

## METODA IDENTYFIKACJI STANU TECHNICZNEGO URZĄDZEŃ NA PODSTAWIE OCENY ICH DZIAŁANIA

Jerzy GIRTLEK

Katedra Siłowni Okrętowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa  
Politechniki Gdańskiej

ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk; tel. (58) 347-24-30, fax: (58) 347-19-81, e-mail: [kgirtl@pg.gda.pl](mailto:kgirtl@pg.gda.pl)

### Streszczenie

Przedstawiono propozycję ilościowej interpretacji działania dowolnego urządzenia, w którym zachodzą oddziaływania energetyczne w określonym czasie. Według tej interpretacji, działanie urządzeń zostało przyrównane do pojęcia wielkości fizycznej, z jednostką miary [dżul×sekunda], którą można przedstawić zależnością podobną do tych, jakie są używane w fizyce, a ściślej w mechanice klasycznej i mechanice kwantowej. Uzasadniono, że w przypadku przyjęcia zaproponowanej interpretacji działania urządzeń, w których następują przemiany energetyczne, działanie może być nośnikiem informacji o stanie tych urządzeń, a więc – sygnałem diagnostycznym. Do uzasadnienia tego zastosowano jednorodny proces Poissona, który umożliwił skonstruowanie modelu przebiegu pogarszania działania urządzeń, jako procesu losowego o jednorodnych i niezależnych przyrostach spadku generowanej przez nie energii w określonym czasie.

Słowa kluczowe: diagnostyka, działanie, energia, stan techniczny, urządzenie.

### IDENTIFICATION METHOD OF TECHNICAL STATE OF THE OBJECTS ON THE GROUND OF ESTIMATION OF THEIR WORK

The paper presents suggestion of quantitative interpretation of work of a objects, in which energetic interactions proceed in determined time. According to the interpretation, work of the object is considered as a physical quantity with the unit of measure [joule×second], which can be presented by the dependence similar to these ones which are used in classic mechanics and quantum mechanics. It has been motivated that, in the case of accepting the suggested interpretation of work of objects, in which energetic changes proceed, such work can be a carrier of information about states of these systems – so, it can be a diagnostic signal. To motivate this, it has been used homogeneous Poisson's process, which made possible designing model of the course of getting the objects' work worse. This model is a random process of homogeneous, independent, single and the same gains  $e$  in energy drop, in determined time.

### 1. WSTĘP

*Działanie* jest pojęciem, które może być różnie rozumiane i różnie definiowane. Rozpatrywane jest w mechanice klasycznej i mechanice kwantowej, w prakseologii, naukach technicznych itd. [8]. W ujęciu prakseologicznym rozróżnia się:

- działanie (istoty obdarzonej świadomością, a więc człowieka bądź zespołu ludzi);
- zachowanie (organizmu żywego innego niż człowiek);
- funkcjonowanie (urządzenia, obiektu technicznego, systemu technicznego).

W nauce i w praktyce, pojęcie *działania* nie jest jednak odnoszone wyłącznie do ludzi. W naukach technicznych rozpatrywane jest *działanie urządzeń* i wobec tego przedstawiana zasada działania np. silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym (4 i 2-suwowego), turbinowego silnika spalinowego, prądnicy (prądu stałego i przemiennego), pompy wirowej odśrodkowej, sprężarki tłokowej, kotła parowego, itd. [8]. Sytuację tę należy uznać za oczywistą, bowiem każdą naukę cechuje swoisty język. Znamienne jest dla tak rozumianego działania to, że towarzyszy mu generowanie energii bądź jej przenoszenie. To pierwsze zachodzi w maszynach (a więc w urządzeniach, w których następuje

przekształcanie energii), a drugie – w innych urządzeniach, np. w chłodziarach. Ponadto działanie zawsze powoduje zużycie energii  $E$  i wymaga czasu  $t$  zgodnie z zasadą: *im jest mniej sprawne, tym zużycie energii i czasu jest większe*. Zasada ta odzwierciedla fakt, że energia zarówno przetwarzana, jak też przenoszona przez wspomniane urządzenia powoduje zużycie ich struktury konstrukcyjnej. Wskutek tego następuje zmniejszenie:

1) sprawności przetwarzania energii (w przypadku maszyn);

2) ilości przekazywanej energii (w przypadku urządzeń nie będących maszynami, np. chłodziar wody bądź oleju smarowego silników o zapłonie samoczynnym, kotłów, itd.).

Ze względu na to, że własności struktury konstrukcyjnej każdego urządzenia określają jego stan techniczny, zatem oczywiste jest, że energia zmieniając się wraz z tym stanem jednoznacznie ten stan charakteryzuje. W przypadku każdego urządzenia, zależnie od jego stanu technicznego i warunków jego zastosowania, energia określa więc zdolność tego urządzenia do wykonania pracy. Zatem energia generowana przez dowolne urządzenie jest miarą jego zdolności do wykonania pracy.

W praktyce jednak jest istotne nie tylko to, jaka jest wartość energii, którą można dysponować używając urządzenie w danej chwili, lecz także czas, w którym może ona być przez to urządzenie zapewniona. Wobec tego jest sens rozpatrywania działania różnych urządzeń w takim ujęciu, aby mogło być ono określone jednocześnie przez energię i czas, w którym można tą energią dysponować w celu zrealizowania zadań, do których urządzenia te zostały przystosowane w fazie projektowania i wytwarzania. Zagadnienie to zostało podjęte również z tego powodu, że istnieją analogie takiego podejścia w fizyce, a ściślej – mechanice klasycznej (przy rozpatrywaniu ruchu ciała jako punktu lub układu punktów materialnych) i w mechanice kwantowej (przy rozpatrywaniu promieniowania elektromagnetycznego ciał).

## 2. INTERPRETACJA DZIAŁANIA URZĄDZENIA

Działanie (funkcjonowanie) urządzeń polega (w zależności od ich przeznaczenia) na przetwarzaniu, bądź przenoszeniu doprowadzonej energii. W przypadku takich maszyn, jak silniki o zapłonie samoczynnym, następuje w nich przetwarzanie energii chemicznej (zawartej w doprowadzonym do ich komór spalania paliwie) na energię cieplną a następnie mechaniczną, umożliwiającą wytworzenie momentu obrotowego ( $M_o$ ) wału korbowego przy określonej prędkości obrotowej ( $n$ ) danego silnika [12] Wobec tego działanie urządzeń w przedziale czasu  $[t_0, t_n]$  można, w ujęciu ogólnym, interpretować następująco:

$$D = \int_{t_0}^{t_n} E(t) dt \quad (1)$$

gdzie:  $D$  – działanie urządzenia;  $E$  – energia przetworzona (uzyskana), umożliwiająca realizację określonego zadania (energia użyteczna);  $t$  – czas zużywania energii  $E$ ;  $t_0 \leq t \leq t_n$ .

Zależność (1) odzwierciedla fizyczne walory działania, ponieważ wynika z niej, że w przypadku, gdy równe są zero bądź energia  $E$ , bądź czas  $t$ , bądź jednocześnie energia  $E$  i czas  $t$ , urządzenie nie może działać (funkcjonować). Ponadto odzwierciedla również to, że działanie jako wielkość fizyczna ma skończoną wartość, gdyż wartość zarówno energii  $E$  jak również czasu  $t$  nie może być nieograniczona.

Interpretacja działania przedstawiona zależnością (1) ma odpowiednik w fizyce, a ściślej mechanice klasycznej i mechanice kwantowej.

W mechanice klasycznej wykazano, że równanie ruchu układu mechanicznego (układu punktów materialnych) można zapisać w formie wariacyjnej [3]:

$$\delta D_H = 0 \quad (2)$$

gdzie:  $D_H$  – działanie układu, nazywane działaniem Hamiltona;  $\delta$  – operator rachunku wariacyjnego.

Działanie ( $D_H$ ), w przedziale czasu  $[t_1, t_2]$ , jest przy tym interpretowane następująco:

$$D_H = \int_{t_1}^{t_2} E_H dt \quad (3)$$

przy czym  $E_H = E_k - E_p$

gdzie:  $E_H$  – energia, tzw. funkcja Lagrange'a układu mechanicznego (ciała), lagrangian;  $E_k$  – energia kinetyczna,  $E_p$  – energia potencjalna.

Podobną formę analityczną ma działanie Maupertiusa ( $D_M$ ) w przedziale czasu  $[t_1, t_2]$ , które wyrażane jest następująco [11]:

$$D_M = \int_{t_1}^{t_2} 2E_k dt \quad (4)$$

gdzie:  $E_k$  – energia kinetyczna.

W fizyce działanie jest interpretowane także jako wielkość będąca iloczynem pędu ( $p$ ) ciała i jego przesunięcia ( $s$ ), czyli [3, 11]:

$$D_p = ps \quad (5)$$

przy czym:  $p = mv$

gdzie:  $m$  – masa ciała,  $v$  – prędkość ciała.

Zależność (5) można uzasadnić tym, że pęd ciała można określić w formie zależności:

$$dp = Kdt \quad (6)$$

dlatego, że  $dp = mdv = madt = Kdt$

gdzie:  $a$  – przyspieszenie ciała,  $K$  – siła z jaką oddziałuje dane ciało na inne.

\* Pęd ciała może się zmieniać w czasie, stosownie do zmiany prędkości i masy tego ciała, wobec tego działanie  $D_p$  w przedziale czasu  $[t_1, t_2]$ , zgodnie z zależnościami (5) i (6), można przedstawić w formie:

$$D_p = \int_{t_1}^{t_2} Ksdt = \int_{t_1}^{t_2} L_p dt \quad (7)$$

W mechanice kwantowej odpowiednikiem działania jest stała Plancka ( $h$ ), która określa zależność energii jednego kwantu promieniowania elektromagnetycznego ( $E_v$ ) od częstości kwantowania ( $\nu$ ), zgodnie z zależnością [10]:

$$E_v = h\nu \quad \text{a więc} \quad h = E_v \nu^{-1} \quad (8)$$

Działanie wyrażone wzorem (1) ma także swoje odpowiedniki w innych obszarach wiedzy, jak na przykład w termodynamice i tribologii.

W termodynamice są rozpatrywane dwie formy przekazywania energii w określonym czasie, którymi są praca  $L$  oraz ciepło  $Q$  [10]. W tym przypadku działanie układów termodynamicznych (ciał, urządzeń), w przedziale  $[[t_1, t_2]$ , można ogólnie wyrazić następującymi wzorami:

$$D_L = \int_{t_1}^{t_2} Ldt; \quad D_Q = \int_{t_1}^{t_2} Qdt \quad (9)$$

Z kolei w tribologii, tak interpretowane działanie ma istotne znaczenie przy rozpatrywaniu pracy tarcia ( $W_T$ ) układów tribologicznych, w określonym czasie ( $t$ ) [14]. Wtedy działanie (funkcjonowanie) danego układu tribologicznego można wyrazić następująco:

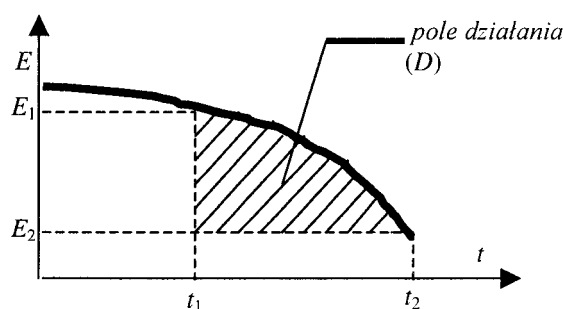
$$D_T = \int_{t_1}^{t_2} W_T dt \quad (10)$$

Praca każdego urządzenia, także dowolnego jego układu tribologicznego (jeśli takie układy w nim ist-

nieją) zależy od warunków, w których jest ona wykonywana. W warunkach trudniejszych, energia użyteczna (rys. 2), a więc również praca użyteczna, każdego urządzenia będzie mniejsza, natomiast praca tarcia w układach tribologicznych urządzenia – większa. Ta ostatnia zwiększając się powoduje zmniejszanie pracy użytecznej i tym samym spadek sprawności mechanicznej urządzenia [12].

Oczywiste jest, że tak interpretowane działanie powinno być analizowane wszechstronnie. Niezbędne jest więc zastosowanie różnych wskaźników określających sprawność takiego działania, w tym np. prakseometrycznych mierników sprawności uniwersalnej [5].

Tak rozumiane działanie może być, zgodnie z zależnością (1), przedstawione w układzie współrzędnych „ $E-t$ ”, a więc w formie wykresu, który proponuję nazwać *wykresem działania* dlatego, że pole powierzchni na tym wykresie odzwierciedla działanie (funkcjonowanie) urządzenia. Przykład takiego *wykresu działania*, dla dowolnie wybranych chwil  $t_1$  i  $t_2$ , przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykład wykresu działania urządzenia:  $E$  – energia,  $t$  – czas

Działanie urządzeń może być rozumiane dwojako: jako wymagane ( $D_W$ ), czyli takie, które jest niezbędne, aby mogło być wykonane zadanie, do którego realizacji zostały dane urządzenia przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania i jako możliwe ( $D_M$ ), czyli takie, które może dane urządzenie zrealizować w wymaganym czasie, będąc w określonym stanie technicznym i funkcjonując ustalonych warunkach. Zatem można uznać, że każde urządzenie jest w stanie zdatności (i może wykonać zadanie) gdy:

$$D_M \geq D_W \quad (11)$$

W przeciwnym przypadku (gdy  $D_M < D_W$ ) należy uznać, że urządzenie jest w stanie niezdatności. Oczywiście, gdy nie wszystkie zadania muszą być wykonane w danym czasie, lecz tylko te, dla których spełniony jest warunek (11), to można uznać, że urządzenie znajduje się w stanach pośrednich zdatności i nazwać je stanami częściowej zdatności [9]. O przydatności poszczególnych urządzeń można byłoby więc wnioskować

wać po dokonaniu porównania pól działań wymagane-  
go ( $D_W$ ) i możliwego ( $D_M$ ). Oczywiście jest, że rozpa-  
trywanie działania z uwzględnieniem obu jego rodza-  
jów jest równoznaczne z badaniem zmian energii wy-  
maganej ( $E_W$ ), jaka jest potrzebna, w czasie wymaga-  
nym ( $t_W$ ), do wykonania danego zadania oraz energii  
możliwej ( $E_M$ ), a więc tej, która może być dostarczona  
w czasie możliwym ( $t_M$ ) przez urządzenie, zastosowane  
do realizacji tego zadania. Zastosowanie działania  
urządzeń jako symptomu ich stanu technicznego wy-  
maga przede wszystkim określenia klas stanów wzor-  
cowych tego stanu. W diagnostyce zawsze istotne jest  
ustalenie, czy dane urządzenie znajduje się w stanie  
zdatności, a zatem można sformułować następujące  
przypadki jego istnienia:

- 1)  $t_M = t_W$ , gdy jednocześnie  $E_M \geq E_W$ ;
- 2)  $t_M = t_W$ , gdy jednocześnie  $E_M = E_W$ ;
- 3)  $t_M \geq t_W$ , gdy jednocześnie  $E_M = E_W$ ;
- 4)  $t_M \geq t_W$ , gdy jednocześnie  $E_M \geq E_W$

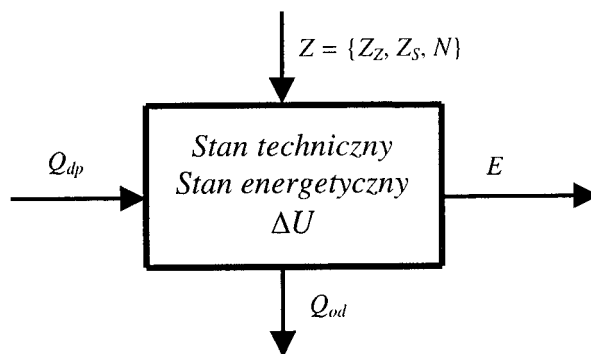
Oczywiście jest, że aby wyznaczyć pole działania  
( $D$ ) trzeba znać zależność funkcyjną energii od czasu,  
czyli  $E = f(t)$ . Ze względu na to, że  $D = f(E, t)$ , wobec  
tego działanie urządzeń można także przedstawić w  
układzie współrzędnych „ $D, E, t$ ”.

### 3. DIAGNOSTYCZNE ASPEKTY DZIAŁANIA URZĄDZENIA

Działanie urządzeń, w których zachodzą zmiany  
energii, można rozpatrywać jako wielkość fizyczną  
charakteryzującą zużycie energii w określonym  
czasie. W tym przypadku, podobnie jak w fizyce i me-  
chanice kwantowej, działanie może być wyrażone w  
jednostkach miary [dżul×sekunda] i przedstawione  
wzorem (1). Każde z takich urządzeń można rozpatry-  
wać jako przetwornik energii. Schemat takiego prze-  
twornika, na przykładzie silnika spalinowego, został  
przedstawiony na rys. 2.

Wskutek zużycia, zmiany energii urządzenia będą  
przebiegały z coraz mniejszą sprawnością. Wobec tego  
przy  $Q_{dp} = \text{idem}$  wraz z upływem czasu energia  $E$   
(rys.1) będzie malała. Utrzymanie zaś warunku  $E =$   
 $\text{idem}$ , wymagać będzie zwiększania  $Q_{dp}$  z upływem  
czasu, jeśli będzie to możliwe. W niektórych przypad-  
kach z upływem czasu może istnieć także konieczność  
zmniejszania  $Q_{od}$ .

Zmniejszanie się energii  $E$  zależy od stanu tech-  
nicznego urządzenia i zakłóceń  $Z$ . W rezultacie, zarów-  
no badanie diagnostyczne, jak też kolejne etapy (rod-  
zaje) wnioskowania diagnostycznego mogą być obar-  
czone (nieraz znacznym) błędem [2].



Rys. 2. Schemat urządzenia jako przetwornika energii:  $Z$  – zakłócenia,  
 $Z_Z$  – zakłócenia zasilania,  $Z_S$  – zakłócenia sterowania,  $N$  – inne zakłó-  
cenia,  $Q_{dp}$  – energia doprowadzona,  $Q_{od}$  – energia tracona,  $\Delta U$   
– przyrost energii wewnętrznej,  $E$  – energia użyteczna

Wobec tego, jeżeli system diagnozujący zostanie przy-  
sposobiony do pomiarów i wnioskowań diagnostycz-  
nych tak, że nie będzie czuły na zmiany  $Z$ , to energia  
 $E$  będzie odwzorowywała stan techniczny urządzenia.  
Ze względu na to, że zarówno zmiana stanu technicz-  
nego urządzenia, jak też zakłócenia  $Z$  na nie oddziału-  
jące są losowe, zatem można zastosować ciąg zmiennych  
losowych jako model matematyczny procesu  
zmian energii  $E$  w czasie  $t$ . W praktyce zmniejszenie  
energii  $E$  o wartość elementarną (np.  $\Delta E = e$ ) jest moż-  
liwe do stwierdzenia w przypadku, gdy urządzenia  
diagnostyczne mają stosowną do tego rozdzielczość  
pomiarową. Zatem zarejestrowanie zmiany energii o  
stałą wartość  $e$  będzie możliwe po upływie czasu  $t_e$   
będącego realizacją zmiennej losowej  $T$ .

Wobec tego, można zmianę energii  $\Delta E$  o wartość  $e$   
uznać za zdarzenie losowe  $A$ , które po upływie czasu  $t$ ,  
np. w przedziale  $(0, t)$ , może powtórzyć się wielokrot-  
nie i wskutek tego pojawić się liczba  $B$ , powtórzeń tego  
zdarzenia. Liczba  $B$ , jest oczywiście zmienną losową o  
wartościach całkowitych nieujemnych. Zależność tej  
zmiennej losowej od czasu tworzy proces stochastyczny  
 $\{B(t); t \geq 0\}$ . Do opisu tego procesu zmiany energii  
 $E$  może być zastosowany jednorodny proces Poissona  
[1, 4, 8]. Stosując ten proces można przedstawić nastę-  
pującą interpretację fizyczną procesu zmniejszania  
energii  $E$  urządzenia o stałą wartość  $e$ : od chwili rozpo-  
częcia działania urządzenia energetycznego (może to  
być chwila  $t_0$ ) do chwili zarejestrowania (wskutek jego  
zużycia) po raz pierwszy, przez urządzenie pomiarowe,  
zmniejszenia energii  $E$  o wartość  $e$ , może być genero-  
wana jakakolwiek wartość energii (w tym maksymalna)  
w poszczególnych przedziałach czasu. Dalsze zużycie  
urządzenia energetycznego spowoduje, z upływem  
czasu, pojawienie się kolejnych rejestracji spadku ener-

gii  $E$  o jednakowe wartości ( $e$ ). Wobec tego, w przypadku zarejestrowania do chwili  $t$  skumulowanej liczby  $B_t$  zaistniałych zdarzeń  $A$ , opisanej jednorodnym procesem Poissona, można spadek energii  $\Delta E_t$  w chwili  $t$  przedstawić zależnością:

$$\Delta E_t = eB_t \quad (12)$$

przy czym zmienna losowa  $B_t$  ma następujący rozkład [1, 4, 5]:

$$P(B_t = k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} \exp(-\lambda t); \quad k = 1, 2, \dots \quad (13)$$

gdzie:  $\lambda$  – wielkość stała, która może być interpretowana jako intensywność pojawiania się zdarzeń  $A$ , czyli zarejestrowanych przez urządzenie pomiarowe spadków energii  $E$  o jednakowe wartości ( $e$ );  $\lambda > 0$  ( $\lambda = \text{idem}$ ).

Wartość oczekiwana i wariancja procesu narastania liczby zdarzeń  $A$  (spadków energii) można przedstawić następująco [1, 6]:

$$E(B_t) = \lambda t; \quad D^2(B_t) = \lambda t \quad (14)$$

Zatem zgodnie z zależnością (1) wartość oczekiwana i odchylenie standardowe spadku energii generowanej przez urządzenie, do chwili  $t$  mogą być wyrażone wzorami:

$$E[\Delta E(t)] = eE(B_t) \quad (15)$$

$$\sigma_E(t) = e\sqrt{D^2(B_t)} = e\sqrt{\lambda t} \quad (16)$$

Uwzględniając fakt, że dla  $t = 0$  wartość energii, którą generuje urządzenie jest największa, czyli że  $E(0) = E_{max}$ , można zależność matematyczną opisującą spadek tej energii z upływem czasu wyrazić następująco:

$$E(t) = \begin{cases} E_{max} & \text{dla } t = 0 \\ E_{max} - e\lambda t \pm e\sqrt{\lambda t} & \text{dla } t > 0 \end{cases} \quad (17)$$

Przyjęcie we wzorze (17) energii  $E_{max}$  zamiast  $E(E_{max})$  jest dopuszczalne dlatego iż dla  $t = 0$ , a więc urządzeń nowych (dopiero wprowadzonych do eksploatacji) można przyjąć, że ich energie początkowe  $E_{max(i)}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) różnią się nie istotnie. Oczywiście jest, że to założenie może być słuszne tylko w przypadku urządzeń tego samego typu i przy tym jednorod-

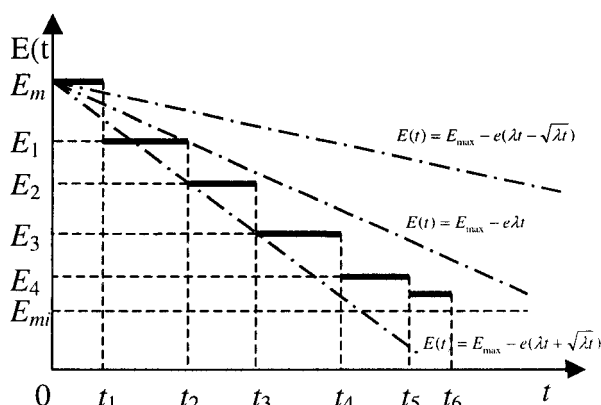
nych, czyli wykonanych według tego samego projektu, w tych samych warunkach produkcyjnych i przy stabilnej kontroli technicznej jakości produkcji.

Wzór (17) określa następujący proces zmniejszania energii urządzenia ulegającego zużyciu:

$$E_{max} \rightarrow E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow \dots \rightarrow E_{n-1} \rightarrow E_{n(min)}$$

gdzie:  $E_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ) – energie określone w wyniku zarejestrowania (przez urządzenie pomiarowe) olejnych spadków o wartości  $e$  (kwantów) energii  $E$  urządzenia;  $E_{n(min)}$  – najmniejsza energia, która może być generowana przez urządzenie w chwili uszkodzenia (nie musi być możliwe jej zarejestrowanie przez urządzenie pomiarowe).

Graficzna interpretacja zależności (17) przedstawiona jest na rys. 3.



Rys. 3. Graficzna interpretacja przykładowej realizacji zmniejszania energii urządzenia:  $E$  – energia,  $e$  – kwant energii, o który ulega zmniejszeniu energia  $E$  i który może być zarejestrowany przez urządzenie pomiarowe;  $\lambda$  – intensywność pojawiania się zarejestrowanych przez urządzenie pomiarowe kwantów, o które zmniejszana jest energia  $E$ ,  $t$  – czas

Energia  $E$  generowana przez urządzenie może być zużywana z upływem czasu  $t$  w różny sposób, najczęściej w formie pracy ( $L$ ) i ciepła ( $Q$ ). Pierwszy z tych przypadków można wyjaśnić na przykładzie działania silnika o zapłonie samoczynnym, a drugi – przenośnika (wymiennika) ciepła. W przypadku silnika o zapłonie samoczynnym, energia powstała wskutek spalania paliwa w cylindrach umożliwia wytwarzanie momentu obrotowego silnika. W praktyce rozpatrywany jest średni moment obrotowy silnika ( $M_o$ ) działający w ciągu całego obiegu termodynamicznego, przenoszony z wału korbowego silnika do odbiornika. Moment ten może być mierzony różnymi metodami z zastosowaniem: torsjometrów lub dynamometrów sprzęgłowych, bądź hamulców silnikowych. W wyniku przekazywania momentu obrotowego od silnika do odbiornika wykonywana jest praca  $L$ , którą w tym przypadku można określić z zależności:

$$L = M_o \varphi = M_o \omega t \quad (18)$$

gdzie:  $L$  – praca całkowita na drodze kątowej,  $M_o$  – moment obrotowy silnika,  $\varphi$  – kąt obrotu wału korbowego [rad],  $\omega$  – prędkość kątowa wału korbowego silnika [rad/s].

Z zależności (1) oraz (18) wynika, że działanie takich maszyn, jak silniki o zapłonie samoczynnym może być określone wzorem:

$$D = \int_{t_0}^{t_n} M_o \omega t dt \quad (19)$$

przy czym można założyć:  $M_o = \text{idem}$ ,  $\omega = \text{idem}$ .

Z kolei w przypadku urządzeń nie będących maszynami, na przykład przenośników ciepła, energia wewnętrzna przepływających przez nie czynników energetycznych może być zwiększana (podgrzewacze), bądź zmniejszana (chłodnice). W obu przypadkach ciepło, rozpatrywane w stanie ustalonym, może być wyrażone zależnością:

$$Q = mc_s \Big|_{T_1}^{T_2} (T_1 - T_2) \quad (20)$$

gdzie:  $m$  – masa czynnika energetycznego przepływającego przez przenośnik ciepła;  $c_s \Big|_{T_1}^{T_2}$  – średnie ciepło właściwe czynnika w zakresie temperatur od  $T_1$  do  $T_2$ ;  $T_1$  – temperatura czynnika na dolocie do przenośnika ciepła;  $T_2$  – temperatura czynnika na odlocie z wymiennika ciepła.

Przedziały czasu, po upływie których następuje zarejestrowanie przez urządzenie pomiarowe zmniejszenie energii o kwant  $e$ , są realizacjami zmiennej losowej  $T_e$  oznaczającej czas dyskretnego spadku energii wskutek zużycia urządzenia. Energia  $E$  generowana przez urządzenie zależy od jego stanu technicznego oraz wykonywanych zadań i zakłóceń istniejących w czasie ich realizacji. W przypadku, gdy zadania są wyznaczone i określone warunki ich realizacji, energia generowana przez urządzenie jest funkcją jego stanu technicznego.

W praktyce na ogół nie ma potrzeby podejmowanie decyzji eksploatacyjnych po upływie każdej chwili, w której zarejestrowany został spadek energii  $E$  o kwant  $e$ . Bardziej przydatny w tym celu jest zbiór mniej liczny (np. trójelementowy) rozłącznych klas stanów energetycznych (które można nazwać wprost – stanami), obejmujący wszystkie spadki energii  $E$  o wartość  $e$ , a mianowicie:

$$X = \{x_1, x_2, x_3\} \quad (21)$$

o następującej interpretacji:

- $x_1$  – stan energetyczny urządzenia, niezbędny do wykonania w ustalonym czasie wszystkich zadań, do których zostało ono przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania;
- $x_2$  – stan energetyczny urządzenia, niezbędny do wykonania tylko tych zadań, które mogą jeszcze zapewnić bezpieczeństwo użytkownika;
- $x_3$  – stan energetyczny urządzenia przydatny wyłącznie do diagnozowania urządzenia, lecz uniemożliwiający wykonanie jakiegokolwiek zadania.

W przypadku stwierdzenia stanu  $x_2$  urządzenie może być odnowione, bądź użytkowane nadal aż do pojawienia się stanu  $x_3$ . Zajście stanu  $x_3$  uniemożliwia dalsze użytkowanie urządzenia, co wymusza wykonanie odpowiedniej obsługi w celu jego odnowy.

Stany  $x_i (i = 1, 2, 3)$  mogą być uważane za wartości procesu stochastycznego  $\{Y(t): t \geq 0\}$ , jako losowego przebiegu następujących po sobie i powiązanych przyczynowo w czasie stanów energetycznych, które w ściśle ustalonej chwili  $\tau$  czasu pracy urządzenia mogą pojawiać się z określonym prawdopodobieństwem.

Ze względu na to, że stan techniczny urządzenia zależy przede wszystkim od jego jakości początkowej oraz warunków eksploatacji, zaś słabo jest skorelowany z czasem użytkowania, zatem można (podobnie, jak w przypadku procesu eksploatacji silników o zapłonie samoczynnym) [6] sformułować następującą hipotezę (H): *możliwe jest prognozowanie stanu energetycznego  $x_i \in X (i = 1, 2, 3)$  urządzenia w chwili  $\tau_n + \tau$ , gdy znany jest on w chwili  $\tau_n$  dlatego, ponieważ jego stan energetyczny rozpatrywany w dowolnej chwili  $\tau_n (n = 0, 1, \dots, m): \tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_m$  zależy istotnie od bezpośrednio poprzedzającego, a nie zależy od stanów energetycznych, które zaszły wcześniej i przedziałów czasu ich trwania.*

Należy zauważyć, że sformułowana hipoteza nie zawiera żadnych takich sprzeczności, które mogłyby ją sfalsyfikować jeszcze przed jej sprawdzeniem. Do zweryfikowania tej hipotezy można zastosować metodę wnioskowania niededukcyjnego (indukcyjnego) nazywaną wnioskowaniem redukcyjnym. Weryfikacja tej hipotezy może być przeprowadzona podobnie, jak w przypadku weryfikacji hipotezy dotyczącej prognozowania stanu procesu eksploatacji silników o zapłonie samoczynnym [9].

Spostrzeżenie to umożliwia zastosowanie teorii procesów semimarkowskich do sterowania procesem eksploatacji urządzeń z uwzględnieniem ich działania, a tym samym – stanu technicznego.

#### 4. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Działanie dowolnego urządzenia, w przedstawionej propozycji, jest rozumiane jako generowanie przez niego energii  $E$  w określonym czasie  $t$ . Zostało więc przedstawione jako wielkość fizyczna, którą można wyrazić wartością liczbową i jednostką miary nazwaną dżulosekundą [dżul×sekunda]. Bezpośrednim skutkiem tak interpretowanego działania urządzenia jest generowana przez niego niezbędna energia  $E$ , w odpowiednim czasie  $t$ , niezbędna do wykonania określonego zadania. Energia  $E$  i czas  $t$  są więc wielkościami jednoznacznie charakteryzującymi działanie urządzenia. Działanie tak rozumiane może być uznane za wielkość bezpośrednio charakteryzującą stan techniczny urządzenia, a więc symptom tego stanu. Wraz z narastaniem zużycia wartość tak rozumianego działania urządzenia, w określonym czasie, będzie maleć wskutek zmniejszenia generowanej przez niego energii. W celu określenia zakresu pogarszania tego działania przyjęto model stochastyczny zmniejszenia generowanej energii użytkowej (jaką można przekazać odbiorcy) w formie procesu losowego o jednakowych (stałych), jednorodnych i niezależnych spadkach.

Na uwagę zasługuje to, że tak interpretowane działanie może być uznane za symptom diagnostyczny stanu urządzenia, nie zaś energia przez niego emitowana i czas jej generacji. Zarówno emitowana przez urządzenie energia, jak i czas jej emisji nie odzwierciedlają jednoznacznie stanu tego urządzenia, jeśli będą rozpatrywane oddzielnie. Dopiero łączne rozpatrywanie tych wielkości, w formie związku wyrażonego równaniem (1) stanowi taki symptom. Może się bowiem zdarzyć tak, że urządzenie nie może natychmiast dostarczać wymaganą energię, lecz jest w stanie dostarczać wymaganą energię dopiero po upływie dłuższego czasu, o wiele większego od wymaganego (np. zbyt długi czas trwania procesów przejściowych, tzw. stanów nieustalonych, zanim zostanie ono w pełni obciążone), albo też może być tak, że potrzebna do realizacji danego zadania energia nie zostanie wytworzona przez dane urządzenie w wymaganym czasie (np. zbyt mała moc urządzenia z powodu jego zużycia).

Działanie urządzenia w przedstawionej wersji ma także i tę zaletę, że może być badane przez wykonanie precyzyjnego pomiaru, a następnie wyrażone w formie:

- liczby z jednostką miary (wzór 1);
- graficznej, jako pole pracy (rys. 1).

#### 5. LITERATURA

[1] Benjamin J. R., Cornell C. A.: Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers. Wyd. polskie: Rachunek prawdopodobieństwa,

statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. WNT, Warszawa 1 977.

- [2] Będkowski L.: Elementy diagnostyki technicznej. Wyd. 3. WAT, Warszawa 1 992.
- [3] Encyklopedia fizyki współczesnej. Praca zbiorowa. Redakcja Nauk Matematyczno-Fizycznych i Techniki Zespołu Encyklopedii i Słowników PWN. PWN, Warszawa 1 983.
- [4] Firkowicz S.: Statystyczna ocena jakości i niezawodności lamp elektronowych. WNT, Warszawa 1 963.
- [5] Gasparski W.: Kryterium i metoda wyboru rozwiązania technicznego w ujęciu prakseometrycznym. PWN, Warszawa 1970.
- [6] Gercbach I. B., Kordonski Ch. B.: Модели отказов. Wyd. polskie: Modele niezawodnościowe obiektów technicznych. WNT, Warszawa 1 968.
- [7] Girtler J.: Metoda energetyczno-czasowa oceny działania systemów antropotechnicznych. ZN ITE „Problemy Eksploatacji”, Nr 4/2001, Radom 2001, s. 131-142.
- [8] Girtler J.: Działanie urządzeń jako symptom zmiany ich stanu technicznego. Materiały II Międzynarodowego Kongresu Diagnostyki Technicznej *DIAGNOSTYKA 2000*. Warszawa 2000, dysk CD, s.[1-8], streszczenie referatu – Vol. 2, s. 123 i 124.
- [9] Girtler J.: Diagnostyka jako warunek sterowania eksploatacją okrętowych silników spalinyowych. *Studia* Nr 28. WSM, Szczecin 1 997.
- [10] Gribbin J.: In Search of Schrödinger's Cat Quantum Physics Reality. Wyd. polskie: W poszukiwaniu kota Schrödingera. Zysk i S-ka Wydawnictwo s.c. Poznań 1 997.
- [11] Leksykon naukowo-techniczny z suplementem. Praca zbiorowa. Zespół redaktorów Działu Słownictwa Technicznego WNT. WNT, Warszawa 1 989.
- [12] Wajand J. A.: Silniki o zapłonie samoczynnym. WNT, Warszawa 1 988.
- [13] Wiśniewski S.: Termodynamika techniczna. WNT, Warszawa 1 995.

- [14] Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych węzłach maszyn. Praca zbiorowa pod redakcją Wiesława Zwierzyckiego. PWN, Warszawa 1990.



Prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler jest kierownikiem Katedry Siłowni Okrętowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Kwalifikacje jego zostały zaliczone do dziedziny – *nauki techniczne*, dyscypliny – *budowa i eksploatacja maszyn*, specjalności – *silniki spalinowe*. Prowadzi badania z zakresu wiedzy dotyczące eksploatacji urządzeń mechanicznych, ze szczególnym uwzględnieniem siłowni okrętowych i urządzeń w nich instalowanych, zwłaszcza okrętowych silników spalinowych. Głównymi obszarami zainteresowań są problemy dotyczące niezawodności i diagnostyki wspomnianych urządzeń oraz decyzyjnego sterowania procesami ich eksploatacji z zastosowaniem teorii procesów semimarkowskich i statystycznej teorii decyzji. Dotychczas opublikował jako autor bądź współautor około 170 prac naukowych w formie monografii, artykułów oraz referatów na konferencje krajowe i zagraniczne, a także jest autorem

bądź współautorem ponad 50 prac niepublikowanych, które zostały zaprezentowane na różnych seminariach i przedstawione w formie sprawozdań z wykonanych prac naukowo-badawczych.