

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Tomasz Burnos

**Zastosowanie sygnałów różnego typu
w diagnozowaniu sterów strumieniowych**

Słowa kluczowe: stery strumieniowe, analiza sygnałów, analiza czasowo-częstotliwościowa, emisja akustyczna, drgania, analiza zawartości cząstek w oleju

Przedstawiono koncepcje stworzenia modelu diagnostycznego steru strumieniowego, którego budowa oparta jest na miarach sygnałów różnego typu generowanych przez urządzenie. Rozpatrzono możliwości pozyskania informacji na temat stanu poszczególnych elementów agregatu, analizując składowe czasowo-częstotliwościowe sygnały.

Different Type Signals Used In Thrusters Diagnosis

Key words: transverse thrusters, time-frequency analysis, acoustic emission, vibrations, oil particle count analysis

The paper presents the concept of creation of a diagnostic model of thruster based on signal estimates, generated during the operation of the aggregate. Possible use of time-frequency details for individual elements of machine are taken under consideration.

Wstęp

Przepływowe stery strumieniowe są urządzeniami montowanymi na statkach w części dziobowej oraz rufowej, ułatwiającymi manewrowanie. Wykorzystywane są głównie podczas manewrów, determinuje to stawiane im wymagania, z których najważniejsza jest wysoka niezawodność. Podlegają one okresowym przeglądom, zgodnie z wymaganiami towarzystw klasyfikacyjnych w odstępach czasu nie dłuższych niż pięć lat [6]. Produkowane obecnie stery strumieniowe charakteryzują się dosyć dużą niezawodnością, jednak ze względu na spory wpływ poprawności działania tych urządzeń na bezpieczeństwo jednostki, armator podjął decyzję o objęciu ich nadzorem diagnostycznym. W odpowiedzi na zapotrzebowanie armatora, aby wprowadzić do obsługi sterów strumieniowych diagnostykę w szerokim słowa znaczeniu, w Zakładzie Diagnostyki i Remontów Maszyn Okrętowych podjęto badania nad możliwościami oceny stanu elementów agregatu na podstawie miar sygnałów generowanych przez urządzenie podczas pracy.

1. Sygnały różnego typu generowane przez ster strumieniowy

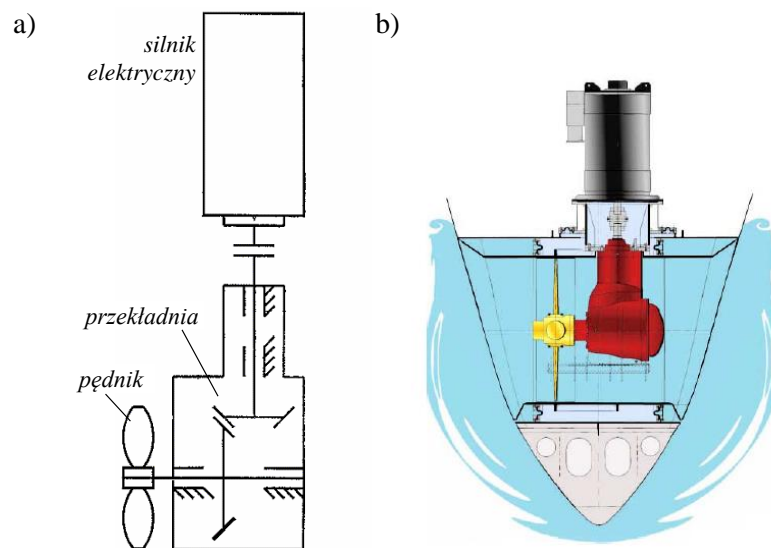
Analizując budowę steru strumieniowego i możliwości pomiaru sygnałów różnego typu, rozważono pomiary:

- sygnałów drganiowych (V_x^1), jako nośnika informacji o stanie łożysk tocznych, przekładni, sprzęgła oraz współosiowego ustawienia wałów;
- zawartości cząstek stałych w oleju smarującym (C_x), jako nośnika informacji o stanie węzłów tribologicznych smarowanych olejem;
- przebiegu nierównomierności prędkości obrotowej (ω_x), jako nośnika informacji o stanie węzłów tribologicznych (obserwacje zmian momentu oporowego);
- deskryptorów emisji akustycznej (EA_x), jako nośnika informacji o stanie pędnika, łożysk tocznych oraz obciążeniu;
- mocy pobieranej przez napęd (P_x), jako nośnika informacji o obciążeniu oraz zmianach zapotrzebowania na moc elektryczną (zmiany momentu oporowego);
- natężenia przepływu przez tunel steru (F_x), jako nośnika informacji o stanie pędnika;
- temperatury (T_x), jako nośnika informacji o stanie węzłów tribologicznych, głównie łożysk tocznych.

¹ Oznaczenia wprowadzone przez autora, indeks oznacza miarę sygnału.

Jak wynika z przedstawionego zestawienia, istnieje możliwość łączenia miar sygnałów różnego typu w celu zorientowania ich na obserwację zmian stanu poszczególnych elementów steru strumieniowego. Odwołując się do budowy steru strumieniowego (rys. 1a), można rozważyć łączenie sygnałów dla następujących elementów maszyny:

- łożysk silnika,
- wirnika silnika,
- wału silnika,
- sprzęgła łączącego,
- łożysk przekładni,
- wałów przekładni,
- kół zębatach przekładni,
- uszczelnień wału śrubowego,
- pędnika.

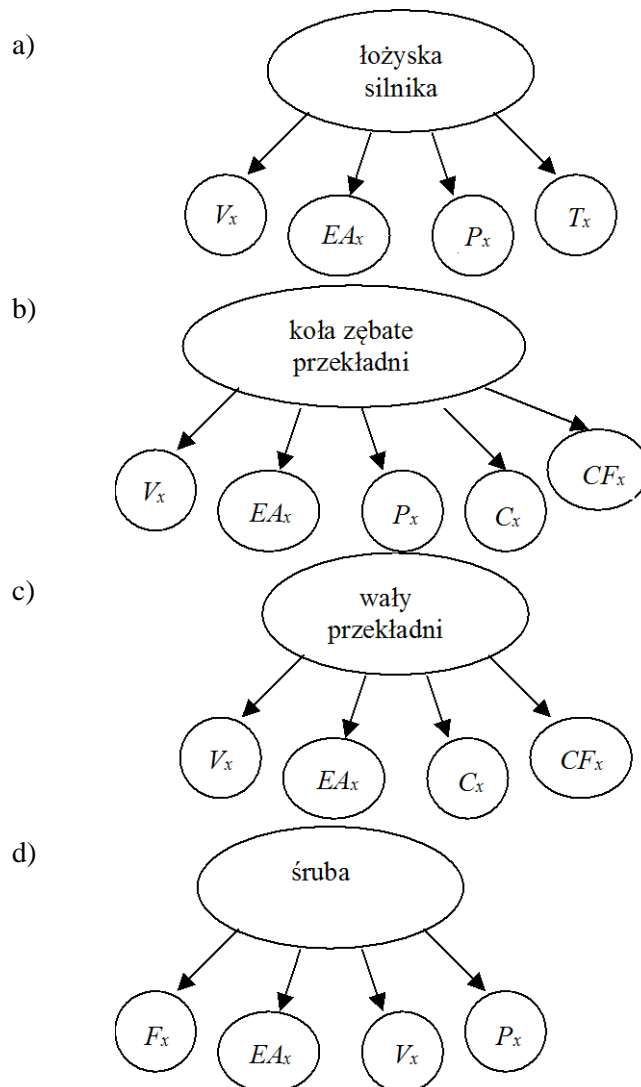


Rys. 1. Ster strumieniowy: a) schemat kinematyczny, b) sposób montażu w kadłubie statku
Fig. 1. A thruster a) kinematic diagram, b) mounting of the thruster in the hull of a ship

Na podstawie przytoczonego wcześniej zestawienia sygnałów generowanych przez ster strumieniowy dokonano grupowania miar poszczególnych sygnałów. Schematyczne, założone grupowanie sygnałów dla niektórych elementów agregatu przedstawiono na rysunku 2.

Obecna faza badań obejmuje fizyczne tworzenie lub adaptowanie torów pomiarowych dla sygnałów poszczególnych typów oraz analizy pozyskanych

sygnałów. W dalszej części artykułu zostaną przedstawione wyniki badań przeprowadzonych z wykorzystaniem sprzętu do pomiaru emisji akustycznej, drgań oraz zawartości cząstek stałych w oleju.



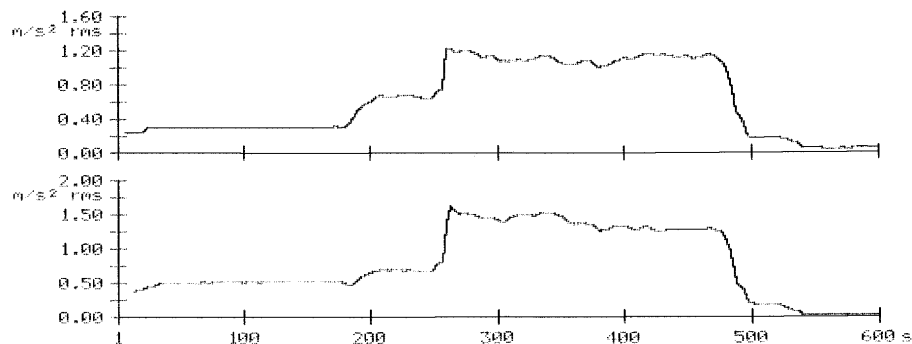
Rys. 2. Założone grupowanie sygnałów dla wybranych elementów agregatu; a) łożysk tocznych silnika, b) kół zębatach przekładni, c) wałów przekładni, d) śruby/pędnika

Fig. 2. Assumed signals grouping for some elements of the aggregate: a) rolling bearing, b) toothed wheel of gear, c) gear shafts, d) propeller

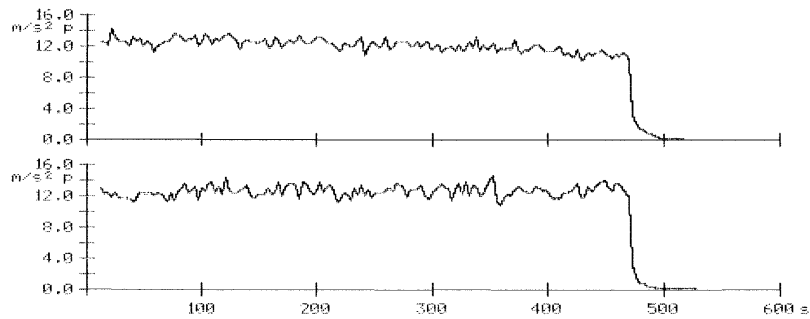
2. Zastosowanie metod drganiowych

Diagnozowanie sterów strumieniowych, jak i innych urządzeń na statku narzuca wiele problemów. Jest to spowodowane głównie dużym zagnieżdżeniem urządzeń na niewielkiej przestrzeni, wspólnym źródłem zasilania, połączeniem fundamentów maszyn przez stałe elementy kadłuba oraz pracą jednocześnie wewnątrz jak i na zewnątrz kadłuba, jak ma to miejsce w przypadku sterów strumieniowych. Źródła [1, 2, 4] zawierają wyniki prób zastosowania metod drganiowych do diagnozowania maszyn zamontowanych na statkach. Analiza wyników zaprezentowanych w wymienionych publikacjach nasuwa wniosek, że największym problemem stosowania tych metod jest nakładanie się drgań pochodzących z różnych źródeł. Pomiary drgań na sterach strumieniowych zamontowanych na promie pasażersko-samochodowym „Polonia” potwierdziły te obserwacje. Zmierzono drgania na elementach konstrukcyjnych steru strumieniowego niepracującego w czasie manewrów, podczas gdy pozostałe dwa stery znajdujące się w dziobowym pomieszczeniu sterów były poddane normalnemu cyklowi obciążenia. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg drgań na dziobowym sterze strumieniowym numer 2. Wyraźnie widać zmianę poziomu drgań, odpowiada ona zmianie obciążenia sąsiadujących sterów strumieniowych. Dla porównania na rysunku 4 pokazano przebieg drgań podczas normalnej pracy steru.

Ster strumieniowy jako generator sygnałów drganiowych jest układem bardzo złożonym. Częstotliwości drgań jakie można rozpatrywać dla steru strumieniowego zestawiono w tabeli 1.



Rys. 3. Przebieg drgań obudowy łożysk steru wyłączanego z eksploatacji
Fig. 3. Course of bearing housing vibrations out of operating thruster



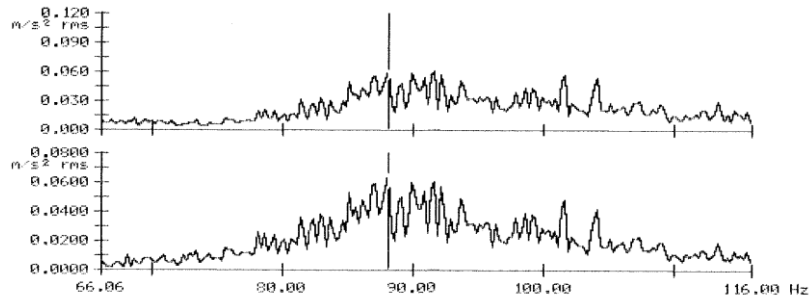
Rys. 4. Przebieg drgań obudowy łożysk steru podczas normalnej pracy
 Fig. 4. Course of bearing housing vibrations of a normally operating thruster

Tabela 1

Zestawienie częstotliwości charakterystycznych dla pracującego steru strumieniowego
 Characteristic frequencies of normally operating thruster

Źródło drgań	Częstotliwość charakterystyczna
Silnik elektryczny: <ul style="list-style-type: none"> • Łożyska silnika • Wirnik i wał • Zjawiska pochodzące od układów elektrycznych 	<ul style="list-style-type: none"> • Koszyka • Elementu tocznego • Bieżni zewnętrznej • Bieżni wewnętrznej • Obrotowa • 100 Hz i 50 Hz
Sprzęgło: <ul style="list-style-type: none"> • Współosiowe ustawienie wałów • Luzy 	<ul style="list-style-type: none"> • Druga harmoniczna obrotowa • Kolejne harmoniczne obrotowe do dziesiątej
Przekładnia: <ul style="list-style-type: none"> • Łożyska przekładni • Wały przekładni • Koła zębate 	<ul style="list-style-type: none"> • Koszyka • Elementu tocznego • Bieżni zewnętrznej • Bieżni wewnętrznej • Obrotowa • Częstotliwość zazębiania
Pędnik/śruba: <ul style="list-style-type: none"> • Niewyważenie • Uszkodzenie płatów 	<ul style="list-style-type: none"> • Obrotowa • Obrotowa × ilość płatów

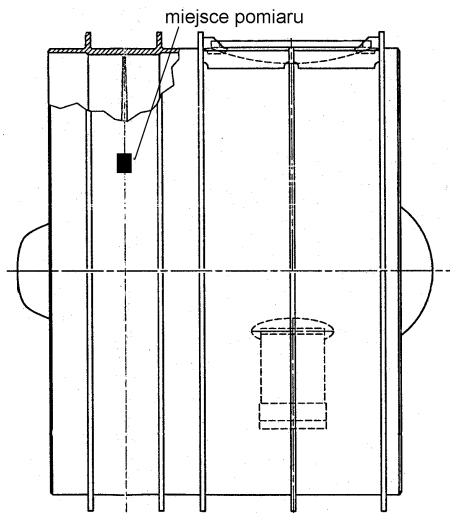
Dodatkowo dla większości z wymienionych częstotliwości w widmie sygnału znajdują się również ich harmoniczne, co powoduje dodatkowe utrudnienie analizy. Fragment przykładowego widma drgań przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Przykładowe widmo drgań zmierzonych na obudowie łożyska
Fig. 5. An example of frequency spectrum of the vibration measured on the bearing housing

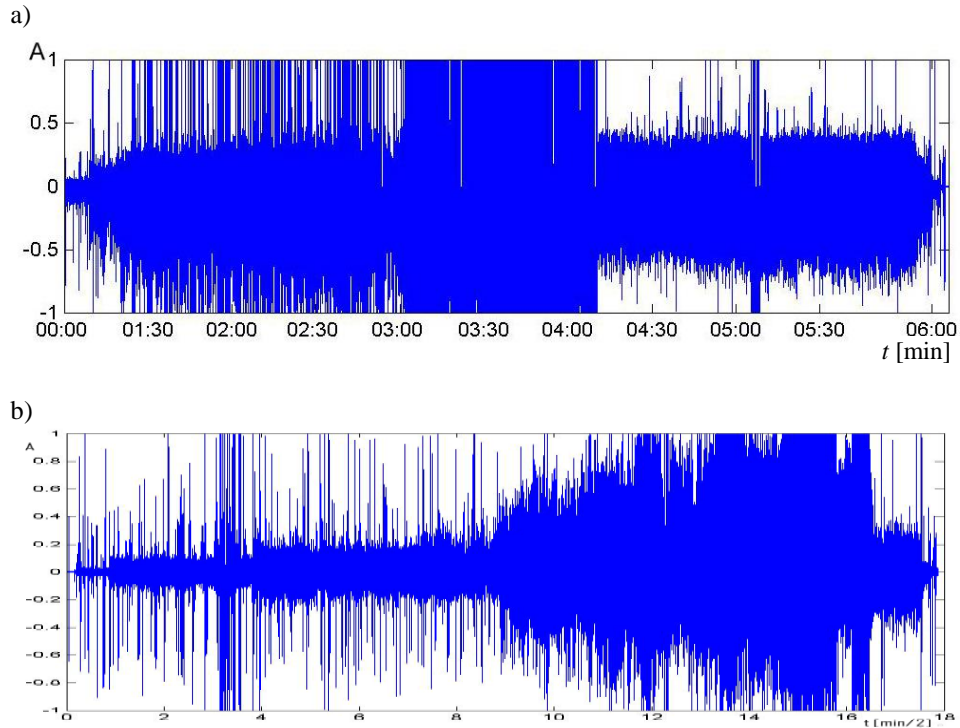
3. Pomiary emisji akustycznej

Jednym z problemów w diagnozowaniu agregatu, jakim jest ster strumieniowy, jest ocena stanu odbiornika mocy – pędnika. W zestawieniu możliwych do obserwowania sygnałów jako nośnik informacji o stanie pędnika wskazano sygnał natężenia przepływu. Jednak obserwacja i rejestracja tego sygnału wymaga zamontowania odpowiedniej aparatury pomiarowej na zewnątrz kadłuba.



Zaproponowano wykorzystanie do tego celu sygnału emisji akustycznej. Przeprowadzono pomiary emisji akustycznej na powierzchni tunelu steru strumieniowego w przekroju odpowiadającym płaszczyźnie pracy śruby przy biegu jałowym (rys. 6), oraz na obudowie łożyska wolnego końca wału silnika napędowego. Przebiegi przedstawiono na rysunkach (rys. 7).

Rys. 6. Miejsce zamontowania przetwornika emisji akustycznej
Fig. 6. The mounting point of acoustic emission transducer



Rys. 7. Przebiegi sygnału emisji akustycznej: a) zmierzonej na powierzchni tunelu, b) zmierzonej na obudowie łożyska

Fig. 7. Course of acoustic emission a) on the tunnel surface, b) on the bearing housing

Zgodnie z publikacją [5] na płaszczyźnie pracy śruby występuje nagły, niemal skokowy wzrost ciśnienia od p_1 do p_2 . Dla śruby pracującej w kanale steru strumieniowego skok ten zależy od:

- prędkości obrotowej śruby $\frac{d\alpha}{dt}$,
- kąta wychylenia płatów śruby β ,
- sprawności śruby η ,
- różnicy średnic śruby ϕ_s i tunelu ϕ_t :

$$\frac{p_2}{p_1} = f\left(\frac{d\alpha}{dt}, \beta, \eta, \phi_t - \phi_s\right) \quad (1)$$

jeżeli przyjąć, że:

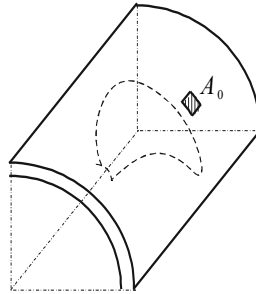
$$\frac{d\alpha}{dt} = \text{const}, \quad \eta = f(\beta), \quad \phi_t - \phi_s = \text{const} \quad (2)$$

otrzymujemy:

$$\frac{P_2}{P_1} = f(\beta) \quad (3)$$

Nagły przyrost ciśnienia działającego na ścianę tunelu powoduje wzrost panujących w niej naprężeń. Odnosząc przez analogię do przypadku zbiornika poddanego zmiennym obciążeniom opisanym w pracach [7, 8, 9], zmiana naprężeń w materiale powoduje zmianę sygnału emisji akustycznej. Rozpatrując wycinek A_0 (rys. 8) tunelu, naprężenia w nim wywoływane będą zmienne, a zmiany będą spowodowane:

- wychyleniem płatów śruby (obciążenie steru),
- chwilową pozycją płata w stosunku do wycinka A_0 .



Rys. 8. Fragment tunelu steru strumieniowego z zaznaczonym wycinkiem powierzchni A_0
 Fig. 8. A sector of the thruster tunnel with a surface section A_0

Aby zweryfikować pierwszy z założonych związków, poddano sygnał pierwotny (rys. 7a) analizie w celu wyznaczenia jego wartości skutecznej chwilowej (rys. 10). Na przebiegu wyraźnie widać jak zmieniało się obciążenie podczas manewrów sterem strumieniowym. Zaznaczono odcinek odpowiadający przesterowaniu płatów śruby.

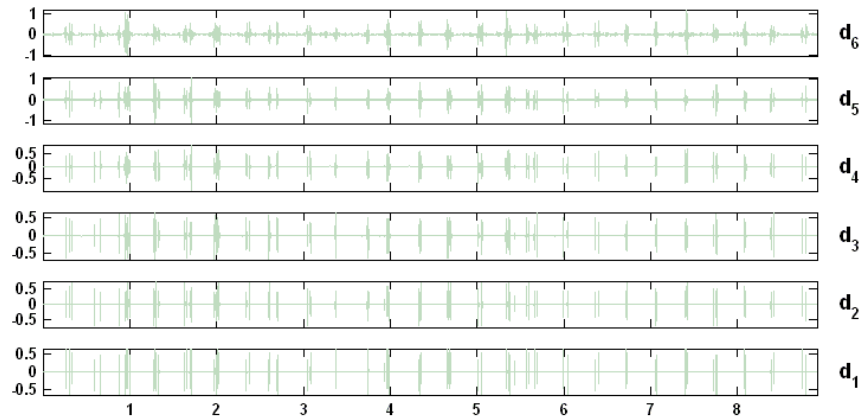
W celu zweryfikowania drugiego założenia przyjęto, że sygnał emisji akustycznej będzie największy w chwili przejścia krawędzi płata przez powierzchnię wycinka A_0 . Powinien on więc występować z częstotliwością równą częstotliwości obrotowej śruby pomnożonej przez ilość płatów:

$$f_s = \frac{n_s}{60} = \frac{194}{60} = 3,24 \text{ Hz} \quad \text{– częstotliwość obrotowa śruby,}$$

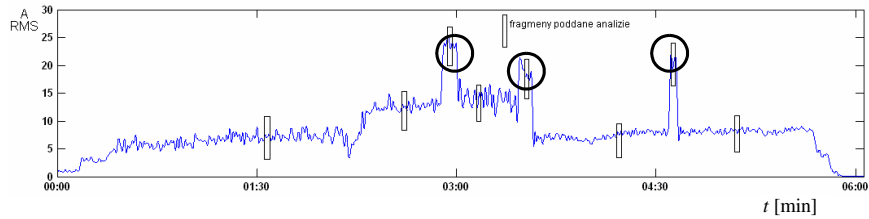
$$f_{ps} = f_s \cdot 4 = 12,96 \text{ Hz} \quad \text{– częstotliwość obrotowa płatów śruby.}$$

Wykonano rozkład sygnału pierwotnego z użyciem analizy falkowej na maksymalną możliwą liczbę poziomów, w wyniku czego otrzymano sygnały

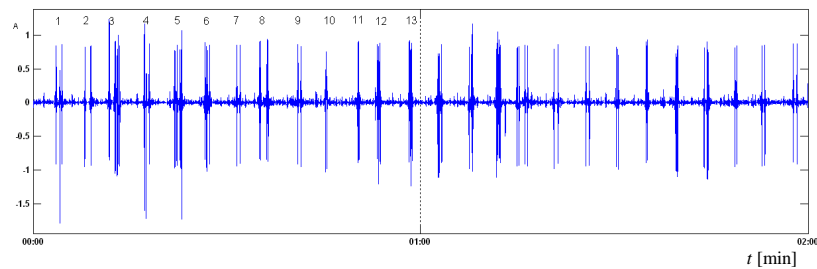
składowe (rys. 9). Następnie wyznaczono ilość sygnałów przejściowych w jednostce czasu (rys. 11). Stwierdzono, że częstotliwość występowania sygnałów przejściowych jest zbliżona do obliczonej częstotliwości obrotowej płatów śruby, jest więc równa ilości przejść krawędzi płyta przez wycinek A_0 .



Rys. 9. Składowe sygnału zawierające sygnały przejściowe
 Fig. 9. Details of signal with transient signals



Rys. 10. Przebieg zmian wartości skutecznej sygnału
 Fig. 10. Course of signal RMS



Rys. 11. Składowa sygnału, zawierająca sygnały przejściowe, poddana analizie progowej
 Fig. 11. Details of signal with transient signals after tresholding

4. Pomiary drgań elementów steru strumieniowego

4.1. Analiza zawartości cząstek stałych

Jedną z metod oceny stanu węzłów jest analiza produktów zużycia znajdujących się w czynniku smarnym [1]. Dla sterów strumieniowych zamontowanych na promie „Polonia” czynnikiem smarnym jest olej BP Energol GR-XP 68, którego krótką charakterystykę przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

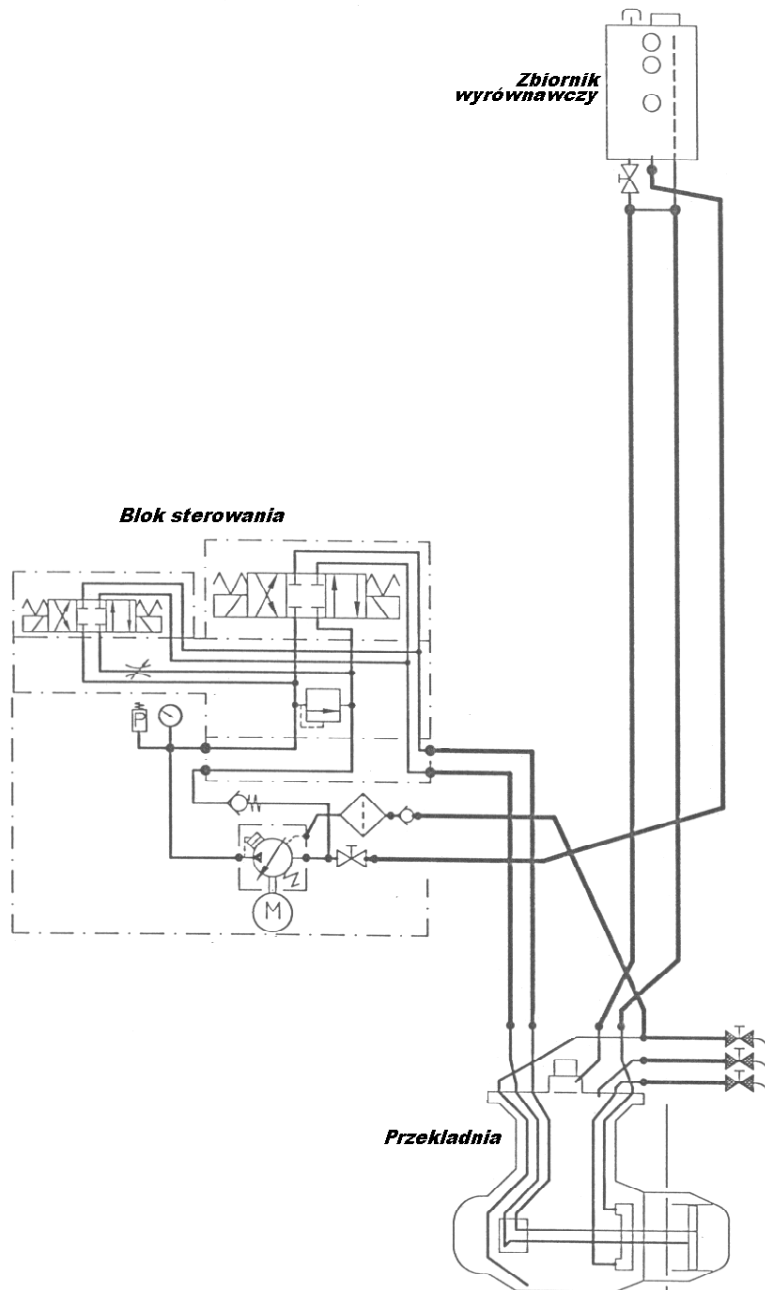
Charakterystyka oleju smarnego steru strumieniowego
Characteristic of thruster lubricating oil

Olej		BP Energol GR-XP 68
Barwa		bursztynowa
Gęstość w 15°C	kg/l	0,888
Temp. zapłonu	°C	193
Temp. krzepnięcia	°C	-24
Lepkość w 40°C	cSt	65
Lepkość w 100°C	cSt	8,7

W układzie steru strumieniowego olej smarujący pełni również rolę czynnika sterującego pracą steru, przesterowaniem płatów śruby. Schemat systemu olejowego przedstawiono na rysunku 12.

Próbki do analizy pobrano zgodnie z normami PN-EN ISO 3170:2002, PN-66/C-04000, PN-81/C-04002. Następnie z użyciem systemu analizy oleju określono ilości cząstek stałych w poszczególnych klasach wymiarowych oraz klasę czystości oleju według normy ISO 4406. Wyniki uzyskane dla oleju świeżego oraz dla próbek pobranych z przekładni w odstępie miesiąca podano w tabeli 3 oraz zaprezentowano graficznie na rysunku 13.

Na wykresach przedstawiających zmianę zawartości cząstek stałych w oleju wyraźnie widać gwałtowną zmianę czystości oleju pracującego w urządzeniu w stosunku do oleju czystego, jednakże nie obserwuje się dużej zmiany pomiędzy dwoma próbkami oleju pobranymi z przekładni. Świadczyć to może o stałości procesów tribologicznych oraz braku uszkodzeń elementów mających kontakt z olejem. Weryfikacja tych założeń wymaga prowadzenia obserwacji w dłuższym okresie.

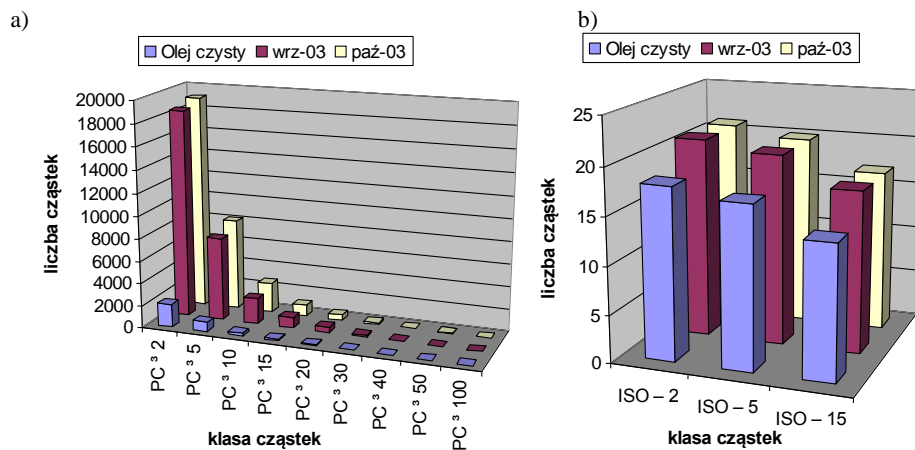


Rys. 12. Schemat układu olejowego steru strumieniowego
Fig. 12. Characteristic of thruster lubricating system

Tabela 3

Zestawienie wyników analizy zawartości cząstek stałych w oleju
Particie counts results

Urządzenie	Ster strumieniowy nr 1	Ster strumieniowy nr 1	Ster strumieniowy nr 1
Olej	BP Energol GR-XP 68	BP Energol GR-XP 68	BP Energol GR-XP 68
Klasa wielkości cząstek	Czysty olej	Wrzesień 2003	Październik 2003
PC ≥ 2	2065,227	18508,37	19101,23
PC ≥ 5	835,3844	7397,017	8137,7
PC ≥ 10	253,9439	2275,821	2652,134
PC ≥ 15	105	941	993
PC ≥ 20	51,45314	461,1182	482,0192
PC ≥ 30	16,66276	149,3301	161,221
PC ≥ 40	6,865603	61,52888	65,23421
PC ≥ 50	3,284559	29,43591	30,98765
PC ≥ 100	0,2523112	2,261189	2,312342
Klasa czystości ISO			
ISO – 2	18	21	21
ISO – 5	17	20	20
ISO – 15	14	17	17



Rys. 13. Zmiana zawartości cząstek stałych w oleju steru strumieniowego: a) ogólna liczba cząstek w poszczególnych klasach, b) zmiana klasy oleju według ISO

Fig. 13. Course of particle counts in oil a) total amount of particles in particular oil classessl, b) ISO class

4.2. Analiza pozyskanych sygnałów

Jak we wszystkich metodach diagnostycznych, w których diagnoza oparta jest na wynikach analizy sygnałów, tak również i w tej, jednym z najważniejszych elementów tworzenia modelu jest dobór metody analizy sygnału w celu uzyskania miar. W wielu przypadkach z powodzeniem udaje się zastosować miary uzyskane z użyciem powszechnie stosowanych metod analizy, takich jak szybka transformata Fouriera (FFT), analiza obwiedni, analiza widma itp., lecz nie we wszystkich są one wystarczające. W tym celu wprowadza się do modeli diagnostycznych miary uzyskane innymi metodami, głównie czasowo-częstotliwościowych (TF), oraz tzw. miary złożone. W przedstawionym artykule również zastosowano metodę nie zaliczaną do grupy TF, ale pozwalającą na wnioskowanie w dziedzinie czasu i częstotliwości, a mianowicie metodę rozkładu falkowego polegającą na rozłożeniu sygnału pierwotnego na macierz współczynników falkowych, opisującą korelacje pomiędzy funkcją analizującą a sygnałem rzeczywistym. Zastosowanie tej metody dało możliwość wyodrębnienia z sygnału pierwotnego sygnałów przejściowych o charakterze zbliżonym do impulsowego. Metoda oparta na FFT nie pozwoliła na wyodrębnienie sygnału będącego przedmiotem poszukiwań.

Wnioski

Przedstawiona idea łączenia sygnałów różnego typu generowanych przez urządzenie daje możliwość „dowolnego” (ograniczonego ze względów ekonomicznych) doboru zestawu rejestrowanych sygnałów. Połączenie tej cechy z zaawansowanymi metodami analizy sygnałów daje możliwość praktycznie dowolnego konfigurowania modelu. Nadając poszczególnym miarom sygnału wagę, oraz łączenia ich w miary złożone, następnie wprowadzając je do modelu mamy możliwość zorientowania modelu na konkretny element agregatu. Najtrudniejszym etapem pozyskiwania wiedzy niezbędnej do stworzenia modelu, jest uzyskanie informacji na temat rzeczywistego stanu elementów agregatu. Można je uzyskać jedynie w eksperymencie biernym, podczas obserwacji urządzenia będącego w normalnej eksploatacji. Obecny etap badań nie pozwala jeszcze na jednoznaczne przypisanie symptomów do stanu, będzie to przedmiotem dalszych badań autora.

Literatura

1. Bejger A., Burnos T., *Time-Frequency Analyze of Some Acoustic Emmission Signals*, w: Materiały III International Scientifically-Technical Conference

- 'Explo-Diesel & Gas Turbine '03', Gdańsk – Międzyzdroje – Lund (Sweden), May 5–9, 2003, s. 53 – 60.
2. Bielawski P., Burnos T., *Diagnostyka zużyciowa z zastosowaniem systemu ENTEK*, w: Materiały V Krajowej Konferencji „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów Diag'2003”, 13-17 października 2003, Ustroń, s. 307 – 308.
 3. Bielawski P., *Elementy diagnostyki drganiowej mechanizmów tłokowo-korbowych maszyn okrętowych*, WSM w Szczecinie, Studia nr 39, Szczecin 2002.
 4. Bielawski P., *Maintenance Diagnosis of Turbo-Machines on Board m/f 'Polonia'*, w: Materiały III International Scientifically-Technical Conference 'Explo-Diesel & Gas Turbine '03', Gdańsk – Międzyzdroje – Lund (Sweden), May 5–9, 2003, s. 67 – 76
 5. Dudziak J., *Teoria okrętu*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1988.
 6. Galbas J., Krajczyński Z., Lisowski J., *Okrętowe stery strumieniowe*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1986.
 7. Ranachowski Z., *Metody pomiaru i analizy sygnału emisji akustycznej*, Prace IPPT PAN nr 1/97, Warszawa 1997
 8. Soares S.D., *A Conservative Approach To The Acoustic Emmission Technique Applied To Equipment Subject To Internal Pressure*, www.cenpres.petrobras.com.br.
 9. Vallen H., *AE Testing Fundamentals, Equipment, Application*, Vallen-Systeme GmbH, ndt.net Vol.7 Nr 9, 2002.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr hab. inż., kmdr Zbigniew Korczewski, prof. AMW
dr hab. inż. Oleh Klyus, prof. AM

Adres Autora

mgr inż. Tomasz Burnos
Akademia Morska w Szczecinie
Zakład Diagnostyki i Remontów Maszyn Okrętowych
ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin
tomaszburnos@wp.pl