

Prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler, prof. zw. PG
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych
Politechnika Gdańska
Ul. G. Narutowicza nr 11/12, 80-233 Gdańsk, Polska
E-mail: jqirtl@pg.gda.pl
Mgr inż. Marek Ślęzak
Przemysłowy Instytut Motoryzacji
Ul. Jagiellońska nr 55, 03-301 Warszawa, Polska
E-mail: m.slezak@pimot.org.pl

Model stochastyczny czterostanowy zmian stanów niezawodnościowych samochodu

Słowa kluczowe: niezawodność, proces semi-Markowa, samochód

Streszczenie: W artykule scharakteryzowano ogólnie własności procesów semimarkowskich i uzasadniono możliwości ich zastosowania do określenia niezawodności samochodów i innych pojazdów drogowych. Przedstawiono formalny opis procesu zmian stanów technicznych samochodów uznanych za stany niezawodnościowe oraz model tego procesu w postaci jednowymiarowego procesu stochastycznego. Wartościami tego procesu są występujące w czasie eksploatacji stany techniczne samochodów, mające istotne znaczenie praktyczne. Przyjęto czterostanowy zbiór stanów o następującej interpretacji: stan zdatności pełnej (całkowitej), stan zdatności częściowej (niepełnej, niecałkowitej), stan niepełnej zdatności zadaniowej i stan niezdatności pełnej (całkowitej). Na podstawie przyjętego rozkładu początkowego i opracowanej macierzy funkcyjnej został określony rozkład graniczny procesu zmian stanów technicznych (niezawodnościowych) samochodu. Prawdopodobieństwo istnienia stanu zdatności pełnej (całkowitej) samochodu zostało uznane za miarę jego niezawodności w długim okresie czasu eksploatacji. Wskazano też na możliwość określenia niezawodności samochodu w formie prawdopodobieństwa, w którym uwzględniony został przypadek wykonania zadania przez samochód także wtedy, gdy znajduje się on w stanie zdatności częściowej.

1. Wprowadzenie

W artykule [12] przedstawiony został jedenastostanowy model niezawodnościowy samochodu osobowego, w którym wyróżniono stan zdatności samochodu i dziesięć stanów niezdatności, które pojawiają się wtedy, gdy zostanie uszkodzony któryś z zespołów funkcjonalnych samochodu. W tych rozważaniach ustalono, że będą to następujące zespoły funkcyjne: 1) silnik z układami zasilania czynnikami energetycznymi (paliwem, olejem smarowym i cieczą chłodzącą), 2) sprzęgło, 3) skrzynia biegów, 4) wał napędowy, 5) most napędowy, 6) zespół kierowniczy z zawieszeniem, 7) zespół hamulcowy, 8) zespół urządzeń elektrycznych, 9) nadwozie wraz z podwoziem, 10) zespół urządzeń kontrolno-pomiarowych. Istotnym walorem tego modelu jest to, że odzwierciedla on szeregową strukturę niezawodnościową wspomnianego rodzaju samochodu i jest rezultatem zastosowania alternatywnej klasyfikacji jego stanów niezawodnościowych na stan zdatności s_0 oraz stany niezdatności s_i ($i = 1, 2, 3, \dots, 10$) tworzące zbiór stanów niezdatności S_n , czyli $S_n = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_{10}\}$. W praktyce eksploatacyjnej samochodów zarówno osobowych jak również dostawczych mogą być jednak istotne także stany częściowej zdatności, a więc stany o własnościach pośrednich między stanem zdatności i niezdatności a nawet może być istotna informacja, czy samochód jest w stanie pełnej zdatności. W takim przypadku niezawodność może być rozpatrywana podobnie jak w publikacji [11], w której podjęto zagadnienie

opracowania modelu procesu eksploatacji silników spalinowych no zapłonie samoczynnym. Do opracowania tego modelu została także zastosowana teoria procesów semimarkowskich jak w publikacji [12]. Jest to o tyle ważne a zarazem istotne, że silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym są stosowane w niektórych rodzajach samochodów zarówno osobowych jak też dostawczych i innych pojazdach (np. autobusach, itp.), stosowanych w transporcie drogowym. Proces pojawiania się poszczególnych stanów niezawodnościowych samochodów jest ściśle związany z ich stanem technicznym i należy do najważniejszych procesów zachodzących w fazie eksploatacji samochodów. Proces ten tworzą kolejno następujące po sobie i powiązane przyczynowo w czasie stany techniczne wspomnianych samochodów. Oczywiście jest, że przebieg tego procesu powinien być racjonalny, czyli taki, który powinien wynikać z przyjętego kryterium optymalizacyjnego, np. wartości oczekiwanej kosztów eksploatacji danego rodzaju samochodów (co jest ważne w przypadku samochodów osobowych i dostawczych) bądź współczynnika ich gotowości do uruchomienia w dowolnej chwili (co ma szczególne znaczenie w przypadku karet pogotowia, wozów strażackich, czy też radiowozów policyjnych). W przypadku karet pogotowia, wozów strażackich, jak również radiowozów policyjnych, w każdej takiej chwili może być nagle zlecone zadanie, do którego wykonania niezbędne jest natychmiastowe uruchomienie silników i poprawne (niezawodne) działanie także wszystkich innych urządzeń tych samochodów [8, 10]. Istotne znaczenie dla realizacji racjonalnej eksploatacji różnych rodzajów samochodów mają informacje dotyczące ich niezawodności. Jednym z najważniejszych wskaźników charakteryzujących niezawodność samochodów jest prawdopodobieństwo poprawnego ich działania. Do rozwiązywania wielu problemów z dotyczących niezawodności różnych urządzeń, stosowana jest coraz częściej i z powodzeniem teoria procesów semi-Markowa. Teoria ta może mieć również zastosowanie w przypadku rozwiązywania podobnych problemów związanych z niezawodnością samochodów [2, 12]. Z tego też powodu w tym artykule został zaproponowany semimarkowski model niezawodnościowy dowolnego samochodu o czterostanowym zbiorze stanów niezawodnościowych, których interpretacja została przedstawiona w punkcie 2 niniejszego, artykułu.

Procesy semi-Markowa są procesami stochastycznymi o szczególnych właściwościach. W publikacjach dotyczących procesów semimarkowskich są różne definicje procesu semi-Markowa, które cechują odmienne zakresy ogólności i ścisłości. Dla potrzeb modelowania procesu pojawiania się stanów technicznych jako niezawodnościowych samochodów, proces semimarkowski (rodzina zmiennych losowych) $\{W(t): t \geq 0\}$, może być definiowany za pomocą tak zwanego jednorodnego markowskiego procesu odnowy [1, 3, 13, 14, 17].

Z definicji procesu semimarkowskiego wynika, że jest on procesem stochastycznym o dyskretnym zbiorze stanów, a jego realizacje są funkcjami stałymi w poszczególnych przedziałach (funkcje te o jednakowych wartościach w przedziałach czasu eksploatacji są zmiennymi losowymi), prawostronnie ciągłymi. Z definicji tej wynika również to, że proces ten jest określony wtedy, gdy znany jest jego rozkład początkowy $P_i = P\{Y(0) = s_i\}$ oraz macierz funkcyjna $\mathbf{Q}(t) = [Q_{ij}]$, której elementami są prawdopodobieństwa przejścia procesu ze stanu „ s_i ” do stanu „ s_j ”, w czasie nie większym niż t ($i \neq j$; $i, j = 1, 2, \dots, k$), będąc niemalejącymi funkcjami zmiennej t , oznaczanymi symbolem $Q_{ij}(t)$ [4, 10].

Semimarkowski model dowolnego procesu rzeczywistego można skonstruować tylko wtedy, gdy da się określić stany tego procesu w taki sposób, aby czas trwania stanu istniejącego w chwili τ_n oraz stan możliwy do uzyskania w chwili τ_{n+1} nie zależał stochastycznie od stanów, które zaszły wcześniej i przedziałów czasu trwania tych stanów.

Skonstruowanie semimarkowskiego modelu $\{W(t): t \geq 0\}$ rzeczywistego procesu zmian stanów technicznych jako niezawodnościowych dowolnego samochodu jest warunkiem

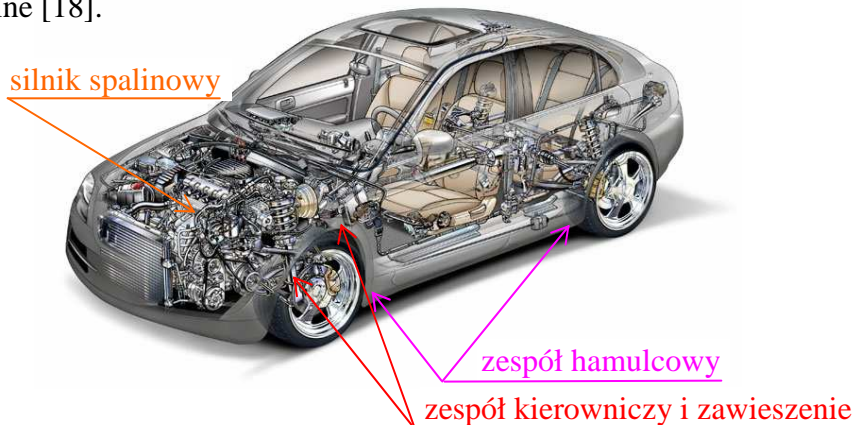
koniecznym zastosowania teorii procesów semimarkowskich. Modele te cechuje to, że [5, 7, 8, 13, 14]:

- 1) spełniony jest warunek Markowa, aby ewolucja w przyszłości stanu dowolnego samochodu jako obiektu badań (procesu zmian stanów niezawodnościowych w fazie eksploatacji samochodu), dla którego został zbudowany semimarkowski model, zależała tylko od jego stanu w danej chwili a nie od funkcjonowania tegoż samochodu w przeszłości, a więc aby *przyszłość* tego samochodu nie zależała od jego *przeszłości* tylko od *teraźniejszości*;
- 2) zmienne losowe T_i (oznaczające czas trwania stanu s_i niezależnie jaki stan nastąpi po nim) oraz T_{ij} (oznaczające czas trwania stanu „ s_j ” pod warunkiem, że następnym stanem tego procesu będzie stan „ s_j ”) mają rozkłady inne niż wykładnicze.

Zatem w modelowaniu, które ma doprowadzić do opracowania semimarkowskiego modelu procesu zmian stanów technicznych jako niezawodnościowych samochodów powinna być uwzględniona analiza zmian stanów rzeczywistego procesu, czyli zmian stanów niezawodnościowych zachodzących w fazie eksploatacji wspomnianych samochodów.

2. Sformułowanie problemu niezawodności samochodu

Samochód osobowy, podobnie jak każdy inny współczesny pojazd drogowy jest złożonym systemem technicznym (rys. 1), składającym się z wielu elementów o określonej trwałości oraz niezawodności, z których utworzono wspomniane we wstępie zespoły funkcjonalne [18].



Rys. 1. Ogólny widok samochodu osobowego z wyszczególnieniem przykładowych jego zespołów funkcjonalnych, najistotniejszych dla bezpieczeństwa jego ruchu

Samochód może działać poprawnie (niezawodnie), jeżeli wszystkie elementy samochodu i tym samym jego zespoły funkcjonalne działają niezawodnie podczas jazdy. Jednak działanie takie, w czasie eksploatacji samochodu nie jest zdarzeniem pewnym, lecz prawdopodobnym. Prawdopodobieństwo poprawnego działania samochodu ulega zmniejszeniu z upływem czasu. Znajomość tego prawdopodobieństwa jest istotna zwłaszcza po upływie dłuższego czasu jego eksploatacji. Umożliwia to racjonalne planowanie obsługi profilaktycznych samochodów. Znając bowiem prawdopodobieństwo poprawnego działania samochodu i koszty wynikające z jego uszkodzenia można określić ryzyko nie wykonania zadania transportowego. Prawdopodobieństwo poprawnego (niezawodnego) działania samochodu w dłuższym okresie jego eksploatacji (teoretycznie przy $t \rightarrow \infty$) można wyznaczyć stosunkowo łatwo w przypadku opracowania semimarkowskiego modelu niezawodnościowego tego samochodu [5, 6, 9, 12, 13, 14]. Model taki odzwierciedla zmiany stanów technicznych samochodu, które są zarazem jego stanami niezawodnościowymi.

3. Semimarkowski model zmian stanów technicznych samochodów jako stanów niezawodnościowych

W przypadku każdego samochodu, podobnie jak dowolnego silnika o zapłonie samoczynnym, jego proces zmian stanów technicznych jest procesem, w którym przedziały czasu trwania każdego jego stanu są zmiennymi losowymi. Poszczególne realizacje tych zmiennych losowych zależą od wielu czynników, między innymi od zużycia elementów zespołów funkcjonalnych wspomnianych samochodów. W przypadku wszystkich rodzajów samochodów zużycie ich elementów jest słabo skorelowane z czasem [4, 7, 11, 16, 19]. Spostrzeżenie to umożliwiła prognozowanie stanu technicznego wspomnianych samochodów z uwzględnieniem jedynie ich aktualnego stanu z pominięciem stanów, które zaistniały wcześniej. Oznacza to, że do opracowania modelu niezawodnościowego samochodów można zastosować teorię procesów semi-Markowa i tym samym uzyskać bardziej adekwatny probabilistyczny model matematyczny potrzebny do określenia wskaźników niezawodnościowych samochodów, w tym przede wszystkim prawdopodobieństwa ich poprawnego działania.

Z rozważań przedstawionych we wstępie artykułu wynika, że modelami procesu zmian stanów niezawodnościowych samochodów $\{W(t): t \geq 0\}$ mogą być procesy stochastyczne o dyskretnym zbiorze stanów i ciągłym czasie trwania wyróżnionych stanów technicznych samochodów. Rozpatrywane modele procesu zmian stanów technicznych samochodów, podobnie jak i innych urządzeń (obiektów technicznych), w ujęciu matematycznym są funkcjami odwzorowującymi zbiór chwil T w zbiór stanów technicznych S . Zatem opracowanie takiego modelu wymaga ustalenia skończonego zbioru zmian stanów niezawodnościowych (technicznych) tych samochodów. Przyjmując za kryterium wyodrębniania stanów, przydatność samochodów do wykonywania zadań, można wyróżnić następujący zbiór klas (podzbiorów) stanów technicznych, nazywając te klasy wprost stanami (mający istotne znaczenie w praktyce eksploatacyjnej), które są jednocześnie stanami niezawodnościowymi samochodu [5, 7, 14]:

$$S = \{s_i; i = 1, 2, 3, 4\}. \quad (1)$$

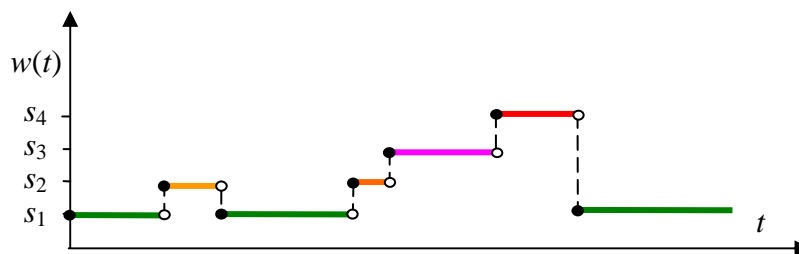
Poszczególne stany s_i ($i = 1, 2, 3, 4$) należące do zbioru S mają następującą interpretację:

- s_1 – stan zdatności pełnej (całkowitej), czyli taki stan techniczny dowolnego samochodu, przy którym samochód może być użytkowany w całym zakresie jego możliwości, do którego został przysposobiony w fazie projektowania i wytwarzania,
- s_2 – stan zdatności częściowej (niepełnej, niecałkowitej), czyli taki stan techniczny samochodu, który może być użytkowany w całym zakresie jego możliwości, jak w stanie s_1 , ale przy znacznym zwiększeniu zużycia paliwa wskutek nadmiernego zużycia silnika bądź przy zwiększonej drodze hamowania wskutek zużycia zespołu (układu) hamulcowego (rys. 1),
- s_3 – stan niepełnej zdatności zadaniowej, czyli taki stan techniczny samochodu, który umożliwia wykonanie tylko niektórych zadań, na przykład taki stan, który wynika z takiego zużycia silnika spalinowego, które uniemożliwia uzyskanie większych prędkości samochodu (rys. 1),
- s_4 – stan niezdatności pełnej (całkowitej), czyli taki stan techniczny samochodu, który uniemożliwia jego użytkowanie wskutek uszkodzenia silnika, zespołu (układu) hamulcowego, zespołu (układu) kierowniczego, zawieszenia, itd. (rys. 1).

Stan niezdatności pełnej, inaczej całkowitej (s_4), jest rezultatem zaistnienia zdarzenia losowego, które nazywane jest uszkodzeniem całkowitym. Do takich zdarzeń można

przykładowo zaliczyć [10, 18]: zatarcie tłoków w cylindrach silnika powodujące unieruchomienie tłoków i wału korbowego, pęknięcie przewodu powodującego wyciek płynu hamulcowego, odkształcenie zwrotnicy lub wahaczy przedniego zawieszenia, wskutek czego nie można utrzymać kierunku ruchu samochodu, ścięcie klina na stożku półosi powodujące brak napędu na koła, itp. Natomiast stany zdadności częściowej (s_2) oraz stan niepełnej zdadności zadaniowej (s_3) są rezultatami zaistnienia zdarzeń losowych, nazywanych uszkodzeniami częściowymi. Takie uszkodzenia są często nazywane usterkami, bądź niesprawnościami. Można do nich zaliczyć takie zdarzenia jak [10, 15, 18]: znaczne zużycie układu wtryskowego, tłoków z pierścieniami, krzywek wału rozrządu, uszkodzenie termostatu, dziura w tłumiku, pęknięcie sprężyn tłumika drgań skrętnych powodujące hałaśliwą pracę włączonego sprzęgła, znaczne zużycie przekładni kierowniczej powodujące nadmierny ruch jałowy koła kierownicy, itd.

Elementy zbioru $S = \{s_i; i = 1, 2, 3, 4\}$ są wartościami procesu $\{W(t): t \geq 0\}$, który stanowią kolejno po sobie następujące stany $s_i \in S$, pozostające (jak wiadomo) między sobą w związku przyczynowym. Przykładowa realizacja takiego procesu została przedstawiona na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowa realizacja procesu $\{W(t): t \geq 0\}$, obrazująca zmiany stanów niezawodnościowych samochodu

Rozróżnianie stanów $s_i \in S$ ($i = 1, 2, 3, 4$), w przypadku samochodów jest o tyle istotne, że niezwykle ważne jest ich użytkowanie wtedy, gdy znajdują się one w stanie s_1 ewentualnie, jeśli są w stanie s_2 . W tym drugim przypadku samochody te powinny być jednak użytkowane w możliwie najkrótszym czasie, po którym należy poddać je odnowie.

Proces ten jest w pełni określony, jeżeli jest znana jego macierz funkcyjna [6, 9, 13]

$$Q(t) = [Q_{ij}(t)] \quad (2)$$

przy czym niezerowe jej elementy mają następującą interpretację:

$$Q_{ij}(t) = P\{W(\tau_{n+1}) = s_j, \tau_{n+1} - \tau_n < t \mid W(\tau_n) = s_i\}; s_i, s_j \in S; i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j$$

oraz gdy dany jest rozkład początkowy tego procesu

$$p_i = P\{W(0) = s_i\}, s_i \in S; i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

W zależności od strategii utrzymywania samochodów w stanie umożliwiającym wykonanie zadań, do których zostały one przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania, mogą być brane pod uwagę różne warianty realizacji procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ [11]. W przypadku samochodów zwłaszcza osobowych, także w innych pojazdach przysposobionych do przewozu ludzi najistotniejszy jest, ze względu na bezpieczeństwo ich ruchu, wariant, w którym rozkład początkowy procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ jest następujący:

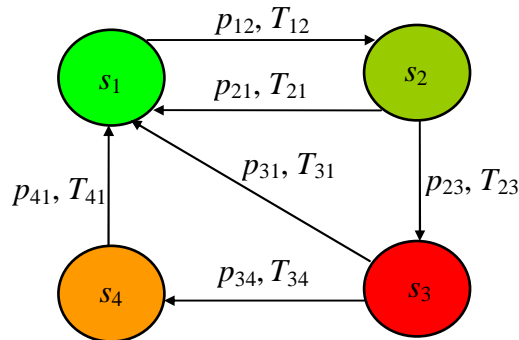
$$p_1 = P\{W(0) = s_1\} = 1, \quad p_i = P\{W(0) = s_i\} = 0 \quad \text{dla } i = 2, 3, 4 \quad (4)$$

natomiast jego macierz funkcyjna ma taką postać:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}(t) & 0 & 0 \\ Q_{21}(t) & 0 & Q_{23}(t) & 0 \\ Q_{31}(t) & 0 & 0 & Q_{34}(t) \\ Q_{41}(t) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

W tym wariantcie przyjmuje się, że użytkowanie samochodu rozpoczynane jest wtedy, gdy znajduje się on w stanie pełnej zdatności (s_1). W przypadku, gdy znajdzie się on w stanie zdatności częściowej (s_2) jest użytkowany przez taki czas, który umożliwi wykonanie wcześniej pojętego zadania transportowego. Przejście samochodu ze stanu s_1 do stanu s_2 jest zdarzeniem losowym, które zachodzi z prawdopodobieństwem p_{12} , po upływie czasu T_{12} , który jest zmienną losową. Stan s_2 trwa przez czas T_2 , który jest także zmienną losową. Po wykonaniu tego zadania samochód powinien być poddany odnowie przez wykonanie odpowiedniej obsługi technicznej. W przeciwnym razie, gdy samochód będzie nadal użytkowany pojawi się stan niepełnej zdatności zadaniowej (s_3), który może uniemożliwić wykonanie zadania. Samochód będący w stanie s_3 powinien zostać odnowiony tak, aby został mu przywrócony stan s_1 . Wynika to z tego, że w eksploatacji samochodów istotna jest zasada, że ich odnowa powinna być pełna a nie częściowa. Z tego powodu zerowe są prawdopodobieństwa przejścia p_{32} , p_{42} i p_{43} (czyli $p_{32} = 0$, $p_{42} = 0$ i $p_{43} = 0$), co zostało uwzględnione w macierzy funkcyjnej (5) [11].

Macierz (5) odzwierciedla zmiany stanów $s_i \in S(i = 1, 2, 3, 4)$ procesu $\{W(t): t \geq 0\}$. Zgodnie z tą macierzą zmiany tych stanów zachodzą według grafu przejść, który został przedstawiony na rys. 3.



Rys.3. Graf zmian stanów $s_i \in S(i = 1, 2, 3, 4)$ procesu $\{W(t): t \geq 0\}$.

Z teorii procesów semimarkowskich wynika [10, 13, 14], że prawdopodobieństwa zmian stanów dowolnego obiektu technicznego, więc także samochodu, określone są przez prawdopodobieństwa p_{ij} włożonego łańcucha Markowa $\{W(\tau_n): n = 0, 1, 2, \dots\}$ w proces $\{W(t): t \geq 0\}$. Prawdopodobieństwa te tworzą następującą macierz prawdopodobieństw przejścia:

$$P = [p_{ij}; i, j = 1, 2, 3, 4] \quad (6)$$

przy czym: $p_{ij} = P\{W(\tau_{n+1}) = s_j \mid W(\tau_n) = s_i\} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{ij}(t)$

Macierz (6) umożliwia wyznaczenie rozkładu granicznego procesu $\{W(t): t \geq 0\}$, którego ogólna interpretacja jest następująca.

$$P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t) = s_j\} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t) = s_j / W(0) = s_i\} \quad (7)$$

Macierz ta, jak wynika z macierzy (5), ma postać:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} & 0 \\ p_{31} & 0 & 0 & p_{34} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Z twierdzenia zamieszczonego w pracy [14] na s.40 wynika, że istnieje rozkład graniczny (7) rozpatrywanego procesu, który jest określony wzorem [10, 12, 13]

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

przy czym rozkład graniczny $\pi_j (j = 1, 2, 3, 4)$ łańcucha Markowa $\{W(\tau_n): n = 0, 1, 2, \dots\}$, włożonego w proces $\{W(t): t \geq 0\}$, spełnia następujące równania:

$$\left. \begin{aligned} & [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} & 0 \\ p_{31} & 0 & 0 & p_{34} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4] \\ & \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Po rozwiązaniu układu równań (10) i korzystając z zależności (9) uzyskuje się następujące wzory:

$$P_1 = E(T_1)M^{-1}, P_2 = E(T_2)M^{-1}, P_3 = p_{23}E(T_3)M^{-1}, P_4 = p_{23}p_{34}E(T_4)M^{-1} \quad (11)$$

przy czym: $M = E(T_1) + E(T_2) + p_{23}E(T_3) + p_{23}p_{34}E(T_4)$,
gdzie:

$E(T_j)$ – wartość oczekiwana czasu trwania stanu $s_j \in S (j = 1, 2, 3, 4)$;

p_{ij} – prawdopodobieństwo przejścia procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ ze stanu s_i do stanu $s_j (s_i, s_j \in S; i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j)$,

P_j – prawdopodobieństwa przebywania procesu $\{W(t): t \geq 0\}$ w stanie $s_j (j = 1, 2, 3, 4)$.

Poszczególne prawdopodobieństwa $P_j (j = 1, 2, 3, 4)$, określone wzorami (11), mają następującą interpretację:

$$P_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t) = s_1\}, P_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t) = s_2\}, P_3 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t) = s_3\}, P_4 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{W(t) = s_4\}$$

W przedstawionym wariantcie zmian wyróżnionych stanów niezawodnościowych dowolnego rodzaju samochodów przewidziane są sytuacje, w których użytkownik może zaryzykować podjęcie się wykonania zadania przy stanie s_2 (stan zdatności częściowej) danego samochodu a nawet zaryzykować dokończenie podjętego wcześniej zadania wtedy, gdy znajduje się on już w stanie s_3 (stan niepełnej zdadności zadaniowej). Za miarę niezawodności samochodu można przyjąć prawdopodobieństwo P_1 , ponieważ określa ono możliwość przebywania samochodu w stanie s_1 w dłuższym okresie jego eksploatacji, a więc w stanie, który umożliwia użytkowanie samochodu w całym zakresie jego możliwości. W przypadku, gdy możliwe jest wykonanie zadania przez samochód wtedy, gdy znajduje się on w stanie s_2 , to jego niezawodność można określić prawdopodobieństwem $P = P_1 + P_2$. Prawdopodobieństwa P_3 oraz P_4 można i należy interpretować jako prawdopodobieństwa zdarzenia, że samochód nie wykona zadania, jeżeli wcześniej był w stanie długotrwałej eksploatacji.

4. Podsumowanie

Z przedstawionych rozważań wynika, że proces zmian stanów technicznych (niezawodnościowych) samochodów można modelować jako proces stochastyczny dyskretny w stanach i ciągły w czasie, czterostanowy o następującej ich interpretacji: s_1 – stan zdadności pełnej (całkowitej), s_2 – stan zdadności częściowej (niepełnej, niecałkowitej), s_3 – stan niezadadności zadaniowej, s_4 – stan niezadadności pełnej (całkowitej).

Stan techniczny każdego samochodu zmienia się w sposób ciągły i z tego powodu można rozpatrywać zbiory przeliczalne ich stanów, a więc zbiory składające się z nieskończonej liczby elementarnych stanów technicznych. Rozpoznawanie wszystkich stanów technicznych samochodów nie jest możliwe ani celowe, zarówno ze względów technicznych, jak i ekonomicznych. Zachodzi zatem potrzeba podziału tego zbioru ich stanów na niewielką liczbę klas (podzbiorów) stanów technicznych. Przyjmując za kryterium podziału wspomnianego zbioru stanów przydatność samochodów do wykonywania zadań transportowych, można wyróżnić, jak już wspomniano klasy (podzbiory) stanów technicznych tworzących zbiór stanów $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$, które można uważać za zbiór wartości procesu stochastycznego $\{W(t): t \in T\}$ o realizacjach, które są przedziałami stałe i prawostronnie ciągłe. Proces ten jest więc w ujęciu matematycznym funkcją odwzorowującą zbiór chwil T w zbiór stanów technicznych S .

Procesy semimarkowskie są wygodnymi w badaniach modelami rzeczywistych procesów eksploatacji różnych obiektów technicznych. Mogą więc być przydatne do analizy niezawodności samochodów. Wynika to z tego, że skonstruowanie semimarkowskiego modelu procesu eksploatacji dowolnego rodzaju obiektu technicznego umożliwia łatwe (dzięki istniejącej teorii procesów semimarkowskich) wyznaczenie charakterystyk probabilistycznych samochodów.

Procesy semimarkowskie jako modele rzeczywistych procesów zmian stanów obiektów technicznych 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 są zmiennymi losowymi o rozkładach wykładniczych.

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 stanów dla tego rodzaju modeli procesów rzeczywistych.

Literatura

1. Benjamin J.R, Cornell C.A. Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. Warszawa: WNT, 1977. Dane o oryginale: Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers. Copyright by McGraw-Hill, Inc., 1970
2. Cempel C, Natke H. G, Yao J.P.T. Symptom reliability and hazard for systems condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2000; 14(3): 495-505.
3. Cinlar E. Markov renewal theory: a survey. *Mag. Sciences* 1975; 7: 727-752.
4. Gercbach I.B, Kordonski Ch.B. Modele niezawodnościowe obiektów technicznych. Warszawa: WNT, 1968.
5. Girtler J. Stochastyczny model procesu eksploatacji okrętowego silnika spalinowego. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 1989; 2: 79-88.
6. Girtler J. Możliwości zastosowania i przydatność procesów semimarkowskich jako modeli procesów eksploatacji maszyn. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 1996; 3: 419-428.
7. Girtler J. Diagnostyka jako warunek sterowania eksploatacją okrętowych silników spalinowych. Szczecin: WSM, 1997.
8. Girtler J.: Sterowanie procesem eksploatacji okrętowych silników spalinowych na podstawie diagnostycznego modelu decyzyjnego. Gdynia: AMW, 1989.
9. Girtler J. Physical aspects of application and usefulness of semi-Markovian processes for modeling the processes occurring in operational phase of technical objects. *Polish Maritime Research* 2004; 3: 7-12.
10. Girtler J. Operation of diesel engines as the index of their reliability and safety. *Journal of KONES. International Combustion Engines* 2003; 10(1-2): 17-24.
11. Girtler J. Semi-Markov model of diesel engines' operating process. *The Archives of Automotive Engineering (Archiwum Motoryzacji)* 2004; 3:165-196.
12. Girtler J, Ślęzak M. Application of the theory of semi-Markov processes to the development of a reliability model of an automotive vehicle. *The Archives of Automotive Engineering (Archiwum Motoryzacji)* 2012; 56(2): 15-27.
13. Grabski F. Teoria semi-markowskich procesów eksploatacji obiektów technicznych. Gdynia: AMW, 1982.
14. Grabski F. Semi-markowskie modele niezawodności i eksploatacji. Warszawa: IBS PAN, 2002.
15. Korczewski Z. Entropy function application In the selection process of diagnostic parameter of marine diesel and gas turbine engines. *Polish Maritime Research* 2010; 17(2): 29-35.
16. Niewczas A. Podstawy stochastycznego modelu zużywania poprzez tarcie w zagadnieniach trwałości elementów maszyn. Radom: Politechnika Radomska, 1989.
17. Pyke R. Markov renewal processes with finitely many states. *Ann. Math. Statist.* 1961; 32(4): 1243-1259.
18. Trzeciak K. Diagnostyka samochodów osobowych. Warszawa: WKiŁ, 1991.
19. Zwierzycki W. Prognozowanie niezawodności zużywających się elementów maszyn. Radom: ITE, 2000.