MODELS OF TEAM ACTIONS WITHIN THE NATIONAL RESCUE SYSTEM

MODELE DZIAŁAŃ ZESPOŁÓW W KRAJOWYM SYSTEMIE RATOWNICZYM

Józef Żurek

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
jozef.zurek@itwl.pl

Abstract: *The paper has been intended to present models of intervention actions launched by the rescue system and undertaken by a team carried by a means of transport. The models are expected to simulate how the undertaken actions are performed. This, in turn, would allow the assessment of crew/team's readiness to perform/accomplish the expected tasks within some fixed limits of time. Distinguished and described is a method to analyse intervention actions by rescue teams. General classification of tasks and the question of how stress affects the time to complete these tasks have also been included. An algorithm has been given to assess the process of mobilising teams for rescue actions. Furthermore, models of various intervention-action structures under crisis conditions have been presented. What else the paper submits is a method to assess reliability of an engineered means of rescue. The basis for the assessment is formed by a change of a selected diagnostic parameter. The main objective of this method is to search for the distribution of time to a failure of some specific type, characteristic of the object/device and operating conditions given consideration.*

Keywords: rescue systems, organisation of actions, intervention

Streszczenie: Niniejszy artykuł zawiera modele działań interwencyjnych załogi środka transportu i systemów ratowniczych, które pozwolą symulować przebieg działań i oceniać gotowość załóg lub zespołów do terminowej realizacji przewidywanych zadań. Wyróżniono i opisano metodę analizy działań interwencyjnych zespołów ratowniczych, a w tym ogólną klasyfikację zadań i wpływ stresu na czas wykonywania zadań. Podano algorytm oceny procesu mobilizacji zespołów do działań ratowniczych oraz przedstawiono modele różnych struktur działań interwencyjnych w sytuacjach kryzysowych. Artykuł zawiera również metodę oceny niezawodności technicznego środka ratownictwa. Podstawą oceny jest zmiana wybranego parametru diagnostycznego. Celem metody jest poszukiwanie rozkładu czasu do uszkodzenia określonego rodzaju właściwego dla rozpatrywanego obiektu lub urządzenia i warunków pracy.

Słowa kluczowe: systemy ratownicze, organizacja działań, interwencja

1. Wprowadzenie

Zjawiska przyrodnicze oraz celowe i przypadkowe działania ludzi powodują niekiedy zagrożenia ich życia i zdrowia, a także nieodwracalnych zniszczeń w otoczeniu. Obserwacja i analiza skutków tych działań, rodzi problem podziału nakładów oraz przedsięwzięć na prewencję (zapobieganie występowaniu zagrożeń różnej natury) i interwencję (łagodzenie skutków zdarzeń, które już wystąpiły). Podział ten nie musiałby być dokonywany, gdyby można było uniknąć całkowicie niepożądanych skutków i strat metodą prewencji. Ponieważ nie jest to możliwe, istnieje konieczność utrzymywania systemów ratowniczych (interwencyjnych). Systemy ratownicze, uruchamiane w sytuacjach zagrożeń, przeznaczone są do niesienia pomocy ludziom oraz do ochrony bogactw przyrody i dóbr stworzonych przez człowieka. W skład ich wchodzi odpowiednio wyszkoleni specjaliści, wyposażeni w niezbędne, nierzadko bardzo złożone urządzenia techniczne.

Tworząca się nowa dyscyplina naukowa, jaką jest bezpieczeństwo, posiada stosunkowo słabo ugruntowane podstawowe pojęcia, normy i miary. Otwartymi problemami pozostają też badania zagrożeń bezpieczeństwa w celu ustalenia programu działań prewencyjnych, oraz analiza i ocena działań interwencyjnych w celu eliminacji zagrożeń lub ich skutków. Badania bezpieczeństwa funkcjonowania systemów technicznych obejmują między innymi wzajemne relacje występujące między zagrożeniem bezpieczeństwa, a skutecznością przeciwdziałania i łagodzenia skutków zaistniałych zdarzeń. W działaniach praktycznych systemów technicznych wyróżnia dwa kierunki, prewencję i interwencję. W ramach prewencji realizuje się zadania polegające na kształtowaniu bezpieczeństwa w budowanych i modernizowanych systemach oraz na zarządzaniu bezpieczeństwem w celu utrzymania go na wymaganym poziomie. W ramach interwencji realizuje się zadania ratownictwa polegające na łagodzeniu skutków katastrof, wypadków i innych niepożądanych zdarzeń występujących w operacjach przewozowych. Obowiązki interwencji po wystąpieniu niepożądanych zdarzeń organizuje i nadzoruje **Krajowy System Ratowniczy**, jako integralna część organizacji bezpieczeństwa wewnętrznego państwa wprowadzona Ustawą z dnia 24 sierpnia 1991 r. o ochronie przeciwpożarowej..

Zadania z dziedziny szeroko pojętego ratownictwa i działań antykrzysowych zostały rozdzielone między organa samorządu terytorialnego i administracji rządowej oraz państwową straż pożarną, a także inne służby. Krajowy system ratowniczy opiera się głównie na państwowych służbach ratowniczo-gaśniczych oraz na podstawie umów cywilno-prawnych angażuje również podmioty, które dobrowolnie zgodziły się współdziałać w akcjach ratowniczych. Skuteczność działania systemów ratowniczych w wielu przypadkach zależy od czasu jaki upływa od chwili stwierdzenia zagrożenia do chwili podjęcia działań ratowniczych. Ponieważ chwila i miejsce (rejon) stwierdzenia zagrożenia są generowane losowo, to system ratowniczy musi dysponować czasem, niezbędnym na zmobilizowanie się i na przybycie do miejsca zagrożenia. Model procesu mobilizacji systemu ratowniczego, wykonany z punktu widzenia oceny i analizy gotowości do

działania, umożliwia oznaczanie jakości i może przyczynić się do rozwoju tych systemów w kierunku poprawy dynamiki ich funkcjonowania.

Proces mobilizacji systemu ratowniczego do właściwego stanu i miejsca umożliwiającego realizację akcji ratowniczej może przebiegać w różny sposób, zależny od jego struktury organizacyjnej i struktury działania. W ogólnym przypadku proces ten można podzielić na następujące podprocesy:

- mobilizacji zespołów ludzkich do stanu gotowości do działania;
- uzdatniania systemu ratowniczego do stanu gotowości do działania;
- przemieszczenia systemu do rejonu działania.

2. Metoda analizy działań interwencyjnych zespołów w systemach antro-po-technicznych

Bezpieczeństwo systemu antro-po-technicznego rozumiemy jako właściwość układu „obiekt techniczny-załoga-otoczenie” umożliwiającego działanie w danych warunkach klimatyczno-meteorologicznych i przy danej infrastrukturze, bez wypadków.

Analizując wpływ człowieka na bezpieczeństwo rozpatrywanego układu należy uwzględnić model działania operatorów sprzętu lub załogi ratowników w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa.

Współczesny operator złożonego technicznego środka transportu lub innego obiektu technicznego prowadzi selekcję napływających informacji, poszukuje odpowiedzi na pojawiające się pytania i nadzoruje systemy wspomagające oraz podejmuje decyzje rozwiązując sekwencyjnie pojawiające się problemy. Stanowi rezerwę dla automatyki nawigacyjnej lub sterowania w układzie otwartym. Wieloosobowa załoga wykonuje rutynowe prace, prowadzi zwyczajowy tok życia i czuwa nad prawidłowym przebiegiem realizowanych zadań. Mimo zastosowań techniki i automatyki, „rzeczywistość” niekiedy zaskakuje operatorów lub załogę nieprzewidywanymi okolicznościami a błędy lub opóźnienia w działaniu stanowią istotne przyczyny wypadków.

Operatorzy stanowią najsłabsze ogniwo w rozpatrywanym systemie, o czym świadczą statystyki wypadków. Operator lub członek załogi, może popełniać błędy powodujące zagrożenia, które pochodzą od:

- niewiedzy w danej profesji (niski poziom wykształcenia lub niezrozumienie zadania);
- niepamięci wynikającej z braku powtórzeń procedur lub czynności (brak treningu, rutyna);
- niesubordynacji spowodowanej charakterem, brakiem kontroli lub motywacji;
- braku predyspozycji do danego zawodu (stan zdrowia, cechy osobowości).

Specyficznym czynnikiem działającym na człowieka jest stres, a szczególnie stres polegający na świadomości deficytu czasu podczas przeciwdziałania zagrożeniu. Niewielki deficyt czasu wpływa mobilizująco na działanie człowieka, zmniejsza prawdopodobieństwo popełnienia błędu lub zwiększa szansę poprawnego działania. Proces mobilizujący trwa do osiągnięcia pewnego progu w świadomości.

Przykładowy rzeczywisty czas wykonywania czynności w stresie zależny od limitu czasu dysponowanego przedstawia rys. 1.

Rys.1 Rzeczywisty czas trwania czynności zależny od zadanego limitu czasowego na jego wykonanie.

$$M = \frac{\bar{T}_C}{T_d}$$

Gdzie: T_C - średni czas wykonywania czynności;

T_d - limit czasowy przydzielony na wykonanie czynności.

Gdy czas dysponowany jest dwukrotnie krótszy od czasu niezbędnego, to następuje skokowa demobilizacja operatora lub członka załogi i wszystkie parametry bezbłędного działania pogarszają się. Człowiek jako wykonawca zadań interwencyjnych posiada jeszcze sferę podświadomości, która także wpływa na eliminację błędów, a co za tym idzie na bezpieczeństwo wykonywanych operacji. Kształtowanie bezpieczeństwa jest bezpośrednim lub pośrednim oddziaływaniem człowieka na system transportowy. Prakseologiczne pierwiastki bezpieczeństwa tkwią w różnych etapach przygotowania operatorów lub załóg ratowniczych.

Jedną z miar predyspozycji załogi do pomyślnego wykonania zadania jest znajomość przydzielonych zadań i gotowość do ich realizacji.

Zadania te ze względu na rodzaj (charakter) dzieli się na planowe i losowe. Dalszy podział zadań przedstawiono na poniższym rysunku.

Rys. 2 Schemat podziału zadań interwencyjnych.

Ze względu na sposób realizacji zadań w czasie, dzielimy je na:

- niepodzielne,
- modułowo podzielne,
- nieskończenie podzielne.

Zadanie niepodzielne nie może być przerywane (np. lot samolotu, rejs statku) ponieważ powoduje to zagrożenie bezpieczeństwa lub straty materialne. Zadanie nieskończenie podzielne może być przerywane i wznowiane w dowolnej chwili bez istotnych konsekwencji.

Ze względu na bezpieczeństwo podczas wykonywanych zleczanych zadań gospodarczych lub transportowych załogi są przygotowywane do realizacji zadań interwencyjnych (ratowniczych). Informacje opisujące zadania ratownicze i procedury ich wykonywania przyswajane są przez załogę podczas szkolenia i przygotowania do działań zawodowych.

Typowymi informacjami opisującymi zadanie mogą być:

- przedmiot zadania (co realizować?),
- sposób, procedura lub technologia wykonywania zadania (jak realizować?),
- rozmiar zadania, wymagany efekt lub skutek (jaki produkt końcowy?),
- miejsce realizacji zadania (gdzie realizować?),
- termin i czas realizacji zadania (kiedy realizować?).

Informacje dotyczące przedmiotu zadania, sposobu realizacji i rozmiaru, na ogół są przekazywane w trakcie szkolenia. Informacje dotyczące terminu, czasu i miejsca wykonywania generowane są w chwilach zapotrzebowania na interwencję (jednocześnie z zadaniem). Przykładowe informacje, dotyczące terminowości (chwile i przedziały czasu) generowane razem z zadaniem przedstawiono na rys. 3. Miarą gotowości załogi do pomyślnej realizacji zadania interwencyjnego jest łączne prawdopodobieństwo zmobilizowania się oraz podjęcia i wykonania zadania w czasie nie dłuższym niż norma czasowa T_d . Analiza działania interwencyjnego może obejmować procesy mobilizacji załogi do stanu gotowości i realizacji zadania.

Rys.3 Przykładowe chwile i przedziały czasu zawarte w informacji dotyczącej terminowości zadania losowego.

Na rys. 3 przyjęto oznaczenia:

t_0 – chwila postawienia zadania,

t_2 – wymagana chwila zakończenia zadania

T_g – zmienna losowa czasu osiągnięcia przez zespół stanu gotowości do działania,

T_R – zmienna losowa czasu realizacji zadania.

Na podstawie histogramu wyznaczonego podczas badań albo oszacowań ankietowych, można wyznaczyć rozkład procentowy lub probabilistyczny, czasów przebywania w poszczególnych stanach uśrednionego członka zespołu. Otrzymamy w ten sposób r -wymiarowy wektor prawdopodobieństw, $P = [p_i]$, $i = 1, 2, \dots, r$, (r - liczba stanów).

W chwili t_0 (postawienia zadania interwencyjnego) rozpoczyna się mobilizacja załogi. Czas osiągnięcia stanu gotowości do działania z i -tego stanu w jakim znajdował się członek załogi w chwili t_0 jest zmienną losową T_{gi} , która posiada dystrybuantę

$$F_i(t_g) = P\{T_{gi} \leq t_g\}.$$

Graf procesu mobilizacji uśrednionego w zbiorze członka załogi przedstawiono na rys 4.

Rys. 4 Graf procesu mobilizacji członka załogi z podsystemu funkcjonalnego.

Poszczególne symbole na rysunku 4 oznaczają:

- p_i - prawdopodobieństwa przebywania członka zespołu w poszczególnych stanach;
- $F_i(t_g)$ - dystrybuanty zmiennych losowych T_{gi} ;
- d - stan gotowości załoganta do wykonywania zadania interwencyjnego.

Średnią gotowość $g(t_g)$ członka zespołu wyznaczamy ze wzoru:

$$g(t_g) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq d}}^{r-1} p_i F_i(t_g) + p_d \quad (2.1)$$

gdzie:

- p_i - prawdopodobieństwo przebywania członka zespołu w i -tym stanie;
- $F_i(t_g)$ - dystrybuanty zmiennych losowych T_{gi} czasu osiągnięcia stanu d z dowolnego i -tego stanu;
- p_d - stacjonarne prawdopodobieństwo przebywania specjalisty w stanie d , który jest stanem gotowości);
- r - liczba stanów członka zespołu;
- t_g - czas mobilizacji członka zespołu.

Mobilizacja spośród całej załogi o liczności n , zespołu o liczności co najmniej k , niezbędnego do wykonania zadania interwencyjnego, przebiega według niżej przedstawionego modelu. Liczba k członków zespołu, stanowi w modelu próg gotowości do terminowego wykonania zadania.

Model mobilizacji zespołu można opisać trójką $\langle k, n, g(t) \rangle$, gdzie:

- k - próg gotowości do działania (minimalna, niezbędna liczba załogantów do pomyślnej realizacji zadania);
- n - liczba wszystkich członków zespołu;
- $g(t_g)$ - gotowość uśrednionego członka zespołu.

Prawdopodobieństwo $G_{k,n,g}$ zdarzenia polegającego na tym, że co najmniej k spośród n członków załogi zmobilizuje się do stanu gotowości w czasie t_g , licząc od chwili t_0 , wyznaczymy z zależności.

$$G_{k,n,g} = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} [g(t_g)]^i [1 - g(t_g)]^{n-i} \quad (2.2)$$

Wzór ten opisuje dystrybuanty rozkładu dwumianowego o parametrach $k, n, g(t_g)$. Można go przedstawić w postaci sumy dwóch członów:

$$G_{k,n,g} = \binom{n}{k} [g(t_g)]^k [1 - g(t_g)]^{n-k} + \sum_{j=k+1}^n \binom{n}{j} [g(t_g)]^j [1 - g(t_g)]^{n-j} \quad (2.3)$$

Człon pierwszy przedstawia prawdopodobieństwo mobilizowania się dokładnie liczby k spośród n członków zespołu. Człon drugi stanowi nadmiar poprawiając

strukturę działania. Prawdopodobieństwo mobilizowania się dokładnie j specjalistów spośród całej załogi wynosi:

$$P_j(n, g) = \binom{n}{j} [g(t_g)]^j [1 - g(t_g)]^{n-j}$$

Czas mobilizacji zespołu do uzyskania wyższych stopni ukończenia j , $k \leq j \leq n$ jest zmienną losową $T_{gj}(t)$, którą wyznaczamy stosując wzór:

$$F_{gj}(t) = P\{T_{gj} \leq t\} = \frac{\int_0^t [g(t_g)]^j [1 - g(t_g)]^{n-j} dt_g}{\int_0^\infty [g(t_g)]^j [1 - g(t_g)]^{n-j} dt_g} \quad (2.4)$$

gdzie:

- j – stopień ukończenia zespołu;
- n – liczba członków zespołu,
- t_g – czas mobilizacji zespołu;
- $g(t_g)$ – funkcja gotowości członka zespołu.

Wykonywanie zadania rozpoczyna się od chwili, w której zespół osiągnął gotowość do działania, tzn. stopień ukończenia co najmniej k .

Czas realizacji zadania przez zespół ukończony do stopnia j , $k \leq j \leq n$, jest równy sumie zmiennych losowych T_{gj} , T_{Rj} , których łączna dystrybucja wynosi

$$F_{zj}(t) = F_{gj}(t) * F_{Rj}(t),$$

gdzie $*$ – oznacza operację splotu, co można zapisać w postaci:

$$F_{zj}(t) = P\{T_{zj} \leq t\} = \int_0^\infty F_{Rj}(t - x) dF_{gj}(x) \quad (2.5)$$

Rzeczywisty czas realizacji zadania przez zespół ukończony do stopnia n , jest zmienną losową T_{zn} , której dystrybucja stanowi sumę ważoną dystrybucji $F_{zj}(t)$ daną wzorem:

$$F_{zn}(t) = P\{T_{zn} \leq t\} = \sum_{j=k}^n P_j(k, n, g(t_g)) \cdot F_{zj}(t) \quad (2.6)$$

gdzie: $F_{zn}(t)$ – dystrybucja czasu pomyślnego działania interwencyjnego zespołu;

$P_j(k, n, g(t_g))$ – prawdopodobieństwo ukończenia zespołu o parametrach $\langle j, n, g(t_g) \rangle$ do stopnia j w procesie mobilizacji trwającym do chwili t_g .

Przedstawiony model ocenowy działań zespołu w sytuacjach kryzysowych opisuje jeden zespół i jeden obiekt obsługiwany w trakcie działań. Dla wielu obiektów i wielu zespołów należy dokonać podziału ludzi i ustalić strukturę działania.

Struktura działania charakteryzuje się następującymi parametrami:

- N - liczba działań elementarnych, wchodzących w skład procedury pomyślnego działania interwencyjnego;
 K - minimalna liczba działań elementarnych, jakie należy wykonać aby uznać, że działanie interwencyjne przyniosło pożądany skutek;
 M - liczba działań elementarnych realizowanych jednocześnie;
 $F_i(t)$ - dystrybuanta czasu działania;
 $P_i(t)$ - prawdopodobieństwo wystąpienia działania elementarnego w systemie działania.

Symboliczne zobrazowanie struktury działania przedstawiono na rys. 5.

Rys. 5 Symboliczne zobrazowanie struktury działania

Struktury działania dzielą się na struktury: elementarne i złożone. Elementarne struktury działania w procesie analizy nie podlegają dalszej redukcji. Struktura złożona składa się z elementarnych struktur działania. System działania, licznego zorganizowanego zespołu na ogół ma złożoną strukturę działania i -tego rzędu, jeżeli po k -krotnym procesie redukcji, może zostać zredukowany do struktury elementarnej. Struktury elementarne mogą być nienadmiarowe i nadmiarowe. Struktura elementarna jest nienadmiarowa jeżeli działanie uznaje się za wykonane, gdy wszystkie działania elementarne są wykonane. Dla nienadmiarowej struktury działania słuszny jest związek: $K = N$. W przeciwnym przypadku elementarna struktura działania jest nadmiarowa, to znaczy $K < N$. Elementarna struktura działania może być jednoczesna, jeżeli $M = N$ lub niejednoczesna jeżeli $M < N$. Elementarna struktura działania może być statyczna, co oznacza, że liczba elementarnych działań w strukturze jest zdeterminowana lub dynamiczna, gdy liczba elementarnych działań w strukturze jest wielkością losową.

Zgodnie z przyjętą klasyfikacją możemy wyróżnić wiele struktur elementarnych. Ponieważ czasy trwania czynności elementarnych na ogół są losowe, to analiza czasu realizacji zadań przy zastosowaniu poszczególnych struktur może odbywać się drogą symulacji komputerowej. Dla czynności następujących po sobie należy przeprowadzić operację splotu rozkładów zmiennych losowych, co jest analitycznie trudne. Przykładem może być analiza dla wartości średnich czasów trwania czynności.

Np.: Struktura działania ma postać $S(K = N, M = 1, N = 4)$, gdzie:

- K – liczba obiektów, które należy obsłużyć interwencyjnie, aby można było przyjąć, że zagrożenie zostało oddalone;
- M – liczba zespołów (grup obsługowych);
- T_i – czas obsługi pojedynczego obiektu;
- N – liczba wszystkich obiektów, na których należało by wykonać obsługowanie; posiada średni łączny czas T_s :

$$T_s = \sum_{i=1}^N T_i; \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.7)$$

Dla struktury działania $S(K = N, M = 3, N = 4)$, T_s wyniesie:

$$\begin{aligned} T_s &= \max[T_1, T_2, T_3^*, T_4^*] \\ T_3^* &= \min[T_1, T_2] + T_3; \\ T_4^* &= \min\{\max[(T_1, T_3^*), (T_2, T_3^*), (T_1, T_2)]\} + T_4 \end{aligned} \quad (2.8)$$

3. Metoda oceny niezawodności obiektu technicznego

W dalszej części pracy podjęta zostanie próba opisu niezawodności obiektu technicznego dla przypadku, gdy jego stan techniczny oceniany jest przy pomocy parametrów diagnostycznych, które w wyniku działania procesów destrukcyjnych (ich wartości) ulegają losowym zmianom.

Najogólniej elementy konstrukcyjne i układy funkcjonalne można poklasyfikować na trzy rodzaje :

1. Elementy posiadające silnie skorelowane zmiany wartości parametrów kreślących stan zdatności z ilością lub czasem funkcjonowania.
2. Elementy posiadające słabo skorelowane zmiany wartości parametrów opisujących stan zdatności z ilością lub czasem funkcjonowania, co implikuje słabe związki czasu pracy ze zmianą stanu technicznego, zużyciem i uszkodzeniami.
3. Elementy bez korelacji z czasem pracy, liczbą włączeń lub inną miarą ilości funkcjonowania, o przypadkowo występujących uszkodzeniach.

Dla elementów pierwszej grupy, które będą przedmiotem dalszej analizy, można prognozować chwilę osiągnięcia stanu granicznego dla parametrów diagnostycznych opisujących ich stan. Można również prognozować moment bezpiecznego wyłączenia elementu lub zespołu z eksploatacji. Procesy narastania skutków destrukcji w tym przypadku opisujemy odpowiednio dobranymi modelami.

Przykładami takich procesów podczas eksploatacji techniki morskiej mogą być np.:

- procesy zmęczenia;

- procesy związane ze zużyciem powierzchniowym prowadzące do zmian wymiarów elementów lub wzrostu luzów oraz związane z pogorszeniem stanu powierzchni;
- procesy starzeniowe i procesy korozyjne.

Rozpoznawanie strony fizycznej tych procesów stwarza nie małe trudności w ustaleniu zależności analitycznych. Procesy zmęczeniowe konstrukcji prowadzą do powstawania pęknięć zmęczeniowych, których proces narastania najczęściej (przy pewnych założeniach) opisuje się wzorem Parisa. Problemem w tym przypadku jest określenie bezpiecznej długości pęknięcia zapewniającej jeszcze nie przekroczenia ryzyka katastroficznego pęknięcia elementu i doprowadzenie do awarii zagrażającej bezpieczeństwu lotu statku powietrznego.

Procesy związane ze zużyciem powierzchniowym, jak już było powiedziane, prowadzą do zmiany wymiarów lub wzrostu luzów pomiędzy współpracującymi elementami. Problem w tym przypadku polega na budowaniu zależności związanych z narastaniem zmian wartości określonego wymiaru będącego różnicą pomiędzy wartością początkową a wartością bieżącą tego parametru. Procesy zużycia prowadzą najczęściej do pogorszenia własności wytrzymałościowych lub pogorszenia współpracy z innymi elementami konstrukcji.

Podobne objawy towarzyszą procesom korozyjnym. Ujemne skutki procesów korozyjnych objawiają się w postaci wżerów na znacznej powierzchni, pogarszając własności użytkowe tego elementu lub w postaci głębokich wżerów pogarszających własności wytrzymałościowe konstrukcji.

W wyniku oddziaływania procesów destrukcyjnych narasta lub maleje pewien wskaźnik, który może być podstawą do oceny niezawodnościowej urządzenia lub elementu.

Ważną sprawą jest rozpoznawanie fizyki tych procesów umożliwiających ujęcie analityczne ich przebiegu. Przeważnie procesy te mają charakter losowy.

Ważnym problemem jest budowanie modeli probabilistycznych umożliwiających budowanie wskaźników niezawodnościowych i oceny trwałości konstrukcji obiektów technicznych.

W niniejszej pracy, bazując na opracowaniu [3] przedstawione zostaną wybrane metody do szacowania ryzyka powstawania uszkodzeń w procesie eksploatacji obiektów technicznych i na tej podstawie oceny niezawodności.

Przyjmuje się, że:

- Stan techniczny urządzenia określa się jednym dominującym parametrem diagnostycznym. Jego wartość bieżącą określa się przez z .
- Zmiana wartości parametru diagnostycznego następuje tylko podczas pracy obiektu.
- Parametr z jest niemalejący.

Niech $U_{z,t}$ oznacza prawdopodobieństwo, że w chwili t wartości parametru diagnostycznego będzie równa z . Dla przykładu można przyjąć, że z może oznaczać np. długość pęknięcia lub wartość zużycia powierzchniowego. Do opisu narastania wartości parametru w ujęciu losowym przyjęto następujące równanie różnicowe:

$$U_{z,t+\Delta t} = (1 - \lambda\Delta t)U_{z,t} + \lambda\Delta tU_{z-\Delta z,t} \quad (3.1)$$

gdzie:

Δz - przyrost wartości parametru diagnostycznego w czasie jednego obiektu technicznego;

$\lambda\Delta t$ - prawdopodobieństwo włączenia do pracy obiektu technicznego w przedziale czasu o długości Δt , przy czym $\lambda\Delta t \leq 1$;

λ - intensywność włączeń do pracy obiektu technicznego.

Równanie (1) w zapisie funkcyjnym przyjmuje postać

$$u(z, t + \Delta t) = (1 - \lambda\Delta t)u(z, t) + \lambda\Delta tu(z - \Delta z, t) \quad (3.2)$$

gdzie: $u(z, t)$ - funkcja gęstości parametru diagnostycznego z w chwili t .

Z równania (3.2), po uwzględnieniu fizyki narastania parametru diagnostycznego oraz odpowiednich przekształceniach, otrzymujemy równanie różniczkowe typu Fokkera-Plancka. W wyniku rozwiązania tego równania otrzymujemy następującą funkcję gęstości:

$$u(z, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi at}} e^{-\frac{(z-bt)^2}{2at}} \quad (3.3)$$

gdzie:

b - średni przyrost parametru diagnostycznego na jednostkę czasu;

a - średni kwadrat przyrostu parametru diagnostycznego na jednostkę czasu.

Prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia (czyli przekroczenie stanu dopuszczalnego) z wykorzystaniem zależności (3.3) można przedstawić następująco:

$$Q(t, z_d) = \int_{z_d}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi at}} e^{-\frac{(z-bt)^2}{2at}} dz \quad (3.4)$$

gdzie: z_d - wartość parametru diagnostycznego określający stan graniczny.

Niezawodność, czyli prawdopodobieństwo niepowstania uszkodzenia w przedziale czasu $(0, t)$ można określić wykorzystując zależność (3.4).

$$R(t) = 1 - Q(t)_{z_d} \quad (3.5)$$

Rozpatrując przypadek ogólniejszy, wystąpienia dodatkowego uszkodzenia (drugiego rodzaju uszkodzenia zwanego uszkodzeniem nagłym-katastroficznym) możliwego do realizacji w każdej chwili eksploatacji obiektu technicznego.

Wprowadzimy dodatkowo intensywność powstawania tego typu dodatkowego uszkodzenia:

$$\mu = \frac{P}{\Delta t} \Rightarrow P = \mu \Delta t \leq 1 \quad (3.6)$$

gdzie:

P - prawdopodobieństwo wystąpienia tego typu uszkodzenia w pojedynczym włączeniu do pracy obiektu technicznego;

Δt - przedział czasu, w którym może odbyć realizacja zadania;

μ - intensywność dodatkowego uszkodzenia (uszkodzenia katastroficznego).

Pozostałe niezbędne parametry i wielkości w tym punkcie będą takie same jak dla przypadku jednego rodzaju uszkodzenia zależnego od liczby włączeń do pracy. Równanie różnicowe przyjęte do opisu narastania wartości zmian parametru diagnostycznego przyjmuje postać (w zapisie funkcyjnym):

$$u(z, t + \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t)(1 - P)u(z, t) + \lambda \Delta t(1 - P)u(z - \Delta z, t) \quad (3.7)$$

Z równania (7) po przekształceniu otrzymamy następujące równanie różniczkowe cząstkowe:

$$\frac{\partial u(z, t)}{\partial t} = -\mu u(z, t) - b(t) \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{2} a(t) \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} \quad (3.8)$$

gdzie:

$b(t)$ - średni przyrost parametru diagnostycznego na jednostkę czasu;

$$b(t) = \lambda(1 - P)\Delta z \quad (3.9)$$

$a(t)$ - średni przyrost bieżącej wartości parametru diagnostycznego na jednostkę czasu;

$$a(t) = \lambda(1 - P)\Delta z^2 \quad (3.10)$$

Δz - przyrost wartości parametru diagnostycznego w czasie jednego zadania (określony z wykorzystaniem prawidłowości zmian tego parametru).

W pracy [4] wykazano, że rozwiązanie równania (3.8) przyjmuje następującą postać:

$$u(z, t) = \mu e^{-\mu t} \bar{u}(z, t) \quad (3.11)$$

gdzie:

$$\bar{u}(z, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi A(t)}} e^{-\frac{(z-B(t))^2}{2A(t)}} \quad (3.12)$$

$$B(t) = \int_0^t b(t) dt \quad (3.13)$$

$$A(t) = \int a(t) dt \quad (3.14)$$

Wykorzystując zależność (3.11) możemy określić prawdopodobieństwo powstania uszkodzenia dodatkowego w przedziale $(0, t)$

$$Q_1(t) = \int_0^t \mu e^{-\mu t} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \bar{u}(z, t) dz \right] dt = 1 - e^{-\mu t} \quad (3.15)$$

Stąd, można napisać zależność na prawdopodobieństwo określające możliwość wystąpienia obu rodzajów uszkodzeń w przedziale czasu $(0, t)$, przy czym urządzenie jest zdadne do chwili wystąpienia pierwszego z nich. Wzór obliczeniowy przyjmuje postać:

$$Q(t) = (1 - e^{-\mu t}) + e^{-\mu t} \int_{z_d}^{\infty} \bar{u}(z, t) dz \quad (3.16)$$

Wzór na niezawodność statku przyjmuje postać:

$$R(t) \cong e^{-\mu t} \int_{-\infty}^{z_d} \frac{1}{\sqrt{2\pi A(t)}} e^{-\frac{(z-B(t))^2}{2A(t)}} \quad (3.17)$$

gdzie: $B(t)$ i $A(t)$ określone zależności (3.13) i (3.14).

4. Uwagi końcowe

Zagadnienia z teorii systemów działania, wykorzystane do modelowania i analizy systemów ratowniczych mogą być wykorzystane do oceny skuteczności działań, symulacyjnych ćwiczeń zespołów i dobierania struktur działania. Wspomagają też projektowanie i organizację systemów ratowniczych.

Istotną rolę w organizacji działań interwencyjnych i ratowniczych w systemach transportowych, budowlanych, wydobywczych i wielu innych, mają nadmiary: strukturalne (osobowe), czasowe, informacyjne, itp. Przytoczone w artykule modele pozwalają oszacować ilościowo wartości wybranych nadmiarów, co może być pomocne w organizacji rzeczywistych bezpiecznych działań.

Podane w punkcie 3 metody analitycznego opisu powstawania uszkodzeń w technice mogą być wykorzystane do szacowania ryzyka ich wystąpienia.

Modele te można adoptować do konkretnych przypadków szacowania wartości prawdopodobieństwa powstawania uszkodzenia uwzględniając fizykę występujących zjawisk i warunków eksploatacji.

5. Literatura

- [1] Gerebach J. B., Kordoński Ch. B.: *„Modele niezawodności obiektów technicznych”*. WNT, Warszawa.
- [2] Stępień S., Tomaszek H.: *„Zarys probabilistycznego opisu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego oraz określanie ryzyka katastroficznego zniszczenia elementu podczas eksploatacji”*. ZEM, Zeszyt 1 (133), 2003 r., s. 23-31.
- [3] Lorocho L., Jasztal H., Tomaszek H.: *„Modele powstawania uszkodzeń katastroficzych w urządzeniach lotniczych”*. Problemy Eksploatacji. 3 – 2005. s. 193-201.
- [4] Tomaszek H.: *„Modelowanie procesów zużycia elementów mechanicznych urządzeń o obciążeniu impulsowym w aspekcie niezawodności”*. Informator ITWL, 1981r.
- [5] Żurek J.: *„Wykorzystanie wyników diagnozowania do oceny i sterowania eksploatacją techniki lotniczej”*. Biuletyn WAT nr 5, 5 - 2005 r.
- [6] Piasecki S.: *„Definicje i problemy określania gotowości obiektów wojskowych”*. Prace Zespołu Teorii Walki, WAT, Warszawa 1977.
- [7] Żurek J.: *„Wpływ nadmiarów strukturalnych i funkcjonalnych na niezawodność systemów progowych”*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1986.
- [8] Woropay M., Żurek J., Migawa K.: *„Model oceny i kształtowania gotowości operacyjnej podsystemu utrzymania ruchu w systemie transportowym”*. Bydgoszcz-Radom 2003.

- [9] Żurek J., Ziółkowski J.: „*Model gotowości do działania pojazdów interwencyjnych*” . X Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Stare Jabłonki 2005.
- [10] Praca zbiorowa pod redakcją: Jaźwińskiego J., Żurka J., „*Wybrane Problemy Sterowania Zapasami*”. ITWL, Warszawa, Radom 2007.
- [11] Żurek J., Tomaszek H., Jasztal M., „*Prognostowanie uszkodzeń zagrażających bezpieczeństwu lotów statków powietrznych*”. ITWL, Warszawa, Radom 2008.
- [12] Praca zbiorowa „*Zintegrowany system bezpieczeństwa transportu*” - tomy: I, II i III. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
- [13] Żurek J., „*Modele niezawodności nadążnych systemów bezpieczeństwa*”. ITWL, Warszawa, Radom 2010
- [14] Niziński S., Żurek J., „*Logistyka Ogólna*”. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 2011.

*Prof. nadzw. dr hab. inż. **Józef Żurek**, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w Warszawie. Specjalizacja: budowa i eksploatacja maszyn, transport, bezpieczeństwo i niezawodność systemów,*