

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

EXPLO-SHIP 2004

Artur Bejger

**Możliwości aplikacyjne emisji akustycznej
do badania układów wtryskowych silników okrętowych**

Słowa kluczowe: emisja akustyczna, układ wtryskowy silników wysokopięnych, pompa wtryskowa, wtryskiwacz, zjawiska hydrauliczne w przewodzie wtryskowym

Dokonano próby zastosowania sygnałów emisji akustycznej do diagnozowania stanów niesprawności oraz wykrycia źródeł sygnału zachodzących w układzie wtryskowym silników okrętowych. Sygnały emisji akustycznej są zależne od stanu technicznego elementów układu wtryskowego.

**Possible Applications of Acoustic Emission Signals
for Testing Fuel Injection Systems of Marine Engines**

Key words: acoustic emission, fuel injection system, fuel injection pump, injector, hydraulic effects in high pressure pipe

The paper presents the results of acoustic emission signals application for diagnosing defects detecting signal sources in the fuel injection system of marine diesel engines. Changes of acoustic emission signals are sensitive to the working of the injection pump and the condition of injectors. The emitted signals are dependent on their technical condition.

Wstęp

Podczas eksploatacji elementy układu wtryskowego ulegają nie dającemu się zatrzymać zużyciu. Mogą wystąpić zakłócenia w postaci zanieczyszczeń i zmian w układzie wtryskowym. Wymagania dotyczące warunków pracy układu wtryskowego (zwłaszcza dla silników okrętowych), są związane z możliwością jego pracy w różnych położeniach na silniku (związanymi zarówno z ich usytuowaniem jak i z przechyłami statku – silnika), w różnych warunkach otoczenia, określonych temperaturą i ciśnieniem powietrza oraz stopniem zapylenia. Silnik okrętowy ze względu na bardzo trudne warunki pracy, narażony jest na liczne problemy, z którymi boryka się użytkownik. Spośród podstawowych układów funkcjonalnych silnika okrętowego, liczba uszkodzeń układu paliwowego stanowi największy udział procentowy. W szczególności dotyczy to pomp wtryskowych i wtryskiwaczy (tab. 1).

Tabela 1

Zestawienie procentowe uszkodzeń poszczególnych zespołów układu wtryskowego silnika okrętowego [2]
Percentage of failures of injection system of marine engine elements

Struktura uszkodzeń układu paliwowego			
Lp.	Nazwa układu	Liczba uszkodzeń	Udział %
1	Wtryskiwacz	53	54,6
2	Pompa wtryskowa	37	38,1
3	Przewód wysokiego ciśnienia	6	6,2
4	Zawór stałego ciśnienia	1	1,1
Razem		97	100,0

Na przebieg i jakość procesu wtrysku paliwa zasadniczo wpływają: konstrukcja, stan techniczny aparatury a także dokładność regulacji układu wtryskowego. Stosowane obecnie metody pomiarowe polegają przede wszystkim na pomiarze przebiegu ciśnienia paliwa w przewodzie paliwowym. Jednakże niektóre towarzystwa klasyfikacyjne nie zezwalają na ingerencję w wysokociśnieniowy przewód wtryskowy (na czym bazują przecież typowe urządzenia służące do pomiaru przebiegu ciśnienia wtrysku paliwa).

Na statkach do pomiaru ciśnienia spalania i ciśnienia wtrysku najczęściej są stosowane czujniki piezoelektryczne i tensometryczne, np. firm ASEA oraz KISTLER. Charakteryzują się one dobrym odwzorowaniem zmian ciśnienia oraz dobrą dynamiką, lecz stosunkowo szybko się zużywają. Poza tym istnieje dość poważny problem związany z bezpośrednią ingerencją w układ wtryskowy wy-

sokociśnieniowy. Powoduje to m.in. zwiększenie niebezpieczeństwa związanego z możliwością wystąpienia awarii układu a tym samym zmniejszenie niezawodności i bezpieczeństwa żeglugi.

Istnieje ciągła potrzeba diagnozowania pomp wtryskowych i wtryskiwaczy. Brak jest jednocześnie niezawodnych i wystarczających narzędzi diagnostycznych. Prowadzone badania własne autora z zakresu emisji akustycznej pozwalają stwierdzić, że do oceny stanu technicznego układu wtryskowego mogłaby być wykorzystana emisja akustyczna.

1. Zjawiska hydrauliczne zachodzące w przewodzie wtryskowym wysokociśnieniowym

W objętości paliwa znajdującej się w przewodzie pomiędzy wylotem pompy wtryskowej (króćcem tłocznym) a wejściem do wtryskiwacza występują zaburzenia wywołane:

- tłoczeniem paliwa przez pompę,
- zmienną prędkością tłoka elementu tłoczącego (silniki klasyczne),
- dławieniem przepływu w otworach przelotowych elementu tłoczącego i zaworu tłoczącego,
- zmianami przekrojów przepływowych w rozpylaczu,
- ruchem iglicy rozpylacza.

W różnych punktach przewodu, w dowolnej chwili występują różne wartości ciśnień i prędkości paliwa. Rozpoczęcie tłoczenia paliwa i otwarcie zaworu tłoczącego wywołuje wzrost ciśnienia na wlocie do przewodu. Prędkość narastania tego ciśnienia zależy od prędkości otwierania zaworu tłoczącego i natężenia tłoczenia. To spiętrzenie ciśnienia paliwa na wlocie rozchodzi się z prędkością dźwięku w kierunku wtryskiwacza, zapoczątkowując tak zwaną pierwotną falę ciśnienia, zwaną również pierwszą falą tłoczącą lub uderzeniem (naporem) tłoczenia (rys. 1). Według autorów pracy [1] wartość spiętrzonego ciśnienia p można wyznaczyć ze wzoru:

$$p_p = \frac{E \cdot V_p}{a} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

gdzie:

- E – moduł ściśliwości (sprężystości) paliwa – dla olejów napędowych równy 1700 – 1900 MPa,
- a – prędkość rozchodzenia się dźwięku w paliwie z jaką przemieszcza się fala ciśnienia (≈ 1450 m/s),
- V_p – prędkość paliwa na wlocie do przewodu:

$$V_p = \frac{q_t}{F_p} \quad (2)$$

gdzie:

F_p – przekrój przepływowy przewodu,
 q_t – natężenie tłoczenia paliwa przez pompę wtryskową wyrażone iloczynem powierzchni tłoka i jego prędkości:

$$p_p = \frac{V_p \cdot 1700}{1450} = 1,2 V_p \quad (3)$$

Fala ciśnienia dochodzi do wtryskiwacza w czasie t określonym zależnością:

$$t = \frac{l_p}{a} \quad [\text{s}] \quad (4)$$

lub wyrażając czas przejścia fali ciśnienia w stopniach obrotu wału korbowego silnika:

$$\alpha = 6 n t \quad [^\circ\text{OWK}] \quad (5)$$

gdzie n – prędkość obrotowa wału korbowego [obr/min]:

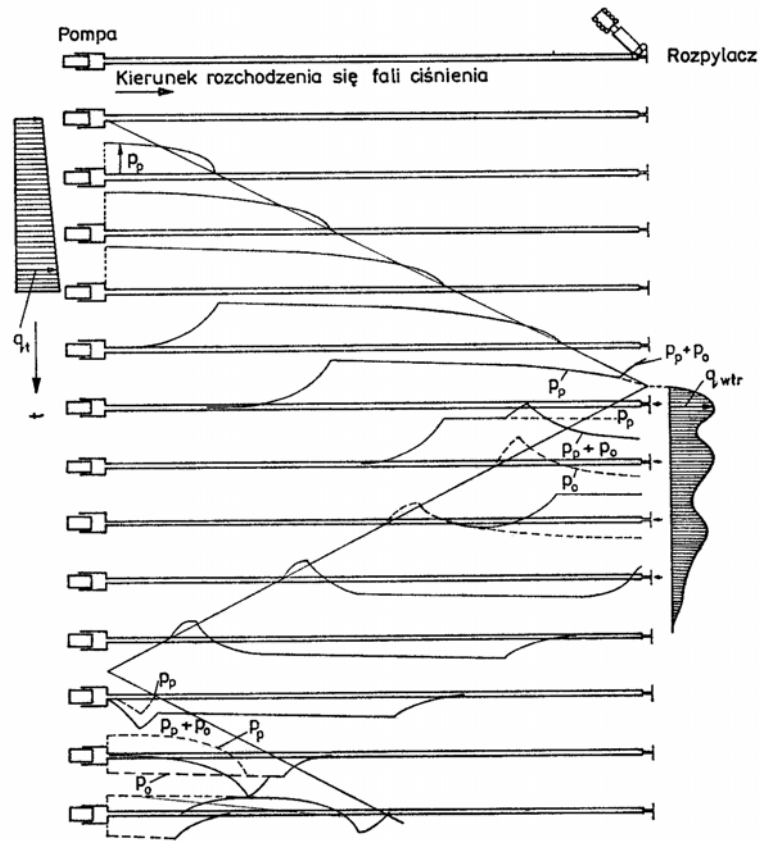
$$\alpha = \frac{6n \cdot l_p}{a} = \frac{6n \cdot l_p}{1430} = 4,2 \cdot 10^{-3} n \cdot l_p \quad [^\circ\text{OWK}] \quad (6)$$

W miarę oddalania się od początku przewodu wtryskowego, ciśnienie słabnie i w komorze ciśnieniowej rozpylacza może być mniejsze niż jego ciśnienie otwarcia. Pierwotna fala ciśnienia odbija się od rozpylacza i z tą samą prędkością a przemieszcza się w kierunku pompy wtryskowej. W tym czasie, wskutek trwającego w dalszym ciągu procesu tłoczenia, powstają nowe fale ciśnienia, które nakładają się na fale odbite.

Spiętrzenie ciśnienia paliwa odbywa się w całym okresie tłoczenia paliwa przez pompę wtryskową. Ściskana objętość paliwa ulega odkształceniom sprężystym. Mimo dość znacznych lokalnych spiętrzeń i spadków ciśnień podczas tłoczenia, w całej przestrzeni pomiędzy pompą wtryskową a wtryskiwaczem utrzymuje się wysokie ciśnienie i zwiększa się ono w miarę zwiększania natężenia tłoczenia.

Przesuwanie się fali ciśnienia wywołuje chwilowe zmniejszanie i powiększanie lokalnych objętości paliwa, przemieszczanie się jego cząstek w kierunku wtryskiwacza. Proces generowania i odbijania fal tłoczonych trwa do chwili, gdy

spiętrzenie ciśnienia w komorze ciśnieniowej rozpylacza przewyższy jego ciśnienie otwarcia. Pierwotna fala ciśnienia odbija się od rozpylacza i z tą samą prędkością a przemieszcza się w kierunku pompy wtryskowej. W tym czasie, wskutek trwającego w dalszym ciągu procesu tłoczenia, powstają nowe fale ciśnienia, które nakładają się na fale odbite. Proces generowania i odbijania fal tłoczących trwa do chwili, gdy spiętrzenie ciśnienia w komorze ciśnieniowej rozpylacza przewyższy jego ciśnienie otwarcia. Pod wpływem zachodzących zmian ciśnienia a także przepływającego przez przewód paliwa, generowana jest również emisja akustyczna.



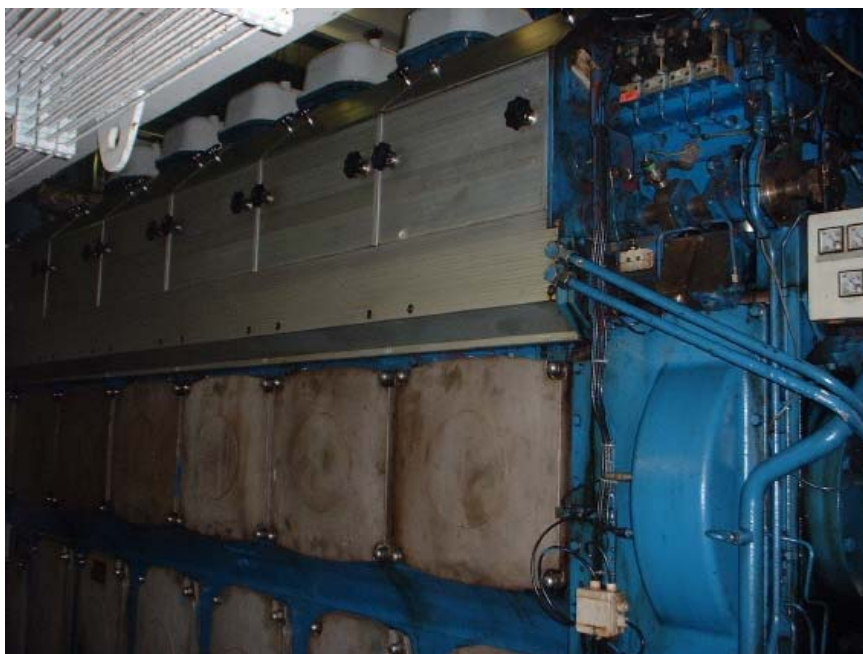
Rys. 1. Schemat rozchodzenia się fali ciśnienia w przewodzie wtryskowym [1];

q_{wtr} – natężenie wtrysku, p_o – ciśnienie fali odbitej, t – czas

Fig. 1. Wave pressure spreading in a high pressure pipe

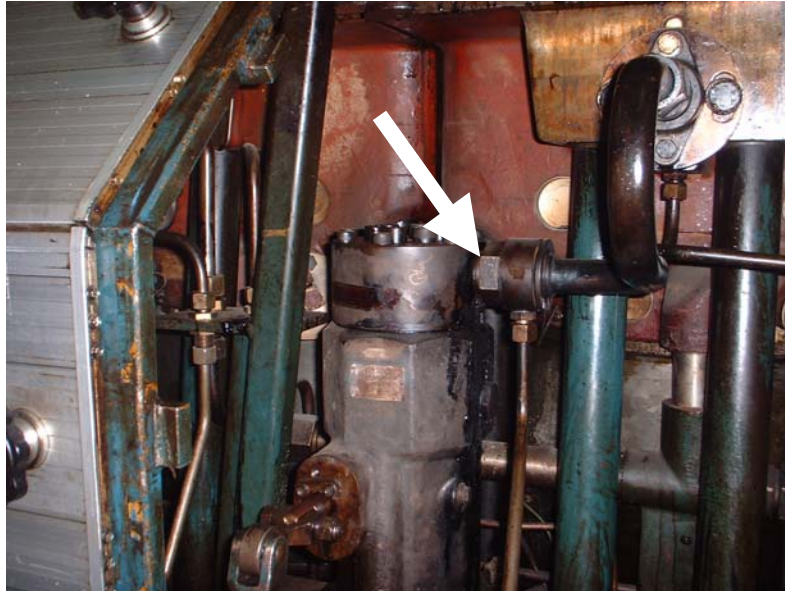
2. Obiekt badań

Pomiarów dokonano na dwóch typach silników firmy Wartsila: SW 380 (rys. 2) pracującym jako napęd główny promu „Polonia” oraz SW 280 będącym układem agregatem prądotwórczym na tymże samym statku. Tor pomiarowy składał się z przetwornika szerokopasmowego emisji akustycznej serii WD (firmy Endevco), skąd sygnał był przekazywany przez przedwzmacniacz na analizator emisji akustycznej EA 100 (produkcji IPPT PAN) i dalej do komputera. W trakcie badań dokonywano również (w tradycyjny sposób) pomiarów przebiegów procesu spalania na poszczególnych cylindrach.



Rys. 2. Widok ogólny silnika Wartsila SW 380 pracującego jako napęd główny promu „Polonia”
Fig. 2. View of main engine – Wartsila SW 380 type – of the ferry vessel "Polonia"

Czujnik emisji akustycznej mocowano na zewnętrznej części króćca tłoczno-pompowego pompy wtryskowej (rys. 3). Doświadczalnie stwierdzono, że daje to najlepsze odwzorowanie zarówno zjawisk zachodzących bezpośrednio w pompie wtryskowej (np. praca zaworka odciążającego [2]), jak również zjawisk hydrodynamicznych związanych z przepływem paliwa przez przewód wtryskowy i wtryskiwacz.



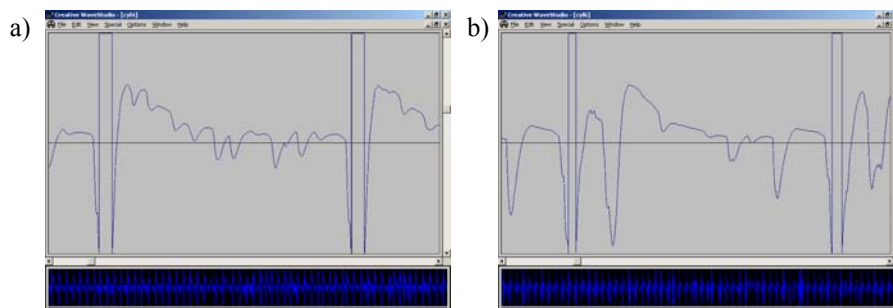
Rys. 3. Pompa wtryskowa silnika Wartsila SW 380 (strzałką zaznaczono miejsce mocowania przetwornika)

Fig. 3. Fuel injection pump of Wartsila SW 380 engine (the point of acoustic emission sensor mounting is marked by arrow)

3. Wyniki pomiarów

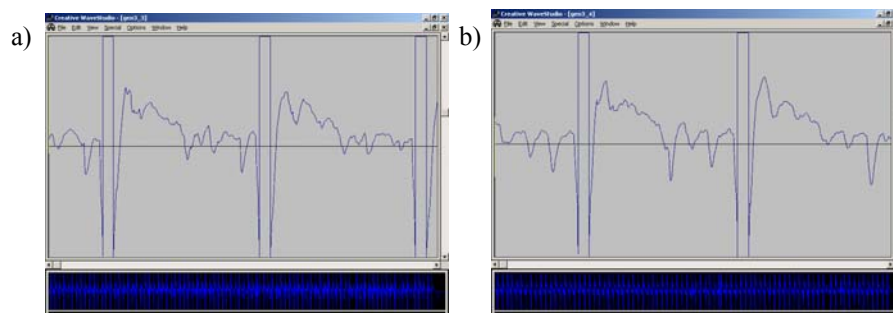
Na rysunku 4 przedstawiono sygnał emisji akustycznej dla 4 i 6 cylindra jednego z silników napędu głównego (Wartsila **SW 380**). Największa energia sygnału emisji akustycznej jest związana z maksymalnym ciśnieniem wtrysku. Widoczny jest wyraźny spadek energii sygnału na cylindrze 6 (bezpośrednio po osiągnięciu maksymalnego ciśnienia wtrysku). Było to związane bezpośrednio ze stanem zaworu odciążającego.

Na rysunku 5 pokazano przebiegi sygnałów emisji akustycznej dla dwóch różnych cylindrów silnika **SW 280** (agregat prądotwórczy), przy jednakowych ustawieniach regulacyjnych oraz podobnym stanie technicznym układu wtryskowego. W obu przypadkach wyraźnie widoczne są takie same źródła sygnałów emisji akustycznej. Zmniejszona dawka paliwa spowodowana niewłaściwym ustawieniem zaworu wtryskowego jest uwidoczniiona na rysunku 6b. Przed osiągnięciem maksymalnego ciśnienia wtrysku jest podwyższony stan energetyczny, wywołany niewielką różnicą wzrostu ciśnienia otwarcia wtryskiwacza.



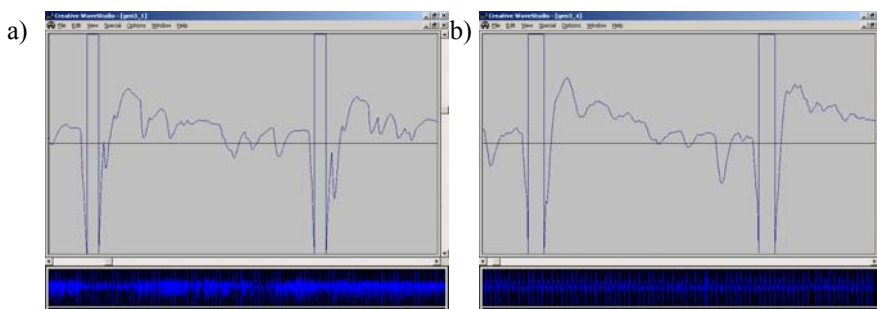
Rys. 4. Porównanie sygnałów emisji akustycznej (RMS) na silniku **Wartsila SW 380** dla procesu wtrysku: a) na 4 cylindrze, b) na 6 cylindrze

Fig. 4. Comparison of acoustic emission signals in the main engine Wartsila SW 380 during injection process: a) in 4th cylinder, b) in 6th cylinder



Rys. 5. Porównanie sygnałów emisji akustycznej (RMS) na silniku **Wartsila SW 280** (agregat prądowłórczy) dla procesu wtrysku: a) na 3 cylindrze, b) na 4 cylindrze (w obu przypadkach jednakowa regulacja układu pompa – wtryskiwacz oraz jednakowy stan techniczny pompy wtryskowej)

Fig. 5. Comparison of acoustic emission signals in Wartsila SW 280 type engine during injection process: a) in 3rd cylinder, b) in 4th cylinder



Rys. 6. Sygnał emisji akustycznej (RMS) dla silnika **SW 280** na cylindrze 1 i 4. Zmniejszona dawka paliwa na cylindrze 4 (rys. b) spowodowana niewłaściwym ustawieniem wtryskiwacza

Fig. 6. Acoustic emission signals (RMS) in Wartsila SW 280 type engine during injection process in 1st cylinder and 4th cylinder. Decreased fuel supply in 4th cylinder (b) caused by wrong adjustment of injector

Wnioski

W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań związanych z diagnozowaniem (bezinwazyjnym) układów wtryskowych silników okrętowych. Emisja akustyczna może być jedną z metod diagnozowania układu wtryskowego silników wysokoprężnych. Może być szczególnie przydatna w przypadku zastosowań w silnikach okrętowych. Ze względu na odbierany wysokoczęstotliwościowy sygnał (rzędu 1 MHz), sygnały pochodzące z innych źródeł nie nakładają się na badany. Są prowadzone ciągłe badania ukierunkowane na dokładne określenie źródeł sygnałów emisji akustycznej, pochodzących od poszczególnych zjawisk występujących w układzie wtryskowym silnika okrętowego.

Literatura

1. Falkowski H., Hauser G, Janiszewski T., Jaskuła A., *Układy wtryskowe silników wysokoprężnych*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1989.
2. Bejger A., *Diagnostyka wtryskiwaczy z wykorzystaniem emisji akustycznej*, Rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2001.
3. Dokumentacja techniczno-ruchowa silników Wartsila SW 280 i SW 380.
4. Bejger A., *Możliwości wykorzystania sygnałów emisji akustycznej w diagnozowaniu wybranych urządzeń silowni okrętowej*, V Krajowa Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów Diag’2003”, 13-17 października 2003, Ustroń, s. 301–302.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Jerzy Honczarenko
dr hab. inż. Oleh Klyus, prof. AM

Adres Autora

dr inż. Artur Bejger
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Nauk Podstawowych Technicznych
Zakład Diagnostyki i Remontów Maszyn Okrętowych
ul. Podgórna 51/53, 70-205 Szczecin