WPROWADZENIE

Doświadczalna część kształcenia studentów budownictwa z zakresu fizyki budowli wymaga nie tylko teoretycznego poznania praw rządzących ruchem ciepła i wilgoci w typowych materiałach budowlanych ale też zapoznania się z eksperymentem. Specyficzną cechą takich materiałów jak cegła, beton, gips, zaprawy jest ich porowatość. W sieci kapilar dochodzi do intensywnego ruchu różnych form wilgoci. W najprostszym przypadku będzie to dyfuzyjny ruch pary wodnej w sieci kapilar. Bardziej złożony ruch występuje wówczas, kiedy wilgoć wykrapla się na powierzchni kapilar. Podobnie w materiałach grubo porowatych stwierdzamy możliwość konwekcyjnego ruchu cieczy, który opisujemy równaniami filtracji. Równie złożony charakter posiada także ruch ciepła przez ocieplone, warstwowe konstrukcje zewnętrznych ścian budowli.

W ramach ćwiczeń laboratoryjnych należy wyznaczać współczynniki kinetyczne określające własności materiałów w trakcie ruchu ciepła i wilgoci w sieci jego kapilar. Jest to jednocześnie minimalny program ćwiczeń laboratoryjnych z fizyki budowli. W ujęciu tego problemu podano ogólne równania zagadnienia, tak jak się je przedstawia w rozważaniach ogólnych. Oczywiście w badaniach eksperymentalnych, tak dobiera się warunki doświadczalne aby przepływ był uproszczony np. jednowymiarowy. Takie proste ujęcie jest celem badań ekperymentalnych, które powinien znać student.

Każde z 9 ćwiczeń zawiera najpierw wprowadzenie teoretyczne, następnie opis zjawiska i metod jego pomiaru. Kolejno należy opracować wg. zadanego wzoru wyniki pomiaru oraz przeanalizować możliwe błędy pomiaru. W sprawozdaniu muszą być również podane zewnętrzne parametry takie jak wilgotność otoczenia, temperatura i inne parametry określające warunki przeprowadzanych pomiarów.

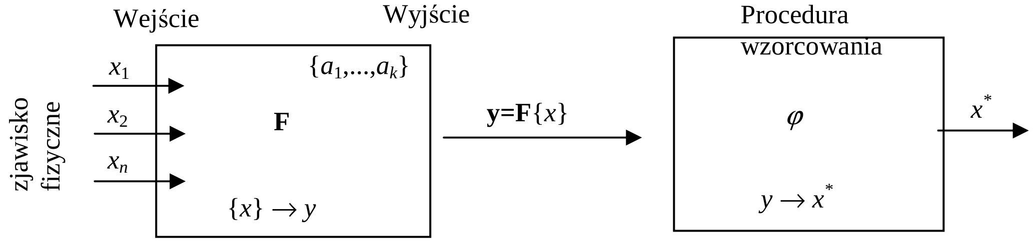
Na początku opracowania zapoznaje się czytelnika z teorią pomiaru czyli ze współzależnościami pomiędzy pomiarem a jego rejestracją przez urządzenia pomiarowe oraz z obróbką wyników. Ten element doświadczalnictwa jest coraz bardziej istotny z uwagi na rosnące znaczenie nowych technik pomiarowych, korzystających najczęściej z pomiarów charakterystyk elektrycznych powiązanych z poszukiwanymi wielkościami fizycznymi. Kolejnym ważnym zagadnieniem są relacje między badanym zjawiskiem fizycznym a jego modelem i pomiarem w laboratorium.W laboratorium badamy najczęciej tylko jedną z własności złożonego procesu, tak ustawiając warunki eksperymentu, aby pozostałe parametry były niezmienne w trakcie pomiarów. Jest to poważny problem ograniczający wartość uzyskanych z pomiarów wyników.

ELEMENTY TEORII POMIARU

0.1. Pojęcia podstawowe

- *System pomiarowy (SP)* opiera się na prawach fizyki. Stanowi jednak ich rozszerzenie ponieważ uwzględnia losowość pomiarów. Ujawnienie tej losowości oznacza, że zależności między prawami fizycznymi np. $pV = \mu RT$ nie są w pełni jednoznaczne, lecz stają się procesami stochastycznymi. Równania opisujące te związki nie są prawami fizycznymi, lecz równaniami modeli procesu.
- Kolejnym pojęciem podstawowym jest *sygnał*, czyli wielkość fizyczna która jest nośnikiem energii i informacji.
- *Model systemu pomiarowego* zawiera związek między sygnałami, które wprowadzamy na wejściu *{x}* i które uzyskujemy na wyjściu *y*. Wejściem jest stan mierzonej wielkości doprowadzonej do systemu a wyjściem wskazanie przyrządu.

Każdy pomiar jest więc odtworzeniem wejścia na podstawie znajomości modelu i sygnału na wyjściu.



Rys. 0.1. Model systemu pomiarowego.

Pomiar polega więc najpierw na przetworzeniu sygnału na wejściu *x*, które reprezentują mierzone zjawisko w sygnał na wyjściu *y*. Następnie znając sygnał *y* należy poprzez porównanie ze wzorcami przypisać mu mierzoną wartość sygnału x^*. To porównanie nazywa się procedurą wzorcowania.

Przykład. Dokonuje się pomiaru temperatury przemiany wody w lód poprzez pomiar oporności elektrycznej cieczy. Wtedy na wyjściu otrzymuje się wartość oporności roztworu. Następuje teraz procedura wzorcowania, podczas której przypisuje się opornościom wartości temperatur zamarzania.

0.2. Model systemu pomiarowego

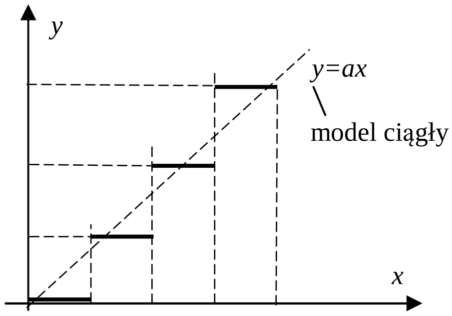
Przedstawione zostaną obecnie formalne opisy podstawowych systemów pomiarowych.

0.2.1. *Model statyczny*

Funkcja procesu przetwarzania

$$y = F(x_1,...,x_n; a_1,...,a_k, w). \tag{0.1}$$

Wielkości $x_1,...,x_n$ są procesami losowymi o pewnych charakterystykach natomiast $a_1,...,a_k$ są parametrami konstrukcyjnymi modelu a *w* to wiek urządzenia przetwarzającego.



Rys. 0.2. Funkcje przetwarzania.

Równanie wzorcowania (procedury wzorcowania)

$$x^* = \varphi(y). \tag{0.2}$$

Błąd systemu pomiarowego Δ wynosi

$$\Delta = x^* - x = \varphi[F(x_1,...,x_n; a_1,...,a_k, w)] - x. \tag{0.3}$$

0.2.2. *Dynamiczny model systemu*

Jeżeli wielkości wejściowe $\{x_1(t),...x_n(t)\}$ są funkcjami czasu, a system opisuje zmienne zjawiska fizyczne to najczęściej wielkość wyjściowa *y* opisana jest równaniem różniczkowym

$$y = F(y, y^1,...y^n; \quad x_1(t),...,x_n(t); \quad a_1,...,a_k, w). \tag{0.4}$$

W szczególności może zachodzić

$$\frac{dy}{dx} = f(a,x) \text{ lub } \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{Ay} + \mathbf{Bx}, \tag{0.5}$$

co prowadzi do zależności całkowych

$$dy(t) = f(a,x(t))dt \quad \Rightarrow \quad y(t) = \int_0^t f(a,x(\tau))d\tau. \tag{0.6}$$

Jeżeli równanie modelu ma postać

$$a_n y^n + a_{n-1} y^{n-1} + \ldots + a_0 y = (x(t)), \tag{0.7}$$

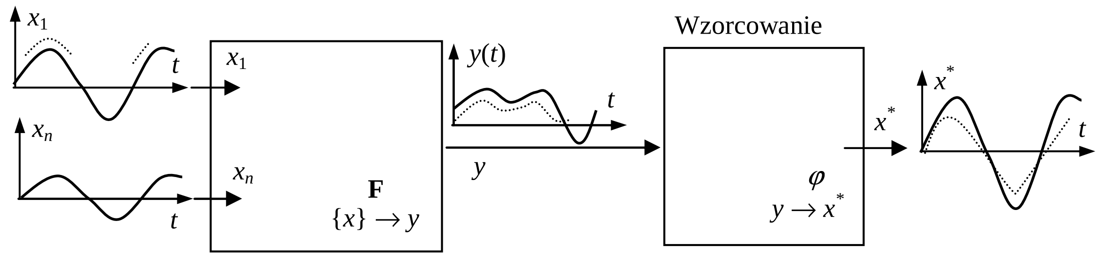
to sygnał wyjścia $y(t)$ przyjmie formę

$$y(t)=\int_0^t k(t,\tau)x(\tau)d\tau\,, \tag{0.8}$$

gdzie $k(t,\tau)$ jest odpowiedzią systemu na impulsowe pobudzenie przez funkcję delta Dirac'a $\delta(t)$.

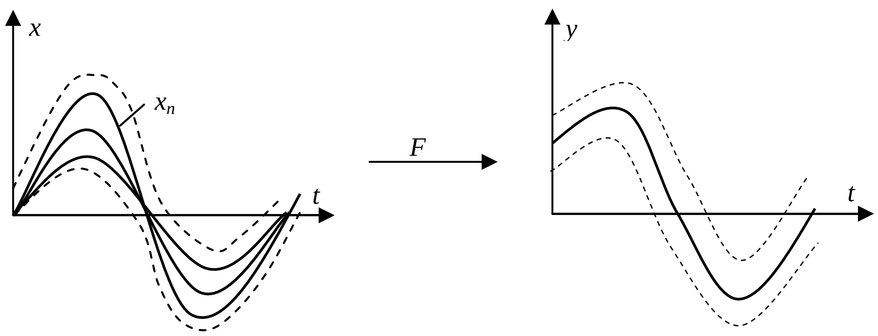
0.2.3. *Stochastyczny model systemu*

Jeżeli funkcje na wejściu tworzą proces losowy $\{x(t)\}$ o znanych charakterystykach, m. in. znanej wartości średniej i odchyleniu średniokwadratowym, to i na wyjściu otrzyma się proces losowy $\{y\}$.



Rys. 0.3. Stochastyczny model systemu.

Proces losowy na wejściu - istnieją różne realizacje $x_n(t)$ które charakteryzuje wartość średnia $<x>$ i odchylenie standartowe $S_x=\sqrt{\dfrac{\sum_n(x_n-<x>)^2}{n(n-1)}}$.



Rys. 0.4. Przetworzenie sygnałów.

$$<x>=\frac{1}{n}\sum_n x_n\,, \qquad <y>=F(<x>). \tag{0.9}$$

Z teorii procesów stochastycznych wynika, że parametry procesu spełniają relacje

$$<y>=F(<x>....) \text{ i } S_y=F(S_x)\,, \tag{0.10}$$

gdzie $S_y=\sqrt{\dfrac{\sum_n(y_n-<y>)^2}{n(n-1)}}$ a F i φ są odpowiednio liniowymi operatorami przetwarzania i wzorcowania.

0.3. Błędy pomiaru

W niniejszym punkcie zostaną podane oszacowania odchyłek odwzorowań na poziomie przetwarzania i wzorcowania wyników.

0.3.1. *Równania przetwarzania*

Jeżeli funkcja $y = F\left(x_1,...,x_n;\, a_1\left(x_i\right),...,a_k\left(x_i\right)\right)$ opisuje matematycznie system pomiarowy to jego błąd wynosi

$$dy = \sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\partial F}{\partial x_i}\right|dx_i + \sum_{k=1}^{l}\left|\frac{\partial F}{\partial a_k}\frac{\partial a_k}{\partial x_i}\right|dx_i\ , \tag{0.11}$$

co wynika z formy różniczki funkcji wielu zmiennych.
Przechodząc z różniczek *dy* na różnice skończone Δy otrzyma się analogicznie

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\partial F}{\partial x_i}\right|\Delta x_i + \sum_{k=1}^{l}\left|\frac{\partial F}{\partial a_k}\frac{\partial a_k}{\partial x_i}\right|\Delta x_i\ . \tag{0.12}$$

Jeżeli narzuci się teraz dokładność na wielkość na wejściu $\left|\Delta x_i\right| < \varepsilon$ to w zakresie stabilnym procesu przetwarzania zachodzi $\left|x - x^*\right| < \delta$.

0.3.2. *Procedury wzorcowania*

Procedura ta opisana jest równaniem

$$y \xrightarrow{\varphi} x^* \quad \left(x^* = \varphi(y)\right). \tag{0.13}$$

Przyrost $dx^* = \frac{\partial\varphi}{\partial y}dy$ powoduje, że błąd systemu pomiarowego wynosi

$$dx^* = \frac{\partial\varphi}{\partial y}\left[\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\partial F}{\partial x_i}\right|dx_i + \sum_{k=1}^{l}\left|\frac{\partial F}{\partial a_k}\frac{\partial a_k}{\partial x_i}\right|dx_i\right]. \tag{0.14}$$

0.4. Uproszczone oszacowania błędów

Praktyczne oszacowanie błędu przeprowadza się w sposób przybliżony wprowadzając wielkość globalną, tzw. błąd zredukowany. Błąd zredukowany, jest to błąd wyrażony w procentach górnej granicy zakresu pomiarowego (największej możliwej wartości pomiarów) w postaci liczb, np. 0,5%; 1,0%; 1,5% itp.

Wzór na obliczenie maksymalnej bezwzględnej dokładności ΔA wynosi

$$\Delta A = \frac{k}{100}A_{max}\ . \tag{0.15}$$

Często też wprowadza się ten błąd w zakresie mierzonej wielkości *A*

$$\Delta A = \frac{k}{100}A. \tag{0.16}$$

Potencjalnie występujący błąd systematyczny pomiaru równy jest zawsze $\frac{\Delta A}{2}$ (połowa ponad pomierzoną wielkość błędu a połowa poniżej).