Akademia Morska w Szczecinie

Wydział Mechaniczny

## ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Paweł Mazuruk

# Diagnostyka zasobnikowych układów paliwowych na podstawie fazowości procesu wtrysku

Promotor:

dr hab. inż. Zbigniew Ranachowski Prof. Polskiej Akademii Nauk

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Artur Bejger Prof. Akademii Morskiej w Szczecinie

Szczecin 2013

## SPIS TREŚCI

Streszczenie
Abstract
Słownik terminów użytych w pracy
Wstęp
1. Analiza stanu wiedzy o diagnozowaniu wtryskiwaczy zasobnikowego
układu wtryskowego 12
1.1. Budowa zasobnikowego układu wtryskowego paliwa 12
1.1.1 Pompa wysokiego ciśnienia 14
1.1.2 Wtryskiwacz
1.1.2.1. Wtryskiwacz elektromagnetyczny 1 <sup>2</sup>
1.1.2.2. Wtryskiwacz piezoelektryczny
1.1.3. Fazowość procesu wtrysku paliwa
1.2. Rodzaie uszkodzeń zasobnikowych układów wtryskowych
1.3. Przeglad metod stosowanych w diagnozowaniu wtryskiwaczy
układów zasobnikowych
1.4. Wykorzystanie Emisji Akustycznej w diagnozowaniu silników
spalinowych
2. Teza, cel i zakres pracy
3. Zakres prac poprzedzajacych badania eksperymentalne
3.1. Przedmiot badań
3.2. Pomiar przelewu z komory sterującej wtryskiwaczy
3.3. Badanie wizualne wtryskiwaczy
3.4. Badanie wtryskiwaczy na stole probierczym
<b>4.</b> Badania ekspervmentalne
4.1. Opis stanowiska badawczego
4.2. Badanie dokładności toru pomiarowego
4.3. Przygotowanie silnika i toru pomiarowego Emisji Akustycznej do
pomiarów
5. Wyniki badań
5.1. Analiza wybranych miar sygnału Emisji Akustycznej
5.2. Analiza faz sygnału Emisji Akustycznej w procesie wtrysku paliwa 93
5.3. Klasyfikacja sprawności wtryskiwaczy 109
5.3.1. Analiza statystyczna wyników pomiaru 109
5.3.2. Analiza zależności sprawności wtryskiwaczy od czasu trwania III
fazy w chwili maksymalnej aktywności akustycznej
wtryskiwacza 112
5.3.3. Klasyfikacja sprawności wtryskiwaczy od czasu trwania sygnału
EA w chwili maksymalnej aktywności wtryskiwacza i fazy
pomiaru 114
5.4. Badanie relacji pomiędzy stanem wtryskiwaczy a deskryptorem
w postaci funkcji gęstości widmowej sygnału EA 117
Podsumowanie i wnioski
Literatura
Załączniki
Spis rysunków
<b>Spis tabel</b>

### STRESZCZENIE

W rozprawie doktorskiej zaprezentowano nowy, bezinwazyjny sposób oceny stanu technicznego wtryskiwaczy zasobnikowego układu wtryskowego silnika przemysłowego, z ang. Common Rail (CR) – możliwy do wykorzystania w warunkach polowych. W rozprawie przedstawiono wyniki analizy sygnału Emisji Akustycznej (EA) generowanej w trakcie pracy wtryskiwacza. Stan techniczny wtryskiwaczy przeznaczonych do badań zasadniczych został wstępnie określony przy zastosowaniu dwóch wiarygodnych metod, rutynowo stosowanych w praktyce serwisowej, tj. przy pomocy pomiaru objętości paliwa mierzonej w jednostce czasu na króćcu przelewowym oraz przy pomocy pomiaru objętości wtryskiwanego paliwa w jednostce czasu na stanowisku testowym firmy Hartridge IFT-70. Zastosowanie specjalnie opracowanego algorytmu umożliwiło identyfikację w badanym sygnale EA trzech faz generowanych w trakcie następujących procesów: I - faza aktywności kotwicy cewki sterującej wtryskiem; II - faza wzrostu ciśnienia działającego na iglice wtryskiwacza; III - faza aktywności iglicy wtryskiwacza. Następnie w rozprawie przedstawiono wyniki pomiarów średnich czasów trwania trzech podanych wyżej faz, odchylenia standardowe i współczynniki zmienności wyznaczone dla populacji 60 pomiarów dla każdego z 18 zbadanych wtryskiwaczy. Na podstawie analizy tych parametrów stwierdzono, że średni czas trwania sygnału EA w fazie pierwszej nie jest istotny przy klasyfikacji wtryskiwaczy do jednego z dwóch klas: uszkodzone bądź nieuszkodzone, natomiast efektywne jest stworzenie pewnych reguł klasyfikacji w oparciu o średni czas trwania trzeciej fazy oraz podano reguły tej klasyfikacji. Odsetek prawidłowo i nieprawidłowo zaklasyfikowanych wtryskiwaczy w oparciu o przedstawioną wyżej regułę, zastosowaną do wyników pomiarów populacji 18 wtryskiwaczy, zaprezentowano w tabeli. Dla wtryskiwaczy nieuszkodzonych wynik trafności proponowanej reguły wynosił 69%, natomiast dla uszkodzonych odpowiednio 86%, a łącznie dla obu populacji 77,5%, co sugeruje przydatność opisanej procedury do stosowania w praktyce. Praca składa się ze wstępu i pięciu rozdziałów. W rozdziale pierwszym dokonano analizy stanu wiedzy o diagnozowaniu wtryskiwaczy CR, opisano fazy aktywności poszczególnych części wtryskiwacza w trakcie jego pracy oraz typowe rodzaje uszkodzeń tego układu, spotykane w silnikach przemysłowych. Następnie na podstawie badań literaturowych oraz dostępnych metod diagnostycznych wykazano, że

istniejące metody nie pozwalają na precyzyjne określenie stanu technicznego wtryskiwaczy CR w warunkach polowych. W związku z powyższym w rozdziale drugim sformułowano tezę, cel i zakres pracy. W kolejnym, trzecim rozdziale, opisano wykorzystane do badań silniki spalinowe oraz dokonano opisu weryfikacji wstępnej uszkodzonych wtryskiwaczy, które pochodziły z silników ze zdiagnozowanym uszkodzeniem układu wtryskowego. W rozdziale czwartym omówiono zaprojektowane i zbudowane przez autora pracy stanowisko badawcze oraz opisano metodę badania dokładności toru pomiarowego. W tej samej części pracy przedstawiono także sposób przeprowadzenia badań eksperymentalnych. W ostatnim piątym rozdziale opisano wyniki analizy sygnału EA zarejestrowanego podczas pracy wtryskiwaczy w trakcie badań zgodnie z przyjętą procedurą pomiarową. Dokonano analizy statystycznej wyników pomiarów oraz przedstawiono zależność sprawności wtryskiwacza od czasów trwania poszczególnych fazy sygnału EA. Statystyczne ujęcie średniego czasu trwania wytypowanej fazy III umożliwiło określenie stanu wtryskiwacza w sensie dwustanowym (sprawny-niesprawny). Zbadano również widmo zarejestrowanego sygnału EA i ustalono, że funkcja amplitudy gęstości widmowej w zależności od częstotliwości rejestrowanego sygnału cechuje się układem charakterystycznych maksimów lokalnych, zależnym od stanu wtryskiwacza. Całość rozprawy podsumowano w części końcowej pracy w postaci wniosków utylitarnych i szczegółowych, podkreślając osiągniecie założonego celu, to jest opracowania metody diagnostyki uszkodzeń układu wtryskowego przy wykorzystaniu pomiarów fazowości sygnału generowanego przez pracujący wtryskiwacz.

## ABSTRACT

The doctoral dissertation presents a new, non-invasive way to evaluate the technical condition of the Common Rail system in an industry engine - capable of being used in field conditions. The dissertation presents the results of the analysis of Acoustic Emission (AE) signal generated during injector operation. The technical condition of injectors intended for basic research has been pre-determined by means of two reliable methods routinely used in service practice, ie measurement of the fuel volume per unit of time at the overflow connection pipe and measurement of the injected fuel volume per unit of time on Hartridge IFT-70 test stand. The use of a specially developed algorithm enabled to identify, in the examined AE signal, three phases occurring during the following processes: I – activity phase of coil anchor for injection control, II – phase of growing pressure, acting on the injector needle, III – the activity phase of injector needle. Afterwards, in the dissertation there were presented the results of measurements of average duration times of three phases mentioned above, standard deviations and coefficients of variation determined for population of 60 measurements for each of the 18 tested injectors. Based on the analysis of these parameters it was found that the average duration of the AE signal in the first phase is not critical to qualify the injectors for one of two classes: damaged or undamaged, while it is reasonable to create some rules for classification based on the average duration of the third phase and the rules of this classification were provided. The percentages of correctly and incorrectly classified injectors based on the rule set forth above, applied to the measurement results of the population of 18 injectors, were presented in the table. For undamaged injectors, the relevance score of proposed rule amounted to 69%, while for damaged ones 86%, with a total of 77.5% for both populations, what suggests that the described procedure is suitable for use. The dissertation consists of an introduction and five chapters. The first chapter analyzes the state of knowledge about diagnosing the CR injectors, describes the activity phases of various injector parts in the course of its operation, and typical failure types of the system, occurring in industrial engines. Afterwards, based on the literature studies and available diagnostic methods, it was showed that the existing methods do not allow for precise determination of the technical condition of the CR injectors in the field conditions. Therefore, in the second chapter, the thesis, the purpose and scope of the work were formulated. In the next, third chapter there is a description of internal combustion engines used for tests and preliminary verification of damaged injectors that came from engines with diagnosed injection system failure. In the fourth chapter, the test stand designed and built by the author was discussed and a method of testing the accuracy of the measurement chain was described. In the same part of the dissertation a method for carrying out experimental studies was presented. The analysis results of the AE signal recorded during the injector operation were described in the fifth chapter, in accordance with the measurement procedure adopted during the test period. There was also presented the statistical analysis of measurement results as well as the dependence of the injector efficiency on the duration of the individual AE signal phases. Statistical approach to the average duration of the selected phase III made it possible to determine the state of the injector in binary condition (functional-out of order). The spectrum of recorded AE signal was also examined, and it was found that the function of spectral density amplitude, depending on frequency of the recorded signal is characterized by the layout of typical local maxima, dependent on the state of the injector. The whole dissertation was summarized in the final part of the work in the form of utilitarian and detailed conclusions, highlighting the achievement of the intended purpose, ie development of methods for diagnosis of injection system failures by using measurements of phase of a signal generated by the running injector.

## SŁOWNIK TERMINÓW UŻYTYCH W PRACY

**AMPLITUDA SZCZYTOWA** – maksymalna amplituda w czasie trwania sygnału impulsowego [53].

**AWARIA** – uszkodzenie maszyny lub urządzenia ograniczające lub uniemożliwiające dalsze jego działanie. Często występują uszkodzenia wtórne [77].

**BEZAWARYJNOŚĆ OBIEKTU** – właściwość obiektu charakteryzująca utrzymanie się obiektu w stanie zdatności [77].

COMMON RAIL - w skrócie CR, z j. ang. zasobnikowy układ wtryskowy.

**CZAS TRWANIA ZDARZENIA EA** – różnica czasu pomiędzy pierwszym a ostatnim przekroczeniem progu wykrywalności [53].

**CZUJNIK** – element funkcjonalny, którego zadaniem jest bezpośrednie przekazywanie oddziaływania obiektu na dalsze części narzędzi sterujących lub sygnalizujących [77].

DESKRYPTOR – element zbioru miar sygnału Emisji Akustycznej [53].

**DIAGNOSTYKA TECHNICZNA** – dziedzina wiedzy obejmująca całokształt zagadnień teoretycznych i praktycznych dotyczących identyfikacji i oceny aktualnych, przeszłych i przyszłych stanów obiektu technicznego, z uwzględnieniem jego otoczenia [56].

**DIAGNOZA** – jest decyzją o stanie obiektu, będącą wynikiem badania diagnostycznego (określenie stanu obiektu, wynik syntezy diagnostycznej, najbardziej prawdopodobny stan obiektu) [56].

**DIAGNOZOWANIE** – jest to realizacja łańcucha działań, zawierającego badania diagnostyczne, którego celem jest wypracowanie diagnozy, czyli ustalenie aktualnego stanu technicznego obiektu [56].

**EKSPLOATACJA** – ogół wszystkich zdarzeń, zjawisk i procesów zachodzących w danym obiekcie od chwili zakończenia procesu jego wytwarzania do chwili likwidacji [77].

**EMISJA AKUSTYCZNA** – zjawisko spontanicznej generacji fal akustycznych przez przegrupowanie struktury wewnętrznej ciał stałych (rzadziej cieczy) i układów fizycznych, powstawanie fal sprężystych na skutek lokalnej, dynamicznej zmiany w strukturze materiału [57]. Także termin stosowany w przypadku fal sprężystych wywołanych przez wyzwolenie energii w materiale lub przez proces [53].

ENERGIA SYGNAŁU IMPULOWEGO – pomiar energii względnej sygnału impulsowego Emisji Akustycznej [53].

**INFORMACJA DIAGNOSTYCZNA** – informacja umożliwiająca określenie stanu obiektu. Informacjami diagnostycznymi są: wyniki badań, wyniki sprawdzeń oraz diagnozy [56].

**NIESPRAWNOŚĆ** – niespełnienie przez obiekt w czasie jego eksploatacji wymagań określonych w warunkach technicznych [77].

**NIEZAWODNOŚĆ** – właściwość obiektu charakteryzująca jego zdolność do wykonywania określonych funkcji, w określonych warunkach i w określonym przedziale czasu [54].

**PARAMETR STANU OBIEKTU** – wyróżniona wartość wielkości opisującej stan obiektu technicznego [77].

**PRÓG WYKRYWALNOŚCI EA (próg dyskryminacji)** – poziom napięcia, który ma być przekroczony, aby sygnał Emisji Akustycznej został wykryty i poddany obróbce [53].

**PRZETWORNIK** – przyrząd lub urządzenie do przetwarzania przebiegu jednej (wejściowej) wielkości fizycznej na przebieg innej (wyjściowej) wielkości fizycznej z zachowaniem stałego stosunku między nimi [77].

**SKALA DECYBELOWA EA** – skala logarytmiczna określająca stosunek pomiędzy napięciem *U* mierzonym na wyjściu czujnika EA a napięciem odniesienia *Ur* wynoszącym 1  $\mu$ V: *U*dB = 20 log10 (*U/Ur*) [53].

**STAN NIEZDATNOŚCI OBIEKTU** – stan techniczny, w którym obiekt nie może realizować zadania zgodnie z wymaganiami, przy określonym oddziaływaniu otoczenia [77].

**STAN OBIEKTU** – zbiór wartości cech obiektu w danej chwili czasu, trwanie rzeczy w czasie pod jakimś względem takiej samej [77].

**STAN ZDATNOŚCI OBIEKTU** – stan techniczny, w którym obiekt może realizować zadanie zgodnie z wymaganiami, przy określonym oddziaływaniu otoczenia [77].

## WSTĘP

Nieodłącznym zjawiskiem występującym w trakcie eksploatacji wszystkich obiektów technicznych, jest zużycie poszczególnych ich elementów. Często, wynikiem tego są awarie, doprowadzające do znacznych strat ekonomicznych, ale także związanych z bezpieczeństwem a niejednokrotnie ryzykiem utraty życia ich eksploatatorów. Energetyczne obiekty techniczne napędzane są najczęściej silnikami spalinowymi, które ze względu na swoją złożoną budowę mogą ulegać uszkodzeniom [72]. Istnieje ścisła zależność pomiędzy niezawodnością pracy wymienionych obiektów a czynnikami zewnętrznymi takimi choćby jak poziom technicznej wiedzy eksploatacyjnej z jednej strony, ale także np. jakość stosowanego paliwa z drugiej strony. Każde zakłócenie w pracy silnika spalinowego wiąże się ze znacznym wzrostem kosztów związanych np. z nadmiernym zużyciem paliwa, nieprzewidywanymi przestojami urządzenia, a także ze zwiększeniem zagrożeń związanych ze spadkiem bezpieczeństwa eksploatacji danego urządzenia lub też zwiększoną emisją szkodliwych związków spalin do atmosfery.

Zanieczyszczenie środowiska spowodowane emisją szkodliwych składników zawartych w spalinach pochodzących z silników o zapłonie samoczynnym jest obecnie głównym motorem napędzającym rozwój konstrukcyjno-technologiczny tych urządzeń. Państwa krajów rozwiniętych przemysłowo, podjęły wspólne działania mające na celu zmniejszenie emisji gazów pochodzących z procesu spalania paliw weglowodorowych w eksploatowanych silnikach. Ustalanie coraz bardziej "wymagających" norm, zmniejszających zawartość weglowodorów, tlenków azotu (HC+NO<sub>x</sub>), cząstek stałych, tlenków węgla (CO), stanowi obecnie (z praktycznego punktu widzenia) główną wprowadzania zmian konstrukcyjnych silników przyczynę przemysłowych. Obowiązujące normy, które w zależności od przeznaczenia silnika są obecnie, na etapie 3A a następnie 3B, także i w Polsce powinny być zgodne z Dyrektywa Parlamentu Europejskiego 2004/26/EC z dnia 26 Kwietnia 2004 oraz 97/68/EC z dn. 16 Grudnia 1997 (załącznik 3) [21-23].

Analizując budowę przemysłowych silników o zapłonie samoczynnym można zauważyć tendencję do coraz powszechniejszego zastosowania zasobnikowych układów wtryskowych (z ang. Common Rail, w skrócie "C-R") [18, 20]. Jest to jedna z możliwości przybliżających do osiągnięcia założonych norm dotyczących emisji spalin (Załącznik 4) [21-23, 45, 54-56].

Zasobnikowy układ wtryskowy, który po raz pierwszy zastosowano w silniku samochodowym w roku 1994, oprócz wielu zalet, które wydatnie wpływają na prace silnika, ma także swoje wady. W przypadku nieodpowiedniej jakości paliwa, przy jednoczesnej dużej precyzji wykonania elementów układu, jest bardzo podatny na uszkodzenia. Jak pokazują badania własne autora (Załącznik 2) [45], a także innych autorów [5, 9, 10, 13, 30, 45, 73, 81], procentowy udział uszkodzeń układu paliwowego w stosunku do innych układów funkcjonalnych przemysłowego silnika o zapłonie stanowi największy odsetek. Stanowi on około 70% wszystkich awarii głównych układów funkcjonalnych silnika. Autor rozprawy, pracując od wielu lat w serwisie silników spalinowych stwierdził, iż uszkodzenia układu wtryskowego stanowia główny (z praktycznego punktu widzenia) problem eksploatacyjny silników (bez względu na jego markę, aplikację, moc czy długość czasu eksploatacji). Wykrycie zbliżającej się niesprawności układu wtryskowego stanowi dosyć duże wyzwanie dla serwisantów, gdyż obecnie istniejące metody diagnostyczne, które stosowane są w praktyce, bazują najczęściej na analizie symptomów zewnętrznych niewłaściwej pracy silnika (zmniejszenie mocy, zadymienie spalin, wzrost temperatury spalin itp.). Około 80% niesprawności układu wtryskowego spowodowanych jest uszkodzeniem wtryskiwaczy [45]. Wtryskiwacze zasobnikowego układu wtryskowego można precyzyjnie kontrolować i testować na stole probierczym w warunkach laboratoryjnych, natomiast w "warunkach polowych" ich diagnoza ogranicza się w praktyce do pomiaru objętości paliwa wypływającego z komory sterującej poszczególnych wtryskiwaczy lub ze wszystkich wtryskiwaczy zbiorczo. Serwisant ma więc bardzo ograniczone możliwości badania ich stanu technicznego w trakcie diagnozowania (bądź naprawy) silnika w terenie. Najczęściej prowadzi to do podjęcia decyzji o wymianie wszystkich wtryskiwaczy bez szczegółowej znajomości ich stopnia uszkodzenia. Między innymi z uwagi na brak niezawodnych narzędzi diagnostycznych, jest to również zalecenie producentów silników pracujących z układem C-R. Automatycznie wzrasta koszt naprawy, który w przypadku wymiany wszystkich wtryskiwaczy może dochodzić nawet do 25% ceny całego silnika.

Brak możliwości precyzyjnego badania stanu technicznego wtryskiwaczy może być także powodem dopuszczenia do pracy wtryskiwaczy, których nieprawidłowa praca nie jest widoczna w postaci symptomów związanych z problematycznym rozruchem czy odczuwalną niewłaściwą pracą silnika, ale wydatnie przyczynia się do nieprawidłowości związanych z procesem spalania paliwa w silniku. Skutkuje to ryzykiem zwiększenie emisji szkodliwych składników spalin do atmosfery, spadku uzyskanej mocy a w wielu przypadkach nagłego i niepożądanego zatrzymania silnika.

Przytoczone argumenty dotyczące potrzeby diagnozowania wtryskiwaczy w warunkach rzeczywistej eksploatacji silnika oraz studia literaturowe [19, 24-27, 36, 38, 45-47, 51-52] pozwalają na sformułowanie stwierdzenia, iż istnieje potrzeba opracowania nowej, bezinwazyjnej metody, która znajdzie zastosowanie w diagnozowaniu wtryskiwaczy układu zasobnikowego w trakcie pracy silnika. Zaawansowane prace w zakresie diagnostyki wtryskiwaczy, prowadzone w polskich ośrodkach naukowo-badawczych, pozwoliły na opracowanie metody diagnozowania wtryskiwaczy tradycyjnego układu wtryskowego z wykorzystaniem Emisji Akustycznej. Metoda ta pozwala na szybki pomiar sygnałów Emisji Akustycznej na pracujących wtryskiwaczach silnika okrętowego oraz na komputerowa obróbkę sygnału wraz z cyfrową prezentacją wyników [9]. Niemniej, ze względu na zupełnie odmienną zasadę działania wtryskiwaczy pracujących w układzie Common-Rail, opracowana metoda nie może być bezpośrednio wykorzystania do prostej analizy ich stanu technicznego. Autor niniejszej rozprawy podjął próbę wykorzystania zjawiska Emisji Akustycznej do diagnozowania wtryskiwaczy układu zasobnikowego silnika przemysłowego. W badaniach wykorzystano eksperyment czynno-bierny, polegający na obserwacji parametrów sygnału z równoczesnym pomiarem parametrów stanu badanego obiektu. Wykorzystano to m.in. do późniejszego oszacowania wartości stanów granicznych symptomów, umożliwiających klasyfikację dwustanową obiektu: zdatny, niezdatny. Na bazie zgromadzonych uszkodzonych (w wyniku rzeczywistej eksploatacji) wtryskiwaczy, których stan techniczny został ustalony w warunkach laboratoryjnych, dokonano pomiarów sygnału Emisji Akustycznej podczas pracy tych wtryskiwaczy w silniku na stanowisku pomiarowym. Otrzymane sygnały porównano z uzyskanymi podczas pracy wtryskiwaczy nieuszkodzonych, (w tym przypadku, zweryfikowanymi fabrycznie nowymi). Zaproponowano także opracowanie algorytmu, który mógłby jednoznacznie wyznaczyć stan techniczny diagnozowanego, pracującego wtryskiwacza.

## 1. ANALIZA STANU WIEDZY O DIAGNOZOWANIU WTRYSKIWACZY ZASOBNIKOWYCH UKŁADÓW WTRYSKOWYCH

Nowoczesne silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym są podstawowym źródłem napędu wielu urządzeń, pojazdów i jednostek pływających (załącznik 1). Konstruktorzy, dążąc do uzyskania coraz wyższych sprawności, utrzymania rygorystycznych norm emisji spalin czy poprawieniu kontroli na silnikiem, wprowadzili pod koniec XX wieku nową konstrukcję układu wtryskowego paliwa. W tradycyjnym układzie wtryskowym, wytwarzane przez pompę sekcyjną lub rozdzielaczową ciśnienie paliwa, powodowało w określonym momencie czasowym, otwieranie się iglicy wtryskiwacza. W nowym układzie wtryskowym ciśnienie paliwa wytwarzane jest w pompie wysokiego ciśnienia i gromadzone w zasobniku paliwa, zaś wtryskiwacze otwierane są elektronicznie. Wartości ciśnień w układzie z zasobnikiem paliwa są kilkukrotnie wyższe, niż w układzie tradycyjnym. Wtrysk paliwa jest tu bardzo precyzyjnie sterowany zarówno w stosunku do kata obrotu wału korbowego jak i czasu trwania wtrysku. Może on być także dzielony na kilka dawek (tzw. faz wtrysku). Jednocześnie, ze względu na swoją precyzyjną budowę a przez to konieczność stosowania bardzo czystych paliw, wymaga opracowania nowych metod diagnozowania, możliwych do zastosowania w warunkach eksploatacyjnych podczas pracy silnika.

#### 1.1. Budowa zasobnikowego układu wtryskowego paliwa

Głównymi elementami układu wtryskowego silnika przemysłowego z zasobnikowym układem wtryskowym są:

- ręczna pompka z filtrem o wielkości "oczek" wkładu filtracyjnego 20-25 μm wraz z odwadniaczem;
- pompa podająca paliwo do pompy wysokiego ciśnienia (napędzana poprzez wałek rozrządu, wałek pompy wysokiego ciśnienia lub silnik elektryczny), generująca ciśnienie o wartości 0,4 - 0,6 MPa;
- 3) filtr dokładnego oczyszczania o wielkości "oczek" wkładu filtracyjnego 2-3 µm;
- chłodnica paliwa w przypadku pracy w wysokich temperaturach otoczenia lub gdy zastosowano zwartą zabudowę silnika;

- pompa wysokiego ciśnienia napędzana kołem zębatym z wału korbowego wartość ciśnień od 30 MPa przy obrotach biegu jałowego do 160 MPa przy pełnej mocy rozwijanej przez silnik, (w niektórych rozwiązaniach nawet do 250 MPa i więcej) [20, 66, 68];
- przewody wysokiego ciśnienia wraz z zasobnikiem paliwa i zaworem redukcyjnym ciśnienia montowanym w zasobniku;
- 7) wtryskiwacze elektromagnetyczne lub piezoelektryczne;
- zawór elektromagnetyczny do regulacji przebiegu zmiany ciśnienia w układzie wtryskowym, montowany najczęściej w pompie wysokiego ciśnienia;
- 9) sterownik silnika.

Pompa wysokiego ciśnienia montowana jest w obudowie rozrządu i napędzana najczęściej poprzez koła zębate z wału korbowego. Elektrozawór na pompie steruje wartością wydatku paliwa w zależności od sygnału otrzymanego ze sterownika silnika, co z kolei wpływa na wartość ciśnienia w zasobniku paliwa. Sygnał ten jest formowany między innymi na podstawie informacji otrzymanych z następujących czujników:

- kąta położenia wału korbowego;
- pozycji wału krzywkowego, montowany na pompie wysokiego ciśnienia;
- ciśnienia powietrza w kolektorze dolotowym;
- ciśnienia oleju;
- ciśnienia paliwa w zasobniku paliwa;
- temperatury płynu chłodzącego;
- temperatury powietrza dolotowego.

Dodatkowo w sterowniku silnika określone są sygnały wyjściowe sterujące elektrozaworem recyrkulacji spalin, sygnały elektryczne sterujące wtryskiwaczami, informacje z elementów sterowania prędkością obrotowa wału korbowego silnika (np. pedału gazu) a także sygnały ze sterownika maszyny roboczej (napędzanej przez silnik). Sterownik silnika zawiera wprowadzone tzw. "mapy" wtrysku paliwa, które ustalane są przez producenta dla konkretnego typu silnika na podstawie rozważań teoretycznych i badań doświadczalnych. Sygnał sterujący pracą wtryskiwaczy i pompy wtryskowej zawiera informację o początku oraz czasie trwania wtrysku a tym samym ustala dawkę i ciśnienie paliwa. W większości współczesnych silników z układem Common-Rail,

wtrysk może odbywać się w kilku fazach zależnie od obciążenia silnika. Fazowość procesu wtrysku, będąca istotą rozważań autora pracy, została szczegółowo omówiona w rozdziale 1.1.3.

Na rysunku 1 zaprezentowano uproszczony schemat zasobnikowego układu paliwowego silnika przemysłowego, sześciocylindrowego o mocy 130 kW. Silniki tego typu posłużyły jako obiekty badań zarówno laboratoryjnych jak i rzeczywistych (w warunkach przemysłowej ich eksploatacji).



Rys. 1. Budowa zasobnikowego układu paliwowego badanego silnika [opracowanie własne na podstawie dokumentacji firmy Perkins]

Za prawidłową wartość ciśnienia paliwa w zasobniku odpowiedzialna jest pompa wysokiego ciśnienia wraz z układem regulacji, przy założeniu poprawnej pracy układu niskiego ciśnienia. Zespół wtryskiwacz-układ sterujący ECM (*ang. Electronic Control Module*) reguluje wartość i czas trwania wtrysku.

#### 1.1.1. Pompa wysokiego ciśnienia

Integralnym elementem zasobnikowego układu jest pompa wysokiego ciśnienia. We współczesnych konstrukcjach silników przemysłowych najczęściej spotyka się pompy firmy Bosch, które w swojej najnowszej wersji wytwarzają ciśnienia powyżej 200 MPa. Innymi znaczącymi producentami są: firmy Denso i Caterpillar, które oferują pompy mogące wytworzyć ciśnienie o wartości powyżej 180 MPa oraz firma Delphi, której pompy wytwarzają ciśnienia do 250 MPa. W silniku firmy PERKINS, który stanowił główny obiekt badań autora niniejszej pracy, zarówno pompa wysokiego ciśnienia jak i pozostałe elementy układu wtryskowego są produkcji firmy Caterpillar.

Pod względem budowy i zasady działania, pompy wtryskowe wysokiego ciśnienia (rys. 2) w większości przypadków różnią się jedynie sposobem regulacji ciśnienia paliwa.



Rys. 2. Budowa pompy wysokiego ciśnienia na przykładzie pompy HP2 firmy Denso [79]

W silnikach przemysłowych stosuję się następujące metody regulacji wysokiego ciśnienia paliwa:

- a) Przy pomocy regulatora ciśnienia na dolocie paliwa do zasobnika lub w niektórych rozwiązaniach w zasobniku paliwa (wcześniejsze układy regulacji ciśnienia CR np. Siemens SID 801). Wadą tego systemu jest wysoka temperatura i z tego powodu konieczność zastosowania w układzie chłodnicy paliwa. Pompa taka pracuje pod pełnym obciążeniem bez względu na zapotrzebowanie paliwa w procesie spalania, a tym samym występuje nadmierne jej zużycie, co ma bezpośredni wpływ na zwiększony pobór mocy i tym samym pośrednio zmniejszenie sprawności silnika.
- b) Poprzez odcięcie jednej z sekcji tłoczących pompy wysokiego ciśnienia.
  Rozwiązanie tego typu stosuje się np. w pompach Bosch CP1 typ S. Odbywa się to poprzez podtrzymywanie elektromagnetycznego zaworu na ssaniu pompy.

Wadą takiego rozwiązania są wahania ciśnienia w zasobniku paliwa oraz zmiany momentu obrotowego w napędzie pompy.

- c) Za pomocą zaworu regulującego dawkę paliwa do pompy wysokiego ciśnienia (najnowsza metoda). To rozwiązanie znalazło zastosowanie w pompach Bosch CP1 typ H, CP3, w pompach Denso HP3 i HP4, w systemach Siemens SID 802 lub Delphi a także w konstrukcjach firmy Caterpillar. Praca układu polega w takim przypadku na objętościowym dozowaniu ilości paliwa do pompy wysokiego ciśnienia i tym samym regulacji jej wydajności. Nadmiar paliwa jest przekazywany z układu niskiego ciśnienia do układu powrotu paliwa, co powoduje, że nie ma strat energii i wyzwalania dodatkowego ciepła.
- d) Za pomocą połączenia metod wymienionych w podpunktach a) i c) poprzez regulację zaworu sterującego dawką paliwa oraz regulatorem ciśnienia paliwa na dolocie do zasobnika. Zaletą tego systemu jest dokładniejsze dozowanie paliwa wraz z szybszą zmianą wartości ciśnienia w zasobniku. Sytuacje takie występują w momencie rozruchu lub chwilowych zmian prędkości obrotowych. Rozwiązanie tego typu można znaleźć w pompie Bosch EDC16 czy też Siemens DCP.

#### 1.1.2. Wtryskiwacz

Wtryskiwacze składają się z kilku podstawowych podzespołów (modułów):

- 1. Rozpylacza.
- 2. Hydraulicznego układu wspomagającego.
- 3. Iglicy.
- Elementu napędowego (elektrozaworu lub zaworu z membraną piezoelektryczną).

Na rysunku 3 przedstawiono budowę wtryskiwacza elektromagnetycznego silnika przemysłowego.



Rys. 3. Wtryskiwacz elektromagnetyczny; a) schemat, b) widok rzeczywisty [45]

Niezależnie od rodzaju wtryskiwacza, rozpylacze mają zbliżoną budowę, różnią się głównie wielkością i kształtem komory rozpylacza oraz średnicą kanalików wtryskowych.

#### 1.1.2.1. Wtryskiwacz elektromagnetyczny

Wtryskiwacze elektromagnetyczne charakteryzują się tym, że kotwica elektrozaworu jest jednocześnie elementem zamykającym i otwierającym komorę sterującą wtryskiwacza. Komora sterująca posiada dwa dławiki – dopływu i odpływu, (dławik dopływu stawia większy opór dla przepływającego paliwa). Przed fazą wtrysku paliwa, w komorze sterującej panuje wysokie ciśnienie takie, jak w pompie wysokiego ciśnienia i w zasobniku paliwa. Identyczne ciśnienie panuje w przewodach wysokiego ciśnienia oraz korpusie wtryskiwacza i w komorze rozpylacza. Z tego powodu, ciśnienia

działające z obu stron na iglicę są identyczne. Dodatkowo, aby zapewnić docisk iglicy do gniazda, pole powierzchni osadzenia rozpylacza jest mniejsze niż pole powierzchni popychacza w komorze sterującej i tym samym siła docisku popychacza i igły rozpylacza jest większa niż siła otwarcia. Aby skrócić czasy opóźnienia działania iglicy rozpylacza, stosuje się sprężynę dociskową. W momencie zadziałania elektrozaworu i otwarcia dławika odpływu, paliwo odpływa do kanału przelewowego. Przekrój dławika dopływu jest mniejszy niż odpływu, więc następuje spadek ciśnienia paliwa w komorze sterującej. Różnica ciśnień nad i pod igłą rozpylacza powoduje jej uniesienie i tym samym wtrysk paliwa do komory spalania. Czas trwania wtrysku zależy od czasu otwarcia kotwicy elektrozaworu. Jeżeli kotwica elektrozaworu zamknie dławik odpływu, ciśnienie w komorze sterującej podnosi się i wyrównuje do ciśnienia panującego w całym układzie wysokiego ciśnienia. Tym samym wartości siły potrzebnej do przemieszczenia iglicy w kierunku komory rozpylacza jest wyższa od siły potrzebnej do jej otwarcia. Wtryskiwacz kończy w tym momencie proces wtrysku.

W większości konstrukcji wtryskiwaczy elektromagnetycznych, maksymalny skok kotwicy elektrozaworu wynosi około 0,5 mm. W połączeniu ze sprzężeniem hydraulicznym, czas procesu otwarcia i zamknięcia iglicy rozpylacza jest rzędu dziesiątek mikrosekund. Na dzień dzisiejszy, nie istnieje żaden system (lub przyrząd) serwisowy, który pozwoliłby na zdiagnozowanie tych wartości.

Z punktu widzenia sterowania elektrozaworu sygnałem elektrycznym wyróżnia się tzw. fazy otwierania, przyciagania i podtrzymania [58]. Celem uzyskania wysokiej siły elektrodynamicznej i tym samym powtarzalności cyklu, stosuje się tu zazwyczaj duże napięcia elektryczne rzędu 50 do 150 V. W badanych silnikach (opis w rozdziale 3.1), wartość napięcia wynosi 70 V. Układ elektroniczny zasilania cewki wtryskiwacza znajduje się w sterowniku silnika. Zawiera on dodatkowo kondensator, w którym gromadzona jest energia elektryczna podwyższonego napięcia.

W fazie otwierania pobierany jest z kondensatora (umieszczonego w sterowniku silnika) prąd o wartościach około 20 A. W fazie przyciągania i podtrzymania, wykorzystywany jest prąd generowany w przetwornicy wysokiego napięcia. W tzw. między fazach następuje doładowanie kondensatora.

Z praktycznego punktu widzenia obsługa techniczna nie ma możliwości ingerencji w ten układ, gdyż jest on zabudowany w szczelnym i nie serwisowalnym sterowniku silnika. Można jedynie monitorować przebieg prądu i napięcia sterowania wtryskiwacza.

#### 1.1.2.2. Wtryskiwacz piezoelektryczny

Wtryskiwacz piezoelektryczny stanowi nowsze rozwiązanie w zasobnikowym układzie wtryskowym paliwa. Elementem napędowym do sterowania przepływem paliwa jest stos płytek piezoelektrycznych wraz z popychaczem (zaworem sterującym) oraz element pośredniczący tzw. moduł sprzęgający. W tym rozwiązaniu, w powszechnie stosowanych konstrukcjach, nie ma kotwicy, która bezpośrednio zamyka i otwiera dławik komory sterującej. Popychacz napędzany stosem płytek piezoelektrycznych zamyka lub otwiera kanał upustowy. W przypadku otwarcia kanału upustowego, ciśnienia w komorze sterującej oraz w komorze rozpylacza wyrównują się a iglica jest dociśnięta do gniazda. Jeżeli natomiast kanał upustowy zostanie zamknięty, to paliwo z nad iglicy w komorze sterującej odpłynie do przelewu, spadnie tym samym jego ciśnienie i nastąpi uniesienie iglicy rozpylacza oraz rozpocznie się proces wtrysku.

Zmianom wydłużeń cieplnych popychacza, spowodowanych rozszerzalnością cieplną, zapobiega się stosując moduł sprzęgający, który jest przetwornikiem hydraulicznym. W celu zapewnienia prawidłowej pracy modułu sprzęgającego, na przelewie wtryskiwaczy piezoelektrycznych utrzymuje się ciśnienie około 1 MPa.

Skok popychacza siłownika piezoelektrycznego waha się od 0,030 do 0,045 mm. Ze względu na bardzo małe grubości pojedynczych elementów piezoelektrycznych wynoszących około 0,08 mm i przyrost grubości pod wpływem przyłożonego napięcia około 0,15%, stosuje się blisko 300 warstw elementów piezoelektrycznych. Przyłożone napięcie elektryczne ma najczęściej wartość od 100 do 200 V i przechodzi bezpośrednio ze sterownika silnika.

Wtryskiwacze piezoelektryczne są szybsze w działaniu niż wtryskiwacze elektromagnetyczne ze względu na mniejszą masę elementów ruchomych we wtryskiwaczu, co daje większą szybkość ruchu iglicy (rzędu 1-1,5 m/s). Niemniej jednak w ostatnich rozwiązaniach konstrukcyjnych wtryskiwaczy silników przemysłowych coraz częściej stosuje się wtryskiwacze elektromagnetyczne, ze względu na wyższą niezawodność pracy ich części elektrycznej.

#### 1.1.3. Fazowość procesu wtrysku

Proces regulacji charakterystyki wtryskiwania paliwa jest realizowany przez sterownik silnika. Sterownik generuje sygnały napięciowo-prądowe, które zapewniają pracę wtryskiwacza w odpowiedniej fazie działania rozrządu silnika.

W zasobnikowym układzie wtryskowym jednym z najważniejszych elementów są wtryskiwacze paliwa. Moc silnika, generowany hałas, stopień zanieczyszczenia składnikami toksycznymi zawartymi w spalinach, jest ściśle uzależniony od prawidłowości działania układu wtryskowego a w szczególności od dawki wtryskiwanego paliwa.

Zasada procesu wtrysku paliwa układów zasobnikowych, generalnie jest podobna do innych silników o zapłonie samoczynnym wyposażonych w klasyczny układ wtryskowy. Ten pierwszy z nich, posiada jednak kilka cech charakterystycznych takich m.in. jak:

- wysokie ciśnienie wtrysku, dochodzące w niektórych obecnych rozwiązaniach do 250 MPa [20, 66, 68];
- możliwość kilku wtrysków o zmiennej dawce podczas jednego cyklu pracy (nawet do 8 dawek wtrysku w silnikach samochodowych) [78];
- krótki czas trwania pojedynczych faz wtrysku;
- zmienność dawkowania wtrysku oraz początku wtrysku zależna od wymagań i warunków pracy silnika.

Przebiegi podstawowych parametrów sterujących i faz we wtryskiwaczu podano na rysunku 4.



Rys. 4. Sygnały robocze wtryskiwacza elektromagnetycznego - opracowanie własne na podstawie [74]

Zasada pracy wtryskiwacza elektromagnetycznego, który został zastosowany w silnikach badanych przez autora pracy, opisana jest szczegółowo na przykładzie wtryskiwaczy firmy Bosch w [58]. Producent zasobnikowych układów wtryskowych, firma Bosch, opisuje pracę wtryskiwacza elektromagnetycznego z podziałem na następujące fazy:

- a) <u>faza prądu otwarcia</u> prąd przepływa według przebiegu zadanego przez sterownik do cewki elektromagnesu. Wartość prądu jest w granicach kilkudziesięciu amperów i wzrasta dość stromo by zainicjować otwarcie kotwicy wtryskiwacza;
- b) <u>faza prądu przyciągania</u> w tej fazie napięcie przepływa już nie z kondensatora w sterowniku lecz z akumulatora;
- c) <u>faza prądu podtrzymania</u> ze względu na mniejsze zapotrzebowanie energii elektrycznej w celu utrzymania rdzenia elektromagnesu, którym jest kotwica, spada wartość prądu o mniej więcej połowę wartości początkowej. W tym stanie elektromagnes utrzymuje kotwicę do końca ustalonego czasu działania;

- d) <u>faza wyłączenia</u> w tej fazie napięcie na cewce elektromagnesu maleje do zera;
- e) <u>faza doładowania energii kondensatora</u> proces ten odbywa się w sterowniku za pośrednictwem wzmacniacza napięcia i nie ma wpływu na działanie wtryskiwacza w danej chwili, lecz zachodzi tu gromadzenie energii do kolejnego procesu otwarcia, który następuje w okresie kilkudziesięciu milisekund w zależności od obrotów silnika.

Na rysunku 5 zaprezentowano opisane fazy na wykresie prądowym, zarejestrowanym w trakcie badań oscyloskopowych przez autora pracy.



Rys. 5. Przebieg czasowo-prądowy pracy cewki elektromagnetycznego wtryskiwacza podczas pojedynczego wtrysku: a) faza prądu otwarcia, b) faza prądu przyciągania, c) faza prądu podtrzymania, d) faza wyłączenia, e) faza doładowania kondensatora [45]

#### 1.2. Rodzaje uszkodzeń zasobnikowych układów wtryskowych

Podstawowe wielkości, wywierające istotny wpływ na diagnostykę omawianego układu to:

- 1. Wartość ciśnienia paliwa lub jego przepływ w układzie podawania paliwa ze zbiornika poprzez filtry.
- 2. Wartość ciśnienia paliwa w zasobniku.
- 3. Wartości napięć elektrycznych i prądów sterujących pracą wtryskiwaczy.

- 4. Częstotliwość podawania impulsów sterujących do wtryskiwaczy.
- 5. Wartość przelewu paliwa z wtryskiwaczy.
- 6. Pomiar stopnia zadymienia spalin.

Na pracę powyższego układu wpływają również stany niesprawności poszczególnych czujników silnika lub też przekroczenie założonych parametrów takich jak: ciśnienie, temperatura, prędkość obrotowa itd. Nieprawidłowości te są rejestrowane w panelu sterującym maszyny.

Wszelkie nieprawidłowości w opisanych sygnałach, mogą być przyczyną niesprawności pracy silnika w postaci braku możliwości jego rozruchu, utraty lub niepełnej mocy, nierównomiernej prędkości obrotowej, samoczynnego zatrzymywania silnika podczas pracy, nadmiernego dymienia, braku reakcji na żądane zmiany prędkości obrotowej i momentu obrotowego itd.

Nie wnikając w szczegóły, niesprawności układu paliwowego podzielić można na niesprawności związane z układem niskiego oraz układem wysokiego ciśnienia.

Zestawiając typowe niesprawności związane z układem niskiego ciśnienia silnika z zasobnikowym układem wtryskowym, można dokonać analizy dotyczącej przyczyn ich występowania w połączeniu z praktycznymi sposobami ich wykrywania (tabela 1) [14].

Niesprawność	Przyczyny i sposób wykrywania					
Brak odpowietrzenia	Niesprawność tę można zdiagnozować podłączając manometr					
zbiornika paliwa	na ssaniu pompy podającej, w którym wskazania zbyt dużego					
	podciśnienia będą dowodziły, że zbiornik paliwowy nie jest					
	prawidłowo odpowietrzany. Zazwyczaj po odpowietrzeniu					
	zbiornika poprzez wykręcenie korka wartość ciśnienia					
	normuje się i pompa podająca zaczyna pracować prawidłowo.					
Zbyt mały przepływ paliwa	Niesprawność jest spowodowana zanieczyszczeniem układu paliwowego w króćcu ssawnym zbiornika, filtrach paliwa, przewodach paliwowych. Zbyt mały przepływ może być przyczyną zagięcia przewodów paliwowych, przeciekami. Diagnozuje się ją poprzez weryfikację wzrokową oraz pomiar podciśnienia na ssaniu pompy podającej. Dla ułatwienia potwierdzenia tego rodzaju niesprawności, podłącza się niezależny układ zasilania w paliwo (składający się z przenośnego zbiornika z czystym paliwem wraz z przewodem podłączanym do pompy podającej paliwa przed filtrem dokładnego oczyszczania). Bezproblemowe uruchomienie silnika na zewnętrznym układzie potwierdza nieszczelności układu paliwowego maszyny.					

Tabela. 1. Zestawienie typowych niesprawności układu niskiego ciśnienia paliwa [14]

Niesprawności	Przyczyny i sposób wykrywania					
Powietrze w układzie	Spowodowana nieszczelnościami na króćcach, pękniętymi					
paliwowym	przewodami paliwowymi, wadach spawów zbiornika					
	paliwowego, uszkodzeniami gwintów filtrów. Niesprawność					
	tę diagnozuje się podłączając przeźroczysty przewód					
	paliwowy pomiędzy pompą podającą paliwo a pompą					
	wtryskową. wyznacznikiem obecności powietrza w paliwie					
	dużych pecherzy. Dopuszczalne są niewielkie pecherze na					
	długości nie wiekszej niż 2 5 cm					
Uszkodzenie recznei	Uszkodzenie zaworu zwrotnego lub samego mechanizmu					
pompy wstepnego	pompy. Uszkodzenie to diagnozuje sie poprzez sprawdzenie					
ciśnienia	wycieków paliwa z króćców ręcznej pompy na ssaniu.					
	Dodatkowo podczas pompowania wyczuwa się opór ze					
	względu na prawidłowy wzrost ciśnienia. Przy braku tego					
	oporu potwierdza się nieprawidłową pracę pompki na					
	tłoczeniu. Niesprawność ta często występuje w okresie					
	zimowym z powodu zamarzania wody na powierzchni					
NT: //	1 wewnątrz pompki.					
Niesprawnosc machanicznaj lub	Objawy uszkodzenia diagnozuje się poprzez podłączenie na thoszoniu manometru i odezutu wartości ciśnień które					
elektrycznej wstennej	nowinny być w zakresie podanym przez producenta Niższe					
nomny nodajacej	lub wyższe wartości po wyeliminowaniu poprzednich					
paliwo do filtra	njesprawności, wskazuja na uszkodzenia pompy. Innym					
dokładnego	sposobem jest wyznaczanie objętości przepływającego paliwa					
oczyszczania.	w czasie (w cm <sup>3</sup> /min), zgodnie z wytycznymi podanymi przez					
	producenta.					
Niesprawność	Sygnał alarmowy generowany w sterowniku silnika					
czujnika poziomu	wskazujący na brak paliwa w zbiorniku może redukować					
paliwa w zbiorniku.	obroty sılnıka lub "nie zezwolić" na uruchomienie sılnıka.					
	W przypadku, gdy paliwo znajduje się w zbiorniku					
	koniecznym jest sprawdzenie, czy pływak porusza się					
	sprawny oraz czy jest poprawne połaczenie końcówek					
	w wiazce elektrycznei					
Niesprawności	W wielu rozwiazaniach niesprawności elektryczne					
elementów	wykrywane są przez układ diagnostyczny silnika, więc					
elektrycznych np.	konieczna jest prawidłowa interpretacja alarmu np. zwarcie					
czujników lub	do masy, otwarty obwód itp.					
elektromagnetycznego						
zaworu regulującego						
dopływ paliwa do						
pompy wysokiego						
cisnienia.						

Tabela. 1. Zestawienie typowych niesprawności układu niskiego ciśnienia paliwa [14] - cd.

Jak podano wcześniej, drugi typ niesprawności występujących w zasobnikowym układzie paliwowym to uszkodzenia związane z obwodem wysokiego ciśnienia (tabela 2).

Niesprawność	Przyczyny i sposób wykrywania
Przecieki i	Symptomem jest najczęściej brak możliwości uruchomienia
nieszczelności	silnika oraz widoczne (nieuzbrojonym okiem) wycieki
	paliwa. Ze względu na bardzo wysokie ciśnienie w układzie,
	niesprawność ta objawia się dosyć szybko. Większość
	producentów zabrania wielokrotnego stosowania przewodów
	paliwowych. Każdorazowy demontaż przewodu powinien
	skutkować jego wymiana na nowy.
Uszkodzenia	Niesprawności elektryczne wykrywa się wykorzystując
elementów	program diagnostyczny silnika lub też oscyloskop
elektrycznych: czujnik	Uszkodzenia mechanicznych elementów wykonawczych sa
ciśnienia naliwa w	czesto bardzo trudne do wykrycja a rozwiązanie problemu
zasobniku naliwa	nolega najczęściej na wymianie całego zesnołu na nowy
elektromagnetyczny	pologa najezęselej na wymianie <u>eulego zespolu</u> na nowy.
zawór sterujący	
wysokim ciśnieniem	
w pompie sterownik	
nomny wysokiego	
ciśnienia czuinik	
temperatury paliwa	
itd	
Ilu.	Snowodowana uszkodzoniam machaniaznym alamantów
Awaria politpy	spowodowana uszkouzemeni mechanicznym elementów
wysokiego cisiliellia	Diagnozowania niagnrawnaćaj nalega na ustalanju wartaćaj
	Diagnozowanie mespiawności polega na ustaleniu wartości
	diagnostvoznogo silnika przy założoniu sprzyvności ozniników
	i sterovnika silnika W przypadku stwiordzenia uszkodzenia
	norma delaza waryfikacja polaza na joj wymontowaniu
	pompy daisza werynkacja polega na jej wymonowaniu
	1 przekazaniu wyspecjalizowanej firmie zajmującej się
NT 11	naprawą pomp wuyskowych.
Nieprawidłowe	Niesprawność ta spowodowana jest nieprawidłowościami po
sygnaty sterujące ze	stronie sterowania slinika, biędami w systemie sterowania
sterownika silnika	maszyny, w układzie magistrali komunikacyjnej CAN-BUS
	(ang. Controller Area Network) itd. Diagnozowanie
	niesprawności polega na odłączeniu wiązki elektrycznej
	maszyny i zastąpienie jej panelem serwisowym. Ustąpienie
	niesprawności będzie dowodziło, że występuje ona po stronie
<b>TT 1 1 1</b>	sterowania w instalacji maszyny.
Uszkodzenia	Uszkodzenia elektryczne – wykrywane poprzez zastosowanie
wtrysk1waczy	programu diagnostycznego, test cewek elektromagnetycznych
	wtryskiwaczy, analizie przebiegów napięć, prądów
	i częstotliwości za pomocą oscyloskopu.

Tabela. 2. Zestawienie typowych niesprawności układu wysokiego ciśnienia paliwa [14]

Niesprawność	Przyczyny i sposób wykrywania							
Uszkodzenia	Uszkodzenia mechaniczne* – zaawansowane uszkodzen							
wtryskiwaczy	możliwe do wykrycia poprzez badanie ilości paliwa							
	z przepływu z wtryskiwaczy. Ilość paliwa z przepływu jest							
	ściśle określona przez producenta dla konkretnego czasu							
	i obrotów silnika zarówno podczas jego pracy czy też w							
	trakcie rozruchu. Objętość paliwa przekraczająca poza normy							
	podane przez producenta wskazuje na uszkodzenia							
	mechaniczne któregoś lub wszystkich wtryskiwaczy.							
	Usunięcie niesprawności polega na wymianie całego zestawu							
	wtryskiwaczy w silniku lub też pojedynczych wtryskiwaczy,							
	których przelew odbiega od podanej przez producenta normy.							
	Ze względu na występowanie bardzo wysokich ciśnień wymienia się każdorazowo przewody wysokiego ciśnienia,							
	które po zluzowaniu króćców nie mogą być ponownie							
	zamontowane.							

Tabela. 2. Zestawienie typowych niesprawności układu wysokiego ciśnienia paliwa [14] - cd.

\* Jedną z metod diagnostycznych zaproponowanych do wykrywania uszkodzeń mechanicznych jest tzw. "badanie zadymienia". Jest to metoda, którą opisano w [32] polegająca na sprawdzeniu stopnia zadymienia pochodzącego z układu wydechowego silnika poprzez podłączanie złącza wtryskiwaczy do wtryskiwacza zewnętrznego i tym samym wyłączaniu poszczególnych cylindrów z pracy. Poziom zadymienia silnika pracującego ze sprawnym układem Common Rail jest prawie niemierzalny. Jakikolwiek wzrost zadymienia, mierzony specjalistyczną aparaturą oznacza to, że występują zakłócenia w spalaniu. W przypadku, kiedy pozostale układy pracują prawidłowo i po podłączeniu zewnętrznego wtryskiwacza zadymienie zmaleje, można wnioskować, że niesprawny jest wtryskiwacz testowanego cylindra.

Niesprawność wtryskiwaczy paliwa w układzie C-R objawia się dość wyraźnie poprzez utrudniony proces rozruchu silnika. Należy w związku z tym przeanalizować czynniki warunkujące poprawną jego pracy i przeprowadzić diagnostykę samego układu wysokiego ciśnienia. Najważniejszymi czynnikami warunkującymi bezproblemowe uruchamianie silnika, które należy rozpatrzyć są [45]:

- 1. Dostateczna ilość powietrza dostarczanego do komory spalania czysty filtr powietrza, prawidłowo pracująca turbosprężarka, sprawny układ rozrządu itd.
- Odpowiednia wartość prędkości obrotowej wału korbowego sprawny akumulator rozruchowy, brak dodatkowych niż konstrukcyjne oporów ruchu układu tłokowo-korbowego, brak dodatkowych oporów ruchu po stronie

urządzenia napędzanego (przekładni, pompy hydraulicznej, śruby wału napędowego, prądnicy itd.).

- 3. Szczelność komory spalania.
- 4. Sprawny układ rozrządu
- 5. Prawidłowa wartość ciśnienia paliwa w każdym punkcie układu paliwa.
- 6. Prawidłowa wartość dawki wtryskiwanego paliwa oraz czasu trwania wtrysku.

Oprócz badań własnych autora opisanych w kolejnych rozdziałach, dokonano także analizy uszkodzeń układów wtryskowych pracujących w warunkach rzeczywistych, silników zaopatrzonych w system zasobnikowy [4, 6, 9, 11, 14, 19, 31, 32, 37].

W celu uzyskania informacji dotyczących niezawodności tych wtryskiwaczy, określono czas pracy do momentu ich uszkodzenia. Wykorzystano tu kilka pracujących w tzw. "terenie" silników, w których wystąpiło uszkodzenie oraz stanowisko laboratoryjne, które powstało w jednej z firm zajmujących się zarówno sprzedażą jak i szeroko rozumianym serwisem rozpatrywanych silników.

Opis obiektów badanych przez autora:

- <u>Silnik</u>, na którym dokonywano badań weryfikacyjnych wtryskiwaczy, był fabrycznie nowy i testowany laboratoryjnie, przez co wykluczono występowanie istotnych nieprawidłowości zarówno samego układu paliwowego, jak też innych jego układów funkcjonalnych.
- <u>Badane wtryskiwacze</u> pochodziły z silników, które w okresie 2÷3 letniej eksploatacji osiągnęły maksymalny poziom około 3000 godzin pracy.

W przypadku zgłoszenia awarii i ustaleniu, że uszkodzeniu uległ układ wtryskowy, badano dodatkowo paliwo, w akredytowanym laboratorium. Skład paliwa był analizowany głównie pod kątem zanieczyszczeń stałych i płynnych. Na podstawie tych danych zweryfikowano także, kiedy nastąpił moment uszkodzenia silnika w stosunku do przepracowanych godzin. Wyniki analiz zaprezentowano na rysunku 6.

Czas do momentu uszkodzenia [h]



Rys. 6. Czas do momentu uszkodzenia układu wtryskowego w zależności od liczby godzin pracy silnika [opracowanie własne]

Na podstawie analizy literaturowej [30, 31, 32, 39-40, 45] popartej danymi zebranych w formie ankiet, wywiadów z firmami przeprowadzającymi remonty oraz z badań własnych stwierdzono, iż <u>stopień uszkodzenia wtryskiwaczy</u> nie jest zależny od czasu pracy, lecz od momentu wprowadzenia zanieczyszczonego paliwa do eksploatacji.

# 1.3. Przegląd metod stosowanych w diagnozowaniu wtryskiwaczy układów zasobnikowych

Jedną z metod diagnostycznych dotyczących uszkodzeń układów Common Rail zaproponowaną w literaturze [43] jest analiza zanieczyszczeń zawartych w paliwie. Polega ona na pobraniu próbek paliwa w sposób pośredni, za pomocą pompy próżniowej ze zbiornika paliwa lub metodą bezpośrednią poprzez pobranie paliwa z przewodu powrotnego. Metoda bezpośrednia jest bardziej preferowana ze względu na większą reprezentatywność próbki. Stosując urządzenie z zastosowaniem magnesów, odczynników usuwających zanieczyszczenia płynne oraz membran do oddzielenia cząstek stałych, odseparowano cząstki ferromagnetyczne pochodzące ze zużytych powierzchni. Kolejno przy pomocy mikroskopu badano wielkość, kształt oraz typ cząstek. Opisano cząstki charakterystyczne dla efektów zużycia pompy wysokiego ciśnienia, pompy niskiego ciśnienia, zanieczyszczenia pochodzenia mineralnego jak kurz czy też fragmentów materiału z przewodów układu paliwowego. Cząstki te, dla wyróżnionych podzespołów i źródeł pochodzenia, mają charakterystyczny kształt, rozmiar, rodzaj materiału, które w sposób jednoznaczny mogą wskazywać na proces zużycia danego elementu.

Metoda ta wydaje się jednak być trudną w zastosowaniu w przypadku serwisów silnikowych ze względu na konieczność posiadania urządzeń laboratoryjnych takich jak specjalistyczne mikroskopy i mikrosondy rentgenowskie czy urządzenia do preparowania próbek. Dodatkowym problemem może być też efekt zróżnicowania składników stopowych stosowanych przez różnych producentów układów wtryskowych.

Innym podejściem do diagnostyki układu zasobnikowego paliwa były badania przeprowadzone przez niemieckiego inżyniera H. Gunthera [31].

Na podstawie badań autorskich stwierdził on, że możliwym sposobem weryfikacji pracy wtryskiwaczy jest pomiar zadymienia spalin. Udowodnił, że pomiar zadymienia na sprawnym silniku z układem Common Rail jest praktycznie niemierzalny i wynosi od 0÷1% wartości zadymienia. Poprzez rozłączanie kolejno wtryskiwaczy i podłączenie dodatkowego wtryskiwacza, możliwym były badania zmiany stopnia zadymienia - zagadnienie to omówiono także w tabeli 2. Poziom zadymienia w kolejnych pomiarach wskazywał, przy którym wyłączonym cylindrze wartość zadymienia maleje, co sugerowało o niesprawności danego wtryskiwacza. Przy prawidłowym interpretowaniu uzyskanych w taki sposób wyników, konieczna była też weryfikacja stanu układu dolotowego powietrza, poprawności działania czujników, pomiaru luzów zaworowych itd. Wykorzystanie opisanej metody z pozostałych czynności diagnostycznych nie daje szybkiej i trafnej odpowiedzi, czy i który wtryskiwacz pracuje nieprawidłowo. Konieczne jest też posiadanie zazwyczaj kosztownego aparatu do pomiaru zadymienia, który w wielu wersjach ma gabaryty urządzenia warsztatowego i nie nadaje się do badania silników w warunkach polowych. Dodatkowo w silnikach, produkowanych według coraz bardziej zaostrzonych norm emisji spalin, w których stosuje się filtr cząstek stałych, pomiar stopnia zadymienia w przypadku niesprawności jednego z wtryskiwaczy może być zupełnie nieefektywny.

Ten sam autor [32] przedstawia również sposoby diagnozowania wtryskiwaczy pod względem ich nieszczelności pomiędzy iglicą rozpylacza a gniazdem, które to może się objawiać "twardą" pracą podczas procesu spalania oraz niebieskim zadymieniem spalin. Występuje tu dodatkowo problem z uruchomieniem silnika, gdyż pompa wysokiego ciśnienia nie jest w stanie wytworzyć odpowiedniego ciśnienia paliwa w zasobniku, ze względu na nadmierny wyciek z wtryskiwacza. Z praktycznego punktu widzenia, dokonuje się kolejnych odłączeń poszczególnych wtryskiwaczy od zasobnika paliwa i zaślepianie króćca wylotowego. W momencie wytypowania uszkodzonego wtryskiwacza i tym samym spowodowanie zaprzestania wycieku, pompa wysokiego ciśnienia jest w stanie wygenerować prawidłowe ciśnienie i silnik powinien dać się uruchomić. Dalsze czynności polegają na demontażu wtryskiwacza i sprawdzeniu go na stanowisku probierczym. Jest to metoda czysto praktyczna, lecz nie zawsze zalecana przez producentów silników ze względu na niebezpieczeństwo, które wiąże się z manipulacja przy zasobniku paliwa. Producenci zabraniają zazwyczaj swobodnego demontażu przewodów wtryskowych a jeśli taki przypadek nastąpi, nakazują każdorazowo na ich wymianę. Stąd też badanie wtryskiwacza poprzez "zaślepianie" króćców zasobnika powinno być stosowane tylko wtedy, jeżeli przewiduje to instrukcja obsługi danego silnika. Dodatkowym utrudnieniem w zastosowaniu tej metody jest fakt, że często demontaż choćby jednego wtryskiwacza powoduje znaczną ingerencję w maszynę czy sam silnik i czas potrzebny na samą diagnostykę jest taki sam, jak potrzebny na wymianę wtryskiwaczy.

Powszechnie stosowaną metodą diagnostyczną wtryskiwaczy układów Common Rail jest pomiar wydatku przelewu. Metoda ta jest w wielu przypadkach jedyną możliwą metodą diagnostyki poprawności pracy wtryskiwaczy w warunkach warsztatowych czy polowych. Analizując instrukcje serwisowe producentów silników przemysłowych oraz poradników serwisowych [32] można stwierdzić, iż nadmierny wypływ paliwa z otworu przelewowego wtryskiwacza pojawia się najczęściej w przypadku nieszczelności zaworu wylotowego komory sterującej i jest to jedna z najczęściej występujących niesprawności wtryskiwaczy. Opis pomiaru przelewu z pojedynczych wtryskiwaczy (lub zbiorczo ze wszystkich) przedstawiany jest w większości instrukcji serwisowych silników, ale także w wielu pozycjach literaturowych [31-32, 50-51]. Niestety wykrycie nadmiernego przelewu z wtryskiwacza oznacza, że przelew jest na tyle duży, że nieszczelność komory sterującej znacznie przekracza dopuszczalne stany graniczne.

W [36] podjęto próbę oceny sprawności działania układu wtryskowego poprzez analizę sygnałów pochodzących ze znajdującego się w zasobniku czujnika ciśnienia paliwa. W taki właśnie sposób, dokonuje się np. próby wykrycia niesprawności układu paliwowego silnika Renault G9T-720. Przeprowadzono również badania weryfikacyjne elementów układu wtryskowego na stole probierczym celem stworzenia programu diagnostycznego, który zarówno na bazie szybkiej transformaty Fouriera (FFT) i dolnoprzepustowej filtracji, a także krótkoczasowej transformaty Fouriera (STFT) byłby w stanie wykrywać niesprawności wtryskiwaczy w trakcie rzeczywistej pracy na silniku. Parametrem odniesienia był sygnał z czujnika ciśnienia w zasobniku paliwa, z którego sygnał elektryczny poprzez dodatkowe złącze był przesyłany do modułu połączonego z komputerem i oprogramowaniem LabVIEW 7.1. Oprogramowanie pozwalało na analizę sygnałów z czujnika ciśnienia, które miało zmienną wartość ze względu na sterowanie prędkością silnika, ale również z powodu uszkodzenia wtryskiwaczy. Ustalono, że zmiany ciśnienia paliwa w zasobniku, w przypadku pracy układu z zatarta iglica wtryskiwacza pozwalają (na bazie wytworzonego oprogramowania) na ustalenie przyczyny niesprawności układu wtryskowego. Stwierdzono także, że program z zastosowaniem "FFT" pozwala na wykrycie niesprawności pompy wysokiego ciśnienia, zaś użycie "STFT" umożliwia ustalenie braku wtrysku paliwa. Wydaje się jednak, iż metodą tą nie można oszacować stanu uszkodzenia wtryskiwaczy ani też wytypować, który z nich konkretnie jest uszkodzony.

Analizując opisane w literaturze możliwe sposoby diagnozowania wtryskiwaczy układu zasobnikowego można sprecyzować następujące wnioski:

- Szczegółowe określenie stanu wtryskiwaczy zasobnikowego układu wtryskowego możliwe jest do przeprowadzenia metodami laboratoryjnymi na stole probierczym;
- Możliwym jest zastosowanie badań pośrednich poprzez kontrolę stopnia zanieczyszczenia paliwa w obiegu układu zasobnikowego albo też pomiar zadymienia spalin – są to jednak metody trudne do wykorzystania w praktyce i nie stosowane w warunkach polowych;
- Jedyną praktycznie stosowaną metodą badania stanu technicznego wtryskiwaczy, pomijając usterki elektryczne, jest metoda pomiaru przelewu z wtryskiwaczy. Nie jest to jednak metoda dokładna, gdyż pozwala na wykrycie niesprawności wtryskiwacza już w znacznym stanie jego zaawansowania – nadmierny przelew. Zarówno urządzenia testowe różnych producentów jak i procedury naprawcze producentów silników zazwyczaj nie podają dokładnych wartości z przelewu, a wskazują na różnice w wartościach zgromadzonego

paliwa pochodzącego z przelewu wtryskiwaczy. Stąd w przypadku zakłócenia w pracy wszystkich wtryskiwaczy w układzie np. zwiększony przelew, symptom ten może być błędnie zinterpretowany;

- Ze względu na istniejące bardzo wysokie ciśnienia paliwa w układzie wtryskowym, producenci silników z układami zasobnikowymi, zabraniają ponownego stosowania przewodów wysokiego ciśnienia i innych elementów układu wtryskowego po ich demontażu lub chociażby poluzowaniu;
- Brak jest metod diagnostycznych, które nie wymagałyby ingerencji w układ wtryskowy.

Na bazie wieloletniego doświadczenia praktycznego autora rozprawy w zakresie diagnostyki, napraw i eksploatacji silników przemysłowych oraz przytoczonych w niniejszym rozdziale badań literaturowych można stwierdzić, iż koniecznym jest opracowanie nowej, bezinwazyjnej metody diagnostycznej wtryskiwaczy układu zasobnikowego, możliwej do zastosowania w warunkach polowych. Tendencje rozwojowe diagnostyki silników spalinowych od wielu lat są ukierunkowane na zastosowanie bezdemontażowych metod badań stanu technicznego silników [52]. Przytoczone w rozdziale 1.4 wyniki badań literaturowych wskazują, że diagnostyka wibroakustyczna, a w szczególności Emisja Akustyczna, może być praktycznie użyteczna dla opracowania nowej metody diagnostycznej.

#### 1.4. Wykorzystanie Emisji Akustycznej w diagnozowaniu silników spalinowych

Już od wielu lat w przemyśle wykorzystuje się zjawisko Emisji Akustycznej do diagnozowania stanu obiektów czy urządzeń inżynieryjnych [7, 61-62]. Emisja akustyczna (EA) zgodnie z definicją [53], to termin stosowany na określenie "chwilowych fal sprężystych wywołanych przez wyzwolenie energii wewnętrznej w materiale, lub bezpośrednio przez proces".

W Polsce od wielu lat ośrodkiem, który zajmuje się wykorzystaniem Emisji Akustycznej w przemyśle i badaniach naukowych jest Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk [59-64], natomiast praktycznym zastosowaniem w diagnozowaniu maszyn (w szczególności okrętowych) – Wydział Mechaniczny Akademii Morskiej w Szczecinie [8-14, 64-65]. Emisja Akustyczna jest tzw. metodą pasywną niegenerującą dodatkowej energii w badanym obiekcie ani niezakłócającą jego pracy, przez co staje się bezinwazyjną. Źródłem Emisji Akustycznej w materiałach stałych są procesy, które wytwarzają i propagują fale sprężyste w materiale. Fale te rozchodząc się we wszystkich kierunkach w objętości materiału, w którym powstały. Są odbierane przez czujnik EA i przesyłane do analizatora Emisji Akustycznej w postaci zmian sygnału napięciowego. Analizator wzmacnia napięcie elektryczne oraz filtruje niepożądane sygnały pochodzące z innych źródeł tła wibroakustycznego. Wyniki zapisywane są przez urządzenie rejestrujące w postaci pliku cyfrowego co schematycznie przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat funkcjonalny systemu diagnostycznego z wykorzystaniem Emisji Akustycznej [63]

Sposób technicznego stosowania EA ujęto w normie ISO 22096, w której zaproponowano zastosowanie sygnału EA do diagnostyki wyszczególnionych urządzeń, co przedstawiono w tabeli 3 [34].

	Typ uszkodzenia						
Typ maszyny	Uszkodzenie łożysk	Tarcie uszczelnie- nia mechani- cznego	Zużycie	Zanieczy- szczenia środka smarującego i utrata smarowania	Niewspół- osiowość	Błędy monta- żowe	Monitoring procesów np. wycieki, spadek osiągów
Pompy	X	X	X	X	X	X	X
Przekładnie zębate	X		X	X	X	X	x
Silnik elektryczny	X			X	X	X	
Turbina parowa	X	х		X	х	х	X
Turbina gazowa przemysłowa	X	X		X	X	X	X
Prądnica elektryczna	X			X		X	
Silnik spalinowy			x				x
Maszyny procesowe	X		X	X			
Wentylatory i dmuchawy	X			Х	x		x
Maszyny wolnoobrotowe (≤ 60 obr/min)	X			X	x	x	х
Podzespoły maszyn np. zawory, wymienniki ciepła itd.			x	X		x	x
Sprężarki (powietrzne, gazowe itd.)	X	X	x	X	x	X	X

#### Tabela 3. Przykłady zastosowania EA do diagnostyki urządzeń wg normy ISO 22096 [34]

X- duże prawdopodobieństwo wykrywania niesprawności

x- mniejsze prawdopodobieństwo wykrycia niesprawności

Norma podaje jedynie propozycję możliwości diagnostycznych, nie podaje natomiast konkretnych rozwiązań i analiz.

Źródłami Emisji Akustycznej w materiałach są: [57, 61]

- ruch defektów sieci krystalicznej (ruch dyslokacji, wakansów, atomów wtrąconych), a także przejścia cząstek i atomów pomiędzy stanami energetycznymi (zjawisko foto-akustyczne);
- formowanie mikropęknięć i pęknięć oraz ich rozprzestrzenianie się oraz powstające rysy;
- przepływ burzliwy w cieczach;
- lokalne ruchy ośrodka powodujące tarcie wewnętrzne;

- przejścia fazowe i reakcje chemiczne związane z lokalnymi zmianami faz;
- niektóre procesy biologiczne;
- procesy korozyjne;
- ulatnianie się gazu i cieczy przez nieszczelności.

Sygnał Emisji Akustycznej może mieć postać:

- impulsową czyli możliwą do rozdzielenia w czasie,
- ciągłą czyli niemożliwą do rozdzielenia w czasie,
- mieszaną.

Na rys. 8 przedstawiono rzeczywisty obraz sygnału EA zmierzony w trakcie badania dwóch wtryskiwaczy: uszkodzony (a) – emisja ciągła i nieuszkodzony (b) – emisja impulsowa.



Rys. 8. Obraz sygnału źródłowego Emisji Akustycznej a) ciągłej - dla wtryskiwacza uszkodzonego, b) impulsowej - dla wtyskiwacza nieuszkodzonego [45]

Zgodnie z normą [53] w sygnale EA można wyodrębnić tak zwane "zdarzenia EA". Na rys. 9 zaprezentowano sygnał EA zarejestrowany podczas pracy sprawnego wtryskiwacza. Przykład ten ukazuje charakterystyczne parametry wyróżniane przy charakteryzowaniu zdarzenia Emisji Akustycznej, to jest: początek zdarzenia EA, czas jego trwania, czas narastania oraz próg wykrywalności.



Rys. 9. Parametry zdarzenia Emisji Akustycznej [45, 53]

Parametry sygnału EA opisane w normie [53] mają następujące definicje:

- Próg wykrywalności Emisji Akustycznej poziom napięcia, który ma być przekroczony, aby sygnał Emisji Akustycznej został wykryty i mógł być poddany obróbce. Może być on nastawialny, stały lub zależeć od chwilowej wartości sygnału;
- Czas trwania sygnału impulsowego przedział między pierwszym i ostatnim przekroczeniem progu wykrywalności przez sygnał impulsowy;
- Liczba przekroczeń krotność sygnału impulsowego przecinająca próg wykrywalności;
- Początek zdarzenia EA bezwzględny czas, w którym impuls przekracza po raz pierwszy próg wykrywalności;
- Czas narastania sygnału impulsowego przedział czasu między pierwszym przekroczeniem progu a maksymalną amplitudą szczytową sygnału impulsowego.
W tabeli 4 przedstawiono najczęściej stosowane deskryptory Emisji Akustycznej stosowane w technice. Przez serię pomiarów EA rozumie się kilka pomiarów EA wykonanych na tym samym obiekcie lub serii obiektów.

Nazwa deskryptora	Dodatkowe wyjaśnienia						
POCHODNE ZMIAN W CZASIE							
Suma przekroczeń	Uzyskuje się przez zliczanie obszarów dla których amplituda przekracza próg wykrywalności						
Suma zdarzeń całego pomiaru	Suma wszystkich zdarzeń Emisji Akustycznej zarejestrowanych w serii pomiarowej						
Średnia liczba zdarzeń w jednej serii pomiarowej	Suma zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarów podzielona przez liczbę w serii pomiarów $N_{\acute{s}r} = \frac{\Sigma N_{zd}}{n_{ii}}$						
Liczba przejść przez wybrany poziom amplitud	Liczba przekroczeń 10%, 20%, 50% amplitudy maksymalnej						
POCHODNE PRZEBIEGÓW CZASOWYCH							
Amplituda szczytowa U <sub>m</sub>	Maksymalna amplituda w czasie trwania sygnału impulsowego						
Średnia wartość amplitudy w jednej serii pomiarowej	Suma amplitud szczytowych wszystkich zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarów podzielona przez liczbę zdarzeń $U_{\acute{sr}} = \frac{\Sigma U_m}{N_{zd}}$						
Powierzchnia nad wartością średnią	Suma iloczynów kolejnych próbek wartości sygnału i przedziałów próbkowania.						
Okres półtrwania	Czas trwania sygnału do osiągnięcia połowy amplitudy						
POCHODNE ENERGII							
Wartość skuteczna napięcia sygnału EA za przedział czasu T	$U_{\rm rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} U^2(t) dt}$						

Tabela. 4. Najczęściej stosowane deskryptory [59]

Nazwa deskryptora	Dodatkowe wyjaśnienia				
Współczynnik kształtu	Stosunek $U_m$ do $U_{\rm rms}$				
Energia zdarzenia EA	Połowa iloczynu amplitudy szczytowej i czasu trwania zdarzenia podzielona przez wartość impedancji sensora $E_{zd} = \frac{1}{2} U_m^2 \Delta t/Z$				
Średnia energia zdarzeń EA w jednej serii pomiarowej	Suma energii $E_{zd}$ wszystkich zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę $N_{zd}$ zdarzeń $E_{\acute{s}r} = \frac{\Sigma E_{zd}}{N_{zd}}$				
POCHODNE ROZKŁADU CZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO					
Mediana rozkładu widmowego	Granica podziału rozkładu na części o równej mocy				
Współczynnik kształtu prążków widmowych	Stosunek prążka maksymalnego do średniej wartości prążka				
Liczba przekroczeń wybranego poziomu przez prążki widma	Liczba przekroczeń 10%, 20%, 50% wartości prążka maksymalnego				

Tabela. 4. Najczęściej stosowane deskryptory [59] - cd.

W krajowej i światowej literaturze można znaleźć prace, które prezentują badania silników spalinowych metodami wibroakustycznymi. Często cytowani za swój wkład w tej dziedzinie są autorzy publikacji [38, 44, 71]

W pracy [38] zaproponowano i opisano metodę badania stanu technicznego silnika benzynowego, czterocylindrowego małej mocy za pomocą sygnału drganiowego niskiej częstotliwości rejestrowanego na korpusie silnika. Wyniki prezentowano opisując zarejestrowaną charakterystykę widmową sygnału w funkcji czasu i kąta obrotu wału korbowego. Badano silnik w sprawnym stanie technicznym oraz w stanie z nieprawidłowym luzem zaworowym i nieprawidłową szczeliną w świecy zapłonowej. Fale sprężyste generowane w silniku rejestrowano za pośrednictwem aluminiowego adaptera przyłożonego na powierzchni głowicy poprzez akcelerometr firmy Bruel & Kjaer, czujnik położenia tłoka w Górnym Martwym Punkcie (GMP). Zastosowano oprzyrządowanie elektroniczne firmy National i oprogramowania LabVIEW. Badanie przeprowadzono przy prędkości obrotowej 1500 obr/min dokonując pomiarów sygnału i porównując uzyskany obraz drgań silnika w stanach pełnej sprawności jak i zasymulowanych uszkodzeń. Autorzy pracy wykazali, że w przypadku zmniejszenia luzu na zaworze dolotowym sygnał wibroakustyczny w odpowiednim momencie dla pracy zaworu jest znacznie słabszy w porównaniu z rejestrowanym na silniku z prawidłowym luzem. W przypadku zaś zmniejszonego luzu zaworu wydechowego jest on przesunięty w fazie względem GMP. Uszkodzenia symulowane na świecy zapłonowej realizowano poprzez ponad dwukrotne zwiększenie szczeliny między elektrodą i katodą i wówczas obserwowano słabszy sygnał w momencie powstawania iskry zapłonowej. Wykazano, że analizując zarejestrowane parametry sygnału wibroakustycznego drgań można bezinwazyjnie śledzić ogólny stan techniczny silnika.

Wykorzystanie sygnałów wibroakustycznych w badaniu luzów zaworowych zostały też przedstawione w pozycjach [4, 19].

Niektóre metody analizy sygnału akustycznego dają pozytywne wyniki w testach laboratoryjnych, ale ich zastosowanie w warunkach przemysłowych jest utrudnione. Niemniej warto podkreślić uzyskane wyniki choćby na przykładzie pozycji [1-2, 7-8, 12, 29, 48-49] odnoszącej się do diagnostyki układu wtryskowego silnika z zapłonem samoczynnym.

W pracy [1] autorzy badali sygnały akustyczne rejestrowane w trakcie pracy wtryskiwacza w silniku o zapłonie samoczynnym z mechanicznym sterowaniem wtryskiem paliwa. Do badań wykorzystano wtryskiwacze pracujące w silniku Ford FSD 425, czterocylindrowym, czterosuwowym z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Sygnały akustyczne mierzono w odległości 25 cm od wtryskiwacza mikrofonem firmy B&K model MK224. Następnie sygnały te były nagrywane podczas pracy silnika przy różnych ustawionych wartościach ciśnienia wtrysku od 25 do 21 MPa zmieniane co 1 MPa. Analizując dane autorzy zastosowali adaptacyjny układ filtracyjny sygnału oraz analizę czasowo-częstotliwościową zwaną transformatą Wignera-Ville'go. Ustalono, że energia w zakresie 7-15 kHz odzwierciedla zmiany zachodzące w pracy wtryskiwaczy przy różnych ciśnieniach wtrysku.

Kontynuacją opisanych powyżej badań była praca [2]. Podjęto w niej próbę badania sygnału akustycznego emitowanego przez silnik w celu diagnostyki układu wtryskowego silnika. Obiektem badań był silnik Ford FSD 425, czterocylindrowy, czterosuwowy, wysokoprężny z bezpośrednim wtryskiem paliwa do cylindra. Zamocowano trzy mikrofony w odległości około 25 mm i w jednej płaszczyźnie co 120°. Następnie badano, przy różnych prędkościach i obciążeniach sygnał akustyczny pochodzący ze sprawnego i niesprawnego wtryskiwacza. Kolejnym, najbardziej istotnym etapem w tej pracy, była analiza matematyczna otrzymanego sygnału. Przeprowadzono eliminację sygnałów pochodzących z innych elementów silnika jak praca zaworów, układu przeniesienia napędu, pracy kół zębatych i innych. Zdaniem autorów w sygnale wtryskiwacza można wyróżnić składowe pochodzące od otwarcia i zamknięcia iglicy, które w obrazie sygnału objawia się krótkim kliknięciem. W celu dekompozycji sygnału zastosowano niezależną analizę składowych tzw. Independent Component Analysis (ICA). Wyodrębniono charakterystykę procesu wtrysku paliwa w postaci amplitudy w funkcji częstotliwości stosując transformatę Wigner-Ville'go (WVD).

Zaproponowany schemat filtracji sygnału doprowadził autorów do wniosków, że część sygnału akustycznego niegenerowana w układzie wtryskowym może być wyeliminowana w funkcji kąta obrotu wału i częstotliwości. Dominującym sygnałem w funkcji częstotliwości w silniku wysokoprężnym są sygnały z procesu spalania oraz ich składowych harmonicznych. Stosując transformatę WVD można zdefiniować częstotliwość procesu spalania w cylindrach w zakresach poniżej 5 kHz jednak nie ma możliwości wykrycia sygnałów akustycznych z takich procesów jak wtrysk paliwa czy praca zaworów rozrządu. Uzyskany model analizy sygnału może być jednak skuteczny do wykrywania niewielkich zmian w ustawieniach momentu zadziałania wtryskiwaczy, co z kolei ma wpływ na niestabilność procesu spalania, który przesuwa się w czasie, co jest widoczne w obrazie sygnału.

Sygnały akustyczne, których pomiar dokonuje się mikrofonem nie mają zastosowania w praktyce, gdyż w komorze silnika oprócz napędu głównego są także odbiorniki mocy w postaci np. pomp hydraulicznych, mechanizmów pomocniczych jak elektrozaworów, sprężarki itd., które także emitują sygnały akustyczne.

Kolejna praca obejmująca już zastosowanie Emisji Akustycznej w diagnozowaniu silnika z zapłonem samoczynnym to [67].

Przedstawiono w niej źródła Emisji Akustycznej w badaniu stanu tulei cylindrowej w silniku dużej mocy (10 MW). Przeprowadzono szereg badań w celu identyfikacji miejsca generowania oraz parametrów sygnału Emisji Akustycznej w funkcji zmian geometrycznych tulei. Ustalono optymalne usytuowanie położenia czujnika w badaniu powierzchni dla rejestracji sygnału. Sygnał Emisji Akustycznej rejestrowany na tulei cylindrowej ma złożoną postać ze względu na skomplikowany

układ źródeł sygnału pochodzącego ze ścian tulei. Efektem przeprowadzonych badań była identyfikacja zdarzeń oraz okresu występowania Emisji Akustycznej wyodrębnionej z sygnałów pochodzących z pracy par tłok/pierścienie i tuleja cylindrowa. Stwierdzono również, że za pomocą dwóch czujników nie można zlokalizować źródła EA w przestrzeni trójwymiarowej. Niemniej biorąc pod uwagę takie czynniki jak propagacja sygnału po najkrótszej drodze fali a także czas trwania zarejestrowanego sygnału i jego tłumienie, sygnał EA może stanowić wartościowe źródło informacji diagnostycznej. Identyfikacja źródła EA może być przeprowadzona bez wcześniejszej znajomości pozycji GMP tłoka, gdyż uzyskiwane wartości z badania wyraźnie wskazują na jego położenie poprzez charakter propagacji fali w funkcji czasu i tłumienia. W wielu typach silników kształt tulei powoduje, że źródła sygnału rozchodzą się obwodowo i instalując w tych miejscach czujniki można obserwować procesy zachodzące na powierzchniach tych tulei.

Bardziej szczegółowe wyniki, opisujące zależności pomiędzy sygnałem Emisji Akustycznej i jego interpretacją a uszkodzeniem wtryskiwaczy układu wtryskowego z mechaniczną regulacją wtrysku zaprezentowano w pracy [26].

Cytowane opracowanie koncentruje się na badaniach metody identyfikacji uszkodzeń wtryskiwaczy w silniku czterocylindrowym, czterosuwowym turbodoładowanym z mechanicznym sterowaniem wtrysku paliwa firmy JCB 444T2 za pomocą Emisji Akustycznej (AE). Zbadano tam Emisję Akustyczną sprawnego wtryskiwacza, a następnie zasymulowano stan uszkodzenia poprzez ustawienie wartości ciśnienia wtrysku o 15% poniżej wartości nominalnej oraz 20% powyżej wartości nominalnej. Testy przeprowadzono przy prędkości 1000 obr/min pod obciążeniami 0 Nm, 50 Nm, 100 Nm oraz 150 Nm. Wyniki zaprezentowano na wykresach kata korbowego, częstotliwościowych i częstotliwościowo-czasowej. obrotu wału Eksperyment wykazał, że stosując analizę sygnału AE istnieje możliwość detekcji uszkodzeń wtryskiwaczy silnika z zapłonem samoczynnym. Istotne znaczenie ma wybór metody tej analizy. Analiza w dziedzinie kąta obrotu wału identyfikuje niewielkie uszkodzenia wtryskiwaczy pracujące na silniku bez obciążenia. Analiza w dziedzinie częstotliwości może wskazać różnice w sygnałach z wtryskiwaczy zarówno pracujących na silniku bez jak i pod obciążeniem natomiast nie jest możliwa identyfikacja źródła i typu uszkodzenia wtryskiwacza. Przedstawiona na wykresie częstotliwościowo-czasowym wskazuje na sygnały pochodzące zarówno na zmiany uszkodzeń wtryskiwaczy oraz na inne procesy, zachodzące w cylindrze np. otwarcie

zaworu dolotowego. Zdaniem autorów pracy [7, 9, 12, 26] ten typ analizy sygnału Emisji Akustycznej jest najbardziej przydatny do weryfikacji pracy wtryskiwaczy.

Kolejnym eksperymentem przeprowadzanym na omawianym silniku było badanie sygnałów Emisji Akustycznej bez jego obciążenia.

W pracy [24] przedstawiono wyniki badań uszkodzeń wtryskiwaczy w silniku o zapłonie samoczynnym firmy JCB444T2, czterocylindrowym, czterosuwowym, z mechaniczną regulacją wtrysku paliwa. Za pomocą czujnika PAC WD2030 mocowanego na głowicy, wzmacniacza wstępnego PAC 2/4/5 i przetwornika PAC PCI 2 mierzono sygnały Emisji Akustycznej dla trzech różnych uszkodzeń wtryskiwaczy: zwiększone ciśnienie wtrysku o 5,5 MPa, zmniejszone ciśnienie wtrysku o 3,5 MPa oraz brak wtrysku. Każdy z sygnałów zawierał 40 000 próbek zebranych w okresie jednego cyklu pracy, czyli dwóch obrotów wału korbowego. Silnik podczas badań pracował z prędkością obrotową 1000 obr/min bez obciążenia. Wyniki zaprezentowano dla trzech różnych domen: w dziedzinie kąta obrotu wału, częstotliwościowej oraz częstotliwościowo-kątowej. Zdaniem autorów pracy [24] na wykresie kątowym różnice w funkcji energii EA wskazują na to, że pod wpływem większego ciśnienia wtrysku mniej paliwa zostaje wtryśniętego do cylindra i mniej energii powstaje w wyniku spalania, więc sygnał EA jest słabszy niż sprawnego wtryskiwacza. W przypadku zmniejszenia ciśnienia wtrysku większa dawka paliwa zostaje wtryśnięta do komory spalania i powstaje silniejszy sygnał EA w porównaniu ze sprawnym wtryskiwaczem. Jeżeli natomiast jest brak wtrysku wówczas nie zaobserwowano sygnału EA pochodzącego z komory spalania na wykresie. Prezentując wyniki na spektogramie, autorzy zastosowali szybką transformatę Fouriera. Na wykresie tym widoczna jest różnica parametru sygnału EA wtryskiwacza uszkodzonego i sprawnego, ale nie można zaobserwować zmian spowodowanych różnymi typami uszkodzeń. Najbardziej obiecujące wyniki widoczne są na wykresie częstotliwościowo-kątowym. Analiza ta najczęściej jest stosowania w badaniu obiektów stacjonarnych niemniej, jak zasugerowali autorzy stosując Szybką Transformatę Fouriera można analizować także procesy zmienno-czasowe. Sygnały EA mierzone do wartości około 200 kHz wyraźnie wskazują na różnice w zależności od rodzaju niesprawności wtryskiwacza. Większe wartości energii sygnału w zakresie 100 kHz do 140 kHz są obecne w momencie podania większej dawki paliwa, czyli przy zmniejszonej wartości ciśnienia wtrysku. Natomiast w przypadku braku wtrysku nie obserwuje się składowych sygnału w zakresie 150 kHz do 200 kHz.

W badaniach autora rozprawy, które zostały przeprowadzone na najnowszym typie silnika przemysłowego, nie obserwowano niesprawności polegających na braku wtrysku z poszczególnych wtryskiwaczy czy też różnym ciśnieniom wtrysku w różnych cylindrach. Jak zauważyli autorzy omawianych prac [24, 26, 76], tego typu niesprawności mogą wstępować w klasycznych układach wtryskowych.

W [76] opisano proces analizy sygnału Emisji Akustycznej podczas badania zjawisk występujących w silniku o zapłonie samoczynnym. Mierzono jednocześnie sygnał czterema czujnikami zamocowanymi na bloku silnika o mocy 47 kW, czterocylindrowego, czterosuwowego. Pomiary wykonano przy stałej prędkości silnika 1700 obr/min mierząc jednocześnie sygnał z czterech cylindrów o długości 2 sekund, co stanowiło równowartość około 28 cyklów pracy. Sygnały EA były analizowane w paśmie częstotliwości 0,02÷0,4 MHz. Wyselekcjonowano składowe sygnału pochodzące z otwarcia i zamknięcia zaworów dolotowych i wydechowych oraz z wtrysku paliwa i procesu spalania mieszanki w cylindrze. Amplituda sygnału pochodząca z pracy zaworów była większa niż pozostałe. Ze względu na nakładanie się sygnałów EA z poszczególnych cylindrów na siebie dokonano analizy źródła emisji poprzez zastosowanie zaawansowanych algorytmów obróbki sygnału. Stwierdzono jednocześnie, że nie jest możliwym zupełne odseparowanie sygnałów z poszczególnych cylindrów. Niemniej można wytypować charakterystyczne sygnały dla poszczególnych procesów w każdym z cylindrów na poziomie 0,1÷0,4 MHz. Zaproponowano tam zatem zastosowanie pewnych procedur separacji składowych sygnału jednak skalowanie wartości sygnału źródłowego wynikające ze zjawiska tłumienia na drodze źródłoczujnik stanowi wciąż problem. Nie podjęto także badań dotyczących szczegółowej analizy sygnału pochodzącego z wtryskiwaczy a jedynie obecność sygnału EA w trakcie wtrysku paliwa do cylindra.

Zastosowanie Emisji Akustycznej w silniku o zapłonie samoczynnym do regulacji układu rozrządu opisano w opracowaniu [25].

Zaprezentowano tam wyniki pomiarów luzów zaworowych za pomocą Emisji Akustycznej silnika o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa marki Ford FSD 425, czterocylindrowego, czterosuwowego. Zmieniano luz zaworowy w zakresie co 0,1 mm. Przy użyciu czujnika PAC WD2030 i D9241A, które były zamontowano z przodu i z tyłu głowicy rejestrowano sygnał źródłowy. Czujnik, który był bliżej cylindra, w którym zmieniano luz zaworowy rejestrował sygnał EA o większej energii. Analizy sygnału dokonano w funkcji kąta obrotu wału korbowego oraz w funkcji częstotliwości w zakresie 22÷38 kHz. Oszacowano, że obraz w funkcji kąta daje wyraźne zmiany dla zmienionego luzu na zaworze wydechowym. Stwierdzono również, że stany przejściowe EA generowane są głównie w procesie spalania w poszczególnych cylindrach oraz że nieprawidłowości w ustawieniu luzu zaworu wydechowego są główną przyczyną zaburzeń tego procesu spalania, co uwidacznia się właśnie w sygnale EA. Przy pomiarach na głowicy silnika źródłami sygnału EA są: zdarzenia pochodzące z zaworów tj. procesu otwarcia i zamknięcia, ale również uderzenia mechaniczne, przepływ gazów przez powierzchnie zaworów. Stwierdzono także, że dominującymi zdarzeniami EA w głowicy silnika są procesy związane z pracą wtryskiwacza i wtrysku paliwa.

W [28] przedstawiono wyniki badań ciśnienia sprężania silników o zapłonie samoczynnym metodą pośrednią za pomocą Emisji Akustycznej. Pomiarów dokonano na dwóch silnikach: czterosuwowym, czterocylindrowym, 75 kW silniku Perkins oraz dwusuwowym, czterocylindrowym, 7350 kW silniku MAN-B&W. Pomiar źródłowego sygnału EA z czujnika umieszczonego w bloku silnika przy jednym z cylindrów został przedstawiony w dziedzinie czasu oraz sygnału RMS EA w dziedzinie częstotliwościowej z zastosowaniem analizy "complex cepstrum" stosowanej do diagnostyki maszyn z ruchem postępowo-zwrotnym. Stwierdzono tam, że sygnał źródłowy EA nie obrazuje dobrze procesu sprężania w cylindrze. Określono natomiast, że energia składowych sygnału EA pochodzącego od procesu spalania jest skorelowana z wartością ciśnienia w komorze silnika. Analiza sygnału metodą complex cepstrum wskazuje, że bardziej przydatnym jest widmo parametru RMS Emisji Akustycznej niż energia zawarta w tym sygnale. Umożliwia ono bowiem wykrycie procesów o niskiej energii jak proces sprężania. Analiza sygnału EA tą metodą pozwala na dokładne określenie procesów zachodzących w cylindrze bez względu na wielkość silnika, jego typ czy też wartość zadanego obciążenia.

Zastosowanie Emisji Akustycznej w silniku może być przydatne także do wykrywania stanu oleju smarującego, co udowodniono w pozycji [27]

Opisano tam [27] zależność pomiędzy sygnałem Emisji Akustycznej z czujnika, zamontowanego w okolicach GMP trzeciego cylindra silnika wysokoprężnego a rodzajem oleju, którym był smarowany silnik. Porównania dokonano stosując oleje SAE 10W-30, 15W-40 oraz 20W-50 spełniające normy jakości wg API (American Petroleum Institute) CG-4. Silnik pracował w dwóch zakresach prędkości obrotowej oraz w czterech zakresach obciążenia dla każdej z prędkości. Po każdej wymianie oleju badano sygnały w tych samych warunkach pracy. Obrazując sygnał z czujnika na wykresie amplitudowo-kątowym wykryto, że w przypadku niższej jakości oleju wartość energii EA rośnie, co uwidacznia się w zakresie 10÷50 kHz.

Zastosowanie Emisji Akustycznej do badania sygnałów z układu wtryskowego w zależności od rodzaju paliwa było tematem pracy [3].

Badano w niej wpływ prędkości narastania ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym na emisję akustyczną wtryskiwacza przy zasilaniu paliwem mineralnym i roślinnym. Eksperyment wykonano na silniku Perkins model AD3.152 z mechanicznym wtryskiem paliwa. Wykazano, że uśrednione ze 100 pomiarów maksymalne wartości prędkości narastania ciśnienia w przewodzie wtryskowym są o 6,4% do 8% wyższe dla paliw mineralnych. Wiąże się to jednocześnie z różnicą uśrednionych wartości amplitud sygnału Emisji Akustycznej. Wartości te są około 14% do 24% mniejsze dla paliwa mineralnego, co z kolei uwidacznia się mniejszym hałasem wtryskiwacza pracującego na tym paliwie. Do badań EA wykorzystano analizator i oprogramowanie zaprojektowane i wykonane w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk (IPPT PAN).

Ten sam system pomiarowy został wykorzystany do badania wtryskiwaczy klasycznego układu wtryskowego [9, 60].

W [60] przedstawiono możliwość diagnozowania klasycznego układu wtryskowego silnika okrętowego średniej mocy za pomocą Emisji Akustycznej. Analizator sygnału składał się z modułu analogowego, który zawierał wzmacniacz szerokopasmowy dopasowany do impedancji czujnika piezoelektrycznego oraz z filtra środkowoprzepustowego. Dalej sygnał przesyłany był do przetwornika analogowocyfrowego o rozdzielczości 10 bitów i częstotliwości próbkowania 50 kHz. Kolejnym elementem był cyfrowy moduł obróbki sygnału EA bazujący na mikrokontrolerze ATMEL AT91SAM7S256 oraz wyświetlacz znaków alfanumerycznych. Urządzenie to umożliwia pomiar parametrów EA w warunkach polowych na pracującym silniku, co nieodzowne jest w przypadku silników stacjonarnych lub silników o dużych gabarytach. Obiektem opisanym w badaniu był silnik wysokoprężnych o mocy 147 kW. Badanie przeprowadzono przy prędkości 700 obr/min. Badano sygnał EA z dwóch punktów: króćca tłocznego pompy wtryskowej oraz śruby łączącej przewód wtryskowy z wtryskiwaczem. Wyniki przedstawiono na spektogramach w układzie czasowoczęstotliwościowym, natomiast dekompozycji sygnału dokonano przy zastosowaniu algorytmu okienkowej transformaty Fouriera. Obrazy z dwóch punktów pomiarowych

wskazały odmienną dynamikę, której różnice pokazano na wykresie funkcji czasowej gęstości widmowej sygnału. W tej postaci, zależnie od wyboru pasma częstotliwości, można obserwować sygnały z różnych źródeł. Przykładowo w pomiarze na króćcu pompy wtryskowej przy częstotliwości 9 kHz widoczne są sygnały z zaworu odciążającego w pompie wtryskowej zaś w częstotliwości 19 kHz nie widać już było sygnałów z tego źródła. Podobnie jest w obrazie gęstości widmowej sygnału pochodzącego z króćca na wtryskiwaczu – tutaj także przedstawiono sygnały pochodzące z różnych elementów układu wtryskowego np. otwierania i zamykanie iglicy wtryskiwacza. W pracy [60] stwierdzono, że zarejestrowane sygnały z układu wtryskowego silnika poddane obróbce i filtracji (w przedziale 6 kHz do 20 kHz) mogą indykować procesy zachodzące w tym układzie i tym samym bezinwazyjnie wykrywać stany awaryjne w trakcie eksploatacji silnika. Badania te wnoszą istotny wkład w rozwój i ukierunkowanie metody diagnostycznej z zastosowaniem Emisji Akustycznej, jednak badany przez autorów klasyczny układ wtryskowy znacznie różni się od zasobnikowego układu wtryskowego silników spalinowych najnowszej generacji jakim zajmowano się w niniejszej pracy.

Aparatura omówiona w [6, 12, 59-62, 64] została zastosowana do badań silników spalinowych małej mocy stosowanych w samochodach osobowych. Podobne badania przeprowadzone z zastosowaniem również takiej aparatury opisano w pracy [50-51].

Autor monografii [50] omawiając urządzenia firmy Bosch opisuje metody diagnozowania układu Common Rail w silniku wymienia również metodę pomiaru sygnału Emisji Akustycznej. Z opisu wynika, że czujnik pomiarowy był montowany za pośrednictwem magnesu na króćcu przewodu wysokiego ciśnienia na wtryskiwaczu tak, by nie stykał się z innymi elementami silnika. W dyskusji na temat uzyskanych wyników można stwierdzić, że im bliżej czujnik jest montowany wtryskiwacza, tym mniejsze obserwuje się rozrzuty parametrów. Sygnał emisji rejestrowany był w częstotliwości w zakresie 1 kHz do 30 kHz. W układzie pomiarowym we wzmacniaczu sygnału zastosowano filtr, eliminujący niskie częstotliwości pochodzące od pracy zaworów rozrządu, układu tłokowo-korbowego, efektów rezonansowych. Kolejnym elementem układu pomiarowego było oprogramowanie z filtrem zdarzeń, które oprócz obróbki zarejestrowanego widma wyznaczało deskryptor jakości w postaci liczbowej. Diagnostyka uszkodzeń układu wtryskowego polegała na rejestracji sygnału EA z każdego wtryskiwacza. Następnie przy pomocy programu komputerowego wyznaczano całkowitą moc zarejestrowanego sygnału a także udział wybranych składowych prezentowanych w postaci deskryptora jakości. Wzrost tego deskryptora świadczył o rozwoju uszkodzeń wtryskiwacza bądź silnika. Do interpretacji wyników zastosowano wykresy widma emisji impulsowej w postaci akustogramów oraz zależność czasową U=f(t) wyznaczoną dla wybranej częstotliwości. Przedstawiając widmo wartości skutecznej EA danego wtryskiwacza opisano ilość występujących wtrysków paliwa. Ustalono również pewną wartość szczególną  $\Delta t_c$ , która może powstawać w wyniku odbicia fali ciśnienia po chwili zamknięcia rozpylacza. Czas wysterowania elektrycznego wtryskiwacza i czas rzeczywistego przepływu paliwa jest różny ze względu na dynamiczne procesy zachodzące we wtryskiwaczu. Autor [50] powołując się na dokumentację Bosch, w układzie Common Rail, w którym maksymalne ciśnienie wtrysku wynosiło 135 MPa, czas przemieszczenia iglicy rozpylacza w kierunku zamknięcia wynosi 0,250 ms zaś czas wypływu paliwa wynosi 0,700 ms. Zdaniem autora, akustogram EA zawiera znacznie więcej informacji diagnostycznych niż widmo tego sygnału wyznaczone w chwili działania wtryskiwacza. Ponadto, sygnał EA zawiera składowe powstałe w trakcie działania układu m.in. wtryskowego, sterowania czy układu tłokowo-korbowego. Wpływ na wartość tego sygnału mogą mieć np. uszkodzenia mechaniczne poszczególnych podzespołów i będą one rejestrowane w obrazie widma akustycznego. Autor ustalił też wartości częstotliwości na podstawie badania układu Common Rail CP1 firmy Bosch, że istnienie składowych w zakresie 1 kHz do 22 kHz wskazuje na poprawne działanie układu wtryskowego. Jeżeli pojawia się dodatkowe pasmo w przedziale 22 kHz do 30 kHz jest to obraz uszkodzonego wtryskiwacza. Ustalono również, że w warunkach serwisowych przedstawiona metoda badania składowych widma jest najbardziej efektywna w praktyce.

Opisane badania podejmują temat zastosowania Emisji Akustycznej do diagnostyki zasobnikowego układu wtryskowego, lecz pod kątem ogólnym, bez szczegółowego podziału na charakter i poziom uszkodzenia czy też pracy wtryskiwacza w konkretnym silniku.

Z zastosowaniem Emisji Akustycznej dokonano także próby oceny stanu węzła tribologicznego, jakim jest para precyzyjna iglica-gniazdo we wtryskiwaczu klasycznego układu wtryskowego oraz opisano w pracach Z. Raunmiagi [64-65].

Badano tam stan zużycia pary precyzyjnej iglica-gniazdo wtryskiwacza. Do tego celu wykorzystano specjalnie skonstruowane stanowisko pomiarowe, w skład którego

wchodził czujnik sygnału Emisji Akustycznej. Za pomocą wyskalowanego obciążnika generowano falę sprężystą, która propagowała się przez styk iglica-gniazdo. Stopień zużycia tego styku wpływał na jego własności transmisyjne dla propagującej się fali sprężystej. Wytypowano trzy miary sygnału EA, które były wrażliwe na zmiany stanu powierzchni elementów węzła tribologicznego a mianowicie średnią ilość zdarzeń, energię zdarzeń oraz wartość amplitudy sygnału. Stwierdzono też, że w zależności od progu wykrywalności wspomniane powyżej deskryptory wykazują mniejsze lub większe różnice pomiędzy rozpylaczami nowymi i zużytymi. Udowodniono także, że klasyfikatorem sygnału, dającym jednoznacznie ocenę jakości rozpylaczy jest średnia energia zdarzeń dla najniższego progu wykrywalności tj. 50 mV.

Jeden z zaproponowanych, możliwych sposobów przedstawiania i interpretowania sygnałów Emisji Akustycznej pochodzącej z badania urządzeń i podzespołów m.in. silników spalinowych opisano w pracy [75].

Zaprezentowano tam metodę wizualizacji sygnałów pochodzacych z Emisji Akustycznej oraz sygnałów wibroakustycznych za pomocą metody dot patterns czyli szablonów kropkowych. Obraz przedstawia tam sygnał kształtu fali w postaci kropkowej, tworząc symetryczne obrazy przypominające płatki śniegu. Dla różnych stanów i rodzajów sygnałów powstają różnego rodzaju obrazy. Forma przedstawiania sygnału w ten sposób jest o tyle przydatna, że w niektórych urządzeniach dodano (np. maszyny wolnoobrotowe czy silniki spalinowe) nakładające się sygnały z innych podzespołów tworzą tło i nie ma możliwości (lub jest znacznie utrudniona) interpretacja sygnału w dziedzinie czasu lub częstotliwości. Przedstawione tam badania przeprowadzono na trzech obiektach: na silniku spalinowym, gdzie zasymulowano pięć uszkodzeń, na wentylatorze chłodnicy, również z zasymulowanymi pięcioma uszkodzeniami oraz na wale napędowym z trzema uszkodzeniami. Pomiarów dokonywano przy różnych prędkościach rozpoczynając od stanu bezawaryjnego. Następnie symulowano uszkodzenia i tworzono kolejno obrazy szablonów kropkowych, które stanowiły bazę dla programu komputerowego, tworząc mapę obrazów dla różnych uszkodzeń i prędkości.

Pomiary Emisji Akustycznej do detekcji typowych uszkodzeń są stosowane także w silnikach benzynowych (iskrowych). Podjęto próby zaadoptowania czujnika AE jako alternatywnego czujnika spalania stukowego służącego do wykrycia uszkodzeń w systemie sygnału sterującego zapłonem [35].

Autorzy opisali sposób badania za pomocą EA silnika benzynowego samochodu marki KIA, w którym odcinano zapłon w poszczególnych cylindrach wytwarzając stan niesprawności. Następnie rejestrowano sygnał EA i poddawano go obróbce celem porównania z wynikami uzyskanymi przy pomiarze EA w sprawnym silniku. Do tego celu wykorzystano analizę obrazu sygnału w dziedzinie czasowej i czasowoczęstotliwościowej. Następnie analizowano segmenty sygnału EA by wyznaczyć w nich kilka deskryptorów: energię, RMS, asymetrię, kurtozę, amplitudę szczytową, powierzchnię pod wykresem, liczbę przekroczeń, liczbę maksimów i minimów. Porównując uzyskane wartości autorzy uzyskali ponad 70% poprawnych wyników w diagnozowaniu niesprawności braku zapłonu z powodu odcięcia zasilania do świecy zapłonowej.

W pracy [49] opisano badania związane z lokalizacją i klasyfikacją źródeł Emisji Akustycznej zmierzone w głowicy silnika o zapłonie samoczynnym. Obiektem badawczym był czterocylindrowy, czterosuwowy silnik Perkins o mocy 74 kW, w którym przy pomocy trzech czujników w dziewięciu różnych pozycjach mierzono wartość sygnału Emisji Akustycznej. Badania przeprowadzano przy prędkości 800 i 1200 obr/min oraz dodatkowo bez i z obciążeniem równym 30 Nm. Wykonano dwa zestawy badań, w których pierwsze miały na celu ustalenie źródła sygnału, odległości oraz zjawisk tłumiących w okolicach wtryskiwaczy, górnej części zaworów dolotowych oraz pokrywy sprężyny zaworów wydechowych. Zastosowano w tym przypadku, jako sygnał symulacyjny standardowe źródło Hsu-Nielsen'a. Drugi zestaw badań przeprowadzony był na pracującym silniku, w których to mierzono sygnały pochodzące z elementów usytuowanych w głowicy. Dominującymi sygnałami była emisja emitowana z wtryskiwaczy i zaworów wydechowych mierzona w zakresie 0,1 do 1 MHz. Wyznaczano energię EA by następnie określić współczynnik tłumienia dla różnych źródeł. Wartości współczynnika tłumienia wydarzeń EA były wyższe, gdy pochodziły z wtryskiwaczy zaś niższe, o około 20-30%, gdy pochodziły z zaworów wydechowych. W obrazie EA wtryskiwaczy widoczne były sygnały pochodzące z procesów otwarcia iglicy, zamknięcia iglicy oraz wzrostu wartości ciśnienia paliwa przed momentem wtrysku. W obrazie sygnału z zaworu wydechowego można było wyróżnić składowe pochodzące od: procesu otwarcia, mechanicznych uderzeń oraz przepływających gazów spalinowych.

Wyniki badań są dosyć obiecujące jednak opisują zjawiska zachodzące w klasycznym układzie wtryskowym, który jak wspomniano już wcześniej, jest zupełnie odmienny co do zasady działania od układu zasobnikowego.

Badanie zużycia tulei cylindrowej silnika Doosan za pomocą sygnału Emisji Akustycznej przedstawiono w [37]. Silnik pod ustalonym obciążeniem, pracował przez 30 minut. Za pośrednictwem czujnika Emisji Akustycznej mocowanego na zewnętrznej stronie cylindra, rejestrowano sygnał EA. Przy założeniu, że proces wybuchu mieszanki rozpoczyna się w punkcie 0° kąta obrotu wału ustalono, że w zakresie 40° do 120° OWK jest "region czystego zużywania się tulei". W tym właśnie zakresie poddano obróbce sygnał EA poprzez m.in. filtry środkowoprzepustowe. W ten sposób wygenerowano wektor wyników służący do klasyfikacji źródeł sygnału. Obliczono i porównano następujące miary Emisji Akustycznej: energia, amplituda, amplituda FFT, ilość zdarzeń. Największe różnice w widmie częstotliwościowym sygnału w zależności od obciążenia silnika były widoczne w zakresie częstotliwościowym 100 do 350 kHz. Uzyskane parametry diagnostyczne zaimplementowano w oprogramowaniu sterownika silnika, dzięki czemu parametr diagnostyczny zużycia tulei mógł być prezentowany w czasie rzeczywistym.

Możliwości diagnozowania silników z zasobnikowym i klasycznym układem wtryskowym paliwa za pomocą Emisji Akustycznej zostały także przedstawione w [40].

Autorzy badali dwa silniki, jeden o pojemności 5,9 dm<sup>3</sup> z bezpośrednim wtryskiem paliwa firmy Cummins, drugi zaś o pojemności 2,216 dm<sup>3</sup> z wtryskiem do komory wstępnej firmy Perkins. Pierwszy z nich posiadał wtryskiwacze z rozpylaczem wielootworowym i układ wtryskowy Common Rail drugi zaś, rozpylacz czopikowy i tradycyjny układ wtryskowy z pompą rzędową. Autorzy podali, jakie problemy eksploatacyjne powstają w tego typu wtryskiwaczach a następnie przedstawili odpowiednie deskryptory sygnału EA w zależności od typu uszkodzenia. Silnik z rozpylaczem wielootworkowym testowano przy prędkości 1500 i 2000 obr/min przy pełnym i w połowie obciążenia. Silnik z rozpylaczem czopikowym badano przy prędkości 1500 obr/min i w zakresach obciążeń 0, 5, 10 i 15 kW. Do opracowywania wyników wykorzystano oprogramowanie LabVIEW oraz tor pomiarowy składający się z czujnika PAC MICRO-30D, przedwzmacniacza PAC 2/4/6 oraz wzmacniacza PAC AE5A do konwersji sygnału RMS. Sygnał przetwarzany był przez filtr dolnoprzepustowy. Czujniki mocowano na głowicy blisko wtryskiwaczy. We wtryskiwaczu z rozpylaczem wielootworkowym symulowano zaburzenia procesu

wtrysku poprzez zniszczenie końcówki szczotką drucianą a następnie sprawdzenie na stole probierczym wartości ciśnienia wtrysku paliwa, które było niższe o 20%, 80% i 100% od nominalnych wartości. Wartość sygnału EA malała w przypadku zwiększenia uszkodzenia tzn. zmniejszania się dawki paliwa. Dekompozycja sygnału wskazała, że charakterystyka widmowa sygnału z wtryskiwacza uszkodzonego i pracującego poprawnie jest zbliżona aczkolwiek pojawiają się pewne dysproporcje, które na tym etapie nie były omawiane przez autorów sugerując, że badanie wymaga dalszych analiz. W przypadku testów z rozpylaczem czopikowym zasymulowano trzy typy uszkodzeń, jednakże na podstawie sygnałów AE autorzy nie byli w stanie wytypować rodzaju uszkodzenia końcówki wtryskiwacza. Niemniej, zaobserwowano zmiany w amplitudzie sygnału, co może sugerować zmiany w procesie spalania i tym samym różnice sygnałów pochodzących od zdarzeń mechanicznych, występujących podczas spalania w poszczególnych cylindrach. Autorzy stwierdzają, że metodyka analizy sygnału EA pochodzącego z wyżej wymienionych obiektów wymaga dalszego doskonalenia.

Należy też podkreślić, iż symulacja uszkodzeń poprzez zniszczenie rozpylacza jest, zdaniem autora rozprawy, mało wiarygodną niesprawnością. Nie obserwuje się bowiem uszkodzeń końcówek rozpylaczy układu zasobnikowego poprzez zatykanie się otworków choćby ze względu na występujące wysokie ciśnienia wtrysku. Bardziej prawdopodobne niesprawności to rozkalibrowanie otworka, jednakże nieprawidłowe działanie wtryskiwacza z powodu uszkodzenia rozpylacza stanowi marginalny problem, który na przykład w badanych przez autorach rozprawy silnikach, nigdy nie wystąpił.

Znacznie precyzyjniejsze badania w tym zakresie już w latach dziewięćdziesiątych XX wieku dokonał A. Bejger, który w swojej rozprawie doktorskiej dowiódł zależność zmiany w sygnale Emisji Akustycznej od stanu wtryskiwacza tradycyjnego układu wtryskowego [5].

Badania przeprowadzono na modelu składającym się z głowicy i fragmentu bloku cylindrowego oraz pompy wtryskowej, która była napędzana i sterowana za pomocą silnika elektrycznego. Testowano rozpylacze wtryskiwaczy jedno-, dwui trzyotworowe o różnych średnicach otworków. Poprzez przepływ cieczy przez otworki i symulowanie różnych stanów ciśnienia generowano sygnał Emisji Akustycznej, który zapisywano poprzez czujnik i układ pomiarowy składający się z analizatora EA100. Analizator ten jest wcześniejszą wersją systemu stosowanego w badaniach przedstawionych w niniejszej pracy. Na podstawie badań modelowych a następnie badań przeprowadzonych na pracującym silniku z zamontowanym uszkodzonym wtryskiwaczem autor wysnuł wniosek, że wartość skuteczna sygnału EA maleje wraz ze wzrostem ilości otworków w rozpylaczu. Także powiększenie średnicy otworków powoduje zmniejszenie wartości skutecznej i ilość zliczeń sygnału EA. Zaobserwowano także, że im większa wartość przeciwciśnienia w komorze cylindrowej tym bardziej jednorodne i powtarzalne są wyznaczone miary sygnału Emisji Akustycznej. Efektywnym deskryptorem okazał się przebieg czasowy wartości skutecznej (RMS), gdyż można było na jego podstawie odczytać kąt oraz czas trwania wtrysku a także powtarzalność generowanej dawki paliwa w kolejnych cyklach pracy.

### 2. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

Analizując rozwiązania konstrukcyjne wtryskiwaczy zasobnikowego układu wtryskowego wykazać można, że w silnikach przemysłowych stosowane są najczęściej wtryskiwacze elektromagnetyczne. Na podstawie własnych, wieloletnich doświadczeń, odbytych szkoleń i kursów o tematyce Common Rail oraz dostępnej literaturze naukowej i specjalistycznej, przeanalizowano najczęściej występujące niesprawności tych wtryskiwaczy. Autor rozprawy, bedac odpowiedzialnym za realizacje napraw gwarancyjnych i pogwarancyjnych silników przemysłowych kilku europejskich producentów, prowadzac szkolenia dedykowane dla serwisów silnikowych oraz mając możliwość zaznajomienia się ze sposobami realizacji napraw układów wtryskowych silników najnowszej generacji stwierdził, że dotychczasowe metody indykacji, wykonywane na pracującym silniku, są mało precyzyjne, mało wiarygodne i nieekonomiczne. Wysokie koszty, które należy ponieść z tytułu nieprzewidzianych awarii skłaniają do poszukiwania nowych rozwiązań w dziedzinie diagnostyki wtryskiwaczy z zasobnikowym systemem paliwowym. Na podstawie studiów literaturowych, wstępnej wiedzy korelacyjnej pomiędzy procesem uszkodzenia zachodzącym w silniku o zapłonie samoczynnym a parametrami sygnału Emisji Akustycznej sformułowano następującą tezę pracy:

# Istnieje sygnał źródłowy Emisji Akustycznej odzwierciedlający fazowość procesów zachodzących w pracujących wtryskiwaczach układu zasobnikowego (Common Rail) i jest on ściśle związany z ich stanem technicznym.

Celem rozprawy jest podjęcie próby udowodnienia założonej tezy poprzez określenie relacji pomiędzy sygnałem Emisji Akustycznej a fazami pracy wtryskiwacza. Stan sprawności jest ściśle związany z długością czasu trwania poszczególnych faz związanych z pracą wtryskiwacza i procesem wtrysku paliwa. W dalszej części pracy dokonano próby udowodnienia wpływu wybranych uszkodzeń na zmianę sygnału Emisji Akustycznej. Celami cząstkowymi są również:

- Opracowanie algorytmu identyfikacji parametrów sygnału Emisji Akustycznej skorelowanych czasowo z fazami procesu wtrysku paliwa;
- Opis procesu wtrysku ukierunkowany na pracę istotnych z punktu widzenia diagnostyki elementów układu wtryskowego;

- Określenie związków diagnostycznych pomiędzy stanem wtryskiwacza a sygnałem Emisji Akustycznej,
- 4) Badanie relacji pomiędzy zbiorem parametrów związanych z procesem wtrysku a parametrami wyjściowymi w postaci sygnału Emisji Akustycznej określającymi dwustanowy (w sensie niezawodnościowym) stan wtryskiwaczy: sprawny/niesprawny

Zakres pracy obejmuje:

- Przeprowadzenie badań eksperymentalnych, na zbudowanym według własnej koncepcji stanowisku laboratoryjnym, którego podstawowym obiektem pomiarowym był fabrycznie nowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym z elektronicznie sterowanym zasobnikowym układem wtryskowym paliwa typu Common Rail.
- 2. Sklasyfikowanie badanych wtryskiwaczy ze względu na ich stan techniczny:
  - a. sprawne technicznie;
  - b. niesprawne.
- Zaprojektowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego do rejestracji sygnału Emisji Akustycznej generowanego w układzie rozpylacza w warunkach laboratoryjnych.
- 4. Wzorcowanie toru pomiarowego Emisji Akustycznej.
- 5. Wykonanie pomiarów wstępnych mających na celu określenie powtarzalności uzyskiwanych wyników badań.
- Opracowanie kryterium oceny jakości wtryskiwaczy oraz ich stanów granicznych – zdatny (dla rozpylaczy nowych) lub niezdatny (dla rozpylaczy niesprawnych).
- 7. Wykonanie badań doświadczalnych dla obu grup wtryskiwaczy.
- 8. Poszukiwanie zależności pomiędzy zmianą sygnału EA odzwierciedlającego poszczególne fazy wtrysku a stanem uszkodzenia wtryskiwacza.

## 3. ZAKRES PRAC POPRZEDZAJĄCYCH BADANIA EKSPERYMENTALNE

Opisane w literaturze próby diagnozowania zasobnikowych układów wtryskowych, pozwoliły określić zakres zadań i prac związanych z przeprowadzeniem eksperymentu badawczego. W większości przypadków, nie ma jednoznacznego przyporządkowania pomiędzy symptomem a stanem. Rozwiązanie problemu postawionego w tezie pracy powinno przyczynić się do umożliwienia nie tylko ilościowej, ale również jakościowej oceny stanu aparatury wtryskowej układów zasobnikowych.

W kolejnych rozdziałach, autor dokona próby wykazania, że istnieje możliwość zastosowania sygnałów Emisji Akustycznej do precyzyjnego odzwierciedlenia zjawisk związanych z procesami zachodzącymi w układzie wtryskowym a tym samym, zakłóceniami związanymi z pracą konkretnych elementów samego wtryskiwacza.

#### 3.1. Przedmiot badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono na fabrycznie nowym silniku, który produkowany jest w zależności od przeznaczenia w wersji przemysłowej lądowej i morskiej, jako jednostka cztero- i sześciocylindrowa. W tym przypadku, wykorzystano dwa silniki w wersji przemysłowej, jeden będący jednostką czterocylindrową (rys. 10), drugi – sześciocylindrową (rys. 11). Podstawowe ich parametry przedstawiono w tabeli 5.

Silnik o zapłonie samoczynnym, rzędowy, czterosuwowy,								
certyfikowany wg norm EU 97/68/EC Stage 3A								
Liczba cylindrów	sześć	cztery						
Średnica cylindra	Ø105 mm	Ø105 mm						
Skok tłoka	127 mm	127 mm						
Pojemność silnika	$6600 \text{ cm}^3$	$4400 \text{ cm}^3$						
Maksymalna moc przy 2200 obr/min	129,5 kW	102 kW						
Maksymalny moment obrotowy przy 1400 obr/min	695 Nm	536 Nm						
Stopień sprężania	16,2:1	16,2:1						
Układ chłodzenia	cieczą							
Układ zasilania powietrzem	turbodoładowany z chłodzeniem końcowym powietrza doładowującego							

Tabela. 5. Podstawowe parametry silnika

Do podstawowych elementów zasobnikowego układu zasilania paliwem (Common Rail) zastosowanych silników zaliczyć można:

 pompę zasilającą napędzaną mechanicznie z pompy wysokiego ciśnienia – ciśnienie paliwa ok. 0,3 MPa;

- pompę wysokiego ciśnienia firmy Caterpillar model Cat HPCR Pump o takich istotnych parametrach jak:

- zasilanie paliwem przy prędkości obrotowej nominalnej ok. 91 mm<sup>3</sup>/skok dla sześciocylindrowego i 109 mm<sup>3</sup>/skok dla czterocylindrowego;
- zasilanie paliwem przy prędkości dla maksymalnego momentu obrotowego ok.
  109 mm<sup>3</sup>/skok dla sześciocylindrowego i 122,8 mm<sup>3</sup>/skok dla czterocylindrowego;
- średnica wewnętrzna przewodów wysokiego ciśnienia do wtryskiwaczy Ø 3 mm;
- długość przewodów wysokiego ciśnienia do wtryskiwaczy 1040 ± 4 mm;
- maksymalne ciśnienie w układzie  $18 \pm 0.5$  MPa;

- przegrodę filtracyjną filtra końcowego paliwa o wielkości filtra paliwa końcowego 2 μm;
- szczelność przegrody filtracyjnej filtra paliwa wstępnego 20 μm i 250 ml objętości na wodę;
- regulator prędkości obrotowej firmy Caterpillar, elektroniczny.

- wtryskiwacze elektromagnetyczne;



Rys. 10. Widok stanowiska laboratoryjnego silnika PERKINS 1104D-E44TA zastosowanego do badań eksperymentalnych

Na rysunku 11 przedstawiono silnik w wersji sześciocylindrowej.



Rys. 11. Stanowisko badawcze sześciocylindrowego silnika PERKINS zastosowanego do wstępnej weryfikacji wtryskiwaczy

#### 3.2. Pomiar przelewu paliwa z komory sterującej wtryskiwaczy

Przed przystąpieniem do badań, zgromadzono ponad 30 wtryskiwaczy (rys. 12) pochodzących Z eksploatacji, które na podstawie ogólnych symptomów diagnostycznych, zakwalifikowano jako niesprawne. Stosowana procedura związana ze strategią obsługiwania urządzeń oraz zaleceniami producenta silnika wymagała, aby wtryskiwacze wymieniać zbiorczo. Niedopuszczalna jest wymiana jednego (przypuszczalnie nieprawidłowo pracującego) wtryskiwacza. Producent nie przewiduje bowiem możliwości zbadania, który z elementów rozpatrywanego układu działa niepoprawnie. Procedura taka obowiązuje w rozwiązaniach także innych producentów silników, w których jedynym możliwym sposobem pomiaru wartości przelewu paliwa z komory sterującej wtryskiwacza jest pomiar zbiorczy przelewu ze wszystkich wtryskiwaczy [17, 45].



Rys. 12. Wtryskiwacze pochodzące z niesprawnych silników przeznaczone do weryfikacji wstępnej

Zgodnie z dokumentacją techniczną producenta silnika, **metoda weryfikacji** uszkodzenia mechanicznego wtryskiwaczy polega na badaniu zbiorczego przelewu paliwa z komór sterujących wszystkich wtryskiwaczy. W przypadku, gdy jest możliwość uruchomienia i pracy silnika, badanie przeprowadza się dokonując pomiaru przelewu paliwa w czasie 3 minut i przy prędkości obrotowej silnika 1000 obr/min na biegu jałowym. Zmierzona pojemność paliwa nie powinna przekroczyć wartości 480 cm<sup>3</sup> dla silnika czterocylindrowego i 720 cm<sup>3</sup> dla silnika sześciocylindrowego. Wynika więc z tego, że określona maksymalna dawka przelewu z jednego wtryskiwacza nie powinna wynosić więcej niż 120 cm<sup>3</sup> podczas pomiaru. Oczywiście w przypadku, gdy tylko jeden wtryskiwacz znacznie przekracza przyjęte wartości graniczne przelewu paliwa, może to spowodować, że sumaryczny wynik przekracza maksymalną objętość podaną przez producenta. Przypadek taki powoduje, że nieznana jest wartość nieszczelności pozostałych wtryskiwaczy a tym samym ich stan techniczny, który niekoniecznie musi odbiegać od prawidłowości.

Pierwszy etap badań obejmował weryfikację przelewów paliwa z komory sterującej poszczególnych wtryskiwaczy. W tym celu zaprojektowano i wykonano adapter (rys. 13), który pozwolił na pomiar przelewu paliwa z komory sterującej wtryskiwacza. Badany wtryskiwacz zasilany był paliwem z przewodu wysokiego ciśnienia jednego z cylindrów silnika. Sygnał elektryczny do sterowania pracą wtryskiwacza również pochodził z tego samego układu, co pozwoliło na "normalne funkcjonowanie" wtryskiwacza podczas pracy silnika.



Rys. 13. Adapter do wstępnej weryfikacji wtryskiwaczy

Adapter składał się z dwóch skręcanych ze sobą części, oddzielonych od siebie uszczelnieniem typu: O-ring. Na korpus wtryskiwacza nałożono górną część adaptera, gdzie znajdowała się komora połączona króćcem z odpływem paliwa pochodzącego z przelewu z komory sterującej. Wypływ paliwa z komory sterującej skierowano poprzez odpływ na zewnątrz przewodem, którym paliwo spływało do skalowanej menzurki. Dolna część adaptera była wkręcana na górną. Po odkręceniu dwóch części adaptera następowało uszczelnienie poprzez O-ring górnej komory. Dolna część adaptera posiadała specjalny gwint, na który nakręcano naczynie do gromadzenia paliwa wypływającego z rozpylacza, czyli paliwa wtryskiwanego w normalnych warunkach do komory spalania.

Wtryskiwacze zasobnikowego układu wtryskowego sterowane są elektronicznie. Jednak producenci aparatury paliwowej opracowali oprogramowanie, dzięki któremu można uwzględnić ustawienia korekcyjne dla każdego wtryskiwacza indywidualnie. Rozbieżności procesu wtrysku, czasu reakcji cewki itp. biorą się z niedoskonałości procesu produkcyjnego tych wtryskiwaczy. Dlatego też każdy wtryskiwacz posiada swój indywidualny numer fabryczny oraz oprogramowanie korekcyjne, które każdorazowo zapisuje się w elektronicznym module sterowania silnika w zależności, w którym cylindrze pracuje dany wtryskiwacz.

Korzystając z oprogramowania serwisowego, każdorazowo wprowadzano oprogramowanie korekcyjne dla poszczególnych badanych wtryskiwaczy. W ten sposób sterownik silnika prawidłowo odczytywał korekty wtrysku paliwa dla zamontowanego wtryskiwacza. Elektronicznie ustawiono wartość obrotów biegu jałowego silnika na 1000 obr/min i uruchamiano silnik na 3 minuty pracy, mierząc w tym czasie objętość paliwa pochodzącego z przelewu z komory sterującej. Jednocześnie mierzono objętość paliwa podczas trwania procesu do komory spalania. Ze względu na naukowy charakter pomiaru wprowadzono stabilizację termodynamicznych parametrów silnika w trakcie pomiaru. Ze względu na to, że jeden z cylindrów był wyłączony z pracy, sterownik silnika podnosił wartość ciśnienia wtrysku paliwa o około 5% w stosunku do warunków, w których pracują wszystkie cylindry. W ten sposób układ sterowania dąży do utrzymania prędkości obrotowej na żądanym poziomie (w tym przypadku 1000 obr/min) pomimo wyłączenia jednego z cylindrów.

W typowych warunkach pracy silnika, jako napędu głównego w maszynie, pracującego z prędkością obrotową biegu jałowego, jest on wstępnie obciążony o około 5-8% w stosunku do całego możliwego zakresu obciążenia silnika. Obciążenie silnika przy prędkości obrotowej biegu jałowego pochodzi z takich urządzeń jak alternator czy urządzenia peryferyjne podwieszane na silniku np. pompy hydrauliczne, dodatkowe sprężarki itp. Dlatego też porównując wartości ciśnienia paliwa w układzie wtryskowym silnika w trakcie badań weryfikacyjnych, przy wyłączonym z pracy jednym cylindrze a pracy w normalnych warunkach – dla prędkości biegu jałowego można przyjąć, że są one zbliżone. Na rysunku 14 zaprezentowano sposób pomiaru objętości paliwa gromadzonego z przelewu.



Rys. 14. Pomiar przelewu paliwa z wtryskiwaczy w trakcie weryfikacji wstępnej

Należy zaznaczyć, że w warunkach polowych nie ma możliwości przebudowania serwisowanego silnika w taki sposób, by sprawdzić przelew paliwa z poszczególnych wtryskiwaczy poprzez mocowanie dodatkowych akcesoriów jak opisany powyżej adapter. Wiąże się to z zabudową poszczególnych silników, zastosowaniem różnych odbiorników mocy, zagrożeniami wynikającymi z ciągłymi uruchomieniami silnika w maszynie, wyłączonej z eksploatacji z powodu niesprawności itp.

W trakcie weryfikacji wstępnej uzyskano następujące wyniki dla poprawnie pracujących wtryskiwaczy (grupa populacji była większa lub równa 12 sztuk, co jest zgodne z przyjętymi warunkami przedstawionymi w [11, 69-70]): objętość paliwa wtryśnięta do komory spalania około 20-25 cm<sup>3</sup>, objętość paliwa z przelewu z wtryskiwacza około 30 cm<sup>3</sup> – dla całej populacji wtryskiwaczy. Spośród wszystkich badanych wtryskiwaczy wytypowano również 12 z nich (o różnych wartościach przelewów paliwa). Do dalszej analizy, wprowadzono następujące oznaczenia:

- N1.....N12 - Nowe od 1 do 12 przy czym "nowe" oznacza pracujące poprawnie

#### - U1.....U12 – Uszkodzone od 1 do 12

Jak wspomniano wcześniej, ze względu na konieczność wprowadzania do modułu sterującego silnikiem indywidualnego oprogramowania korekcyjnego wtryskiwacza, każdy wtryskiwacz posiada nadany przez producenta swój niepowtarzalny numer seryjny. Na jego podstawie istnieje łatwa możliwość identyfikacji wtryskiwaczy. W tabeli 6 podano fragmenty numerów seryjnych i wyniki z pomiaru przelewów.

L.P.	Numer seryjny wtryskiwacza	Wartość przelewu na silniku w [cm <sup>3</sup> ] przy 1000 obr/3 min	Uwagi	L.P.	Numer seryjny wtryskiwacza	Wartość przelewu na silniku w [cm <sup>3</sup> ] przy 1000 obr/3 min	Uwagi
1	2Sxxxxx77B	26	N1	25	2Sxxxxxx81C	120	<b>U2</b>
2	2Sxxxxx6F5	23	N2	26	2Sxxxxxx32D	290	<b>U7</b>
3	2Sxxxxx1F5	34	N3	27	2Sxxxxx7A8	50	
4	2Sxxxxx403	21	N4	28	2Sxxxxxx9BD	200	<b>U5</b>
5	2Sxxxxxx511	26	N5	29	2Sxxxxx8D7	88	
6	2Sxxxxx71F	26	N6	30	2Sxxxxx3F3	64	
7	2Sxxxxx52F	30	N7	31	2Sxxxxxx2F4	97	
8	2Sxxxxx69A	27	N8	32	2Sxxxxxx0FA	1270	<b>U12</b>
9	2Sxxxxx77F	28	N9	33	2Sxxxxxx12B	1000	U11
10	2Sxxxxx088	33	N10	34	2Sxxxxx236	28	
11	2Sxxxxx79B	23	N11	35	2Sxxxxx707	70	
12	2Sxxxxx69D	24	N12	36	2Sxxxxxx6FC	20	
13	2Sxxxxx40A	67		37	2Sxxxxxx007	18	
14	2Sxxxxx929	30		38	2Sxxxxxx7D9	40	
15	2Sxxxxxx916	38		39	2Sxxxxx528	23	
16	2Sxxxxx527	620	<b>U8</b>	40	2Sxxxxxx067	20	
17	2Sxxxxx7E7	275	<b>U6</b>	41	2Sxxxxxx019	25	
18	2Sxxxxxx0A8	75		42	2Sxxxxxx269	650	<b>U10</b>
19	2Sxxxxx732	156	<b>U3</b>	43	2Sxxxxx241	77	
20	2Sxxxxxx059	156	<b>U4</b>	44	2Sxxxxx333	30	
21	2Sxxxxx5A6	640	<b>U9</b>	45	2Sxxxxx87C	45	
22	2Sxxxxxx1AF	40		46	2Sxxxxx751	178	
23	2Sxxxxx8AF	25		47	2Sxxxxx55F	38	
24	2Sxxxxx8B7	112	<b>U1</b>				

Tabela. 6. Wyniki badań objętości przelewu paliwa – kolor zielony oznacza fabrycznie nowe wtryskiwacze, kolor czerwony uszkodzone wytypowane do dalszej części badań

Autor rozprawy bedac serwisantem silników przeanalizował rodzaje niesprawności zgłaszane przez eksploatatorów od momentu ich wejścia na rynek. W tym czasie nie obserwowano awarii silników związanych z uszkodzeniem wtryskiwacza polegającym na nadmiernym wtrysku paliwa do komory spalania. Jedyne zgłaszane niesprawności polegały właśnie na wadliwej pracy wtryskiwacza poprzez nadmierny przelew z komory sterującej. Podobne dane na ten temat autor niniejszej rozprawy uzyskał dla innych typów (marek) silników przemysłowych z zasobnikowym układem wtryskowym, podczas szkoleń czy nieformalnych rozmów z osobami zajmującymi się naprawami oraz serwisem układów wtryskowych. Wyniki badań weryfikacyjnych potwierdziły regułę, że żaden z wtryskiwaczy nie wykazał nadmiernego wtrysku paliwa do komory spalania, a jedynie różnice w wartości przelewów paliwa z komory sterującej. Analiza wykazała, że wynika to z zastosowania zanieczyszczonego paliwa (lub stosowania paliw o niewłaściwych parametrach), na skutek czego osady odkładają się na bardzo precyzyjnych otworkach komory sterującej, w efekcie powodując nieszczelności tej komory. Na rysunku 15 zaprezentowano w formie graficznej objętości zgromadzonego z badanych wtryskiwaczy paliwa pochodzącego z przelewu.



Rys. 15. Wartości objętości paliwa pochodzącego z przelewu badanych wtryskiwaczy

Na rysunku 16 zaprezentowano wyniki z pomiaru objętości paliwa wtryśniętego z rozpylacza badanych wtryskiwaczy do komory spalania.



Rys. 16. Wartość objętości wtryskiwanego paliwa z rozpylacza poszczególnych wtryskiwaczy mierzona podczas badania weryfikacyjnego

Podczas badania przelewu z wtryskiwacza oraz objętości paliwa wtryskiwanego z rozpylacza zmierzono także, przy pomocy komputera diagnostycznego silnika, wartości ciśnienia w zasobniku paliwa. Z uzyskanych informacji wynikało, że zbyt duży wydatek paliwa, spowodowany nadmiernym przelewem z wtryskiwaczy jest do pewnego stopnia kompensowany poprzez podniesienie ciśnienia w zasobniku. Sygnał z czujnika ciśnienia w zasobniku przekazuje informację do elektronicznego modułu sterującego silnika, który porównując aktualne parametry z zadanymi tzw. mapami wtrysku, steruje zaworem regulacyjnym na pompie wysokiego ciśnienia. W przypadku wtryskiwaczy z najwyższymi przelewami badania pojawiły sie problemy z uruchomieniem silnika co oznacza, że wydatek paliwa jest zbyt wysoki i wtrysk paliwa do komory spalania może być zakłócony. Na rysunku 17 przedstawiono w formie graficznej uzyskane wartości ciśnienia paliwa w zasobniku podczas pracy badanych wtryskiwaczy.



Rys. 17. Wartość ciśnienia w zasobniku paliwa podczas pomiaru przelewu paliwa poszczególnych wtryskiwaczy

W najnowszych rozwiązaniach konstrukcyjnych silników Common-Rail, parametr ciśnienia paliwa w zasobniku nie może być jednak stosowany jako główny wyznacznik uszkodzenia wtryskiwaczy. Wiąże się to przede wszystkim z tym, iż poziom ciśnienia paliwa w zasobniku może być inny dla różnych obciążeń, nawet przy tej samej prędkości obrotowej i tym samym modelu silnika. Silnik może zasilać różne, na stałe podwieszone na silniku urządzenia peryferyjne o zróżnicowanym zapotrzebowaniu jednostkowym mocy tj. alternator, dodatkowe sprężarki, pompy hydrauliczne, opory głównego odbiornika mocy itd. Z tego względu, ciśnienie paliwa mierzone w zasobniku (przy prędkości biegu jałowego) jest uzależnione od wstępnego obciążenia silnika i nie może być stosowane jako istotny (podstawowy) parametr diagnostyczny.

#### **3.3. Badania wizualne wtryskiwaczy**

Badając uzyskane z eksploatacji wtryskiwacze, dokonano dodatkowo ich weryfikacji wizualnej. Na ich wewnętrznych elementach, zaobserwowano specyficzne zanieczyszczenia w miejscach, które miały bezpośredni kontakt z paliwem (rys. 18). Widoczne na rysunkach zanieczyszczenia stałe to głównie osady pochodzące z samych

części wtryskiwacza, które powstały w wyniku korozyjnego działania paliwa i odłożenia się różnych substancji (tlenków metali). Zastosowane filtry paliwa chronią układ paliwowy przed zanieczyszczeniami stałymi, jednak w przypadku obecności w paliwie płynnych parafin, kwasów czy innych substancji lotnych (lub innych niepożądanych), efektem są osady lub uszkodzenia prowadzące najczęściej do korozyjnego zużycia precyzyjnych elementów wtryskiwacza (rys. 18).



Rys. 18. Przykłady uszkodzeń elementów wtryskiwaczy: a) śruba montażowa, b) płytka rozdzielacza, c) płytka rozdzielacza w powiększeniu, d) płytka rozdzielacza – druga strona, e) podkładka sprężyny, f) cewka elektromagnesu, g) fragment cewki elektromagnesu w powiększeniu, h) sprężyna

#### 3.4. Badanie wtryskiwaczy na stole probierczym

W celu całkowitego wykluczenia błędnych interpretacji wyników eksperymentalnych, wytypowane wtryskiwacze przebadano również (przy zastosowaniu certyfikowanej aparatury), na stanowisku testowym firmy Hartridge IFT-70, przedstawionym na rys. 19.



Rys. 19. Stanowisko testowe do badania wtryskiwaczy C-R IFT-70 firmy Hartridge, 2013 [80]

Stanowisko testowe wyposażone było w następujące wybrane parametry pomiarowe, które wykorzystano do kolejnych analiz i badań:

- ciśnienie pracy od 0 do 70 MPa;
- wtrysk do przeźroczystej komory;
- pomiar wtrysku paliwa do 158 cm<sup>3</sup> z dokładnością 2 cm<sup>3</sup>;
- pomiar przelewu paliwa do 158 cm<sup>3</sup> z dokładnością 2 cm<sup>3</sup>;
- automatyczne opróżnianie paliwa;
- redukcja oparów paliwowych;
- adaptery do mocowaniu wtryskiwaczy różnych producentów;
- elastyczne przewody wtryskowe;

- myjka ultradźwiękowa do czyszczenia elementów badanych;
- sterownik urządzenia z możliwością określania m.in szerokości impulsu, ilości wtrysków, regulacji czasu trwania testu itd.

Przed przystąpieniem do badań, dokonano porównania wyników pomiaru dla fabrycznie nowych wtryskiwaczy odniesionych do wartości wzorcowych. Następnie, przeprowadzono pomiary dla wytypowanych niesprawnych wtryskiwaczy. Czas trwania każdego z testów wynosił 120 sekund. <u>Mierzono wartość dawki wtrysku paliwa do komory spalania oraz wartość przelewu paliwa w zależności od ciśnienia wtrysku, szerokości impulsu otwarcia cewki elektromagnetycznej jak i częstotliwości ilości wtrysku w zadanej jednostce czasu.</u>

Wyniki badań w formie tabelarycznej przedstawiono w załączniku 6.

W trakcie badań stwierdzono, że wtryskiwacze oznaczone i ponumerowane kolejno od U7 do U12 mają wartość przelewu znacznie przekraczającą możliwości pomiarowe stołu probierczego, czyli powyżej 158 cm<sup>3</sup> w trakcie cyklu pomiarowego. Ze względu na brak możliwości przetestowania wtryskiwaczy U7 do U 12 na stole probierczym wyeliminowano je z dalszych badań. Uzyskano w ten sposób kolejne wyniki badań eksperymentalnych. Dokonano zmiany indeksacji wyłonionych wtryskiwaczy na NN1÷NN12 (jako wtryskiwacze sprawne) i UU1÷UU6 (jako wtryskiwacze niesprawne).

Na rysunkach 20÷22 przedstawiono wybrane wyniki testów w formie graficznej kolejno dla różnych ciśnień procesu wtrysku (20, 30, 50 MPa) oraz szerokości impulsu otwarcia cewki (500, 1000, 800 ms) a także ilości wtrysków (200, 700, 800 min<sup>-1</sup>).



Rys. 20. Wartość średnia przelewu paliwa w [cm<sup>3</sup>] zmierzona podczas testu: ciśnienie 20 MPa, szerokość impulsu otwarcia cewki 500 ms, ilość wtrysków 200 na minutę



Rys. 21. Wartość średnia przelewu paliwa w [cm<sup>3</sup>] zmierzona podczas testu: ciśnienie 30 MPa, szerokość impulsu otwarcia cewki 1000 ms, ilość wtrysków 700 na minutę


Rys. 22. Wartość średnia przelewu paliwa w [cm<sup>3</sup>] zmierzona podczas testu: ciśnienie 50 MPa, szerokość impulsu otwarcia cewki 800 ms, ilość wtrysków 800 na minutę

# 4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W celu udowodnienia postawionej tezy przeprowadzono kolejny etap badań eksperymentalnych. Obejmował on pomiary na pracującym silniku. Sklasyfikowane wtryskiwacze pod kątem stanu sprawny/uszkodzony, były kolejno montowane w silniku, a następnie dokonywano próby rejestracji sygnałów Emisji Akustycznej dla znanych już stanów niesprawności.

#### 4.1. Opis stanowiska badawczego

Głównym celem badań przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym z pracującym silnikiem, było m.in. określenie stanów granicznych i wyselekcjonowanie za pomocą sygnałów EA niewłaściwie pracujących wtryskiwaczy. Dodatkowo, należało wyłonić estymaty odpowiedzialne za zmianę faz podczas procesu wtrysku paliwa do komory spalania pochodzące od uszkodzonych wtryskiwaczy. Stanowisko składało się z:

- Silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, typu zasobnikowego (Common Rail opisanego w rozdziale 3.1), czterocylindrowego z wtryskiem bezpośrednim do komory spalania.
- 2. Zewnętrznego układ chłodzenia silnika składającego się z pompy zintegrowanej na silniku, wentylatora, chłodnicy, przewodów łączących wymienione elementy.
- 3. Urządzenia rozruchowego do zasilania rozrusznika.
- 4. Panelu sterującego do silnika wraz z programem diagnostycznym producenta silnika.
- 5. Zbiornika paliwa wraz z filtrem i przewodami.
- 6. Toru pomiarowego Emisji Akustycznej.
- Zestawu narzędzi niezbędnych do przeprowadzenia wymiany wtryskiwaczy i regulacji luzów zaworowych.
- 8. Oscyloskopu PicoScope wraz z oprzyrządowaniem.

Podstawowym elementem stanowiska badawczego był silnik o zapłonie samoczynnym firmy Perkins, którego uproszczony schemat (z uwzględnieniem układu wysokiego ciśnienia) zamieszczono na rys. 23. W badanym systemie, pompa wysokiego ciśnienia paliwa zasila zasobnik paliwa, z którego poprzez jednakowej długości przewody paliwo dopływa do poszczególnych wtryskiwaczy. Elementem "zarządzającym" wartościami ciśnienia w układzie jest sterownik silnika, który na podstawie informacji z czujników, elementów wykonawczych oraz zapisanych w pamięci mikroprocesora w postaci tzw. map wtrysku, dobiera odpowiedni czas trwania i moment wtrysku. Zapewnia to stałą prędkość obrotową wału korbowego przy zadanym obciążeniu. Do silnika, poprzez specjalne złącze, podłączono komputer diagnostyczny celem monitorowania wybranych parametrów jego pracy w trakcie badań.



Rys. 23. Uproszczony schemat silnika użytego do badań wraz z oprzyrządowaniem pomiarowym

Na rysunkach 24÷25 przedstawiono widok stanowiska badawczego, z zaznaczeniem głównych elementów układu pomiarowego.



Rys. 24. Silnik użyty do badań wraz z oprzyrządowaniem pomiarowym



Rys. 25. Widok ogólny stanowiska badawczego z komputerem obsługującym fabryczny moduł diagnostyczny oraz torem pomiarowym do rejestracji sygnału EA

W celu uzyskania jednakowych warunków w trakcie pomiarów sygnału EA dla wszystkich wtryskiwaczy, każdy kolejno badany wtryskiwacz montowany był na tym samym (ostatnim czwartym) cylindrze. Na pozostałych cylindrach czyli pierwszym, drugim i trzecim, montowane były zweryfikowane pod względem prawidłowości działania, fabrycznie nowe wtryskiwacze. Każdorazowo regulowano luz zaworowy dla cylindra, w którym był wymieniany wtryskiwacz, gdyż jego demontaż wymagał poluzowania dźwigienek zaworowych. Jednocześnie w programie sterującym silnika wgrywano oprogramowanie korekcyjne dla każdego z wtryskiwaczy. Silnik był w "idealnym" stanie technicznym (sprawdzony, fabrycznie nowy) co pozwoliło na wykluczenie ewentualnych sygnałów pochodzących z niesprawności pozostałych jego układów funkcjonalnych. Przed przystąpieniem do badań zasadniczych, dodatkowo dokonano wymiany wszystkich filtrów silnika, wymieniono olej smarujący oraz wyregulowano luzy zaworowe każdego z cylindrów.

Najczęściej, nieprawidłową pracę większości silników można zauważyć obserwując przy jego pełnym obciążeniu. Typowe, zauważalne w ten sposób symptomy to np. drgania, stuki, przerywana praca, nadmierne zadymienie, brak mocy itp. Objawy te najczęściej są niewidoczne lub niemożliwe do sprawdzenia przy pracy silnika z prędkością biegu jałowego (np. podczas próby diagnostyki silnika w warunkach polowych). Autor niniejszej rozprawy założył, że za pomocą Emisji Akustycznej możliwym będzie wykrycie niesprawności wtryskiwacza już przy prędkości obrotowej biegu jałowego silnika. Niesprawność związana z pracą wtryskiwacza (a co za tym idzie i silnika), będzie jedynie bardziej widoczna przy zwiększaniu obciażenia. Wnioskować można, że przy prędkości obrotowej biegu jałowego, zwiększy się niepowtarzalność procesu wtrysku [5], ale nie jego stan techniczny. Istotne również jest to, że praktycznie większość warsztatów serwisowych i naprawczych nie posiada tzw. hamulca silnikowego. Wiąże się to przede wszystkim ze znacznymi kosztami tego urządzenia. Wykrycie nieprawidłowości pracy wtryskiwacza już przy obrotach biegu jałowego mogłoby być dokonywane skutecznie nawet w "terenie", czyli w miejscu postoju maszyny.

Niezbędnym elementem stanowiska badawczego jest tor pomiarowy Emisji Akustycznej, którego podstawowe elementy przedstawiono na rys. 26.



Rys. 26. Uproszczony schemat toru pomiarowego Emisji Akustycznej

Głównym elementem układu pomiarowego jest przenośny analizator Emisji Akustycznej (na rysunku otoczony linią przerywaną) dedykowany dla zakresu częstotliwości określonych na podstawie badań przeprowadzonych w Akademii Morskiej w Szczecinie [9-10]. Dokładny opis tego urządzenia przedstawiono w Załączniku 5 niniejszej rozprawy.

W badaniach zastosowano czujnik pomiarowy firmy Bruel&Kjaer, którego ogólną budowę przedstawiono na rysunku nr 27.



Rys. 27. Budowa czujnika 4371 V firmy Bruel&Kjaer [15]

Czujnik został zakupiony łącznie z certyfikatem kalibracji i wykresem charakterystyki częstotliwościowej przedstawionej na rys 28.



Rys. 28. Charakterystyka częstotliwościowa czujnika 4371 V firmy Bruel&Kjaer [15]

Wykorzystany czujnik jest klasycznym akcelerometrem, jednak jego czułość oraz zakres pomiarowy jest na tyle szeroki, że można wykorzystać go również do wymaganego pasma Emisji Akustycznej. Jak podaje literatura [33] czujniki tego typu można wykorzystywać w pomiarach EA, jednak z praktycznego (pomiarowego) punktu widzenia, istotna jest znajomość jego częstotliwości rezonansowej oraz znajomość częstotliwości drgań własnych badanego elementu. Dodatkowo, w celu wyeliminowania rozproszenia i odbicia fal sprężystych EA w wysokim paśmie częstotliwości, sensor mocowany był z użyciem cieczy sprzęgającej.

### 4.2. Badanie dokładności toru pomiarowego

Badanie dokładności toru pomiarowego przeprowadzono zgodnie ze schematem na rys. 29.



Rys. 29. Schemat układu do badania dokładności toru pomiarowego

Tor pomiarowy składał się z następujących przyrządów (rys. 29):

- cyfrowego generatora funkcyjnego HAMEG HM8131-2, wytwarzającego sygnał prostokątny o częstotliwości 100 Hz i napięciu 2,2 V;
- wzmacniacza mocy TIRA typ BAA 120 o wzmocnieniu x 1;
- równolegle do toru pomiarowego podłączono przyrząd kontrolny sygnału emitowanego – oscyloskop;

- wzbudnika drgań TIRA typ TV51075-M wytwarzającego przyspieszenie o wartości maksymalnej 10 g na częstotliwości 5 kHz;
- trwale przytwierdzonego czujnika Bruel&Kjaer typ 4371V [15];
- analizatora służącego do rejestracji generowanego sygnału Emisji Akustycznej.

Zasada generacji sygnału wzorcowego była następująca: generator mocy wytwarzał sygnał napięcia prostokątnego, który podawano do wzbudnika drgań. Ten z kolei, powodował powstawanie harmonicznych o częstotliwości 2 i 4 kHz i przyspieszeniu 10 g.

Do oceny toru wybrano przedział kolejnych 20 zarejestrowanych sygnałów, w których każdy zawierał ok. 50 amplitud szczytowych. Obraz rejestrowanego sygnału przedstawiono na rys. 30.



Rys. 30. Obraz rejestrowanego sygnału wzorcowego podczas badania dokładności toru pomiarowego

Wyniki obróbki zarejestrowanych sygnałów przeprowadzono z wykorzystaniem programu Look50\_16Analiza opracowanego w IPPT PAN i przedstawiono w tabeli 7.

Lp.	Liczba pomiarów	Seria pomiarów	Średnia Amplituda Szczytowa A [g]	Odchylenie Standardowe σ	Współczynnik zmienności Δ [%]
1	20	Ι	9,565	0,0267	0,279

Tabela 7. Wyniki pomiaru dokładności toru pomiarowego

Analiza badania toru pomiarowego wykazała, że dla amplitud szczytowych współczynnik zmienności wynosi 0,279 %. Przyjęto zatem, że niepewność pomiarów w zastosowanym torze pomiarowym jest nie większa niż 0,3 %.

### 4.3. Przygotowanie silnika i toru pomiarowego Emisji Akustycznej do pomiarów

Cykl badań obejmował wymiany wtryskiwacza w cylindrze nr 4 na wcześniej opisany i zbadany w procesie badania weryfikacyjnego niesprawny wtryskiwacz. Następnie, po przeprowadzeniu regulacji luzu zaworowego i zamknięciu pokrywy zaworów, wprowadzano oprogramowanie korekcyjne dla konkretnego wtryskiwacza. Etapy wymiany wtryskiwacza pokazano na rys 31.



Rys. 31. Etapy demontażu wtryskiwacza: a) demontaż pokrywy zaworów; b) demontaż przewodów elektrycznych; c) demontaż przewodu wysokiego ciśnienia i osłony gumowej; d) poluzowanie dźwigni zaworu ssącego



Rys. 31. Etapy demontażu wtryskiwacza: e-f) poluzowanie dźwigni zaworu ssącego; g-i) demontaż wtryskiwacza; j) głowica po zdemontowaniu wtryskiwacza –cd.

Po zamontowaniu wtryskiwacza i złożeniu pokrywy zaworów, mocowano czujnik EA na przewodzie wtryskowym w miejscu pomiarowym, którym był króciec przewodu wysokiego ciśnienia dokręcany do wtryskiwacza. W ten sposób stabilizacja temperatury zarówno czujnika jak i przewodów oraz całego silnika następowała w jednakowym czasie. Podczas badań Emisji Akustycznej, temperatura silnika wynosiła w przybliżeniu 80 °C. Poglądowy schemat układu pomiarowego zaprezentowano na rys. 32.



Rys. 32. Poglądowy schemat układu wtryskowego silnika wielocylindrowego oraz miejsce pomiaru sygnału EA

Ciecz sprzęgającą (taką jak stosuje się w badaniach ultradźwiękowych), nanoszono pomiędzy powierzchnię króćca i mocowanego czujnika. Czujnik przytwierdzano do badanej powierzchni przy pomocy specjalnie zaprojektowanego i skonstruowanego uchwytu (rys.33). Po zamontowaniu zestawu, uchwyt nie miał kontaktu z żadną częścią silnika poza wybraną powierzchnią króćca. Wyeliminowano dzięki temu inne źródła np. drgań w zakresie badanych częstotliwości pochodzące np. z obudowy lub pokrywy zaworów układu rozrządu.



Rys. 33. Sposób mocowania czujnika w uchwycie na króćcu przewodu wysokiego ciśnienia na ostatnim cylindrze silnika

Czujnik pozycjonowany był na badanej powierzchni dzięki dodatkowemu wgłębieniu w postaci nakiełka, poprzez specjalny talerzyk, zakładany od strony obudowy sensora. Pomiędzy powierzchnię obudowy czujnika i talerzyka pozycjonującego wprowadzano polimer silikonowy, który oddzielał metalowe powierzchnie obu elementów. Zastosowanie polimeru silikonowego miało na celu wytłumienie fal sprężystych propagujących się przez uchwyt pomiarowy do górnej części czujnika. We wgłębieniu na powierzchni talerzyka dokręcana była śruba, która

na swym końcu miała wmontowaną kulkę pozycjonującą. Kompletny uchwyt pokazano na rysunkach 34÷35.



Rys. 34. Specjalnie zaprojektowany i skonstruowany uchwyt do mocowania czujnika



Rys. 35. Sposób pozycjonowania czujnika

Cały zestaw dokręcano za pomocą klucza dynamometrycznego zawsze jednakowym momentem o wartości 2,5 Nm (rys. 36). Określony docisk powodował, iż zestaw pomiarowy czujnik-uchwyt był zamocowany bez luzów na powierzchni pomiarowej, nie przemieszczał się podczas pracy silnika i nie wywoływał nadmiernych naprężeń w układzie pomiarowym.



Rys. 36. Sposób mocowania czujnika na przewodach wysokiego ciśnienia z pomocą klucza dynamometrycznego

Ustalono także warunki pracy silnika podczas badań głównych. W takcie przeprowadzania badań weryfikacyjnych stwierdzono, że dopiero po osiągnięciu maksymalnej temperatury silnika pracującego bez obciążenia równej 79 ÷ 80°C, wartość dawki paliwa oraz ciśnień w układzie wtryskowym stabilizuje się.

Badania przeprowadzano dla następujących, ustalonych warunków pracy silnika:

- prędkość obrotowa 1000 obr/min;
- obciążenie silnika (wentylator) około 6÷9% wartość obliczeniowa pochodząca ze sterownika silnika;
- temperatura silnika 79 ÷ 80 °C (temp. wody chłodzącej pomiar w momencie pełnego otwarcia termostatu);

- czujnik montowany przed uruchomieniem silnika (w celu zapewnienia stabilizacji cieplnej czujnika);
- jednakowe odstępy czasowe pomiędzy badaniem poszczególnych wtryskiwaczy;
- ustalone warunki otoczenia tj. temperatura, wilgotność, hałas, drgania;
- ustalone pozostałe parametry pracy silnika;
- brak jakichkolwiek alarmów generowanych przez sterownik silnika.

Po zamocowaniu czujnika na powierzchni pomiarowej dokonywano rejestracji sygnału EA. Następnie demontowano czujnik wraz z uchwytem z powierzchni pomiarowej, poprawiano stan pokrycia żelem sprzęgającym i montowano go ponownie w ten sam sposób. Po dokonanym zapisie sygnału EA, czynność powtarzano. Dla każdego z wtryskiwaczy wykonywano 10 kolejnych cykli pomiarów po 3 zapisy sygnału, każdy o długości 500 ms.

# 5. WYNIKI BADAŃ

W niniejszym rozdziale zaprezentowano otrzymane wyniki badań w postaci zarejestrowanych zbiorów próbek sygnału Emisji Akustycznej. Częstotliwość próbkowania wynosiła 50 000 próbek na sekundę. Sygnał miał charakter impulsowy, zaś widoczne na rys. 37 i 38 maksymalne wartości amplitud odpowiadają momentowi wtrysku i są związane z przebiegiem pracy badanego wtryskiwacza. Dla silnika pracującego z prędkością obrotową 1000 obr/min przedział czasu pomiędzy maksymalnymi wartościami sygnału wynosił 120 ms. Sygnały zarejestrowane pomiędzy fragmentami o najwyższej amplitudzie pochodzą z innych sąsiednich wtryskiwaczy oraz procesów związanych z pracą elementów układu rozrządu (zaworów w pompie wysokiego ciśnienia, układu przepłukania itd.) i nie są one analizowane w niniejszej rozprawie. Na rysunkach 37 i 38 pokazano typową postać sygnału źródłowego zarejestrowanego kolejno na wtryskiwaczu sprawnym i niesprawnym.



Rys. 37. Sygnał EA nowego wtryskiwacza przedstawiony w układzie napięcie na wyjściu wzmacniacza pomiarowego w funkcji czasu. Wzmocnienie sygnału wynosi 20 dB



Rys. 38. Sygnał EA uszkodzonego wtryskiwacza – brak istotnych różnic pomiędzy formą sygnału pokazaną na powyższym rysunku i sygnałem pokazanym na rysunku 37

Na rysunku 39 zaprezentowano sygnał Emisji Akustycznej w postaci przebiegów na akustogramie częstotliwościowo-czasowym, wykonanym programem Widmo12\_50\_05ms zaprojektowanym w IPPT PAN i opisanym szczegółowo w [9].



Rys. 39. Przykład akustogramu częstotliwościowo-czasowego: a) nowy wtryskiwacz; b) uszkodzony wtryskiwacz; c) legenda

W klasycznym sygnale Emisji Akustycznej, zarówno na wykresie sygnału źródłowego EA jak i na spektrogramie w układzie częstotliwościo-czasowym (akustogram), trudno zaobserwować istotne różnice w zapisie sygnału pomiędzy wtryskiwaczem sprawnym i niesprawnym. Wynika to z niedostatecznej rozdzielczości czasowej zastosowanej przy obróbce sygnału.

### 5.1. Analiza wybranych miar sygnału Emisji Akustycznej

W silnikach z układem zasobnikowym Common-Rail, problem zidentyfikowania różnic w sygnale wtryskiwacza sprawnego/niesprawnego wymagał zastosowania bardziej precyzyjnego algorytmu jego obróbki. Opracowany do tego celu program obliczeniowy, poszukuje maksimum amplitudy szczytowej i na tej podstawie oblicza parametry sygnału impulsowego dla ustalonego progu wykrywalności.

Podobną analizę zastosowano w pracy A. Bejgera [9] oraz Z. Raunmiagiego [65]. Na podstawie doświadczeń wspomnianych autorów można stwierdzić, iż miarą sygnału Emisji Akustycznej dla tego typu pomiarów może być <u>Średnia energia zdarzeń</u> oraz <u>Średni czas trwania zdarzenia</u>. Wyznaczono parametry wspomnianych deskryptorów, które zaprezentowano w tabeli 8.

Lp.	Sygnał źródłowy - oznaczenie wtryskiwacza	Średnia e	energia zdarzeń EA dla l	k=60	Średni czas trwania zdarzenia EA dla k=60			
		E [mJ]	Odchylenie standardowe σ [mJ]	Δ [%]	t [ms]	Odchylenie standardowe σ [mJ]	Δ [%]	
1	NN1	44896	1675	4	3,296	0,898	27	
2	NN2	49080	2485	5	3,421	0,791	23	
3	NN3	39846	8339	21	4,251	0,878	21	
4	NN4	30232	8088	27	3,501	0,919	26	
5	NN5	56973	4169	7	3,500	0,677	19	
6	NN6	51966	1688	3	3,553	0,769	22	
7	NN7	45891	2295	5	3,394	0,664	20	
8	NN8	72926	4904	7	4,977	1,259	25	
9	NN9	41082	4213	10	3,402	0,747	22	
10	NN10	68637	4448	6	4,458	0,883	20	
11	NN11	59302	3913	7	4,007	0,841	21	
12	NN12	47457	5142	11	3,897	1,028	26	
13	UU1	55004	3465	6	5,033	0,613	12	
14	UU2	43998	4328	10	3,578	1,223	34	
15	UU3	44317	5376	12	3,840	1,030	27	
16	UU4	56490	3307	6	4,003	0,529	13	
17	UU5	33414	2996	9	2,908	1,105	38	
18	UU6	43355	3349	8	3,930	1,136	29	

Tabela. 8. Wartości średnie energii i czasu trwania zdarzenia EA odpowiadającemu procesowi wtrysku. Δ oznacza współczynnik zmienności badanego parametru

Analizując uzyskane wyniki przedstawione w formie liczbowej (tabela 8) oraz w na wykresach (rys. 40- 41) można wnioskować, iż ani średnia energia zdarzeń ani średni czas trwania zdarzenia nie są znamiennymi wartościami, mogącymi odróżnić badane przez autora rozprawy nowe i uszkodzone.



Rys. 40. Zestawienie średniej energii zdarzenia odpowiadającego procesowi wtrysku wtryskiwaczy sprawnych i niesprawnych



Rys. 41. Zestawienie średniego czasu trwania zdarzenia odpowiadającego procesowi wtrysku wtryskiwaczy sprawnych i niesprawnych

Wyznaczając czas trwania zdarzenia EA poszczególnych wtryskiwaczy zauważono, że współczynnik zmienności jest na poziomie 19÷27% dla wtryskiwaczy nowych, zaś dla uszkodzonych w zakresie 12÷38%. Wartości te zobrazowano na wykresie słupkowym (rys. 42).



Rys. 42. Zestawienie współczynnika zmienności  $\Delta$  [%] średniego czasu trwania zdarzenia dla sprawnych i niesprawnych wtryskiwaczy

## 5.2. Analiza faz sygnału Emisji Akustycznej w procesie wtrysku paliwa

W trakcie prowadzonych badań założono, że odniesienie wyników pomiaru EA do GMP (górne martwe położenie tłoka) silnika może nie mieć zastosowania w czasie badania silnika w trakcie rzeczywistej eksploatacji maszyny. Spowodowane jest to dwoma czynnikami:

- brakiem możliwości ustalenia pozycji GMP (Górne Martwe Położenie tłoka) silnik sprzężony jest z odbiornikiem mocy, który zazwyczaj jest zabudowany i nie ma możliwości sprawdzenia GMP na kole zamachowym;
- występuje zmienność parametrów map wtrysku w zależności od obciążenia wstępnego, chwilowego, warunków otoczenia itd. Informacja ta nie jest znana diagnoście, gdyż najczęściej nie ma on dostępu do oprogramowania sterownika.

Ustalono, że najlepszym punktem odniesienia dla sekwencji czasowej faz wtrysku odwzorowanej w sygnale EA będzie sygnał pradowy z cewki elektrycznej wtryskiwacza. W trakcie całej pracy eksploatacyjnej silników tego typu nie stwierdzono przypadków uszkodzenia wtryskiwaczy ani po stronie elektrycznej ani po stronie sterowania. Należy więc założyć, iż sygnał ten jest wzorcowy w warunkach pracy silnika bez obciążenia, przy stałej prędkości obrotowej wału korbowego i w stałej przypadku, gdy silnik pracował z uszkodzonym wartości temperatury. W wtryskiwaczem, sterownik silnika "podnosił" ciśnienie wtrysku paliwa odnosząc to do pompy wysokiego ciśnienia. Dla warunków pracy podczas testów na stanowisku badawczym, takie parametry jak czas trwania procesu wtrysku i szerokość impulsu pozostawały na tym samym poziomie. Stałość parametrów wtrysku wynikała z prowadzenia badań przy niskich prędkościach obrotowych i małym obciążeniu. Za pomocą oscyloskopu dwukanałowego, cegów prądowych oraz toru pomiarowego EA, dokonywano pomiaru nateżenia pradu cewki badanego wtryskiwacza oraz jednocześnie pomiaru sygnału EA. Uzyskany obraz zaprezentowano na rys. 43.



Rys. 43. Sygnał związany z pracą wtryskiwacza: pomiar (za pomocą oscyloskopu) natężenia prądu cewki badanego wtryskiwacza (kolor niebieski) oraz sygnał źródłowy EA (kolor czerwony)

Rysunek 43 obrazuje zależność zmierzonego sygnału EA w odniesieniu do sygnału sterującego procesem wtrysku. Zauważono, że wtrysk składa się z dwóch faz: tzw. przedwtrysku oraz wtrysku zasadniczego – niebieska linia prądowa na wykresie. Odnoszac się do rysunku 4 (rozdział 1.1.3) można wnioskować, jakie procesy we wtryskiwaczu zachodzą po sobie i które z nich mają odzwierciedlenie w sygnale EA. W pierwszej fazie następuje dopływ prądu do elektromagnesu wtryskiwacza oraz wzbudzenie cewki na okres 0,5 ms. Wówczas rdzeń cewki stanowiący połączenie z kotwicą otwiera dławik odpływu z komory sterującej, następuje wypływ paliwa z tej komory i spadek ciśnienia w jej wnętrzu a tym samym wznios iglicy oraz wtrysk paliwa do komory spalania. Po czasie 0,35 ms od momentu zaniku napięcia na cewce, w fazie przedwtrysku następuje ponowny wznios kotwicy (poprzez pobudzenie cewki elektromagnesu) lecz tym razem na okres 0,8 ms. W trakcie tego czasu, następuje główny wtrysk paliwa do komory spalania silnika. Proces wtrysku paliwa trwa jeszcze przez około 1 ms po zaniku napięcia w cewce elektromagnesu wtryskiwacza i czas ten jest zależny od wartości chwilowego ciśnienia panującego w zasobniku paliwa oraz od stanu technicznego wtryskiwacza.

Na rysunku 44 widoczny jest przebieg sygnału EA w zależności od pracy cewki elektromagnesu wtryskiwacza. Jak widać, pierwszy wzrost sygnału EA występuje w trakcie procesu przepływu paliwa przez wtryskiwacz czyli po około 0,8 ms od momentu otwarcia cewki elektromagnesu. W tym czasie kotwica udrożniła odpływ paliwa z komory sterującej. Następstwem tego jest spadek ciśnienia w tej komorze, wznios iglicy wtryskiwacza i wspomniany wcześniej - początek wtrysku paliwa. W fazie wtrysku, w warunkach przeprowadzania badań, następuje przepływ paliwa pod ciśnieniem około 30 MPa. Ze względu na krótki czas trwania przedwtrysku, sygnał ze sterownika skokowo (po upływie 0,5 ms) opada do zera. Po tym czasie sygnał EA o podwyższonej amplitudzie utrzymuje się przez czas około 0,28 ms po czym opada aż do chwili ponownego pobudzenia cewki w momencie wtrysku głównego i wzniosu iglicy. Należy pamiętać, że po okresie przedwtrysku i zamknięciu kotwicy, następuje dalszy przepływ paliwa do momentu wyrównania ciśnień w komorze sterującej, a także następuje proces zamknięcia iglicy. Można oszacować, iż proces zamknięcia iglicy oraz przepływ paliwa po czasie zamknięcia kotwicy w okresie przedwtrysku zawiera się właśnie w sygnale EA na długości 0,28 ms. Jak potwierdzono w pracy [64-65], moment uderzenia iglicy w gniazdo rozpylacza generuje sygnały impulsowe, przez co całkowity czas sygnału EA jest wydłużony o to dodatkowe "echo", nakładające się na początek procesu wtrysku głównego.

Sygnał sterujący cewką w trakcie wtrysku głównego podzielony jest na fazy wzbudzenia cewki, a następnie jej podtrzymania co jest związane głównie z ładowaniem kondensatora. W momencie wyłączenia zasilania prądu do cewki elektromagnesu, sterownik silnika wywołuje stopniowe zmniejszanie się wartości prądu do wartości zerowej. Na podstawie analizy przebiegu procesu wtrysku na łącznym wykresie Emisji Akustycznej oraz prądu sterującego otwarciem cewki wtryskiwacza, można wytypować **następujące sektory pracy wtryskiwacza** (rys. 44):

- sektor A wtryskiwacz nie pracuje, stałe ciśnienie w komorze sterującej i komorze rozpylacza, cewka nie jest pobudzona i wtryskiwacz jest gotowy do pracy;
- sektor B pobudzenie cewki wtryskiwacza, wznios kotwicy i odpływ paliwa z komory sterującej, w dalszej kolejności wznios iglicy wtryskiwacza i rozpoczęcie procesu wtrysku;
- sektor C sterownik wyłącza sygnał prądowy do cewki, następuje zamykanie dławika odpływu i początek procesu wyrównania ciśnienia w komorze sterującej;
- sektor D dławik odpływu komory sterującej pozostaje zamknięty przez kotwicę.

W sprawnym wtryskiwaczu, sektor oznaczony symbolem DN obrazuje wyrównanie ciśnienia w komorze sterującej, zamknięcie iglicy i koniec procesu wtrysku. We wtryskiwaczu uszkodzonym, sektor opisany symbolem DU wskazuje na brak szczelności komory sterującej, dalszy wypływ paliwa do przelewu, dłuższy okres stabilizacji ciśnienia paliwa w komorze sterującej, oscylacje przemieszczania się iglicy wtryskiwacza.

## Sektory pracy wtryskiwacza CR



Rys. 44. Podział sygnału EA wtryskiwacza na fazy

Analiza rysunku 44 pozwala wydzielić w pracującym wtryskiwaczu, dwie fazy wymuszone przez sygnał prądowy. Po stronie odpowiedzi natomiast, uzyskuje się trzy zasadnicze fazy sygnału EA (oznaczone odpowiednio cyframi rzymskimi), które zawierają następujące informacje:

**Faza I** – określa wartość sygnału powyżej przyjętego progu wykrywalności i zawiera informacje pochodzące z procesów przedwtrysku oraz otwarcia kotwicy (początku wtrysku zasadniczego i zamknięcia kotwicy). W fazie tej zawierają się sektory A1, B1, C1, D1 oraz A2, B2 i C2.

**Faza II** – to wydzielona w sygnale EA część zawierająca informacje związane z wyrównaniem ciśnienia w komorze sterującej. Na wykresie charakteryzuje się on niską amplitudą, ponieważ nie generuje fali sprężystej pochodzącej od uderzenia elementów we wtryskiwaczu. Określa jedynie początek sektora D2.

**Faza III** – obrazuje proces zamknięcia iglicy wtryskiwacza i zawiera większą część sektora D2. Czas trwania tej fazy zależny jest od poprawności zamknięcia iglicy i generowanych w procesie uderzeń iglicy o gniazdo fal sprężystych.

W celu uwidocznienia opisanych wyżej, istotnych z punktu widzenia diagnostyki faz pracy wtryskiwacza, opracowano w IPPT PAN, wg wskazówek autora rozprawy, program Look50\_16, służący do bezpośredniej analizy sygnału EA. Na rys. 45 przedstawiono analizę rozpatrywanego sygnału EA, który wyraźnie wyodrębnia opisane wcześniej fazy przebiegu procesu wtrysku.



Program Look50\_16 prezentuje sygnał EA w wyższej rozdzielczości niż programy prezentowane na rys. 37÷39. Opisany sposób faz występujących podczas pracy wtryskiwacza w układzie zasobnikowym, rejestrowany był we wszystkich pomiarach przeprowadzonych przez autora. Ponieważ założono, że istnieje ścisły związek pomiędzy czasem trwania poszczególnych faz procesu wtrysku a niesprawnością wtryskiwacza, powstała konieczność opracowania specjalnego algorytmu do wyznaczania czasu trwania tych faz.

Wykonano algorytm wyznaczający czas trwania istniejących faz z dokładnością do 0,1 ms. Zakres pomiarowy w dziedzinie amplitudy podzielono na 500 jednostek, co odpowiadało 50 jednostkom przyspieszenia (50g) z niepewnością pomiaru oszacowaną na  $\pm 2g$  (jednostkom przyspieszenia grawitacyjnego mierzonego w paśmie częstotliwości 3-25 kHz). Jedną próbkę sygnału rejestrowano co 20 µs, zaś algorytm pozwalał analizować kolejne wartości amplitudy sygnału kodowane w próbkach sygnału (łącznie w 25000 próbkach).

Algorytm zawierał następujące części składowe programu (czas trwania faz z dokładnością 100 µs) dla następujących sekwencji:

- Znalezienie początku I fazy (t<sub>1</sub>) algorytm porównuje dwie kolejne próbki sygnału i wykrywa wzrost o co najmniej 250 jednostek co odpowiada wzrostowi przyspieszenia rejestrowanego przez czujnik o 25g - punkt ten w programie jest oznaczony jako "A<sub>1</sub>".
- 2. Znalezienie początku II fazy (t<sub>2</sub>) od początku I fazy algorytm przemieszcza start poszukiwań o 800 μs aby zminimalizować efekt wahań poziomu sygnału po wystąpieniu przyrostu A<sub>1</sub>, a następnie porównuje średnią wartość sygnału w kolejnych segmentach sygnału o czasie trwania 100 μs. Poszukuje średniego spadku amplitudy do poziomu co najmniej "0,8 A<sub>1</sub>". Początek tego segmentu oznaczony jest jako t<sub>2</sub>.
- Znalezienie początku III fazy (t<sub>3</sub>) od początku II fazy algorytm porównuje średnią wartość sygnału w kolejnych segmentach o czasie trwania 100 μs przemieszczając się co 20 μs. Poszukuje średniego podwyższenia amplitudy do co najwyżej "A<sub>1</sub>" i wyznacza początek tego segmentu oznaczając jako t<sub>3</sub>.
- Znalezienie umownego końca III fazy (t<sub>4</sub>) od początku III fazy algorytm porównuje średnią wartość sygnału w kolejnych segmentach o czasie trwania 100 μs przemieszczając się co 20 μs. Poszukuje średniego obniżenia amplitudy

do co najmniej "0,5 A<sub>1</sub>". Początek tego segmentu sygnału wyznaczony jest jako  $t_4$ .

Sieć działań algorytmu wyznaczania trzech faz procesu wtrysku przedstawiono w formie graficznej na rys. 46.



Rys. 46. Sieć działań algorytmu wyznaczania trzech faz procesu wtrysku

Dokonując obliczeń według algorytmu (rys. 46), wyznaczono czasy trwania poszczególnych trzech faz w sygnale generowanym podczas wtrysku paliwa i przedstawiono je w tabeli 9.

Lp.	Sygnał źródłowy- numer wtryskiwacza	Średni czas trwania I fazy dla k=60			Średni czas trwania II dla k=60			Średni czas trwania III dla k=60		
		t [ms]	Odchylenie standardowe σ	Δ[%]	t [ms]	Odchylenie standardowe σ	Δ [%]	t [ms]	Odchylenie standardowe σ	Δ[%]
1	NN1	0,86	0,07	8,66	0,48	0,31	64,50	0,63	0,16	24,82
2	NN2	1,05	0,16	15,24	0,67	0,60	89,12	0,60	0,14	24,05
3	NN3	0,81	0,04	5,29	1,03	0,78	75,38	0,56	0,13	23,24
4	NN4	0,82	0,05	5,90	0,83	0,30	36,14	0,58	0,14	24,09
5	NN5	1,12	0,14	12,07	0,45	0,26	57,43	0,61	0,19	31,52
6	NN6	1,06	0,11	10,09	0,42	0,20	47,01	0,78	0,17	21,56
7	NN7	1,03	0,18	17,91	0,46	0,75	164,69	0,59	0,13	22,44
8	NN8	1,18	0,15	12,42	0,24	0,29	123,49	0,86	0,20	23,77
9	NN9	0,98	0,10	9,97	0,68	0,50	73,48	0,58	0,17	28,78
10	NN10	1,23	0,20	15,94	0,26	0,22	84,47	0,80	0,29	35,73
11	NN11	0,95	0,07	7,64	0,51	0,39	77,20	0,71	0,26	37,25
12	NN12	0,89	0,08	9,38	0,90	0,64	71,30	0,58	0,16	27,41
13	UU1	0,98	0,26	26,09	0,18	0,43	245,82	0,87	0,42	47,86
14	UU2	0,96	0,14	15,11	0,49	0,55	111,44	0,87	0,43	49,45
15	UU3	0,96	0,21	21,85	0,19	0,39	203,66	0,76	0,34	45,03
16	UU4	0,92	0,20	21,37	0,17	0,29	171,63	0,75	0,35	46,45
17	UU5	0,82	0,04	5,18	0,74	0,77	56,53	0,52	0,07	14,07
18	UU6	0,89	0,16	17,79	0,41	0,60	145,91	0,69	0,31	44,57

Tabela. 9. Wartości średnie czasu trwania poszczególnych faz w sygnale wtrysku paliwa.  $\Delta$  oznacza współczynnik zmienności badanego parametru

W wersji graficznej czasy trwania trzech faz przedstawiono na wykresie słupkowym na rys. 47.



Rys. 47. Zestawienie średnich pomiarów czasów trwania trzech faz wyznaczonych algorytmem w programie Look50\_16\_trzy\_fazy

Sumaryczny czas wyznaczony z analizy trwania poszczególnych faz wskazuje, że jego wartość jest nieco niższa we wtryskiwaczach uszkodzonych aczkolwiek nie są to parametry, które w sposób jednoznaczny wskazywałyby na uszkodzenie wtryskiwacza.

Dokonano analizy odchylenia standardowego uzyskanych rezultatów dla czasów trwania poszczególnych trzech faz wszystkich pomiarów czyli k = 60.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^{k} (x_i - \bar{x})^2}$$

gdzie:

 $x_i$ , i = 1, 2, ..., k – wartości czasu trwania poszczególnej fazy,

- k ilość pomiarów w próbie (k  $\leq$  60),
- $\bar{x}$  wartość średnia

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} x_i$$



Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunkach 48÷50 w postaci współczynnika zmienności odchylenia standardowego dla pomiarów poszczególnych faz.

Rys. 48. Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania I fazy



Rys. 49. Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania II fazy



Rys. 50. Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania III fazy

Odchylenie standardowe pierwszych dwóch faz nie wskazuje jednoznacznie na różnicę pomiędzy wtryskiwaczem sprawnym i niesprawnym chociaż, w większości wtryskiwaczy wartości odchylenia są niższe w przypadku sprawnych. Wartym głębszej analizy może być fakt bardzo wysokich wartości odchylenia standardowego w fazie II we wtryskiwaczach uszkodzonych. Porównując te dane z czasem trwania fazy II dla tych wtryskiwaczy widać, że jest ona najkrótsza z trzech badanych faz i wynosi około 0,18÷0,19 ms. W przypadku niepowodzenia w określeniu czasu trwania tej fazy w oparciu o kryterium podane na rys. 46 program podawał wartość ekstremalnie dużą by wyróżnić, że faza II nie została określona i był to czas 20 ms. Dlatego też, w zbiorze 60 pomiarów dla każdego wtryskiwacza część z nich miała czas drugiej fazy równy 20 ms co rzutowało na wyznaczoną wartość odchylenia standardowego.

Znamiennym parametrem jest współczynnik zmienności czasu trwania III fazy, którego wartość znacznie wzrasta w przypadku wtryskiwaczy uszkodzonych i <u>waha się w okolicy 45%.</u>

Dla wtryskiwaczy sprawnych <u>waha się on od 21% do 37%</u>. Wyjątek stanowi wtryskiwacz uszkodzony UU5, dla którego współczynnik zmienności przyjmuje ekstremalnie niską wartość, nawet niższą od wtryskiwaczy nowych. W celu ustalenia przyczyny tego wyniku należy porównać go z wykresem rys. 42, w którym to dla tego

wtryskiwacza współczynnik zmienności zdarzenia EA odpowiadającemu procesowi wtrysku jest najwyższy i wynosi 38% (podczas gdy dla sprawnych wtryskiwaczy wahał się on w zakresie 20% ÷ 25%). Kolejnym parametrem, który znacznie odbiega od pozostałych, jest wartość przelewu zmierzona na stole probierczym i tak dla przykładu na rysunku 20 wartość przelewu w określonych warunkach wyniosło 3 cm<sup>3</sup> dla sprawnych wtryskiwaczy, około 50 cm<sup>3</sup> dla niesprawnych i 100 cm<sup>3</sup> dla wtryskiwacza UU5. Analizując przytoczone parametry nasuwa się wniosek, że przelew z tego wtryskiwacza jest praktycznie stały i jego uszkodzenie generuje wyciek paliwa z komory sterującej w trakcie całego procesu wtrysku. Przyczyną jest przytarcie iglicy wtryskiwacza i brak typowych uderzeń tej iglicy w gniazdo podczas zakończenia procesu wtrysku. Stąd trudno jest powiązać ze sobą precyzyjnie czasy trwania fazy II, czyli spadku natężania sygnału, gdyż szum pochodzący z wycieku generuje falę sprężystą w materiale powodując rejestrację sygnału EA typu szumowego o podwyższonej amplitudzie.

W przypadku fazy I i III wtryskiwacza nr UU5 ze względu na stały wyciek, przyrząd diagnostyczny odczytuje w miarę stabilne sygnały, których odchylenie standardowe ma wyjątkowo niski rozrzut. Dlatego też w interpretacji wyników należy brać pod uwagę, że współczynnik zmienności III fazy poniżej 20% może świadczyć o niesprawności wtryskiwacza.

W celu wyznaczenia przedziału, w którym zawiera się oszacowana wartość wyznaczonego parametru (to jest np. czasu trwania III fazy) skorzystano z metody znajdowania przedziału ufności metodą rozkładu *t*-Studenta [69]:

- z wszystkich pomiarów III fazy wtryskiwaczy sprawnych wyznaczono wartość średnią czyli T = 0,632 ms;
- wyznaczono zmierzone (S = 0,16 ms) średnie odchylenie standardowe;
- ilość pomiarów k = 60;
- dla prawdopodobieństwa 0,95 i liczby pomiarów minus 1 z tablicy rozkładu
  *t*-Studenta (dla 59) uzyskano parametr:

$$t_{59}^{0.95} = 2,000$$

Zatem czas trwania III fazy wynosi:

$$T = 0,632 \pm (t_{59}^{0.95} S) / \sqrt{59}$$
$$T = 0,632 \pm 0,041 \text{ [ms]}$$

Celem sprawdzenia dokładności wyników III fazy dla mniejszej ilości prób wytypowano losowo zapisy z badań EA i podzielono na trzy grupy: 24, 15 i 6 zapisów, przy czym zapis oznacza jednorazowe wciśnięcie przycisku na około 1 sekundę w analizatorze EA i odczyt dwóch wtrysków. Dlatego też ilość pomiarów dla trzech grup z losowo wybranymi pomiarami będzie wynosiła i = 48 pomiarów (rys. 51), i = 30 pomiarów (rys. 52) oraz i = 12 pomiarów (rys. 53). Sam pomiar, po zamontowaniu czujnika, odbywa się w sposób bardzo szybki i wygodny.



Rys. 51. Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania III fazy dla k = 48



Rys. 52. Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania III fazy dla k = 30



Rys. 53. Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania III fazy dla k = 12
Analizując wykresy przedstawiające zestawienia współczynników zmienności  $\Delta$  pomiarów czasu trwania III fazy dla różnych ilości pomiarów można wnioskować, że w każdym z przypadków wartość powyżej 40% odnosiła się do wtryskiwaczy niesprawnych, oprócz wtryskiwacza UU5. Jednocześnie we wszystkich przypadkach wartość parametru  $\Delta$  nie przekroczyła 40% dla wtryskiwaczy sprawnych. Niemniej dla małej ilości pomiarów k = 12 wartości współczynnika zmienności zbliżyły się do siebie w przypadku sprawnych i niesprawnych wtryskiwaczy, gdyż np.  $\Delta$  = 39,6 % dla NN11 zaś dla UU6 wynosi  $\Delta$  = 40,2 %. Różnice te zwiększają się z ilością wzrostu pomiarów i dla wartości k = 60 wynoszą już ponad 7% pomiędzy maksymalnym współczynnikiem zmienności wtryskiwacza sprawnego i minimalnym wtryskiwacza niesprawnego.

Zapewnienie wiarygodności procedury oceny stanu wtryskiwaczy sprawny/niesprawny należy przeprowadzić przy założeniu, że ilość pomiarów nie powinna być mniejsza niż 30 co jest zgodne z wymogami zawartymi w [11, 41, 70] i stosunkowo łatwe do wykonania. W warunkach prowadzenia badań przy prędkości 1000 obr./min ilość wtrysków w ciągu 1 sekundy wynosiła 8. Oznacza to, że procedura zapisu sygnału źródłowego trwać będzie około 5 sekund, w przypadku gdyby silnik pracował na swojej najmniejszej prędkości obrotowej tzn. 800 obr/min. Taki czas jest bardzo krótki w realizacji, a w połączeniu z prostotą całego pomiaru dogodny w wykonaniu.

#### 5.3. Klasyfikacja sprawności wtryskiwaczy

W celu poprawnego sklasyfikowania sprawności wtryskiwaczy przeprowadzono analizę statystyczną wyników pomiaru czasu trwania III fazy sygnału EA zarejestrowanego w chwili maksymalnej aktywności wtryskiwacza.

#### 5.3.1 Analiza statystyczna wyników pomiarów

Na podstawie przeprowadzonych analiz teoretycznych stwierdzono, że niesprawność wtryskiwacza może wystąpić w przypadku zaburzenia pracy jednej z faz procesu wtrysku. W celu sklasyfikowania wtryskiwaczy na sprawne i niesprawne dokonano pomiarów czasów trwania I, II i III fazy sygnału Emisji Akustycznej (EA) w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza paliwa zasobnikowego układu wtryskowego. Do badań eksperymentalnych wytypowano 12 wtryskiwaczy

nieuszkodzonych i 6 wtryskiwaczy uszkodzonych (wielkość próby jest wystarczająca do analizy tego typu zależności zgodnie z wymogami przedstawionymi w [11, 41, 70]). Weryfikację wtryskiwaczy przeprowadzono dwoma metodami i opisano w rozdziale 3. wstępne badania wykazały, że najbardziej wrażliwą na wystąpienie niesprawności wtryskiwacza, jest faza III związana z procesem wtrysku. W związku z tym, na podstawie badań weryfikacyjnych wytypowano wtryskiwacze nieuszkodzone, w tym przypadku fabrycznie nowe oraz uszkodzone, których wartość przelewu paliwa z komory sterującej przekracza poziom graniczny określony przez producenta.

Określone zostały następujące zmienne:

- t czas trwania III fazy w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza w [ms];
- u uszkodzenie w skali nominalnej: 0-nie, 1-tak.

Na wstępie zostały wyznaczone parametry statystyczne w zakresie miar położenia oraz zmienności, przedstawia je tabela 10.

Czes trwenie III fezy	Wtryskiwacze						
Czas u wania ini iazy	wszystkie	nieuszkodzone	uszkodzone				
N ważnych	1080	720	360				
Minimum	0,5	0,5	0,5				
Maksimum	2	1,5	2				
Średnia geometryczna	0,64	0,63	0,68				
Średnia arytmetyczna	0,68	0,65	0,74				
Przedział ufności dla	0,67	0,64	0,71				
średniej (1-a = 0,95)	0,7	0,67	0,78				
Mediana	0,6	0,6	0,6				
Pierwszy kwartyl	0,5	0,5	0,5				
Trzeci kwartyl	0,8	0,8	0,9				
Moda	0,5	0,5	0,5				
Liczność mody	534	355	179				
Odchylenie standardowe	0,27	0,21	0,36				
Współczynnik zmienności	40%	32%	48%				

Tabela 10. Parametry statystyczne dla czasu trwania III fazy w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza w zależności od sprawności wtryskiwaczy

Z miar położenia dla zmiennej, analizowano czas trwania III fazy dla poszczególnych wtryskiwaczy. Z tabeli 10 wykazać można, że minimalne wartości nie różnią się, a maksymalne wartości różnią się (są mniejsze) tylko dla nieuszkodzonych wtryskiwaczy. Moda, czyli wartość najczęstsza czasu trwania nie różni się dla wtryskiwaczy uszkodzonych i nieuszkodzonych. Mediany i pierwsze kwartyle czasu trwania III fazy są takie same dla sprawnych i niesprawnych wtryskiwaczy, a trzeci kwartyl jest większy dla uszkodzonych wtryskiwaczy. Średnia geometryczna jest nieznacznie (o 0,05 s) większa dla uszkodzonych wtryskiwaczy. Średnia arytmetyczna natomiast i przedziały ufności dla średniej czasu trwania III fazy są znacząco większe (0,09 s) dla wtryskiwaczy uszkodzonych. Miary zróżnicowania czasu trwania III fazy, czyli odchylenie standardowe i współczynnik zmienności są większe dla uszkodzonych wtryskiwaczy. Podsumowując można stwierdzić, że średnia arytmetyczna oraz przedział ufności dla średniej czasu trwania sygnału EA wtrysku paliwa są zróżnicowane ze względu na sprawność (lub uszkodzenia) wtryskiwacza w III fazie pomiaru oraz większa jest zmienność czasu trwania III fazy, co przedstawiono na rysunkach 54 i 55.



Rys. 54. Średni czas trwania sygnału EA wtrysku paliwa w zależności od uszkodzenia.



Rys. 55. Ramkowy wykres średniego czasu trwania sygnału EA wtrysku paliwa w zależności od uszkodzenia.

Oznacza to zatem, że jeżeli wtryskiwacz jest nieuszkodzony, to czas trwania III fazy z prawdopodobieństwem 95% należy do przedziału (0,64 ms  $\div$  0,67 ms), natomiast jeżeli wtryskiwacz jest uszkodzony to czas trwania III fazy z prawdopodobieństwem 95% należy do przedziału (0,71 ms  $\div$  0,78 ms).

## 5.3.2. Analiza zależności sprawności wtryskiwaczy od czasu trwania III fazy w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza

Następnym etapem analizy było sprawdzenie, czy czas trwania sygnału zależy istotnie statystycznie od sprawności wtryskiwaczy. W tym celu wykorzystano metody analizy korelacji.

Analizowane zmienne mają charakter ilościowy - czas, dyskretny (skokowy) – faza, bądź jakościowy - uszkodzenie, a dla takich cech wyznaczono współczynnik korelacji Spearmana - oznaczany przez r.

Z kolei współczynnik korelacji Pearsona - oznaczany symbolem  $r_{XY}$  - dla zmiennych X i Y jest miernikiem siły zależności pomiędzy tymi zmiennymi. Oblicza się go według wzoru:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2}},$$

gdzie  $\bar{x}, \bar{y}$  są wartościami średnimi zmiennych X i Y, czyli  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$ ,  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i$ .

Ponadto przeprowadzone zostały testy istotności współczynników korelacji, które obejmowały:

1. Postawienie hipotezy zerowej, że dane zmienne są nieskorelowane, czyli

H<sub>0</sub> : r<sub>XY</sub>=0, wobec hipotezy alternatywnej,

że istnieje zależność pomiędzy tymi zmiennymi, czyli

 $H_1$ :  $r_{XY}$ ≠0,

- 2. Obliczenie statystyki sprawdzającej t według wzoru: t =  $\frac{r_{XY}}{\sqrt{1 r_{XY}}} \sqrt{n 2}$ ,
- 3. Wyznaczenie wartości krytycznej p, która dla poziomu istotności  $\alpha = 0.05$ .
- 4. Ocenę istotności współczynnika korelacji Pearsona:
  - jeżeli p≥α to brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy zerowe H<sub>0</sub>, czyli korelacja nieistotnie różni się od zera;
  - jeżeli p<α to odrzucamy hipotezę zerową H<sub>0</sub> na korzyść alternatywnej H<sub>1</sub>,
    i można przyjąć, że współczynnik korelacji istotnie różni się od zera.

Wyniki obliczeń współczynnika korelacji i graniczna wartość p przedstawione są w tabeli 11.

Tabela 11. Współczynnik korelacji Pearsona czasu trwania sygnału EA w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza i sprawności wtryskiwaczy.

Współczynnik korelacji czasu trwania sygnału EA	r	t(N-2)	р
Uszkodzenia	0,152	5,078	0,0000

Oznacza to, że czas trwania III fazy zależy statystycznie istotnie od sprawności wtryskiwacza (przy czym zależność ta jest słaba).

#### 5.3.3. Klasyfikacja sprawności wtryskiwaczy zależna od czasu trwania sygnału EA w chwili maksymalnej aktywności wtryskiwacza oraz jego fazy pracy

Następnym etapem badań jest określenie przedziałów średniego czasu trwania sygnału EA w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza dla uszkodzonych wtryskiwaczy i dla wtryskiwaczy nieuszkodzonych w III fazie pomiaru.

Posłużyła do tego metoda C&RT (wyczerpującego poszukiwania podziałów jednowymiarowych), która jest jedną z metod drzew klasyfikacyjnych [41-42]. Drzewa klasyfikacyjne wykorzystuje się do wyznaczania przynależności przypadków (obiektów) do klasy jakościowej zmiennej zależnej, na podstawie wartości jednej lub więcej zmiennych predykcyjnych. W odróżnieniu od metod wyboru podziału opartych na dyskryminacji, metoda wyczerpującego poszukiwania wykorzystuje przeszukiwanie sieciowe wszystkich możliwych kombinacji poziomów zmiennych predykcyjnych w celu odnalezienia najlepszego podziału. W przypadku tej metody poszukiwany jest podział, przy którym następuje największa poprawa dobroci dopasowania lub największa redukcja braku dopasowania. Przy doskonałym dopasowaniu otrzymamy czystą klasyfikację.

W badanym przypadku zmienną zależną jest zmienna uszkodzenia, która jest jakościowa (0 - nie ma uszkodzenia, 1 - jest uszkodzenie), natomiast zmienną predykcyjną jest średni czasy trwania wtrysku w fazie trzeciej. Wyniki klasyfikacji metodą C&RT zostały zaprezentowane na rysunku 56.



Rys 56. Struktura drzewa decyzyjnego uszkodzenia wtryskiwacza w zależności od średniego czasu trwania III fazy.

Widać, że średni czas trwania III fazy wynoszący 1,35 ms wyznacza dwa zbiory wtryskiwaczy – uszkodzone i nieuszkodzone, zostało to przedstawione również w tabeli 12.

Tabela 12.Reguły klasyfikacyjne wtryskiwaczy w zależności od czasu trwania sygnału EA w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza

Warunek dla średniego czasu III fazy	Prawdopodobieństwo			
t [ms]	P(U=0)	P(U=1)		
<=1,35	0,69	0,31		
>1,35	0,14	0,86		

Ocena trafności klasyfikacji określana "kosztem klasyfikacji" stanowi stosunek liczby przypadków trafnie zakwalifikowanych do liczby wszystkich przypadków i przedstawiona została w tabeli 13 oraz na rysunku 57.

Magiorz klasufikacji	Obserwowana wartość	Obserwowana wartość	Sumo	
	0-nieuszkodzony	1-uszkodzony	Sullia	
Przewidywana wartość	714	6	720	
0-nieuszkodzony	/14	0	720	
Przewidywana wartość	272	37	360	
1-uszkodzony	323	57	300	
Suma	1037	43	1080	
Procent trafności	69%	86%	77,50%	

Tabela 13. Porównanie ilości trafnych wskazań algorytmu drzewa klasyfikacyjnego

Dla wtryskiwaczy nieuszkodzonych wynik trafności wynosi 69%, a dla uszkodzonych 86%. Sumarycznie współczynnik trafności wynosi 77,5% jest to zatem dość duża jego wartość.



Rys. 57. Macierz klasyfikacji wskazująca trafność przyporządkowania do poszczególnych klas

Podsumowując, dokonano zarówno analizy statystycznej jak i analizy zależności czasu trwania III fazy sygnału EA w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza dla nieuszkodzonych i uszkodzonych wtryskiwaczy. Wyniki tych analiz pozwoliły ustalić, że czas trwania fazy trzeciej jest różny dla wtryskiwaczy uszkodzonych i nieuszkodzonych. To dało podstawy do zbadania, jaka jest to zależność i ustalenia reguł decyzyjnych dla klasyfikacji uszkodzonych i nieuszkodzonych wtryskiwaczy.

# **5.4.** Badanie relacji pomiędzy stanem wtryskiwaczy a deskryptorem w postaci funkcji gęstości widmowej sygnału EA

Jak podano [60-61] do identyfikacji wtryskiwaczy uszkodzonych klasycznego układu wtryskowego można zastosować deskryptor sygnału EA w postaci zależności funkcji gestości widmowej od czasu, zarejestrowanej w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza. Jak wspomniano wcześniej sam obraz akustogramu nie umożliwia wyżej wymienionej identyfikacji w przypadku badanych wtryskiwaczy. Możliwa przyczyna jest krótkotrwałość procesów zachodzących we wtryskiwaczu zasobnikowego układu wtryskowego (Common Rail). Cały okres trwania wtrysku to około 3 ms. W tym czasie następuje wtrysk wielofazowy w postaci przedwtrysku i wtrysku zasadniczego. Na akustogramie o rozdzielczości 0,5 ms widoczny jest obraz samego wtrysku, natomiast trudno zauważyć podział na fazy wtrysku. Dopiero analizując amplitudę sygnału w funkcji czasu lub zmiany gęstości widmowej w danym przedziale częstotliwości w funkcji czasu można zauważyć pewne prawidłowości. Jak podano na rys. 44 w okresie całego zdarzenia, w którym wtryskiwacz jest aktywny, można wytypować dwa segmenty, w których energia sygnału EA rośnie, tj. na początku i na końcu tego zdarzenia. Przeanalizowano więc wyżej wymienione funkcje wyznaczone dla różnych przedziałów częstotliwości w zakresie od 0 do 24 kHz. Ustalono, że dla częstotliwości ok. 6 kHz następuje wyraźny wzrost sygnału w postaci piku w początkowej fazie wtrysku, natomiast dla częstotliwości ok. 12 kHz ten pik przesuwa się o kilka milisekund w stronę końca zdarzenia. Zależności te przedstawiona na rysunku 58.



Rys. 58. Fragment funkcji czasowej gęstości widmowej dla tego samego wtrysku dla różnych częstotliwości a) 6080 Hz; b) 12160 Hz

Omówione wyżej wyniki świadczą, że w sygnale EA aktywnego wtryskiwacza, maksimum amplitudy może wystąpić w różnej chwili czasowej zależnej od zakresu częstotliwości analizowanego sygnału. W przypadku sygnału pokazanego na rys. 58 dla wartości 6080 Hz maksimum występuje w odległości 2 ms, zaś dla częstotliwości 12160 Hz w odległości 5 ms w stosunku do początku aktywności. Ta różnica 3 ms stanowi cały proces wtrysku, co opisano na początku rozdziału 5. Można więc wnioskować, że analizując maksima w funkcji czasowej gęstości widmowej dla wyróżnionej częstotliwości 6080 Hz będziemy wyznaczać parametr występujący w fazie I zaś dla wyróżnionej częstotliwości 12160 Hz w fazie III.

Według definicji gęstość widmowa [16] jest funkcją częstotliwości określoną w zbiorze liczb dodatnich rzeczywistych, która jest zbiorem widm realizacji procesu i przedstawiona jest w postaci mocy lub energii przypadającej na jednostkę częstotliwość. Przecinając funkcję czasową gęstości widmowej w danym punkcie, otrzymamy przebieg zbioru wartości energii w funkcji częstotliwości. Jak wykazały badania A. Bejgera [8, 15], określenie funkcji gęstości widmowej w maksimum aktywności wtryskiwacza daje różne wyniki w zależności od stanu technicznego

wtryskiwacza (uszkodzony/nieuszkodzony). Badania A. Bejgera prowadzono na wtryskiwaczach klasycznego układu wtryskowego silnika okrętowego.

Przedstawiony wyżej sposób analizy sygnału EA zastosowano do przebadania zapisów sygnałów będących przedmiotem niniejszej rozprawy. W tym celu wykorzystano sposób analizy opracowany przez A. Bejgera [5, 9] i oprogramowanie napisane w IPPT PAN o nazwie Auto Spectral Analyser, które wyznacza uśrednioną postać funkcji gęstości widmowej w chwili maksymalnej aktywności energetycznej wtryskiwacza. Oprogramowanie posiada możliwość zmiany częstotliwości filtra cyfrowego, który umożliwia określenie momentu maksymalnej aktywności wtryskiwacza.

W oknach programu, którego interfejs przedstawiono na rysunku 59, zaprezentowano częściowe wyniki jego działania, np. wyniki otrzymane dla kolejnych zapisów danych pomiarowych.



Rys. 59. Interfejs programu Auto Spectral Analyser

Przenalizowano wyniki zapisów Emisji Akustycznej wszystkich wtryskiwaczy dla całego zbioru pomiarów k = 60. Jak wynika z badań [5-12] minimalna liczba pomiarów niezbędna do wyznaczenia charakterystyki widmowej indykującą w sposób statycznie istotny wtryskiwacze sprawne i niesprawne wynosi 12. Otrzymany wynik prezentowany jest w formie wykresu w funkcji gęstości widmowej w chwili maksymalnej aktywności wtryskiwacza i ma postać jak na rysunku 60 i 61.



Rys.60. Gęstość widmowa - wtryskiwacz nowy NN1. Częstotliwość filtra określającego moment maksymalnej aktywności wtryskiwacza ustawiono na wartość 6080 Hz





Rys. 61. Gęstość widmowa - wtryskiwacz uszkodzony UU1. Częstotliwość filtra określającego moment maksymalnej aktywności wtryskiwacza ustawiono na wartość 6080 Hz

Analizując wykresy gęstości widmowej wyznaczonej przy ustawieniu filtra detekcji maksymalnej aktywności wtryskiwacza na częstotliwości 6080 Hz, występującej głównie w fazie I oraz 12160 Hz reprezentującą fazę III można zauważyć istotne różnice pomiędzy charakterystyką gęstości widmowej dla wtryskiwaczy nieuszkodzonych i uszkodzonych. Wyznaczono więc wartość średnią dla grupy wtryskiwaczy nowych i uszkodzonych (rys. 62÷65) z wyłączeniem wtryskiwacza UU5 (rys. 66), który jak wskazywały wcześniej opisane wyniki, ma odmienny charakter uszkodzenia.



Rys. 62. Uśrednione wartości gęstości widmowej dla zbioru wtryskiwaczy nowych NN1 ÷ NN12 i częstotliwości 12160 Hz



Rys. 63. Współczynnik zmienności uśrednionych wartości gęstości widmowej dla zbioru wtryskiwaczy nowych NN1 ÷ NN12 i częstotliwości 12160 Hz



Rys. 64. Uśrednione wartości gęstości widmowej dla zbioru wtryskiwaczy uszkodzonych UU1 ÷ UU6 z wyjątkiem UU5 i częstotliwości 12160 Hz



Rys. 65. Współczynnik zmienności uśrednionych wartości gęstości widmowej dla zbioru wtryskiwaczy uszkodzonych UU1 ÷ UU6 z wyjątkiem UU5 i częstotliwości 12160 Hz



Rys. 66. Wartość gęstości widmowej wtryskiwacza uszkodzonego UU5 i częstotliwości 12160 Hz

Wtryskiwacze nieuszkodzone na wykresie gęstości widmowej uzyskanego przy ustawieniu filtra detekcji na częstotliwości 12160 Hz mają widoczne dwa maksima, przy czym amplituda drugiego jest wyższa od pierwszego i występuje w zakresie 11÷12 kHz. Dla tego zakresu, odchylenie standardowe wynosi około 5%. Nieco odmienna sytuacja jest na wykresach wtryskiwaczy uszkodzonych, dla których wyodrębnić można trzy wyraźne i malejące maksima, w których pierwsze największe, występuje w zakresie ok. 6 kHz. Tutaj również odchylenia standardowe jest na niskim poziomie bo w zakresie 2%. Nasuwa się więc wniosek, że analizując kształt wartości gęstości widmowej na podstawie odczytanych ilości maksimów oraz miejsca największego maksima odpowiednio występowania można z dużym prawdopodobieństwem typować stan wtryskiwacza. Odmienny kształt krzywej wyznaczony został dla wtryskiwacza UU5 niemniej zachowana jest cecha jak dla wtryskiwaczy uszkodzonych, tzn. taka, że pierwsze maksimum jest o najwyższej amplitudzie i występuje w okolicach 6 kHz.

## **PODSUMOWANIE I WNIOSKI**

Z uwagi na coraz bardziej restrykcyjne podejście europejskich i światowych komisji ds. ochrony środowiska, spodziewać się należy, że rozwój każdego systemu podwyższającego trafność diagnozy dotyczącej niesprawności elementów silnika o zapłonie samoczynnym (w szczególności związanego z jego układem wtryskowym i procesem spalania), będzie obiektem zainteresowań zarówno wyspecjalizowanych serwisów naprawczych jak też firm produkujących silniki. Przedstawiona praca stanowi syntezę teoretycznych i praktycznych badań nad wykorzystaniem fal sprężystych Emisji Akustycznej do diagnozowania wtryskiwaczy silników z zasobnikowym układem wtryskowym.

W pracy zaproponowano m.in. algorytm, za pomocą którego możliwe byłoby wyznaczenie stanu technicznego rozpatrywanych wtryskiwaczy. Stwierdzono, że sygnał w postaci fal sprężystych Emisji Akustycznej, pozwala na precyzyjne określenie zmiany fazowości procesu wtrysku. Powiązano to z pracą konkretnych elementów układu, a jednocześnie z ich ewentualną niesprawnością lub zbliżeniem się do stanu granicznego pracy danego elementu. Zastosowanie proponowanej metody (przy założeniu, że jeden wtryskiwacz jest uszkodzony) pozwala zredukować koszty naprawy układu wtryskowego o ok. 80%. Aktualnie prowadzone są prace nad komercjalizacją a także przemysłowym wykorzystaniem aparatury oraz wypracowanych i omówionych w przedstawionej rozprawie algorytmów.

Z przeprowadzonych rozważań teoretycznych oraz badań eksperymentalnych wynikają następujące wnioski:

#### Wnioski utylitarne

- Pracujące wtryskiwacze zasobnikowego układu wtryskowego silników o zapłonie samoczynnym, są źródłem sygnału Emisji Akustycznej.
- Istnieje możliwość określenia i zakwalifikowania wtryskiwaczy do jednej z dwóch klas stanu technicznego: 0 – nieuszkodzony, 1 - uszkodzony.
- Istnieje sygnał źródłowy Emisji Akustycznej odzwierciedlający fazowość procesów zachodzących w pracujących wtryskiwaczach układu zasobnikowego (Common Rail).

- Istnieje zależność określonych parametrów sygnału EA od stanu wtryskiwacza (0 nie ma uszkodzenia; 1 jest uszkodzenie).
- 5. Istnieje możliwość określenia czasów trwania poszczególnych faz pracy wtryskiwacza w sygnale generowanym podczas wtrysku paliwa.

#### Wnioski szczegółowe

- 1. Analiza sygnału EA w dziedzinie czasu, pozwala identyfikować niewielkie uszkodzenia wtryskiwaczy pracujących na silniku bez obciążenia.
- 2. Analiza sygnału EA w dziedzinie częstotliwości może wskazać różnice w sygnałach z wtryskiwaczy zarówno pracujących na silniku bez jak i pod obciążeniem natomiast nie jest możliwa identyfikacja źródła i typu uszkodzenia wtryskiwacza.
- 3. Na podstawie analizy przebiegu sygnału Emisji Akustycznej w trakcie procesu wtrysku, można wytypować tzw. <u>sektory pracy wtryskiwacza:</u>
  - sektor A wtryskiwacz nie pracuje, stałe ciśnienie w komorze sterującej i komorze rozpylacza, cewka nie jest pobudzona i wtryskiwacz jest gotowy do pracy;
  - sektor B pobudzenie cewki wtryskiwacza, wznios kotwicy i odpływ paliwa z komory sterującej, w dalszej kolejności wznios iglicy wtryskiwacza i rozpoczęcie procesu wtrysku;
  - sektor C sterownik wyłącza sygnał prądowy do cewki, zamykanie dlawika odpływu i początek procesu wyrównania ciśnienia w komorze sterującej;
  - sektor D dławik odpływu komory sterującej pozostaje zamknięty przez kotwicę.
- 4. Statystyczne ujęcie średniego czasu trwania III fazy, pozwala na określenie w sensie dwustanowym (dobry uszkodzony) stanu wtryskiwacza.
- 5. Analiza czasu trwania II fazy nie może być stosowana do klasyfikowania wtryskiwaczy na sprawne i niesprawne, ale może stanowić dodatkową informację, że zapis sygnału EA w zakresie tej fazy zawiera niestabilności sygnału, które uniemożliwiają wyznaczenie przesunięcia (czasu trwania) tej fazy.
- 6. W przypadku uszkodzenia wtryskiwacza w postaci zatarcia iglicy, po zakończenia procesu wtrysku następuje zanik uderzenia tej iglicy o gniazdo. Wyciek paliwa powoduje, że w materiale generowana jest w fala sprężysta EA typu szumowego o znacznie podwyższonej amplitudzie.\*

- 7. Istnieją charakterystyczne poziomy częstotliwości, dla których amplituda gęstości widmowej w funkcji częstotliwości przyjmuje obraz krzywej o różnym kształcie zależnym od stanu wtryskiwaczy (nieuszkodzony/uszkodzony):
  - a. Przy ustawieniu filtra na częstotliwości 12160 Hz w programie Auto Spectral Analyser w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza, podczas badania wtryskiwaczy nieuszkodzonych widoczne są na wykresie dwa maksima, przy czym amplituda drugiego jest wyraźnie wyższa i występuje ona w zakresie częstotliwości bliskich 11-12 kHz;
  - b. Przy ustawieniu filtra detekcji na częstotliwości 12160 Hz podczas badania wtryskiwaczy uszkodzonych widoczne są trzy malejące maksima amplitudowe, przy czym pierwsze najwyższe występuje w okolicy 6 kHz.

\* Ten typ uszkodzenia został zidentyfikowany we wtryskiwaczu UU5.

## LITERATURA

- Albarbar A., Gu F., Ball A.D., Starr A.: Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques. Applied Acoustics 71 (2010) 1132–1141.
- Albarbar A., Gu F., Ball A.D.: Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis. Measurement 43 (2010) 1376-1386, Elsevier.
- 3. Ambrozik A., Ambrozik T., Kruczyński S., Orliński S.: *Wpływ właściwości paliw mineralnych i roślinnych na prędkość narastania ciśnienia w przewodzie wtryskowym i emisję akustyczną wtryskiwacza*. Motrol, 2007, 9, 7-14.
- Barczewski R., Szymański G.: Zastosowanie selekcji czasowo widmowej sygnału drganiowego do oszacowania luzów zaworów silnika spalinowego o ZS. 3rd International Congress of Technical Diagnostic. Poznań 2004.
- Bejger A.: Diagnostyka wtryskiwaczy z wykorzystaniem Emisji Akustycznej. Rozprawa Doktorska, Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Szczecin 2000.
- 6. Bejger A.: Praktyczne możliwości wykorzystania sygnałów Emisji Akustycznej w siłowni okrętowej. Biuletyn WAT Nr 5(621) 2004.
- Bejger A.: Alternative Research Metod for the Marine Engine Injection System. Scientific Journals Maritime University of Szczecin Nr 5(77) 2005.
- 8. Bejger A.: The possibilities of diagnosing common-rail injection systems of marine diesel engines. Journal of Polish CIMAC, Vol. 6, No. 2, Gdańsk 2011.
- Bejger A.: Zastosowanie fal sprężystych Emisji Akustycznej do diagnozowania układów wtryskowych okrętowych silników spalinowych. Wydawnictwo Fotobit, Kraków 2012.
- Bejger A.: An application of the coherence function in diagnosing marine engine injection pumps. Archives of Mechanical Technology and Automation, Vol. 32 Nr 4/2012.
- Bejger A., Berczyński S.: A probabilistic analysis of failure occurrence in diesel engine injection system components Archives of Mechanical Technology and Automation. Vol. 32 Nr 2/2012.

- Bejger A., Burnos T.: Możliwość wykorzystania analizy czasowoczęstotliwościowej dla wybranych sygnałów Emisji Akustycznej. Scientific Journals Maritime University of Szczecin 5(77) 2005.
- Bejger A., Gawdzińska K., Berczyński S.: Application of the Pareto analysis for the description of faults and failures of marine medium power engines. Archives of Mechanical Technology and Automation, Vol. 32 Nr 3/2012.
- Bejger A., Mazuruk P.: Praktyczne sposoby wykrywania niesprawności układów wtryskowych silników Common-Rail. Nadieżnost i Efiektiwnost Tiechniczieskich Sistiem. Mieżdunarodnyj Sbornik Trudow. Kaliningrad 2009. ISBN 978-5-94826-245-1.
- 15. Bruel&Kjaer Product Data, Piezoelectric Accelerometer, Charge Accelerometer - Type 4371, 4371S and 4371V, BP 2036-12, 05/06.
- Brzózka J.: *Regulatory i układy automatyki*. Warszawa: Wydawnictwo Mikom, 2004, s. 35-38.
- Centrum Szkolenia Motoryzacji "Autoelektronika Kędzia": Budowa, funkcjonowanie i remonty systemów sterowania elektronicznego silników Diesla. Materiały Szkoleniowe z kursu. Poznań 2010.
- Chad Koci: The Effect of High Injection Pressure and Multi-Injection Common Rail Systems on Diesel Emissions. Report EPD 397 MTR – Spring 2006.
- Czechyra B., Szymański G.M., Tomaszewski F.: Ocena luzu zaworów silnika spalinowego w oparciu o parametry drgań – założenia metodyczne. Silniki Spalinowe nr 1/2004 (118).
- Delphi: Delphi F2r Ultra High Pressure Heavy Duty Diesel Common Rail System; <u>http://delphi.com/shared/pdf/ppd/cv/pwrtrn/f2r-ultra-high-pressure-heavy-duty-diesel-common-rail-system.pdf</u>. 2013.
- 21. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego 2003/44/EC z dn. 16 czerwca 2003.
- 22. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego 97/68/EC z dn. 16 grudnia 1997.
- 23. Dziennik Ustaw 2005.202.1681 z dn. 19.08.2005.
- 24. Elamin F., Fan Y., Gu F., Ball A.: Detection of Diesel Engine Injector Faults Using Acoustic Emissions. COMADEM 2010: Advances in Maintenance and Condition Diagnosis Technologies towards Sustainable Society, 28th June-2nd July 2010, Nara, Japan. (Unpublished).
- 25. Elamin F., Fan Y., Gu F., Ball A.: *Diesel Engine Valve Clearance Detection Using Acoustic Emission.* School of Computing and Engineering, University of

Huddersfield, Advances in Mechanical Engineering, Volume 2010, Article ID 495741.

- 26. Elamin F., Gu F., Ball A.D.: Diesel Engine Injector Faults Detection Using Acoustic Emissions Technique. School of Computing and Engineering, University of Huddersfield. Modern Applied Science. Vol. 4, No. 9; September 2010, 3-13.
- 27. Elamin F., Gu F., Ball A.D.: Online Monitoring of Engine Oil Quality Based on AE Signal Analysis. Computing and Engineering Researchers' Conference, University of Huddersfield, 2010.
- El-Ghamry M., Steel J.A., Reuben R.L., Fog T.L.: Indirect measurement of cylinder pressure from diesel engines using acoustic emission. Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 751-765, Elsevier.
- Gładysek J.: Common Rail Bosch III Generacja, Diagnostyka systemów CR. Materiały szkoleniowe z kursu. Kraków 2009.
- 30. Greuter E., Zima S.: Engine Failure Analysis. Internal Combustion Engine Failures and Their Causes. SAE International ISBN 978-7680-0885-2. 2012.
- 31. Gűnter H.: *Diagnozowanie silników wysokoprężnych*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Wydanie 3, Warszawa, 2009.
- Günter H.: Układy wtryskowe Common Rail w praktyce warsztatowej, Budowa, sprawdzanie, diagnostyka. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Wydanie 1, Warszawa, 2010.
- 33. Holroyd T., Machine & Systems Condition Monitoring Series. Acoustic Emission & Ultrasonics. Coxmoor Publishing Company's, Oxford UK, 2000.
- ISO/DIS 22096 Condition monitoring and diagnostics of machines Acoustic emission. Stage: <u>90.93</u> (2010-12-20).
- 35. Kabiri P., Makinezhad A.: Using PCA in Acoustic Emission Condition Monitoring to Detect Faults in an Automobile Engine. EWGAE 2010.
- 36. Karczewski M., Koliński K.: Diagnostyka wtryskiwaczy układu common rail na podstawie pomiarów ciśnienia w zasobniku. Zeszyty Naukowe, WSOWL Nr 1(159) 2011.
- 37. Kim J. K., Cheo Lee M. L.: Real-Time Diagnostic System Using Acoustic Emission for a Cylinder Liner in a Large Two- Stroke Diesel Engine. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009, Vol. 10, No. 3, 51-58.

- Klinchaeam S., Nivesrangsan P., Lokitsangthong M.: Condition Monitoring of a Small Four-stroke Petrol Engine using Vibration Signals. KMITL Sci. Tech. J. Vol. 9 No. 1 Jan. - Jun. 2009.
- 39. Klyus O, Michalski R., Tilipałow W., *Procesy naprawy maszyn teoria i praktyka*, 2002, KEPiM, Olsztyn-Kaliningrad.
- 40. Lowe D. P., Wu W., Tan A.C.C.: Experimentally induced diesel engine injector faults and some preliminary acoustic emission signal observations. In World Congress on Engineering Asset Management, October 2011, Cincinnati, USA. 3-5.
- 41. Luszniewicz A., Słaby T.: Statystyka z pakietem komputerowym STATISTICA PL. Teoria i zastosowania. Wydawnictwo C.H.Beck, 2008.
- 42. Łapczyński M.: Drzewa klasyfikacyjne i regresyjne w badaniach marketingowych. Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, 2010.
- Macian V., Payri R, Tormos B., Montoro L.: Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systems. Wear 260 (2006) str. 562-566.
- 44. Madej H.: Diagnozowanie uszkodzeń mechanicznych silników spalinowych metodami wibroakustycznymi. Przegląd Mechaniczny Rok Wyd. LXVII -ZESZYT 1/2008.
- 45. Mazuruk P., badania własne niepublikowane.
- 46. Mazuruk P.: Diagnostyka wtryskiwaczy Common Rail z wykorzystaniem emisji akustycznej. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów. Politechnika Warszawska. Zeszyt 1(87)/2012.
- Matuszak Z. Sposób oceny stanu technicznego urządzeń siłowni okrętowej. Materiały XIII Międzynarodowego Sympozjum Siłowni Okrętowych, Gdynia 1991, s. 129-137.
- 48. Murawin B.: Acoustic Emission Method. History. Fundamentals. Applications. www.muravin.com.
- Nivesrangsan P., Steel J.A., Reuben R.L.: Acoustic emission mapping of diesel engines for spatially located time series—Part II: Spatial reconstitution. Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007) 1084–1102.
- 50. Olszowski S., Marczak M.: *Diagnostics of new generation diesel engines*. Diagnostyka 4(48)/2008.

- 51. Olszowski S.: Zaawansowane technologie informatyczne w diagnozowaniu stanu silników o zapłonie samoczynnym z układem Common Rail. Monografia CR, 2009.
- 52. Piętak A.: *Systemy współczesnego diagnozowania silników spalinowych*. Journal of Kones. Internal Combustion Engines. Vol 7, No 1-2.2000.
- 53. PN-EN 1330-9 Badania nieniszczące część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną.
- 54. PN-N-04000:1980P Niezawodność w technice Terminologia. Norma zastąpiona PN-N-50191:1993 Słownik terminologiczny elektryki Niezawodność, jakość usługi.
- 55. PN-N-04001:1982P Eksploatacja obiektów technicznych Terminologia ogólna. Norma wycofana bez zastąpienia.
- 56. PN-N-04002:1990P *Diagnostyka techniczna* Terminologia ogólna. Norma wycofana bez zastąpienia.
- 57. Praca zbiorowa pod red. I. Maleckiego i J. Ranachowskiego, *Emisja Akustyczna*. Źródła, metody, zastosowanie. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 1994.
- 58. Praca zbiorowa: Zasobnikowe układy wtryskowe Common Rail. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Sp. z o.o., Wydanie 2 rozszerzone, Warszawa 2009. ISBN 978-83-206-1745-0.
- 59. Ranachowski Z. *Metody pomiaru i analiza sygnału Emisji Akustycznej*. Prace IPPT PAN, 1/1997.
- 60. Ranachowski Z., Bejger A.: Application of light weight acoustic emission analyser for diagnostic of the fuel injection system of medium power marine diesel engines. Polish Journal of Environmental Studies, 2009, Tom 18, Nr 2A Supplement.
- 61. Ranachowski Z.: *Emisja akustyczna w diagnostyce obiektów technicznych*. Drogi i Mosty 2/2012 str. 151-174.
- 62. Ranachowski Z.: *Metody pomiaru i analiza sygnału Emisji Akustycznej*. Prace IPPT. 1/1997. Warszawa 1997.
- 63. Ranachowski Z., Pawełek A., Jasieński Z., Piątkowski A., Kudela S., Lewandowski M., Mazuruk P.: Durability and wear of engine parts – new methods of testing of alloys and composites. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie. 2013, 35(107).

- 64. Raunmiagi Z., Ranachowski Z.: Laboratoryjna metoda oceny stanu stożkowego węzła tribologicznego rozpylaczy spalinowych silników okrętowych. MOTROL, 2009, 11c, 165-169.
- 65. Raunmiagi Z.: Ocena stanu stożkowej powierzchni iglicy i gniazda rozpylaczy paliwa silników okrętowych z wykorzystaniem Emisji Akustycznej. Rozprawa Doktorska, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk, Gdańsk, 2012.
- 66. Roberts Ch. E., Stovell Ch., Rothbauer R., Metha D.: Advancement in diesel combustion system design to improve the Smoke-BSFC Tradeoff. International Journal of Automotive Engineering 2 (2011).
- 67. Robertson A.I.F., Douglas R.M., Nivesrangsan P., Brown E.R., Steel J.A., Reuben R.L.: Source identification using acoustic emission on large bore cylinder liners. School of Engineering and Physical Sciences, Heriot Watt University, Edinburgh, UK. DGZfP-Proceedings BB 90-CD, Lecture 65, EWGAE 2004, 637-643.
- 68. Rollbusch C.: Effects of hydraulic nozzle flow rate and high injection pressure on mixture formation, combustion and emissions on a single-cylinder DI lightduty diesel engine. International Journal of Engine Research August 2012 13: 323-339.
- 69. Rumszyski L. Z.: Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu. WNT, Warszawa 1973.
- 70. Sobczyk M.: Statystyka. Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., 2012.
- 71. Tomaszewski F.: Zagadnienia wyznaczania stanu technicznego złożonego obiektu mechanicznego za pomocą sygnału wibroakustycznego: na przykładzie silnika spalinowego pojazdu szynowego. Rozprawa habilitacyjna. Politechnika Poznańska 1998.
- 72. Wajand J.A., Wajand J.T.: *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe*.
  Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Wydanie czwarte zmienione, Warszawa 2005.
- 73. Wielligh AJ., Burger NDL, Vaal PL.: Diesel injector failures and the consequences – caused by fuel quality – case studies. International Conference of the South African Institute of Tribology. 2004.

- 74. Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J.: A comparative analysis of diesel fuel injection parameters in piezoelectric and electromagnetic fuel injectors. Polskie Towarzystwo Naukowe Silników Spalinowych, PTNSS-2009-SS3-C089.
- 75. Wu J-D., Chuang Ch-Q.: Fault diagnosis of internal combustion engines using visual do patterns of acoustic and vibration signals. NDT & E International, Vol. 38 Issue Nr 8, 2005, 605-614.
- 76. Wu W., Tan A.C.C., Kim E.Y.H.: Enhancing acoustic emission signals from multi-cylinder diesel engine. 6th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 6 12-15 December 2010, Perth, Australia.
- 77. Żółtowski B., Ćwik Z.: Leksykon Diagnostyki Technicznej. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1996.
- 78. http://en.wikipedia.org/wiki/JTD engine
- 79. http://steldiesel.ru/files/crdensoservismanual.pdf
- 80. http://dpgo.ru/article/2012-05-24/diagnostika-dizelya-ot-hartridge
- 81. http://www.ifleet.co.za/pages/injector\_failure.htm

## Załącznik 1

Przykładowe zdjęcia maszyn, w których zastosowany jest spalinowy silnik przemysłowy



Rys. 1, I. Przykłady maszyn, w których zastosowany jest spalinowy silnik przemysłowy: a)÷b) napęd główny jednostki pływającej; c) rozdrabniacz odpadów; d) kruszarka minerałów



Rys. 1. II. Przykłady maszyn, w których zastosowany jest spalinowy silnik przemysłowy: e) agregat prądotwórczy; f) układarka mas bitumicznych; g) równiarka; h) spycharko-koparka; i) wiertnica; j) ładowarka teleskopowa.

## Załącznik 2



Procentowy udział uszkodzeń układów funkcjonalnych przemysłowego silnika o zapłonem samoczynnym

Rys. 1. Procentowy udział uszkodzeń układów funkcjonalnych przemysłowego silnika o zapłonie samoczynnym [badania własne]

## Załącznik nr 3

# Wytyczne dotyczące ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych silników spalinowych przemysłowych wg DYREKTYWY 97/68/WE

Kategoria: Moc netto (P) [kW]	Tlenek węgla (CO) [g/kWh]	Suma węglowodorów i tlenków azotu (HC+NO <sub>X</sub> ) [g/kWh]	Cząstki stałe (PT) [g/kWh]
$130 \text{ kW} \le P \le 560 \text{ kW}$	3,5	4,0	0,2
$75 \text{ kW} \le P \le 130 \text{ kW}$	5,0	4,0	0,3
$37 \text{ kW} \le P \le 75 \text{ kW}$	5,0	4,7	0,4
$19 \text{ kW} \le P \le 37 \text{ kW}$	5,5	7,5	0,6

Tabela 1. Normy emisji Stage IIIA dla silników przemysłowych innych niż w jednostkach pływających śródlądowych i morskich, lokomotywach kolejowych [21]

Tabela 2. Normy emisji Stage IIIB dla silników przemysłowych innych niż w jednostkach pływających śródlądowych i morskich, lokomotywach kolejowych [21]

Kategoria: Moc netto	Tlenek węgla	Węglowodory	Tlenki azotu	Cząstki stałe
(P)	(CO)	(HC)	$(NO_X)$	(PT)
[kW]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
$130 \text{ kW} \le P \le 560 \text{ kW}$	3,5	0,19	2,0	0,025
$75 \text{ kW} \le P \le 130 \text{ kW}$	5,0	5,0 0,19		0,025
$56 \text{ kW} \le P \le 75 \text{ kW}$	5,0	0,19	3,3	0,025
		Suma węglo i tlenków azot [g/kW		
$37 \text{ kW} \le P \le 56 \text{ kW}$	5,0	4,7	0,025	

Tabela 3. Normy emisji spalin dla silników morskich [21]

Тур	Tlenek węgla CO A+B/P <sub>N</sub> <sup>n</sup> [g/kWh]			Węgl	owodor A+B/P <sub>N</sub> <sup>i</sup> [g/kWh]	y HC	Tlenek azotu NO <sub>X</sub>	Cząstki stałe PT	
	А	В	n	А	В	n	[g/ K W II]	[g/ K W II]	
Wysokoprężne	5,0	0	0	1,5	2,0	0,5	9,8	1,0	
Gdzie A, B i n s	ą stałym	i zgodn	ie z tab	elą z no	rmy EN	ISO 81	178-1:2006, P <sub>N</sub> je	est znamionową	
mocą silnika mierzoną w [kW] zaś emisja spalin mierzona zgodnie z harmonizowanymi									
standardami (norma EN ISO 8178-1:2006)									

Zakres mocy	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015 i dalej		
P [kW]	Silniki przemysłowe maszyn mobilnych												
$19 \le P \le 37$	Stage	e II					Stage	III A					
$37 \le P \le 56$	St	tage II		Stage			А	A			Stage III B		
$56 \le P \le 75$	St	tage II	Stage III A				St	age III	В	Stage IV			
$75 \le P \le 130$	Stage	e II		Stage III A				Stage III B			Stage IV		
$130 \le P \le 560$	Stage II		St	Stage III A			St	Stage III B		S	Stage IV		
	Si	lnik pr	zemys	łowe n	naszyn	stacjoi	narnyc	h (agre	gaty p	rądotw	órcze)		
$19 \le P \le 37$	Bez n	orm		Stag	ge II			Stage III A					
$37 \le P \le 75$	Bez n	orm		Stage II			Stage III A			А			
$75 \le P \le 130$	Bez n	orm	Stage II				Stage III A						
$130 \le P \le 560$	Bez n	orm		Stag	ge II		Stage III A						

Tabela 4. Okresy obowiązywania poszczególnych okresów z Dyrektywy 2004/26/EC – opracowanie własne

## Załącznik 4



Zastosowanie zasobnikowego układu wtryskowego w silnikach spelniających normy emisji spalin Stage 3A

Rys. 1. Zastosowanie zasobnikowego układu wtryskowego w silnikach z Stage IIIA [opracowanie własne z 2012 roku]

## Załącznik 5

# Opis przenośnego analizatora Emisji Akustycznej z rejestracją na karcie SD, użytego do przeprowadzenia pomiarów w niniejszej rozprawie

Przenośny analizator Emisji Akustycznej zbudowany w IPPT PAN w Warszawie jest przeznaczony do diagnostyki elementów układu paliwowego silników o zapłonie samoczynnym. Przyrząd waży ok 2 kg i ma wymiary 250 X 110 X 60 mm. Został zaprojektowany do współpracy z akcelerometrem firmy Bruel & Kjaer typu 4371, który pobudzony przyśpieszeniem 1 g generuje napięcie 8 mV. Skala wykresów czasowych w oprogramowaniu została wykonana w jednostkach przyspieszenia rejestrowanych na wejściu przyrządu z uwzględnieniem trzech nastaw wzmocnienia. Zakres mierzonych przyspieszeń, dobrany doświadczalnie wynosi 0 ÷ 200 g z maksymalną rozdzielczością 0,1 g. Analizator jest wyposażony w baterię akumulatorów umożliwiających mu nieprzerwaną pracę przez maksymalnie 10 godzin oraz zewnętrzną ładowarkę. Transmisja zarejestrowanych wyników pomiaru do komputera wyposażonego w system WINDOWS wydań XP, 2000, ME, 7 odbywa się przez złącze MINI USB.



Rys. 1. Płyta czołowa analizatora

Na płycie czołowej przyrządu znajduje się przycisk rozpoczęcia rejestracji sygnału, który trwa automatycznie przez 500 ms. Natężenie oświetlenia białej diody LED wskazuje na poziom rejestrowanego sygnału, zaś działanie czerwonej diody LED oznacza proces zapisu. Na cyfrowym wyświetlaczu znajdują się informacje dotyczące procesu rejestracji sygnału, kolejnego numeru pomiaru, procesu wysyłania danych, gotowości urządzenia itd.

Panel boczny zawiera złącza mini USB, złącze ładowarki, przycisk RESET służący do przełączania z trybu zapisu na tryb przesyłania danych, złącze do przewodu czujnika oraz włącznik główny zasilania.

Przed rozpoczęciem pracy należy naładować akumulatory analizatora, których praca po naładowaniu wystarczy na kilka godzin eksploatacji. Następnie należy po podłączeniu analizatora do komputera wyczyścić wszelkie zapisane dane. Kolejne pliki rejestrowane przez analizator oznaczane są jako tekstowe w formacie test0000.txt. Aby przeprowadzić pomiar należy:

- podłączyć przewód wraz z czujnikiem do analizatora;
- umieścić czujnik w miejscu pomiaru;
- włączyć zasilanie, odczekać kilka sekund na pojawienie się komunikatu na wyświetlaczu o gotowości analizatora do pracy poprzez wyświetlenie komunikatu PRESS SW1;
- przycisnąć włącznik startu pomiaru i przytrzymać ok. 3 sekund;
- koniec procedury zapisu danych jest sygnalizowany przez wyświetlenie nazwy zapisanego pliku i ponowne wyświetlenie komunikatu PRESS SW1.

Po przeprowadzeniu serii pomiarów należy zapisać uzyskane pliki na komputerze poprzez podłączenie przewodu transmisji danym do złącza MINI USB.

## Załącznik 6

### Wyniki badań wtryskiwaczy na stole probierczym

	Szerokość	Ilość	Dawka wtry	Dawka wtrysku w ml Przelew w ml Pom			Przelew w ml			ar w ml
Ciśnienie	impulsu w μs	wtr/min	Wzorcowa	Min	Max	Wzorcowa	Min	Max	Dawka	Przelew
230	0,5	200	0	0	0	3	1	5	0	50
300	0,5	400	0	0	0	11	7	14	0	70
300	1,0	700	22	20	26	16	12	18	16	74
400	1,0	700	29	25	34	20	17	23	26	88
400	1,0	1000	38	35	42	30	27	33	32	96
500	0,5	500	9	7	12	22	19	25	6	104
500	1,0	500	28	25	32	22	19	25	24	100
500	0,8	800	30	28	34	28	25	31	26	100
450	1,0	1000	46	42	48	34	31	37	36	96

Tabela. 1. Wyniki badań objętości wtrysku i przelewu paliwa w urządzeniu pomiarowym – wtryskiwacz UU1

Tabela. 2. Wyniki badań objętości wtrysku i przelewu paliwa w urządzeniu pomiarowym – wtryskiwacz UU2

	Szerokość	Ilość	Dawka wtry	/sku w	/ ml	Przelew	w ml		Pomia	ar w ml
Ciśnienie	impulsu w μs	wtr/min	Wzorcowa	Min	Max	Wzorcowa	Min	Max	Dawka	Przelew
230	0,5	200	0	0	0	3	1	5	0	52
300	0,5	400	0	0	0	11	7	14	0	72
300	1,0	700	22	20	26	16	12	18	14	75
400	1,0	700	29	25	34	20	17	23	22	88
400	1,0	1000	38	35	42	30	27	33	30	96
500	0,5	500	9	7	12	22	19	25	6	110
500	1,0	500	28	25	32	22	19	25	22	98
500	0,8	800	30	28	34	28	25	31	22	116
450	1,0	1000	46	42	48	34	31	37	34	100
	Szerokość	Ilość	Dawka wtry	/sku w	/ ml	Przelew	w ml		Pomia	ar w ml
-----------	-----------------	---------	------------	--------	------	----------	------	-----	-------	---------
Ciśnienie	impulsu w μs	wtr/min	Wzorcowa	Min	Max	Wzorcowa	Min	Max	Dawka	Przelew
230	0,5	200	0	0	0	3	1	5	0	52
300	0,5	400	0	0	0	11	7	14	0	50
300	1,0	700	22	20	26	16	12	18	0,5	62
400	1,0	700	29	25	34	20	17	23	1	62
400	1,0	1000	38	35	42	30	27	33	6	68
500	0,5	500	9	7	12	22	19	25	2	70
500	1,0	500	28	25	32	22	19	25	8	78
500	0,8	800	30	28	34	28	25	31	8	70
450	1,0	1000	46	42	48	34	31	37	12	76

Tabela. 3. Wyniki badań objętości wtrysku i przelewu paliwa w urządzeniu pomiarowym – wtryskiwacz UU3

Tabela. 4. Wyniki badań objętości wtrysku i przelewu paliwa w urządzeniu pomiarowym – wtryskiwacz UU4

	Szerokość Ilość		Dawka wtrysku w ml			Przelew	Pomiar w ml			
Ciśnienie	impulsu w μs	wtr/min	Wzorcowa	Min	Max	Wzorcowa	Min	Max	Dawka	Przelew
230	0,5	200	0	0	0	3	1	5	0	60
300	0,5	400	0	0	0	11	7	14	0	80
300	1,0	700	22	20	26	16	12	18	1	90
400	1,0	700	29	25	34	20	17	23	6	120
400	1,0	1000	38	35	42	30	27	33	6	130
500	0,5	500	9	7	12	22	19	25	6	124
500	1,0	500	28	25	32	22	19	25	12	130
500	0,8	800	30	28	34	28	25	31	12	138
450	1,0	1000	46	42	48	34	31	37	14	136

	Szerokość	Ilość	Dawka wtry	/sku w	/ ml	Przelew	w ml		Pomia	ar w ml
Ciśnienie	impulsu w us	wtr/min	Wzorcowa	Min	Max	Wzorcowa	Min	Max	Dawka	Przelew
230	0,5	200	0	0	0	3	1	5	0	100
300	0,5	400	0	0	0	11	7	14	0	114
300	1,0	700	22	20	26	16	12	18	12	116
400	1,0	700	29	25	34	20	17	23	18	136
400	1,0	1000	38	35	42	30	27	33	26	130
500	0,5	500	9	7	12	22	19	25	10	154
500	1,0	500	28	25	32	22	19	25	24	160
500	0,8	800	30	28	34	28	25	31	24	160
450	1,0	1000	46	42	48	34	31	37	32	156

Tabela. 5. Wyniki badań objętości wtrysku i przelewu paliwa w urządzeniu pomiarowym – wtryskiwacz UU5

Tabela. 6. Wyniki badań objętości wtrysku i przelewu paliwa w urządzeniu pomiarowym – wtryskiwacz UU6

<i></i>	Szerokość Ilość		Dawka wtrysku w ml			Przelew	Pomiar w ml			
Ciśnienie	impulsu w μs	wtr/min	Wzorcowa	Min	Max	Wzorcowa	Min	Max	Dawka	Przelew
230	0,5	200	0	0	0	3	1	5	0	82
300	0,5	400	0	0	0	11	7	14	0	88
300	1,0	700	22	20	26	16	12	18	0	90
400	1,0	700	29	25	34	20	17	23	0	104
400	1,0	1000	38	35	42	30	27	33	0	106
500	0,5	500	9	7	12	22	19	25	0	112
500	1,0	500	28	25	32	22	19	25	0	118
500	0,8	800	30	28	34	28	25	31	0	112
450	1,0	1000	46	42	48	34	31	37	0	112

## SPIS RYSUNKÓW

1.	Budowa zasobnikowego układu paliwowego badanego silnika	14
2.	Budowa pompy wysokiego ciśnienia na przykładzie pompy HP2 firmy	
	Denso	15
3.	Wtryskiwacz elektromagnetyczny	17
4.	Sygnały robocze wtryskiwacza elektromagnetycznego	21
5.	Przebieg czasowo-prądowy pracy cewki elektromagnetycznego	
	wtryskiwacza podczas pojedynczego wtrysku	22
6.	Czas do momentu uszkodzenia układu wtryskowego w zależności od liczby	
	godzin pracy silnika	28
7.	Schemat funkcjonalny systemu diagnostycznego z wykorzystaniem Emisji	
	Akustycznej	33
8.	Obraz sygnału źródłowego Emisji Akustycznej	35
9.	Parametry zdarzenia Emisji Akustycznej	36
10.	Widok stanowiska laboratoryjnego silnika PERKINS 1104D-E44TA	
	zastosowanego do badań eksperymentalnych	57
11.	Stanowisko badawcze sześciocylindrowego silnika PERKINS zastosowanego	
	do wstępnej weryfikacji wtryskiwaczy	58
12.	Wtryskiwacze pochodzące z niesprawnych silników przeznaczone do	
	weryfikacji wstępnej	59
13.	Adapter do wstępnej weryfikacji wtryskiwaczy	60
14.	Pomiar przelewu paliwa z wtryskiwaczy w trakcie weryfikacji wstępnej	62
15.	Wartości objętości paliwa pochodzącego z przelewu badanych	
	wtryskiwaczy	65
16.	Wartość objętości wtryskiwanego paliwa z rozpylacza poszczególnych	
	wtryskiwaczy mierzona podczas badania weryfikacyjnego	66
17.	Wartość ciśnienia w zasobniku paliwa podczas pomiaru przelewu paliwa	
	poszczególnych wtryskiwaczy	67
18.	Przykłady uszkodzeń elementów wtryskiwaczy	69
19.	Stanowisko testowe do badania wtryskiwaczy C-R IFT-70 firmy Hartridge .	70
20.	Wartość średnia przelewu paliwa w [cm3] zmierzona podczas testu: ciśnienie	
	20 MPa, szerokość impulsu otwarcia cewki 500 ms, ilość wtrysków 200 na	
	minutę	72
21.	Wartość średnia przelewu paliwa w [cm3] zmierzona podczas testu: ciśnienie	
	30 MPa, szerokość impulsu otwarcia cewki 1000 ms, ilość wtrysków 700 na	
	minutę	72
22.	Wartość średnia przelewu paliwa w [cm3] zmierzona podczas testu: ciśnienie	
	50 MPa, szerokość impulsu otwarcia cewki 800 ms, ilość wtrysków 800 na	
	minutę	73
23.	Uproszczony schemat silnika użytego do badań wraz z oprzyrządowaniem	
	pomiarowym	75

24.	Silnik użyty do badań wraz z oprzyrządowaniem pomiarowym	76
25.	Widok ogólny stanowiska badawczego z komputerem obsługującym fabryczny	
	moduł diagnostyczny oraz torem pomiarowym do rejestracji sygnału EA	76
26.	Uproszczony schemat układu pomiarowego Emisji Akustycznej	78
27.	Budowa czujnika 4371 V firmy Bruel&Kjaer	78
28.	Charakterystyka częstotliwościowa czujnika 4371 V firmy Bruel&Kjaer	79
29.	Schemat układu do badania dokładności toru pomiarowego	79
30.	Obraz rejestrowanego sygnału wzorcowego podczas badania dokładności toru	
	pomiarowego	80
31.	Etapy demontażu wtryskiwacza	81
32.	Poglądowy schemat układu wtryskowego silnika wielocylindrowego oraz	
	miejsce pomiaru sygnału EA	83
33.	Sposób mocowania czujnika w uchwycie na króćcu przewodu wysokiego	
	ciśnienia na ostatnim cylindrze	84
34.	Specjalnie zaprojektowany i skonstruowany uchwyt do mocowania czujnika	85
35.	Sposób pozycjonowania czujnika	85
36.	Sposób mocowania czujnika na przewodach wysokiego ciśnienia z pomocą	
	klucza dynamometrycznego	86
37.	Sygnał EA nowego wtryskiwacza przedstawiony w układzie napięcie na	
	wyjściu wzmacniacza pomiarowego w funkcji czasu. Wzmocnienie sygnału	
	wynosi 20 dB	88
38.	Sygnał EA uszkodzonego wtryskiwacza – brak istotnych różnic pomiędzy	
	formą sygnału pokazaną na powyższym rysunku i sygnałem pokazanym na	
	rysunku 37	89
39.	Przykład akustogramu częstotliwościowo-czasowego	90
40.	Zestawienie średniej energii zdarzenia odpowiadającego procesowi wtrysku	
	wtryskiwaczy sprawnych i niesprawnych	92
41.	Zestawienie średniego czasu trwania zdarzenia odpowiadającego procesowi	
	wtrysku wtryskiwaczy sprawnych i niesprawnych	92
42.	Zestawienie współczynnika zmienności $\Delta$ [%] średniego czasu trwania	
	zdarzenia dla sprawnych i niesprawnych wtryskiwaczy	93
43.	Sygnał związany z pracą wtryskiwacza: pomiar (za pomocą oscyloskopu)	
	natężenia prądu cewki badanego wtryskiwacza (kolor niebieski) oraz sygnał	
	źródłowy EA (kolor czerwony)	94
44.	Podział sygnału EA wtryskiwacza na fazy	97
45.	Podział sygnału EA wtryskiwacza na fazy w programie Look50_16	98
46.	Sieć działań algorytmu wyznaczania trzech faz procesu wtrysku 1	01
47.	Zestawienie średnich pomiarów czasów trwania trzech faz wyznaczonych	
	algorytmem w programie Look50_16_trzy_fazy 1	03
48.	Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania I fazy 1	04
49.	Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania II fazy 1	04
50.	Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania III fazy . 1	05
51.	Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania III fazy	
	dla k = 48	07

52. Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania III fazy dla k = 30	
53. Zestawienie współczynników zmienności pomiarów czasu trwania III fazy dla k = 12	
54. Średni czas trwania III fazy sygnału EA wtrysku paliwa w zależności od uszkodzenia	
55. Ramkowy wykres średniego czasu trwania III fazy sygnału EA wtrysku paliwa w zależności od uszkodzenia	
56. Struktura drzewa decyzyjnego uszkodzenia wtryskiwacza w zależności od średniego czasu trwania III fazy	
57. Macierz klasyfikacji wskazująca trafność przyporządkowania do poszczególnych klas	
58. Fragment funkcji czasowej gęstości widmowej dla tego samego wtrysku ale	
59. Interfejs programu Auto Spectral Analyser	
<ul> <li>60. Gęstość widmowa- wtryskiwacz nowy NN1. Częstotliwość filtra określającego moment maksymalnej aktywności wtryskiwacza ustawiono na wartość 6080 Hz</li> <li>61. Gęstość widmowa - wtryskiwacz uszkodzony UU1. Częstotliwość filtra</li> </ul>	
określającego moment maksymalnej aktywności wtryskiwacza ustawiono na wartość 6080 Hz	
62. Uśrednione wartości gęstości widmowej dla zbioru wtryskiwaczy nowych NN1 ÷ NN12 i częstotliwości 12160 Hz	
63. Współczynnik zmienności uśrednionych wartości gęstości widmowej dla zbioru wtryskiwaczy nowych NN1 ÷ NN12 i częstotliwości 12160 Hz	
64. Uśrednione wartości gęstości widmowej dla zbioru wtryskiwaczy uszkodzonych UU1 ÷ UU6 z wyjątkiem UU5 i częstotliwości 12160 Hz	
65. Współczynnik zmienności uśrednionych wartości gęstości widmowej dla zbioru wtryskiwaczy uszkodzonych UU1 ÷ UU6 z wyjątkiem UU5 i	
częstotliwości 12160 Hz 66. Wartość gęstości widmowej wtryskiwacza uszkodzonego UU5 i częstotliwośc	ci
12160 Hz	

## **SPIS TABEL**

1.	Zestawienie typowych niesprawności układu niskiego ciśnienia paliwa	23
2.	Zestawienie typowych niesprawności układu wysokiego ciśnienia	
	paliwa	25
3.	Przykłady zastosowania EA do diagnostyki urządzeń wg normy	
	ISO 22096	34
4.	Najczęściej stosowane deskryptory	37
5.	Podstawowe parametry silnika	56
6.	Wyniki badań objętości przelewu paliwa	63
7.	Wyniki pomiaru dokładności toru pomiarowego	80
8.	Wartości średnie energii i czasu trwania zdarzenia EA odpowiadającemu	
	procesowi wtrysku	91
9.	Wartości średnie czasu trwania poszczególnych faz w sygnale wtrysku	
	paliwa	102
10.	Parametry statystyczne dla czasu trwania III fazy w chwili maksymalnej	
	aktywności akustycznej wtryskiwacza w zależności od sprawności	
	wtryskiwaczy	110
11.	Współczynnik korelacji Pearsona czasu trwania sygnału EA w chwili	
	maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza i sprawności	
	wtryskiwaczy	113
12.	Reguły klasyfikacyjne wtryskiwaczy w zależności od czasu trwania sygnał	u
	EA w chwili maksymalnej aktywności akustycznej wtryskiwacza	115
13.	Porównanie ilości trafnych wskazań algorytmu drzewa	
	klasyfikacyjnego	116