

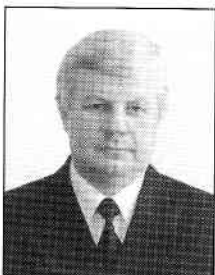
## Janusz MINDYKOWSKI

KATEDRA ELEKTROENERGETYKI OKRĘTOWEJ  
WYŻSZA SZKOŁA MORSKA W GDYNI

# Problemy pomiarów na statkach morskich

### Dr hab. inż. Janusz MINDYKOWSKI

urodził się w 1950 roku w Gdańsku. Studia wyższe ukończył w 1974 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej. W latach 1974-1976 był zatrudniony w Instytucie Automatyki Systemów Energetycznych - Oddział Gdańsk, a od 1976 pracuje w Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni. W 1981 roku doktoryzował się na Politechnice Gdańskiej w zakresie metrologii elektrycznej, a w 1993 roku na Politechnice Warszawskiej uzyskał stopień doktora habilitowanego w tej samej specjalności. Od 1993 jest zatrudniony na stanowisku profesora nadzwyczajnego w Wyższej Szkole Morskiej w Gdyni. W latach 1985-1990 był Prodziekanem Wydziału Elektrycznego ds. dydaktycznych, a od 1990 do 1993 r. Dziekanem tegoż Wydziału. W latach 1993-1996 pełnił funkcję Pełnomocnika Rektora ds. Badań Naukowych, a od 1996 Prorektor ds. Nauki Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni. Jego główne zainteresowania naukowe związane są z pomiarami i diagnostyką okrętowych systemów technicznych, a zwłaszcza elektroenergetycznych sieci okrętowych. Autor licznych publikacji i wystąpień konferencyjnych, a także wielu rozwiązań chronionych patentami i wdrożonych do praktyki przemysłowej z zakresu uprawianej specjalności. Janusz Mindykowski jest członkiem "Fellow" IEE, przewodniczącym IEE Poland Gdańsk Area, członkiem rzeczywistym Stowarzyszenia Tłumaczy Polskich, a także członkiem Polskiego Stowarzyszenia Pomiarów Automatyki i Robotyki, Polskiego Stowarzyszenia Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej oraz Polskiej Sekcji Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO).



### Streszczenie

W referacie podjęto próbę przedstawienia specyfiki zagadnień pomiarowych na statkach morskich na tle szeroko rozumianej metrologii. Statek przedstawiono jako złożony obiekt pomiarowy narażony na oddziaływanie środowiska morskiego. Omówiono rolę pomiarów w procesie eksploatacji statku. Sformułowano zadania metrologiczne dotyczące eksploatacji i diagnostyki okrętowych systemów technicznych, szczególną uwagę zwracając na podejście systemowe do pomiarów na statkach morskich. W oparciu o wybrane przykłady związane z bezpieczną i efektywną eksploatacją siłowni okrętowej oraz diagnostyką uszkodzeń w elektroenergetycznej sieci okrętowej sformułowano wnioski końcowe. Niniejszy artykuł w znacznej mierze jest oparty na referacie [12] przedstawionym przez autora podczas obrad XXX MKM'98.

### Abstract

In the paper the trial of presentation of specific measurement problems under ships conditions in the context of widely understood metrology has been undertaken. The ship as a complex measuring object exposed to influence of the sea environment was presented. Short characteristics of this environment were given and the diversity and great dynamics of disturbing factors attendant upon measurements were pointed out. The role of measurements in ship exploitation processes, under assumption, that a ship is mainly a transport means for carrying cargoes and persons, was discussed. Metrological tasks concerning exploitation and diagnostics of ship technical systems were formulated. A particular attention was paid to system approach to measurements on sea ship. On the basis of given appropriate examples connected with safe and effective exploitation of ship power plant and diagnostics of failures in ship electrical power network the final conclusions were formulated. This paper is significantly based on the author's presentation [12] during the debate of the MKM'98 conference.

### Wprowadzenie

Pomiary na statkach morskich związane są z dwoma zagadnieniami tj. technologią budowy statków oraz procesem ich eksploatacji. Pierwszym, dotyczącym budownictwa okrętowego,

zajmuje się metrologia okrętowa, dyscyplina w znacznej mierze ukształtowana przez Skrzymowskiego [19], [20] i Nieblyskiego [16], [17]. Istotą metrologii okrętowej jest połączenie właściwości wybranych metod i narzędzi pomiarowych z procesami technologicznymi budowy statków. Przykładowo, w niektórych pomiarach korzystnie jest stosować klasyczne przyrządy pomiarowe (system GEOSTAT [19]), w innych lepiej posługiwać się optyczną bazą w postaci wiązki światła laserowego (system LA-STAT [19]), czasami zaś najbardziej odpowiednie są metody fotogrametryczne (system FOTOSTAT [19]).

Podstawowym warunkiem dalszego rozwoju metrologii okrętowej staje się dążenie do eliminacji analitycznych czynności wykonywanych rachunkowo i zastępowanie ich systemami wspomaganiami komputerowego, docelowo zaś - takie powiązanie procesów technologicznych z czynnościami pomiarowymi, aby kontrola powykonawcza była ograniczona jedynie do specjalnych przypadków [19].

Drugie ze wspomnianych na wstępie zagadnień dotyczy procesu eksploatacji statku, który trwa od momentu przekazania jednostki armatorowi aż do chwili jego kasacji [4]. Tak zdefiniowana eksploatacja obejmuje problemy pomiarowe związane nie tylko z użytkowaniem statku w czasie pełnienia przez niego funkcji transportowych, ale również w procesie remontowym w czasie przywracania mu resursu [5].

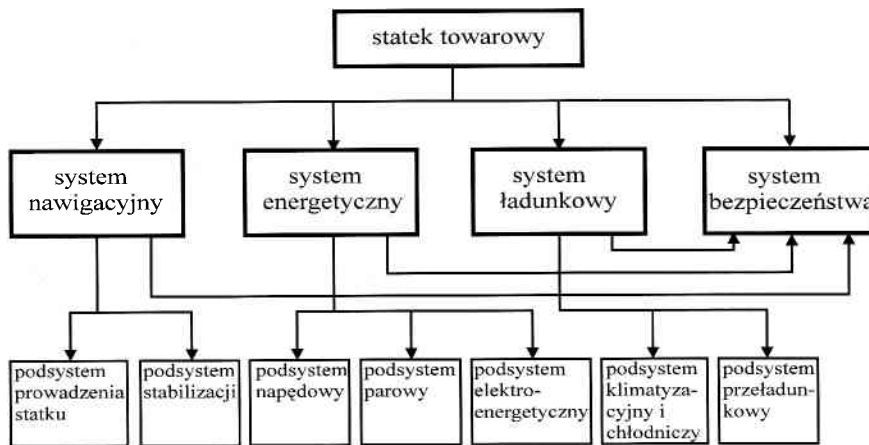
Powyższymi zagadnieniami zajmuje się metrologia eksploatacyjna statku; dyscyplina, na której powstanie i opis w przytoczonym zarysie znaczące piętno wywarły prace Majewskiego [4], [5], [6].

Istotą metrologii eksploatacyjnej statku jest odpowiednie zastosowanie znanych oraz opracowanie nowych technik pomiarowych, przydatnych w procesach eksploatacji i diagnostyki okrętowych urządzeń technicznych, z uwzględnieniem wymagań środowiska morskiego. Warto dodać, iż w procesie eksploatacji statku ważną rolę odgrywa nie tylko metodyka postępowania eksploatacyjno-diagnostycznego, ale również diagnostyczno-naprawczego.

Tematykę niniejszego artykułu ograniczono do wybranych problemów pomiarowych na statkach morskich związanych z procesem ich właściwej eksploatacji, przy czym statek traktowany jest jako środek transportowy do przewozu towarów. Przy takim podejściu wskaźnikiem decydującym o racjonalnej eksploatacji statku jest zysk wynikający z realizacji jego funkcji handlowej. Wówczas jednym z głównych problemów armatora jest ustalenie relacji między stawkami frachtowymi za przewożone ładunki, a nakładami na eksploatację statku, w tym również na jego infrastrukturę metrologiczną. Zagadnienie jest o tyle trudne, że wymaga rozwiązania przy założeniu dłuższego horyzontu czasowego i predykcji zmian warunków otoczenia.

### Statek jako obiekt pomiarowy

Współczesny, zautomatyzowany statek, jako obiekt sterowania i pomiarów stanowi strukturę złożoną z czterech głównych systemów: nawigacyjnego, energetycznego, ładunkowego i bezpieczeństwa, zawierających odpowiednie podsystemy (rys.1):



Rys. 1. Schemat funkcjonalny zautomatyzowanego statku

przewodzenia statku, stabilizacji, napędowy, parowy, elektroenergetyczny, klimatyzacyjny i chłodniczy oraz przeładunkowy [13].

Pośród bloków pokazanych na rysunku 1 znaczącą rolę pełni podsystem elektroenergetyczny, będący nie tylko niezwykle ważnym ogniwem szeroko rozumianego systemu energetycznego, ale mający również decydujące znaczenie dla pracy systemów: nawigacyjnego i ładunkowego. Warto zwrócić uwagę na ścisłe związki łączące podsystemy elektroenergetyczny i napędowy, szczególnie na statkach, gdzie energia elektryczna wytwarzana jest nie tylko w sposób konwencjonalny (zespoły prądo-

Biorąc powyższe pod uwagę, należy stwierdzić, że współczesny statek to złożony obiekt transportowy, zawierający wiele bardzo różnych zespołów o dużym stopniu autonomności, ale jednocześnie o dużej interakcji.

### Krótką charakterystyka środowiska morskiego

Klasyfikacja narażeń środowiskowych w odniesieniu do warunków morskich obejmuje następujące czynniki środowiskowe [8], [22]:

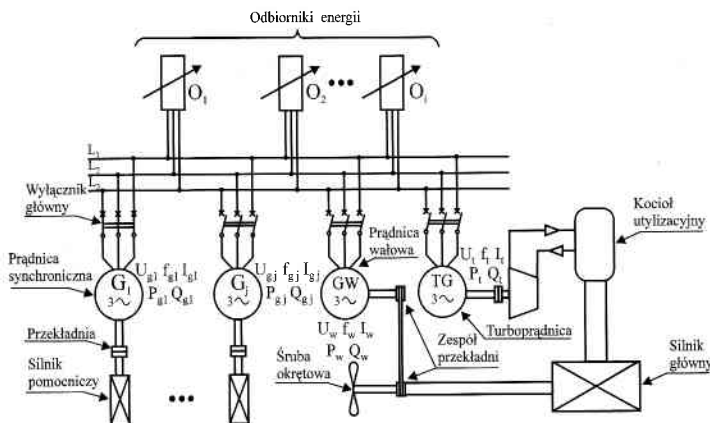
- klimatyczne,
- biologiczne i chemiczne,
- mechaniczne,
- elektryczne i elektromagnetyczne.

Blizsze informacje odnośnie czynników klimatycznych, biologicznych i chemicznych, a także zakres badań i prób środowiskowych, tj. rodzaje prób i ich parametry można znaleźć w pracach [8], [22], [23].

Z narażeń występujących w środowisku morskim, podstawowy wpływ na pracę elektrycznych urządzeń okrętowych zarówno, pod względem jakości, jak i niezawodności ich funkcjonowania, mają warunki mechaniczne. Czynniki mechaniczne, wśród których główne narażenia stanowią drgania i wibracje, są przede wszystkim powodowane pracą silników głównych i pomocniczych, względnie innych urządzeń, zawierających poruszające się masy. A zatem zależą one przede wszystkim od rodzaju i typu stosowanych napędów. Istotną rolę na powstawanie tego typu narażeń ma również falowanie morza, które może być przyczyną dużych uderzeń (wstrząsów) o charakterze nieokresowym, przy czym falowanie wnosi udary głównie dla małych jednostek.

Występujące na statkach natężenia pól magnetycznych, elektrycznych oraz elektromagnetycznych zazwyczaj zmieniają się w szerokich granicach, a ich intensywność może być bardzo duża. Wśród elektrycznych i elektromagnetycznych parametrów środowiskowych ważną rolę odgrywa natężenie pola elektromagnetycznego, generowanego w wyniku pracy nadajników radiowych oraz zakłócenia przenoszone przez wspólną sieć zasilającą [2], [12], [14].

Wśród czynników zakłócających funkcjonowanie rozważanej sieci elektroenergetycznej można wyróżnić zarówno czynniki związane z wytwarzaniem, jak i użytkowaniem energii elek-



Rys. 2. Przykładowy schemat elektroenergetycznej trójfazowej sieci okrętowej zasilanej z różnych źródeł energii

twórcze napędzane silnikami spalinyowymi), ale również za pomocą prądnic wałowych napędzanych silnikiem głównym statku czy też turboprądnic zasilanych energią gazów odlotowych tego silnika (rys.2) [13], [14], [21].

System ładunkowy, z punktu widzenia podstawowej, handlowej funkcji statku, ma zasadnicze znaczenie dla jego efektywnej eksploatacji. Natomiast system bezpieczeństwa, wprowadzany sukcesywnie na statki wraz z rozwojem zintegrowanych systemów kontrolno-pomiarowych [13], opartych przeważnie o mikroprocesorowe rozproszone układy pomiarowe [7], pełni rolę nadrzędną, zabezpieczającą w stosunku do pozostałych systemów technicznej eksploatacji statku. Jego zadanie to nadzór nad bezpieczeństwem ludzi, systemów technicznych, ładunku i środowiska naturalnego, w jakim statek jest eksploatowany.

trycznej [2], [14]. Zakłócające działanie zespołów prądowórczych zależy przede wszystkim od funkcjonowania układów regulacji napięcia i częstotliwości (w przypadku wolnostojących zespołów prądowórczych - regulatorów prędkości obrotowej) prądnic okrętowych, a także od parametrów samych prądnic i ich jednostek napędowych. Osobne zagadnienie stanowi współpraca prądnic wałowych z siecią okrętową, zwłaszcza przy wykorzystaniu do tego celu falowników i filtrów harmonicznym. Zakłócające działanie odbiorników energii elektrycznej na jej jakość w sieci okrętowej objawia się przede wszystkim jako:

- stany przejściowe wynikające z załączania i wyłączania dużych odbiorników energii elektrycznej,
- zakłócenia powodowane nieprawidłową pracą i uszkodzeniami odbiorników energii elektrycznej,
- wprowadzanie wyższych harmonicznym prądu do sieci przez obciążenia o charakterze nieliniowym, głównie przekształtniki tyrystorowe,
- asymetria obciążenia.

Innym charakterystycznym elementem elektroenergetycznych systemów okrętowych jest występowanie zakłóceń radioelektrycznych tzn. zakłóceń szerokopasmowych, zarówno o widmie dyskretnym jak i ciągłym w paśmie pracy urządzeń radiotelewizyjnych. Zakłócenia tego rodzaju mają istotny wpływ przede wszystkim na pracę urządzeń elektronicznych, ale również mogą mieć wpływ na poprawne funkcjonowanie urządzeń elektrycznych i układów automatyki. W rzeczywistych warunkach okrętowych, ze względu na ekranowanie, przewody sieci zasilającej stanowią główną drogę rozchodzenia się zakłóceń radioelektrycznych. Zakłócenia radioelektryczne w elektroenergetycznej sieci okrętowej powodowane są zarówno normalną pracą zainstalowanych w systemie odbiorników energii elektrycznej, zwłaszcza procesami łączeniowymi, jak również pracą urządzeń radiowych i energoelektronicznych. Ponadto zakłócenia te mogą być generowane uszkodzeniami elementów systemu, a także wyładowaniami elektrostatycznymi i naturalnym środowiskiem elektromagnetycznym, kształtowanym np. przez wyładowania atmosferyczne.

Aparatura kontrolno-pomiarowa stosowana na statkach musi być odporna na wszystkie narażenia występujące w środowisku morskim [8].

### **Rola pomiarów w procesie eksploatacji statku**

Z analizy statku jako obiektu sterowania i kontroli procesów związanych z jego eksploatacją wynikają następujące zadania pomiarowe, które muszą być realizowane w odpowiednich dziedzinach:

- nawigacja:
  - pomiary, filtracja i estymacja współrzędnych położenia statków (pomiary pozycji statku własnego i statków obcych) dla potrzeb sterowania jego ruchem wzdłuż zadanej trajektorii oraz wykorzystania w systemach antykolizyjnych;
  - pomiary parametrów charakteryzujących ruch statku (określanie wektora prędkości, wyznaczanie kursu, zanurzenia, trymu, kołysań bocznych statku, kierunku i siły wiatru, pomiary nastaw pędników).
- bezpieczna i ekonomiczna eksploatacja siłowni okrętowej, tj. silnika głównego oraz wszelkich mechanizmów i urządzeń znajdujących się w siłowni:
  - pomiary parametrów ruchu mechanicznych urządzeń napędzających prądnicę oraz wybrane parametry charakterystyczne, jak na przykład jakość podawanego do nich paliwa i skład wydalanych spalin,

- pomiary parametrów, na ogół temperatur, ciśnień, lepkości i przepływów płynów w wybranych punktach, decydujących o warunkach pracy SG, zespołów silnik spalinowy/prądnic oraz mechanizmów i urządzeń siłownianych,
- pomiary momentu, mocy i prędkości obrotowej na wale śruby SG dla celów ekonomicznej eksploatacji siłowni okrętowej i diagnostyki SG,
- pomiary wielkości charakteryzujących sieć okrętową (napięcia, prądy, moce, częstotliwość,  $\cos \phi$ , rezystancja izolacji).
- przewóz ładunków:
  - pomiary parametrów ładunku decydujących o jego cechach jakościowych,
  - pomiary ilości/masy przewożonego ładunku,
  - pomiary rozmieszczenia ładunku (kalkulatory ładunkowe)
  - pomiary parametrów mediów technologicznych, umożliwiających przewóz ładunku.
- bezpieczeństwo:
  - kontrola wartości granicznych, a także trendów ich zmian, parametrów decydujących o bezpiecznej pracy systemów technicznych oraz o bezpieczeństwie ludzi, ładunku i środowiska morskiego.

Wyszczególnione powyżej zadania metrologiczne dotyczą zarówno pomiarów eksploatacyjnych, jak i diagnostycznych, choć należy wyraźnie podkreślić, iż wytyczenie ścisłej granicy między nimi jest praktycznie niemożliwe. Celem pomiarów eksploatacyjnych jest określenie aktualnej wartości parametrów danego systemu oraz kontrola prawidłowości jego pracy i związanych z nią procesów.

W odniesieniu do systemów okrętowych pokazanych na rys.1 pomiary eksploatacyjne wykorzystywane są dla potrzeb sterowania ręcznego bądź automatycznego, a ich celem nadrzędnym jest bezpieczna i efektywna eksploatacja statku.

W przypadku sterowania ręcznego, wyniki pomiarów eksploatacyjnych odczytywane są bezpośrednio z mierników zainstalowanych w Rozdzielnicy Głównej bądź odnośnych pulpitał CMK lub mostka nawigacyjnego i wykorzystywane w układach regulacji wieloparametrowej, których podstawowym ogniwem jest człowiek.

W przypadku sterowania automatycznego wykorzystuje się przetworniki pomiarowe przetwarzające kontrolowane wielkości elektryczne i nieelektryczne na sygnały stałoprądowe o znormalizowanych wartościach napięcia lub prądu, zainstalowane w pętlach sterowania automatycznego odpowiednich układów regulacji. Niezależnie od lokalnych mierników i przetworników pomiarowych, na nowoczesnych statkach morskich powszechnie wykorzystuje się autonomiczne i zintegrowane systemy pomiarowo-kontrolne [13]. Warto podkreślić, iż postulat bezpiecznej eksploatacji i wysokiej niezawodności rozważanych systemów implikuje szerokie stosowanie układów redundancyjnych.

Natomiast cel wcześniej wspomnianych pomiarów diagnostycznych, będących w zamierzeniu uzupełnieniem i rozszerzeniem pomiarów eksploatacyjnych, zależy od stanu technicznego badanego obiektu. Pomiary dotyczące diagnostyki obiektów sprawnych mają na celu zapewnienie optymalnych warunków ich użytkowania oraz w miarę pełnego wykorzystania reśursów przy zminimalizowaniu prawdopodobieństwa awarii. Zakres diagnostycznych pomiarów urządzeń sprawnych to głównie obliczanie uśrednionych wartości określonych parametrów i predykcja ich zmian, alarmowanie o przekroczeniu wartości granicznych i ich rejestracja, diagnozowanie stopnia zużycia poszczególnych elementów oraz prognozowanie czasu ich wymiany lub naprawy. Odmienny charakter mają pomiary diagnostyczne przeprowadzane na obiektach uszkodzonych; ich podstawowym celem jest zminimalizowanie czasu niezbędnego do wykrycia miejsca, przyczyny oraz skutków uszkodzenia w odniesieniu do obiektu i jego

otoczenia. Stąd, zadaniem pomiarów diagnostycznych w odniesieniu do elementów i urządzeń uszkodzonych jest detekcja, lokalizacja i identyfikacja istniejących niesprawności. Realizacja pomiarów diagnostycznych w systemach okrętowych odbywa się poprzez stacjonarne lub przenośne urządzenia i systemy diagnostyczne, na ogół stanowiące sprzężenie testera ze specjalnie oprogramowanym komputerem [4], [13].

### Specyfikacja pomiarów na statkach morskich

Śledząc ewolucję metod i instrumentarium pomiarowego stosowanego na statkach, można dojść do konkluzji, iż pomiary w technice okrętowej od modelu pomiarów bezpośrednich i pośrednich przeszły w fazę pomiarów systemowych. Według interpretacji przedstawionej przez Jaworskiego, najważniejsze cechy charakterystyczne pomiaru systemowego to [3]:

- musi być on traktowany łącznie z obiektem mierzonym,
- towarzyszy mu instrumentarium, zwane zwykle systemem pomiarowym, realizujące zespół operacji, z których warto wymienić:
  - detekcję sygnałów z obiektu mierzonego,
  - formowanie sygnałów - wymuszeń pobudzających obiekt,
  - przetwarzanie analogowo-cyfrowe sygnałów, na które składa się próbkowanie, kwantowanie i kodowanie cyfrowe,
  - przetwarzanie operacyjne sygnałów, głównie cyfrowe, realizowane z wykorzystaniem techniki komputerowej, polegające na formowaniu sygnałów przenoszących informacje o wielkościach mierzonych; zwykle mamy do czynienia z przetwarzaniem wielotorowym,
- pomiar dotyczy wielu wielkości mierzonych, oprócz których zawsze dodatkowo mierzy się wielkości wpływające.

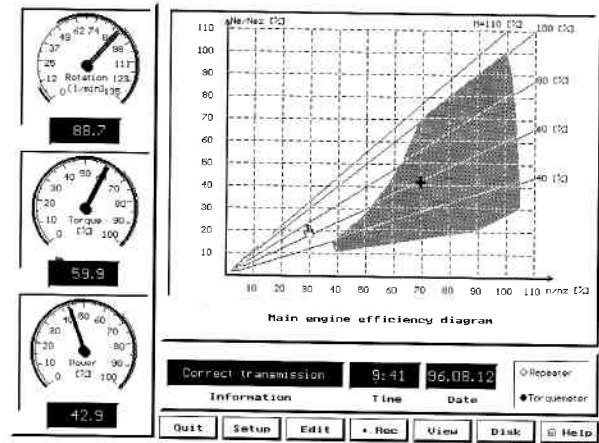
Jednym z fundamentalnych zagadnień dotyczących eksploatacji statku jest minimalizacja zużycia paliwa, przy spełnieniu określonych warunków. Rozwiązanie tego zagadnienia wiąże się zwykle z wykorzystaniem mikroprocesorowego urządzenia do pomiaru momentu, mocy i prędkości kątowej na wale śruby napędu głównego statku, gdzie pomiar rozumiany jest systemowo, zgodnie z przedstawionymi wcześniej przesłankami.

#### Przykład 1.

Rozważany system pomiarowy jest ściśle związany z obiektem - silnikiem głównym (SG), którego charakterystyka (pole dopuszczalnej pracy [15] - rys. 3) stanowi podstawę do podejmowania właściwych decyzji eksploatacyjnych.

Instrumentarium, którym przykładowo może być mikroprocesorowy momentomierz typu TNP-7 [15], [18] realizuje następujące funkcje:

- pomiar prędkości kątowej wału napędowego,
- pomiar momentu obrotowego przenieszonego przez wał śruby,
- obliczanie wartości mocy przenieszonej przez wał śruby, oraz jako opcje dodatkowe:
  - obliczanie tzw. normowego zużycia paliwa na podstawie charakterystyki silnika spalinowego,
  - uwzględnianie w pomiarach mocy prądnicy zainstalowanej na wale śruby,



Rys. 3. Monitorowanie momentu, mocy i prędkości kątowej wału śruby w polu charakterystyk SG

- transmisja wyników pomiarów i obliczeń do zewnętrznego systemu komputerowego - układów automatyki.

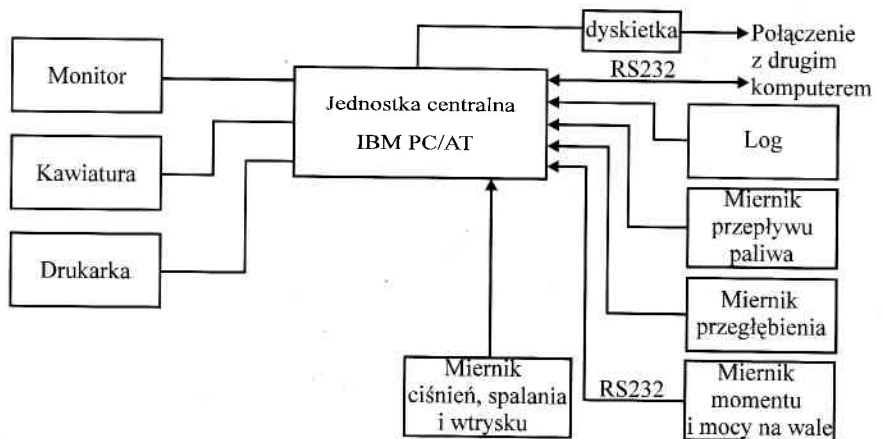
Funkcjonowanie przedstawionego systemu mikroprocesorowego w swojej istocie związane jest z przywołanymi wcześniej operacjami na sygnałach i dotyczy trzech wielkości mierzonych, przy pomiarze których uwzględnia się liczne wielkości wpływające.

#### Przykład 2.

Jeszcze wyraźniej znaczenie podejścia systemowego do pomiaru widać na przykładzie komputerowego systemu wspomaganie eksploatacji siłowni okrętowej (rys.4), [18], którego omawiany momentomierz jest integralną częścią.

System wspomaganie eksploatacji siłowni okrętowej [18] dokonuje:

- pomiarów zużycia paliwa i obliczeń wartości wskaźników jakości:
  - zużycia paliwa na jednostkę energii [g/kWh],
  - zużycia paliwa na jednostkę czasu - godzinę, dobę, podróż,
  - zużycia paliwa na jednostkę przebytej drogi [t/Nm].



Rys. 4. Schemat blokowy komputerowego systemu wspomaganie eksploatacji siłowni okrętowej

- pomiarów i monitorowania na ekranie: czasu GMT, momentu siły i mocy na wale silnika oraz jego obrotów, dynamicznego przegłębienia kadłuba, prędkości statku, poślizgu śruby,
  - obliczeń: średniej prędkości statku potrzebnej do osiągnięcia punktu docelowego w zadanym czasie (ETA), drogi przebytej od początku podróży i od początku aktualnej doby, drogi pozostałej do punktu docelowego,
  - monitorowania ww. wskaźników oraz parametrów w postaci wykresów ułatwiających podejmowanie decyzji odnośnie warunków eksploatacji silnika oraz stwarza możliwości sporządzania raportów sprawozdawczych dla służb eksploatacji armatora,
  - na żądanie operatora, nie przerywając pomiarów zużycia paliwa i innych wielkości, system dokonuje pomiarów ciśnień spalania i wtrysku po uprzednim załączeniu przystawki z przetwornikami i czujnikami ciśnień.
- System jest przydatnym narzędziem do:
- optymalizacji zużycia paliwa,
  - optymalizacji trasy przez obliczenie najbardziej ekonomicznej drogi przy zmiennych warunkach zewnętrznych,
  - obserwacji danych o osiągnięciach układu napędowego statku w długich przedziałach czasu,
  - ustalenia najbardziej odpowiednich parametrów pracy silnika głównego przy różnych prędkościach statku.

Nadto, system rejestruje i monitoruje wartości wskaźników eksploatacyjnych statku pozwalając obserwować krótkotrwałe i długotrwałe trendy ich zmian.

Znana skądinąd teza, iż znajomość obiektu jest podstawowym warunkiem dla właściwej oceny stanu technicznego urzą-

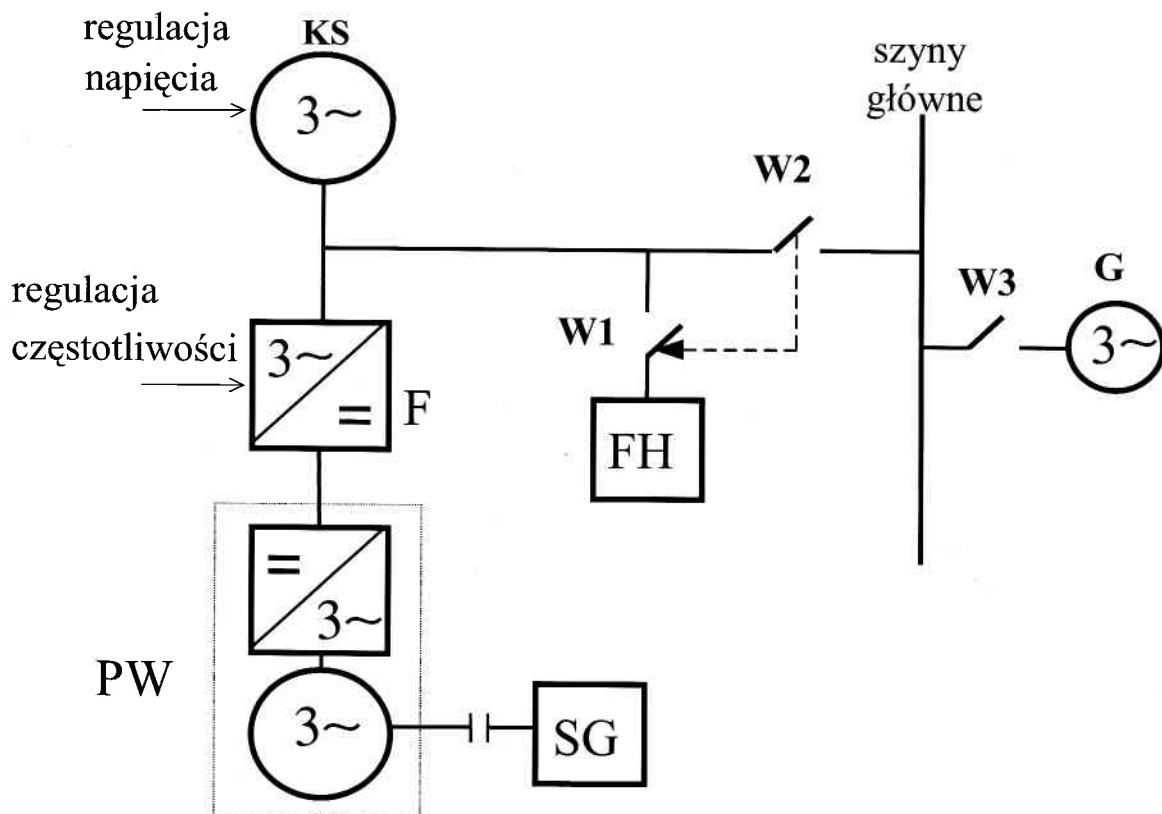
żeń w oparciu o przeprowadzone pomiary w warunkach morskich nabiera wyjątkowej ostrości. Tutaj niezajomość obiektu prowadzi do niewiarygodnych nieporozumień, o czym świadczą liczne przykłady z praktyki okrętowej.

### Przykład 3.

Można założyć, iż na wyjściu prądnic synchronicznych (rys.2) będących podstawowymi źródłami energii elektrycznej w sieciach okrętowych otrzymuje się przebiegi napięć praktycznie sinusoidalnych [21], natomiast pojawienie się dodatkowych harmonicznych w sieci jest wynikiem włączania i wyłączania nieliniowych odbiorników. Znaczący poziom zawartości harmonicznych pojawia się w czasie procesów komutacyjnych i ma charakter zanikający.

Odmienne mechanizmy powstawania zakłóceń ma miejsce w przypadku wytwarzania energii elektrycznej w oparciu o prądnice wałową z wykorzystaniem falowników. Zachodzi wówczas potrzeba włączania równoległe do sieci odpowiednich filtrów harmonicznych, których zadaniem jest ograniczenie dopuszczalnego poziomu zniekształceń od strony źródła.

W przykładowym rozwiązaniu elektrowni okrętowej przedstawionym na rys.5 [1] prądnica wałowa wytwarza energię prądu stałego, poprzez zainstalowanie prostowników bezpośrednio w prądnicy trójfazowej sprzężonej z silnikiem głównym. Energia prądu stałego zamieniana jest w falowniku trójfazowym na przebieg zmienny o częstotliwości podstawowej  $f_0$  odpowiadającej żądanej częstotliwości napięcia na szynach głównych. Do wyjścia falownika podłączony jest kompensator synchroniczny. Wartości częstotliwości falownika i napięcia kom-



Rys. 5. Kompensacja zakłóceń w układzie wytwarzania energii elektrycznej na statku z wykorzystaniem prądnicy wałowej, gdzie:  $W_i$  - wyłączniki,  $G$  - generator synchroniczny,  $F$  - falownik,  $FH$  - filtr harmonicznych,  $PW$  - prądnica wałowa,  $SG$  - silnik główny,  $KS$  - kompensator synchroniczny

sensora synchronicznego kontrolowane są przez odpowiednie elektroniczne układy regulacji.

Po włączeniu prądnicy wałowej do pracy równoległej z generatorem synchronicznym, do szyn podłączany jest filtr harmonicznym FH (zwykle pasywny filtr LC), którego zadaniem jest wyeliminowanie szkodliwych przebiegów, najczęściej do 7 harmonicznej włącznie.

Na rys.6 przedstawione są, zdjęte na obiekcie rzeczywistym, przebiegi oscylogramów napięcia na szynach głównych okrętowej sieci elektroenergetycznej przy pracy prądnicy wałowej z częściowo uszkodzonymi kondensatorami filtra harmonicznym [1]. Rozważane oscylogramy napięć pozwalają na wyróżnienie dwóch rodzajów zniekształceń, które w sposób niezależny negatywnie oddziałują na urządzenia i układy zasilane z okrętowego systemu elektroenergetycznego. Zniekształcenia niskoczęstotliwościowe, będące wynikiem uszkodzenia filtra harmonicznym oraz wysokoczęstotliwościowe, wynikające z procesów komutacyjnych.

Zarejestrowane przypadki niesprawności dotyczyły m.in. całkowicie przypadkowych wyłączeń systemu łączności satelitarnej GMDSS (Global Maritime Distress and Safety System), mającego istotne znaczenie dla bezpiecznej eksploatacji statku. Awarie te były zgłaszane przez radio serwisowi i poddane wielokrotnej weryfikacji w różnych portach, gdzie uszkodzeń nie potwierdzano. Przyczyną takiego stanu rzeczy był fakt, iż w porcie okrętowy system elektroenergetyczny zasilany jest jedynie poprzez klasyczne generatory synchroniczne (w tym czasie prądnica wałowa nie pracuje) i wówczas prawidłowa diagnoza w rozważanym zakresie jest niemożliwa, a wcześniej zgłoszone do naprawy urządzenia w nowych warunkach zasilania pracują prawidłowo.

Przytoczone zdarzenie nie należy do wyjątkowych, a konsekwencje tego typu sytuacji mają negatywny wpływ zarówno na przebieg wacht, jak również na szeroko pojęte bezpieczeństwo życia na morzu.

Remedium byłoby zastosowanie specjalnych urządzeń [11] do monitorowania zarówno zniekształceń harmonicznym, jak również wysokoczęstotliwościowych niezależnie dla każdej z faz. Jest to szczególnie istotne ze względu na lawinowo rosnące nasycenie wysoko zaawansowaną elektroniką statków nowobudowanych, a także modernizacje, np. w oparciu o sterowniki mikroprocesorowe, układów automatyki na statkach już eksploatowanych.

Przytoczony przykład świadczy o skali trudności eksploatacji i diagnostyki rozważanych systemów elektroenergetycznych. Warto zauważyć, że poziom zniekształceń i zakłóceń zazwyczaj

zwiększa się z upływem czasu i w zasadzie nie podlega on kontroli towarzystw klasyfikacyjnych.

## Wnioski

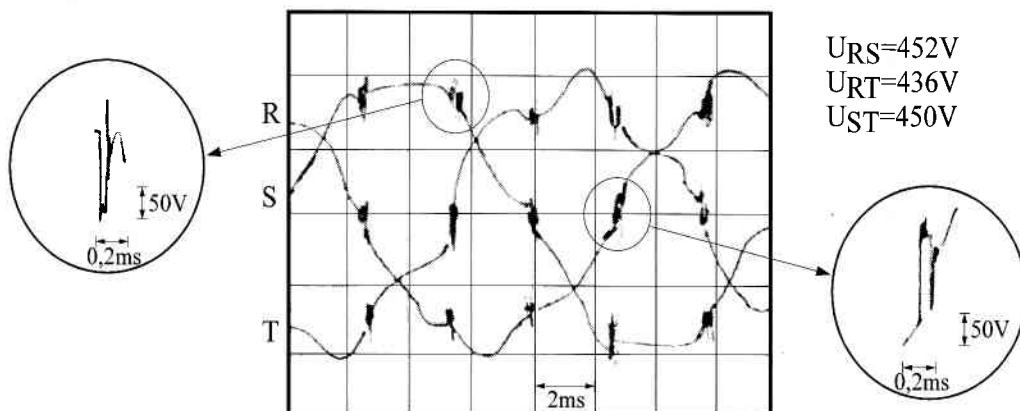
Współczesny, zautomatyzowany statek jest złożonym obiektem technicznym, o dużym nasyceniu układami pomiarowo-kontrolnymi, pracującymi w niezwykle trudnych warunkach środowiska morskiego.

Bezpieczna i efektywna eksploatacja statku w znacznej mierze zależy od jakości eksploatacyjnych i diagnostycznych pomiarów charakteryzujących funkcjonowanie okrętowych systemów technicznych. Biorąc pod uwagę ich wzajemne powiązania i wymaganą dużą niezawodność, powszechnie stosuje się zasadę redundancji pomiarów oraz rozproszone systemy pomiarowe.

Tendencje rozwojowe w dziedzinie pomiarów na statkach wiążą się z przejściem od lokalnych i autonomicznych układów pomiarowych do zintegrowanych systemów kontrolno-pomiarowych, gdzie pomiar traktuje się systemowo. Zmiany obejmują zarówno udoskonalenie procesu poboru informacji pomiarowej (czujniki i przetworniki), jak też jej przetwarzania i transmisji. Proces poboru informacji wiąże się z zastosowaniem nowych przyrządów i urządzeń pomiarowych o podwyższonej odporności zakłóceń w warunkach morskich i korzystniejszych parametrach metrologicznych. Rozwój w zakresie przetwarzania i transmisji informacji pomiarowych związany jest głównie z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów i wprowadzaniem procedur ekspertowych, wspomagających procesy decyzyjne, a także z powszechnym stosowaniem technik optoizolacyjnych i łącz światłowodowych. Na szczególną uwagę zasługuje bardzo szybki rozwój specjalistycznego oprogramowania komputerów okrętowych, m.in. w zakresie diagnostyki silnika głównego, optymalizacji zużycia paliwa, czy też automatycznego sterowania pracą elektrowni okrętowej. Jednym z fundamentalnych zagadnień dotyczących pomiarów na statkach, związanych z eksploatacją i diagnostyką wyspospecjalizowanych urządzeń, jest dogłębna znajomość obiektu, tj. kontrolowanych systemów okrętowych.

## Literatura

- [1] B. Dudojć, J. Mindykowski: Pomiary diagnostyczne filtrów harmonicznym jako instrument poprawy jakości energii w sieciach okrętowych, Zeszyty Naukowe WSM w Gdyni, Nr 31, 1997, s.120-131.



Rys. 6. Przykładowy przebieg zniekształconych napięć w okrętowej sieci elektroenergetycznej przy uszkodzonym filtrze harmonicznym

- [2] M. Gonera: Źródła i mechanizmy powstawania zakłóceń w systemach pomiarowych analogowych układów scalonych, Prace PIE, 1995, s.124.
- [3] J. Jaworski: Pomiar, model, eksperyment, identyfikacja, Materiały Konferencyjne MKM'96, Częstochowa 1996, s.244-257.
- [4] J. Majewski: Eksploatacja i diagnostyka elektrycznych urządzeń okrętowych, Skrypt monograficzny. WSM Gdynia, 1997.
- [5] J. Majewski: Pomiary w eksploatacji i diagnostyce, Zeszyty Naukowe WSM w Gdyni nr 21; Pomiary eksploatacyjne i diagnostyczne obiektów technicznych, WSM Gdynia, 1991.
- [6] J. Majewski: Metrologia eksploatacyjna statku, Skrypt monograficzny. Cz.1. Specyfika i metody, Cz.2. Przetwarzanie i opracowanie sygnału, Cz.3. Urządzenia, systemy, pomiary. WSM Gdynia, 1992.
- [7] R. Maśnicki, J. Mindykowski: Od przetworników elektro-mechanicznych do przyrządów wirtualnych w pomiarach czasowych związków między sygnałami elektrycznymi w elektroenergetycznej sieci okrętowej, Zeszyty Naukowe WSM w Gdyni, Nr 31, 1997, s.40-61.
- [8] J. Mindykowski, D. Pajórek, H. Pepliński: On selecting the control-measuring instruments for ship power plants in compliance with the requirements of classification societies, Polish Maritime Research No 1/March 1998, s.18-22.
- [9] J. Mindykowski, B. Dudójć: Wybrane problemy pomiarów i transmisji sygnałów w obszarach zagrożonych wybuchem na statkach morskich, VIII Krajowa Konferencja Metrologii, Warszawa 1995, s.59-64.
- [10] J. Mindykowski, T. Tarasiuk: Zagadnienie jakości wytwarzania i użytkowania energii elektrycznej w okrętowym systemie elektroenergetycznym, Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, Tom II, Zeszyt 2, 1996, s.71-81.
- [11] J. Mindykowski, T. Tarasiuk: Specialized analyser for electrical energy quality estimation in ship electrical power system, IEEE Conference IMTC'98 "Where instrumentation is going", Vol.2., St.Paul, 1998, s.791-796.
- [12] J. Mindykowski: Problemy pomiarów na statkach morskich. Materiały konferencyjne MKM'98, Część II Szczecin 98. Referaty zaproszone, s. 35-48.
- [13] J. Mindykowski, Li Jieren: Measurements of exploitation and diagnostic parameters of ship power system, Polish Maritime Research, June 1997, s.46-50.
- [14] J. Mindykowski, T. Tarasiuk: Nowe podejście do problemu jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach okrętowych, Zeszyty Naukowe WSM w Gdyni, Nr 31, 1997, s.9-39.
- [15] L. Morawski, M. Sikora, J. Tański: Mikroprocesorowe urządzenie do pomiaru momentu, mocy i prędkości kątownej na wale śruby napędu głównego statku, Materiały Konferencyjne SP'96 "Systemy pomiarowe w badaniach naukowych i w przemyśle", Zielona Góra 1996, s.179-189.
- [16] J. Niebylski: Geodezyjne pomiary w nachylonych układach odniesienia dla potrzeb budownictwa okrętowego - Prace Naukowe PS nr 229/1984.
- [17] J. Niebylski: Podstawy teoretyczne metody niwelacji optycznej i technika pomiarowa, Geodezja i Kartografia XXVII nr 4, Warszawa 1978.
- [18] J. Pomirski, L. Morawski: Mikrokomputerowy system wspomaganie bezpiecznej eksploatacji okrętowego silnika napędu głównego. Zeszyt Szkoleniowy Nr 31 "Zagadnienia bezpiecznej eksploatacji urządzeń okrętowych", Stowarzyszenie Starszych Mechaników Morskich, 1995, s. 65-77.
- [19] E. Skrzymowski, J. Niebylski: Metrologia okrętowa jako nowa dyscyplina nauki, Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska, wrzesień-październik 1998, s.14-16.
- [20] E. Skrzymowski i inni: Wytyczne wykonania geodezyjnych pomiarów stoczni i statków morskich - "Wema", Warszawa 1976.
- [21] S. Wyszowski: Elektrotechnika Okrętowa t.1, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1991.
- [22] Polski Rejestr Statków, Próby środowiskowe wyposażenia statków, Publikacja Nr 11/P. Gdańsk 1991.
- [23] Polski Rejestr Statków, Przepisy Klasyfikacji i Budowy Statków Morskich 1991, Tom 6, Część XI, Gdańsk 1990.