



PROBABILISTYCZNY MODEL PROCESU OBCIĄŻEŃ MOCĄ OKRĘTOWEGO TŁOKOWEGO SILNIKA GŁÓWNEGO I JEGO PRAKTYCZNA PRZYDATNOŚĆ

Jerzy Girtler

Politechnika Gdańska
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych
tel. (+48 58) 347-24-30; fax (+48 58) 347-19-81
e-mail: jgirtl@pg.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono propozycję modelu widma obciążeń mocą okrętowego silnika głównego w formie czterostanowego procesu semi-Markowa $\{D(t): t \geq 0\}$ ciągłego w stanach i czasie o zbiorze stanów $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ i następującej interpretacji elementów tego zbioru: c_1 – obciążenie silnika mocą częściową, c_2 – obciążenie silnika mocą trwałą, c_3 – obciążenie silnika mocą znamionową, c_4 – obciążenie silnika mocą maksymalną. Określono rozkład graniczny wspomnianego procesu i wykazano możliwość oszacowania prawdopodobieństw tego rozkładu. Przedstawiono uzasadnienie potrzeby opracowania takiego modelu charakteryzując warunki eksploatacji okrętowych silników głównych. Wykazano, że zastosowanie w praktyce nawet tak prostego modelu może być przydatne do planowania zapasu paliwa niezbędnego do działania silnika podczas rejsu statku. Wykazano też, że model ten może być zmodyfikowany, w zależności od potrzeb eksploatacyjnych tak, aby uwzględnionych było w nim tyle stanów odzwierciedlających poszczególne rodzaje obciążeń mocą silnika głównego, ile musi znać użytkownik, aby zapewnić racjonalną jego eksploatację.

Słowa kluczowe: obciążenie, proces obciążeń, proces stochastyczny, proces semi-Markowa, okrętowy silnik główny, tłokowy silnik spalinowy, widmo obciążeń

1. Wstęp

Obciążenia, zwłaszcza cieplne, okrętowych tłokowych silników głównych mają zasadniczy wpływ na ich trwałość, niezawodność i bezpieczeństwo działania w fazie ich eksploatacji. Obciążenia te są przyczyną uszkodzeń. Do tego rodzaju uszkodzeń można przykładowo wymienić takie jak: pęknięcie płaszczka tłoka, pęknięcie tulei cylindrowej, popękanie pierścieni tłokowych uszczelniających, zatarcie tłoka w tulei cylindrowej, odpadnięcie grzybka zaworu wylotowego spalin od trzonu, wypchnięcie uszczelki spod głowicy cylindra, wytopienie i znaczne ubytki stopu łożyskowego łożysk głównych (ramowych) bądź korbowych, zatarcie łożysk głównych bądź korbowych, znaczne ubytki materiału łopatek turbiny turbosprężarki, itp. [7, 10, 11, 14, 15, 20].

W praktyce eksploatacyjnej okrętowych silników głównych uszkodzenia te są na ogół skutkiem nadmiernego ich obciążenia, powodowanego przez warunki hydrometeorologiczne, ale nie tylko. Przykładowo, w przypadku zatarcia tłoka w tulei i związanego z nim na ogół pęknięcia tulei cylindrowej, nawet na całym obwodzie (w silnikach dwusuwowych, z reguły w pobliżu szczelin), pęknięcie płaszczka tłoka, połamanie pierścieni uszczelniających, przyczyny mogą być następujące:

– nadmierne obciążenie (przeciążenie) silnika z powodu nie uwzględnienia przez użytkownika dużego wzrostu oporu ruchu statku, jaki powstaje wskutek pogorszenia warunków zewnętrznych, głównie

hydrometeorologicznych i znacznego porośnięcia podwodnej części kadłuba, ale także

- nieodpowiednie przygotowanie paliwa ciężkiego w wyniku zastosowania jednostopniowego wirowania paliwa, zamiast dwustopniowego (wbrew zaleceniom producenta silnika),
- znaczne zmniejszenie intensywności smarowania gładzi tulei cylindrowej w wyniku zmniejszenia prędkości obrotowej wałka napędowego lubrykatorów.

Wszystkie wymienione uszkodzenia silników głównych są rezultatami narastania zużycia powierzchniowego (liniowego – wzrost luzów w układach tribologicznych) i objętościowego (propagacji mikro- a następnie mikropęknięć elementów) powodowanych obciążeniami cieplnymi i mechanicznymi tych silników [10, 11]. Takim uszkodzeniom można zapobiegać stosując odpowiednie systemy diagnozujące (*SDG*) przysposobione do identyfikacji stanu technicznego tychże silników, jako systemów diagnozowanych (*SDN*), czyli takie, które umożliwiają użytkownikowi uzyskanie wiarygodnych diagnoz chwilowych oraz prognoz o tym stanie [1, 15]. W opracowaniu wiarygodnej prognozy niezbędna jest informacja o zmianach obciążeniach każdego silnika głównego (*SDN*) w czasie jego działania. Oznacza to, że istotna jest znajomość widma obciążeń takiego silnika. Ponadto widmo takie potrzebne jest także do planowania zapasu paliwa potrzebnego do zapewnienia działania silnika podczas rejsu statku. Obciążenia okrętowych silników głównych są losowe a rozpatrywane w czasie t działania tych silników tworzą proces losowy. Oznacza to, że widmo obciążeń tego rodzaju silników wymaga probabilistycznego opisu w formie procesu stochastycznego. Wobec tego w artykule została przedstawiona propozycja właśnie takiego opisu obciążeń okrętowych silników głównych, z uwzględnieniem ich czasu działania t oraz warunków eksploatacji wpływających na obciążenie.

2. Warunki wpływające na powstawanie i zmiany obciążeń

W czasie ruchu statku na obciążenie mocą silnika głównego wpływa szereg istotnych czynników. Do najważniejszych z nich należą [6, 7, 17, 18, 21]: oddziaływanie pływów i prądów pływowych, zalodzenie nadwodnej części kadłuba oraz rodzaj akwenu, ruch poziomy wód spowodowany czynnikami hydrometeorologicznymi, nazywany prądem morskim.

Ruch statku sprawia, że na jego kadłub działa siła oporu skierowana przeciwnie do kierunku tego ruchu powodowana tarcieniem wody omywającej podwodną część kadłuba i powierza otaczającego oddziałującego na takie elementy konstrukcyjne, jak nadwodna część kadłuba, nadbudówki i maszty oraz ewentualny ładunek pokładowy [7, 18, 21].

Statek płynący kursem przeciwnym do fali wiatrowej, której wysokość i długość zależy od siły wiatru oraz do kierunku wiatru jest narażony na pokonywanie większych oporów powietrza, który rośnie w przypadku pojawienia się dryfu (spychania statku przez wiatr z linii kursu). Wiatr indukuje na powierzchni nawodnej części kadłuba statku nieraz znaczne siły i momenty aerodynamiczne. Zachodzi wobec tego konieczność kompensacji działania tego wiatru, co wymaga odpowiednich wychyleń steru. W czasie sztormowej pogody może się jednak okazać, że nawet maksymalne wychylenia steru nie wystarcza do utrzymania kursu statku. Statek traci wtedy sterowność i tym samym nie może poruszać się w ustalonym kierunku. [6, 7].

W wyniku oddziaływania fali, ale także wiatru, są kołysania statku, powodują wzrost obciążenia mocą silnika głównego ze względu na wzrost oporu statku, który może doprowadzić do przeciążenia silnika głównego mocą użyteczną zwłaszcza podczas pojawienia się slemingu i związanemu z nim wynurzania śruby napędowej a także zalewania pokładu przez fale [6, 7].

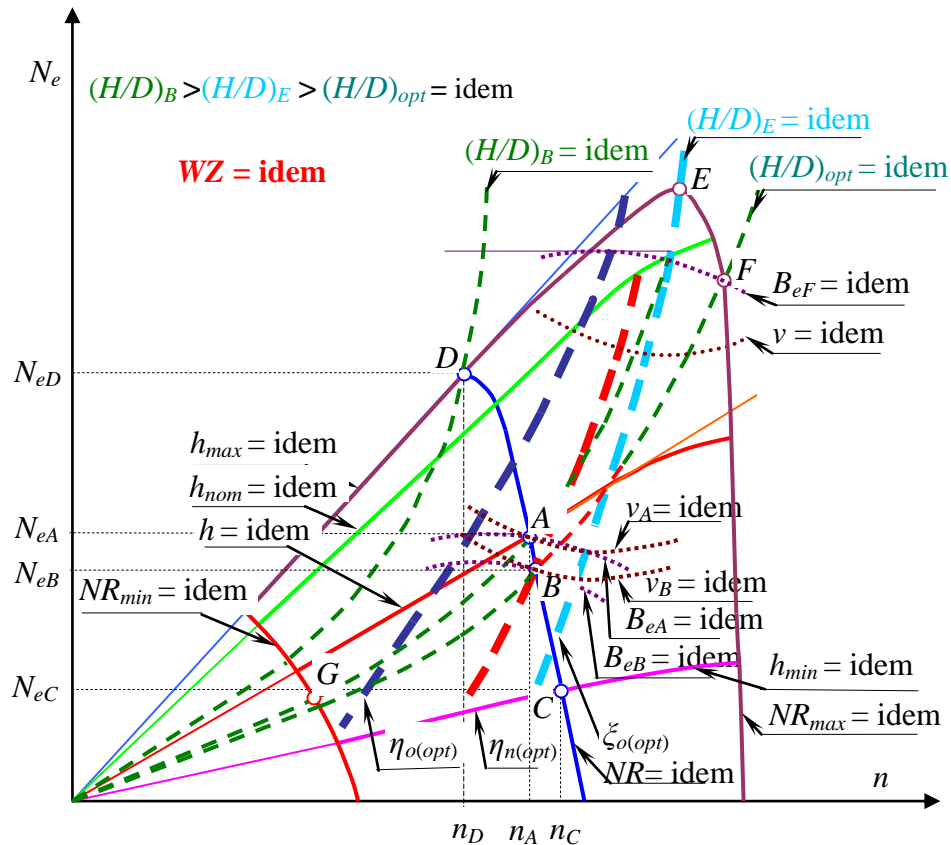
Obciążenie mocą silnika głównego statku zwiększają także, wskutek zwiększania oporów statku, takie rodzaje kołysań jak [7, 8, 18, 21]: boczne (czyli *kołysanie*), wzdłużne (*kiwanie*), poprzeczne (*myszowanie*) i oscylacyjne ruchy pionowe (*nurzanie*).

Opory statku eksploatowanego w dłuższym okresie, bez oczyszczania podwodnej części jego kadłuba może doprowadzić do wzrostu oporu nawet o 50% [8].

Wzrost, bądź zmniejszenie oporu kadłuba statku i tym samym obciążenia mocą silnika głównego w czasie pogarszania się warunków hydrometeorologicznych, jest rezultatem narastającego, bądź malejącego falowania wody (wysokości fali, długości fali, częstości falowania i kierunku napływających fal) i oddziaływania wiatru (siły wiatru i jego kierunku). Zwłaszcza kierunek fali wpływa istotnie na zmiany oporu kadłuba i obciążenia silnika głównego. Opór jest większy wtedy, gdy fala napływa od dziobu, zaś

mniejszy, gdy napływa ona od strony rufy. Oddziaływanie wiatru na nawodną część kadłuba może spowodować wzrost oporu statku nawet do 20% [8] a to oznacza wzrost obciążenia silnika głównego a nawet możliwość jego przeciążenia.

Z rozważań wynika, że ze względu na losowe własności warunków zewnętrznych, także losowe będą obciążenia silnika głównego. Silnik taki przekazując energię mechaniczną śrubie napędowej może być obciążony przy różnych mocach użytecznych (N_e) i prędkościach obrotowych (n), co obrazuje charakterystyka ruchowa zespołu napędowego (rys. 1) [8].



Rys. 1. Charakterystyka ruchowa zespołu napędowego dla $WZ = idem$ [8]:

H/D – współczynnik skoku śruby nastawnej, $(H/D)_{opt}$ – optymalny współczynnik skoku śruby nastawnej, WZ – warunki zewnętrzne ruchu statku, B_e – godzinowe zużycie oleju napędowego przez silnik, B_{eA} – godzinowe zużycie oleju napędowego przez silnik w punkcie A jego pracy, B_{eB} – godzinowe zużycie oleju napędowego przez silnik w punkcie B jego pracy, B_{eF} – godzinowe zużycie oleju napędowego przez silnik w punkcie F jego pracy, v – prędkość statku, v_A – prędkość statku, gdy silnik pracuje w punkcie A, v_B – prędkość statku, gdy silnik pracuje w punkcie B, NR – nastawa regulatora prędkości obrotowej, NR_{max} – maksymalna nastawa regulatora prędkości obrotowej, NR_{min} – minimalna nastawa regulatora prędkości obrotowej, h_{max} – maksymalna nastawa listwy paliwowej, h_{nom} – nominalna nastawa listwy paliwowej, h_{min} – minimalna nastawa listwy paliwowej, h – nastawa listwy paliwowej, N_e – moc efektywna (użyteczna) silnika, N_{eA} – moc efektywna silnika w punkcie A jego pracy, N_{eB} – moc efektywna silnika w punkcie B jego pracy, N_{eC} – moc efektywna silnika w punkcie C jego pracy, N_{eD} – moc efektywna silnika w punkcie D jego pracy, n – prędkość obrotowa silnika, n_A – prędkość obrotowa silnika w punkcie A jego pracy, n_C – prędkość obrotowa silnika w punkcie C jego pracy, n_D – prędkość obrotowa silnika w punkcie D jego pracy, $\eta_{o(opt)}$ – optymalna sprawność ogólna silnika, $\eta_{n(opt)}$ – optymalna sprawność ogólna napędu, $\xi_{o(opt)}$ – optymalna sprawność napędowa,

Punkty współpracy silnika głównego z śrubą napędową wynikają z nastaw pomp wtryskowych oraz warunków zewnętrznych ruchu statku, które kształtują: warunki atmosferyczno-morskie, rodzaj wykonywanych zadań przez statek (rodzaj rejsu) oraz walory jego kadłuba (rys. 1).

W określonych warunkach zewnętrznych silnik główny może napędzać śrubę o skoku nieregulowanym (nienastawnym) i o skoku nastawnym. Działanie takiego silnika polegające na przekazywaniu energii śrubie napędowej o skoku nastawnym jest bardziej zróżnicowane. Z tego powodu działanie silnika głównego zostanie scharakteryzowane z uwzględnieniem tego rodzaju śruby napędowej, jako odbiornika energii mechanicznej wytwarzanej przez silnik.

Rozpatrując działanie silnika głównego napędzającego śrubę nastawną (rys. 1) można stwierdzić, że jego obciążenie w czasie działania zależy od dokonania odpowiedniego doboru prędkości obrotowej i skoku śruby (nastawy skoku śruby). Pole osiągow silnika głównego jest ograniczone minimalną (NR_{min}) i maksymalną (NR_{max}) nastawą regulatora prędkości obrotowej oraz minimalną (h_{min}) i maksymalną (h_{max}) nastawą listwy paliwowej (nastawą pompy wtryskowej) [17, 21].

Zrozumiałe jest, że sterowanie działaniem silnika powinno polegać na takim doborze nastawy pompy wtryskowej i nastawy skoku śruby, aby dla danych warunków zewnętrznych (warunków pływania) nie dopuścić do jego przeciążenia, a jednocześnie było możliwe było uzyskanie optymalnej sprawności ogólnej napędu $\eta_{n(opt)}$, a nie jedynie optymalnej sprawności ogólnej silnika $\eta_{o(opt)}$ lub optymalnej sprawności napędowej $\xi_{o(opt)}$ [21]. Wspomniana krzywa optymalnej sprawności ogólnej napędu $\eta_{n(opt)}$ jest między krzywą optymalnej sprawności ogólnej silnika $\eta_{o(opt)}$ a krzywą optymalnej sprawności napędowej $\xi_{o(opt)}$ (rys. 1).

Sterowanie działaniem silnika według krzywej optymalnej sprawności ogólnej silnika $\eta_{o(opt)}$ umożliwia uzyskanie minimalnego jednostkowego zużycia paliwa (oleju ciężkiego bądź oleju napędowego). Natomiast sterowanie działaniem silnika według krzywej optymalnej sprawności napędowej $\xi_{o(opt)}$ umożliwia uzyskanie minimalnej mocy silnika przy zadanej (a priori) prędkości ruchu statku. Oczywiście jest, że zużycie jednostkowe paliwa przez silnik jest wtedy większe niż w przypadku działania silnika według krzywej $\eta_{o(opt)}$.

Cechą charakterystyczną działania silnika napędzającego śrubę nastawną jest to, że zadana prędkość statku może być osiągnięta przez nieskończenie dużą liczbę par nastaw: pompy tryskowej i skoku śruby napędowej. Jest to korzystne dla silnika głównego, ponieważ jego użytkownik może zapobiegać jego nadmiernym obciążeniom nazywanym przeciążeniami.

Z rozważań (rys. 1) wynika, że punkt B leżący na krzywej optymalnej sprawności ogólnej napędu $\eta_{n(opt)}$ wyznacza optymalne działanie silnika. To działanie jest związane z wytwarzaniem mocy użytecznej N_{eB} . Wobec tego uwzględniając to, że moc N_e jest wielkością wyrażającą pracę L_e wykonaną w czasie (τ), działanie silnika w przedziale czasu $[t_1, t_2]$, gdy $N_{eB} = \text{idem}$, można przedstawić następująco [2, 5, 12].

$$D = \int_{t_1}^{t_2} N_{eB} t dt = N_{eB} \int_{t_1}^{t_2} t dt = N_{eB} \frac{1}{2} t^2 \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{2} N_{eB} (t_2^2 - t_1^2) \quad (1)$$

Wzór (1) wynika z tego, że praca wykonywana przez silnik działający w czasie t przy obciążeniu mocą użyteczną $N_{eB} = \text{idem}$ może być wyrażona wzorem: $L_{eB} = N_{eB} \cdot t$. W działaniu tym może być rozpatrywany proces obciążenie silnika głównego mocą ściśle określoną np. mocą: maksymalną (N_{em}), znamionową (N_{ez}), trwałą (N_{et}) i częściową (N_{ec}). Proces ten jest, jak wynika z przedstawionych rozważań, procesem stochastycznym.

3. Proces stochastyczny obciążeń okrętowych silników głównych

Z badań eksploatacyjnych różnych układów napędowych i zespołów napędowych, które w skład tych układów wchodzi, wynika, że są one obciążane w sposób ciągły i że przez dłuższy czas pracują przy ściśle określonych obciążeniach, zadanych zgodnie z obowiązującymi zasadami ich eksploatacji. Przejście z jednego takiego obciążenia na inne dokonywane jest w o wiele krótszym czasie w porównaniu z czasem trwania każdego, takiego obciążenia (zadanego). Zmiana obciążeń wspomnianych silników ma przebieg losowy. Zatem zmiana obciążeń silników $\{B(t): t \geq 0\}$ jest procesem losowym o ciągłych realizacjach, a przy tym dodatnich i ograniczonych. Opracowanie modelu tego procesu wymaga dokonania dyskretyzacji wartości wspomnianego procesu.

W przypadku silników o zapłonie samoczynnym, jako silników głównych, można przyjąć, że najistotniejsze są obciążenia, które stanowią zbiór:

$$C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\} \quad (2)$$

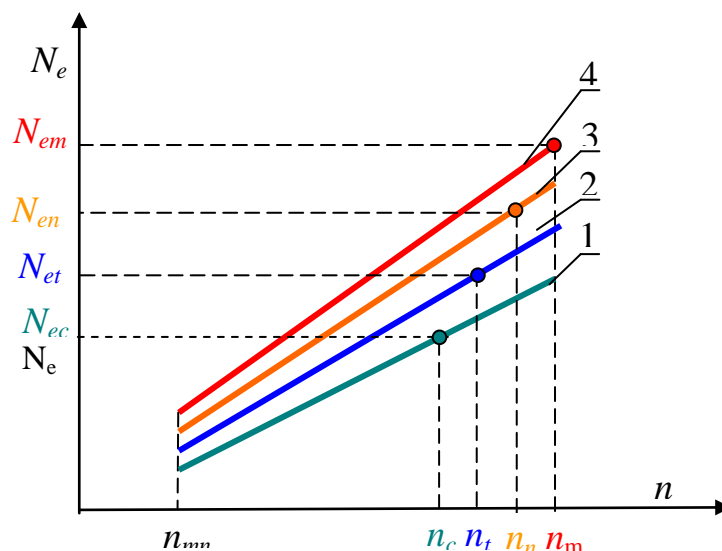
o następującej interpretacji jego elementów (rys. 4):

- c_1 – obciążenie silnika mocą częściową,
- c_2 – obciążenie silnika mocą trwałą,
- c_3 – obciążenie silnika mocą znamionową,
- c_4 – obciążenie silnika mocą maksymalną.

Wyróżnienie tych rodzajów obciążeń jest istotne, dlatego że wynikają one z zasad eksploatacji silników o zapłonie samoczynnym i związanej z nimi konieczności sprecyzowania położenia listwy paliwowej odpowiadającej poszczególnym obciążeniom. Zatem uwzględniając wymienione rodzaje obciążenia silnika głównego statku należy mieć na uwadze, że [17, 19, 21]:

- charakterystyka zewnętrzna mocy maksymalnej jest sporządzana podczas ustawienia położenia listwy paliwowej odpowiadającej mocy maksymalnej silnika, to jest takiej mocy, która może być wytwarzana przez silnik tylko w ograniczonym okresie (przedziale czasu), np. 1 do 3 godzin, gdy jednocześnie jego prędkość obrotowa jest równa prędkości maksymalnej. Moc ta nazywana jest maksymalną, dlatego ponieważ w przypadku silników okrętowych uzyskanie większej mocy jest nie możliwe ze względu na zastosowanie ograniczników, które uniemożliwiają uzyskanie położenia listwy paliwowej zapewniającego uzyskanie mocy większej od maksymalnej, np. mocy granicznej, osiągnięcie której powoduje nadmierne zużycie paliwa, wysoką temperaturę spalin wylotowych, także naruszenie równowagi cieplnej silnika i w związku z tym przedwczesne zużycie prowadzące do uszkodzenia każdego silnika,
- charakterystyka zewnętrzna mocy znamionowej jest sporządzana podczas ustawienia położenia listwy paliwowej odpowiadającej mocy znamionowej silnika wytwarzanej przy jego prędkości znamionowej, to jest takiej mocy, która uznawana przez producenta za podstawową i odzwierciedlającą wszystkie podstawowe wskaźniki (parametry) pracy silnika,
- charakterystyka zewnętrzna mocy trwałej jest sporządzana podczas ustawienia położenia listwy paliwowej odpowiadającej mocy eksploatacyjnej (trwałej) silnika wytwarzanej przy jego prędkości eksploatacyjnej (trwałej), to jest takiej mocy, która powinna zapewniać ekonomiczną a zarazem niezawodną pracę w długim przedziale czasu eksploatacji,
- charakterystyka zewnętrzna mocy częściowej jest sporządzana podczas ustawienia położenia listwy paliwowej (odpowiadającej zmniejszonej dawce paliwa w porównaniu z dawką odpowiadającą mocy trwałej) silnika wytwarzanej przy jego prędkości trwałej, wynikającej z potrzeb i warunków wykonywania zadań przez statki.

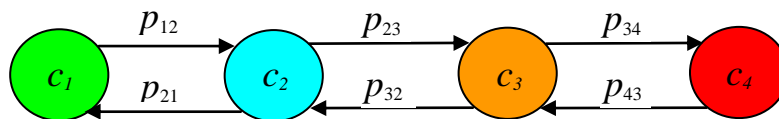
Przykładowe teoretyczne charakterystyki zewnętrzne mocy okrętowego silnika głównego zostały przedstawione na rys. 2.



Rys. 2. Teoretyczne charakterystyki zewnętrzne silników o zapłonie samoczynnym:

4 – charakterystyka zewnętrzna mocy maksymalnej, 3 – charakterystyka zewnętrzna mocy znamionowej, 2 – charakterystyka zewnętrzna mocy trwałej, 1 – charakterystyka zewnętrzna mocy częściowej, N_e – moc użyteczna, N_{em} – moc użyteczna maksymalna, N_{en} – moc użyteczna znamionowa (nominalna), N_{et} – moc użyteczna trwała, N_{ec} – moc użyteczna częściowa, n – prędkość obrotowa, n_{min} – prędkość obrotowa minimalna, n_t – prędkość obrotowa trwała, n_n – prędkość obrotowa znamionowa (nominalna), n_m – prędkość obrotowa maksymalna

Wobec tego można przyjąć, że zbiór obciążeń $c_k \in C$ ($k = 1, 2, 3, 4$) określony wzorem (2) jest zbiorem stanów procesu stochastycznego $\{D(t): t \geq 0\}$, którego przedziały są jednakowe (stałe) a realizacje prawostronnie ciągłe. Długości przedziałów $[\tau_0, \tau_1)$, $[\tau_1, \tau_2)$, $[\tau_2, \tau_3)$, ..., $[\tau_n, \tau_{n+1})$, ..., w których wspomniany proces $\{D(t): t \geq 0\}$ przyjmuje stałe (jednakowe) wartości, są zmiennymi losowymi o dodatnich rozkładach. W przypadku obciążeń wspomnianych silników można założyć [3, 4, 8, 9, 10, 11], że czas trwania dowolnego stanu $c_i \in C$ (2), który został osiągnięty w chwili τ_n oraz stan osiągnięty w chwili τ_{n+1} nie zależą stochastycznie od stanów, które zaistniały wcześniej i przedziałów czasu ich trwania. Wobec tego można przyjąć, że proces $\{D(t): t \geq 0\}$ zmian obciążeń tych silników jest procesem semimarkowskim [1, 3, 9]. Zatem można przyjąć, że proces $\{D(t): t \geq 0\}$ jest modelem losowo zmieniającego się obciążenia mocą silników głównych o zbiorze stanów $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ i grafie zmian stanów przedstawionym na rys. 3.



Rys. 3. Graf zmian stanów procesu $\{D(t): t \geq 0\}$

Proces ten jest w tedy całkowicie określony (zdefiniowany), gdy określona zostanie macierz funkcyjna [1, 13]

$$Q_{ij} = [Q_{ij}(t)], \quad i, j = 1, 2, 3, 4, \quad (3)$$



przy czym

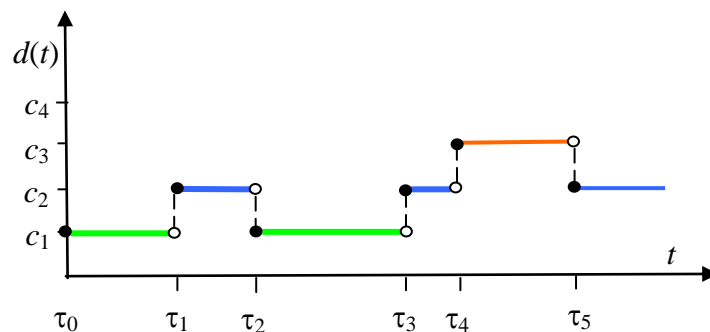
$$Q_{ij}(t) = P\{D(\tau_{n+1}) = c_j, \tau_{n+1} - \tau_n < t | D(\tau_n) = c_i\}$$

oraz rozkład początkowy

$$P_i = P\{D(0) = c_i\}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (4)$$

Wyszczególnione stany $c_i \in C$ ($i = 1, 2, 3, 4$) procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ dowolnego silnika głównego mogą być rozpoznawane za pomocą odpowiednich systemów diagnostycznych (SD), których przydatność zależy od jakości zastosowanego systemu diagnozującego (SDG) oraz jego przysposobienia do rozpoznawania stanów wspomnianych silników jako systemów diagnozowanych (SDN) [1, 2, 14, 15, 16].

Przykładowa realizacja procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ została przedstawiona na rys. 4.



Rys. 4. Przykładowy przebieg $d(t)$ procesu $\{DY(t): t \geq 0\}$ w czasie użytkowania silnika.

Zmiany stanów należących do zbioru $C = \{c_i; i = 1, 2, 3, 4\}$ można rozpatrywać, w czasie działania każdego silnika głównego o zapłonie samoczynnym, jako wartości procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ o realizacjach stałych (jednakowych) w poszczególnych przedziałach czasu i przy tym prawostronnie ciągłych [3, 4, 8, 9, 13, 20]. Długości przedziałów, w których proces $\{D(t): t \geq 0\}$ przyjmuje stałe (jednakowe) wartości są zmiennymi losowymi T_{ij} oznaczającymi czas trwania stanu $c_i \in C$ tego procesu pod warunkiem, że następnym jego stanem będzie $c_j \in C$, przy czym $i, j = 1, \dots, 4$ oraz $i \neq j$. Zmienne te są zmiennymi losowymi niezależnymi o skończonych wartościach oczekiwanych $E(T_{ij})$ i mają dodatnio skoncentrowane rozkłady. Proces ten cechuje ponadto właściwość polegająca na tym, że czas trwania stanu c_i , który zaistniał w chwili τ_n oraz stan, który pojawił się w chwili τ_{n+1} nie zależą stochastycznie od stanów, które zaszły wcześniej i przedziałów czasu ich trwania. Zatem można przyjąć, że przyszłe stany procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ zależą wyłącznie od aktualnie istniejącego stanu. Oznacza to, że proces $\{D(t): t \geq 0\}$ jest procesem semimarkowskim o grafie zmian stanów przedstawionym na rys. 3. Zdefiniowanie tego procesu wymaga określenia jego rozkładu początkowego P_i oraz macierzy funkcyjnej $Q(t)$.

Rozkład początkowy procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ jest następujący:

$$P_i = P\{D(0) = c_i\} = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = 1 \\ 0 & \text{dla } i = 2, 3, \dots, 4 \end{cases} \quad (5)$$

Macierz funkcyjna zgodnie z grafem zmian stanów, przedstawionym na rys. 3, ma następującą postać:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}(t) & 0 & 0 \\ Q_{21}(t) & 0 & Q_{23}(t) & 0 \\ 0 & Q_{32}(t) & 0 & Q_{34}(t) \\ 0 & 0 & Q_{43}(t) & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Elementy macierzy (6) są niemalejącymi funkcjami zmiennej t , oznaczającymi prawdopodobieństwa przejścia procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ ze stanu c_i do stanu c_j ($c_i, c_j \in C; i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j$) w czasie nie większym niż t , oznaczanymi następująco [9, 13]:

$$Q_{ij}(t) = P\{D(\tau_{n+1}) = c_j, \tau_{n+1} - \tau_n < t \mid D(\tau_n) = c_i\} = p_{ij}F_{ij}(t) \quad (7)$$

gdzie: $c_i, c_j \in C(i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j)$,

przy czym: p_{ij} – prawdopodobieństwo przejścia w jednym kroku jednorodnego łańcucha Markowa włożonego w proces $\{D(t): t \geq 0\}$, natomiast $F_{ij}(t)$ – dystrybuanta zmiennej losowej T_{ij} oznaczającej czas trwania stanu c_i procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ pod warunkiem, że następnym jego stanem będzie c_j .

Prawdopodobieństwo p_{ij} interpretowane jest następująco:

$$p_{ij} = P\{D(\tau_{n+1}) = c_j \mid D(\tau_n) = c_i\} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{ij}(t) \quad (8)$$

W tej sytuacji rozwiązanie sformułowanego problemu polega na znalezieniu rozkładu granicznego procesu $\{D(t): t \geq 0\}$, o następującej interpretacji:

$$P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{D(t) = c_j\}, \quad j = \overline{1,4}.$$

Rozkład ten można wyznaczyć posługując się wzorem [9, 13]:

$$P_j = \frac{\pi_j E(T_j)}{\sum_{k=1}^3 \pi_k E(T_k)}, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

gdzie: $\pi_j = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P\{D(\tau_n) = c_j \mid Y(0) = c_i\}$, a $[\pi_j; j = 1, 2, 3, 4]$ jest stacjonarnym rozkładem łańcucha Markowa $\{D(\tau_n): n \in N\}$ włożonego w proces $\{D(t): t \geq 0\}$.

Rozkład ten spełnia następujący układ równań (10) i (11) [9, 13]:

$$\sum_{i=1}^4 \pi_i p_{ij} = \pi_j; \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^4 \pi_i = 1 \quad (11)$$

Macierz funkcyjna (6) jest macierzą stochastyczną, zatem macierz prawdopodobieństw przejść $\mathbf{P} = [p_{ij}]$, $i, j = 1, 2, 3, 4$ jest następująca:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} & 0 \\ 0 & p_{32} & 0 & p_{34} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Wobec tego równania (10) i (11), charakteryzujące rozkład graniczny π_j , $j = 1, 2, 3, 4$ łańcucha Markowa $\{D(\tau_n): n = 0, 1, 2, \dots\}$ włożonego w proces $\{D(t): t \geq 0\}$ mogą być przedstawione w formie układu równań [9, 13]:

$$\left. \begin{aligned} & \left[\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4 \right] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} & 0 \\ 0 & p_{32} & 0 & p_{34} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \left[\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4 \right] \\ & \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Rozwiązując układ równań (13) uzyskuje się, zgodnie z wzorem (9), następujące zależności:

$$P_1 = \frac{p_{21}p_{32}E(T_1)}{M}; \quad P_2 = \frac{p_{32}E(T_2)}{M}; \quad P_3 = \frac{p_{23}E(T_3)}{M}; \quad P_4 = \frac{p_{23}p_{34}E(T_4)}{M} \quad (14)$$

przy czym:

$$M = p_{21}p_{32}E(T_1) + p_{32}E(T_2) + p_{23}E(T_3) + p_{23}p_{34}E(T_4)$$

gdzie: p_{ij} – prawdopodobieństwo przejścia procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ ze stanu c_i do stanu c_j ($c_i, c_j \in C$; $i, j = 1, 2, 3, 4$; $i \neq j$);

$E(T_j)$ – wartość oczekiwana zmiennej losowej T_j ($j = 1, 2, 3, 4$) oznaczającej czas trwania stanu $c_j \in C$ ($j = 1, 2, 3, 4$) procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ niezależnie od tego, do jakiego stanu przechodzi ten proces ze wspomnianego stanu c_j .

Wartości oczekiwane $E(T_j)$ zależą od wartości oczekiwanych $E(T_{ij})$ oraz prawdopodobieństw p_{ij} następująco:

$$E(T_j) = E(T_i) = \sum_j p_{ij} E(T_{ij}), \quad i, j = \overline{1,4}; \quad i \neq j \quad (14)$$

Poszczególne prawdopodobieństwa P_j ($j = 1, 2, \dots, 4$) mają następującą interpretację:

$$P_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{D(t) = c_1\}, \quad P_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{D(t) = c_2\}, \quad P_3 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{D(t) = c_3\}, \quad P_4 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{D(t) = c_4\}.$$



Prawdopodobieństwo P_1 może być uważane za prawdopodobieństwo obciążania silnika według charakterystyki mocy częściowej, prawdopodobieństwo P_2 – za prawdopodobieństwo obciążania silnika według charakterystyki mocy trwałej, prawdopodobieństwo P_3 – za prawdopodobieństwo obciążania silnika według charakterystyki mocy znamionowej a prawdopodobieństwo P_4 za prawdopodobieństwo obciążania silnika według charakterystyki mocy maksymalnej.

Uzyskanie (oczywiście przybliżonych) wartości prawdopodobieństw $P_j (j = 1, 2, 3, 4)$ wymaga oszacowania p_{ij} oraz $E(T_j)$.

Oszacowanie prawdopodobieństw p_{ij} oraz wartości oczekiwanych $E(T_j)$ jest możliwe po uzyskaniu realizacji $d(t)$ procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ w odpowiednio długim przedziale czasu badań, a więc dla $t \in [0, t_b]$, przy czym $t_b \gg 0$. Można wtedy ustalić liczby $n_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, 4; i \neq j)$, które oznaczają liczby przejść ze stanu c_i do c_j w odpowiednio długim czasie.

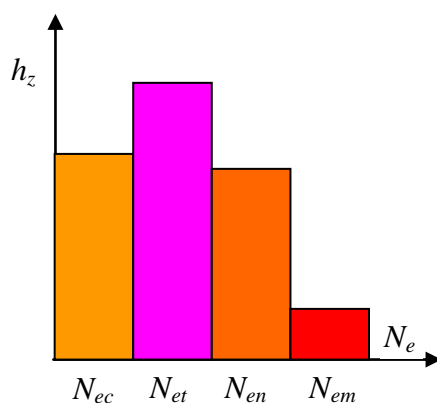
Estymatorem największej wiarygodności prawdopodobieństwa przejścia p_{ij} jest statystyka [9, 13]

$$\hat{P}_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_j N_{ij}}, \quad i \neq j; \quad i, j = 1, 2, \dots, 4, \quad (15)$$

której wartość $\hat{p}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}}$ stanowi oszacowanie nieznanego prawdopodobieństwa p_{ij} przejścia procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ ze stanu c_i do stanu c_j .

Ze wspomnianego przebiegu $d(t)$ można także uzyskać realizacje $t_j^{(m)}$, $m. = 1, 2, \dots, n_{ij}$ zmiennych losowych T_j . Zastosowanie estymacji punktowej pozwala na łatwe oszacowanie $E(T_j)$ jako wartości średniej arytmetycznej realizacji $t_j^{(m)}$ [9, 13].

W razie potrzeby mogą być także badane widma obciążeń mocą z uwzględnieniem tylko mocy użytecznej: maksymalnej (N_{em}) znamionowej (nominalnej – N_{en}), trwałej (N_{et}) oraz częściowej (N_{ec}), jakie są wyzwalane w cylindrach okrętowego silnika głównego. Wtedy mogą być rozpatrywane histogramy częstości obciążeń (rys. 6), który obrazuje częstość (h) pojawiania się zdarzenia losowego (ogólnie $Z \equiv N_e$) polegającego na kolejnym powstawaniu obciążeń mocą użyteczną, mianowicie $N_{ec}, N_{et}, N_{en}, N_{em}$ w czasie t użytkowania silnika.



Rys. 5. Histogram (rozkład empiryczny) częstości obciążeń silnika mocą użyteczną: h_z – częstość zdarzeń (stanów c procesu $\{D(t): t \geq 0\}$), N_e – moc użyteczna silnika, N_{em} – moc użyteczna maksymalna, N_{en} – moc użyteczna znamionowa (nominalna), N_{et} – moc użyteczna trwała, N_{ec} – moc użyteczna częściowa (rys. 2)

Podobne histogramy do tego, jak na rys. 5 mogą być opracowane dla dowolnych mocy użytecznych silnika wywiązywanych w poszczególnych jego cylindrach, a także mocy użytecznych średnich, jaką wytwarza jeden cylinder, bądź mocy wyzwalanych we wszystkich jego cylindrach.

Przedstawiony model widma obciążeń można różnie rozwinąć. W przypadku gdyby istotne było obciążanie silników głównych według dwóch charakterystyk mocy częściowej, np. 50% mocy znamionowej (N_{en}) oraz 25% N_{en} , można byłoby przyjąć, stan c_1 za stan obciążenia 50% N_{en} natomiast stan obciążenia 25% N_{en} oznaczyć w tym modelu jako stan c_0 analizowanego procesu widma obciążenia $\{D(t): t \geq 0\}$. W takim przypadku zbiór stanów charakteryzujących widmo obciążeń silników o zapłonie samoczynnym jako silników głównych może być określony następująco:

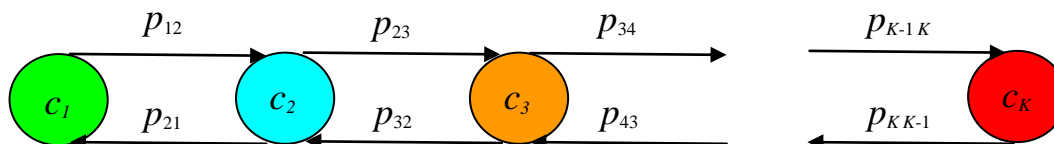
$$C = \{c_0, c_1, c_2, c_3, c_4\} \quad (16)$$

wtedy prawdopodobieństwo P_0 może być uważane za prawdopodobieństwo obciążania silnika według charakterystyki mocy częściowej na poziomie 25% mocy znamionowej (N_{en}), prawdopodobieństwo P_1 – za prawdopodobieństwo obciążania silnika według charakterystyki mocy częściowej na poziomie 50% mocy N_{en} , prawdopodobieństwo P_2 – za prawdopodobieństwo obciążania silnika według charakterystyki mocy eksploatacyjnej, prawdopodobieństwo P_3 – za prawdopodobieństwo obciążania silnika według charakterystyki mocy znamionowej a prawdopodobieństwo P_4 – za prawdopodobieństwo obciążania silnika według charakterystyki mocy maksymalnej.

Przedstawiony histogram widoczny na rys. 5. można jeszcze bardziej rozwinąć uwzględniając więcej mocy wyzwalanych w każdym z cylindrów. Podobnie przedstawiony na rys. 2. zbiór charakterystyk zewnętrznych silnika można uzupełnić uwzględniając więcej charakterystyk zewnętrznych. Należy bowiem mieć na uwadze, że mogą być różne strategie eksploatacji okrętowych silników głównych i stąd różne mogą być obciążenia mocą użyteczną tych silników. Najogólniej, można wobec tego rozpatrywać graf zmian stanów procesu $\{D^*(t): t \geq 0\}$ obciążeń okrętowego silnika głównego o zbiorze stanów:

$$C^* = \{c_k\}, k = 1, 2, \dots, K,$$

Zatem można rozpatrywać proces $\{D^*(t): t \geq 0\}$ jako proces stochastyczny o grafie zmian stanów przedstawionym na rys. 6.



Rys. 6. Graf zmian stanów $c_k \in C^* (k = 1, 2, 3, \dots, K)$ procesu $\{D^*(t): t \geq 0\}$

Zatem proces $\{D^*(t): t \geq 0\}$ będzie procesem o zbiorze stanów $C^* = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_K\}$. Proces ten będzie w pełni określony jeśli zdefiniowana zostanie macierz funkcyjna

$$Q_{ij} = [Q_{ij}(t)], \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, K, \quad (17)$$

przy czym

$$Q_{ij}(t) = P\{D^*(\tau_{n+1}) = c_j, \tau_{n+1} - \tau_n < t | D^*(\tau_n) = c_i, \tau_{n+1} - \tau_n < t | D^*(\tau_n) = c_i\},$$

oraz rozkład początkowy

$$P_i = P^*\{D(0) = c_i\}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, K.$$

Z grafu przedstawionego na rys. 2 wynika, że macierz procesu $\{D^*(t): t \geq 0\}$ jest następująca [13]:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}(t) & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21}(t) & 0 & Q_{23}(t) & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & Q_{K-1K-2}(t) & 0 & Q_{K-1K}(t) \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & Q_{KK-1}(t) & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Z oczywistych względów można przyjąć (silnik bowiem jest obciążany stopniowo od najmniejszego obciążenia), że stanem początkowym jest stan c_1 , zatem rozkład badanego widma o zbiorze stanów $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_K\}$ jest następujący:

$$P_i = P\{D(0) = c_i\} = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = 1 \\ 0 & \text{dla } i = 2, 3, \dots, K \end{cases} \quad (19)$$

Wynika z tego, że $P\{D^*(0) = c_1\} = 1$.

Podobnie jak w poprzednich rozważaniach należy określić macierz prawdopodobieństw przejścia łańcucha Markowa $\{D^*(\tau_n): n = 1, 2, 3, \dots\}$ włożonego w proces $\{D^*(t): t \geq 0\}$. Z macierzy (18) wynika, że łańcuch ten ma postać [13]:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & 0 & 1 - p_{21} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{K-1K-2} & 0 & p_{K-1K} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

gdzie:

$$p_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{ij}(t)$$

Określenie rozkładu granicznego [9, 13]

$$P_j = \frac{\pi_j E(T_j)}{\sum_{k=1}^K \pi_k E(T_k)}, \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (21)$$

kontraktowych, wewnątrz którego znajdują się parametry odpowiadające różnej mocy i prędkości obrotowej, którym odpowiadają małe zużycia jednostkowe paliwa. Można też opracować model widma o zbiorze stanów, którego elementami mogą być nie tylko: moc maksymalna, moc znamionowa (nominalna), moc trwała i moc częściowa. Można przecież, jak już wspomniano, wyróżnić różne moce częściowe (np. N_{ec0} – moc użyteczna częściowa równa 25% N_{ez} bądź też N_{ec1} – moc użyteczna częściowa równa 50% N_{ez} , itd.) i utworzyć określony zbiór tych mocy o danej liczności, niezbędny dla potrzeb praktyki eksploatacyjnej. Z przedstawionych rozważań wynika, że przyjmując interpretację działania zaproponowaną w publikacjach [2, 12] i stosując teorię procesów semimarkowskich, można sterować procesem eksploatacji silników dążąc do uzyskania wymaganej trwałości, niezawodności i bezpieczeństwa działania silników głównych [2, 4, 5, 6].

Prawdopodobieństwo P_4 (14) obciążenia silnika mocą maksymalną (N_{em}), jeśli zostanie zinterpretowane, jako prawdopodobieństwo obciążenia okrętowego silnika głównego według charakterystyki mocy maksymalnej ($h_{max} = \text{idem}$), może być uznane za miarę niezawodności silnika. Możliwość obciążania tego silnika według tej charakterystyki (rys. 1) może być tylko wtedy, gdy silnik jest w stanie pełnej zdatności (s_1) a prawdopodobieństwo P_4 jest wtedy prawdopodobieństwem istnienia tego stanu [1, 4]. W przypadku, gdy silnik może być (przykładowo) obciążany (rys. 1), co najwyżej według charakterystyki mocy znamionowej ($h_{nom} = \text{idem}$), to silnik nie może być uznany za w pełni zdalny do wykonania zadania i należy uznać, że jest on wtedy w stanie częściowej zdatności (s_2). Prawdopodobieństwo P_3 (14) jest wówczas prawdopodobieństwem istnienia takiego właśnie stanu silnika (stanu zdalności częściowej). W przypadku zaś, gdy silnik nie może być długotrwale obciążany według charakterystyki mocy trwałej, to należy uznać, że jest on w stanie niezdatności (s_3) [1, 4].

Ponadto rozkład graniczny procesu $\{D(t): t \geq 0\}$ wyrażony wzorem (14) umożliwia zaplanowanie zapasu paliwa potrzebnego do zasilania silnika głównego podczas wykonywania zadania transportowego przez statek. W przypadku znajomości zużycia godzinowego G_e (bądź dobowego) przez silnik pracujący przy poszczególnych obciążeniach mocą (rys. 5): N_{em} w czasie t_m , N_{ez} w czasie t_z , N_{et} w czasie t_t i N_{ec} w czasie t_c , to ilość paliwa niezbędna do zasilania silnika głównego przy tych obciążeniach silnika głównego może być, w ujęciu deterministycznym, określona wzorem:

$$G_e(t) = \sum_k G_{ek}; \quad k = m, z, t, c; \quad t = \sum_i t_i \quad (28)$$

bądź bardziej szczegółowo

$$G_e(t) = G_{em}t_m + G_{ez}t_z + G_{et}t_t + G_{ec}t_c \quad (29)$$

Oczywiście, że wyróżnienie więcej stanów procesu obciążeń okrętowych silników głównych bądź pomocniczych, jak też jakichkolwiek silników o zapłonie samoczynnym, będzie wymagało opracowania odpowiadających im modeli widm obciążeń, do czego pomocne mogą być bezpośrednio rys. 6 oraz wzory (17) ÷ (27).

4. Uwagi i wnioski

W artykule zostały przedstawione możliwości opisu rzeczywistego widma obciążenia dowolnego okrętowego silnika głównego, jako procesu losowego w formie procesu stochastycznego dyskretnego w stanach i ciągłego w czasie, jako probabilistycznego modelu odwzorowującego widmo rzeczywiste.

Dokonanie dyskretyzacji rzeczywistego procesu obciążania silnika, umożliwiło utworzenie zbioru stanów (wartości) procesu obciążania silnika $\{D(t): t \geq 0\}$, w zależności od przyjętej liczby wyróżnionych stanów c_i tworzących zbiór C . W rezultacie powstał probabilistyczny model

widma tego procesu w formie procesu semimarkowskiego dyskretnego w stanach i ciągłego w czasie.

Można rozpatrywać modele widma procesu obciążania silników o różnej liczności stanów obciążenia i różnej interpretacji tych stanów. W każdym jednak przypadku dowolny taki model można skonstruować w formie procesu semimarkowskiego o skończonym zbiorze stanów ciągłego w czasie i dyskretnego w stanach.

Przy opracowaniu tego modelu wykorzystano własności Darboux funkcji ciągłych, które umożliwiają rozpatrywanie procesów obciążenia silników spalinowych, jako procesów dyskretnych w stanach i ciągłych w czasie.

Przedstawione modele mają istotne znaczenie praktyczne ze względu na łatwość określenia estymatorów prawdopodobieństw macierzy przejścia łańcucha Markowa, które są niezbędne do określenia prawdopodobieństw granicznych P_j procesu $\{D(t): t \geq 0\}$.

Każdy z zaproponowanych modeli widma procesu obciążania silnika umożliwi racjonalne jego użytkowanie, ponieważ można przewidzieć te obciążenia z określonym prawdopodobieństwem i podejmować tym samym stosowne decyzje. Do takich decyzji można przykładowo zaliczyć decyzję o zgromadzeniu zapasu paliwa niezbędnego do zasilania silnika głównego w czasie wykonywania rejsu przez statek a także oleju smarowego do smarowania łożysk silnika a w przypadku silnika wodorowego także oleju cylindrowego.

Wykazano także przydatność teorii procesów semimarkowskich do modelowania procesów obciążeń silników. Procesy semimarkowskie są wygodnymi w badaniach modelami rzeczywistych procesów obciążeń silników o zapłonie samoczynnym, nie tylko głównych. Wynika to z tego, że skonstruowanie semimarkowskiego modelu procesu obciążeń dowolnego rodzaju silnika spalinowego umożliwia łatwe (dzięki istniejącej teorii procesów semimarkowskich) wyznaczenie charakterystyk probabilistycznych takiego procesu obciążeń.

Procesy semimarkowskie, jako modele rzeczywistych procesów obciążeń nie tylko silników spalinowych, lecz także innych urządzeń energetycznych są bardziej przydatnymi w praktyce modelami niż procesy Markowa. Wynika to z tego, że procesy semimarkowskie o ciągłym parametrze czasu i skończonym zbiorze stanów cechują się tym, że przedziały czasu przebywania tych procesów w poszczególnych stanach są zmiennymi losowymi o dowolnych rozkładach skoncentrowanych w zbiorze $R_+ = [0, \infty)$. To odróżnia je od procesów Markowa, których przedziały te są zmiennymi losowymi o rozkładach wykładniczych.

Model semimarkowski procesu obciążeń nie tylko silników głównych, ale każdego urządzenia energetycznego jest procesem o skończonym zbiorze stanów i ciągłym w czasie.

Dodatkową korzyścią ze stosowania procesów semimarkowskich (podobnie jak w przypadku stosowania procesów Markowa) jest to, że można skorzystać z profesjonalnych narzędzi komputerowych, umożliwiających rozwiązywanie różnych układów równań potrzebnych do opisu probabilistycznego stanów wyróżnionych w modelu obciążeń silnika, który odzwierciedla proces rzeczywisty obciążeń.

Literatura

1. Girtler J.: Diagnostyka jako warunek sterowania eksploatacją okrętowych silników spalinowych. Studia Nr 28, WSM, Szczecin 1997.
2. Girtler J.: Deterministic and probabilistic interpretation of operation of technical systems with regard to their reliability. Polish Maritime Research, No 3(37)/ 2003, vol. 10, pp. 16-21.
3. Girtler J.: Physical aspect of application and usefulness of semi-Markovian processes for modelling the processes occurring in operational phase of technical objects. Polish Maritime Research. 2004, No 3(41), vol. 11, pp. 25-30.



4. Girtler J.: Semi-Markovian models of the process of technical state changes of technical objects. Polish Maritime Research 2004, No 4(42), vol. 11, pp. 3-7.
5. Girtler J.: Decision control of the process of combustion engines operation. Archiwum Motoryzacji 2004, nr 4, s. 368-388.
6. Girtler J., Kitowski Z., Kuriata A.: Bezpieczeństwo okrętu na morzu. Ujęcie systemowe. WKiŁ, Warszawa 1995.
7. Girtler J., Kuszmidler S., Plewiński L.: Wybrane zagadnienia eksploatacji statków morskich w aspekcie bezpieczeństwa żeglugi. Monografia. WSM, Szczecin 2003.
8. Girtler J.: The semi-Markov model of the process of appearance of sea-going ship propulsion system ability and inability states in application to determining the reliability of these systems. Polish Maritime Research. 2013, No 4(80), vol. 20, pp. 18 – 24.
9. Girtler J.: The semi-Markov model of energy state changes of the main marine internal combustion engine and method for evaluating its operation during ships voyage. Polish Maritime Research. 2011, No 4, vol. 18, 2011, s. 36-42.
10. Girtler J.: Identification of damages of tribological associations in crankshaft and piston systems of two-stroke internal combustion engines used as main propulsion engines used as main propulsion I sea-going vessels and proposal of probabilistic description of loads as causes of these damages. Polish Maritime Research. 2015, No 86, vol. 22, pp. 44 – 54.
11. Girtler J.: Features of load and wear of main propulsion devices on sea-going ships with piston combustion engines and their impact on changes in technical states of the systems. Polish Maritime Research 2017, No 4(93), vol 24, s. 57-68.
12. Girtler J.: A method for evaluating theoretical and real operation of diesel engines in energy conversion formulation taking into account their operating indices. Polish Maritime Research. 2011, No. 3(70), vol. 18, s. 31-36.
13. Grabski F.: Teoria semi-markowskich procesów eksploatacji obiektów technicznych. ZN AMW nr 75A, Gdynia 1982.
14. Korczewski Z.: Endoskopia silników okrętowych. Wyd. Akad. AMW, Gdynia 2008,
15. Korczewski Z.: Diagnostyka eksploatacyjna silników okrętowych. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2017.
16. Niziński S.: Diagnostyka obiektów technicznych. WiZP ITE, Radom 2002.
17. Piotrowski I., Witkowski K.: Eksploatacja okrętowych silników spalinowych. AM, Gdynia 2002.
18. Urbański P.: Podstawy napędu statków. Fundacja rozwoju AMW w Gdyni, Gdynia 2005.
19. Wajand J.A.: Silniki o zapłonie samoczynnym. WNT, Warszawa 1988.
20. Włodarski J.K.: Stany eksploatacyjne okrętowych silników spalinowych. WSM, Gdynia 1998.
21. Wojnowski W.: Okrętowe siłowni spalinowe. Cz. I. Wyd. AMW, Gdynia 1998.

