

**Dr inż. Andrzej Loska**  
Instytut Inżynierii Produkcji  
Politechnika Śląska  
Ul. Roosevelta nr 26, 41-800 Zabrze, Polska  
E-mail: Andrzej.Loska@polsl.pl

## **Eksplatacyjna ocena wybranych obiektów technicznych z zastosowaniem metod taksonomicznych**

**Słowa kluczowe:** ocena eksploatacyjna, taksonomia numeryczna, rangowanie

**Streszczenie:** Artykuł jest próbą odpowiedzi na formułowane w przedsiębiorstwach przemysłowych problemy dotyczące praktycznych aspektów wykorzystania określonych miar do oceny eksploatacji obiektów technicznych. W tym zakresie, przeprowadzono badania literaturowe obejmujące przegląd możliwości kształtowania wartości wybranych cech eksploatacyjnych, a także badania przemysłowe dotyczące analizy potrzeb służb technicznych przedsiębiorstw w zakresie oceny ich funkcjonowania. Wynikiem przeprowadzonych badań i sformułowanych w tym zakresie wniosków, została opracowana metoda wstępnej wzajemnej oceny eksploatacyjnej w oparciu o wartości normowanych i zagregowanych rang obiektów technicznych w świetle wyznaczonych miar eksploatacyjnych. Metoda ta, jak również przykład jej zastosowania, odnoszący się do wybranego sieciowego systemu technicznego są przedmiotem dalszej treści tego artykułu.

Artykuł jest wynikiem realizacji części badań w ramach projektu badawczego, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki nr 5636/B/T02/2011/40 pt.: Wykorzystanie metod scenariuszowych w modelowaniu procesów eksploatacyjnych.

### **1. Wprowadzenie**

Rzetelne wartościowanie zadań eksploatacyjnych jest jednym z kluczowych kryteriów prawidłowego funkcjonowania służb utrzymania ruchu każdego przedsiębiorstwa. Oznacza to konieczność wyznaczania wartości wybranych cech, a w konsekwencji możliwość kształtowania procesów decyzyjnych związanych z wykonawstwem prac obsługowo-naprawczych.

W praktyce przemysłowej, stosowanych jest wiele różnorodnych miar eksploatacyjnych (wskaźników). Ich wartości odnoszą się do poszczególnych eksploatowanych obiektów technicznych, jak również do działalności organizacji utrzymania ruchu. Różnorodność ta może znacząco wpływać na wybór poszczególnych zbiorów wielkości w konkretnych indywidualnych warunkach organizacyjno-technicznych: w sposób pozytywny - poprzez wyraźne odzwierciedlenie oceny realizacji polityki eksploatacyjnej, w sposób negatywny - poprzez zbytnie uwypuklenie kierunków mniej znaczących oraz czynne „kształtowanie” wartości niektórych miar.

Z matematycznego punktu widzenia, problemy eksploatacyjne w przedsiębiorstwach przemysłowych należy traktować w kategorii zjawisk złożonych, które w otoczeniu czasowym i przestrzennym wymagają realizacji prac o charakterze technicznym, organizacyjnym i ekonomicznym. Złożoność taka jest charakteryzowana wieloma cechami, które przekładają się na miary posiadające różne miana i rzędy skali, czyli są wzajemnie nieporównywalne. Porównywalność taka wydaje się możliwa po sprowadzeniu kluczowych miar do tzw. „wspólnego mianownika” w oparciu o metody normowania, a następnie ich syntezy z wykorzystaniem metod agregacji.

Artykuł ten stanowi próbę rozwiązania tak postawionego problemu poprzez opracowanie sposobu rangowania obiektów technicznych w aspekcie wartości cech eksploatacyjnych. Powstała w ten sposób metoda oceny eksploatacyjnej jest jednym z kluczowych elementów badań, prowadzonych przez autora tego artykułu, nad sposobami wykorzystania technik scenariuszowych w modelowaniu zdarzeń i procesów eksploatacyjnych.

## **2. Klasyfikacja i charakterystyka wybranych modeli ocen eksploatacyjnych**

Istnieje wiele modeli matematycznych stanowiących podstawę ilościowej oceny eksploatacji obiektów technicznych oraz funkcjonowania organizacji utrzymania ruchu. Poszczególne zbiory miar są przedmiotem wielu publikacji, w postaci:

- odrębnych pozycji literaturowych, najczęściej w formie katalogowej, zawierających uporządkowany wykaz i charakterystykę określonych miar, m.in. w [26, 27, 32, 34, 36],
- elementów metod i technik zarządzania utrzymaniem ruchu, w postaci uzupełnienia opisu strategii eksploatacyjnej lub systemu zarządzania utrzymaniem ruchu, m.in. w [2, 4, 9, 12, 14, 17, 22, 23, 33],
- elementów zastosowań strategii eksploatacyjnych i systemów zarządzania utrzymaniem ruchu w określonych przedsiębiorstwach przemysłowych, m.in. w [7, 11, 18],
- sposobów interpretacji (najczęściej matematycznej) i prób zastosowania wybranych miar eksploatacyjnych m.in. w [1, 3, 15, 31].

Z praktycznego przemysłowego punktu widzenia, szczególnie istotnego znaczenia nabierają tutaj opracowania przyporządkowane do grup trzeciej i czwartej. Obejmują one koncepcje i konkretne rozwiązania dotyczące wykorzystania znanych modeli matematycznych w zastosowaniach praktycznych. Stanowi to najczęściej bezpośredni przedmiot potrzeb i oczekiwań większości ośrodków przemysłowych.

Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania, przedstawiony w [20] przegląd i analiza doprowadziła do wyodrębnienia tych modeli, które mają największe znaczenie, zarówno w aspekcie teoretycznym - literaturowym, jak i praktycznym - przemysłowym. Można w tym zakresie wyróżnić trzy ogólne modele:

- a. model niezawodnościowy [5, 10, 12, 23, 28],
- b. model efektywności eksploatacyjnej OEE (Overall Equipment Effectiveness) [22, 33, 34],
- c. model organizacyjno-techniczny KPI (Key Performance Indicators) [27, 32].

### **2.1. Obliczeniowy model niezawodnościowy**

Model niezawodnościowy pozwala na wyznaczanie miar eksploatacyjnych w ujęciu statystycznym. W praktyce przemysłowej wynika on z tych strategii eksploatacyjnych, w ramach których decyzje dotyczące możliwości użytkowania obiektów technicznych oraz terminy i zakresy prac obsługowo-naprawczych związane są bezpośrednio z czasową analizą statystycznego obrazu funkcjonowania obiektów technicznych opisywanych modelami grupowymi. Model niezawodnościowy przekłada się w praktyce na miary, które odnoszą się do:

- a. obiektów eksploatacji w ujęciu technicznym - miary stanowiące wynik identyfikacji stanu technicznego (w postaci prawdopodobieństwa) odniesione do określonych klas stanów (np. funkcja niezawodności w ujęciu rozkładu wykładniczego [10, 28], intensywność uszkodzeń [5], czy współczynnik gotowości technicznej [12]),
- b. obiektów eksploatacji w ujęciu organizacyjno-technicznym - miary wynikające zarówno z identyfikacji stanu technicznego, jak również działalności organizacyjno-

ekonomicznej służb eksploatacyjnych (np. zdefiniowane według [23] miary MTBF, MTTR czy MFOT).

## 2.2. Obliczeniowy model efektywności eksploatacyjnej OEE

Model efektywności eksploatacyjnej OEE (Overall Equipment Effectiveness) jest najważniejszym elementem ilościowej oceny strategii TPM. Ze względu na dużą elastyczność modelu jest on stosowany również w tych przedsiębiorstwach, które nie wdrożyły tej strategii. Model ten wyraża całkowitą efektywność eksploataowania za pomocą trzech głównych czynników (Tab. 1).

Dostępność	Efektywność działań	Jakość
$D = \frac{t_d - t_p}{t_d}$ (1)	$E = \frac{t_c \cdot n}{t_o}$ (2)	$J = \frac{n - d}{n}$ (3)
$t_d$ - czas dostępny $t_p$ - czas postoju	$t_c$ - teoretyczny czas cyklu $n$ - ilość przetworzona $t_o$ - operacyjny czas działania	$n$ - ilość przetworzona $d$ - ilość defektów
<b><math>OEE = D \cdot E \cdot J</math></b>		

Tab. 1. Wskaźniki efektywności eksploatacyjnej OEE [22]

Należy zwrócić uwagę na fakt, że ze względu na sposób obliczenia OEE (iloczyn wartości wskaźników częściowych) w przypadku tego modelu ważna jest nie tyle bezwzględna wartość OEE, ale wnioski wynikające ze sposobu jej uzyskania. Interpretacja matematyczna wartości wskaźnika OEE powinna mieć charakter geometryczny. W szczególności, OEE można przedstawić w układzie trójwymiarowym, w którym osie reprezentują poszczególne wskaźniki częściowe. W takim ujęciu, przedstawiając OEE w postaci wektora, można formułować wnioski i decyzje wynikające z tego modelu, które powinny odnosić się do:

- wartości bezwzględnej OEE,
- wpływu poszczególnych czynników na wartość OEE,
- kierunku i wartości zmiany OEE.

## 2.3. Obliczeniowy model organizacyjno-techniczny KPI

Model organizacyjno-techniczny KPI (Key Performance Indicators) obejmuje zbiór miar wydajności i efektywności. Miary te w założeniu pozwalają na kompleksową ocenę procesu realizacji celów organizacji utrzymania ruchu, czyli w praktyce muszą być ściśle związane ze strategią eksploatacyjną przedsiębiorstwa. Na podstawie przeprowadzonych badań, można stwierdzić, że istnieje wiele odmian modelu KPI, które odnoszone są do konkretnych obszarów zastosowań. Dlatego też od kilkunastu lat istniała potrzeba ujednoczenia zarówno w zakresie miar objętych tym modelem, jak również interpretacji poszczególnych wskaźników i ogólnego modelu KPI. Na tej podstawie powstała norma EN 15341:2007 (Maintenance - Maintenance Key Performance Indicators), która zawiera ujednoczony zbiór miar będących elementami modelu KPI [27].

Norma zawiera 72 wskaźniki wraz ze szczegółową interpretacją elementów, które się na nie składają. Wskaźniki te, w aspekcie poszczególnych poziomów, mogą podlegać interpretacji i porównywaniu z wartościami uzyskiwanymi w innych przedsiębiorstwach danej branży. Wybrane przykładowe wskaźniki, to:

E1 - całkowity względny koszt działań obsługowo-naprawczych dla obiektu technicznego:

$$E1 = \frac{\text{całkowity koszt działań obsługowo - naprawczych}}{\text{wartość wymiany (nowego) obiektu technicznego}} \quad (4)$$

T7 - dostępność obiektów dla prac prewencyjnych:

$$T7 = \frac{\text{całkowity czas działania}}{\text{całkowity czas działania} + \text{całkowity czas postoju dla prac planowanych}} \quad (5)$$

### 3. Koncepcja oceny eksploatacyjnej obiektów technicznych

Przy złożonych warunkach organizacyjno-technicznych systemów eksploatacji oraz niezbyt szczegółowo sprecyzowanych potencjalnych oczekiwaniach kadry zarządzającej, różnorodność miar, może prowadzić do:

- niejednoznaczności interpretacyjnej miar w zakresie wpływu poszczególnych czynników (elementów) na szeroko rozumianą efektywność eksploatacji obiektów,
- nieuzasadnionego merytorycznie uwypuklenia wybranych aspektów kosztem pozostałych w świetle polityki eksploatacyjnej przedsiębiorstwa.

Inaczej mówiąc, w odniesieniu do każdego wskaźnika eksploatacyjnego musi występować uzasadniona konieczność jego wyznaczenia, a także istotne jest miejsce i waga każdej z miar rozpatrywanych w aspekcie technicznym, organizacyjnym lub ekonomicznym.

Opisane uwarunkowania generują potrzebę opracowania, weryfikacji i stosowania w praktyce takich modeli ocen, które obejmują konieczną ale jednocześnie wystarczającą, w określonych warunkach organizacyjno-technicznych, ilość i zakres miar. Ich znaczenie powinno być adekwatne bardziej dla celów przedsiębiorstwa, ujętych w ramach polityki eksploatacyjnej, a mniej dla partykularnych interesów poszczególnych osób lub komórek organizacyjnych.

Wnioski, wynikające z przeprowadzonej analizy literaturowej oraz wykonanych badań przemysłowych, stanowią punkt wyjścia do opracowania sposobu oceny eksploatacyjnej w oparciu o rozpoznane i zdefiniowane uwarunkowania i ograniczenia teoretyczne (modelowe), jak również obserwacje i doświadczenia praktyczne (przemysłowe).

Proponowany przez autora sposób oceny wykorzystuje w swoich podstawach elementy znanych i stosowanych w obszarze nauk społeczno-ekonomicznych metod taksonomicznych [8, 16, 25]. W tym przypadku sprowadzają się one do wyboru, porządkowania i grupowania analizowanych zjawisk w płaszczyznach: przestrzennej, merytorycznej i czasowej. Wynikiem tych działań jest przekształcenie zmiennych diagnostycznych opisujących w sposób rozproszony poszczególne fragmenty analizowanego zjawiska w zmienną syntetyczną (agregowaną) będącą swoistą wypadkową rozpatrywanych zdarzeń i procesów eksploatacyjnych. W tym ujęciu, budowa procedury oceny eksploatacyjnej obejmuje trzy kluczowe aspekty:

- wybór i hierarchizację cech diagnostycznych (cecha diagnostyczna jest tutaj przyjmowana szerzej aniżeli w typowym ujęciu eksploatacyjno-niezawodnościowym, czyli wg. [25] jest to potencjalna i pierwotna wielkość pozwalająca na wyjaśnienie określonego zjawiska),
- normowanie różnoimiennych zmiennych diagnostycznych, w celu doprowadzenia do jednolitych mian,
- agregację unormowanych zmiennych, w celu wyprowadzenia zmiennej syntetycznej (zagregowanej) dla potrzeb wyznaczenia wartości rang porównywanych obiektów technicznych.

Wybór pozwala na wyodrębnieniu tych cech opisujących obiekty techniczne i realizowane procesy eksploatacyjne, które w procesie oceny mogą odgrywać znaczącą rolę. Drugim kryterium wyboru cech jest ich dostępność pomiarowa. W aspekcie praktycznego wykorzystania miar do oceny eksploatacji obiektów technicznych oraz realizowanych z ich udziałem procesów eksploatacyjnych, można wyróżnić kilka kluczowych cech, które

mogą stanowić podstawę takiego wyboru. Cechy takie, które zostały szczegółowo scharakteryzowane w [12, 19] i usystematyzowane w [38], mogą obejmować: stan techniczny, niezawodność, jakość, funkcjonalność, efektywność, obsługiwalność i diagnozowalność. Powyższe cechy należy traktować bardziej jako grupy, aniżeli pojedyncze wielkości. W ramach każdej grupy można zlokalizować miary (wskaźniki), opisujące i oceniające wybrane aspekty eksploatacyjne obiektów/systemów technicznych, jak również funkcjonowania służb utrzymania ruchu.

Hierarchizacja jest elementem porządkowania wybranych cech w celu ustalenia jednoznacznych zmiennych diagnostycznych, a także określenie ich charakteru. W obszarze eksploatacyjnym, charakter zmiennych diagnostycznych pozwala na uporządkowanie cech w trzech grupach (wg. [8]):

- stymulanty, dla których pożądane są wysokie wartości cech (np. średni czas pomiędzy awariami - MTBF),
- destymulanty, dla których pożądane są niskie wartości cech (np. koszt awaryjnych prac obsługowo-naprawczych),
- nominanty, dla których pożądane są „normalne” wartości cech (np. koszty korekcyjnych prac obsługowo-naprawczych jako wynik działań prewencyjnych - obchodów i przeglądów).

Działania związane z ujednoczeniem charakteru zmiennych powinny przebiegać według postulatu jednolitej preferencji [8], który polega na wyodrębnieniu i przypisaniu cech do jednej z powyższych kategorii, wyboru zamierzonej tendencji oraz dokonania tzw. przekształcenia odwrotnościowego w zakresie tych cech, które zostały zakwalifikowane do grup o tendencji przeciwnej. Inaczej mówiąc, destymulanty można przekształcić w stymulanty w oparciu o ustalone wartości graniczne (np. wartości teoretyczne czy wartości minimalne i maksymalne zebrane w całej historii dokonywanych pomiarów). W odniesieniu do nominant można założyć, że każde odchylenie ich wartości od poziomu normalnego jest zjawiskiem niekorzystnym. Dlatego przekształcenie nominant wymaga ustalenia ich poziomu „normalnego”, a następnie wykonania dwóch kroków: przekształcenia w destymulanty, czyli wielkości bezwzględne odchylenia od poziomu „normalnego”, a następnie w stymulanty.

Kolejnym etapem, po wyborze i uporządkowaniu zmiennych diagnostycznych, jest normowanie cech, które wynika z różnoimienności wartości opisujących je zmiennych. Proces ten powinien przebiegać zgodnie z postulatem addytywności [16], co oznacza, że należy dokonać transformacji oryginalnych zmiennych diagnostycznych w taki sposób, aby otrzymać wartości pozbawione mian oraz ujednoczone co do rzędu wielkości. Według [16] proces taki może przebiegać według następującej ogólnej zależności:

$$x'_i = \left( \frac{x_i - A}{B} \right)^p \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6)$$

gdzie:  $x'_i$  - wyjściowa znormalizowana wartość i-tej realizacji zmiennej,

$x_i$  - nieznormalizowana wartość i-tej realizacji zmiennej,

$n$  - liczba obserwacji,

$A, B, p$  - parametry przyjmujące wartości uzależnione od sposobu normalizacji.

Odpowiednie metody normalizacji obejmujące m.in. standaryzację, unitaryzację czy przekształcenie ilorazowe z wartością odniesienia zostały szczegółowo przedstawione w literaturze, m.in. [8, 16].

Ostatnim założonym etapem jest agregacja. To proces prowadzący bezpośrednio do uzyskania zmiennej syntetycznej. W rozpatrywanym tutaj ujęciu ma ona charakter rangi opisującej wartość eksploatacyjną poszczególnych obiektów technicznych w aspekcie analizowanych zdarzeń i procesów eksploatacyjnych. Agregacja jest najczęściej prowadzona w oparciu o tzw. formuły addytywne [16]. Stanowią one różne formy dodawania iloczynów

wartości unormowanych cech przez odpowiadające im wagi. Typowa procedura agregacji, polega na poszukiwaniu wartości liczbowych następującego wektora funkcji agregującej:

$$[Q_i] = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad i = (1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

gdzie:  $Q_i$  - wartość funkcji agregatowej wyznaczonej dla  $i$ -tego obiektu.

Typową postacią funkcji agregacyjnych jest zależność [37]:

$$Q_i = \sum_{j=1}^s z_{ij} \omega_j \quad i = (1, 2, \dots, n), \quad \omega_j \in R_+ \quad (8)$$

gdzie:  $z_{ij}$  - wartość  $i$ -tej oceny  $j$ -tego wariantu,  
 $\omega_j$  - wartość wagi.

Innym przykładem postaci funkcji agregacyjnej jest jej wartość ważona odniesiona do średniej arytmetycznej [24]:

$$Q_i = \frac{\sum_{j=1}^s z_{ij} \omega_j}{\sum_{j=1}^s \omega_j} \quad i = (1, 2, \dots, n), \quad \omega_j \in R_+ \quad (9)$$

Z zależności (8) i (9) wynika, że w procesie agregacji ważną rolę odgrywa system wag, który z jednej strony może opierać się na opiniach ekspertów, a z drugiej na procedurach statystycznych z wykorzystaniem gromadzonych informacji o zmiennych.

#### 4. Sposób rangowania obiektów technicznych w świetle ich cech eksploatacyjnych

Przedstawione założenia metodologiczne i koncepcyjne dotyczące możliwości i potrzeb oceny eksploatacyjnej stały się podstawą opracowania sposobu rangowania wybranych obiektów technicznych. Celem rangowania jest eksploatacyjne uporządkowanie równoważnych obiektów technicznych w oparciu o historię zdarzeń i procesów wynikającą z realizowanych prac obsługowo-naprawczych wraz z wszystkimi ich okolicznościami. Przyjęto przy tym następujące warunki początkowe:

- podstawą rangowania jest jednoczesne uwzględnienie szerokiego zbioru miar, będącego wyznacznikiem kompleksowej oceny eksploatacji obiektów technicznych i funkcjonowania organizacji utrzymania ruchu,
- proponowany sposób rangowania opiera się na ogólnych założeniach metod taksonomicznych (opisanych wcześniej),
- wszystkie wagi przyporządkowane do poszczególnych miar i poziomów decyzyjnych, uporządkowanie miar w ramach tabeli ocen zostały określone częściowo w sposób subiektywny, w oparciu o wiedzę ekspercką i konsultacje,
- sposób rangowania poddaje wzajemnej ocenie (wzajemnemu porównaniu) równorzędne obiekty techniczne z punktu widzenia zarządzania eksploatacją, dlatego dla potrzeb analizy nie jest istotna sama wartość rangi ale jej relacja do rang innych obiektów.

Pierwszym etapem sposobu rangowania jest wybór miar (wskaźników) eksploatacyjnych stanowiących ilościową podstawę oceny eksploatacji obiektów technicznych. W oparciu o przeprowadzone rozpoznanie, należy wyraźnie stwierdzić, że określony zbiór miar ma charakter indywidualny w każdym rozpatrywanym przypadku, zależny każdorazowo od szczegółowych uwarunkowań techniczno-organizacyjnych

przedsiębiorstwa i jego służb utrzymania ruchu. Niezależnie od wyboru konkretnych miar, kluczowym aspektem metody jest ich klasyfikacja. W tym przypadku dokonano uporządkowania miar w trzech głównych kategoriach:

- miary (wskaźniki) ekonomiczne, wyrażające kosztową wartość wybranego aspektu eksploatacyjnego,
- miary (wskaźniki) techniczne, wyrażające czasową wartość wybranego aspektu eksploatacyjnego,
- miary (wskaźniki) organizacyjne, wyrażające okołoeksploatacyjną wartość wybranego aspektu eksploatacyjnego.

Zbiór przykładowych miar wybranych w oparciu o [27] i uporządkowanych według powyższego układu przedstawiono w Tab. 2.

<b>Miary ekonomiczne</b>	<b>Miary techniczne</b>	<b>Miary organizacyjne</b>
Wskaźnik kosztów działań odnoszony do ilości świadczonej produkcji	Wskaźnik czasu usuwania awarii	Wskaźnik udziału pracowników utrzymania ruchu w ilości sumarycznej pracowników własnych firmy
Wskaźnik kosztów działań i braku świadczonej usługi odnoszony do ilości świadczonej produkcji	Wskaźnik czasu działań korekcyjnych	Wskaźnik udziału ilości pracowników pośrednich w sumarycznej ilości pracowników utrzymania ruchu
Wskaźnik kosztów personelu odnoszony do sumarycznych kosztów eksploatacji	Wskaźnik czasu działań prewencyjnych	Wskaźnik wykorzystania potencjału w procesie planowania
Wskaźnik kosztów zużycia zasobów materiałowych	Wskaźnik czasu działań diagnostycznych	Wskaźnik ilości czynności przy których występują wypadki
Wskaźnik kosztów zużycia narzędzi i sprzętu specjalistycznego	Wskaźnik - Średni czas pomiędzy zdarzeniami uniemożliwiającymi normalne funkcjonowanie (MTBF)	Wskaźnik ilości czynności przy których występuje zagrożenie potencjalne wypadkiem
Wskaźnik udziału kosztów czynności korekcyjnych w sumarycznych kosztach eksploatacji	Wskaźnik średniego czasu działań związanych z naprawami (MTTR)	Wskaźnik ilości czynności przy których występuje zagrożenie dla środowiska
Wskaźnik udziału kosztów czynności prewencyjnych w sumarycznych kosztach eksploatacji	Wskaźnik średniego czasu działań związanych z naprawami (MFOT)	Wskaźnik ilości czynności przy których występuje potencjalne zagrożenie dla środowiska
Wskaźnik udziału kosztów czynności diagnostycznych w sumarycznych kosztach eksploatacji	Wskaźnik dostępności obiektów eksploatacji	Wskaźnik wykorzystania potencjału na działania prewencyjne
Wskaźnik udziału kosztów awarii w sumarycznych kosztach eksploatacji	Wskaźnik efektywności działań eksploatacyjnych	Wskaźnik wykorzystania potencjału na działania korekcyjne
	Wskaźnik efektywności planowania działań obsługowo-naprawczych	Wskaźnik wykorzystania potencjału na działania diagnostyczne
		Wskaźnik wykorzystania potencjału na działania związane z awariami
		Wskaźnik nadgodzin pracowników utrzymania ruchu

Tab. 2. Przykładowe miary eksploatacyjne (opracowanie własne w oparciu o [27])

Wybrane na tej podstawie miary eksploatacyjne opisują w sposób ilościowy różne aspekty, a co za tym idzie wyrażane są w odmiennych nieporównywalnych ze sobą jednostkach. Zgodnie z podstawowymi założeniami metody, konieczne jest równoważne traktowanie wszystkich miar, czyli innymi słowy sprowadzenie rozpatrywanych miar do tej samej skali ocen. Poza tym mamy tutaj do czynienia zarówno ze stymulantami, jak i destymulantami. Dlatego proces normowania proponuje się przeprowadzić łącznie z ujednoczeniem wartości, uwzględniając:

- wyrażenie wartości oceny w ujęciu względnym (odniesionym do maksymalnej i minimalnej wartości miary, uzyskanych w całej historii pomiaru w danym układzie organizacyjno-technicznym),
- wyrażenie wartości oceny w przedziale  $\langle 0, 10 \rangle$ , co pozwoli na sprowadzenie poszczególnych miar z postaci mianowanej (np. zł/m<sup>3</sup>) do postaci oceny niemianowanej w jednej skali (od 0 do 10), a przez to możliwe do porównywania,
- ustalenie jednolitej tendencji wartości wskaźników (zdaniem autora, lepszym rozwiązaniem jest tendencja pozytywna - stymulanty, czyli im wartość większa tym lepiej).

Na podstawie powyższych kryteriów można wyznaczyć wartość oceny dla miar eksploatacyjnych:

1. dla miar o tendencji pozytywnej - stymulantów:
- 2.

$$OC_{is} = \frac{10 \cdot M_i}{M_{i_{max}} - M_{i_{min}}} \quad (10)$$

gdzie:

$OC_i$  - wybrana (i-ta) ocena eksploatacyjna,

$M_i$  - wybrana (i-ta) miara eksploatacyjna,

$M_{i_{max}}$  - maksymalna wartość miary eksploatacyjnej w całej historii pomiaru w danym układzie organizacyjno-technicznym,

$M_{i_{min}}$  - wartość minimalnej wartości miary eksploatacyjnej w całej historii pomiaru w danym układzie organizacyjno-technicznym.

Przyjmuje się, że dla wszystkich rozpatrywanych tutaj miar eksploatacyjnych, wartość minimalna  $M_{i_{min}} = 0$ , stąd:

$$OC_{is} = \frac{10 \cdot M_i}{M_{i_{max}}} \quad (11)$$

3. dla miar o tendencji negatywnej - destymulantów:
- 4.

$$OC_{id} = 10 - \frac{10 \cdot M_i}{M_{i_{max}} - M_{i_{min}}} \quad (12)$$

dla  $M_{i_{min}} = 0$ :

$$OC_{id} = 10 - \frac{10 \cdot M_i}{M_{i_{max}}} \quad (13)$$

Wyznaczone wartości można uporządkować w tabeli ocen eksploatacyjnych (Tab. 3).



	Wskaźniki ekonomiczne waga $k_1$	Wskaźniki techniczne waga $k_2$	Wskaźniki organizacyjne waga $k_3$
Poziom 1 waga $p_1$	$a_{11}$ $OC_{E1}, \dots, OC_{Em}$ (suma wag równa 1)	$a_{12}$ $OC_{T1}, \dots, OC_{Tm}$ (suma wag równa 1)	$a_{13}$ $OC_{O1}, \dots, OC_{Om}$ (suma wag równa 1)
Poziom 2 waga $p_2$	$a_{21}$ $OC_{Em+1}, \dots, OC_{En}$ (suma wag równa 1)	$a_{22}$ $OC_{Tm+1}, \dots, OC_{Tn}$ (suma wag równa 1)	$a_{23}$ $OC_{Om+1}, \dots, OC_{On}$ (suma wag równa 1)
Poziom 3 waga $p_3$	$a_{31}$ $OC_{En+1}, \dots, OC_{Ep}$ (suma wag równa 1)	$a_{32}$ $OC_{Tn+1}, \dots, OC_{Tp}$ (suma wag równa 1)	$a_{33}$ $OC_{On+1}, \dots, OC_{Op}$ (suma wag równa 1)

Tab. 3. Tabela ocen eksploatacyjnych

gdzie:

- $OC_{Ei}$  - ocena eksploatacyjna typu ekonomicznego,
- $OC_{Ti}$  - ocena eksploatacyjna typu technicznego,
- $OC_{Oi}$  - ocena eksploatacyjna typu organizacyjnego.

Tabela ta uwzględnia:

- typy ocen eksploatacyjnych (ekonomiczne, techniczne, organizacyjne), których suma wag musi być równa 1 ( $k_1 + k_2 + k_3 = 1$ ),
- poziomy decyzyjne, których wagi mają następujące wartości:  $p_1 = 4$ ,  $p_2 = 2$ ,  $p_3 = 1$ .

Z danych zawartych w tabeli ocen (Tab. 3), należy określić:

1. macierz ocen eksploatacyjnych:

$$W = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

gdzie:

$$a_{ij} = \sum_{i=1}^N OC_{ij} \cdot g_i \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^N g_i = 1 \quad (16)$$

$a_{ij}$  - ujednoliconą ważoną sumą wartości ocen eksploatacyjnych określonego typu obliczana dla obiektu,

$OC_{ij}$  - ocena eksploatacyjna,

$g_i$  - wartość wagi odniesiona do pojedynczej oceny.

2. wektor kategorii zadań:

$$K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

gdzie:

$K$  - zbiór wag odniesiony do kategorii (ekonomiczna, techniczna, organizacyjna),  
 $k_i$  - waga  $i$ -tej kategorii.

Wektor kategorii umożliwia zdefiniowanie wag dla ocen określonych typów. Pozwala to na właściwe zdefiniowanie znaczenia polityki eksploatacyjnej przedsiębiorstwa w odniesieniu do rozpatrywanych obiektów technicznych. Przykładowo:

- duża wartość wagi kategorii ekonomicznej, przy jednocześnie niższych wartościach wag kategorii technicznej i organizacyjnej może wskazywać na prowadzenie prac obsługowo-naprawczych ze szczególnym naciskiem na bezpośrednie wynikające stąd koszty,
- duża wartość wagi kategorii technicznej, przy jednocześnie niższych wartościach wag kategorii ekonomicznej i organizacyjnej przekłada się na realizację działań obsługowo-naprawcze, poprawę niezawodności i efektywności przy mniejszym nacisku na koszty i ilość poświęconych na ten cel roboczogodzin.

Wartości wektora kategorii można kształtować dowolnie, przyjmując założenie, że:

$$\sum_{i=1}^N k_i = 1 \quad (18)$$

5. wektor poziomów decyzyjnych:

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

gdzie:

$p_i$  - waga  $i$ -tego poziomu organizacyjnego przedsiębiorstwa:

$p_1$  - waga poziomu przedsiębiorstwa,

$p_2$  - waga poziomu pionu technicznego,

$p_3$  - waga poziomu służb utrzymania ruchu.

Wektor poziomów decyzyjnych pozwala na wyróżnienie tych ocen, które w procesie podejmowania decyzji odgrywają określoną rolę w odniesieniu do polityki eksploatacyjnej przedsiębiorstwa. Rola ta wynika przede wszystkim z przejętej strategii eksploatacyjnej oraz zbudowanych na tej podstawie struktur organizacyjno-decyzyjnych służb utrzymania ruchu. W szczególności, wektor ten obejmuje:

- wagę poziomu przedsiębiorstwa ( $p_1$ ) - uwzględniającą decyzje strategiczne i związane z tym oceny dotyczące bezpośrednio polityki eksploatacyjnej przedsiębiorstwa i sposobu funkcjonowania służb utrzymania ruchu jako całości,
- wagę poziomu pionu technicznego - uwzględniającą decyzje i związane z tym oceny dotyczące zakresu planowania i realizacji prac obsługowo-naprawczych,
- wagę poziomu służb utrzymania ruchu - uwzględniającą decyzje operacyjne i związane z tym oceny dotyczące szczegółowych sposobów realizacji prac obsługowo-naprawczych.

Hierarchiczny charakter poziomów decyzyjnych oraz odpowiedzialności za określone zadania obsługowo-naprawcze pozwalają na przyjęcie wartości wektora poziomów decyzyjnych stosując zasadę, że waga poziomu wyższego jest wielokrotnością wagi poziomu bezpośrednio niższego, czyli:

$p_3 = 1$ ,

$p_2 = 2$ ,

$p_1 = 4$ .

Wartości wektora poziomów decyzyjnych mają w tym przypadku charakter umowny i mogą być różnie kształtowane w odniesieniu do innego przedsiębiorstwa.

W oparciu o zdefiniowane i wyznaczone wcześniej macierze i wektory obliczana jest ranga obiektu, stanowiąca wynik agregacji:

$$R = (W \cdot K) \cdot P^T \quad (20)$$

W szczególności:

$$R = \left( \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

$$R = \begin{bmatrix} a_{11} \cdot k_1 + a_{12} \cdot k_2 + a_{13} \cdot k_3 \\ a_{21} \cdot k_1 + a_{22} \cdot k_2 + a_{23} \cdot k_3 \\ a_{31} \cdot k_1 + a_{32} \cdot k_2 + a_{33} \cdot k_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

$$R = [(a_{11} \cdot k_1 + a_{12} \cdot k_2 + a_{13} \cdot k_3) \cdot p_1 + (a_{21} \cdot k_1 + a_{22} \cdot k_2 + a_{23} \cdot k_3) \cdot p_2 + (a_{31} \cdot k_1 + a_{32} \cdot k_2 + a_{33} \cdot k_3) \cdot p_3] \quad (23)$$

Wyznaczona na tej postawie ranga stanowi wartość eksploatacyjną obiektu w odniesieniu do innych rangowanych obiektów.

## 5. Przykład obliczania rang dla obiektów wybranego sieciowego systemu technicznego

Przedstawiona metoda rangowania obiektów technicznych może być zastosowana w wielu przypadkach eksploataowania systemów technicznych z uwzględnieniem następujących warunków:

- konieczne jest wyodrębnienie równoważnych porównywalnych obiektów lub fragmentów systemów technicznych,
- konieczne jest przygotowanie szczegółowych i kompletnych zasobów danych o wszystkich zdarzeniach eksploatacyjnych, które miały miejsce w obrębie rozpatrywanych obiektów.

Uwzględniając powyższe wytyczne, przyjęto że przedmiotem przykładu będzie typowy sieciowy system techniczny, jakim jest system wodociągowy. System taki realizuje funkcje zbiorowego zaopatrzenia w wodę, na które składa się ujmowanie, uzdatnianie oraz dostarczanie wody do odbiorców. Specyfikę eksploatacyjną systemu wodociągowego wyznaczają trzy aspekty [13]:

- zdecydowana większość elementów systemu wodociągowego jest zlokalizowana i funkcjonuje w miejscach trudno dostępnych (np. pod ziemią), co utrudnia lub uniemożliwia prowadzenie takich prac prewencyjnych, które są charakterystyczne dla typowych przedsiębiorstw produkcyjnych (np. obchody, przeglądy),
- w celu prawidłowego funkcjonowania systemu wodociągowego, wymagane jest zapewnienie ciągłości i jakości działania obiektów w ramach rozbudowanej infrastruktury technicznej rozproszonej geograficznie na dużym obszarze,
- specyfika budowy oraz lokalizacji systemu wodociągowego powoduje, że największy udział w strukturze prac obsługowo-naprawczych mają działania realizowane zgodnie ze strategią według uszkodzeń (prace interwencyjne), natomiast mniej obiektów jest obsługiwanych w ramach strategii według ilości wykonanej prac i strategii według stanu technicznego (prace prewencyjne).

Dla potrzeb przygotowanego przykładu przyjęto, że obiektami stanowiącymi podstawę decyzyjną i przedmiot analizy eksploatacyjnej są fragmenty wodociągu przyporządkowane do poszczególnych ulic wraz z wszystkimi elementami technicznymi. Uporządkowany zbiór ocen i wag przedstawiono w Tab. 4.

	Wskaźniki ekonomiczne waga $k_1 = 0,5$		Wskaźniki techniczne waga $k_2 = 0,3$		Wskaźniki organizacyjne waga $k_3 = 0,2$	
Poziom 1 waga $p_1 = 4$	$a_{11}$		$a_{12}$		$a_{13}$	
	Ocena	Waga ( $g_i$ )	Ocena	Waga ( $g_i$ )	Ocena	Waga ( $g_i$ )
	OC <sub>E1</sub>	0,35	OC <sub>T9</sub>	0,2	OC <sub>O1</sub>	0,4
	OC <sub>E2</sub>	0,25	OC <sub>T10</sub>	0,15	OC <sub>O2</sub>	0,35
	OC <sub>E3</sub>	0,2	OC <sub>T14</sub>	0,2	OC <sub>O3</sub>	0,25
	OC <sub>E14</sub>	0,2	OC <sub>T15</sub>	0,25		
			OC <sub>T16</sub>	0,1		
			OC <sub>T17</sub>	0,1		
Poziom 2 waga $p_2 = 2$	$a_{21}$		$a_{22}$		$a_{23}$	
	Ocena	Waga ( $g_i$ )	Ocena	Waga ( $g_i$ )	Ocena	Waga ( $g_i$ )
	OC <sub>E4</sub>	0,35	OC <sub>T11</sub>	0,45	OC <sub>O4</sub>	0,6
	OC <sub>E5</sub>	0,25	OC <sub>T12</sub>	0,25	OC <sub>O9</sub>	0,4
	OC <sub>E6</sub>	0,2	OC <sub>T13</sub>	0,3		
	OC <sub>E7</sub>	0,1				
OC <sub>E8</sub>	0,1					
Poziom 3 waga $p_3 = 1$	$a_{31}$		$a_{32}$		$a_{33}$	
	Ocena	Waga ( $g_i$ )	Ocena	Waga ( $g_i$ )	Ocena	Waga ( $g_i$ )
	OC <sub>E9</sub>	0,3	OC <sub>T3</sub>	0,25	OC <sub>O5</sub>	0,35
	OC <sub>E10</sub>	0,25	OC <sub>T14</sub>	0,2	OC <sub>O6</sub>	0,25
	OC <sub>E11</sub>	0,2	OC <sub>T5</sub>	0,2	OC <sub>O7</sub>	0,15
	OC <sub>E12</sub>	0,15	OC <sub>T6</sub>	0,15	OC <sub>O8</sub>	0,25
	OC <sub>E13</sub>	0,1	OC <sub>T7</sub>	0,15		
		OC <sub>T8</sub>	0,05			

Tab. 4. Tabela ocen eksploatacyjnych dla przykładowego sieciowego systemu technicznego

Wartości  $OC_{ij}$  zostały wyznaczone w oparciu o:

- zależności wskaźników przedstawionych w Tab. 2 i zamieszczone w [27],
- zależności (10) - (13).

Fragment zestawienia wartości miar oraz odpowiadających im ocen wyznaczonych dla wybranych obiektów technicznych (ulic) przedstawiono w Tab. 5. W tabeli uwzględniono wyniki analizy sześciu spośród prawie stu obiektów, co pozwala na pokazanie idei i możliwości praktycznej realizacji proponowanej metody, jak również w praktyczny sposób umożliwić ograniczenie przestrzeni prezentacyjnej.

Obiekt (ulica)	$E_1$	$OC_{E1}$	$T_{11}$	$OC_{T11}$	$O_6$	$OC_{O6}$
Obiekt 1	0,3493	9,7049	0,0004	0,2278	0,0251	9,9094
Obiekt 2	3,7983	6,7916	0,0006	0,2941	0,0709	9,7439
Obiekt 3	5,1721	5,6312	0,0006	0,3448	0,1270	9,5411
Obiekt 4	0,0335	9,9716	0,0004	10,000	0,0098	9,9646
Obiekt 5	0,2591	9,7811	0,0004	5,0000	0,1807	9,3468
Obiekt 6	0,098	9,9171	0,0002	0,2564	0,0521	9,9812

Tab. 5. Fragment zestawienia wartości miar oraz odpowiadających im ocen wyznaczonych dla wybranych obiektów technicznych (ulic)

W wyniku przeprowadzonych obliczeń, zgodnie z zależnościami (15) - (16), wyznaczono wartości macierzy ocen eksploatacyjnych dla poszczególnych obiektów (Tab. 6).

Obiekt (ulica)	a11	a12	a13	a21	a22	a23	a31	a32	a33
Obiekt 1	7,5390	7,0727	10	8,9896	5,2279	9,3259	9,1634	6,9476	9,9463
Obiekt 2	5,8716	7,0509	10	9,1802	4,9882	9,5678	9,1657	5,5745	10,000
Obiekt 3	5,3614	5,6458	10	8,6021	5,1581	9,7208	7,1919	5,0159	9,7836
Obiekt 4	7,4951	8,0000	10	6,0269	9,6029	8,3353	9,9798	6,1449	9,5250
Obiekt 5	7,9525	7,5000	10	7,3498	7,3529	9,7100	9,9798	7,4237	9,6677
Obiekt 6	7,3723	7,6213	10	9,1224	3,8801	8,6855	9,8824	7,4913	9,9073

Tab. 6. Zestawienie wartości elementów macierzy ocen eksploatacyjnych W dla wybranych obiektów technicznych

Następnie, obliczony został wektor rang obiektów (ulic), w oparciu o zależności (20) -(23).

Obiekt (ulica)	R
Obiekt 1	152,8236
Obiekt 2	159,8538
Obiekt 3	162,3891
Obiekt 4	163,4277
Obiekt 5	171,5911
Obiekt 6	177,6439

## 6. Wnioski

Prezentowany artykuł stanowi, zdaniem autora, element w trwającej, w kręgu służb utrzymania ruchu przedsiębiorstw przemysłowych, dyskusji nad sposobami i efektami prowadzenia oceny eksploatacyjnej. Przedstawiony tutaj sposób rangowania obiektów technicznych, stanowi próbę odpowiedzi na stale występujące w tym zakresie pytania:

- które miary są najbardziej adekwatne w rozpatrywanym układzie organizacyjno-technicznym?
- jakie powinno być znaczenie (waga) określonej miary w rozpatrywanym układzie organizacyjno-technicznym?
- które kryteria (wartości miar) powinny stanowić podstawę dla porównywania obiektów i/lub jednostek organizacyjnych służb utrzymania ruchu pomiędzy sobą?

Należy jednocześnie zaznaczyć, że opracowany sposób ma charakter rozwojowy. Na obecnym etapie trwają badania o charakterze przemysłowym, które polegają na weryfikacji prawidłowości i skuteczności sposobu rangowania w oparciu o dane pochodzące z rzeczywistego środowiska pracy - działalności służb utrzymania ruchu przedsiębiorstw usługowych (wodociągowo-kanalizacyjnych), jak i produkcyjnych. Prowadzona weryfikacja praktyczna pozwoli dokonać parametryzacji i pozycjonowania opracowanego sposobu, które

wynikają z występujących pewnych niejednoznaczności metody i słabych jej punktów, które dotyczą:

- wyboru miar,
- sposobów określania wag,
- pełnego wykorzystania rang obiektów do planowania strategicznego przedsiębiorstwa.

W zakresie optymalizacji doboru miar oraz wag planuje się wykorzystanie metod z obszaru Analytic Network Process, których prekursorem jest T. Saaty [29, 30] i rozwijanych w różnych obszarach przez wielu innych autorów, np. [6, 35].

Opracowany sposób rangowania jest fragmentem badań, prowadzonych przez autora w Instytucie Inżynierii Produkcji Politechniki Śląskiej. Badania te dotyczą sposobów modelowania zdarzeń i procesów eksploatacyjnych z wykorzystaniem metod scenariuszowych.

## Literatura

1. Adamkiewicz A., Burnos A. The maintenance of the ship turbines with the application of the key performance indicators. Journal of POLISH CIMAC „Diagnosis, reliability and safety” 2010; Vol. 5 No. 2: 7-16.
2. Brown M. Managing Shutdowns, Turnarounds & Outages. Hoboken: Wiley Publishing Inc., 2004.
3. Burnos A. Universal maintenance performance indicator for technical objects operated on floating units. Szczecin: Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej 2011; 27 (99) z. 1: 34-39.
4. Campbell J., Jardine A., McGlynn J. Asset Management Excellence. Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions. Boca Raton: CRC Press, 2011.
5. Chmurawa M., Bińkowski W. Podstawy niezawodności i eksploatacji maszyn roboczych. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1980.
6. Downarowicz O. Wybrane metody ergonomii i nauki o eksploatacji. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2000.
7. Drożyner P., Mikołajczak P. Assessment of the effectiveness of machine and device operation. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2007; 3 (35): 72-75.
8. Grabiński T., Wydymus S., Zeliaś A. Metody taksonomii numerycznej w modelowaniu zjawisk społeczno-gospodarczych. Warszawa: PWN, 1989.
9. Grenčík J., Legát V. Maintenance audit and benchmarking - search for evaluation criteria on global scale. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2007; 3 (35): 34-39.
10. Hebda M. Elementy teorii eksploatacji systemów technicznych. Radom: MCNEMT, 1990.
11. Jasiulewicz-Kaczmarek M. Participatory Ergonomics as a Method of Quality Improvement in Maintenance. Ergonomics and Health Aspects of Work with Computers 2009; Vol. 5624: 153-161.
12. Kaźmierczak J. Eksploatacja systemów technicznych. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2000.

13. Kaźmierczak J., Loska A., Dąbrowski M. Use of geospatial information for supporting maintenance management in a technical network system. Belgrade: Proceedings of International Conference "Euromaintenance 2012", 2012.
14. Kelly A. Strategic Maintenance Planning. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.
15. Kornacki A., Sokołowska E. The estimation of smooth operation time until failure with the application of the Akaike Information Criterion (AIC). *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2010; 1 (45): 69-76.
16. Kukuła K. Metoda unitaryzacji zerowanej. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2000.
17. Levitt J. The Handbook of Maintenance Management (second edition). New York: Industrial Press Inc., 2009.
18. Loska A. (red.): Przeprowadzenie dla potrzeb Pionu TR oceny wydajności wykonawstwa własnego do identyfikacji przyczyn złej jakości prac i umożliwienia doskonalenia jakości usług wykonywanych przez pracowników pionu TR. Zabrze-Rybnik: Praca badawcza wykonana na zlecenie Elektrowni Rybnik S.A. Politechnika Śląska, 2009.
19. Loska A. Przegląd metod modelowania jako podstawa budowy scenariuszy eksploatacyjnych. Opole: Konferencja Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją 2010; t. 2: 152-161.
20. Loska A. Przegląd modeli ocen eksploatacyjnych systemów technicznych. Opole: Konferencja Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją 2011; t. 2: 37-46.
21. Loska A. Remarks about modelling of maintenance processes with the use of scenario techniques. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2012; 14 (2): 92-98.
22. Nakajima S. Introduction to TPM. Total Productive Maintenance. Portland: Productivity Press, 1988.
23. Niebel W.B. Engineering Maintenance Management. Second edition. New York: Marcel Dekker Inc., 1994.
24. Pahl G., Beitz W. Nauka konstruowania. Warszawa: WNT, 1984.
25. Pawłowski Z. Ekonometria. Warszawa: PWN, 1980.
26. Peters R.W. Maintenance Benchmarking and Best Practices: A Profit - and Customer - Centered Approach. New York: McGraw-Hill, 2006.
27. Polska Norma PN-EN 15341:2007 - Maintenance - Maintenance Key Performance Indicators. Warszawa, Polski Komitet Normalizacyjny, 2007.
28. Radkowski S. Podstawy bezpiecznej techniki. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
29. Saaty T. How to make a decision. The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research* 1990; 48 (1): 9-26.
30. Saaty T. Theory and Applications of the Analytic Network Process. Decision making with benefits, opportunities, costs and risks. Pittsburgh: RWS Publications, 2009.

31. Skotnicka-Zasadzień B, Biały W. An analysis of possibilities to use Pareto chart for evaluating mining machines' failure frequency. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2011; 3 (51): 51-55.
32. Smith J. *The KPI Book*. Stoubridge: Insight Training & Development Limited, 2001.
33. Suzuki T. *TPM in Process Industries*. Portland: Productivity Press, 1994.
34. The Productivity Development Team. *OEE for Operators*. New York: Productivity Press Inc., 1999.
35. Triantaphyllou E. Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications some challenges, *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice* 1995; Vol. 2 No. 1: 35-44.
36. Wiremann T. *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance* (second edition). New York: Industrial Press, 2005.
37. Zeliaś A. *Przestrzenno-czasowe modelowanie i prognozowanie zjawisk gospodarczych*. Kraków: Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Krakowie, 1993.
38. Żółtowski B. *Podstawy diagnostyki maszyn*. Bydgoszcz: Wydawnictwo Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, 1996.