

METODA ESTYMACJI RYZYKA NAPĘDOWEGO SYSTEMÓW OKRĘTOWYCH

Artykuł przedstawia procedury zastosowania metody AHP w estymacji ryzyka systemów okrętowych. Estymacje parametrów funkcji ryzyka systemów przeprowadza się na podstawie danych ekspertów uzyskanych metodą porównywania parami.

WPROWADZENIE

W transporcie morskim wśród wielu czynników wpływających na bezpieczeństwo żeglugi istotna jest niezawodność systemu napędowego. Utrata funkcji napędu przez statek w pewnych warunkach może spowodować poważne wypadki morskie, których konsekwencjami mogą być straty w ludziach czy środowisku.

Ryzyko zaistnienia takiego zdarzenia, które nazwiemy ryzykiem napędowym, zależy od niezawodności jego elementów składowych układu napędowego oraz operatorów. Oszacowanie ryzyka takiego systemu napotyka trudności ze względu na złożoność systemu i brak danych o tej niezawodności. W takich wypadkach użyteczne okażą się subiektywne oszacowania na podstawie opinii ekspertów [3].

W przedstawionej pracy ekspertami byli oficerowie mechanicy okrętowi o długoletnich stażach, którzy ujawniali roczne liczby uszkodzeń systemu napędowego i lingwistyczne wartości udziałów podsystemów tego systemu w ogólnej liczbie jego uszkodzeń katastroficznych. Estymacje parametrów funkcji ryzyka podsystemów z danych ekspertów zostały przeprowadzone metodą porównywania parami. Uzyskano w ten sposób właściwą korelację między danymi dotyczącymi systemu oraz jego składowych (podsystemów). Dane uzyskane z porównywania parami przetworzono metodą AHP (*Analityczny Hierarchiczny Proces Decyzyjny*).

1. PODSTAWY TEORETYCZNE

Metoda AHP jest jedną z powszechnie stosowanych metod w wieloatrybutowym podejmowaniu decyzji. Proces decyzyjny w metodzie AHP składa się z sze-

regowania wariantów i agregacji otrzymanych uszeregowania według zdefiniowanej struktury hierarchicznej [4]. Uszeregowania wyznacza się metodą porównywania parami.

Metoda porównywania parami polega na porównywaniu poszczególnych wariantów ze sobą i przyporządkowaniu każdej parze pewnej liczby z wcześniej zdefiniowanej skali. Porównania dokonuje ekspert, przypisując każdej parze ocenę liczbową lub rozmytą. Ocena ta wyraża subiektywną preferencję eksperta dla jednego z dwóch wariantów (tab. 1).

Tabela 1

Oceny odpowiadające preferencjom ekspertów na podstawie Saaty'ego [4]

Ocena	Preferencja
1	Równoważność
3	Słaba preferencja wariantu i -tego względem wariantu j -tego
5	Istotna preferencja wariantu i -tego względem wariantu j -tego
7	Wyraźna preferencja wariantu i -tego względem wariantu j -tego
9	Bezwzględna preferencja wariantu i -tego względem wariantu j -tego
2, 4, 6, 8	Wartości pośrednie
Odwrotność powyższych liczb	Odpowiednia preferencja odwrotna do wyżej wymienionych

Załóżmy, że mamy n wariantów (W_1, W_2, \dots, W_n) do szeregowania. Każdej parze wariantów (W_i, W_j) ekspert przypisuje liczbę r_{ij} ze zbioru $S = \{1/9, 1/8, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 8, 9\}$ wyrażającą jego subiektywne preferencje dotyczące wariantu i -tego w stosunku do j -tego. Na podstawie ocen ekspertów tworzone są macierze ocen R (z reguły niezgodnych):

$$R = [r_{ij}] = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Macierz R jest macierzą z niezgodnymi ocenami o właściwości:

$$r_{ij} > 0, \quad r_{ij} = \frac{1}{r_{ji}} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Macierz R uważana jest za zgodną, jeśli jej elementy spełniają warunek:

$$r_{ij}r_{jk} = r_{ik}, \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n.$$

Uszeregowanie wariantów otrzymuje się w wyniku aproksymacji macierzy ocen R za pomocą macierzy P :

$$\mathbf{P} = [p_{ij}] = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nm} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

której elementy są ocenami zgodnymi przedstawionymi w postaci ilorazów wag poszczególnych wariantów:

$$p_{ij} = \frac{p_i}{p_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

gdzie:

p_i – wagi poszczególnych wariantów wektora uszeregowania p :

$$\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)^T. \quad (5)$$

Po arytmetycznej normalizacji otrzymujemy znormalizowany wektor uszeregowania:

$$\mathbf{p}^* = (p_1^*, \dots, p_n^*)^T, \quad (6)$$

gdzie:

$$p_i^* = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}.$$

W artykule zastosowano metodę logarytmicznych najmniejszych kwadratów w aproksymacji macierzy ocen [2, 4]. Metoda ta polega na wyznaczeniu macierzy P położonej najbliżej w stosunku do macierzy R na podstawie normy euklidesowej w skali logarytmicznej. Macierz P spełnia zależność:

$$\min \left\{ \sum_{i,j=1}^n \left[\ln(r_{ij}) - \ln\left(\frac{p_i}{p_j}\right) \right]^2 \right\}. \quad (7)$$

Po podstawieniu $y_{ij} = \ln(r_{ij})$, $x_i = \ln(p_i)$ otrzymujemy zagadnienie optymalizacyjne:

$$\min \left\{ I = \sum_{i,j=1}^n [y_{ij} - x_i + x_j]^2 \right\}, \quad (8)$$

którego rozwiązanie ma postać:

$$\frac{\partial I}{\partial x_k} = -2 \sum_{j=1}^n [y_{kj} - x_k + x_j] = 0. \quad (9)$$

Po wprowadzeniu warunku normalizacji geometrycznej

$$\prod_{i=1}^n p_i = 1, \quad \left(\sum_{j=1}^n x_j = 0 \right) \quad (10)$$

równanie (9) przyjmuje postać:

$$\sum_{j=1}^n y_{kj} = nx_k \quad \text{lub} \quad x_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{kj}, \quad k = 1, \dots, n. \quad (11)$$

Ostatecznie po uwzględnieniu (8) otrzymujemy wektor uszeregowania wariantów:

$$p_i = e^{x_i} = \left(\prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (12)$$

W przypadku wielu ekspertów oceniających parę wariantów oceny poszczególnych ekspertów traktuje się równoważnie i wówczas zadanie sprowadza się do postaci:

$$\min \left\{ \sum_{i,j=1}^n \sum_{k=1}^{m_{ij}} \left[\ln(r_{ijk}) - \ln\left(\frac{p_i}{p_j}\right) \right]^2 \right\}, \quad (13)$$

gdzie:

m_{ij} – liczba ocen dotyczących pary (i, j) .

Po wprowadzeniu podstawień: $y_{ijk} = \ln(r_{ijk})$, $x_i = \ln(p_i)$ otrzymujemy zagadnienie optymalizacyjne:

$$\min \left\{ I = \sum_{i,j=1}^n \sum_{k=1}^{m_{ij}} [y_{ijk} - x_i + x_j]^2 \right\}, \quad (14)$$

którego rozwiązanie ma postać:

$$\frac{\partial I}{\partial x_l} = -2 \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_{lj}} [y_{ljk} - x_l + x_j] = 0, \quad l = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

Układ równań (15) sprowadza się do układu równań normalnych:

$$x_i \sum_{j=1, j \neq i}^n m_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n m_{ij} x_j = \sum_{j=1, j \neq i}^n \sum_{k=1}^{m_{ij}} y_{ijk}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

W zapisie macierzowym układ (16) ma postać:

$$Ax = b, \quad (17)$$

gdzie: $b = [b_i], \quad b_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \sum_{k=1}^{m_{ij}} y_{ijk}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (18)$

$$A = \begin{pmatrix} \sum_{j=1, j \neq 1}^n m_{1j} & -m_{12} & \cdots & -m_{1n} \\ -m_{21} & \sum_{j=1, j \neq 2}^n m_{2j} & \cdots & -m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -m_{n1} & -m_{n2} & \cdots & \sum_{j=1, j \neq n}^n m_{nj} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Wektor uszeregowania wariantów można wyznaczyć z równania:

$$p = e^x = e^{A^{-1}b}. \quad (20)$$

2. ZASTOSOWANIE

Metodę AHP zastosowano w estymacji udziałów składowych podsystemów i zespołów w strukturze niezawodnościowej układu napędowego statku. Dane uzyskiwano w grupie 47 ekspertów (oficerów mechaników) za pomocą specjalnie przygotowanej ankiety.

Eksperci ujawnili swoje sądy na temat udziałów podsystemów w ogólnej liczbie uszkodzeń badanego systemu w postaci lingwistycznych wartości (bardzo mały, mały, średni, duży, bardzo duży). Oceny ekspertów zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Lingwistyczne oceny ekspertów na temat udziałów podsystemów
w ogólnej liczbie uszkodzeń systemu

Nazwa podsystemów	Udział w ogólnej liczbie uszkodzeń badanego systemu				
	bardzo mały/brak	mały	średni	duży	bardzo duży
Instalacja zasilania paliwem				x	
Instalacja chłodzenia wodą morską		x			
Instalacja niskotemperaturowa chłodzenia wodą słodką		x			
Instalacja wysokotemperaturowa chłodzenia wodą słodką		x			
Instalacja sprężonego powietrza			x		
Instalacja obiegowego smarowania silnika głównego			x		
Instalacja smarowania tulei cylindrowych silnika głównego		x			
Instalacja elektroenergetyczna				x	
Silnik główny				x	
Układ zdalnego sterowania silnikiem głównym			x		
Śruba napędowa i linia wału		x			

Dane te są porównywane parami i przeskalowane w przyjętej 5-stopniowej skali w celu tworzenia macierzy ocen. Przykład takiej macierzy ocen dla jednego k -tego eksperta wygląda następująco:

$$R_k = [r_{ijk}] = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 5 & 5 & 3 & 3 & 5 & 1 & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \\ \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \\ \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \\ \frac{1}{3} & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \\ 1 & 5 & 5 & 5 & 3 & 3 & 5 & 1 & 1 & 3 & 5 \\ 1 & 5 & 5 & 5 & 3 & 3 & 5 & 1 & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix}_k$$

Następnie aproksymuje się macierze ocen R za pomocą macierzy ilorazów składowych wektora uszeregowania. W aproksymacji macierzy ocen stosowano metodę logarytmicznych najmniejszych kwadratów dla przypadku wielu ekspertów.

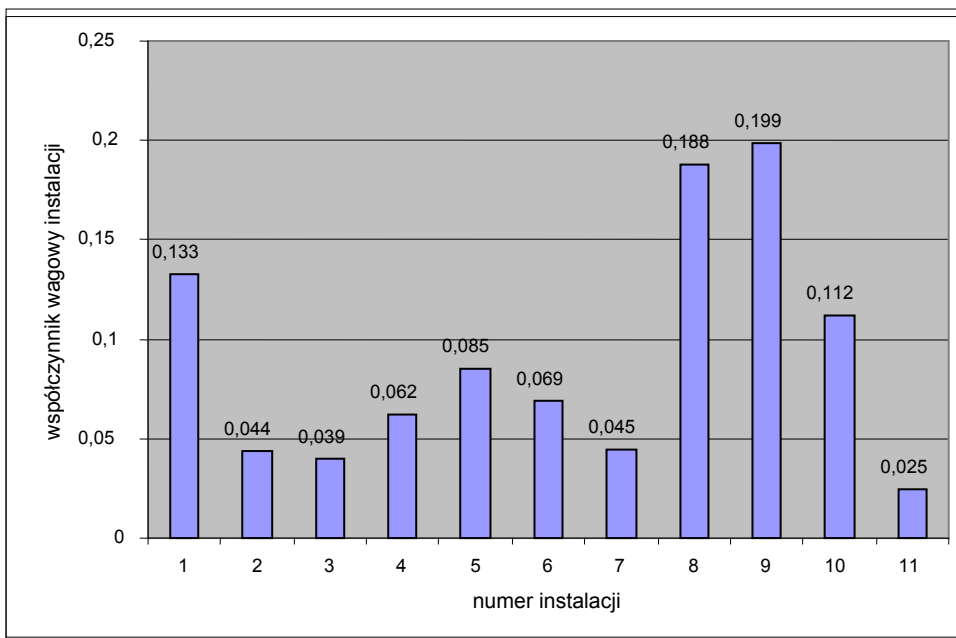
Macierz A otrzymuje się w postaci:

$$A = [a_{ij}] = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -47 & 470 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 \\ -47 & -47 & 470 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 \\ -47 & -47 & -47 & 470 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 \\ -47 & -47 & -47 & -47 & 470 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 \\ -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & 470 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 \\ -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & 470 & -47 & -47 & -47 & -47 \\ -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & 470 & -47 & -47 & -47 \\ -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & 470 & -47 & -47 \\ -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & 470 & -47 \\ -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & -47 & 470 \end{pmatrix}$$

Natomiast wektor b , wektor x i wektor wag znormalizowanych udziałów podsystemów jako przyczyny uszkodzenia układu napędowego wyznaczone na podstawie ocen od grupy 47 ekspertów są następujące:

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ -274,95 \\ -327,13 \\ -94,04 \\ 71,12 \\ -40,97 \\ -264,76 \\ 478,40 \\ 508,06 \\ 212,73 \\ -568,94 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} 0,5812 \\ -0,5318 \\ -0,6327 \\ -0,1819 \\ 0,1375 \\ -0,0792 \\ -0,5121 \\ 0,9253 \\ 0,9827 \\ 0,4114 \\ -1,1004 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{p}^* = \begin{pmatrix} 0,1329 \\ 0,0436 \\ 0,0394 \\ 0,0619 \\ 0,0853 \\ 0,0686 \\ 0,0445 \\ 0,1876 \\ 0,1986 \\ 0,1122 \\ 0,0247 \end{pmatrix}$$

Na rysunku 1 przedstawiono estymowane wagi podsystemów w modelu ryzyka utraty funkcji układu napędowego, wyznaczone na podstawie ocen od grupy 47 ekspertów.



Rys. 1. Wagi podsystemów wyznaczone metodą logarytmicznych najmniejszych kwadratów z ocen 47 ekspertów

Przyjęto, że funkcja zawodności systemu \mathfrak{R} ma wykładnicze prawdopodobieństwa czasu do pierwszego uszkodzenia. Wykładniczy rozkład tego czasu jest charakterystyczny dla normalnej eksploatacji wielu klas systemów, w tym także systemów okrętowych [1]:

$$\mathfrak{R}(t) = P\{\tau < t\} = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \quad (21)$$

gdzie:

λ – intensywność uszkodzenia systemu,

τ – zmienna losowa oznaczająca czas do uszkodzenia.

W rozważanym modelu przyjęto także pomijalnie krótkie w stosunku do czasu eksploatacji okresy postojów związane z odnowami statku i jego wyposażenia. Intensywność uszkodzenia systemu λ można wtedy wyznaczyć na podstawie twierdzenia o asymptotycznym zachowaniu się procesu odnowy [1]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[N(t)]}{t} = \frac{1}{T_0} = \lambda, \quad (22)$$

gdzie:

T_0 – średni czas do uszkodzenia,

$N(t)$ – liczba uszkodzeń systemu.

Z danych ujawnionych przez ekspertów otrzymujemy $\lambda = 3,34575 \cdot 10^{-4}$ 1/h.

Otrzymany wektor szeregowania udziałów podsystemów można zapisać w postaci:

$$p = \mathbf{p}^* = (p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n), \quad (23)$$

gdzie:

p_i – udział i -tego podsystemu jako przyczyny uszkodzenia systemu,

n – liczba podsystemów.

Intensywność uszkodzeń podsystemów można wyznaczyć z zależności:

$$\lambda_i = \lambda p_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (24)$$

Wyniki obliczeń przedstawione są w tabeli 3 jako estymowane wagi i intensywności uszkodzeń podsystemów w modelu ryzyka utraty funkcji układu napędowego.

Tabela 3

Intensywności uszkodzeń podsystemów układu napędowego statku

Nazwa podsystemów	p_i	λ [$\times 10^{-5}$]
Instalacja zasilania paliwem	0,132970	4,52026
Instalacja wody chłodzenia wodą morską	0,043692	1,48517
Instalacja niskotemperaturowa chłodzenia wodą słodką	0,039497	1,34260
Instalacja wysokotemperaturowa chłodzenia wodą słodką	0,061996	2,10739
Instalacja sprężonego powietrza	0,085332	2,90062
Instalacja obiegowego smarowania silnika głównego	0,068698	2,33519
Instalacja smarowania tulei cylindrowych	0,044561	1,51474
Instalacja elektroenergetyczna	0,187603	6,37703
Silnik główny	0,198681	6,75360
Układ zdalnego sterowania silnikiem	0,112219	3,81457
Śruba napędowa i linia wału	0,024742	0,84103

PODSUMOWANIE

W pracy pokazano procedury zastosowania metody porównywania parami w estymacji ryzyka systemów okrętowych. Metody te są szczególnie przydatne w przypadku estymacji danych ekspertowych, w których oceny są zazwyczaj niezgodne bądź obciążone błędami. Stosowanie metody logarytmicznych najmniejszych kwadratów w szeregowaniu wariantów sprowadza się do geometrycznej

normalizacji, która zapewnia właściwą korelację między ocenami wielu ekspertów także w wypadku brakujących danych.

Obecnie przeprowadzone są prace nad neuronowo rozmytym modelem ryzyka napędowego statków w Katedrze Podstaw Techniki AM. Estymowane parametry otrzymywane metodą AHP stanowią dane wejściowe dla tego modelu.

LITERATURA

1. Gniedienko B.W., Bielajew J.K., Sołowiew A.D., *Metody matematyczne w teorii niezawodności*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1968.
2. Kwiesielewicz M., *Analityczny hierarchiczny proces decyzyjny. Nierozmyte i rozmyte porównywanie parami*, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2002.
3. Mazzuchi T., Linzey W., Brauning A., *A paired comparison experiment for gathering expert judgment for an aircraft wiring risk assessment*, Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93, s. 722–731.
4. Saaty T.L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York 1980.

A METHOD OF RISK ESTIMATION OF THE SHIP SYSTEMS

Summary

Presented is a method of risk estimation caused by loss of the propulsion function by a seagoing ship. The estimation is fully based on the data obtained from experts and processed using the pair comparison method. An example is given of the propulsion risk estimation of container carriers operating on the North Atlantic line. The example allows to assess effectiveness of the method.