ZESZYTY NAUKOWE AKADEMII MARYNARKI WOJENNEJ
ROK LI NR 4 (183) 2010

Czesław Dyrcz
Akademia Marynarki Wojennej

WPŁYW INFORMACJI NAUTYCZNEJ NA BEZPIECZEŃSTWO MORSKIE

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono próbę stworzenia matematycznego modelu systemu obiegu informacji nautycznej w oparciu o teorię niezawodności. Zdefiniowano pojęcia dostępności, niezawodności, ciągłości oraz wiarygodności w odniesieniu do systemu obiegu informacji nautycznej. Ocena parametryczna systemu wykorzystana została do porównania i oceny dwóch modeli — istniejącego i postulowanego.

Słowa kluczowe:
bezpieczeństwo morskie, informacja nautyczna, system obiegu informacji nautycznej.

WSTĘP

Pierwsza dekada XXI wieku charakteryzuje się zapoczątkowanym w ubiegłym stuleciu dynamicznym wzrostem zainteresowań człowieka obszarami morskimi oraz potrzebą dostarczania niezbędnej wiedzy z zakresu hydrografii, kartografii morskiej, oznakowania nawigacyjnego, czyli szeroko pojętej informacji nautycznej niezbędnej dla działalności na morzach i oceanach. Informacja nautyczna jako produkt funkcjonowania służby hydrograficznej dostarczana jest wszystkim użytkownikom morza, którymi są: żegluga morska, rybołówstwo, administracje morskie, służby poszukiwania i ratownictwa, obrona i ochrona obszarów morskich, zarządy portów, instytucje badające i eksploatujące bogactwa naturalne z morza, ochrona środowiska naturalnego, turystyka i rekreacja morska.

W artykule podjęto próbę stworzenia matematycznego modelu systemu obiegu informacji nautycznej w oparciu o teorię niezawodności. Zdefiniowano pojęcia

dostępności, niezawodności, ciągłości oraz wiarygodności w odniesieniu do systemu obiegu informacji nautycznej niezależnie od stosowanego przez IALA w dokumentach NAVGUIDE, Recommendation 0-130, Guideline 1035 ed.2. Ocena parametryczna systemu wykorzystana została do porównania i oceny dwóch modeli — istniejącego i postulowanego.

BEZPIECZEŃSTWO MORSKIE OPARTE NA INFORMACJI NAUTYCZNEJ

Efektem funkcjonowania służby hydrograficznej są papierowe i elektroniczne produkty, które stanowią (zawierają) informację nautyczną (wiadomości żeglarskie, ostrzeżenia nawigacyjne, locje, spisy świateł, spisy radiosygnałów, papierowe i elektroniczne morskie mapy nawigacyjne, specjalistyczne biuletyny i zbiory danych do systemów nawigacyjnych oraz inne wydawnictwa nautyczne) docierającą do szeroko pojętych „użytkowników morza".

Dostarczane do systemu bezpieczeństwa morskiego wraz z innymi informacjami (komunikaty meteorologiczne, SAR itd.) wpływają na tworzenie niezbędnych warunków dla zapewnienia bezpieczeństwa morskiego. Informacja nautyczna wytwarzana w Biurze Hydrograficznym MW coraz częściej jest nazywana morską informacją geoprzestrzenną, co ma związek z rozwojem współczesnych geoprzestrzennych systemów informacyjnych (GIS). Informacja geoprzestrzenna obejmuje również cały zestaw danych meteorologicznych i oceanograficznych [9]. Środowisko, w jakim powstaje informacja nautyczna, a także urzędy, instytucje, organizacje, służby, uczelnie i wszyscy użytkownicy, jako elementy składowe wraz ze wzajemnymi relacjami pomiędzy sobą, tworzą system obiegu informacji nautycznej. Relacje występujące podczas wytwarzania informacji nautycznej w Biurze Hydrograficznym MW oraz jej użytkownicy (odbiorcy) są przedstawieni na rysunku 1.

Informacja nautyczna (morska informacja geoprzestrzenna) jako produkt działania służby hydrograficznej jest kluczowym elementem oddziaływania służby na środowisko użytkowników, przez co wpływa na stan bezpieczeństwa morskiego. Biorąc powyższe pod uwagę, do rozważań przyjęto informację nautyczną jako decydujący czynnik warunkujący zapewnienie bezpieczeństwa morskiego na obszarach morskich, a generowany przez służbę hydrograficzną. Tak sformułowane założenie wymaga opisania wpływu informacji nautycznej na bezpieczeństwo morskie. Do tego

celu przyjęto następujące parametry: dostępność, niezawodność, ciągłość i wiarygodność [3]. Powyższe parametry określone zostały jako filary bezpieczeństwa morskiego opierającego się na informacji nautycznej (rys. 2.).

Rys. 1. Relacje zachodzące w procesie tworzenia i użytkownicy informacji nautycznej (morskiej informacji geoprzestrzennej)

Źródło: opracowanie własne.

Rys. 2. Filary bezpieczeństwa morskiego oparte na informacji nautycznej

Źródło: opracowanie własne.

MATEMATYCZNY MODEL SYSTEMU OBIEGU INFORMACJI NAWIGACYJNEJ

Podejmując rozważanie systemu na poziomie ogólnym w oparciu o teorię niezawodności, niezbędne jest zdefiniowanie pojęcia elementów struktury systemu, co umożliwia zastosowanie jednakowych miar i wskaźników niezawodności. Niech modelem systemu obiegu informacji nawigacyjnej jest uporządkowany zbiór:

$$\left(S_1, S_2, ..., S_n, S, \psi\right), \tag{1}$$

gdzie:

$S_1, S_2, ..., S_n$ — zbiory stanów niezawodności elementów;

S — stan systemu;

ψ — funkcja struktury systemu.

W modelu ψ określona jest jako:

$$\psi : S_1 \times S_2 \times ... \times S_n \rightarrow S\,. \tag{2}$$

Funkcja ta przyporządkowuje stanom elementów stan systemu.

W rozważaniach dotyczących systemu elementom i podsystemom możemy przyporządkować dwa stany (binarne — B) związane z ich użytkowaniem: „0" — oznaczający stan niezdatności elementu struktury lub systemu nawigacyjnego oraz „1" — oznaczający stan jego zdatności [12]. Stąd też można dokonać następującego zapisu:

$$S_1 = ... = S_n = S = B = \{0,1\}, \tag{3}$$

gdzie:

B — stan binarny systemu.

Dzięki tak sformalizowanemu zapisowi każdy z systemów, grup lub pojedynczych elementów może być niezależnie modelowany i można w stosunku do niego dokonywać niezależnych oszacowań niezawodności, dostępności czy ciągłości, aż do pełnego modelu systemu włącznie [12]. Należy podkreślić, że elementami systemu mogą być zarówno obiekty fizyczne (urządzenia), jak i struktury zawierające dodatkowe elementy, na których stan wpływają czynniki niezwiązane bezpośrednio z wyposażeniem technicznym. Oznacza to możliwość dołączania w ramach struktur dodatkowych elementów, zależnych na przykład od lokalnych warunków. Równie istotny jest fakt, iż w ramach modelowania struktur czy systemu dopuszczalne jest zdefiniowanie dowolnych podsystemów zawierających podzbiory elementów struktur bardziej złożonych, co sprowadza się do możliwości rozważania kryteriów niezawodnościowych (niezawodność, dostępność, ciągłość) na dowolnym podzbiorze elementów:

$$\psi(x_1, x_2) = x_1 \wedge x_2 = \min(x_1, x_2), \tag{4}$$

gdzie:

x_1, x_2 — stany niezawodności odpowiednio elementów e_1, e_2.

Działaniu elementów struktur systemowych można w funkcji czasu przypisać dwa stany: czas pracy (zdatności) oraz czas awarii (niezdatności). Stąd momenty czasu przedstawione wzorem (5) stają się chwilami awarii:

$$Z_n^{'} = X_1 + Y_1 + X_2 + Y_2 + ... + Y_{n-1} + X_n, \; n = 1,2,..., \tag{5}$$

gdzie:

$Z_n^{'}$ — czas awarii systemu;

$X_1, X_2, ...$ — długości czasów pracy odnawianej struktury systemu;

$Y_1, Y_2, ...$ — długości czasów odpowiadające czasom awarii.

Momenty przedstawione wzorem (6) są momentami odnowy struktury systemu:

$$Z_n'' = Z_n' + Y_n,\ n = 1,2,\ldots, \tag{6}$$

gdzie:

Z_n'' — czas pracy systemu.

Załóżmy, że zmienne losowe X_i, Y_i dla $i = 1,2,\ldots$ są niezależne oraz czasy pracy i awarii struktury systemu mają jednakowe rozkłady. Wprowadźmy ustalenie dla dystrybuant, że są prawostronnie ciągłe, wtedy otrzymujemy:

$$\begin{matrix} P(X_i \le x) = F(x) \\ P(Y_i \le y) = G(y) \end{matrix} \quad i = 1,2,\ldots, \tag{7}$$

gdzie:

$F(x)$ — dystrybuanta czasów pracy struktury systemu;

$G(y)$ — dystrybuanta czasów awarii struktury systemu.

Ponadto przyjmijmy, że zmienne te mają skończone wartości oczekiwane i wariancje:

$$E(X_i) = E(X), i = 1,2,\ldots; \tag{8}$$

$$E(Y_i) = E(Y), i = 1,2,\ldots; \tag{9}$$

$$V(X_i) = \sigma_1^2, i = 1,2,\ldots; \tag{10}$$

$$V(Y_i) = \sigma_2^2, i = 1,2,\ldots, \tag{11}$$

gdzie:

$E(X_i)$ — wartość oczekiwana czasu pracy struktury systemu;

$E(Y_i)$ — wartość oczekiwana czasu awarii pracy struktury systemu;

$V(X_i)$ — wartość wariancji czasu pracy struktury systemu;

$V(Y_i)$ — wartość wariancji czasu awarii struktury systemu.

Aby wykluczyć przypadki zdegenerowane (deterministyczne), należy przyjąć następujący warunek:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 > 0. \tag{12}$$

Przedstawione powyżej założenia stanowiące ogólny matematyczny opis modelu systemu zostaną wykorzystane przy definiowaniu parametrów oceny systemu.

Dostępność

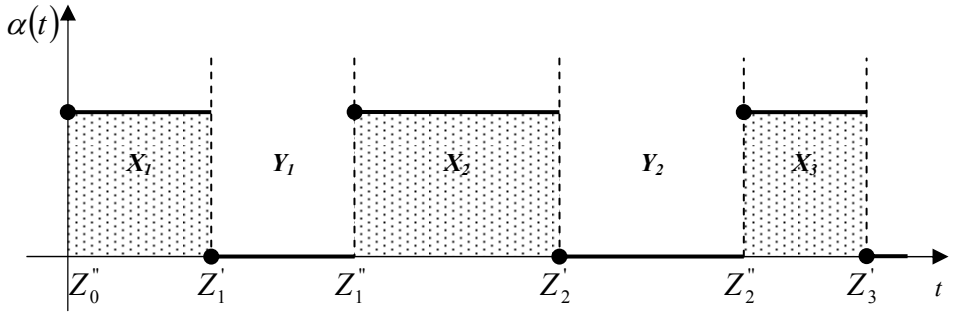
Według [12] w oparciu o powyższe założenia określony zostaje proces awarii elementu struktury systemu jako:

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1, & Z_n'' \le t < Z_{n+1}' \\ 0, & Z_{n+1}' \le t < Z_{n+1}'' \end{cases} \quad \text{dla } n = 0,1,..., \tag{13}$$

gdzie:

$\alpha(t)$ — stan pracy elementu struktury systemu.

Proces awarii elementu (systemu) odpowiada stanowi $\alpha(t) = 1$, oznaczając, że w chwili t wyodrębniona struktura nawigacyjna znajduje się w stanie pracy (dostępności) (rys. 3., [12]).



Rys. 3. Stany pracy elementów struktury nawigacyjnej (systemu)

Źródło: opracowano na podstawie C. Specht, Availability, Reliability and Continuity Model of Differentia GPS Transmission, 'Annual of Navigation', 2003, No 5.

Zdefiniujmy dostępność informacji nautycznej jako prawdopodobieństwo tego, że w dowolnie wybranym momencie czasu t

$$A(t) = P[\alpha(t) = 1], \tag{14}$$

gdzie:

$A(t)$ — prawdopodobieństwo znajdowania się wyodrębnionego elementu w stanie zdolności do pracy w momencie *t*.

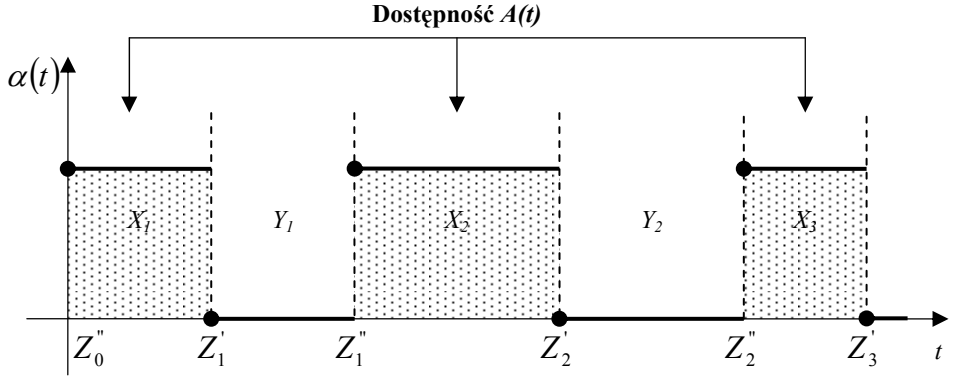
W celu znalezienia oszacowanej wartości dla przyjętego ciągu zdarzeń $V_0, V_1, ...V_n$ spełniającego warunek

$$V_n = \{Z_n'' \le t < Z_{n+1}'\},\ n = 0,1,2\ldots, \tag{15}$$

polegający na tym, że w chwili t element (system) jest w stanie dostępności (pracy), a także w chwili t nastąpiło dokładnie n odmów (zmian stanu pracy), powyższy ciąg zdarzeń wyklucza się parami. W związku z tym dostępność pracy elementów systemu wynosi:

$$P[\alpha(t)=1]=P\left(\bigcup_{n=0}^{\infty}V_n\right)=\sum_{n=0}^{\infty}P(V_n)\,. \tag{16}$$

Graficzną interpretację pojęcia dostępności pracy elementów struktury nawigacyjnej (systemu) przedstawiono na rysunku 4. [12].



Rys. 4. Graficzna interpretacja terminu dostępność pracy elementów struktury nawigacyjnej (systemu)

Źródło: opracowano na podstawie C. Specht, Availability…, wyd. cyt.

W ostatecznej formie według [12] wzór na dostępność elementu struktury nawigacyjnej (systemu) przyjmie postać:

$$A(t)=1-F(t)+\int_0^t\left[1-F(t-x)\right]dH_{\Phi}(x), \tag{17}$$

gdzie:

$$H_{\Phi}(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\Phi_n(x) \tag{18}$$

jest funkcją odnowy strumienia utworzonego przez momenty odnowy elementów struktury nawigacyjnej.

Potocznie rozumiana dostępność struktury nawigacyjnej odniesiona może być do dowolnego przedziału czasu, w którym ją (najczęściej empirycznie) oszacowano, jednak najbardziej miarodajną reprezentacją dostępności jest jej graniczna

wartość, którą określamy jako współczynnik dostępności elementu struktury nawigacyjnej (systemu) — A [12]. Końcowa wartość współczynnika A wynosi:

$$A = \frac{E(X)}{E(X) + E(Y)}. \tag{19}$$

W powyżej przeprowadzonych rozważaniach do określenia dostępności zaproponowane zostały dwie miary:

— dostępność elementu struktury nawigacyjnej (systemu) $A(t)$ opisana wzorem (17);
— współczynnik dostępności elementu struktury nawigacyjnej (systemu) A opisany wzorem (19).

Powyższe miary mogą znaleźć zastosowanie w modelowaniu matematycznym elementów struktur nawigacyjnych, podsystemów i systemów nawigacyjnych.

W dalszym toku rozważań przyjmując, że rozkłady czasów pracy i awarii struktur systemów nawigacyjnych są wykładnicze, funkcje gęstości czasów zdatności $f(t)$ i gęstości czasów niezdatności $g(t)$ wyrażają się następującymi wzorami:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & dla \quad t > 0 \\ 0 & dla \quad t \le 0 \end{cases}; \tag{20}$$

$$g(t) = \begin{cases} \mu e^{-\mu t} & dla \quad t > 0 \\ 0 & dla \quad t \le 0 \end{cases}, \tag{21}$$

przy dystrybuantach odpowiednio:

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & dla \quad t > 0 \\ 0 & dla \quad t \le 0 \end{cases}; \tag{22}$$

$$G(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\mu t} & dla \quad t > 0 \\ 0 & dla \quad t \le 0 \end{cases}, \tag{23}$$

gdzie:
λ — intensywność uszkodzeń;
μ — intensywność napraw.

Ostateczną postać dostępności elementów struktury nawigacyjnej (systemu) $A_{\exp}(t)$ przy wykładniczych rozkładach czasu zdatności i awarii wyraża wzór (24) [12]:

$$A_{\exp}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}. \tag{24}$$

Z kolei współczynnik dostępności elementów struktury nawigacyjnej (systemu) $A_{\exp}$ przy wykładniczych rozkładach czasów zdatności i awarii określa ostatecznie wzór (28), gdy

$$E_{\exp}(X_i) = \frac{1}{\lambda},\ i = 1,2,\ldots; \tag{25}$$

$$E_{\exp}(Y_i) = \frac{1}{\mu},\ i = 1,2,\ldots \tag{26}$$

po podstawieniu wynosi

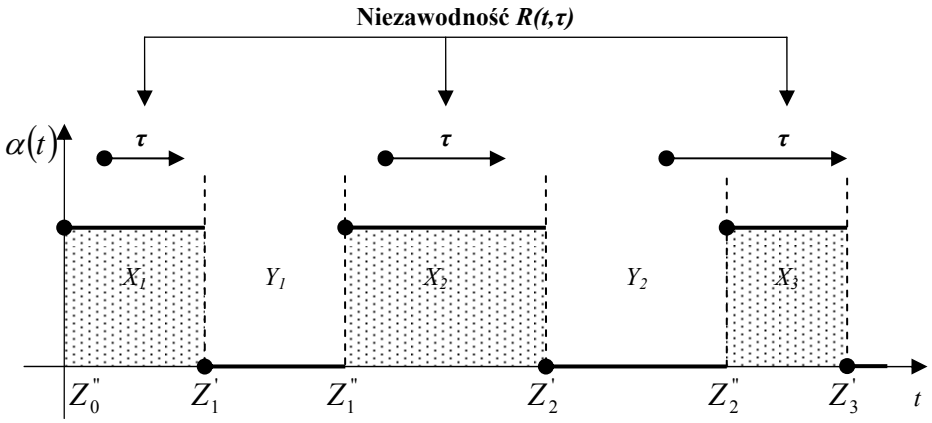
$$A_{\exp} = \frac{E_{\exp}(X_i)}{E_{\exp}(X_i) + E_{\exp}(Y_i)} = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}. \tag{27}$$

Ostatecznie

$$A_{\exp} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}. \tag{28}$$

N i e z a w o d n o ś ć

Prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy wyodrębnionego elementu struktury w czasie $[t, t+\tau)$ określamy mianem niezawodności pracy elementu struktury nawigacyjnej (systemu). Graficzną interpretację pojęcia niezawodności pracy elementów struktury nawigacyjnej (systemu) przedstawiono na rysunku 5. [12].



Rys. 5. Graficzna interpretacja terminu niezawodność pracy elementów struktury nawigacyjnej (systemu)

Źródło: opracowano na podstawie C. Specht, Availability…, wyd. cyt.

Rozważmy ciąg zdarzeń A_n polegających na tym, że do chwili t nastąpiło dokładnie n odmów dostępności w przedziale czasu $[t, \tau)$ oraz w tym przedziale czasu nie nastąpiła jej utrata. Zdarzenia $A_0, A_1, ..., A_n$ wykluczają się parami. Zdefiniujmy również zdarzenie B polegające na tym, że w przedziale $[t, \tau)$ element jest dostępny. Otrzymamy:

$$B = \bigcup_{n=0}^{\infty} A_n \,, \tag{29}$$

wtedy

$$R(t,\tau) = P(B) = P\left(\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=0}^{\infty} P(A_0) + \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n)\,, \tag{30}$$

gdzie:

$$A_n = \{Z_n'' \le t < t+\tau < Z_n'' + X_{n+1}\}\,, \text{ dla } n = 1,2,...\,,$$

to

$$P(A_n) = P(Z_n'' \le t < t+\tau < Z_n'' + X_{n+1}) = \int_0^t P(Z_n'' \in [x, x+dx), t+\tau < x + X_{n+1})\,. \tag{31}$$

Ostateczna postać niezawodności elementów struktury nawigacyjnej (systemu) $R(t, \tau)$ wyrażona jest wzorem (32) [12]:

$$R(t,\tau) = 1 - F(t+\tau) + \int_0^t [1 - F(t, t+\tau)] dH_{\Phi}(x)]\,, \tag{32}$$

gdzie:

$R(t, \tau)$ — niezawodność elementów struktury nawigacyjnej (systemu);

$H_{\Phi}(x)$ — dystrybuanta, funkcja odnowy strumienia utworzonego przez momenty odnowy elementów struktury nawigacyjnej, która wynosi (18).

Niezawodność elementu struktury nawigacyjnej (systemu) $R_{\exp}(t,\tau)$ przy wykładniczych rozkładach czasu zdatności i awarii wyrażona jest wzorem (33) [12]:

$$R_{\exp}(t,\tau) = 1 - F(t+\tau) + \int_0^t [1 - F(t, t+\tau)] dH_{\Phi}(x)]\,. \tag{33}$$

Po uwzględnieniu (22) otrzymamy:

$$R_{\exp}(t,\tau) = e^{-\lambda(t+\tau)} + \int_0^t e^{-\lambda(t+\tau+x)} \frac{\lambda\mu}{\lambda+\mu} [e^{-(\lambda+\tau)x}] d(x)\,, \tag{34}$$

a po przekształceniu i pogrupowaniu uzyskamy ostateczną wartość niezawodności elementu struktury nawigacyjnej (systemu) $R_{\exp}(t,\tau)$ wynoszącą:

$$R_{\exp}(t,\tau)=\left[\frac{\mu}{\lambda+\mu}+\frac{\lambda}{\lambda+\mu}e^{-(\lambda+\mu)t}\right]\cdot e^{-\lambda\tau}. \tag{35}$$

W dalszej kolejności rozważań wyznaczona zostanie granica wartości niezawodności ze wzoru (35):

$$\lim_{t\to\infty}R_{\exp}(t,\tau)=\lim_{t\to\infty}\left\{\left[\frac{\mu}{\lambda+\mu}+\frac{\lambda}{\lambda+\mu}e^{-(\lambda+\mu)t}\right]e^{-\lambda\tau}\right\}. \tag{36}$$

$$t\to\infty$$

Ponieważ

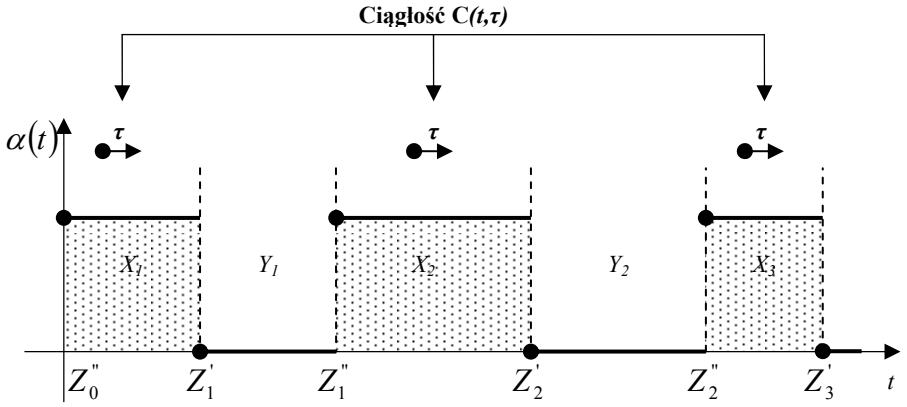
$$\lim_{t\to\infty}\frac{\lambda}{\lambda-\mu}e^{-(\lambda+\mu)t}=0, \tag{37}$$

po podstawieniu do (36), otrzymamy końcową graniczną wartość niezawodności:

$$\lim_{t\to\infty}R_{\exp}(t,\tau)=\frac{\mu}{\lambda+\mu}e^{-\lambda\tau}. \tag{38}$$

Ciągłość

Graficzną interpretację pojęcia ciągłości pracy elementów struktury nawigacyjnej (systemu) przedstawiono na rysunku 6. [12].



Rys. 6. Graficzna interpretacja terminu ciągłość pracy elementów struktury nawigacyjnej (systemu)

Źródło: opracowano na podstawie C. Specht, Availability…, wyd. cyt.

Ciągłość pracy sytemu nawigacyjnego jest prawdopodobieństwem poprawnej pracy systemu w zadanym przedziale czasu $[t, t+\tau)$, pod warunkiem że system na początku tego przedziału w momencie *t* był dostępny. Powyższe kryterium pojawiło się w nawigacji dopiero na końcu lat dziewięćdziesiątych.

Za [12] zdefiniujmy ciągłość jako prawdopodobieństwo warunkowe:

$$C(t,\tau) = P(D/E), \tag{39}$$

gdzie:

1. $D = \{\alpha(t) = 1\}$ jest zdarzeniem polegającym na tym, że element struktury nawigacyjnej (systemu) jest dostępny w momencie czasu *t*.
2. $E = \{\alpha(t) = 1, \alpha(x) = 1 \text{ dla } x \in [t, t+\tau)\}$ jest zdarzeniem polegającym na tym, że element struktury nawigacyjnej (systemu) był dostępny w przedziale czasu $[t, t+\tau)$ i w tym przedziale nie nastąpiła zmiana jego stanu (utrata dostępności).

Należy zauważyć, że $E \subset D$, stąd wzór na prawdopodobieństwo warunkowe przyjmuje postać:

$$C(t,\tau) = P(E/D) = \frac{P(D \cap E)}{P(D)} = \frac{P(E)}{P(D)}, \tag{40}$$

gdzie:

$$P(E) = R(t,\tau); \tag{41}$$

$$P(D) = A(t). \tag{42}$$

Po dokonaniu podstawienia powyższych danych otrzymamy ostateczny wzór na ciągłość pracy elementu struktury nawigacyjnej (systemu) — $C(t,\tau)$:

$$C(t,\tau) = \frac{1 - F(t+\tau) + \int_0^t [1 - F(t+\tau-x)]dH_\Phi(x)}{1 - F(t) + \int_0^t [1 - F(t-x)]dH_\Phi(x)}. \tag{43}$$

Natomiast ciągłość pracy elementu struktury nawigacyjnej (systemu) przy wykładniczych rozkładach czasu zdatności i awarii, wykorzystując wzory (35) i (24), wynosi:

$$C_{\exp}(t,\tau) = \frac{\left[\frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} e^{-(\lambda+\mu)t}\right] \cdot e^{-\lambda\tau}}{\frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} e^{-(\lambda+\mu)t}}, \tag{44}$$

a po dokonaniu skrócenia wzór przyjmuje ostatecznie postać:

$$C_{\exp}(t,\tau) = e^{-\lambda\tau}. \tag{45}$$

Reasumując powyższe rozważania, należy stwierdzić, iż pomiędzy dostępnością, niezawodnością i ciągłością dla modelu szczegółowego, w którym występują wykładnicze rozkłady czasów zdatności i niezdatności, zachodzi następująca zależność:

$$R_{\exp}(t,\tau) = A_{\exp}(t) \cdot C_{\exp}(t,\tau). \tag{46}$$

Wiarygodność

Problematyka kontroli i oceny wiarygodności systemów nawigacyjnych jest stosunkowo nowa. Rozwój techniczny sprzętu oraz znaczny wzrost jego niezawodności powoduje, że kontrola wiarygodności systemu staje się możliwa już nie tylko *post factum*, lecz może być niejednokrotnie realizowana w czasie rzeczywistym, przyczyniając się do zwiększenia bezpieczeństwa. Znaczenie wiarygodności wzrasta w aplikacjach pomiarowych (hydrografia, badania złóż mineralnych, określanie właściwości manewrowych jednostek), umożliwiając wykonywanie tych przedsięwzięć ze znacznie większą efektywnością i decydując niejednokrotnie o ich ekonomicznym sukcesie. Wiarygodność systemów nawigacyjnych to jeden z kluczowych kierunków rozwoju przede wszystkim systemów radionawigacyjnych. Według Departamentu Transportu oraz Departamentu Obrony Stanów Zjednoczonych wiarygodność systemu nawigacyjnego określa jego zdolność do informowania użytkowników o stanie pracy systemu.

Pierwsza próba unormowania kwestii wiarygodności pojawiła się w konwencji SOLAS 1974 (rozdział V, prawidło 14.), gdzie instytucjom odpowiedzialnym za pracujące systemy nawigacyjne daje się dowolność podejmowania (lub też nie) zabiegów ku zwiększeniu ich wiarygodności. W rezolucji IMO nr A557 z 20 listopada 1985 roku stwierdzono, że organizacje odpowiedzialne za pracę systemu powinny dążyć do stworzenia w nim opcji dostarczającej nawigatorowi informacji o statusie systemu oraz ewentualnych zakłóceniach pracy. Można więc stwierdzić, że na dzień dzisiejszy organizacje odpowiedzialne za tego typu systemy nie są ustawowo zobligowane do

wyposażania ich w opcję kontroli wiarygodności. W przytoczonym artykule rezolucji nie definiuje się również czasu, po jakim użytkownik powinien, (chociaż nie musi) otrzymać informację o wadliwej pracy systemu. Termin ten wstępnie określono opisowo: „tak szybko jak to tylko możliwe".

Aktualnie IMO prowadzi prace nad przygotowaniem wymagań dla światowego systemu nawigacyjnego i jest bardzo prawdopodobne, że wiarygodność stanie się fundamentalnym parametrem systemu nawigacyjnego. Zasadniczym problemem utrudniającym projektowanie systemu z opcją wiarygodności jest realizacja tego procesu w czasie rzeczywistym. Aby móc to czynić, należy prowadzić ciągły monitoring połączony z natychmiastową możliwością informowania użytkowników o błędach w pracy przy wykorzystaniu dostępnych środków (najczęściej jest to kanał radiowy). M. Breeuwer, R. Farnworth, B. Tiemeyer i A. Watt w proponowanej definicji zwracają również uwagę na brane pod uwagę w wiarygodności czas i położenie w całej strefie działania systemu [1].

Uwzględniając definicje [6, 7, 12], za wiarygodność systemu informacji nautycznej uznamy zdolność do prowadzenia okresowych ostrzeżeń, kiedy system lub jego składowy element nie powinny być używane w nawigacji. Tak zdefiniowany system charakteryzują następujące miary, które trudno zastosować do informacji nautycznej:

— wystąpienie alarmu zdefiniowane maksymalnym dopuszczalnym błędem pozycji;
— maksymalnie dopuszczalna częstotliwość zaistnienia alarmów podczas określonego czasu;
— czas wystąpienia alarmu określony interwałem czasowym pomiędzy zajściem niebezpiecznej sytuacji a powstaniem alarmu;
— minimalne prawdopodobieństwo skutecznego wykrycia zakłócenia;
— czas do przekazania informacji użytkownikowi.

Proponuje się nową miarę — czas aktualizacji informacji nautycznej. Jest to czas przekazania informacji od momentu otrzymania wiadomości przez system do jej dotarcia i otrzymania przez użytkownika (jednostkę, oznaczmy ją jako T_{AIN}):

$$T_{AIN} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + \ldots + T_i + \ldots + T_n, \tag{47}$$

gdzie:

T_1 — czas od powstania zdarzenia do przekazania informacji o zdarzeniu odpowiednim służbom;

T_2 — czas przygotowania komunikatu nawigacyjnego;

T_3 — czas przekazania komunikatu do krajowego koordynatora ostrzeżeń nawigacyjnych;

T_4 — czas redagowania ostrzeżenia nawigacyjnego;

T_5 — czas przekazania ostrzeżenia nawigacyjnego do rozpowszechnienia;

T_n — czas dotarcia ostrzeżenia nawigacyjnego do użytkownika.

Reasumując:

$$T_{AIN} = \sum_{i=1}^{n} T_i \,. \tag{48}$$

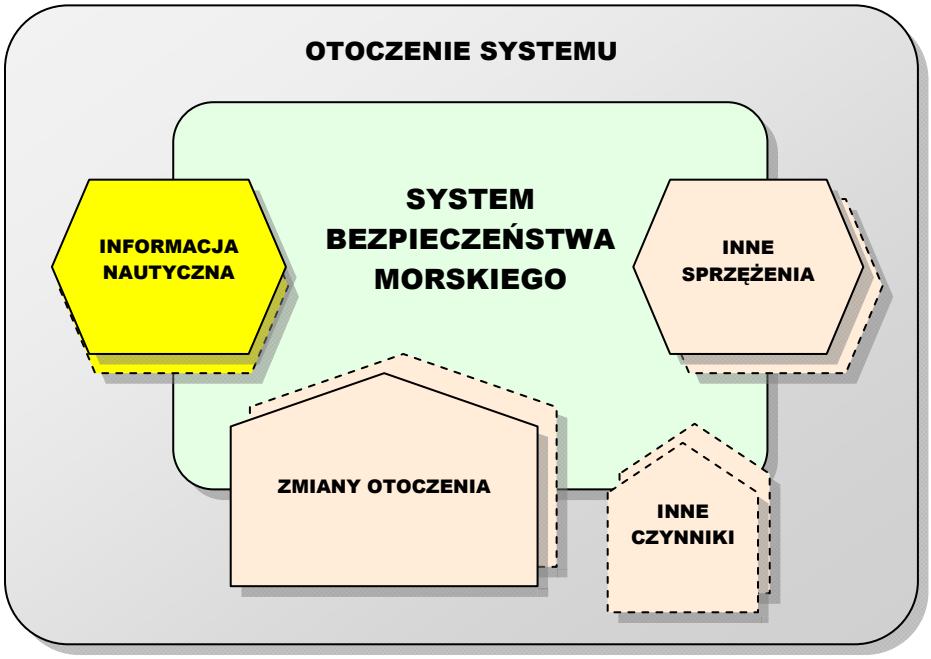
KRYTERIA OCENY I PORÓWNANIA WPŁYWU SYSTEMU OBIEGU INFORMACJI NAUTYCZNEJ NA BEZPIECZEŃSTWO MORSKIE

Ocena parametryczna systemów nawigacyjnych stanowi w ostatnim dziesięcioleciu zasadniczą metodę ich klasyfikacji jakościowej. Kryteria porównawcze systemów nawigacyjnych prezentowane powszechnie w literaturze ulegają na przestrzeni lat przewartościowaniu wraz z rozwojem technologicznym oraz potrzebami procesu nawigacji przy jednoczesnej zmianie rang poszczególnych z nich [12]. Analiza kryteriów pozwala na wyodrębnienie trzech grup, które odpowiadają poszczególnym fazom rozwoju systemów w ostatnich latach:

1. Kryteria pozycyjne — charakteryzują system w zakresie jakości określenia pozycji, używając miar dokładności, częstości, jednoznaczności i wymierności wyznaczeń oraz biorąc pod uwagę pojemność systemu;
2. Kryteria niezawodnościowe — obejmują grupę wskaźników odnoszących się do charakterystyk eksploatacyjnych systemów (niezawodność, dostępność i ciągłość);
3. Kryteria bezpieczeństwa eksploatacji — stanowią zapewnienie użytkownikowi bieżącej informacji o jakości pracy systemu, która jest charakteryzowana przez wiarygodność (opisywaną takimi zmiennymi, jak czas do alarmu, prawdopodobieństwo fałszywego alarmu itd.). Kryterium wiarygodności jest wyznacznikiem nowoczesności we wszystkich współczesnych dziedzinach techniki oraz dynamicznie rozwijającą się problematyką badawczą początku XXI wieku w nawigacji [12].

System bezpieczeństwa morskiego, jak każdy system, łączy się z otaczającym środowiskiem (otoczeniem systemu) poprzez szereg czynników, które w dużym uogólnieniu sklasyfikowano jako: wzajemne sprzężenia, zmiany otoczenia wpływające na system, wymiana informacji oraz inne. Informacja, jaka podlega wymianie

pomiędzy systemem bezpieczeństwa morskiego i jego otoczeniem, jest informacją nautyczną. Ogólne czynniki wpływające na funkcjonowanie systemu bezpieczeństwa morskiego schematycznie przedstawia rysunek 7.



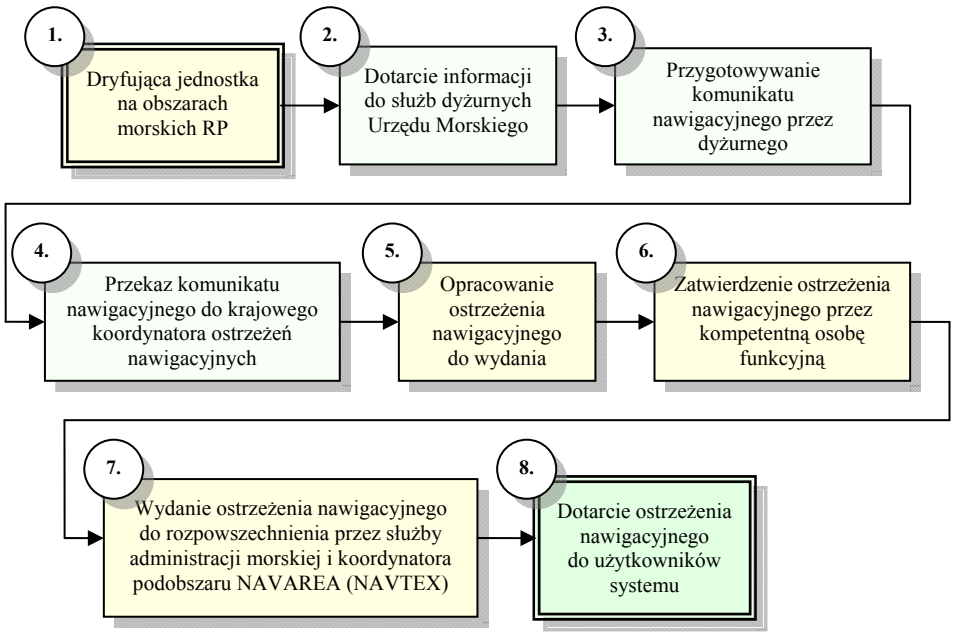
Rys. 7. Czynniki wpływające na funkcjonowanie systemu bezpieczeństwa żeglugi morskiej

Źródło: opracowanie własne.

PROPOZYCJA POPRAWY SYSTEMU I OCENA SKUTKÓW ZMIAN

Do oceny i porównania systemu obiegu informacji nautycznej w dotychczas stosowanym modelu służby hydrograficznej oraz jego wpływu na bezpieczeństwo morskie wykorzystano ocenę parametryczną systemu poprzez zastosowanie takich parametrów, jak dostępność, niezawodność, ciągłość i wiarygodność, czyli kryteriów niezawodnościowych i bezpieczeństwa eksploatacji (wiarygodnościowych). Analizie poddany został przykład obiegu informacji nautycznej związanej z dryfującą jednostką na polskich obszarach morskich (rys. 8.) [3]. Przedstawione zdarzenie jest obrazem typowego postępowania służb polskiej administracji morskiej i krajowego koordynatora ostrzeżeń nawigacyjnych, jakim jest BHMW. Zaproponowana w modelu integracja służby hydrograficznej umożliwia rezygnację z niektórych stopni procedury postępowania przedstawionej poniżej. Jednocześnie możliwość dokonania unifikacji

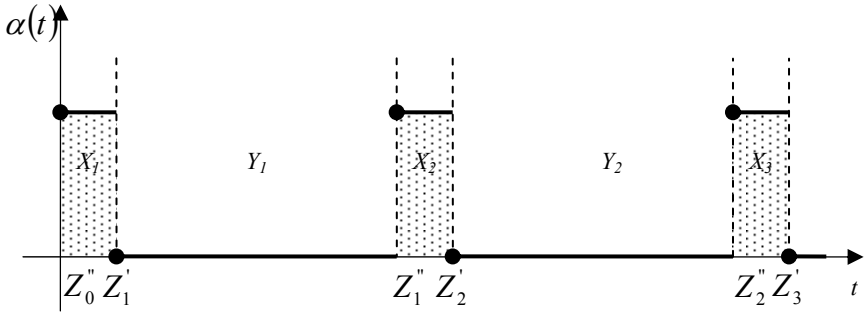
systemów i sprzętu, w ramach jednej służby, daje realną szansę skrócenia czasu obiegu informacji. W przedstawionym przykładzie na potrzeby opracowania założona została rezygnacja z elementów 3. i 4 .przykładowej procedury.



Rys. 8. Przykład obiegu informacji nautycznej w przypadku uzyskania informacji o dryfującej jednostce na polskich obszarach morskich

Źródło: opracowanie własne.

Dokonując przygotowania do przeprowadzenia obliczeń, wprowadza się następujące założenia: niech $\alpha(t)$ oznacza stany niezawodności systemu informacji nautycznej w przypadku dryfującej jednostki, które przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Stany pracy elementów struktury nawigacyjnej (systemu)

Źródło: opracowanie własne.

Przyjmujemy następujące wartości stanów:

stan 1 — dostępność informacji o dryfującej jednostce;
stan 0 — brak dostępności informacji o dryfującej jednostce (informacja przetwarzana jest przez system).

W związku z tym:

$X_1, X_2, X_3, ..., X_n$ — są czasami pracy systemu;
$Y_1, Y_2, Y_3, ..., Y_n$ — są czasami awarii systemu.

Wartości oczekiwane czasu pracy i awarii systemu wynoszą:

$$E(X_1) = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}; \tag{49}$$

$$E(Y_1) = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i}{n}. \tag{50}$$

Dla rozpatrywanego przypadku — system przed modernizacją:

$$E(Y_1) = \frac{T^*}{n}, \tag{51}$$

gdzie:

$$T^* = T_1 + T_2 + T_3 + ...T_n. \tag{52}$$

W rozpatrywanym przykładzie przyjęto następujące założenia dla systemu przed modernizacją:

$$MTBF_1 = 6\text{h} = 360 \text{ min}; \tag{53}$$

$$MTTR_1 = 1\text{h} = 60 \text{ min}, \tag{54}$$

gdzie:
$MTBF_1$ — średni czas pomiędzy uszkodzeniami;
$MTTR_1$ — średni czas do naprawy.

Dokonując podstawienia przyjętych powyżej wartości (53) i (54) dla systemu przed modernizacją, otrzymamy:

$$\lambda_1 = \frac{1}{MTBF_1} = \frac{1}{360\,\text{min}} \approx 2{,}778 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}; \tag{55}$$

$$\mu_1 = \frac{1}{MTTR_1} = \frac{1}{60\,\text{min}} \approx 0{,}01667\,\text{min}^{-1}, \tag{56}$$

gdzie:

λ_1 — intensywność uszkodzeń przed modernizacją;

μ_1 — intensywność napraw przed modernizacją.

Dostępność przedstawia wzór (24) przyjmujący poniższą postać (57), dla rozpatrywanego przypadku zobrazowany na rysunku 10.:

$$A_{t_1}(t) = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} e^{-(\lambda_1 + \mu_1)t}. \tag{57}$$

Wartość współczynnika dostępności obliczamy ze wzoru (28) i przyjmuje on następującą wartość (58), którą zobrazowano na rysunku 10. wraz z dostępnością:

$$A_1 = A_{\exp} = \frac{\mu_1}{\mu_1 + \lambda_1} \approx 0{,}8571. \tag{58}$$

Niezawodność przedstawia wzór (35) przyjmujący postać (59), dla rozpatrywanego przypadku zobrazowany na rysunku 11., przy wartości $\tau = 3$:

$$R_{t_1}(t,\tau) = \left[\frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} e^{-(\lambda_1 + \mu_1)t} \right] \cdot e^{-\lambda_1 \tau}. \tag{59}$$

Granica niezawodności obliczana jest ze wzoru (38) i przyjmuje ona wartość (60), którą zobrazowano na rysunku 11. wraz z niezawodnością:

$$R_1 = \lim_{t \to \infty} R_{\exp}(t,\tau) = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} e^{-\lambda_1 \tau} \approx 0{,}85. \tag{60}$$

Wartość ciągłości obliczona została ze wzoru (45) przyjmującego dla rozpatrywanego przypadku postać (61) i wynosi:

$$C_1 = C_{\exp}(t,\tau) = e^{-\lambda_1 \tau} \approx 0.9917. \tag{61}$$

Następnie rozpatrzono system po modernizacji, gdzie przyjęto następujące założenia:

$$MTBF_2 = 390 \text{ min}; \tag{62}$$

$$MTTR_2 = 30 \text{ min}, \tag{63}$$

gdzie:
$MTBF_2$ — średni czas pomiędzy uszkodzeniami;
$MTTR_2$ — średni czas do naprawy.

Dokonując podstawienia przyjętych powyżej wartości (62) i (63) dla systemu po modernizacji, otrzymamy:

$$\lambda_2 = \frac{1}{MTBF_2} = \frac{1}{390\,\text{min}} \approx 2{,}564 \times 10^{-3}\ \text{min}^{-1} \tag{64}$$

$$\mu_2 = \frac{1}{MTTR_2} = \frac{1}{30\,\text{min}} \approx 0{,}03333\,\text{min}^{-1} \tag{65}$$

gdzie:
λ_2 — intensywność uszkodzeń po modernizacji;
μ_2 — intensywność napraw po modernizacji.

Dostępność przedstawia wzór (24) przyjmujący poniższą postać (66), dla rozpatrywanego przypadku zobrazowany na rysunku 10.:

$$A_{t_2}(t) = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} e^{-(\lambda_2 + \mu_2)t}. \tag{66}$$

Wartość współczynnika dostępności obliczamy ze wzoru (28) i przyjmuje on następującą wartość (67), którą zobrazowano na rysunku 10. wraz z dostępnością:

$$A_2 = \frac{\mu_2}{\mu_2 + \lambda_2} \approx 0{,}9286. \tag{67}$$

Niezawodność przedstawia wzór (35) przyjmujący postać (68), dla rozpatrywanego przypadku zobrazowany na rysunku 11., przy wartości $\tau = 3$:

$$R_{t2}(t,\tau) = \left[\frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} e^{-(\lambda_2 + \mu_2)t} \right] \cdot e^{-\lambda_2 \tau}. \tag{68}$$

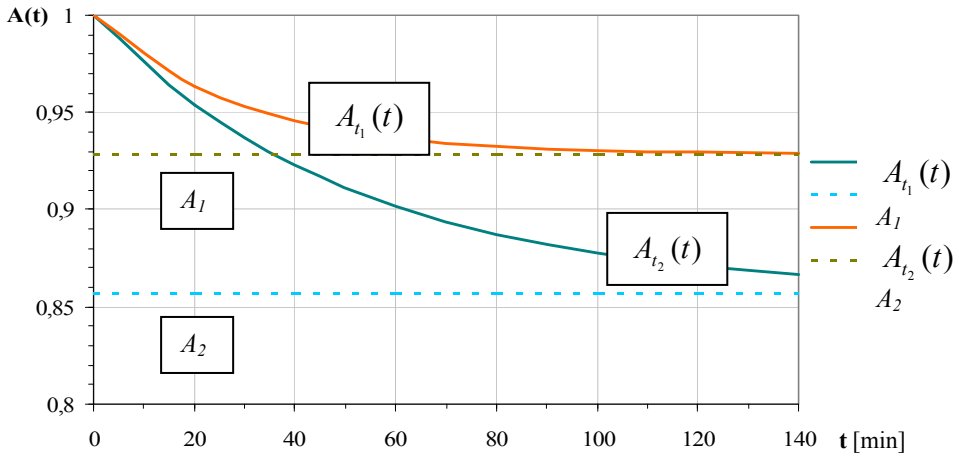
Granica niezawodności obliczana jest ze wzoru (38) i przyjmuje ona wartość (68), którą zobrazowano na rysunku 11. wraz z niezawodnością:

$$R_2 = \lim_{t \to \infty} R_{\exp}(t,\tau) = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} e^{-\lambda_2 \tau} \approx 0{,}9215. \tag{69}$$

Wartość ciągłości obliczona została ze wzoru (45) i wynosi:

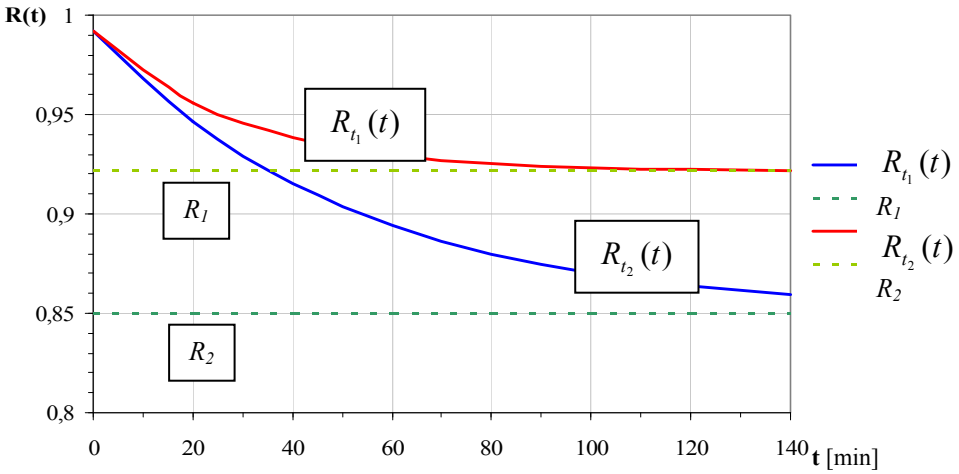
$$C_2 = C_{\exp}(t,\tau) = e^{-\lambda_2 \tau} \approx 0.9923 . \tag{70}$$

Na rysunku 10. zestawiono wykresy funkcji dostępności i współczynnika dostępności przed i po modernizacji, a na rysunku 11. wykresy funkcji niezawodności i granicy niezawodności w uwarunkowaniach jak wyżej.



Rys. 10. Zestawienie funkcji dostępności i współczynnika dostępności systemu przed i po modernizacji

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11. Zestawienie funkcji niezawodności i granic niezawodności systemu przed i po modernizacji

Źródło: opracowanie własne.

Wykresy obrazują zmienność wartości rozpatrywanych parametrów w funkcji czasu. W każdym przypadku widoczny jest wzrost wartości prezentowanych parametrów. W tabeli 1. zebrano wyniki obliczeń parametrów porównawczych (współczynnik dostępności, granica niezawodności i współczynnik ciągłości) stanów systemu przed i po modernizacji w zależności od założonych wartości wiarygodności. Widoczna jest w każdym przypadku poprawa przyjętych do porównania parametrów systemu. Duży wzrost nastąpił szczególnie w odniesieniu do wartości współczynnika dostępności i granicznej wartości niezawodności. Po dokonaniu analizy otrzymanych wyników, przedstawionych na wykresach i w tabeli, należy wnioskować, iż funkcjonowanie systemu po modernizacji uległo poprawie [3].

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń parametrów porównawczych stanów systemów

Porównywany parametr	**Stan systemu**	
	przed modernizacją	po modernizacji
Współczynnik dostępności A_i	0,8571	0,9286
Graniczna wartość niezawodności R_i	0,85	0,9215
Współczynnik ciągłości C_i	0.9917	0.9923
Wiarygodność T_{AIN_1}	60 min	30 min

Z przeprowadzonej analizy otrzymanych wyników zobrazowanych na wykresach i zawartych w tabeli nasuwa się wniosek stwierdzający poprawę funkcjonowania systemu po dokonanej modernizacji oraz słuszność zaproponowanego aparatu porównania obu systemów (przed i po modernizacji). Zmiany organizacyjne i funkcjonalne zaproponowane w modelu polskiej służby hydrograficznej idą w kierunku ujednolicenia całej służby w zakresie realizacji zadań, co w rezultacie daje poprawę funkcjonowania systemu bezpieczeństwa morskiego. Poprawa systemu obiegu informacji nautycznej wiąże się ze skróceniem czasu pracy całego systemu podczas realizacji procesu wytworzenia i przekazu ostrzeżeń nawigacyjnych (ten przykład podlegał analizie porównawczej), jednak to zadanie jest tylko składową pracy służby. Z przyspieszeniem obiegu informacji nautycznej powiązana jest ustawowa działalność służby hydrograficznej, taka jak wydawanie cotygodniowego biuletynu „Wiadomości Żeglarskie", podręczników nautycznych (locje, spisy świateł, spisy radiosygnałów i inne), produkcja elektronicznych i papierowych map nawigacyjnych oraz wykonywanie zadań krajowego koordynatora systemu ostrzeżeń nawigacyjnych.

PODSUMOWANIE

Porównania i oceny dwóch modeli — istniejącego i postulowanego (przed i po modernizacji) dokonano poprzez wskazanie czynnika porównawczego, umożliwiającego zastosowanie aparatu matematycznego i innych metod. Tym czynnikiem okazała się informacja nautyczna, a dokładniej — system obiegu informacji nautycznej. Wykorzystując model matematyczny systemu oraz wskaźniki niezawodności, dostępności, ciągłości i wiarygodności, przeprowadzono na wybranym przykładzie ocenę parametryczną systemu opartą na kalkulacjach i obliczeniach, która wykazała lepsze parametry modelu po modernizacji.

Reasumując, wprowadzenie proponowanego modelu w życie, jak wykazały oceny i porównania, wpłynie na poprawę poziomu bezpieczeństwa morskiego, lepsze wykorzystanie pozyskiwanych danych hydrograficznych, informacji nautycznej oraz wzajemnej współpracy instytucji morskich. Oprócz teoretycznych rozważań wykorzystujących wskazany aparat matematyczny do oceny i porównania modeli, zaproponowanych rozwiązań metodycznych, przeprowadzonych kompletnych analiz problemowych i innych cech ma on ponadto charakter utylitarny. Utylitarność proponowanych rozwiązań wyraża się w możliwości ich zastosowania w pracach legislacyjnych oraz tworzeniu wizji nowej polskiej służby hydrograficznej na obszarach morskich [3].

W przedstawionym artykule elementami o charakterze poznawczym są:

1. Zastosowanie elementów teorii niezawodności procesów stacjonarnych umożliwiające zdefiniowanie pojęć dostępności, niezawodności, ciągłości i wiarygodności informacji nautycznej, niezależnie od systemu IALA.
2. Wykazanie, w oparciu o wyznaczoną przestrzeń kryterialną, iż postulowana zmiana funkcjonowania systemu obiegu informacji nautycznej powoduje wzrost wartości kryteriów oceny.

BIBLIOGRAFIA

[1] Breeuwer M., Farnworth R., Tiemeyer B., Watt A., *GNSS-1 Performance Specyfication and Validation for Civil Aviation*, ION GPS-98, Nashville 1989.

[2] Dyrcz C., *Hydrographic Service of the Polish Navy in System of Maritime Security*, The XV-th International Scientific and Technical Conference 'The Role of Navigation in Support of Human Activity on the Sea', AMW, Gdynia 2006.

[3] Dyrcz C., *Model służby hydrograficznej na obszarach morskich RP*, rozprawa doktorska, AMW, Gdynia 2007.

[4] Dyrcz C., *Podstawy prawne funkcjonowania Polskiej Służby Hydrograficznej*, „Przegląd Hydrograficzny", 2007, nr 3.

[5] Dyrcz C., Grabiec D., Nitner H., Tuszyński J., *Współczesne zabezpieczenie hydrograficzne działalności człowieka na morzu*, XIV Konferencja Naukowo--Techniczna „Rola nawigacji w zabezpieczeniu działalności człowieka na morzu", AMW, Gdynia 2004.

[6] Felski A., *About understanding a few basical ideas connected with satellite navigation*, Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Inżynierii Ruchu Morskiego, WSM, Szczecin 1999.

[7] Hofmann-Wellendof B., Legat K., Wieser M., *Navigation. Principles of Positioning and Guidance*, Springer-Verlag, Wien — New York 2003.

[8] Kopacz Z., Morgaś W., Urbański J., *Wybrane zagadnienia Międzynarodowego Systemu Bezpieczeństwa Morskiego*, AMW, Gdynia 2005.

[9] Kubicki K., *Rola morskiej informacji geoprzestrzennej dla zabezpieczenia działań morskich*, „Przegląd Hydrograficzny", 2007, nr 3.

[10] Nitner H., *Informacja środowiskowa dla wsparcia działań morskich w cyfrowych produktach hydrograficznych*, XII Konferencja Naukowa MW RP „Automatyzacja Dowodzenia", Jurata 2003.

[11] Specht C., *Availability, Reliability and Continuity in Navigation and Hydrography — terminology discussion*, 'Annual of Navigation', 2002, No 4.

[12] Specht C., *Availability, Reliability and Continuity Model of Differentia GPS Transmission*, 'Annual of Navigation', 2003, No 5.

[13] Urbański J., Nitner H., Morgaś W., Kopacz Z., *Rola morskiej informacji geoprzestrzennej dla zabezpieczenia działań morskich*, Konferencja Naukowa, AMW, Gdynia 2004.

INFLUENCE OF NAUTICAL INFORMATION ON SAFETY AT SEA

ABSTRACT

The article presents an attempt to develop a mathematical model of a system of nautical information circulation based on the theory of reliability. Definitions of availability, reliability, continuity

as well as credibility are defined with reference to the system of nautical information circulation. The parametric assessment of the system is used to compare and the assess two models — existing and proposed.

Keywords:
safety at sea, nautical information, system of nautical information circulation.

Recenzent dr inż. Wacław Morgaś, prof. AMW