

STROJENIE SIECI NEURONOWEJ NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU NA PODSTAWIE OPINII EKSPERTÓW

W artykule przedstawiono metodę strojenia sieci neuronowej, odpowiednią w analizach niezawodności systemów antropotechnicznych, opartą na opiniach ekspertów – praktyków eksploatacji. Przeprowadzono numeryczno-lingwistyczną elicytację tych opinii, które okazały się nieskorelowane i nie nadawały do strojenia sieci. Do przetwarzania danych zastosowano metodę AHP z odpowiednią przyjętą skalą i metodą aproksymacji macierzy ocen. Przeprowadzono analizy korelacji zbiorów otrzymanych danych wejściowych i wyjściowych sieci oraz uchybu metody przetwarzania danych. Wyniki przedstawiono w przykładzie elicytacji i analizy korelacji danych sieci niezawodności systemu napędowego statku morskiego.

Słowa kluczowe: strojenie sieci neuronowej, niezawodność systemu, opinia ekspertów, korelacja danych, metoda AHP, skala potęgowa.

WSTĘP

Sieci neuronowe (SN) mogą być użyteczne tam, gdzie występują trudności ze sformułowaniem, także rozwiązaniem modelu analitycznego, a istnieją dane do strojenia sieci. Mogą to być dane obiektywne lub subiektywne, zgromadzone w pamięci ludzkiej. Takimi dziedzinami są m.in. niezawodność i bezpieczeństwo systemów antropotechnicznych, szczególnie złożonych, których modele bywają obarczone bliżej nieokreśloną niepewnością.

W pracy [5] przyjęto określony formalny model niezawodności systemu napędowego statku, którego parametry wyznacza się za pomocą sieci neuronowej. Dane uczące tę sieć uzyskuje się od ekspertów. Jak wynika z badań przeprowadzonych w [5], sieć nie potrafiła znaleźć poprawnych zależności pomiędzy wejściami a wyjściem i konieczna jest kalibracja opinii ekspertów do takiej postaci, aby umożliwić sieci neuronowej znalezienie zależności panujących w badanym systemie.

Strojenie SN polega na wyznaczeniu wartości parametrów wejściowych i wyjściowych sieci (I/O). Wartości parametrów I/O SN muszą być skorelowane – nieskorelowane nie nadają się do strojenia, co jest oczywiste. Uzyskanie skorelowanych danych subiektywnych stanowi podstawową trudność w rozważanym przypadku.

Istnieje kilka sposobów wpływania na poziom tej korelacji. Są to przede wszystkim: właściwy dobór ekspertów i metod elicytacji ich opinii oraz zastosowanie odpowiednich, skutecznych w rozpatrywanym przypadku, metod przetwarzania uzyskanych danych. Tego właśnie przypadku dotyczy artykuł.

1. EKSPERCI I PROCEDURA ELICYTACJI

Ekspert to z założenia znawca rzeczy, co do której ma on sformułować swoją opinię. Znaństwo to wiąże się z doświadczeniem, które zdobywa się w ciągu lat praktyki. Ekspert powinien także posiadać umiejętność formułowania swoich opinii. Wiąże się to z poziomem jego wykształcenia oraz językiem użytym w procesie elicytacji, szczególnie z wielkościami, których wartości ekspert ma oszacować. Może być to język wartości numerycznych lub lingwistycznych. Wartości numeryczne są cenniejsze, ale trudniejsze do wyartykułowania, łatwiej tu o błędne opinie.

W przypadku niezawodności strojenie dotyczy charakterystyk wyrażonych wielkościami probabilistycznymi, np. funkcją zawodności lub niezawodności, intensywności uszkodzeń, gęstością odnowy lub też wielkościami fizycznymi, będącymi zmiennymi niezależnymi w tych wyrażeniach, np. liczbą uszkodzeń w jednostce czasu, czasem do lub między uszkodzeniami.

Preferowanymi kandydatami na ekspertów systemów technicznych są osoby, które miały możliwość obserwowania procesu eksploatacji obiektów elicytacji przez dostatecznie długi czas oraz posiadające odpowiednią wiedzę teoretyczną. Analityk niezawodności powinien odpowiednio określić język elicytacji i wybrać kategorię dostępnego eksperta. Ograniczenie w tym przypadku może stanowić liczba i umiejętności dostępnych ekspertów. Przykładowo, w badaniach niezawodności urządzeń elektrowni jądrowej można liczyć na operatorów tych obiektów, będących wysokiej klasy specjalistami, którym znana jest probabilistyka, a na statkach morskich – na członków załóg o różnym poziomie wykształcenia, którym generalnie probabilistyka jest obca.

Człowiek źle szacuje prawdopodobieństwo. Jego opinie wykazują odchyłki, słabą kalibrację, brak koherencji oraz tendencję do zawyżonej wiarygodności. Między opiniami ekspertów mogą występować zależności. Nie daje się tych wad w pełni usunąć w fazie elicytacji [3, 9].

W tabeli 1 zamieszczono dane dotyczące form prezentacji opinii probabilistycznych. Rodzaj rozkładu prawdopodobieństwa wiąże się z naturą zdarzenia, którego rozkład dotyczy. Przykładowo, rozkłady czasu zdatności lub czasu obsługi są ciągłe, a prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez człowieka estymuje się na ogół dyskretnymi. Rozkłady okoliczności zdarzeń niebezpiecznych, występujących w drzewach zdarzeń, estymowane są na ogół rozkładami dyskretnymi dwupunktowymi. Wymiar rozkładu może być istotny w przypadku estymacji rozkładów prawdopodobieństwa zaistnienia strat różnej kategorii, a także rozkładów parametrów stanu otoczenia obiektu analizy ryzyka, np. warunków meteorologicznych.

Tabela 1. Taksonomia form opinii probabilistycznych stosowanych w niezawodności
Table 1. Taxonomy of the forms of probabilistic judgments used in reliability

Rodzaj rozkładu	Dyskretny: dwupunktowy lub wielopunktowy, lub ciągły o znanej postaci funkcyjnej lub empiryczny
Modele rozkładów prawdopodobieństwa	Empiryczny Formalny, np. wykładniczy, normalny lub procesy Markowa
Wymiar rozkładu	Jednowymiarowy lub wielowymiarowy
Częstość zdarzeń	Częsta ($p > 0,01$) lub rzadka ($p < 0,01$)
Kalibracja	Z kalibracją lub bez danymi obiektywnymi

Istotne jest rozróżnienie zdarzeń częstych i rzadkich. Te ostatnie mogą znajdować się poza doświadczeniem ekspertów, którzy ich nie obserwowali. Estymacja prawdopodobieństwa zaistnienia zdarzeń rzadkich opiera się na intuicji.

Odnośnie do informacji, wymienionej w ostatnim wierszu tabeli 1, istotny jest fakt posiadania lub nieposiadania informacji obiektywnej, która mogłaby zostać użyta do kalibracji opinii eksperckich. Bez takiej informacji wyniki estymacji mogą być obarczone znaczną niepewnością.

W [4] opisano warunki, jakie powinny zostać spełnione w fazie elicytacji opinii eksperckich. Podstawowe z nich dotyczą doboru ekspertów, instruktażu, ankiety i sposobu ich wypełniania, niezależności opinii oraz czasu trwania wywiadu. Ekspertów dobiera się odpowiednio do tematyki badania. Przedstawia się im cel i procedurę badania, sposób przetwarzania danych oraz wyjaśnia powstałe kwestie. Motywuje się ich do rzetelnego formułowania opinii. Ekspersi ujawniają je, wypełniając przygotowane w tym celu ankiety. Podają w nich liczby lub zaznaczają wartości lingwistyczne w określonych polach ankiety. Nie można od nich wymagać odpowiedzi na kwestie, co do których nie posiadają wiedzy. Ankiety powinny być możliwie proste.

Opinie ekspertów muszą być formułowane niezależnie, co oznacza, że nie mogą oni kontaktować się między sobą podczas procesu elicytacji. Mają całkowicie samodzielnie formułować swoje opinie, polegając na własnym doświadczeniu [1, 3, 9].

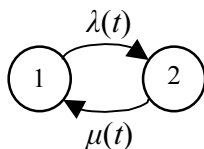
W dużym systemie niezawodnościowym można proces elicytacji udziałów elementów tego systemu w częstości jego uszkodzeń podzielić na „warstwy”, przykładowo w przypadku dwóch warstw – wyższej i niższej – wyznaczyć w pierwszej warstwie udziałów uszkodzeń elementów wyższej warstwy drzewa FT systemu w częstości jego uszkodzeń, a następnie udziałów uszkodzeń warstwy niższej w częstościach uszkodzeń obiektów tej pierwszej. W procedurze należy zachować rygory zupełności i rozłączności poszczególnych warstw. Zabieg ten powinien zwiększyć dokładności oszacowań eksperckich, gdyż zmniejsza „odległość” przedmiotów, między którymi rozważane są relacje.

2. FORMALNY MODEL NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU

Interesujący nas obiekt antropotechniczny potraktowano jako system w sensie niezawodności. Może być to system nieodnawialny lub odnawialny z pomijalnym lub niepomijalnym czasem odnowy. Stan uszkodzenia katastroficznego modeluje się jako stan pochłaniający.

Pierwszym krokiem w programowaniu każdego badania jest sformułowanie jego celu oraz założeń odnośnie do przedmiotu badania (definicje systemu i jego stanów eksploatacyjnych, formalny model niezawodności, charakterystyki otoczenia). Opierając się na tych założeniach buduje się drzewo niezdatności systemu (FT). Drzewo to umożliwi wyznaczenie zbiorów elementów, od których zdatności zależy niezawodność systemu i ewentualnie zależności pośrednich, jeśli okaże się to korzystne dla procesu elicytacji.

Do dalszych rozważań przyjęto model niezawodności systemu jako łańcuch Markowa z dwoma stanami eksploatacyjnymi (rys. 1). Zadaniem SN będzie wyznaczanie parametrów tych modeli.



Rys. 1. Graf łańcucha Markowa systemu z dwoma stanami eksploatacyjnymi

Fig. 1. Markov chain graph of system with two operational stages

Graf na schemacie przedstawia najprostszy przypadek łańcucha systemu z dwoma stanami eksploatacji: 1 – użytkowanie z intensywnością $\lambda(t)$ oraz 2 – obsługa z intensywnością $\mu(t)$. Jest to łańcuch procesu niejednorodnego ze skończonym czasem odnowy. Jeżeli intensywności zmian stanów nie zależą od czasu t , to łańcuch staje się jednorodny, a rozkłady czasu przebywania w stanach 1 i 2 wykładnicze. Wzór na gotowość takiego systemu w wersji jednorodnej ma postać:

$$a(t) = P_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \text{eks}[-(\lambda + \mu)t]. \quad (1)$$

Parametrami w modelu (1) są intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ oraz odnów $\mu(t)$. Generalnie zależą one od czasu, ale można je aproksymować stałymi lub przedziałami stałymi wartościami λ i μ . Wskazana jest weryfikacja statystyczna takiego uproszczenia [6, 11]. Z twierdzenia o asymptotycznym zachowaniu się funkcji odnowy $H(t)$ [6]

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{H(t)}{t} = \frac{1}{T_0}, \quad (2)$$

gdzie T_0 jest średnim czasem między uszkodzeniami (MTBF) wynika, iż po dostatecznie długim czasie

$$MTBF = \frac{t}{\bar{v}(t)}, \quad (3)$$

gdzie $\bar{v}(t)$ jest średnią liczbą uszkodzeń w przedziale czasu t , którą można wyznaczyć na podstawie opinii ekspertów.

Na ogół przyjmuje się, że czasy odnow mają także rozkłady wykładnicze o intensywności μ niezależnej od czasu. Założenie to dotyczy czasu trwania bezpośrednich prac przy odnowie obiektu z pominięciem czasu organizacyjnego, a w tym czasie oczekiwania na podjęcie odnowy. W praktyce może panować w tym obszarze chaos, co powoduje, że probabilistyczne oszacowanie parametru μ jest trudne lub nawet niemożliwe.

Proponuje się następujące podejścia do oszacowania parametru μ :

- a) przyjęcie modelu strumienia z pomijalnym czasem odnowy, jeżeli czas ten jest znacząco krótki w porównaniu z czasem użytkowania;

$$R(t) = \exp(-\lambda t). \quad (4)$$

gdzie:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad \text{– intensywność uszkodzeń,}$$

t – czas;

- b) przyjęcie stałej wartości czasu odnowy poszczególnych urządzeń;
c) wyznaczenie μ ze wzoru:

$$\mu = \frac{1}{\bar{\theta}}, \quad (5)$$

gdzie $\bar{\theta}$ jest średnim czasem trwania odnowy, który może zostać oszacowany przez ekspertów.

Parametry modeli niezawodności są funkcjami określonych zmiennych niezależnych, będących wielkościami fizycznymi. Mogą to być czasy do lub między uszkodzeniami, czasy trwania określonych stanów niezawodnościowych lub eksploatacyjnych, liczby uszkodzeń w pewnych przedziałach czasu (częstości zdarzeń). Wielkości te są łatwiejsze do wyartykułowania dla ekspertów niż probabilistyczne parametry modeli – sugeruje się, aby one były przedmiotami elicytacji.

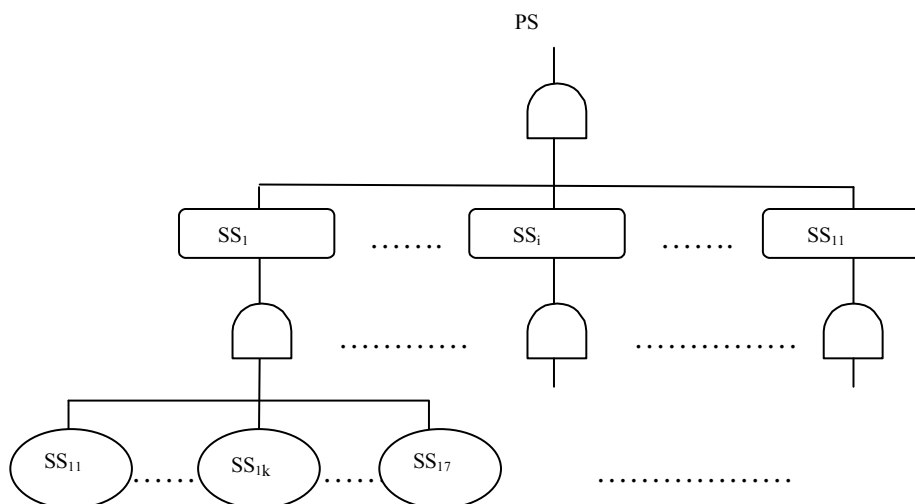
Struktura niezawodnościowa systemu została zdekomponowana na warstwy. Eksperti proszeni są o traktowanie obiektów ich sądów jako systemów antropotechnicznych. Ujawniają oni swoje sądy o częstościach uszkodzeń w wartościach lingwistycznych w (przykładowo trzech) warstwach tak, aby była zachowana właściwa korelacja między danymi dotyczącymi systemu jako całości oraz jego dekomponentami.

W warstwie „0” – system jako całość – ujawniają oni swoje sądy także w wartościach liczbowych. Warstwa I obejmuje dekompozycję systemu do poziomu n podsystemów, a warstwa II – dekompozycję podsystemów do poziomu zespołów urządzeń.

Zespołem nazwano część podsystemu, tworzącą pewną funkcjonalną całość, której uszkodzenie katastroficzne powoduje uszkodzenie podsystemu (np. może to być zespół pomp podsystemu wody chłodzącej słodkiej w systemie napędowym statku).

Dalej rozważanie przeprowadza się na przykładzie systemu napędowego (PS) statku kontenerowego, wyposażonego w silnik spalinowy tłokowy wolnoobrotowy i śrubę napędową, eksploatowanego na północnym Atlantyku. Analizowano niezawodność ze względu na uszkodzenia katastroficzne (ICF) tego systemu.

Na rysunku 2 przedstawiono drzewo niezdatności FT przykładowego systemu. Bliższe dane dotyczące przykładu można znaleźć w [1, 2, 5].

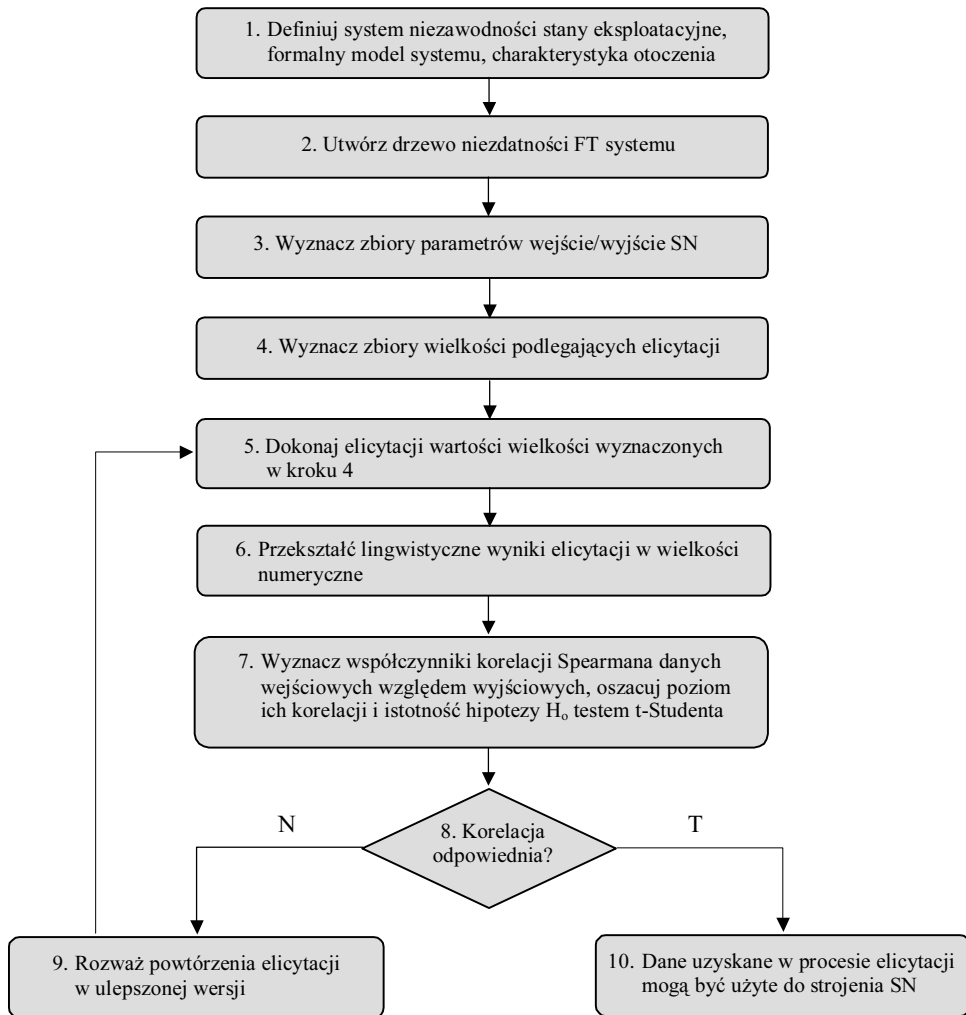


Rys. 2. Drzewo niezdatności (FT) przykładowego systemu napędowego statku

Fig. 2. Fault tree of the sample ship propulsion system

Wielkościom lingwistycznym udziałów przyporządkuje się zbiory ich wartości: {bardzo mały, mały, średni, duży, bardzo duży}. Uzyskane dane wymagają sprawdzenia poziomu korelacji parametrów wyjścia O względem wejścia I na każdym poziomie dekompozycji i systemu jako całość. W przypadku braku korelacji stosuje się metody porównywania parami do określenia preferencji wiążących poszczególne pary tych udziałów, a dalej – metodą AHP odpowiednich udziałów numerycznych [10, 12].

Na rysunku 3 przedstawiono schemat algorytmu elicytacji i przetwarzania danych celem uzyskania zbiorów skorelowanych, odpowiednich do strojenia SN.



Rys. 3. Algorytm elicytacji i przetwarzania danych do strojenia SN

Fig. 3. Algorithm of the data elicitation and processing for tuning the neural network

3. SIEĆ NEURONOWA NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU

Zgodnie ze strukturą niezawodnościową systemu (11 podsystemów SS, 89 zespołów urządzeń SD) przyjęto następującą kaskadową strukturę sieci:

- 11 sieci klasyfikacyjnych z liczbą neuronów w warstwie wejściowej, odpowiadającą liczbie zespołów w danym podsystemie SS oraz 5 neuronami w warstwie wyjściowej, odpowiadającymi zmiennym lingwistycznym stanu niezawodnościowego podsystemu,

- jedna sieć klasyfikacyjna z 11 neuronami w warstwie wejściowej, odpowiadającymi liczbie podsystemów SS w systemie napędowym (PS) oraz 5 neuronami w warstwie wyjściowej, odpowiadającymi zmiennym lingwistycznym stanu niezawodnościowego systemu,
- jedna sieć regresyjna z 5 neuronami na wejściu i jednym neuronem na wyjściu, wyznaczającym roczną liczbę uszkodzeń systemu PS.

Są to sieci jednokierunkowe wielowarstwowe perceptronowe z odpowiednim algorytmem uczenia (wstecznej propagacji błędu lub radialnej funkcji bazowej). Wartości wyjściowe z poziomu SD podawane są na wejście do poziomu SS, a wartości wyjściowe z poziomu SS na wejście do poziomu PS. Ostatnia sieć realizuje funkcję regresji ogólnej wartości otrzymanych z SS na liczbę uszkodzeń systemu PS. Sieć została przetestowana na dziesięciu danych testowych wyodrębnionych losowo ze zbioru uczącego, nieeksponowanych podczas procesu uczenia.

4. PRZETWARZANIE DANYCH EKSPERCKICH METODĄ AHP

Formalna procedura metody AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [10, 12] polega na wyznaczeniu macierzy opinii lingwistycznych, zwanej macierzą ocen, na podstawie porównywania parami tych opinii według przyjętej funkcji skali. Macierz ocen następnie przekształca się za pomocą odpowiedniej metody w macierz wektorów priorytetów. Zależność między opiniami otrzymuje się w postaci kolumnowego lub wierszowego wektora tej macierzy. Dobór funkcji skali i metody przekształcenia macierzy ocen jest przedmiotem badań i obszernej analizy w pracy [4].

Lingwistyczne oszacowania udziałów elementów systemu niezawodnościowego w częstości uszkodzeń tego systemu polegają, jak to podano wyżej, na wyborze przez eksperta wartości tego udziału ze zbioru pięciu możliwości. Oszacowaniom tym przypisuje się numery od 1 do 5. Różnica tych numerów określa rozmiar preferencji przy porównywaniu parami eksperckich ocen lingwistycznych. W zależności od tego rozmiaru przypisuje się preferencjom wagi według określonej funkcji skali. Formalna procedura polega na wyznaczeniu macierzy opinii lingwistycznych, którą następnie przekształca się w wektor priorytetów. Jest to normalna procedura metody AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [10, 12]. Preferencjom porównywania parami zaś przypisano wartości r_{ij} wg przyjętej funkcji skali. Otrzymuje się wtedy macierz ocen ekspertów R

$$R = r_{ij} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

o następującej właściwości:

$$r_{ij} > 0, r_{ij} = \frac{1}{r_{ji}} \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Macierz R uważana jest za zgodną, jeśli jej elementy spełniają warunek $r_{ij}r_{jk} = r_{ik}$, $\forall i, j, k = 1, 2, \dots, n$. Wektor priorytetów $p = (p_1, \dots, p_n)^T$ wyznacza się poprzez aproksymację macierzy ocen R za pomocą macierzy P .

$$P = p_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{p_1}{p_1} & \frac{p_1}{p_2} & \dots & \frac{p_1}{p_n} \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \\ \frac{p_2}{p_1} & \frac{p_2}{p_2} & \dots & \frac{p_2}{p_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{p_n}{p_1} & \frac{p_n}{p_2} & \dots & \frac{p_n}{p_n} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Macierz P jest macierzą z ocenami zgodnymi przedstawionymi w postaci ilorazów priorytetów, ponieważ spełnia warunek:

$$p_{ik} = \frac{p_i}{p_j}, \forall i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

Za miarę dokładności przetwarzania macierzy ocen przyjęto różnicę między macierzami P i R zgodnie z Xu [13]:

$$d(R, P) = \sqrt{\frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (r_{ij} - p_{ij})^2} \quad (10)$$

Proponuje się zastosowanie funkcji skali Xu [14], która ma postać:

$$f(s) = (\sqrt{c})^{I(s)}, \quad (11)$$

gdzie:

$I(s)$ – indeks symbolu preferencji s ,

c – parametr.

W [14] wykazano, że przy wartości parametru $c = 2$ różnica między macierzą ocen lingwistycznych a macierzą uzyskaną jest zerowa.

W tabeli 2 przedstawiono dane zastosowanej skali geometrycznej z parametrem $c = 2$.

Tabela 2. Preferencje i ich wartości w skali geometrycznej ($c = 2$)*Table 2. The preferences and geometrical scale data ($c = 2$)*

Preferencje	s_i	$l(s)$	$f(s)$
Równoważność	s_0	0	1
Słabo bardziej ważny	s_2	2	2
Umiarkowanie bardziej ważny	s_4	4	4
Wyraźnie bardziej ważny	s_6	6	8
Mocno bardziej ważny	s_8	8	16
Słabo mniej ważny	s_{-2}	-2	0,5
Umiarkowanie mniej ważny	s_{-4}	-4	0,25
Wyraźnie mniej ważny	s_{-6}	-6	0,17
Mocno mniej ważny	s_{-8}	-8	0,125

5. ZAGADNIENIE KORELACJI DANYCH

Dane uzyskiwane od ekspertów mogą mieć formę numeryczną lub lingwistyczną. Te ostatnie są przymiotnikami wartościującymi natężenie wielkości mierzonej określonego obiektu (przedmiotu, procesu, zjawiska). Można tym przymiotnikom przypisać liczby naturalne rosnące ze wzrostem tego natężenia, czyli dokonać rangowania mierzonej wielkości. Oszacowania wielkości lingwistycznych dokonuje się na skalach porządkowych. Skale te posiadają relacje porządkujące.

Wielkości numeryczne – jak już to podkreślono wyżej – w przypadku obiektów fizycznych obserwowanych w procesach ich eksploatacji dotyczą wartości wielkości, będących zmiennymi niezależnymi w wyrażeniach na parametry modeli niezawodności. Szacuje się je na skalach przedziałowych. Skale takie mają stałą jednostkę miary, relację porządkującą oraz dowolnie obrane zero.

Analizy korelacji wielkości mierzonych na przedstawionych wyżej skalach dokonuje się metodami nieparametrycznymi. Kompensują one wpływy pomiarów wyskakujących oraz brak normalności elicytowanych wielkości [13].

Do analizy korelacji danych uzyskanych w procesie elicytacji stosuje się metodę Spearmana. Należy dokonać rangowania danych wyjściowych O i wejściowych I , przyporządkowując im rosnące ciągi liczb naturalnych, zaczynając od 1. Numery te są rangami. Proces rangowania można przeprowadzić także na ciągu malejącym. Współczynnik korelacji rang Spearmana wyznacza się z następującego wzoru [13]:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}; \quad -1 \leq r_s \leq 1, \quad (12)$$

gdzie d_i jest różnicą między rangami odpowiadających sobie wartości cech.

Współczynnik korelacji wyznaczony wzorem (12) dotyczy jedynie losowo wybranej próby i należy sprawdzić, czy korelacja istnieje także w populacji generalnej. W tym celu weryfikuje się hipotezę zerową $H_0: \rho = 0$, gdzie ρ jest współczynnikiem korelacji populacji generalnej wobec hipotezy alternatywnej $H_1: \rho \neq 0$.

Do weryfikacji stosuje się test t-Studenta. Zakłada się, że populacja ma rozkład Studenta o $n - 1$ stopniach swobody. Test ten ma postać:

$$t = \frac{r_s}{\sqrt{1 - r_s^2}} \sqrt{n - 1}, \quad (11)$$

gdzie n jest licznością próby.

Wartość testu t porównuje się z wartością krytyczną t_p , wyznaczoną z tablic Studenta dla założonego poziomu istotności p oraz $n - 2$ stopni swobody. Jeżeli $t > t_p$, to odrzuca się hipotezę H_0 , ponieważ istnieje korelacja między zbiorami danych O oraz I [13].

6. PRZYKŁAD

6.1. Obiekt analizy, elicytacja

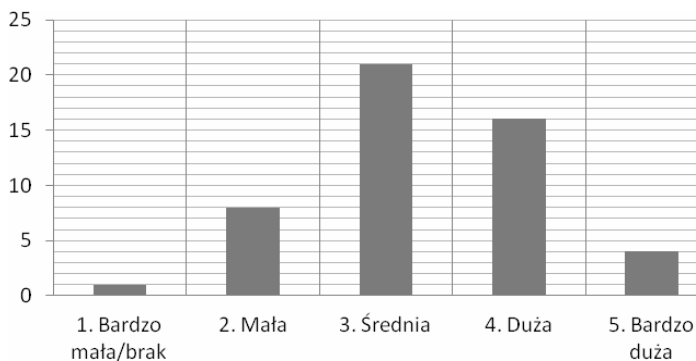
Przykład dotyczy analizy niezawodności systemu napędowego statku kontenerowego, wyposażonego w silnik spalinowy tłokowy wolnoobrotowy i śrubę napędową, eksploatowanego na północnym Atlantyku. Analizowano niezawodność ze względu na uszkodzenia katastroficzne ICF (*immediate catastrophic failure*) tego systemu.

Przyjęto, że uszkodzenia ICF mogą wystąpić jedynie podczas użytkowania aktywnego systemu, czyli podczas ruchu morskiego statku. Udział tego stanu eksploatacyjnego w ogólnym czasie użytkowania statku wynosił $\bar{\kappa} = 0,8396$ (średnia z ocen 50 ekspertów). Bliższe dane dotyczące przykładu można znaleźć w [1, 2, 5].

Opracowano ankietę, w której przedstawiono definicję badanego obiektu, pojęcia „uszkodzenie katastroficzne” i „ruch morski” oraz tablice do wypełnienia przez ekspertów wraz z sugestiami co do sposobu ich wypełnienia. Ankietę wypełniło 50 ekspertów. Pytano o częstości uszkodzeń typu ICF systemu PS w okresie jednego roku, udziały uszkodzeń podsystemów (SS) w częstości uszkodzeń systemu oraz następnie częstości uszkodzeń modułów (SDs) tych SS w liczbach ich uszkodzeń, także typu ICF. W załączniku 1 przedstawiono fragmenty ankiety.

6.2. Analiza korelacji wyników elicytacji

Odnosnie do systemu PS jako całości eksperci wypowiadali się numerycznie, podając swoje subiektywne oszacowania rocznej wartości częstości uszkodzeń ICF oraz lingwistycznie, zakreślając jedno z pól na skali porządkowej, zawierającej numery i nazwy wartości tej częstości uszkodzeń (patrz załącznik 1).



Rys. 4. Rozkład częstości uszkodzeń typu ICF systemu napędowego

Fig. 4. *Distribution of propulsion system ICF type failure frequency*

Przykładowo, na rysunku 4 przedstawiono histogram rocznych częstości uszkodzeń systemu PS. Histogram wskazuje na rozkład bliski do normalnego, co można uznać za prawidłowe w przypadku obserwacji zdarzeń niebezpiecznych, stwarzających wysokie zagrożenie, o mniej więcej ustalonej częstości zaistnienia.

Elicytacja częstości uszkodzeń typu ICF podsystemów SS oraz ich modułów SD polegała na oznaczaniu odpowiednich pól na skalach porządkowych ankiety (patrz załącznik 1). Dotyczyły one rozmiaru udziału danego SS lub DS w częstości uszkodzeń typu ICF obiektu bezpośrednio nadrzędnego, czyli systemu PS w przypadku podsystemów SS oraz tych podsystemów w przypadku modułów SD. Udziały te porównano parami i wyznaczono różnice przypisanych im liczb, które potraktowano jako numeryczne oszacowania preferencji ekspertów.

W załączniku 2 przedstawiono wyniki sprawdzające poziom korelacji danych między systemem a jego podsystemami PS – SS_i, ($i = 1, 2, \dots, 11$), między podsystemem pierwszym a jego zespołami urządzeń SS₁ – SD_{1k}, ($k = 1, 2, \dots, 7$) i między systemem a zespołami jego podsystemu pierwszego PS – SD_{1k}, ($k = 1, 2, \dots, 7$). Współczynniki korelacji danych I/O, osiągające wartości w zakresie od 0,971 do 0,990, pozwalają postawić następujące wnioski:

1. Korelacje między danymi dotyczącymi PS oraz SS, SD i SS oraz SD kwalifikują się jako prawie pełne [13].
2. Hipoteza $H_0: \rho = 0$ o braku korelacji w populacji generalnej może zostać odrzucona (poziom ufności 0,01) [13].
3. Przyjęcie funkcji skali Xu skutkuje zerowym uchybem przetwarzania danych lingwistycznych w wektor priorytetów.

PODSUMOWANIE

Zastosowana metoda elicytacji opinii ekspertów sprawdziła się w przypadku braku danych obiektywnych oraz gdy ekspertami są praktycy eksploatacji obiektów analizy niezawodności.

Metoda może być użyteczna do strojenia sieci neuronowych w analizach niezawodności oraz sterowania ryzykiem systemów technicznych.

W dalszych badaniach można by korzystać ze statystycznych modeli niezawodności dostępnych, podobnych systemów do kalibracji danych ekspertowych, które obarczone są nieokreśloną niepewnością.

LITERATURA

1. Brandowski A., *Estimation of the Probability of Propulsion Loss by a Seagoing Ship Based on Expert Opinions*, Polish Maritime Research 1(59), 2009, Vol. 16, p. 73–77.
2. Brandowski A., Mielewczyk A., Nguyen H., Frąckowiak W., *A fuzzy-neuron model of the ship propulsion risk prediction*, Journal of KONBiN, 2010, No. 1(13), p. 117–128.
3. Cooke R.M., *Experts in Uncertainty*, Oxford University Press, New York, Oxford 1991.
4. Elliot M.A., *Selecting numerical scales for pairwise comparisons*, Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95, p. 750–763.
5. Frąckowiak W., *Zastosowanie sieci neuronowych w badaniach ekspertowych niezawodności systemu napędowego statku*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 64, 2010, p. 43–51.
6. Gniedienko B.W., Bielajew J.K., Sołowiew A.D., *Metody matematyczne w teorii niezawodności*, WNT, Warszawa 1968.
7. IMO – Resolution A.849(20), *Code for the investigation of marine casualties and incidents*, London 1997.
8. Jaźwiński J., Smalko Z., *Wykorzystanie metody ekspertowej do oszacowania parametrów rozkładu beta dla oceny nieuszkodzalności i bezpieczeństwa technicznych środków transportu*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2001.
9. Kahneman G., Slovic P., Tversky A., *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases*, Cambridge University Press, Cambridge 2001.
10. Kwiesielewicz M., *Analityczny hierarchiczny proces decyzyjny. Nierozmyte i rozmyte porównywanie parami*, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2002.
11. Modarres M., Kaminsky M. et al., *Reliability Engineering and Risk Analysis*, New York, Basel Marcel Dekker Inc. 1999.
12. Saaty T.L., *The analytic hierarchy process*, McGraw Hill, New York 1980.
13. Stanisław A., *Przystępny kurs statystyki*, t. 1, StatSoft, Kraków 2006.
14. Yucheng Dong, Yinfeng Xu, Hongyi Li, Min Dai, *A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP*, European Journal of Operational Research, 2008, 186, p. 229–242.

Fragmenty ankiety dotyczącej systemu PS oraz podsystemów SS

13. Układ napędowy (jako całość) – Proszę w tabeli poniżej podać:

- własne oszacowanie rocznej przeciętnej częstości uszkodzeń katastroficznych układu napędowego statku, które spowodowały natychmiastowe zatrzymanie tego układu lub też niemożność jego uruchomienia, gdy statek znajduje się w morzu;
- zakreślić (X) według własnego uznania zakres tej częstości.

Frequency per year of the propulsion system critical failures:[year ¹]				
Propulsion system failure frequency range:				
1 – very rare	2 – rare	3 – occasional	4 – frequent	5 – very frequent

14. Podsystemy układu napędowego (silnik główny, instalacje, układy) – Proszę zgodnie z własnym doświadczeniem zawodowym zaznaczyć znakiem X w odpowiednim polu tabelicy.

Subsystem	Share of failures of the installation / engine / assembly in the total number of propulsion system critical failures causing its immediate stoppage				1. very small / none
	5. very large	4. large	3. medium	2. small	
1. Propeller + shaft line SS					
2. Remote control SS					
3. Main engine SS					
4. Electric SS					
5. Cylinder lubrication SS					
6. Lubrication SS					
7. Starting air SS					
8. High temperature fresh water cooling SS					
9. Low temperature fresh water cooling SS					
10. Sea water cooling SS					
11. Fuel oil SS					

Załącznik 2

Wyniki analizy korelacji danych ekspertowych po przetworzeniu metodą AHP (skala geometryczna, $c = 2$)

Współczynniki korelacji Spearmana między PS i SS _i (i = 1,2,...,11) po przetworzeniu AHP	
t_p ($p = 0,01$)	2,682204

Współczynniki korelacji Spearmana między SS ₁ i SD _{1k} (k = 1,2,...,7) po przetworzeniu AHP							
SD _{1k} *	SD ₁₁	SD ₁₂	SD ₁₃	SD ₁₄	SD ₁₅	SD ₁₆	SD ₁₇
Współczynnik Spearmana	0,971	0,985	0,986	0,976	0,982	0,987	0,978
t test	28,7	41,0	42,0	31,4	37,3	44,1	33,3
t_p ($p = 0,01$)	2,682204						
Hipoteza H ₀	odrzucona	odrzucona	odrzucona	odrzucona	odrzucona	odrzucona	odrzucona

Współczynniki korelacji Spearmana między PS i SD1k w SS1, (k = 1,2,...,7) po przetworzeniu AHP							
Współczynnik Spearmana	0,982	0,990	0,990	0,987	0,990	0,993	0,987
t test	37,1	51,3	50,3	43,5	51,4	59,2	44,6
t_p ($p = 0,01$)	2,682204						
Hipoteza H ₀	odrzucona	odrzucona	odrzucona	odrzucona	odrzucona	odrzucona	odrzucona

* Opisy SS_i i SD_{1k} jak na rysunku 2.

EXPERT JUDGMENT-BASED TUNING OF THE SYSTEM RELIABILITY NEURAL NETWORK

Summary

The article presents a method for tuning neural network, appropriate in the analysis of the anthrop technical system reliability, based on the opinions of experts – practitioners operation. The numerical-linguistic elicitation of these opinions was carried out, which turned out to be uncorrelated and not suitable for tuning the network. Data processing method was used with the appropriate adopted AHP scale and matrix approximation method evaluations. Correlation analyzes were performed for received input and output data of network and error of data processing method was determined. The results are shown in the example of elicitation and data correlation analyzes for tuning the reliability neural network of the ship propulsion system.

Keywords: *neural network, reliability, elicitation, AHP method, expert judgment, data correlation.*