

Andrzej Adamkiewicz
Arkadiusz Burnos
Akademia Morska w Szczecinie

KLUCZOWE WSKAŹNIKI EFEKTYWNOŚCI W UTRZYMANIU SILNIKÓW SPALINOWYCH W UKŁADACH ENERGETYCZNYCH JEDNOSTEK PŁYWAJĄCYCH

STRESZCZENIE

Kluczowe wskaźniki efektywności (*Key Performance Indicators* — KPI) to jedno z podstawowych narzędzi sterowania eksploatacją obiektów technicznych. Ich właściwe wdrożenie i stosowanie pozwala na doskonalenie oraz kontrolę zarówno procesów utrzymywania, jak i użytkowania układów energetycznych. W artykule przedstawiono aspekty wykorzystania kluczowych wskaźników efektywności utrzymania w procesach sterowania eksploatacją układów energetycznych na jednostkach pływających. Wskazano istotne mierzalne wartości techniczne, organizacyjne i ekonomiczne systemów eksploatacji, które mogą determinować decyzje związane z utrzymywaniem obiektów technicznych w stanie zdatności według zamierzonych kryteriów. Dokonano przeglądu metod doboru wskaźników i podjęto próbę interpretacji ich przykładowych wartości. Odniesiono się do wykorzystania wskaźników w komputerowych systemach zarządzania utrzymaniem ruchu (*Computerized Maintenance Management System* — CMMS) i wykorzystania tych systemów w procesach sterowania utrzymaniem układów energetycznych.

Słowa kluczowe:

wskaźniki efektywności, KPI, układ energetyczny, jednostka pływająca, turbinowy silnik spalinowy.

WSTĘP

Eksploatacja układów energetycznych jednostek pływających jest współcześnie procesem coraz dokładniej dozorowanym. Pozwalają na to systemy nadzoru, pomiarowe, rejestracji i archiwizowania danych, szybsze i zminiaturyzowane komputery oraz uniwersalne i otwarte oprogramowanie. Zgromadzone dane stają się cennym

zasobem informacji, a ich identyfikacja i analiza pozwala na racjonalizację sterowania procesem eksploatacji [2].

Na podstawie wykonywanych pomiarów właściwości eksploatacyjnych maszyn i urządzeń zainstalowanych na jednostkach pływających wyznacza się istotne grupy informacji. Ich przedstawienie dokonuje się z użyciem kluczowych wskaźników efektywności (*Key Performance Indicators* — KPI), które są jednym z podstawowych narzędzi sterowania eksploatacją obiektów technicznych [7].

Efektywność może być rozumiana w różny sposób, w zależności od dziedziny i warunków, w których jest szacowana. W systemach eksploatacji jest to właściwość spełniania wymagań w kontekstach: niezawodnościowym, ekonomicznym, jakościowym, wydajnościowym i ekologicznym [5]. Istotą oceny efektywności jest określenie prawdopodobieństwa zachowania przez system nominalnych osiągnięć w trakcie użytkowania [6]. Efektywność określa się zatem w kategoriach rezultatów osiągniętych lub oczekiwanych [8].

Utrzymanie układów energetycznych na jednostkach pływających odnosi się do wielokierunkowej działalności mającej na celu zachowanie zdolności funkcjonalnej maszyn, urządzeń i instalacji. Utrzymanie jest pojęciem coraz częściej spotykanym w literaturze technicznej związanej z teorią i praktyką eksploatacji [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Niekiedy są stosowane również takie pojęcia, jak utrzymanie ruchu lub utrzymanie w ruchu. Wszystkie te zagadnienia odnoszą się przede wszystkim do zachowania obiektów technicznych w stanie zdolności i gotowości do użytkowania na oczekiwanym poziomie i w odpowiednim czasie.

Na utrzymanie obiektów składają się czynności zarówno bezpośrednio związane z obiektem technicznym, jak i wspierające, zazwyczaj związane z przedmiotem eksploatacji pośrednio poprzez dział zarządzania, informacji, logistyki itp. Na utrzymanie składają się następujące działania [1, 3, 8]:

- obsługa techniczna (naprawy, remonty, regulacje itp.);
- obsługa logistyczna, tj. logistyka części zamiennych i środków eksploatacyjnych;
- akwizycja informacji o utrzymywanych obiektach;
- zarządzanie wiedzą i personelem technicznym;
- tworzenie i wdrażanie okresowych procedur obsługowych;
- diagnostyka na potrzeby obsługi.

CEL STOSOWANIA KLUCZOWYCH WSKAŹNIKÓW EFEKTYWNOŚCI

Efektywność utrzymywania układów energetycznych jednostek pływających jest istotnym zagadnieniem z punktu widzenia racjonalizacji działalności człowieka

z wykorzystaniem morskich środków transportu, okrętów o charakterze militarnym oraz wszystkich innych jednostek pływających, zwłaszcza wydobywczych i produkcyjnych platform pełnomorskich oraz jednostek FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*). Celem stosowania kluczowych wskaźników efektywności utrzymania jest:

- przedstawienie bieżących i historycznych wartości miar właściwości eksploatacyjnych oraz relacji między nimi;
- umożliwienie porównania otrzymanych wartości z wartościami projektowymi oraz z wartościami uzyskanymi w wyniku obserwacji innych systemów eksploatacji;
- diagnostyka realizowanych działań utrzymania;
- realizacja procesu ciągłego doskonalenia poprzez wyszukiwanie i eliminację znacznych odchyłeń od założonych wartości projektowych;
- śledzenie zmian i postępu w systemie eksploatacji;
- motywowanie oraz rozliczanie personelu technicznego i zarządzającego z uzyskanych efektów.

KLASYFIKACJA WSKAŹNIKÓW EFEKTYWNOŚCI UTRZYMANIA

Efektywność utrzymania układów energetycznych jednostek pływających najczęściej odnosi się do:

- jakości realizowanych procesów utrzymania;
- jakości pracy maszyn, urządzeń i instalacji;
- organizacji i wydajności pracy kadr technicznych;
- kosztów i opłacalności realizowanych działań utrzymania.

Kluczowe wskaźniki efektywności utrzymania zostały ustrukturyzowane w trzy kategorie [8]:

- wskaźniki ekonomiczne;
- wskaźniki techniczne;
- wskaźniki organizacyjne.

W każdej z tych grup wydzielono wskaźniki na poziomie ogólnym, pośrednim i szczegółowym [8, 10]. Korzystając z oznaczeń zastosowanych w [8, 9, 10], podział predefiniowanych w tych materiałach wskaźników przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Strukturyzacja wskaźników efektywności utrzymania maszyn [8, 9, 10]

	Wskaźniki ekonomiczne	Wskaźniki techniczne	Wskaźniki organizacyjne
Poziom 1. — ogólny/armatorski (np. zbiór jednostek pływających)	E1, E2, E3, E4, E5, E6	T1, T2, T3, T4	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8
Poziom 2. — pośredni (np. układ energetyczny jednostki pływającej)	E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13, E14	T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15, T16	O9, O10
Poziom 3. — szczegółowy (np. turbinowy silnik spalinowy)	E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22, E23, E24	T17, T18, T19, T20, T21	O11, O12, O13, O14, O15, O16, O17, O18, O19, O20, O21, O22, O23, O24, O25, O26

Źródło: S. Niziński, *Utrzymanie pojazdów i maszyn*, „Biblioteka Problemów Eksploatacji”, red. S. Niziński, R. Michalski, Olsztyn 2007; PN-EN 15341; PN-EN 13306.

W aktualnych normach [10] umieszczono wskaźniki uznane przez Komitet Techniczny CEN/TC 319 ‘Maintenance’ za najistotniejsze. Nie oznacza to jednak, że na firmy i instytucje zajmujące się eksploatacją jednostek pływających nakładane są jakiegokolwiek ograniczenia. KPI są tworzone i dobierane na podstawie indywidualnego zapotrzebowania informacyjnego w każdym systemie eksploatacji. Poniżej przedstawiono wybrane predefiniowane w [10] oraz [8] wskaźniki efektywności utrzymania.

Śród wskaźników technicznych jednym z najczęściej wykorzystywanych KPI jest dostępność A określonej maszyny lub całego układu energetycznego. Wartość ta jest tożsama ze stosowaną w Polsce gotowością K . Rozróżniana jest dostępność techniczna A_t oraz dostępność operacyjna A_o .

$$[T1] A_t = T_{OT} / (T_{OT} + T_{DTM}); \quad (1)$$

$$[T2] A_o = T_{UT,t} / t; \quad (2)$$

gdzie:

T_{OT} — całkowity czas pracy;

T_{DTM} — sumaryczny czas spoczynku spowodowany działaniami utrzymania;

$T_{UT,t}$ — czas zdadności w czasie t .

Wskaźniki T1 oraz T2 pozwalają na opisanie niezawodności poszczególnych obiektów lub całego układu energetycznego. Innym wskaźnikiem technicznym używanym do opisanie niezawodności jest średni czas pomiędzy uszkodzeniami $MTBF$ (*Mean Time Between Failures*).

$$[T17] MTBF = T_{OT} / F, \quad (3)$$

gdzie:

F — liczba awarii.

KPI, za pomocą którego opisuje się nie tylko efektywność prac utrzymania, ale również podatność obiektów na odnowę/naprawę, jest średni czas naprawy $MTTR$ (*Mean Time To Repair*).

$$[T21] MTTR = T_{DTM} / F. \quad (4)$$

Jednym z najczęściej stosowanych na jednostkach pływających wskaźników organizacyjnych jest stosunek zaplanowanych zadań do wszystkich dostępnych osobogodzin.

$$[O5] O_w = WO / WF, \quad (5)$$

gdzie:

WO — suma osobogodzin działań UR zaplanowana;

WF — suma osobogodzin działań UR dostępna.

Z punktu widzenia ekonomicznego stosowany jest często wskaźnik opłacalności, mówiący o kosztach utrzymania w aspekcie ewentualnej wymiany obiektu lub układu na nowy.

$$[E1] E_l = C_M / C_{Re}, \quad (6)$$

gdzie:

C_M — całkowity koszt utrzymania;

C_{Re} — całkowity koszt wymiany.

Stosowany też bywa wskaźnik kosztów utrzymania w relacji do parametru pracy lub wydajności (np. tona wyprodukowanego produktu naftowego w przypadku jednostek FPSO).

$$[E5] C_P = C_M / P, \quad (7)$$

gdzie:

P — wydajność produkcyjna.

Mierzona jest również efektywność gospodarki magazynowej. Przykładem wskaźnika w tym obszarze może być stosunek wartości całkowitych kosztów środków eksploatacji/części zamiennych wykorzystywanych w działaniach utrzymania i wartości zapasów w danym przedziale czasu t .

$$[E12] E_{WT} = C_{Materials,t} / V_{Materials,t} \quad (8)$$

gdzie:

$C_{Materials,t}$ — całkowity koszt materiałów stosowanych w utrzymaniu ruchu w czasie t ;

$V_{Materials,t}$ — średnia wartość zmagazynowanych materiałów stosowanych w utrzymaniu ruchu w czasie t .

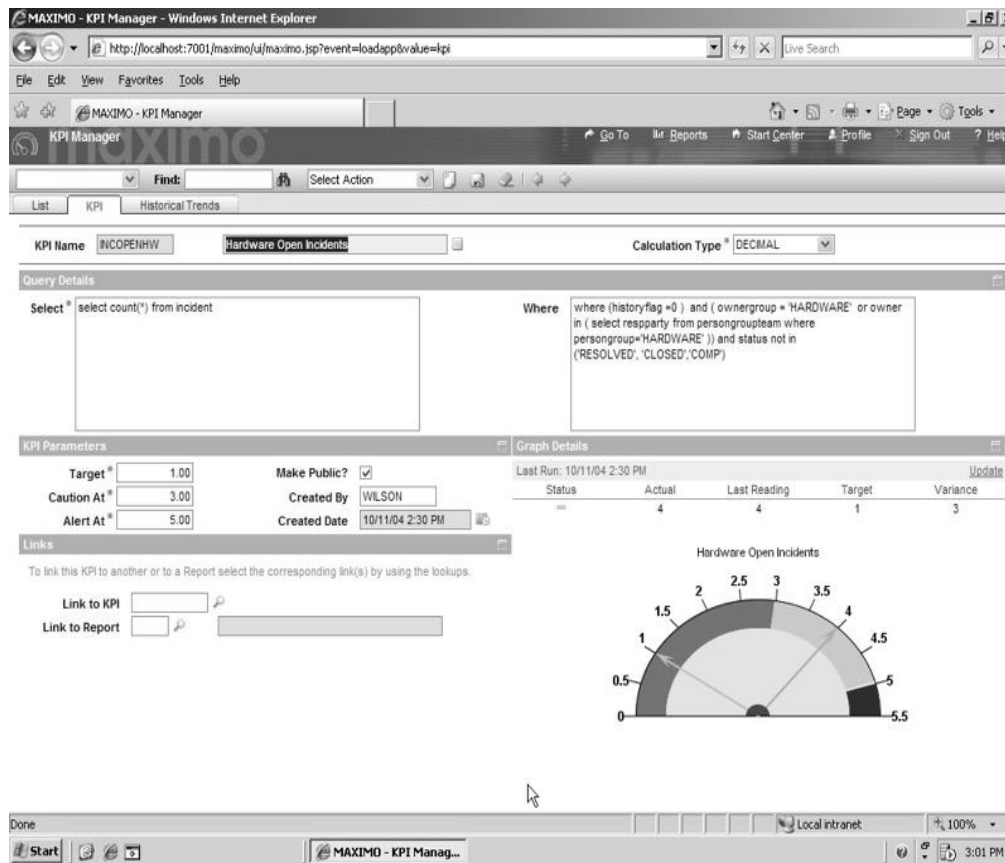
METODY DOBORU WSKAŹNIKÓW EFEKTYWNOŚCI UTRZYMANIA

Dobór kluczowych wskaźników efektywności utrzymania jest najczęściej realizowany z wykorzystaniem metody eksperckiej. Polega ona na selekcji wskaźników przez grupę specjalistów z zakresu eksploatacji. Metoda ta wywodzi się z praktyk zarządzania projektami i jest ona możliwa do wykorzystania, jeżeli spełnione są następujące warunki:

- dostępni są pracownicy, którzy znając funkcjonalność poszczególnych KPI, mogą zdecydować w plenarnej dyskusji, jakie wskaźniki w konkretnej części systemu eksploatacji będą mogły znaleźć zastosowanie;
- wśród pracowników pracujących nad doбором znajdują się osoby z różnych szczebli organizacyjnych (pracownicy techniczni, kierownicy niższego szczebla, kierownicy wyższego szczebla);
- równolegle wykorzystywane są wskaźniki efektywności w innych obszarach przedsiębiorstwa, a definicje poszczególnych składowych tych wskaźników są ujednolicone i znane grupie eksperckiej pracującej nad doбором wskaźników dla systemu eksploatacji układów energetycznych.

Metoda ekspercka znajduje szerokie zastosowanie w sterowaniu eksploatacją jednostek pływających. Taki dobór wskaźników efektywności jest jednak mocno uzależniony od doświadczenia i wiedzy członków zespołu specjalistów. Z tego względu na potrzeby ustanawiania nowych standardów dotyczących KPI w poszczególnych przedsiębiorstwach zatrudniani są często zewnątrzni konsultanci, których zadaniem jest wprowadzenie do prac zespołu wiedzy o tzw. najlepszej praktyce stosowanej w podobnych systemach eksploatacji.

Tam gdzie wykorzystywane są CMMS (*Computerized Maintenance Management System*), można skorzystać z predefiniowanych wskaźników. Do najbardziej rozbudowanych i znanych systemów tego typu należą: IBM Maximo, SAP PM, Infor EAM oraz dedykowane moduły dla Microsoft Dynamics. Na rysunku 1. przedstawiono panel tworzenia i ilustracji kluczowych wskaźników efektywności w programie IBM Maximo wersja 7.



Rys. 1. Panel tworzenia i ilustracji kluczowych wskaźników efektywności w programie IBM Maximo wersja 7

Źródło: www.maximo.pl.

W nowoczesnych systemach CMMS znajduje się wiele opcji wyboru i modyfikacji najczęściej stosowanych wskaźników. Aktualizowane dane pozwalają na zastosowanie metod analitycznych i wyznaczenie obszarów o niższej niż oczekiwana efektywności, a co za tym idzie — skierowanie tam działań doskonalących utrzymanie.

Jeżeli na potrzeby systemu eksploatacyjnego jest tworzony nowy wskaźnik efektywności, powinno się uwzględnić następujące zasady [11]:

- celowości: nie wskaźnik jest przedmiotem analizy, lecz określony obszar systemu eksploatacji, który opisywany jest za pomocą wskaźnika;

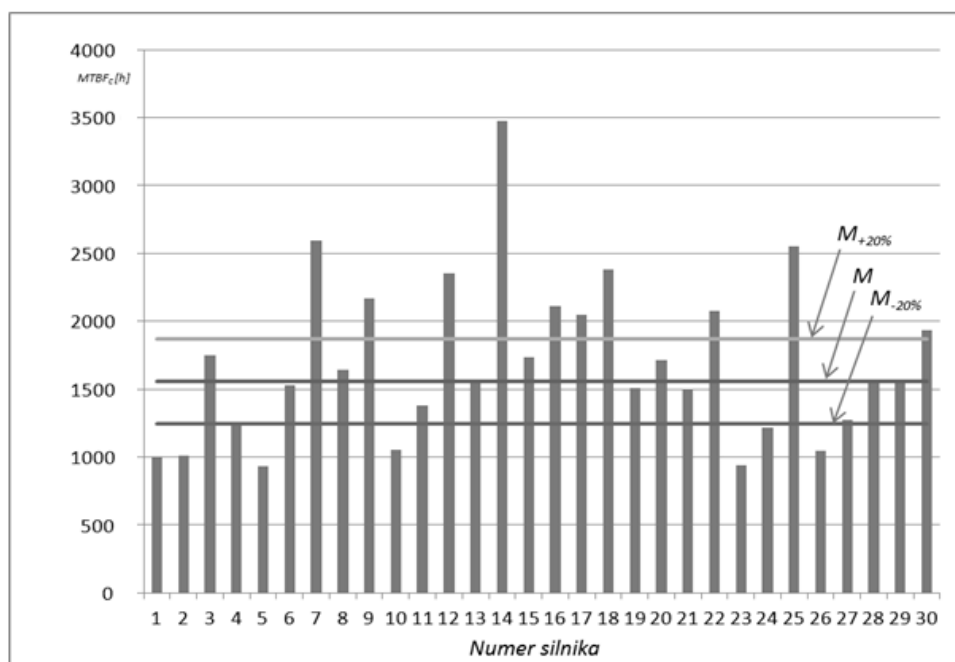
- odpowiedniości: za pomocą wskaźników należy wiązać ze sobą tylko takie wielkości, które pozostają ze sobą w logicznym związku i pozwalają na dokonanie sensownej interpretacji;
- współmierności: zapewnienie takiego sposobu wyrażania wielkości, który odpowiada faktycznym relacjom zachodzącym między nimi.

INTERPRETACJA KLUCZOWYCH WSKAŹNIKÓW EFEKTYWNOŚCI I ICH WPLYW NA DECYZJE EKSPLOATACYJNE

Właściwie dobrane i przedstawione KPI mogą nieść ze sobą dużą wartość informacyjną. Dzięki właściwej interpretacji można podejmować racjonalne decyzje eksploatacyjne związane między innymi z planowaniem remontów, zmianami organizacyjnymi, planowaniem częstotliwości zakupów i dostaw części zamiennych itp.

Na rysunku 2. przedstawiono wartości średniego czasu między uszkodzeniami krytycznymi $MTBF_C$ dla populacji 30 turbinowych silników spalinowych uzyskane drogą symulacji losowej z rozkładu normalnego przy średniej wartości $x_{sr} = 605,9$ oraz odchyleniu standardowym $S = 200$. Wartości początkowe zostały zaczerpnięte i zmodyfikowane na potrzeby symulacji z poradnika niezawodnościowego OREDA-97 [4]. Na rysunku zaznaczono również medianę M oraz wartości: mediana +20% — $M_{+20\%}$ i mediana -20% — $M_{-20\%}$. Przyjęto, że wartość $M_{-20\%}$ jest dla tej populacji silników minimalną wartością oczekiwaną. Wyznaczono w ten sposób przedział, który dla badanej grupy populacji uznaje się za zakres wartości normalnych. Na podstawie analizy wyników symulacji uzyskano zbiór silników turbinowych znajdujących się poniżej i powyżej wartości projektowych. Interpretacją tak przedstawionych danych może być stwierdzenie, że efektywność utrzymania (w ujęciu niezawodnościowym) turbinowych silników spalinowych o numerach 1, 2, 5, 10, 23, 24, 26 jest niezadowolająca (poniżej wartości oczekiwanych).

Analiza tylko wskaźnika $MTBF$ nie jest jednak wystarczająca w zakresie podejmowania istotnych decyzji organizacyjnych czy eksploatacyjnych. Na rysunku 3. zestawiono otrzymane wartości $MTBF_C$ wraz z otrzymanymi drogą podobnej symulacji wartościami średniego czasu naprawy uszkodzeń krytycznych $MTTR_C$ oraz całkowitymi rocznymi kosztami utrzymania w odniesieniu do jednostki produkowanej mocy C_P . Wyjściowe wartości dla symulacji $MTTR$ zaczerpnięto, podobnie jak dla $MTBF$, z poradnika OREDA-97, natomiast wartości ekonomiczne z danych udostępnionych przez Northeast CHM Application Center Uniwersytetu Massachusetts (USA).

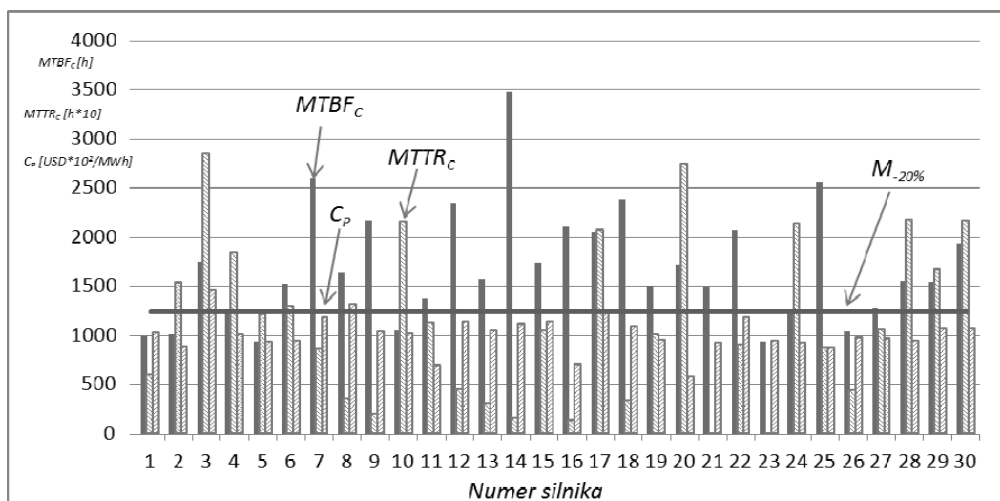


Rys. 2. Wartości wskaźnika $MTBF_C$ dla populacji 30 turbinowych silników spalinowych

Źródło: Det Norske Veritas, *Ofshore Reliability Data Handbook 3rd Edition*, OREDA Participants, Hovik 1997.

Przedstawione na rysunku 3. wartości wskaźników pozwoliły na dokonanie wstępnej oceny efektywności utrzymania. W tym przypadku szczególną uwagę zwrócono na silniki o numerach 2, 5, 10 oraz 24, których średni czas między uszkodzeniami krytycznymi wynosi mniej niż minimalna wartość oczekiwana $M_{-20\%}$ i jednocześnie średni czas naprawy uszkodzenia krytycznego oraz całkowity roczny koszt utrzymania są stosunkowo wysokie. Silniki te są utrzymywane w sposób znacznie mniej efektywny niż pozostałe z badanej populacji. W celu poprawy ich efektywności należałoby podjąć określone działania organizacyjne i eksploatacyjne. Przykładowymi działaniami tego typu mogłyby się stać:

- przegląd i modernizacja procedur obsługowych;
- szkolenie załogi obsługującej turbiny;
- wprowadzenie dodatkowych procedur z zakresu zarządzania częściami zamiennymi;
- zaplanowanie remontu głównego w systemach energetycznych, gdzie te turbiny są zainstalowane;
- wprowadzenie nadzwyczajnych procedur kontrolnych (inspekcje, diagnostyka na potrzeby utrzymywania).



Rys. 3. Wartości wskaźników $MTBF_C$, $MTTR_C$ oraz C_p dla populacji 30 turbinowych silników spalinowych

Źródło: Det Norske Veritas, *Offshore Reliability Data Handbook...*, wyd. cyt.

Wybór podejmowanych czynności doskonalenia utrzymania układów energetycznych zależy od elementów składowych tego układu oraz od możliwości inwestycyjnych przedsiębiorstwa lub instytucji odpowiadającej za eksploatację. Racjonalizacja działań utrzymania prowadzona jest zazwyczaj w oparciu o kryterium wiodące, którym może być przykładowo niezawodność lub całkowity koszt utrzymania. Szczególnie istotne jest ustalenie wartości pożądanych oraz alarmowych poszczególnych wskaźników dla całego układu oraz dla poszczególnych jego elementów. Większość z oferowanych na rynku systemów CMMS umożliwia automatyzację nadzoru wartości KPI. Powiadomianie o przekroczeniu wartości alarmowych może się odbywać drogą komunikatu w systemie, ale również drogą poczty elektronicznej do wyznaczonej osoby odpowiadającej za określoną część układu energetycznego. Automatyzacja procesu powiadomienia wiąże się zazwyczaj z włączeniem do grupy odbiorców wiadomości alarmowych biura armatorskiego jednostki pływającej.

PODSUMOWANIE

Sformułowane w artykule kluczowe wskaźniki efektywności utrzymania silników spalinowych są stosownym zbiorem wielkości wiarygodnie wartościujących ocenę i prawidłowość podejmowanych decyzji eksploatacyjnych w utrzymaniu

silników spalinowych. Teza ta dotyczy silników w układach energetycznych statków zarówno w skali technicznej, jak i pozyskiwania informacji do budowy modeli predykcyjnych, dla potrzeb między innymi logistyki armatora. Źródłami informacji przedstawianych za pomocą kluczowych wskaźników efektywności mogą być dane historyczne dotyczące częstotliwości i charakteru zdarzeń eksploatacyjnych, a także dane pozyskane drogą badań symulacyjnych adekwatnych do rozpatrywanego procesu utrzymania obiektów technicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamkiewicz A., Burnos A., *Influence of maintenance strategies on the reliability of gas turbines in power systems of floating production, storage and offloading units (FPSO)*, 28th International Scientific Conference DIAGO® 2009, 'Technical diagnostics of machines and Manufacturing equipment', Technická Univerzita Ostrava, Asociace Technických Diagnostiků, Ostrava, Rožnov pod Radhoštěm, 27–28. January 2009.
- [2] Adamkiewicz A., Burnos A., *Modele sygnałów diagnostycznych stosowane w utrzymaniu turbinowych silników spalinowych na jednostkach typu FPSO*, „Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie”, 2009, nr 19, s. 5–13.
- [3] Adamkiewicz A., Burnos A., *Utrzymanie turbinowych silników spalinowych na jednostkach typu FPSO*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2009, nr 178A, s. 9–20.
- [4] Det Norske Veritas, *Ofshore Reliability Data Handbook 3rd Edition*, OREDA Participants, Hovik 1997.
- [5] Lewitowicz J., Kustroń K., *Podstawy eksploatacji statków powietrznych — własności i właściwości eksploatacyjne statku powietrznego*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2003.
- [6] Lewitowicz J., *Podstawy eksploatacji statków powietrznych — systemy eksploatacji statków powietrznych*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2006.
- [7] Mobley K. R., Higgins L. R., Wikoff D. J., *Maintenance Engineering Handbook Seventh Edition*, The McGraw-Hill Companies, 2008.
- [8] Niziński S., *Utrzymanie pojazdów i maszyn*, „Biblioteka Problemów Eksploatacji”, red. S. Niziński, R. Michalski, Olsztyn 2007.
- [9] PN-EN 13306.
- [10] PN-EN 15341.

- [11] *Zarządzanie finansami*, red. D. Zarzecki, Publikacje Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin 2010.
- [12] www.maximo.pl.

KEY PERFORMANCE INDICATORS IN MAINTENANCE OF GAS TURBINE ENGINES IN POWER SYSTEMS OF FLOATING VESSELS

ABSTRACT

Key performance indicators (KPI) are one of basic tools used in technical objects exploitation management. Proper implementation and use of KPI make it possible to improve and control maintenance as well as operation processes of power systems. The paper presents some aspects of use of key performance indicators related to maintenance of power systems in exploitation of floating units. It includes essential measurable technical, organizational and economic values in exploitation systems which can influence decisions related to maintaining floating objects in proper conditions according to the criteria measured. The authors review the KPI selection methods and try to interpret examples of the values. It also refers to the use of KPIs in computerized maintenance management systems (CMMS) as well as to the use of these systems to control maintenance of power systems.

Keywords:

key performance indicators, KPI, power system, floating vessel, gas turbine engine.