

## MODELE SYGNAŁÓW GENEROWANYCH PRZEZ OKRĘTOWY KOCIOŁ PAROWY

Andrzej ADAMKIEWICZ\*, Artur BEJGER\*\*, Krzysztof KOŁWZAN\*\*\*

\*Akademia Morska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych  
Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, [andrzej.adamkiewicz@am.szczecin.pl](mailto:andrzej.adamkiewicz@am.szczecin.pl)

\*\*Akademia Morska, Wydział Mechaniczny, Katedra Diagnostyki i Remontów Maszyn  
ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin, [artur.bejger@am.szczecin.pl](mailto:artur.bejger@am.szczecin.pl)

\*\*\*Polski Rejestr Statków S.A, Al. Gen. J. Hallera 126, 80-416 Gdańsk, [krzysztof.kolwzan@prs.pl](mailto:krzysztof.kolwzan@prs.pl)

### Streszczenie

Ograniczona dostępność pomiarowa sygnałów generowanych podczas pracy zautomatyzowanych kotłów pomocniczych zmusza do wykorzystywania w procesie tak modelowania jak i rzeczywistego dozoru stanów kotłów na podstawie wybranych sygnałów odwzorowujących stan techniczny kotłów. Przeprowadzono dekompozycję strukturalną i funkcjonalną okrętowego pomocniczego kotła parowego. Sygnały podzielono na: ciepło-przepływowe, emisji toksycznych zanieczyszczeń w strumieniu spalin wylotowych, jak również wibroakustyczne. Przedstawiono estymację parametrów sygnałów na podstawie wyników pomiarów wielkości wyjściowych ogólnego modelu kotła. W pracy zdefiniowano sygnały tworzące relacje diagnostyczne, jakich można oczekiwać w procesie oceny stanów kotłów okrętowych. Ich identyfikacja może być uzasadnieniem do wdrożenia strategii eksploatacji kotłów okrętowych z tzw. obsługiwaniem quasidynamicznym.

Słowa kluczowe: kocioł parowy, sygnał, diagnoza, parametr, okrętowy układ energetyczny, obsługiwanie.

### MODELS OF SIGNALS GENERATED BY A SHIP BOILER

#### Summary

The especially limited measurement availability of signals generated at operation of automated auxiliary boilers enforces the application of modeling as well as actual monitoring of their condition on the basis of a significant number of reliable measurement signals. A structural and functional decomposition of an auxiliary ship boiler has been carried out. Signals have been divided into: thermal-flow, exhaust toxic pollutant emissions in gas flows of marine boilers, as well vibroacoustic and acoustic. Estimation of signals parameters, basing on the results of measurements of output values for a general boiler model, has been suggested. Diagnostic relations which can be expected to be valid for ship boilers have been defined. Establishing their validity may be a justification for implementing a ship boiler quasidynamic maintenance.

Keywords: ship boiler, signal, diagnostic, parameter, marine power plants, maintenance.

### 1. ISTOTA ROZPATRYWANEGO PROBLEMU BADAWCZEGO

Okrętowe kotły parowe są eksploatowane z zastosowaniem strategii eksploatacji opartej na metodzie planowo – zapobiegawczej. Strategia ta nie obejmuje nieplanowanych czynności obsługowych, jako konsekwencji zaistniałych losowo w historii użytkowania kotłów zdarzeń – niezdatności [1, 2]. Stan taki, zachęca do stosowania zróżnicowanych metod postępowania eksploatacyjnego w celu wypracowania tak diagnozy użytkowej jak i obsługowej.

Szersze zastosowanie diagnostyki w eksploatacji kotłów, pozwoli na dynamiczne podejmowanie decyzji eksploatacyjnych, utrzymanie w stanie zdatności, wzrost dyspozycyjności kotłów, uprzedzając ewentualne zaistnienie niezdatności.

Powstawanie osadów, od strony spalin i kamienia kotłowego od strony wodnej, jest niesprawnością charakterystyczną dla kotłów, rozwijającą się w procesie eksploatacji ewolucyjnie, a jej skutki powodują znaczną liczbę niezdatności i awarii kotłów [1]. Z tego powodu wynika znaczenie faktu odpowiednio wczesnego rozpoznawania wszelkich niezdatności. Możliwość rozróżniania uszkodzenia lub stanu technicznego zależy od własności diagnozowanego obiektu – typu kotła. Wymagana rozróżnialność wiąże się z jego wyposażeniem w odpowiedni zbiór urządzeń pomiarowych.

Przedstawione zagadnienie rozpatrzono kompleksowo, w oparciu o model diagnozowanego rzeczywistego obiektu technicznego – okrętowego kotła parowego i wyniki pomiarów.

Identyfikacja parametrów modelu może nastąpić metodą bezpośredniego pomiaru lub pośrednimi

metodami obliczeniowymi. Ograniczenia i stosowalność każdej z tych metod wynikają z przeznaczenia modelu i specyfiki struktury konstrukcyjnej kotła. Do ekstrakcji cech kotłów stosowane są przede wszystkim metody analizy sygnałów, obejmujące opis sygnałów i modele sygnałów. Od ich relacji z cechami stanu zależne są metody rozróżnialności niesprawności kotłów.

## 2. SYGNAŁY W RELACJACH DIAGNOSTYCZNYCH KOTŁÓW

Dysponowanie wiarygodnymi metodami diagnozowania kotłów bez ich wyłączania z ruchu związane jest z identyfikacją cech sygnałów generowanych przez kocioł podczas pracy. Jednocześnie ich znajomość jest niezbędna do oceny warunków pracy kotła dla potrzeb sterowania procesem w kierunku realizacji racjonalnego sposobu eksploatacji zdefiniowanego przez uogólnione kryterium wybranej strategii. W pierwszym przypadku będą wykorzystywane modele diagnostyczne relacji typu [7, 9]:

$$\text{parametry sygnałów – parametry stanu} \\ Y_i = F_1(X) \quad (1)$$

$$\text{oraz} \\ \text{parametry sygnałów – stany} \\ Y_i = K(W) \quad (2)$$

$$\text{w drugim:} \\ \text{parametry sygnałów – miara eksploatacji} \\ Y_i = G_1(L) \quad (3)$$

$$\text{oraz} \\ \text{miara eksploatacji – parametry sygnałów} \\ L = G_2(Y_i) \quad (4)$$

gdzie:

- $Y_i$  – zbiory parametrów sygnałów „i”,
- $X$  – zbiory parametrów stanu,
- $W$  – zbiory stanów,
- $L$  – zbiory miar eksploatacji,
- $i$  – identyfikator rodzaju sygnału.

Każda z relacji (1) – (4) jest modelem obiektu technicznego/kotła, jak i modelem procesów przetwarzania energii i procesów towarzyszących – resztkowych, również innych urządzeń współpracujących z kotłem [6, 8].

W pracującym kotle, funkcjonującym w środowisku okrętowym zachodzą procesy fizykochemiczne, między innymi takie jak: przepływ strumieni energii z równoczesną konwersją, strumieni masy wody, pary, powietrza, paliwa i spalin, drgania, emisję akustyczną, promieniowanie ciepła itp., które są źródłem generowanych sygnałów. Opisują je przebiegi w czasie wielkości fizycznych transmitujących informację w sposób zależny od rodzaju sygnału (jego właściwości). Składowe sygnały, niosące informację są parametrami sygnału [9]. Przy nieznaności pełnego modelu, a taka sytuacja jest rozpatrywana,

do detekcji uszkodzeń kotła wykorzystywane są metody kontroli ograniczeń oraz związków między zmiennymi procesowymi [7, 9]. Postępowanie takie zastosowano w odniesieniu do kotła w eksploatacji, gdy podstawą oceny jego stanu mają być wyniki badań procesów: głównego roboczego, ciepło-przepływowego i procesów resztkowych: emisji produktów spalania oraz wibroakustycznych.

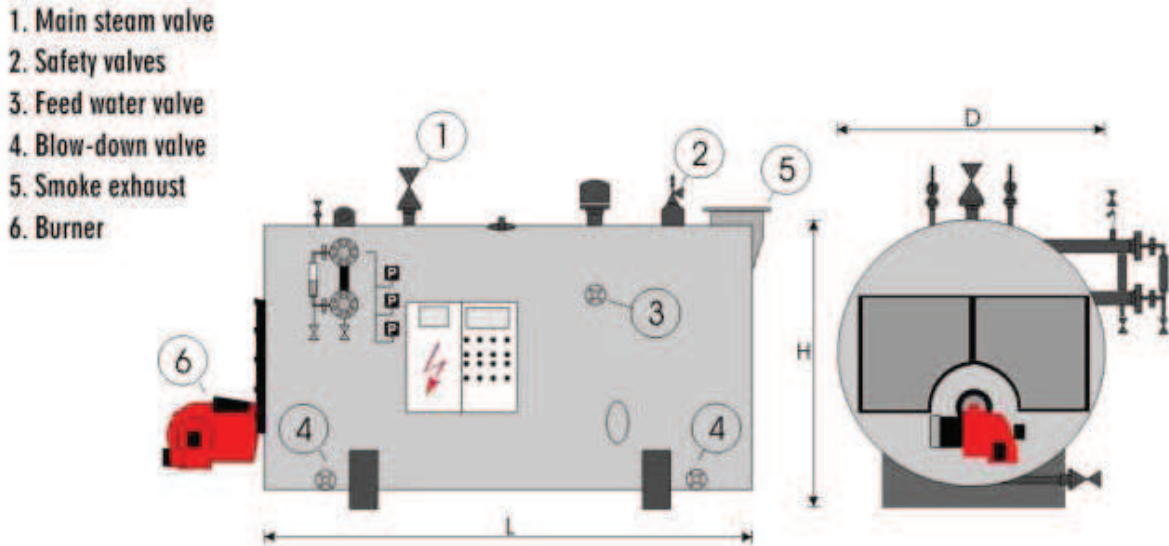
## 3. OBIEKT, PRZEDMIOT, WARUNKI I PROGRAM BADAŃ

Identyfikację parametryczną sygnałów przeprowadzono w oparciu o instalację kotłową układu energetycznego m/f „Polonia”. Układ wyposażony jest w 3 pomocnicze kotły parowe produkcji Anders Halvorsen A/S Flekkefjord – Norwegia [10]. Jeden typu PARAT Mod. B – 3, jest poziomym kotłem płomieniówkowym, z palnikiem ciśnieniowym typu Weishaupt 132/150-2 opalany paliwem ciężkim HFO, o wydajności pary 6000 kg/h, ciśnieniu projektowym pary 9 bar, ciśnieniu roboczym dla stanu eksploatacyjnego 7 bar. Kocioł jest użytkowany przede wszystkim podczas postoju statku w porcie. Dwa kotły utylizacyjne typu PARAT o wydajności pary każdy 1250 kg/h, zasilane spalinami z silników głównych, pracują wyłącznie podczas podróży morskiej. Ogólną budowę obiektu badań, kotła opalanego, przedstawiono na rysunku 1.

Przedmiotem przeprowadzonych badań były parametry sygnałów generowanych przez pomocniczy kocioł opalany. Procesy zachodzące w czasie pracy kotła generowały sygnały wielowymiarowe, opisywane przez zbiory wielu parametrów.

Badania przeprowadzono w trybie eksperymentu biernego, w warunkach eksploatacyjnych statku. Instalacja kotła opalanego znajdowała się w stanie pełnej zdadności technicznej, po wykonanym stoczniowym przeglądzie klasyfikacyjnym. Woda zasilająca kocioł o temperaturze 85 – 95 °C, w zakresie zalecanym przez producenta, była odgazowana i uzdatniona chemicznie. Kocioł opalany był paliwem ciekłym o temperaturze 160 °C i zawartości siarki 1,49%. Kocioł pracował w trybie automatycznym, cyklicznie włączając palnik przy ciśnieniu pary świeżej 5,1 bar i wyłączając przy ciśnieniu 6,3 bar, w zależności od zapotrzebowania na parę przez okrętowe instalacje pary grzewczej. Dopuszczalny zakres zmian ciśnienia pary w kotle podczas automatycznej pracy kotła wynosił 4,4 – 7,0 bar. Wykonano dwie serie pomiarów, po kilkadziesiąt obserwacji w każdej. Na rys. 2 pokazano przykładowy fragment przebiegu zmian parametrów eksploatacyjnych układu energetycznego, w tym ciśnienia pary w kotle, na monitorze centrali kontrolno – manewrowej siłowni statku, w funkcji czasu pracy.

Wybór punktów pomiarowych sygnałów podyktowany był konstrukcją kotła i jego



Rys. 1. Schemat ogólnej budowy pomocniczego kotła opalanego typu Parat Mod. B – 3 [11]: 1 - główny zawór parowy, 2 - zawory bezpieczeństwa, 3 - zawór zasilania wodnego, 4 - Zawór szumowania dolnego, 5 - wylot spalin, 6 – palnik

podzespołów, układem monitorowania parametry pracy siłowni oraz rodzajem badanego sygnału. Ocena stanu dynamicznego kotła za pomocą generowanych procesów fizycznych wymaga jednoznaczności skojarzenia jego parametrów funkcjonalnych ze zbiorem miar procesów wyjściowych oraz kryteriów ich oceny. Identyfikacja charakteru sygnałów i mechanizmu ich generacji musi w diagnozowaniu kotłów poprzedzać zastosowanie informacji zawartych w emitowanych procesach wyjściowych.



Rys. 2. Przykładowy fragment przebiegu zmian ciśnienia pary w kotle na monitorze centrali kontrolno – manewrowej siłowni statku w funkcji czasu pracy (linia żółta)

#### 4. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW SYGNAŁÓW GENEROWANYCH PRZEZ PROCESY ZACHODZĄCE W KOTLE

Źródłem sygnałów generowanych przez kocioł okrętowy jest główny proces roboczy wymiany ciepła pomiędzy produktami spalania strumienia paliwa w atmosferze strumienia powietrza, wodą

i parą wodną z udziałem materiałów elementów kotła. Nadzоровanie pracy kotła odbywa się przede wszystkim w oparciu o wartości parametrów sygnału ciepło – przepływowego oraz metodami wizualizacyjnymi. Stosując jednak jedynie te metody nie można sterować procesem eksploatacji kotła.

##### 4.1. Sygnał ciepło - przepływowy

Parametry sygnału ciepło-przepływowego, stanowią integralny składnik systemu regulacji i sterowania pracą kotła. Międzynarodowe standardy opierają się aktualnie na stacjonarnych modelach entalpowych [6]. Miarą jakości przemian w takich modelach są sprawności i jednostkowe zużycia ciepła. Dla pomocniczego kotła parowego będzie to sprawność  $\eta_{Kh}$  definiowana zależnością w postaci

$$\eta_{Kh} = \frac{\dot{m}_{pary1}(i_{pary1} - i_{wz})}{\dot{m}_{pal}W_d + \dot{m}_{pow0}i_{pow0}} \quad (5)$$

gdzie:

- $\dot{m}_{pary1}, i_{pary1}$  – strumień masy i entalpia pary wodnej opuszczającej kocioł,
- $i_{wz}$  – entalpia wody zasilającej kocioł,
- $\dot{m}_{pal}$  – strumień masy paliwa zasilającego kocioł,
- $\dot{m}_{pow0}, i_{pow0}$  – strumień masy i entalpia powietrza atmosferycznego zasilającego kocioł,
- $W_d$  – wartość opałowa dolna paliwa.

Zmienne modelu (5) są zmiennymi zależnymi od wielkości wejścia i wyjścia podzespołów kotła. Dla potrzeb analizy sygnałów kocioł zdekomponowano rozróżniając w nim: walczak, komorę spalania i palnik. Modelami entalpowymi  $F_h$  sygnału będą



wówczas związki między ciepłno-przepływowymi wielkościami zależnymi, a parametrami ciepłno-przepływowymi niezależnymi i geometrią walczaka, komory spalania oraz palnika. W takim ujęciu model jest określony przez układ równań bilansowych masy i energii dla walczaka W, komory spalania KS wraz z palnikiem P, zapisany symbolicznie w postaci

$$\eta_{Kh} = F_h \{D_{pary}(p_{p1}, t_{p1}) f_{KS} [KS, f_W(W)]\} \quad (6)$$

gdzie:

$D_{pary}(p_{p1}, t_{p1})$  – wydajność pary przy ciśnieniu  $p_{p1}$  i temperaturze  $t_{p1}$ ,

$$KS = \{p_{pal}, t_{pal}, W_d, P_{pow0}, t_{pow0}; m_{pal}, m_{pow0}, i_{pow0}; \text{współcz. korekc.}\} \quad (7)$$

- zbiory zmiennych (rozdzielone średnikami), niezależnych, zależnych i współczynników korekcyjnych komory spalania,

$$W = (t_{wz}, p_{p1}, t_{p1}; \dot{m}_{pary1}, t_{wz}, i_{pary1}; L, D, H, \dots) \quad (8)$$

- zbiory zmiennych (rozdzielone średnikami) niezależnych, zależnych i wymiarów geometrycznych podzespołów, które decydują o własnościach ciepłno-przepływowych walczaka kotła/elementów przepływowych.

Przez zmienne niezależne determinujące stan cieplny kotła w zapisach (6) – (8) rozumiane są zbiory parametrów z danymi początku (indeks 0) i końca (indeks 1) procesu odparowania wody w kotle. Parametry niezależne mogą być zadawane jako zbiór zmiennych wejścia/zewnętrznych (outside parameters) lub stanowić zbiór wielkości mierzonych/kontrolowanych. Niektóre z nich mogą być/są dla kotła parametrami alarmowymi.

Modele sygnałów ciepłno-przepływowych budowane są jako zero wymiarowe (o parametrach skupionych). Przy zidentyfikowanych parametrach sygnału miarą degradacji kotła będą różnice między wartościami aktualnymi i wartościami referencyjnymi wybranych parametrów sygnału ciepłno-przepływowego.

#### 4.2. Sygnał emisji produktów spalania

Współczesne kotły okrętowe opalane są paliwami płynnymi, produktami destylacji ropy naftowej lub gazowymi. W składzie paliw dla kotłów występują: węgiel < (85 – 90)%, wodór (10 – 12)%, siarka < (0,6 – 2)%, tlen i azot 0,5% oraz inne domieszki.

W procesie zupełnego spalania paliwa następuje utlenianie cząstek palnych, a w rezultacie reakcji egzotermicznej emitowane są w postaci gazowej: z węgla –  $CO_2$  (dwutlenek węgla), wodoru –  $H_2O$  (woda), siarki –  $SO_2$  (dwutlenek siarki) lub w postaci dymu. Reszty w postaci osadów, które są lub nie są korodujące oraz mogą, ale nie muszą, hamować przenikania ciepła mogą częściowo pozostawać w kotle. Azot i tlen w spalinach pochodzi

z powietrza podawanego do paleniska, a także w niewielkiej ilości z paliwa [1, 4, 5, 8, 11].

Podczas spalania paliwa przy niedostatecznej ilości podawanego powietrza pozostają oprócz cząstek  $CO_2$  również i  $CO$  oraz nie spalone węglowodory, które mogłyby podlegać dalszemu utlenianiu. Jednakże spalanie to poza komorą jest wysoce utrudnione ze względu na zbyt niskie temperatury, zbyt małą ilość tlenu lub/ oraz niedostateczną w mieszanie składników palnych.

Miarą oceny jakości funkcjonowania kotła na podstawie parametrów sygnału emisji produktów spalania jest sprawność kotła  $\eta_{KA}$  definiowana zależnością z uwzględnieniem straty wylotowej  $q_{Af}$  i straty niezupełnego spalania  $q_{Ag}$  w postaci [4, 5, 8]

$$\eta_{KA} [\%] = 100 [\%] - q_{Af} [\%] - q_{Ag} [\%] \\ = \eta_{Af} [\%] - q_{Ag} [\%] \quad (9)$$

gdzie:

$$\eta_{Af} [\%] = 100 [\%] - q_{Af} [\%] \quad (10)$$

jest sprawnością procesu spalania w kotle określaną z wykorzystaniem straty wylotowej  $q_{Af}$

$$q_{Af} [\%] = (t_{spal} [^{\circ}C] - t_{pow0} [^{\circ}C]) \left( \frac{A_1}{CO_2 [\%]} + B \right) \quad (11)$$

gdzie:

- $A_1, B$  – współczynniki Siegerta [4, 5, 8] charakterystyczne dla danego paliwa,
- $q_{Ag}$  – strata niezupełnego spalania, obliczana w oparciu o zmierzoną zawartość  $CO_{zmiarz}$  w spalinach wg wzoru.

$$q_{Ag} = \frac{\alpha CO_{zmiarz} [\%]}{CO_{zmiarz} [\%] + CO_2 [\%]} \quad (12)$$

gdzie:

- $\alpha$  – współczynnik charakterystyczny dla danego rodzaju paliwa, tutaj dla oleju opałowego  $\alpha = 48$ ,
- $CO_2$  – zawartość objętościowa dwutlenku węgla  $CO_2$  w spalinach, obliczona z zależności.

$$CO_2 = CO_{2max} \left( 1 - \frac{O_{2zmiarz} [\%]}{20,95 [\%]} \right) \quad (13)$$

gdzie:

- $CO_{2max}$  – współczynniki Siegerta [4, 5, 8] charakterystyczne dla danego paliwa,
- 20,95% – zawartość tlenu  $O_2$  [%] w czystym powietrzu,
- $O_{2zmiarz}$  – zmierzona zawartość tlenu  $O_2$  [%].

Strata niezupełnego spalania określa procentową stratę ciepła spowodowaną obecnością gazów palnych  $CO$  w spalinach. Wśród szkodliwych składników emitowanych w spalinach oprócz tlenu

węgla  $CO$  i tlenku azotu  $NO$  spaliny zawierają również wyższe tlenki, głównie  $NO_2$ . Stężenie tlenku azotu, wyrażone w (ppm) można z dużą dokładnością wyrazić jako sumę stężeń  $NO$  i  $NO_2$ . Jeżeli analizator nie posiada czujnika dwutlenku azotu  $NO_2$ , a jedynie czujnik tlenku azotu  $NO$ , wówczas zawartość  $NO_2$  jest szacowana na podstawie zmierzonej koncentracji  $NO$ . Najczęściej przyjmuje się, że tlenek azotu  $NO$  występujący w spalinach stanowi około 95% ogólnej ilości tlenków azotu  $NO_x$  wówczas

$$NO_x [ppm] = \frac{NO_{zmierz} [ppm]}{0,95} \quad (14)$$

Wpływ na zawartość tlenków siarki  $SO_x$  w spalinach ma ilość siarki w paliwie.

W praktyce niemożliwym jest takie rozdrobnienie paliwa, aby wszystkie molekuly otrzymały jednocześnie niezbędną do spalania ilość powietrza. Współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$  z zastosowaniem parametrów emisji produktów spalania obliczany jest na podstawie znanej dla danego paliwa wartości  $CO_{2max}$  oraz zmierzonej wartości  $CO_{2zmierz}$  w spalinach według związku

$$\lambda = \frac{CO_{2max}}{CO_{2zmierz}} \quad (15)$$

lub poprzez pomiar w spalinach zawartości tlenu  $O_2$

$$\lambda = \frac{20,95\%}{20,95\% - O_{2zmierz} [\%]} \quad (16)$$

Jest on zmienną zależną wyjścia palnika.

Niezbędne do wyznaczenia sprawności kotła związku (9) – (16) można, analogicznie do zależności (6) – (8), zapisać w postaci ogólnego modelu sygnału emisji produktów spalania pomocniczego kotła okrętowego w postaci:

$$\eta_{KA} = F_A \{O_2, skl.pal, \lambda, f_{Af} [AF, f_{Ag} (AG)]\} \quad (17)$$

gdzie:

$skl.pal$  – skład paliwa,

$Af$  – zbiory zmiennych (rozdzielone średnikami), niezależnych, zależnych i współczynników korekcyjnych związanych ze stratą wylotową,

$$Af = \{t_{pow0}, O_2, t_{gaz}, q_{Af}, Cw_{pal}, A_1, B, 20,95\} \quad (18)$$

$t_{gaz}$  – temperatura spalin wylotowych,

$Cw_{pal}$  – zawartość węgla w paliwie,

$Ag$  – zbiory zmiennych (rozdzielone średnikami) niezależnych, zależnych i wymiarów geometrycznych palnika związanych z niepełnym spalaniem,

$$Ag = \{O_2, CO, \alpha, skl.pal; q_{Ag}; wym.geom.pal\} \quad (19)$$

Do pomiarów parametrów sygnału emisji produktów spalania posłużono się analizatorem spalin typu IMR 3000 P [4, 5], którego widok ogólny przedstawiono na rysunku 3. Pomiar parametrów sygnału prowadzono w stanach

złączenia, stanach pośrednich i wyłączenia palnika kotła, rejestrując podczas jednej obserwacji kilkadziesiąt sekwencji czasowych wzrostu i zmniejszania ciśnienia w kotle. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy wydruk protokołu pomiaru parametrów sygnału emisji produktów spalania uzyskany przy pomocy analizatora spalin.



Rys. 3. Widok ogólny zastosowanego do pomiarów analizatora spalin IMR 3000 P [4]

Dokumentuje on wartości parametrów sygnału emisji produktów spalania oleju opałowego, w prezentowanym protokole przy najwyższym osiągalnym w kotle ciśnieniu pary 6,3 bar.

IMR 3000P		09.07.2008	
		12:14:11	
Olej opałowy ciezki			
T-gaz	195°C	T-pow.	36°C
CO2	11.4 %	O2	5.9 %
CO	6 PPM	SO2	583 PPM
NOx	270 PPM		
αA	8.5 %	LAMBDA	1.39

Rys. 4. Wybrany protokół pomiaru parametrów sygnału emisji produktów spalania w chwili wyłączenia palnika

Szkodliwe produkty spalania z okrętowych kotłów parowych  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_x$  i  $NO_x$  wpływając destrukcyjnie na stan techniczny kotłów okrętowych stanowią realne zagrożenie dla środowiska morskiego, szczególnie podczas postojów w portach, stoczniach i żegludze w pobliżu lądu. Dopuszczalne wartości udziałów związków toksycznych w strumieniu emitowanych produktów spalania ropopochodnych paliw okrętowych zostały objęte przepisami Konwencji MARPOL. Stosując reguły wnioskowania diagnostycznego ich przekroczenie klasyfikuje formalnie kocioł do stanu niezdatności, natomiast wartości parametrów sygnału emisji produktów spalania jako skutek jakości organizacji

tego procesu są nośnikami informacji diagnostycznej.

#### 4.3. Sygnał wibroakustyczny

W kotle obserwuje się dwa rodzaje wymuszeń generujących sygnały wibroakustyczne związane ze zjawiskami przepływowymi, z których pierwsze jest spowodowane przez procesy zachodzące w komorze paleniskowej, pozostałe natomiast przez zjawiska występujące podczas omywania pęczków w ciągu konwekcyjnym. Pewien wpływ mogą mieć również wymuszenia ze strony pompy paliwowej i wentylatora powietrza.

W komorze spalania, przy ciśnieniu spalin wynoszącym 10 kPa, mogą pojawić się charakterystyczne drgania widoczne w częstotliwości rzędu 30 - 200 Hz. Zmiany te przenoszą się na ściany komory i związane z nimi elementy, a. zjawisku towarzyszy hałas. Oprócz drgań akustycznych mogą też występować infradźwięki o częstotliwościach 3 - 10 Hz, które są trudne do zaobserwowania. Widmo drgań może zmieniać się na skutek zmian: obciążenia kotła (poboru pary), stanu eksploatacyjnego pracy palnika (parametrów powietrza, rodzaju dysz, stosunku nadmiaru powietrza) oraz rodzaju i parametrów paliwa [8, 11].

Częstotliwości drgań własnych można określić w zależności od przyjętego modelu źródła drgań, w którym odpowiednie wymuszenie generuje fale stojące o częstotliwości podstawowej określonej prawami akustyki. Dla komory spalania może to być model typu zamkniętej rury, otwartej lub rezonatora Helmholtza. Przy długościach fali wyraźnie większych od wymiarów komory, modele rezonatora Helmholtza i rury jednostronnie otwartej stają się identyczne [11]. Na skutek doprowadzania energii płomienia do gazów wypełniających komorę paleniskową występują pulsacje ciśnienia wywołujące takie zjawiska jak:

- rezonans układu zasilania paliwem i komorą spalania,
- pulsacje spowodowane niestabilnością procesu spalania,
- szum spalania.

Ciśnienie akustyczne strumienia spalin emitowane przez płomień może oddziaływać na komorę spalania, generując jej drgania. Mogą być one przyczyną drgań akustycznych, w zależności od rozmiarów kotła. Płomień wytwarza szum o szerokim zakresie częstotliwości. Składa się on z szumu przepływu turbulentnego i szumu spalania od fal ciśnienia wywołanych chwilowymi wzrostami objętości podczas spalania. Szum turbulentny i szum spalania zależą od typu palnika i obciążenia kotła. Spalanie znacznie podwyższa poziom hałasu w stosunku do przepływu burzliwego.

Uproszczone modele sygnałów drgań własnych i emisji akustycznej można znaleźć w stosownej literaturze, między innymi np. [3, 8]. Z modeli tych wynika, że każdy kocioł może generować drgania

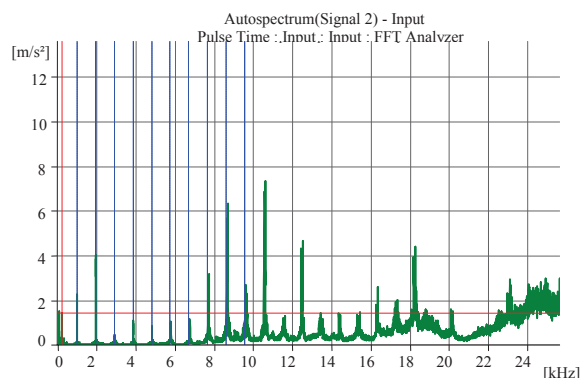
o właściwych tylko dla siebie częstotliwościach własnych.

Największy problem przy korzystaniu z tych modeli stanowi określenie wielkości wynikających z cech konstrukcyjnych kotła, np. stałych charakteryzujących sposób mocowania rury, logarytmicznego dekrementu tłumienia itp. Wielkości te można wyznaczyć jedynie doświadczalnie poprzez pomiary połączone z rejestracją amplitudy i czasu zanikania drgań własnych po wzbudzeniu.

Dla pomiarów parametrów drganiowych i emisji akustycznej wyróżniono stany: z pracującym palnikiem i z wyłączonym płomieniem a pracującą tylko dmuchawą palnika. Badania ukierunkowano na określenie pasma częstotliwości sygnału drganiowego i emisji akustycznej kotła związanego bezpośrednio z pracą:

- pompy paliwowej zasilającej pracujący palnik (pomiar na kadłubie pompy),
- na kołnierzu mocującym pracujący palnik do kotła - pomiar w kierunku poziomym,
- przepływem strumienia powietrza dostarczanego przez dmuchawę bez pracującego palnika.

Akwizycja i archiwizacja danych sygnału drganiowego oparta była na platformie multianalizatora PULSE® firmy Brüel & Kjaer z przenośną kasetą pomiarową typu B&K 3650C. System ten był wyposażony w pięciokanałowy moduł kontrolera wejścia/wyjścia typu 7537 oraz 12 kanałowy moduł wejściowy z technologią Dyn-X®. Moduł wejściowy umożliwia synchroniczny pomiar do 17 sygnałów w szerokim paśmie częstotliwości od 0 do 25,6 kHz. System pomiarowy współpracował z przetwornikami przyspieszeń drgań typu B&K 4514B oraz B&K 4504A również firmy Brüel & Kjaer. Na rysunku 4 przedstawiono wybrane widmo przyspieszeń drgań zarejestrowane na kadłubie pompy paliwowej zasilającej pracujący palnik kotła.



Rys. 4. Przykładowe widmo przyspieszeń drgań zarejestrowane na kadłubie pompy paliwowej pracującego palnika

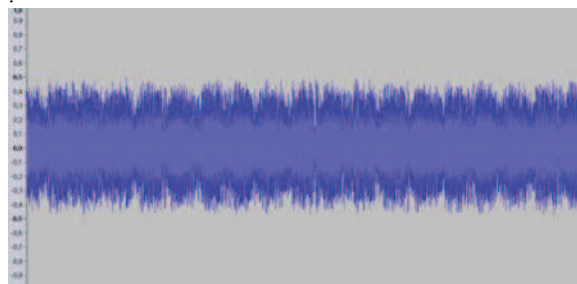


Analizując otrzymane wyniki pomiarów sygnału drganiowego zidentyfikowano charakterystyczne składowe harmoniczne związane z procesem spalania, widoczne dla częstotliwości 10,5 kHz oraz składowe harmoniczne napędu pompy paliwowej palnika w niskim paśmie częstotliwości rzędu 60 i 180 Hz, obliczone z prędkości obrotowej napędu pompy. Są one widoczne na widmie przyspieszeń drgań zarejestrowanych na kołnierzu mocującym palnik do walczaka kotła.

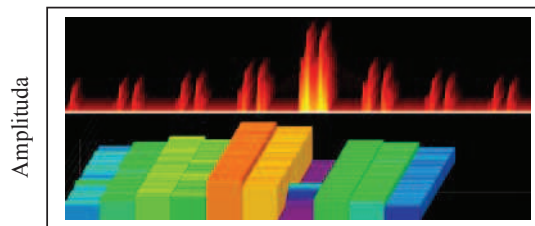
W przypadku rejestracji sygnałów emisji akustycznej istotne znaczenie ma wybór doświadczalnie wyselekcjonowanego punktu pomiaru. W celu zapewnienia skutecznej separacji sygnałów związanych z pracą kotła parowego zastosowano układ wzmacniający sygnał czujnika emisji akustycznej charakteryzujący się niskimi szumami własnymi i ściśle określonym pasmem przenoszonych częstotliwości.

Do pomiarów zastosowano aparaturę opracowaną w Pracowni Analizy Sygnału Emisji Akustycznej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego. Ponieważ sygnał z typowego czujnika emisji akustycznej posiada niski poziom napięcia (rzędu miliwoltów) i pasmo od około 0,1 kHz do 1,5 MHz, konieczne było uprzednie odpowiednie przekształcenie sygnału. Sygnał emisji akustycznej był najpierw wzmacniany w przedwzmacniaczu, a następnie odfiltrowany. Do rejestracji sygnałów szumowych emisji akustycznej generowanych przez przepływ paliwa oraz powietrza zasilającego, potrzebny był wzmacniacz niskoszumny o impedancji wejściowej  $> 0.5 \text{ Ohm}$  i paśmie przenoszenia 0.5 – 40 kHz. Zastosowano tu zapis sygnału z następującymi parametrami: wejście liniowe, częstotliwość próbkowania 88,2 kHz, rozdzielczość 16 bitów, waga najmłodszego bitu z zastosowaniem wzmocnienia  $\times 100\text{--}2$  mikrovolty.

Na rysunku 6 przedstawiono wybrany przebieg czasowy sygnału źródłowego emisji akustycznej z pracującej pompy paliwowej zasilającej kocioł i na rysunku 6 jego wizualizację amplitudowo częstotliwościową.

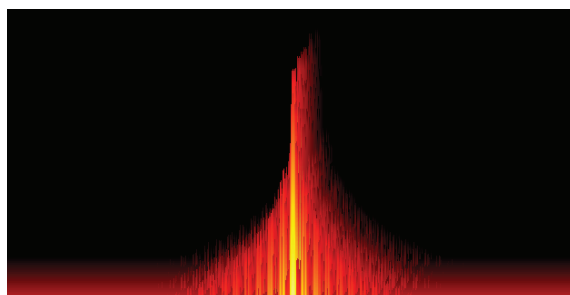


Rys. 5. Przebieg czasowy sygnału źródłowego emisji akustycznej z pracującej pompy paliwowej zasilającej kocioł



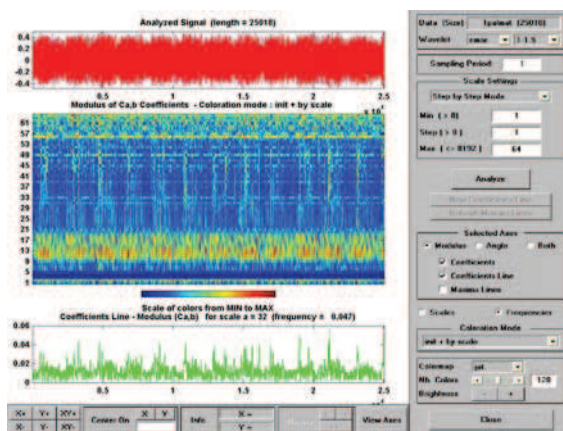
Rys. 6. Wizualizacja procesu emisji akustycznej z pompy paliwowej zasilającej pracujący palnik kotła

Wizualizację sygnału emisji akustycznej dla przepływu powietrza podawanego przez dmuchawę, bez pracy palnika przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Wizualizacja sygnału emisji akustycznej dla przepływu powietrza podawanego przez dmuchawę (bez pracy palnika)

Klasyczne metody Fouriera nie mogą być stosowane do analizy procesów niestacjonarnych. Nie dają one informacji na temat lokalnych rozkładów częstotliwościowych. Zamiast klasycznej transformacji Fouriera zastosowano transformację falkową, gdzie częstotliwość reprezentowała współczynnik skalujący. Na rysunku 8 przedstawiono dekompozycję falkową sygnału emisji akustycznej kotła z zapalonym palnikiem.



Rys. 8. Dekompozycja falkowa sygnału emisji akustycznej kotła z zapalonym palnikiem

Stosując metodę dekompozycji falkowej analizowano sygnał z gorszą rozdzielczością w dziedzinie częstotliwości w porównaniu z przekształceniem Fouriera, natomiast można było pozyskać informację o ewentualnych zmianach charakterystyki widmowej sygnału w kolejnych, względnie krótkich, przedziałach czasu pracy kotła.

Skutki degradacji i niesprawności odwzorowuje wzrost drgań i zmiana charakteru widma czasowo-widmowego generowanego sygnału wibroakustycznego kotła. Do jego opisu mogą/są powszechnie stosowane modele diagnostyki wibroakustycznej [3, 9, 10].

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE I PODSUMOWANIE

Nadzór eksploatacyjny kotła odbywa się dotychczas przede wszystkim w oparciu o wartości parametrów sygnału ciepłno – przepływowego oraz metodami wizualizacyjnymi. Osady i zanieczyszczenia kotła wpływają znacząco na jakość procesu przejmowania ciepła, a regulacja palnika na proces spalania paliwa. Dlatego spośród sygnałów generowanych przez parowy kocioł okrętowy za podstawowy w nadzorowaniu poprawności funkcjonowania kotła należy uznać sygnał ciepłno – przepływowy. Jego modele doczekały się w literaturze dostatecznie wszechstronnych opracowań [6, 8, 11, 12].

Ze względu na łatwość pozyskiwania wartości parametrów sygnału emisji produktów spalania modele (9) – (19) mogą mieć one zastosowanie w uwiarygodnianiu parametrów modeli ciepłno – przepływowych (5) – (8). Wynik tej konfrontacji będzie dobrym uzupełnieniem uzasadnienia podejmowanych usługowych decyzji eksploatacyjnych. Zależność (9) dzięki swej prostocie dobrze oddaje tendencje zmian wartości sprawności kotła, natomiast sprawność spalania  $\eta_{Af}$  obliczona ze związku (10) jest wygodna jako parametr kontrolny podczas regulacji palnika. Modele te mogą być również pomocne w ocenie skuteczności przeprowadzanych usług – odtwarzania stanu technicznego powierzchni wymiany ciepła kotła (czyszczenia) i regulacji palnika.

Kotły parowe podczas pracy generują drgania, hałas i pulsacje czynników roboczych. Są one przyczynami i/lub efektami degradacji stanu technicznego kotłów. Bezpośrednim powodem emisji akustycznej może być zmiana naprężeń, temperatury, promieniowanie, erozja a nawet korozja materiału kotła. Zaistnienie emisji akustycznej nabytej w trakcie eksploatacji należy uznać za sygnał degradacji/zmiany własności struktury warstwy wierzchniej i wnętrza materiału elementu konstrukcji. Sygnał ten ze względu na doraźny charakter pozyskiwania jego parametrów należy uznać za źródło informacji diagnostycznej, po wnikliwej ich identyfikacji w ramach systemu diagnostycznego.

Zebrane doświadczenia i pozyskane wyniki podczas eksperymentalnej identyfikacji parametrów sygnału wibroakustycznego nasuwają w badaniach celowość pomiarów:

a/ w komorze spalania:

- ciśnienia akustycznego – czujnikami ciśnienia,
- częstotliwości w komorze spalania,
- ciśnienia akustycznego do określenia zmiany fazy,

b/ dla elementów kotła:

- drgań czujnikami prędkości i przyspieszenia,
- natężenia dźwięku wyemitowanego przez elementy kotła.

Przedstawione modele sygnałów generowanych przez kotły i otrzymane wyniki ich identyfikacji parametrycznej wnoszą zachęcające przesłanki do wdrożenia quasidynamicznego obsługiwanie kotłów okrętowych.

## LITERATURA

- [1] Adamkiewicz A., Kolwzan K.: *Influence Of Combustion Products On Faults In Ship Auxiliary Boilers*. Materiały XXVIII Sympozjum Siłowni Okrętowych. Akademia Morska w Gdyni, 15 – 16 listopada 2007, Gdynia 2007.
- [2] Adamkiewicz A., Tomaszewski F.: *Analysis Of Possibilities Of Applying Ship Boiler Maintenance Strategies With Quasidynamic Diagnostics*. 27-th International scientific conference DIAGO® 2008. Technical diagnostics of machines and Manufacturing equipment. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Asociace technických diagnostiků ČR o.s., Rožnov pod Radhoštěm, 5. - 6. February 2008.
- [3] Cempel Cz., Tomaszewski F.: *Diagnostyka maszyn. Zasady Ogólne. Przykłady zastosowań*. Międzynarodowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom 1992.
- [4] Combustion Gas Analyzer IMR 3000. IMR Environmental Equipment, Inc., St. Petersburg, [www.imrusa.com](http://www.imrusa.com)
- [5] *Flue Gas Analyzer GA-20 plus*. Operating manual 01/2003. MADUR Electronics, 01/2003.
- [6] Głuch J., Krzyżanowski J.: *Diagnostyka ciepłno-przepływowa obiektów energetycznych*. Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk 2004.
- [7] Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W.: *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*. WNT, Warszawa 2002.
- [8] Kruczek S.: *Kotły. Konstrukcje i obliczenia*. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2001.
- [9] Niziński S., Michalski R.: *Diagnostyka obiektów technicznych*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2002.



- [10] PARAT Andes Halvorsen A/S.: *Operator's Manual For Parat Steam Boiler Plant*. Flekkefjord, Norway, Steam and Heat Industry, Boiler Factory, 1995.
- [11] Pronobis M.: *Modernizacja kotłów energetycznych*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002.
- [12] Zajczyk R.: *Modele matematyczne systemu elektroenergetycznego do badania elektromechanicznych stanów nieustalonych i procesów regulacyjnych*. Gdańsk, PAN Komitet Elektrotechniki, 2003.
- [13] <http://www.parat.no/index2.htm>
- [14] [www.imrusa.com](http://www.imrusa.com)



**Andrzej ADAMKIEWICZ** dr hab. inż. prof. nadzw. na Wydziale Mechanicznym Akademii Morskiej w Szczecinie. Doktoryzował się w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Stopień doktora habilitowanego uzyskał na Wydziale Maszyn

Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Reprezentowane dyscypliny i specjalności: budowa i eksploatacja maszyn: ciepłe maszyny wirnikowe, siłownie okrętowe i diagnostyka maszyn. Pracę naukową i dydaktyczną realizuje w zakresie okrętowych układów energetycznych: maszyn przepływowych, turbin okrętowych, napędów parowych, a w tym kotłów parowych opalanych, utylizacyjnych i fluidalnych oraz szeroko rozumianych zagadnień ochrony środowiska morskiego. Członek Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN, Zachodniopomorskiego Zespołu Środowiskowego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN, członek Rady Technicznej Polskiego Rejestru Statków, Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych oraz Zespołu Techniki Morskiej Sekcji Technicznych Środków Transportu Komitetu Transportu PAN.



**Artur BEJGER** dr inż. jest adiunktem w Katedrze Diagnostyki Maszyn Okrętowych Akademii Morskiej w Szczecinie. Prodziekan ds. studiów dziennych Wydziału Mechanicznego AM. Pracę dydaktyczną realizuje na przedmiotach związanych z diagnozo-

waniem oraz technologią remontów maszyn okrętowych. Działalność naukową koncentruje wokół problematyki diagnozowania maszyn (ze szczególnym uwzględnieniem układów wtryskowych silników wysokoprężnych) z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej. Jest współautorem nowej metodyki badawczej (z opracowaniem przenośnego urządzenia

pomiarowego) układów wtryskowych silników wysokoprężnych. Członek Zachodniopomorskiego Zespołu Środowiskowego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN oraz Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych.



**Krzysztof KOŁWZAN**, mgr inż., pracownik Inspektoratu Konwencyjnego Polskiego Rejestru Statków S.A. Absolwent Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni. Pracę magisterską obronił w 1985 r. (promotor prof. mgr inż. Andrzej Perepeczko).

Zainteresowania naukowe autora obejmują zagadnienia: eksploatacji statków i siłowni okrętowych ze szczególnym uwzględnieniem wymagań stawianych im przez międzynarodowe konwencje o ochronie środowiska morskiego oraz diagnostykę okrętowych maszyn i urządzeń. Jest ekspertem Ministerstwa Infrastruktury w czasie sesji Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO) oraz przewodniczy polskiej sekcji Komitetu Ochrony Środowiska Morskiego (IMO MEPC).