

**Piotr BIELAWSKI**

Akademia Morska w Szczecinie

## **MIARY I WARTOŚCI GRANICZNE POTENCJAŁU EKSPLOATACYJNEGO MASZYN SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH**

### **Słowa kluczowe**

Potencjał eksploatacyjny maszyn, miary potencjału eksploatacyjnego zespołów funkcjonalnych, identyfikacja potencjału eksploatacyjnego.

### **Streszczenie**

W artykule wskazano na potrzebę opisu zależności między jakością przedsiębiorstwa i jakością maszyny jako obiektu systemu produkcyjnego przedsiębiorstwa, natomiast za niedostatecznie rozwiązany problem opisu uznano miary i wartości graniczne potencjału eksploatacyjnego maszyn systemu produkcyjnego. Wykazano, że w oparciu o pojęcie „jakość” możliwa jest dekompozycja pożądanych cech jakości przedsiębiorstwa na pożądane wartości cech maszyny i zespołu funkcjonalnego maszyny oraz możliwe jest zdefiniowanie pojęcia „potencjał eksploatacyjny maszyny” i „potencjał eksploatacyjny zespołu funkcjonalnego maszyny”. Wymieniono miary cech zespołu funkcjonalnego składające się na wytworzony (rzeczywisty) potencjał eksploatacyjny i wskazano na potrzebę znajdowania miar zastępczych rzeczywistego potencjału eksploatacyjnego. Podano algorytm identyfikacji potencjału eksploatacyjnego oraz typy relacji wymuszenie – odpowiedź węzła zespołu funkcjonalnego. Zaprezentowano podstawowe modele węzłów i uzasadniono celowość ich rozwoju oraz stosowania w identyfikacji potencjału eksploatacyjnego maszyn.

## Wprowadzenie

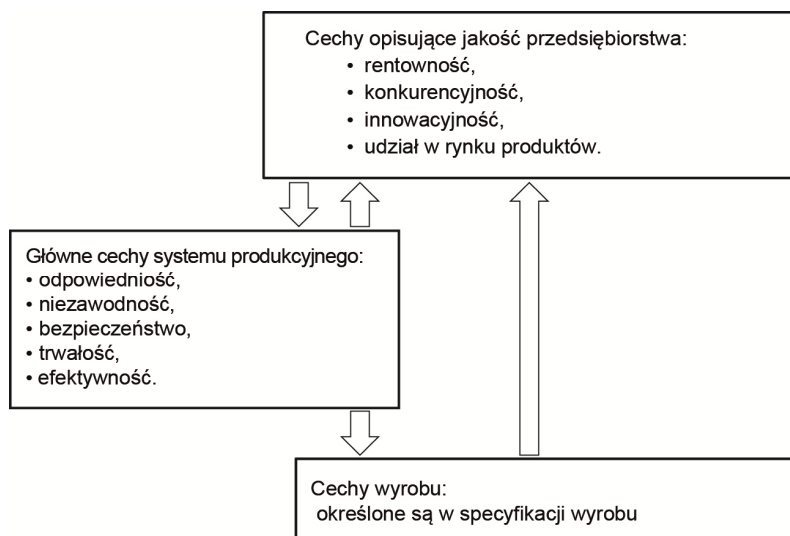
Istniejące w ramach przedsiębiorstwa systemy produkcyjne służą do wytwarzania wyrobów lub usług. Wyroby lub usługi są środkiem do realizacji celu podstawowego przedsiębiorstwa – przynoszenia zysku swoim udziałowcom. Warunkiem zysku jest wytwarzanie wyrobów lub usług o akceptowalnej (odpowiedniej) jakości. Warunkiem odpowiedniej jakości wyrobu lub usługi jest między innymi odpowiednia jakość podstawowych elementów systemu produkcyjnego – maszyn. Jakość maszyn kształtowana jest podczas ich projektowania i wytwarzania, a utrzymywana podczas obsługi. Koszty jakości maszyn to koszty przedsiębiorstwa wpływające znacząco na zyski. Nieodczuwalna jest optymalizacja kosztów jakości maszyn. Skomplikowane zależności między celami przedsiębiorstwa a jakością maszyn próbuje się opisywać z wykorzystaniem pojęcia „potencjał eksploatacyjny maszyn”. Problemem nierozwiązanym są miary i wartości graniczne potencjału eksploatacyjnego maszyn danego systemu produkcyjnego.

### 1. Pożądane i rzeczywiste wartości cech maszyny

Bogata literatura z zakresu zarządzania przedsiębiorstwem, zarządzania majątkiem przedsiębiorstwa, eksploatacji obiektów, w tym diagnozowania, obsługi, napraw i identyfikacji elementów maszyn oraz technologii wytwarzania maszyn, skłania do usystematyzowania wiedzy celem utworzenia spójnego systemu umożliwiającego zarządzanie – od zarządzania materiałem elementu obiektu do zarządzania przedsiębiorstwem. Podstawowym pojęciem takiego systematyzowania może być „jakość”.

Według norm ISO [1] jakość wyrobu to „ogół cech i właściwości wyrobu i usługi decydujących o zdolności wyrobu lub usługi do zaspokajania stwierdzonych lub przewidywanych potrzeb”, a wymagania dotyczące własności danego wyrobu określone są w dokumencie zwanym „specyfikacją wyrobu”. W pracy [2] wprowadzono pojęcie „jakość przedsiębiorstwa” i „jakość systemu produkcyjnego” i na podstawie literatury zestawiono główne cechy jakości. Relacje między jakością przedsiębiorstwa, systemu produkcyjnego i wyrobu przedstawiono na rysunku 1.

Ponieważ przedsiębiorstwo samo określa pożądane wartości cech przedsiębiorstwa, a głównymi elementami systemu produkcyjnego są maszyny, to zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami autora [2, 3, 4] cechy jakości maszyny i wartości miar tych cech (rys. 2) powinny wynikać z dekompozycji cech i pożądanych wartości miar cech systemu produkcyjnego. Maszyny jako obiekty systemu produkcyjnego są wyrobami innych systemów produkcyjnych. Cykl życia wyrobu – maszyny systemu produkcyjnego w społecznej gospodarce rynkowej składa się z fazy projektowania, wytwarzania, eksploatacji i likwidacji.



Rys. 1. Relacje między jakością przedsiębiorstwa, systemu produkcyjnego i wyrobu

Rzeczywiste cechy i wartości miar cech maszyny określone są w fazie rozwoju (projektowania) maszyny jako wyrobu, a pożądane wartości miar cech maszyny powinny wynikać z pożądanych cech jakości przedsiębiorstwa.

Projektowanie maszyny polega na wykonaniu specyfikacji maszyny w formie dokumentacji konstrukcyjnej i wykonawczej. Specyfikacja określa:

- przedziały wartości miar cech opisujących obciążenie maszyny (moment obrotowy, prędkość obrotowa),
- pożądane przedziały wartości miar cech materiału konstrukcyjnego elementów,
- pożądane przedziały wartości miar cech elementów maszyny (makrostruktury, kształtu i wymiarów elementów),
- pożądane przedziały wartości miar cech zespołów i elementów wbudowanych (np. luz, napięcie wstępne śrub, wcisk, szczelność, niewyważenie itp.),
- pożądane przedziały wartości miar cech płynów eksploatacyjnych (np. lepkość oleju).

Zakłada się, że jeżeli wszystkie wymienione miary będą miały wartości z pożądanego odpowiedniego przedziału, to obiekt jako całość otrzyma pożądane cechy o wartościach mieszczących się w pożądanym zakresie.

Wartości cech nadane podczas wytwarzania maszyny ulegają zmianie w wyniku zużywania podczas użytkowania maszyny. Skutki zużywania ujęte są w cechach opisujących system produkcyjny. Takie cechy nie występują w sposób bezpośredni w specyfikacji maszyny. Nie wszystkie cechy maszyny ulegają zmianie. Wygodne – w dalszych rozważaniach – jest posługiwanie się pojęciem „potencjał eksploatacyjny maszyny”.

## 2. Miary potencjału eksploatacyjnego maszyny

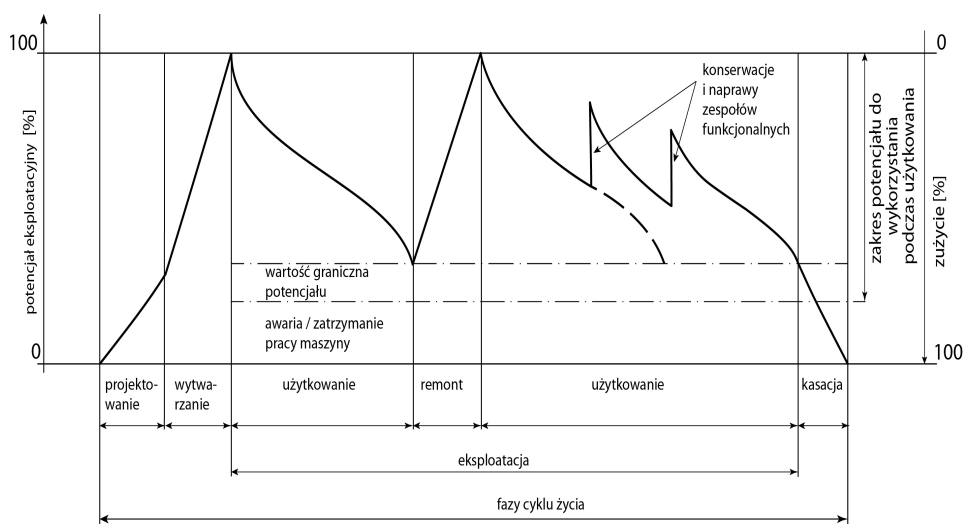
Potencjał eksploatacyjny dotyczy pracującej maszyny. Istnieje wiele definicji potencjału eksploatacyjnego [5, 6]. Na potrzeby niniejszych rozważań potencjał eksploatacyjny maszyny określono jako zbiór miar cech, których wartości:

- są wynikiem wytwarzania maszyny,
- zmniejszają się na skutek zużycia podczas użytkowania,
- mogą być przywrócone podczas remontu lub obsługi.

W literaturze potencjał eksploatacyjny i koszty związane z potencjałem eksploatacyjnym przedstawia się w funkcji faz cyklu życia maszyny. Potencjał eksploatacyjny powstaje w fazie projektowania i wytwarzania, wyczerpuje się w fazie eksploatacji i ulega likwidacji w fazie recyklingu (rys. 2). Eksploatacja jest najdłuższą trwającą fazą cyklu życia maszyny i składa się ponownie z cyklicznie powtarzających się faz użytkowania i obsługi w formie remontu (obsługi z zatrzymaniem użytkowania) lub dodatkowo obsługi w formie konserwacji i/lub napraw bez zatrzymywania użytkowania. Problemem przy posługiwaniu się potencjałem eksploatacyjnym maszyny jest to, że:

- w specyfikacji maszyny brak jest on-line mierzalnych cech bezpośrednio opisujących potencjał eksploatacyjny maszyny;
- liczba cech koniecznych do opisu potencjału maszyny jest duża.

Ze względu na dużą liczbę cech koniecznych do opisu potencjału pożądane jest wyznaczanie „miar zastępczych” – miar dających się wyznaczyć na podstawie wartości miar cech elementów wbudowanych, płynów eksploatacyjnych,

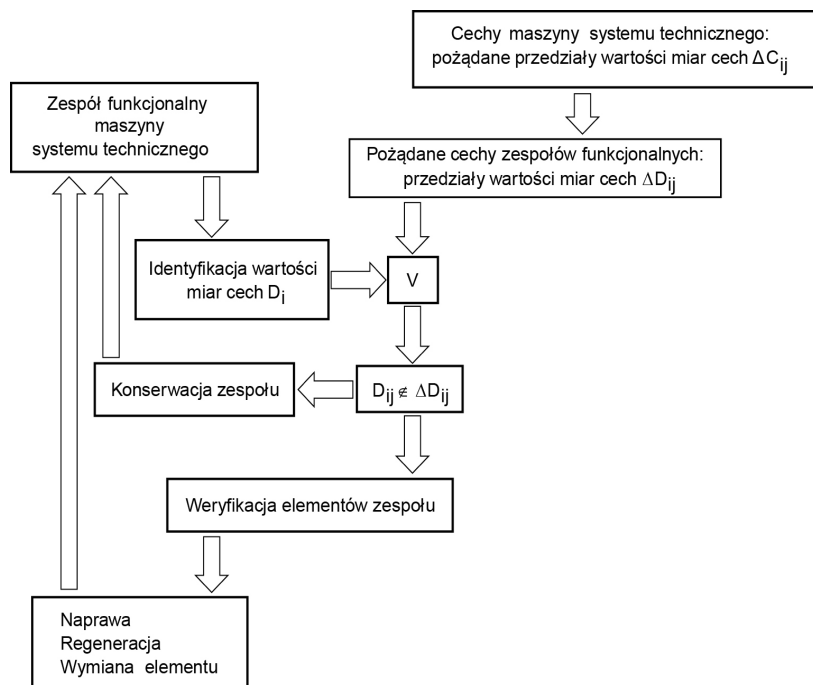


Rys. 2. Fazy cyklu życia maszyny i potencjał eksploatacyjny maszyny w funkcji czasu eksploatacji

obciążenia i ruchu względnego. W literaturze można znaleźć przykłady miar, które mogą być uznane za miary potencjału eksploatacyjnego „zespołów funkcjonalnych” maszyny. Rozwiązaniem problemu może być zatem posługiwanie się pojęciem „potencjału eksploatacyjnego zespołu funkcjonalnego maszyny”, a uzasadnieniem to, że:

- potencjał eksploatacyjny maszyny jest wypadkową potencjału eksploatacyjnego zespołów funkcjonalnych maszyny,
- istnienie w maszynie zespołów funkcjonalnych realizujących określone funkcje cząstkowe oznacza, że szybkość degradacji potencjałów eksploatacyjnych poszczególnych zespołów funkcjonalnych może być różna i może wymagać oddzielnego działania sanacyjnego,
- łączenie maszyn w agregaty odbywa się przez łączenie elementów wybranych zespołów funkcjonalnych. Powstają „nowe” zespoły funkcjonalne nie ujęte w specyfikacji maszyny.

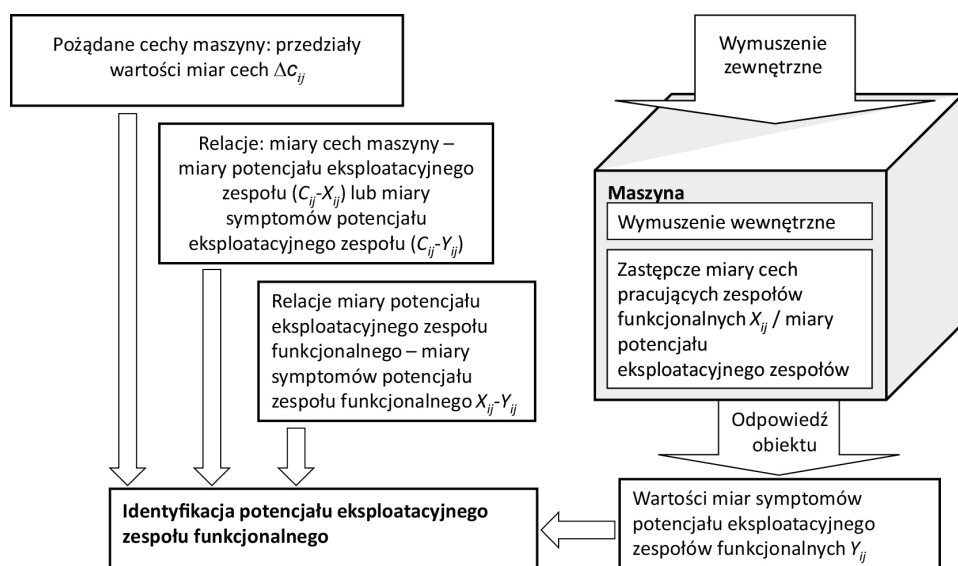
Warunkiem koniecznym posługiwania się potencjałem eksploatacyjnym zespołów funkcjonalnych jest dekompozycja pożądanych wartości miar cech maszyny na pożądane wartości miar potencjału zespołów funkcjonalnych  $D_{ij}$  (rys. 3). Działania na potencjale eksploatacyjnym zespołu funkcjonalnego są działaniami z zakresu obsługi maszyn.



Rys. 3. Obsługiwanie zespołów funkcjonalnych maszyn [2]

### 3. Sygnały diagnostyczne zespołów funkcjonalnych

Bezpośredni pomiar wartości miar potencjału eksploatacyjnego pracujących zespołów funkcjonalnych z reguły nie jest możliwy. Konieczny jest pomiar pośredni z wykorzystaniem sygnałów emitowanych przez elementy zespołu funkcjonalnego. Algorytm takiej identyfikacji potencjału eksploatacyjnego zespołu funkcjonalnego przedstawiono na rysunku 4.



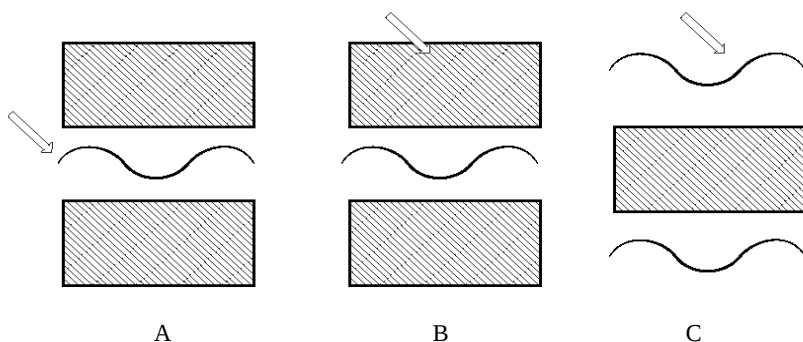
Rys. 4. Algorytm identyfikacji potencjału eksploatacyjnego zespołu funkcjonalnego pracującej maszyny [4]

Elementy zespołu funkcjonalnego tworzą tzw. „węzły”. Zespół funkcjonalny można przedstawić jako sumę węzłów, z tym że jeden i ten sam element zespołu funkcjonalnego może wchodzić w skład kilku węzłów. W najprostszym przypadku zespół funkcjonalny może być jednym węzłem. Wyróżnić można trzy podstawowe modele węzłów zespołów funkcjonalnych (rys. 5):

- 1) dwa ciała stałe rozdzielone są płynem. Na płyn działa obciążenie hydrodynamiczne, które wymusza i determinuje ruch płynu względem ciał stałych (rys. 5A);
- 2) dwa ciała stałe rozdzielone są płynem, w którym zachodzą zjawiska znane z mechaniki płynów (hydrodynamiki, aerodynamiki, reologii). Na jedno z ciał, oprócz obciążenia mechanicznego, działa może obciążenie magnetyczne, elektryczne lub ciepłne. Obciążenie mechaniczne wymusza i determinuje ruch względny ciał stałych (rys. 5B). Taki węzeł nazywany jest również węzłem tribologicznym;

- 3) dwa płyny rozdzielone są ciałem stałym. Na płyny oprócz obciążenia hydrodynamicznego działać może obciążenie cieplne, elektryczne lub magnetyczne. Pod wpływem działających obciążeń odbywa się ruch względny płynów i/lub ruch względny płyn – ciało stałe (rys. 5C).

W literaturze tematu można znaleźć modele szczegółowe powyższych modeli podstawowych – modele uwzględniające kształt ciał stałych i właściwości fizykochemiczne płynów. W fizyczno-matematycznym opisie modeli szczegółowych stosuje się wielowymiarowe i/lub bezwymiarowe (liczby podobieństwa/liczby kryterialne) współczynniki proporcjonalności. Ponieważ współczynniki proporcjonalności są generalnie ilorazem wartości miar wybranych cech elementów wbudowanych, płynów eksploatacyjnych, obciążenia i ruchu względnego, to można je uznać za zastępcze miary potencjału eksploatacyjnego danego węzła funkcjonalnego (przykładowo dwa węzły funkcjonalne o takiej samej danej liczbie podobieństwa mają taką samą wartość danej miary cechy potencjału eksploatacyjnego).



Rys. 5. Modele węzłów zespołów funkcjonalnych: A, B, C – rodzaj modelu,  
 ciało stałe,  płyn,  kierunek przenoszonego obciążenia

W modelu A, np. w przypadku rurociągu, spadek ciśnienia wzdłuż rurociągu zależy od liczby Reynoldsa, ilorazu chropowatości i średnicy rurociągu oraz prędkości i gęstości płynu [7], a więc od cech elementów wbudowanych, cech obciążenia i cech płynów eksploatacyjnych. Ponieważ spadek ciśnienia jest mierzalny, to może być on wykorzystany jako symptom diagnostyczny potencjału rurociągu. Spadek ciśnienia przekłada się na sprawność energetyczną rurociągu i dalej efektywność systemu produkcyjnego.

W modelu B, np. w przypadku łożyska ślizgowego, grubość filmu olejowego jest zależna od liczby Sommerfelda. Liczba Sommerfelda zależy od luzu względnego (miara cechy elementów wbudowanych), względnej prędkości obrotowej (cecha ruchu), lepkości (cecha płynu eksploatacyjnego) i średniego ciśnienia (cecha obciążenia) [8]. Grubość filmu olejowego nie jest bezpośrednio

mierzalna, ale decyduje o mierzalnym położeniu środka czopa w kole luzu łożyska. Położenie środka czopa może być wyznaczone podczas pomiaru względnych drgań promieniowych wału. Położenie środka czopa determinuje sprawność mechaniczną łożyska i przekłada się na niezawodność i efektywność systemu produkcyjnego.

W modelu C, np. w przypadku wymiennika ciepła, strumień ciepła przepływający od jednego płynu do drugiego zależny jest od powierzchni wymiany ciepła, różnicy temperatur płynów i współczynnika proporcjonalności – współczynnika przenikania ciepła  $k$ . Wartość tego współczynnika zależy od cech elementów wbudowanych (grubości i rodzaju materiału ścianki, współczynnika przewodzenia materiału ścianki, geometrii kanału), cech płynów eksploatacyjnych (lepkość, gęstość, ciepło właściwe płynów), cech ruchu (prędkości cieczy), obciążenia (różnica temperatur cieczy) [9]. Różnice temperatur płynów na wlocie i wylocie wymiennika zależne są od współczynnika  $k$ . Współczynnik  $k$  może być zatem miarą zastępczą potencjału eksploatacyjnego wymiennika. Na podstawie mierzalnych różnic temperatur wlotowych i wylotowych obydwu płynów (symptomy diagnostyczne potencjału wymiennika) można obliczyć sprawność wymiennika ciepła.

Dla konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych zespołów funkcjonalnych można tworzyć modele będące kombinacją modeli szczegółowych. Potencjał eksploatacyjny danego zespołu funkcjonalnego może być opisany wieloma liczbami podobieństwa/współczynnikami proporcjonalności powiązanymi z symptomami o różnej formie energii i o różnym przebiegu mierzonego sygnału (przy zmiennym okresowo obciążeniu mogą mieć formę sygnałów okresowych). Jeden i ten sam sygnał może być nośnikiem wielu symptomów potencjału eksploatacyjnego.

Na skutek błędów wytwarzania i montażu elementów zespołu funkcjonalnego jego potencjał eksploatacyjny może natychmiast po uruchomieniu maszyny osiągnąć wartość graniczną i tym samym może rozpocząć się proces intensywnego zużywania kończący się awarią maszyny. Takie zdarzenia określane są jako uszkodzenia wczesne – np. około 50% uszkodzeń łożysk tocznych to właśnie uszkodzenia wczesne. Inne niż przewidziano w specyfikacji maszyny wartości miar cech obciążenia, ruchu lub cieczy eksploatacyjnych mogą również skutkować spadkiem potencjału zespołu funkcjonalnego do wartości granicznej i rozpoczynać intensywne zużywanie kończące się awarią maszyny. Przyczyny powodujące chwilowy spadek potencjału eksploatacyjnego nazywane są zakłóceniami, warunki powodujące permanentny spadek potencjału do wartości granicznej nazywane są „użytkowaniem maszyny/zespołu funkcjonalnego niezgodnie z przeznaczeniem”.

Przy poszukiwaniu symptomów potencjału eksploatacyjnego bez znajomości relacji miara potencjału – symptom należy analizować proces i skutki zużycia celem właściwej klasyfikacji symptomów diagnostycznych. Pod wpływem

obciążeń działających w węzłach zespołów funkcjonalnych dochodzi do jednoczesnego generowania odpowiedzi (sygnału) i zużywania elementów węzła. Obciążenie przenoszone przez węzeł posiada określoną formę i wartość energii, podobnie odpowiedź elementu węzła jest sygnałem/sygnałami o określonej energii i rozkładzie w czasie. W zależności od możliwej lub wybranej formy energii sygnału odpowiedzi można wyróżnić trzy przypadki:

- 1) forma odpowiedzi drugiego ciała lub płynu na działające obciążenie jest taka sama jak wymuszenia. Wartość miary odpowiedzi zależna jest od potencjału eksploatacyjnego węzła – symptom diagnostyczny jest symptomem potencjału eksploatacyjnego węzła;
- 2) w węźle zespołu następuje przetwarzanie energii, forma energii odpowiedzi jest inna niż energii obciążenia. Przetwarzanie energii zależne jest od potencjału eksploatacyjnego węzła zespołu funkcjonalnego – symptom diagnostyczny jest symptomem potencjału eksploatacyjnego węzła;
- 3) w elementach węzła zespołu zużycie materiału ciał stałych i płynów jest następstwem działającego obciążenia i odbywa się z przetwarzaniem energii. Proces zużycia przebiega w trzech etapach: kumulowanie energii (powstawanie warunków do rozwoju zużycia), zużycie z ewentualnym powstawaniem ubytków i cząstek materiału, rozpraszanie energii wyzwalanej w procesie zużycia. Wartość energii odpowiedzi zależna jest od wartości kumulowanej energii albo od intensywności zachodzącego procesu zużycia – symptom diagnostyczny jest symptomem zaistnienia warunków do intensywnego zużywania lub symptomem intensywności (szybkości) zużywania (procesu zużycia).

Szczegółowe relacje miary potencjału eksploatacyjnego zespołu funkcjonalnego – miary symptomów zespołów funkcjonalnych są specyficzne dla danego rozwiązania konstrukcyjnego zespołu funkcjonalnego i muszą być rozpatrywane oddzielnie.

## Podsumowanie

Problemem przy tworzeniu systemów skutecznego i efektywnego zarządzania systemami produkcyjnymi jest brak miar i wartości granicznych potencjału eksploatacyjnego maszyn. Rozwiązaniem może być dekompozycja pożądanych cech przedsiębiorstwa na pożądane cechy maszyny i wprowadzenie pojęcia potencjału eksploatacyjnego pracującego zespołu funkcjonalnego. Miarami potencjału eksploatacyjnego pracującego zespołu funkcjonalnego są zastępcze miary, na które składają się miary cech: materiału elementów, elementów swobodnych, elementów wbudowanych, płynów eksploatacyjnych, obciążenia i ruchu elementów zespołu. Wartości miar potencjału eksploatacyjnego pracującego zespołu mierzalne są tylko w sposób pośredni z wykorzystaniem sygnałów wyjściowych będących odpowiedzią elementów maszyny na działające na nie obciążenie.

nie. Symptomy wyekstrahowane z sygnałów mogą być symptomami potencjału eksploatacyjnego, symptomami zaistnienia warunków do intensywnego zużycia oraz symptomami intensywności procesu zużycia. W wyszukiwaniu symptomów potencjału i budowaniu relacji miara potencjału – miara symptomu pomocne może być rozłożenie zespołu funkcjonalnego na węzły i korzystanie z istniejących modeli węzłów. W takich modelach liczby podobieństwa i/lub wielowymiarowe współczynniki proporcjonalności są miarami zastępczymi potencjału eksploatacyjnego węzła funkcjonalnego, a mierzalne, zależne od nich wielkości fizyczne mogą być symptomami potencjału eksploatacyjnego.

### **Bibliografia**

1. PN-EN ISO 9000: 2006. Systemy zarządzania jakością. Podstawy i terminologia.
2. Bielawski P.: Zrównywanie wartości miar cech obiektów technicznych. *Pomiary Automatyka Robotyka* nr 4/2014, s. 80–87.
3. Bielawski P.: Identyfikacja obiektów technicznych systemów produkcyjnych. Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2014 [monografia].
4. Bielawski P.: Diagnostyka techniczna obiektów systemów produkcyjnych – aktualne potrzeby i rozwiązania, [w:] *Wybrane zagadnienia diagnozowania i użytkowania urządzeń i systemów*. Praca zb. red. T. Dąbrowski, S. Radkowski. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2015.
5. PN-82/N-04001. Eksploatacja obiektów technicznych. Terminologia ogólna.
6. Szpytko J.: Metodyka identyfikacji stanu technicznego środków transportu. *Diag'2006*, Ustroń.
7. Böswirth L., Bschorer S.: *Technische Strömungslehre*. Vieweg + Teubner Verlag Wiesbaden 2012.
8. Bielawski P.: Diagnostics of marine propeller shafts. *Journal of POLISH CIMAC* 2011, Vol. 6, No 2, p. 31–40.
9. Sperlich V.: *Grundlagen der Technischen Thermodynamik*. Universität Duisburg Essen 2007.

### **Measurements and limits of the machine wear margin of production systems**

#### **Key words**

Machine operability, functional unit wear margin measurements, the identification of wear margin.

## Summary

The article points out the need to describe the relationship between the quality of the company and the quality of the machine as an item of a company production system. In terms of description, existing measurements and limit values of the wear margin of production system machines are recognized as insufficiently developed. It has been shown that, based on the concept of *quality*, it is possible to decompose the desired quality characteristics of a company to get the desired measurements of machine characteristics and the machine functional unit. It is also possible to define the term *machine wear margin* and *machine functional unit wear margin*. The author identifies measurements of functional unit characteristics that make up the manufactured (real) wear margin and points out the need for finding substitute measurements of the actual wear margin. The algorithm is given for the identification of wear margin and the types of relationships between the excitation and response of the functional unit node. The author presents the basic models of the nodes and discusses the purpose of their development and use in the identification of machine wear margin.

