ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: ELEKTRYKA z. 71 Nr kol. 656

Aleksander ŁATKA

SYSTEMOWE UJĘCIE FIZYCZNYCH WIELKOŚCI POMIAROWYCH

Streszczenie. Przedstawiono propozycję nowego sposobu klasyfikacji pomiarowych wielkości fizycznych. Podano dwa kryteria podziału jako punkt wyjścia do systematyzacji wielkości fizycznych. Wynika z nich możliwość interdyscyplinarnego podejścia do problemu pomiaru różnych wielkości fizycznych. Artykuł jest wstępem do systemowego ujęcia fizycznych wielkości pomiarowych.

1. Wstęp

Rozwój każdej dziedziny nauki wymaga pewnych uogólnień wynikających z wykorzystania cech wspólnych dla różnych wielkości fizycznych. Takie wspólne cechy występują także w pomiarach wszystkich wielkości. Dzięki uogólnionemu ujęciu różne wielkości fizyczne można mierzyć w jednym układzie pomiarowym, różniącym się jedynie rodzajem czujnika. Szczególne znaczenie miałoby tutaj wykorzystanie wspólnych cech wszystkich systemów pomiarowych, w celu jednolitego, interdyscyplinarnego i systemowego ujęcia problemu pomiaru. Takie interdyscyplinarne podejście ułatwić może także nauczanie metrologii.

Mierzone wielkości fizyczne można sklasyfikować wg następujących kryteriów:

I Kryterium. Występowanie wielkości fizycznych w systemach pomiarowych.

II Kryterium. Znaczenie fizykalne wielkości.

2. Występowanie wielkości fizycznych w systemach pomiarowych jako I kryterium ich klasyfikacji

Przyjmując jako kryterium klasyfikacji występowania wielkości fizycznych w systemach pomiarowych można wyróżnić następujące wielkości:

A. Wielkością zero punktową niezależną od systemu i miejsca w przestrzeni fizycznej jest czas t. Czas można traktować jako wielkość nieza-

leżną, gdyż jego pomiar nie jest związany z jakimkolwiek punktem przestrzeni fizycznej[x)].

B. Wielkościami jednopunktowymi (przelotowymi - ang. Pervariable lub przepływu - ang. Through variable) - są to takie wielkości, które można zmierzyć lub zdefiniować w odniesieniu do jednego punktu przestrzeni fizycznej. Zgodnie z tabelą 1 wielkości jednopunktowe można podzielić na wielkości natężenia τ charakteryzujące prędkość zmian (np.: siła, prąd elektryczny, przepływ i in.) oraz wielkości stanu σ (np.: ładunek elektryczny, objętość, entropia i in.).

Ogólną zależność między stanem σ, a natężeniem τ dla wielkości jednopunktowych można przedstawić jako:

$$\sigma = \int \tau \, dt \tag{2-1}$$

$$\tau = \frac{d\sigma}{dt}. \tag{2-2}$$

C. Wielkościami dwupunktowymi (poprzecznymi ang. Transvariable lub spadku ang. Across variable) - są to takie wielkości, które można zmierzyć między dwoma punktami przestrzeni lub zdefiniować w odniesieniu do dwóch punktów przestrzeni fizycznej. Wielkości dwupunktowe można podzielić na wielkości natężenia α charakteryzujące prędkość zmian (np.: prędkość, napięcie, ciśnienie, temperatura itp.) oraz wielkości stanu λ (np.: przemieszczenie liniowe lub kątowe, strumień sprzężony itp.). W termodynamice nie występuje dwupunktowa wielkość stanu.

Ogólną zależność między stanem λ, a natężeniem α dla wielkości dwupunktowych można przedstawić następująco:

$$\alpha = \frac{d\lambda}{dt} \tag{2-3}$$

$$\lambda = \int \alpha \, dt. \tag{2-4}$$

Pojęcie wielkości jednopunktowych i dwupunktowych wiąże się ze sposobem ich pomiaru. Amperomierz i przepływomierz włącza się w jednym punkcie obwodu. W celu wzorcowania tych przyrządów łączy się je szeregowo z wzorcami.

Woltomierz i manometr włącza się między dwa punkty systemu fizycznego. Podczas wzorcowania takie przyrządy łączy się równolegle z wzorcami.

---

x) Takie ujęcie czasu oparte jest na teorii fizyki klasycznej. W sensie teorii względności czasu t nie można traktować jako wielkości absolutnie niezależnej.

Tabela 1

System fizyczny	Wielkości			
	Przepływu 1-punktowe	P(er)	Spadku 2-punktowe	T(rans)
	stan	natężenie	natężenie	stan
Ogólny system fizyczny	$G=\int \tau dt$	$\tau=\frac{dG}{dt}$	$\alpha=\frac{d\lambda}{dt}$	$\lambda=\int \alpha dt$
Mechaniczny translacyjny	impuls siły (popęd) $\mathcal{T}_F$	siła F	prędkość liniowa v	przemieszczenie liniowe s
Mechaniczny rotacyjny	impuls momentu $\mathcal{T}_s$	moment obrotowy M_s	prędkość kątowa ω	przemieszczenie kątowe φ
Elektryczny	ładunek q	prąd i	napięcie u	strumień skojarzony ψ
Magnetyczny	strumień magnetyczny ϕ	napięcie (SEM) magn. e	siła magnetomotoryczna (SMM) F_m	impuls SMM $\mathcal{T}_m=\int F_m dt$
Strumieniowy	objętość V	natężenie przepływu $\dot{V}$	ciśnienie p	impuls ciśnienia $\mathcal{T}_p$
Termodynamiczny	entropia S	prędkość entropii $\dot{S}$	temperatura absolutna T	
Cieplny (pseudotermodynamiczny)	ilość ciepła Q	strumień cieplny $\dot{Q}$	temperatura ϑ	

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wielkości jedno- i dwupunktowych, z uwzględnieniem natężenia i stanu, niektórych systemów fizycznych.

2.1. Energia i moc jako funkcja wielkości typu P i T

Na bazie wielkości jedno i dwupunktowych można sformułować funkcje rozproszenia i magazynowania energii oraz odpowiadające im kofunkcje:

a) energia zmagazynowana wyrażona wielkościami typu T (energia potencjalna)

$$U_T=\int_0^{\alpha} \tau d\lambda \tag{2-5}$$

b) koenergia wyrażona wielkościami typu T

$$T_T = \int_0^{\tau} \lambda d\tau, \tag{2-6}$$

c) energia zmagazynowana wyrażona wielkościami typu P (energia kinetyczna)

$$U_p = \int_0^{\sigma} \varphi d\sigma, \tag{2-7}$$

d) koenergia wyrażona wielkościami typu P

$$T_p = \int_0^{\varphi} \sigma d\varphi, \tag{2-8}$$

e) funkcja dyssypacji

$$G = \int_0^{\tau} \varphi d\tau, \tag{2-9}$$

f) kofunkcja dyssypacji

$$I = \int_0^{\varphi} \tau d\varphi, \tag{2-10}$$

g) moc

$$P = \varphi\tau = \int_0^{\tau} \varphi d\tau + \int_0^{\varphi} \tau d\varphi = G + I. \tag{2-11}$$

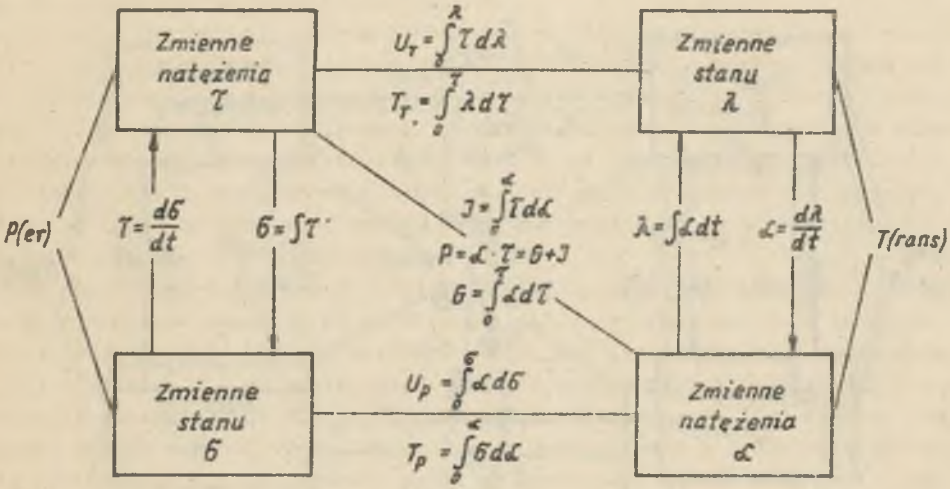
Obowiązujące ogólne zależności między wielkościami przepływu i stanu dla różnych systemów fizycznych wyrażone wzorami od (2-5) do (2-11) przedstawiono na rysunkach od 1 do 7.

Przez podział wielkości na jedno i dwupunktowe otrzymuje się możliwość odwzorowania systemów technicznych (w szczególności pomiarowych) w izomorficznych strukturach topologicznych.

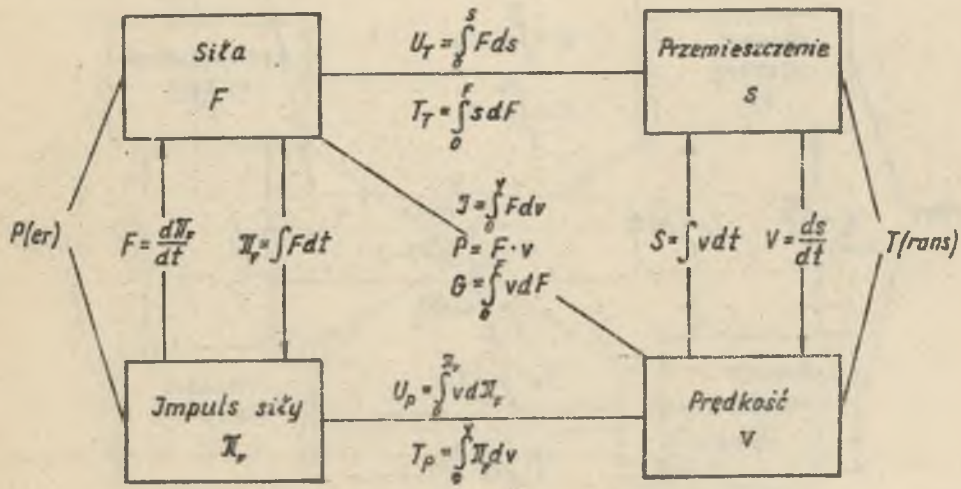
2.2. Prawa obwodów

Połączenie elementów w sieci daje struktury, których właściwości są określone przez dwa rodzaje zależności, związane z geometrią połączeń oraz z charakterem elementów.

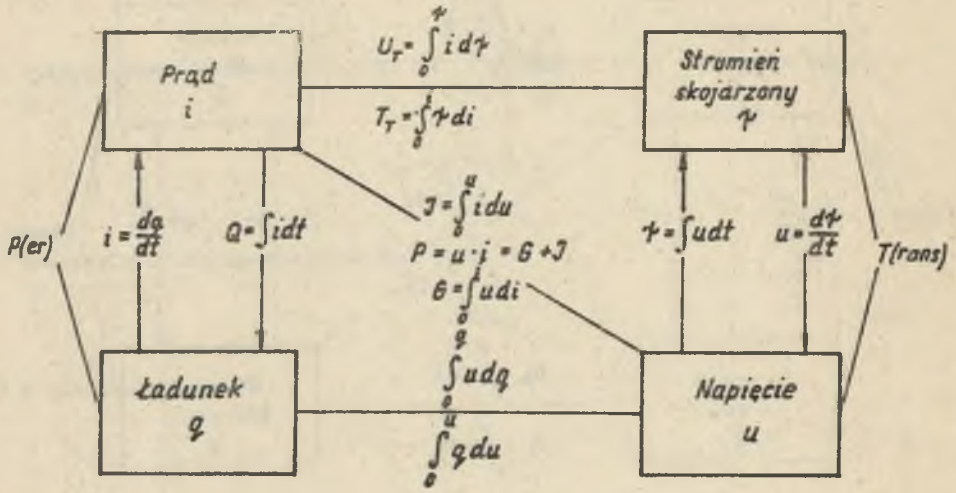
Z geometrią sieci związane są zależności między wielkościami przepływu, wyrażające zależności dla węzłów.



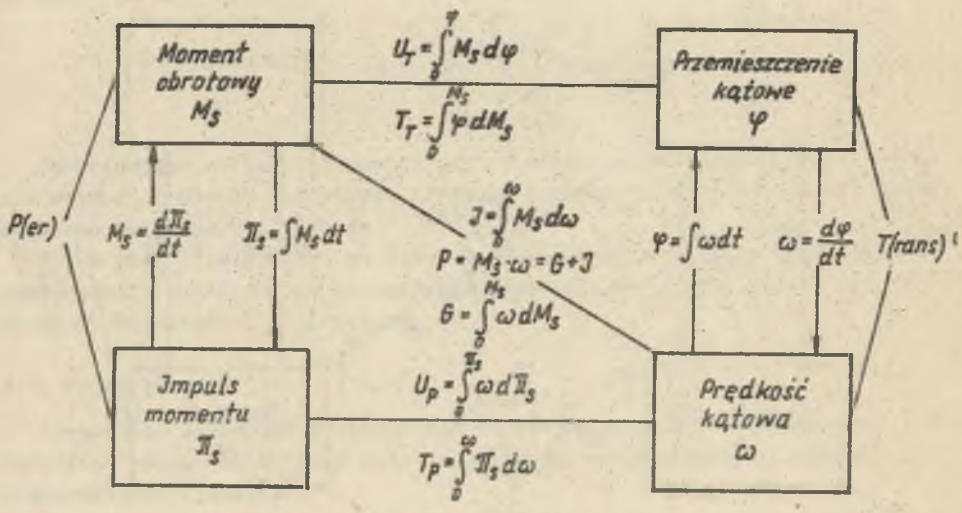
Rys. 1. Ogólny system fizyczny



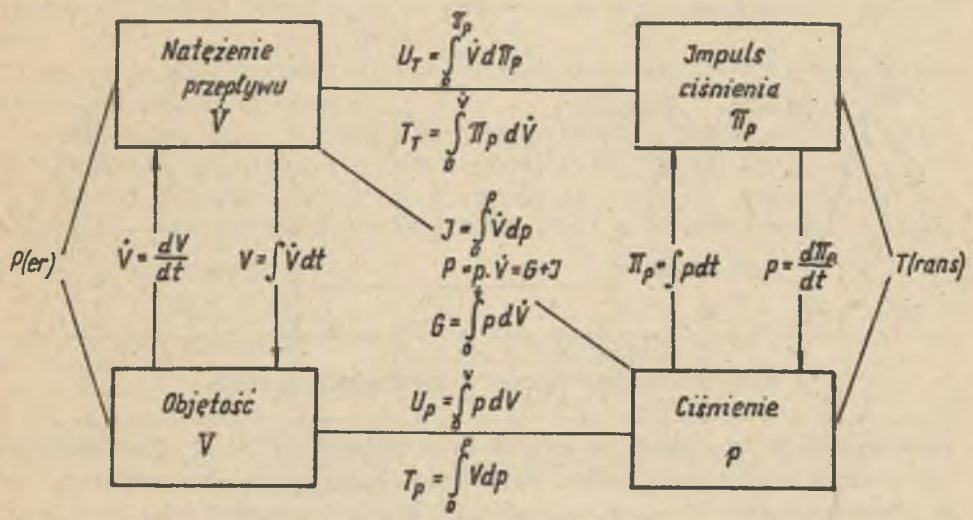
Rys. 2. System mechaniczny translacyjny



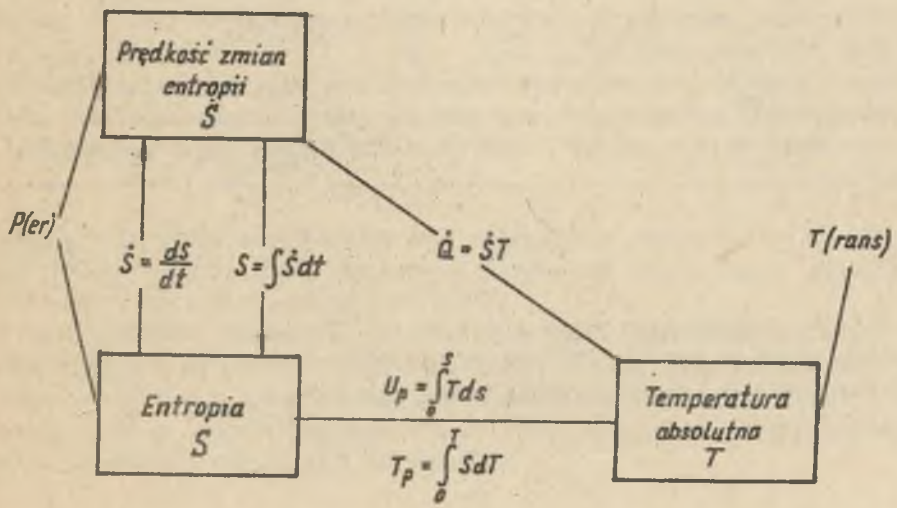
Rys. 3. System elektryczny



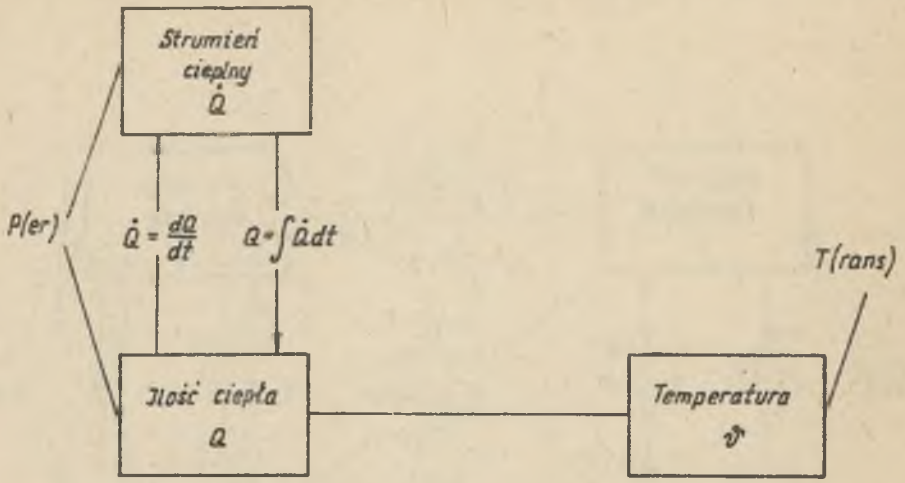
Rys. 4. System mechaniczny rotacyjny



Rys. 5. System strumieniowy



Rys. 6. System termodynamiczny



Rys. 7. Cieplny system pseudotermodynamiczny

Suma wszystkich wielkości jednopunktowych, występujących w jednym punkcie przestrzeni (względnie w jednym węźle systemu dynamicznego) jest równa zeru. Twierdzenie to wyrażone za pomocą jednopunktowych wielkości natężenia τ przedstawia matematyczna postać prawa dla węzłów

$$\sum_i \tau_i = 0, \tag{2-12}$$

Dla obwodów elektrycznych prawo to znane jest jako I prawo Kirchhoffa. Dla układów mechanicznych wyraża je prawo równowagi sił przecinających się w jednym punkcie (prawo Newtona). Dla układów hydraulicznych jest to równanie ciągłości przepływu.

Drugie prawo dotyczy zmiennych dwupunktowych. Suma wszystkich wielkości dwupunktowych wzdłuż zamkniętego obwodu systemu dynamicznego jest równa zeru. Prawo to wyrażone za pomocą wielkości dwupunktowych natężenia σ ma postać.

$$\sum_i \sigma_i = 0 \tag{2-13}$$

Dla obwodów elektrycznych prawo to nazywa się II prawem Kirchhoffa. W przypadku sieci rurociągów II prawo Kirchhoffa oznacza, że suma algebraiczna spadków ciśnienia w obwodzie jest równa zeru.

3. Znaczenie fizykalne wielkości jako II kryterium ich klasyfikacji

Ze względu na różnorodność zjawisk w systemach fizycznych, celowy jest opis matematyczny tych zjawisk za pomocą wielkości o charakterze uogólnionym.

Wprowadza się wielkości typu uogólniona siła, uogólniona prędkość lub uogólnione przemieszczenie.

Wybór uogólnionych wielkości musi być sensowny z punktu widzenia fizyki i powinien być zgodny z opisem matematycznym zjawiska.

W tabeli 2 podano zestawienie wielkości najczęściej przyjmowanych za uogólnione siły, przemieszczenia i prędkości w przypadku różnych rodzajów energii.

Tabela 2

Środowisko fizyczne	Wielkość typu uogólniona		
	Siła	Przemieszczenie	Prędkość
Elektryczne	siła elektromotoryczna (e) Napięcie (u)	ładunek elektryczny (q)	prąd elektryczny (i)
Magnetyczne	siła magnetomotoryczna (F_m)	strumień magnetyczny (ϕ)	siła elektromotoryczna (e)
Mechaniczne	siła (F) moment obrotowy (M_s) ciśnienie (p)	przemieszczenie liniowe (s) przemieszczenie kątowe (φ) objętość (V)	prędkość liniowa (v) prędkość kątowa (ω) natężenie przepływu ($\dot{V}$)
Cieplne Termodynamiczne	temperatura (ϑ) (T)	ilość ciepła (Q) entropia (S)	strumień cieplny ($\dot{Q}$) prędkość zmian entropii ($\dot{S}$)
Chemiczny	potencjał chemiczny	ilość materii	prędkość reakcji

Przyjęcie pojęć uogólnionych sił, prędkości i przemieszczeń (uogólnionych współrzędnych) umożliwia wprowadzenie pojęć uogólnionych parametrów systemów fizycznych i źródeł informacji.

Na wejściach i wyjściach systemów fizycznych można zidentyfikować takie uogólnione wielkości, których iloczyn ma wymiar mocy lub energii. Zależnie od tego w pierwszym przypadku określa się parametry obiektów fizycznych przez uogólnioną impedancję i admitancję, a w drugim przypadku przez uogólnioną sztywność i podatność.

3.1. Uogólniona impedancja

Uogólnioną impedancję Z systemu fizycznego [1, 5] definiuje się jako stosunek uogólnionej siły x_F określonej na wyjściu systemu, do uogólnionej prędkości x_v określonej na jego wejściu

$$Z = \frac{x_F}{x_v} \tag{3-1}$$

przy czym: siła x prędkość = moc.

W ogólnym przypadku impedancje mogą być funkcjami czasu, zmiennej zespolonej lub mogą mieć postać operatorową. Postać operatorowa jest najogólniejszym sposobem przedstawienia impedancji, ponieważ inne postacie mogą być z niej wyprowadzone.

Jeżeli uogólniona siła x_F jest wielkością zawierającą informacje pomiarowe, wówczas na podstawie (3-1) chwilowa wartość mocy P na wejściu przetwornika pomiarowego wyraża zależność

$$P = x_v\, x_F = \frac{x_F^2}{Z}. \tag{3-2}$$

Z wzoru (3-2) wynika, że warunkiem małego poboru mocy ze źródła informacji jest duża wartość impedancji wejściowej przetwornika pomiarowego. Uściślenie powyższego sformułowania brzmi: impedancja wejściowa przetwornika pomiarowego powinna być duża w porównaniu z impedancją wyjściową źródła informacji, co można ogólnie zapisać

$$x_F = x_{F0}\,\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}; \quad Z_1 \gg Z_2 \tag{3-3}$$

przy czym:

x_{F0} - pierwotna, niezakłócona wartość mierzonej wielkości o charakterze uogólnionej siły,

Z_1 - uogólniona impedancja wejściowa przetwornika,

Z_2 - uogólniona impedancja wyjściowa źródła informacji.

Impedancja wejściowa przetwornika pomiarowego decyduje o jego oddziaływaniu na źródło informacji.

3.2. Uogólniona admitancja

Jeżeli nośnikiem informacji jest wielkość o charakterze uogólnionej prędkości x_v, wówczas korzystniej jest posługiwać się pojęciem uogólnionej admitancji:

$$Y = \frac{x_v}{x_F} \tag{3-4}$$

Chwilową wartość mocy pobieraną przez przetwornik w funkcji wielkości będącej nośnikiem informacji x_v określa się jako

$$P = x_p x_v = \frac{x_v^2}{Y} \tag{3-5}$$

Na podstawie (3-5) widać, że zmniejszenie mocy pobieranej ze źródła informacji przez przetwornik jest możliwe przez zwiększenie uogólnionej admitancji wejściowej przetwornika.

Można wykazać [1], że zmierzona wartość wielkości o charakterze uogólnionej prędkości x_v uzależniona jest od uogólnionej admitancji wyjściowej źródła informacji Y_1 i uogólnionej admitancji wejściowej przetwornika Y_2 w następujący sposób

$$x_v = x_{vo} \frac{1}{1+\frac{Y_1}{Y_2}} \tag{3-6}$$

przy czym: x_{vo} - pierwotna niezakłócona wartość wielkości mierzonej.

Gdy spełniony jest warunek

$$Y_2 \gg Y_1 \tag{3-7}$$

wówczas pierwotna wartość wielkości mierzonej jest w przybliżeniu równa zmierzonej wartości wielkości.

3.3. Uogólniona sztywność statyczna

Oddziaływanie przetworników na źródła informacji w ujęciu energetycznym można opisać takimi parametrami, jak uogólniona sztywność statyczna i uogólniona podatność statyczna.

Uogólnioną sztywność statyczną S_s można zdefiniować, jako stosunek uogólnionej siły x_p do uogólnionego przemieszczenia x_s lub do całki z uogólnionej prędkości x_v

$$S_s = \frac{x_p}{x_s} = \frac{x_p}{\int x_v dt} \tag{3-8}$$

przy czym: $x_p\, x_s$ = energia.

Można wykazać [1], że oddziaływanie przetwornika pomiarowego na źródło informacji określa zależność analogiczna do (3-3) po zastąpieniu Z przez S_s. Wówczas otrzymuje się

$$x_p = x_{po} \frac{S_{s1}}{S_{s1} + S_{s2}} \tag{3.9}$$

przy czym:

x_F - zmierzona wartość wielkości informacyjnej o charakterze uogólnionej siły,

x_{F0} - pierwotna niezakłócona wartość wielkości informacyjnej,

S_{s1} - uogólniona statyczna sztywność wejściowa przetwornika,

S_{s2} - uogólniona statyczna sztywność wyjściowa źródła informacji.

Warunek znikomego oddziaływania przetwornika na źródło informacji wynika ze wzoru (3-9)

$$S_{s1} \gg S_{s2} \tag{3-10}$$

3.4. Uogólniona podatność statyczna

Uogólnioną podatność statyczną C_s definiuje się jako stosunek uogólnionego przemieszczenia x_s (lub całki z uogólnionej prędkości x_v) do uogólnionej siły x_F

$$C_s = \frac{x_s}{x_F} = \frac{\int x_v dt}{x_F} \tag{3-11}$$

Analogicznie jak we wzorze (3-6) można określić warunki pomijalnego oddziaływania przetwornika na źródło informacji

$$x_v = x_{v0} \frac{1}{1 + \frac{C_{s1}}{C_{s2}}} \tag{3-12}$$

gdy

$$C_{s2} \gg C_{s1} \tag{3-13}$$

przy czym:

x_v - zmierzona wartość wielkości będącej nośnikiem informacji o charakterze uogólnionej prędkości,

x_{v0} - pierwotna niezakłócona wartość wielkości informacyjnej,

C_{s1} - uogólniona statyczna podatność wyjściowa źródła informacji,

C_{s2} - uogólniona statyczna podatność wejściowa przetwornika pomiarowego.

W tabeli 3 przedstawiono zestawienia uogólnionych parametrów systemów fizycznych i źródeł informacji.

Posługiwanie się pojęciami uogólniona podatność i sztywność statyczna jest szczególnie przydatna, gdy w warunkach ustalonej pracy systemów fizycznych uogólniona impedancja i admitancja są równe zero.

Tabela 3

Zestawienie uogólnionych wielkości

Wielkość informacyjna ma charakter uogólnionej		Iloczyn wielkości ma wymiar mocy			Iloczyn wielkości ma wymiar energii		
Siły	Prędkości	Wielkość towarzysząca	Impedancja	Admitancja	Wielkość towarzysząca	Sztywność	Podatność
Napięcie U		Natężenie prądu I	U/I, Ω		Ładunek elektryczny q	U/q, $\frac{1}{C}$	
	Natężenie prądu I	Napięcie U		I/U, $\frac{1}{\Omega}$	$\int$(napięcie) dt		$I/\int U\,dt$, $\frac{1}{H}$
Siła mechaniczna F		Prędkość liniowa v	F/v, $\frac{N\,s}{m}$		Przemieszczenie liniowe s	F/s, $\frac{N}{m}$	
	Przemieszczenie liniowe s	Prędkość zmiany siły $\frac{dF}{dt}$		$\frac{dv}{dF}$, $\frac{s}{N}\,m$	Siła F		$\frac{s}{F}$, $\frac{m}{N}$
Moment obrotowy M_o		Prędkość kątowa ω	M_o/ω, $\frac{Nm\,s}{rad}$		Przemieszczenie kątowe φ	$\frac{M_o}{\varphi}$, $\frac{N\,m}{rad}$	
	Prędkość liniowa v	Siła F		$\frac{v}{F}$, $\frac{m}{N}\,s$	$\int$(siła) dt		$\int F\,dt$, $\frac{m}{N\,s^2}$
	Prędkość kątowa ω	Moment M_o		$\frac{\omega}{M_o}$, $\frac{rad}{N\,m\,s}$	$\int$(moment) dt		$\int M_o\,dt$, $\frac{rad}{Nm\,s^2}$
	Przemieszczenie kątowe φ	$\frac{dM_o}{dt}$		$\frac{\varphi}{d(M_o)/dt}$, $\frac{rad\,s}{Nm}$	Moment (M_o)		$\frac{\varphi}{M_o}$, $\frac{rad}{Nm}$
	Przyspieszenie liniowe a	$\int$(siła) dt		$\frac{a}{\int F\,dt}$, $\frac{m/s^2}{N\,s}$	$\int\left[\int(\text{siła})\,dt\right]dt$		$\frac{a}{\iint F\,dt^2}$, $\frac{m/s^2}{Ns^2}$
	Przyspieszenie kątowe α	$\int$(moment) dt		$\frac{\alpha}{\int M\,dt}$, $\frac{rad/s^2}{Nm\,s}$	$\int\left[\int(\text{moment})\,dt\right]dt$		$\frac{\alpha}{\iint M\,dt^2}$, $\frac{rad/s^2}{Nm\,s^2}$
Temperatura ϑ		Strumień ciepła przepływający przy różnicy temperatur 1 °C $\dot{Q}$	$\frac{\vartheta}{\dot{Q}}$, $\frac{°C}{J/s\ °C}$		Ilość ciepła przepływająca przy różnicy temperatur 1 °C Q	$\frac{\vartheta}{Q}$, $\frac{°C}{J.deg}$	

LITERATURA

[1] Doebelin E.O.: Measurement Systems. Application and Design. London 1966 Mac Graw-Hill.

[2] Hagel R.: Miernictwo dynamiczne. WNT, Warszawa 1975.

[3] Mac Farlene, A.G.J.: Engineering systems analysis. G.G. Harrp Co.Ltd., London 1964.

[4] Meisel J.: Zasady elektromechanicznego przetwarzania energii.WNT, Warszawa 1970.

[5] Ostrovskij L.A.: Elektrische Messtechnik. Grundlagen einer allgemeinen Theorie. VEB Verlag Technik, Berlin 1969.

[6] Watts R.D.: Pewna propozycja ujęcia problemów konstrukcji przyrządów. Przegląd Elektrotechniczny 8/1973.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ФИЗИЧЕСКИМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ВЕЛИЧИНАМ

Р е з ю м е

Статья содержит предложение нового способа классификации измерительных физических величин. Даны два критерия раздела величин, которые являются исходной точкой для систематизации физических величин. Рассмотренные вопросы являются введением к системному подходу к измерительным физическим величинам.

SYSTEM FORMULATION OF PHYSICAL MEASUREMENT QUANTITIES

S u m m a r y

A new way of physical measurement quantities clasification has been introduced. As a starting point to systematization of physical quantities two criteria of their division have been given. These criteria have resulted in the possibility of the interdisciplinar approach to the problem of different physical quantities measurement. The paper is an introduction to the system formulation of the physical measurement quantities.