

Karol Andrzejczak

Politechnika Poznańska

MIARY BEZPIECZEŃSTWA I ZAGROŻENIA ŚRODKA TRANSPORTU

Rękopis dostarczono, maj 2013

Streszczenie: W artykule przedstawione są miary bezpieczeństwa i zagrożenia stanu zdatności środka transportu, w parametrycznym modelowaniu losowych zdarzeń. Zdarzenia te są niebezpieczne i zagrażają funkcjonowaniu środka transportu z pewnej ich zbiorowości. Środek transportu jest rozważany w układzie człowiek - maszyna - otoczenie (C-M-O). Najpierw wprowadzone są warunkowe miary zagrożenia i bezpieczeństwa użytkowanego środka transportu oraz związki między nimi. Następnie zastosowano warunkowe prawdopodobieństwa zdarzeń do zbudowania modelu rywalizujących zagrożeń (CRM). Jeśli wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych są niezależne, to przedstawiony model CRM można zastosować do wszystkich, znanych z teorii niezawodności, rozkładów prawdopodobieństwa. Na koniec publikacji podane są dwa przykłady środków transportu, dla których wyznaczona jest warunkowa funkcja utraty zdatności. Przedstawiony model CRM można zastosować w planowaniu działań profilaktycznych, zwiększających poziom bezpieczeństwa użytkowania środka transportu w układzie C-M-O.

Słowa kluczowe: poziom bezpieczeństwa, warunkowa funkcja hazardu, środek transportu

1. WPROWADZENIE

W czasie użytkowania technicznych środków transportu, takich jak: pojazdy drogowe, szynowe, statki powietrzne, kosmiczne, morskie występują różne zdarzenia. Urządzenia transportowe ulegają uszkodzeniom, skutkami których są przerwy w wykonywaniu zadań, obniżenie poziomu bezpieczeństwa lub wypadki. Uszkodzone urządzenia transportowe przechodzą do stanu obsługiwanego, gdzie podlegają naprawie. Występujące zdarzenia w czasie użytkowania urządzeń transportowych są rejestrowane, a w oparciu o przetworzone informacje estymowane są miary niezawodności, bezpieczeństwa i efektywności. W oparciu o wyznaczone miary dokonywane jest sterowanie użytkowaniem urządzeń transportowych [12]. W wielu publikacjach można znaleźć próbę odpowiedzi na pytanie: *jak opisać ryzyko i jak je analizować?* W opisie ryzyka według Avena [3] należy brać pod uwagę przyszłe zdarzenia oraz konsekwencje tych zdarzeń. Ponieważ wcześniej nie wiadomo, czy te zdarzenia zajdą czy nie, więc zdarzeniom tym towarzyszy niepewność (ang. *uncertainty*). Miarą niepewności są prawdopodobieństwa tych zdarzeń.

Pojawia się więc problem wyznaczania tych prawdopodobieństw. W przypadku zdarzeń często zachodzących stosowane są metody statystyki matematycznej, natomiast jeśli pewne zdarzenia zachodzą bardzo rzadko lub jeszcze nigdy nie zaszły, to w praktyce prawdopodobieństwa tych zdarzeń określane są subiektywnie w oparciu o wiedzę ekspertów. W określeniu subiektywnego prawdopodobieństwa niebezpiecznych zdarzeń pomocna jest analiza ich przyczyn. Przykład zastosowania takiego podejścia podał Grabski w [8].

Świadomość różnorodnych zagrożeń i skutków, jakie niosą ze sobą wytwory cywilizacji technicznej, jest warunkiem koniecznym przeciwdziałania im, nie tylko w fazie eksploatacji tych wytworów, ale już w fazie formułowania potrzeby ich projektowania. Badania obejmujące proces uszkodzania obiektu technicznego i wywoływanych skutków są ważne zarówno ze względu na bezpieczeństwo ich użytkowników lub operatorów, jak i ponoszonych strat ekonomicznych oraz zagrożeń środowiskowych.

W artykule tym opracowane są miary gotowości operacyjnej na potrzeby badania poziomu bezpieczeństwa środków transportu (ŚT), w układzie zwanym „człowiek – maszyna – otoczenie” (C-M-O), użytkowanych w warunkach eksploatacyjnych, w których występują zidentyfikowane zagrożenia ich stanu zdadności.

2. ZDARZENIA NIEBEZPIECZNE

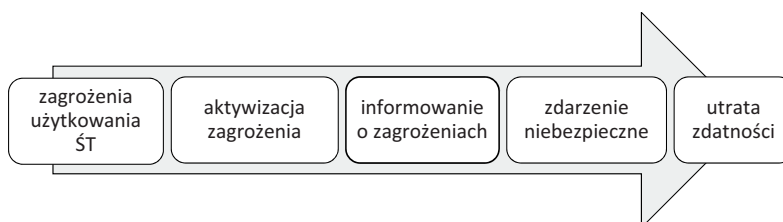
Zdarzenia niebezpieczne są zwykle zdarzeniami losowymi, trudno przewidywalnymi. Konsekwencje niebezpiecznych zdarzeń prowadzą do szkód i strat. W publikacji tej przyjęte jest, że w wyniku zajścia zdarzenia niebezpiecznego następuje utrata stanu zdadności ŚT w układzie C-M-O.

Z pojęciami zdarzenia niebezpiecznego i strat związane jest pojęcie ryzyka. Ryzyko ma w literaturze wiele określeń [14], [16], [9]. Bezpieczeństwu i zarządzaniem ryzykiem w technice poświęcona jest monografia [18]. Systematyce i metodom zarządzania ryzykiem w obszarze inżynierii drogowej poświęcona jest monografia [10]. W ogólnym sensie, przez akceptację ryzyka rozumie się gotowość poniesienia konsekwencji określonych decyzji, podejmowanych w warunkach niepewności co do wystąpienia i ewentualnego uniknięcia spodziewanych szkód i strat [17].

Niezwykle istotnym działaniem w zarządzaniu ryzykiem jest komunikowanie o ryzyku [10]. Jest to dwukierunkowy proces, który polega przede wszystkim na informowaniu partnerów i opinii publicznej o ocenie ryzyka, wysłuchaniu reakcji ludzi i ich obaw, wyjaśnianiu wszelkiej niepewności oraz włączaniu partnerów do procedury decyzyjnej. Najnowszym elementem komunikowania o ryzyku są mapy ryzyka i zagrożenia na drogach w wybranych krajach, w tym w Polsce (od roku 2009) w ramach Programu EuroRAP [7]. Przewidywane jest przejście do publikowania także map zagrożenia na drogach, z zastosowaniem ich w systemach nawigacji pojazdowej oraz wykorzystanie mediów i portali internetowych do prezentacji map zagrożeń i ryzyka [11].

Ogólny schemat utraty zdadności ŚT użytkowanego w warunkach eksploatacyjnych, w których występują określone zagrożenia jest przedstawiony na rys. 1. Największą wartość w przygotowywaniu decyzji dotyczących podejmowania działań obsługowych ŚT,

związanych z utrzymaniem lub odtwarzaniem jego stanu zdatności ma takie określenie miary ryzyka, które łączy wielkość straty z prawdopodobieństwem pojawienia się zdarzenia niebezpiecznego, w określonym horyzoncie czasowym. W pracy tej zainteresowanie dotyczy drugiego członu tego stwierdzenia, tj. prognozowania prawdopodobieństw pojawiania się zdarzeń niebezpiecznych, w procesie użytkowania ŚT w układzie C-M-O.



Rys. 1. Ogólny schemat utraty zdatności ŚT

Analiza zagrożeń utraty zdatności daje podstawy do przygotowania decyzji i podejmowania działań zapobiegających lub uodporniających na skutki zdarzeń niebezpiecznych, a tym samym podnoszących poziom bezpieczeństwa użytkowania ŚT. W analizie tej można zastosować metody FTA (analiza drzew niezdatności) i ETA (analiza drzew zdarzeń) stanowiące podstawę w konstrukcji struktury bezpieczeństwa systemu. Szerszy kontekst tych zagadnień jest przedstawiony w [15].

Eksploatację ŚT uważa się za podstawowy etap sprawdzania jego przydatności i spełniania oczekiwań społecznych. Współczesne pojazdy coraz częściej są wyposażane w układy automatycznej identyfikacji specjalnych cech AVI (ang. *Automatic Vehicle Identification*) w czasie ich użytkowania, w celu wykrywania zagrożeń stanu zdatności i informowania o nich. Interdyscyplinarne powiązanie problemów eksploatacji ŚT wyraźnie wskazuje na dominującą wśród nich rolę diagnostyki zarówno technicznej jak i użytkowej. W następnym punkcie opracowana jest metoda prognozowania przyczyny utraty zdatności ŚT użytkowanego w warunkach eksploatacyjnych, w których występują różne zagrożenia jego stanu zdatności. Przedstawiona metoda badania zagrożeń i gotowości operacyjnej ŚT stanowi specjalistyczne uzupełnienie metody HAZOP, (ang. *Hazard and Operability Study*).

3. MIARY BEZPIECZEŃSTWA I ZAGROŻENIA

Poruszana problematyka dotyczy modelowania zagrożeń gotowości operacyjnej ŚT w układzie C-M-O, w celu wyznaczenia prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niebezpiecznego. W proponowanej metodzie zastosowany jest tzw. model konkurujących zagrożeń (CRM – ang. *Competing Risks Model*), oparty na koncepcji intensywności przejść ze stanu zdatności do jednego spośród wielu identyfikowalnych i rozróżnialnych

stanów niezdatności, na skutek zajścia zdarzenia niebezpiecznego związanego z wyspecyfikowanym zagrożeniem. Inspiracją do opracowania miar bezpieczeństwa i zagrożenia na podstawie modelu CRM jest książka [13], w której rozwinięte są metody probabilistyczne mające szczególne zastosowania w biologii i medycynie. W przygotowaniu tej publikacji nawiązano do idei przedstawionych w pracach [1], [2], [5].

W czasie użytkowania ŚT, w warunkach w których aktywizują się zagrożenia Z , ŚT jest narażony na wystąpienie negatywnego zdarzenia, tj. zdarzenia niepożądanego lub wręcz niebezpiecznego. Zdarzenie to przerywa proces użytkowania ŚT. Zdarzeniem tym może być wypadek pojazdu, w wyniku którego nastąpi trwała lub czasowa utrata jego zdatości. Zagrożeniami, które można uznać za przyczynę wypadku mogą być: niesprawność pojazdu (np. układu hamulcowego lub oświetleniowego, niskie ciśnienie w oponie, itp.), przemęczenie kierowcy, nadmierna prędkość, brak oznakowania miejsca niebezpiecznego, złe warunki atmosferyczne, zniszczona droga.

Miarą użytkowania ŚT, w określonych warunkach eksploatacyjnych, w których aktywizują się zagrożenia Z jest rzeczywisty czas eksploatacji lub przebieg liczony od zera.

Modelem wystąpienia zdarzenia niebezpiecznego, w czasie użytkowania ŚT jest warunkowa nieujemna zmienna losowa T o wartościach rzeczywistych. Do wyznaczenia rozkładu tej zmiennej losowej korzysta się z danych historycznych, tj. rejestrów zdarzeń dotyczących jednorodnej zbiorowości ŚT, będącej przedmiotem badań. Zmienna losowa T jest czasem utrzymania gotowości operacyjnej ŚT, tj. czasem opisującym jego zdolność do realizacji zadań do których jest przeznaczony, w określonych warunkach eksploatacji.

Podstawową miarą tracenia gotowości operacyjnej – z powodu użytkowania ŚT w warunkach zagrażających Z i możliwości pojawienia się zdarzenia niebezpiecznego w okresie $(0, t)$ – jest dystrybuanta warunkowej zmiennej losowej T , tj. funkcja $F: \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$, zwana funkcją warunkowej zawodności $F(t|Z)$. Dziedzina funkcji zawodności ograniczona jest do \mathbb{R}_+ (symbol \mathbb{R}_+ oznacza zbiór liczb rzeczywistych nieujemnych).

Aby być zgodnym z normami Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej ISO w pracy przyjęte jest, że warunkowa dystrybuanta jest funkcją co najmniej prawostronnie ciągłą, tj. $F(t|Z) = \mathbb{P}(T \leq t|Z)$, gdzie \mathbb{P} jest miarą probabilistyczną indukowaną przez zmienną losową T .

Oprócz wymienionej warunkowej dystrybuanty inne odpowiedniki znanych z teorii niezawodności funkcji również charakteryzują rozkład zm. l. T . Są to:

- warunkowa funkcja przetrwania S (ang. *conditional survival function*),
- warunkowa funkcja hazardu h (ang. *conditional hazard function*),
- warunkowa funkcja prawdopodobieństwa lub warunkowa gęstość prawdopodobieństwa f , (ang. *conditional probability mass function* CPMF, *conditional probability density function* CPDF),
- warunkowa funkcja wiodąca (skumulowana warunkowa funkcja hazardu) Λ (ang. *cumulative conditional hazard function*).

Problem jaki ma być rozwiązany, to opracowanie metody służącej do wskazania zagrożenia, które stanie się przyczyną zdarzenia powodującego utratę zdatości ŚT. Zagrożenie uznaje się za przyczynę, jeśli zajdzie jakiegokolwiek zdarzenie niebezpieczne związane z tym zagrożeniem i doprowadzi do utraty zdatości ŚT. Z powodu losowości zdarzeń problem ten sprowadza się do prognozowania różnych scenariuszy zdarzeń.

Postawiony problem jest rozwiązywalny, jeśli można ustalić wszystkie zagrożenia, które aktywizują się w czasie użytkowania ŚT w układzie C-M-O. Na przykład nadmierna prędkość, zużyte opony pojazdu, brawurowa jazda kierowcy, przydrożne drzewa, itp. Niech $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ będzie zbiorem zagrożeń, na które narażony jest użytkowany ŚT. Do rozwiązania postawionego problemu opracowany jest model pierwszego losowego zdarzenia niebezpiecznego, powodującego utratę zdadności użytkowanego ŚT w układzie C-M-O. Za przyczynę niezdatności uznane jest zagrożenie związane z tym zdarzeniem. Model ten, ze względu na podobieństwo z modelem *competing risks model* (CRM) [13], stosowanym w naukach biomedycznych, nazwany jest *modelem konkurujących zagrożeń*.

Podstawową miarą poziomu bezpieczeństwa użytkowania ŚT – przez określony czas $(0, t)$ i w określonych warunkach eksploatacyjnych, w których występują zagrożenia Z – jest prawdopodobieństwo nie wystąpienia w tym czasie zdarzenia niebezpiecznego. Prawdopodobieństwo to jest miarą zdolności układu C-M-O do przetrwania zagrożeń, które w czasie użytkowania ŚT aktywizują się.

Niech T oznacza losowy czas zdadności ŚT użytkowanego w warunkach z zagrożeniami Z . Podstawową miarą poziomu bezpieczeństwa użytkowania ŚT jest warunkowa funkcja przetrwania $S: \mathbb{R}_+ \rightarrow [0, 1]$, zdefiniowana wzorem:

$$S(t|Z) \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{P}(T > t|Z) \quad (1)$$

Jeżeli funkcja S jest absolutnie ciągła i ma warunkową gęstość f , to ma przedstawienie całkowe:

$$S(t|Z) = \int_t^{\infty} f(u|Z) du, \quad t > 0 \quad (2)$$

Warunkowa funkcja hazardu (ang. *conditional hazard function*), w wersji bezwarunkowej podana w [6], zdefiniowana jest jako granica:

$$h(t|Z) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbb{P}(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t; Z)}{\Delta t} \quad (3)$$

Jeżeli czas zdadności T jest zmienną losową typu ciągłego i istnieje gęstość warunkowa f , to dla warunkowej funkcji hazardu zachodzą związki (w wersji bezwarunkowej podane, np. w (4)):

$$h(t|Z) = -\frac{d \ln S(t|Z)}{dt} = \frac{f(t|Z)}{S(t|Z)} \quad (4)$$

Interpretacja praktyczna warunkowej gęstości i warunkowej funkcji hazardu wynika z przybliżeń otrzymanych z rozwinięć (5), (6) tych funkcji w szereg Taylora

$$f(t|Z) \approx \frac{S(t|Z) - S(t + \Delta t|Z)}{\Delta t} \quad (5)$$

oraz

$$h(t|Z) \approx \frac{S(t|Z) - S(t + \Delta t|Z)}{S(t|Z)\Delta t} \quad (6)$$

Ze wzoru (5) wynika, że warunkowa gęstość prawdopodobieństwa przedstawia spadek poziomu bezpieczeństwa w małym przedziale czasowym o długości Δt , a z (6) wynika, że funkcja hazardu wyraża względny spadek poziomu bezpieczeństwa w małym przedziale czasowym. W zbiorowości środków transportu na tyle licznej, aby można założyć „funkcjonowanie prawa wielkich liczb” ze wzoru (5) wynika jaka ich część utraci zdadność w okresie o długości Δt , gdy jako podstawę, przyjmie się liczbę wszystkich zdadnych środków transportu w chwili początkowej, tj. dla $t = 0$, natomiast za pomocą wzoru (6) można określić tę część, w stosunku do środków transportu, które przetrwały zagrożenia do chwili t .

Z funkcją warunkowego hazardu związana jest warunkowa funkcja wiodąca Λ , którą można interpretować jako informującą o wyczerpywaniu się „zapasu bezpieczeństwa”, czyli zdolności ŚT (w układzie C-M-O) do przebywania w stanie zdadności. Każdą z wymienionych miar charakteryzujących czas do wystąpienia zdarzenia niebezpiecznego, w czasie użytkowania ŚT w układzie C-M-O, można wyrazić przez dowolną inną spośród nich. Zależności te w bezwarunkowym ujęciu niezawodnościowym znane są z [4].

Aby można było rozwiązać problem wskazywania zagrożeń, które są najbardziej prawdopodobnymi przyczynami utraty zdadności ŚT konieczne są: baza specyficznej wiedzy i baza danych. Bazy te dotyczą określonych zbiorowości ŚT użytkowanych w warunkach z określonymi zagrożeniami Z i są (powinny być) tworzone przez interdyscyplinarne zespoły specjalistów. Pozwalają one zbudować zestaw scenariuszy zdarzeń niebezpiecznych, z udziałem określonych ŚT w układzie C-M-O. Baza danych powinna zawierać historyczne rejestry zdarzeń dotyczących badanej zbiorowości ŚT, z wyszczególnieniem tych danych, które są niezbędne w estymacji warunkowych miar poziomu bezpieczeństwa i zagrożenia.

W zaproponowanym modelu CRM zastosowane są warunkowe intensywności przejść ze stanu zdadności do jednego spośród k identyfikowalnych i rozróżnialnych stanów niezdadności wskazujących zagrożenie, które stanie się przyczyną utraty zdadności. Zdarzenia niebezpieczne mają postać par $(T \leq t, \delta = i)$, gdzie $T \leq t$ oznacza utratę zdadności układu do chwili t , natomiast zmienna δ wskazuje indeks zagrożenia, które stanie się przyczyną zdarzenia powodującego utratę zdadności ŚT.

Podstawową miarą poziomu bezpieczeństwa i zagrożenia w modelu CRM są przyczynowo wyspecyfikowane warunkowe funkcje hazardu $h_{i|Z}$, tj. intensywności utraty zdadności ŚT z powodu zdarzeń niebezpiecznych związanych z kolejnymi zagrożeniami. Funkcje te zdefiniowane są wzorem:

$$h_{i|Z}(t) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbb{P}(t \leq T_i < t + \Delta t, \delta = i | T_j \geq t, j = 1, \dots, k; Z)}{\Delta t}, \quad i = 1, \dots, k \quad (7)$$

Funkcja $h_{i|Z}$ jest warunkową funkcją hazardu i -tego zagrożenia użytkowanego ŚT w układzie C-M-O, przy założeniu że układ jest narażony na wszystkie zagrożenia ze zbioru Z . Bezwarunkowa funkcja hazardu h_T , przy założeniu niezależności zachodzenia zdarzeń związanych z różnymi zagrożeniami, jest addytywna, tzn. jest sumą wszystkich k warunkowych funkcji hazardu, tj.

$$h_T(t) = \sum_{i=1}^k h_{i|Z}(t) \quad (8)$$

W rozważanym problemie wskazania zagrożenia, które przyczyni się do utraty zdadności, interesujące może być prawdopodobieństwo niebezpiecznego zdarzenia, które zajdzie w warunkach częściowego zabezpieczenia $\dot{S}T$ przed pewną grupą zagrożeń ze zbioru Z . Ma to miejsce w przypadku podjęcia działań niedopuszczających do niektórych niebezpiecznych zdarzeń. Dla tak zmodyfikowanego problemu CRM wprowadzone są prawdopodobieństwa warunkowe dla trzech różnych sytuacji zagrożeniowych. Idea tego pomysłu zawarta jest w [1]. Są to prawdopodobieństwa zajść zdarzeń niebezpiecznych dla układu C-M-O przy:

- pełnym braku zabezpieczeń układu przed zagrożeniami,
- częściowym zabezpieczeniu układu,
- zabezpieczeniu układu przed wszystkimi zagrożeniami z wyjątkiem jednego.

Prawdopodobieństwa te nazywane są prawdopodobieństwem brutto, prawdopodobieństwem częściowo brutto i prawdopodobieństwem netto.

Prawdopodobieństwem brutto utraty zdadności nazwane jest prawdopodobieństwo utraty zdadności $\dot{S}T$ (w układzie C-M-O) ze szczególnej przyczyny, przy aktywizujących się wszystkich zagrożeniach ze zbioru Z , w rozpatrywanym czasie, tj. gdy układ nie jest zabezpieczony w tym czasie przed nimi.

Prawdopodobieństwo brutto w swojej podstawowej postaci jest wyrażane poprzez funkcję skumulowanego specyficznego zagrożenia zdefiniowaną wzorem: $F_{i|Z}(t) \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{P}(T \leq t, \delta = i)$. Wartości funkcji brzegowych $F_{1|Z}(t), \dots, F_{k|Z}(t)$ zależą od funkcji hazardu, gdy wszystkie zagrożenia w czasie użytkowania $\dot{S}T$ zaktywizowały się. Ponieważ funkcja warunkowego hazardu $h_{i|Z}$ dla zagrożenia z_i może być estymowana bezpośrednio z danych historycznych dotyczących badanej zbiorowości $\dot{S}T$, więc funkcja $F_{i|Z}$ może być również bezpośrednio estymowana, bez czynienia żadnych założeń dotyczących łącznego rozkładu wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych z powodu wszystkich zagrożeń. Warto zauważyć, że funkcja $F_{i|Z}$ nie jest dystrybucją, ponieważ $F_{i|Z}(\infty) = \mathbb{P}(\delta = i)$. Funkcja ta jest niemalejąca oraz $F_{i|Z}(0) = 0$ i $F_{i|Z}(\infty) < 1$, więc jest nazywana i -tą semi-zawodnością.

Prawdopodobieństwem częściowo brutto utraty zdadności nazywane jest prawdopodobieństwo utraty zdadności, w określonym czasie, $\dot{S}T$ w układzie C-M-O ze szczególnej przyczyny, w warunkach zabezpieczenia tego układu przed pewną grupą zagrożeń ze zbioru Z .

W przypadku prawdopodobieństw częściowo brutto przyjmuje się, że podzbiór $J \subset Z$ i $J \neq \emptyset$ jest niepustym podzbiorem zagrożeń, przed którymi $\dot{S}T$ nie jest zabezpieczony, natomiast J' jest podzbiorem tych zagrożeń ze zbioru Z przed którymi jest zabezpieczony (zagrożenia te nie aktywizują się).

Pseudo-zawodnością częściowo brutto $F_{i|J}$ dla $i \in J$ nazywana jest funkcja zdefiniowana wzorem:

$$F_{i|J}(t) \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{P}(T_J \leq t, \delta = i) \quad (9)$$

Tak zdefiniowana i -ta pseudo-zawodność w chwili t jest prawdopodobieństwem zajścia zdarzenia niebezpiecznego w czasie $(0, t)$, z powodu zagrożenia $z_i \in J$, przy założeniu że układ jest narażony jedynie na zagrożenia ze zbioru J . Mając wyznaczoną łączną funkcję

przetwarzania S_T można przejść do wyspecyfikowanej funkcji hazardu częściowo brutto $h_{i|J}$ w układzie C-M-O:

$$h_{i|J}(t) = - \frac{\partial S_T(t_1, \dots, t_k | Z)}{\partial t_i} \frac{1}{S(t_1, \dots, t_k | Z)} \Big|_{t_j=t, j \in J, t_j=0, j \in J'} \quad (10)$$

Stąd pseudo-zawodność częściowo brutto przedstawia się wzorem:

$$F_{i|J}(t) = \int_0^t h_{i|J}(x) \exp \left(- \sum_{j \in J} \int_0^t h_{j|J}(u) du \right) dx \quad (11)$$

Jeżeli zajścia zdarzeń niebezpiecznych, ze względu na zagrożenia ze zbioru J , są niezależne, to wyspecyfikowana funkcja hazardu częściowo brutto upraszcza się do postaci:

$$h_{i|J}(t) = \frac{dF_i(t|Z)}{dt} \frac{1}{S_T(t|Z)} \quad (12)$$

Prawdopodobieństwem netto utraty zdatności nazywane jest prawdopodobieństwo utraty zdatności $\dot{S}T$ (w układzie C-M-O), z powodu jednego zagrożenia, w warunkach zabezpieczenia układu przed wszystkimi pozostałymi zagrożeniami. Jest to prawdopodobieństwo brzegowe dla wyspecyfikowanej przyczyny.

Dla zobrazowania przedstawionej metody wyznaczania zagrożenia, które stanie się przyczyną utraty zdatności pewnych $\dot{S}T$, podane są dwa przykłady zastosowania wprowadzonych miar bezpieczeństwa i zagrożenia z wykorzystaniem modelu CRM.

Przykład 1. Środek transportu, który użytkowany jest w pewnych warunkach eksploatacyjnych, jest narażony na utratę zdatności z powodu zidentyfikowanych trzech zagrożeń z_1, z_2, z_3 . Zagrożenia te prowadzą do niezależnych zdarzeń niebezpiecznych. Utrata stanu zdatności następuje w trakcie użytkowania $\dot{S}T$ w układzie C-M-O, w chwili wystąpienia pierwszego zdarzenia niebezpiecznego. Na podstawie dotychczasowych rejestrów zdarzeń wiadomo, że zdarzenia niebezpieczne pojawiają się niezależnie dla każdego zagrożenia i zgodnie z rozkładami wykładniczymi o intensywnościach $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, odpowiednio dla poszczególnych zagrożeń. Niech ponadto $\max\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} = \lambda_3$. Problem polega na wskazaniu zagrożenia, przed którym warto zabezpieczyć układ, aby optymalnie przedłużyć czas użytkowania rozważany środek transportu. Następnie po zabezpieczeniu się przed tym zagrożeniem wyznaczyć pseudo-zawodność częściowo brutto.

W tym przykładzie $Z = \{z_1, z_2, z_3\}$, a wyspecyfikowane funkcje hazardu netto i brutto są takie same. Funkcja hazardu h_T jest równa sumie wyspecyfikowanych funkcji hazardu ze względu na poszczególne zagrożenia, czyli $h_T(t) = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ i funkcja ta jest stała w czasie. Wyspecyfikowana funkcja pseudo-zawodności z powodu zdarzenia związanego z i -tym zagrożeniem przyjmuje postać:

$$F_{i|Z}(t) = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} (1 - \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t)) \quad (13)$$

Prawdopodobieństwo brutto $1 - \exp(-\lambda_1 t)$, utraty zdatności badanego układu z powodu pierwszego zagrożenia w czasie $(0, t)$, nie jest takie samo jak prawdopodobieństwo netto (brzegowe) utraty zdatności w tym czasie. Ponadto $F_{i|Z}(\infty) = \lambda_i / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$ dla $i = 1, 2, 3$. Jest to prawdopodobieństwo, że zagrożenie z_i jako pierwsze zaktywuje zdarzenie niebezpieczne i spowoduje utratę zdatności rozważanego ŚT. Stąd najlepiej zabezpieczyć się przed tym zagrożeniem z_i dla którego graniczna wartość funkcji $F_{i|Z}(\infty)$ jest maksymalna. W tym przypadku jest to zagrożenie o największej intensywności aktywacji zdarzenia niebezpiecznego, czyli zagrożenie z_3 .

Jeżeli rozważany układ zostanie zabezpieczony przed zagrożeniem z_3 , to może wystąpić utrata zdatności, z powodu wystąpienia zdarzenia niebezpiecznego, z powodu jednego z dwóch zagrożeń ze zbioru $J = \{z_1, z_2\}$. W tej sytuacji funkcja hazardu częściowa brutto ma postać $h_{i|J}(t) = \lambda_i$, $i = 1, 2$, natomiast pseudo-zawodność częściowa brutto dla $i = 1, 2$:

$$F_{i|J}(t) = \int_0^t \lambda_i \exp(-u(\lambda_1 + \lambda_2)) du = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2} (1 - \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2)t)) \quad (14)$$

Stąd prognozowaną przyczyną utraty stanu zdatności rozważanego ŚT, z zabezpieczeniem na zagrożenie z_3 , jest to zagrożenie spośród z_1, z_2 , które powoduje zdarzenia niebezpieczne z większą intensywnością.

Przykład 2. Środek transportu, użytkowany w określonych warunkach eksploatacyjnych, jest narażony na utratę zdatności z powodu zidentyfikowanych dwóch zagrożeń z_1, z_2 . Ustalona na podstawie danych statystycznych, dotyczących dotychczasowych zdarzeń, łączna funkcja przetrwania ma postać:

$$S(t_1, t_2) = (1 + \theta(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2))^{-1/\theta}, \quad \theta > 0, \lambda_1, \lambda_2 > 0 \quad (15)$$

Celem jest wyznaczenie funkcji pseudo-zawodności ze względu na wystąpienie zdarzenia niebezpiecznego związanego z poszczególnymi zagrożeniami.

W tym przykładzie dwie potencjalne chwile wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych są skorelowane. Wypcyfikowane funkcje hazardu są wyznaczane ze wzoru (10) dla $t_1 = t_2 = t$ oraz $j = 1, 2$:

$$h_{i|Z}(t) = - \frac{\frac{\partial \left((1 + \theta(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2))^{-1/\theta} \right)}{\partial t_i}}{\left((1 + \theta(\lambda_1 + \lambda_2))^{-1/\theta} \right)} = \frac{\lambda_i}{1 + \theta t(\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (16)$$

Ponieważ $T = \min \{T_1, T_2\}$, więc dla $t_1 = t_2 = t$

$$S(t, t) = S_T(t) = (1 + \theta t(\lambda_1 + \lambda_2))^{-1/\theta}, \quad \theta > 0, \lambda_1, \lambda_2 > 0 \quad (17)$$

Funkcja hazardu zależy od czasu i jest określona wzorem:

$$h_T(t) = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{(1 + \theta t(\lambda_1 + \lambda_2))^{-1/\theta}} \quad (18)$$

Funkcja przetrwania pierwsze zagrożenie przedstawia się wzorem:

$$S(t_1, 0) = (1 + \theta t \lambda_1)^{-1/\theta} \quad (19)$$

więc brzegowa funkcja hazardu dla pierwszego zagrożenia ma postać $\lambda_1/(1 + \theta t \lambda_1)$, a pseudo-zawodność ze względu na i -te zagrożenie:

$$F_{i|z}(t) = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2} (1 - (1 + \theta t(\lambda_1 + \lambda_2))^{-1/\theta}) \quad (20)$$

Przedstawiona metoda badania przyczyny utraty zdatności ŚT w układzie C-M-O została opracowana wyłącznie z użyciem metod probabilistycznych. Praktyczne zastosowanie przedstawionej metody z użyciem modelu CRM wymaga zebrania danych statystycznych o zdarzeniach niebezpiecznych. Zdarzenia te dotyczyć powinny ściśle określonej zbiorowości ŚT, użytkowanych w warunkach eksploatacyjnych, z tymi samymi zagrożeniami. Dane te mogą być wykorzystane do badania niezależności zdarzeń niebezpiecznych oraz estymacji wprowadzonych miar bezpieczeństwa i zagrożenia.

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawione zostały miary bezpieczeństwa i zagrożenia w parametrycznym modelowaniu losowych zdarzeń, które powodują utratę zdatności ŚT użytkowanego w warunkach eksploatacyjnych, w których występują różne zagrożenia. Najpierw zostały wprowadzone warunkowe miary zagrożenia i bezpieczeństwa użytkowanego środka transportu oraz związki między nimi. Następnie zastosowano warunkowe prawdopodobieństwa do zbudowania modelu rywalizujących zagrożeń (CRM). Jeśli wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych są niezależne, to przedstawiony model CRM można zastosować do wszystkich znanych z teorii niezawodności rozkładów czasów zdatności obiektów technicznych.

Na zakończenie publikacji podane zostały dwa przykłady wyznaczania funkcji zagrożenia użytkowania ŚT, z powodu pewnych przyczyn. Przedstawiony model CRM można zastosować w planowaniu działań profilaktycznych zwiększających poziom bezpieczeństwa użytkowania środka transportu w układzie C-M-O.

Bibliografia

1. Andrzejczak K.: Probabilistic model for competing risk. *Maintenance Problems*, 2009, (75), pp. 7-18.
2. Andrzejczak K., Popowska B.: Three parameter model of the system lifetime with two types of risks. *Problemy Eksploatacji. Maintenance Problems*, 2011, Issue 80, pp. 17-24.
3. Aven T.: *Risk Analysis*. WILEY, New York 2008.

4. Bobrowski D.: Modele i metody matematyczne teorii niezawodności w przykładach i zadaniach. WNT, Warszawa 1985.
5. Bousquet N., Bertholon H., Celeux G.: An alternative competing risk model to the Weibull distribution for modelling aging in lifetime data analysis. *Lifetime Data Anal.*, 2006, (12), pp. 481-504.
6. Evans M., Hastings N., Peacock B.: *Statistical Distributions*. Wiley, New York 2000.
7. FRIL: Bezpieczne drogi ratują życie. Atlas ryzyka na drogach krajowych w Polsce w latach 2007-2009, Gdańsk: Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej 2010.
8. Grabski F.: Analiza ryzyka w decyzyjnych semi-markowskich modelach procesu eksploatacji. W: *Materiały XXXVIII Szkoły Niezawodności. Ryzyko w eksploatacji systemów technicznych*. Szczyrk: Instytut Technologii Eksploatacji - PIB w Radomiu, 2010, pp. 43-52.
9. Jajuga K.: *Zarządzanie ryzykiem*. PWN, Warszawa 2007.
10. Jamroz K.: *Metoda zarządzania ryzykiem w inżynierii drogowej*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.
11. Jamroz K.; Kadziński A.: TRANS-RISK - an integrated method of risk management in transport. *Journal of KONBiN*, Vol. 1(13), 2010.
12. Jaźwiński J., Grabski F.: *Niektóre problemy modelowania systemów transportowych*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji. Warszawa-Radom 2003.
13. Klein J. P., Moeschberger M. L.: *Survival Analysis. Techniques for Censored and Truncated Data*. Springer, New York, Berlin Heidelberg 2003.
14. Kumamoto H., Henley E.: *Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists*. IEEE Press, New York 1996.
15. Młyńczak M.: *Metodyka badań eksploatacyjnych obiektów mechanicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2012.
16. Pritchard C.: *Risk Management. Concepts and Guidance*. ESI International, Arlington 2001
17. Smalko Z., 2010. *Studium terminologiczne inżynierii bezpieczeństwa transportu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2010.
18. Szymanek A.: *Bezpieczeństwo i ryzyko w technice*. Politechnika Radomska. Radom 2006.

SAFETY AND THREATS MEASURES OF THE MEAN OF TRANSPORT

Summary: This article presents measures of the safety and threats to the suitability state of means of transport, in the parametric modelling of random events. These events are dangerous and are threatening the functioning of a certain population of means of transport in the arrangement man - machine - surroundings (Polish: *człowiek – maszyna – otoczenie*, C-M-O). At first conditional measures of risks and safety of the used mean of transport and links between them are implemented. Next, conditional probabilities were applied for building the competing risks model (CRM). If occurrences of dangerous events are independent, then the introduced CRM model can be applied to every probability distribution, well-known from the reliability theory.

At the end of the publication two examples are given of a mean of transport, for which the conditional function of loss of its state of suitability was determined. The introduced CRM model can be applied in planning of preventive actions for increasing the safety level of the used mean of transport in the C-M-O arrangement.

Keywords: safety level, conditional hazard function, mean of transport