się na szereg koncentrycznych pierścieni o znanych powierzchniach F_1, F_2 itd. Przesuwając rurkę Prandtla wzdłuż dwu prostopadłych średnic mierzy się prędkość na każdym z pierścieni czterokrotnie, a następnie znajduje ich średnią arytmetyczną. Sumując odpowiednie iloczyny tak otrzymanych prędkości i powierzchni pierścieni, znajduje się wartość całki z równania na średnią prędkość przepływu.

Zasadniczą wadą tej metody jest pracochłonność pomiarów i obliczeń. Jej zaletą natomiast — bardzo małe straty ciśnienia całkowitego, wywołane jedynie niewielkimi oporami odpowiednio oprofilowanej rurki Prandtla.

Trzeci sposób określania średniej prędkości przepływu polega na umieszczeniu czterech rurek Pitota w odległości od osi przewodu odpowiadającej $\frac{3}{4}$ promienia. Dobór tej odległości opiera się na doświadczalnym fakcie, że tu właśnie mierzona prędkość jest dla przepływów turbulentnych prędkością średnią. Założenie to wiąże się oczywiście z pewnym błędem, który zmniejsza dokładność metody pomiarowej. Metoda poza tym jest bardzo prosta, a samo urządzenie pomiarowe łatwe do wykonania i tanie. Zainstalowanie go wymaga jednak zastosowania, podobnie jak w przypadku zwężki, odpowiednio długiego przewodu, w celu wyrównania przepływu.

Projektant stoiska powinien wybrać metodę pomiaru optymalną z punktu widzenia możliwości zainstalowania, kosztów, praco-

chłonności przy przeprowadzaniu badania i obliczaniu wyników oraz wymaganej dokładności.

Przy planowaniu eksperymentów laboratoryjnych należy wnikliwie przeanalizować wszystkie czynniki, które mogą wpłynąć na wynik badania. Badając wpływ jakiegoś parametru na określoną właściwość (np. temperatury na lepkość gazu), staramy się inne parametry zachować stałe. W pewnych przypadkach jest to trudne do zrealizowania.

Sporządzając np. charakterystyki silnika odrzutowego w normalnie spotykanym laboratorium, które nie jest odizolowane od otoczenia, trzeba liczyć się z wpływem zmian ciśnienia i temperatury powietrza atmosferycznego na osiągi silnika. W celu wyeliminowania tych wpływów należy do wyników pomiarów wprowadzić odpowiednie poprawki. Zadaniem poprawek jest sprowadzenie osiągow uzyskanych w warunkach badania do warunków przyjętych za normalne (na ogół: ciśnienie 760 mm słupa rtęci i temperatura 288°K).

Poprawki na ciąg i jednostkowe zużycie paliwa wynoszą

$$S_R = S_M \frac{760}{P_M} \quad b_R = b_M \frac{288}{T_M} \quad [10.1]$$

gdzie: S_M , b_M , P_M , T_M — ciąg, jednostkowe zużycie paliwa, ciśnienie i temperatura zmierzona w warunkach badania;

S_R , b_R — ciąg i jednostkowe zużycie paliwa sprowadzone do warunków normalnych.

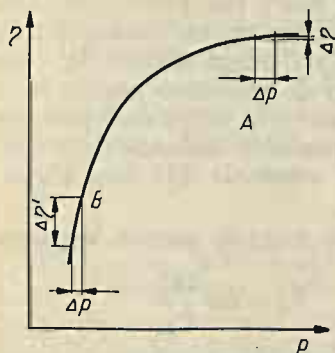
Metoda sprowadzania wyników pomiarów do warunków normalnych oparta jest na założeniu, że małe zmiany parametrów termodynamicznych nie wpływają na zmianę sprawności poszczególnych zespołów, tak że w związku z tym procesy cieplne i przepływowe zachodzące w silniku w zakresie tych zmian można uważać za podobne. Kryteriami podobieństwa tych procesów dla tego samego silnika są stosunki użyte do określania poprawek w równaniach [10.1]:

$$\frac{S}{P} = \text{idem} \quad \text{i} \quad \frac{b}{\sqrt{T}} = \text{idem}$$

Powyższe założenie jest słuszne tylko w bardzo wąskim przedziale zmian warunków otoczenia, przy czym wielkość tego przedziału zależy od położenia w polu charakterystyk pracy silnika. Rys. 10.6. przedstawia przykładową zależność sprawności cieplnej η komory spalania silnika odrzutowego od ciśnienia panują-

cego w komorze (lub ciśnienia atmosferycznego, gdyż ciśnienia te są ze sobą związane sprężem urzeczywistnianym przez sprężarkę) p .

Z wykresu wynika, że zmiana sprawności komory zależy od położenia na charakterystyce. W obszarze A nawet stosunkowo duże zmiany ciśnienia nie mają praktycznie wpływu na sprawność komory. Natomiast w obszarze B zależność ta jest bardzo widoczna.



Rys. 10.6. Przykładowa charakterystyka komory spalania silnika odrzutowego:

η — sprawność cieplna komory,
 p — ciśnienie panujące w komorze, A — obszar małych zmian sprawności, B — obszar dużych zmian sprawności

Realizacja zmian określonego parametru pociąga za sobą z reguły wtórne zmiany warunków, w jakich przeprowadzany jest eksperyment. Zmiany te muszą być wzięte pod uwagę podczas analizy czynników mogących wpłynąć na wynik badania.

Mamy na przykład zbadać zależność ciśnienia od temperatury dla określonego czynnika termodynamicznego przy stałej objętości. Wzrost temperatury realizujemy przez podgrzewanie naczynia, w którym znajduje się badany czynnik. Wywołuje to zmianę objętości naczynia, a tym samym wymaga zastosowania kompensacji albo wprowadzenia poprawek w obliczeniach.

W niektórych przypadkach zmuszeni jesteśmy pewne wpływy uboczne pominąć. Badając na przykład wymianę ciepła między spalinami (produkt spalania prochu) i ściankami lufy karabinu, mierzymy rozkład temperatury w czasie, w kilku punktach położonych wzdłuż lufy (rys. 10.7). Wzrost temperatury ścianki pochodzi z dwu źródeł: ciepła spalin oraz ciepła tarcia. Rozdzielenie tych ciepł jest bardzo trudne. Przeprowadzając jednak szacunkowe obliczenia udziału ciepła tarcia w ogólnym cieple pochłoniętym przez ściankę dochodzi się do wniosku, że jest on mniejszy od 10%. Nieuwzględnienie więc zjawiska tarcia w procesie wymiany ciepła w lufie karabinu prowadzi do błędu systema-

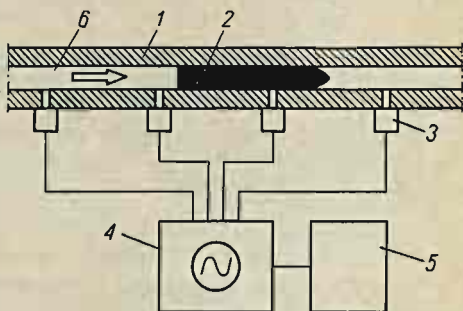
tycznego, z którego istnieniem możemy się świadomie pogodzić, jeśli cel naszego badania nie będzie przez to przekreślony.

Na ogół powinno się w badaniach laboratoryjnych dążyć do pełnego wyeliminowania wpływów ubocznych. Jest to możliwe tylko wtedy, gdy badany proces został uprzednio szczegółowo rozpoznany pod względem jakościowym, a stoisko badawcze tak opracowane, aby przebieg jego był kontrolowany i zgodny z naszymi zamierzeniami. Uzyskanie takich właśnie warunków przebiegu badanego procesu jest najtrudniejszym etapem w realizacji eksperymentu laboratoryjnego.

Poza eksperymentem laboratoryjnym w pewnych dyscyplinach naukowych praktykuje się przeprowadzanie eksperymentów metodami statystycznymi. Dotyczy to przede wszystkim dyscyplin zajmujących się badaniem procesów masowych, a więc na przykład społecznych, biologicznych, agrotechnicznych itp. Istotną cechą tych procesów jest interweniowanie w nich w sposób losowy często nieznanych czynników, spod których wpływu nie można uwolnić badanego zjawiska. Metody statystyczne umożliwiają jednak wyeliminowanie tych wpływów przez odpowiednie zaplanowanie eksperymentu, a następnie przez właściwe opracowanie wyników badań.

Badacz laboratoryjny styka się z metodami statystycznymi głównie przy opracowywaniu wyników pomiarów, które skażone są błędami przypadkowymi. Metody te pozwalają na podstawie otrzymanych pomiarów znaleźć przedział, w którym z określonym prawdopodobieństwem znajduje się rzeczywista wartość mierzonej wielkości.

Badania statystyczne ze względów czasowych i oszczędnościowych przeprowadza się najczęściej metodą reprezentacyjną. Metoda ta polega na wybraniu z badanej zbiorowości (zwanej populacją generalną) pewnej liczby elementów (tzw. próby) i przebadaniu ich. Zakłada się przy tym, że wyniki otrzymane z badań próby ważne są dla całej populacji. Próbę należy wybrać w taki sposób, aby rzeczywiście reprezentowała ona populację.



Rys. 10.7. Badanie wymiany ciepła w lufie karabinu po wystrzale:

1 — lufa, 2 — pocisk, 3 — nadajnik temperatury, 4 — oscylograf, 5 — przystawka fotograficzna, 6 — spalin

Dlatego też, jeżeli w populacji spostrzegamy pewne cechy lub klasy w określonej proporcji, to próba będzie tym lepsza, im bardziej jej cechy czy klasy będą w swych proporcjach zbliżone do proporcji odpowiednich cech i klas zbiorowości generalnej.

Gdy w konkretnych badaniach nie posiadamy wiadomości o liczebności i proporcjach różnych klas populacji generalnej lub, jak to najczęściej bywa, nie jesteśmy w stanie w ogóle dokonać podziału na klasy, wtedy aby próbę uczynić reprezentatywną, robimy ją przypadkową, tzn. określamy ją w taki sposób, by wybór jej nie miał żadnego związku z badanymi cechami, zapewniając w ten sposób każdemu elementowi zbiorowości jednakową możliwość trafienia do próby. Wówczas, jak wskazuje doświadczenie, proporcje badanych cech w próbie odtwarzają z dużym przybliżeniem ich proporcje w populacji generalnej.

Najprostszym sposobem otrzymania próby przypadkowej jest sposób następujący. Elementy zbiorowości numerujemy kolejno i z otrzymanych numerów losujemy tyle, ile powinno ich być w próbie. Aby przeprowadzić losowanie, piszemy każdy numer na oddzielnej kartce. Następnie dokładnie tasujemy je i wybieramy z nich jedną, której numer zapisujemy. Wybrana kartka wraca do reszty kartek, które znów tasujemy przed wybraniem następnej kartki itd. Wybrawszy w ten sposób potrzebną ilość kartek i zapisawszy ich numery, otrzymamy numery tych elementów zbiorowości, która tworzy próbę. Jeżeli ten sam numer został wylosowany więcej niż raz, np. dwa razy, wówczas uwzględniamy odpowiedni element także dwa razy. Znaczy to oczywiście, że badanie będziemy na nim przeprowadzali raz, natomiast wynik badania uwzględnimy w obliczeniach dwa razy. Prawdopodobieństwo wylosowania danego elementu, przy którymkolwiek ciągnięciu numeru nie zależy od tego, czy została ona wylosowana poprzednio, czy też nie. Każdy element w trakcie ciągnięcia ma jedno i to samo prawdopodobieństwo, że zostanie wylosowany.

Powyższy sposób losowania próby byłby w praktyce uciążliwy. Dlatego losowanie takie wykonujemy przeważnie posługując się tablicami liczb przypadkowych. Przedstawione w załączniku tablice zawierają przypadkowo wybrane czterocyfrowe liczby w czterech blokach po 25 wierszy i 10 kolumn każdy. Przypadkowość tych liczb polega na tym, że nie ma żadnego prawa, według którego są one ułożone. Losowanie za pomocą tablic liczb przypadkowych przeprowadza się następująco. Poszczególne elementy badanej zbiorowości numeruje się kolejnymi numerami o stałej ilości cyfr, używając zer na początku. Jeśli na przykład

zbiorowość składa się z 520 elementów, to kolejne numery będą 000, 001, 002, ..., 518 i 519. Numery, które mają być zaliczone do próby, odczytuje się z tablicy liczb przypadkowych od miejsca zwanego początkiem odczytywania. Początek odczytywania ustala się na chybił trafił, na przykład przez dowolne wymienienie bloku, wiersza i kolumny. Liczby z tablicy odczytuje się w wierszach od strony lewej do prawej, wiersz po wierszu tak jak pismo łacińskie. Jeśli w toku odczytywania skończy się blok (wiersz 25, kolumna 10), to przechodzi się do początku następnego bloku (wiersz 1, kolumna 1), jeśli skończy się cała tablica (blok 4, wiersz 25, kolumna 10), to przechodzi się do jej początku (blok 1, wiersz 1, kolumna 1). Jeśli w toku losowania otrzyma się numer, który był już wylosowany, to uwzględnia się go ponownie z tym, że element bada się jeden raz, natomiast wynik badania jest brany pod uwagę dwukrotnie. Jeśli w toku losowania otrzyma się numer, którego nie ma w populacji, to nie uwzględnia się tego numeru.

Jeśli największy numer w zbiorowości składa się z mniejszej ilości cyfr niż cztery, to należy w każdej odczytanej liczbie uwzględnić tylko daną ilość cyfr (licząc od początku odczytanej liczby).

W przypadku, gdy największy numer w zbiorowości jest czterocyfrowy, numery należy składać z dwu grup po dwie cyfry. Grupy losuje się osobno ustalając dla każdej inny początek odczytywania, a następnie składa liczby z wylosowanych grup. Na przykład po wylosowaniu w pierwszej grupie liczby 16, a w drugiej 63, składa się liczbę czterocyfrową 1663. Element 1663 należy pobrać do próby. W przypadku gdy największy numer w zbiorowości jest pięcio- lub sześciocyfrowy, numery należy składać z dwu grup: pierwszej dwu- lub trzycyfrowej i drugiej trzycyfrowej. Tok postępowania jest analogiczny jak poprzednio.

Przedstawiony schemat losowania nazywamy losowaniem prostym lub niezależnym. Istnieją jeszcze inne schematy, ale ten jest w badaniach eksperymentalnych najczęściej stosowany.

Bardzo istotnym zagadnieniem w badaniach metodami statystycznymi jest liczebność prób. Ze względów oszczędnościowych staramy się próby możliwie zmniejszać. Z drugiej jednak strony wynik badania jest tym pewniejszy, im próba jest liczniejsza. Ogólnie rzecz biorąc, liczebność próby powinna być tym większa, im spodziewamy się mieć do czynienia z większą ilością i większą intensywnością oddziaływania na przebieg badania zakłócających czynników przypadkowych.

Jeśli na przykład celem badania jest kontrola jakości produkcji, to próba powinna być tym liczniejsza, im organizacja

zakładu produkcyjnego i jego wyposażenie w obrabiarki i narzędzia są gorsze, a personel słabiej przygotowany i o mniejszych kwalifikacjach.

Jeżeli natomiast celem badania jest ustalenie zależności między jakąś cechą badanej próby i jakimś czynnikiem zmiennym, to liczebność próby przy określonym wpływie czynników zakłócających powinna być tym większa, im mniejszy jest spodziewany wpływ badanego czynnika na badaną cechę.

Eksperymenty przeprowadzane metodą statystyczną dzielimy na eksperymenty proste i eksperymenty złożone.

W eksperymentach prostych badamy wpływ na określoną cechę tylko jednego czynnika, w eksperymentach złożonych natomiast wielu czynników na raz. Przykładem eksperymentu prostego może być badanie kliniczne, którego celem jest, powiedzmy, stwierdzenie przydatności jakiegoś nowego lekarstwa do leczenia określonej choroby. Ze zgłaszających się pacjentów tworzymy dwie równoważne grupy: kontrolną i badaną. Obydwie grupy nie powinny się różnić między sobą pod żadnym istotnym względem. Grupę kontrolną leczymy w sposób konwencjonalny, natomiast grupę badaną za pomocą nowego lekarstwa. O przydatności nowej metody leczenia decydują uzyskane w obu grupach wskaźniki charakteryzujące jego wynik, na przykład wskaźniki śmiertelności. Pamiętać należy przy tym, że otrzymany wynik jest natury statystycznej, to znaczy, że przeciętnie biorąc, pewna metoda leczenia jest lepsza niż inna. Nikt jednak nie potrafi przewidzieć, w jaki sposób zareaguje pewien wybrany chory.

W eksperymentcie złożonym, jak to już było powiedziane wyżej, badamy równocześnie wpływ wielu czynników na raz. Chcemy na przykład w badaniu agrotechnicznym określić wpływ na plon ziemniaków ulepszeń gleby solami amonu, potasu i nawozem naturalnym oddzielnie oraz w połączeniach po dwa i po trzy rodzaje ulepszeń (w sumie 7 wariantów ulepszeń). Eksperyment przeprowadzamy następująco.

Wycinek doświadczalnego pola dzielimy na cztery bloki, każdy blok zaś na 8 próbek, z których jedna jako kontrolna nie będzie nawożona. Niech A oznacza sole amonu, B — potasu, C — nawóz naturalny, wreszcie k (kontrola) brak ulepszeń. Plan eksperymentu ilustruje tablica 10.1. W tablicy pod każdym zestawem ulepszeń podany jest urodzaj dla danego zestawu w pewnych jednostkach. Poszczególne warianty zestawów są lokowane w każdym bloku przypadkowo. W celu bardziej poglądowego przedstawienia wyników eksperymentu w tablicy 10.2 podano sumaryczne urodzaje dla każdego sposobu ulepszania, uzyskane we

Plan eksperymentu złożonego

Blok 1

<i>AB</i>	<i>BC</i>	<i>C</i>	<i>AC</i>
291	398	312	373
<i>K</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>ABC</i>
101	265	106	450

Blok 2

<i>BC</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>
407	324	272	306
<i>A</i>	<i>ABC</i>	<i>AC</i>	<i>K</i>
89	449	338	106

Blok 3

<i>C</i>	<i>K</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>
323	87	324	423
<i>AB</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>ABC</i>
324	279	128	471

Blok 4

<i>AC</i>	<i>AB</i>	<i>A</i>	<i>C</i>
361	272	103	324
<i>B</i>	<i>K</i>	<i>ABC</i>	<i>BC</i>
302	131	437	445

Tablica 10.2

Sumaryczne urodzaje dla poszczególnych wariantów ulepszeń, uzyskane w eksperymencie złożonym

<i>K</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
325	426	1118	1283	1203	1396	1673	1807

wszystkich czterech blokach. W celu stwierdzenia, czy zmiany w urodzaju zarejestrowane w tej tabeli można przypisać ulepszeniom, czy też pochodzą one z przyczyn przypadkowych, należy przeprowadzić analizę wariancji*, będącą jednym z podstawowych narzędzi badania statystycznego.

Stosowanie eksperymentu złożonego ma następujące zalety:

— zmniejsza ilość doświadczeń koniecznych przy badaniu każdego czynnika po kolei, co oczywiście wpływa na obniżenie kosztów i skrócenie czasu eksperymentu, ale bez zmniejszania dokładności wyników;

* Patrz np. D. N. Chorafas: *Procesy statystyczne i niezawodność urządzeń*, WNT, Warszawa 1963.

— daje więcej niż bezpośrednie badanie czynników po kolei, ponieważ dostarcza wiadomości nie tylko o bezpośrednim wpływie badanych czynników, ale również o licznych i różnorodnych ich współdziałaniach. Inaczej mówiąc, metoda eksperymentu złożonego daje szerszą podstawę do wyciągania wniosków wynikających z badania.

Jednym z istotniejszych sposobów dokonywania postępu w badaniach eksperymentalnych jest przenoszenie metod z jednej dziedziny do drugiej. Przenoszone mogą być metody pomiarowe, metody obserwacji lub technika przeprowadzania eksperymentu. Zasada powyższa ważna jest oczywiście dla wszystkich dziedzin nauki, a także wszelkich dziedzin życia, w których postęp odgrywa jakąś rolę. Zdarza się, że metoda powstała w jednej dziedzinie wiedzy po przeniesieniu do innej staje się dla niej podstawą rozwoju. Na przykład rozwój stworzonej przez Josepha Listera (1827—1912) aseptycznej chirurgii możliwy był w głównej mierze dzięki zastosowaniu prac Pasteura, z których wynikało, że rozkład gnilny wywołują bakterie.

Podobne znaczenie ma przenoszenie wyników wszelkich badań z takich dyscyplin podstawowych, jak chemia czy fizyka, do techniki. Można zaryzykować twierdzenie, że większość odkryć znajduje szersze zastosowanie w dziedzinach, do których zostały przeniesione, niż w tych, w których powstały. Jest rzeczą oczywistą, że w pewnych przypadkach nowa metoda, zanim będzie mogła być zastosowana w innej dziedzinie, musi ulec modyfikacji.

Inną powszechnie stosowaną w nauce zasadą, która często upraszcza, a nieraz nawet umożliwia przeprowadzenie badania, jest przemysłenie eksperymentu pod kątem widzenia możliwości wyabstrahowania z interesującej nas a skomplikowanej sytuacji istotnego elementu, w którym w jakiś sposób ześrodkowują się problemy istotne dla danego badania. Dobrym przykładem zastosowania tej metody jest badanie odruchów warunkowych przeprowadzonych na psach przez J. P. Pawłowa. A oto co pisze Pawłow*:

„Proces wytwarzania się odruchów warunkowych odbywa się w wyższej części układu nerwowego w sposób następujący. Jeżeli nowa podnieta, poprzednio obojętna, trafiając do kory mózgowej znajduje w tej chwili w układzie nerwowym ognisko silnego pobudzenia, to zmierza ku temu ognisku, jakby torując sobie ku niemu drogę, a stamtąd dociera do odpowiedniego narządu, stając

* J. P. Pawłow: *Wybór pism*, PZWL, W-wa 1951, str. 192—194.

się w ten sposób bodźcem czynności tego narządu. W wypadku przeciwnym, kiedy takiego ogniska nie ma, podnieta rozprasza się po korze mózgowej, nie wywołując widocznego efektu. W taki sposób formułuje się prawo wyższej części układu nerwowego.

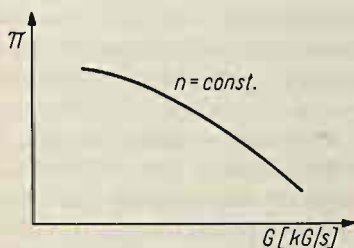
Pozwolę sobie teraz możliwie krótko zilustrować za pomocą faktów to, co przed chwilą powiedziałem o mechanizmie tworzenia się odruchu warunkowego. Cała nasza praca była dotąd wykonywana wyłącznie na drobnym narządzie posiadającym małe znaczenie fizjologiczne, mianowicie na gruczole ślinowym. Wybór ten, chociaż z początku przypadkowy, okazał się niezwykle udany, po prostu szczęśliwy. Po pierwsze, czynił on zadość podstawowej zasadzie myślenia naukowego, aby w dziedzinie zjawisk skomplikowanych zaczynać od przypadku najprostszego; po drugie, na naszym narządzie można było wyraźnie odróżnić prostą postać czynności nerwowej od złożonej tak, że z łatwością można je było porównywać. To właśnie doprowadziło do wyjaśnienia sprawy. W fizjologii było od dawna wiadome, że gruczoł ślinowy zaczyna pracować, tj. dostarczać cieczy do jamy ustnej przy wprowadzaniu do ust pokarmu albo innych substancji drażniących i że powyższe zjawisko zachodzi za pomocą określonych nerwów. Nerwy te odbierają podrażnienia pochodzące od mechanicznych i chemicznych właściwości ciał, które trafiły do ust, przewodzą te podrażnienia do ośrodkowego układu nerwowego, a stamtąd do gruczołu, wywołując w nim wytwarzanie się śliny. Jest to dawny odruch, według naszej terminologii bezwarunkowy, stały związek nerwowy, prosta czynność odbywająca się również u zwierząt pozbawionych wyższego odcinka mózgu. Prócz tego jednak wiadomo nie tylko fizjologom, ale wszystkim ludziom, że gruczoł ślinowy pozostaje w stosunkach złożonych ze światem zewnętrznym, gdy np. widok pokarmu, a nawet myśl o nim wywołuje u głodnego człowieka lub zwierzęcia wydzielanie śliny. Według dawnej terminologii oznaczało to, że wydzielanie śliny może być pobudzane również psychicznie.

Dla tej złożonej czynności nerwowej niezbędna jest wyższa część mózgu. Otóż w tym właśnie przypadku analiza nasza wykazała, że u podstawowej złożonej czynności nerwowej gruczołu ślinowego, tych najbardziej skomplikowanych stosunków ze światem zewnętrznym, leży mechanizm czasowego połączenia — odruchu warunkowego, który poprzednio opisałem ogólnikowo. W naszych doświadczeniach sprawa przybrała kształty wyraźne i nie budzące wątpliwości. Wszystkie zjawiska świata zewnętrznego, jak dźwięki, obrazy, zapachy itd., mogły być czasowo połączone z gruczołem ślinowym, z nich wszystkich można było

utworzyć bodźce wywołujące wydzielanie śliny, o ile tylko występowały one jednocześnie z odruchem bezwarunkowym, z wydzielaniem śliny, wywołanym przez substancje trafiające do jamy ustnej. Krócej mówiąc, mogliśmy wytworzyć dowolną ilość wszelkiego rodzaju odruchów warunkowych, których efektem była czynność gruczołu ślinowego”.

Bardzo ważną, a często niedocenianą sprawą podczas eksperymentowania jest prowadzenie szczegółowych notatek. Najczęściej prowadzi się je w osobnym dla danego tematu dzienniku. Zapisujemy w nim każdorazowo szczegółowy program każdego konkretnego badania, nasze spostrzeżenia, które nasunęły nam się podczas próby oraz wyniki obserwacji, pomiarów i wnioski. W przypadku, gdy pomiarów jest dużo i często powtarzają się w określonym układzie, korzystnie jest zapisywać je na specjalnie przygotowanych formularzach. Jeżeli celem badania jest sporządzenie jakiejś charakterystyki, wtedy zaleca się natychmiast po zakończeniu próby sporządzić wykres w wielkościach bezpośrednio mierzonych.

Chcemy na przykład zbadać charakterystykę sprężarki w postaci zależności między sprężem π i natężeniem przepływu G przy stałej prędkości obrotowej n (rys. 10.8). Stoisko badawcze

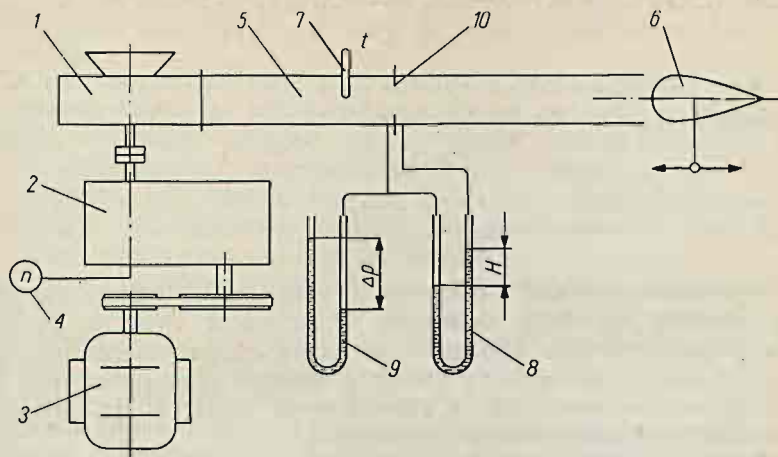


Rys. 10.8. Charakterystyka sprężarki:

π — spręż, G — natężenie przepływu, n — liczba obrotów

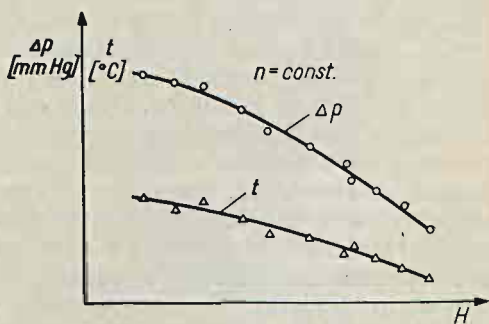
oraz sposób pomiaru poszczególnych wielkości istotnych dla wyznaczenia charakterystyki przedstawia szkic na rys. 10.9. Wyznaczenie sprężu oraz natężenia przepływu wymaga pewnych dość czasochłonnych przeliczeń. Może się zdarzyć, że podczas badania popełniliśmy jakieś przypadkowe grube błędy lub wybraлиśmy niewłaściwe rozstępy między punktami pomiarowymi, tak że poprowadzenie krzywej na wykresie napotyka na trudności. Utrzymywanie stoiska w stanie gotowym do powtórzenia badania, aż do czasu, gdy wykona się odpowiednie przeliczenia, nie zawsze jest możliwe. Dlatego najlepiej od razu w laboratorium po zatrzymaniu sprężarki nanieść na wykres zależności: $\Delta p = f(H)$ oraz $t = f(H)$ przedstawione na rys. 10.10. Wielkość H będąca

spadkiem ciśnienia na zwężce jest w pewnym stopniu miarą prędkości, a tym samym i natężenia przepływu G . Natężenie prze-



Rys. 10.9. Stoisko do sporządzania charakterystyki sprężarki:
1 — badana sprężarka, 2 — przekładnia, 3 — silnik elektryczny, 4 — obrotomierz, 5 — przewód, 6 — urządzenie regulujące ciśnienie na wyjściu ze sprężarki, 7 — termometr, 8 — manometr mierzący spadek ciśnienia na zwężce, 9 — manometr mierzący ciśnienie za sprężarką, 10 — zwężka pomiarowa

plywu zależy poza tym od temperatury t i przyrostu ciśnienia na sprężarce Δp . Ta ostatnia wielkość wraz z mierzonym równocześnie za pomocą barometru ciśnieniem otoczenia decyduje o wartości sprężu. W sumie więc, jeśli zależności między tymi wielkościami wykazują pewną prawidłowość, to także na pewno uzyska się i prawidłową, właściwą charakterystkę sprężarki. Jeśli natomiast w zależnościach tych wystąpią jakieś odchylenia lub nieciągłości, to z miejsca możemy nasze badanie uzupełnić dalszymi punktami, uruchamiając sprężarkę i wykonując dodatkowe pomiary.



Rys. 10.10. Charakterystyka sprężarki przedstawiona w postaci zależności między wielkościami bezpośrednio mierzonymi:

Δp — przyrost ciśnienia na sprężarce, t — temperatura powietrza za sprężarką, H — spadek ciśnienia na zwężce

OBSERWACJA

Eksperyment wyrósł z obserwacji, która nadal jednak stanowi jego nieodłączną część składową. Obserwacja twórcza, to jest taka, o jaką głównie chodzi w metodzie eksperymentalnej, zawiera w sobie dostrzeżenie rzeczy i zjawisk oraz określenie ich cech charakterystycznych w stosunku do rzeczy i zjawisk znanych lub poprzednio zaobserwowanych.

Dobrym przykładem twórczej obserwacji jest następująca historia. Pewnego dnia do pracowni francuskiego fizjologa Klaudivsza Bernarda (1813—1878) przyniesiono z targu króliki. Bernard zauważył, że wydalany przez nie mocz jest klarowny i kwaśny, a nie, jak to zwykle bywa u trawożernych, mętny i zasadowy.

Domyślił się on, że te objawy mięsożerności były następstwem trawienia przez króliki własnych tkanek, spowodowanego głodem. Mniemanie to poparł doświadczeniem, w którym stwierdził, że kolejne karmienie i głodzenie królików zmieniało odczyn moczu tak, jak to pierwotnie przewidywał. Chcąc uzyskać dowód bezpośredni, zaczął karmić króliki mięsem. Zgodnie z przewidywaniem, króliki wydalały mocz kwaśny. Aby zakończyć eksperyment, dokonał sekcji tych królików. Udało mu się dostrzec, że białe grudki limfatyczne, zawierające mleczne wytworzone z zemulgowanego tłuszczu, są widoczne w niższej części dwunastnicy, około 30 cm poniżej odźwiernika. Zwróciło to jego uwagę, ponieważ w dwunastnicy psów znajdują się one wyraźnie znacznie wyżej, tuż pod odźwiernikiem. Po ściślejszej obserwacji zauważył, że miejsce, gdzie grudki limfatyczne zawierają mleczne, zbiega się z ujściem przewodu trzustki. To doprowadziło go do odkrycia roli soku trzustkowego w trawieniu tłuszczów.

Każda obserwacja jest czymś więcej niż zwykłe widzenie. Zawiera ona mianowicie zawsze dwa elementy:

- postrzeżenie zmysłowe (najczęściej wzrokowe);
- element umysłowy, który przybiera kształt przynajmniej jednego wniosku.

W związku z tym analiza aktu obserwacji polega na prawidłowym rozróżnieniu między tym w wyniku obserwacji, co rzeczywiście było postrzeżone, a tym, co jest wnioskiem z tego postrzeżenia.

Ta nierozzerwalna więź postrzeżenia i wnioskowania jest następstwem faktu, że nie potrafimy opisać żadnego zjawiska lub rzeczy, nie wprowadzając czegoś więcej niż to zjawisko lub rzecz. Jeśli chcemy zarejestrować jakąś własną obserwację na nasz użytek lub użytek innych, to przede wszystkim musimy stwierdzić podobieństwo między zaobserwowanym zjawiskiem a jakimś innym znanym nam uprzednio.

W istocie każdego opisu leży, że jest on ustaleniem podobieństwa lub podobieństw. Niepodobna więc wyrazić w słowach wyniku obserwacji, nie dokonując aktu, który ma cechę charakterystyczną dla metody indukcyjnej. Zawsze bowiem wprowadza się coś, co nie było objęte samą obserwacją. Może to być na przykład jakieś pojęcie wspólne danemu zjawisku z innymi zjawiskami, z którymi ono zostaje porównane. Mówiąc więc o jakiejś obserwacji, upodabniamy ją do innych zjawisk już uprzednio zaobserwowanych i sklasyfikowanych. Jeśli widzę jakiś przedmiot, o którym mówię, że jest zielony, to stwierdzam przez to, że zakwalifikowałem go do klasy przedmiotów, które zwykliśmy nazywać zielonymi. Należy zauważyć, że jest to jedyny sposób zapisywania obserwacji.

Aby zaobserwowany fakt można było uznać za prawdziwy, należy przede wszystkim stwierdzić, czy to rzeczywiście była obserwacja, czy tylko wniosek lub też wyraźnie zakreślić granicę między obserwacją i wnioskiem. Idąc na przykład ulicą, słyszymy za sobą głos człowieka. W języku potocznym uchodziłoby to za postrzeżenie bezpośrednie. Ale przecież jedyną rzeczą, która jest postrzeżeniem, jest to, że słyszymy dźwięk. Że dźwięk jest głosem i że ten głos jest głosem człowieka, to nie są postrzeżenia, lecz wnioski.

Źródłem błędów obserwacji są więc albo złudzenia zmysłów, albo błędne wnioskowanie. Wbrew pozorom w praktyce spotykamy się częściej z tym drugim przypadkiem. Gdy skrzyżuję dwa palce (zakładając palec środkowy na wskazujący) i obejmę nimi jakiś wąski przedmiot na przykład ołówek, to zamknąwszy oczy mam przeświadczenie, że dotykam dwu ołówków, a nie jednego. Ale to nie dotyk został oszukany. Złudzenie tkwi w naszym sądzie. Zmysły dają tylko wrażenia i te są rzeczywiste. Sąd natomiast opiera się na pewnym przyzwyczajeniu, które jest następstwem faktu, że nasze palce dotykają przedmiotów stale w pewien określony sposób.

Jakość obserwacji zależy od tego, kto i w jakich warunkach jej dokonuje. Różni ludzie oglądając ten sam widok dostrzegają różne rzeczy, w zależności od swych zainteresowań. W krajobrazie miejskim muzyk dostrzeże harmonizujące i dysonujące ze sobą odgłosy, botanik różne gatunki roślin, malarz rozmaite barwy, kształty i odcienie, rolnik urodzaje, a zwykła mieszkanka miasta, nie mająca żadnego z wymienionych zainteresowań, dostrzeże jedynie, że krajobraz jest romantyczny.

Często zdarza się, że nie dostrzegamy rzeczy, którą wiele razy widzieliśmy. Jeśli od wielu lat pracujemy w źle zorganizowanej instytucji, to na ogół nie zauważamy braków i niedociągnięć, które rzucają się nieraz od razu w oczy każdemu nowo przyjętemu pracownikowi.

Najważniejszą jednak kwestią, z której należy zdać sobie sprawę, jest nie tylko to, że obserwatorzy pomijają rzeczy istotne, lecz, co gorsze, że dodają często całkowicie fałszywe obserwacje. Wiele z nich można przypisać faktowi, że nasz umysł ma skłonność do podświadomego wypełniania luk w obserwacji, zgodnie z naszymi poprzednimi doświadczeniami i zasobem wiedzy oraz ze świadomym oczekiwaniem. W części wnioskowej obserwacji często jest więcej domysłu niż rzeczywistości. Zjawisko to jest tak powszechne, że wykorzystuje się je często jako jeden z podstawowych trików filmowych. Ekran filmowy ukazuje na przykład oddzielnie ścigającego lwa oraz uciekającego człowieka. Po szeregu powtórzeń tych obrazów widzimy w końcu lwa skaczącego na coś w wysokiej trawie. I chociaż ani lew ani człowiek nigdy nie zjawili się razem, wszyscy widzowie są przekonani, że widzieli lwa skaczącego na człowieka.

Innego przykładu takiego subiektywnego błędu dostarcza następująca znana anegdota. Pewien lekarz w czasie ćwiczeń ze studentami zanurzył palce w moczu chorego na cukrzycę, by sprawdzić smak moczu. Następnie polecił zrobić to samo studentom. Studenci robili to niechętnie i ze wstrętem, lecz zgodzili się, że mocz był słodki. „Zrobiłem to — powiedział lekarz — aby nauczyć was, jak ważne jest obserwowanie szczegółów. Gdybyście dobrze uważali, dostrzeglibyście, że zanurzyłem w moczu palec środkowy, a oblizałem wskazujący”.

Na podobnych efektach wynikających z nieścisłości obserwacji wzrokowych oparte są różne i nieraz bardzo efektowne sztuczki iluzjonistów i kuglarzy.

Jak trudne jest dokonywanie dokładnych obserwacji, ilustruje następujące wydarzenie. Na pewnym kongresie psychologów w czasie jednego z posiedzeń na salę nagle wbiegł jakiś mężczy-

zna, goniony przez drugiego, który był uzbrojony w pistolet. W ciągu niespełna pół minuty na sali rozegrała się krótka walka, padł strzał i obaj mężczyźni wybiegli z sali. Natychmiast potem przewodniczący poprosił obecnych o opisanie tego, co zaszło. Obserwatorzy nie wiedzieli, że całe zajście zostało uprzednio przygotowane, wystudiowane i sfilmowane. Na czterdzieści przedstawionych sprawozdań tylko jedno zawierało mniej niż 20% błędów dotyczących faktów zasadniczych, w czternastu sprawozdaniach ilość błędów wahała się od 20 do 40%, a dwadzieścia pięć sprawozdań zawierało ponad 40% błędów. Zjawiskiem specjalnie godnym uwagi było to, że w przeszło połowie sprawozdań 10% szczegółów było oczywistym wymysłem. Należy zauważyć, że wynik ten otrzymano w bardzo korzystnych warunkach. Całe wydarzenie było krótkotrwałe i mocno zwracające na siebie uwagę, a szczegóły zostały natychmiast zapisane przez ludzi nawykłych do obserwacji naukowych i niezainteresowanych osobie incydentem.

Zanim przystąpi się do rozpatrywania wartości zarejestrowanej obserwacji, należy się upewnić, czy opis zjawiska nie jest w dużym stopniu odbiciem charakteru i uczuć obserwatora. Franciszek Bacon powiedział, że umysł ludzki przypomina mu nierówne zwierciadło, które zawsze odbija zjawiska przyrody niekształcąc je. Nie chodzi tu o rozmyślnie fałszowane wyniki obserwacji lub błędy powodowane wadliwą pamięcią czy niedoskonałymi warunkami, w których przeprowadzano obserwacje. Nawet gdy jakiś fakt obserwuje się wielokrotnie, a potem z największą dokładnością i starannością zapisuje to, co się obserwoowało, skłonność do błędu istnieje. Trudno znaleźć ludzi, którzy potrafią z idealną uczciwością stwierdzać fakty zgodne i niezgodne z ich poglądami lub życzeniami.

Skłonność obserwatorów do spostrzegania sprzyjających zdarzeń i zapominania nie sprzyjających była już nie raz stwierdzona. Dlatego, gdy ma się wykonać dużą serię obserwacji na przykład astronomicznych lub meteorologicznych, dobrze jest kiedy pracę rachunkową, będącą podstawą do późniejszych wniosków, wykonywają pracownicy niezainteresowani w spodziewanych wynikach. Uzyskane tym sposobem dane są całkowicie bezstronne. Oczywiście tak biernymi obserwacjami, jak i obserwacją w eksperymencie powinni kierować ludzie, którzy wiedzą, na co należy zwrócić uwagę. Obserwator dostrzeże wiele najważniejszych rzeczy tylko wtedy, gdy jest zaciekawiony i gdy nim kieruje nadzieja sprawdzenia teorii. Gdy praca nie ma charakteru mechanicznego, żaden pomocnik nie zastąpi twórczych spostrze-

zeń eksperymentatora prowadzącego badania. A więc owoenie obserwujący badacz musi łączyć w sobie dwie zasadnicze cechy:

— musi sobie w oparciu o przyjętą teorię wyraźnie uświadomić, co chciałby ujrzeć i jakich wyników się spodziewa;

— powinien jednak przy tym mieć taką bezstronność i giętkość umysłu, które pozwolą mu przyjąć nie sprzyjające wyniki i w związku z tym odrzucić błędne poglądy.

Warunki nowoczesnej cywilizacji sprzyjają zanikaniu zdolności obserwacyjnych. Można je jednak rozwinąć wyrabiając w sobie stały zwyczaj dociekliwego, aktywnego obserwowania zjawisk. Dobrze rozwinięte zdolności obserwacyjne są często ważniejsze w pracy twórczej niż wielki zasób akademickich wiadomości. Dotyczy to wszystkich twórców: malarzy, poetów, dramaturgów, konstruktorów i naukowców. Wyrabianie w sobie zdolności obserwacyjnych odbywa się według tych samych zasad co ćwiczenie każdej innej czynności. Z początku należy zaprawiać się do tego świadomie i zmusznie, lecz z biegiem czasu następuje wprawa, tak że zaczyna się obserwować podświadomie i nawyk ten ustala się.

Obserwacja twórcza powinna być wnikliwa, to znaczy, że powinna w miarę potrzeby dotyczyć nawet najdrobniejszych szczegółów. Należy szeroko korzystać w niej z szeregu metod instrumentalnych i wizualnych. Prawie zawsze godne polecenia jest szkicowanie oraz stosowanie fotografowania i filmowania. Umysł ludzki jest szczególnie wrażliwy na zmiany i różnice. Korzystamy z tego oczywiście w obserwacji naukowej. W nauce jednak bardzo ważne jest dostrzeganie podobieństw i korelacji między rzeczami i zjawiskami, które pozornie nie wykazują żadnego związku. Takie zależności może odkryć tylko wnikliwa obserwacja. Związek między błyskawicą a iskrzeniem wywołanym przez tarcie jest dla nas obecnie czymś oczywistym. Jednak przed Benjaminek Franklinem związku tego nikt się nie domyślał.

Ponieważ nie można zaobserwować wszystkiego, należy obserwowane fakty różnicować i próbować wybierać tylko to, co wydaje się być znamienne. Większość zdobywczy naukowych ma swe źródło w zdolności wybierania tego, co jest godne obserwacji. Zdolność ta jest często czynnikiem decydującym o powodzeniu lub niepowodzeniu całej pracy badawczej, którą należy prowadzić umysłem wolnym od uprzedzeń. Przeprowadzając jakiekolwiek doświadczenie powinno się świadomie szukać rzeczy i zjawisk spodziewanych i niespodziewanych, a przede wszystkim skojarzeń i związków między rzeczami dostrzeganymi a tymi,

które już znamy. To porównywanie rzeczy nowych ze starymi odbywa się często w podświadomości. Obserwator uświadamia sobie rzeczy czymś wyróżniające się już nawet wtedy, gdy nie mógł jeszcze zauważyć wszystkich szczegółów. Staje się to często źródłem wielu błędów. Ale o wiele więcej błędów można popełnić, podchodząc do obserwacji z pewnym dogmatycznym nastawieniem, z którego wynika oczekiwanie określonych szczegółów. Takie nastawienie może doprowadzić do przeoczenia zjawisk nieprzewidzianych. Możemy przez to z jednej strony wyciągnąć fałszywe wnioski z poczynionych obserwacji, z drugiej zaś nieodwracalnie stracić szansę odkrycia czegoś oryginalnego.

Pamiętać bowiem należy, że w rozwoju nauki przypadek z natury rzeczy musi odgrywać istotną rolę. Wynika to po prostu stąd, że na ogół nie wiemy, gdzie należy szukać zjawisk odmiennych od znanych. To też nie dziwny się, że z przypadkowych spostrzeżeń powstała wielka wiedza ludzka, którą obecnie dysponujemy. Ale przypadek na ogół jest tylko punktem wyjścia. Jakaś dobrze wykorzystana przypadkowa obserwacja naprowadza nas na tysiące dalszych, wykonanych planowo i z pewnym określonym celem. Ktoś, gdzieś, kiedyś pierwszy zaobserwował dziwne zachowanie się magnezu, ktoś inny niezrozumiałe ruchy papierków powodowane przez bursztyn; Galvani zauważył skurcz żabiej nóżki, a Malus zjawisko polaryzacji. To były właśnie owe przypadkowe obserwacje, które stały się zaczątkiem nauki.

W każdej obserwacji musimy posłużyć się przynajmniej jednym zmysłem. Wynika stąd, że zakres naszej wiedzy może w związku z tym ulec ograniczeniu wskutek ograniczoności wchodzącego w grę zmysłu. Dla człowieka pierwotnego świat był tak wielki, jak wielki był zasięg jego zmysłów. Wszystko, czego nie mógł zobaczyć, dotknąć, usłyszeć, posmakować lub powąchać, nie istniało. Nie istniał dla niego między innymi cały wielki świat zjawisk elektrycznych i magnetycznych, nie objętych żadnym zmysłem, przynajmniej dopóty, dopóki nie stykały się one z innymi zjawiskami natury świetlnej czy akustycznej, takimi jak pioruny czy grzmoty.

Przeciętny człowiek dzisiejszy posiada właściwie w codziennym życiu te same granice zasięgu wrażeń zmysłowych, co człowiek pierwotny, może nawet w niektórych przypadkach bardziej jeszcze przytępione i zwężone, ale pomimo to jego świat jest znacznie większy i bogatszy, gdyż zawiera poza bezpośrednio zdobytymi wrażeniami zmysłowymi jeszcze szereg wiadomości uzyskanych za pomocą precyzyjnych przyrządów i aparatów technicznych oraz metod wizualnych, rozszerzających i powiększających wie-

lokrotnie granice zdolności rozpoznawczych jego zmysłów. Do takich aparatów należą między innymi: lunety i radioteleskopy, powiększające nasz świat na zewnątrz, przyrządy pomiarowe elektryczne (amperomierze, woltomierze, galwanometry, komórki fotoelektryczne itd.) tłumaczące sens zjawisk elektrycznych na język dostępny naszym zmysłom, aparaty rentgenowskie oraz mikroskop zwykły i mikroskop elektronowy, odsłaniające przed nami niektóre tajemnice otaczającego nas świata mikrokosmosu.

Mikroskopy, przede wszystkim w medycynie, biologii i technice, stają się niezbędnym przyrządem codziennego użytku, otwierającym możliwości wkraczania w obszar zupełnie innych wymiarów niż te, z którymi się powszechnie stykamy.

Obserwowanie świata mikroskopowego uzależnione jest oczywiście od powiększenia mikroskopu. Każde zwiększenie wielkości tego powiększenia otwiera przed nami nowe szczegóły, nowe twory i nowe nie znane dotąd prawa przyrody. Niestety, w zwykłych mikroskopach optycznych granica maksymalnego powiększenia została już osiągnięta i dalszy rozwój techniki mikroskopowej nie wróży już nowych możliwości.

Teoria mikroskopu wyjaśnia nam przyczynę ograniczenia tych możliwości powiększenia, mianowicie wykazuje, że odległość dwóch najbliższych punktów, jakie można jeszcze rozróżnić w mikroskopie (tzw. zdolność rozdzielcza mikroskopu), jest tego samego rzędu wielkości co długość fali światła, którym oświetlamy badany przedmiot. Zatem im mniejsza jest długość fali światła, tym mniejsze przedmioty możemy oglądać w mikroskopie. Ponieważ długości fal światła widzialnego leżą w granicach od $0,4$ — $0,8 \mu$, przeto najmniejsze przedmioty, jakie możemy jeszcze oglądać pod mikroskopem w normalnych warunkach, w świetle zwykłym są rzędu $0,4 \mu$. Stosowanie fal krótszych (ultrafioletowych) wymaga użycia optyki kwarcowej oraz metody fotograficznej zamiast obserwacji bezpośredniej, ponieważ promienie ultrafioletowe są niewidzialne. Jednak i ten sposób nie daje dużych możliwości, bo i optyka kwarcowa przepuszcza światło ultrafioletowe tylko do pewnej długości fali. Ostatecznie więc nawet po zastosowaniu dalszych ulepszeń, takich jak wprowadzenie pomiędzy przedmiot badany i obiektyw cieczy o dużym współczynniku załamania światła (co zwiększa zdolność rozdzielczą mikroskopu), otrzymuje się najniższą granicę widzialności za pomocą zwykłych mikroskopów rzędu $0,1 \mu$.

Ponieważ jednak z poruszającymi się elektronami związane są fale długości poniżej 1 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-4} \mu$), więc można by mieć nadzieję, że używając elektronów zamiast fal światła granicę tę

da się przekroczyć. Istotnie udało się zbudować przyrząd do tego celu, zwany mikroskopem elektronowym. Przyrząd ten przypomina budową lampę oscyloskopową. Żarząca się katoda wysyła elektrony rozpędzone napięciem kilkudziesięciu tysięcy woltów doprowadzonym między katodą i anodą. Gdy na drodze wiązki elektronów wstawimy przedmiot o dostatecznie małej grubości, aby elektrony przez niego łatwo przenikały, ulegają one dyfrakcji. Ugięte od szczegółów przedmiotu elektrony zbiera układ soczewek elektronowych, wytwarzając powiększony obraz przedmiotu. Obraz powiększa się jeszcze raz przez drugi układ soczewek, podobnie jak w zwykłym mikroskopie. Ostatecznie obraz przedmiotu otrzymuje się na ekranie fluoryzującym lub kliszy fotograficznej.

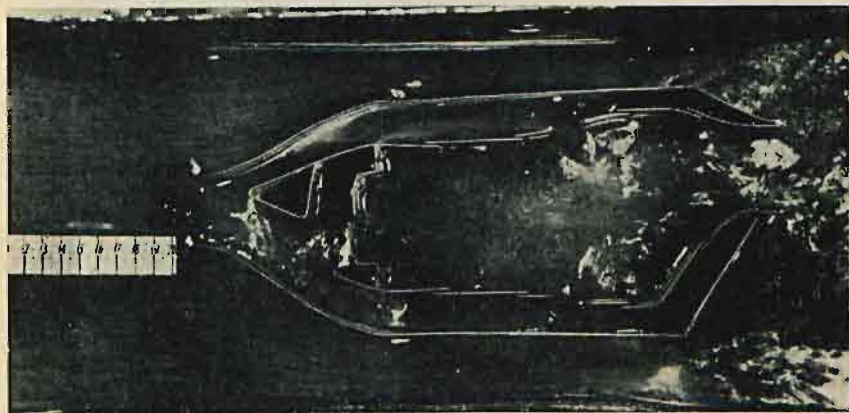


Rys. 11.1. Zdjęcie dokonane za pomocą mikroskopu elektronowego: bakterie Coli z atakującymi je wirusami. Powiększenie 20 000 razy

Oczywiście wewnątrz mikroskopu konieczna jest próżnia, toteż mikroskop elektronowy musi być na stałe połączony z pompą próżniową. Mikroskop elektronowy daje o wiele większe powiększenia od mikroskopu zwykłego. Ze względu na stosowaną w nim długość fali, przeszło 1000 razy mniejszą od długości fali światła, powinniśmy tą drogą móc uzyskać powiększenie dochodzące do miliona. Zdolność rozpoznawcza już osiągnięta w tych mikroskopach wynosi kilkanaście Å.

Mikroskop elektronowy znajduje ogromne zastosowanie w bardzo wielu gałęziach nauki i techniki, zarówno w świecie nieożywionym, jak i żywym. Jednym z największych osiągnięć naukowych uzyskanych za pomocą mikroskopu elektronowego było wykrycie wirusów, najmniejszych ze znanych obecnie istot żywych. Rozmiary wirusów mieszczą się w granicach $0,01 \div 0,3 \mu$. Fotografia na rys. 11.1 przedstawia wirusy (bakteriofagi) atakujące bakterie (*Bact. Coli*). Zdjęcie wykonano oczywiście za pomocą mikroskopu elektronowego; powiększenie: 20 000 razy.

Dla ułatwienia lub czasem w ogóle umożliwienia obserwacji opracowano szereg metod wizualnych, które znalazły powszechne zastosowanie w technice eksperymentu. W aerodynamice i hydrodynamice stosuje się często sposoby unaoczniania przepływu, nie wymagające użycia układów optycznych. I tak na przykład wprowadzenie cieczy barwnej do przepływającego strumienia cieczy bezbarwnej pozwala obserwować burzliwość ruchu. To samo można uzyskać wprowadzając spaliny oleju do strumienia gazu.



Rys. 11.2. Obraz przepływu przez model pierścieniowej komory spalania badany w kanale wodnym. Wizualizacja uzyskana za pomocą likopodium

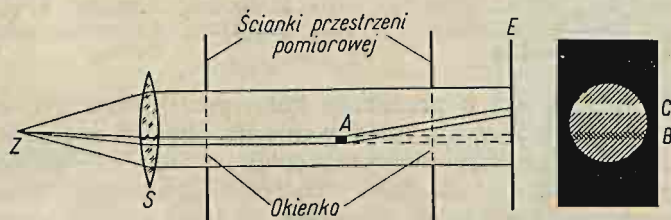
Ta ostatnia metoda obrazuje poza tym przebieg linii prądu oraz wirowość ruchu. Podobne efekty otrzymuje się, pokrywając strumień cieczy opływającej badany model nasieniem likopodium. Ostatni sposób wykorzystano przy poglądowym badaniu przepływu przez komorę spalania w kanale wodnym przedstawionym na rys. 11.2.

Opisane metody nadają się głównie do obserwacji jakościowych. W pewnych przypadkach, opierając się na dodatkowych założeniach, można otrzymać wyniki ilościowe. Przykładem tego są badania konwekcji wymuszonej dokoła pręta cylindrycznego zilustrowane na załączonym zdjęciu (rys. 11.3). Pręt okręcono bibułą nasyconą kwasem solnym. Do przepływającego powietrza dodawano par amoniaku. Powstałe białe pary salmiaku można fotografować. Opierając się na identyczności równań przenikania ciepła i masy z rozkładu koncentracji par można określić rozkład temperatury.

Rys. 11.3. Obraz konwekcji wymuszonej wokół pręta cylindrycznego. Wizualizacja uzyskana wskutek powstających na powierzchni pręta par salmiaku



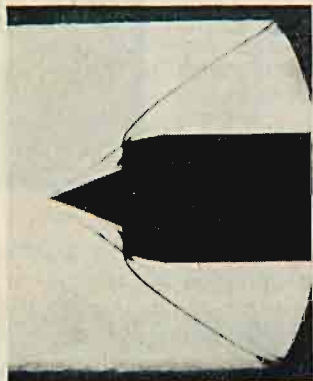
Uzyskanie w pełni ilościowych wyników umożliwiają jednak dopiero metody z zastosowaniem układów optycznych. Metody te opierają się na zjawisku zmiany współczynnika załamania światła wraz ze zmianą gęstości ośrodka. W badaniach przepływów naddźwiękowych oraz przepływów z wymianą ciepła stosuje się przeważnie dwie metody: metodę cieniów oraz metodę smug.



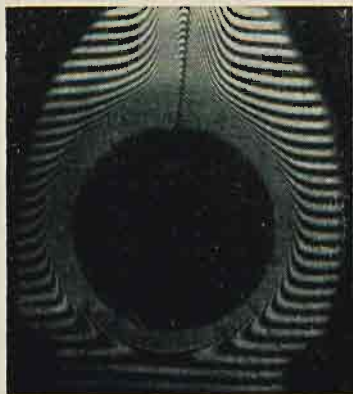
Rys. 11.4. Zasada metody cieniów

Zasadę metody cieniów ilustruje rys. 11.4. Z punktowego (np. lampa łukowa) źródła światła Z umieszczonego w ognisku soczewki S promienie świetlne przechodzą przez obszar wypełniony powietrzem (może to być przestrzeń pomiarowa z umieszczonym w niej badanym obiektem) i padają na ekran E . Ekran można zastąpić matówką lub kliszą aparatu fotograficznego. Jeżeli powietrze w przestrzeni między soczewką i ekranem jest jednorodne, to ekran będzie równomiernie oświetlony. Jeśli natomiast w tej przestrzeni znajdzie się słupek powietrza A (rys. 11.4) o nieco innej gęstości i wobec tego nieco innym współ-

czynnika załamania niż pozostała masa powietrza, to na ekranie pojawi się ciemniejszy pasek B w miejscu odpowiadającym położeniu słupka A oraz jaśniejszy pasek w miejscu C , do którego dotrą załamane w słupku A promienie świetlne. Fotografije na rys. 11.5 oraz 11.6 ilustrują zastosowanie metody cieniów: rys. 11.5. do przepływów naddźwiękowych (w tym konkretnym przypadku przepływ odbywa się z prędkością odpowiadającą liczbie Macha 2,3), rys. 11.6 do badania konwekcji swobodnej



Rys. 11.5. Obraz fal ciśnieniowych na wejściu do dyfuzora naddźwiękowego. Metoda cieniów



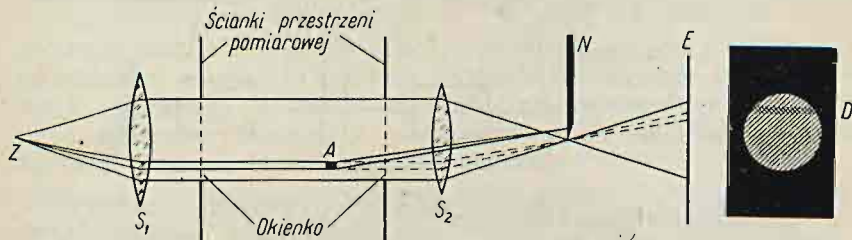
Rys. 11.6. Obraz konwekcji swobodnej dookoła pręta o przekroju kołowym. Metoda cieniów

wokół gorącego pręta o przekroju kołowym. Pierwsza z wymienionych fotografii pozwala między innymi określić położenie oraz kąt pochylenia fal ciśnieniowych, co przy znanych wartościach gazodynamicznych parametrów wolnego strumienia umożliwia wyznaczenie ich za falą. Z fotografii drugiej można wyznaczyć rozkład gęstości, a tym samym i rozkład temperatur wokół pręta. Zadanie to jest dość proste, gdyż linie stałej gęstości stanowią miejsce geometryczne punktów, dla których odchylenie prążków jest stałe.

Zasadę metody smug przedstawia rys. 11.7. Promienie świetlne wychodzące ze źródła światła Z przechodzą przez soczewkę S_1 , przestrzeń pomiarową, soczewkę S_2 i padają na ekran E umieszczony w odległości większej niż ogniskowa soczewki S_2 od tej soczewki. W ognisku soczewki S_2 znajduje się ostrze N .

Promienie, które ulegną załamaniu w słupku A , nie przetną się w ognisku soczewki S_2 , ale bądź padną na ostrze N tak, jak to widać na rys. 11.7, bądź też przejdą pod ostrzem i padną na

ekran. Oczywiście zależy to od tego, czy w słupku A powietrze jest gęstsze, czy też rzadsze niż w pozostałej masie powietrza. W pierwszym przypadku otrzymamy na ekranie ciemny pasek D (rys. 11.7), w drugim przypadku — pasek jasny. Rys. 11.7 nie

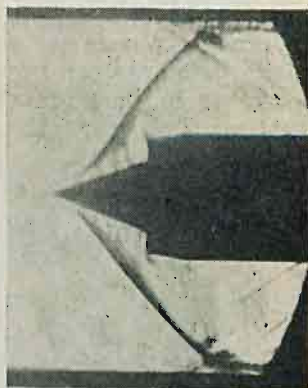


Rys. 11.7. Zasada metody smug

uwzględnia przypadku drugiego, by rysunku zbyt nie zaciemniać. Zastosowanie metody smug przedstawiono na rys. 11.8, który ilustruje układ fal uderzeniowych powstających na wejściu do dyfuzora przy przepływie naddźwiękowym. Jest to ten sam dyfuzor, który pokazywany jest na rys. 11.5. Obraz przepływu jest jednak nieco inny ze względu na zmienione dławienie strumienia przepływającego przez dyfuzor.

W badaniach wytrzymałości materiałów stosuje się bardzo wygodną metodę polaryzacyjno-optyczną, która poza wizualnym obrazem rozkładu naprężeń w badanym modelu pozwala dość ściśle określić ich wielkość. Metoda ta ogromnie ułatwia dobór najdogodniejszego kształtu części maszyn oraz właściwych sił obciążających.

Podstawę metody polaryzacyjno-optycznej stanowią zjawiska, które umożliwiają ustalenie związku między zmianami właściwości optycznych, wywołanymi obciążeniami i naprężeniami badanego modelu, a wartościami tych naprężeń. Zjawiskiem fizycznym wykorzystywanym przy tego typu pomiarach jest zjawisko rozchodzenia się światła w ośrodkach izotropowym i anizotropowym. Pewne materiały przezroczyste (np. celuloid, żelatyna, fenolit, pewne gatunki szkła czy też niektóre rodzaje bakelitu), których

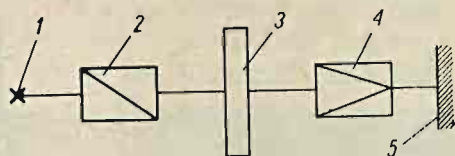


Rys. 11.8. Obraz fal uderzeniowych na wejściu do dyfuzora naddźwiękowego.
Metoda smug

używa się do wykonania modelu badanego przedmiotu, charakteryzuje właściwość sztucznej anizotropii, to znaczy, że w przypadku powstawania w nich naprężeń, nabierają one właściwości podwójnego załamania światła. Schemat urządzenia badawczego (polaroskopu) podano na rys. 11.9. Urządzenie składa

Rys. 11.9. Schemat polaroskopu:

1 — źródło światła,
2 — polaryzator, 3 —
badany model, 4 —
analizator, 5 — ekran



się z polaryzatora i analizatora, między którymi znajduje się badany model. Jeśli na układ pada światło, a w modelu występują naprężenia, to na ekranie powstaje obraz interferencyjny. Interferencja promieni następuje w wyniku nakładania się wiązki promieni zwyczajnych i nadzwyczajnych, otrzymanych w modelu podwójnie załamującym światło.

W przypadku modelu płaskiego punkty leżące na jednym prążku charakteryzuje jednakowa wartość maksymalnego naprężenia stycznego. W miejsce ekranu można w polaryzacyjnych urządzeniach pomiarowych umieścić płytę fotograficzną, na której otrzymuje się bezpośredni obraz pasm interferencyjnych. Takie fotografie zostały przedstawione na rys. 11.10 i 11.11.



Rys. 11.10. Obraz pasm interferencyjnych w modelu zamocowania łopatkki sprężarki osiowej

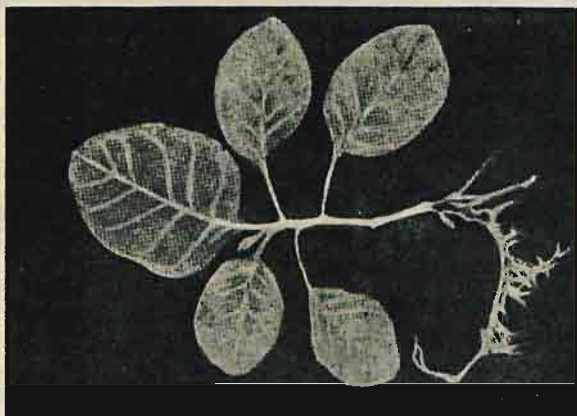


Rys. 11.11. Obraz pasm interferencyjnych w modelu współpracujących zębów kół zębatach

Pierwsza z nich przedstawia obraz naprężeń występujących w zamocowaniu łopatki sprężarki osiowej, druga zaś — w zębach współpracujących ze sobą kół zębatych.

Metodę polaryzacyjno-optyczną można zastosować także w badaniach odkształceń przy obciążeniach zmiennych i działaniu krótkotrwałych sił uderzeniowych. W tych przypadkach należy zwracać baczna uwagę na znaczne niekiedy różnice między właściwościami materiału modelu i badanej części. W celu utrwalenia zmiennych w czasie obrazów interferencyjnych najlepiej użyć aparatów filmowych przystosowanych do robienia zdjęć szybkich (nawet 64 000 zdjęć na sekundę i więcej).

Rozwój fizyki jądrowej dostarczył w ostatnich latach naukowcom i technikom nowego bardzo ważnego narzędzia badań, a mianowicie metody tzw. „atomów znaczonych”. Metoda ta umożliwia bezpośrednie śledzenie przebiegu procesów fizycznych, chemicznych, a nawet biologicznych. Polega ona na wprowadzeniu do badanego procesu atomów promieniotwórczego izotopu pierwiastka występującego w tym procesie. Atomy te w wyniku promieniotwórczości sygnalizują swą obecność w określonych punktach badanego układu. Można więc przy różnych analizach i badaniach



Rys. 11.12. Radioautograf fasoli zawierającej promieniotwórczy izotop węgla

przebiegu reakcji zastosować pierwiastek promieniotwórczy zamiast zwykłego, a następnie wyznaczyć jego zawartość w badanym produkcie lub rozmieszczenie na podstawie sygnałów promieniowania. Dokładność metody jest bardzo duża, gdyż na przy-

kład licznik Geigera-Müllera może zarejestrować nawet jednorazowy przebieg jednej naładowanej cząstki.

W zagadnieniu lokalizacji atomów znaczonych znajduje zastosowanie metoda radioautograficzna, oparta na oddziaływaniu promieniowania na kliszę fotograficzną. Jeśli badany preparat przyłoży się płaską stroną do kliszy fotograficznej, to w wyniku promieniowania znajdujących się w nim atomów promieniotwórczego izotopu otrzymuje się na niej odcisk badanego preparatu, przy czym wyraźnie widać skupienia atomów promieniotwórczych. Rys. 11.12 podaje przykładowy obraz radioautografu fasoli zawierającej promieniotwórczy izotop węgla.



ZAGADNIENIA METROLOGII

Postęp w każdej dziedzinie wiedzy stosowanej jest związany z postępowaniem w zakresie precyzji i pewności osiągniętych wyników pomiarów. Łączy się to z wprowadzaniem coraz dokładniejszych narzędzi i lepszych metod pomiarowych.

Narzędzia pomiarowe, uzupełniając jak gdyby nasze zmysły, rozszerzają i uściślają obserwacje.

Jednostki miary. Pomiarom nazywamy porównanie danej wielkości z inną wielkością tego samego rodzaju, uznaną za jednostkę miary. Jednostką miary jest umownie przyjęta i z dostateczną dokładnością ustalona konkretna wartość jakiegokolwiek wielkości, służąca do jej określenia. W celu jednoznacznego określenia wielkości podaje się liczbę wyrażającą, ile razy dana wielkość jest większa od jednostki miary oraz nazwę jednostki. Wynik pomiaru przedstawia się zwykle w następującej postaci:

wielkość = liczbowa wartość wielkości \times jednostka miary.

Liczbowa wartość wielkości charakteryzuje daną wielkość jedynie pod względem ilościowym, jej charakterystyka jakościowa natomiast jest zawarta w jednostce miary.

Na przykład

$$t = 4s$$

gdzie: t — jest symbolem wielkości (w danym przypadku czasu);

4 — liczbową wartością wielkości;

s — symbolem jednostki miary (sekundy).

Generalna Konferencja Miar obradująca w Paryżu w 1960 r. zatwierdziła system miar oparty na następujących sześciu podstawowych jednostkach:

długość	metr	m
masa	kilogram	kg
czas	sekunda	s

nateżenie prądu		
elektrycznego	amper	A
temperatura	stopień Kelwina	°K
światłość	kandela	cd

Jednostkami uzupełniającymi w tym systemie są:

kąt płaski	radian	rad
kąt bryłowy	steradian	sr

W pierwszej kolumnie podana jest oczywiście wielkość, w drugiej jednostka miary, w trzeciej natomiast jej symbol.

Oprócz powyższego układu jednostek, zwanego międzynarodowym (SJ), znajduje się w użyciu układ techniczny, w którym wielkość „masa” została zastąpiona wielkością „siła”, przy czym jednostką siły jest kilogram-siła [kG].

Poszczególne jednostki podstawowe są w układzie SJ zdefiniowane następująco:

— *metr* jest długością równą 1650763,73 długości fali w próżni promieniowania odpowiadającego przejściu pomiędzy poziomami $2p_{10}$ i $5d_5$ atomu kryptonu 86;

— *kilogram* jest masą międzynarodowego wzorca tej jednostki, przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar w Sevres;

— *sekunda* jest $1/31556925,9747$ częścią roku zwrotnikowego 1900 styczeń 0 godzina 12 czasu efemeryd;

— *amper* jest nateżeniem prądu elektrycznego, nie ulegającego zmianom, który przepływając w dwóch przewodach równoległych prostoliniowych o długości nieskończonej i przekroju okrągłym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości jednego metra od siebie, wytwarza między tymi przewodami siłę równą dwóm dziesięciomilionowym częściom niutona na każdy metr długości przewodu;

— *stopień Kelwina* jest $1/273,16$ częścią temperatury potrójnego punktu wody;

— *kandela* jest światłością wysyłaną w kierunku prostopadłym przez powierzchnię jednej sześćset tysięcznej części metra kwadratowego ciała doskonale czarnego w temperaturze krzepnięcia platyny pod ciśnieniem 101325 niutonów na metr kwadratowy.

Występująca w niektórych definicjach jednostka siły — niuton, jest w układzie JS jednostką pochodną. Jednostki pochodne służą do określania wielkości pochodnych, które tworzy się z wielkości podstawowych za pomocą definicyjnych równań tych wiel-

kości. Prędkość na przykład jest zdefiniowana w ruchu jednostajnym prostoliniowym jako stosunek drogi do czasu

$$v = \frac{s}{t}$$

gdzie: v — prędkość;
 s — droga (w metrach);
 t — czas (w sekundach).

Stąd otrzymuje się jednostkę prędkości jako pochodną jednostkę miary wyrażoną w metrach na sekundę [m/s].

Jednostką przyspieszenia na tej samej podstawie jest przyspieszenie, przy którym równomierna zmiana prędkości o jeden metr na sekundę następuje w czasie jednej sekundy [m/s²].

Podobnie wychodząc z definicyjnego równania siły

$$P = m a$$

gdzie: P — siła;
 m — masa [kg];
 a — przyspieszenie [m/s²],

można wyprowadzić jednostkę tej wielkości, a mianowicie niuton (N). Będzie to siła, która masie jednego kilograma nadaje przyspieszenie jednego metra na sekundę do kwadratu.

Relację między jednostką siły w układzie technicznym oraz układzie międzynarodowym ustala zależność

$$kG = 9,80665 \text{ N}$$

Metody pomiarów. Pomiar każdej wielkości fizycznej wymaga zastosowania określonej metody, która ustala sposób jego przeprowadzenia. Wybór metody zależy przede wszystkim od rodzaju i cech mierzonej wielkości, wymaganej dokładności i szybkości wykonania. Zależy on oczywiście także od możliwości aparaturowych oraz od warunków, w jakich ma być przeprowadzony.

W celu znalezienia wartości szukanej wielkości stosuje się, ogólnie biorąc, trzy rodzaje pomiarów: pomiary bezpośrednie, pośrednie i wielorakie.

Pomiary bezpośrednie są pomiarami najprostszymi. Polegają one na porównywaniu jakiejś wielkości z odpowiednim wzorcem miary (np. pomiar masy za pomocą wagi z odpowiednio wywzorcowanymi odważnikami) lub na pomiarze za pomocą przyrządu wyskalowanego w jednostkach tej samej wielkości (np. pomiar ciśnienia — manometrem). Pomiary bezpośrednie są bardzo szybkie i wygodne i dlatego stosuje się je chętnie w technice i życiu codziennym.

Pomiary pośrednie są o tyle bardziej skomplikowane od bezpośrednich, że wymagają pomiaru kilku wielkości związanych z wielkością mierzoną pewnymi zależnościami matematycznymi. Jeśli badana wielkość Y stanowi funkcję pewnych wielkości X, W, Z, \dots

$$Y = f(X, W, Z, \dots)$$

które są łatwiejsze do zmierzenia, to wtedy jej wartość oblicza się wstawiając w powyższe równanie wielkości otrzymane z pomiarów bezpośrednich.

Chcąc na przykład wyznaczyć oporność obwodu elektrycznego, można skorzystać z prawa Ohma

$$R = \frac{u}{i}$$

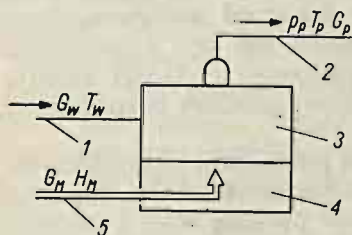
gdzie: R — oporność;

u — spadek napięcia;

i — natężenie.

Mierzac bezpośrednio woltomierzem spadek napięcia i amperomierzem natężenie, możemy oporność obwodu określić pośrednio, posługując się jego równaniem definicyjnym. Pomiar pośrednie umożliwiają zwiększenie dokładności wyznaczenia badanej wielkości, często bowiem wielkości X, W, Z, \dots można wyznaczyć z większą dokładnością aniżeli bezpośrednio wielkość Y .

W pewnych przypadkach, gdy bezpośredni pomiar wielkości mierzonej jest niemożliwy, a zależy nam na bezpośrednim odczycie (lub bezpośrednim zapisie), wtedy dane z przyrządów pomiarowych przekazujemy wprost na maszynę matematyczną, która samoczynnie wykonuje potrzebne operacje obliczeniowe.



Rys. 12.1. Schemat urządzenia kotłowego:

1 — przewód doprowadzający wodę (o wydatku G_w i temperaturze T_w), 2 — przewód odprowadzający parę (o wydatku $G_p = G_w$, temperaturze T_p i ciśnieniu p_p), 3 — wymiennik ciepła, 4 — palenisko 5 — przewód doprowadzający mazut do paleniska (o wydatku G_M i wartości opałowej H_M)

Na przykład w celu wyznaczenia sprawności kotła parowego opalanego mazutem (rys. 12.1) maszyna matematyczna musi wykonać działanie podane na schemacie rys. 12.2.

Sprawność jest obliczana w układzie dzielącym jako iloraz

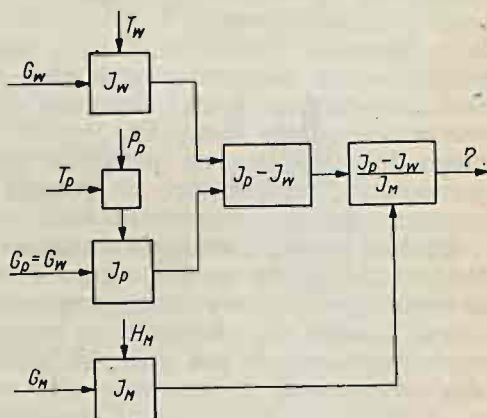
$$\eta = \frac{J_p - J_w}{J_M}$$

gdzie: J_p — entalpia pary,
 J_w — entalpia wody,
 J_M — ciepło wywiązane ze spalania się mazutu przypadające na jednostkę wytworzonej pary.

Ciepła składowe: J_p , J_w oraz J_M obliczane są przez integratory, którym danych dostarczają przyrządy pomiarowe zainstalowane w odpowiednich punktach urządzenia kotłowego. Przyrządy te przekształcają mierzone wielkości mechaniczne i termodynamiczne na odpowiednie impulsy elektryczne.

Rys. 12.2. Schemat obliczeń przy wyznaczaniu sprawności kotła:

J_w — entalpia wody, J_p — entalpia pary, J_M — ciepło wywiązane ze spalania się mazutu, przypadające na jeden kilogram wytworzonej pary



Są to:

G_w, T_w — wydatek i temperatura wody;
 G_p, T_p, P_p — wydatek, temperatura i ciśnienie pary;
 G_M, H_M — wydatek i wartość opałowa mazutu.

Działania matematyczne są wykonywane na zasadzie analogowej, a wynik przechodzi przez przetwornik i urządzenie programowe do maszyny piszącej; maszyna może zapisywać również dokładny czas, podawany z cyfrowego zegara.

Pomiary wielorakie występują wtedy, gdy szukaną wielkość wyznaczamy na podstawie szeregu pomiarów dokonywanych w różnych warunkach lub różnymi metodami. Pomiar wielorakim będzie na przykład pomiar współczynnika rozszerzalności liniowej jakiegoś materiału, gdy pomiaru dokonujemy w odniesieniu do wszelkich różnic temperatur i do prętów o różnych długościach czy przekrojach. Przy każdym pomiarze otrzymuje się

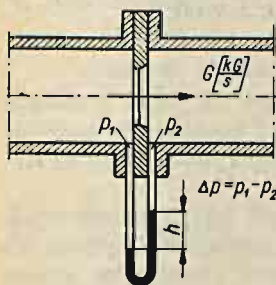
pewne wartości współczynnika rozszerzalności, które się porównuje i z których oblicza się wartość średnią. Tego rodzaju pomiary dają podstawę do ustalenia zakresu stowalności otrzymanych wyników i pozwalają uniknąć błędów systematycznych. Oczywiście i w tym przypadku pomiary sprowadzają się ostatecznie do pomiarów pośrednich i bezpośrednich.

Jak wynika z powyższego przeglądu, podstawowym pomiarem w każdym przypadku jest pomiar bezpośredni. Pomiary bezpośrednie mogą być realizowane za pomocą szeregu metod, z których najważniejszymi są: metoda odczytu bezpośredniego, metoda różnicowa, metoda zerowa i metoda porównawcza.

Najprostszą z tych metod jest metoda *odczytu bezpośredniego*. Stosujemy ją wówczas, gdy rozporządzamy narzędziem pomiarowym wywzorcowanym z odpowiednią dokładnością w jednostkach mierzonej wielkości. Pomiar polega w takim przypadku na bezpośrednim odczycie z podziałki. Wyznacza się przy tym od razu stosunek mierzonej wielkości do jednostki miary, w której wzorcowane było narzędzie. Pomiaru metodą odczytu bezpośredniego dokonuje się na przykład mierząc ciśnienie za pomocą manometru, temperaturę za pomocą termometru lub natężenie prądu za pomocą amperomierza.

Ogólnie biorąc, zasada działania większości przyrządów pomiarowych polega na wywoływaniu przez wielkość mierzoną ściśle określonej siły (nazywanej wewnętrzną), zależnej od tej wielkości. Z kolei siła wewnętrzna powoduje w mechanizmie przyrządu przesunięcia tak duże, że wywołana nimi reakcja (zwana siłą zewnętrzną) zrównoważy siłę wewnętrzną. Zatem określonemu położeniu mechanizmu przyrządu, sygnalizowanemu odpowiednim położeniem wskaźnika, odpowiada ściśle określona siła wewnętrzna, a więc i ściśle określona mierzona wielkość. Stąd metodę bezpośredniego odczytu nazywa się często metodą wychyłową.

Typowym przykładem metody wychyłowej jest określenie natężenia przepływu za pomocą zwężki (rys. 12.3). Spadek ciśnienia na zwężce Δp , ściśle zależny od natężenia przepływu G , jest siłą wewnętrzną, która wywołuje w manometrze hydrostatycznym spiętrzenie rtęci o wielkość h . W tym przypadku spiętrzenie rtęci jest siłą zewnętrzną równoważącą siłę wewnętrzną.



Rys. 12.3. Schemat urządzenia do pomiaru natężenia przepływu za pomocą zwężki

Powyższy efekt można opisać następującym równaniem

$$\Delta p = \gamma h$$

gdzie: γ — ciężar właściwy rtęci.

Każdemu więc wychyleniu rtęci w manometrze odpowiada w danych warunkach ściśle określone natężenie przepływu

$$G = f_1(\Delta p) = f_2(h)$$

Podobne zjawisko występuje przy indykowaniu silnika tłokowego za pomocą indykatora mechanicznego (rys. 12.4). W tym przypadku zmiana ciśnienia w cylindrze silnika (a tym samym i cylindrze indykatora) powoduje zmianę siły wewnętrznej

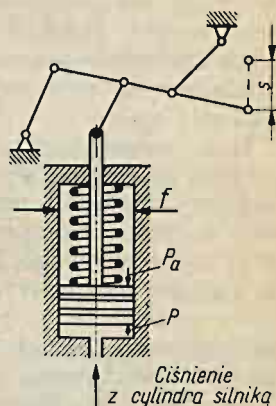
$$P_w = f(p - p_a)$$

gdzie f — przekrój cylindra;
 p — ciśnienie w silniku;
 p_a — ciśnienie atmosferyczne;
 P_w — siła wewnętrzna.

Siła wewnętrzna powoduje przesunięcie tłoczka, co znowu wywołuje napięcie sprężyny indykatora tak duże, że powstała reakcja zrównoważy siłę wewnętrzną

$$P_z = bs = P_w = f(p - p_a)$$

gdzie: b — stała sprężyny;
 s — przesunięcie rysika;
 P_z — siła zewnętrzna (reakcja).



Rys. 12.4. Schemat indykatora mechanicznego

Z powyższego równania wynika, że nadciśnienie w cylindrze jest wprost proporcjonalne do przesunięcia rysika.

Zasadniczą cechą metody wychyłowej jest to, że ustalenie stanu równowagi między siłą wewnętrzną i zewnętrzną zachodzi samoczynnie, to znaczy, że wskazanie wielkości mierzonej przez przyrząd nie wymaga specjalnych czynności ze strony obsługi. Metoda ta jednak nie należy do zbyt dokładnych. Przy pomiarach zmieniającej się wartości wielkości mierzonej zachodzą w układzie pomiarowym ciągle przesunięcia. Powoduje to zmianę oporów w przyrządzie, tak że każda wielkość jest określona z inną dokładnością. Poza tym metoda ta może czasem powodować tak duże zmiany w przebiegu samego zjawiska, że pomiar będzie bez wartości. Przykładem tego może być indykowanie małego silnika spalinowego (mała przestrzeń sprężania) indykatozem o stosunko-

wo dużej objętości cylindra. W tym przypadku pod koniec sprężania na skutek przesunięcia tłoczka indykatora, objętość cylindra indykatora do tego stopnia powiększy przestrzeń sprężania, że wywoła to zmniejszenie ciśnienia, a tym samym zmianę warunków pracy silnika. Rezultatem takiego pomiaru będzie więc fałszywy obraz zjawisk zachodzących w silniku.

Zwiększenie dokładności pomiaru umożliwia *metoda różnicowa*. Polega ona na pomiarze różnicy między badaną wielkością a wielkością jednorodną o znanej wartości. Zwiększenie dokładności wynika stąd, że na ogół mierzona różnica jest mała, można więc zastosować dokładniejszy przyrząd pomiarowy i w ostatecznym wyniku otrzymać mniejszy błąd względny. Można np. sprawdzać przymiar metrowy, porównując go metodą różnicową z metrem wzorcowym. Pozwala to na zastosowanie przy pomiarze optycznych aparatów porównawczych, umożliwiających pomiar z dużą dokładnością, przy czym błąd odniesiony do całkowitej wielkości jest minimalny.

Inną metodą, dokładniejszą jeszcze od różnicowej, jest *zerowa metoda pomiarów*. Polega ona na kompensowaniu efektu działania badanej wielkości przez działanie jednorodnej wielkości o znanej wartości. Kompensację ustala się za pomocą wskaźnika — przyrządu zerowego, który wskazuje zanik efektu. Przy pomiarze tą metodą można wyodrębnić dwie czynności:

— wywołanie w przyrządzie (ręczne lub automatyczne) siły zewnętrznej równej sile wewnętrznej, przy czym równość obu sił jest wskazywana położeniem zerowym wskaźnika;

— odczyt wielkości siły zewnętrznej, przy czym odczyt ten niczym się nie różni od podobnej czynności przy wychyłowej metodzie pomiaru.

Dogodność metody polega na tym, że można zwiększać dokładność pomiarów, stosując odpowiednio czulszy wskaźnik.

Klasycznym przykładem metody zerowej jest pomiar temperatury termoparą w układzie kompensacyjnym. Wywołana w termoparze siła elektromotoryczna e jest zależna od różnicy temperatur spoiny pomiarowej i porównawczej. Przy małej różnicy temperatur można założyć, że

$$t - t_0 = ae$$

gdzie: $t - t_0$ — różnica temperatur spoin;
 a — stała.

Schemat połączeń przy pomiarze *metodą zerową* przedstawia rys. 12.5. Natężenie prądu i reguluje się opornikiem R w obwodzie kompensacyjnym tak, aby galvanometr G w obwodzie kompensowanym wskazywał zero. W ten sposób siła we-

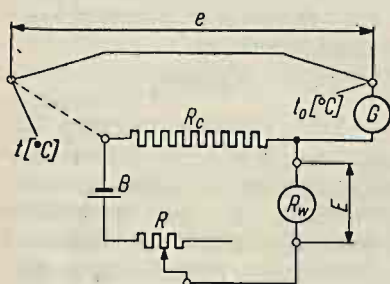
wewnętrzna — elektromotoryczna e została zrównoważona siłą zewnętrzną — przeciwnapięciem dawanym przez baterię B na oporniku R_c . Można więc napisać:

$$i = \frac{e}{R_c} = \frac{E}{R_w}, \text{ skąd } e = \frac{R_c}{R_w} E$$

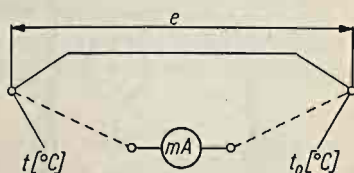
a więc

$$t - t_0 = aE \frac{R_c}{R_w} = f(E), \text{ gdyż } a \frac{R_c}{R_w} = \text{const}$$

Oporniki R_c i R_w znajdują się w stałej temperaturze i przy pomiarze nie ulegają zmianie.



Rys. 12.5. Schemat połączeń przy pomiarze siły elektromotorycznej termopary metodą zerową



Rys. 12.6. Schemat połączeń przy pomiarze siły elektromotorycznej termopary metodą wychyłową

Jeśli ten sam pomiar wykona się metodą wychyłową (schemat połączeń rys. 12.6), to można napisać, że natężenie prądu w obwodzie termopary, wywołane siłą termoelektryczną i mierzone miliamperomierzem, wyniesie

$$i = \frac{e}{R_s}$$

gdzie: R_s — opornik sumaryczny całego obwodu łącznie z miliamperomierzem.

W takim razie

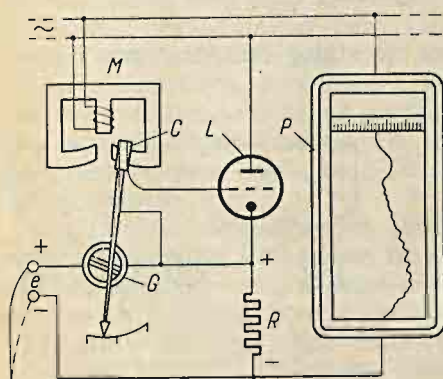
$$t - t_0 = aR_s i$$

Gdy $R_s = \text{const}$, otrzymuje się

$$t - t_0 = f(i)$$

Tak jednak nie jest, gdyż R_s ulega zmianie ze zmianą temperatury przewodów i ich długości.

Metoda zerowa daje możliwość pomiaru z bardzo dużą dokładnością, wymaga jednak w celu dokonania go określonego czasu, należy więc ją stosować, w wykonaniu normalnym, tylko do pomiaru wielkości nie ulegających szybkim zmianom. Można jednak uniknąć tego niedostatku, stosując w metodzie zerowej kompensację automatyczną. Odpowiednie urządzenie jest przedsta-



Rys. 12.7. Schemat połączeń przy pomiarze siły elektromotorycznej termopary metodą zerową z kompensacją automatyczną

wione na rys. 12.7. Wywołana w termoparze siła elektromotoryczna e jest równoważona napięciem o przeciwnym kierunku na oporniku R , przez który płynie prąd i , taki że

$$e = Ri$$

Przy zmianie temperatury spiny pomiarowej termopary ulegnie również zmianie wartość e , co spowoduje przepływ prądu w obwodzie termopary, wychylenie galwanometru G i związanej z mechanizmem obrotowym galwanometru przesuwnej cewki C , która znajduje się w polu magnetycznym ele-

ktromagnesu M zasilanego prądem z sieci. Przesunięcie cewki C wywoła wzrost lub zmniejszenie napięcia indukowanego w tejże cewce, przekazywanego na siatkę lampy elektronowej L , a ta z kolei wywoła zmianę natężenia prądu płynącego przez opornik R dotąd aż zajdzie równość

$$e_1 = Ri_1$$

Prąd z sieci płynie przez lampę L , opornik R oraz przez przyrząd P wskazujący jego wielkość i rejestrujący go. Ponieważ

$$e = Ri = f(t)$$

więc można podziałkę tego przyrządu wykonać od razu w $^{\circ}\text{C}$.

Podobna w zasadzie do metody zerowej jest metoda porównawcza, która polega na tym, że wielkość mierzona zastępuje się wielkością jednorodną o znanej wartości i porównuje efekty

działania na jakimś przyrządzie. Na przykład można zmierzyć określony opór elektryczny, zastępując go oporem znanym i posługując się pomiarem wartości natężenia prądu za pomocą amperomierza. Przez zmianę znanego oporu doprowadza się do tego, aby wychylenie amperomierza było w obu przypadkach jednakowe i wówczas porównuje wartość oporu nieznanego ze znanym oporem zastępczym. Metodę tę można z powodzeniem stosować oczywiście tylko wtedy, gdy ma się zespół odpowiednio dobranych znanych wielkości wzorcowych albo zmienny wzorec danej wielkości, odpowiednio wyskalowany.

W każdym pomiarze laboratoryjnym można wyróżnić trzy grupy następujących czynności elementarnych:

- czynności wstępne,
- pomiar właściwy,
- opracowanie wyników i czynności końcowe.

Pierwszą grupę tworzą czynności konieczne do przygotowania pomiaru i ustalenia programu, według którego ma przebiegać pomiar. Są to:

- wybór metody pomiaru,
- wybór przyrządu pomiarowego,
- ustalenie układu pomiarowego i określenie warunków pomiaru,
- montaż i kontrola układu pomiarowego.

Pomiar właściwy obejmuje następujące czynności elementarne:

- wybór wartości wielkości mierzonej,
- wybór zakresu pomiarowego,
- porównanie wartości wielkości mierzonej z wzorcem,
- odczytanie wyniku porównania,
- rejestracja wyniku pomiaru.

Pierwsza czynność elementarna pomiaru właściwego: wybór wartości wielkości mierzonej, zależy od ustalonego programu pomiaru, który powinien być szczególnie dokładnie opracowany przy pomiarze wielkości zmieniających się w czasie (to jest przy sporządzaniu charakterystyk punktowych), a nie rejestrowanych automatycznie. W tym przypadku częstotliwość pomiarów zależy od wartości pochodnej wielkości mierzonej względem czasu.

Czynności wyboru zakresu pomiarowego występują wtedy, gdy korzysta się z przyrządów wielozakresowych. Ułatwiają one zwiększenie dokładności pomiaru, gdy wartość wielkości mierzonej znajduje się na początku zakresu pomiarowego przyrządu.

Najważniejszą elementarną czynnością procesu pomiarowego jest porównanie wielkości mierzonej z wzorcem. Przyrządy wychyłowe czynność tę wykonują automatycznie, a wynikiem porównania jest ustalone wychylenie wskazówki. Czas potrzebny

na porównanie zależy przede wszystkim od własności dynamicznych mechanizmu przyrządu. Bywa on przeważnie dłuższy dla przyrządów dokładniejszych. Ogranicza to w dużym stopniu możliwość zwiększenia dokładności pomiaru wykonywanego przyrządem wychyłowym, jeżeli wielkość mierzona nie może być uważana w czasie pomiaru za stałą.

Celem dwu ostatnich czynności pomiaru właściwego — odczytu i rejestracji — jest utrwalenie jego wyników dla potrzeb dokumentacyjnych lub dalszej obróbki matematycznej. Czynności te stanowią poważne źródło omyłek i błędów subiektywnych i dlatego obecnie istnieje tendencja do budowy przyrządów, które czynności te automatyzują.

W skład ostatniej grupy czynności elementarnych wchodzi:

- matematyczne opracowanie wyników pomiaru,
- wyznaczenie dokładności pomiaru,
- interpretacja wyników pomiaru,
- opracowanie dokumentacji pomiaru (protokół),
- demontaż układu pomiarowego.

Najważniejszą i najtrudniejszą z tych czynności jest interpretacja wyników, której przeprowadzenie bywa niezbędne przy precyzyjnych pomiarach laboratoryjnych, podczas których istniejące wpływy czynników zewnętrznych lub użyta aparatura nie wykluczają powstania wieloznaczności i mogą być źródłem błędów tak systematycznych, jak i przypadkowych. Interpretacja ta opiera się na fizykalnej analizie zjawisk towarzyszących pomiarowi.

Charakterystyka i podział narzędzi pomiarowych. Wszelkie pomiary w nauce, technice i życiu gospodarczym są realizowane za pomocą narzędzi pomiarowych. Narzędzia pomiarowe można w ogólności podzielić na dwie grupy: wzorców miary i przyrządów.

Wzorcem miary nazywamy ciało fizyczne odtwarzające miarę jakiejś wielkości z określoną dokładnością. Jeżeli na pręcie wykonamy dwie kresy w pewnej odległości, to pręt ten będzie wzorcem długości, stanowiącej odległość tych dwu kres. Według powyższej definicji wzorcem jest każdy przymiar, pojemnik czy odważnik, a także niektóre ciała jak cynk, srebro lub złoto, których temperatury krzepnięcia należą do podstawowych punktów termometrycznych.

Przyrządy pomiarowe tym różnią się od wzorców, że stanowią pewien mechanizm. Przyrządy, które pozwalają bezpośrednio odczytać miarę wielkości mierzonej (np. waga uchylna, wodomierz, termometr) noszą nazwę bezpośrednich, takie zaś, które dla od-

czytania miary wymagają zastosowania wzorców, są przyrządami pośrednimi (np. waga odważnikowa).

Przed oddaniem do użytkowania każde narzędzie pomiarowe powinno być odpowiednio wywzorcowane i wyregulowane.

Wzorcowaniem nazywamy ogół czynności, mających na celu ustalenie odpowiedniości między miarą a wskazaniem narzędzia pomiarowego, regulowaniem natomiast — czynność doprowadzenia narzędzia pomiarowego do stanu należytej dokładności.

Miara wielkości mierzonej, którą podaje narzędzie miernicze, nazywa się jego wskazaniem nominalnym. Wskazanie poprawne otrzymujemy ze wskazania nominalnego, uwzględniając błąd narzędzia. Błędy określa się podczas wzorcowania. Różnicę między wskazaniem nominalnym i poprawnym nazywamy błędem bezwzględnym wskazania

$$e = X_n - X$$

gdzie: e — błąd bezwzględny wskazania;

X_n — wskazanie nominalne przyrządu;

X — miara poprawna wielkości mierzonej.

Aby lepiej zdawać sobie sprawę z dokładności przyrządów, wprowadzono pojęcie błędu względnego. Został on zdefiniowany jako stosunek błędu bezwzględnego do wskazania poprawnego

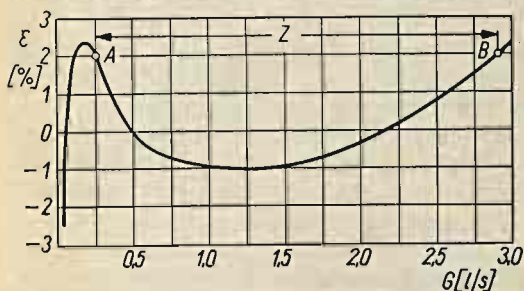
$$\varepsilon = \frac{X_n - X}{X}$$

Dla przyrządów pomiarowych wartość błędu zależy od warunków, w jakich wykonywany jest pomiar (np. temperatury, ciśnienia atmosferycznego, wilgotności) oraz od obciążenia. Zależność błędu od obciążenia w warunkach odniesienia (w tych warunkach błąd nazywamy podstawowym) przedstawia krzywa błędów. Przykładową krzywą błędów sporządzoną dla wodomierza podaje rys. 12.8. Z krzywej błędów przy założeniu maksymalnego błędu dopuszczalnego wynika zakres pomiarowy przyrządu Z (rys. 12.8), gdy maksymalny błąd dopuszczalny wynosi 2%.

W zależności od stopnia dokładności niektóre przyrządy zostały podzielone na klasy. Np. wśród technicznych przyrządów elektrycznych istnieje 5 klas dokładności: 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5. Odpowiadają im takie same liczbowo błędy wskazań wyrażone w procentach w stosunku do górnej granicy zakresu pomiarowego B (rys. 12.8).

Wskazania przyrządów pomiarowych powinny odznaczać się stałością (jeśli pomiary dokonywane są w tych samych warunkach). Stałość wskazań bada się doświadczalnie, porównując sze-

reg odczytanych wskazań. Na tej podstawie wyznacza się maksymalny rozrzut wskazań przyrządu, który stanowi największe otrzymane w wyniku doświadczeń odchylenie wartości nominalnej, uzyskanej w identycznych warunkach, od wartości poprawnej. Im lepsza jest stałość wskazań przyrządu, tym mniejszy jest rozrzut. Bardzo istotną metrologiczną własnością przyrządów pomiarowych jest ich czułość. Zdefiniowano ją jako zmianę skutku



Rys. 12.8. Krzywa błędów wodomierza:

ϵ — błąd względny wskazania,
 G — natężenie przepływu przez wodomierz, Z — zakres pomiarowy, A — granica dolna zakresu pomiarowego, B — granica górna zakresu pomiarowego

wywołanego we wskazaniu do zmiany przyczyny wywołującej ten skutek. Inaczej mówiąc jest to stosunek liniowego lub kątownego przesunięcia wskazówki do wartości zmiany wielkości mierzonej, która wywołała to przesunięcie

$$k = \frac{\Delta J}{\Delta X}$$

gdzie: ΔJ — wychylenie wskazówki;
 ΔX — zmiana wielkości mierzonej.

Przyrządy pomiarowe można podzielić na następujące rodzaje:

- przyrządy wskazujące;
- przyrządy sterujące;
- przyrządy rejestrujące;
- przyrządy sumujące.

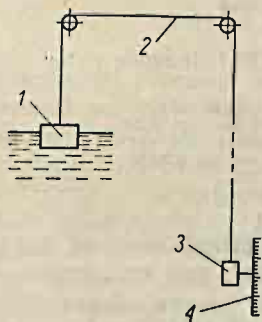
Przyrządy wskazujące wskazują miarę poszukiwanej wielkości w chwili pomiaru. Dzielimy je na wskazujące w miejscu pomiaru i na zdalnie wskazujące. Do typowych przyrządów pierwszej grupy należą termometry cieczowe, manometry hydrostatyczne, manometry membranowe itp. Jeśli wychylenie w przyrządzie jest dostatecznie duże, to można wielkość mierzoną odczytać wprost bez specjalnych urządzeń dodatkowych (jak np. przy użyciu termometrów rtęciowych), których zadaniem jest powiększenie wychylenia. Gdy wychylenia są małe (np. w manometrach membranowych), wtedy stosuje się przekładnie, które transformują przesunięcia w przyrządzie przeważnie na ruch

obrotowy wskazówki. Przekładnia musi być tak dobrana, aby minimalna długość działki na podziałce zapewniała możliwość dokonywania odczytów przez dłuższy czas bez zmęczenia wzroku.

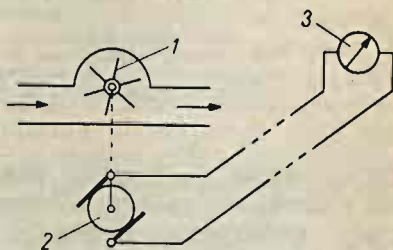
Taka minimalna działka wynosi zwykle 1 mm. Można wtedy odczytywać wynik pomiaru nieuzbrojonym okiem z dokładnością do $\frac{1}{2}$ działki, za pomocą lupy — do $\frac{1}{4}$, a za pomocą noniusza — do $\frac{1}{10}$. Przyrządy wskazujące w miejscu pomiaru mogą być użyte tylko przy małych instalacjach. W przypadku instalacji większych, a szczególnie wtedy, gdy punkty pomiarowe są oddalone, należy w celu ułatwienia odczytu i kontroli stosować przyrządy zdalnie wskazujące, zgrupowane, o ile jest to możliwe, na jednej tablicy. Ich cechą charakterystyczną jest to, że część wskazująca przyrządu znajduje się zwykle w znacznej odległości od części pomiarowej.

Przenoszenie wskazań na odległość może być wykonane różnymi sposobami: mechanicznie, hydraulicznie, optycznie, elektrycznie lub drogą radiową.

Przykładem mechanicznego przenoszenia wskazań może być urządzenie służące do sygnalizacji poziomu cieczy w zbiornikach (rys. 12.9).



Rys. 12.9. Mechaniczne przenoszenie wskazań przyrządu na odległość:
1 — pływak, 2 — taśma stalowa, 3 — ciężar, 4 — podziałka

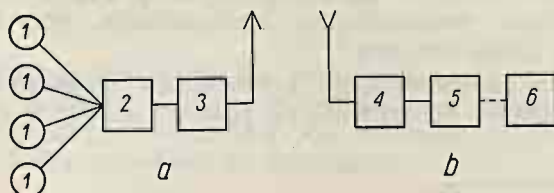


Rys. 12.10. Elektryczne przenoszenie wskazań na odległość:
1 — wirnik wodomierza, 2 — prądnicą, 3 — wskaźnik napięcia

Przenoszenia wskazań na drodze hydraulicznej dokonuje się niemal przy każdym pomiarze ciśnienia, gdy punkt pomiarowy łączy się z przyrządem wskazującym za pomocą przewodu przekazującego ciśnienie. Przy tego rodzaju pomiarach należy tylko uwzględnić ciśnienie hydrostatyczne cieczy wypełniającej przewód łączący.

W podobnie naturalny sposób następuje przenoszenie wskazań w grupie przyrządów, w których zmiana wielkości mierzonej przejawia się zmianą impulsów elektrycznych (np. w termoparach, termometrach oporowych itp.). Sposób ten stosuje się także tam, gdzie wielkość mierzona może być transformowana na zmianę oporności, indukcyjności lub wprost na obroty prądnicy (rys. 12.10).

W pewnych przypadkach, np. w technice raketowej przy badaniach dynamicznych właściwości pocisku albo przy badaniach meteorologicznych górnych warstw atmosfery za pomocą raket sondujących, niezbędne jest bezprzewodowe przekazywanie wielkości mierzonych. Do tego celu służą układy telemetryczne. Schemat blokowy takiego układu przedstawia rys. 12.11.



Rys. 12.11. Schemat blokowy układu telemetrycznego:

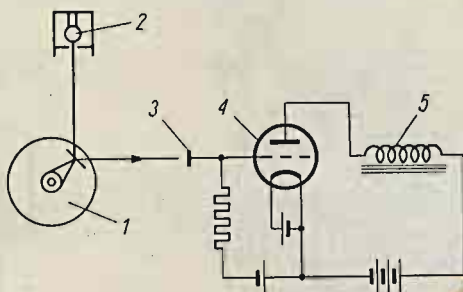
a — część pokładowa, b — część naziemna;
1 — punkty pomiarowe, 2 — układ zwielokrotnienia,
3 — nadajnik, 4 — odbiornik, 5 — rozdzielanie sygnałów z poszczególnych kanałów, 6 — urządzenie rejestrujące

Układ składa się z części pokładowej, zainstalowanej na pocisku i części naziemnej. Wielkości mierzone przekształca się na sygnały elektryczne. Dokonuje się tego w czujnikach, które zwykle są tak skonstruowane, aby zależność między wielkością mierzoną i sygnałem elektrycznym była liniowa.

Ponieważ istnieje tylko jeden nadajnik, za pomocą którego przesyła się dane ze wszystkich punktów pomiarowych, stosuje się więc układ umożliwiający rozróżnienie poszczególnych sygnałów w punkcie odbiorczym. Rozdzielanie sygnałów na poszczególne kanały pomiarowe można przeprowadzić za pomocą odpowiedniej modulacji lub kolejnego przesyłania danych z poszczególnych punktów pomiarowych. W urządzeniu odbiorczym po rozdzieleniu kanałów rejestruje się dane z poszczególnych punktów pomiarowych. Dokładność pomiarów otrzymywanych telemetrycznie zależy od mierzonych parametrów oraz od sposobu

przesyłania. W zależności od potrzeby można uzyskać dokładność w granicach $30 \div 0,1\%$.

Drugą grupę przyrządów stanowią przyrządy sterujące lub sygnalizujące (układy przekaźnikowe). Znajdują one zastosowanie przeważnie w zautomatyzowanych procesach produkcyjnych. Przykład takiego przyrządu do automatycznej regulacji ciśnienia przedstawia rys. 12.12. Po osiągnięciu ciśnienia



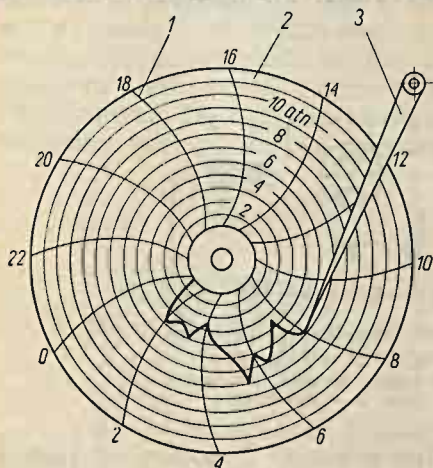
Rys. 12.12. Schemat urządzenia do automatycznej regulacji ciśnienia:

1 — manometr, 2 — źródło światła, 3 — fotokomórka, 4 — trioda, 5 — przekaźnik

maksymalnego promień świetlny z lampy 2, odbity od lusterka osadzonego na wskaźniku manometru pada na fotokomórkę 3 przyłączoną do siatki triody 4. Powoduje to powstanie silnego prądu w obwodzie anody, który uruchomi przekaźnik odpowiednich czynności dodatkowego urządzenia obniżającego ciśnienie mierzone manometrem. Przyrządy sterujące różnią się zwykle od wskazujących posiadaniem niepełnej podziałki, a czasem w ogóle brakiem części wskazujących.

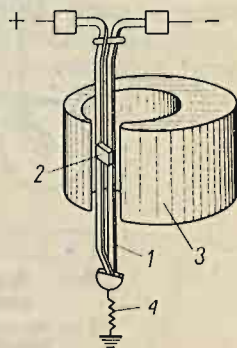
Następną grupą przyrządów są przyrządy rejestrujące. Dzielimy je na analogowe i cyfrowe. W przyrządach analogowych rejestracji zmian obserwowanej wielkości dokonuje się na taśmie, przy czym może się ona odbywać w funkcji czasu lub w zależności od położenia określonej części badanego mechanizmu (np. rejestracja ciśnienia w cylindrze silnika w funkcji położenia tłoka). Jeśli rejestracja odbywa się w funkcji czasu, to taśma papieru (lub innego materiału) służąca do tego celu otrzymuje napęd od mechanizmu zegarowego sprężynowego lub elektrycznego. Rejestracji można dokonać w układzie współrzędnych prostokątnych (wtedy na osi rzędnych obserwuje się zmienność wielkości mierzonej, a na osi odciętych zmienność czasu) lub też w układzie biegunowym. Wadą rejestracji biegunowej (rys. 12.13) jest to, że na podstawie otrzymanego wykresu nie można określić

średniej wielkości mierzonego parametru metodą planimetrowania. Poza tym czas rejestracji jest ograniczony. Rejestrator idealny powinien przenosić bez zniekształceń sygnał użyteczny, a eliminować zakłócenia. Poprzez odpowiedni dobór parametrów dynamicznych rejestratora można się do tego ideału zbliżyć. Należy tu znaleźć kompromis między deformacją sygnału użytecznego a stopniem eliminacji zakłóceń.



Rys. 12.13. Rejestracja biegunowa:

1 — krzywe stałych czasów, 2 — krążek papieru, 3 — wskaźnik z pisakiem



Rys. 12.14. Układ elementarny oscylografu pętlicowego:

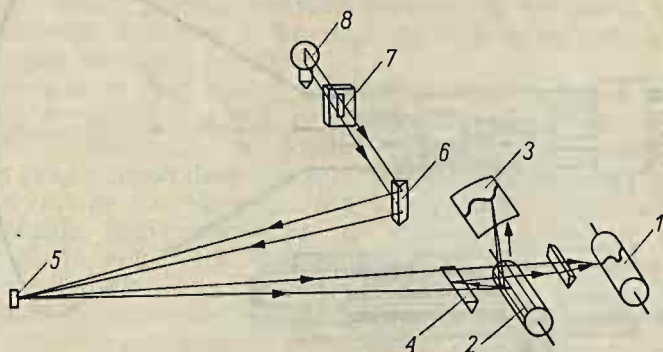
1 — pętla, 2 — zwierciadło, 3 — magnes, 4 — sprężyna

Istnieje szereg sposobów rejestracji analogowej. Wybór sposobu zależy przede wszystkim od szybkości zmian parametrów, które mają być rejestrowane. W procesach wolno zmieniających się znajdują zastosowanie trzy metody: rejestracja za pomocą rysika, rejestracja iskrowa oraz rejestracja punktowa.

W przypadku rejestracji zmian bardzo szybkich z reguły stosuje się oscylografię. Ta metoda staje się coraz powszechniejsza i nabiera coraz większego znaczenia ze względu na coraz większe zainteresowanie techników i naukowców zagadnieniami procesów niustalonych, ściśle związanych z problemem automatyzacji i regulacji. W zależności od wykonania rozróżnia się oscylografię pętlicową i katodową.

Zasadniczym elementem oscylografu pętlicowego jest elastycznie napięta pętla z cienkiego drutu (posrebrzany drucik z kwarcu) z umocowanym na niej lusterkiem o bardzo małej masie (rys. 12.14). Pętla znajduje się w stałym polu magnetycznym. Zmiana natężenia prądu płynącego przez pętlę powoduje zmianę wychy-

lenia lusterka. Do rejestracji wychyleń służy promień świetlny, którego droga w oscylografie jest przedstawiona na rys. 12.15. Zmienność wychyleń lusterka w czasie jest utrwalana na papierze fotograficznym przesuwającym się po bębnie 1 z szybkością ściśle określoną. Część promieni odbitych i załamanych w pryzmacie pada na obracający się bęben wielolusterkowy 2, który przetwarza obraz zmienności w czasie na obraz przestrzen-



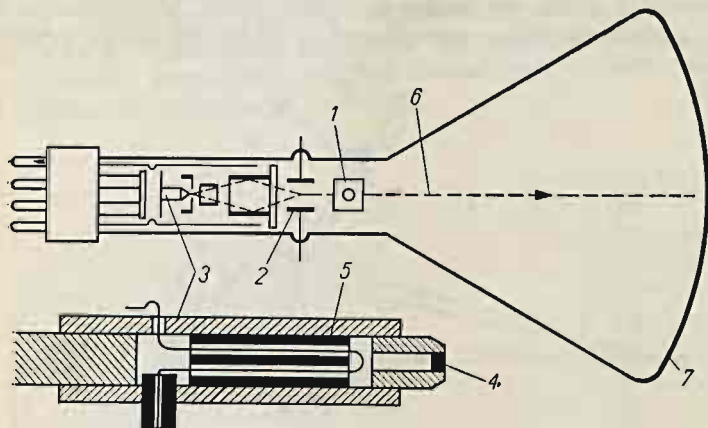
Rys. 12.15. Przebieg promieni świetlnych w oscylografie pętlicowym:

1 — bęben obracający się z szybkością proporcjonalną do czasu, 2 — obracający się bęben wielolusterkowy, 3 — matówka, 4 — pryzmat, 5 — lusterko, 6 — pryzmat kierujący promienie świetlne, 7 — przesłona kształtująca wąskie pasmo promieni świetlnych, 8 — źródło światła

ny, obserwowany na matówce 3. W ten sposób, przy odpowiednim doborze obrotów bębna 2 i okresowych zmianach wielkości mierzonej, otrzymuje się nieruchomy obraz cyklu zmian na matówce. Uzależniając np. wielkość natężenia prądu płynącego przez pętlę od ciśnienia w cylindrze silnika pulsacyjnego lub tłokowego można rejestrować zmienność tych ciśnień w czasie. Oscylografy pętlicowe umożliwiają równoczesny pomiar kilkudziesięciu wielkości zmiennych. Dają one zapis dokładny, ale tylko w ograniczonym zakresie szybkozmienności. Wynika to z bezwładności ich układu wychylającego.

Przyrządem praktycznie zupełnie pozbawionym bezwładności jest oscylograf katodowy. Zasadniczą częścią tego oscylografu jest elektronowa lampa oscyloskopowa, której schemat przedstawia rys. 12.16. W części cylindrycznej lampy znajduje się katoda emitująca elektrony. Odpowiedni układ siatki i anod przepuszcza wąski strumień elektronów, które padając na ekran powleczoney siarczkiem cynku wywołują świecący punkt. Przed wejściem do

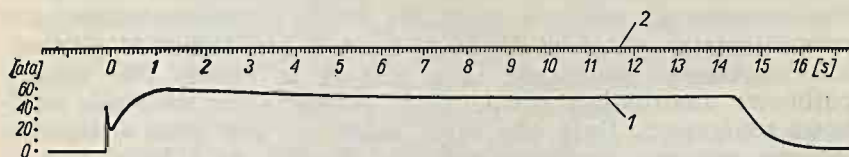
części rozszerzającej się rury umieszczone są dwie pary płytek 1 i 2, pomiędzy którymi przebiega strumień elektronów. Płytki 1 i 2 umieszczone są w płaszczyznach prostopadłych do siebie. Zmienne pola elektryczne pomiędzy płytkami, wywołane zmianą napięcia na płytkach, powodują wychylenia strumienia elektro-



Rys. 12.16. Lampa oscyloskopowa:

1, 2 — dwie pary płytek metalowych, 3 — żarząca się katoda, 4 — tlenek baru emitujący elektrony, 5 — izolacja z tlenku magnezu, 6 — strumień elektronów, 7 — ekran

nów w płaszczyznach płytek, a więc i wychylenie punktu świecącego na ekranie. Uzależniając np. napięcie na płytkach 2 od ciśnienia w cylindrze silnika tłokowego, a napięcie na płytkach 1 od drogi tłoka, otrzymamy na ekranie obraz wykresu indykato-



Rys. 12.17. Przebieg ciśnienia w czasie w silniku rakietowym na stałym materiale pędny:

1 — krzywa przebiegu, 2 — podstawa czasu

rowego. Jeśli chcemy otrzymać na ekranie obraz okresowo zmieniających się wielkości w funkcji czasu, to do pary płytek 2 trzeba przyłączyć napięcie zmieniające się liniowo w czasie. Stosując dodatkowy układ w połączeniu z rejestracją fotograficzną,

można użyć oscylografu katodowego do obserwacji szybkich zmian wielkości mierzonych, ciągłych w czasie. W tym przypadku na taśmie papieru fotograficznego po wywołaniu otrzymuje się obraz zmian wielkości mierzonej oraz tzw. podstawę czasu (rys. 12.17).

Wadą analogowego sposobu rejestracji wyników pomiaru jest jego mała dokładność oraz konieczność wprowadzenia dodatkowej czynności odczytywania wartości liczbowych wielkości mierzonej na podstawie wykresu, co bardziej jeszcze ogranicza dokładność i zmniejsza szybkość pomiaru.

Niedostatków tych można uniknąć stosując cyfrowy sposób rejestracji wyników. Do tego celu służą mierniki drukujące wynik pomiaru bezpośrednio w postaci cyfrowej. Stosowane obecnie w tych przyrządach drukarki elektromechaniczne mogą zapisywać kilka wyników na sekundę. Jeśli te wyniki, w celu dalszego ich opracowania, mają być użyte do sterowania maszyn matematycznych, to rejestracji dokonuje się za pomocą odpowiednich perforatorów lub magnetofonów.

Pomiary przebiegów wielkości zmiennych w czasie wiążą się z szeregiem specyficznych problemów, co zmusiło do wyodrębnienia w metrologii nowej dziedziny, zwanej miernictwem dynamicznym. Zajmuje się ona obecnie przede wszystkim zależnością między charakterem zmienności obiektu pomiaru i dynamicznymi własnościami przyrządów pomiarowych oraz weryfikuje i przystosowuje pojęcia i terminologię metrologii statycznej do potrzeb własnych. Szczególnie istotną wydaje się tu zmiana definicji błędu wskazania narzędzia pomiarowego. Posługiwanie się bowiem w warunkach pomiarów dynamicznych błędem określonym jako różnica wskazania nominalnego i miary poprawnej wielkości mierzonej jest niewygodne, gdyż błąd ten zmienia się w czasie i trudno go wyznaczyć. Dlatego w celu doboru właściwej aparatury pomiarowej stosuje się w miernictwie dynamicznym kryterium błędu średniego kwadratowego zdefiniowanego jako

$$\tau^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [X(\tau) - Y(\tau)]^2 d\tau$$

gdzie: $X(\tau)$ — sygnał wejściowy,
 $Y(\tau)$ — sygnał wyjściowy,
 τ — czas.

Aby określić w praktyce błąd na podstawie powyższej definicji należy znać statystyczne cechy sygnału wejściowego oraz funkcje przejścia aparatury pomiarowej.

Ostatnią grupę przyrządów pomiarowych stanowią przyrządy sumujące, w których miarę poszukiwanej wielkości otrzymuje się, znajdując różnicę wskazań przyrządu w różnych chwilach. Zadaniem przyrządu jest więc określenie całki

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} x d\tau$$

gdzie: τ — czas;

x — wielkość mierzona w czasie.

Wielkością mierzoną jest natężenie przepływu: cieczy, gazu lub energii.

Przyrządy, w których wielkość mierzona jest proporcjonalna do szybkości kątowych pewnej części mechanizmu przyrządu (tj. do liczby obrotów), można bardzo łatwo wykonać jako przyrządy liczące. Wiążąc obracającą się część przyrządu z pierwszym kółkiem normalnego dziesiętnego liczydła, można określić liczbę obrotów wykonanych przez mechanizm przyrządu w określonym czasie, co jest np. równoznaczne z określeniem natężenia przepływu wody przepływającej w wodomierzach lub gazu w gazomierzach.

Jeśli wielkość mierzona nie przejawia się obrotami, stosuje się wtedy dodatkowe urządzenia całkujące mechaniczne lub elektryczne.

Możliwe jest również wykonanie sumowania, jeśli wielkość mierzona jest określona za pomocą kilku wielkości niezależnych od siebie, np. przy ustalaniu ilości energii elektrycznej lub energii cieplnej zawartej w przepływającej parze czy wodzie.

W przyjętej klasyfikacji przyrządów pomiarowych w każdej grupie znajdują się przyrządy pracujące na różnych zasadach i o różnej konstrukcji. W podanych przykładach starano się uwzględnić najważniejsze i najczęściej stosowane typy. Należałoby tylko dla całości obrazu dodać, że w ostatnich czasach coraz częściej w technice pomiarów znajdują zastosowanie izotopy promieniotwórcze i to zarówno do budowy układów przekaźnikowych stanowiących (o czym już była mowa) ważny element automatyzacji procesów produkcyjnych i ich kontroli, jak i do budowy przyrządów do pomiarów ilościowych. Zasada działania tych ostatnich jest oparta na metodzie pomiaru zmian natężenia promieniowania jonizującego wywołanych bądź zmianą geometrii układu źródło-detektor, bądź też zmianą stopnia pochłaniania lub rozpraszania promieniowania przez badany układ.

Dokładność pomiarów. Każda wielkość fizyczna określona pomiarem zawsze różni się od jej miary rzeczywistej. Wartość tej różnicy, nazywana błędem bezwzględnym pomiaru, zależy od

dokładności użytych przyrządów, doskonałości metody pomiarowej oraz od wprawy i zręczności osoby wykonującej pomiar. Zależnie od rodzaju przyczyn oraz wynikającego z nich charakteru błędu rozróżniamy trzy rodzaje popełnianych błędów:

- błędy systematyczne;
- błędy przypadkowe;
- błędy grube.

Błędy systematyczne są to błędy powtarzające się co do wielkości i znaku. Mogą być one wywołane przez przyczyny tkwiące w samym narzędziu pomiarowym i przez przyczyny zewnętrzne. Do pierwszych należy niedoskonałość wykonania narzędzia i jego zużycie, do drugich natomiast — określony i powtarzający się wpływ temperatury, ciśnienia, wilgotności, pola magnetycznego itp. Błędy systematyczne wywołane przez przyczyny tkwiące w przyrządzie można wyeliminować przez okresowo przeprowadzane wzorcowanie przyrządu.

Błędy spowodowane przyczynami zewnętrznymi eliminujemy, wprowadzając odpowiednie poprawki.

Poza tymi dwoma źródłami błędów systematycznych istnieje jeszcze trzecie źródło, a mianowicie błędy metody pomiaru. Błędy te powstają z powodu nieuwzględnienia w przyjętej metodzie wpływu jakiegoś czynnika. Takim błędem jest na przykład przy pomiarach oporu elektrycznego metodą wyznaczania natężenia prądu i napięcia, nieuwzględnienie oporu wewnętrznego samych przyrządów pomiarowych, amperomierza i woltomierza.

Błędy systematyczne mogą być stałe i zmienne. Systematyczne błędy zmienne są spowodowane najczęściej zmieniającymi się warunkami pomiarów, np. zmieniającą się w czasie trwania pomiarów temperaturą albo rozładowywaniem się akumulatora.

Błędy te są trudniejsze do uchwycenia, gdyż wymagają stałej kontroli wszystkich czynników mogących wpłynąć na wynik pomiaru. Kontrola taka jest jednak niezbędna, jeśli z analizy metody i działania aparatury pomiarowej wynika możliwość wystąpienia zmian zakłócających. Najbardziej bowiem w pomiarach niebezpieczne są takie błędy, z których nie zdajemy sobie sprawy. Poznane błędy systematyczne nie wpływają już w sposób istotny na wynik pomiarów, ponieważ można je usunąć przez wymianę przyrządów lub przez ulepszenie stoiska badawczego, albo też uwzględnić w obliczeniach przez wprowadzenie poprawek.

Drugi rodzaj błędów, a mianowicie błędy przypadkowe zmieniają się przy powtarzaniu pomiaru tak co do bezwzględnej wartości, jak i co do znaku. Są one spowodowane losowymi zmianami wszystkich czynników wpływających na wynik pomiaru,

których nie można ani usunąć, ani przewidzieć, ani też ściśle liczbowo określić. Z tego powodu błędów przypadkowych nie można wyeliminować przez wprowadzenie poprawek. Ponieważ jednak wpływają one w sposób zasadniczy na dokładność pomiarów, muszą być określone. Określeniem ich zajmuje się teoria błędów.

Błędy przypadkowe mogą być wywołane przez:

- statyczne i dynamiczne własności przyrządu, z których dla każdego wskazania wynika istnienie obszaru, w którym w sposób przypadkowy może zatrzymać się wskazówka;

- obserwatora wykonującego pomiar, który wskutek wady wzroku, niedostatecznego wyszkolenia lub trudnych warunków odczytywania może popełniać błędy.

Na podstawie szeregu doświadczeń można stwierdzić następujące własności przypadkowych błędów pomiarowych:

- błędy przypadkowe dodatnie i ujemne są jednakowo prawdopodobne;

- jednakowo prawdopodobne jest otrzymanie równych co do wielkości błędów dodatnich i ujemnych;

- najbardziej prawdopodobne są błędy małe, tzn. im większy jest błąd przypadkowy, tym mniejsze jest prawdopodobieństwo spotkania go pośród otrzymanych wyników. Wartość błędów przypadkowych praktycznie nie przekracza pewnej granicy.

Jeśli wyniki pomiarów nie potwierdzają powyższych własności błędów przypadkowych, oznacza to, że ukryty jest wśród nich jakiś błąd systematyczny i należy sprawdzić metodę i aparaturę pomiarową, aby go wykryć.

Trzeci rodzaj błędów stanowią błędy grube, powstające wskutek wadliwego zainstalowania przyrządów, fałszywego odczytania któregoś ze wskazań lub nieprawidłowego zapisu. Pomiaru takie odrzucamy jako omyłkowe i nie uwzględniamy przy opracowaniu wyników. Czasem jest dość trudno ocenić, czy pewien pomiar należy odrzucić jako obarczony błędem grubym, czy też jest on wynikiem zwykłych błędów. Na ogół stosuje się zasadę, że odrzuca się te wyniki, w których błąd jest większy od pewnej ustalonej wartości. Błędy grube powinny zdarzać się bardzo rzadko. Jeśli wystąpią, powinny za każdym razem prowadzić do powtórnej analizy działania urządzenia pomiarowego.