

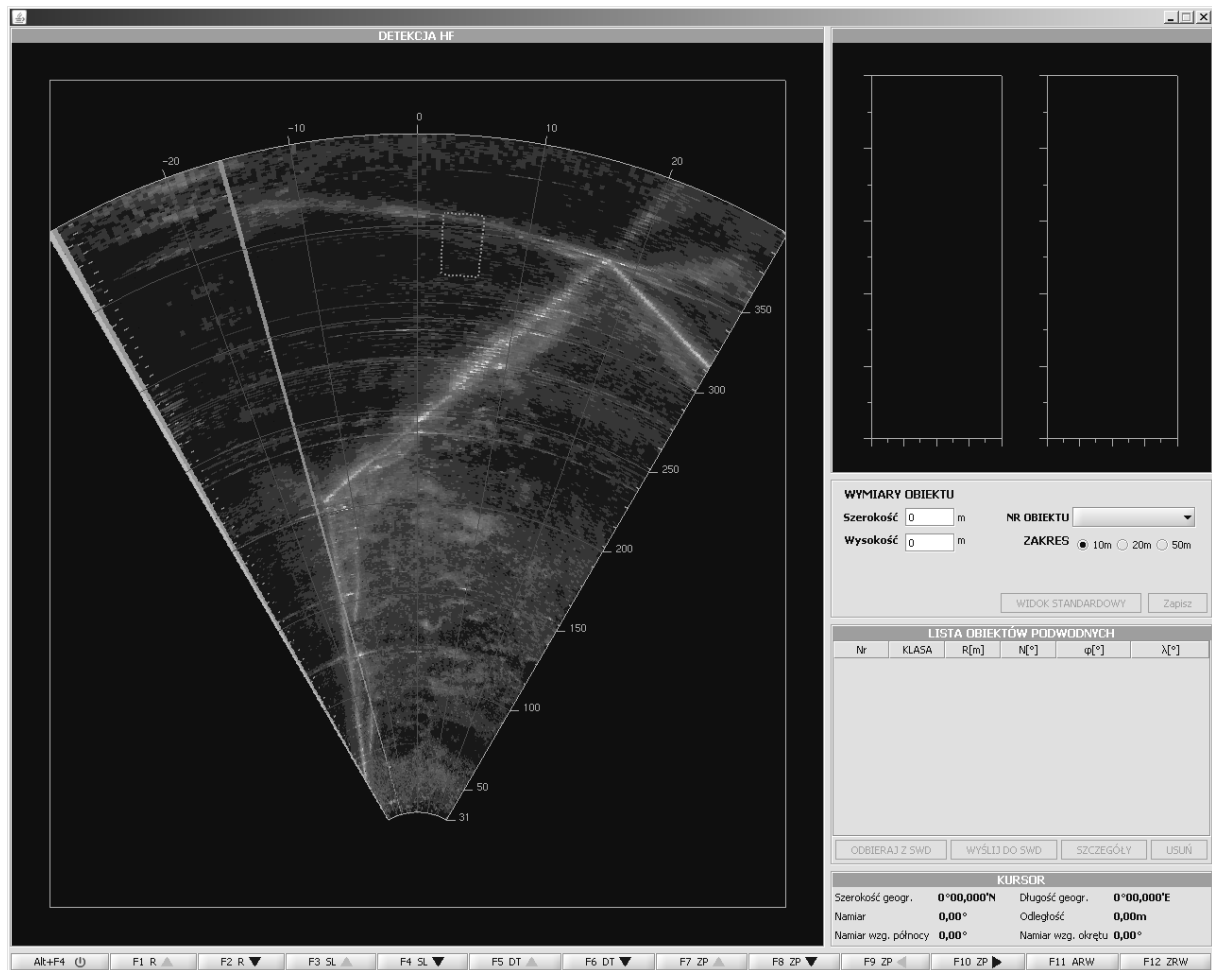
Tadeusz **JANOWSKI**  
Halina **NALEZIŃSKA**

## **TWORZENIE WARSTWY APLIKACJI SIECI CAN W OPARCIU O DIAGRAM STANÓW NA PRZYKŁADZIE STEROWANIA ZESPOŁEM MECHANICZNYM SONARU**

**Streszczenie:** Diagramy stanów dobrze nadają się do opisu sterowania złożonych urządzeń. W przypadku wykorzystania do tego celu sieci CANopen przejścia w diagramie stanów są efektem ramek odebranych (TxPDO) lub sterujących (RxPDO). Protokół CANopen jest zorientowany na anonimowe komunikaty, co oznacza, że ramki sterujące nie mają potwierdzenia. Wprowadzono mechanizm oczekiwania na skutek ramki sterującej poprzez obserwację ramek z danymi pomiarowymi. W przypadku braku potwierdzenia ramki sterujące są powtarzane. Mechanizm ten poprawił niezawodność zaprojektowanego układu sterowania zespołem mechanicznym sonaru.

### **1. WSTĘP**

W Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Centrum Techniki Morskiej w kooperacji z wieloma zakładami krajowymi i zagranicznymi zbudowano nowoczesny sonar o bardzo wyśrubowanych parametrach. Wieleelementowy przetwornik hydroakustyczny tego sonaru umocowany jest w sposób umożliwiający wysłanie fali hydroakustycznej w dowolnym kierunku z dużą precyzją. Położenie przetwornika ( kąty obrotu, pochylania, przechyłu) muszą być stabilizowane w przestrzeni, niezależnie od manewrów jednostki oraz stanu morza. Zespół mechaniczny realizujący to zadanie został całkowicie wykonany w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Urządzeń Mechanicznych OBRUM Gliwice. Wszystkie elementy wykonawcze oparto na układach hydraulicznych sterowanych za pośrednictwem sieci CAN. Lokalizację położenia przetwornika względem kadłuba okrętu umożliwiają dublowane enkodery kątowe i liniowe wyposażone również w interfejs CAN. Zaprojektowany układ sterowania współpracuje z siecią okrętową skąd pobierane są informacje o położeniu okrętu i nastawy operatora. Dla poszukiwania lub śledzenia obiektów mino podobnych można stosować różne rodzaje stabilizacji na przykład na określony azymut lub na wybrany obiekt. W rezultacie stabilizacji przetwornika względem morza w czasie całego cyklu sondowania (wysłania i odbioru impulsu sonaru) otrzymuje się obraz dobrej jakości o dużej rozdzielczości kątowej i głębokiej z dowolnie wybranego kierunku w przestrzeni. Dzięki temu zaznaczone przez operatora obiekty mają dokładną lokalizację a ich parametry są przekazywane do systemu dowodzenia w celu rejestracji. Rysunek 1 pokazuje przykład obrazu sonaru dla okrętu zacumowanego w porcie. Na zobrazowaniu panoramicznym widoczny jest falochron i sylwetki okrętów. Barwy „ciepłe” odpowiadają obiektom o dużej sile celu.

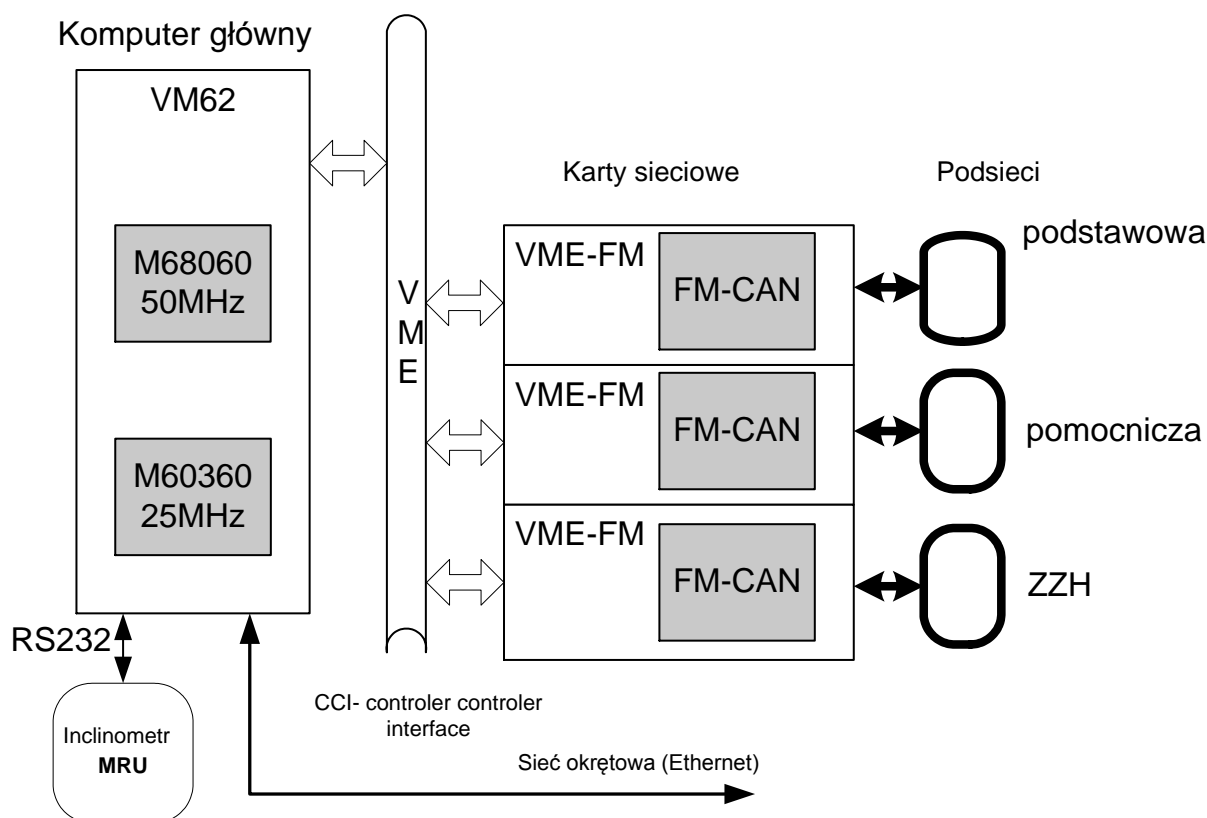


Rys.1. Obraz z przetwornika sonaru na wybranym kierunku

## 2. DIAGRAM STANÓW ZESPOŁU STEROWANIA

Dotychczasowe doświadczenia [1][2][3] w konstrukcji zespołu sterowania i stabilizacji pokazały zalety algorytmizacji w oparciu o diagram stanów. Zastosowano sterownik firmy Contron wyposażony w interfejsy sieci CAN. Sterownik ten działa w oparciu o system operacyjny czasu rzeczywistego os9 [4]. W zaprojektowanym zespole sterowania i stabilizacji procesor centralny układu komunikuje się z siecią CAN za pośrednictwem specjalizowanych kart pracujących jako master (rys. 2). Komunikacja ta odbywa się za pomocą tak zwanego CCI (Controler – Controler Interface) obejmującą bufory cykliczne zrealizowane na Dual Ported RAM oraz systemie przerwań. Większość usług sieciowych realizuje karta kontrolera. Do procesora centralnego docierają komunikaty zawierające dane oraz komunikaty o błędach w funkcjonowaniu sieci (tak zwane zdarzenia). Wybrano okres próbkowania 10 ms zapewniający wystarczającą jakość stabilizacji. Każdy ze stanów posiada unikalny numer. Diagram stanów zbudowano w oparciu o tak zwany alarm cykliczny (os9 F\$Alarm). Każde wywołanie alarmu cyklicznego uruchamia uniwersalną procedurę zawierającą:

- odczyt najbardziej aktualnych danych pomiarowych i uformowanie ich w wektor pomiarów,
- odczyt aktualnych nastaw operatorskich i uformowanie ich w wektor nastaw,
- identyfikację stanu na podstawie jego numeru i wywołanie odpowiedniego wejścia obsługi stanu.



**Rys.2. Konfiguracja sprzętowa zespołu sterowania i stabilizacji przetwornika sonaru**

Stany podzielono na trzy grupy:

- stany stabilne,
- stany alarmowe,
- stany niestabilne.

Stany alarmowe wymagają interwencji operatora.

Stany stabilne mogą zmienić swój numer albo pod wpływem dyrektywy operatora, albo pod wpływem nieoczekiwanych danych prowadzących do stanów alarmowych.

Stany niestabilne oczekują na zmianę wielkości pomiarowych. Zmiana ta jest wywołana ramką sterującą. Znajomość modelu zespołu sterowania i stabilizacji pozwala na ocenę czasu, dla którego zmiana ta powinna się pojawić. Kolejne alarmy cykliczne odliczają ten czas z krokiem 10 ms. Przekroczenie tego czasu prowadzi do stanu alarmowego. Opisana warstwa aplikacji jest niezależna od protokołu sieci CAN. Aby napisać oprogramowanie bazujące na diagramie stanów należy stworzyć warstwę pośrednią dostarczającą niezbędnych danych i procedur z protokołu CANOpen.

Warstwa ta obejmuje:

- cykliczne wytworzenie najbardziej aktualnego wektora pomiarów,
- procedurę wysłania danej sterującej,
- wprowadzenie stanów związanych ze sprawnością i gotowością węzłów sieci CAN,
- modyfikację stanów niestabilnych w mechanizm powtórzeń ramek sterujących.

Opracowanie tej warstwy pozwala na napisanie „uniwersalnej” aplikacji sterującej.

### 3.1. Wytworzenie aktualnego wektora pomiarów

Automat sterujący działa cyklicznie z okresem 10 ms. Tak wybrany okres próbkowania zapewnia wymaganą dokładność sterowania. Dane pomiarowe dostarczane są do buforów cyklicznych. Nadejście ramki PDO z danymi pomiarowymi wywołuje sprzętowe przerwanie. W obsłudze przerwania dla każdej danej pomiarowej (ramka PDO może zawierać kilka danych pomiarowych) przeznaczono dwuelementowy bufor FIFO. W przypadku, gdy dane pomiarowe dostarczane są częściej niż częstotliwość próbkowania bufor jest nadpisywany. W cyklicznym przerwaniu zegarowym, (co 10 ms) o priorytecie wyższym niż odbiór ramki PDO następuje odczyt wszystkich buforów FIFO i uformowanie z nich najbardziej aktualnego wektora pomiarów. Wyjątkiem jest tutaj przerwanie procedury odbioru PDO przed uformowaniem semaforów kolejki FIFO. W takim przypadku można powiedzieć, że dana pomiarowa przyszła po przerwaniu zegarowym i być może będzie daną aktualną dla kolejnego przerwania zegarowego.

### 3.2. Wysłanie danej sterującej

Wysłanie danej sterującej umożliwia CCI (Controler-Controller Interface). Polega ono na wpisaniu danych do bufora cyklicznego umieszczonego w DPRAM i zwiększenie wskaźnika zapisu. Wysłaniem fizycznym ramki zajmuje się karta FM\_CAN. Nastawa ta nie jest potwierdzana, przez co odpada konieczność wprowadzania stanów związanych z oczekiwaniem na potwierdzenie nastawy.

### 3.3. Diagram stanów dla sieci CAN

Dla napisania uniwersalnej aplikacji sterującej do stanów związanych ze sterowaniem zespołem stabilizacji wprowadzono dodatkowe stany:

- stan niestabilny „inicjacja sieci”,
- stan alarmowy „awaria sieci”,
- stan alarmowy „watch dog”.

Stan „Inicjacja sieci” testuje obecność węzłów sieci za pomocą ramek pytających o profil. Po stwierdzeniu jego obecności węzeł ustawiany jest w stan operacyjny. W przypadku braku, po określonym czasie, poprawnej odpowiedzi któregośkolwiek węzła automat stanów ustawia stan „awaria sieci”. Dodatkową próbą odzyskania sprawności jest wyłączenie zasilania i ponowne jego włączenie. Sytuacja ta należy do obsługi stanu „awaria sieci”, która po czasie 1 minuty instaluje na 15 sekund stan „watch dog”. Po zakończeniu stan „watch dog” przywraca zasilanie na sieć instalując ponownie stan „inicjacja sieci”. Po poprawnej inicjalizacji sieci uruchomiane są stany związane ze sterowaniem.

Zanik jakiegokolwiek węzła sieci prowadzi do ponownej instalacji stanu „inicjacja sieci”.

### 3.4. Modyfikacje obsługi stanów niestabilnych w mechanizm powtórzeń

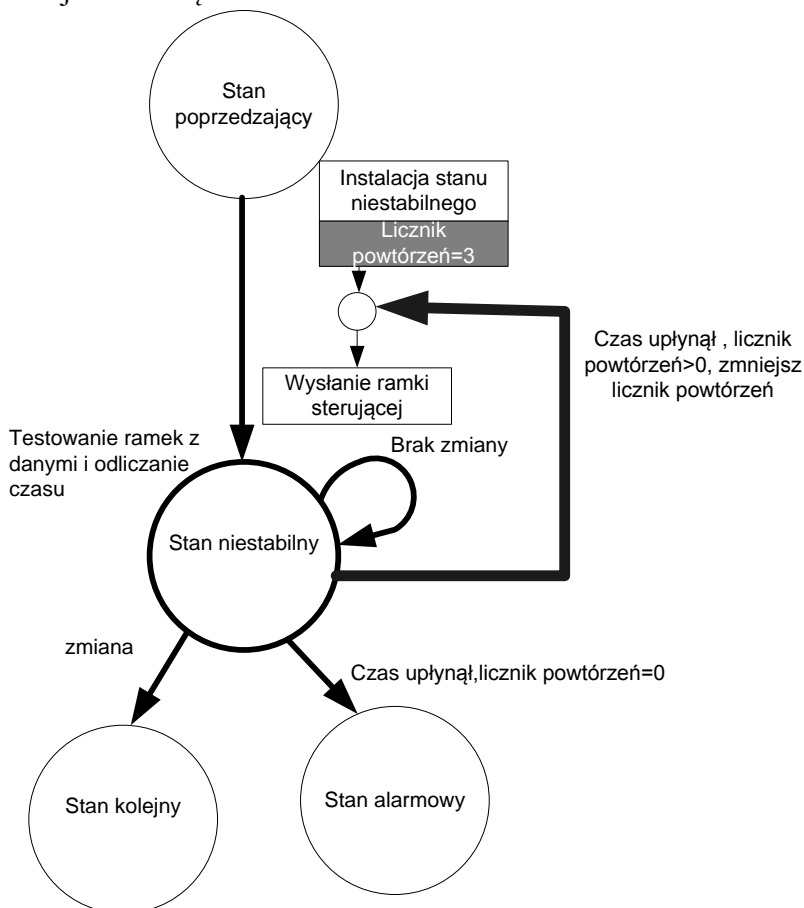
Określone sekwencje sterowań prowadzą do określonych przejść na diagramie stanów. W sieci CAN sterowanie można zrealizować na dwa sposoby:

- przy pomocy potwierdzanych ramek serwisowych (SDO),
- przy pomocy niepotwierdzonych ramek RxPDO.

Pierwszy z omawianych sposobów nie jest objęty normą, to znaczy nie wszystkie dane w ramach PDO muszą mieć swój odpowiednik SDO. Zaletą tej metody jest potwierdzenie (pozytywne bądź negatywne) realizowane w ramach karty. Dla diagramu stanów oznaczałoby to wprowadzenie dla każdej nastawy dodatkowego stanu oczekiwania na potwierdzenie. W drugim przypadku węzeł slave obierający ramkę sterującą nie potwierdza jej. Tu należy rozpatrzyć dwa przypadki:

- proces sterujący jest permanentny, to znaczy ramki sterujące są powtarzane z częstotliwością próbkowania 100 Hz,
- proces sterujący wysyła pojedynczą nastawę typu "włącz pompę".

W pierwszym przypadku zanik pojedynczego sterowania nie ma istotnych konsekwencji w procesie regulacji. W przypadku drugim procesor nie ma gwarancji, że węzeł „slave” odebrał ramkę. Typowe działanie w diagramie stanów jest następujące: instalowany jest stan niestabilny, w którym oczekuje się na skutek wysłanego sterowania ( na przykład na wzrost ciśnienia oleju w układzie hydraulicznym). Potwierdzenie obserwowanej wielkości jest tu realizowane pośrednio przez odbiór ramek z danymi. Na ogół brak jakiejkolwiek reakcji świadczy o awarii sterowania. Dla wykluczenia przypadku, że ramka sterująca nie została odebrana wprowadzono mechanizm jej trzykrotnego powtórzenia. Mechanizm ten pokazany na rysunku 4. Konieczne jest zapamiętanie wejścia procedury instalacyjnej, będącego fragmentem przejścia ze stanu poprzedzającego do stanu niestabilnego i wpisanie wartości 3 do licznika powtórzeń. Ponadto w każdej procedurze obsługi „timeout” należy sprawdzić stan licznika powtórzeń. Gdy wartość ta jest większa od zera należy ją zmniejszyć o jeden i ponownie wysłać ramkę sterującą. Dopiero trzykrotny brak reakcji na ramkę sterującą świadczy o faktycznej awarii węzła.



Rys 4. Fragment diagramu stanów z powtarzaniem ramek sterujących

#### 4. STAN „REGULACJA”

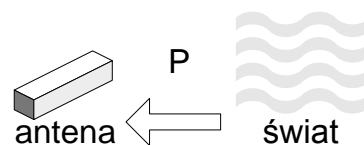
Diagram stanów zespołu sterowania i stabilizacji anteny sonaru obejmuje osiem stanów stabilnych, kilkanaście stanów alarmowych i kilkadziesiąt stanów niestabilnych. Stany te wiążą się z uruchomieniem zespołu hydraulicznego, wyciąganiem lub wciąganiem przetwornika akustycznego pod dnem kadłuba okrętu, składania i rozkładania przetwornika oraz stabilizacji położenia przetwornika w czasie normalnej eksploatacji. Najbardziej złożonym stanem jest stan „REGULACJA”. W stanie tym uruchomiany jest trójwymiarowy regulator położenia. Dane do regulacji pochodzą z systemu nawigacyjnego (kurs okrętu), z miernika ruchu okrętu (przechyły i pochylania okrętu) oraz ze zdublowanych enkoderów kątowych mierzących położenia katowe przetwornika hydroakustycznego względem okrętu. Na rysunku 5 pokazane są transformacje macierzowe związane z trzema układami współrzędnych prostokątnych. Macierz P reprezentuje zadane nastawy operatora. Zadawany jest obrót (Yaw) i pochYLENIE (Pitch) przetwornika akustycznego w odniesieniu do powierzchni morza. Przetwornik w czasie regulacji musi mieć przechył (Roll) równy 0.

Przy składaniu przetwornika przechył powinien wynosić 90 stopni (pozycja wertykalna). Macierz Q reprezentuje dane katowe z systemu nawigacyjnego i z miernika ruchu okrętu. Macierz  $m=MPRY1$  reprezentuje dane odczytane z enkoderów kątów odczytywane z częstotliwością do 200 Hz z dublowanych enkoderów trzech osi obrotu.

#### Macierze transformacji katowych

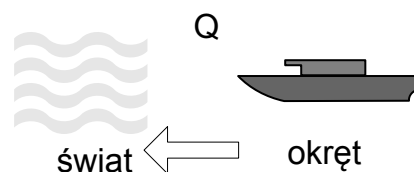
$$P=MPYz$$

$\cos Pz \cdot \cos Yz$	$\cos Pz \cdot \sin Yz$	$\sin Pz$
$-\sin Yz$	$\cos Yz$	0
$-\sin Pz \cdot \cos Yz$	$-\sin Pz \cdot \sin Yz$	$\cos Pz$



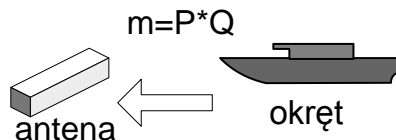
$$Q=MRPo^T$$

$\cos Po$	$\sin Ro \cdot \sin Po$	$-\cos Ro \cdot \sin Po$
0	$\cos Ro$	$\sin Ro$
$\sin Po$	$-\sin Ro \cdot \cos Po$	$\cos Ro \cdot \cos Po$



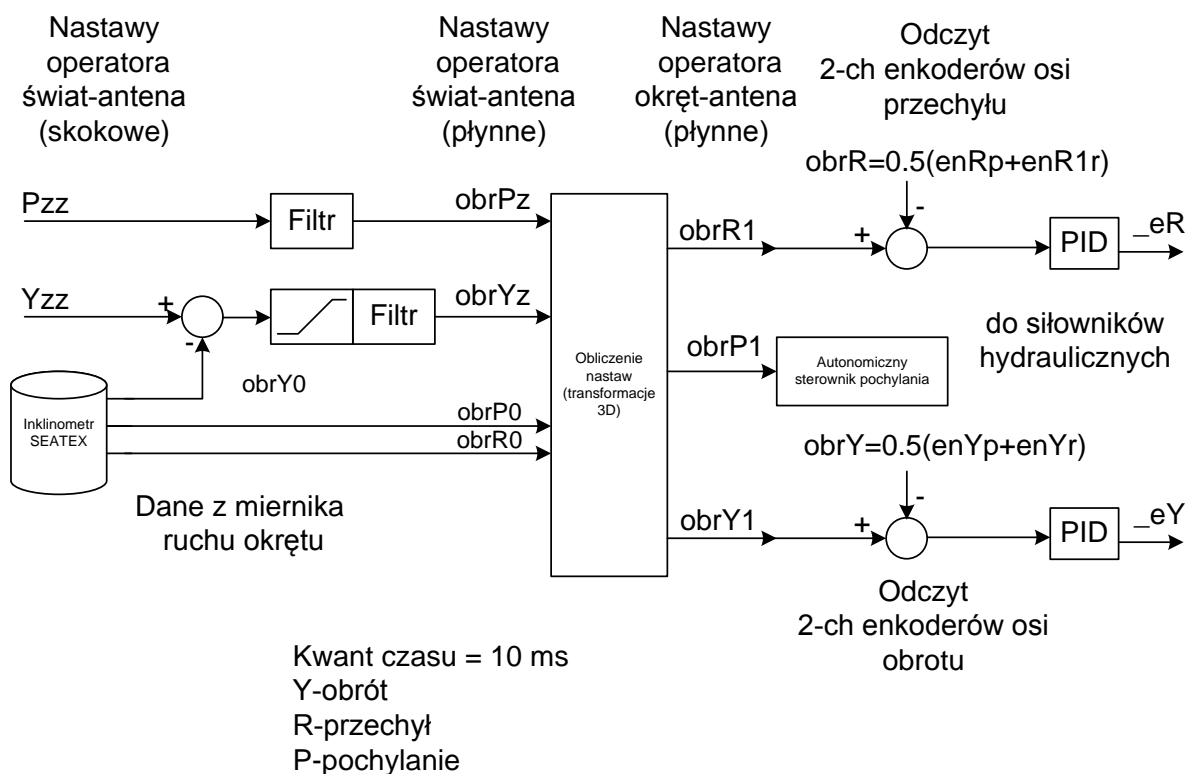
$$m=MPRY1$$

$\cos P1 \cos Y1 - \sin P1 \sin Y1 \sin R1$	$\cos P1 \sin Y1 + \sin P1 \cos Y1 \sin R1$	$\sin P1 \cos R1$
$-\cos R1 \sin Y1$	$\cos R1 \cos Y1$	$-\sin R1$
$-\sin P1 \cos Y1 - \cos P1 \sin Y1 \sin R1$	$-\sin P1 \sin Y1 + \cos P1 \cos Y1 \sin R1$	$\cos P1 \cos R1$



Rys 5. Zależności matematyczne dla trójwymiarowej stabilizacji położenia

Stabilizacja położenia jest poprawna, gdy macierz  $m$  jest równa iloczynowi macierzy  $P$  i  $Q$ . Schemat algorytmu stabilizacji położenia przetwornika pokazuje rysunek 6.



**Rys 6. Algorytm stanu REGULACJA**

Widoczny na rysunku ogranicznik uniemożliwia dostarczenie do układu nastaw niemożliwych do zrealizowania ze względów mechanicznych. Enkodery osi są dublowane z uwagi na ostre wymogi bezpieczeństwa. W razie awarii któregośkolwiek z nich inicjowany jest stan alarmowy „AWARIA ENKODERA”. Awaria jest wykrywana, gdy różnica wskazań między enkoderami jest większa od  $0.2^\circ$ . O jakości regulacji decyduje właściwy dobór regulatorów PID przy spełnieniu wymagań na moc siłowników hydraulicznych.

## 5. WNIOSKI

Warstwowe podejście do projektowania zespołu stabilizacji i sterowania w oparciu o diagram stanów ułatwiło napisanie uniwersalnego oprogramowania aplikacyjnego. W czasie uruchomienia wielokrotnie zdarzały się niesprawności różnych węzłów zaplanowanej sieci. System czasu rzeczywistego umożliwił napisanie procesów symulujących działanie określonych węzłów sieci. Bufory danych zrealizowane zostały w postaci modułów danych o określonej nazwie dostępnej dla wszystkich procesów symulacyjnych. Takie podejście umożliwiło uruchomienie oprogramowania mimo częściowej niesprawności sieci bez jakichkolwiek zmian w warstwie aplikacji. W końcowej fazie, gdy system był zamontowany na okręcie i nie zawsze dostępny dla testów, wytworzono symulator całej sieci pozwalający testować poprawki w warstwie aplikacji. Stosowanie diagramu stanów wielokrotnie pozwoliło na precyzyjną diagnostykę usterki. Cykliczna transmisja wektora pomiarów

wzbogacona o numer stanu i aktualny czas jego trwania pozwalała na komputerze diagnostycznym tworzyć „historię” przejść w automacie stanów. Dało to bezcenne wskazówki dla poprawnego skonstruowania modelu zespołu sterowania i stabilizacji, a tym samym optymalizacji algorytmów sterowania.

## 6. LITERATURA

- [1] JANOWSKI T., KOTŁOWSKI A.: Protokół FMS sieci Profibus w układzie sterowania i diagnostyki podsystemu regulacji położenia anteny sonaru, Systemy Czasu Rzeczywistego 2000, Kraków strona 307.
- [2] JANOWSKI T., NALEZIŃSKA, H., POROSIŃSKA E.: Stabilizacja anteny sonaru podkadłubowego, realizacja techniczna i wyniki prób SWMT Puck 2005.
- [3] MICHALOSKI J.L., PROCTOR F.M, RIPPEY W.G.: Expanding the Role of Finite State Machine Technology in Open Architecture Control, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> CIRP International Conference on Reconfigurable Manufacturing Ann Arbor, August 20-21 2003.
- [4] OS-9 for 68K processors Technical I/O Manual, v 3.2 RadiSys Microware Communications Software Division Inc., 2000.

## STATE DIAGRAM APPROACH USING CONTROL AREA NETWORK APPLICATION LAYER FOR MECHANICAL PART CONTROL OF SONAR

**Abstract:** State diagrams are very useful description tools for complex devices control. When CANOpen is used the transitions in state diagrams are results of received frames (TxPDO) or steering frames (RxPDO). CANOpen protocol is message oriented protocol and consequently sent frames have no confirmation. We use alternate paradigm where frames with measurement data are observed. When we have no expected value then steered frame is repeated. This paradigm increased reliability of designed control system for mechanical part of sonar.

Recenzent: dr hab. inż. Zdzisław Filus