

## BADANIA WSTĘPNE CHARAKTERYSTYK PRACY ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO ZA POMOCĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ

*W artykule opisano emisję akustyczną oraz aparaturę niezbędną do pomiarów przy użyciu tej metody. Omówiono stanowisko badawcze, na którym przeprowadzono badania łożyska ślizgowego metodą emisji akustycznej. Przedstawiono sposób przeprowadzania badań wstępnych dotyczących możliwości zastosowania emisji akustycznej do badania warunków pracy łożyska ślizgowego. Przeanalizowano wpływ zmiany prędkości obrotowej czopa wału oraz obciążenia łożyska na sygnał emisji akustycznej.*

**Słowa kluczowe:** emisja akustyczna, łożysko ślizgowe, diagnostyka.

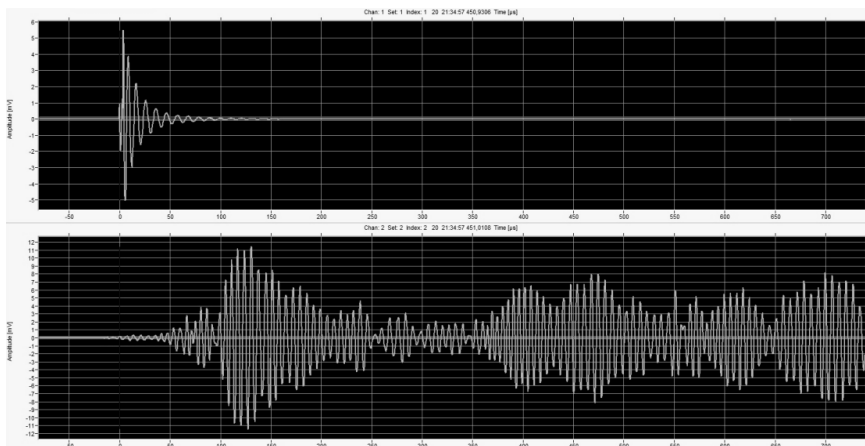
### WSTĘP

Emisja akustyczna to określenie zjawiska, w którym występuje generowanie i propagowanie chwilowych fal sprężystych, będących efektem wyzwolenia energii nagromadzonej w obrębie ośrodka lub powodowanego przez proces fizyczny. Emisję akustyczną można zasadniczo podzielić na dwa rodzaje, tj.: emisję dyskretną lub impulsową (*ang. burst emission*), emisję ciągłą (*ang. continuous emission*), oraz emisję mieszaną. Emisja impulsowa charakteryzuje się czasem trwania krótszym bądź równym czasowi odstępu między impulsami. Przykład tego typu emisji generowanej przez łamanie grafitu w ołówku przedstawiono na rysunku 1a. W emisji ciągłej natomiast czas trwania jest dłuższy od czasu odstępu między impulsami. Przykład sygnału generowanego przez emisję ciągłą pokazano na rysunku 1b.

Źródłami emisji impulsowej są np. powstające i rozwijające się pęknięcia, mikropęknięcia oraz bliźniakowanie. Emisja ciągła jest natomiast generowana przez odkształcanie plastyczne i przebudowę mikrostruktury ciała stałego, ruchy elementów badanego ośrodka połączone z tarciami, a także procesy energetyczne oraz biologiczne [5, 6, 10].

Emisji akustyczna stanowi jedną z metod badań nieniszczących i została ujęta w normie PN-EN ISO 9712:2012 [9]. Normą przewodnią opisującą ogólne zasady badań za pomocą tej metody jest PN-EN 13554:2011 [7]. Metoda emisji akustycznej opiera się na rejestrowaniu fal sprężystych, które powstają na skutek uwolnienia energii sprężystej nagromadzonej w materiale, powstającej w wyniku zmian stanu równowagi energetycznej układu. Innymi słowy można powiedzieć,

że powstają one na skutek zmian w materiale zarówno na poziomie mikro-, jak i makrostrukturalnym. Czynnikiem, który wywołuje wyzwolenie energii, a co za tym idzie – powstawanie fal sprężystych, jest proces fizyczny, np. naprężenie mechaniczne, termiczne, wpływ środowiska bądź też proces chemiczny [6]. Typowy dla emisji akustycznej zakres częstotliwości zazwyczaj wyznacza się w przedziale 2 kHz–2 MHz [4].



**Rys. 1.** Przykładowe sygnały emisji akustycznej: a) sygnał dyskretny (impulsowy), b) sygnał ciągły

**Fig. 1.** Example of acoustic emission signals: a) burst signal, b) continuous signal

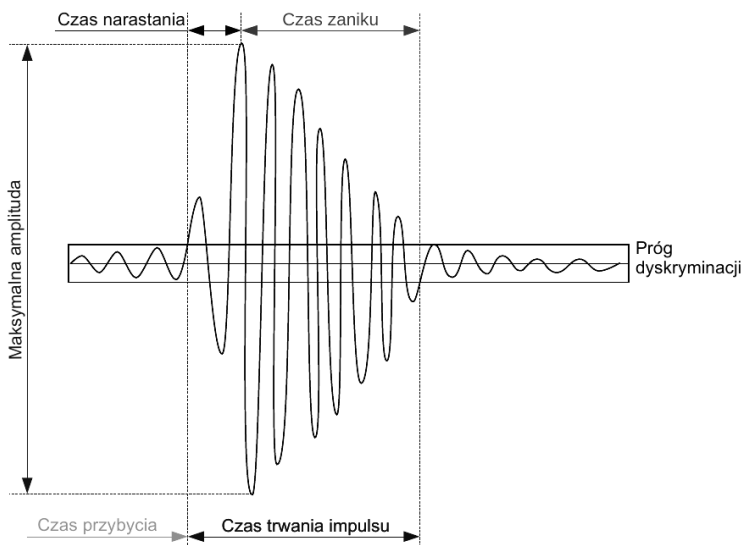
## 1. EMISJA AKUSTYCZNA

W celu umożliwienia oceny i porównywania sygnałów emisji akustycznej niezbędna jest znajomość podstawowych, charakterystycznych miar sygnału (rys. 2), ujętych w normie PN-EN ISO 1330-9:2009. Należą do nich [8]:

- czas przybycia (bezwzględny czas, w którym impuls po raz pierwszy przekracza próg dyskryminacji);
- liczba przekroczeń progu dyskryminacji przez sygnał impulsowy;
- maksymalna amplituda sygnału impulsowego (maksymalna amplituda podczas trwania sygnału impulsowego);
- czas narastania sygnału (przedział czasu pomiędzy pierwszym przekroczeniem progu dyskryminacji a maksymalną amplitudą sygnału impulsowego);
- czas trwania sygnału (przedział czasu pomiędzy pierwszym a ostatnim przekroczeniem progu dyskryminacji przez sygnał impulsowy);
- liczba przekroczeń progu dyskryminacji przez sygnał impulsowy;
- energia sygnału;
- wartość skuteczna sygnału – RMS (ang. *root mean square*).

Do zalet metody emisji akustycznej należą:

- bardzo wczesne wykrycie mikrozmiian w strukturze bądź bardzo wolno powiększających się wad w materiale – stanowi to niewątpliwie największą zaletę. Przy użyciu innych metod jest to utrudnione;
- sposobność rejestracji procesów zachodzących w znacznej objętości badanego elementu. Wysoka czułość tej metody pozwala na monitorowanie i wykrywanie sygnałów emisji akustycznej przy użyciu względnie niewielkiej liczby czujników zamontowanych na badanej konstrukcji;
- możliwość badania urządzeń i konstrukcji w sposób okresowy bądź ciągły bez wyłączenia ich z eksploatacji;
- możliwość lokalizacji uszkodzeń przy użyciu wielokanałowych układów pomiarowych. Do lokalizacji źródła leżącego na prostej wymagany jest układ dwukanałowy, natomiast do zlokalizowania źródła leżącego na płaszczyźnie – układ czterokanałowy. Lokalizację źródła dokonuje się zwykle za pomocą metody triangulacyjnej na podstawie różnicy czasu przybycia sygnału  $\Delta t$ . Różnice w odległości między źródłem a poszczególnymi czujnikami są równe różnicom czasu przybycia sygnału do poszczególnych czujników z prędkością fali sprężystej. Czas ten mierzy się dla poszczególnych przetworników i są to niezbędne dane wejściowe dla triangulacyjnego algorytmu lokalizacji źródła [3].



**Rys. 2.** Przykład sygnału emisji dyskretnej (impulsowej) z opisanymi charakteryzującymi go parametrami

**Fig. 2.** Example of burst emission signal with characteristic parameters

Wady metody emisji akustycznej:

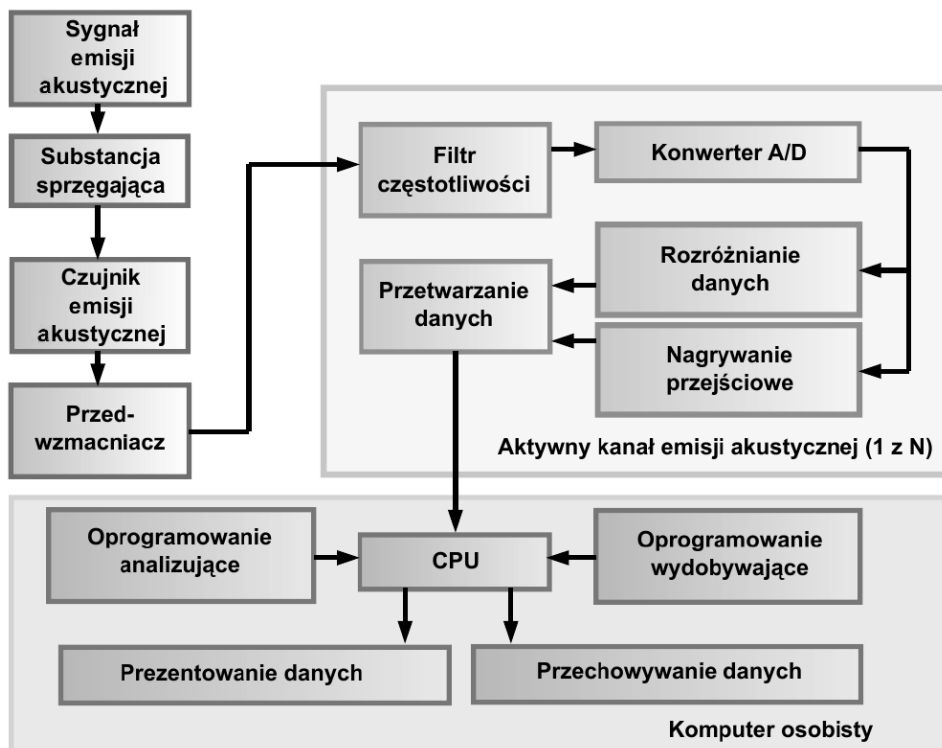
- konieczność bardzo złożonej obróbki sygnałów – jest to największa wada tej metody;
- szeroki zakres widma częstotliwości sygnałów emisji akustycznej w zależności od badanego materiału nastrożający wielu trudności;
- konieczność rejestracji amplitudy oraz czasu trwania sygnału od mikrosekund

do dziesiątych części sekundy;

- występowanie bardzo słabych sygnałów, które dość często są zakłócone przez tło szumów. W celu zminimalizowania ich wpływu istnieje konieczność stosowania filtrów, które wycinają szумы oraz akustyczne izolowanie urządzenia pomiarowego;
- zniekształcanie sygnału przez tłumienie ośrodka i wielokrotne odbicia od granic materiału. Wynika to z faktu, że wielokrotnie źródło sygnału emisji akustycznej znajduje się wewnątrz materiału, a odbiornik jest sytuowany na jego powierzchni. Cecha ta negatywnie wpływa na wynik badań.

## 2. ŁAŃCUCH POMIAROWY

Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy łańcucha pomiarowego służącego do pomiarów emisji akustycznej począwszy od substancji sprzęgającej, a skończywszy na komputerze z oprogramowaniem.



**Rys. 3.** Schemat blokowy łańcucha pomiarowego używanego podczas badań przy użyciu emisji akustycznej [2]

**Fig. 3.** Block diagram of the measuring chain used during acoustic emission testing [2]

Używane podczas badań czujniki piezoelektryczne powinny mieć dobrany

optymalny zakres częstotliwości. Powinien on być wyselekcjonowany w zależności od przewidywanego rodzaju źródła emisji akustycznej oraz materiału, z którego wykonana jest badana konstrukcja, co decyduje o warunkach propagacji fal oraz ich tłumieniu. Podczas badania konstrukcji stalowych z reguły wykorzystuje się czujniki pracujące w zakresie 100–300 kHz [2].

Przedwzmacniacze są częścią łańcucha pomiarowego systemu pomiaru emisji akustycznej. Zawierają zwykle jedno wejście do odbioru sygnału z czujnika oraz jedno wyjście, które jest połączone z procesorem sygnału emisji akustycznej. Sygnał wytwarzany przez czujniki ma wysoką impedancję i nie nadaje się do transmisji za pomocą długich przewodów. Z tego powodu przedwzmacniacze przekształcają sygnał wejściowy o wysokiej impedancji na sygnał o niskiej impedancji. Wystąpią wówczas minimalne straty podczas transmisji sygnału za pomocą długich przewodów. Ponadto przedwzmacniacze wzmacniają sygnał z czujnika do zakresu napięcia odpowiedniego dla procesora sygnału. Omawiane elementy łańcucha pomiarowego są tak projektowane, aby utrzymywały możliwie jak najwyższy stosunek sygnału do szumu w celu zminimalizowania zakłóceń sygnału pożądanego. Przedwzmacniacze mogą być zintegrowane z czujnikiem emisji akustycznej lub stanowić odrębny element łańcucha pomiarowego [1].

Kolejnym ogniwem łańcucha pomiarowego emisji akustycznej są filtry. Filtrowanie sygnału do pewnego stopnia jest konieczne w celu uniknięcia zakłóceń i usunięcia z kanału pomiarowego niepożądanych składników częstotliwości sygnału emisji akustycznej pochodzących z hałasu otoczenia. Obecnie stosuje się filtry cyfrowe, które są bardzo elastyczne, a proces filtracji jest całkowicie powtarzalny [1]. Podczas badań emisją akustyczną stosuje się filtry dolnoprzepustowe – LP (ang. *low pass*), górnoprzepustowe – HP (ang. *high pass*) oraz pasmowe – BP (ang. *band pass*).

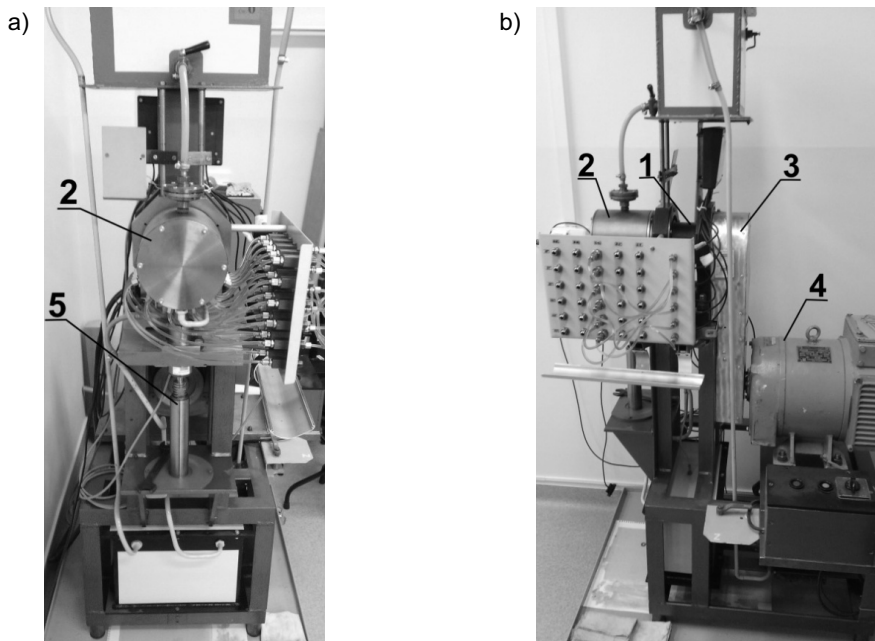
Przetworniki analogowo-cyfrowe (A/D) posiadają 16-bitowy zakres dynamiczny. Ich ciągła częstotliwość próbkowania wynosi 10 MHz, co pociąga za sobą produkcję przez każdy kanał 10 mln wartości pomiarowych na sekundę. Dane te są przetwarzane przez procesor rozróżniania danych (funkcji ekstrakcji) w czasie rzeczywistym. Nagrywanie przejściowe wykorzystuje się do archiwizacji wszystkich próbek z przebiegu tych impulsów, których charakterystyczne cechy są znaczące [2].

### 3. METODYKA BADAŃ

Badania wstępne wykonano na stanowisku do badania łożyska ze smarowaniem hydrodynamicznym, znajdującym się w Katedrze Podstaw Techniki na Wydziale Mechanicznym Akademii Morskiej w Gdyni. Na rysunku 4 przedstawiono widok stanowiska, które składa się ze stalowego wału (1), którego czop obraca się w panewce (2) wykonanej z brązu. Ruch obrotowy czopa wału jest realizowany przez przekładnię pasową (3) za pomocą silnika elektrycznego prądu

stałego (4). Zmiana prędkości obrotowej silnika odbywa się za pośrednictwem zespołu tyrystorowego. Do pomiaru prędkości obrotowej silnika wykorzystano prądniczkę tachometryczną. Zmiany obciążenia łożyska dokonano przy użyciu siłownika mechanicznego (5). Podczas eksperymentu zastosowano olej przekładniowy „TRANSOL SP 100”.

Do przeprowadzenia badań wykorzystano urządzenie pomiarowe AMSY-6 firmy Vallen-Systeme GmbH. Urządzenie to wyposażone jest w cztery równoległe kanały pomiarowe. Na każde dwa kanały przypada jeden procesor sygnału akustycznego ASIP-2/S. Posiada on moduł nagrywający dane po 8 MB na każdy kanał. Do urządzenia pomiarowego za pomocą przewodu BNC przyłączono przedwzmacniacz AEP4. Pracuje on w zakresie częstotliwości 20 kHz–1 MHz ze wzmocnieniem 34 dB. Kolejnym elementem łańcucha pomiarowego był czujnik piezoelektryczny służący do pomiaru sygnału emisji akustycznej, typu VS150-M, o zakresie częstotliwości 100–450 kHz. Czujnik przymocowano do łożyska za pomocą dorobionego przez autorów uchwytu. Miejsce usytuowania czujnika przedstawiono na rysunku 5. Jako środka sprężającego użyto smaru silikonowego.



**Rys. 4.** Stanowisko badawcze: a) widok od czoła, b) widok z boku

**Fig. 4.** Test stand: a) front view, b) side view

Badania wstępne polegały na pomiarze amplitudy i RMS sygnału emisji akustycznej generowanej przez obracający się w panwi wał w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Przeprowadzono je przy zmiennych parametrach filmu oleju smarnego spowodowanych zmienną prędkością obrotową czopa wału oraz zmiennym obciążeniem łożyska.

Celem pomiarów wstępnych było określenie możliwości wykorzystania systemu Vallen do badania zjawisk zachodzących w łożysku podczas jego pracy. Autorzy chcieli zobaczyć, czy możliwe będzie zaobserwowanie zmiany obciążenia i prędkości obrotowej wału w rejestrowanym sygnale. Badania te będą wykorzystane do opracowania metody diagnozowania łożysk ślizgowych za pomocą emisji akustycznej.

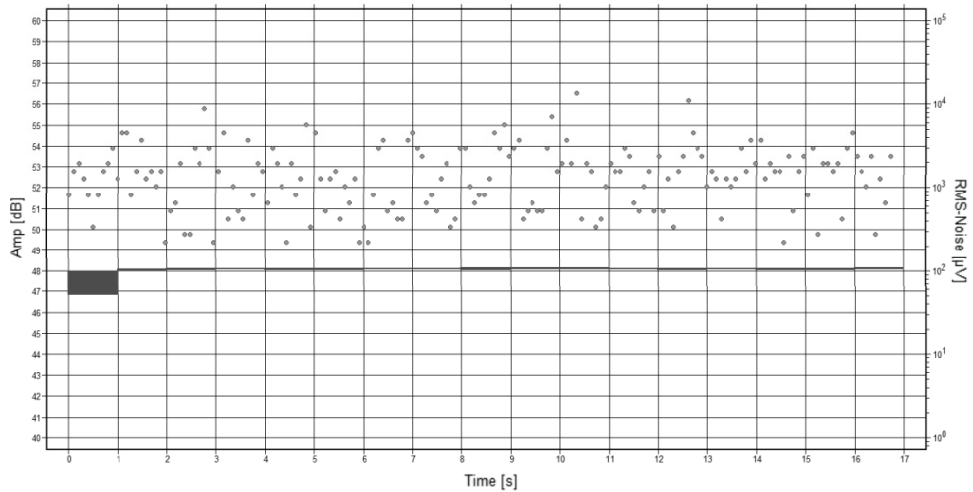


**Rys. 5.** Umieszczenie czujnika  
**Fig. 5.** Location of the sensor

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW

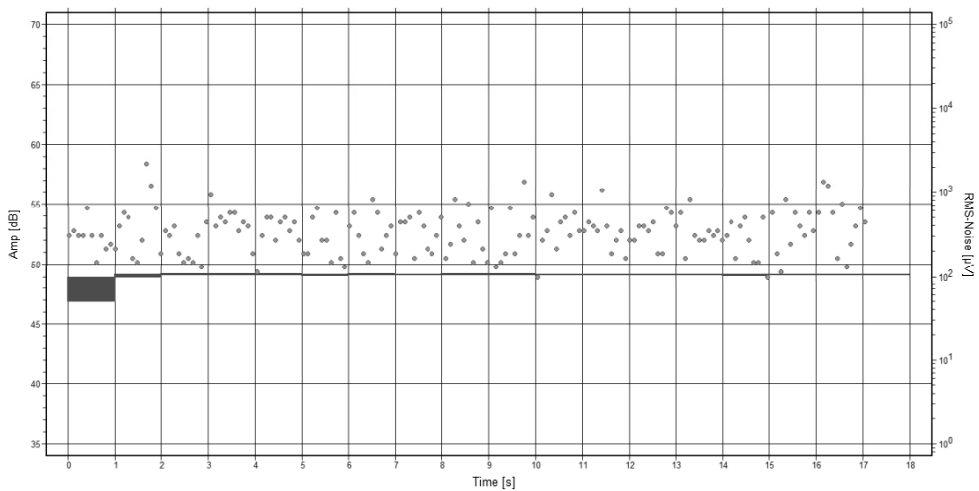
Podczas badań rejestrowano sygnał emisji akustycznej generowany przez obracający się w panwi czop wału. Początkowo zarejestrowano sygnał emisji akustycznej dla nieobciążonego łożyska obracającego się z prędkością 270 obr/min. Pomiar ten umożliwił ustawienie progu dyskryminacji na poziomie pozwalającym wyeliminować część zakłóceń związanych z otoczeniem. W dalszej kolejności zwiększono obciążenie łożyska do 1000 N, następnie do 2000 N i ostatecznie do 3000 N. Dla każdego z obciążeń zarejestrowano sygnał emisji akustycznej. Dla prędkości 600 i 900 obr/min dokonano pomiarów wg tego samego schematu. Na rysunkach 6–10 przedstawiono przykładowe wykresy amplitudy oraz wartości skutecznej sygnału (*RMS*) w funkcji czasu dla poszczególnych pomiarów.

Na poniższych wykresach można zauważyć, że dla niskiej prędkości obrotowej 270 obr/min rozrzut wielkości amplitudy (zaznaczonych punktowo) zdarzeń jest znaczny – sięga prawie 10 dB. Rozrzut maleje wraz ze wzrostem obciążenia (patrz rys. 6–8). Przy zwiększeniu prędkości obrotowej wartość amplitudy sygnału emisji akustycznej przyjmuje bardziej równomierną wartość, a rozrzut nie przekracza 5 dB. Zdaniem autorów świadczy to o niestabilności klina oleju smarnego przy minimalnej prędkości obrotowej i minimalnym obciążeniu. W tych warunkach pracy występuje tarcie mieszane. Dodatkowa emisja akustyczna jest związana z chwilową utratą tarcia hydrodynamicznego i pojawienia się tarcia ślizgowego. Grubość klina smarnego ma wówczas wartość zbliżoną do chropowatości powierzchni.



**Rys. 6.** Wykres przedstawiający liczbę zdarzeń i ich amplitudę (linia punktowa) oraz wartość skuteczną sygnału (linia ciągła) dla prędkości obrotowej wału 270 obr/min i obciążenia 1000 N

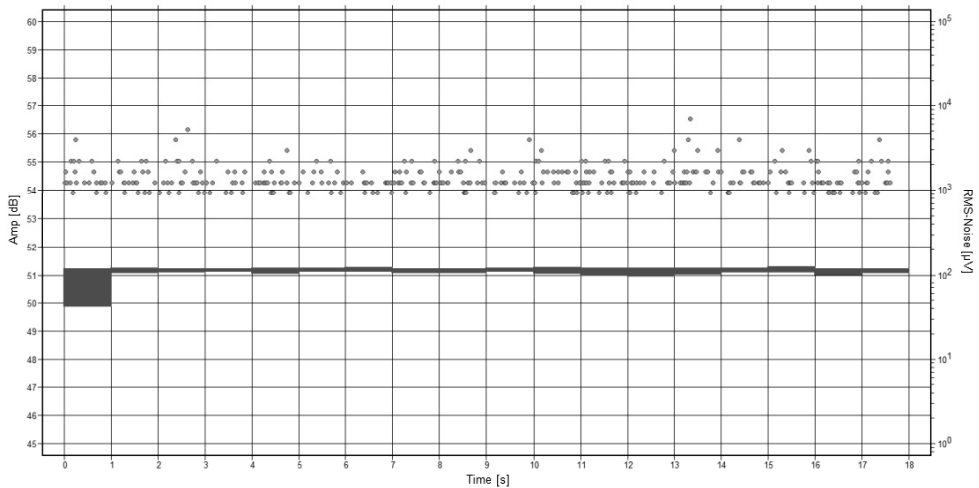
**Fig. 6.** A diagram showing the number of events, their amplitude (dotted line) and the signal RMS (solid line) for a shaft speed of 270 rev/min and a load of 1000 N



**Rys. 7.** Wykres przedstawiający liczbę zdarzeń i ich amplitudę (linia punktowa) oraz wartość skuteczną sygnału (linia ciągła) dla prędkości obrotowej wału 270 obr/min i obciążenia 2000 N

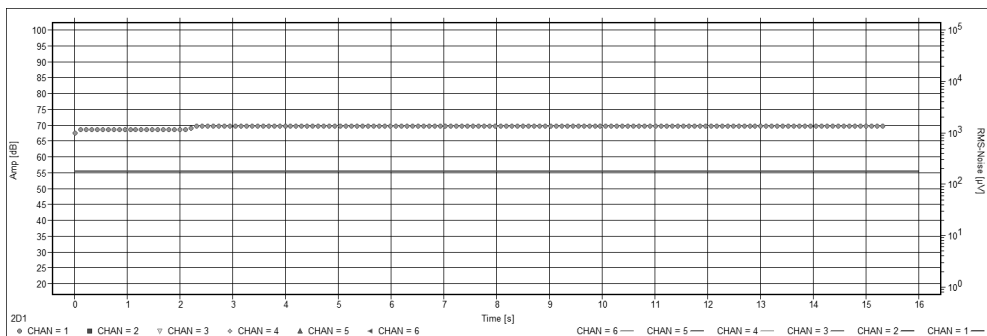
**Fig. 7.** A diagram showing the number of events, their amplitude (dotted line) and the signal RMS (solid line) for a shaft speed of 270 rev/min and a load of 2000 N





**Rys. 8.** Wykres przedstawiający liczbę zdarzeń i ich amplitudę (linia kropkowa) oraz wartość skuteczną sygnału (linia ciągła) dla prędkości obrotowej wału 270 obr/min i obciążenia 3000 N

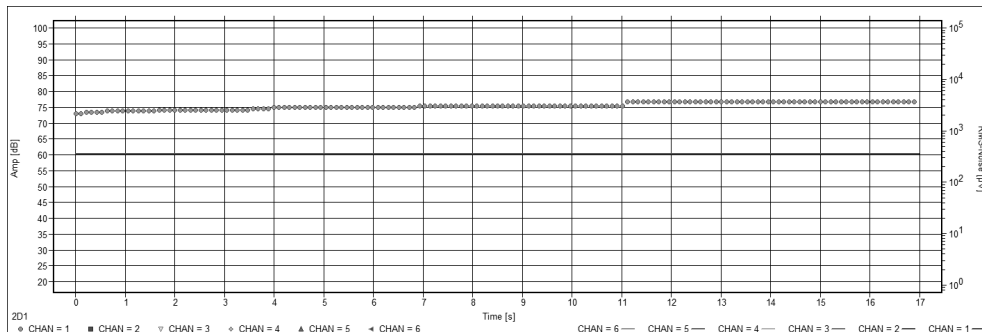
**Fig. 8.** A diagram showing the number of events, their amplitude (dotted line) and the signal RMS (solid line) for a shaft speed of 270 rev/min and a load of 3000 N



**Rys. 9.** Wykres przedstawiający liczbę zdarzeń i ich amplitudę (linia kropkowa) oraz wartość skuteczną sygnału (linia ciągła) dla prędkości obrotowej wału 600 obr/min i obciążenia 2000 N

**Fig. 9.** A diagram showing the number of events, their amplitude (dotted line) and the signal RMS (solid line) for a shaft speed of 600 rev/min and a load of 2000 N

W drugiej części badań poddano analizie (przy użyciu programu Vallen Vizual AE) zarejestrowane parametry sygnału, do których należą: amplituda, liczba zdarzeń i wartość skuteczną sygnału. Dla każdego pomiaru obliczono średnią wartość amplitudy, rozrzut wartości amplitudy oraz średnie wartości RMS, które przedstawiono w tabeli 1.



**Rys. 10.** Wykres przedstawiający liczbę zdarzeń i ich amplitudę (linia punktowa) oraz wartość skuteczną sygnału (linia ciągła) dla prędkości obrotowej wału 900 obr/min i obciążenia 2000 N

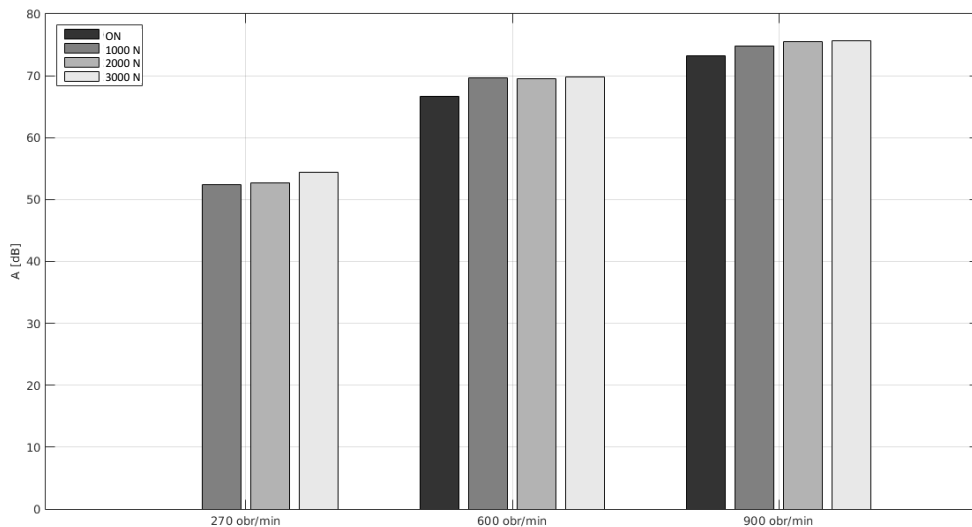
**Fig. 10.** A diagram showing the number of events, their amplitude (dotted line) and the signal RMS (solid line) for a shaft speed of 900 rev/min and a load of 2000 N

**Tabela 1.** Uśrednione wartości amplitudy ( $A$ ), rozrzut amplitudy ( $R$ ) i średnie wartości RMS zarejestrowanych sygnałów emisji akustycznej

**Table 1.** Mean values of amplitude ( $A$ ), the dispersion of the amplitude ( $R$ ) and average of the RMS recorded acoustic emission signals

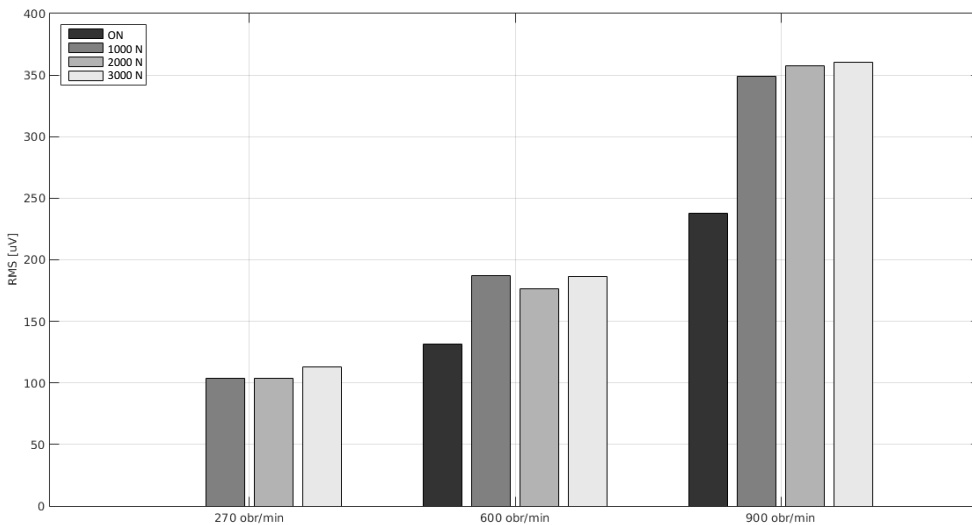
Obroty [obr/min]	Obciążenie [N]	$A$ [dB]	$R$ [dB]	RMS [ $\mu$ V]
270	1000	52,44	7,10	103,60
	2000	52,65	9,40	103,91
	3000	54,44	2,60	112,86
600	0	66,68	3,30	131,50
	1000	69,71	3,00	187,50
	2000	69,53	2,30	176,70
	3000	69,78	4,50	186,50
900	0	73,23	4,10	237,60
	1000	74,86	1,90	349,10
	2000	75,52	3,80	357,70
	3000	75,68	2,30	360,40

Analizując przedstawione w tabeli 1 dane, można zauważyć, że największe zmiany amplitudy sygnału emisji akustycznej towarzyszą zmianom prędkości obrotowej czopa wału (rys. 11). Zmiany obciążenia łożyska nie wpływają tak znacząco na zmiany amplitudy. Natomiast zmiana RMS najsilniej uwidacznia się wraz ze zmianą obciążenia łożyska (rys. 12).



**Rys. 11.** Wykres wartości amplitudy sygnału ( $A$ ) w funkcji prędkości obrotowej ( $n$ ) wału dla różnych obciążeń łożyska

**Fig. 11.** A plot of the signal amplitude ( $A$ ) of rotational speed ( $n$ ) of the shaft for various bearing loads



**Rys. 12.** Wykres wartości RMS sygnału w funkcji prędkości obrotowej ( $n$ ) wału dla różnych obciążeń łożyska

**Fig. 12.** A plot of the signal RMS of rotational speed ( $n$ ) of the shaft for various bearing loads

## PODSUMOWANIE

Badania wstępne nieuszkodzonego łożyska ślizgowego za pomocą emisji akustycznej wskazują na potencjalną użyteczność metody do diagnozowania i monitoringu okrętowych łożysk układów przeniesienia napędu. Autorów interesuje możliwość rozpoznania, poprzez autonomiczny system wyposażony w elementy sztucznej inteligencji, uszkodzeń okrętowych łożysk ślizgowych.

Łożysko nieuszkodzone jest źródłem rozróżnialnych sygnałów emisji akustycznej przy różnej prędkości obrotowej łożyska i różnym jego obciążeniu. Co więcej, nieprawidłowe parametry filmu oleju smarowego (występujące przy małej prędkości obrotowej i obciążeniu bliskim zeru) są zauważalne poprzez zwiększony rozrzut amplitud zdarzeń sygnału. Wartość skuteczna sygnału (*RMS*) oraz amplituda zdarzeń stanowią informację o różnych zmianach parametrów pracy łożyska. Występują więc co najmniej dwa niezależne parametry diagnostyczne.

W pracy [11] wykorzystano emisję akustyczną do określenia siły tarcia w łożysku ślizgowym. Profesorowie Ziegler i Mischak udowodnili, że zmiany wartości skutecznej sygnału (*RMS*) są wprost proporcjonalne do zmian siły tarcia występującej w łożysku ślizgowym przy zmianie obciążenia i obrotów. Jednakże przeprowadzone przez nich badania były wykonywane na innym stanowisku badawczym, z wykorzystaniem innego oleju smarowego oraz przy użyciu innej aparatury pomiarowej.

Porównując oba eksperymenty ze sobą, można stwierdzić, że emisja akustyczna może być skutecznym narzędziem do diagnostyki stanu pracy łożysk ślizgowych. Przypuszczalnie metoda ta może posłużyć także do diagnozowania uszkodzeń łożysk ślizgowych, a także do ich identyfikacji. W przyszłości autorzy zamierzają przeprowadzić badania wpływu uszkodzeń łożyska na parametry emisji akustycznej. Planuje się stworzenie bazy danych obejmującej typy uszkodzeń i odpowiadające im zmiany w sygnałach emisji akustycznej dla łożysk długich, tj. takich, w których długość łożyska jest większa od jego średnicy. Zamierza się także rozszerzyć taką bazę danych dla łożysk krótkich, tj. takich, których szerokość jest zbliżona do ich średnicy.

## LITERATURA

1. *Acoustic Emission Preamplifiers. Specification*, Vallen-Systeme GmbH, 2015.
2. *AE Testing (AT). Fundamentals – Equipment – Data Analysis (Overview)*, Vallen-Systeme GmbH, 2005.
3. Al-jumaili S., Pearson M., Holford K., Eaton M., Pullin R., *Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique*, Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, no. 72–73 p. 513–524.
4. *AMSY-6. System description*, Vallen-Systeme GmbH, 2010.
5. *Introduction to Acoustic Emission NDT*, <http://www.geocities.ws/raobpc/AET.html> [dostęp 26 marca 2016].

6. Malecki I., Ranachowski J., *Emisja akustyczna: źródła, metody, zastosowania*, Biuro Pascal, Warszawa 1994.
7. PN-EN 13554:2011. *Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Zasady ogólne*.
8. PN-EN ISO 1330-9:2009. *Badania nieniszczące – Terminologia – Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną*.
9. PN-EN ISO 9712:2012. *Badania nieniszczące – Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących*.
10. Ranachowski Z., *Emisja akustyczna i jej zastosowanie w technice*, Nowa Elektrotechnika, 2010, nr 9(73).
11. Ziegler B., Miszczak A., *Acoustic emission as a friction force indicator after test stands experiments*, Journal of KONES, 2007, vol. 14, no. 4.

## PRELIMINARY ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF SLIDE BEARING WITH USING ACOUSTIC EMISSION

### Summary

*The paper describes the acoustic emission and the necessary equipment for measurements using this method. The authors describe the research station, where the slide bearing study was conducted with using the acoustic emission method. They also show how to conduct preliminary studies on the possibility of using acoustic emission method to study the working conditions of a slide bearing. The influence of change in rotational speed of the shaft journal and the bearing load on the acoustic emission signal was analysed.*

**Keywords:** *acoustic emission, slide bearing, diagnostics.*