

**Andrzej Felski**  
**Bogusław Jakubowski**

## **NIEZAWODNOŚĆ SYSTEMU NAWIGACYJNEGO W KONTEKŚCIE PRZETWARZANIA INFORMACJI NAWIGACYJNEJ**

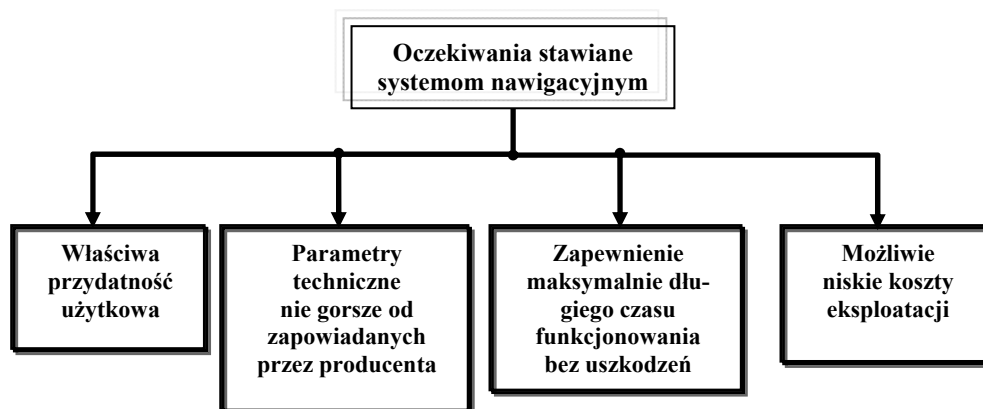
### **STRESZCZENIE**

W pracy przedstawiono koncepcję oceny niezawodności systemu nawigacyjnego w kontekście przetwarzania informacji nawigacyjnej. Opracowano niezbędne teoretyczne informacje dotyczące opisu zjawiska oceny niezawodności systemu informacyjnego, jakim jest układ integrujący czujniki INS i GPS. W dalszej części artykułu sporządzono model niezawodnościowy układu INS/GPS w oparciu o oszacowane błędy pozycji jednostki pływającej.

Do przeprowadzenia oceny modelu wykorzystano dane z symulatora nawigacyjnego WelNavigate GS720. Zrobiono analizę statystyczną rozważanego procesu niezbędną do wyznaczenia wskaźników niezawodnościowych badanego układu.

### **WSTĘP**

Systemy nawigacyjne stosowane na okrętach marynarki wojennej, głównie satelitarne systemy nawigacyjne i inercjalne systemy nawigacyjne, funkcjonują w warunkach, które są bardziej uciążliwe niż w innych dziedzinach gospodarki. W związku z tym problem zapewnienia właściwej niezawodności wymaga uwzględnienia szeregu specyficznych właściwości nierozpatrywanych w ogólnej literaturze dotyczącej niezawodności. Spełnienie wszystkich wymagań użytkownika wobec złożoności funkcji, których spełnienia wymaga się od tych systemów, sprawia nie lada wyzwanie przed konstruktorami systemów. Przedstawia to schemat na rysunku 1.



Rys. 1. Oczekiwania stawiane nowoczesnym systemom nawigacyjnym

Źródło: Opracowanie własne.

Powyższe wymagania można spełnić przynajmniej w zadowalającym stopniu, jeżeli systemy będą miały właściwą jakość i niezawodność. Cechy te rozpatruje się zazwyczaj w sensie własności urządzeń technicznych. W pracy zaproponowano odmienną ocenę niezawodności systemu w kontekście niezawodności procesu przetwarzania informacji w systemie informacyjnym opartą na statystycznej analizie danych wyjściowych. Przed zapoznaniem się z istotą problemu niezawodności oraz proponowanym sposobem jego rozwiązania konieczne jest wyjaśnienie podstawowych pojęć i założeń z teorii niezawodności.

Niezawodnością systemu nawigacyjnego nazwiemy zbiór jego cech (własności), które opisują gotowość obiektu do wykonania określonego zadania, mówiąc inaczej – wypełnienia określonych funkcji stawianych przed tym systemem w jak najdłuższym okresie eksploatacji. Miarą niezawodności będzie zatem jakość przetworzonej informacji przesłanej do użytkownika systemu.

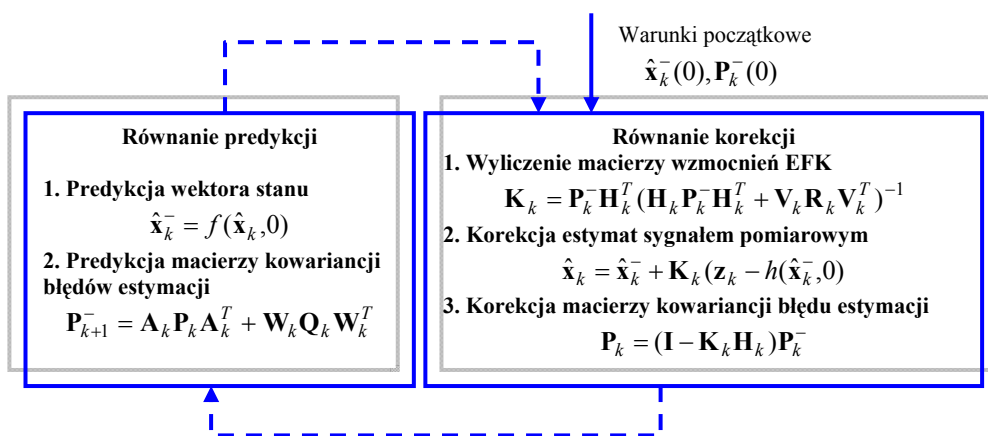
Pod pojęciem jakości informacji nawigacyjnej rozumiemy zbiór własności decydujących o ich zdolności do zaspokojenia istniejących lub przewidywanych potrzeb użytkownika. Od systemów nawigacyjnych oczekuje się przede wszystkim bezawaryjnej pracy, tj. utrzymania sprawności w określonych warunkach i w zdefiniowanym przedziale czasu trwania zadania nawigacyjnego. Wobec tego sprawność informacji nawigacyjnej może być oceniona wielkością błędu przetworzonej informacji wyrażonej błędem wyznaczenia pozycji czy też wielkością wpływających na błąd informacji, np. współczynnik geometryczny dokładności pozycji (DOP).

Wobec tego można przyjąć, że systemy nawigacyjne spełniają oczekiwania użytkownika w sensie niezawodności w przypadku osiągnięcia takiej wiarygodności informacji nawigacyjnej, która będzie zawarta w zadowalającym nas przedziale ufności. Dokładność prowadzenia nawigacji normują rezolucje IMO A.529 z uaktu-

alnikami A.529(13), A.860(20), A. 815(19) o normach dokładności w nawigacji *Accuracy Standards for Navigation 1983*.

W pracy zaproponowano ocenę niezawodności systemu informacyjnego integrującego czujniki GPS i INS w kontekście przetworzonej informacji nawigacyjnej. Specyficzne własności tych systemów predestynują je w sposób szczególnie w przyszłościowych zintegrowanych systemach nawigacyjnych na okrętach. Zasadniczym celem integracji elementów INS i GPS jest zwiększenie niezawodności integrującego je systemu nawigacyjnego poprzez poprawę dokładności określenia parametrów nawigacyjnych (pozycji, prędkości), jak również wydłużenie czasu bezawaryjnej pracy systemu. W rozważanym wariancje systemu zintegrowanego informację otrzymaną z czujników pomiarowych poddaje się procesowi filtracji, wykorzystując *Rozszerzony Filtr Kalmana(EFK)* [1, 3, 14, 27].

W niniejszej pracy podjęto próbę wyznaczenia oczekiwanego wskaźnika gotowości zintegrowanego systemu nawigacyjnego, wykorzystując metody probabilistyczne. Ogólny algorytm zastosowania EFK przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Diagram działania algorytmu rozszerzonego filtru Kalmana

Źródło: Opracowanie własne.

- $\hat{\mathbf{x}}_k^-$  – estymata stanu *a priori* (predykcji) w kroku  $k$ ;
- $\hat{\mathbf{x}}_k$  – estymata stanu *a posteriori* w kroku  $k$ ;
- $\mathbf{P}_k$  – macierz kowariancji estymacji *a priori* (predykcji);
- $\mathbf{P}_k^-$  – macierz kowariancji estymacji *a posteriori*;
- $\mathbf{x}_{k+1}$  oraz  $\mathbf{z}_k$  – rzeczywiste wektory stanu i pomiaru;
- $\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}$  oraz  $\tilde{\mathbf{z}}_k$  – aproksymowane wektory stanu i pomiaru;
- $\hat{\mathbf{x}}_k$  – estymata *a posteriori* w kroku  $k$ ;

zmienne przypadkowe  $\mathbf{v}_k$  i  $\mathbf{w}_k$  – szумы pomiaru i procesu;

A – macierz pochodnych cząstkowych z  $f(\bullet)$  względem  $\mathbf{x}$ ,  $A_{[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{\mathbf{x}}_k, 0)$ ;

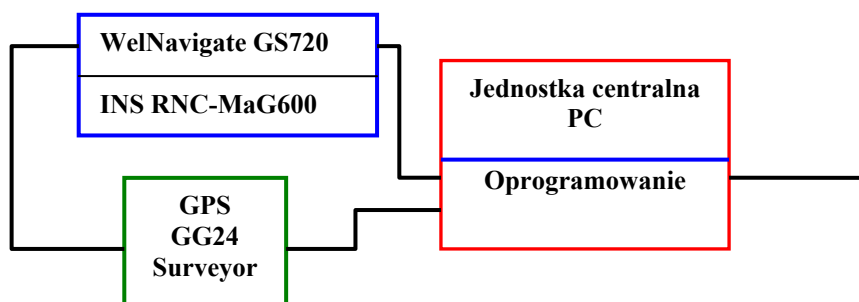
W – macierz pochodnych cząstkowych z  $f(\bullet)$  względem  $\mathbf{w}$ ,  $W_{[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial w_{[j]}}(\hat{\mathbf{x}}_k, 0)$ ;

H – macierz pochodnych cząstkowych z  $h(\bullet)$  względem  $\mathbf{x}$ ,  $H_{[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\tilde{\mathbf{x}}_k, 0)$ ;

V – macierz pochodnych cząstkowych z  $h(\bullet)$  względem  $\mathbf{v}$ ,  $V_{[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial v_{[j]}}(\tilde{\mathbf{x}}_k, 0)$ ;

I – macierz jednostkowa.

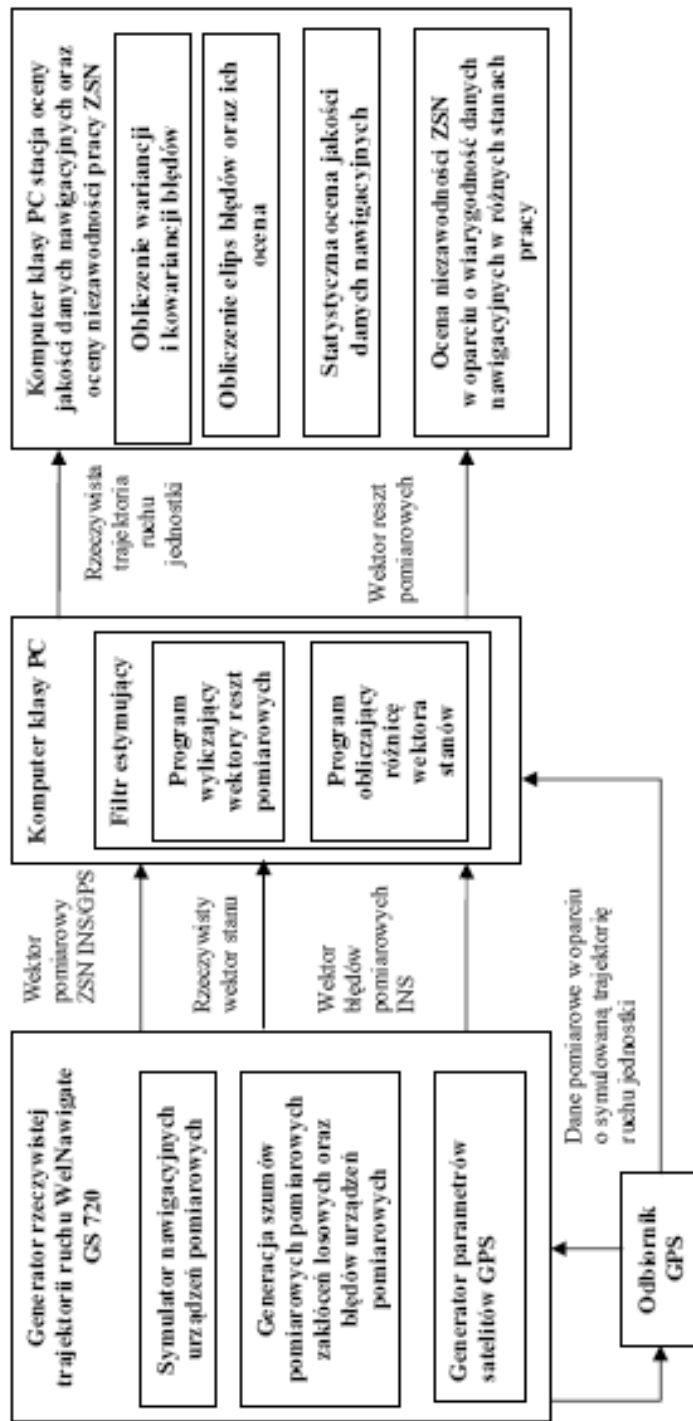
Do oceny niezawodności systemu informacyjnego można podejść na wiele sposobów. Jednym z nich jest przedstawienie zintegrowanego systemu nawigacyjnego w układzie szeregowo-równoległym, w którym następuje estymacja błędów pozycji systemu INS w procesie filtracji, w odniesieniu do danych uzyskanych z odbiornika GPS. Rysunek 3. przedstawia model systemu szeregowo-równoległego integrującego czujniki INS i GPS w układzie równoległym oraz jednostkę centralną z oprogramowaniem niezbędnym do realizacji postawionych zadań przez te urządzenia. W badaniach niezawodnościowych systemu, w wersji początkowej, przyjęto niezawodność oprogramowania równą jeden.



Rys. 3. Struktura funkcjonalna o pniu szeregowo-równoległym badanego systemu nawigacyjnego

Źródło: Opracowanie własne.

Do wyznaczenia tą metodą wskaźników niezawodności posłużono się symulatorem WelNavigate GS720. Na rysunku 4. przedstawiono koncepcję oceny niezawodności systemu informacyjnego w oparciu o analizę statystyczną informacji uzyskanych z symulatora.



Rys. 4. Koncepcja oceny niezawodności systemu informacyjnego w oparciu o analizę statystyczną danych czujników INS i GPS

Źródło: opracowanie własne.

Istotnym dla takich pomiarów faktem jest to, że podczas wykonywania eksperymentów nie ma możliwości powrotu do poprzednich warunków. Z uwagi na fakt, że są one realizowane w odmiennych warunkach, trudno jest mówić o rzetelnym porównaniu danych wyjściowych z odbiorników.

W warunkach dynamicznych badania takie mają małą wiarygodność, także z tego powodu, iż zazwyczaj dokładność rejestracji ruchu nosiciela jest porównywalna z dokładnością badanych odbiorników. W takich warunkach trudno jest również oddzielić szumy pomiarowe badanego urządzenia (błędy odbiornika GPS oraz INS) od naturalnych szumów środowiska eksperymentu.

Dodatkowym problemem jest kwestia weryfikacji odporności odbiorników na zakłócenia wytwarzane celowo oraz pojawiające się w sposób naturalny. Zarówno jednych, jak i drugich nie można generować, gdyż zakłóciłoby to funkcjonowanie wielu odbiorników GPS stosowanych w tym czasie przez innych użytkowników, co stwarzałoby utrudnienie ich działalności i mogłoby spowodować zagrożenie [6].

W tej sytuacji jedynym sposobem prowadzenia badań w dziedzinie uwierzytelnienia informacji otrzymywanych z odbiorników GPS i INS jest metoda laboratoryjna. Typowy symulator systemu GPS generuje przebiegi elektryczne, jakie pojawiają się w antenie odbiornika GPS w efekcie docierania do niej sygnałów od satelitów. Sygnały te zawierają komplet informacji występujących w sygnałach odbieranych od rzeczywistych satelitów, a więc wszystkie typy depech transmitowanych od satelitów oraz sygnał nośny zniekształcony stosownie do zamodelowanej konstrukcji satelitów oraz ich usytuowanie względem obiektu nawigacyjnego. Dodatkowa możliwość integracji innych czujników pomiarowych, takich jak log, żyrokompas, INS, pozwala na dowolną konfigurację zintegrowanych systemów nawigacyjnych.

Istotnym elementem takiego symulatora jest oprogramowanie wspomagające, które pozwala zamodelować ruch obiektu nawigacji w trakcie eksperymentu, wprowadzać wszelkie parametry do systemu GPS oraz przeprowadzać analizę zarejestrowanych przez odbiornik pomiarów.

Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwa jest powtarzalność eksperymentów, precyzyjnie porównywanie wpływu na odbiorniki wybranych źródeł błędów, a także eksperymentowanie w zakresie potencjalnych skutków zmian w konstelacji satelitarnej.

W wyniku przeprowadzonej analizy pracy symulatora oraz informacji dostarczonej od producenta WelNavigate opracowano schemat przepływu informacji pomiędzy odbiornikiem GPS a kartą komunikacyjną INS RNC-MaG600 ISA wcho-

dzącą w skład symulatora. Do opracowania statystycznej oceny jakości danych wykorzystano program „Voyager” firmy WelNavigate, program „Evaluate” firmy Ashtech, program STASISTICA<sup>TM</sup>PL oraz program Excel z pakietu Microsoft Office. Rysunek 5. przedstawia przepływ informacji z karty INS symulatora WelNavigate GS720 i odbiornika GPS do jednostki centralnej, gdzie następuje statystyczna ocena jakości informacji. Schemat przepływu informacji w symulatorze opracowano w oparciu o [13, 19, 20, 21].

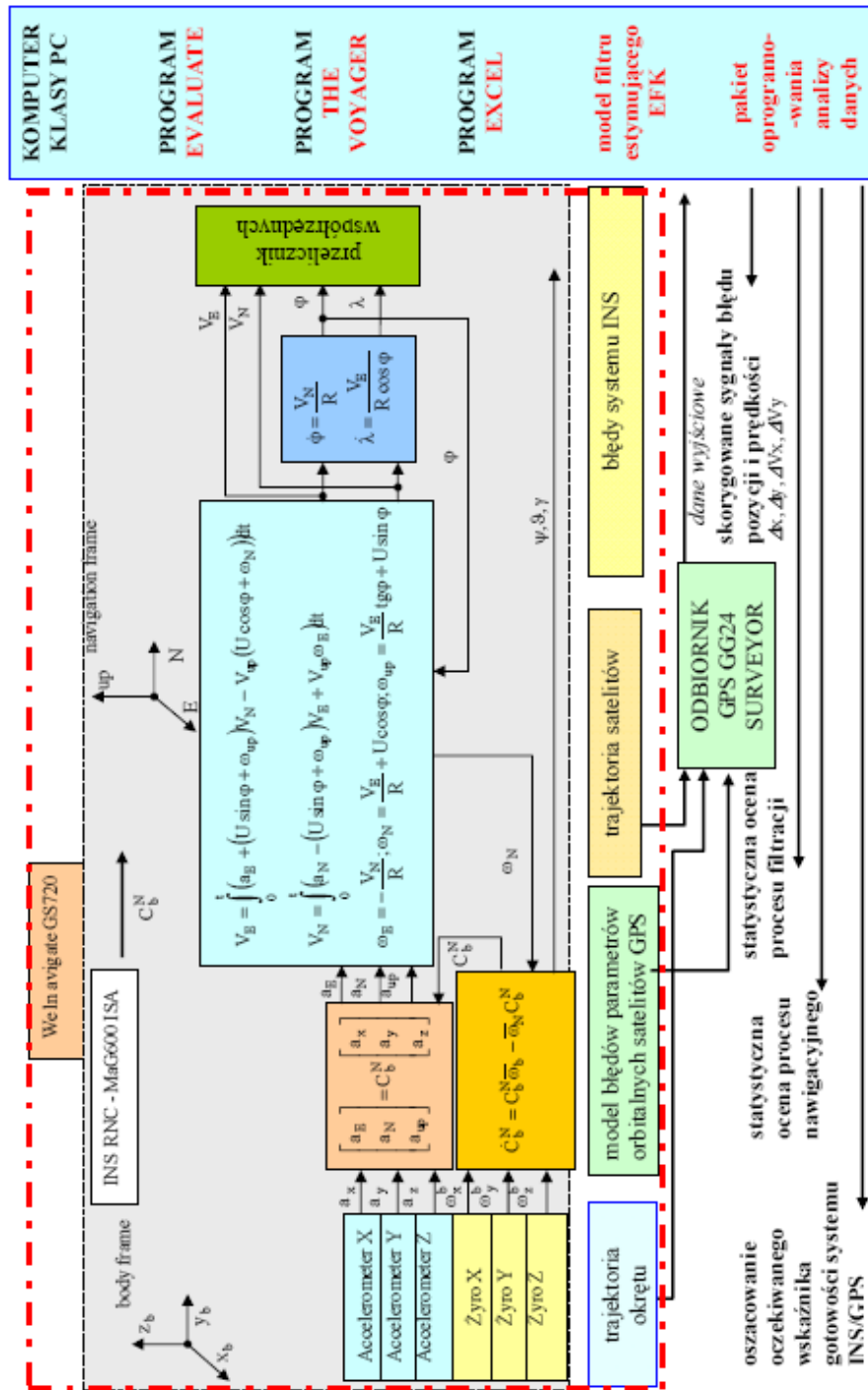
Zestaw symulatora WelNavigate GS 720 składa się z dwóch zespołów:

- wykonawczego;
- kontrolno-sterującego.

Symulator stanowi zespół generatorów, który symuluje sygnały odebrane przez antenę odbiornika GPS od całej konstelacji satelitarnej systemu GPS, dostosowując jego parametry do danych przekazywanych przez blok kontrolno-sterujący, którym jest komputer klasy PC.

GS 720 jest urządzeniem symulującym pełną konstelację 24 satelitów, jednak na wyjściu jest w stanie generować sygnały dla wybranych ośmiu, zgodnie z ustalonym przez operatora kryterium. Sygnały te, poprzez blok sprzęgający R-40, mogą być podawane równocześnie na dwa odbiorniki, a ponadto istnieje możliwość miksowania ich z sygnałem zakłócającym. Wyniki pomiarów wykonanych testowanym odbiornikiem mogą być rejestrowane w komputerze sterującym, co daje możliwości przetwarzania i wykonywania dowolnych analiz uzyskanych pomiarów.

W najprostszym przypadku można ograniczyć się do porównania zaprogramowanej dla eksperymentu trajektorii, na podstawie której symulowano sygnały odbierane od satelitów, z trajektorią ustaloną przez odbiornik. Sygnały generowane przez symulator umożliwiają podłączonemu do niego odbiornikowi ustalenie czasu i pozycji. Dzięki dołączonemu oprogramowaniu możliwe jest również wprowadzenie do sygnałów GPS generowanych przez symulator błędów i zakłóceń, których wartości można precyzyjnie ustalić. Najistotniejszą jednak zaletą symulatora jest możliwość przeprowadzenia całkowicie powtarzalnych testów.



Rys. 5. Przepływ informacji z karty INS symulatora WeINavigate GS720 i odbiornika GPS do jednostki centralnej

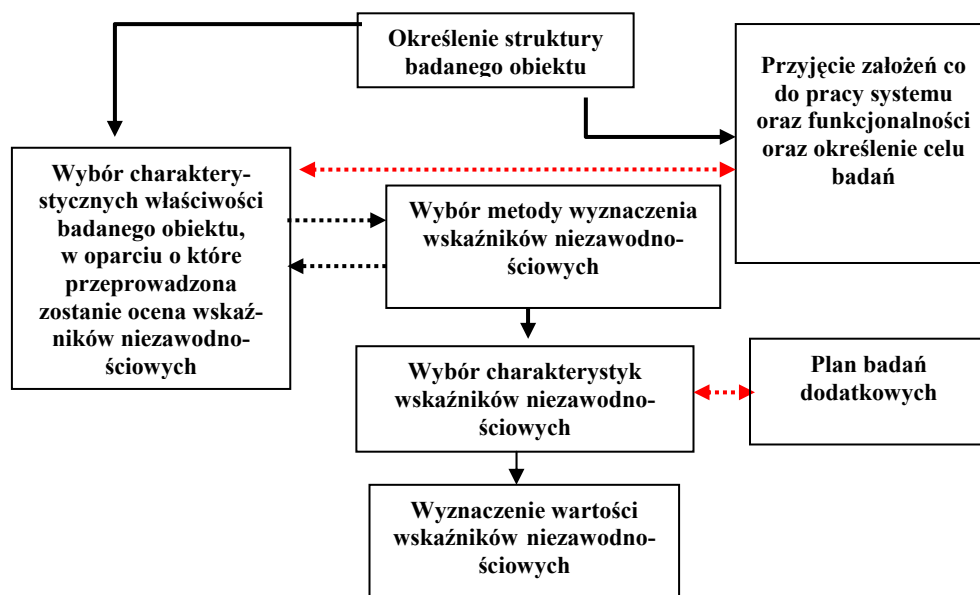
Źródło: Opracowanie własne



## METODA ANALIZY OCENY NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU

W celu oszacowania niezawodności badanego systemu należy opracować model zmian wartości badanego parametru w zależności od zmian warunków wpływających na dokładność otrzymywanej informacji.

Kolejnym krokiem jest przyjęcie pewnych założeń, które są niezbędne do oszacowania wskaźników niezawodności, nie zmniejszając ich wartości, przy jednoczesnym uproszczeniu modelu (rys. 6).



Rys. 6. Algorytm przyjęcia założeń do oceny wskaźników niezawodnościowych badanego systemu informacyjnego

Źródło: Opracowanie własne.

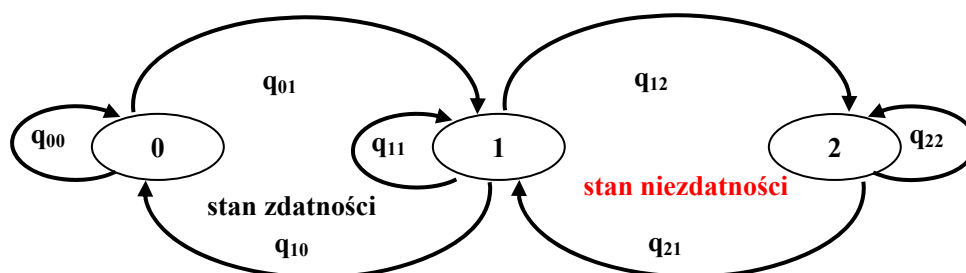
## ZAŁOŻENIA TEORETYCZNE DO BADANEGO UKŁADU

Do oceny wskaźników niezawodnościowych przyjęto następujące założenia:

1. Wyznaczone wskaźniki niezawodnościowe zostały wyliczone w oparciu o oszacowane błędy pozycji jednostki pływającej.

2. Założono następujące stany zdatności systemu, przyjmując jednocześnie, że oszacowane błędy pozycji są niezależne i mają rozkład normalny:
  - $S_0=0$ : stan zdatności systemu – błąd pozycji nie przekracza 10 metrów;
  - $S_1=1$ : stan zdatności częściowej – błąd pozycji jest zawarty w przedziale  $10 \text{ m} \leq \Delta X \leq 20 \text{ m}$ .
  - $S_2=2$ : stan niezdatności  $\Delta X > 20 \text{ m}$ .
3. Obiekt jest zbudowany z dwóch elementów INS i GPS, które są naprawialnymi elementami trójstanowymi w sensie niezawodnościowym o wykładniczych rozkładach czasu pracy i uszkodzenia (intensywność uszkodzeń  $\lambda_i$ ) oraz czasu odnowy (intensywność odnowy  $\mu_i$ ), gdzie  $i=1, 2, \dots, n$ .
4. Pomiary są dokonywane w odstępach jednosekundowych.

Graf stanów niezawodnościowych jest najogólniejszym sposobem przedstawienia struktury niezawodnościowej badanego obiektu. Jednocześnie stanowi on podstawę do oceny charakterystyk niezawodnościowych na podstawie aparatu procesów Markowa.



Rys. 7. Graf stanów niezawodnościowych systemu

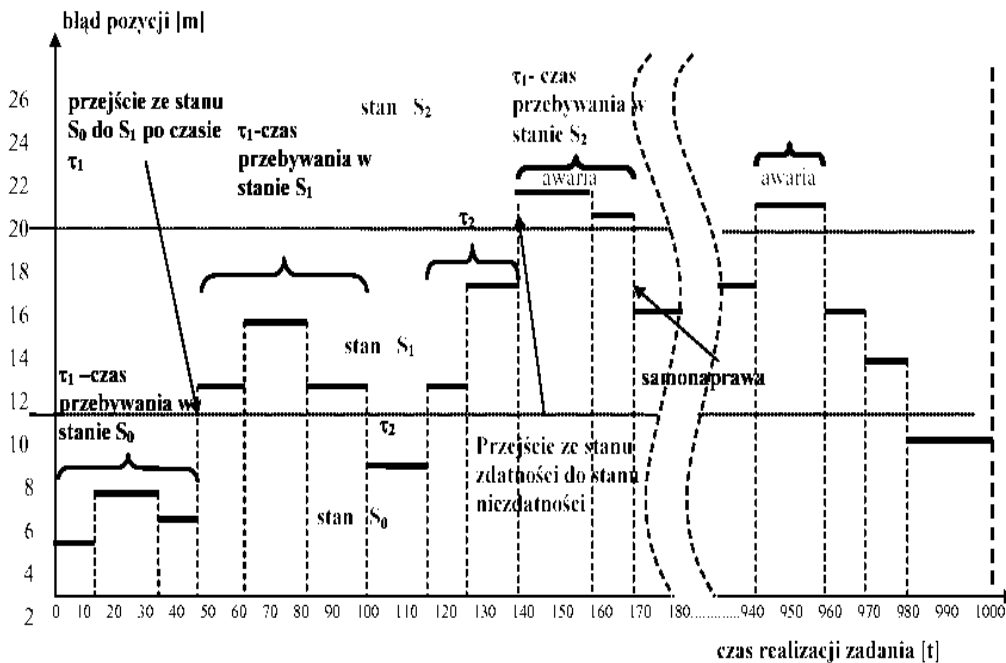
- 0 – stan zdatności całkowitej;
- 1 – stan zdatności częściowej;
- 2 – stan niezdatności;
- $q_{ij}$  – intensywność przejścia między stanami.

W efekcie przeprowadzenia kwantowania otrzymamy model zmian wartości błędu pozycji w zależności od czasu trwania zadania (czasu eksploatacji systemu).

### MODEL ZMIAN STANÓW ZINTEGROWANEGO SYSTEMU NAWIGACYJNEGO

W analizie rozkładu cechy mierzalnej ważną rolę odgrywają charakterystyki liczbowe zwane momentami. Są to miary klasyczne, obliczane na podstawie wszystkich obserwacji [26]. Dla pozyskania informacji o dokładności danych o wektorze ruchu jednostki pływającej prezentowanych w oparciu o symulator nawigacyjny przeprowadzono eksperyment badawczy. Polegał on na rejestracji danych o kursie, prędkości oraz pozycji statku płynącego po zadanym kursie i z zadaną prędkością. Wektor wzorcowy wyznaczono w oparciu o zasymulowane zadanie nawigacyjne. Dane pozyskane z odbiornika GPS oraz karty INS zostały sprowadzone do tych samych momentów czasowych i za pomocą metod statystycznych porównane z wektorem wzorcowym. Efektem porównania danych wzorcowych z danymi otrzymanymi z systemów nawigacyjnych były oszacowane błędy pozycji, które posłużyły do wyliczenia niezawodności systemu GPS/INS w kontekście przetworzonej informacji nawigacyjnej.

Na podstawie pomiarów z symulatora opracowano model zmian stanów (rys. 9) w oparciu o oszacowane błędy pozycji.



Rys. 8. Model przejścia między stanami w oparciu o oszacowane błędy informacji

Źródło: Opracowanie własne.

$S = \{0, 1, 2, \dots\}$  – stany systemu (błąd pozycji);

$\tau_i$  – czas przebywania w stanie  $S_j$ , pod warunkiem że przebywanie rozpoczęło się od stanu  $S_i$ ; czasy trwania stanów  $\tau_i$  są niezależnymi, ciągłymi i dodatnimi zmiennymi losowymi, co oznacza, że dystrybuanty  $F_i(\tau)$  i gęstości  $f_i(\tau)$  tych zmiennych losowych spełniają warunki:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} F_i(\tau) = 1, f_i(\tau) < \infty; \tau \geq 0, i = \overline{1, m} \quad (1)$$

Przyjęto również, że odnowa poszczególnych elementów nie przerywa pracy pozostałych elementów, jak również nie występuje faktyczne uszkodzenie elementów w sensie technicznym.

Następny etap w ocenie niezawodności będzie polegał na:

- ustaleniu wszystkich możliwych przejść między stanami;
- ustaleniu intensywności  $q_{ji}$  uszkodzenia elementu, powodującej przejście systemu ze stanu  $j$  do stanu  $i$ ;
- wyznaczeniu intensywności przebywania systemu w  $i$ -tym stanie niezawodnościowym według wzoru

$$q_{ii} = - \sum_{i \neq j} q_{ij} ; \quad (2)$$

- zbudowaniu macierzy  $\mathbf{Q}$  intensywności przejść między stanami niezawodnościowymi systemu

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{00} & q_{01} & \dots & q_{0N} \\ q_{10} & q_{11} & \dots & q_{1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{N0} & q_{N1} & \dots & q_{NN} \end{bmatrix} ; \quad (3)$$

- ustaleniu warunków początkowych wektora prawdopodobieństw przebywania systemu w stanach niezawodnościowych

$$\mathbf{P}(0) = [\mathbf{P}_0(0), \mathbf{P}_1(0), \dots, \mathbf{P}_N(0)] , \quad (4)$$

przy spełnieniu warunków rozłączności prawdopodobieństw

$$\sum_{i=0}^N \mathbf{P}_i \equiv \sum_{i=0}^N \mathbf{P}_i(0) = 1 ; \quad (5)$$

- rozwiązaniu równania macierzowego przy warunku początkowym według wzoru (4)

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P} = \mathbf{P} \times \mathbf{Q}, \quad (6)$$

przy czym

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N]. \quad (7)$$

Równanie (6) można przedstawić w postaci operatorowej:

$$\mathbf{P}(s) = \mathbf{P}(0) \times [s\mathbf{I} - \mathbf{Q}]^{-1}, \quad (8)$$

gdzie:

- $\mathbf{I}$  – macierz jednostkowa;
- $s$  – operator Laplace’a.

W przypadku zastąpienia (6) równaniem (8) macierz  $[s\mathbf{I} - \mathbf{Q}]^{-1}$  jest zawsze funkcją wymierną w dziedzinie operatora  $s$  i wobec tego składowe  $P_i(s)$  będą także funkcjami wymiernymi, a wyznacznik  $\det[s\mathbf{I} - \mathbf{Q}]^{-1}$  wielomianem o liczbie  $k$  pierwiastków.

Po znalezieniu pierwiastków równania

$$\det[s\mathbf{I} - \mathbf{Q}]^{-1} = 0, \quad (9)$$

wykorzystując twierdzenie o residuach [23], wyznacza się prawdopodobieństwa:

$$\mathbf{P}_i(t) = \sum_k \frac{1}{(m-1)!} \lim_{s \rightarrow s_k} \frac{d^{m-1}}{ds^{m-1}} \left| (s - s_k)^m \mathbf{P}_i(s) \exp(st) \right|, \quad (10)$$

gdzie:

- $s_k$  –  $k$ -ty pierwiastek wielomianu  $\det[s\mathbf{I} - \mathbf{Q}]^{-1}$ ;
- $m$  – krotność  $k$ -tego pierwiastka.

W przypadku gdy wszystkie pierwiastki  $s_k$  są wielokrotne, wzór (10) przybiera postać

$$\mathbf{P}_i(t) = \sum_k \lim_{s \rightarrow s_k} \left( (s - s_k) \mathbf{P}_i(s) \exp(st) \right). \quad (11)$$

Po wyznaczeniu prawdopodobieństwa przebywania systemu we wszystkich stanach niezawodnościowych można obliczać wskaźniki niezawodności systemu. Na podstawie znajomości prawdopodobieństw przebywania systemu w jego stanach niezawodnościowych wyznacza się gotowość chwilową systemu według wzoru

$$A = \sum_{i: s_i \in S^+} P_i, \quad (12)$$

gdzie:

$P_i$  – prawdopodobieństwo przebywania w  $i$ -tym stanie niezawodnościowym systemu;

$s_i$  –  $i$ -ty stan niezawodnościowy;

$S^+$  – zbiór stanów zdatności.

Gotowość asymptotyczna jest równa

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{E(T_z)}{E(T_z) - E(T_n)}. \quad (13)$$

Oczekiwany stan zdatności systemu  $E(T_z)$

$$E(T_z) = \frac{\sum_{i: s_i \in S^+} P_i}{\sum_{i: s_i \in S^+} P_i \sum_{j: s_j \in S^+} q_{ij}}, \quad (14)$$

a oczekiwany czas niezdatności systemu

$$E(T_n) = \frac{1-A}{A} E(T_z). \quad (15)$$

Gotowość asymptotyczną można wyznaczyć w prostszy sposób, rozwiązując równanie macierzowe

$$\mathbf{P} \times \mathbf{Q} = \mathbf{0}, \quad (16)$$

przy warunku normującym

$$\sum_{i=0}^N P_{ii} = 1. \quad (17)$$

Gotowość asymptotyczna jest wówczas równa

$$A = \sum_{i:s_i \in S^+} P_{ii} . \quad (18)$$

Empiryczna gotowość asymptotyczna wyznaczana jest z zależności

$$\hat{A} = \frac{\bar{t}_z}{\bar{t}_z + \bar{t}_n} , \quad (19)$$

gdzie:

$\bar{t}_z$  – średni czas zdatności systemu;

$\bar{t}_n$  – średni czas niezdatności systemu.

W przypadku gdy system jest nienaprawialny, gotowość chwilowa jest równa prawdopodobieństwu działania

$$A(t) = R(t). \quad (20)$$

## WNIOSKI

W pracy przedstawiono założenia do oceny niezawodnościowej przetworników informacji nawigacyjnej. Dokonano wyboru charakterystyk wskaźników niezawodnościowych rozpatrywanego systemu. Przeanalizowano przepływ informacji w symulatorze nawigacyjnym, jak również zaproponowano stany pracy systemu. Dane te są niezbędne do interpretacji prawidłowej analizy informacji wyjściowych. Przyjęte założenia będą wykorzystane w dalszej części pracy, w której pokażemy przykład obliczeniowy, wykorzystując przyjęte w rzeczonym artykule kryteria. W oparciu o proponowane wskaźniki niezawodności przedstawione zostaną prawidłowości przyjętych założeń, co do czasu zdatności i niezdatności systemu, jak również rozkładu błędu pozycji.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Anderson B. D. O., Moore J. B., *Filtracja optymalna*, WNT, Warszawa 1984.
- [2] Brandt S., *Analiza danych z pakietem programów na CD*, PWN, Warszawa 1999.
- [3] Deutch R., *Teoria estymacji*, PWN, Warszawa 1969.
- [4] Dobosz M., *Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*, AOW EXIT, Warszawa 2001.
- [5] Felski A., Specht C., Nowakowski J., *Możliwość walidacji odbiorników GPS z użyciem symulatora*, materiały na VIII Sympozjum Wojskowej Techniki Morskiej OBR CTM, Gdynia 2001.
- [6] Felski A., Urbański J., *Satelitarne systemy nawigacji i bezpieczeństwa żeglugi*, AMW, Gdynia 1997.
- [7] Fidelis E., Firkowicz S., Grzesiak K., Kołodziejcki J., Wiśniewski K., *Matematyczne podstawy oceny niezawodności*, PWN, Warszawa 1966.
- [8] Filipowicz B., *Modele stochastyczne w badaniach operacyjnych*, WNT, Warszawa 1996.
- [9] Fitkowicz Sz., *Statystyczne badanie wyrobów*, WNT, Warszawa 1970.
- [10] Fokin J. G., *Niezawodność eksploatacyjna urządzeń technicznych*, MON, Warszawa 1973.
- [11] *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*, Assistant secretary of defense for command, control, communications, and intelligence, October 2001.
- [12] Gniedenko B. W., Bielajew J. K., Sołowiew A. D., *Metody matematyczne w teorii niezawodności*, WNT, Warszawa 1968.
- [13] Gosiewski Z., Ortyl A., *Algorytmy inercyjnego bezkardanowego systemu orientacji i położenia obiektu o ruchu przestrzennym*, BNiL, Warszawa 1999.
- [14] Górski S., Jackowski K., Urbański J., *Ocena dokładności prowadzenia nawigacji*, WSM, Gdynia 1990.
- [15] Grabski F., *Matematyka. Matematyczne podstawy badań operacyjnych*, WSW, Gdynia 1981.
- [16] Grabski F., *Semimarkowskie modele niezawodności i eksploatacji*, PAN, Instytut Badań Systemowych, Warszawa 2002.



- [17] Grabski F., *Wybrane zagadnienia z procesów stochastycznych*, WSW, Gdynia 1978.
- [18] Grabski F., Załęska-Fornal A., *Wielostanowe systemy niezawodnościowe z zależnymi elementami*, KONBiN 2002, ITWL, Warszawa 2001.
- [19] Internet: [www.litton.com](http://www.litton.com)
- [20] Internet: [www.velnaw.com](http://www.velnaw.com)
- [21] *Inżynieria niezawodności, poradnik*, cz. II, ATR, Bydgoszcz 1992.
- [22] ION STD 101 Recommended Test Procedures for GPS Receivers, Revision C, 1997.
- [23] Lesiński S., *Jakość i niezawodność*, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy 1996.
- [24] Luskiewicz A., Słaby T., *Statystyka z pakietem komputerowym STATISTICA™ PL. Teoria i zastosowania*, Wyd. C. H. BECK, Warszawa 2001.
- [25] Morrison F., *Sztuka modelowania układów dynamicznych*, WNT, Warszawa 1996.
- [26] Papoulis A., *Prawdopodobieństwo. Zmienne losowe i procesy stochastyczne*, WNT, Warszawa 1972.
- [27] Schwepper F. C., *Układy dynamiczne w warunkach losowych*, WNT, Warszawa 1978.
- [28] Waryńska-Fiok K., Jaźwiński J., *Niezawodność systemów technicznych*, PWN, Warszawa 1990.
- [29] Weintrit A., *Ocena dokładności pozycji w nawigacji morskiej*, WSM, Gdynia 2000.
- [30] Zawadzki J., *Niezawodność i eksploatacja*, WAT, Warszawa 1987.

## ABSTRACT

The paper presents a concept of navigation system reliability evaluation related to navigation data processing. It comprises all the necessary theoretical data related to the description of an information system reliability such as a system that integrates sensors in INS and GPS. Further in the paper shown is a reliability model of the INS/GPS system based on estimated errors for a floating vessel.

Data from WelNavigate GS720 simulator were used to carry out the evaluation of the model. Statistic analysis was conducted of the process considered necessary to determine reliability indicators for the system investigated.

Recenzent prof. dr Józef Urbański