prof. dr hab. inż. Józef ŻUREK
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

METODY OCENY SYSTEMÓW RATOWNICZYCH

Streszczenie
W artykule przedstawiono model ocenowy systemu ratowniczego dyżurującego lub mobilizującego się w sytuacji kryzysowej. W modelu opisano dyspozycyjność pojedynczego ratownika oraz osiąganie i utrzymywanie poszczególnych stanów gotowości. Przedstawiono również algorytmy wyznaczania miar gotowości do akcji ratowniczych przez ukompletowane zespoły ludzi z użyciem przygotowywanego do tej akcji sprzętu technicznego.
Jako miary gotowości przyjęto prawdopodobieństwo osiągania lub utrzymywania określonych stanów w wymaganym czasie.

Summary
In the article there is presented an assessment model of the duty rescue system and the system based on mobilization in crisis situation. There are described, in the model, availability of single rescuer, building and maintaining of particular states of readiness. There are also presented algorithms of appointing a rescue action readiness measures by completed rescuers' teams and prepared for the action technical equipment. As the readiness measures there was assumed probability of building and maintaining the specified states within required timeframe.

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 zderzeń, 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 wchodzą odpowiednio wyszkoleni specjaliści, wyposażeni w niezbędne, nierzadko bardzo złożone urządzenia techniczne.

Skuteczność działania systemów ratowniczych w wielu przypadkach zależy od czasu, jaki upływa od chwili stwierdzenia zagrożenie 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. Dyspozycyjność pojedynczego specjalisty

Dyspozycyjność pojedynczego specjalisty jest mierzona asymptotycznym prawdopodobieństwem P_d, przy $t \to \infty$, zdarzenia polegającego na tym, że w dowolnej chwili danego horyzontu czasowego znajduje się on w stanie gotowości do działania i może być zmobilizowany w systemie ratowniczym. Prawdopodobieństwo to możemy wyznaczyć odwzorowując proces funkcjonowania specjalisty przy pomocy modelu procesu półmarkowskiego.

Odwzorowanie takie jest właściwe wówczas, jeżeli są spełnione następujące założenia:

A. Każdą sytuację eksploatacyjną, w jakiej znajduje się specjalista w rozpatrywanym horyzoncie czasowym, można zaliczyć do odpowiedniego stanu eksploatacyjnego d_i, który jest elementem skończonego zbioru: $\mathbf{D} = \{d_i\}, i = \overline{1, D}$;

B. Wszystkie przejścia specjalisty między stanami o indeksach $i, j = \overline{1, D}$, odbywają się w sposób skokowy;

C. Czasy przebywania specjalisty w dowolnym stanie d_i, przed przejściem do innego stanu d_j, są wzajemnie niezależnymi zmiennymi losowymi T_{ij} o rozkładach prawdopodobieństwa $F(t)_i$ nie zmieniających swej postaci w czasie kalendarzowym.

Wymienione wyżej założenia, dotyczą funkcjonowania specjalisty w rzeczywistym systemie ratowniczym, mogą być spełnione dla odpowiednio przyjętego przedziału tolerancji, przy tworzeniu przestrzeni eksploatacyjnej i zbioru stanów procesu oraz podczas rejestracji przejść specjalisty między poszczególnymi stanami.

Do wyznaczania dyspozycyjności pojedynczego, uśrednionego w zbiorze specjalisty, niezbędna jest znajomość:

- zbioru stanów eksploatacyjnych $\mathbf{D} = \{d_i\}, i = \overline{1, D}$;
- zbioru warunkowych wartości oczekiwanych $\bar{t}_{ij}$ zmiennych losowych czasów przebywania specjalisty w stanie „*i*” przed przejściem do stanu „*j*”;
- macierzy $\mathbf{P} = [P_{ij}]; i, j = \overline{1 D}$, której elementy P_{ij} oznaczają warunkowe prawdopodobieństwa przejścia specjalisty ze stanu d_i do stanu d_j.

Przykładowymi stanami eksploatacyjnymi specjalisty mogą być stany:

- przebywania w systemie ratowniczym w gotowości do działania;
- realizacji akcji ratowniczej;
- przebywania w miejscu zamieszkania w zasięgu środków łączności;
- przebywania w niedyspozycyjności biologicznej (choroby), przebywania na urlopie w odległej miejscowości;
- itp.

Estymatorem wartości P_{ij} może być stosunek:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}$$

gdzie: n_{ij} - liczba przejść specjalisty ze stanu d_i do innego stanu d_j;

n_i - liczba wyjść specjalisty ze stanu d_i .

Etapem pośrednim do wyznaczania dyspozycyjności jest wyliczenie asymptotycznego prawdopodobieństwa przebywania specjalisty w wyróżnionym stanie d_i [2]. Prawdopodobieństwo to wylicza się stosując wzór:

$$P_{di} = \frac{\Pi_i \, \bar{t}_i}{\sum_{j=1}^{D} \Pi_j \, \bar{t}_j} \tag{1}$$

gdzie: P_{di} - asymptotyczne prawdopodobieństwo przebywania specjalisty w stanie d_i przy $t \leftarrow \infty$;

$\bar{t}_i$ - bezwarunkowa wartość oczekiwana zmiennej losowej czasu przebywania specjalisty w stanie d_i.

Π_i - stacjonarne prawdopodobieństwo łańcucha Markowa włożonego w proces półmarkowski:

$$\bar{t}_i = \sum_{j=1}^{D} P_{ij} \, \bar{t}_{ij} \; ; \tag{2}$$

$$\Pi_i = \frac{\mathbf{D}_i}{\sum_{j=1}^{D} \mathbf{D}_j} \tag{3}$$

gdzie: $\mathbf{D}_i$ - minar główny macierzy $\mathbf{D} = \mathbf{1} - \mathbf{D}$ uzyskany przez wykreślenie *i*-tej kolumny i *i*-tego wiersza;

Π - macierz jednostkowa.

Opisany wyżej zbiór stanów eksploatacyjnych specjalisty $\mathbf{D} = \{d_i\}$ można przedzielić na dwa rozłączne podzbiory $\mathbf{D}_d$ i $\mathbf{D}_n$,

gdzie: $\mathbf{D}_d$ - oznacza podzbiór stanów dyspozycyjności, w których specjalista może uczestniczyć w akcjach ratowniczych;

$\mathbf{D}_n$ - oznacza podzbiór stanów niedyspozycyjności, takich jak: choroba, konieczny wypoczynek itp.

Miarę dyspozycyjności specjalisty P_d stanowi suma prawdopodobieństw P_{d_i} dla stanów należących do podzbioru $\mathbf{D}_d$:

$$P_d = \sum_{d_i \in \mathbf{D}_d} P_{d_i} \tag{4}$$

Wartość P_d, gdzie $P_d \in [0,1]$, określa z jakim prawdopodobieństwem w dowolnej chwili *t* specjalista jest dysponowany do włączenia się do akcji ratowniczej.

3. Gotowość mobilizacyjna pojedynczego specjalisty

Specjalista zatrudniony w systemie ratowniczym może funkcjonować w dwojaki sposób:

1. Może on pełnić dyżury w ustalonym przedziale czasu, a w pozostałym czasie nie uczestniczyć w akcjach ratowniczych;
2. Może okresowo przebywać w systemie ratowniczym oraz może być mobilizowany w dowolnej chwili czasu do uczestnictwa w akcjach ratowniczych. Przykładem takiego rodzaju działania mogą być członkowie Ochotniczej Straży Pożarnej.

W pierwszym przypadku nie odbywa się proces mobilizacji specjalisty, a prawdopodobieństwo uczestnictwa w dyżurze jest równe wartości P_d wyznaczonej z zależności (4), $g = P_d$.

W drugim przypadku, gotowość mobilizacyjna jest charakterystyczną funkcją prawdopodobieństwa $g(t_d)$ zmiennej losowej T_d - czasu przejścia specjalisty z wyróżnionego podzbioru stanów eksploatacyjnych do stanu zdatności do działania.

Wyróżnionym podzbiorem stanów eksploatacyjnych jest tu podzbiór $\mathbf{D}_m \subset \mathbf{D}_d$, takich stanów, w których specjalista znajduje się poza systemem ratowniczym. Prognozuje się, że w ustalonym normą lub zadawalającym nas czasie t_d, przejdzie on do stanu zdatności do działania i będzie uczestniczył w akcji ratowniczej. Charakterystykę gotowości mobilizacyjnej wyznacza się z zależności:

$$g(t_d) = \sum_{d_i \in \mathbf{D}_m} P_{d_i} F_{d_i}(t_d) + P_{d_g} \tag{5}$$

gdzie: P_{d_i} - asymetryczne prawdopodobieństwo przebywania specjalisty w stanie d_i wyznaczone z zależności (1);

F_{d_i} - dystrybuanta zmiennej losowej T_{d_i} - czasu przejścia specjalisty ze stanu d_i do stanu d_g;

d_g - stan gotowości do działania w systemie ratowniczym;

P_{d_g} - asymptotyczne prawdopodobieństwo przebywania specjalisty w stanie d_g;

D_m - podzbiór takich stanów dyspozycyjności, w których specjalista będąc poza systemem uczestniczy w procesie mobilizacji.

Stany eksploatacyjne należące do podzbioru D_m, nazywane są stanami gotowości mobilizacyjnej.

4. Gotowość mobilizacyjna zespołów specjalistów

Zespół jednorodnych specjalistów działających w systemie ratowniczym posiada najczęściej strukturę progową typu *k* z *n*, która z punktu widzenia gotowości do działania może być jednoznacznie opisana trójką parametrów $\langle k, n, g \rangle$,

gdzie: k - próg gotowości zespołu do działania (minimalna liczba specjalistów w ekipie);

n - liczba specjalistów w ekipie;

g - gotowość uśrednionego specjalisty w zespole.

W pierwszym przypadku, gdy specjalista pełni stałe dyżury w systemie, $g = P_d$.

W drugim przypadku wartość *g* jest wyrażana funkcją $g(t_d)$ zależną od normy czasowej t_d.

Gotowość mobilizacyjną jednorodnego zespołu specjalistów w strukturze danej parametrami $\langle k, n, g \rangle$, mierzy się prawdopodobieństwem $(P_k / n, g /)$, zmobilizowania w zespole w czasie t_d, co najmniej *k* spośród *n* specjalistów.

Prawdopodobieństwo to wyraża „ogon” dystrybuanty rozkładu dwumianowego i może być wyznaczone z zależności:

(6)

$$P_k^{(n,g)}(t_g) = \sum_{i=n}^{n} \binom{n}{i} g(t_g)^i \left[1 - g(t_g)\right]^{n-1}$$

Jeśli specjaliści w zespole są niejednorodni, ze względu na parametr gotowości $g(t_g)$, lecz każdy posiada indywidualną charakterystykę gotowości g_i, to zależność (6) będzie bardziej złożona i przyjmie postać:

$$P_k^{(n,g_j)} = \sum_{i=k}^{n} \sum_{\Delta_i} \prod_{j=1}^{i} g_j \prod_{j=i+1}^{n} (1 - g_j) \tag{7}$$

gdzie: $\Delta_i = \{S_1, S_2, S, \ldots, S_j\}$ - zbiór *i*-elementowych kombinacji wystąpienia specjalistów z zespołu o liczbie *n*.

Analiza funkcji $P_k^{(n,g)}(t_g)$, ze względu na poszczególne parametry, została przeprowadzona w pracy [1]. Mobilizacja zespołów ludzkich całego systemu ratowniczego obejmuje wiele zespołów specjalistycznych, które najczęściej tworzą szeregową strukturę gotowości do działania. Gotowość mobilizacyjną systemu wyznacza wówczas iloczyn gotowości poszczególnych *i*-tych zespołów:

$$P_{s,k}^{(n,g)} = \prod_{j=1}^{N} P_{j,k}^{(n,g)} \tag{8}$$

gdzie: $P_{s,k}^{(n,g)}(t_g)$ - miara gotowości mobilizacyjnej zasobów ludzkich systemu ratowniczego;

$P_{j,k}^{(n,g)}(t_g)$ - miara gotowości mobilizacyjnej *j*-tego zespołu specjalistycznego o strukturze typu "*k* z *n*".

5. Obsługiwanie i uzdatnianie urządzeń technicznych

Urządzenia techniczne wykorzystywane w systemach ratowniczych mogą przebywać, podobnie jak specjaliści, w różnych, właściwych dla danego rodzaju urządzenia, stanach eksploatacyjnych.

Możemy wymienić następujące stany eksploatacyjne:

- użytkowania podczas akcji ratowniczej;

- dyżurowania w stanie zdolności;
- diagnozowania i obsługiwania urządzenia zdatnego;
- diagnozowania i uzdatniania urządzenia niezdatnego;
- oczekiwania na diagnozowanie lub obsługę;
- itp.

Stany eksploatacyjne tworzą skończony zbiór $\mathbf{E} = \{e_i\}, i = \overline{1E}$.

Zbiór **E** można podzielić na następujące rozłączne podzbiory:

$\mathbf{E}_0$ - gotowości do natychmiastowego działania w wymaganym wariancie użytkowania;

$\mathbf{E}_p$ - gotowości początkowej określonego stopnia, w którym urządzenie dyżuruje i wymaga pewnego nakładu pracy w celu przeprowadzenia diagnozy lub dokonania rozruchu albo uzdatniania do odpowiedniego wariantu użycia;

$\mathbf{E}_n$ - niegotowości do działania w akcji ratowniczej.

Wymienione podzbiory stanów eksploatacyjnych będziemy w dalszej części pracy nazywać odpowiednio:

$\mathbf{E}_0$ - stanem gotowości operacyjnej;

$\mathbf{E}_p$ - stanem gotowości początkowej;

$\mathbf{E}_n$ - stanem niegotowości.

Prawdopodobieństwo przebywania urządzenia technicznego w poszczególnych stanach gotowości, wyznacza się stosując algorytm przedstawiony w punkcie (1). Różnica polega na interpretacji stanów eksploatacyjnych i odpowiednim podziale zbioru $\mathbf{E}$ na poszczególne podzbiory. Uwzględniając powyższe, wzór (4) dla urządzenia technicznego można przedstawić w postaci:

$$P_0 = \sum_{e_i \in E_0} p_{e_i} \tag{9}$$

gdzie: P_0 - miara gotowości operacyjnej urządzenia;

p_{e_i} - asymptotyczne prawdopodobieństwo przebywania urządzenia w stanie e_i przy $t \to \infty$, wyznaczone z zależności (1)

lub:

(10)

$$P_p = \sum_{e_i \in E_p} p_{e_i}$$

gdzie: P_p - miara gotowości początkowej urządzenia.

Przejście urządzenia z dowolnego stanu $e_i \in \mathbf{E}$ do stanu $e_j \in \mathbf{E}$, następuje po zrealizowaniu odpowiedniej obsługi lub uzdatnianiu urządzenia przez zmobilizowany w systemie zespół specjalistów.

Czas przejścia urządzenia ze stanu $e_i \in \mathbf{E}_p$ do stanu $e_j \in \mathbf{E}_0$ jest zmienną losową $T_{ij}^{(r)}$, zależną od stopnia ukompletowania zespołu specjalistów wykonujących obsługę. Stopień ukompletowania *r* - oznacza liczbę specjalistów zmobilizowanych w zespole. Warunkową gęstość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej $T_{ij}^{(r)}$, przy *r*-tym stopniu ukompletowania zespołu, wynosi $f_{ij}^{(r)}(t_u)$, a wartość oczekiwana $\bar{t}_{ij}^{(r)}$.

Warunkowe prawdopodobieństwo obsługi lub uzdatniania urządzenia dla pary stanów e_i *oraz* e_j w czasie t_u, przy *r*-tym stopniu ukompletowania zespołu, dane jest dystrybuantą $F_{ij}^{(r)}(t_u)$.

Warunkowe prawdopodobieństwo uzdatniania urządzenia z dowolnego stanu e_i do stanu gotowości e_{un}, w czasie t_u, przy *r*-tym stopniu ukompletowania zespołu opisuje dystrybuanta $F_u^{(r)}(t_u)$:

$$F_u^{(r)}(t_u) = \sum_{e_i \in \mathbf{E}_p} p_{e_i} F_{ij}^{(r)}(t_u) \tag{11}$$

Zespół specjalistów o strukturze gotowości typu *k* z *n*, obsługujący użytkowane urządzenia techniczne, tworzy w rozpatrywanym systemie ratowniczym moduł eksploatacyjny. Jego gotowość mobilizacyjna mierzona jest prawdopodobieństwem zmobilizowania się zespołu specjalistów i uzdatnienia urządzeń technicznych w czasie *t*. Rzeczywisty czas trwania obydwu wymienionych przedsięwzięć wyznacza suma zmiennych losowych czasu mobilizacji zespołu specjalistów i czasu uzdatniania urządzeń technicznych.

Miarą gotowości mobilizacyjnej $G_i(t)$ *i*-tego modułu eksploatacyjnego, złożonego z zespołu specjalistów o parametrach $\langle k, u, g \rangle$ i przypisanych im urządzeń technicznych, wyznacza się z zależności:

$$G_i(t) = \sum_{r=k}^{n} P_{n_i,k_i}^{(r)} \; F_i^{(r)}(t) \tag{12}$$

gdzie: $P_{n_i,k_i}^{(r)}$ - prawdopodobieństwo zmobilizowania się dokładnie r specjalistów w i-tym zespole pod warunkiem, że osiągnięty został próg gotowości spośród n specjalistów, wyliczamy stosując wzór (3) [1]:

$$P_{n_i,k_i}^{(r)} = \frac{\binom{n}{r} \int_0^\infty g(t_d)^r \left[1 - g(t_d)\right]^{n-r} dt}{\sum_{m=k}^{n} \binom{n}{m} \int_0^\infty g(t_d)^m \left[1 - g(t_d)\right]^{n-m} dt} \tag{13}$$

(symbole użyte w powyższym wzorze zostały opisane w punkcie (3 i 4)).

$F_i^{(r)}(t)$ - dystrybuanta zmiennej losowej łącznego czasu zmobilizowania się zespołu do liczby r specjalistów i uzdatnienia urządzeń technicznych w i-tym modelu.

Dystrybuantę $F_i^{(r)}(t)$ wyznacza splot dystrybuant:

$$F_i^{(r)}(t) = F_{d,i}^{(r)}(t_d) * F_{u,i}^{(r)}(t_u) \tag{14}$$

gdzie: $F_{d,i}^{(r)}(t_d)$ - dystrybuanta zmiennej losowej czasu zmobilizowania w i-tym zespole o parametrach $\langle k, n, g \rangle$ liczby r specjalistów, dana zależnością:

$$F_{d,i}^{(r)}(t_d) = \frac{\int_0^{t_d} g(t)^r \left[1 - g(t_d)\right]^{n-r} dt}{\int_0^\infty g(t)^r \left[1 - g(t)\right]^{n-m} dt} \tag{15}$$

gdzie: $F_{u,i}^{(r)}(t_u)$ - dystrybuanta zmiennej losowej czasu uzdatniania urządzeń technicznych i-tego zespołu przy r-tym stopniu ukompletowania.

Stosując operację splotu można napisać:

$$F_i^{(r)}(t) = \int_0^t F_{d,i}^{(r)}(t - t_u) dF_{u,i}^{(r)}(t_u) \tag{16}$$

W przypadku, gdy zespół specjalistów pełni stałe dyżury i nie podlega mobilizacji w czasie akcji ratowniczej, wzory (7.16) i (7.18) znacznie się uproszczą i przyjmą postać:

$$P_{n,k}^{(r)} = \frac{\binom{n}{r} P_d^r (1 - P_d)^{n-r}}{\sum_{m=k}^{n} \binom{n}{m} P_d^m (1 - P_d)^{n-m}} \tag{17}$$

gdzie: P_d - miara dyspozycyjności specjalisty dana wzorem (4),

oraz:

$$F_{d,i}^{(r)}(t_d) = 1 \tag{18}$$

Miarę gotowości mobilizacyjnej dla tego przypadku wyznacza się z zależności:

$$G_i(t) = \sum_{r=k}^{n} P_{n_i,k_i}^{(r)} F_{u,i}^{(r)}(t_u) \tag{19}$$

Gotowość systemu ratowniczego, złożonego z *N* różnych zespołów, zależy od struktury, jaką zespoły te tworzą w systemie. Postacie struktur i zasady agregacji mogą być wzięte z teorii niezawodności. Na przykład dla systemu ratowniczego o szeregowej strukturze gotowości poszczególnych zespołów, charakterystyka gotowości mobilizacyjnej *G(t)* będzie podana z zależności:

$$G(t) = \prod_{i=1}^{N} G_i(t) \tag{20}$$

Przedstawiony model oceny gotowości mobilizacyjnej systemów ratowniczych, pozwala precyzyjniej określić ich jakość, wzajemnie porównać oraz umożliwia analizę na wielu płaszczyznach. Niektóre zależności funkcyjne, takie jak ogon dystrybuanty w rozkładzie dwumianowym lub regresja średniego czasu uzdatniania i stopnia ukompletowania zespołu, zostały omówione szerzej w pracach [2] i [1].

Zależność (12) i związane z nią zależności (13), (14) oraz (15) mogą posłużyć do formułowania zagadnień optymalizacyjnych.

Sposób przedstawienia modelu umożliwia opracowanie algorytmów komputerowych, które umożliwią szybką analizę, a w konsekwencji sterowanie gotowością systemu ratowniczego. Ze względu na ograniczone ramy opracowania nie przedstawiono końcowych wzorów, opisujących gotowość mobilizacyjną dla innych struktur niezawodnościowych systemu E oraz pominięto zjawisko wzajemnego zastępowania się specjalistów z sąsiednich zespołów.

Literatura

[1] Żurek J.: *Metoda oceny systemów ratowniczych w lotnictwie.* Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, z. 32, Transport, Warszawa, 1993.

[2] Żurek J.: *Gotowość operacyjna układu "obiekt techniczny - ekipa operatorów".* Materiały na konferencję "Cybernetyka w gospodarce morskiej", Gdańsk, 1983.

[3] Żurek J. *Metoda analizy początkowej gotowości operacyjnej wojskowych systemów lotniczych.* WAT, Warszawa, 1981.

[4] Żurek J.: *Niezawodność systemów technicznych wyposażonych w urządzenia zabezpieczające z wielokrotną próbą odparowania sytuacji niebezpiecznej.* Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z. 1, Warszawa, 1997.