



STANOWISKO LABORATORYJNE DO BADANIA PROCESÓW WIBROAKUSTYCZNYCH W REJONIE GŁOWICY CYLINDROWEJ SILNIKA Z ZAPŁONEM SAMOCZYNNYM – WYNIKI BADAŃ PILOTAŻOWYCH

Jacek Rudnicki

Politechnika Gdańska
Ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Polska
Tel.: +48 58 3472773, fax: +48 58 3472430
e-mail: jacekrud@pg.edu.pl

Abstrakt

W artykule przedstawiono założenia oraz ich praktyczną realizację w odniesieniu do stanowiska laboratoryjnego przeznaczonego do badania procesów wibroakustycznych w rejonie głowicy silnika z zapłonem samoczynnym. Podstawowym założeniem podczas realizacji tego projektu było stworzenie możliwości dydaktycznych oraz naukowo – badawczych w zakresie obserwacji i rejestracji procesów drganiowych w rejonie głowicy cylindrowej silnika z zapłonem samoczynnym podczas pracy układu rozrządu napędzane go ze źródła zewnętrznego. Umożliwia to wyselekcjonowanie prawie „czystej” postaci tych procesów, pochodzących wyłącznie od pracy układu rozrządu bez zakłóceń spowodowanych pracą innych przekładni i mechanizmów w rzeczywistym silniku oraz zjawisk gazodynamicznych związanych ze spalaniem. Fakt ten pozwala na rejestrację wartości wybranych wskaźników opisujących drgania tego węzła konstrukcyjnego silnika, odpowiednie opracowanie powstałych zapisów i ich ewentualne wykorzystanie we wnioskowaniu diagnostycznym np. w zakresie oceny faz rozrządu. Innym sposobem wykorzystania tak uzyskanych wyników jest możliwość wykorzystania tych zapisów do filtracji wyników uzyskanych na obiekcie rzeczywistym czyli funkcjonującym silniku.

Słowa kluczowe: procesy wibroakustyczne, diagnostyka techniczna, silnik z zapłonem samoczynnym, układ rozrządu, fazy rozrządu

1. Wprowadzenie

W czasie eksploatacji każdego urządzenia technicznego na jego podsystemy funkcjonalne oddziałują różnorodne czynniki zewnętrzne i wewnętrzne, które są przyczyną nieodwracalnych procesów degradacyjnych, powodujących zmiany stanu technicznego i

stopniowe pogorszenie charakterystyk eksploatacyjnych. W podsystemach tych nieuchronnie pojawiać się zatem będą uszkodzenia ich elementów składowych.

W przypadku szczególnie odpowiedzialnych systemów np. statku morskiego, zmiana wspomnianego stanu na przynależny do jednego z podzbiorów stanów niepożądanych może spowodować zagrożenie nie tylko dla przedmiotowego systemu, lecz również dla ludzi z bliskiego i dalszego otoczenia a także dla środowiska naturalnego [5].

Z drugiej strony wiadomo jest powszechnie, że czas użytkowania każdego złożonego układu, (w szczególności – silnika z zapłonem samoczynnym) nie może być jednoznaczną miarą zużycia jego elementów, zaś wysoka niezawodność zadaniowa jest jedną z głównych przesłanek wpływających na bezpieczeństwo każdego, odpowiedzialnego systemu antropotechnicznego. Racjonalna eksploatacja wymaga zatem dopływu informacji na temat jego aktualnego stanu technicznego oraz opracowywania w tym zakresie stosownych prognoz.

Dodatkowo, pomimo istniejących nadal ograniczeń formalno – prawnych zawartych min. w przepisach klasyfikacyjnych od wielu lat można zauważyć zmianę koncepcji eksploatacji stacjonarnych i okrętowych układów energetycznych. Ze względu na rosnące koszty eksploatacji morskim coraz wyraźniejsze stają się tendencje do wdrażania elementów strategii eksploatacji wg stanu technicznego (ang. *Condition Based Maintenance*) [2, 4, 13].

Nie jest to możliwe bez istniejącego w systemie eksploatacji nadzoru diagnostycznego. Realizacja sprzętowo – programowa systemu diagnostycznego umożliwia sterowanie procesem eksploatacji poprzez [5]:

- możliwość dostosowania aktualnego stanu eksploatacyjnego stosownie do istniejącego stanu technicznego oraz istniejących warunków zewnętrznych,
- identyfikację potrzeby wykonania obsługi poprzez znajomość diagnozy i prognozy w zakresie stanu technicznego urządzenia,
- możliwość oceny jakości wykonania obsługi.

O podstawowych wskaźnikach pracy silnika dotyczących jego własności użytkowych, ekologicznych i ergonomicznych, w głównej mierze decyduje przebieg procesów fizykochemicznych składających się na obieg roboczy. W związku z tym, w badaniach naukowych dotyczących funkcjonowania silników okrętowych jak również w czasie ich użytkowania, kluczową rolę w ocenie realizacji obiegu roboczego każdym w silniku tłokowym z zapłonem samoczynnym odgrywa analiza procesów składowych.

Jednym z nich jest proces wymiany ładunku, na który istotny wpływ mają tzw. fazy rozrządu decydujące o początku i końcu podprocesów składowych.

Kontrolnie wykonywana przez operatorów, wartościująca ocena tego parametru w silnikach przemysłowych znajdujących się w eksploatacji jest z reguły dosyć kłopotliwa i wiąże się z częściowym demontażem podzespołów a tym samym wyłączeniem silnika z użytkowania.

Nowe możliwości w tym zakresie pojawiają się wraz zastosowaniem diagnostyki wibroakustycznej [6, 8, 9, 10, 11, 12]. Procesy wibroakustyczne ujawniają się głównie w postaci drgań mechanicznych i akustycznych, a także w postaci zmiennych w czasie obciążeń dynamicznych i odkształceń elementów urządzenia. Zjawiska charakteryzujące te procesy są emitowane na wyjściu systemu reprezentującego urządzenie. Procesy wibroakustyczne są rezultatem uaktywnienia różnego rodzaju zaburzeń stanów równowagi w mechanicznej części funkcjonującego systemu technicznego. Zaburzenia mogą być rezultatem okresowych wymuszeń na wejściu systemu lub elementem procesu użytkowego [3]. W tłokowym silniku spalinowym podczas realizacji wymiany ładunku, procesom fizykochemicznym towarzyszą zjawiska, które są przyczyną impulsów drganiowych. Z punktu widzenia diagnostyki tego procesu za najbardziej istotne z tych zjawisk uznać należy uderzenia zaworów w gniazdach zaworowych oraz wszystkie pozostałe w układzie przeniesienia napędu na zawory.

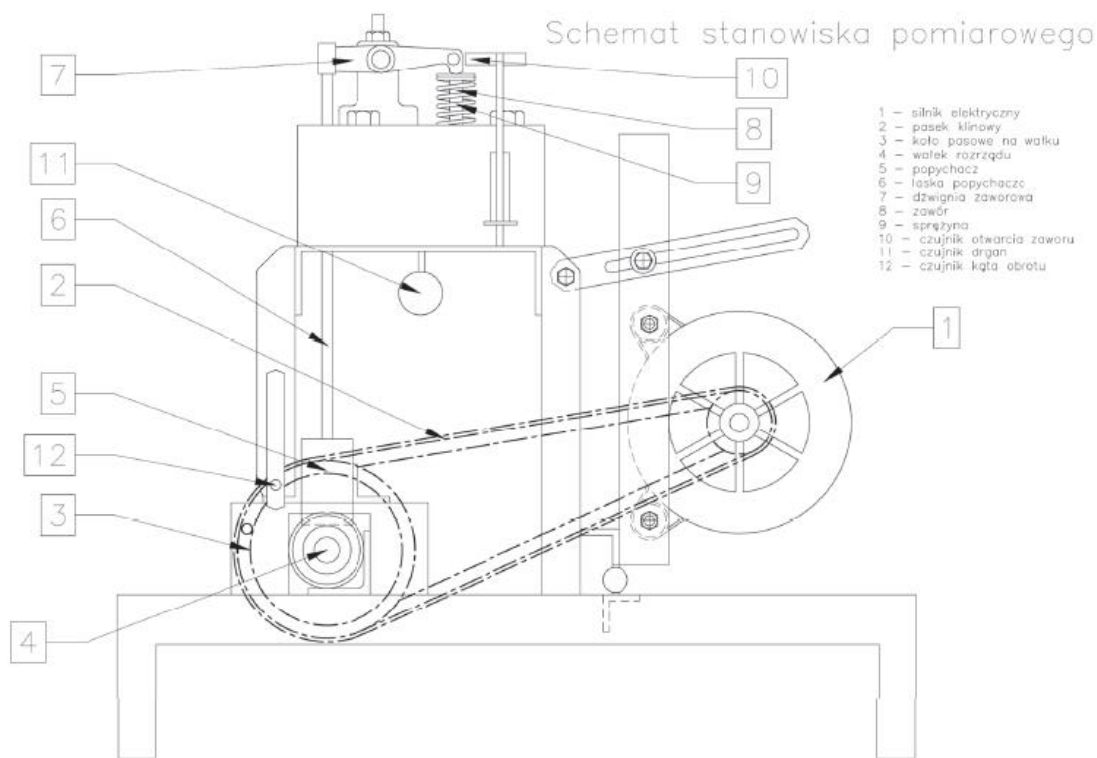
Charakter tych zjawisk oraz typowe rozwiązania konstrukcyjne silnika sprawiają, że sygnał drganiowy np. w postaci zarejestrowanych przyspieszeń drgań musi zawierać informacje dotyczące ich przebiegu, czyli dotyczące również faz rozrządu silnika.

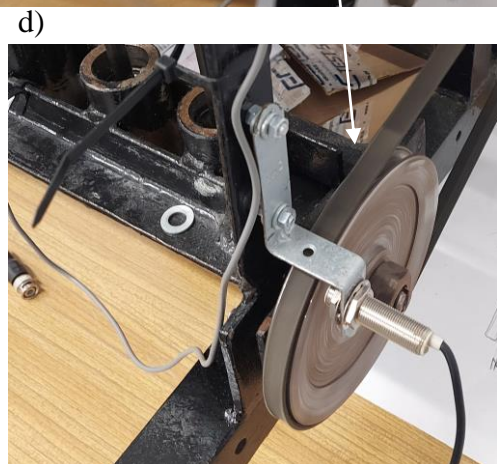
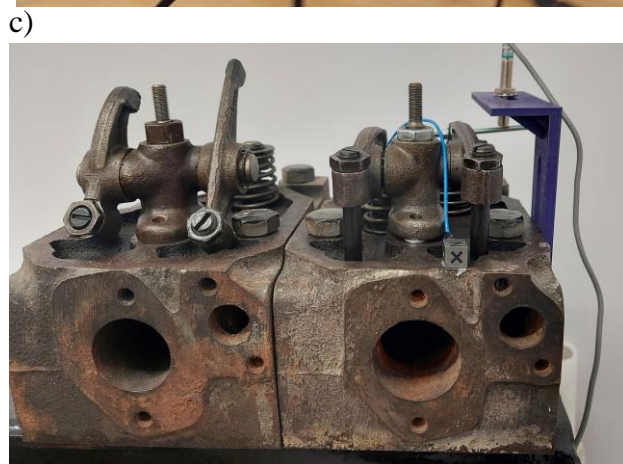
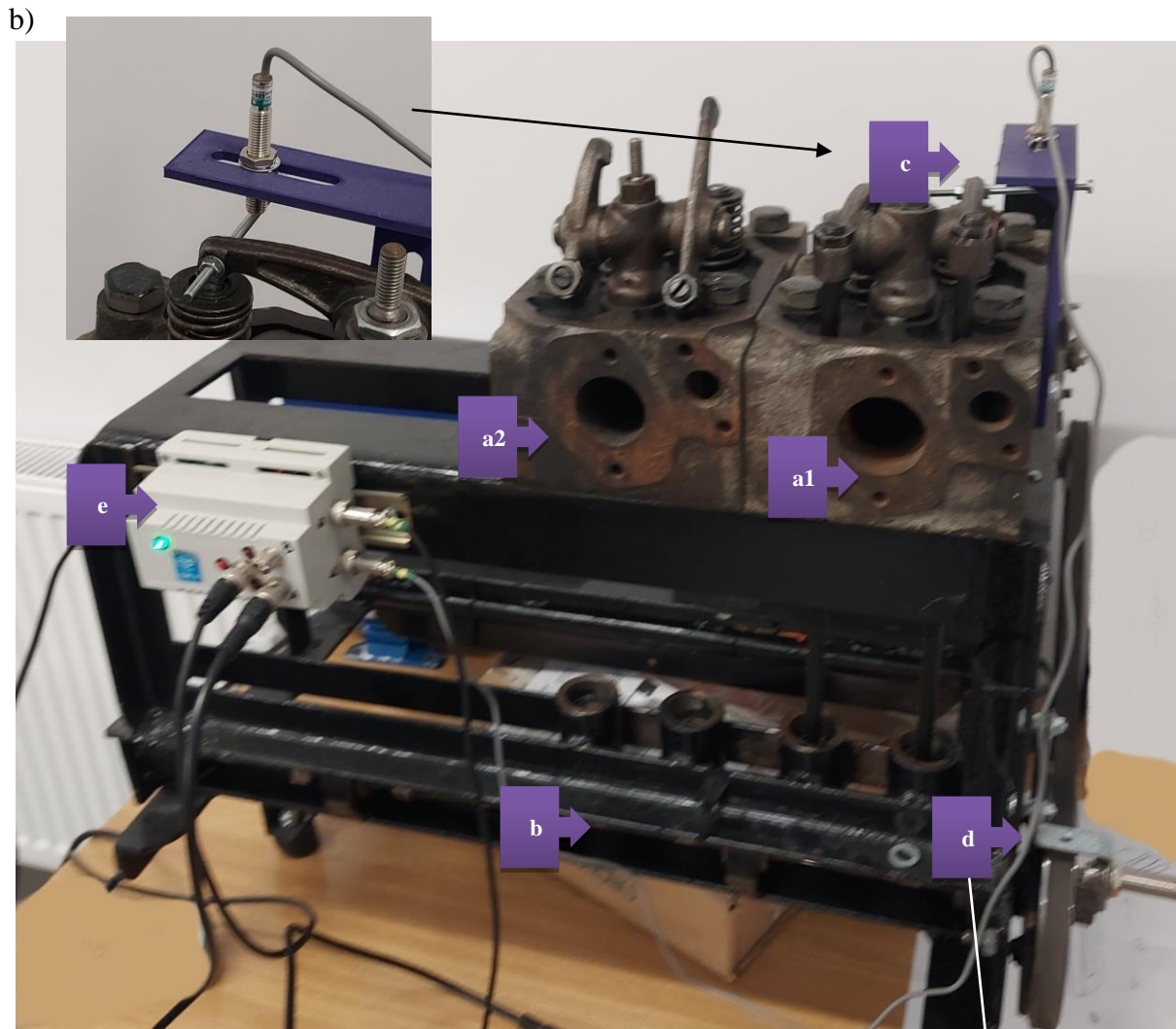
Mając na uwadze powyższe oraz fakt tylko jednostkowych zastosowań tego typu narzędzi w diagnostyce eksploatacyjnej silników okrętowych pojawiła się koncepcja realizacji w ramach pracy dyplomowej, inżynierskiej [7] stanowiska laboratoryjnego przeznaczonego do badania procesów wibroakustycznych w rejonie głowicy silnika z zapłonem samoczynnym. Podstawowym założeniem podczas realizacji tego projektu było stworzenie możliwości dydaktycznych oraz naukowo – badawczych w zakresie obserwacji i rejestracji procesów drganiowych w rejonie głowicy cylindrowej silnika z zapłonem samoczynnym podczas pracy układu rozrządu napędzane go ze źródła zewnętrznego. Umożliwia to wyselekcjonowanie prawie „czystej” postaci tych procesów, pochodzących wyłącznie od pracy układu rozrządu bez zakłóceń spowodowanych pracą innych przekładni i mechanizmów w rzeczywistym silniku oraz zjawisk gazodynamicznych związanych ze spalaniem i stwarza możliwość wykorzystania tych zapisów do opracowania metod filtracji wyników uzyskanych na obiekcie rzeczywistym.

2. Opis stanowiska laboratoryjnego

Podstawowym elementem stanowiska przedstawionego na rys. 1 są dwie głowice zdemontowane z silnika S – 4003 stanowiącego silnik napędowy stosowany w ciągnikach Ursus C-C360 [14]. Ze względu na ograniczenie mocy napędowego silnika elektrycznego zdecydowano się zastosować takie rozwiązanie w odróżnieniu od 4 głowic w silniku rzeczywistym.

a)





Rys. 1 Stanowisko laboratoryjne zespołu napędowego z silnikiem Farymann Diesel D10; (a) schemat projektowy stanowiska [7]; (b) widok podstawowych elementów – a1, a2 – głowice silnika S – 4003, b – wał rozrządu, c – czujnik położenia zaworu dolotowego głowicy I, d – czujnik położenia wału rozrządu, e – moduł zasilania i kondycjonowania sygnałów pomiarowych; (c) – widok głowic silnika S – 4003 (zdemontowany układ przeniesienia napędu na zaworu głowicy II) z widocznym trójosiowym akcelerometrem typu 356B21 PCB Piezotronics; (d) – koło pasowe większe przekładni napędowej z widocznym czujnikiem położenia wału rozrządu

Głowice z kompletnym mechanizmem napędu zaworów zamontowano na ramie nośnej i

wyposażono w niezbędne oprzyrządowanie tzn.:

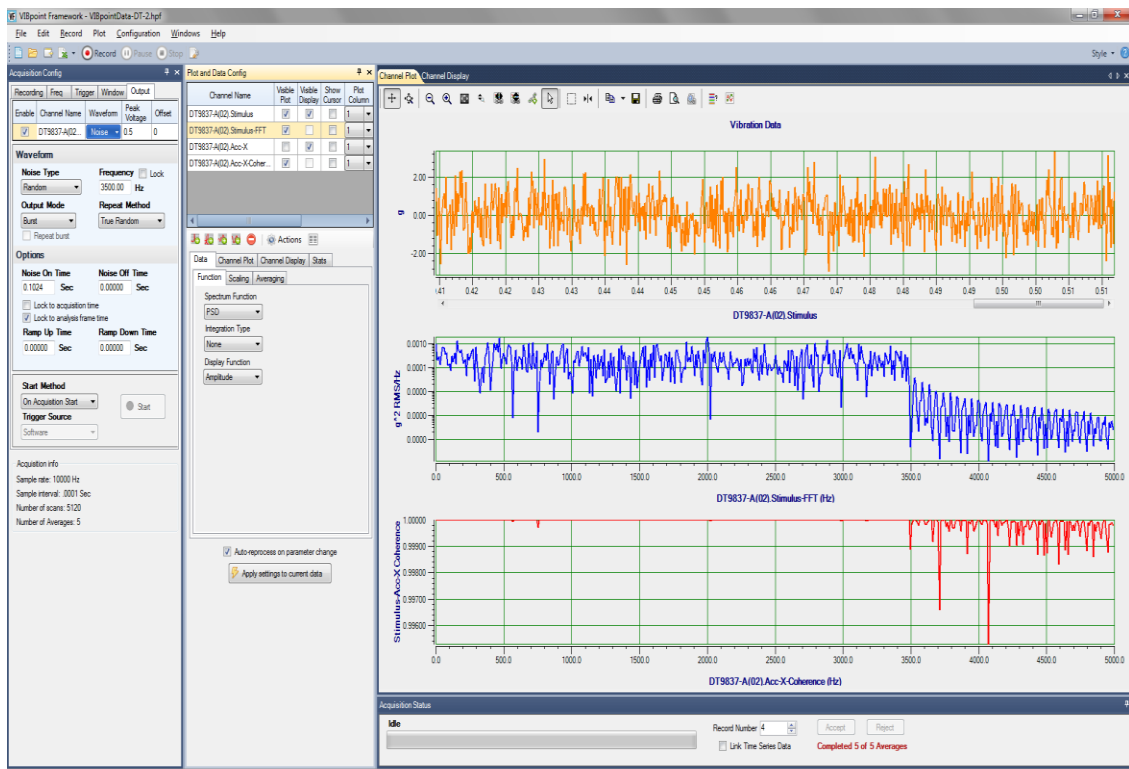
- elektryczny silnik napędowy z układem regulacji prędkości obrotowej,
- pasową przekładnię napędową wału rozrzędu,
- indukcyjny czujnik położenia wału rozrzędu typu LM12-3004PC (czujnik pełni dwie funkcje - tzn. umożliwia pomiar prędkości obrotowej wału rozrzędu oraz znacznika GMP umownego łożka),
- indukcyjny czujnik położenia zaworu dolotowego głowicy 1 typu LM12-3004PC,
- moduł zasilania i kondycjonowania sygnałów pomiarowych.

Akwizycja sygnałów pomiarowych tak zrealizowanego stanowiska możliwa jest z zastosowaniem dowolnego systemu pomiarowego umożliwiającego pomiar i rejestrację przyspieszeń (prędkości) drgań oraz pomocniczych sygnałów napięciowych z czujników indukcyjnych.

W przypadku badań, których wyniki przedstawiono w dalszej części zastosowana została dedykowana tego typu pomiarom karta DT9837 firmy Data Translation [15]. Karta została wyposażona w 4 analogowe wejścia 24-bitowe z częstotliwością próbkowania w przedziale od 195 Hz do 52 kHz na kanał. Stwarza ona możliwość bezpośredniego podłączenia do każdego wejścia czujnika piezoelektrycznego w standardzie IEPE. Dodatkowe wejście tachometryczne umożliwia synchronizację czasową sygnału drganiowego z prędkością obrotową wału silnika.

Pomiar przyspieszenia drgań zrealizowany został za pomocą trójosiowego akcelerometru typu 356B21 firmy PCB Piezotronics [17].

Analizę uzyskanych wyników przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowanie dedykowane modułowi DT9837 - VIBpoint Framework [16]. W przypadku analizy otrzymanych danych program umożliwia posługiwanie się wbudowaną funkcją analizy FFT. Dodatkowo wykorzystano autorskie skrypty pakietu Matlab firmy MathWorks [18]. Przykładowy zrzut ekranu z programu VIBpoint Framework przedstawiony został na rys. 2.



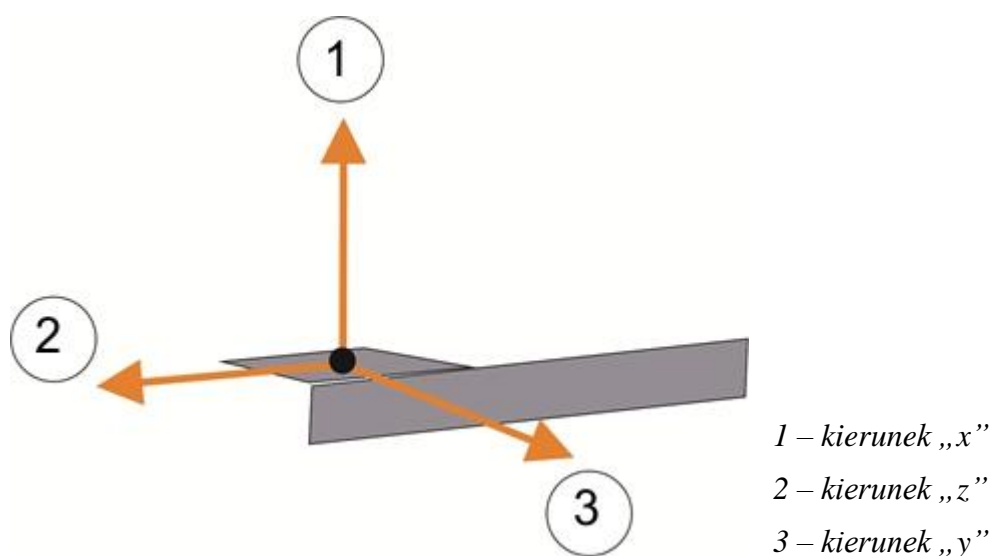
Rys. 2 Przykładowy zrzut ekranowy programu VIBpoint Framework [16]

3. Program i wyniki badań pilotażowych

Badania pilotażowe przeprowadzono w 2 etapach:

1. Etap I – rejestracja przebiegów przyspieszeń drgań dla różnych miejsc montażu akcelerometru.
2. Etap II – analiza uzyskanych wyników z wykorzystaniem oprogramowania dedykowanego i zewnętrznego.

Rejestrację sygnału drganiowego przeprowadzono dla dwóch miejsc zamocowania akcelerometru w celu określenia wpływu jego lokalizacji na przebieg przyspieszeń drgań. Lokalizacja przedstawiona jest na rys. 4. Montaż akcelerometru wykonano za pomocą uchwyty magnetycznego. Pomiar rejestrowany był w trzech osiach x, y i z zgodnie z rys. 3.



Rys. 3 Osie pomiarowe akcelerometru.

a)

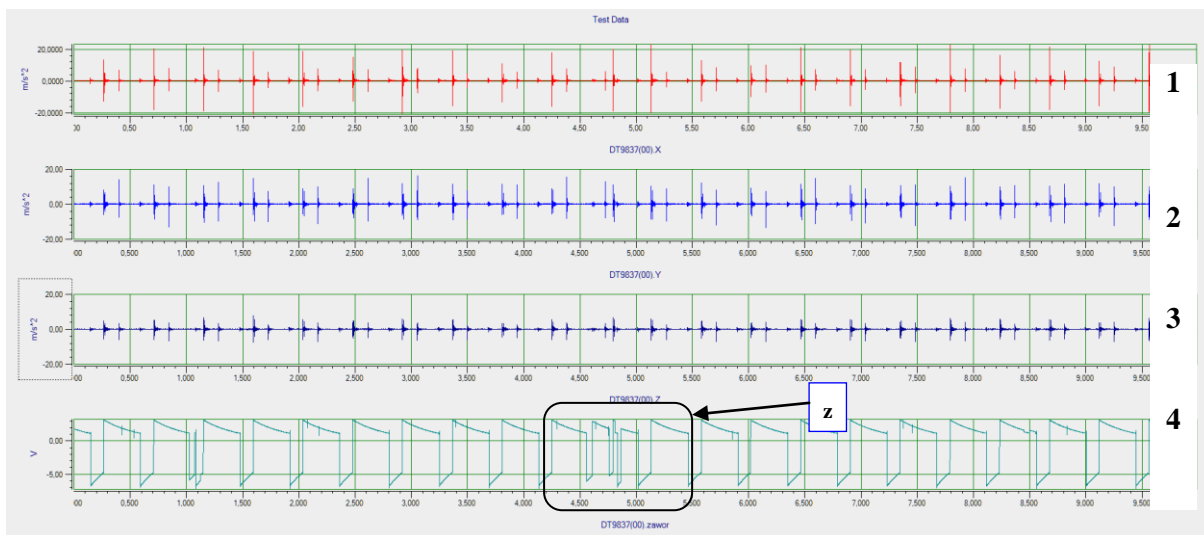


b)

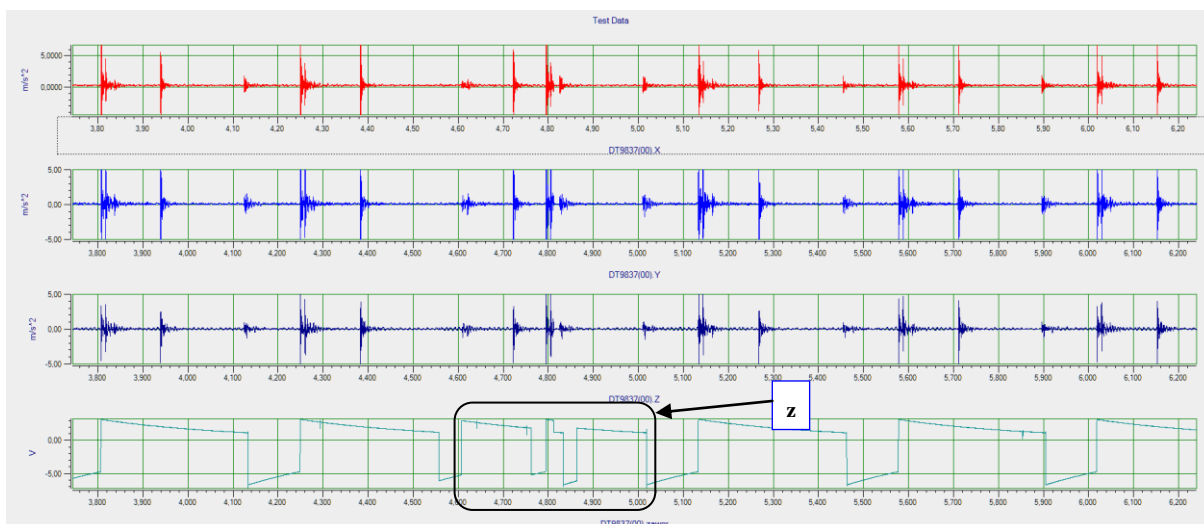


Rys. 4 Lokalizacja akcelerometru – a) lokalizacja I; b) lokalizacja II

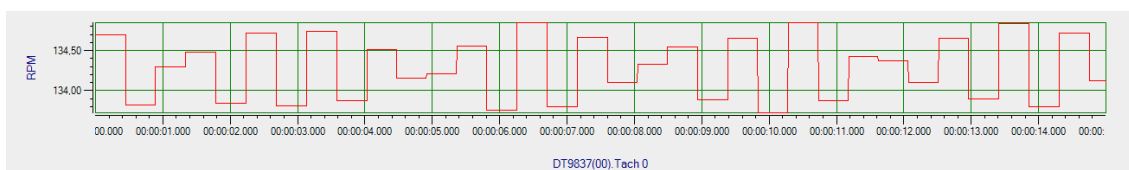
Uzyskane wyniki przedstawione są na rys. 5 - rys. 10 oraz w tab. 1



Rys. 5 Lokalizacja I – przebieg rejestrowanych sygnałów. 1 – przebieg przyspieszeń drgań kierunek „x”, 2 – przebieg przyspieszeń drgań kierunek „y”, 3 – przebieg przyspieszeń drgań kierunek „z”, 4 – czujnik położenia zaworu dolotowego, z – zaburzenie sygnału czujnika położenia zaworu dolotowego

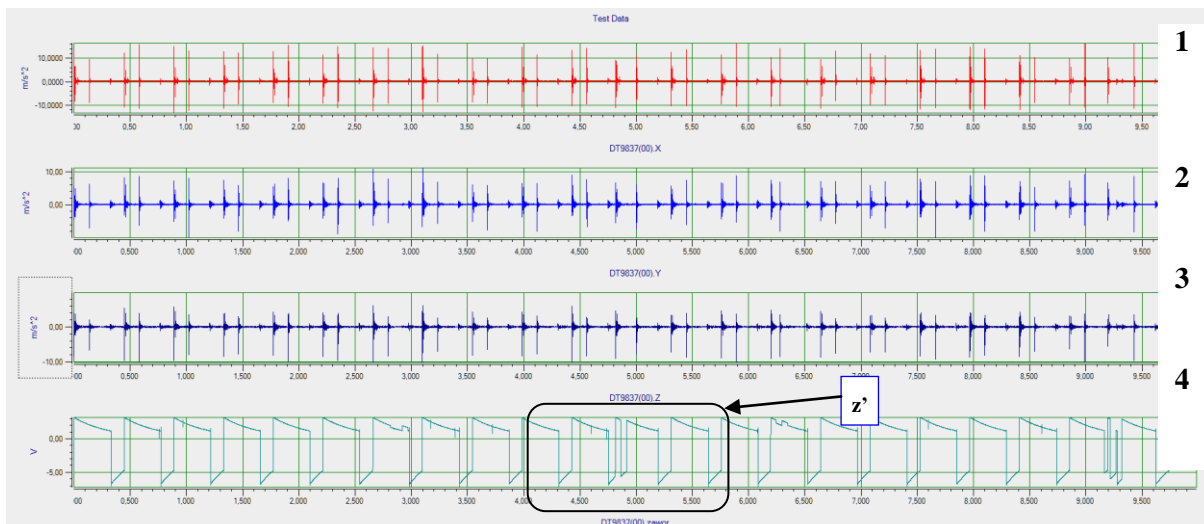


Rys. 6 Lokalizacja I – powiększony fragment przebiegów

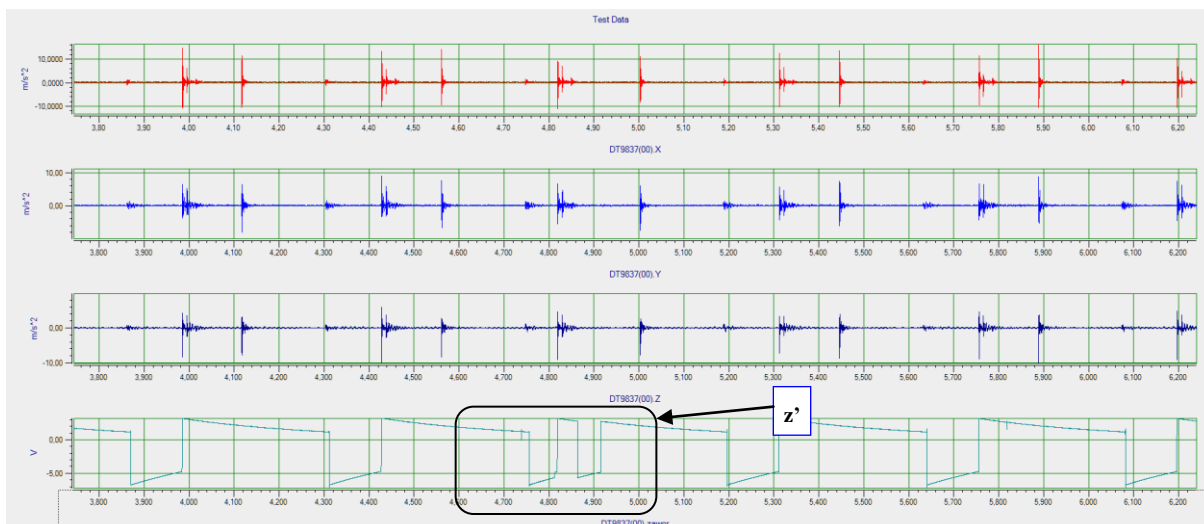


Rys. 7 Lokalizacja I - zmiany prędkości obrotowej wału rozrządu

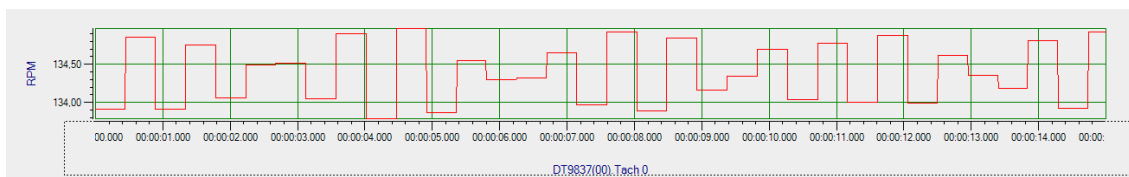




Rys. 8 Lokalizacja II – przebieg rejestrowanych sygnałów. 1 – przebieg przyspieszeń drgań kierunek „x”, 2 – przebieg przyspieszeń drgań kierunek „y”, 3 – przebieg przyspieszeń drgań kierunek „z”, 4 – czujnik położenia zaworu dolotowego, z' – zaburzenie sygnału czujnika położenia zaworu dolotowego



Rys. 9 Lokalizacja II – – powiększony fragment przebiegów



Rys. 10 Lokalizacja II - zmiany prędkości obrotowej wału rozrzędu

Tab. 1 Zestawienie wartości RMS i międzyszczytowych („*peak to peak*”) uzyskanych podczas pomiarów

Przyspieszenie drgań							
		RMS - a_{RMS} [m/s ²]			Wartość międzyszczytowa – a_{p-p} [m/s ²]		
		Oś x	Oś y	Oś z	Oś x	Oś y	Oś z
Lokalizacja I	Pomiar 1	0,72	0,57	0,40	47,87	29,91	14,85
	Pomiar 2	0,63	0,51	0,33	46,89	29,92	15,57
	Pomiar 3	0,61	0,50	0,32	47,21	27,58	14,70
	Średnia	0,65	0,53	0,35	47,32	29,14	15,04
Lokalizacja II	Pomiar 1	0,58	0,39	0,37	30,36	21,03	19,11
	Pomiar 2	0,60	0,38	0,33	32,45	18,91	19,06
	Pomiar 3	0,61	0,38	0,33	34,12	18,97	19,58
	Średnia	0,60	0,38	0,34	32,31	19,64	19,25

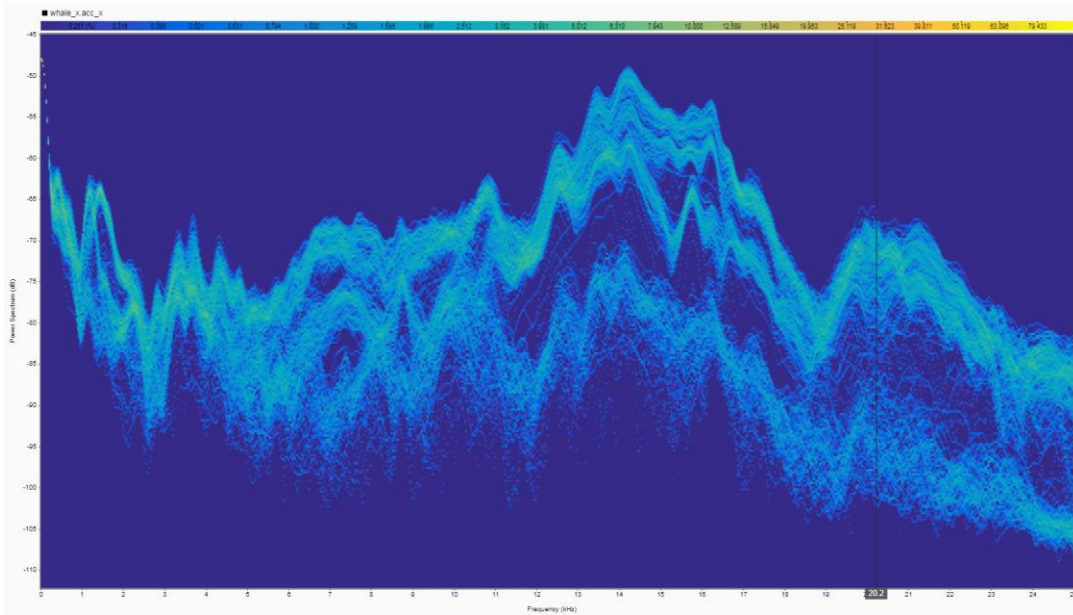
Wnioski, które można wyciągnąć z przedstawionych w formie graficznej i tabelarycznej wyników można przedstawić następująco:

- zgodnie z założeniami i oczekiwaniami rejestrowane przebiegi przyspieszeń drgań wykazują charakter okresowy (quasiokresowy) co odpowiada fizycznej naturze zjawisk w czasie pracy silnika,
- największe wartości wskaźników charakteryzujących w pewien sposób intensywność procesów wibroakustycznych – RMS i wartość międzyszczytową sygnału, zaobserwować można w kierunku osi X – tab. 1, co również odpowiada oczekiwaniom i fizycznej naturze zjawisk w czasie pracy zaworów i dźwigni zaworowych,
- znacznik położenia dźwigni zaworowej zasadniczo spełnia swoją funkcję dając wyraźny i czytelny sygnał w przeważającej części swego przebiegu – przebiegi 4 na rys. 5 oraz na rys. 8, jednak można zauważyć jednostkowe zaburzenia sygnału – szczególnie „z” i „z” na rys. 6 oraz rys. 9,
- wahania prędkości obrotowej wynoszące ok. 0,5 obr/min nie powinny wpływać z praktycznego punktu widzenia na dokładność prowadzonych, dalszych analiz.

Jako podstawowy cel wstępnego opracowania uzyskanych wyników założono weryfikację hipotezy o możliwości oceny wartości faz rozrządu na podstawie zarejestrowanych przyspieszeń drgań. Ze względu na to, że wyniki zarejestrowane w obu lokalizacjach nie wykazywały istotnych różnic dotyczących przesunięć przebiegów w dziedzinie czasu (a tym samym i w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego), dalszej analizie zdecydowano poddać tylko jeden z zarejestrowanych przebiegów tzn. zarejestrowany w kierunku osi X w lokalizacji I.

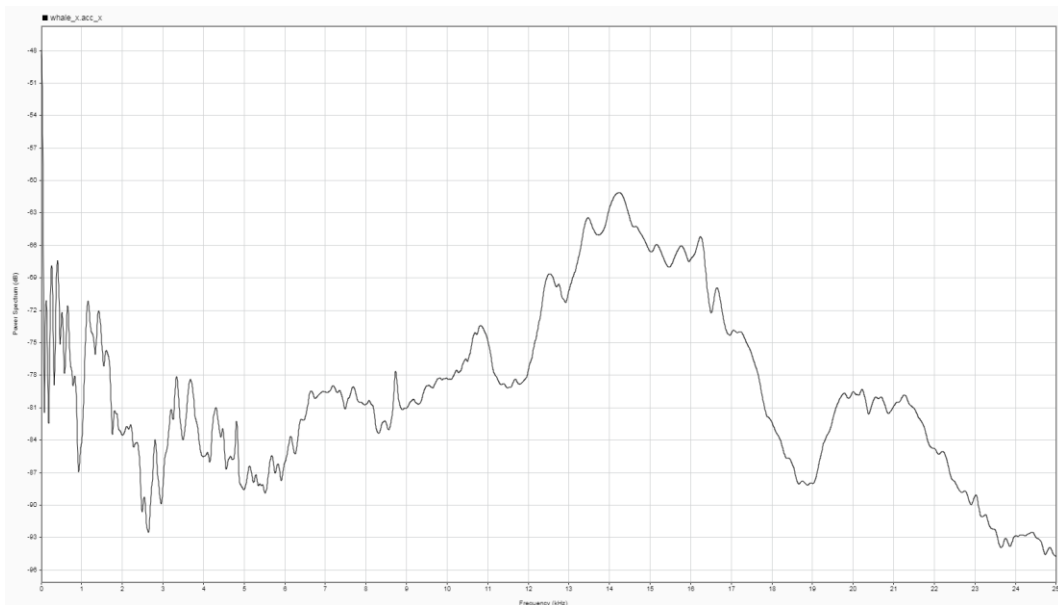
Z zastosowaniem pakietu Matlab 2020 MathWorks i dodatku Signal Processing Toolbox [19] opracowano widmo częstotliwościowe sygnału. Uzyskany wynik przedstawiono na rys. 11 i rys. 12.



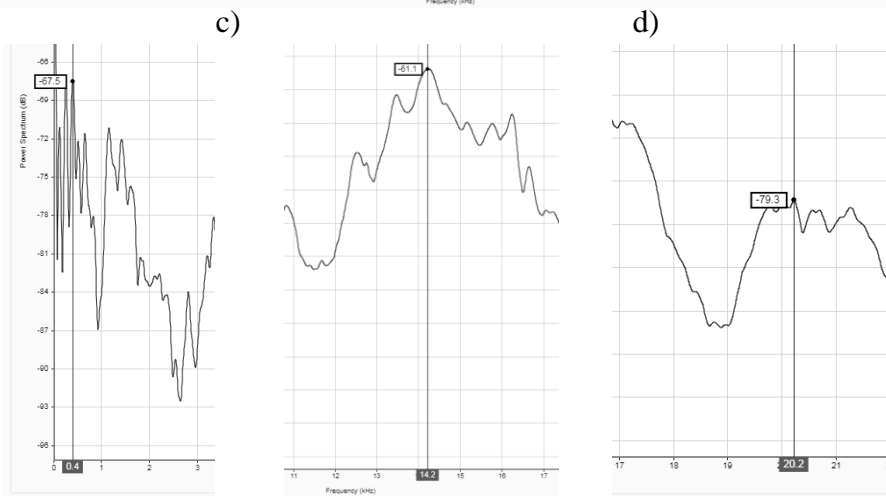


Rys. 11 Widok częstotliwościowo – czasowy widma sygnału przyspieszenia (lokalizacja I, oś X)

a)



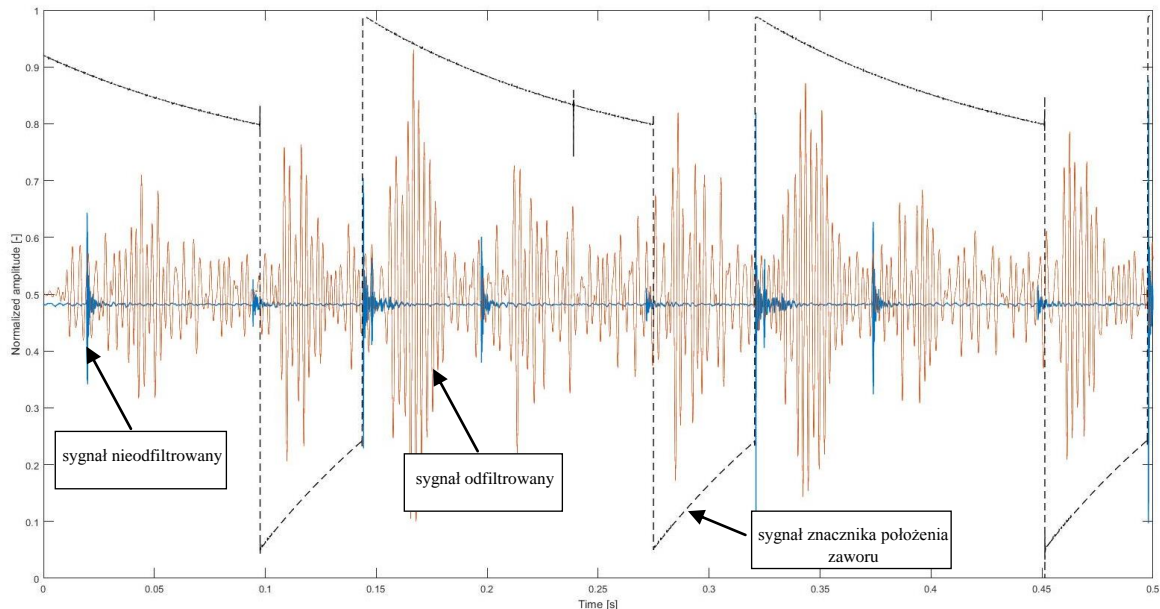
b)



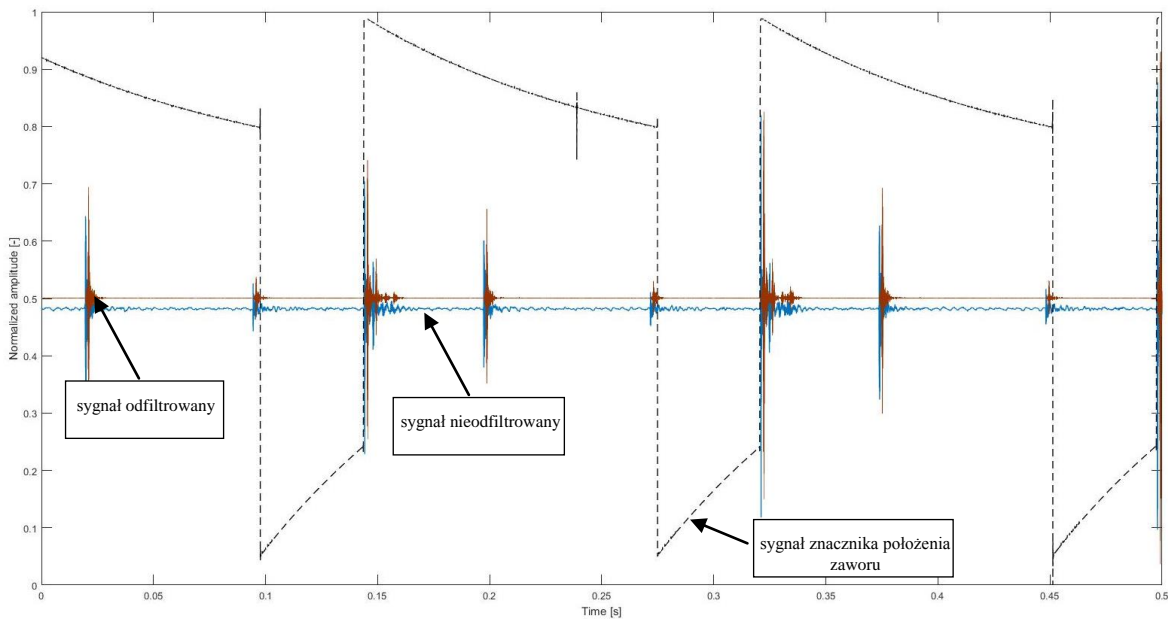
Rys. 12 Widok widma sygnału przyspieszenia drgań - lokalizacja I, oś X; a) pełne widmo w zakresie 0 – 25 kHz; b), c), d) – powiększone fragmenty widma

Jak widać na przedstawionych wykresach (rys. 12 – b, c i d) zwiększone amplitudy przyspieszeń drgań można zaobserwować w zakresie częstotliwości zbliżonych do 0,4, 14,2 i 20,2 kHz. Tym samym wstępnie założono filtrację sygnału z zastosowanie filtra środkowoprzepustowego o wymienionych pasmach przepustowości.

Zastosowanie filtrów środkowoprzepustowych pozwoliło na uzyskanie przebiegów przedstawionych na rys. 13 – rys. 15.

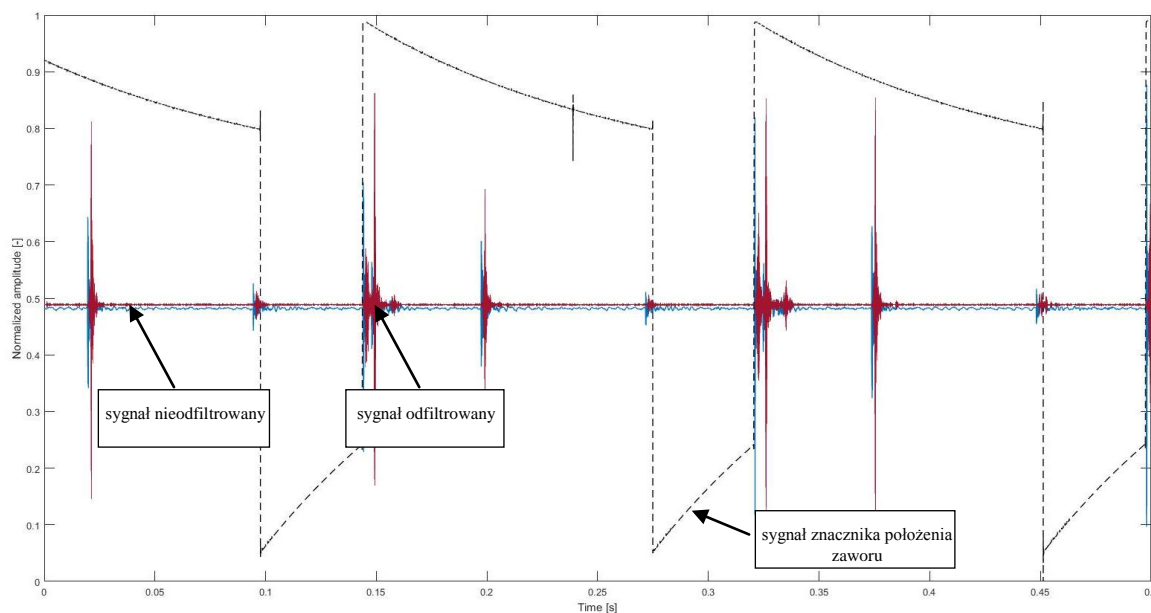


Rys. 13 Przebieg przyspieszeń drgań „surowy” oraz odfiltrowany filtrem środkowoprzepustowym I o pasmie przepustowości $B = 0,2$ kHz (dolna częstotliwość graniczna $f_l = 0,3$ kHz, górna częstotliwość graniczna $f_h = 0,5$ kHz, częstotliwość środkowa $f_0 = 0,4$ kHz)



Rys. 14 Przebieg przyspieszeń drgań „surowy” oraz odfiltrowany filtrem środkowoprzepustowym II o pasmie przepustowości $B = 2,6$ kHz (dolna częstotliwość graniczna $f_l = 12,8$ kHz, górna częstotliwość graniczna $f_h = 15,4$ kHz, częstotliwość środkowa $f_0 = 14,2$ kHz)





Rys. 15 Przebieg przyspieszeń drgań „surowy” oraz odfiltrowany filtrem środkowoprzepustowym III o pasmie przepustowości $B = 4$ kHz (dolna częstotliwość graniczna $f_1 = 18,2$ kHz, górna częstotliwość graniczna $f_2 = 20,2$ kHz, częstotliwość środkowa $f_0 = 22,2$ kHz)

Ja widać na rys. 13 zastosowanie filtra środkowoprzepustowego I doprowadziło do uzyskania sygnału, który wstępnie wydaje się być całkowicie bezużyteczny w ocenie momentu otwarcia i zamknięcia zaworu dolotowego. Brak jest w tym przypadku widocznego związku pomiędzy przebiegiem odfiltrowanego sygnału a widocznym na ryzunku znacznikiem położenia zaworu.

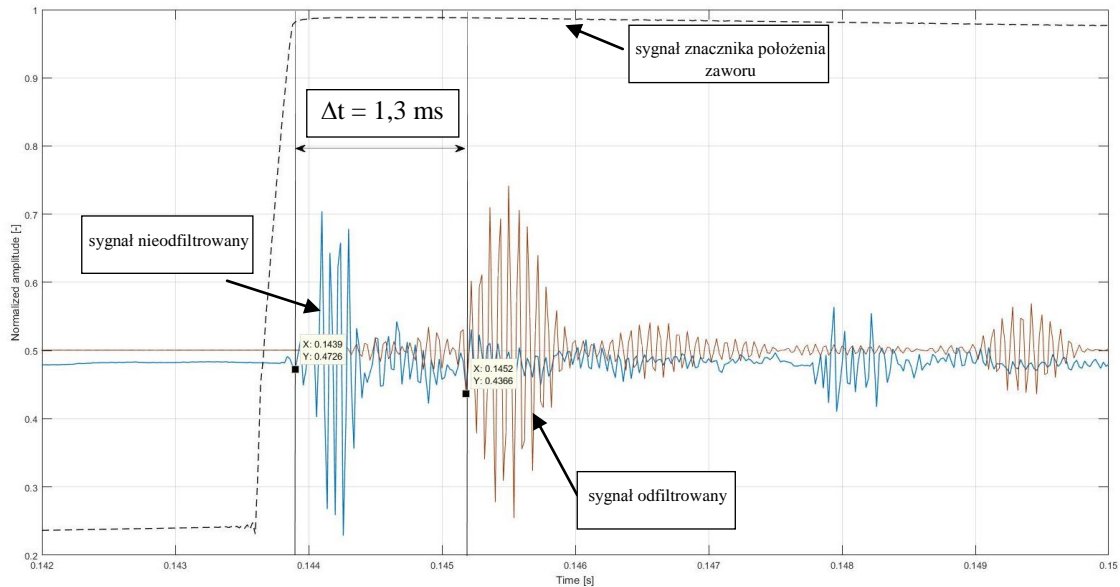
Dużo korzystniej sytuacja przedstawia się w przypadku zastosowania filtrów środkowoprzepustowych II i II (rys. 14 i 15). Na rysunkach ilustrujących stosowne przebiegi sygnałów pomiarowych zaznacza się wyraźny związek pomiędzy amplitudami odfiltrowanych przebiegów przyspieszeń drgań a znacznikiem położenia zaworu.

4. Uwagi i wnioski końcowe

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań pilotażowych można ogólnie stwierdzić, że zrealizowane stanowisko doświadczalne stwarza potencjalne możliwości oceny ilościowej faz rozrządu na podstawie pomiaru drgań w rejonie głowicy cylindrowej silnika z zapłonem samoczynnym z zastosowaniem metod przetwarzania sygnałów cyfrowych (np.[1]. Można tym samym uznać, że założone cele projektowe zostały zrealizowane.

Z drugiej strony jednak, ponieważ w aspekcie praktycznego wykorzystania sygnału drganiowego w przedstawionym w artykule kontekście, najistotniejsza jest jego analiza w dziedzinie czasu należy przeprowadzić bardziej szczegółowe badania w tym zakresie dotyczące:

- określenia wpływu filtracji na przesunięcie sygnału odfiltrowanego względem oryginału; podczas zrealizowanych badań okazało się, że taki wpływ istnieje, jednak z praktycznego punktu widzenia przy prędkościach obrotowych wału rozrządu ok. 135 obr/min może być pominięty (ok. 1,3 ms – zmiana dziedziny z czasowej na kąt obrotu skutkuje wartością ok. 1° obrotu wału rozrządu) – rys. 16.



Rys. 16 Przesunięcie sygnału odfiltrowanego względem oryginału w dziedzinie czasu

- opracowania stosownego filtru obwiedniowego aby uzyskane dane miały dużo większą wartość użyteczną i pozwalały na wnioskowanie diagnostyczne przez użytkownika o przeciętnej wiedzy w tym zakresie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Antoniou A.: Digital Signal Processing. Signals, Systems and Filters. McGraw – Hill Companies Inc., New York 2006.
- [2] Basurko O.C., Uriandob Z.: Condition-Based Maintenance for medium speed diesel engines used in vessels in operation. Applied Thermal Engineering Volume 80, April 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.075>.
- [3] Cempel C., Wibroakustyczna diagnostyka maszyn. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 1985.
- [4] Cipollini F., Oneto L., Coraddu A., Murphy A.J., Anguita D.: Condition-Based Maintenance of Naval Propulsion Systems with supervised Data Analysis. Ocean Engineering Volume 149, 1 February 2018. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.002>.
- [5] Girtler J.: Sterowanie procesem eksploatacji okrętowych silników spalinowych na podstawie diagnostycznego modelu decyzyjnego. Zeszyty Naukowe AMW, nr 100A, Gdynia 1989.
- [6] Komorska I.: Vibroacoustic diagnostic model of the vehicle drive system. Monographic series Library of Maintenance Problems. National Research Institute, Radom 2011.
- [7] Książek P.: Projekt wstępny stanowiska laboratoryjnego do badań drgań w układzie rozrządu zaworowego. Praca dyplomowa inżynierska, opiekun pracy dr inż. J. Rudnicki. WOiO Politechnika Gdańska 2016.
- [8] Lus T.: Analiza przydatności kątowej selekcji drgań w diagnostyce zaworowego rozrządu okrętowych silników spalinowych. Rozprawa doktorska. Wydział Mechaniczno – Elektryczny AMW, Gdynia 1992.
- [9] Madej H.: Metody przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w diagnozowaniu silników spalinowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: TRANSPORT zesz. 69, 2010.



- [10] Polanowski S.: Zastosowanie metod drganiowych w diagnostyce tłokowych silników spalinyowych. Materiały XXVII Ogólnopolskiego Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”, Węgierska Górka 2000.
- [11] Polanowski S., Łutowicz M., Bruski S., Wontka L., Żuralski Cz.: Nowa wersja analizatora cisnień i obwiedni drgań do pomiarów i diagnostyki silników okrętowych. Materiały XVIII Sympozjum Siłowni Okrętowych, Gdynia 1996.
- [12] Zawisza M.: Symptomy wibroakustyczne jako uzupełnienie systemu OBD silników wysokoprężnych. Monograficzna seria wydawnicza Biblioteka Problemów Eksploatacji. Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa – Radom 2015.
- [13] Polski Rejestr Statków, PRZEPISY PUBLIKACJA 2/P Alternatywne systemy nadzoru urządzeń maszynowych - lipiec 2020. Gdańsk 2020.
- [14] Zakłady Mechaniczne „URSUS”. Kołowe ciągniki rolnicze Ursus C-360 i C-360-3P. Instrukcja napraw.
- [15] <https://www.mccdaq.com/Products/Sound-Vibration-DAQ/DT9837>
- [16] <https://www.mccdaq.com/Products/Data-Acquisition-Software/QuickDAQ>
- [17] <https://www.pcb.com/products?model=356b21>
- [18] <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [19] https://www.mathworks.com/products/signal.html?s_tid=srchtitle