ISSN 1733-8670

**ZESZYTY NAUKOWE NR 10(82)**
**AKADEMII MORSKIEJ**
**W SZCZECINIE**

IV MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA
**EXPLO-SHIP 2006**

Jerzy Szcześniak, Jerzy Brzózka

# Rozproszone systemy automatyzacji na statkach

Słowa kluczowe: sieciowy system sterowania NCS, protokoły komunikacyjne,

*W pracy zaprezentowano podstawowe funkcje i właściwości rozproszonych układów regulacji, sterowania, diagnostyki i nadzoru, wykorzystujących sieci przemysłowe. Podano przykłady zastosowania układów rozproszonych w systemach okrętowych.*

# Distributed Ship Control Systems

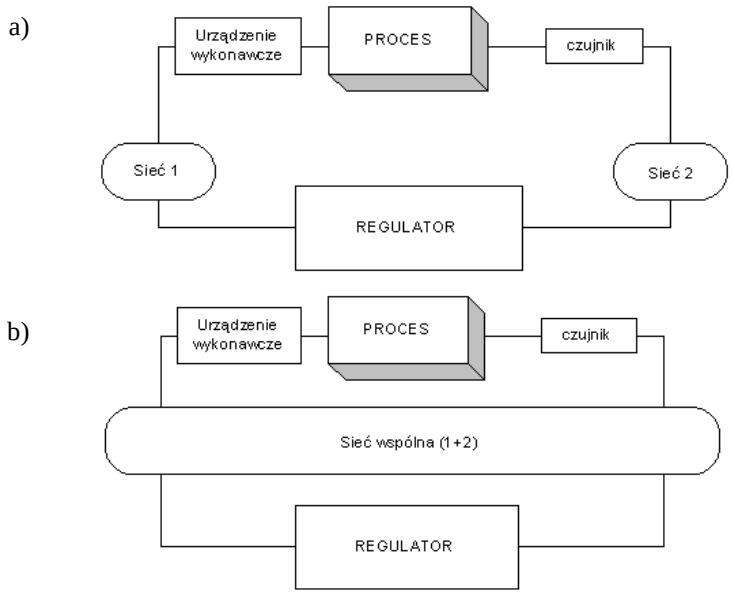
Key words: Network Control System NCS, communication protocols

*This article describes basic functions and properties of distributed control, diagnosing and monitoring systems using industrial networks . Examples of applications of distributed systems in vessel systems are presented.*

## 1. Budowa i właściwości układów rozproszonych

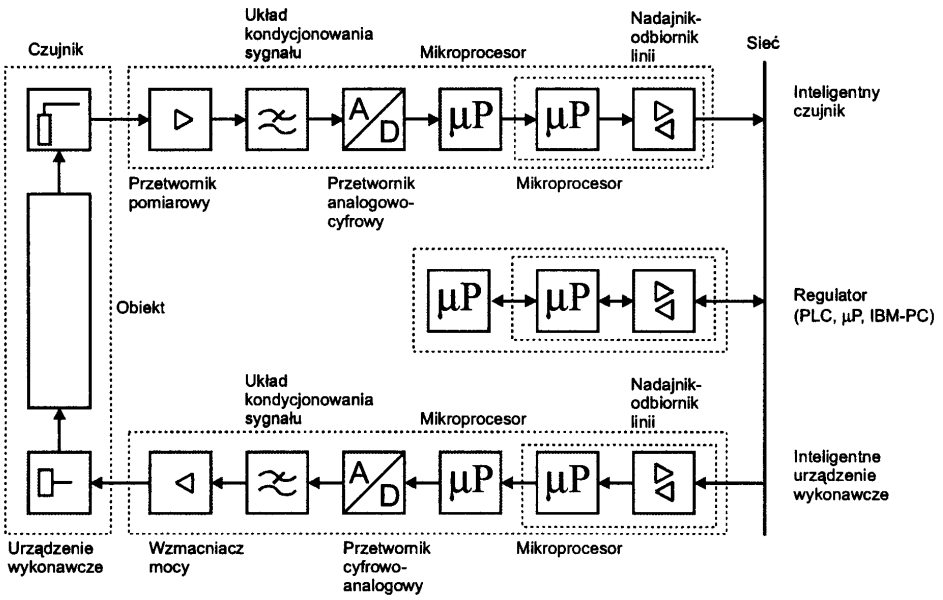
Układ sterownia można traktować jako rozproszony, jeśli którykolwiek z sygnałów występujących w tym układzie przesyłany jest za pośrednictwem sieci cyfrowej (komputerowej). Transmisja danych pomiędzy elementami układu sterowania może być realizowana na drodze od kilku metrów (jeśli przykładowo dotyczy to obrabiarki sterowanej numerycznie) do kilkuset (np. w okrętowych układach sterowania), a nawet tysięcy metrów (duże systemy przemysłowe czy komunikacyjne).

Istnieją różne struktury układów rozproszonych. Najprostsze z nich to takie, w których sieć pośredniczy w wymianie danych pomiędzy czujnikiem a regulatorem oraz takie, gdzie sieć łączy regulator i urządzenie wykonawcze. Natomiast w najbardziej zaawansowanych strukturach sieciowych system sterowania (NCS – *Network Control System*) pośredniczy w wymianie danych pomiędzy wszystkimi elementami systemu. Sieć może być odrębna dla dwóch największych węzłów takich jak czujnik-regulator i regulator-urządzenie wykonawcze, ale układ ten nie cechuje się dużo większą prostotą, a ma przy tym ograniczone możliwości komunikacyjne. Lepszym rozwiązaniem jest struktura przedstawiona na rysunku 1b.




Rys. 1. Schematy poglądowe układów rozproszonych z odrębnymi sieciami (a) lub siecią wspólną (b)

*Fig. 1. Visual schemes of distributed systems with (a) separate networks or (b) common network*




Rys. 2. Przykładowa struktura układu sterowania wykorzystująca sieć [4]
*Fig. 2. An example of network control system structure [4]*

Rozproszone układy automatyzacji zyskują coraz większą popularność. Wynika to z szeregu zalet, takich jak:

- łatwość wprowadzania zmian w konfiguracji systemu;
- wysoki poziom niezawodności systemu ze względu na decentralizację sterowania;
- duża modułowość systemu, która upraszcza projektowanie, diagnostykę, przebudowę oraz wszelkie naprawy;
- niższe koszty inwestycyjne (np. w okablowaniu) i eksploatacyjne (wspólne sieci komunikacyjne) w stosunku do klasycznych systemów automatyzacji;
- możliwość łatwego tworzenia hierarchicznych struktur sterowania i zarządzania systemem oraz ich rozbudowy;
- możliwość łatwego tworzenia systemów wizualizacji w dowolnym punkcie obiektu;
- globalizacja struktur sieciowych umożliwiająca tworzenie systemów o bardzo dużej rozpiętości.

Układy regulacji cyfrowej cechują się działaniem cyklicznym. Przetwarzanie sygnałów przez układ regulacji cyfrowej odbywa się w sposób nieciągły (w odróżnieniu od układów z sygnałami analogowymi), lecz w określonych momentach, w których to poszczególne bloki (elementy) układu wykazują

aktywność. Okres pomiędzy momentami aktywności elementu nosi nazwę okresu próbkowania $T_s$. To, czy wszystkie dyskretne elementy układu będą działały w tym samym momencie, czy też pomiędzy pojedynczymi obiektami będą występowały przesunięcia czasowe, zależy od tego, w jaki sposób aktywowane są bloki układu oraz od tego, czy do układu zostały wprowadzone ewentualne przesunięcia pomiędzy momentami zadziałania poszczególnych bloków.

Elementy wykonawcze, czujniki, regulatory, w rozproszonym układzie regulacji mogą być aktywowane zegarem (*clock driven systems*) lub zdarzeniem (*event driven systems*). W określonym układzie sterowania możliwa jest również kombinacja tych dwóch sposobów aktywowania poszczególnych elementów.

Rozpatrując działanie pojedynczego składnika sieci cyfrowej, można stwierdzić, że składa się ono z kilku kolejnych kroków [4]:

1) przygotowanie danych przez aplikację użytkownika w węźle nadawczym;
2) obróbka przez protokoły sieciowe;
3) oczekiwanie na dostęp do medium transmisyjnego;
4) nadawanie ramki – czas zależny od prędkości transmisji i wielkości ramki (wysyłanie wiadomości przez sieć cyfrową nie odbywa się w sposób ciągły, jest ona dzielona przez protokoły sieciowe na pakiety w wielkości zależnej od typu sieci);
5) propagacja ramki w sieci – zależna od długości kabla i innych czynników;
6) obróbka informacji przez protokoły sieciowe po stronie odbiornika;
7) wykorzystanie danych przez aplikację użytkownika w węźle odbiorczym.

Taki charakter działania poszczególnych składników sieci jest przyczyną pojawiania się opóźnień, które stanowią podstawową wadę cyfrowych systemów rozproszonych. Projektując układ pracujący w sieci należy uwzględnić możliwość występowania opóźnień, które mogą mieć bardzo zróżnicowany charakter.

Rodzaje opóźnień (zależne od typu sieci i konfiguracji systemu) [4]:

- stałe,
- zmienne:
  - o znanych lub nieznanych własnościach probabilistycznych,
  - wolno lub szybkozmienne.

Źródłami występowania opóźnień są:

- transmisja sieciowa;

- opóźnienia w węzłach sieci (obliczenia, pomiary); zastosowanie czujników inteligentnych powoduje zwiększenie wartości opóźnienia;
- zróżnicowanie okresów próbkowania oraz przesunięcia fazowe (często w układzie sterowania współpracują moduły, z których każdy pracuje synchronicznie, a taktowany jest swoim własnym, niezależnym zegarem);
- współzawodnictwo węzłów o dostęp do medium transmisyjnego;
- zmienny czas odpowiedzi wielomodułowych węzłów sieci (złożone węzły składają się z kilku modułów, które odpytywane są cyklicznie przez jednostkę centralną; wiążą się z tym opóźnienia zależne od tego, który aktualnie moduł jest odpytywany).

Inne wady systemów rozproszonych to:

- możliwość nieterminowego docierania pakietów do regulatora (w układzie z taktowanym czujnikiem i regulatorem),
- gubienie części pakietów z danymi,
- dublowanie pakietów,
- chwilowe przerwy w transmisji (np. chwilowy brak zasilania).

Rozproszone systemy sterowania, diagnostyki i nadzoru są coraz szerzej stosowane w bardzo różnych dziedzinach naszego życia. W zależności od przeznaczenia poszczególni producenci budowali własne struktury sieci cyfrowych. Podobnie jak w systemach z sygnałami analogowymi, gdzie wypracowane zostały standardy sygnałów sterujących, także w układach cyfrowych pracuje się nad kompatybilnością sieci, mimo ich odmiennego charakteru w sposobie i warunkach pracy.

Obecnie sieci przemysłowe są budowane bądź dopasowywane ze względu na system, który mają obsługiwać, na jego rozpiętość terytorialną, ze względu na prostotę obsługi, niezawodność, bądź ponoszone koszty. Prawdopodobnie w niedługim czasie powstanie jeden lub co najwyżej kilka standardów protokołów komunikacyjnych charakteryzujących się określonymi właściwościami, najlepszymi ze względu na pełnione zadania. Już obecnie firmy produkujące cyfrowe przetworniki, regulatory czy pozycjonery do zaworów, oferują do wyboru kilka protokołów komunikacyjnych, w które wyposażone są urządzenia. Do najczęściej stosowanych obecnie sieci przemysłowych zalicza się CAN, ControlNet, PROFIBUS, LonWorks, DeviceNet czy Ethernet.

## 2. Zastosowanie sterowania rozproszonego na statkach

Rozwój przemysłowych sieci komunikacyjnych w ostatnich latach przeżywa rozkwit. Sieci te są coraz nowocześniejsze, tańsze i ulegają standaryzacji.

Wobec tak licznych zalet ich ekspansja również na gospodarkę morską, a w szczególności na technologie stosowane na statkach i innych obiektach pływających, była kwestią czasu. Zastosowanie transmisji sieciowej na statku rozpoczęło się od wyspecjalizowanych łączy przeznaczonych tylko do konkretnych celów, najczęściej sterowania. W obecnym czasie ewolucja ta wymusiła zastosowanie sieci Ethernetowych, będących bardzo elastycznym rozwiązaniem i umożliwiających połączenie ze sobą zalet wielu dotychczas wykorzystywanych rozwiązań. Trend ten jest ciągły i coraz więcej producentów, widząc zalety płynące z zastosowań Ethernetu w eksploatacji i funkcjonowaniu statku, stawia również na tego typu rozwiązania. Wykorzystanie sieci może obejmować różne układy funkcjonujące na statku. Sieć taka może przesyłać dane wykorzystywane do sterowania, kontroli, pomiarów, diagnostyki układów aparatury nawigacyjnej, siłownianej oraz pokładowej. Inną funkcją sieci może być komunikacja pomiędzy urządzeniami celem przejmowania realizowanych funkcji w przypadku uszkodzenia jednego z nich. Redundancja zwiększa niezawodność całego systemu, np. na platformach morskich podczas pracy jednego urządzenia dwa inne są w pełnej gotowości, aby przejąć pełnione funkcje. Jednym z ważnych zadań w systemach sieciowych jest również transmisja dźwięku i obrazu umożliwiająca np. wizualizację bieżącej pracy urządzenia. Spektrum wykorzystania transmisji sieciowej na statkach jest bardzo szerokie. Zastosowanie sieci umożliwia automatyzację zintegrowaną. Przykładem systemu wykorzystującego na statkach sieć komputerową jest między innymi system DataChief® DC20 firmy Konsgberg Marine. System ten jest modułowy, co czyni go bardzo wszechstronnym w dopasowaniu do potrzeb wynikających z charakteru jednostki pływającej. Pokrywa on wymagania dla małych statków o niskiej złożoności systemów alarmowych, po bardzo rozbudowane systemy alarmowe oraz kontrolno-pomiarowe zintegrowane z każdym układem funkcjonalnym na statku i połączone z zaawansowanym systemem sterowania siłownią. System DC20 wykonany jest zgodnie z zaleceniami IMO (*International Maritime Organization*) oraz spełnia wymogi IACS (*International Association of Classification Societies*) i jedenastu towarzystw klasyfikacyjnych.

Główne składniki systemu DataChief® C20 to:

1. System kontrolno-alarmowy – zawierający wszystkie funkcje wymagane przez towarzystwa klasyfikacyjne. Alarmy i informacje o nich są prezentowane na kolorowych wyświetlaczach zlokalizowanych na stanowiskach zdalnego sterowania.
2. System sterowania pracą pojedynczych urządzeń w siłowni okrętowej lub wybranych procesów dotyczących np. silnika głównego. Posiada on szerokie spektrum funkcji oraz możliwości wyboru stopnia złożoności, co umożliwia pełne dopasowanie do charakteru jednostki oraz indywidualnych potrzeb.

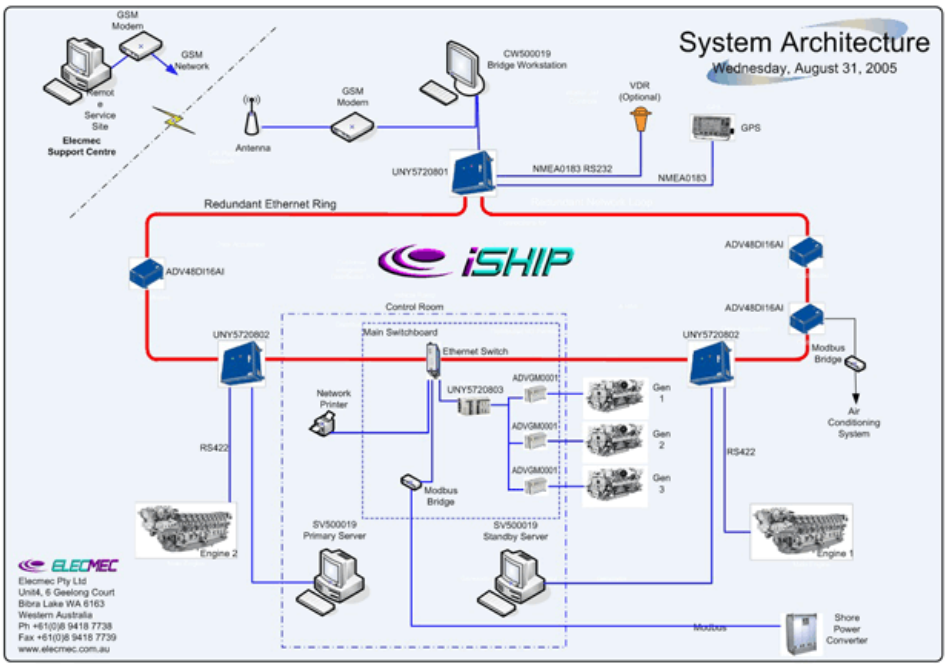
3. System zarządzania energią elektryczną – posiadający pełny zakres obsługi głównej tablicy rozdzielczej i prądnic, który zapewnia wiele funkcji alarmowych, monitorowania i sterowania generatorami prądotwórczymi, główną tablicą rozdzielczą oraz związanych z nimi urządzeń.
4. System automatyki balastowej – zapewniający zdalny pomiar i obsługę zbiorników balastowych, pomp balastowych i zaworów z mostka oraz z centrali manewrowo-kontrolnej. Wchodzi w skład systemu zęzowo-balastowego i może częściowo realizować jego funkcje.
5. System klimatyzacji – system HVAC (ang. Heat Ventilation Air Conditioning), kontrolujący temperaturę i przygotowanie powietrza w kabinach, kuchni, pokładach oraz w innych pomieszczeniach socjalnych, w możliwie najbardziej wydajny sposób.

DC20 korzysta z sieci CAN. Jest ona optymalna dla małych i krótkich informacji, a takie są przede wszystkim w tym systemie wykorzystywane. CAN to sieć pewna i nadająca się do zadań krytycznych czasowo. System, mimo tak daleko posuniętej wszechstronności, wykorzystuje standardowe urządzenia. Modułowa budowa pozwala go dość łatwo modyfikować. Możliwy jest podział sieci tak, aby krótkie obwody oraz przerwane linie w jednym segmencie nie oddziaływały na funkcje w innych segmentach. Modułowa budowa oraz standardowo stosowane urządzenia czynią DC20 systemem nieskomplikowanym, funkcjonalnym, którego możliwości monitorowania i sterowania obejmują praktycznie każdy układ funkcjonalny statku. Z oferowanych rozproszonych układów na szczególną uwagę zasługuje system zarządzania energią elektryczną. Jest to system, bez którego funkcjonowanie statku nie jest możliwe i to na nim są skoncentrowane wszelkie przepisy towarzystw klasyfikacyjnych dotyczące bezpieczeństwa. Brak, nawet chwilowy, energii elektrycznej na statku może doprowadzić do sytuacji bardzo niebezpiecznych dla marynarzy, przewożonego ładunku jak i dla innych statków będących w jego otoczeniu.

## Inne przykłady wykorzystania sieci na statkach

Na rysunku 3 przedstawiono zintegrowany system sterowania i nadzoru firmy Elecmec. Architektura sieci jest typu pętlowego, zdublowana, wykorzystująca protokół Ethernet. Siecią połączone są systemy nawigacyjne, sterowania napędem głównym i elektrownią okrętową. Urządzenia lokalne wykorzystują łącza RS 422 i protokoł Modbus. Istnieje również możliwość połączenia statku z jednostką nadrzędną np. armatorem za pośrednictwem sieci radiowej.

Szereg innych firm produkujących systemy automatyki okrętowej stosuje sieci cyfrowe do komunikacji, sterowania czy nadzorowania pracy systemów okrętowych.




Rys. 3. Zintegrowany system sterowania i nadzoru firmy Elecmec [1]
*Fig. 3. Elecmec-made integrated ship control and monitoring systems [1]*

## 3. Perspektywy rozwoju rozproszonych systemów automatyzacji statku

Do tej pory sieci przemysłowe były stosowane z jednej strony do diagnostyki, testowania i obsługi technicznej, z drugiej – do obsługi ciągłych procesów technologicznych [3]. Obecnie wzrasta liczba użytkowników zainteresowanych wykorzystaniem sieci w sterowaniu ruchem, robotami i maszynami np. numerycznym sterowaniem obrabiarek. Połączenia sieciowe były przede wszystkim wykorzystywane do łączenia sprzętu PLC (sterowniki z logiką programowalną), a obecnie wzrasta zainteresowanie podłączeniem do sieci różnego rodzaju czujników i/lub przetworników (przepływu, poziomu, ciśnienia). W tabeli 1 przedstawiono, jak procentowo kształtowało się i będzie kształtować się zapotrzebowanie użytkowników na produkty związane z sieciami [3]. Natomiast w tabeli 2 przedstawiono zapotrzebowanie na protokoły transmisji.

Analizując obie tabele można stwierdzić, że wzrasta zainteresowanie osprzętem i oprogramowaniem narzędziowym sieci, urządzeniami i sieciowymi układami wejścia/wyjścia oraz to, że tradycyjne sieci przewodowe bazujące na sygnale analogowym 4-20 mA tracą na znaczeniu. Uwidacznia się rosnący

proces przechodzenia od indywidualnych protokołów w lokalnych sieciach przemysłowych do uniwersalnych, otwartych protokołów transmisyjnych. Będzie to zapewne przyczynkiem do umożliwienia użytkownikowi konfigurowania i wyposażania sieci w elementy różnych firm, co spowoduje potrzebę obniżania ich cen oraz zwiększania pewności działania urządzeń. Wzrasta również zainteresowanie bezprzewodowym przesyłaniem informacji (RFID).

Tabela 1

Zapotrzebowanie użytkowników na produkty związane z sieciami
*User demand for network-related products*

| Produkt | w 2003 r. | obecnie | Planowane za 12 m-cy |
|---|---|---|---|
| Sprzętowe komponenty sieciowe | 77 | 81 | 84 |
| Oprogramowanie narzędziowe sieci | 73 | 78 | 83 |
| Urządzenia i systemy We/Wy | 71 | 77 | 77 |
| Sterowniki PLC, sprzęt | 80 | 75 | 85 |
| Czujniki i/lub przetworniki ciśnienia | 57 | 63 | 68 |
| Czujniki i/lub przetworniki temperatury | 59 | 63 | 70 |
| Czujniki i/lub przetworniki przepływu | 53 | 60 | 70 |
| Czujniki i/lub przetworniki poziomu | 55 | 58 | 60 |

Tabela 2

Zapotrzebowanie na protokoły transmisji
*User demand for transmission protocols*

| Rodzaj protokołu transmisji | w 2003 r. | obecnie | Planowane za 12 m-cy |
|---|---|---|---|
| Ethernet TCP/IP | 81 | 78 | 84 |
| RS 485 | 66 | 69 | 65 |
| 4-20 mA | 72 | 68 | 64 |
| Modbus | 40 | 48 | 49 |
| DeviceNet | 44 | 47 | 51 |
| ControlNet | 34 | 39 | 41 |
| WiFi (IEEE 802.11b) | NA | 35 | 42 |
| (indywidualne) | 26 | 33 | 38 |
| HART | 31 | 33 | 35 |
| Radio frequency identification (RFID) | NA | 26 | 37 |
| FOUNDATION fieldbus H1 | 17 | 23 | 31 |

Wzrost zainteresowania sieciami przemysłowymi ma swoje odbicie również na statkach w automatyzacji różnego rodzaju układów. Budowane obecnie w dużej ilości statki do przewożenia skroplonego gazu LNG (*Liquified Natural Gas*) czy LPG (*Liquified Petroleum Gas*) mają bardzo rozbudowane systemy ładunkowe, zarówno sterowania, jak i nadzoru, a przede wszystkim zabezpieczenia przed awariami mogącymi doprowadzić nawet do katastrofy np. ekologicznej. Stopień automatyzacji systemów pokładowych jest po raz pierwszy wyższy od automatyzacji systemów siłownianych. Na statkach typu LNG informacja o stanie pracy urządzeń i systemów pobierana jest z ponad 5000 różnego rodzaju czujników czy przetworników.

Użytkownicy systemów obsługujących urządzenia, pomiędzy którymi nie może dojść do przerwania komunikacji, zainteresowani są innym typem sieci, mianowicie wykorzystujących technikę bezprzewodową. Technika bezprzewodowa narażona jest na przechwytywanie czy wręcz na nieuprawniony, niepożądany dostęp do łącza komunikacyjnego i pobierania zeń przesyłanych danych. W chwili obecnej, techniki bezprzewodowe rzadko stosuje się w budowie dużych sieci, często natomiast służą do przesyłu danych zawierających informacje kontrolno-pomiarowe o stanie pracy systemu, np. poziomie, temperaturze, ciśnieniu, bądź o załączeniu czy wyłączeniu urządzenia oraz jako sygnalizacja stanów alarmowych.

Na statkach systemy bezprzewodowe będą w pierwszej kolejności wykorzystywane w układach kontrolno-pomiarowych. Prowadzenie kabli przez np. różnego rodzaju grodzie separujące, zbiorniki, w których występują wysokie ciśnienia czy niskie temperatury, nastręcza wiele problemów technicznych. Redukcja okablowania i związane z tym zmniejszenie kosztów, a także gwarancja niezawodności i bezpieczeństwa statku stanowi o dużej atrakcyjności systemów bezprzewodowych. Zdalny bezprzewodowy monitoring będzie umożliwiał określanie zawartości zbiorników i parametrów przewożonej substancji czy kontrolował stan kontenerów (np. chłodni) na pokładzie. Informacje będą przekazywane do jednostki centralnej, która zanalizuje parametry i poinformuje obsługę o aktualnym stanie lub załączy sygnalizację alarmową.

Instytut skupiający środowisko inżynierów elektryków (*The Institute of Electrical and Electronic Engineers – IEEE*) od kilku lat wprowadza i rozwija standardy związane z technikami komunikacji bezprzewodowej, jak: IEEE 802.11 – standard dla lokalnych sieci bezprzewodowych Ethernet (WLAN), 802.15.1 – standard komunikacji Bluetooth oraz 802.15.4 opisujący standard ZigBee. Bezpieczeństwo przesyłanych bezprzewodowo informacji powinno zapewnić kodowanie informacji z wykorzystaniem kluczy kodujących i dekodujących (z ich dynamiczną zmianą), stanowiących integralną część algorytmów komunikacyjnych oraz autoryzacja danych z odpowiednimi hasłami dostępu identyfikującymi użytkownika [2].

## Literatura

1. http://www.ship-technology.com/contractors/controls/.
2. Montague J., *Komunikacja bezprzewodowa – prosta, bezpieczna, popularna i z przyszłością*, Control Engineering Polska, 7(20), wrzesień 2005.
3. Montague J., *Sieci stopniowo stają się wszechobecne*, Control Engineering Polska, nr 5(18), czerwiec 2005.
4. Tutaj A., *Problemy sterowania rozproszonego*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków 2002. http://aq.ia.agh.edu.pl/Aquarium/Seminaria/2002-00-00-Tutaj-Slajdy.pdf.

*Wpłynęło do redakcji w lutym 2006 r.*

**Recenzent**

dr hab. inż. Andrzej Brykalski, prof. PS

**Adresy Autorów**

dr inż. Jerzy Szcześniak
dr inż. Jerzy Brzózka
Akademia Morska w Szczecinie
Zakład Automatyki Okrętowej
70-205 Szczecin, ul. Podgórna 51/53