

**Andrzej Łebkowski**

Akademia Morska w Gdyni

## **WERYFIKACJA SYSTEMÓW STEROWANIA STATKIEM Z WYKORZYSTANIEM MODELI FIZYCZNYCH**

*W artykule przedstawiono jeden ze sposobów weryfikacji systemów sterowania statkiem lub systemów wspomagających podjęcie decyzji przez nawigatora. Proces weryfikacji opiera się na wykorzystaniu modelu fizycznego zbudowanego w dużej skali (1:100), który porusza się w rzeczywistym środowisku nawigacyjnym. Dla poruszającego się modelu sprzężonego sygnałami radiowymi ze stanowiskiem znajdującym się na brzegu sytuacje nawigacyjne generowane są wirtualnie. Opisany proces weryfikacji cechuje niski nakład kosztów inwestycyjnych w stosunku do uzyskanych wyników badań.*

### **1. WSTĘP**

Proces weryfikacji opracowanego systemu sterowania lub wspomaganie decyzji jest nieodzownym elementem pracy inżynierskiej. Najczęściej stosowaną metodą weryfikacyjną są badania modelowe z wykorzystaniem matematycznych modeli fizycznych tworzonych na potrzeby specjalistycznego oprogramowania. Inną metodą jest weryfikacja systemu poprzez badania prowadzone z użyciem modeli fizycznych lub jednostek pełnowymiarowych. Ze względu na ograniczenie kosztów najczęściej stosowaną metodą weryfikacji są badania z wykorzystaniem modeli matematycznych za pomocą symulacji komputerowych. Można wyróżnić kilka sposobów prowadzenia tego typu badań, w których udział biorą: symulatory nawigacyjne opracowane przez znanych producentów sprzętu elektronawigacyjnego, środowisko Matlab, a także wiele programów nowatorskich opracowanych z użyciem języków programowania, takich jak C, C++, C#, Java, Visual Basic, Perl, PHP i wielu innych.

Przy takim jednak podejściu do prowadzenia badań nie wszystkie negatywne aspekty systemu wspomaganie decyzji lub systemu antykolizyjnego mogą być wyeliminowane. Głównym elementem powodującym trudności w procesie weryfikacji jest uwzględnienie dynamiki obiektu – w tym wypadku statku, na którym zainstalowano system antykolizyjny. Wynika to z wielu uproszczeń zakładanych przez badaczy podczas tworzenia modelu matematycznego danego obiektu oraz braku idealnych modeli matematycznych opisujących zakłócenia hydrometeorologiczne w postaci prądów morskich, falowania, wiatru, pływów itp.

Innym czynnikiem wpływającym negatywnie na proces weryfikacji danego systemu za pomocą symulacji komputerowych z zastosowaniem modeli matematycznych jest konieczność uwzględnienia opóźnień i zakłóceń sygnałów, jakie występują podczas pracy z rzeczywistymi urządzeniami elektronawigacyjnymi. Dlatego proces weryfikacji konkretnej metody, w którym stosuje się modele fizyczne, oferuje większą liczbę parametrów dla rozpatrywanej sytuacji nawigacyjnej z uwzględnieniem różnych aspektów badawczych.

Wadą procesu weryfikacji danego systemu antykolizyjnego lub metody sterowania z użyciem modeli fizycznych są wyższe koszty prowadzenia badań w stosunku do metody, w której stosuje się modele matematyczne na drodze symulacji komputerowych. Mając jednak na uwadze, że od poprawnego działania systemu w przyszłości może zależeć życie i zdrowie ludzkie, do weryfikacji systemów antykolizyjnych powinno się używać modeli fizycznych, chociażby w ich uproszczonej wersji i dużej skali odwzorowania. Skuteczność procesu weryfikacji danego systemu sterowania ma bezpośredni wpływ na poziom bezpieczeństwa na morzu. Im więcej niedociągnięć i usterek danego systemu wspomagania decyzji wyeliminuje się w wyniku prowadzonych badań symulacyjnych, tym istnieją większe szanse na prawidłowe i niezawodne jego działanie w przyszłości. Dlatego sposób weryfikacji danego systemu antykolizyjnego odgrywa główną rolę w stosunku do jego niezawodności.

## 2. PRAWA PODOBIENSTWA MECHANICZNEGO A MODELOWANIE ŚRODOWISKA NAWIGACYJNEGO [1, 2]

Opracowując proces weryfikacji danej metody badawczej z wykorzystaniem modeli fizycznych, należy mieć na uwadze, w jakiej skali wykonany jest model, który ma być używany do prowadzenia badań. Badania modelowe powinny odzwierciedlać zjawisko rzeczywiste w sposób jak najbardziej zbliżony do rzeczywistości. Innymi słowy, zjawisko modelujące powinno być podobne do zjawiska modelowanego zachodzącego w rzeczywistości. Dlatego budując model fizyczny wzorowany na obiekcie rzeczywistym, należy uwzględnić konieczność zachowania podobieństwa geometrycznego, kinematycznego i dynamicznego pomiędzy zjawiskiem modelowanym a modelującym. Zachowanie określonego podobieństwa oznacza, że dwa układy: modelowy i modelowany mają taką samą wartość liczby bezwymiarowej.

Zachowanie podobieństwa geometrycznego oznacza, że stosunek pomiędzy dowolnymi liniowymi wymiarami w zjawisku modelowanym  $L$  i modelującym  $L_M$  jest stały:

$$\frac{L}{L_M} = \lambda = \text{const}, \quad (1)$$

przy czym:  $\lambda$  – współczynnik skali liniowej.

W konsekwencji tego stwierdzenia należy rozumieć, że miary wartości kątów występujących w obu zjawiskach będą sobie równe, natomiast stosunki odpowiadających pól powierzchni  $A$ ,  $A_M$  oraz proporcje pojemności  $\nabla$ ,  $\nabla_M$  określone są zależnościami:

$$\frac{A}{A_M} = \lambda^2, \quad (2)$$

$$\frac{\nabla}{\nabla_M} = \lambda^3. \quad (3)$$

Spełnienie warunków podobieństwa kinematycznego związane jest z zachowaniem współczynnika skali czasu, prędkości oraz przyspieszeń pomiędzy zjawiskiem modelowanym  $t$  i zjawiskiem modelującym  $t_M$ . W wypadku współczynnika skali czasu określony on będzie zależnością:

$$\frac{t}{t_M} = \tau = \text{const.} \quad (4)$$

Korzystając z zależności (1) i (4), można określić współczynnik skali związany z prędkością, opisany wyrażeniem:

$$\frac{V}{V_M} = \lambda \tau^{-1} \quad (5)$$

oraz współczynnik związany ze skalą przyspieszeń:

$$\frac{a}{a_M} = \lambda \tau^{-2}. \quad (6)$$

Mając na uwadze zachowanie podobieństwa dynamicznego, należy zrównoważyć proporcje pomiędzy siłami występującymi w rzeczywistości w zjawisku modelowanym  $F$  a siłami występującymi w zjawisku modelującym  $F_M$ :

$$\frac{F}{F_M} = \frac{m}{m_M} \frac{a}{a_M} = \kappa. \quad (7)$$

Zastępując w zależności (7) stosunek mas stosunkiem objętości oraz współczynników gęstości, odpowiednio dla zjawiska modelowanego i modelującego, oraz uwzględniając zależność (6), otrzymuje się ogólną postać równania podobieństwa dynamicznego, znaną pod nazwą warunku Bertranda, określonego zależnością:

$$\kappa = \frac{\rho_S}{\rho_M} \lambda^4 \tau^{-2}. \quad (8)$$

Warunek Bertranda, który odnosi się do sił bezwładności, jest warunkiem koniecznym, ale niewystarczającym do istnienia podobieństwa dynamicznego. Z tego względu należy ustalić, jakie warunki powinny być dodatkowo spełnione, aby zachować określone zależności dynamiczne i kinematyczne pomiędzy zjawiskiem modelowanym a modelującym. Uwzględniając wykonanie odpowiednich przekształceń matematycznych, muszą być dodatkowo spełnione zależności związane z: podobieństwem dynamicznym procesów nieustalonych (liczba Strouhala), podobieństwem dynamicznych przepływów odbywających się pod wpływem pola grawitacyjnego, a w szczególności podobieństwem układów falowych generowanych przez statek rzeczywisty i model fizyczny (liczba Froude'a); podobieństwem dynamicznym przepływu (liczba Eulera) oraz podobieństwem dynamicznym sił lepkości (liczba Reynoldsa).

Biorąc pod uwagę fakt, że przyspieszenie ziemskie w zjawisku modelowanym i zjawisku modelującym jest takie samo, współczynnik skali czasu określa się następującym wyrażeniem:

$$\tau = \sqrt{\lambda} . \quad (9)$$

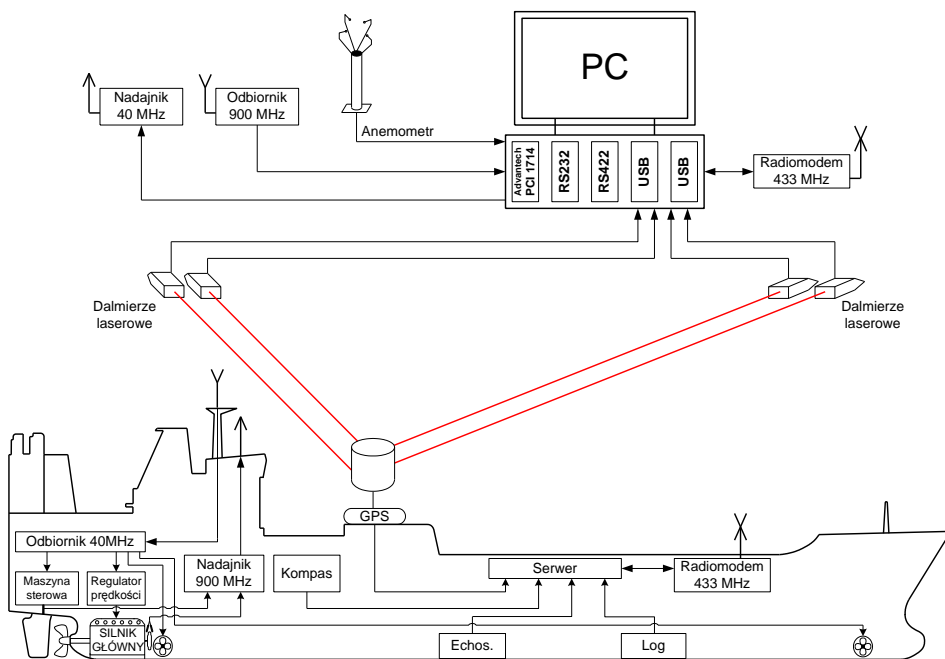
Ze względu na to, że spełnienie wszystkich warunków podobieństwa jest niemożliwe, badania modelowe obarczone są zawsze pewnym błędem zwiększającym się wraz ze skalą zjawiska modelowanego. Zależność ta odnosi się bezpośrednio do współczynnika skali liniowej  $\lambda$  i nosi nazwę efektu skali. O ile dla badaczy nie stanowi problemu zachowanie podobieństwa geometrycznego, o tyle zachodzą duże problemy przy zachowaniu podobieństwa dynamicznego związanego ze spełnieniem warunku równości liczby Reynoldsa w zjawisku modelowanym i modelującym. Wynika to z tego, że badania prowadzone są w płynie o tych samych właściwościach fizycznych. Dlatego podczas badań modeli statków zachowuje się najczęściej podobieństwo geometryczne, równość współczynnika posuwu i liczby kawitacyjnej (związanych ze śrubą napędową), z pominięciem warunku równości liczby Froude'a.

### 3. STRUKTURA UKŁADU POMIAROWEGO DO BADAŃ Z MODELEM FIZYCZNYM [2]

Zaproponowane rozwiązanie dotyczące procesu weryfikacji systemów sterowania statkiem opiera się na współpracy modelu fizycznego statku typu ro-ro o symbolu B-481 wykonanego w skali 1:100 z jednostką pomiarowo sterującą umieszczoną na brzegu akwenu. Model fizyczny opracowano z zachowaniem praw podobieństwa mechanicznego przedstawionych w punkcie 2. W trakcie realizacji badań fizyczny model statku B-481 porusza się w środowisku rzeczywistym, natomiast położenie i parametry ograniczeń nawigacyjnych o charakterze statycznym i dynamicznym modelowane były wirtualnie. Dla układu sterowania

statkiem, który poddany jest takiej metodzie weryfikacji, oznacza to, że za sprawą modelowania elektronicznego obiektów (innych obiektów i poruszających się statków) są one widziane w identyczny sposób, jakby miały poruszać się w rzeczywistości na danym akwenie wokół statku własnego – czyli tego, na którym zamontowany jest weryfikowany system. Strukturę układu pomiarowego wykorzystywanego do procesu weryfikacji danego systemu sterownia statkiem przedstawiono na rysunku 1.

Opracowana struktura układu pomiarowego umożliwia prowadzenie badań w środowisku rzeczywistym do 200 metrów od stacji brzegowej. Gdy uwzględnia się skalę prowadzonych badań, wynika z tego, że wirtualne sytuacje nawigacyjne mogą być modelowane w rejonie o promieniu ok. 20 Mm od stacji brzegowej. W praktyce oznacza to, że podane wymiary obszaru prowadzenia badań w zupełności wystarczą do modelowania różnorodnych sytuacji nawigacyjnych z wykorzystaniem ograniczeń nawigacyjnych o charakterze statycznym i dynamicznym.



**Rys. 1.** Struktura układu pomiarowego wykorzystywanego do badań z modelem fizycznym B-481 wykonanym w skali 1:100

## 4. URZĄDZENIA SYSTEMU POMIAROWEGO UŻYTE DO BADAŃ Z MODELEM FIZYCZNYM [2]

Przedstawiony układ do weryfikacji systemów sterowania statkiem obejmuje urządzenia związane z określeniem warunków hydrometeorologicznych panujących na danym akwenie, jak również urządzenia i elementy wykonawcze związane ze sterowaniem rzeczywistym modelem, takie jak:

- bezprzewodowy (zakres 40 MHz) układ sterowania fizycznym modelem statku B-481 z wykorzystaniem karty przetwornikowej Advantech typu PCI-1751 oraz aparatury SANWA;
- system SILVA NX2 FDX wraz z radiomodemami bezprzewodowymi typu R4P (zakres 433 MHz) realizujący pomiar prędkości modelu, jego kursu, pozycji oraz głębokości pod dnem;
- bezprzewodowe (zakres 900 MHz) urządzenie pomiarowe SEAGULL służące do pomiaru takich parametrów, jak: prędkość obrotowa silnika głównego, wychylenie steru, napięcie zasilania aparatury sterującej, temperatura otoczenia silnika napędowego;
- pomocniczy system dalmierzy laserowych przeznaczony do pomiaru pozycji modelu w środowisku (szczególnie przydatny podczas badań na pływalni krytej, na której sygnał z systemu pozycjonowania GPS jest zbyt słaby);
- system wodnego balastowania modelu oraz zasilania poszczególnych urządzeń pomiarowych.

### 4.1. Komputerowy układ sterujący

Rolę układu pomiarowego, i jednocześnie sterującego, spełnia oprogramowanie zainstalowane na komputerze klasy PC. Poprzez wejścia USB doprowadzane są sygnały pomiarowe oraz sterujące dla wszystkich urządzeń. Sygnały przekazywane są w standardzie NMEA 0183. Dodatkowo do przesyłania danych z i do modelu wykorzystuje się transmisję radiomodemową w zakresie różnych częstotliwości: 40 MHz, 433 MHz, 900 MHz. Transmisja radiowa pozwala na osiągnięcie komunikacji z serwerem NX2 FDX firmy SILVA, karty Advantech PCI-1751 generującej sygnały dla nadajnika SANWA RD-8000 oraz układem pomiarowym SEAGULL. Inne sygnały informacyjne, jak np. sygnał z anemometru, doprowadzane są poprzez łącze RS422. Komputerowy układ sterujący umożliwia podłączenie sygnałów z innych urządzeń służących na przykład do określania warunków panujących na danym akwenie, takich jak falomierz, wiatromierz, termometr itp.

## 4.2. Układ pomiarowy SILVA NX2 FDX [5]

Do pomiaru pozycji, prędkości, kursu oraz głębokości pod dnem modelu fizycznego zastosowano układ SILVA NX2 FDX wraz z modemami bezprzewodowymi (zakres 433 MHz). Możliwości pomiarowe układu są następujące:

- serwer Silva NX2 FDX (2x NMEA 0183 v.2.0),
- pomiar prędkości – Silva Log Transducer TH-52 (dokładność  $\pm 1\%$ ),
- pomiar kursu – Silva Compass Transducer 45° (dokładność  $\pm 1,5^\circ$ , czułość  $\pm 0,1^\circ$ ),
- pomiar pozycji – GPS GARMIN 15H z aktywną anteną (dokładność  $< 3$  m 95%); ze względu na to, że odbiornik ma wbudowany system różnicowy WAAS/EGNOS, istnieje możliwość skorzystania ze stacji referencyjnej, np. Rozewie (pozycja: 54°49'50"N, 18°20'07"E, zasięg 150 km, kanał 35, częstotliwość 301 kHz); ustalenie pozycji z wykorzystaniem stacji referencyjnej zwiększa dokładność ustalania pozycji do kilkunastu centymetrów w pewnym czasie w zależności od konstelacji satelitów,
- pomiar głębokości – Silva Depth Transducer TH52 (dokładność  $\pm 0,3\%$ ).

## 4.3. Układ pomiarowy SEAGULL [3]

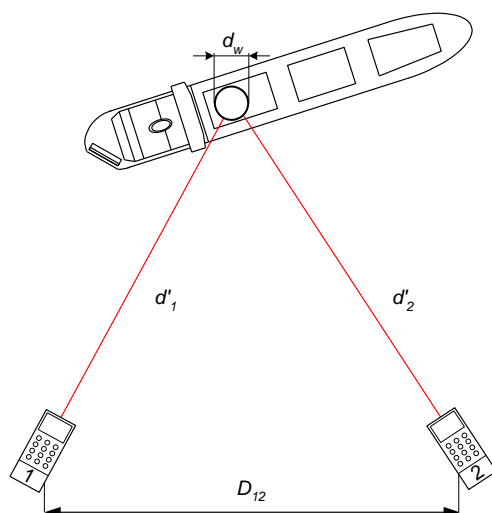
Jest to system zakupiony w firmie SEAGULL, który umożliwia rejestrację oraz odczyt w czasie rzeczywistym kilkunastu parametrów związanych z techniczną obsługą modeli fizycznych. Podczas badań z modelem fizycznym B-481 monitorowano takie parametry, jak:

- prędkość obrotowa silnika głównego (dokładność  $\pm 1\%$ ),
- wychylenie steru (dokładność  $0,01^\circ$ ),
- napięcie zasilania aparatury sterującej (dokładność  $0,1$  V),
- temperatura otoczenia silnika napędowego (dokładność  $0,1^\circ$ ).

## 4.4. Układ dalmierzy laserowych

Do określenia pozycji modelu fizycznego w środowisku zastosowano zamiennie pomiar z GPS-u oraz opracowany przez autora system dalmierzy laserowych z wykorzystaniem urządzeń DISTO™ pro<sup>4</sup>a. Dalmierze laserowe DISTO™ pro<sup>4</sup>a są produktem szwajcarskiej firmy Leica®. Zasięg ich pracy to 150 m, a dokładność pomiaru przy takiej odległości to  $\pm 1,5$  mm. Dalmierze wyposażone są w interfejs RS232 – umożliwia to bezpośredni przesył informacji o zmierzonej odległości do komputera (rys. 2).

Pomiar pozycji wyznaczany jest na podstawie odległości od modelu fizycznego poruszającego w środowisku naturalnym.



**Rys. 2.** Idea pomiaru pozycji modelu fizycznego z wykorzystaniem dalmierzy laserowych;  $d_w$  – średnica walca zamontowanego na modelu fizycznym, na który skierowane są promienie z dalmierzy laserowych,  $d'_1, d'_2$  – wartości odczytane odpowiednio z dalmierza nr 1 i dalmierza nr 2,  $D_{12}$  – odległość pomiędzy środkami obrotów dalmierzy,

$$d_1 \text{ – odległość od osi obrotu modelu fizycznego } d_1 = d'_1 + \frac{d_w}{2},$$

$$d_2 \text{ – odległość od osi obrotu modelu fizycznego } d_2 = d'_2 + \frac{d_w}{2}$$

Dokonując pomiaru odległości od modelu fizycznego ( $d'_1, d'_2$ ) oraz znając odległość ( $D_{12}$ ) pomiędzy parą dalmierzy wykonującą pomiar, można ustalić współrzędne położenia ( $x, y$ ) modelu fizycznego na podstawie następującej zależności:

$$\begin{cases} x = \frac{d_1^2 - d_2^2 + D_{12}^2}{2 \cdot D_{12}} \\ y = \sqrt{d_1^2 - x^2} \end{cases} \quad (10)$$

#### 4.5. Pomiar zakłóceń hydrometeorologicznych – pomiar wiatru [4]

Do określenia siły i kierunku wiatru działających na model fizyczny wykorzystano anemometr firmy GILL – instrument model WINDOBSERVER II, charakteryzujący się następującymi parametrami:

- zakres pomiarowy dla siły wiatru: 0÷65 m/s,
- dokładność pomiarowa dla siły wiatru: 2%,

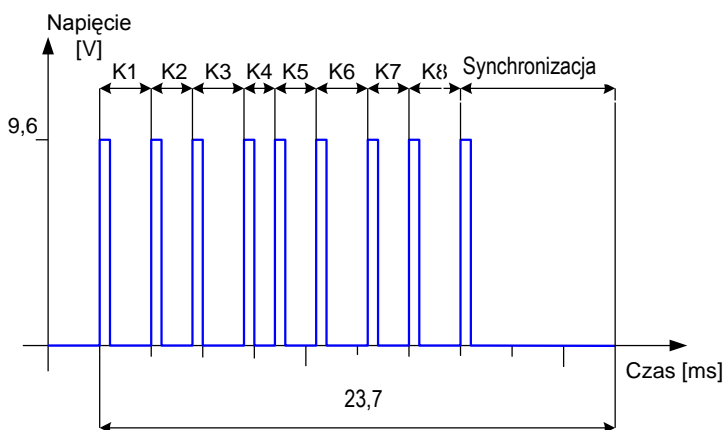


- zakres pomiarowy dla kierunku wiatru:  $0 \div 359^\circ$ ,
- dokładność pomiarowa dla kierunku wiatru: 2%.

#### 4.6. Aparatura sterująca SANWA RD-8000

Do sterowania modelem fizycznym (sterowanie silnikiem głównym, płetwą sterową modelu, dziobowym i rufowym sterem strumieniowym oraz opcjonalnie skokiem śruby nastawnej i balastowaniem) wykorzystuje się aparaturę radiową SANWA RD-8000, która oferuje możliwość zmiany sygnałów sterujących dla ośmiu kanałów. Dodatkowe wejście na płycie głównej tej aparatury umożliwia podłączenie zewnętrznych sygnałów sterujących generowanych w tym wypadku przez kartę przetwornikową Advantech PCI-1751 oraz specjalnie opracowany mikrokontroler dla zwiększenia dokładności sterowania. Kodowanie przesyłanych informacji

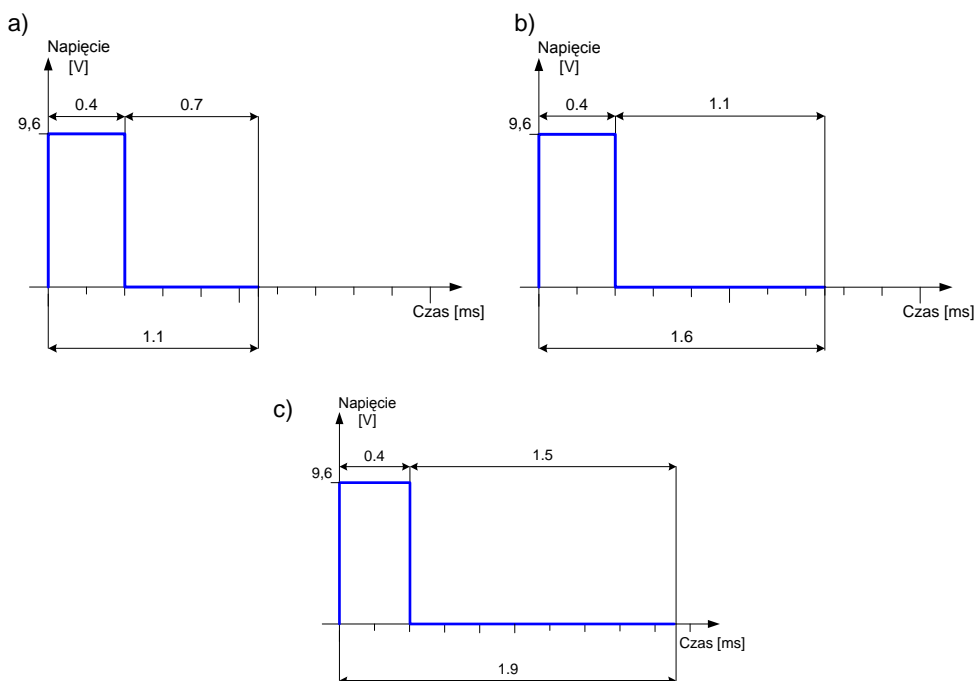
w aparaturze SANWA RD-8000 odbywa się z użyciem modulacji PWM/PPM – modulacja szerokości/położenia impulsu, przy której dane przesyłane są w formie zmiennej długości impulsów. Pojedynczy ciąg impulsów składa się z kilku impulsów kanałowych oraz impulsu synchronizacji (rys. 3).



**Rys. 3.** Przebieg ciągu impulsów generowanych przez kartę przetwornikową

Znajomość tych informacji pozwala na bardzo dokładne sterowanie modelem. Impuls synchronizacji umieszczony jest na końcu paczki impulsów i służy do rozpoznania przez dekoder zamontowany w odbiorniku początku następnej paczki impulsów. Czas trwania impulsu synchronizacji wynosi w zależności od wysterowania poszczególnych kanałów od 8,5 do 14,9 ms (w tym czas trwania stanu wysokiego 0,4 ms). Czas trwania stanu niskiego dla danego kanału w paczce określa wartość sygnału sterującego. Czas trwania stanu wysokiego dla wszystkich kanałów jest taki sam i wynosi 0,4 ms. Na rysunku 4 przedstawiono kształt sygnału

sterującego dla określonego zakresu sterowania, dla którego rozdzielczość wynosi 8000 jednostek. Dla sterowania płetwą sterową statku w zakresie  $\pm 35^\circ$ , wychylenie steru na  $-35^\circ$  zostanie uzyskane przy wartości sygnału sterującego równej 0, natomiast wychylenie steru na  $0^\circ$  przy 4000, a wychylenie steru na  $+35^\circ$  przy 8000.



**Rys. 4.** Przebieg sygnału sterującego dla pojedynczego kanału: a) kształt sygnału sterującego dla wartości maksymalnej w określonym kierunku, b) położenie zerowe, c) kształt sygnału sterującego dla wartości maksymalnej w przeciwnym kierunku niż na rysunku a

## 5. WNIOSKI

Zaproponowany proces weryfikacji systemów sterowania statkiem jest pośrednią metodą badawczą pomiędzy tanimi metodami prowadzenia badań z wykorzystaniem symulacji komputerowych a kosztownymi badaniami z zastosowaniem modeli rzeczywistych wykonanych w małej skali (poniżej 1:40). Stosowanie liczb podobieństwa w trakcie budowy modelu w skali umożliwia uproszczenie i obniżenie kosztów badań.

Pomimo zastosowania modelu wykonanego w dużej skali (powyżej 1:40) potencjalnie uzyskane wyniki badań mogą w znacznym stopniu być bliższe zjawis-

kom zachodzącym w rzeczywistości niż wyniki, które można uzyskać poprzez symulacje komputerowe.

Dzięki elektronicznemu modelowaniu środowiska nawigacyjnego, w którym porusza się rzeczywisty model statku wykonany w skali 1:100, możliwe jest bardzo dokładne zamodelowanie wielu rozmaitych sytuacji nawigacyjnych zawierających różnorodną kombinację ograniczeń nawigacyjnych o charakterze statycznym (łądy, płycizny, kanały, tory wodne, konstrukcje techniczne itp.) oraz dynamicznym (góry lodowe, inne poruszające się statki i obiekty itp.).

Zastosowanie przedstawionego procesu weryfikacji systemów wspomaganie decyzji oraz kierowania ruchem statku może w znacznym stopniu przyczynić się do wzrostu poziomu bezpieczeństwa na morzu oraz zmniejszyć koszty eksploatacji statku.

## LITERATURA

1. Jarosz A., *Okrętowe baseny modelowe*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1977.
2. Łebkowski A., *Hybrydowy system sterowania obiektem ruchomym w środowisku dynamicznym*, rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska 2006.
3. <http://www.eagletreesystems.com>
4. <http://www.gill.co.uk>
5. <http://www.silva.se>

## VERIFICATION OF SHIP STEERING SYSTEMS WITH USE OF PHYSICAL MODELS

### *Summary*

*The paper presents one of the methods of verification of ship steering systems or navigation decision aids for the navigator. The process of verification is based on use of small scale (1:100) physical model, which moves in real navigational environment. Navigational situations are generated virtually for the moving model, which is coupled by radio with the shore station. The described process of verification is characterized by low investment costs in relation to results of research.*