

Tadeusz JANOWSKI
Marcin OKUNIEWSKI

MAGISTRALA CAN W UKŁADZIE STEROWANIA STACJĄ HYDROLOKACYJNĄ SHL-101/T

Streszczenie: Współczesne sonary charakteryzują się rozdzielczością kątową rzędu 0.1 stopnia. Stawia to wysokie wymagania na jakość trójwymiarowej stabilizacji anteny sonaru. W Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Centrum Techniki Morskiej w Gdyni przy współpracy z Ośrodkiem Badawczo-Rozwojowym Urządzeń Mechanicznych sp. z o.o. z Gliwic zrealizowano zespół mechaniczny spełniający wszystkie wymagania. Wszystkie sensory i urządzenia wykonawcze są wyposażone w interfejsy magistrali CANOpen. W artykule opisano szczegóły realizacji sterowania ze szczególnym uwzględnieniem warstwy aplikacji zrealizowanej w systemie czasu rzeczywistego w oparciu o maszynę stanów. Opisany został również mechanizm pozwalający na poprawną pracę systemu w przypadku awarii pojedynczych węzłów sieci.

Słowa kluczowe: stacja hydrolokacyjna, zespół stabilizacji, sonar, regulator stanu, magistrala CAN.

1 WSTĘP

Rozwój technologii związanej z przetwarzaniem sygnałów pozwala na wykonanie wysokiej klasy urządzeń hydrolokacyjnych przetwarzających w czasie rzeczywistym duży strumień informacji (rzędu 100 MB/s). Tak wielki strumień informacji wynika z konstrukcji anteny sonaru.

Wykonana jest ona w postaci wieloelementowego przetwornika hydroakustycznego złożonego z dziesięciu 24-elementowych bloków. Każdy z tych elementów odbiera sygnał szerokopasmowy (pasmo rzędu 50 kHz). Złożone algorytmy dopasowanej filtracji w czasie i przestrzeni dają w efekcie obraz sonarowy o dużej precyzji. Wysoka jakość obrazu nie byłaby możliwa do osiągnięcia bez wysokiej jakości stabilizacji położenia przetwornika w toni wodnej. Położenie przetwornika w trakcie pojedynczego impulsu sondującego powinno być stałe. W warunkach ćwiczeń morskich sonar zainstalowany jest na okręcie poruszającym się na określonym kursie.

W wyniku czynników zakłócających takich, jak wiatr i falowanie morza położenie osi okrętu podlega przypadkowym wahaniom. Szytywne przymocowanie przetwornika sonaru do kadłuba okrętu powodowałoby duże wahania obrazu, uniemożliwiając tym samym operatorowi wychwytywanie obiektów mino-podobnych. Dlatego też w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Urządzeń Mechanicznych wykonano zespół mechaniczny umożliwiający stabilizację w trzech stopniach swobody. Te stopnie swobody to trzy kąty:

- kąt pochylania (kierunek do dna lub do powierzchni),
- kąt przechyłu (kierunek zgodny z przechyłami okrętu na lewą lub prawą burtę),
- kąt obrotu (kierunek w płaszczyźnie azymutu).

Ostatni z tych kątów kompensujący wahania kursu tak zwane myszkowanie decyduje o jakości obrazu przy wysokiej rozdzielczości kątowej.

Dodatkowym, czwartym stopniem swobody jest możliwość ruchu liniowego góra – dół. Umożliwia on po prostu schowanie przetwornika w kadłubie okrętu (tak zwane położenie spoczynkowe) lub wysunięcie przetwornika pod kadłub dla poprawnego sondowania akwenu (tak zwane położenie robocze). Duże wymagania na jakość stabilizacji doprowadziły do wyboru sterowania hydraulicznego.

2 WĘZŁY SIECI CAN JAKO ELEMENTY ZESPOŁU MECHANICZNEGO

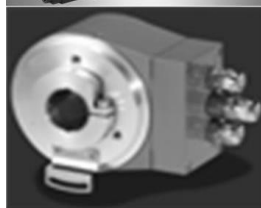
Omówiony w poprzednim punkcie zespół mechaniczny o czterech stopniach swobody wyposażono w sensory i elementy wykonawcze w oparciu o dostępne na rynku węzły sieci CAN. Stabilizację w kącie pochylania wyposażono w autonomiczny sterownik silnika elektrycznego typu IDM 640 firmy Technosoft. Na dzień dzisiejszy istnieje wersja tego sterownika wyposażona w interfejs CAN. Rozwiązanie zaimplementowane w stacji bazuje na starszej wersji opartej na interfejsie szeregowym RS232.

Stabilizację w kącie przechyłu oparto na dwóch dublowanych enkoderach wartości absolutnej kąta przechyłu firmy Kuebler oraz układzie wykonawczym firmy Rexroth.

Stabilizację w kącie obrotu wykonano w sposób analogiczny (dwa enkodery Kuebler, układ wykonawczy Rexroth).



Rozdzielacz
hydrauliczny
Rexroth



Enkoder
obrotów
Kuebler



Enkoder
liniowy
Balluff



Czujnik
ciśnienia
Trafag



Czujnik
temperatury
Trafag



Koncentrator IO IFM

Rys. 1. Zestawienie podstawowych elementów sieci CANOpen SHL101/T

Przy wyborze enkoderów kątowych i elementów wykonawczych wybierano konsekwentnie elementy wyposażone w interfejs CANOpen.

Za wciąganie lub opuszczanie zespołu mechanicznego pod kadłub okrętu odpowiada układ sterujący wyposażony w cylindry hydrauliczne, których położenie kontrolują dublowane enkodery liniowe firmy Balluff oczywiście wyposażone w interfejs CANOpen. W położeniu spoczynkowym i roboczym włączane są hydrauliczne hamulce ruchu liniowego, co uniemożliwia przemieszczanie się zespołu mechanicznego w pionie.

W położeniu spoczynkowym oraz w trakcie przemieszczania w pionie zespołu mechanicznego włączane są hydrauliczne hamulce obrotów.

Hydrauliczne układy regulacji działają tylko wówczas, gdy w układzie wytwarzane jest ciśnienie oleju. Zespół mechaniczny został tak zaprojektowany, aby przy braku ciśnienia wszystkie hamulce działały uniemożliwiając wszelkie przemieszczenia. Kontrola ciśnienia w układach hamowania jest także dublowana. Sterowanie tymi elementami umożliwiają koncentratory wejścia/wyjścia wyposażone w interfejs CANOpen.

Ze względów bezpieczeństwa zespołu mechanicznego pracującego pod wodą w sieci CAN umieszczono też węzły kontrolujące wilgotność i prędkość okrętu. Rysunek 1 pokazuje podstawowe elementy sieci CANOpen zastosowane w układzie sterowania stacją. Niestety, nie wszystkie układy wyposażone są w taki interfejs. Część czujników i układów wykonawczych wyposażonych jest w analogowe lub binarne wejścia lub wyjścia. W takim przypadku dystrybucję danych ułatwiają koncentratory wejścia/wyjścia firmy IFM elektronik.

Sieć przemysłowa dla wykonania sterowania układem mechanicznym, w przypadku zespołu mechanicznego sonaru jest praktycznie jedynym sensownym rozwiązaniem. Wiąże się to z dużymi odległościami, rzędu kilku- kilkunastu metrów między poszczególnymi węzłami i jednostką centralną. Część elementów związana jest ze sterowaniem układem hydraulicznym, inna część umieszczona jest w części podwodnej.

Duży koszt i wysokie wymagania na jakość stabilizacji anteny sonaru wymagają dużej niezawodności danych pomiarowych. Z tych względów wprowadzono dwie równoległe sieci.

3 STRUKTURA REGULATORA

W rozpatrywanym trójwymiarowym układzie regulacji istnieją trzy układy współrzędnych prostokątnych:

- układ geograficzny (oś południka, oś równoleżnika, oś grawitacji),
- układ związany z okrętem (oś rufa-dziób, oś lewa burta-prawa burta, oś pokład – dno),
- układ związany z anteną (oś prostopadła do płaszczyzny azymutu, oś pochylania, oś przechyłów bocznych).

Cała dynamika regulatora opisana jest przemieszczeniami wzajemnymi tych układów. Przemieszczenia takie opisuje macierz obrotów o rozmiarach 3x3. Macierz odwrotną do macierzy obrotów otrzymuje się poprzez transpozycję jej elementów.

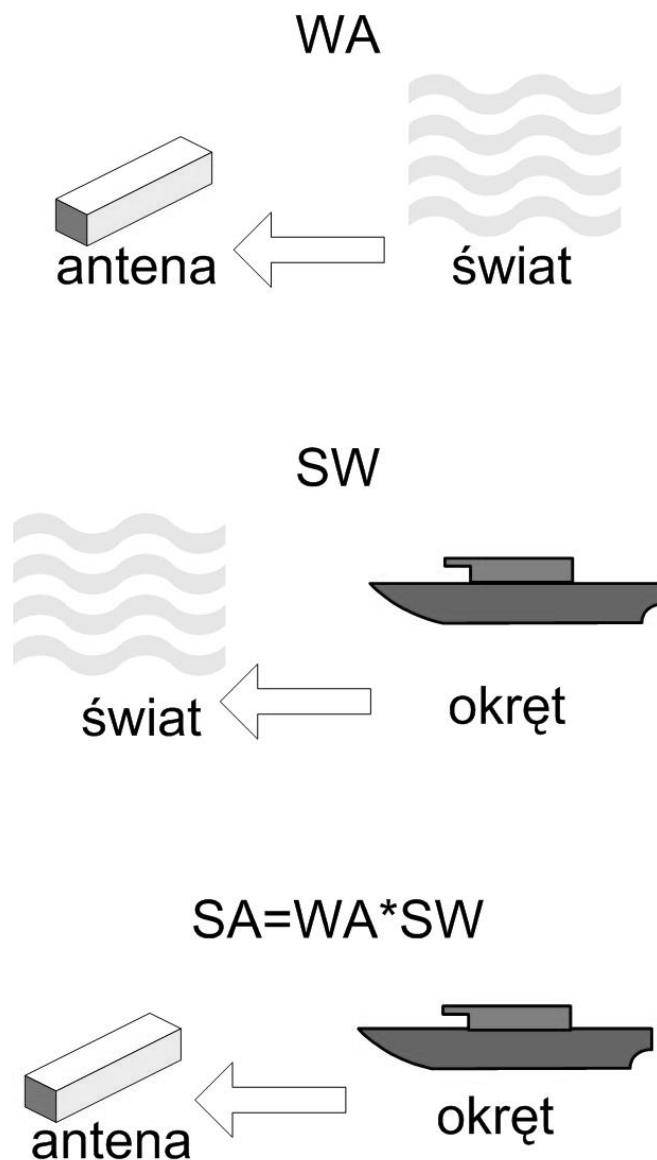
Rozpatruje się trzy macierze obrotów:

- macierz WA (świat-antena), której elementy są jednoznacznie wyznaczone przez nastawy operatora takie, jak pochylenie anteny i kierunek wiązki (przechył jest ustawiony na zero),
- macierz SW (okręt-świat), której elementy są jednoznacznie wyznaczone przez odczyty z żyrokompasu i układu pomiarowego parametrów ruchu (MRU firmy Seatex),

- macierz SA (okręt-antena), której elementy są jednoznacznie wyznaczone przez pożądane wskazania enkoderów kątowych umieszczonych na trzech osiach zespołu mechanicznego.

Macierze WA i SW są znane. Macierz SA oblicza się jako iloczyn macierzy WA i SW. Znając elementy macierzy SA wyznacza się pożądane wartości wskazań enkoderów poszczególnych osi.

Cztery stopnie swobody przemieszczania zespołu mechanicznego są kontrolowane przez dwie sieci- podstawową i rezerwową. Ta redundancja umożliwia wykrywanie sytuacji awaryjnych związanych z błędnym odczytem danych pomiarowych.



Rys. 2 Układy współrzędnych

4 STRUKTURA OPROGRAMOWANIA

Jedną z podstawowych zalet stosowania standardowych rozwiązań jest możliwość korzystania z gotowych narzędzi oferowanych przez producentów kart. Warstwa aplikacji, jaką opisuje standard CANOpen jest w rzeczywistości opisem znaczenia pól parametrów w ramach PDO. W rozumieniu programowym warstwa aplikacji jest napisana przez użytkownika w celu konstrukcji regulatora działającego w czasie rzeczywistym. Typowy regulator cyfrowy działa w cyklicznej pętli pomiarowo-sterującej w której częstotliwość próbkowania dobiera się tak, aby zapewnić dostateczną jakość regulacji.

Na oprogramowanie warstwy aplikacji składają się struktury danych i algorytm. W przypadku sterowania Zespołem Mechanicznym Sonaru opis algorytmu okazał się dosyć złożony. Jest to w rzeczywistości szereg sekwencyjnie wykonywanych algorytmów. Z drugiej, strony, dla celów diagnostycznych, po sieci Ethernet do konsoli operatora powinna być przekazywana informacja który z wielu algorytmów jest aktualnie realizowany. Zdecydowano na opisanie tej sekwencji algorytmów za pomocą skończonej maszyny stanów (FSM-Finite State Machine).

W przypadku struktury danych opis regulatora jest jednoznaczny przy pomocy wektora sterowań, wektora stanu i wektora pomiarów.

Przy takim podejściu wytworzenie warstwy aplikacji w środowisku sieci CANOpen można określić jako:

- przetworzenie ramek przychodzących w najbardziej aktualny wektor pomiarów,
- przetworzenie wektora sterowań w zestaw ramek wychodzących,
- zbudowanie uniwersalnej FSM,
- implementacją poszczególnych węzłów FSM.

Na rys. 3 pokazane są najbardziej kluczowe bloki oprogramowania. W rzeczywistości liczba stanów wszystkich bloków, wliczając różne stany serwisowe, diagnostyczne i awaryjne przekracza setkę.

Formowanie wektora pomiarów		Formowanie wektora sterowań	
Uniwersalna Maszyna Stanów			
Stabilizacja obrotów ZM	Opuszczanie ZM pod kadłub	Podnoszenie ZM ponad dno okrętu	Inne

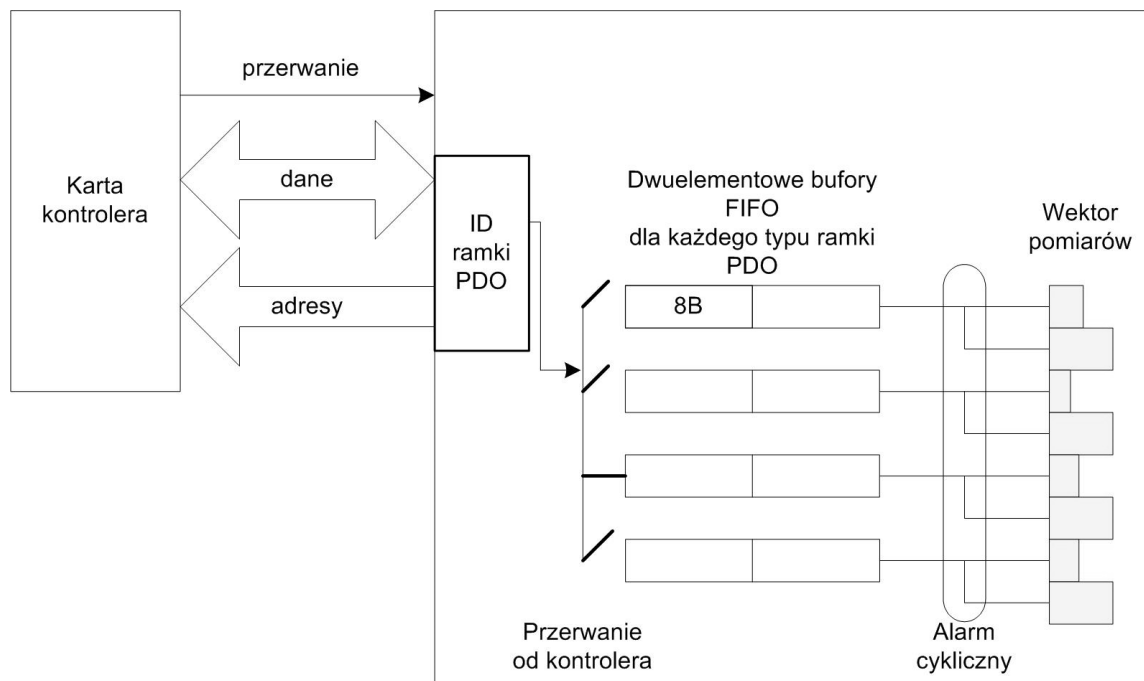
Rys. 3. Struktura warstwy aplikacji

W podpunktach omówione zostaną przykładowe szczegóły implementacji tej struktury.

4.1 Integracja odczytu ramek z sieci CAN

Integracja odczytu ramek z sieci CAN polega na uformowaniu najbardziej aktualnego wektora pomiarów, dostępnego dla regulatora w cyklu zegarowym 10 milisekund.

Ramki z sieci CAN dostarczane są w sposób asynchroniczny do pamięci sterownika poprzez driver w obsłudze przerwań (rys. 4).



Rys. 4. Współpraca karty kontrolera ze sterownikiem uniwersalnym

Wynikiem przetwarzania musi być dostarczany w stałym cyklu pomiarowym tak zwany wektor pomiarów.

W systemie czasu rzeczywistego powstaje problem równoczesnego zapisu i odczytu ramek. Rozwiązaniem tego problemu jest wydzielenie dla każdego węzła wszystkich podsieci dwuelementowej, cyklicznej kolejki FIFO (First Input, First Output).

W obsłudze przerwania, na podstawie identyfikatora ramki ustalany jest adres bufora FIFO do zapisu danych. Semafor kolejki zapewniają to, że jeden z buforów jest zawsze dostępny. W przypadku, gdy oba bufory nie były odczytane, (co występuje przy dużej szybkości transferu danych) nadpisywany jest „starszy” bufor.

Proces regulacji, uruchomiany w cyklicznym przerwaniu zegarowym pobiera najbardziej aktualne wartości z wszystkich kolejek.

Wszystkie dwuelementowe kolejki FIFO zostały umieszczone w module pamięci wspólnej systemu operacyjnego.

Znajomość struktury tej pamięci pozwala na napisanie procesów pozwalających na podgląd ramek przychodzących.

Dodatkową zaletą umieszczenia tych danych w ogólnodostępnej pamięci wspólnej jest możliwość uruchomienia i testowania oprogramowania przy braku części lub nawet wszystkich węzłów sieci CAN.

W tym celu należy uruchomić procesy symulujące wpis danych przez driver nieistniejącego lub uszkodzonego węzła pomiarowego sieci CAN.

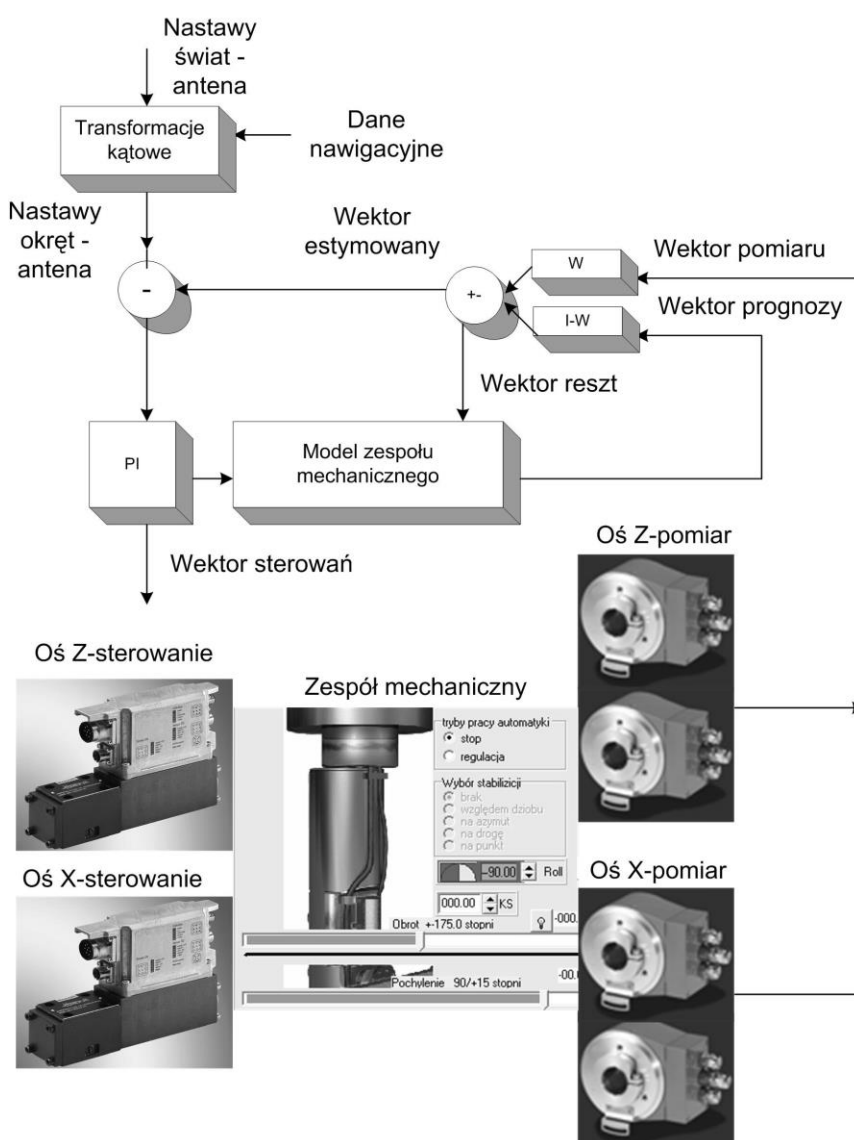
4.2 Integracja zapisu ramek do sieci CAN

Wysyłanie ramek TxPDO w sieć polega na systemie buforów wytworzonych w karcie. Procesor karty cyklicznie przegląda 64-elementową kolejkę FIFO. Jedynym problemem w tym wypadku jest przepełnienie tej kolejki. W wyniku analizy bloków sterowania okazało się, że w każdym cyklicznym alarmie (co 10 milisekund) nie potrzeba więcej niż 5 ramek do

wysłania w sieć. Oznacza to, że praktycznie przepełnienie tej kolejki nie grozi. Reakcją programową na wypadek przepełnienia tych 64 buforów jest ignorowanie ramki.

4.3 Regulator stanu w układzie stabilizacji obrotów

Zaprojektowanie układu regulacji ze średniokwadratowym kryterium jakości prowadzi do wytworzenia modelu stabilizowanego urządzenia. Model urządzenia symuluje rzeczywiste parametry urządzenia. Część tych parametrów (na przykład kąty obrotu) jest mierzona przez czujniki, część jest obliczana na podstawie sterowań (na przykład prędkości kątowe) i korygowana w sposób pośredni. Dla modelu idealnego błędy między rzeczywistym obiektem i modelem są zerowe. W rzeczywistym przypadku różnice między pomiarami za pomocą enkoderów obrotu i obliczonymi kątami pozwalają na bieżące korygowanie wszystkich parametrów modelu ruchu.



Rys. 5. Regulator obrotów jako regulator stanu

W układach regulacji stanu definiuje się następujące wektory:

- wektor sterowań (% otwarcia odpowiednich zaworów hydraulicznych),
- wektor stanu (kąty i prędkości kątowe poszczególnych osi),
- wektor pomiaru (dublowane odczyty enkoderów obrotu),
- wektor prognoz pomiarowych (obliczone na przyszły krok obrotu),
- wektor reszt pomiarowych (różnica między prognozą i pomiarem),
- wektor innowacji (korekta wektora stanu pod wpływem wektora reszt).

Tak zrealizowany regulator można wykorzystać do diagnostyki oceny danych pomiarowych.

Dublowanie wartości odczytu pozwala na wykrycie niepoprawnej kalibracji sensorów odczytu. Na przykład dla osi X z dwóch wskazań enkoderów obrotu En_X1 , En_X2 wytwarzane są sygnały sumacyjny $S_X=1/2(En_X1+En_X2)$ oraz różnicowy En_X1-En_X2 .

Pierwszy sygnał stanowiący średnią arytmetyczną wskazań jest traktowany jako poprawny odczyt kąta związanego z osią X. Sygnał różnicowy, o ile nie przekracza 0.1° , traktowany jest jako poprawny, w przeciwnym przypadku hamowane są wszystkie osie obrotów a operatorowi zgłaszany jest alarm typu „niezgodność enkoderów obrotu”.

Wyższą warstwę diagnostyczną stanowią rozbieżności między rzeczywistym obiektem a jego modelem (tak zwany wektor reszt). Również w tym wypadku duże wartości składowych tego urządzenia prowadzą do włączenia hamulców na wszystkie osie i zgłoszenie alarmu „niepoprawna dynamika regulacji”.

5 SYTUACJE AWARYJNE

Omówiony w poprzednim punkcie mechanizm wykrywania sytuacji awaryjnych zapewnia bezpieczną pracę stacji. W przypadku awarii węzła sieci CAN rozpatruje się dwie sytuacje:

- zespół mechaniczny znajduje się w pozycji złożonej wewnątrz kadłuba okrętu,
- zespół mechaniczny znajduje się albo pod kadłubem okrętu, albo jest w trakcie przemieszczania.

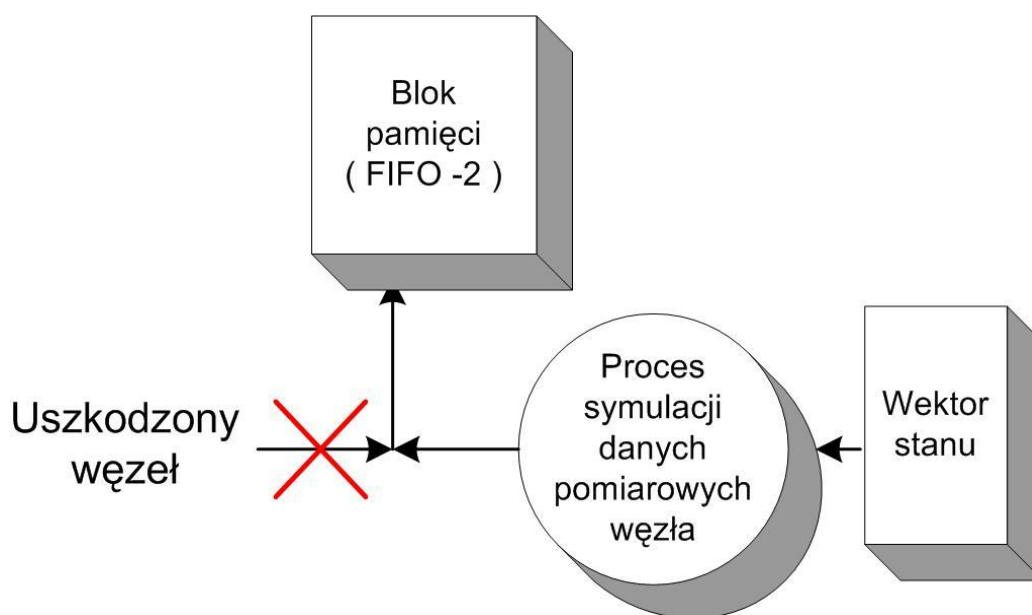
W pierwszym przypadku jedynym rozwiązaniem jest naprawa serwisowa (wymiana uszkodzonego węzła, kalibracja enkodera itp.).

W drugim przypadku należy podjąć próbę sprowadzenia anteny do pozycji spoczynkowej. Są dwa rodzaje uszkodzeń węzła:

- węzeł nie jest widoczny w sieci CAN,
- dane pomiarowe węzła nie są wiarygodne.

W przypadku, gdy uszkodzony jest jeden z węzłów redundantnych operator, po upewnieniu się, że równoległy węzeł pracuje prawidłowo podejmuje decyzję o wyłączeniu tego węzła. W takim przypadku na sterowniku uruchomiany jest „proces symulacji danych pomiarowych węzła”.

Jak omówiono poprzednio, jednym z elementów warstwy aplikacji jest formowanie wektora pomiarów. Bufor dwuelementowych kolejek FIFO jest teraz zapisywany ramkami generowanymi przez ten dodatkowy proces.



Rys. 6 . Symulacja działania uszkodzonego węzła

6. 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 2nd CIRP International Conference on Reconfigurable Manufacturing Ann Arbor, August 20-21 2003.

THE ROLE OF THE CAN BUS IN SHL101T CONTROL SYSTEM

Abstract: The angular resolution of modern sonar is about 0.1 degrees. It involves hard requirements refer to the antenna 3D stabilization quality. R&D Marine Technology Centre in Gdynia in cooperation with R&D Centre for Mechanical Appliances in Gliwice has developed the antenna system which meets all requirements. All sensors and control devices are equipped with CANOpen bus interfaces. The article describes details of the control system and application level based on the finite state machine in real-time system. The paper also presents the mechanism which allows the system to work properly in case of the several network nodes malfunction.

Recenzent: dr inż. Andrzej SZAFRANIEC