

Problemy oszacowania trwałości i niezawodności silników o zapłonie samoczynnym z zastosowaniem teorii procesów semimarkowskich i diagnostyki

Streszczenie: W artykule przedstawiono znaczenie trwałości i niezawodności silników o zapłonie samoczynnym w eksploatacji systemów technicznych, w których są zastosowane. Wykazano, że do oszacowania trwałości i niezawodności wspomnianych silników bardziej przydatne są modele opracowane w formie semimarkowskiego procesu zmian stanów technicznych tego rodzaju silników w porównaniu do modeli proponowanych w klasycznej teorii niezawodności. Scharakteryzowano możliwości zastosowania modeli semimarkowskich do badań trwałości i niezawodności tych silników. Uzasadniono konieczność zastosowania diagnostyki technicznej w tego rodzaju badaniach. Przedstawiono przyczyny powodujące niepewność sformułowania właściwej diagnozy ze szczególnym uwzględnieniem czynników wpływających na błędy pomiarów, ale przede wszystkim na niedokładność pomiarów wykonywanych podczas badań diagnostycznych. W podsumowaniu tego artykułu zwrócono uwagę na te walory, które (zdaniem autora) mają najistotniejsze znaczenie w fazie projektowania i eksploatacji silników o zapłonie samoczynnym, szczególnie stosowanych w silowniach okrętowych jako silniki napędu głównego statku (silniki główne).

Słowa kluczowe: diagnostyka, niezawodność, proces semimarkowski, silnik o zapłonie samoczynnym, trwałość

1. Wstęp

W fazie eksploatacji silników o zapłonie samoczynnym, podobnie jak w przypadku innych maszyn cieplnych, istotna jest znajomość ich trwałości i niezawodności w czasie wykonywania przez nie zadań, do których zostały przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania. Uwzględniając definicje trwałości i niezawodności urządzeń podane w wielu publikacjach [2, 7, 9, 11, 12, 20], można w odniesieniu do tłokowych silników spalinowych podobnie zdefiniować ich trwałość i niezawodność zarówno w ujęciu opisowym jak też normatywnym. W ujęciu opisowym trwałość można interpretować jako zdatność silników do przetwarzania energii w całym zakresie obciążeń, do których zostały przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania. W przypadku okrętowych silników głównych ich trwałość może być rozumiana jako zdatność do obciążenia w całym polu osiągow [3, 4, 15, 16, 18]. Natomiast w sensie normatywnym trwałości tych silników można określić jako czas poprawnego przetwarzania przez nie energii (czas poprawnego ich działania) w całym polu osiągow. Z kolei niezawodność może być interpretowana w sensie opisowym jako zdatność silników do przetwarzania energii w całym zakresie obciążeń w określonym czasie. W przypadku okrętowych silników głównych ich niezawodność może być rozumiana jako zdatność do obciążenia w całym polu osiągow [2, 3] w określonym czasie. Natomiast w sensie normatywnym niezawodność tych silników można określić jako prawdopodobieństwo poprawnego przetwarzania

przez nie energii w całym polu osiągow, w określonym czasie i w ustalonych warunkach jego eksploatacji.

Z zaproponowanej interpretacji pojęć trwałości i niezawodności tłokowych silników spalinowych, w szczególności okrętowych silników głównych wynika, że zarówno trwałość jak i niezawodność tego rodzaju silników jest zachowana wtedy, gdy silniki te mogą być obciążone w całym zakresie obciążeń, do których zostały przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania. Nawiązując do prac [3, 4], można stwierdzić, że oznacza to, iż zarówno trwałość jak i niezawodność tego rodzaju silników wymaga utrzymania ich stanu pełnej zdatności (s_1). W przypadku, gdy silnik ze względu na jego stan techniczny nie może być obciążony w całym zakresie, a jedynie w obszarze ograniczonych charakterystyką zewnętrzną mocy znamionowej [15, 16, 18], to należy uznać, że znajduje się on w stanie częściowej zdatności (s_2). Natomiast, gdy silnik z powodu znacznego zużycia może być obciążony jedynie w zakresie ograniczonym charakterystyką zewnętrzną mocy eksploatacyjnej trwałej [15, 16, 18], należy przyjąć, że jego stan techniczny nie odpowiada wymaganiom eksploatacyjnych i należy go uznać za stan niezdatności (s_3).

Wymienione stany i przedziały czasu ich trwania można ujawnić stosując odpowiednie systemy diagnozujące (SDG), np. w przypadku silników okrętowych takie jak: CoCoS (Computer Controlled Surveillance System) firmy MAN, bądź CBM (Condition-Based Maintenance) firmy Wartsila [21, 22, 23]. Uzyskane w wyniku zastosowania diagnostyki technicznej informacje o czasie trwania

stanu s_1 oraz chwili jego utracenia jak również o chwilach pojawiania się stanów s_2 i s_3 oraz czasie ich trwania, umożliwiając zastosowanie teorii procesów semimarkowskich do określenia trwałości i niezawodności silników o zapłonie samoczynnym [1, 5, 6]. Istotne znaczenie ma tu zastosowanie diagnostyki technicznej do identyfikacji stanu technicznego tego rodzaju silników [5, 16, 19].

2. Znaczenie diagnostyki technicznej w badaniach trwałości i niezawodności silników

W diagnostyce tłokowych silników spalinowych stosowane są parametry (wskaźniki) roboczych procesów wyjściowych, generowanych podczas działania tych silników [5, 15, 16, 18, 19, 23]. Do najczęściej stosowanych tego rodzaju wskaźników należą: moc użyteczna, (N_e), średni moment obrotowy (M_e), maksymalne ciśnienie spalania (p_{max}), średnie ciśnienie indykowane (p_i), jednostkowe zużycie paliwa (g_e), temperatura spalania paliwa w cylindrach, temperatura wody chłodzącej cylinder (na dolocie t_{wd} i wylocie t_{ww} z silnika), temperatura powietrza doładowania (t_d) za każdą chłodnicą, temperatura oleju (na dolocie t_{od} i wylocie t_{ow} z silnika), ale są też rejestrowane inne parametry diagnostyczne jak: temperatura ścianki tulei cylindrowej (t_c), położenie wskaźnika obciążenia (WO) silnika, ciśnienie w skrzyni korbowej (p_{sk}), ciśnienie sprężania (p_{spr}), a oprócz ciśnienia sprężania określa się też ciśnienie ekspansji dla kąta 36° po GMP , prędkość obrotową (n) silnika (jego wału korbowego) i inne. Te parametry diagnostyczne spełniają najważniejsze kryteria przydatności diagnostycznej jak: jednoznaczność odwzorowania stanu technicznego, dostateczność zakresu zmian wartości jako funkcji stanu technicznego i łatwość określania. Ponadto cechuje je to, że ich wartości zmieniają się wraz z pogarszaniem stanu technicznego silników [16, 23]. Jednak wartości tych parametrów zależą także od dokładności przyrządów pomiarowych i ich stanu technicznego oraz oddziałujących na nie zakłóceń wynikających z ze zmieniających się w czasie warunków eksploatacji wspomnianych silników. Zatem w diagnostyce silników tych należy uwzględnić, że [7, 15, 19, 23]:

- w eksploatacji okrętowych silników istnieje stopień niepewności wyników badań związany ze wszystkimi badanymi zjawiskami i zdarzeniami,
- nie można dokładnie przewidzieć zmian walorów techniczno-energetycznych silników w czasie,
- są zmiany stanu okrętowych silników (jako systemów diagnozowanych) podczas pomiaru i błędy zastosowanych metod pomiarowych oraz urządzeń pomiarowych.

- wartość prawdziwa parametru (jego wartość poprawna) jest pojęciem abstrakcyjnym,
- konieczne jest założenie, że wartość średnia arytmetyczna uzyskana z pomiarów jest inna niż wartość prawdziwa parametru (mierzonej wielkości fizycznej),
- nie można oczekiwać takich samych wyników pomiarów, lecz można spodziewać się tej samej częstości uzyskania danego wyniku.

Z rozważań wynika, że w badaniach diagnostycznych silników powstaje niepewność wyników uzyskanych podczas wykonywania pomiarów. Zachodzi więc konieczność ustalenia przyczyn niepewności tych wyników. Do najistotniejszych przyczyn niepewności wyników badań można m.in. zaliczyć [7, 14, 19]:

- kwantowość zmian własności każdego z silników (energii, zużycia),
- kwantowy objaw zmian wielkości fizycznych charakteryzujących przepływ ciepła, promieniowania energii w postaci strumienia cząstek lub fal elektromagnetycznych,
- w metrologii zamiast pojęcia „chwila” wprowadzono pojęcie „kwantu czasu”,
- sygnał cyfrowy jest wielkością skwantowaną i próbkowaną, obarczoną błędami: kwantowania, apertury oraz błędem chwili próbkowania,
- zbiór generowanych napięć przez przetwornik analogowo-cyfrowy jest dyskretny, kolejne wartości napięcia różnią się o kwant „ q ”,
- stosowane są programy generowania napięcia wzorcowego (U_w) nazywane „programami kwant po kwancie”, które generują w kolejnych krokach „ i ” napięcie $U_w = i \cdot q$, q – wartość kwantu napięcia,
- częstość jest z natury kwantowana w czasie,
- kwantowa jest istota pomiaru $a \leq w \leq b \rightarrow b - a = 2\varepsilon$,
- zmienne są warunki wykonywania pomiarów, które powodują zmienność wartości wielkości mierzonych,
- wielkości mierzone są zmiennymi losowymi,
- rejestracja wartości chwilowych jest procesem stochastycznym,
- niejednoznaczna przyczynowość implikuje determinizm wieloznaczny, czyli determinizm wynikający z probabilistycznych praw mechaniki kwantowej.

Z rozważań wynika, że zmiany stanu zarówno technicznego jak też energetycznego okrętowych urządzeń energetycznych będą miały charakter

kwantowy. Zmiany te rozpatrywane w czasie działania tych urządzeń będą stanowiły realizacje, które można rozpatrywać jako procesy stochastyczne dyskretne w stanach i ciągle w czasie.

Na pogorszenie stanu technicznego silników wpływają głównie warunki, w których są eksploatowane. W przypadku silników głównych są one kształtowane przez warunki zewnętrzne ruchu statku morskiego i zadania podjęte przez użytkowników tych silników [16, 23]. Warunki te mogą ulegać zmianie w zakresie od najkorzystniejszych do najtrudniejszych [13, 15]. W tej sytuacji eksploatacyjnej zastosowanie diagnostyki technicznej i wynikających z niej systemów diagnozujących (SDG) do identyfikacji stanu technicznego silników jako systemów diagnozowanych (SDN) oraz rejestrowania chwil pojawiania się tych stanów i przedziałów czasu ich trwania powinno doprowadzić do rozróżniania przynajmniej stanów tworzących zbiór:

$$S = \{s_1, s_2, s_3\}$$

o interpretacji:

- s_1 – stan pełnej zdadności silnika, który istnieje wtedy, gdy silnik można obciążyć w całym zakresie, do którego został przystosowany w fazie projektowania i wytwarzania,
- s_2 – stan częściowej zdadności silnika, który pojawia się z chwilą i istnieje wtedy, gdy silnika nie można obciążyć w całym polu osiągow silnika, ale można go obciążyć w obszarze nie mniejszym od obszaru ograniczonego charakterystyką zewnętrzną mocy trwałej, ale bez możliwości obciążenia w obszarze przeciążenia prędkością obrotową,
- s_3 – stan niezdadności silnika, który pojawia się z chwilą i istnieje wtedy, gdy silnik można obciążyć w obszarze jedynie poniżej charakterystyki zewnętrznej mocy trwałej, ale także bez możliwości obciążenia w obszarze przeciążenia prędkością obrotową.

Dodatkowa rejestracja chwil τ_j ($j = 1, 2, \dots, n$) pojawiania się stanów s_i ($i = 1, 2, 3$) oraz czasu ich trwania t_j ($j = 1, 2, \dots, n$) umożliwia zastosowanie teorii procesów semimarkowskich do opracowania semimarkowskiego modelu procesu zmian stanów $s_i \in S$ ($i = 1, 2, 3$). Model taki jest niezbędny do określenia trwałości i niezawodności wspomnianych silników.

3. Semimarkowski model zmian stanów technicznych silników o zapłonie samoczynnym

Semimarkowski model zmian stanów technicznych silników o zapłonie samoczynnym umożliwia

określenie zarówno niezawodności jak i trwałości tego rodzaju silników. Do opisu niezawodnościowego każdego silnika o zapłonie samoczynnym przydatna jest struktura niezawodnościowa szeregowo. Wynika to z tego, że silnik taki jest w stanie pełnej zdadności (s_1) wtedy i tylko wtedy, gdy wszystkie jego układy funkcjonalne są w stanie pełnej zdadności (s_{1k} , $k = 1, 2, \dots, 9$). Struktura taka jest rezultatem struktury funkcjonalnej tego silnika, której naruszenie wskutek zużycia powoduje powstanie jego stanu częściowej zdadności (s_2) bądź niezdadności (s_3). Schemat struktury niezawodnościowej silnika z uwzględnieniem niezawodności jego układów został przedstawiony na rys. 1. [20].



Rys. 1. Struktura niezawodnościowa silnika, w którym można wyróżnić takie elementy niezawodnościowe jak: 1 – kadłub z cylindrami, 2 – układ korbowo-tłokowy, 3 – układ wymiany czynnika roboczego, 4 – układ zasilania paliwem, 5 – układ smarowania, 6 – układ chłodzenia, 7 – układ rozruchowy (rozruchowo-nawrotny), 8 – układ sterowania i regulacji prędkości obrotowej, 9 – układ diagnozujący

Wobec tego funkcja niezawodności silnika, wynikająca z klasycznej teorii niezawodności, jest następująca [9, 20]:

$$R(t) = P\{T \geq t\} = \prod_{k=1}^9 R_k(t) \quad (1)$$

przy czym:

t – czas, T – czas poprawnego działania (poprawnej pracy) silnika i tym samym jego układów funkcjonalnych, k – numer przyporządkowany danemu układowi funkcjonalnemu silnika.

Aby wyznaczyć $R_k(t)$, czyli niezawodność i -tego układu funkcjonalnego silnika, trzeba znać rozkłady czasu poprawnej pracy poszczególnych urządzeń tego zespołu $F_k(t)$ lub ich funkcje ryzyka powstania uszkodzenia $\lambda_k(t)$ [9, 10, 11, 20]. Jednak takie podejście do określenia niezawodności silnika jest uzasadnione wtedy, gdy można przyjąć założenia:

- zmienne losowe T_k ($k = 1, 2, \dots, 9$), którymi są przedziały czasu poprawnej pracy układów jako elementów niezawodnościowych silnika o dystrybuantach $F_k(t)$, są wzajemnie niezależne,
- w czasie postoju użytkowego, żaden z układów silnika nie ulega uszkodzeniom,
- w czasie obsługi zarówno profilaktycznej jak również wymuszonej uszkodzeniem, wykonywanej w celu odnowy tego silnika spalinowego, układy znajdujące się w stanie zdadności nie ulegają uszkodzeniom,

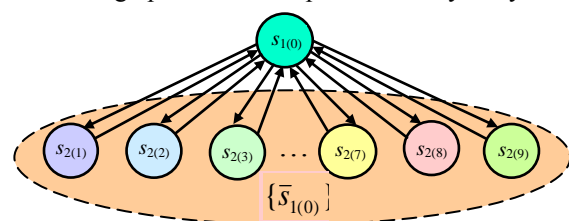
- uszkodzone zespoły funkcjonalne (elementy niezawodnościowe) silnika nie są naprawiane, lecz wymieniane na nowe.

W praktyce, uszkodzone układy są odnawiane, w przypadku każdego silnika (jeśli jest to opłacalne) poprzez wykonanie odpowiedniej obsługi technicznej. Oznacza to, że ostatnie założenie jest na ogół niesłuszne. Natomiast trzy pierwsze założenia mogą być, przy odpowiednim zastosowaniu diagnostyki, uznane za uzasadnione.

Zastosowanie semimarkowskiego modelu procesu zmian stanów wspomnianego silnika umożliwia uwzględnienie obsług profilaktycznych potrzebnych do jego odnowy, która następuje z chwilą przywrócenia stanu s_1 poszczególnym układom funkcjonalnym oraz rozpatrywanie więcej niż dwóch stanów niezawodnościowych silnika, jak też jego układów funkcjonalnych. W trójstanowym modelu niezawodnościowym silnika można wyróżnić [1, 5, 6], jak już wspomniano stany: pełnej (całkowitej) zdatności, częściowej (niepełnej, niecałkowitej, ograniczonej) zdatności i niezdatności. Silnik jest w stanie częściowej zdatności (s_2), gdy dowolny z jego układów k ($k = 1, 2, \dots, 9$) znajduje się w stanie częściowej zdatności (s_{2k}). Dla potrzeb określenia niezawodności silnika, semimarkowski model procesu zmian jego stanów technicznych (jako niezawodnościowych) może być także rozpatrywany jako proces semimarkowski $\{W(t): t \geq 0\}$ o zbiorze stanów $S^* = \{s_{1(0)}, s_{2(k)}\}; k = 1, 2, \dots, 9$ ($S^* \subset S$). Interpretacja stanów $s_{1(0)}$ i $s_{2(k)} \in S^* (k = 1, 2, \dots, 9; \text{ a więc } i = 0, k)$ jest następująca: $s_{1(0)} \equiv s_1$ – stan pełnej zdatności silnika, $s_{2(1)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia kadłuba z cylindrami, $s_{2(2)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu korbowo-tłokowego, $s_{2(3)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu wymiany czynnika roboczego, $s_{2(4)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu zasilania paliwem, $s_{2(5)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu smarowania, $s_{2(6)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu chłodzenia, $s_{2(7)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu rozruchowego (bądź rozruchowo-nawrotnego), $s_{2(8)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu sterowania i regulacji prędkości obrotowej, $s_{2(9)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu diagnostującego (SDG). Zmiany wymienionych stanów $s_{w(i)}$ ($i = 0, 1, 2, \dots, 9; w = 1, 2$) następują w kolejnych chwilach t_n ($n \in N$), przy czym w chwili $t_0 = 0$ silnik znajduje się w stanie $s_{1(0)}$. Stan $s_{1(0)}$ trwa do chwili uszkodzenia się, któregośkolwiek układu funkcjonalnego silnika. Natomiast stany $s_{2(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, 9$) trwają tak długo dopóki uszkodzony układ funkcjonalny silnika nie zostanie odnowiony.

Stan $s_{1(0)}$ istnieje wtedy, gdy wszystkie jego układy funkcjonalne są nowe, bądź tak niewiele zużyte, że możliwe jest obciążenie silnika w całym zakresie, do którego został on przysposobiony w fazie projektowania i wytwarzania. Natomiast stany $s_{2(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, 9$) zachodzą wtedy, gdy wspomniane układy funkcjonalne silnika są w takim stanie, że silnik nie może być użytkowany w całym zakresie obciążeń zgodnie z przeznaczeniem według zasad racjonalnej jego eksploatacji [5, 16]. Takie stany są ujawniane przez odpowiednie systemy (układy) diagnozujące (SDG) w okresie między kolejnymi obsługami profilaktycznymi silnika. Taka możliwość istnieje, jeżeli SDG są przysposobione do identyfikacji stanu technicznego poszczególnych układów silnika, a więc ich podzespołów i elementów. W przypadku, gdy wspomniane systemy SDG nie są odpowiednio przysposobione do identyfikacji stanu technicznego wspomnianych układów, bądź zostały uszkodzone, nie rozpoznają odpowiednio wcześniej nadmiernego zużycia tych układów silnika. To zaś prowadzi do jego uszkodzeń podczas wykonywania zadań przez użytkownika. Uwzględnienie tej sytuacji w fazie eksploatacji silników wymaga probabilistycznego opisu procesu zmian stanów tych silników z uwzględnieniem prawdopodobieństw pojawiania się możliwych do zajęcia wspomnianych stanów $s_{(i)}$ ($i = 0, 1, 2, 3, \dots, 9$) w poszczególnych chwilach $t_0, t_1, \dots, t_{n-1}, t_n$ czasu eksploatacji silnika.

Można przyjąć, że stan silnika w chwili t_{n+1} oraz przedział czasu trwania stanu osiągniętego w chwili t_n nie zależy od stanów, które zaszły w chwilach t_0, t_1, \dots, t_{n-1} oraz przedziałów czasu ich trwania. Zatem proces $\{W(t): t \geq 0\}$ jest procesem semi-Markowa [1, 2, 5, 6, 7, 8, 11, 14]. Graf zmian stanów tego procesu został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Graf zmian stanów procesu $\{W(t): t \geq 0\}$: $s_{1(0)}$ – stan zdatności silnika, $\{S_{1(0)}\}$ – zbiór stanów częściowej zdatności silnika:
 $\{S_{1(0)}\} = \{s_{2(1)}, s_{2(2)}, s_{2(3)}, \dots, s_{2(9)}\}, s_{2(i)} \in S^* (i = 1, 2, \dots, 9)$ – stany o następującej interpretacji: $s_{2(1)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia kadłuba z cylindrami, $s_{2(2)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu korbowo-tłokowego, $s_{2(3)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu wymiany czynnika roboczego, $s_{2(4)}$ – stan częściowej zdatności silnika z powodu uszkodzenia układu zasilania paliwem, $s_{2(5)}$ – stan częściowej zdatności silnika z

powodu uszkodzenia układu smarowania, $s_{2(6)}$ – stan częściowej zdadności silnika z powodu uszkodzenia układu chłodzenia, $s_{2(7)}$ – stan częściowej zdadności silnika z powodu uszkodzenia układu rozruchowego (rozruchowo-nawrotnego), $s_{2(8)}$ – stan częściowej zdadności silnika z powodu uszkodzenia układu sterowania i regulacji prędkości obrotowej, $s_{2(9)}$ – stan częściowej zdadności silnika z powodu uszkodzenia układu (systemu) diagnostycznego.

Rozkład początkowy tego procesu jest następujący:

$$P\{W(0) = s_i\} = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = 0 \\ 0 & \text{dla } i = 1, 2, \dots, 9 \end{cases} \quad (2)$$

natomiast macierz funkcyjna ma postać:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{(01)}(t) & Q_{(02)}(t) & Q_{(03)}(t) & Q_{(04)}(t) & Q_{(05)}(t) & Q_{(06)}(t) & Q_{(07)}(t) & Q_{(08)}(t) & Q_{(09)}(t) \\ Q_{(10)}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{(20)}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{(30)}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{(40)}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{(50)}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{(60)}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{(70)}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{(80)}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{(90)}(t) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Macierz funkcyjna $Q(t)$ stanowi model zmian stanów niezawodnościowych silnika. Niezerowe elementy $Q_{(ij)}(t)$ macierzy $Q(t)$ zależą od rozkładów zmiennych losowych. Tymi zmiennymi są przedziały czasu przebywania procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ w stanach $s_{(i)} \in S^*(i = 0, 1, \dots, 9)$. Elementy macierzy funkcyjnej $Q(t)$, są prawdopodobieństwami przejścia wspomnianego procesu ze stanu $s_{(i)}$ do stanu $s_{(j)}$ ($s_{(i)}, s_{(j)} \in S^*$) w czasie nie większym niż t , określonymi następująco [9, 10]:

$$Q_{(ij)}(t) = P\{W(\tau_{n+1}) = s_{(j)}, \tau_{n+1} - \tau_n < t | W(\tau_n) = s_{(i)}\} = p_{(ij)} F_{(ij)}(t) \quad (4)$$

gdzie:

$p_{(ij)}$ – prawdopodobieństwo przejścia w jednym kroku jednorodnego łańcucha Markowa,

$$p_{(ij)} = P\{(\tau_{n+1}) = s_{(j)} | Y(\tau_n) = s_{(i)}\} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{(ij)}(t); i, j = 0, 1, 2, \dots, 9; i \neq j,$$

$F_{(ij)}(t)$ - dystrybuanta zmiennej losowej $T_{(ij)}$ oznaczającej czas trwania stanu $s_{(i)}$ procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ pod warunkiem, że następnym stanem tego procesu będzie stan $s_{(j)}$.

Macierz P prawdopodobieństw przejścia włożonego łańcucha Markowa w ten proces, jak wynika z macierzy funkcyjnej $Q(t)$ (3), składa się z wyrazów, którymi są [1, 3, 4]: $Q_{(i0)}(t) = p_{(i0)} = 1 (i = 1, 2, \dots, 9)$ oraz $Q_{(0j)}(t) = p_{(0j)}$, ze względu na to, że macierz $Q(t)$ jest macierzą stochastyczną.

Proces $\{W(t): t \geq 0\}$ jest nieprzywiedlny [1, 3, 4], a zmienne losowe $T_{(ij)}$ mają skończone, dodatnie wartości oczekiwane. Wobec tego jego rozkład graniczny [9, 10]

$$P_{(j)} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{(ij)}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t) = s_{(j)}\}, s_{(j)} \in S^*(j = 0, 1, \dots, 9) \quad (5)$$

ma następującą postać:

$$P_{(j)} = \frac{\pi_{(j)} E(T_{(j)})}{\sum_{l=0}^9 \pi_{(l)} E(T_{(l)})} \quad (6)$$

Prawdopodobieństwa $\pi_{(j)} (j = 0, 1, 2, \dots, 9)$ we wzorze (6) są granicznymi prawdopodobieństwami włożonego łańcucha Markowa w proces $\{W(t): t \geq 0\}$. Natomiast $E(T_{(j)})$ i $E(T_{(i)})$ są wartościami oczekiwanymi zmiennych losowych odpowiednio $T_{(j)}$ i $T_{(i)}$, które oznaczają czas przebywania silnika w stanie odpowiednio $s_{(j)}$ i $s_{(i)}$ niezależnie od tego, jaki będzie jego stan później. Wyznaczenie rozkładu granicznego (6) wymaga rozwiązania układu równań, które zawierają wspomniane graniczne prawdopodobieństwa $\pi_{(j)} (j = 0, 1, \dots, 9)$ włożonego łańcucha Markowa oraz macierz P prawdopodobieństw przejścia ze stanu $s_{(i)}$ do stanu $s_{(j)}$. Układ taki jest układem o następującej postaci:

$$\left. \begin{aligned} [\pi_{(0)}, \pi_{(1)}, \pi_{(2)}, \pi_{(3)}, \pi_{(4)}, \pi_{(5)}, \pi_{(6)}, \pi_{(7)}, \pi_{(8)}, \pi_{(9)}] = \\ [\pi_{(0)}, \pi_{(1)}, \pi_{(2)}, \pi_{(3)}, \pi_{(4)}, \pi_{(5)}, \pi_{(6)}, \pi_{(7)}, \pi_{(8)}, \pi_{(9)}] \cdot P \\ \sum_{l=0}^9 \pi_{(l)} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

W wyniku rozwiązania układu równań (7) można korzystając ze wzoru (6) uzyskać następujące zależności:

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \frac{E(T_0)}{E(T_0) + \sum_{l=0}^9 p_{(0l)} E(T_l)} \\ P_1 &= \frac{p_{(01)} E(T_1)}{E(T_0) + \sum_{l=0}^9 p_{(0k)} E(T_l)} \\ P_2 &= \frac{p_{(02)} E(T_2)}{E(T_0) + \sum_{l=0}^9 p_{(0l)} E(T_l)} \\ P_3 &= \frac{p_{(03)} E(T_3)}{E(T_0) + \sum_{l=0}^9 p_{(0l)} E(T_l)} \\ P_8 &= \frac{p_{08} E(T_8)}{E(T_0) + \sum_{l=0}^9 p_{(0l)} E(T_l)} \\ P_9 &= \frac{p_{09} E(T_9)}{E(T_0) + \sum_{l=0}^9 p_{(0k)} E(T_l)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Prawdopodobieństwo P_0 jest prawdopodobieństwem granicznym, że w dłuższym przedziale czasu (okresie) eksploatacji (teoretycznie przy $t \rightarrow \infty$) silnik przebywa w stanie $s_{1(0)}$. Zatem prawdopodobieństwo to określa niezawodność silnika w tak długim okresie. Natomiast prawdopodobieństwa $P_{(j)}$ ($j = 1, 2, \dots, 9$) są prawdopodobieństwami granicznymi istnienia stanów $s_{(j)} \in S^*$ wspomnianego silnika przy $t \rightarrow \infty$, a więc prawdopodobieństwami znajdowania się jego zespołów funkcjonalnych (tym samym silnika z uwagi na jego szeregową strukturę niezawodnościową) w stanach częściowej zdadności.

Uzyskanie wartości prawdopodobieństw $P_{(j)}$ ($j = 1, 2, \dots, 9$) wymaga oszacowania $p_{(ij)}$ oraz $E(T_{(j)})$, co jest kosztowne i pracochłonne [1, 5, 6, 9, 10].

Uzyskanie niezbędnych informacji do oszacowania wspomnianych prawdopodobieństw i wartości oczekiwanych wymaga zastosowania odpowiednich do tego systemów diagnozujących (SDG) silników [6, 21, 22, 23]. Silniki są w tym przypadku systemami diagnozowanymi (SDN) [6, 23].

Przedstawiony opis niezawodnościowy dowolnego silnika o zapłonie samoczynnym można oczywiście rozwinąć, uwzględniając stan s_3 tego silnika. Ponadto można zastosować ten model do określenia niezawodności poszczególnych układów silnika, jeżeli zostanie w nich wyodrębnionych 9 podzespołów. Przykładowo, w przypadku układu zasilania silnika paliwem ciężkim można wyróżnić następujące podzespoły: 1 – wtryskiwacz, 2 – przewody wysokiego ciśnienia, 3 – pompa wtryskowa, 4 – przewody niskiego ciśnienia, 5 – filtr dokładnego oczyszczania, 6 – filtr zgrubnego oczyszczania, 7 – pompa podająca paliwo, 8 – podgrzewacz paliwa, 9 – wiskozystat z wiskozymetrem.

Zaproponowany proces zmian stanów technicznych (jako niezawodnościowych) umożliwia także określenie trwałości silnika. Za trwałość silnika można przyjąć tak zwany czas pierwszego przejścia procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ do podzbioru stanów $\{\bar{s}_{1(0)}\} = \{s_{2(1)}, s_{2(2)}, s_{2(3)}, \dots, s_{2(9)}\}$. Czas ten jest zmienna losową $\Theta_{12} = \Theta_{s_{1(0)}\{\bar{s}_{1(0)}\}}$;

$s_{1(0)}, \bar{s}_{1(0)} \in S$. Realizacji tej zmiennej może być wiele podczas badań trwałości silników. Wobec tego można otrzymać z wyników tych badań trwałość silnika, którą jest wartość oczekiwana $E(\Theta_{12})$, czasu pierwszego przejścia procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ ze stanu do podzbioru stanów $\{\bar{s}_{1(0)}\} = \{s_{2(1)}, s_{2(2)}, s_{2(3)}, \dots, s_{2(9)}\}$ [9].

4. Uwagi końcowe i wnioski

Procesy semi-Markowa są często i coraz częściej stosowane przy rozwiązywaniu różnych problemów, dotyczących niezawodności, obsługi masowej oraz diagnostyki urządzeń, np. silników o zapłonie samoczynnym i innych silników spalinowych.

Zastosowanie tych procesów w praktyce wymaga spełnienia dwóch następujących warunków:

- zgromadzenia odpowiednich statystyk matematycznych.
- opracowania semimarkowskiego modelu zmian stanów niezawodnościowych silnika o niewielkiej liczbie jego stanów i nieskomplikowanej przy tym (w sensie matematycznym) macierzy funkcyjnej $Q(t)$.

Zastosowanie procesu semimarkowskiego (semi-Markowa) jako modelu zmian wymienionych stanów niezawodnościowych silnika w określonym czasie, zamiast procesu Markowa wynika stąd, iż należy się spodziewać, że zmienna losowa $T_{(ij)}$ oznaczająca czas trwania stanu $s_{(i)}$ pod warunkiem, że następnym stanem będzie stan s_j oraz zmienna losowa T_i oznaczająca czas trwania stanu $s_{(i)}$ ($i = 0, 1, 2, 3, \dots, 9$) silnika niezależnie od tego, jaki będzie jego stan następny, mają rozkłady dowolne skoncentrowane w zbiorze $R^+ = [0, +\infty)$. Zastosowanie procesu Markowa w tym przypadku byłoby uzasadnione wtedy, gdyby można było przyjąć, że zmienne losowe $T_{(ij)}$ oraz $T_{(i)}$ mają rozkłady wykładnicze.

Przedstawiony model może mieć istotne znaczenie praktyczne ze względu na łatwość określania estymatorów prawdopodobieństw przejścia $p_{(ij)}$ będących elementami macierzy P (11) oraz łatwość oszacowywania wartości oczekiwanych $E(T_{(j)})$. Należy przy tym uwzględnić fakt, że estymacja punktowa wartości oczekiwanej $E(T_{(j)})$ nie umożliwia określenia dokładności jej oszacowania. Dokładność taką umożliwia estymacja przedziałowa, w której wyznaczany jest przedział ufności $[t_{d(j)}, t_{g(j)}]$ o losowych końcach, który z określonym prawdopodobieństwem (poziomem ufności) β zawiera nieznaną wartość oczekiwaną $E(T_{(j)})$.

Skróty i oznaczenia

SD – system diagnostyczny, SDN – system diagnozowany,

SDG- system diagnozujący, 2ε - próg czułości urządzenia pomiarowego

Literatura

- [1] Girtler J.: Możliwości zastosowania i przydatność procesów semimarkowskich jako modeli procesów eksploatacji maszyn. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, Warszawa 1996, z.3(107) s. 419-428.
- [2] Girtler J.: Reliability model of two-shaft turbine combustion engine with heat regenerator. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 132, No. 4, 2006, pp.15-22.
- [3] Girtler J.: Possibility of defining theoretical operation for diesel engines in energy terms. *Combustion Engines (Silniki Spalinowe)*, nr 3, 2011, s. 1-9[pdf].
- [4] Girtler J.: A method for evaluating the performance of a marine piston internal combustion engine used as the main engine on a ship during its voyage in different sailing conditions. *Polish Maritime Research*, Vol. 17 No. 4, 2010, s. 31-38
- [5] Girtler J.: Diagnostyka jako warunek sterowania eksploatacją okrętowych silników spalinowych. *Studia Nr 28, WSM, Szczeci* 1997.
- [6] Girtler J.: Physical aspects of application and usefulness of semi-Markov processes for modeling the processes occurring in operational phase of technical objects. *Polish Maritime Research*, Vol. 11, No 3, 2004, s. s. 25-30.
- [7] Girtler J.: Quantum issues in diagnostics of marine energy machines and devices. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin.* – No 30(102).
- [8] Girtler J.: Aspekty kwantowej diagnostyki maszyn. XXXIX Sympozjum Diagnostyki Maszyn. *Wisła*, 04÷10.03. 2012, Materiały wydane w formie streszczeń referatów i na CD, 23 s. Wyd. Wydział Transportu Politechniki Śląskiej, Katowice 2012
- [9] Grabski F.: Semi-markowskie modele niezawodności i eksploatacji. PAN IBS, Seria: *Badania Systemowe t. 30*, Warszawa 2002.
- [10] Grabski F.: Teoria semi-markowskich procesów eksploatacji obiektów technicznych. *Zeszyty Naukowe AMW*, nr 75A, Gdynia 1982.
- [11] Jadźwiński J., Borgoń J.: *Niezawodność eksploatacyjna i bezpieczeństwo lotów*. WKiŁ, Warszawa 1989.
- [12] Kiliński A.: Definicje opisowe i normatywne pojęcia niezawodności. *Problemy Jakości*, Nr3, Warszawa 1972, s.5 □ 13.
- [13] Limnios N., Oprisan G.: *Semi-Markov Processes and Reliability*. Boston, Birkhauser 2001.
- [14] Piotrowski J.: *Podstawy miernictwa*. WNT, Warszawa 2002.
- [15] Piotrowski I., Witkowski K.: *Okrętowe silniki spalinowe*. Wyd. TRADEMAR, Gdynia 1996.
- [16] Piotrkowski I., Witkowski K.: *Eksploatacja okrętowych silników spalinowych*. AM, Gdynia 2002.
- [17] Сильвестров Д. С.: *Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний*. Издательство „Советское Радио”. Москва, 1980.
- [18] Wojnowski W.: *Okrętowe silownie spalinowe*. Cz. I. Wyd. AMW, Gdynia 1998.
- [19] *Inżynieria diagnostyki maszyn*. Praca zbiorowa pod redakcją B. Żółtowskiego i C. Cempla. PTDT. Wyd. ITE, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.
- [20] *Poradnik niezawodności*. Praca zbiorowa pod redakcją J. Migdałskiego. Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego „WEMA”, Warszawa 1982
- [21] *MAN B&W Diesel A/S: CoCoS Maintenance, Designed for Maintenance Excellence*, Kopenhaga 2005.
- [22] *Wärtsilä Corporation: Service News from Wärtsilä Corporation 2 2002/1 2003, CBM for two stroke engines*, Kaidara Software, Wärtsilä Corporation Helsinki, marzec 2003.
- [23] Girtler J., Fydrych J.: *Analiza i ocena przydatności opracowanego systemu diagnostycznego silników głównych statków do sterowania procesem eksploatacji tego rodzaju silników w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa statków oraz morskiego środowiska naturalnego*. Sprawozdanie z etapu realizacji projektu badawczego własnego nt. „Decyzyjne

sterowanie procesem eksploatacji układów korbowo-tłokowych silników napędu głównego statków morskich z zastosowaniem diagnostyki technicznej oraz uwzględnieniem bezpieczeństwa i ochrony środowiska.” Projekt wykonywany w ramach projektu finansowanego przez MNiSW Nr N N509

Mr Jerzy Girtler DSc., PhD Eng. – full professor in the Faculty of Ocean Engineering of Ship technology at Gdansk University of Technology.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler – profesor zwyczajny na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.



494638. Kierownik projektu prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler. Prace badawcze nr 04/12/PB. Wydział oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki gdańskiej, Gdańsk 2012.