

Zygmunt Raunmiagi

**Ocena stanu stożkowej powierzchni
iglicy i gniazda rozpylaczy paliwa
silników okrętowych z wykorzystaniem
emisji akustycznej**

Rozprawa doktorska

Promotor
dr hab. inż. Mirosław Meissner
profesor nadzwyczajny w Instytucie
Podstawowych Problemów Techniki PAN

Warszawa 2011

SPIS TREŚCI

Streszczenie	3
Abstract	4
Słownik terminów użytych w pracy	5
Wstęp	7
1. Stan wiedzy o diagnozowaniu okrętowych silników spalinowych	9
1.1. Metody diagnozowania tłokowych silników spalinowych	9
1.2. Metoda emisji akustycznej w diagnostyce silników spalinowych	12
1.2.1. Sygnał emisji akustycznej i jego miary	15
1.2.2. System diagnostyczny wykorzystujący metodę emisji akustycznej	19
1.3. Stan wiedzy związanej z diagnostyką i oceną jakości wtryskiwaczy	19
1.4. Metody badania stanu warstwy wierzchniej	24
2. Teza, cel i zakres pracy	28
3. Zakres prac poprzedzających badania zasadnicze	29
3.1. Przedmiot badań	29
3.1.1. Pomiar metrologiczne nowego rozpylacza	32
3.1.2. Badania metalograficzne rozpylacza	33
3.1.3. Partia badanych rozpylaczy paliwa	35
3.2. Wybór metody badań	38
4. Badania eksperymentalne	39
4.1. Opis stanowiska pomiarowego	39
4.2. Charakterystyki głównych części toru pomiarowego	41
4.3. Badanie dokładności toru pomiarowego	43
4.4. Badanie wizualne za pomocą endoskopu	44
4.5. Badania zasadnicze	46
5. Wyznaczenie kryterium oceny węzła stożkowego iglicy i gniazda rozpylacza paliwa silników okrętowych z zapłonem samoczynnym	72
5.1. Analiza statystyczna wyników pomiarów	72
5.2. Kryterium oceny węzła tribologicznego – stożka iglicy i gniazda rozpylacza paliwa silników okrętowych typu SW38	75
6. Wnioski	77
Literatura	78
Załączniki	87
Spis rysunków	99
Spis tabel	102

STRESZCZENIE

W rozprawie doktorskiej przedstawiono nowatorski sposób oceny stanu węzła tribologicznego powierzchni stożkowej iglicy i gniazda rozpylacza silników z zapłonem samoczynnym z wykorzystaniem emisji akustycznej. Praca zawiera sześć rozdziałów. W rozdziale pierwszym dokonano przeglądu aktualnego stanu wiedzy na temat diagnozowania okrętowych silników spalinowych w oparciu o współczesne publikacje techniczne polskich i zagranicznych autorów. W dalszej części rozdziału scharakteryzowano sygnał emisji akustycznej oraz przedstawiono najczęściej stosowane miary tego sygnału, a także opisano warstwę wierzchnią dla materiałów stalowych i aktualnie stosowane metody oceny jakości powierzchni styku. W rozdziale drugim sformułowano tezę i cel rozprawy oraz przedstawiono zakres pracy. Dla zrealizowania założonego celu naukowego przyjęto sześciopunktowy plan badań naukowych. W rozdziale trzecim scharakteryzowano obiekt badań oraz wybrano sposób przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Kolejny, czwarty rozdział pracy zawiera opis stanowiska pomiarowego i zastosowanej metody badawczej oraz analizę wyników pomiarów. Autor według własnego pomysłu zaprojektował, a następnie zbudował stanowisko pomiarowe, na którym wykonał badania eksperymentalne zgodnie z przyjętą procedurą pomiarową. Badania przeprowadzono w dwóch seriach pomiarowych dla trzech miar sygnału emisji akustycznej: średniej energii zdarzeń, średniej wartości amplitudy oraz średniej liczby zdarzeń, stosując różne progi wykrywalności. Wyniki pomiarów, po uśrednieniu danych z każdej serii, przedstawiono w tabelach oraz dodatkowo na wykresach słupkowych, co umożliwiło ocenę jakości rozpylaczy. W rozdziale piątym przeprowadzono analizę statyczną wyników badań i sformułowano kryterium oceny stanu węzła tribologicznego powierzchni stożkowej iglicy i gniazda rozpylacza dla badanej partii rozpylaczy. W rozdziale ostatnim sformułowano w pięciu punktach wnioski końcowe podsumowujące najistotniejsze osiągnięcia i rezultaty pracy.

ABSTRACT

The doctoral dissertation includes a novel method utilizing acoustic emission for the condition assessment of the tribological pair in a diesel engine: conical needle surface and seat of a fuel atomizer. The work contains six chapters. Chapter One includes a review of the present knowledge on diagnosing marine diesel engines based on publications of Polish and foreign authors. Further in the chapter the acoustic emission signal is characterized and its most commonly used measures are specified. The surface layer of steel materials is described along with presently employed methods for contacting surface quality assessment. Chapter Two formulates the thesis and purpose of the dissertation and outlines the scope of work. The achievement of the assumed scientific goal is based on six-item plan of research. In Chapter Three the research object and the method of conducting experiments are described. Chapter Four contains the description of the measuring stand and research method used followed by the analysis of measurement results. This author has designed, then constructed an original measuring station where he performed experimental tests according to the adopted measuring procedure. The tests included two measurement series for three measures of acoustic emission signals: mean energy of events, mean amplitude value and mean number of events. Various detectability thresholds were applied. The measurement results, after averaging of the data from each series, have been tabulated and additionally illustrated in bar charts, which allowed to assess the quality of atomizers. Chapter Five presents a static analysis of research results and formulates the criterion for the condition assessment of the tribological pair made up of a conical needle surface and seat, for a given batch of atomizers. The last chapter, divided into five points, formulates final conclusions summarizing the most significant achievements and results of the research work.

SŁOWNIK TERMINÓW UŻYTYCH W PRACY

Amplituda szczytowa – maksymalna amplituda w czasie trwania sygnału impulsowego [131]

Areologia – inżynieria powierzchni, która zajmuje się całokształtem działań naukowych i technicznych, mających na celu konstruowanie, wytwarzanie, badanie i stosowanie warstw powierzchniowych

Czas trwania zdarzenia EA – różnica czasu pomiędzy pierwszym a ostatnim przekroczeniem progu wykrywalności [131]

Czujnik – element funkcjonalny, którego zadaniem jest bezpośrednio przekazywanie oddziaływania obiektu na dalsze części narzędzi sterujących lub sygnalizujących [105]

Deskryptor – element zbioru miar sygnału emisji akustycznej [131]

Dyskryminanta – bezwymiarowa (liczbowa) miara procesu drganiowego, zorientowana diagnostycznie [105]

Eksploatacja – zespół celowych działań organizacyjno-technicznych i ekonomicznych ludzi z obiektem technicznym oraz wzajemne relacje, występujące pomiędzy nimi od chwili przejścia obiektu do wykorzystania zgodnie z przeznaczeniem, aż do jego likwidacji

Emisja akustyczna (EA) – termin stosowany w przypadku fal sprężystych wywołanych przez wyzwolenie energii w materiale lub przez proces [131]

Energia sygnału impulsowego – pomiar energii względnej sygnału impulsowego emisji akustycznej [131]

Energia zdarzenia EA – połowa iloczynu kwadratu amplitudy szczytowej U_m oraz czasu trwania zdarzenia Δt przez wartość impedancji sensora Z

$$E_{zd} = \frac{1}{2} U_m^2 \frac{\Delta t}{Z}$$

Liczba zliczeń sygnałów EA – liczba wykrytych sygnałów impulsowych [131]

Model diagnostyczny – zbiór zależności wiążących specyficzne wielkości wejściowe (symptomy) ze specyficznymi wielkościami wyjściowymi (defektami); lub relacja przyczynowo-skutkowa pomiędzy cechami stanu obiektu a parametrami diagnostycznymi zorientowanymi uszkodzeniowo

Próg wykrywalności emisji akustycznej (próg dyskryminacji) – poziom napięcia, który ma być przekroczony, aby sygnał emisji akustycznej został wykryty i poddany obróbce [131]

Przetwornik – przyrząd lub urządzenie do przetwarzania przebiegu jednej (wejściowej) wielkości fizycznej na przebieg innej (wyjściowej) wielkości fizycznej z zachowaniem stałego stosunku między nimi [105]

Skala decybelowa emisji akustycznej – skala logarytmiczna określająca stosunek pomiędzy napięciem U mierzonym na wyjściu czujnika EA a napięciem odniesienia U_r wynoszącym $1 \mu\text{V}$: $U_{\text{dB}} = 20 \log_{10}(U/U_r)$ [131]

Stan niezdatności obiektu diagnozowania – stan techniczny, w którym obiekt nie może zrealizować zadania zgodnie z wymaganiami, przy określonym oddziaływaniu otoczenia

Stan zdatności obiektu diagnozowania – stan techniczny, w którym obiekt może zrealizować zadanie zgodnie z wymaganiami, przy określonym oddziaływaniu otoczenia

Sygnal ciągły – sygnał emisji akustycznej o nieidentyfikowalnym początku i końcu [131]

Sygnal impulsowy – sygnał emisji akustycznej o identyfikowalnym początku i końcu [131]

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

$$E_{\text{sr}} = \frac{\sum E_{\text{zd}}}{N_{\text{zd}}}$$

Średnia wartość amplitudy (w jednej serii pomiarowej) – suma amplitud szczytowych U_m wszystkich zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę zdarzeń N_{zd}

$$U_{\text{sr}} = \frac{\sum U_m}{N_{\text{zd}}}$$

Średnia liczba zdarzeń (w jednej serii pomiarowej) – suma zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez ilość pomiarów n_{ii}

$$N_{\text{sr}} = \frac{\sum N_{\text{zd}}}{n_{ii}}$$

Tribologia – nauka o procesach tarcia oraz procesach towarzyszących tarcia w obszarach przemieszczających się względem siebie elementów ciał stałych lub płynów dociskanych siłą normalną

Uszkodzenie – zdarzenie destrukcyjne powodujące przejście obiektu ze stanu zdatności do stanu niezdatności

Współczynnik szczytu – dyskryminanta procesu wibroakustycznego określona jako stosunek pomiędzy amplitudą szczytową U_m a wartością skuteczną U_{rms}

$$C = \frac{U_m}{U_{\text{rms}}}$$

Współczynnik ten znajduje zastosowanie w diagnostyce łożysk i przekładni [105]

Zdarzenie EA – fragment sygnału impulsowego EA występujący pomiędzy pierwszym a końcowym przekroczeniem progu wykrywalności

WSTĘP

Siłownie okrętowe są układem maszyn i urządzeń połączonych ze sobą rurociągami, armaturą oraz aparaturą kontrolno-pomiarową i diagnostyczną. Przeznaczeniem siłowni jest przetworzenie energii dostarczanej z paliwem na pracę mechaniczną niezbędną dla ruchu okrętu z określoną prędkością oraz na energię elektryczną i ciepłą dla celów technologicznych, warsztatowych i socjalno-bytowych. Statek jest jednostką w pełni autonomiczną, która musi być w stałej gotowości technicznej do przewozu stosownego ładunku na czas do określonego portu. Stąd problematyka eksploatacji, niezawodności, a w tym diagnozowanie i prognozowanie jego stanu ma istotne znaczenie.

Na współczesnych statkach są stosowane różnorodne silniki spalinowe, których zakres wykorzystania zależy od przeznaczenia jednostki. Na statkach handlowych montowane są głównie tłokowe silniki spalinowe z zapłonem samoczynnym wolnoobrotowe do napędu głównego dużych jednostek (powyżej 10 000 DTW), w mniejszych (poniżej 10 000 DTW) jako napęd główny przeważają spalinowe silniki z zapłonem samoczynnym średnioobrotowe (czterosuwowe).

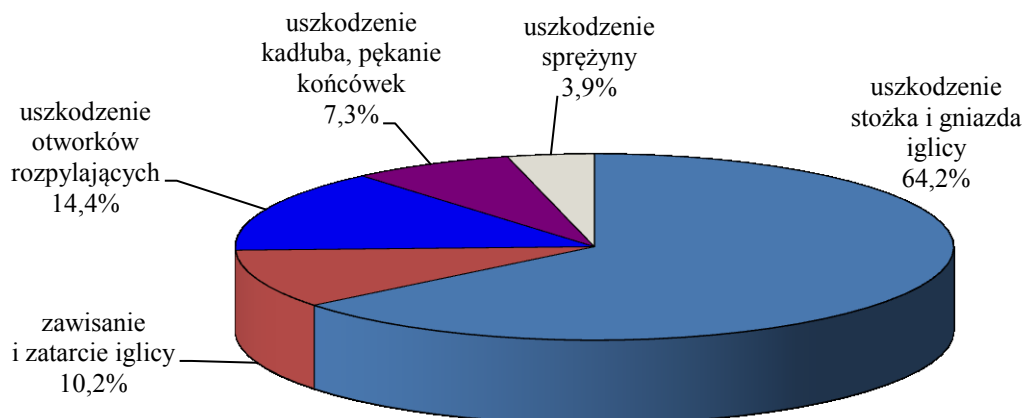
Spalinowy silnik okrętowy jest obiektem technicznym o złożonej budowie, pracujący według cyklu Diesla z wtryskiem bezpośrednim. Według Gätjens [37] obecnie 98% instalowanej mocy nowo budowanych statków wytwarzają spalinowe silniki wysokoprężne. Okrętowe silniki spalinowe pracują w różnych strefach klimatycznych i warunkach pogodowych, a więc często są przeciążane, co może być przyczyną przyspieszonego zużycia przesilonych części silnika.

Ze statystyk uszkodzeń elementów tłokowych silników spalinowych [11, 46, 51, 59, 100] wynika, że najbardziej wrażliwymi na uszkodzenia są:

- układ tłokowo-cylindrowy,
- układ wtrysku paliwa,
- układ korbowy.

Powyższe układy stanowią najbardziej obciążone podukłady tłokowego silnika spalinowego. Częstość występowania uszkodzeń w wymienionych układach, jak również ich następstwa są różne. Dość dużo uszkodzeń występuje w układzie wtrysku paliwa, a szczególnie narażony na uszkodzenia jest paliwowy zawór wtryskowy. Z prac [11, 46, 59, 100] oraz informacji od służb technicznych armatorów wynika, że procentowy udział uszkodzeń elementów rozpylaczy wtryskiwaczy jest następujący:

- zawisanie i zatarcie iglicy – 10,2%;
- uszkodzenie kadłuba, pęknięcie końcówek – 7,3%;
- uszkodzenie otworków rozpylaczy – 14,4%;
- uszkodzenie sprężyny – 3,9%;
- uszkodzenie stożka i gniazda iglicy – 64,2%.



Rys. 1. Procentowy udział uszkodzeń elementów wtryskiwaczy paliwa

Powyższa statystyka oraz nieformalne rozmowy autora z inspektorami służb technicznych armatorów krajowych i zagranicznych doprowadziły do zajęcia się tematem związanym ze stożkowym węzłem tribologicznym stożka iglicy i gniazda rozpylacza. W niniejszej pracy na podstawie badań została wyselekcjonowana miara sygnału diagnostycznego odzwierciedlająca stan techniczny stożka iglicy współpracującego z gniazdem rozpylacza. Najbardziej przydatną miarą sygnału emisji akustycznej do oceny jakości powyższego węzła tribologicznego okazał się deskryptor średniej energii zdarzeń EA dla progu wykrywalności 50 mV (sprecyzowany w rozdziale czwartym niniejszej pracy).

1. STAN WIEDZY O DIAGNOZOWANIU OKRĘTOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

We współczesnych statkach handlowych napędy główne i pomocnicze są zdominowane przez spalinowe silniki z zapłonem samoczynnym, których zaletą jest atrakcyjna sprawność całkowita wynosząca około 60%. Dla utrzymania silników okrętowych w stałej gotowości technicznej wymagane jest gromadzenie i śledzenie informacji o ich stanie technicznym w warunkach eksploatacyjnych, dlatego stworzono stosowne metody diagnozowania tłokowych silników spalinowych.

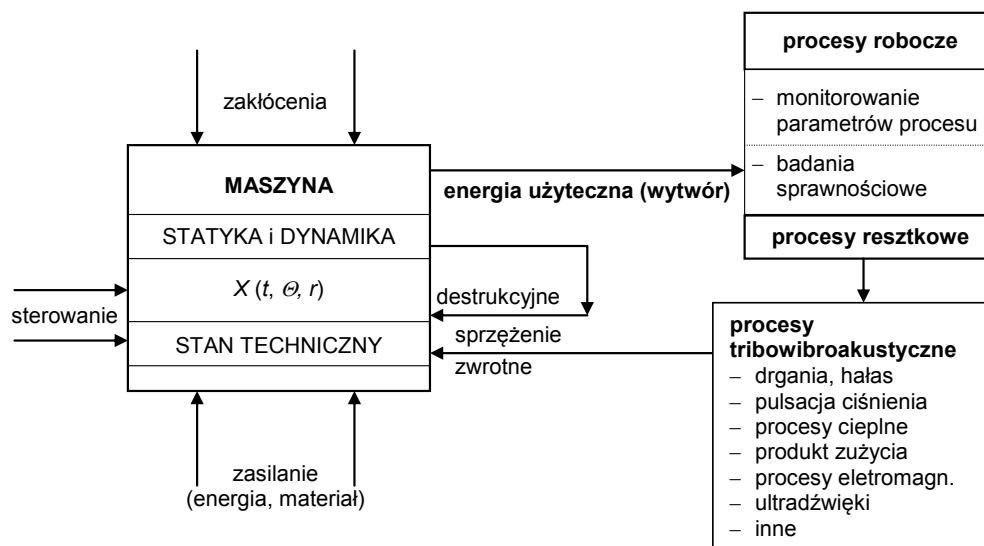
1.1. Metody diagnozowania tłokowych silników spalinowych

Dla niezawodnej pracy okrętowego silnika spalinowego konieczna jest wiedza o jego aktualnym stanie technicznym. Stan techniczny maszyn tłokowych i ich układów funkcjonalnych oraz ich elementów może być oceniony poprzez:

- weryfikację części w stanie spoczynkowym po demontażu,
- pomiary wybranych parametrów pracy i generowanych sygnałów w czasie ruchu.

Oceną stanu technicznego silnika i podzespołów, bez ich demontażu i na podstawie symptomów, zajmuje się diagnostyka techniczna będąca jednym z elementów obsługiwanego. Celem jej jest wskazanie ewentualnych przyczyn niesprawności pracy silnika oraz określenie jego rezerw eksploatacyjnych poprzez konstruowanie trendów dla prognozowania stanu (zużycia) i planowania remontów.

Informacje o stanie technicznym silnika uzyskuje się z pomiarów generowanych przez niego sygnałów, które są wyselekcjonowane z procesów roboczych i procesów zużycia, oraz z analizy silnika spalinowego jako systemu przekształcania energii i źródła informacji o procesach w nim zachodzących (rys. 2).



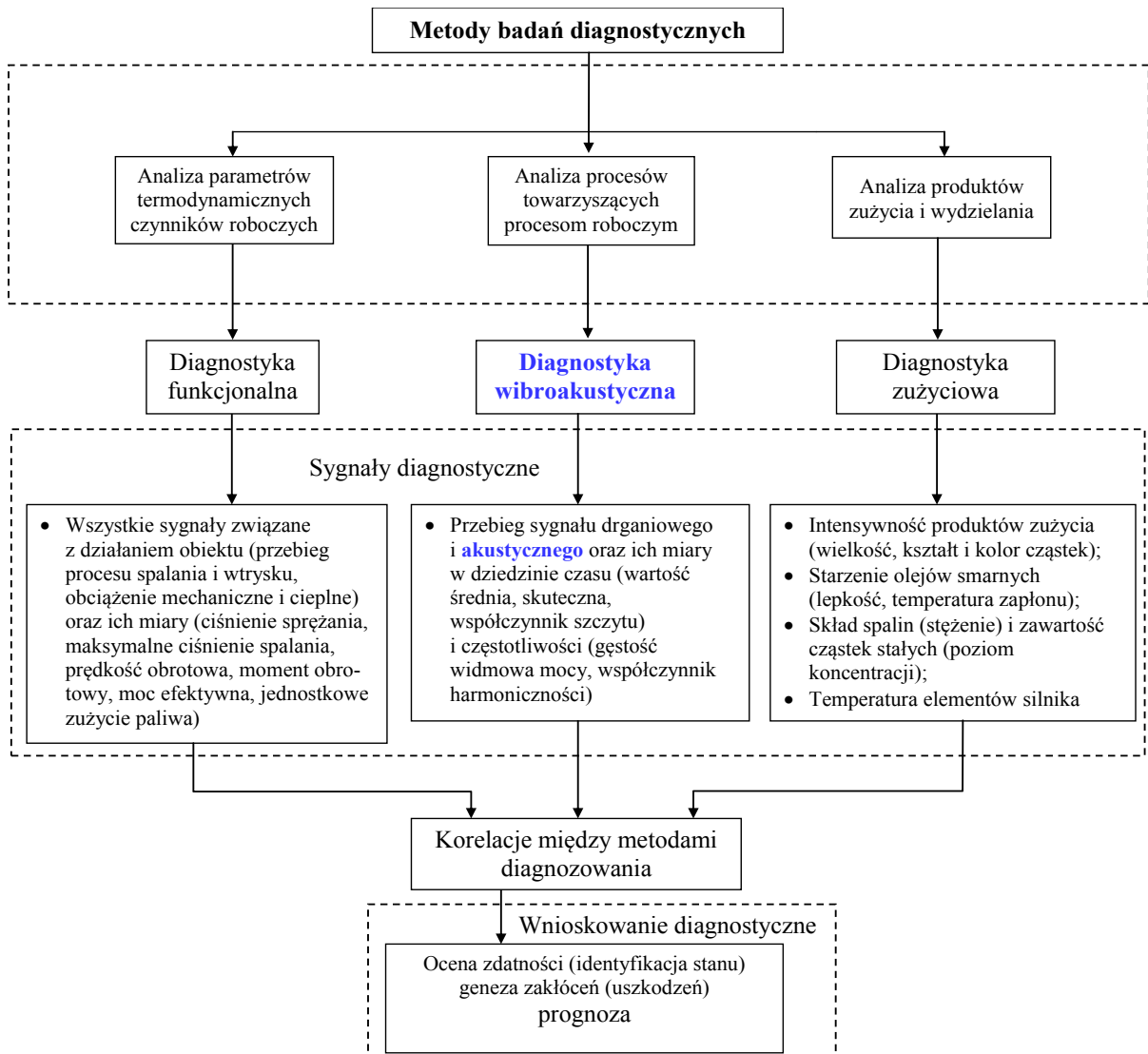
Rys. 2. Tłokowy silnik spalinowy przedstawiony jako system przekształcania energii oraz źródło informacji o procesach w nim zachodzących [104]

Istniejące metody diagnozowania tłokowych silników spalinowych są następujące:

- analiza parametrów termodynamicznych czynników wewnętrznych (powietrze, spaliny, ciecz chłodząca, olej smarujący) [11, 12, 51, 70, 71, 72, 73, 75, 102];
- analiza przebiegów procesów roboczych spalania, wtrysku paliwa i procesów energetycznych silnika (obciążenie mechaniczne i cieplne) [8, 11, 43, 44, 51, 90, 102];
- analiza procesów towarzyszących procesom roboczym (drgania, hałas, emisja akustyczna) [2, 3, 4, 5, 8, 14, 17, 18, 19, 20, 25, 27, 29, 31, 32, 34, 35, 41, 52, 62, 65, 76, 83, 97];
- analiza produktów zużycia i wydzielania (starzenia olejów, emisji spalin, ekspansji cieplnej) [8, 43, 44, 102];
- bezpośredni pomiar geometrii i położenia oraz metody wykorzystujące ruch elementu roboczego (skok iglicy wtryskiwacza, ruch pierścieni tłokowych, trajektorie środka czopa) [36, 38, 39, 46, 77, 90, 102].

Przedstawione na rysunku 3 metody badań diagnostycznych służą do oceny stanu technicznego rozpatrywanego obiektu technicznego. Metody te można zdefiniować następująco:

- 1) diagnostyka funkcjonalna obejmuje metody analizy procesów roboczych i energetycznych silnika oraz parametrów termodynamicznych, zawierające sygnały związane z działaniem silnika oraz ich miary (ciśnienie sprężania powietrza, maksymalne ciśnienie spalania, prędkość i moment obrotowy wału korbowego, moc efektywna, jednostkowe zużycie paliwa);



Rys. 3. Klasyfikacja metod badań diagnostycznych maszyn roboczych [29]

- 2) diagnostyka wibroakustyczna jest pomocna w analizie procesów towarzyszących procesom roboczym, zwanych procesami resztkowymi, powstałymi w wyniku rozproszenia energii; obejmuje między innymi analizę przebiegu sygnału drganiowego i akustycznego i ich miar w dziedzinie czasu (wartość średnia, skuteczna, współczynnik szczytu) i częstotliwości (gęstość widmowa mocy, współczynnik harmonicznego);
- 3) diagnostyka zużyciowa, obejmująca metody analizy procesów towarzyszących procesom roboczym, polega na analizie produktów zużycia (intensywność, wielkość, kształt i kolor) i wydzielania (temperatura elementów silnika, skład spalin – stężenie i zawartość cząstek stałych – poziom koncentracji) oraz na bezpośrednim pomiarze geometrii i położenia.

Przedstawiona na rysunku 3 klasyfikacja metod badań diagnostycznych, stosowana w technice, posłużyła do przeglądu współczesnych metod badań diagnostycznych wykorzystywanych do oceny stanu technicznego rozpatrywanej maszyny podczas jej eksploatacji oraz obrazuje miejsce emisji akustycznej w diagnostyce maszyn (rys. 3 kolor niebieski).

1.2. Metoda emisji akustycznej w diagnostyce silników spalinowych

Wibroakustyka jest nową i dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki, zajmującą się wszelkimi procesami drganiowymi i akustycznymi zachodzącymi w przyrodzie, technice oraz w maszynach i urządzeniach, w środkach transportu i komunikacji. W badaniach wibroakustycznych wykorzystywana jest metoda emisji akustycznej, którą zastosowano w badaniach przedstawionych w niniejszej pracy. Badania metodą emisji akustycznej zostały zapoczątkowane w latach pięćdziesiątych przez duńską firmę Bruel & Kjaer i opublikowane w broszurach szkoleniowych. Od tego czasu termin emisja akustyczna (EA) zaczął być powszechnie używany [81]. Nie jest on całkowicie ścisły, dotyczy bowiem sygnałów w szerokim paśmie częstotliwości, od infradźwięków do ultradźwięków w zakresie od 10 Hz do 50 MHz. Według normy [131] emisja akustyczna to termin stosowany w przypadku chwilowych fal sprężystych spowodowanych przez wyzwolenie energii w materiale lub wywołany przez proces fizyczny. Często ogranicza się rozpatrywanie tego zjawiska do ciał stałych, wówczas można stosować węższą definicję, wedle której emisja akustyczna polega na powstawaniu fal sprężystych na skutek lokalnej, dynamicznej zmiany struktury materiału. Na rysunku 4 zamieszczono zakresy częstotliwości sygnału emisji akustycznej wykorzystywanych w różnych badaniach. Na podstawie badań [4, 5, 21, 22, 23, 61, 82, 86, 87, 88] został wyselekcjonowany średni użyteczny zakres częstotliwości sygnału emisji akustycznej do diagnozowania spalinowych silników z zapłonem samoczynnym od 1 kHz do 50 kHz. Z powyższego zakresu do oceny stanu powierzchni części maszyn przydatny jest zakres częstotliwości emisji akustycznej od 1 kHz do 10 kHz [Ranachowski 82, 83, 88; Marczak 61 i badania własne 85, 86, 87, 88]. Natomiast w diagnostyce eksploatacyjnej do badania procesu roboczego czterosuwowego silnika okrętowego np. instalacji paliwowej Bejger [4, 5] i Ranachowski [82, 83, 88] wyselekcjonowali zakres od 6 kHz do 18 kHz, zaś Chandroth [21, 23] i Sharkey [23] wykorzystywali zakres od 20 Hz do 18 kHz, przy czym stosowali oni wyższe częstotliwości w przypadku oceny prędkości obrotowej silnika.

Spośród prac zagranicznych badaczy zajmujących się wykorzystaniem emisji akustycznej do diagnostyki maszyn i urządzeń na uwagę zasługują następujące pozycje:

- Nivesrangan P., Steel J.A., Reuben R.L. [68, 69]. W pierwszej pracy wykorzystano pomiary prędkości przepływu gazów przepływających do oceny stanu zaworów wlotowych i wylotowych oraz pulsację paliwa w przewodach paliwowych do oceny stanu technicznego wtryskiwaczy paliwa. Drugi artykuł opisuje badania eksperymentalne przeprowadzone na silniku 4-suwowym 4-cylindrowym Firmy Perkins o mocy 74 KW. Badania podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie wykonano pomiary dla różnych stanów symulacyjnych. W drugim zaś dokonano pomiarów dla rzeczywistych stanów eksploatacyjnych z uwzględnieniem optymalnego mocowania przetworników. Do badań wykorzystano pasmo przenoszenia sygnału EA od 0,1 do 1 MHz.
- Elamin F., Fan Y., Gu F., Ball A. [31, 32]. Jest to przykład badań eksperymentalnych z wykorzystaniem emisji akustycznej do oceny wartości luzów silników z zapłonem samoczynnym na przykładzie silnika 4-suwowego firmy Ford typu FSD 425. W pomiarach zastosowano dwa czujniki: pierwszy typu WD2030 o zakresie częstotliwości od 100 kHz do 1 MHz oraz drugi D9241 A o zakresie częstotliwości od 20 kHz do 180 kHz. Ponadto wykorzystanie dwóch przetworników w układzie pomiarowym pozwoliło określić kondycję zaworów wlotowych i wylotowych mających wpływ na stan techniczny silnika.
- EL-Ghamry M., Steel J.A., Reuben R.L., Fog T.L. [33]. Autorzy wskazali na możliwość zastosowania emisji akustycznej do pomiaru ciśnienia spalania w cylindrze dla dużych wolnoobrotowych 2-suwowych silników okrętowych oraz średnioobrotowych 4-suwowych silników okrętowych. Pomiar jest możliwy przy zastosowaniu specjalnego oprogramowania do obróbki sygnału EA, głównie RMS AE. W swoich badaniach autorzy udowodnili, że pomiar ciśnienia jest możliwy dla różnych stanów technicznych, tj. prędkości obrotowej, typu silnika oraz jego obciążenia.
- Douglas R.M., Steel J.A., Reuben R.L. [28] wskazali kolejny obszar zastosowania emisji akustycznej do oceny stanu technicznego (stopnia zużycia) węzła tribologicznego: pierścienie tłokowe – gładź tulei cylindrowej dla różnych silników 2- i 4-suwowych z zapłonem samoczynnym przy zmiennych obciążeniach silników.
- Buttle D.J., Scruby C.B. [15]. W artykule opisano wykrywanie nieciągłości struktury stopów aluminium za pomocą emisji akustycznej.

- Berthelot J.M., Ben Souda M., Robert J.L. [6] wykazali możliwość zastosowania emisji akustycznej do badania jakości betonu po selekcji pasma przenoszenia sygnału EA od 30 kHz do 470 kHz.
- Tan Ch.K., Irving Ph., Mba D. [95] zaproponowali model prognostyczny oparty na emisji akustycznej do wczesnego wykrywania zużycia przekładni zębatych, wykorzystując relację pomiędzy wartością skuteczną sygnału emisji akustycznej a stopniem zużycia wieńca koła zębatego. Przytoczony przykład diagnostyczny można adaptować do różnego rodzaju maszyn wirujących.
- Chater A. [25] zaprezentował wyniki pomiarów dokonane na spalinowym 2-suwowym silniku z zapłonem samoczynnym o mocy 4040 KM 16-cylindrowym z doładowaniem (Zestaw pomiarowy według własnej konfiguracji w oparciu o zjawisko emisji akustycznej). Do obróbki sygnału emisji akustycznej wykorzystano między innymi szybką transformatę Fouriera. Autor zamieścił również ilustracje stanów wtryskiwaczy, w przypadku wtryskiwaczy dobrych i uszkodzonych, w powiązaniu z parametrami roboczymi silnika diesla. Jest to źródłowy materiał do diagnozowania maszyn tłokowych w warunkach eksploatacyjnych.
- Chandroth G.O. [21]. Autor opisuje różnorodność mierzonych parametrów roboczych w kombinacji z sieciami neuronowymi, ukierunkowanych dla celów statystycznych; jest to pomocne jako wskaźnik uszkodzeń rozpatrywanej maszyny tłokowej.
- Chandroth G.O., Sharkey A.J.C., Sharkey N.E. [23]. W artykule opisano pomiary ciśnienia spalania w cylindrze oraz wibracji silnika. Przeprowadzono analizę sygnałów emisji akustycznej w oparciu o dwie sieci neuronowe sztucznej inteligencji, osobno dla pomiarów ciśnienia spalania w cylindrze i dla wibracji.

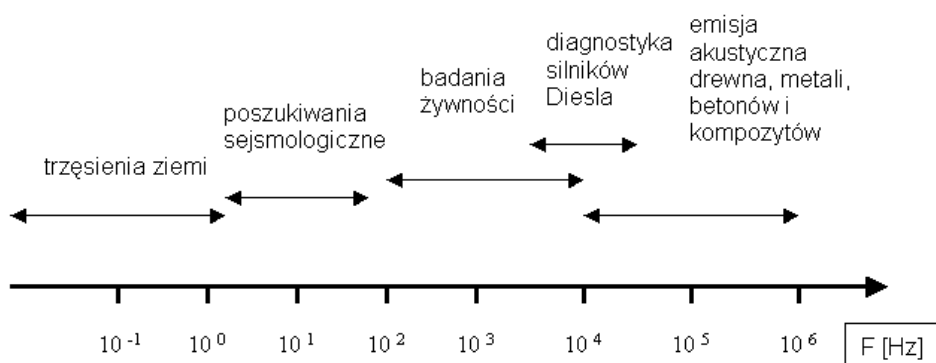
W kolejnych artykułach [22, 90] autorzy wykorzystali do pomiarów ciśnienia w cylindrze pomiarowym przetwornik piezoelektryczny firmy Kistler typu 6125 A o paśmie przenoszenia sygnału EA od 100 kHz do 1000 kHz, natomiast do pomiaru wibracji silnika zastosowano przetwornik piezoelektryczny firmy Bruel & Kjaer Deltatron (4397) o paśmie przenoszenia od 20 Hz do 18 kHz. Z przeglądu zagranicznych publikacji wynika, że Chandroth i jego współpracownicy z Uniwersytetu w Sheffield są liderami z zakresu wykorzystania emisji akustycznej do diagnozowania silników z zapłonem samoczynnym zarówno na morzu, jak i na lądzie.

Kolejnym przykładem zastosowania emisji akustycznej jest wykorzystanie jej w badaniu procesu tribologicznego [61]. Podczas pomiarów z powodzeniem użyto zakres częstotli-

wości 0–15 kHz. Praca Burnosa [14] sygnalizuje natomiast możliwość zastosowania metody emisji akustycznej do diagnozowania agregatów typu ster strumieniowy.

Z przeglądu polskich i zagranicznych publikacji wynika, że metoda emisji akustycznej cieszy się dużym zainteresowaniem naukowców z wielu krajów i jest adaptowana między innymi do oceny struktury materiałów (betonu, owoców, wyrobów stalowych i innych), do diagnozowania maszyn tłokowych i wirnikowych oraz przekładni zębatych. Przemysł maszynowy (MAN – B&W), górniczy, przetwórczy, nadzór techniczny coraz bardziej interesują się wynikami ww. badań laboratoryjnych. Rezultaty wielu nowych prac pozwalają przypuszczać, że wkrótce znajdą one ważne praktyczne zastosowanie w diagnostyce urządzeń.

Na rysunku 4 zaznaczono orientacyjne zakresy częstotliwości sygnału emisji akustycznej wykorzystywane w różnych badaniach.

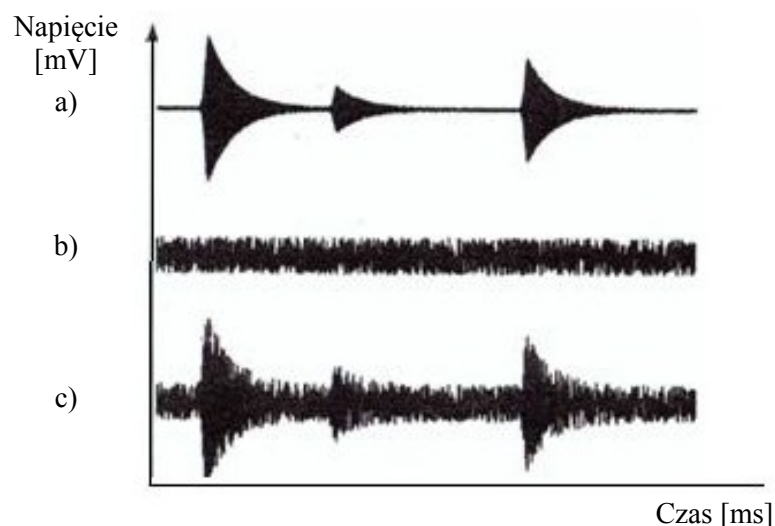


Rys. 4. Zakresy częstotliwości sygnału emisji akustycznej pochodzące z różnych źródeł [82]

1.2.1. Sygnał emisji akustycznej i jego miary

Sygnał to abstrakcyjny model dowolnej mierzalnej wielkości zmieniającej się w czasie, generowanej przez zjawiska fizyczne lub systemy. Tak jak wszystkie sygnały może być opisany za pomocą aparatu matematycznego, poprzez podanie pewnej funkcji zależnej od czasu. Ponieważ sygnał niesie informację o naturze badanych zjawisk lub systemów, w niektórych dziedzinach nauk jest on traktowany jako nośnik informacji.

Sygnał oznacza zatem przepływ strumienia informacji, przy czym może on odbywać się w jednym lub wielu wymiarach. W zależności od procesu zachodzącego w źródle sygnał emisji akustycznej może mieć charakter ciągły lub dyskretny [45, 81]. Na rysunku 5 przedstawiono podstawowe kształty sygnałów emisji akustycznej.



Rys. 5. Kształty sygnałów emisji: a) dyskretny, b) ciągły, c) mieszany [45]

W emisji ciągłej czas trwania sygnału EA (narastania lub zaniku) jest większy od odstępu między impulsami. W emisji akustycznej dyskretniej odstęp między impulsami jest większy (lub równy) od czasu ich trwania.

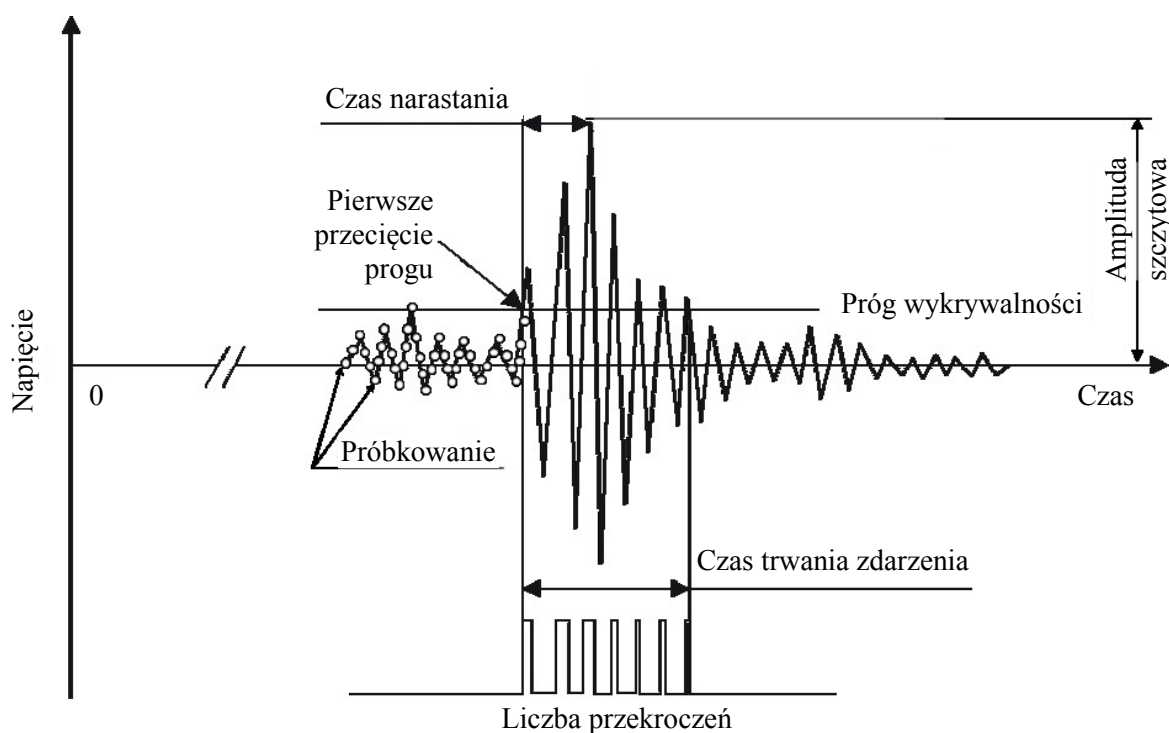
Emisja akustyczna wywołana defektami sieci krystalicznej, niepełnymi wyładowaniami elektrycznymi, przebudową mikrostruktury ciała stałego ma charakter ciągły. Powstanie i rozprzestrzenianie się mikropęknięć i makropęknięć daje emisję dyskretną. W przypadku przesunięć wzajemnych warstw ośrodka EA ma charakter ciągły lub dyskretny w zależności od parametrów układu (rys. 5). Podobnie emisja akustyczna związana z reakcjami chemicznymi ma charakter mieszany [81].

Wybrane charakterystyki sygnału EA oraz terminy stosowane w badaniach metodą emisji akustycznej zamieszczono na rysunku 6 [131].

Występujące na rysunku 6 terminy stosowane do opisu sygnału emisji akustycznej definiuje się następująco:

- Sygnał impulsowy – sygnał emisji akustycznej o identyfikowalnym początku i końcu;
- Czas trwania sygnału impulsowego – przedział czasu pomiędzy pierwszym i ostatnim przekroczeniem progu wykrywalności przez sygnał impulsowy;
- Liczba przekroczeń – krotność sygnału impulsowego przecinająca próg wykrywalności;
- Amplituda szczytowa – maksymalna amplituda w czasie trwania sygnału impulsowego;

- Próg wykrywalności emisji akustycznej (próg dyskryminacji) – poziom napięcia, który ma być przekroczony, aby sygnał emisji akustycznej został wykryty i poddany obróbce;
- Czas narastania sygnału impulsowego – przedział czasu między pierwszym przekroczeniem progu a maksymalną amplitudą szczytową sygnału impulsowego.



Rys. 6. Charakterystyki sygnału impulsowego emisji akustycznej [131]

Najbardziej użyteczne miary sygnału emisji akustycznej (deskrytory) w praktyce podzielono na cztery grupy:

- pochodne zmian w czasie,
- pochodne przebiegów czasowych,
- pochodne energii,
- pochodne rozkładu częstotliwościowego.

Ich wykaz podano w tabeli 1.

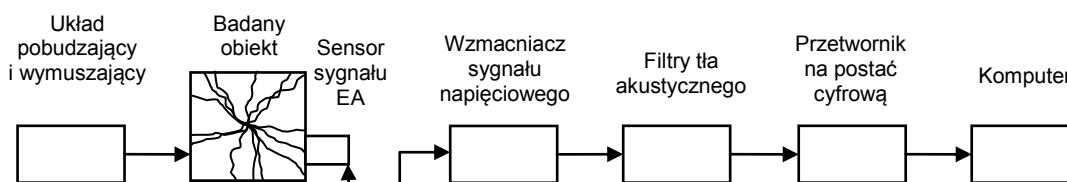
Tabela 1. Najczęściej stosowane deskryptory EA [83]

Nazwa deskryptora	Dodatkowe wyjaśnienia
POCHODNE ZMIAN W CZASIE	
Suma przekroczeń	Uzyskuje się poprzez 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 pomiarowej podzielona przez liczbę testów iglicy $N_{sr} = \frac{\sum N_{zd}}{n_{ti}}$
Liczba przejść przez wybrany poziom amplitud	Liczba przekroczeń 10%, 20%, 50% amplitudy maksymalnej
POCHODNE PRZEBIEGÓW CZASOWYCH	
Amplituda szczytowa U_m	Maksymalna amplituda w czasie trwania sygnału impulsowego
Średnia wartość amplitudy w jednej serii pomiarowej	Suma amplitud szczytowych wszystkich zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę zdarzeń $U_{sr} = \frac{\sum U_m}{N_{zd}}$
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 za przedział czasu T	$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$
Współczynnik kształtu	Stosunek U_m do U_{rms}
Energia zdarzenia EA	Połowa iloczynu amplitudy szczytowej i czasu trwania zdarzenia podzielona przez wartość impedancji sensora $E_{zd} = 1/2 U_m^2 \Delta t / Z$
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 $E_{sr} = \frac{\sum E_{zd}}{N_{zd}}$
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

Uwaga: W tabeli 1 drukiem wytłuszczonym oznaczono deskryptory wykorzystane w badaniach zasadniczych niniejszej pracy.

1.2.2. System diagnostyczny wykorzystujący metodę emisji akustycznej

W badaniach nieniszczących za cel przyjmuje się określenie stanu fizycznego badanego obiektu i w tym kontekście procedura badawcza związana jest z analizą sygnału emisji akustycznej, który odzwierciedla stan obiektu oraz opisuje procesy w nim zachodzące. Definicję tę można uzupełnić stwierdzeniem, że urządzenie do badań nieniszczących powinno zawierać sekcję wywołującą w obiekcie sygnał diagnostyczny oraz sekcję obróbki wygenerowanego sygnału EA. Rejestracja i precyzyjna obróbka sygnału emisji akustycznej wymaga zastosowania cyfrowej techniki przetwarzania danych. Uwzględniając powyższe uwagi, można typowy, nowoczesny system diagnostyczny przedstawić jak na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat funkcjonalny nowoczesnego systemu diagnostycznego wykorzystującego metodę emisji akustycznej [82]

1.3. Stan wiedzy związanej z diagnostyką i oceną jakości wtryskiwaczy

Paliwowy zawór wtryskowy (powszechnie znany jako wtryskiwacz) spalinowych silników z zapłonem samoczynnym jest specyficznym zaworem ze względu na swoją funkcję w instalacji paliwowej. Zadaniem wtryskiwacza jest dawkowanie i właściwie rozpylenie podawanej ilości paliwa w funkcji obrotu wału korbowego do danego cylindra [36, 46, 47, 48, 90, 99, 100]. Budowę typowego wtryskiwacza paliwa okrętowych 4-suwowych silników spalinowych przedstawiono na rysunku 18.

Podczas eksploatacji okrętowego silnika spalinowego niezawodność wtryskiwacza ocenia się na podstawie diagnostyki: funkcjonalnej, wibroakustycznej i zużyciowej (rys. 3), natomiast w procesie wytwarzania i napraw ocenę jakości uzyskuje się za pomocą: metrologii warsztatowej, badań nieniszczących i metalograficznych.

Generalnie w ocenie jakości elementów maszyn należy uwzględnić ich najważniejsze cechy użytkowe i technologiczne, jak:

- dokładność geometryczna określona przez tolerancje wymiarów, kształtów i wzajemnego położenia powierzchni [135],

- struktura geometryczna powierzchni [138],
- stan warstwy wierzchniej [124],
- użytkowe i technologiczne cechy materiału konstrukcyjnego,
- funkcjonalność i technologiczność konstrukcji.

Jakość rozpylacza możemy ocenić według wzoru:

$$J_{\text{rozp}} = f(J_m, D_g, \text{SGP}, \text{WW}) \quad (1)$$

gdzie:

J_{rozp} – jakość rozpylacza,

J_m – jakość materiału,

D_g – dokładność geometryczna,

SGP – struktura geometryczna powierzchni,

WW – warstwa wierzchnia.

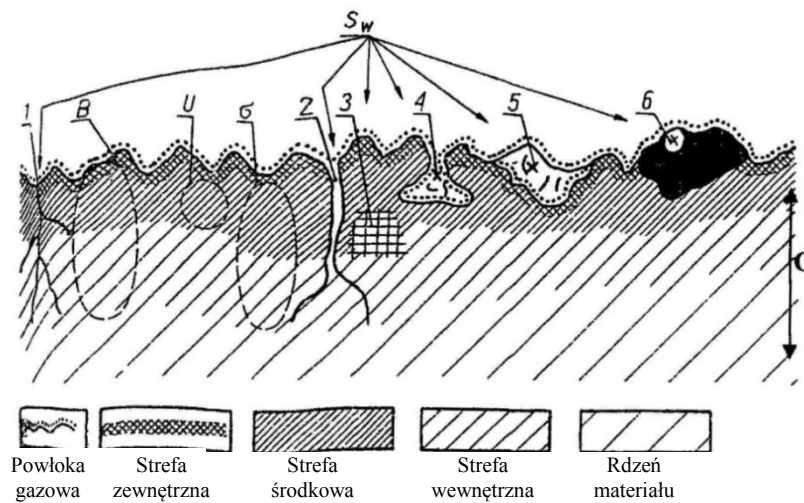
Konstruktor, wybierając materiał na daną część maszyny, uwzględnia wszystkie aspekty użytkowe i technologiczność konstrukcji. W oparciu o normę [135] określona jest dokładność geometryczna, także struktura geometryczna powierzchni (zarys kształtu, profil powierzchni, profil chropowatości) o normę [138].

Ze względu na złożoność zagadnienia w niniejszej pracy skupiono się na badaniach węzła tribologicznego stożka iglicy i gniazda rozpylacza (rys. 18d), które przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. Dwa rozpatrywane elementy zostały ukształtowane w wyniku specjalnej technologii produkcji (tajemnica wytwórcy) i uzyskały stosowne warstwy wierzchnie celem zwiększenia odporności na ścieranie. Warstwę wierzchnią powierzchni stożkowej gniazda rozpylacza otrzymano w wyniku obróbki cieplno-chemicznej, w tym przypadku efekt utwardzenia nastąpił na skutek azotowania (rys. 21).

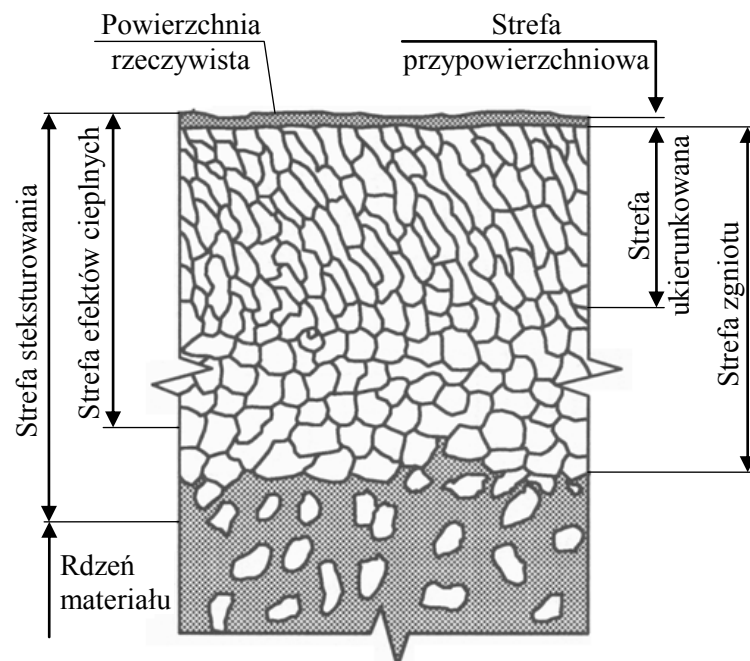
Warstwę wierzchnią można scharakteryzować następująco: Warstwę wierzchnią (warstwą powierzchniową) nazywamy zewnętrzną warstwę materii ograniczoną skończoną powierzchnią zewnętrzną, będącą geometrycznym zbiorem punktów materialnych, stanowiącą granicę dwóch ośrodków ciągłych oraz umowną powierzchnię wewnątrz ciała stałego lub płynu, będącą granicą zmian wartości cech stref podpowierzchniowych powstałych na skutek wymuszeń zewnętrznych fizycznych, chemicznych, różniącą się od rdzenia [10, 13, 43, 44].

Stan warstwy wierzchniej opisuje się zbiorem charakterystyk powierzchni oraz stref podpowierzchniowych, jak: grubość warstwy wierzchniej, charakterystyki stereometryczne i energetyczne powierzchni, własności chemiczne i fizyczne stref podpowierzchniowych oraz gradient zmian tych własności w przekroju poprzecznym.

Grubość warstwy wierzchniej jest to wymiar w kierunku prostopadłym do powierzchni geometrycznej przedmiotu, opisany jej granicami: zewnętrzną – stanowiącą powierzchnię odgraniczającą warstwę wierzchnią od otaczającego ośrodka i ustalającą kształt zewnętrzny elementu maszyny oraz wewnętrzną – będącą powierzchnią odgraniczającą warstwę wierzchnią od materiału. Na rysunku 8 przedstawiono schematycznie zespół czynników charakterystycznych dla przekroju poprzecznego (grubości) warstwy wierzchniej, natomiast na rysunku 9 przedstawiono uproszczony model warstwy wierzchniej.



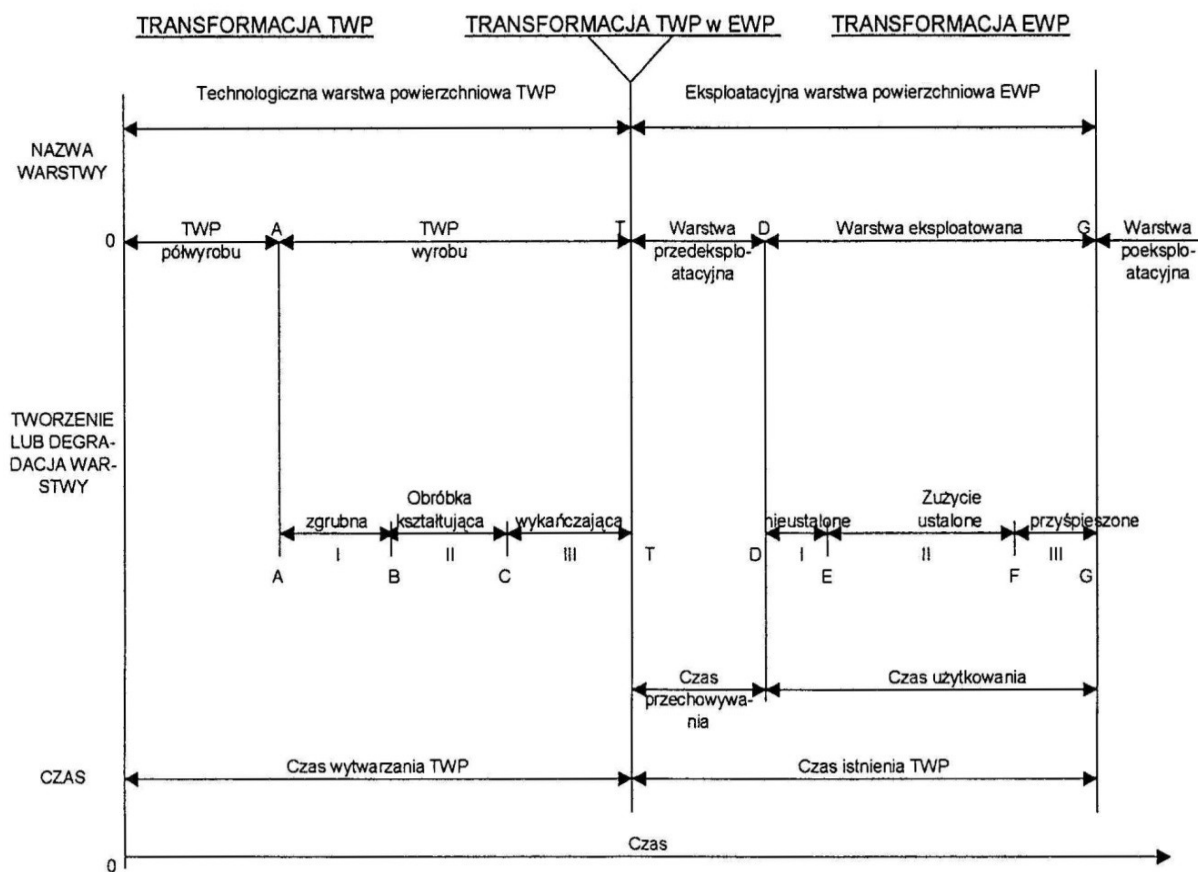
Rys. 8. Model warstwy wierzchniej (WW) stalowego elementu maszyny: G – grubość WW, B – struktura WW, U – utwardzenie (umocnienie) WW, δ – naprężenia własne WW, 2 – szczeliny, 3 – rzadzizny, 4 – pory, 5 – wyrwy, 6 – wtrącenia [44]



Rys. 9. Uproszczony model budowy warstwy wierzchniej [44, 124]

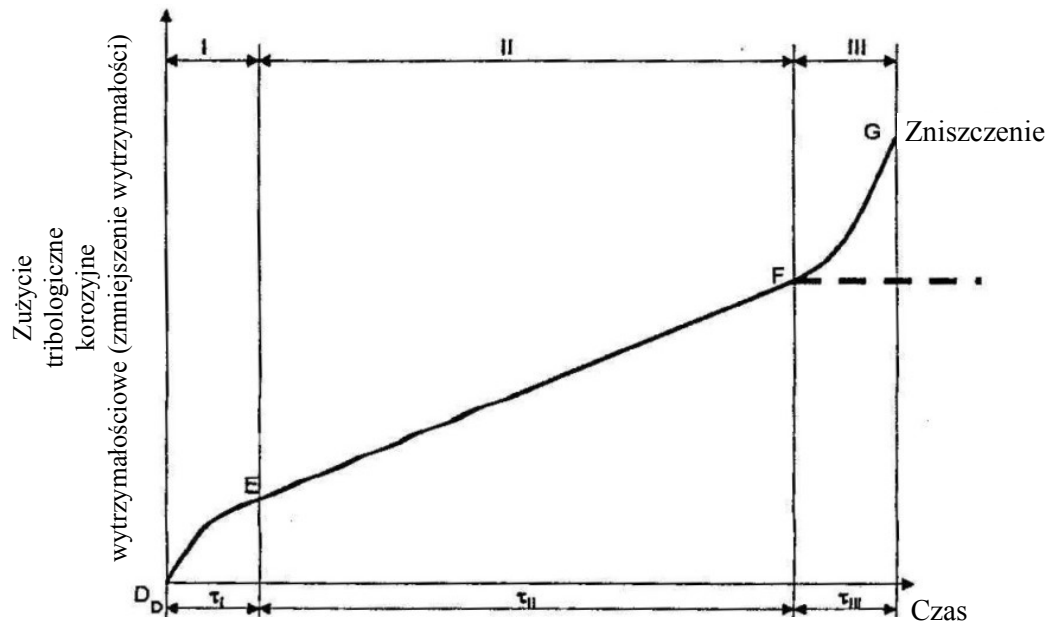
Według Buraczewskiego [13] opis warstwy wierzchniej obejmuje czas od jej powstania, aż do jej złomowania (rys. 10). Warstwę wierzchnią w przedziałach czasowych opisano następującymi skrótami:

- TWP – technologiczna warstwa powierzchniowa to termin stosowany na etapie powstawania elementu maszyny (poczynając od półwyrobu, a na obróbce zgrubnej, kształtującej i wykańczającej kończąc),
- EWP – eksploatacyjna warstwa powierzchniowa określa stan istnienia warstwy wierzchniej; zależy on głównie od warunków pracy danej maszyny i od przyjętej strategii obsługiwanie,
- warstwa poeksploatacyjna – koniec istnienia danego elementu maszyny lub całej maszyny (kasacja).



Rys. 10. Schemat transformacji warstwy powierzchniowej w cyklu wytwarzania i użytkowania wyrobu w funkcji czasu [13]

Na czas istnienia eksploatacyjnej warstwy wierzchniej mają wpływ różne czynniki, a najważniejsze z nich obrazuje krzywa Lorenza (rys. 11).



Rys. 11. Typowy przebieg zużycia w funkcji czasu (tzw. Krzywa Lorenza): tribologicznego, korozyjnego i wytrzymałościowego (zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej); I – okres zużycia niestabilnego, II – okres zużycia ustalonego, III – okres zużycia przyspieszonego [13]

Stan warstwy wierzchniej może być scharakteryzowany zbiorem parametrów, których wartości są zależne od własności materiału i warunków tworzenia tej warstwy. Prawdopodobnie wytworzona warstwa wierzchnia elementów maszyn w wyniku procesów technologicznych oraz procesów eksploatacyjnych zapewnia maksymalną wytrzymałość powierzchniową, a przez to dużą trwałość eksploatacyjną elementu maszyny.

Istnieją związki wielu parametrów charakteryzujących geometrię powierzchni, strukturę metalu i własności użytkowe elementów maszyn. Różnorodność parametrów geometrycznych powierzchni i fizycznych warstwy wierzchniej wymaga przyjęcia ogólnego, z konieczności dość złożonego, kryterium jakości elementu maszyny. W związku z tym opracowano następującą ogólną zależność na jakość rozpatrywanego wężła tribologicznego:

$$J_{\text{rozp.}} = f(J_m, D_w, D_k, S_{\text{WW}}) \quad (2)$$

gdzie:

$J_{\text{rozp.}}$ – jakość rozpylacza,

J_m – jakość materiału; J_m = skład chemiczny,

D_w – dokładność wymiarów; D_w = tolerancje wymiarów,

D_k – dokładność kształtu; D_k = odchyłki kształtu i położenia,

S_{WW} – całokształt własności warstwy wierzchniej elementu maszyny.

Teoretyczny opis stanu warstwy wierzchniej został przedstawiony przez Hebdę [44].

Nie można wiązać stanu warstwy wierzchniej wyłącznie z własnościami powierzchni, ponieważ stan tej warstwy w takim samym stopniu zależy od własności materiału, jakości

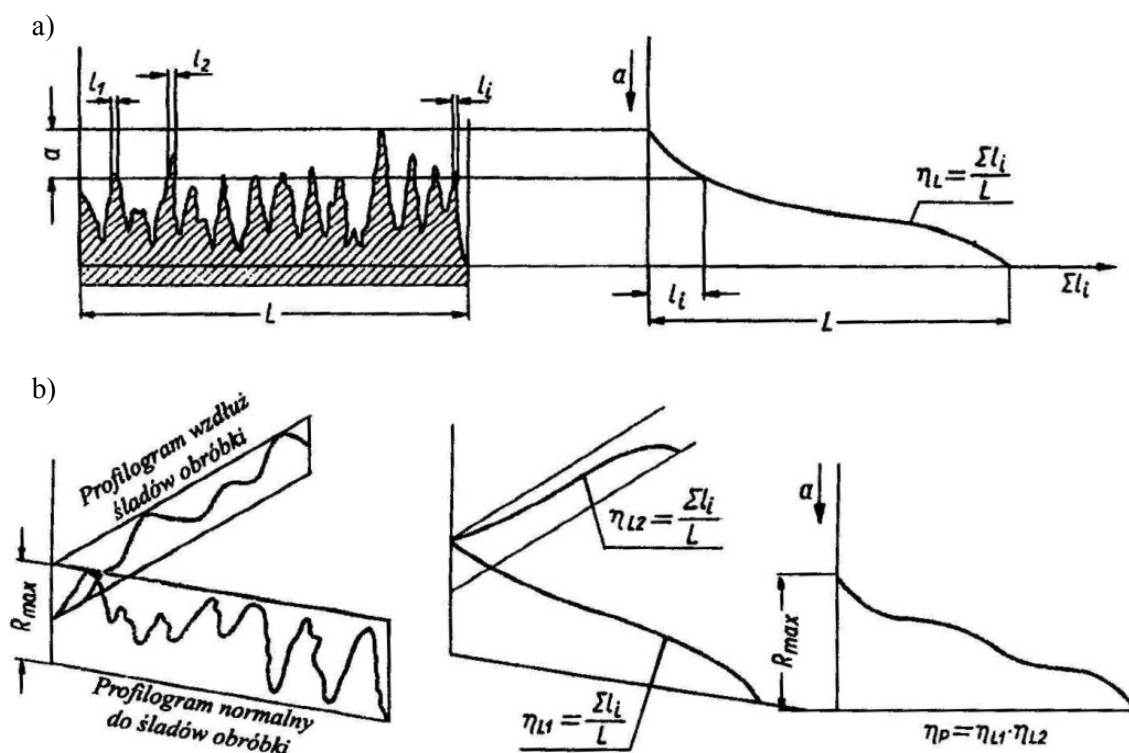
obróbki i warunków eksploatacji maszyny. Stan warstwy wierzchniej jest zatem jednym z głównych parametrów charakteryzujących jakość elementów maszyn.

1.4. Metody badania stanu warstwy wierzchniej

Przegląd podstawowych metod oceny powierzchni styku i udziału nośnego elementu maszyny zawiera tabela 2, a ich szeroki opis znajduje się w pozycji [44].

Powierzchnią nośną nazywa się sumę wszystkich pól styku powierzchni rzeczywistej z powierzchnią nominalną (idealnie gładką, płaską i sztywną) dociskanej do niej siłą normalną (rys. 12). Przy wyznaczaniu powierzchni nośnej nacisk normalny między powierzchnią rzeczywistą (badaną) a powierzchnią nominalną nie może powodować plastycznych odkształceń wierzchołków nierówności.

Wielkość stykającej się powierzchni nominalnej z powierzchnią badaną może być przedstawiona jako pole płaszczyzny przecinającej nierówności badanej powierzchni na określonej ich wysokości.



Rys. 12. Metoda wyznaczania krzywych nośności: a) liniowej, b) powierzchniowej; a – wartość zbliżenia, l_1, l_2, \dots, l_i – szerokość nierówności dla danej wartości zbliżenia, R_{\max} – największa wysokość chropowatości [44]

Tabela 2. Podstawowe metody pomiaru rzeczywistej powierzchni styku i udziału nośności

Parametr	Metody optyczne			Metody adhezyjne			Metody geometryczne		Metody przewodności styku	
	mechaniczna	reflektometryczna	modelowania	izotopowa	luminescencyjna	tuszowania	krzywych nośności	topograficzna	elektryczna	cieplna
Zasada pomiaru	pomiar stopnia zakłócenia całkowitego wewnętrznego odbicia w pryzmacie	pomiar natężenia światła odbitego od powierzchni metalicznej pokrytej pochłaniaczem i z odsłoniętymi wierzchołkami	przejście światła bez rozproszenia w punktach styku powierzchni wykonanych z przezroczystych materiałów	pomiar powierzchni pokrytej warstwą izotopów przeniesionych z powierzchni wzorcowej	pomiar natężenia światła luminowanego z punktów styku z powierzchnią wzorcową pokrytą luminoforem	określenie liczby pól pokrytych tuszem przeniesionym z powierzchni wzorcowej	określenie powierzchni przekroju wierzchołków z profilogramów chropowatości	powierzchnia przekroju wyznaczona na podstawie map warstwowych	pomiar przewodności elektrycznej styku	pomiar przewodności cieplnej
Zastosowanie	η_p S_r	η_p η_l S_r	η_p S_r	η_p S_r	η_p S_r	jakościowa	η_p	η_p S_r	η_p S_r	η_p S_r

S_r – rzeczywista powierzchnia styku, η_p – powierzchniowy udział nośności, η_l – liniowy udział nośności

Długość nośna zarysu powierzchni jest sumą odcinków zarysu, wzdłuż których styka się ona z powierzchnią wzorcową. Liniowym udziałem nośnym η_L nazwano stosunek długości nośnej L_i wzdłuż odcinka pomiarowego do całkowitej długości tego odcinka L :

$$\eta_L = \frac{l_1 + l_2 + l_3 \dots + l_n}{L} \quad (3)$$

a powierzchniowy udział nośny:

$$\eta_p = \frac{\sum S_r}{S_n} \quad (4)$$

gdzie:

S_r – rzeczywista powierzchnia styku sprężystego

$$S_r = S_p f(x)$$

S_p – powierzchnia podstawy profilogramu (suma powierzchni podstaw wszystkich przecinków),

x – zmienna wysokości nierówności,

S_n – powierzchnia nominalna

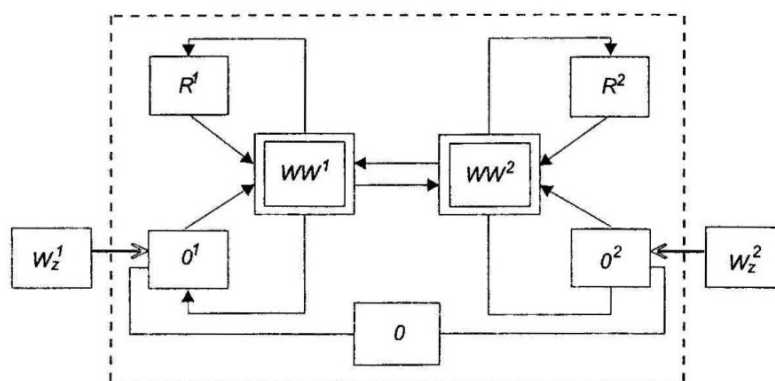
$$S_n = \frac{cN}{R_e}$$

N – obciążenie normalne,

R_e – granica plastyczności bardziej miękkiego ze stykających się metali,

c – współczynnik zależny od kształtu i wielkości wgłębiającego występu.

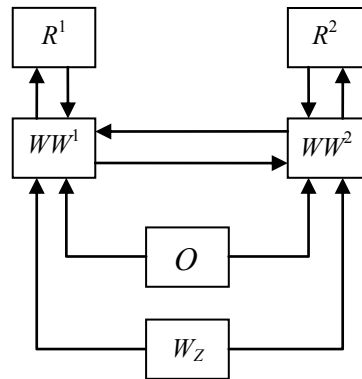
Rysunki 8–10 oraz tabela 2 przedstawiają warstwy wierzchnie pojedynczego elementu, natomiast w badanym przypadku mamy do czynienia ze współpracą dwóch elementów iglicy i gniazda rozpylacza. Dwie współpracujące powierzchnie w rozważanym przypadku: stożek iglicy i powierzchnia stożkowa gniazda tworzą elementarny system tribologiczny (rys. 13).



Rys. 13. Elementarny system tribologiczny dwóch warstw wierzchnich: R^1 – rdzeń elementu pierwszego, R^2 – rdzeń elementu drugiego, WW^1 – warstwa wierzchnia elementu pierwszego, WW^2 – warstwa wierzchnia elementu drugiego, O – otoczenie, O^1 – otoczenie pierwszego elementu, O^2 – otoczenie drugiego elementu, W_z^1 – wymuszenie zewnętrzne dla pierwszego elementu, W_z^2 – wymuszenie zewnętrzne dla drugiego elementu [44]

Przedstawiony na rysunku 13 system tribologiczny dotyczy oddziaływania na siebie dwóch warstw wierzchnich w warunkach eksploatacyjnych, natomiast podczas badań laboratoryjnych można przyjąć, że

$$W_z^1 = W_z^2 = W, \quad O^1 = O^2 = O \quad (5)$$



Rys. 14. Uproszczony system tribologiczny dwóch warstw wierzchnich dla przyjętych warunków laboratoryjnych [opracowanie własne]

System tribologiczny jest znany, jeśli są znane jego układy oraz zbiór relacji opisujących oddziaływania pomiędzy nimi.

2. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

Studia literaturowe [1–105] i badania własne upoważniają do sformułowania następującej tezy: *Istnieje sygnał wibroakustyczny, którego miara może być klasyfikatorem stanu węzła tribologicznego powierzchni stożkowej iglicy i gniazda rozpylacza*. Celem naukowym jest udowodnienie założonej tezy, w której przyjęto, że stan rozpatrywanego węzła tribologicznego odzwierciedlają miary sygnału emisji akustycznej. Zagadnienie to zbadano na przykładzie spalinowego 4-suwowego silnika okrętowego.

Osiągnięcie celu naukowego wymagało przyjęcia następującego planu badań:

- 1) przeprowadzenie klasyfikacji badanych rozpylaczy:
 - a) fabrycznie nowe,
 - b) niesprawne,
- 2) zaprojektowanie i realizacja stanowiska pomiarowego do rejestracji sygnału emisji akustycznej generowanego w układzie rozpylacza pod wpływem impulsowego pobudzenia mechanicznego,
- 3) zbadanie dokładności toru pomiarowego,
- 4) przeprowadzenie pomiarów wstępnych mających na celu zbadanie powtarzalności uzyskiwanych wyników badań,
- 5) wykonanie zasadniczych badań doświadczalnych dla obu grup rozpylaczy,
- 6) opracowanie kryterium oceny jakości rozpylaczy dla stanów – zdatny (jak dla rozpylaczy nowych) lub niezdatny (jak dla rozpylaczy niesprawnych).

3. ZAKRES PRAC PORZEDZAJĄCYCH BADANIA ZASADNICZE

3.1. Przedmiot badań

Do badań wybrano rozpylacze paliwa spalinowego silnika okrętowego Stork-Wärtsilä SW38 napędu głównego promu MF „Polonia” o następującej charakterystyce:

Armator	Unity Line Ltd.
Typ promu	kolejowo-samochodowo-pasażerski
Sygnal wywoławczy	C6NC7



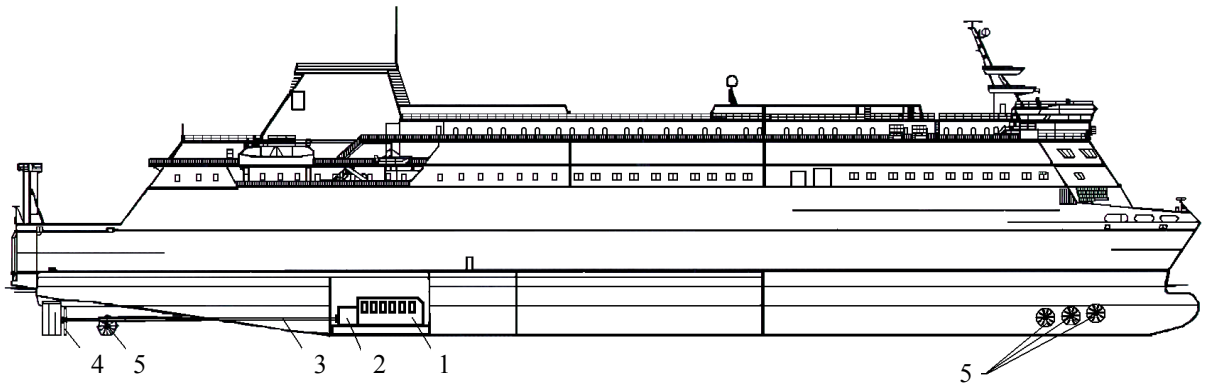
Rys. 15. Widok promu MF „Polonia” podczas podróży morskiej

Ważniejsze dane o promie „Polonia”:

Długość całkowita	169,90 m
Szerokość	28,00 m
Zanurzenie	5,90 m
Prędkość max	20,2 węzła

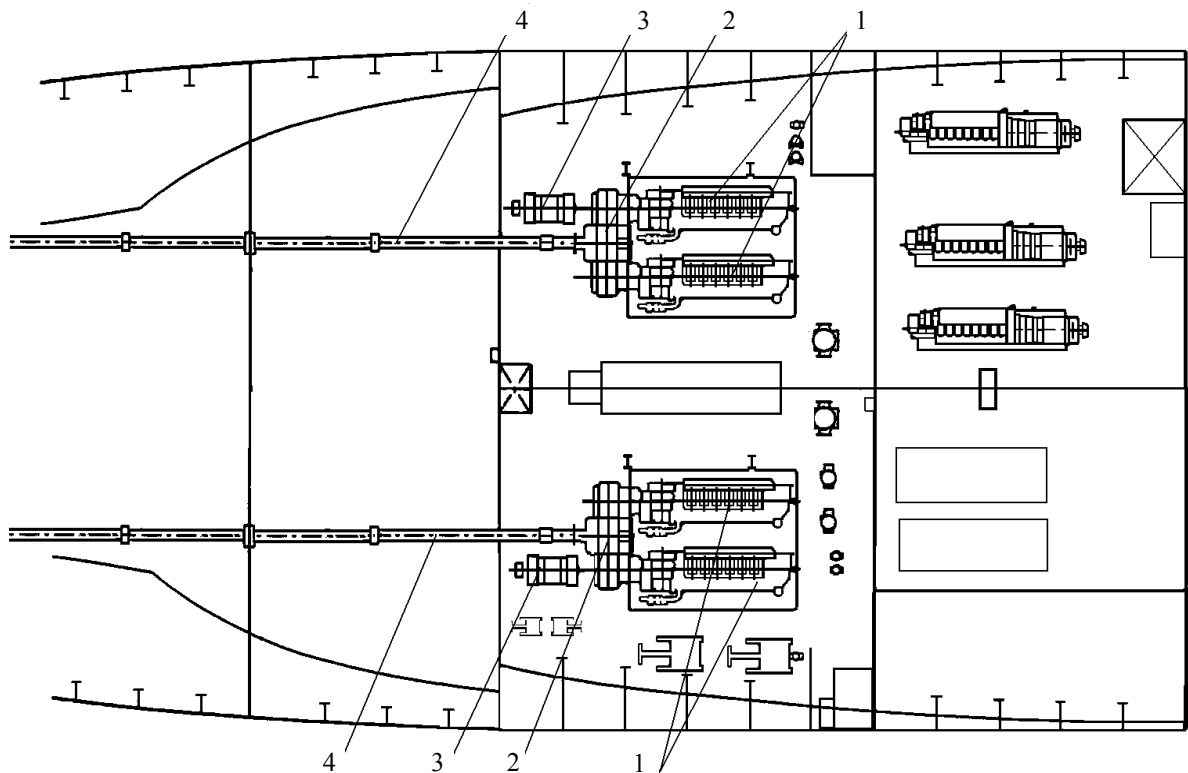
Podstawowe parametry silnika głównego 6 SW38:

Średnica cylindra	380 mm
Skok tłoka	475 mm
Moc	3960 kW
Prędkość obrotowa	600 obr/min

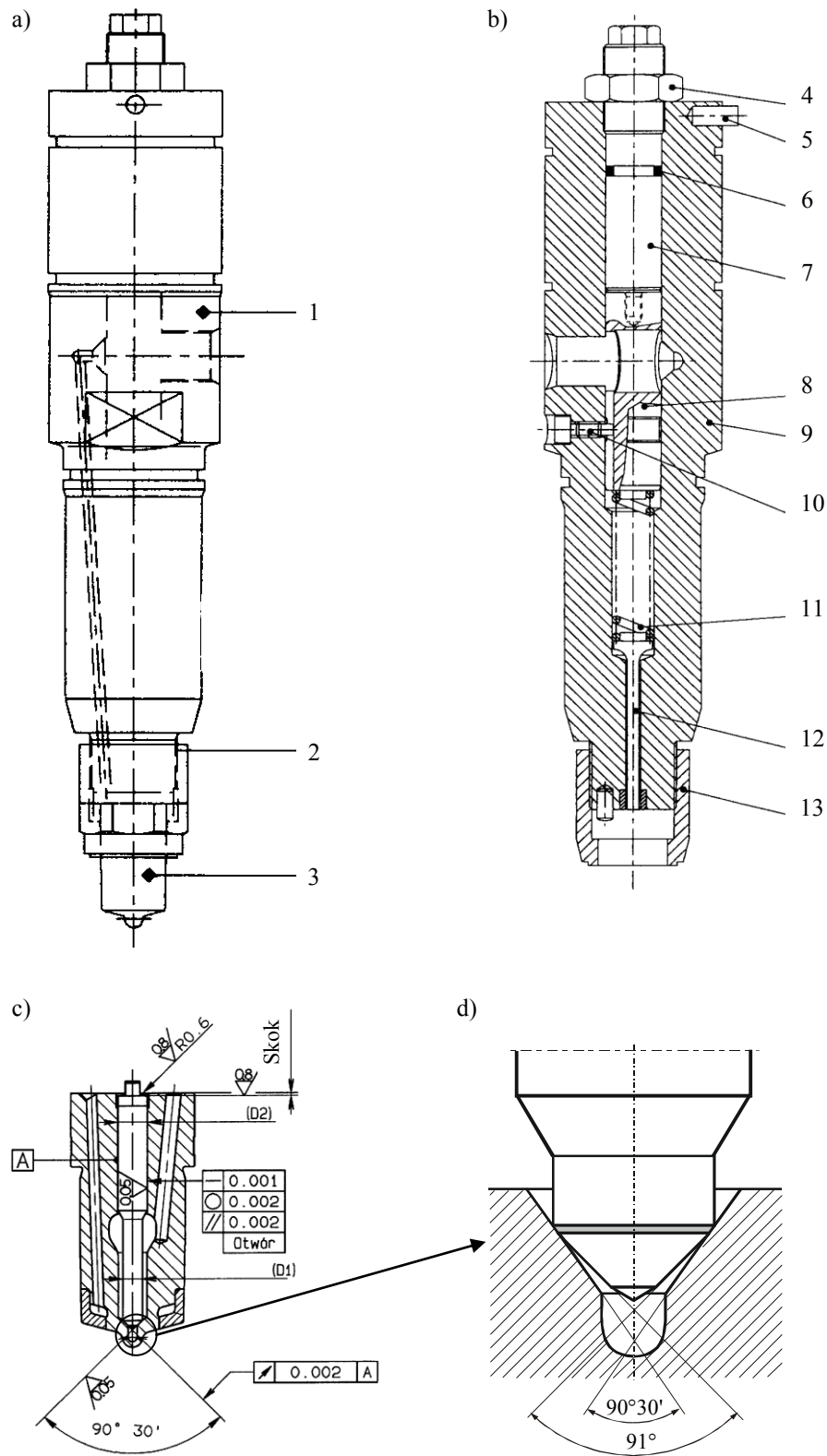


Rys. 16. Ogólny widok promu MF „Polonia”: 1 – silnik główny (4 szt.), 2 – przekładnia (2 szt.), 3 – linia wałów, 4 – śruba napędowa (2 szt.), 5 – stery strumieniowe (4 szt.)

Napęd promu MF „Polonia” składa się z czterech silników Stork-Wärtsilä typu 6SW38, które poprzez przekładnie ABB Zamacz typu MAL 2-140-10 napędzają dwie śruby Wichman typu PR115/4I. Sześciocylindrowy, czterosuwowy, rzędowy silnik z zapłonem samoczynnym Stork-Wärtsilä 38 jest silnikiem średnioobrotowym z turbodoładowaniem i bezpośrednim wtryskiem paliwa.



Rys. 17. Schemat napędu promu MF „Polonia”:
1 – silniki główne, 2 – przekładnia, 3 – prądnica wałowa, 4 – linia wałów



Rys. 18. Badany wtryskiwacz: a) widok wtryskiwacza, b) przekrój wtryskiwacza, c) przekrój rozpylacza, d) stożkowy węzeł tribologiczny rozpylacza; 1 i 9 – korpus wtryskiwacza, 2 i 13 – nakrętka mocująca rozpylacz do korpusu rozpylacza, 3 – rozpylacz, 4 – nakrętka kontruująca, 5 – kołek ustalający, 6 – O-ring, 7 i 8 – śruba regulacyjna, 10 – śruba, 11 – sprężyna, 12 – popychacz

3.1.1. Pomiary metrologiczne nowego rozpylacza

Na maszynie typu Talyrond 290 firmy Taylor Hobson (rys. 19) przeprowadzono następujące pomiary nowego rozpylacza:

1) korpus rozpylacza:

- stożek zamykający korpus (gniazdo iglicy rozpylacza) $90^{\circ}30'$ tol. $\pm 5'$,
- luz części prowadzącej iglicy w korpusie wynosi $6\ \mu\text{m}$ (dop. do $8\ \mu\text{m}$),
- średnia wartość chropowatości R_a na średnicy $\phi 9\ \text{mm}$ otworu korpusu $R_a = 0,09\ \mu\text{m}$,
- średnia wartość chropowatości R_a na średnicy iglicy $R_a = 0,06\ \mu\text{m}$;

2) skok iglicy = $0,7\ \text{mm} \pm 0,02'$;

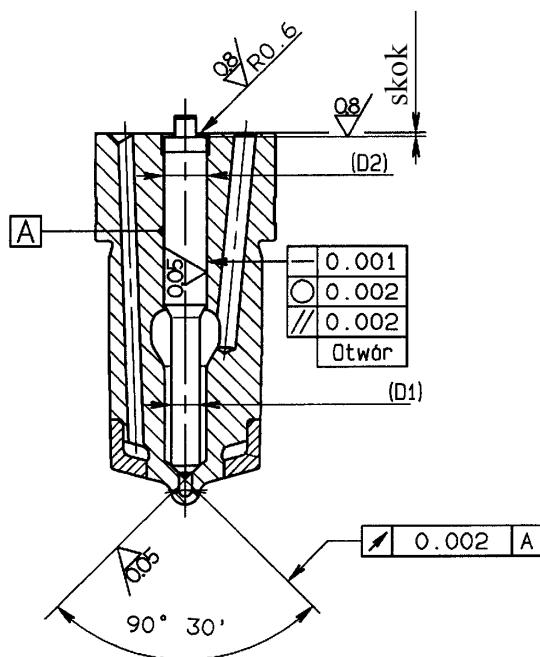
3) stożek iglicy $91^{\circ} \pm 5'$.

Na rysunku 20 przedstawiono pozostałe parametry geometryczne badanego rozpylacza.

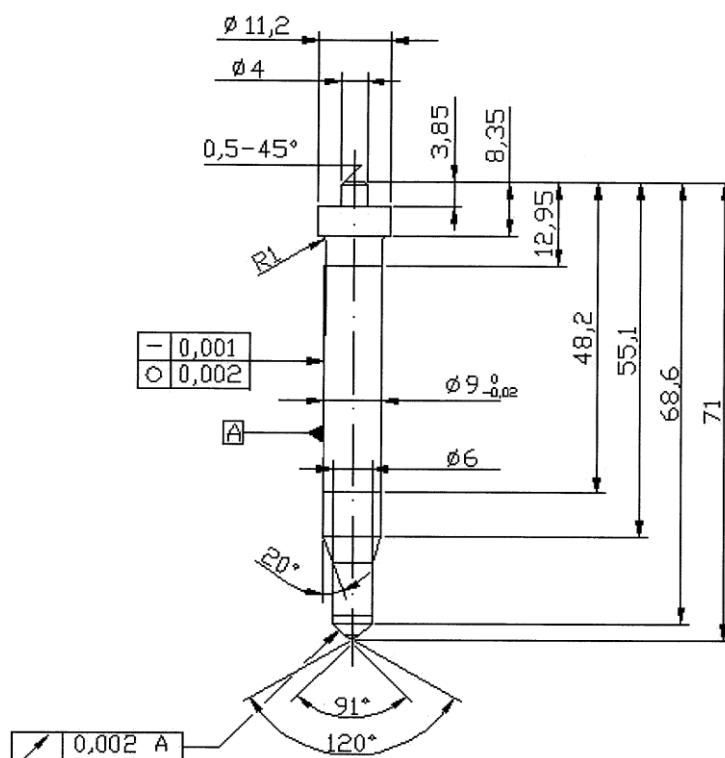


Rys. 19. Pomiary korpusu rozpylacza na maszynie pomiarowej Talyrod 290

a)



b)



Rys. 20. Geometria badanych rozpylaczy; a) przekrój rozpylacza, b) widok iglicy rozpylacza

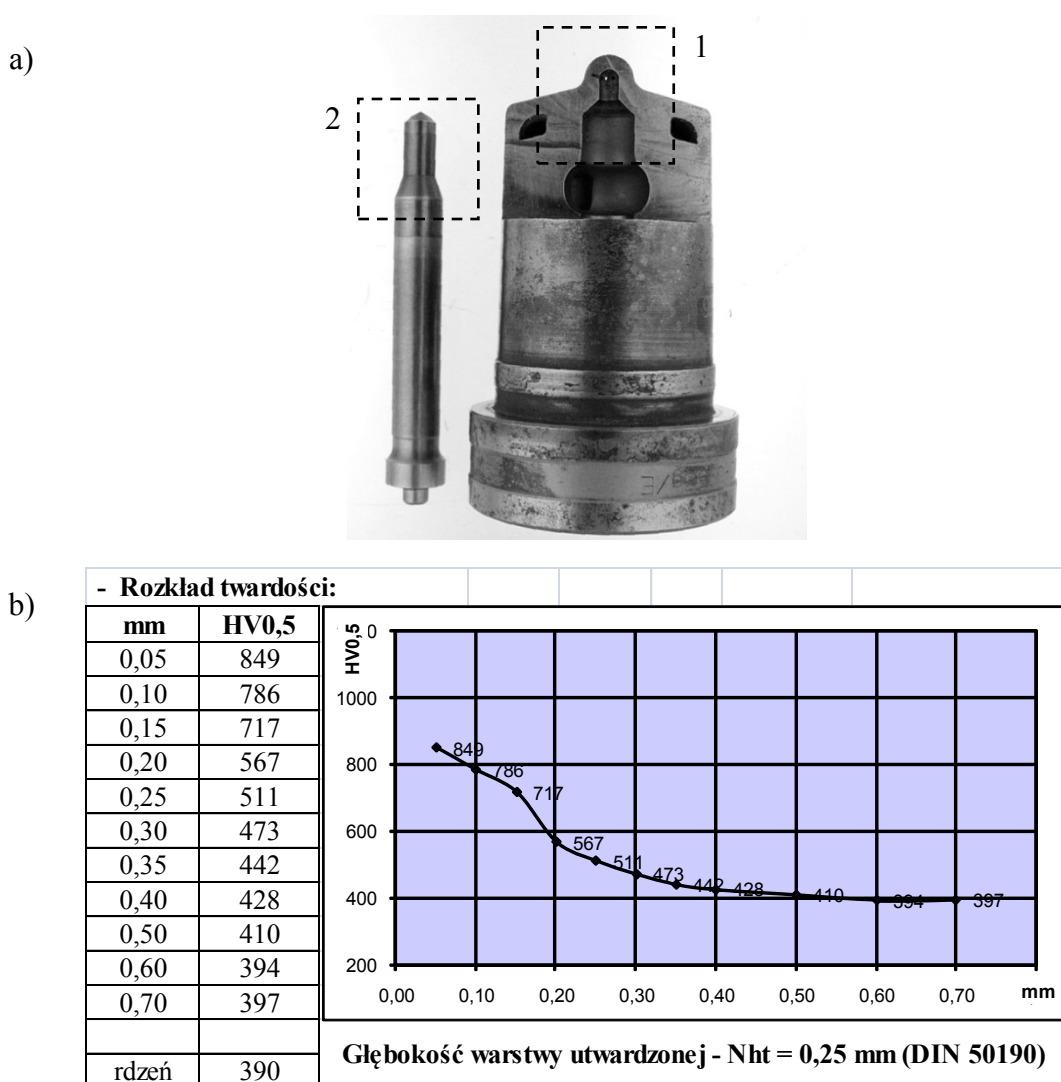
3.1.2. Badania metalograficzne rozpylacza

Szczegółowe informacje na temat własności materiałowych badanego obiektu uzyskano na podstawie badań metalograficznych. Pomiary zostały wykonane przez pracownię HCP

Cegielski posiadającą certyfikat jakości towarzystw klasyfikacyjnych: PRS i Germanischer Lloyd, a ich szczegółowe wyniki zawierają załączniki 8–11. W wyniku badań metalograficznych stwierdzono, że: korpus rozpylacza 1 (rys. 21a) wykonano ze stali do obróbki cieplno-chemicznej dla gatunku stali do azotowania 33CrMoV12-9. Skład chemiczny odpowiada wymaganiom normy PN-EN 10085:2003 i jest następujący:

C – 0,329%	Mn – 0,484%	Si – 0,210%
P – 0,007%	S – 0,002%	Cr – 2,033%
Ni – 0,117%	Cu – 0,053%	Mo – 0,799%
V – 0,263%	Al – 0,001%	

Za pomocą obróbki cieplno-chemicznej azotowania twardość stożka gniazda osiągnęła wartość ok. 62 HRC (rys. 21b).



Rys. 21. a) Elementy rozpylacza: 1 – korpus, 2 – iglica, b) rozkład twardości w warstwie azotowanej

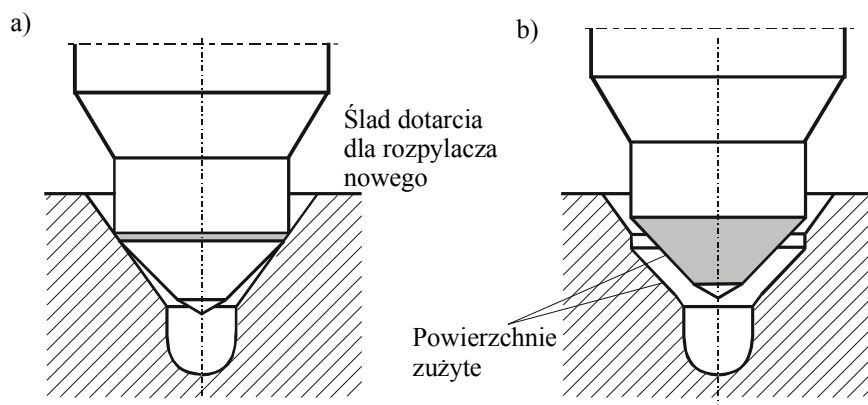
Iglica rozpylacza 2 (rys. 21a) jest wykonana ze stali narzędziowej HS6-5-2C (dawna SW18). Skład chemiczny odpowiada normie PN-EN ISO 4957:2004 i jest następujący:

C – 0,920%	Mn – 0,260%	Si – 0,271%
P – 0,018%	S – 0,005%	Cr – 3,817%
Ni – 0,139%	Cu – 0,079%	Mo – 4,775%
V – 1,688%	W – 6,083%	Co – 0,166%

Stosowną twardość ok. 62 HRC uzyskano podczas hartowania i odpuszczania.

3.1.3. Partia badanych rozpylaczy paliwa

W rozdziale 2 założono, że dla osiągnięcia celu badań należy w pierwszej kolejności dokonać klasyfikacji badanych partii rozpylaczy na fabrycznie nowe oraz niesprawne (naturalnie zużyte). Rysunek 22a przedstawia stan węzła tribologicznego stożka iglicy i gniazda jak dla nowego rozpylacza, natomiast rysunek 22b obrazuje stan rozpatrywanego węzła jak dla rozpylaczy niesprawnych.



Rys. 22. Zmiany w gnieździe stożkowym rozpylacza w wyniku zużycia: a) gniazdo rozpylacza nowego lub naprawionego, b) gniazdo rozpylacza po długim okresie pracy silnika (wtryskiwacz leje)

W tabeli 3 zapisano oznaczenia partii rozpylaczy przyjętych do badań eksperymentalnych. Oznaczenia R40 do R110 przypisano dla fabrycznie nowych rozpylaczy (8 szt.). Oznaczenia RU1 do RU8 przypisano dla niesprawnych rozpylaczy (8 szt.). Dodatkowo w tabeli 4 zestawiono wyniki pomiarów geometrycznych iglic i korpusów rozpylaczy niesprawnych według przyjętych oznaczeń od RU1 do RU8.

Tabela 3. Obiekt badań – partia rozpylaczy

Lp.	Korpus	Iglica	Kształt stożka iglicy	Kształt stożka gniazda	Rodzaj sygnału	Numer zapisu cyfrowego	Uwagi
Nowe rozpylacze							
1			Rys. 22a	Rys. 22a		R40 nowy	
2			Rys. 22a	Rys. 22a		R50 nowy	
3			Rys. 22a	Rys. 22a		R60 nowy	
4			Rys. 22a	Rys. 22a		R70 nowy	
5			Rys. 22a	Rys. 22a		R80 nowy	
6			Rys. 22a	Rys. 22a		R90 nowy	
7			Rys. 22a	Rys. 22a		R100 nowy	
8			Rys. 22a	Rys. 22a		R110 nowy	
Rozpylacze zużyte (po przetworzeniu 1500 – 4000 godzin)							
9	2	2		Rys. 22b		RU1	
10	10	10		Rys. 22b		RU2	
11	6	6		Rys. 22b		RU3	
12	1	1		Rys. 22b		RU4	
13	5	5		Rys. 22b		RU5	
14	9	9		Rys. 22b		RU6	
15	7	7		Rys. 22b		RU7	
16	8	8		Rys. 22b		RU8	



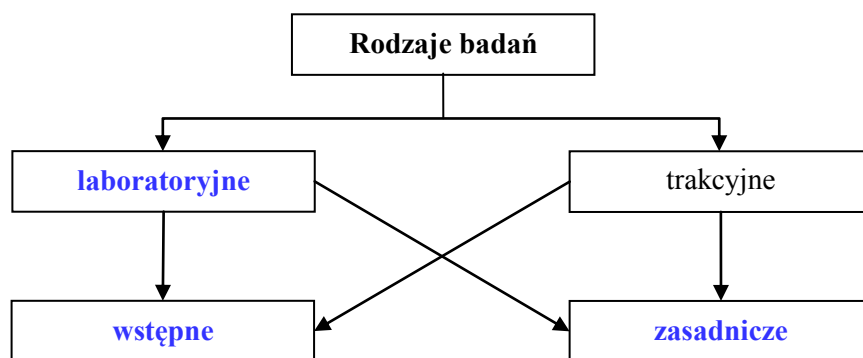
Rys. 23. Partia badanych rozpylaczy: górny rząd – fabrycznie nowe rozpylacze, dolny rząd – rozpylacze zużyte

Tabela 4. Wyniki pomiarów zużytych rozpylaczy

Parametr	RU1	RU2	RU3	RU4	RU5	RU6	RU7	RU8	
Korpus									
$\phi 9$ [mm]	9,005	9,009	9,011	9,018	9,006	9,006	9,013	9,006	
Walcowość $\phi 9$ [μm]	0,96	1,31	0,97	0,77	1,13	0,67	0,89	1,55	
Bicie stożka do $\phi 9$ [μm]	2,39	2,44	1,11	0,62	1,70	5,28	1,10	1,08	
NW stożka do $\phi 9$ [μm]	1,00	1,11	0,34	0,28	0,76	1,88	0,41	0,18	
Ra $\phi 9$ [μm]	0,13	0,05	0,12	0,07	0,06	0,07	0,07	0,10	
$\phi 9$ [mm]	8,998	9,002	9,002	9,010	8,997	8,996	9,006	9,000	
Iglica									
Walcowość $\phi 9$ [μm]	0,55	0,81	1,18	1,09	0,67	0,70	0,72	0,75	
Bicie stożka do $\phi 9$ [μm]	1,52	1,46	2,06	0,94	1,06	0,87	2,21	3,87	
NW stożka do $\phi 9$ [μm]	0,47	0,36	0,69	0,35	0,05	0,40	0,54	0,44	
Bicie $\phi 6$ do $\phi 9$ [μm]	1,13	6,81	3,18	0,65	0,83	0,51	0,92	1,17	
NW $\phi 6$ do $\phi 9$ [μm]	0,49	2,97	0,83	0,26	0,19	0,18	0,39	0,39	
Ra $\phi 9$ [μm]	0,06	0,05	0,06	0,07	0,08	0,06	0,09	0,05	
Długość stożka [mm]	1,10	1,14	1,12	1,11	1,09	1,12	1,10	1,13	
Luz [mm]	0,007	0,007	0,009	0,008	0,009	0,010	0,007	0,006	
Skok [mm]	0,70	0,64	0,68	0,66	0,66	0,68	0,73	0,71	

3.2. Wybór metody badań

Na podstawie przeglądu współczesnych metod badań diagnostycznych postanowiono dokonać oceny stanu wybranego węzła tribologicznego z wykorzystaniem emisji akustycznej. Na rysunku 24 przedstawiono rodzaje diagnostycznych badań eksperymentalnych obiektów technicznych. Dla wyeliminowania wpływu czynników zewnętrznych zastosowano badania laboratoryjne. Przed badaniami zasadniczymi przeprowadzono badania wstępne (rozpoznawcze), które przyczyniły się do wybrania optymalnych warunków badań zasadniczych [85, 86, 87, 88].

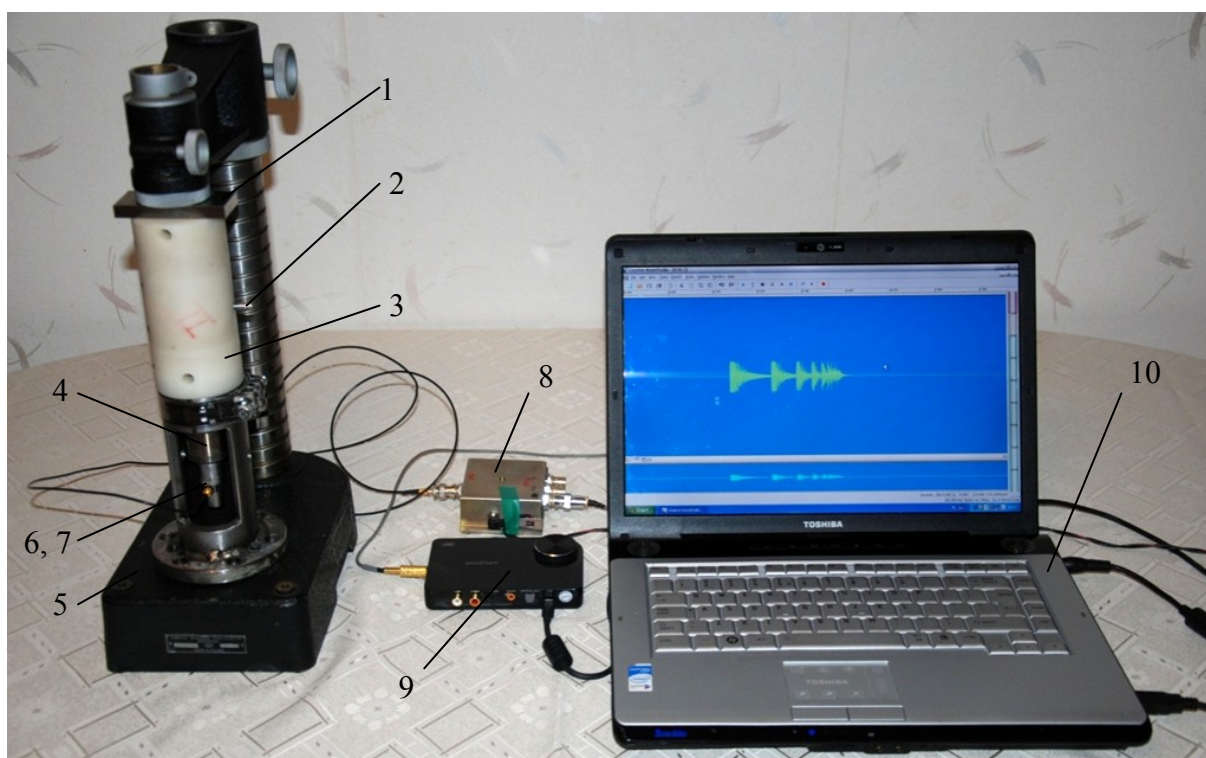


Rys. 24. Rodzaje diagnostycznych badań eksperymentalnych obiektów technicznych [70]
(kolorem niebieskim zaznaczono sposoby badań własnych)

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

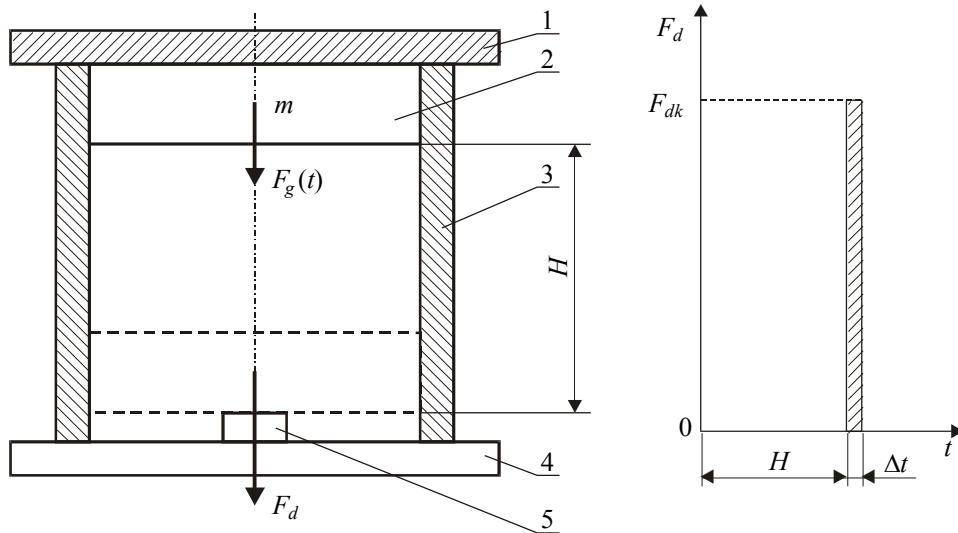
4.1. Opis stanowiska pomiarowego

Na podstawie literatury [4, 5, 45, 82, 83, 84, 88] i wyników badań wstępnych [85, 86, 87, 88] zostało opracowane stanowisko pomiarowe do badań zasadniczych (rys. 25).



Rys. 25. Zdjęcie stanowiska pomiarowego: 1 – górna płyta oporowa, 2 – dźwignia ciężarka, 3 – tuleja prowadząca, 4 – rozpylacz, 5 – statyw, 6 – łącznik profilowany, 7 – przetwornik piezoelektryczny 4371 V, 8 – wzmacniacz, 9 – karta dźwiękowa, 10 – laptop

W układzie pomiarowym generowany impuls siły wymuszającej (wyjaśnia rysunek 26) powstaje w wyniku swobodnego opuszczenia stalowego ciężarka w kształcie walca 2 o masie $m = 0,5$ kg z przyjętej wysokości $H = 23$ mm prowadzonego w teflonowej tulei 3. Spadający z wysokości H ciężarek 2 uderza o iglicę 5 z siłą końcowa F_{dk} .



Rys. 26. Model siły / impulsu wymuszającego; 1 – górna płyta oporowa, 2 – ciężarek stalowy o masie $m = 0,5$ kg, 3 – teflonowa tuleja prowadząca ciężarek, 4 – dolna płyta oporowa, 5 – iglica rozpylacza

Założenie 1 – przyjęto, że współczynnik tarcia ciężarka w tulei prowadzącej $\mu = 0$,

$F_g = mg = \text{const.}$, to według zasady zachowania energii

$$mgH = \frac{mV^2}{2} \quad (6)$$

Masa ciężarka zderza się z iglicą 5 z prędkością V_k

$$V_k = \sqrt{2gH} \quad (7)$$

Z zasady zachowania pędu powstaje siła uderzenia F_d

$$m(V_k - V_0) = F_d \Delta t \quad (8)$$

gdzie Δt to średni czas tworzenia impulsu mechanicznego. Ponieważ prędkość początkowa V_0 jest równa zero, zatem wyrażenie na siłę końcową F_{dk} przyjmie postać

$$F_{dk} = mV_k / \Delta t \quad (9)$$

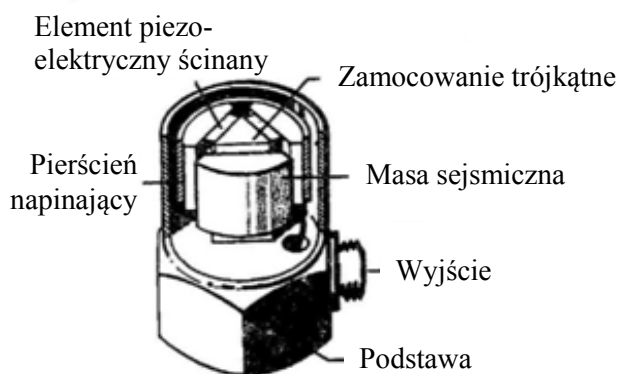
W wyniku uderzenia ciężarka 2 pod wpływem siły grawitacyjnej F_{dk} o iglicę 5, iglica przekazuje energię impulsu na powierzchnię styku stożkowej powierzchni iglicy i gniazda rozpylacza. Powstała energia wewnętrzna w postaci fali sprężystej wyzwała się na powierzchni zewnętrznej rozpylacza 4 (wg rys. 25), następnie poprzez stalowy łącznik 6 powstała energia wewnętrzna jest przekazywana na przetwornik piezoelektryczny 7, który przetwarza impuls uderzenia na sygnał elektryczny, z kolei sygnał elektryczny jest wzmacniany wzmacniaczem 8. Dalej elektryczny sygnał analogowy przetwarzany jest w 24-bitowej karcie dźwiękowej 9 firmy Soundblaster na postać cyfrową i zapisany w odpowiednim folderze

komputera 10. Każdy cyfrowy zapis pomiaru impulsu poddany jest specjalnej obróbce sygnału, w tym przypadku zastosowano program do obróbki dźwięku Wave studio firmy Creative Labs. Wzmacniacz 8 oraz oprogramowanie do analizy EA jest standardowe i zostało zaprojektowane przez IPPT PAN w Warszawie.

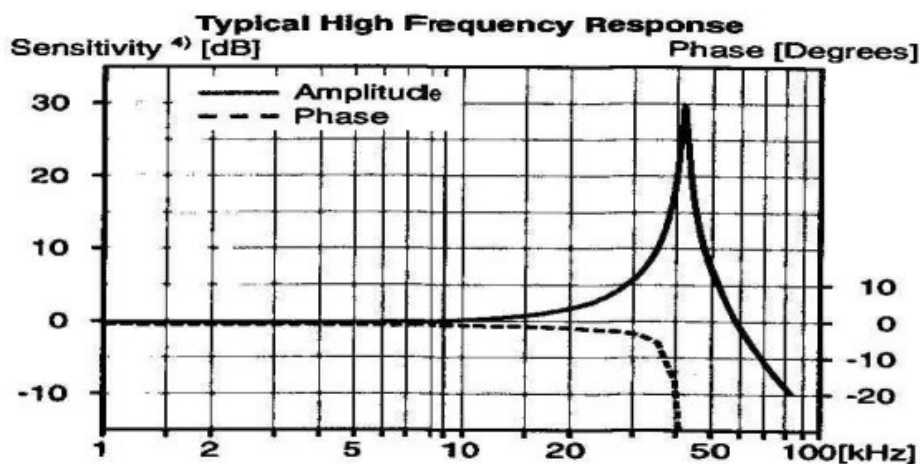
4.2. Charakterystyki głównych części toru pomiarowego

Na rysunkach 27–31 przedstawiono ważniejsze informacje techniczne związane z zastosowanymi elementami zestawu toru pomiarowego:

1) Przetwornik piezoelektryczny o konstrukcji pokazanej na rysunku 27 i charakterystyce częstotliwościowej przedstawionej na rysunku 28.

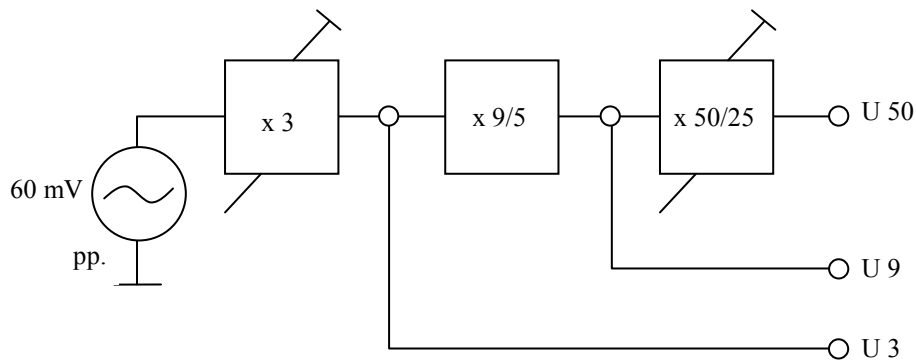


Rys. 27. Budowa czujnika 4371V firmy B&K

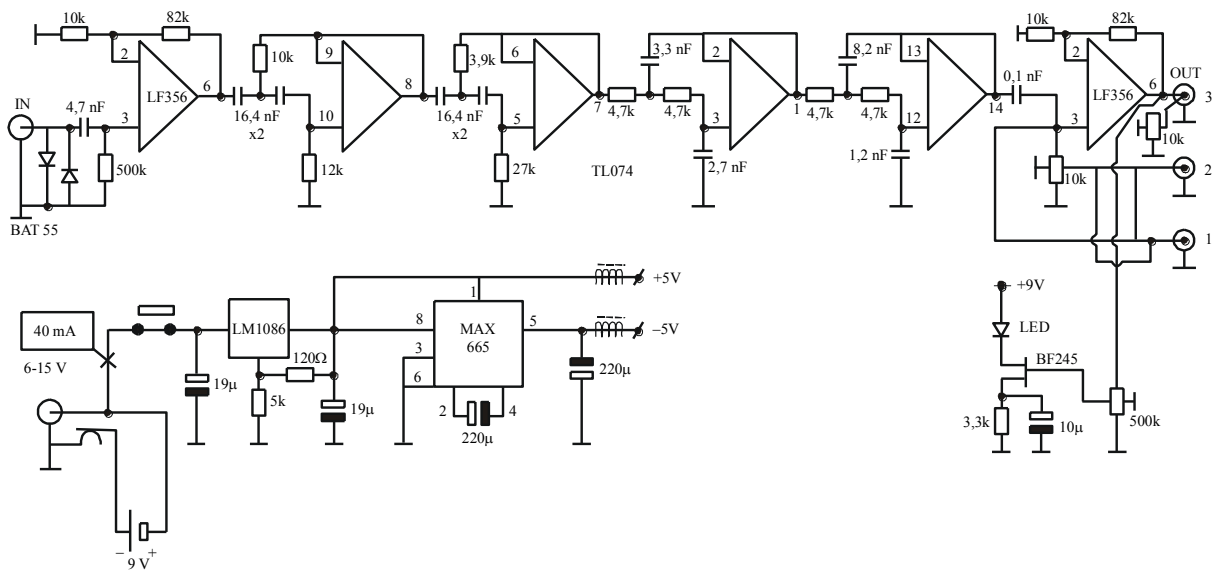


Rys. 28. Charakterystyka częstotliwościowa piezoelektrycznego czujnika 4371V [B&K]

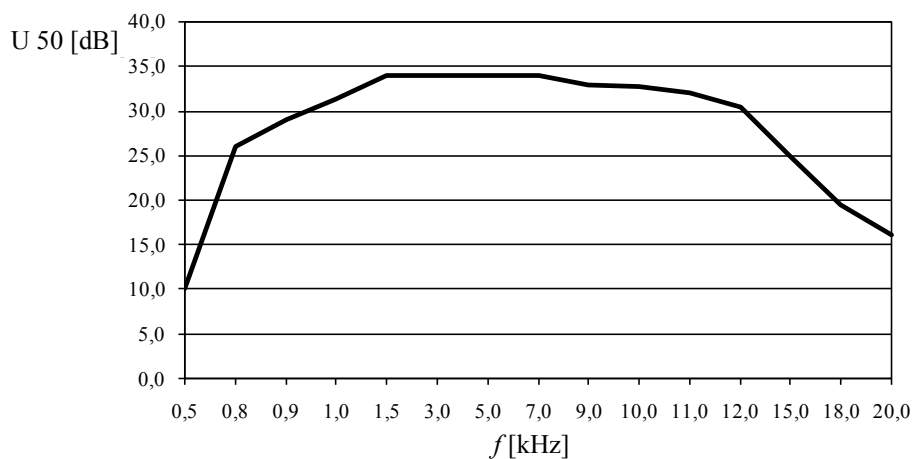
2) Wzmacniacz konstrukcji IPPT (rys. 29–31)



Rys. 29. Schemat blokowy wzmacniacza



Rys. 30. Wzmacniacz pasmowo-przepustowy czujnika drgań; pasmo: 900 kHz – 11 kHz; wzmacnienie: 1 – x3, 2 – x9, 3 – x50; zasilanie: 6÷15 V lub bateria 9 V; pobór prądu: 40 mA



Rys. 31. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa pasma przenoszenia wzmacniacza dla wzmacnienia 50-krotnego

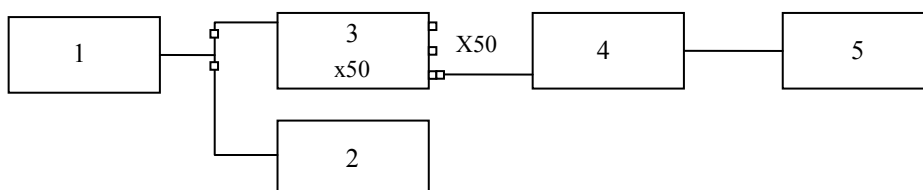
3) Karta dźwiękowa Creative USB SB X-Fi Surround 5.1 – dane techniczne:

- typ zewnętrzna
- producent układu Creative,
- model układu Sound Blaster X-Fi,
- interfejs USB,
- próbkowanie 96Hz,
- rodzaj wyjść wyjście słuchawkowe, wyjście S/PDIF optyczne, wyjścia na głośniki,
- rodzaj wejść line-in, wejście mikrofonowe.

4.3. Badanie dokładności toru pomiarowego

Badanie toru pomiarowego przeprowadzono według następującej procedury:

- testowy tor pomiarowy skonfigurowano jak na rysunku 32;
- generator sygnałów wzorcowych EMIX Model 51A (poz. 1 rys. 32) ustawiono na emitowanie sygnału prostokątnego z częstotliwością powtarzania sygnału 100 Hz;
- równolegle do toru pomiarowego podłączono dodatkowo miernik kontrolny sygnału emitowanego z generatora 2;
- wzorcowy sygnał z generatora 1 został wzmocniony x50 przez wzmacniacz 3 i dla tej wartości wzmocnienia przeprowadzono pomiary, następnie sygnał analogowy w karcie dźwiękowej 4 został przetworzony na sygnał cyfrowy i zapisany w odpowiednim pliku na dysku laptopa 5;
- do oceny toru wybrano przedział 50 kolejnych zarejestrowanych sygnałów, następnie specjalnym programem każdy z 50 sygnałów został zapisany w osobnym pliku;
- obróbkę zapisanych sygnałów przeprowadzono w oparciu o program do analizy sygnałów emisji akustycznej projektu IPPT, a wyniki ujęto w tabeli 5.



Rys. 32. Schemat układu do badania dokładności toru pomiarowego; 1 – generator sygnałów wzorcowych, 2 – przyrząd kontrolny, 3 – wzmacniacz, 4 – karta dźwiękowa, 5 – laptop

Tabela 5. Wyniki pomiaru dokładności toru pomiarowego

Lp.	Liczba pomiarów	Serie pomiarów	Średnia liczba zdarzeń			Średnia energia zdarzeń EA			Średnia wartość amplitudy		
			–	Δ [%]	odchylenie standardowe σ	[mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ	[mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	50	I	409	0,22	0,9	43 480	0,4	183	4686	0,26	12

Z analizy pomiarów zapisanych w tabeli 5 wynika, że dokładność toru pomiarowego jest dla wszystkich trzech miar sygnału EA poniżej 0,5%, dlatego przyjęto, że badany tor pomiarowy jest wiarygodny.

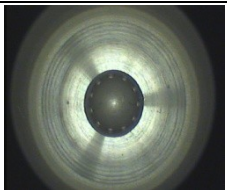

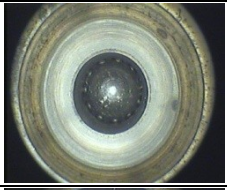

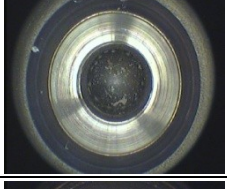

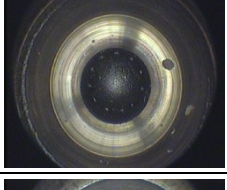

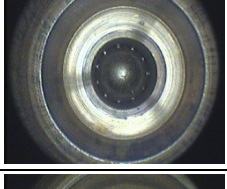

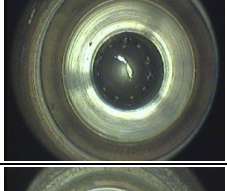

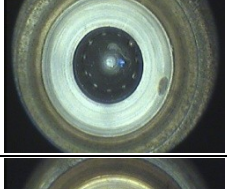
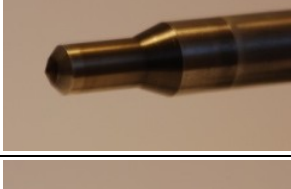
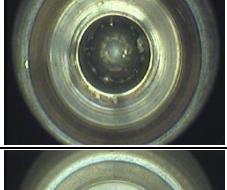

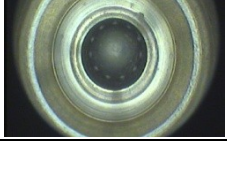
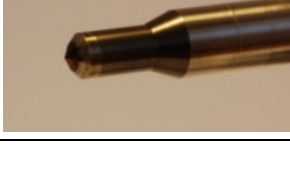
4.4. Badania wizualne za pomocą endoskopu

Przed pomiarami zasadniczymi na stanowisku pomiarowym (rys. 25) badana partia rozpylaczy (nowych i uszkodzonych) została poddana pomiarom metrologicznym, a wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 4. Dodatkowo badane rozpylacze sprawdzono za pomocą endoskopu jak na rysunku 33, a rezultaty badań przedstawiono w tabeli 6.



Rys. 33. Badanie gniazd stożkowych korpusów rozpylaczy paliwa za pomocą endoskopu

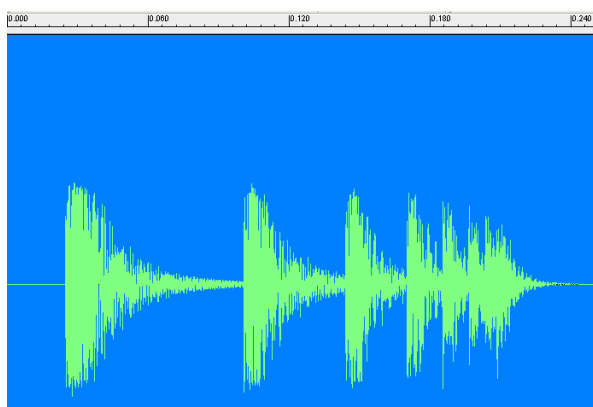
Tabela 6. Zdjęcia stożków iglicy i gniazd badanych rozpylaczy

Lp.	Badany rozpylacz	Stożek gniazda rozpylacza	Stożek iglicy	Uwagi
1	R40–R110			Styk liniowy stożka iglicy z gniazdem w wyniku różnicy kątów $\Delta = 30'$ jednakowy dla wszystkich nowych rozpylaczy
2	RU1			Styk na całej powierzchni stożka iglicy z gniazdem z punktowym uszkodzeniem stożka. Różnica kątów $\Delta = 0'$
3	RU2			Styk stożkowego tribologicznego węzła na całej powierzchni stożkowej. Zanik różnicy kątów powstały w wyniku „wyklepania”. $\Delta = 0'$
4	RU3			Styk stożkowego tribologicznego węzła na całej powierzchni stożkowej. Zanik różnicy kątów powstały w wyniku „wyklepania”. $\Delta = 0'$
5	RU4			Styk stożkowego tribologicznego węzła na całej powierzchni stożkowej. Zanik różnicy kątów powstały w wyniku „wyklepania”. $\Delta = 0'$
6	RU5			Styk stożkowego tribologicznego węzła na całej powierzchni stożkowej. Zanik różnicy kątów powstały w wyniku „wyklepania”. $\Delta = 0'$
7	RU6			Styk stożkowego tribologicznego węzła na całej powierzchni stożkowej. Zanik różnicy kątów powstały w wyniku „wyklepania”. $\Delta = 0'$
8	RU7			Styk stożkowego tribologicznego węzła na całej powierzchni stożkowej. Zanik różnicy kątów powstały w wyniku „wyklepania”. $\Delta = 0'$
9	RU8			Styk stożkowego tribologicznego węzła na całej powierzchni stożkowej. Zanik różnicy kątów powstały w wyniku „wyklepania”. $\Delta = 0'$

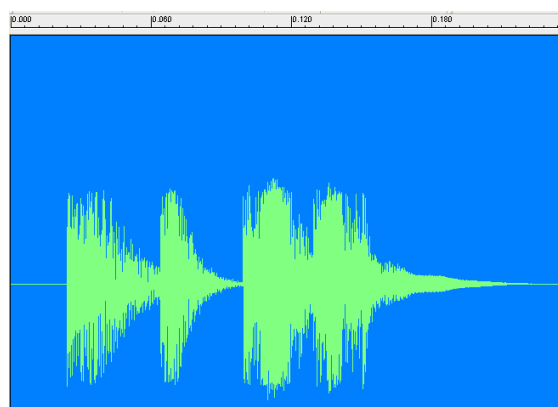
4.5. Badania zasadnicze

Badania przeprowadzono na stanowisku, jak pokazano na rysunku 25, według założonej procedury pomiarowej. Generowanie sygnału impulsowego odbywało się poprzez uderzenie ciężarka w iglicę, co powodowało powstanie fali sprężystej. Fala ta przemieszczała się przez badany węzeł tribologiczny do czujnika drgań, w którym była przetwarzana na sygnał elektryczny. Szczegóły techniczne opisanej powyżej procedury pomiarowej zostały przedstawione we wniosku o przyznanie patentu na opracowaną, oryginalną metodę badawczą.

Badania przeprowadzono w kilku seriach pomiarowych. Każda seria składała się z 30 pomiarów sygnału EA wygenerowanego w badanym układzie pod wpływem impulsu mechanicznego (opuszczenie ciężarka). Na rysunkach 34 i 35 zamieszczono typowe przebiegi zarejestrowanego sygnału EA dla nowego i zużytego rozpylacza.

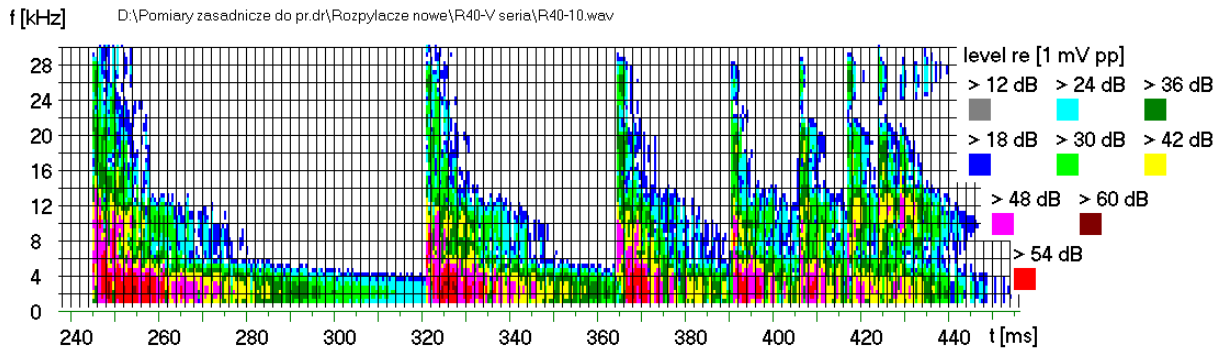


Rys. 34. Sygnał EA dla nowego rozpylacza R40

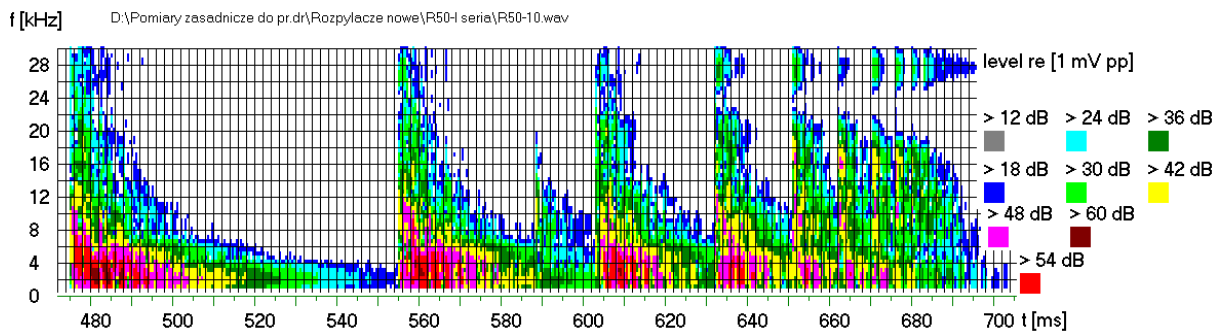


Rys. 35. Sygnał EA dla uszkodzonego rozpylacza RU1

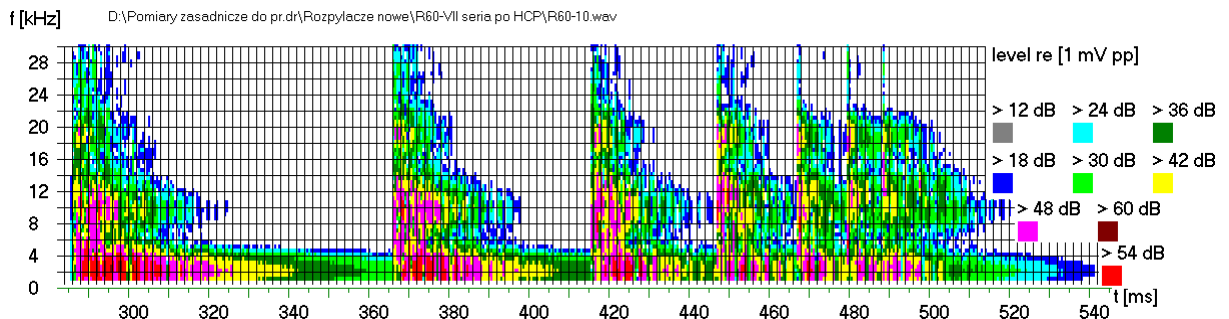
Po rejestracji sygnał EA został poddany odpowiedniej obróbce komputerowej w celu uzyskania akustogramów częstotliwościowo-czasowych oraz wykresów amplitudowo-czasowych sygnału EA. Przykładowe akustogramy dla nowych i zużytych rozpylaczy przedstawiono na rysunkach 36–43. Wyniki te wskazują na dużą powtarzalność akustogramów dla nowych rozpylaczy. W przypadku zużytych rozpylaczy występuje natomiast wyraźne zróżnicowanie akustogramów polegające na innej koncentracji energii sygnału EA w poszczególnych pasmach częstotliwości. Kolejne rysunki 44–59 zawierają wykresy amplitudowo-czasowe sygnału EA dla wszystkich badanych rozpylaczy i potwierdzają informacje zawarte w akustogramach, a mianowicie, że dla nowych rozpylaczy występuje duże podobieństwo w przebiegu zarejestrowanego sygnału EA, natomiast w przypadku zużytych rozpylaczy kształt sygnału EA i jego maksymalna amplituda są wyraźnie inne dla każdego rozpylacza.



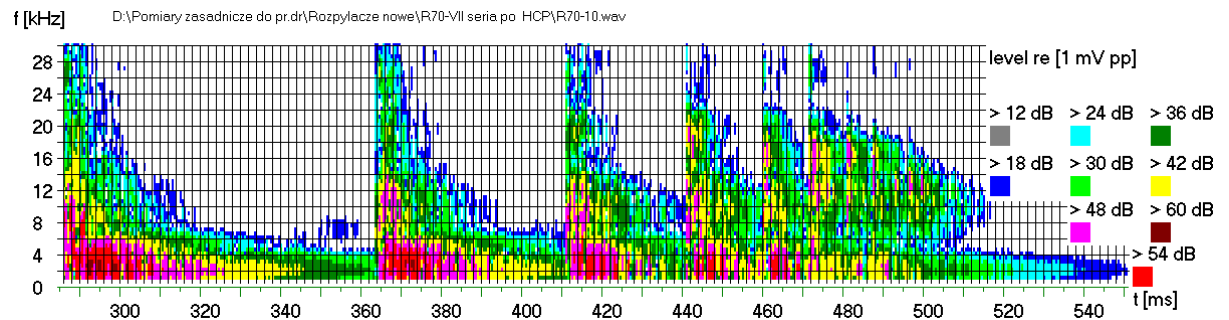
Rys. 36. Akustogram dla nowego rozpylacza R40



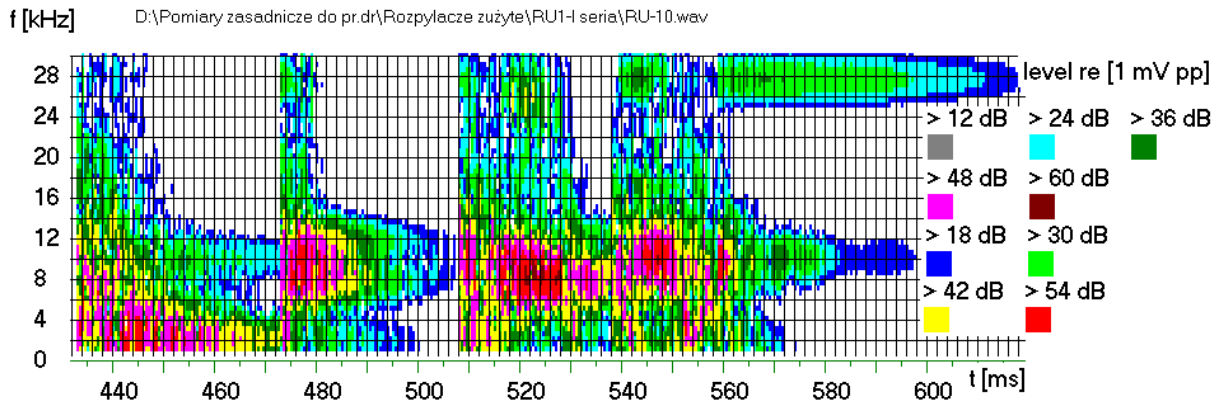
Rys. 37. Akustogram dla nowego rozpylacza R50



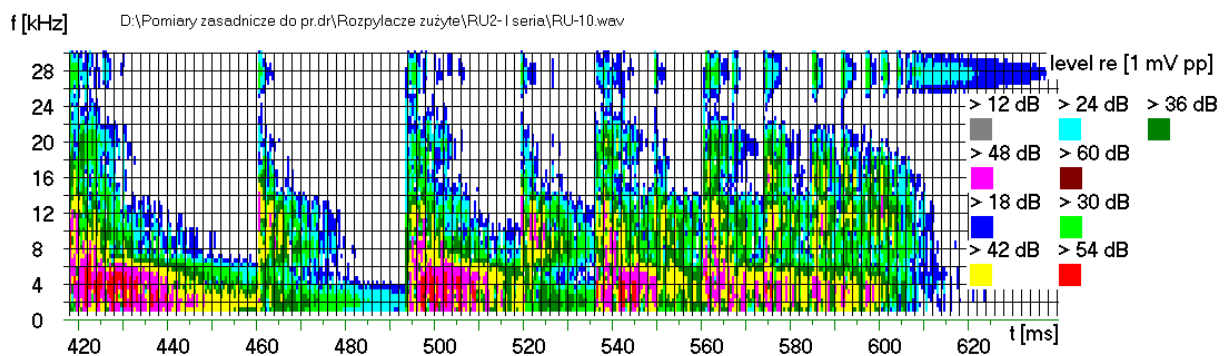
Rys. 38. Akustogram dla nowego rozpylacza R60



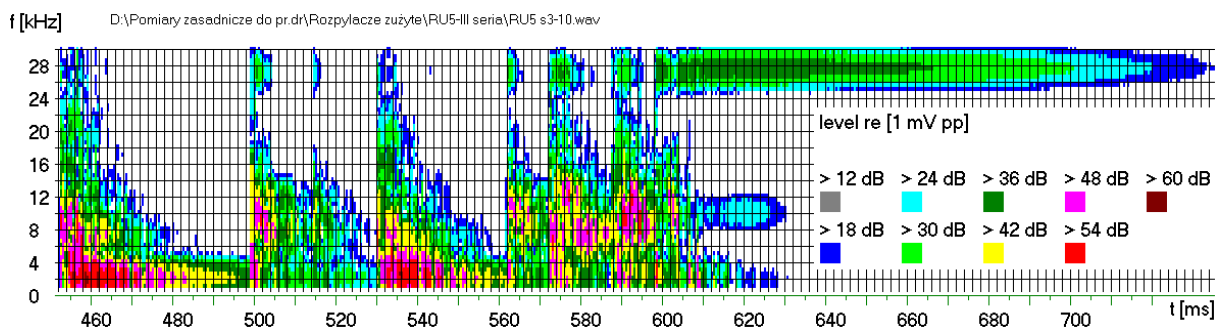
Rys. 39. Akustogram dla nowego rozpylacza R70



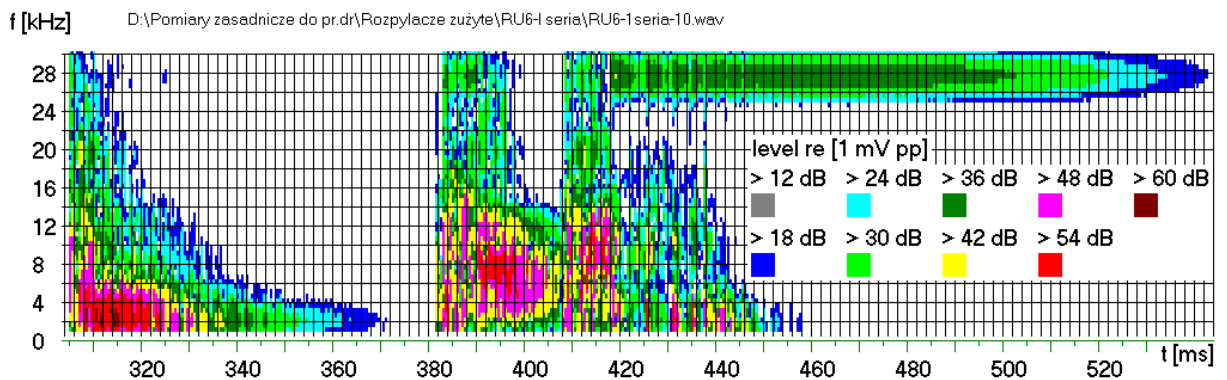
Rys. 40. Akustogram dla zużytego rozpylacza RU1



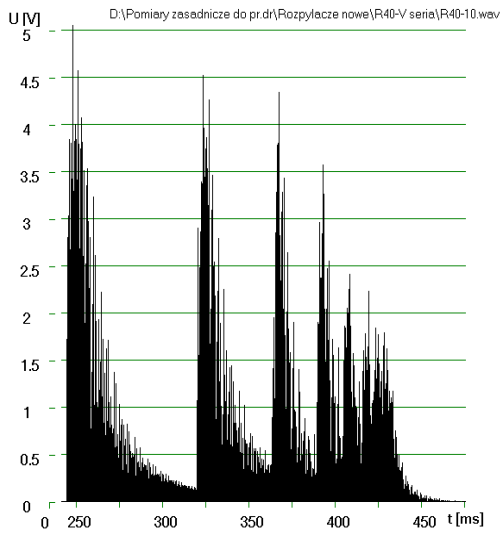
Rys. 41. Akustogram dla zużytego rozpylacza RU2



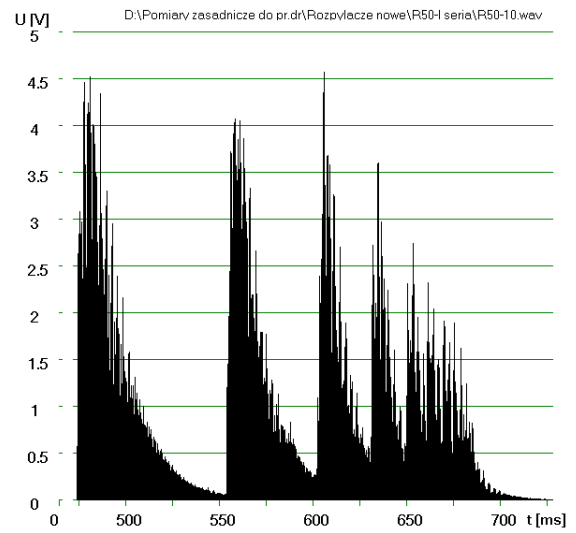
Rys. 42. Akustogram dla zużytego rozpylacza RU5



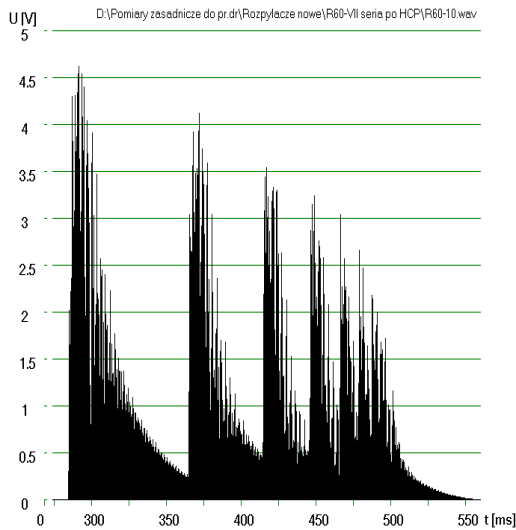
Rys. 43. Akustogram dla zużytego rozpylacza RU6



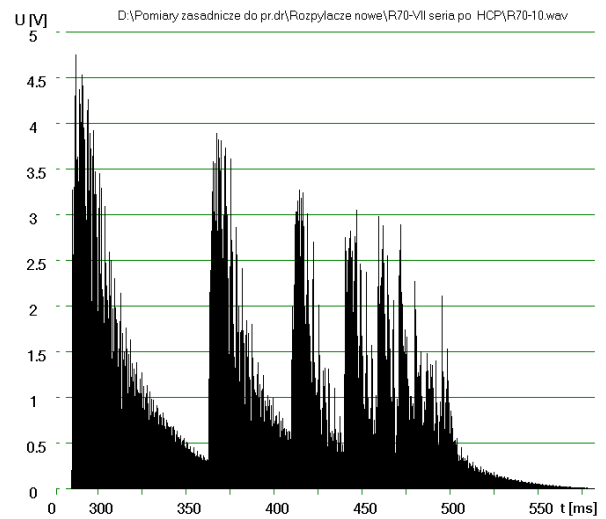
Rys. 44. Nowy rozpylacz R40



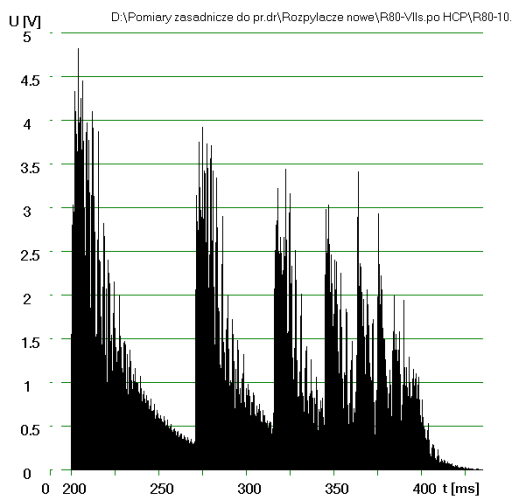
Rys. 45. Nowy rozpylacz R50



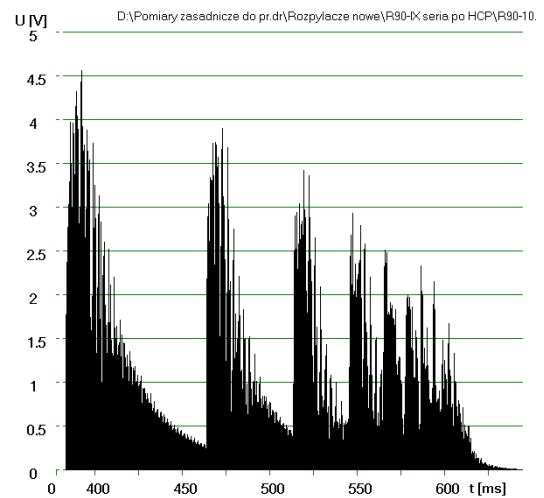
Rys. 46. Nowy rozpylacz R60



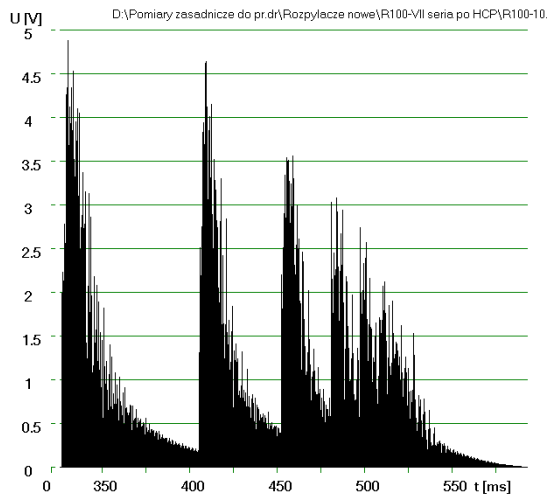
Rys. 47. Nowy rozpylacz R70



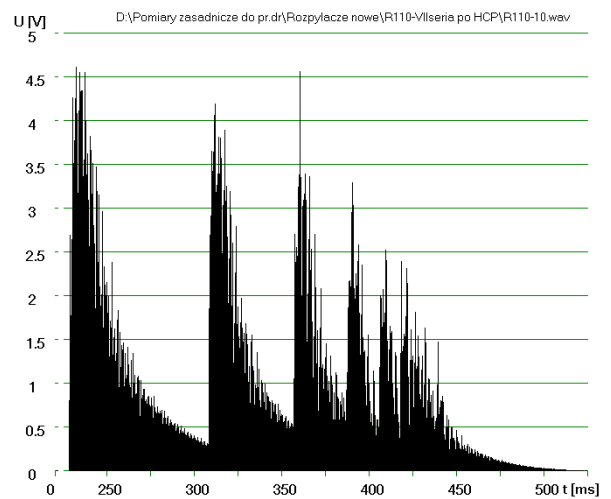
Rys. 48. Nowy rozpylacz R80



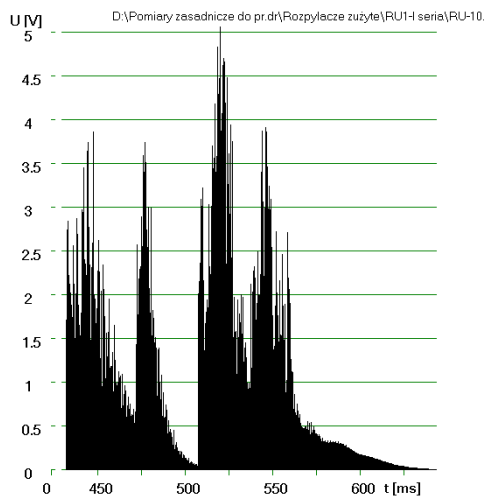
Rys. 49. Nowy rozpylacz R90



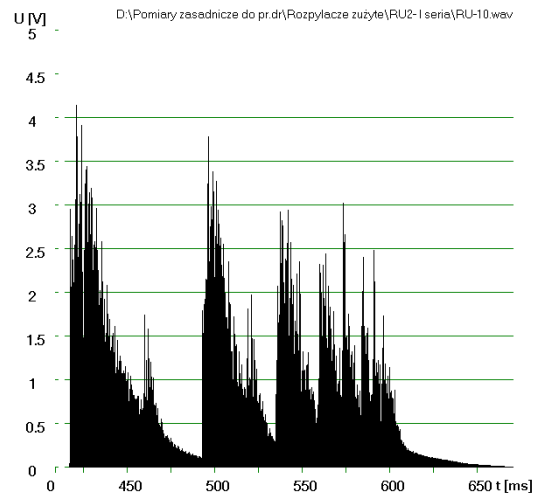
Rys. 50. Rozpylacz nowy R100



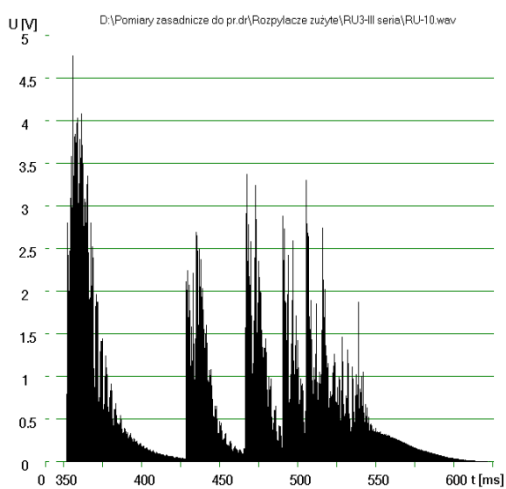
Rys. 51. Rozpylacz nowy R110



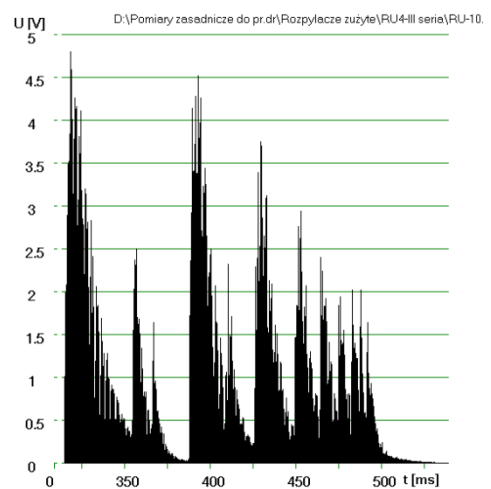
Rys. 52. Rozpylacz zużyty RU1



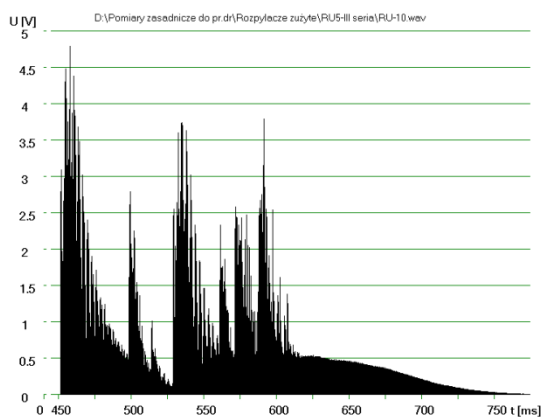
Rys. 53. Rozpylacz zużyty RU2



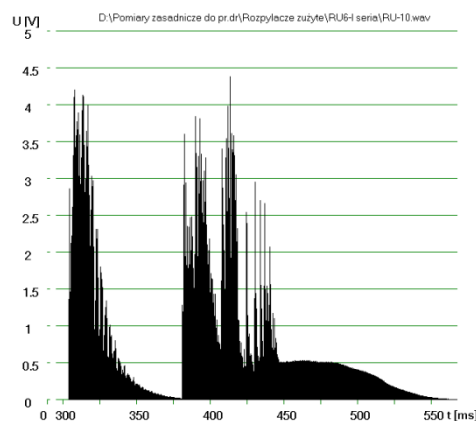
Rys. 54. Rozpylacz zużyty RU3



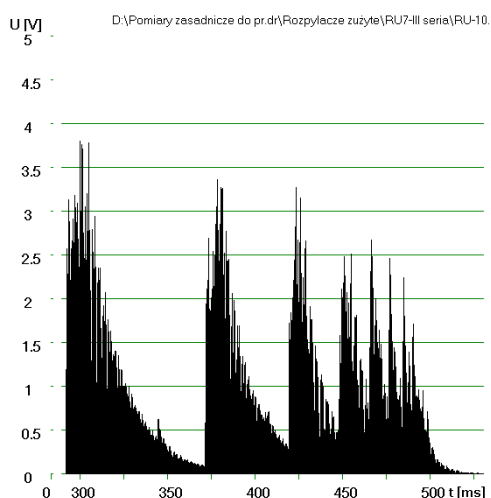
Rys. 55. Rozpylacz zużyty RU4



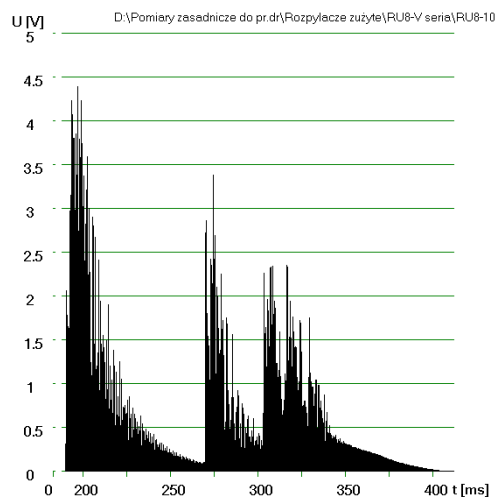
Rys. 56. Rozpylacz zużyty RU5



Rys. 57. Rozpylacz zużyty RU6



Rys. 58. Rozpylacz zużyty RU7



Rys. 59. Rozpylacz zużyty RU8

Dla każdego rozpylacza wykonano dwie serie pomiarowe, w których przeprowadzono po 30 pomiarów sygnału EA. Po pierwszej serii pomiarowej badany rozpylacz był demontowany ze stanowiska badawczego, a następnie od rozpylacza odłączano czujnik piezoelektryczny. Przed drugą serią pomiarów ponownie montowano czujnik do rozpylacza, a następnie rozpylacz z czujnikiem umieszczano na stanowisku pomiarowym w tej samej pozycji co w pierwszej serii. Dla jednego rozpylacza wykonano 60 pomiarów po 30 na jedną serię, co w przypadku 8 nowych rozpylaczy (R40–R110) daje w sumie 480 pomiarów. W taki sam sposób przeprowadzono pomiary dla 8 zużytych rozpylaczy (RU1–RU8). W rezultacie wykonano więc łącznie 960 pomiarów.

Następnym etapem obróbki sygnałów EA było obliczenie, dla różnych progów wykrywalności, wartości trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej: średniej energii zdarzeń, średniej wartości amplitudy i średniej liczby zdarzeń. Wyniki obliczeń wartości średnich

tych miar dla obu serii pomiarowych w przypadku nowych i zużytych rozpylaczy przedstawiono w tabelach 7–20. W tabelach powyższe serie pomiarowe zostały oznaczone jako I i II. Dla każdej serii pomiarowej obliczono też odchylenie standardowe σ dla małej próby

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

gdzie:

$x_i, i = 1, 2, \dots, n$ – wartość jednej z trzech wybranych miar sygnału EA,

n – ilość pomiarów w próbie ($n \leq 30$),

\bar{x} – wartość średnia

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

Dodatkowo w tabelach 7–20 dla każdej miary emisji akustycznej wyznaczono procentowy błąd pomiędzy I i II serią pomiarową, który oznaczono jako Δ . Jak wynika z danych w tabelach, wartości procentowe błędu Δ pomiędzy I i II serią pomiarów dla nowych rozpylaczy w zdecydowanej większości przypadków nie przekraczają 10%, natomiast dla rozpylaczy niesprawnych są zróżnicowane z powodu innego stopnia zużycia stożkowych powierzchni iglicy i gniazda rozpylacza i wynoszą od 0,1 do 49%. Wyniki badań z tabel 7–20 po uśrednieniu wartości miar sygnałów EA z I i II serii pomiarowej zostały przedstawione za pomocą wykresów słupkowych na rysunkach 60–79. Jak widać z zestawienia tych danych pomiarowych, w obu grupach rozpylaczy występuje pewien określony rozrzut wartości każdej z miar emisji akustycznej. Z porównania wykresów na rysunkach 60–79 wynika, że rozrzut ten jest najmniejszy dla średniej energii zdarzeń (rysunki 60–66), natomiast jest największy w przypadku trzeciej miary emisji akustycznej, czyli średniej liczby zdarzeń (rysunki 74–79). Prawidłowość tę potwierdzają wartości trzech miar emisji akustycznej uśrednione dla każdej grupy rozpylaczy (nowe, zużyte) przy danym progu wykrywalności, które zestawiono w tabelach 21–23. Obliczając bowiem stosunek pomiędzy odchyleniem standardowym a wartością średnią, uzyskamy np. dla rozpylaczy nowych zakres wartości tego stosunku od 0,053 do 0,065 dla średniej energii zdarzeń, podczas gdy dla średniej liczby zdarzeń wartości tego stosunku mieszczą się w przedziale 0,141–0,221.

Tabela 7. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 50 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	R40	I	13 076	3,9	447	2128	2,8	55	1123	0,2	30
		II	12 581		350	2067		52	1121		27
2	R50	I	12 255	-19,9	595	2098	-15,3	99	1452	7,9	62
		II	14 699		392	2421		46	1336		33
3	R60	I	12 867	-5,7	353	2593	-1,5	48	1639	1,4	46
		II	13 119		259	2634		34	1615		32
4	R70	I	13 606	-1,6	475	2530	-0,6	48	1601	-0,7	57
		II	13 830		440	2545		56	1613		52
5	R80	I	12 966	3,5	554	2699	3,4	100	1688	0,0	54
		II	12 502		380	2605		66	1688		39
6	R90	I	12 571	6,8	388	2459	4,5	64	1677	-5,3	55
		II	11 714		401	2348		71	1766		53
7	R100	I	14 213	4,9	594	2367	3,5	49	1255	-1,4	40
		II	13 507		451	2283		64	1273		42
8	R110	I	13 546	4,2	691	2353	4,3	76	1444	-4,3	42
		II	12 973		1365	2250		183	1507		186

Tabela 8. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 50 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	RU1	I	7451	-4,0	835	1721	-3,7	163	2498	16,3	192
		II	7755		1242	1786		207	2089		277
2	RU2	I	8074	-13,0	862	1606	-9,3	164	2065	5,7	210
		II	9131		666	1756		125	1946		129
3	RU3	I	7823	8,9	2233	1500	7,6	316	1866	-10,1	433
		II	7124		2844	1386		466	2055		628
4	RU4	I	8642	9,4	945	1714	8,4	185	1896	-0,1	209
		II	7825		769	1569		145	1898		185
5	RU5	I	6612	-7,6	1578	1261	0,6	239	2630	7,9	580
		II	7119		2120	1253		310	2422		776
6	RU6	I	5686	-18,8	1024	1262	-16,9	192	2510	-0,2	459
		II	6756		1788	1476		317	2516		563
7	RU7	I	8433	-13,2	1595	1721	-5,3	307	2107	7,9	402
		II	9554		1572	1813		235	1940		346
8	RU8	I	6774	-49,0	1539	1285	-29,4	236	1769	18,9	420
		II	10 100		3771	1664		405	1433		365

Tabela 9. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 100 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	R40	I	13269	3,6	446	2189	2,5	56	1091	0,6	28
		II	12813		337	2133		50	1084		27
2	R50	I	12255	-20,8	595	2098	-17,6	99	1452	9,8	62
		II	14806		390	2468		47	1309		32
3	R60	I	12969	-2,4	343	2639	-2,0	48	1608	1,8	45
		II	13282		255	2692		34	1579		32
4	R70	I	13877	-1,6	475	2609	-0,4	51	1550	-0,9	55
		II	14102		419	2620		55	1565		49
5	R80	I	13153	3,9	514	2762	3,7	91	1647	-0,2	50
		II	12638		343	2659		58	1651		35
6	R90	I	12692	6,8	330	2507	4,3	54	1642	-5,1	48
		II	11828		372	2398		65	1726		49
7	R100	I	14417	4,7	559	2429	3,2	45	1222	-1,1	36
		II	13726		370	2349		54	1236		34
8	R110	I	13773	0,3	703	2421	2,9	75	1401	1,2	38
		II	13726		370	2349		54	1236		34

Tabela 10. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 100 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	RU1	I	7 895	-3,7	946	1829	-3,3	185	2347	16,0	196
		II	8 187		1326	1890		223	1970		269
2	RU2	I	8 832	-10,0	796	1766	-6,4	152	1864	2,8	162
		II	9 724		666	1880		126	1811		117
3	RU3	I	8 620	8,0	2472	1666	6,3	350	1676	-7,9	411
		II	7 930		3026	1560		496	1809		558
4	RU4	I	9 720	11,1	665	1938	10,0	133	1659	-2,3	119
		II	8 638		745	1743		141	1698		149
5	RU5	I	7 444	-12,6	1848	1427	-3,9	282	2326	11,9	561
		II	8 386		2457	1484		362	2047		731
6	RU6	I	6 240	-15,7	1199	1393	-14,0	214	2268	-2,6	432
		II	7 222		1918	1589		341	2328		525
7	RU7	I	9 253	-13,4	1375	1905	-5,3	265	1876	7,6	303
		II	10 502		1414	2007		209	1732		259
8	RU8	I	7 256	-44,8	1646	1392	-26,2	254	1624	17,3	379
		II	10 511		3726	1758		395	1342		324

Tabela 11. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 250 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	R40	I	13 415	2,9	359	2298	2,2	47	1033	1,0	24
		II	13 019		272	2246		45	1022		24
2	R50	I	13 252	-10,6	469	2324	-9,1	82	1299	2,0	43
		II	14 665		387	2537		49	1272		31
3	R60	I	12 907	-2,8	314	2704	-2,2	43	1564	2,1	42
		II	13 277		266	2765		37	1531		33
4	R70	I	13 925	2,1	427	2696	-0,6	55	1493	-0,7	47
		II	14 228		367	2713		50	1504		44
5	R80	I	13 232	4,1	453	2854	3,8	81	1588	-0,06	41
		II	12 687		287	2744		44	1589		31
6	R90	I	12 684	6,7	305	2582	4,0	50	1587	-4,8	43
		II	11 828		313	2477		57	1664		41
7	R100	I	14 468	4,9	539	2519	3,0	42	1174	-0,9	33
		II	13 755		310	2441		50	1185		30
8	R110	I	13 851	3,8	653	2514	3,7	64	1342	8,5	34
		II	13 311		1090	2420		148	1384		119

Tabela 12. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 250 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	RU1	I	8 547	-4,2	1145	1994	-3,8	225	2140	16,5	221
		II	8 909		1428	2070		244	1785		250
2	RU2	I	9 981	-6,6	580	2024	-3,3	113	1598	-0,8	89
		II	10 648		613	2091		117	1612		92
3	RU3	I	9 847	6,7	2635	1949	4,7	381	1405	-3,9	343
		II	9 185		3026	1856		498	1461		423
4	RU4	I	10 807	9,1	208	2194	8,1	46	1446	0,0	29
		II	9 814		570	2016		108	1446		92
5	RU5	I	8 800	-17,6	2160	1716	-8,9	332	1912	16,6	514
		II	10 351		2677	1869		393	1593		633
6	RU6	I	7 192	-12,1	1709	1629	-11,1	300	1932	-4,6	419
		II	8 069		2163	1811		391	2022		462
7	RU7	I	10 396	-12,7	919	2190	-4,1	172	1590	5,7	173
		II	11 724		1237	2280		172	1499		172
8	RU8	I	8 023	-38,6	1705	1587	-21,8	266	1395	14,6	307
		II	11 126		3499	1933		363	1190		258

Tabela 13. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 500 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	R40	I	13 788	1,8	338	2479	1,3	50	941	2,1	27
		II	13 531		300	2446		49	921		23
2	R50	I	13 716	-2,9	380	2506	-3,2	66	1191	-3,6	34
		II	14 119		359	2588		49	1234		29
3	R60	I	12 606	-3,6	296	2771	-3,2	43	1510	2,1	39
		II	13 059		284	2840		41	1478		33
4	R70	I	13 732	-2,8	408	2776	-0,7	58	1434	-0,4	44
		II	14 117		361	2803		50	1440		41
5	R80	I	12 523	-3,7	256	2831	-3,5	35	1524	-0,7	28
		II	12 996		410	2932		74	1535		45
6	R90	I	12 412	6,6	287	2658	3,9	48	1528	-4,3	42
		II	11 584		294	2554		57	1594		40
7	R100	I	14 535	5,2	562	2662	3,2	50	1098	-0,7	35
		II	13 776		308	2577		47	1106		29
8	R110	I	13 581	3,9	671	2599	3,2	69	1284	-2,4	36
		II	13 048		920	2515		121	1315		80

Tabela 14. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 500 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	RU1	I	9 239	-4,4	1315	2173	-4,0	258	1935	17,3	217
		II	9 651		1444	2260		253	1604		223
2	RU2	I	10 840	-4,8	285	2244	-2,0	58	1410	-2,3	32
		II	11 366		481	2291		93	1443		63
3	RU3	I	10 751	5,2	2419	2210	3,2	353	1191	0,0	252
		II	10 187		2668	2138		443	1190		264
4	RU4	I	11 130	5,8	141	2335	4,9	32	1343	4,1	27
		II	10 475		307	2220		57	1287		45
5	RU5	I	9 957	-15,5	2131	1999	-8,3	333	1582	15,9	427
		II	11 504		2623	2165		394	1329		524
6	RU6	I	8 104	-8,5	2097	1868	-8,1	379	1654	-7,2	392
		II	8 798		2310	2021		425	1774		405
7	RU7	I	11 042	-10,5	575	2403	-1,8	102	1413	2,6	110
		II	12 204		1116	2448		152	1375		147
8	RU8	I	8 881	-33,2	1503	1829	-18,2	238	1155	11,7	213
		II	11 832		3205	2162		327	1020		188

Tabela 15. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 1000 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	R40	I	13 871	1,6	386	2707	1,2	61	826	2,4	28
		II	13 647		296	2674		52	806		19
2	R50	I	13 883	1,4	326	2725	-1,1	61	1049	-4,8	26
		II	13 683		359	2757		56	1103		29
3	R60	I	12 243	-4,7	282	2913	-2,3	48	1380	1,3	38
		II	12 847		239	2983		37	1362		26
4	R70	I	13 470	-3,1	376	2939	-0,9	56	1310	-0,6	45
		II	13 909		353	2967		51	1318		38
5	R80	I	12 660	2,7	354	3080	2,9	72	1419	1,6	49
		II	12 321		245	2992		41	1396		26
6	R90	I	12 093	6,4	250	2804	3,8	51	1398	-3,4	36
		II	11 356		267	2701		57	1448		35
7	R100	I	14 455	4,6	591	2868	2,4	60	978	0,6	33
		II	13 815		332	2797		56	972		30
8	R110	I	13 278	4,4	683	2797	3,7	74	1156	-1,1	36
		II	12 718		604	2696		68	1169		45

Tabela 16. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 1000 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	RU1	I	10 297	-4,4	1270	2460	-3,8	253	1630	16,9	144
		II	10 755		1285	2554		216	1354		148
2	RU2	I	11 170	-5,3	213	2414	-3,6	41	1267	-0,3	27
		II	11 768		270	2503		58	1271		31
3	RU3	I	11 590	5,7	1772	2532	3,7	260	965	0,8	123
		II	10 925		1966	2437		330	957		96
4	RU4	I	11 145	3,2	149	2483	2,4	23	1228	7,7	31
		II	10 787		254	2423		42	1133		33
5	RU5	I	10 664	-10,6	1686	2284	-5,4	280	1277	13,4	251
		II	11 801		2338	2408		379	1105		334
6	RU6	I	9 378	-4,9	2129	2214	-5,6	397	1292	-10,4	305
		II	9 842		2127	2340		406	1427		292
7	RU7	I	11 179	-10,4	521	2600	-0,7	100	1258	1,1	102
		II	12 346		1019	2620		149	1243		152
8	RU8	I	10 440	-21,8	671	2270	-10,5	95	827	2,7	63
		II	12 726		2443	2509		226	804		76

Tabela 17. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 2000 mV

Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	R40	I	14 014	2,0	378	3023	1,4	65	664	2,2	23
		II	13 735		306	2979		61	649		18
2	R50	I	13 983	0,6	291	3000	-3,5	53	873	-0,3	21
		II	13 893		278	3106		51	876		21
3	R60	I	12 302	-3,6	244	3183	-1,1	52	1145	-1,1	33
		II	12 748		214	3221		38	1158		23
4	R70	I	13 542	-2,3	336	3220	-0,7	60	1096	-1,2	42
		II	13 858		338	3245		58	1110		38
5	R80	I	12 563	2,0	290	3325	2,4	64	1214	2,0	47
		II	12 311		271	3245		50	1189		30
6	R90	I	12 044	3,6	261	3079	1,9	57	1169	0,2	32
		II	11 605		285	3019		64	1166		32
7	R100	I	14 365	2,8	618	3120	0,9	70	832	3,7	33
		II	13 958		413	3091		77	801		30
8	R110	I	13 284	3,6	705	3047	1,9	81	951	0,0	31
		II	12 773		590	2987		81	951		45

Tabela 18. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 2000 mV

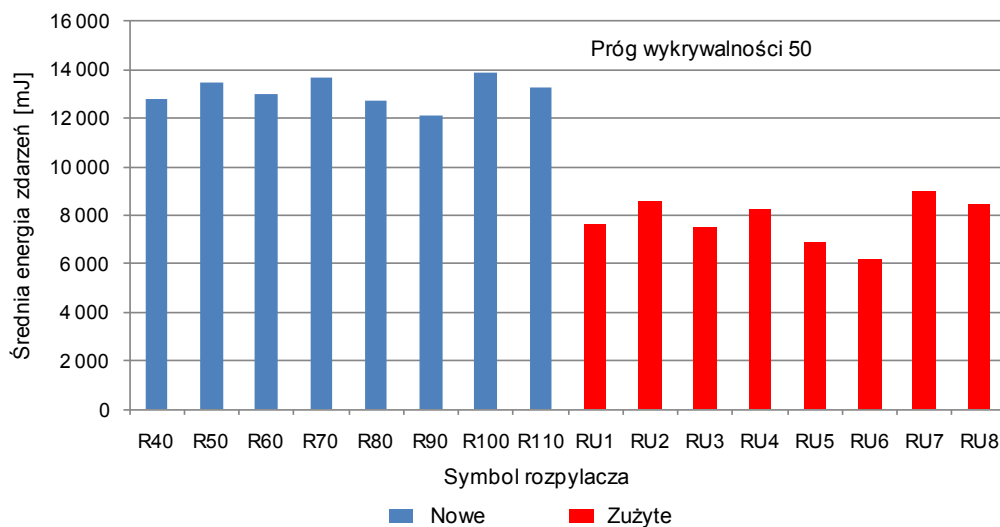
Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	RU1	I	12 515	-2,9	1008	3052	-2,2	191	1192	14,2	99
		II	12 886		1304	3122		209	1022		108
2	RU2	I	11 252	-6,4	192	2605	-5,5	38	1082	1,2	31
		II	11 982		201	2750		39	1069		24
3	RU3	I	12 593	7,6	1064	2946	5,1	167	735	-0,5	36
		II	11 635		1350	2795		245	739		30
4	RU4	I	11 271	2,2	153	2720	1,5	31	1035	9,4	33
		II	11 014		266	2678		52	937		30
5	RU5	I	11 593	10,6	998	2713	-6,1	174	941	18,3	99
		II	12 833		774	2880		126	768		50
6	RU6	I	12 888	-4,3	1106	3098	-4,6	215	750	-12	80
		II	13 446		1124	3242		211	840		55
7	RU7	I	11 325	-10,7	462	2877	-0,3	99	1034	-0,4	86
		II	12 546		937	2888		150	1039		155
8	RU8	I	11 399	-16,5	342	2673	-8,0	69	609	-1,4	26
		II	13 286		1830	2889		176	618		33

Tabela 19. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 4000 mV

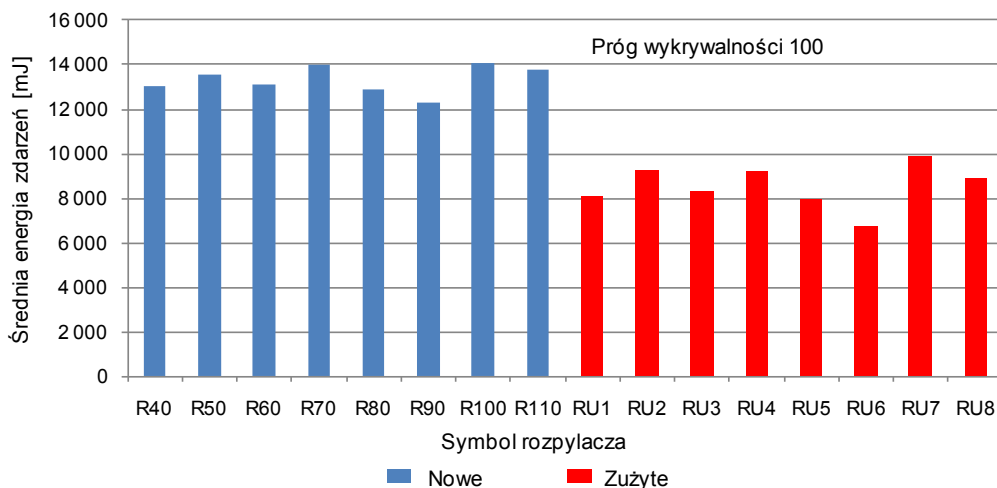
Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	R40	I	13 737	0,8	345	3536	0,05	67	406	3,4	15
		II	13 625		276	3534		59	392		14
2	R50	I	14 077	-2,7	316	3573	-6,3	66	540	6,2	18
		II	14 486		227	3800		50	506		12
3	R60	I	12 766	-3,3	213	3732	-1,8	54	725	-0,8	23
		II	13 193		177	3799		36	731		14
4	R70	I	13 764	0,3	273	3771	0,5	55	694	-3,4	33
		II	13 718		332	3754		67	719		35
5	R80	I	12 769	2,1	245	3818	2,0	50	826	2,3	50
		II	12 497		241	3742		48	807		20
6	R90	I	12 182	0,5	243	3564	-0,2	58	750	2,1	23
		II	12 118		264	3573		57	734		26
7	R100	I	13 963	-0,02	509	3591	-0,6	76	539	0,6	22
		II	13 966		447	3615		95	499		27
8	R110	I	13 563	4,1	685	3648	1,5	87	578	0,6	23
		II	13 005		469	3593		85	574		26

Tabela 20. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 4000 mV

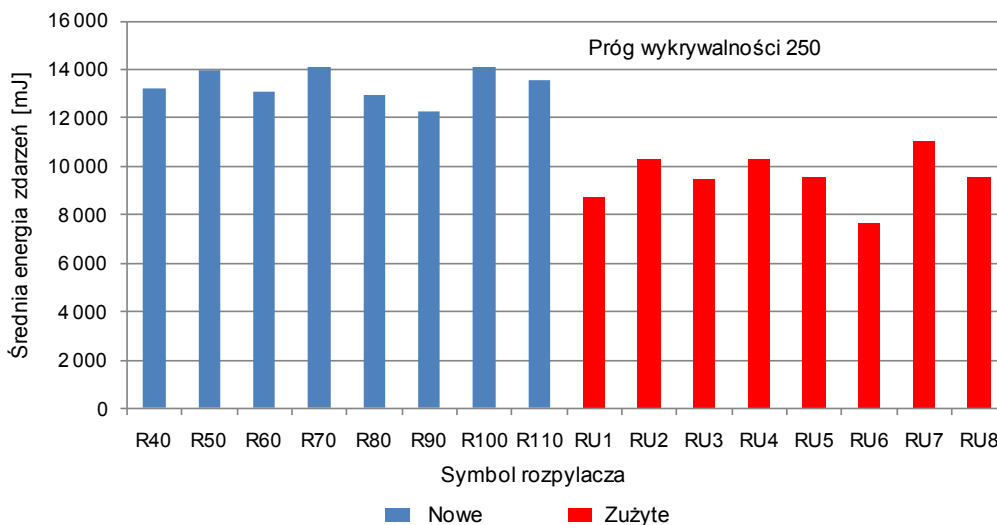
Lp.	Sygnał źródłowy	Serie pomiarów	Średnia energia zdarzeń			Średnia wartość amplitudy			Średnia liczba zdarzeń		
			wartość średnia [mJ]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia [mV]	Δ [%]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia	Δ [%]	odchylenie standardowe σ
1	RU1	I	14 630	-0,5	1089	3771	-0,6	181	802	12,0	85
		II	14 712		1266	3796		188	705		59
2	RU2	I	11 582	-4,9	209	3105	-4,2	45	656	-1,2	23
		II	12 156		196	3237		41	664		18
3	RU3	I	13 487	3,6	887	3595	2,5	162	438	4,1	25
		II	12 990		787	3505		155	420		37
4	RU4	I	12 092	7,3	210	3334	4,7	50	605	6,9	22
		II	11 200		274	3177		60	563		17
5	RU5	I	12 293	8,1	243	3345	-5,7	61	546	19,5	39
		II	13 296		532	3537		109	439		39
6	RU6	I	15 144	-2,3	771	3954	-2,2	140	457	-16,0	34
		II	15 495		1109	4043		206	533		35
7	RU7	I	11 621	-11,4	347	3422	-1,6	96	626	0,0	45
		II	12 948		741	3480		157	626		96
8	RU8	I	12 365	-12,0	300	3365	-6,9	64	337	-3,5	16
		II	13 860		1489	3600		209	349		26



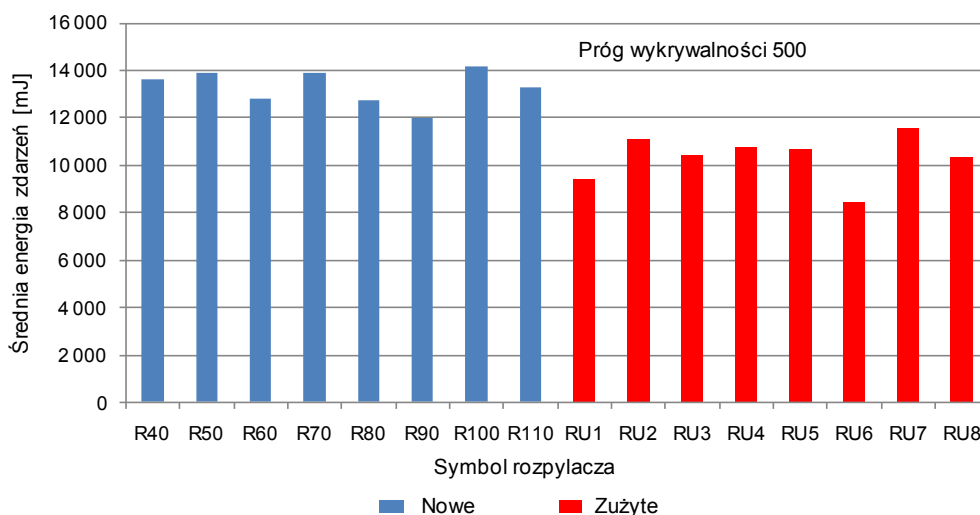
Rys. 60. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 50 mV



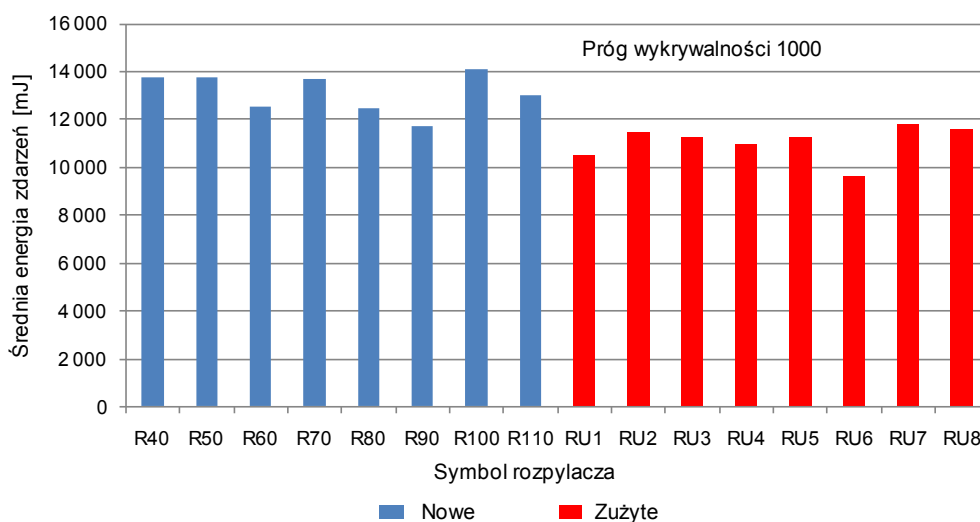
Rys. 61. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 100 mV



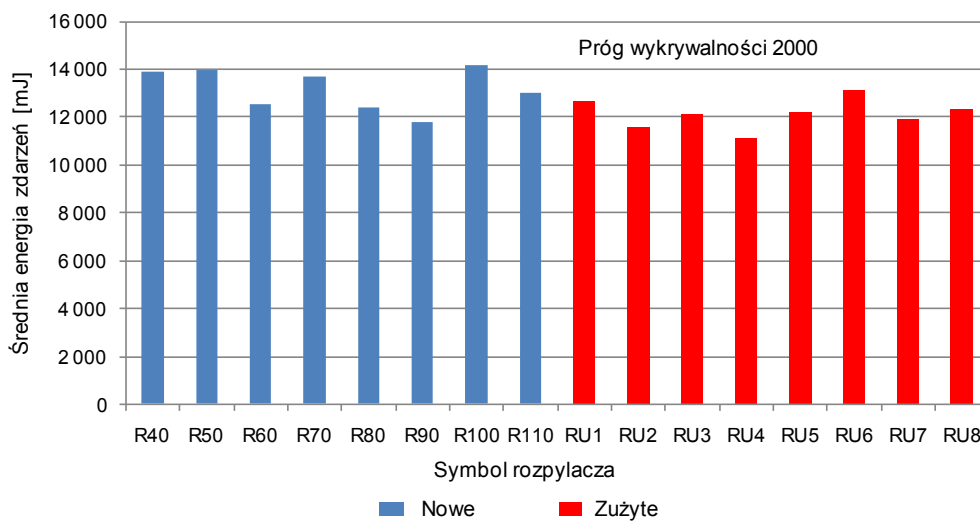
Rys. 62. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 250 mV



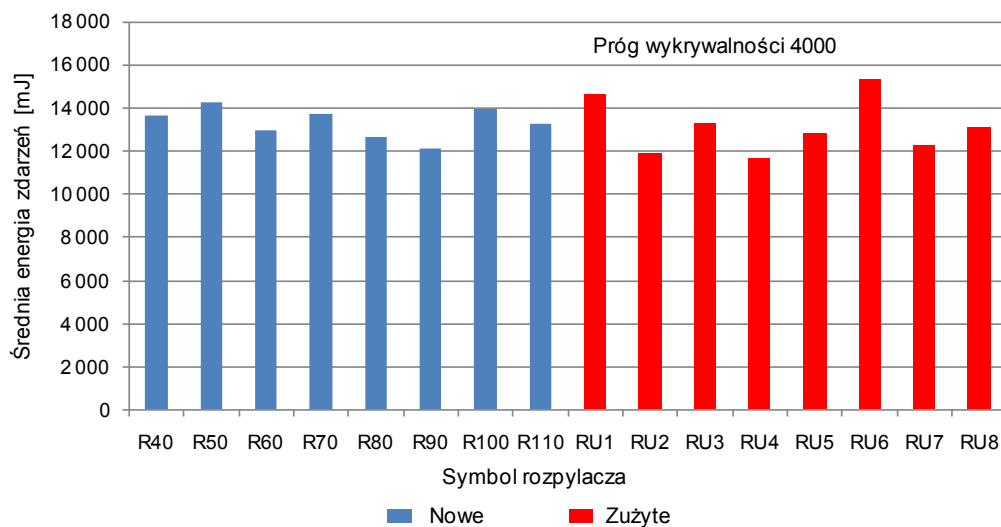
Rys. 63. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 500 mV



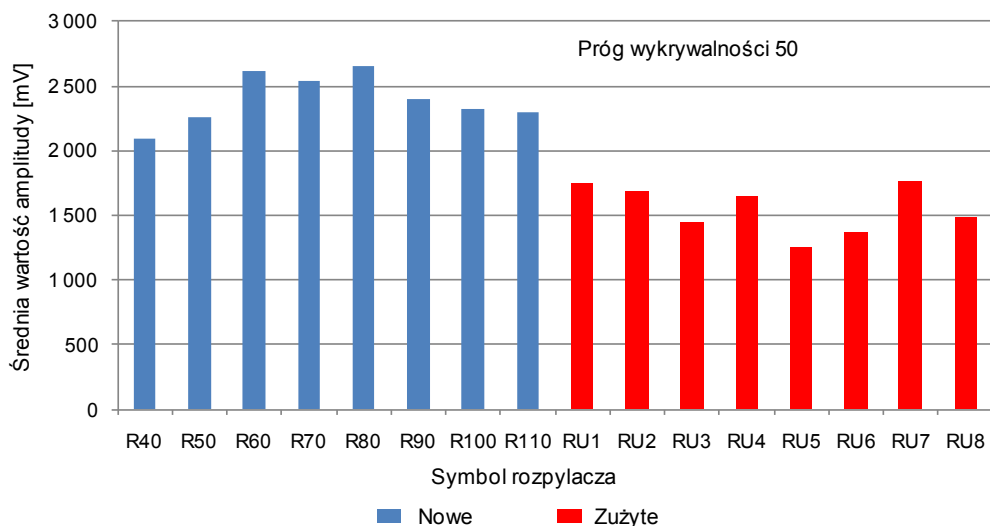
Rys. 64. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 1000 mV



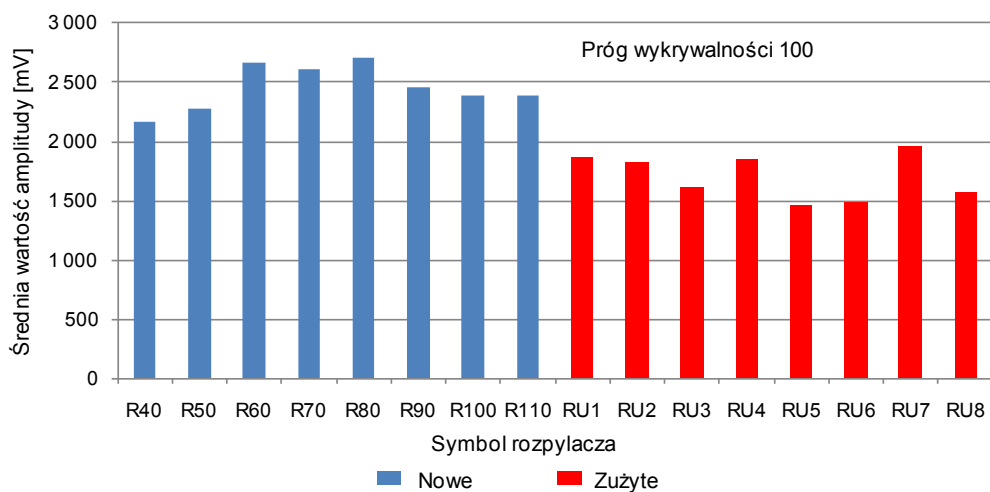
Rys. 65. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 2000 mV



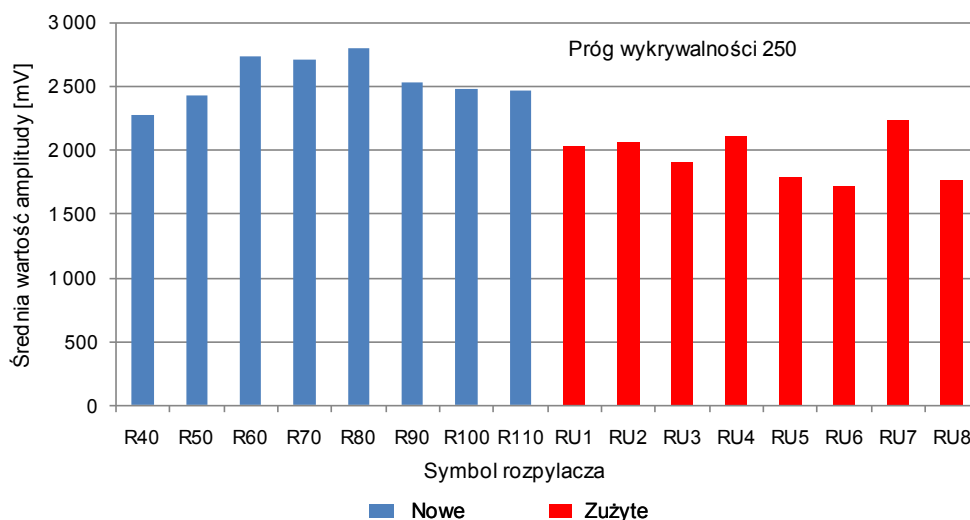
Rys. 66. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 4000 mV



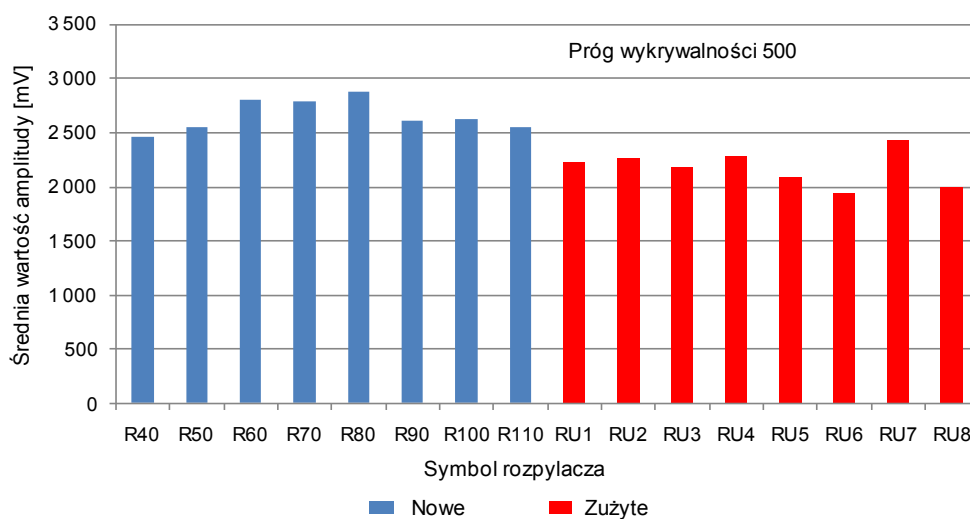
Rys. 67. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 50 mV



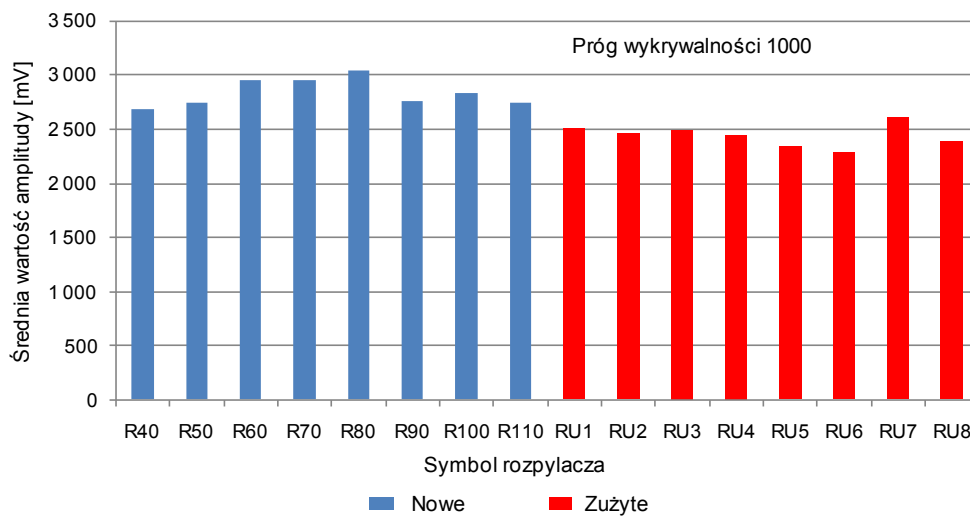
Rys. 68. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 100 mV



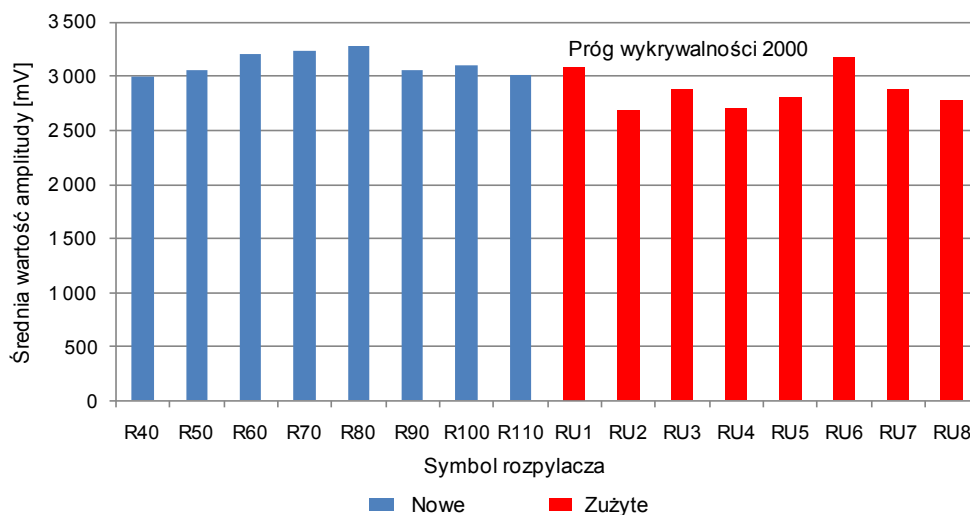
Rys. 69. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 250 mV



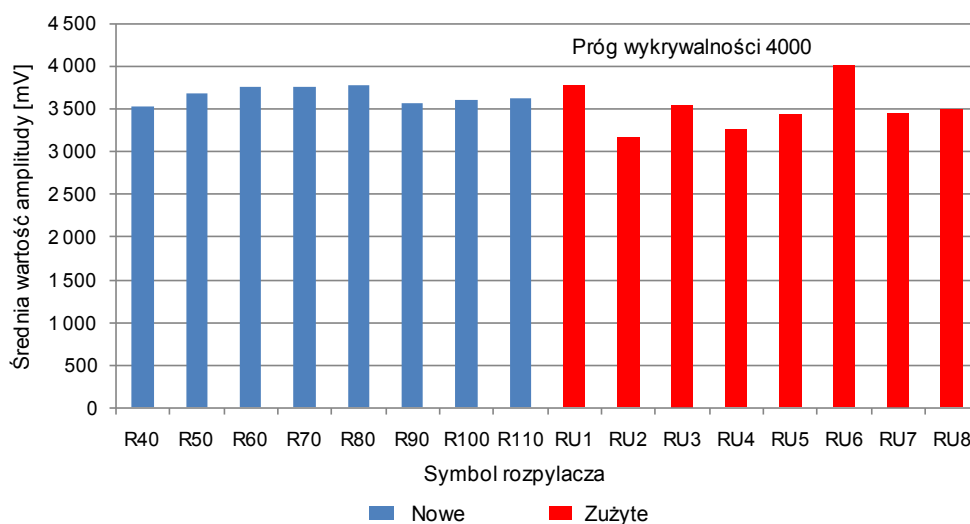
Rys. 70. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 500 mV



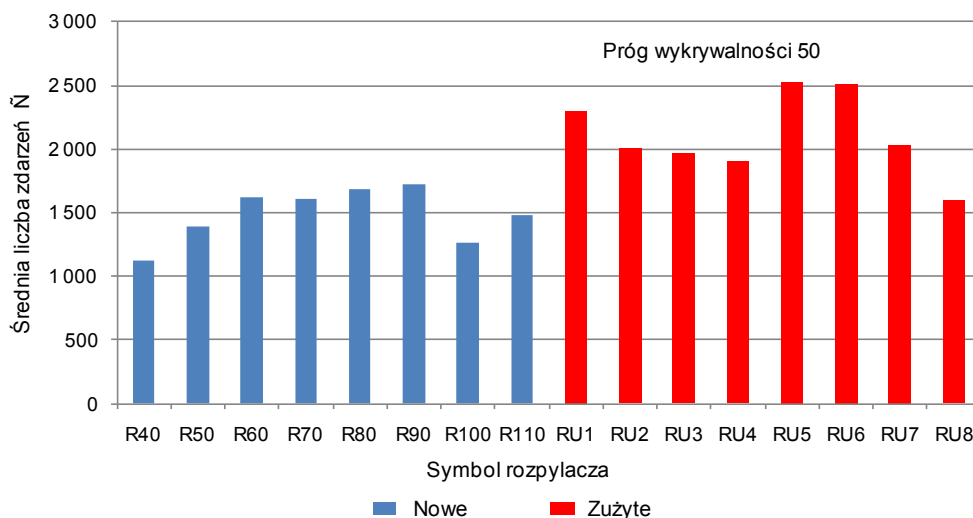
Rys. 71. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 1000 mV



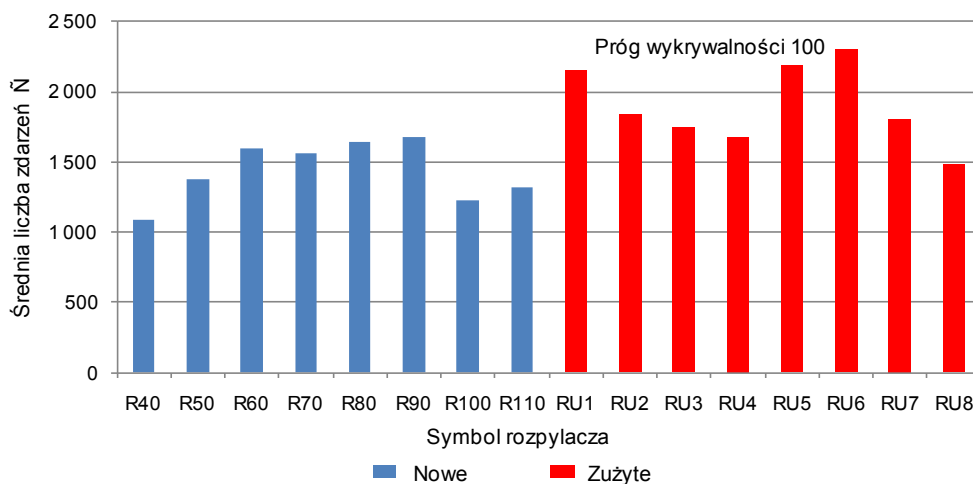
Rys. 72. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 2000 mV



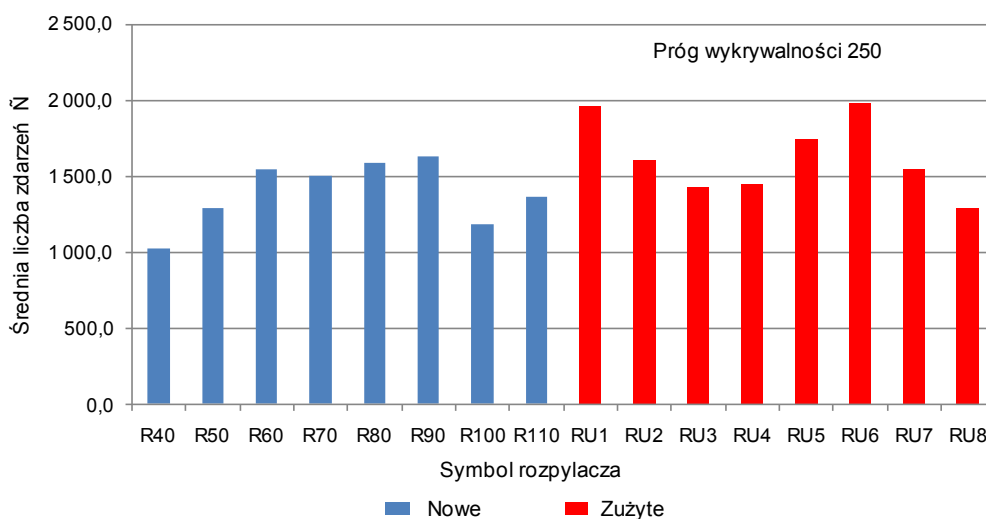
Rys. 73. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 4000 mV



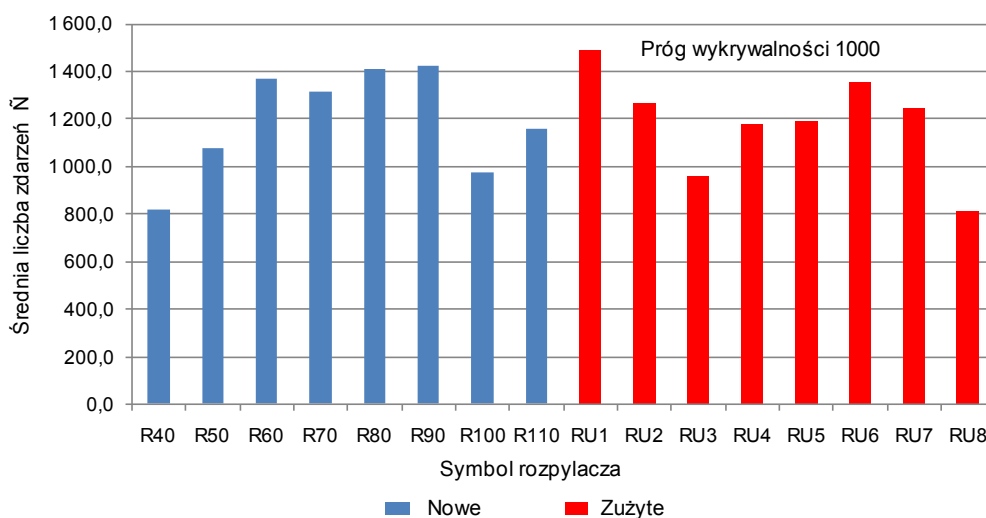
Rys. 74. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 50 mV



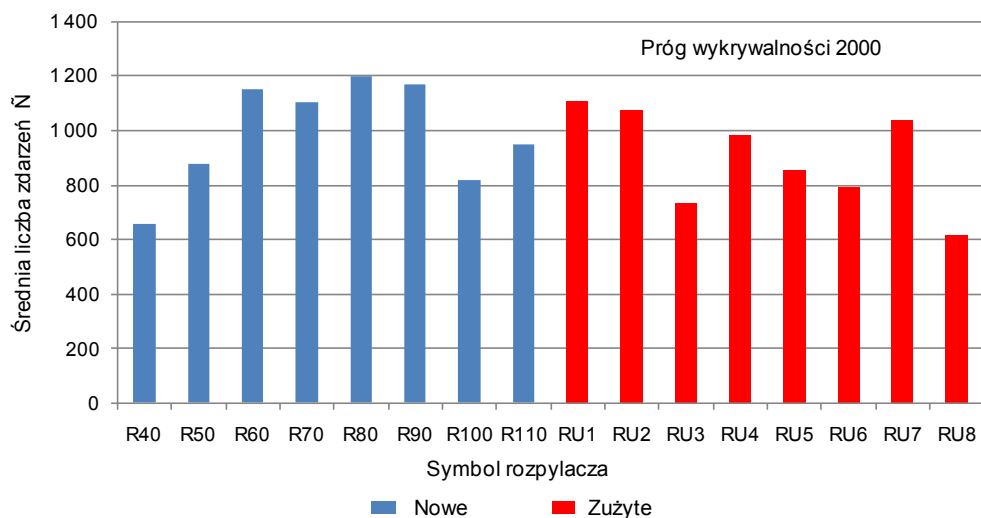
Rys. 75. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 100 mV



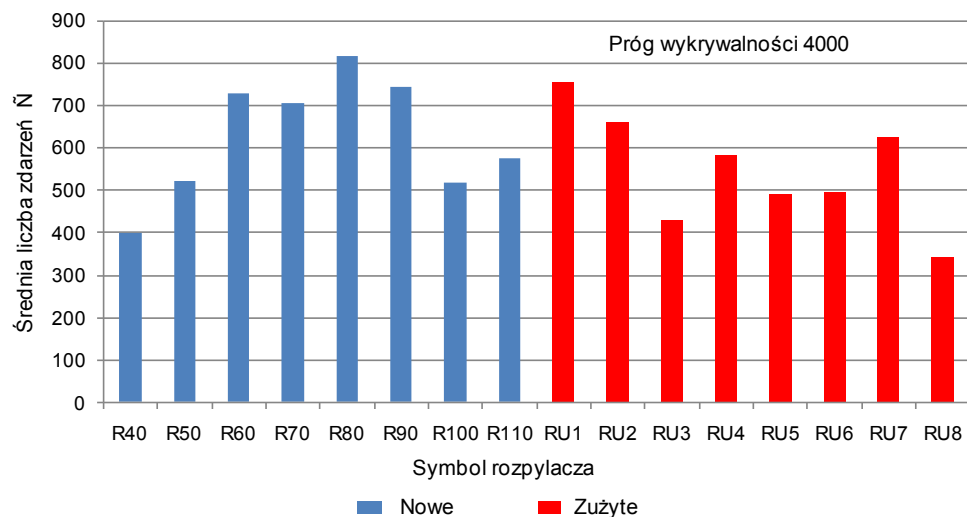
Rys. 76. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 250 mV



Rys. 77. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 1000 mV



Rys. 78. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 2000 mV



Rys. 79. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 4000 mV

Tabela 21. Średnia energia zdarzeń dla różnych progów wykrywalności

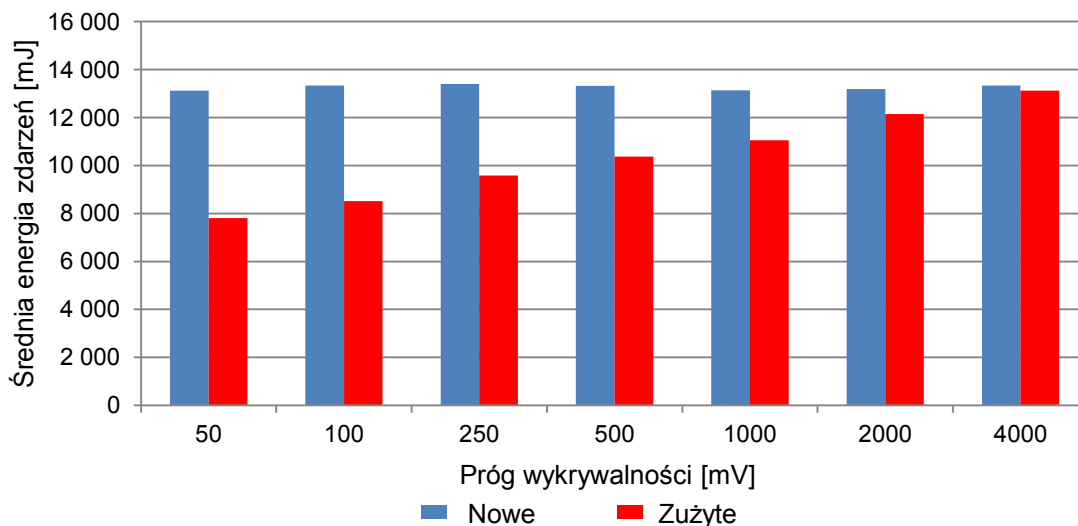
Próg wykrywalności [mV]	Rozpylacze nowe		Rozpylacze zużyte	
	wartość średnia \bar{x} [mJ]	odchylenie standardowe σ [mJ]	wartość średnia \bar{x} [mJ]	odchylenie standardowe σ [mJ]
50	13 126,6	755,8	7 803,7	1165,0
100	13 332,9	795,7	8 522,5	1209,6
250	13 406,5	729,6	9 588,7	1261,5
500	13 320,2	767,9	10 372,6	1183,4
1000	13 140,6	848,2	11 050,8	872,3
2000	13 186,1	848,4	12 154,0	805,3
4000	13 339,3	710,9	13 116,9	1337,9

Tabela 22. Średnia wartość amplitudy dla różnych progów wykrywalności

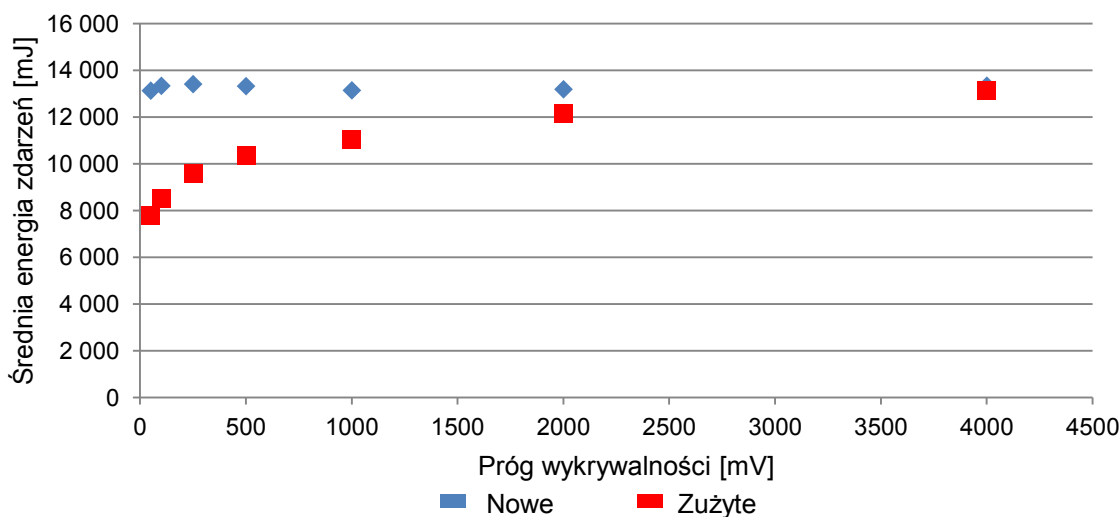
Próg wykrywalności [mV]	Rozpylacze nowe		Rozpylacze zużyte	
	wartość średnia \bar{x} [mV]	odchylenie standardowe σ [mV]	wartość średnia \bar{x} [mV]	odchylenie standardowe σ [mV]
50	2 398,8	197,2	1 548,3	204,7
100	2 457,6	201,5	1 701,7	205,1
250	2 552,1	181,2	1 950,6	199,4
500	2 658,6	148,8	2 172,9	173,4
1000	2 837,5	127,4	2 440,7	117,4
2000	3 118,1	108,6	2 870,5	183,8
4000	3 665,2	104,4	3 516,6	268,8

Tabela 23. Średnia liczba zdarzeń dla różnych progów wykrywalności

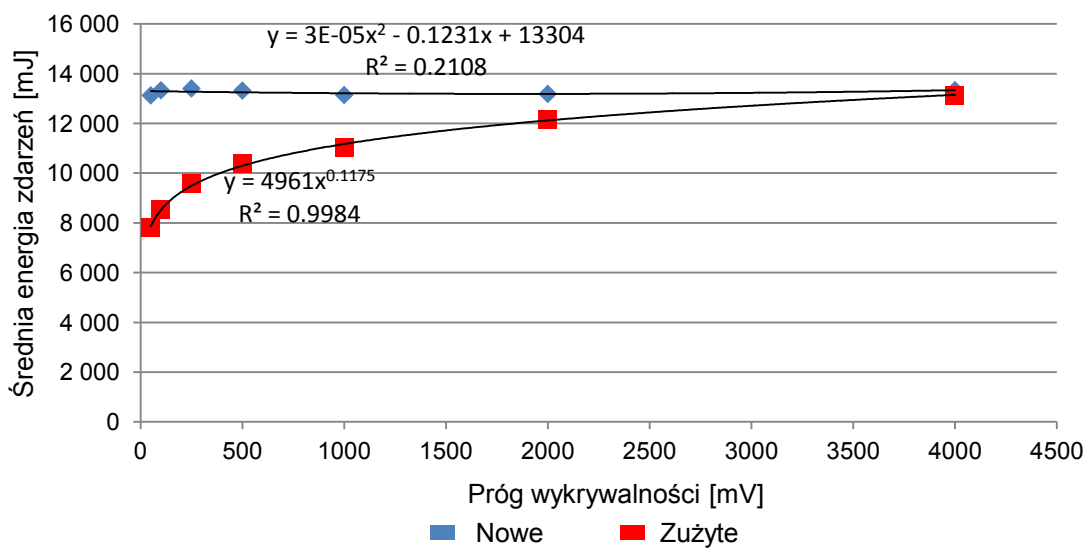
Próg wykrywalności [mV]	Rozpylacze nowe		Rozpylacze zużyte	
	wartość średnia \bar{x}	odchylenie standardowe σ	wartość średnia \bar{x}	odchylenie standardowe σ
50	1487,4	209,0	2102,5	329,0
100	1437,4	213,4	1898,8	295,4
250	1389,4	206,9	1626,6	261,5
500	1320,8	218,8	1419,0	241,6
1000	1193,1	216,4	1189,9	217,9
2000	990,2	190,4	900,6	179,1
4000	626,2	138,5	547,9	132,4



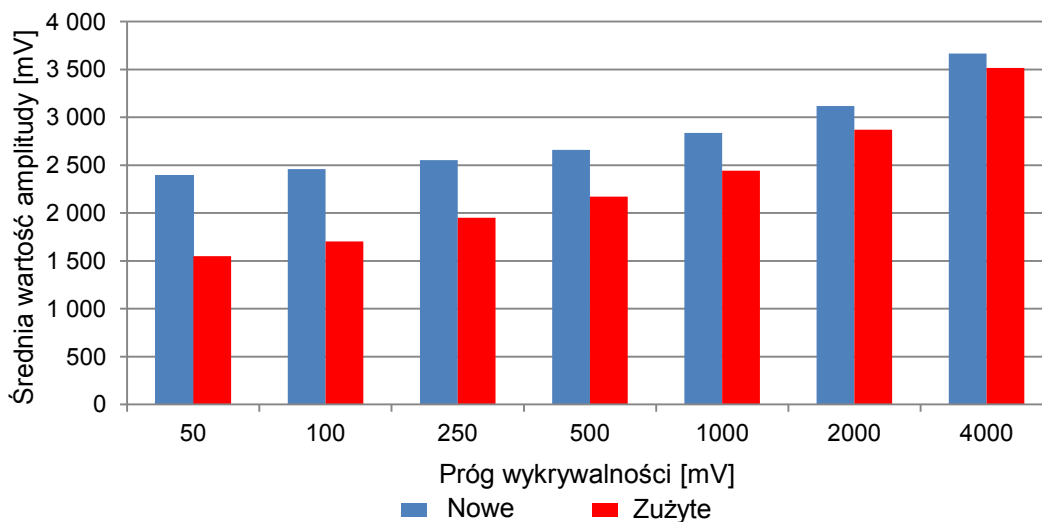
Rys. 80. Wykres słupkowy średniej energii zdarzeń dla różnych progów wykrywalności



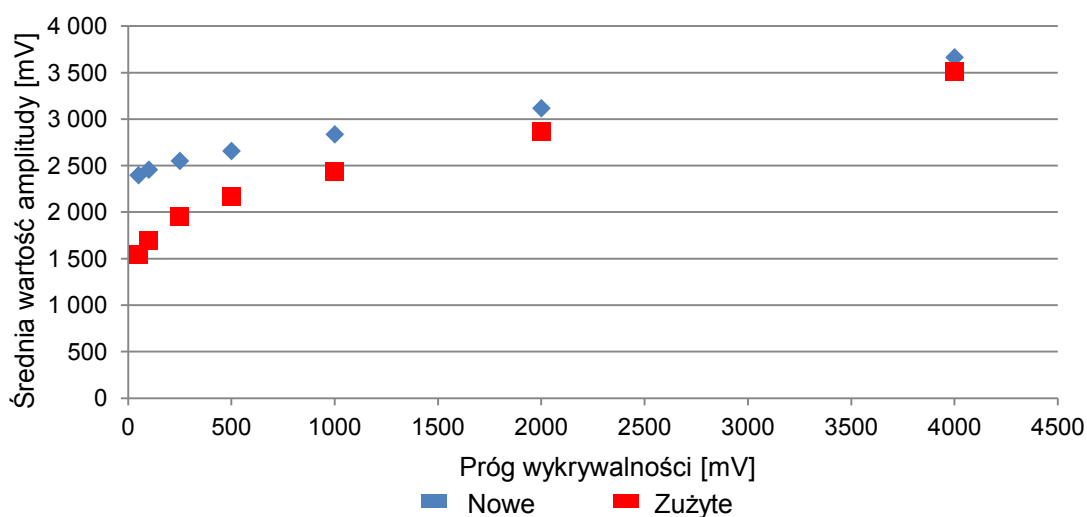
Rys. 81. Wykres punktowy średniej energii zdarzeń dla różnych progów wykrywalności



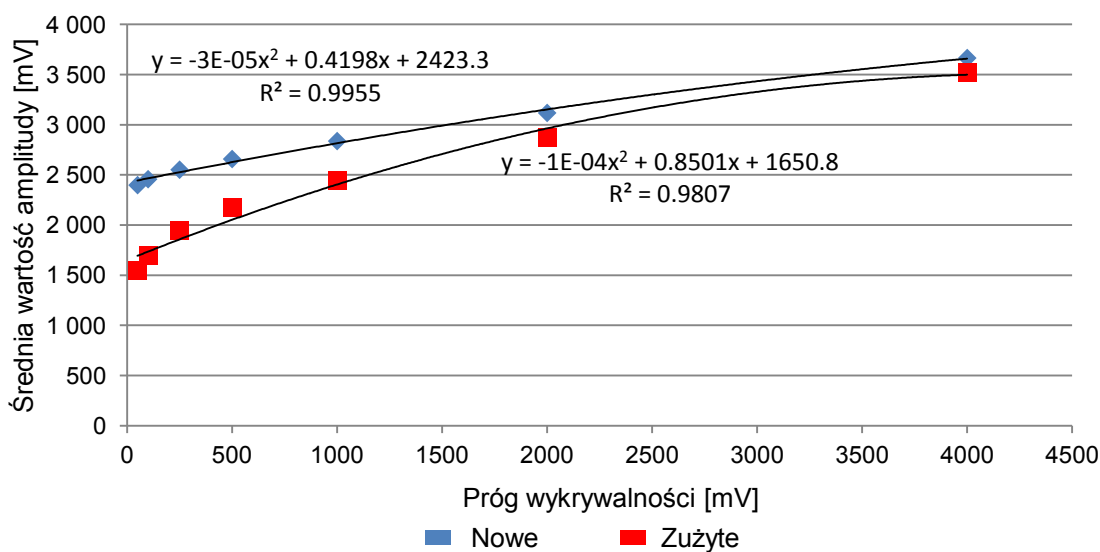
Rys. 82. Aproksymacja zależności średniej energii zdarzeń od progu wykrywalności



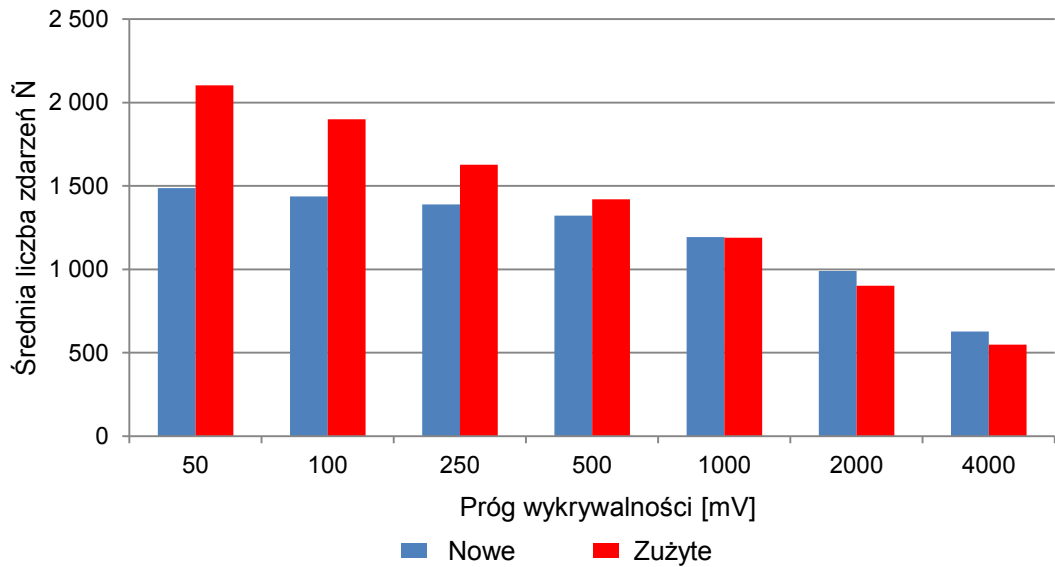
Rys. 83. Wykres słupkowy średniej wartości amplitudy przy różnych progach wykrywalności



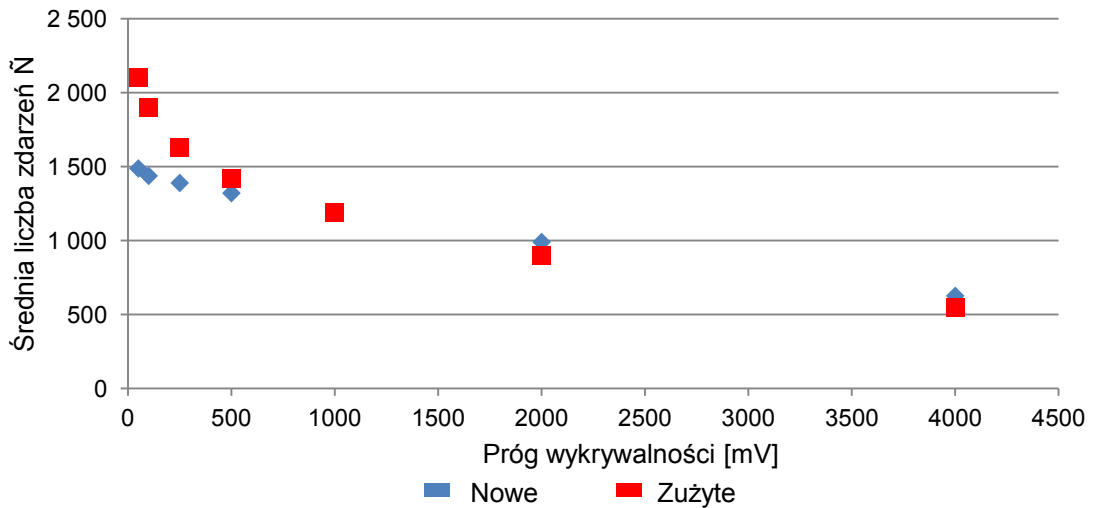
Rys. 84. Wykres punktowy średniej wartości amplitudy przy różnych progach wykrywalności



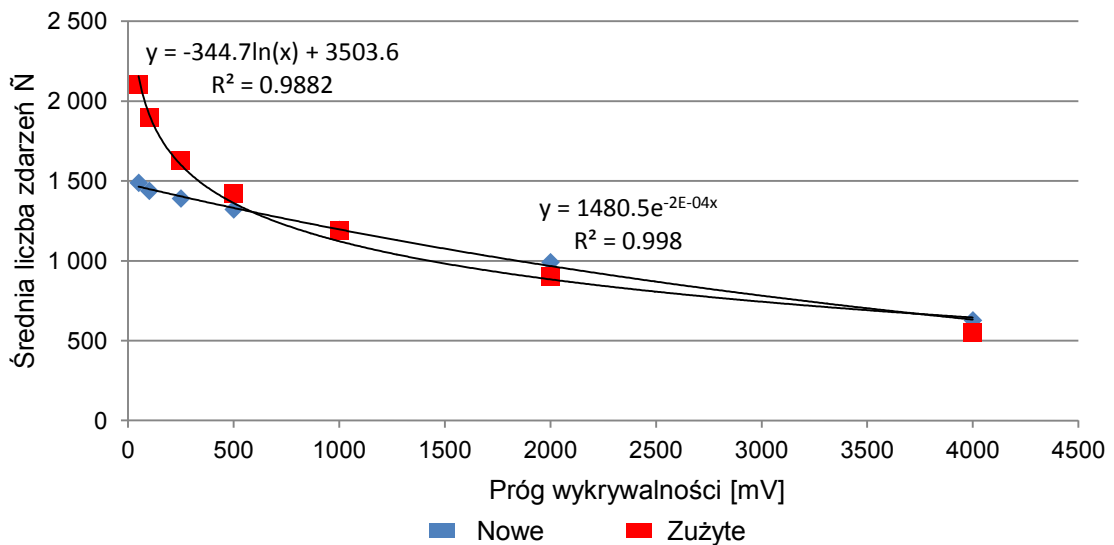
Rys. 85. Aproksymacja zależności średniej wartości amplitudy od progu wykrywalności



Rys. 86. Wykres słupkowy średniej liczby zdarzeń przy różnych progach wykrywalności



Rys. 87. Wykres punktowy średniej liczby zdarzeń przy różnych progach wykrywalności



Rys. 88. Aproksymacja zależności średniej liczby zdarzeń od progu wykrywalności

Dane pomiarowe w tabelach 21–23 zilustrowano graficznie za pomocą wykresów słupkowych oraz wykresów punktowych z wykreślonymi funkcjami interpolacyjnymi, które aproksymują zależność danej miary emisji akustycznej od progu wykrywalności dla rozpylaczy nowych i zużytych. Jak widać na rysunkach 80–88, dane pomiarowe uzyskane po uśrednieniu miar emisji akustycznej w obu grupach rozpylaczy wskazują na istotne różnice w wartościach tych miar dla rozpylaczy nowych i zużytych w przypadku małych progów wykrywalności: 50, 100, 250 mV, natomiast różnice te stają się praktycznie niewidoczne dla progu wykrywalności 4000 mV, czyli jego maksymalnej wartości. Inne ważne prawidłowości wynikające z tych danych, to bardzo mała wrażliwość średniej energii zdarzeń na zmiany progu wykrywalności dla rozpylaczy nowych (rysunki 80–81) oraz monotoniczność funkcji opisujących zależność każdej z miar emisji akustycznej od progu wykrywalności w pozostałych przypadkach. Dla średniej wartości amplitudy i średniej energii zdarzeń określonej dla rozpylaczy zużytych są to funkcje rosnące, natomiast dla średniej liczby zdarzeń – funkcje malejące.

5. WYZNACZENIE KRYTERIUM OCENY STANU WĘZŁA STOŻKOWEGO IGLICY I GNIAZDA ROZPYLACZA PALIWA SILNIKÓW OKRĘTOWYCH Z ZAPŁONEM SAMOCZYNNYM

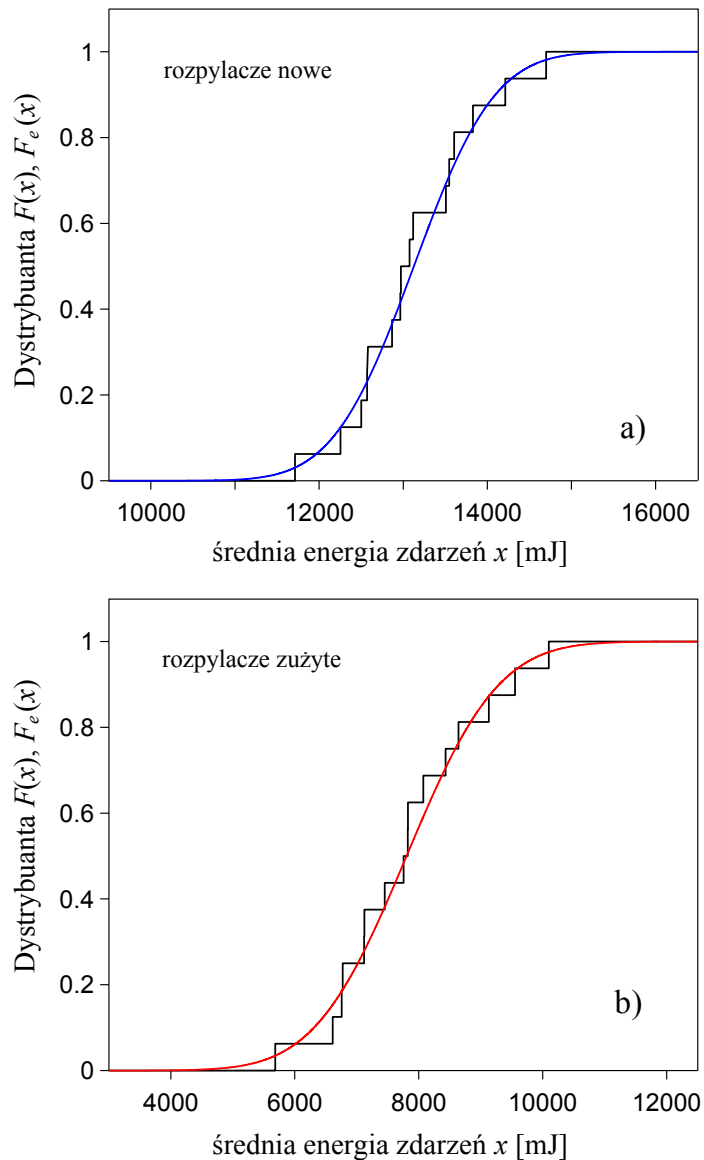
5.1. Analiza statystyczna wyników pomiarów

Z danych pomiarowych przedstawionych na rysunkach 80–88 wynika, że największe różnice pomiędzy rezultatami pomiarów dla rozpylaczy nowych i zużytych widoczne są dla średniej energii zdarzeń przy progu wykrywalności 50 mV (rysunki 80–82). Biorąc to pod uwagę oraz uwzględniając fakt stosunkowo małego rozrzutu danych pomiarowych dla progu wykrywalności 50 mV (rys. 60), można więc przyjąć, że średnia energia zdarzeń przy tym progu jest miarą emisji akustycznej najbardziej odpowiednią do klasyfikacji stanu rozpylaczy. Aby wyznaczyć kryterium oceny stanu rozpylaczy, należy uzyskane wyniki pomiarów przeanalizować od strony statystycznej. Jak wiadomo, wyniki w tabeli 21 dla progu wykrywalności 50 mV uzyskano na podstawie danych pomiarowych zestawionych w tabelach 7 i 8, dotyczących średniej energii zdarzeń. Dla obu grup rozpylaczy dane te stanowią realizacje pewnych zmiennych losowych, ponieważ każdy rezultat pomiaru obarczony jest niepewnością wynikającą z błędów przypadkowych. Dla dużej próby ($n > 30$) gęstość prawdopodobieństwa $f(x)$ dla tych zmiennych ma rozkład normalny i można ją wyznaczyć ze wzoru:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (12)$$

gdzie, tak jak poprzednio, \bar{x} to wartość średnia oraz σ to odchylenie standardowe. Dystrybucja $F(x)$ określona dla takiego rozkładu ma więc następującą postać:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(u-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right] du \quad (13)$$



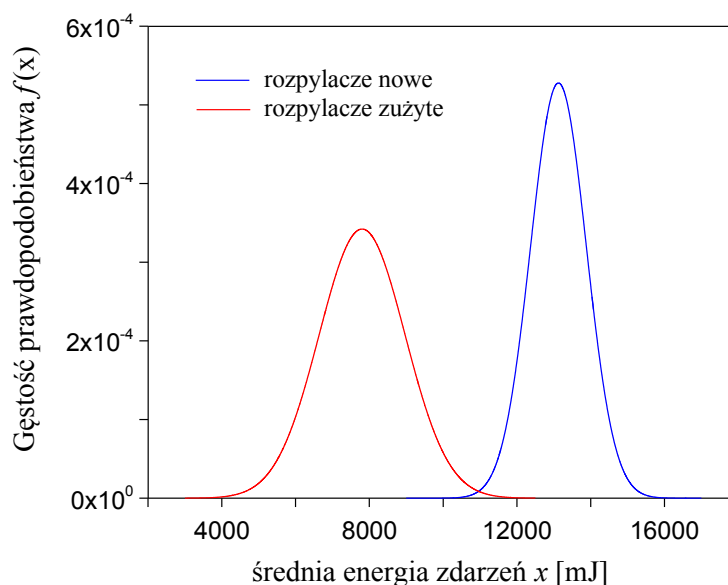
Rys. 89. Zależność dystrybuant F i F_e od średniej energii zdarzeń x dla rozpylaczy nowych (a) i zużytych (b) przy progu wykrywalności 50 mV

W analizowanym przypadku ilość realizacji zmiennych losowych jest mniejsza ($n = 16$), czyli wykorzystanie rozkładu normalnego do wyznaczenia gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej obarczone jest pewnym błędem. Aby zorientować się, jaki jest rozmiar tego błędu, na rysunku 89 przedstawiono porównanie dystrybuanty $F(x)$ obliczonej ze wzoru (13) dla wartości \bar{x} i σ z tabeli 21 z dystrybuantą empiryczną $F_e(x)$ wyznaczoną na podstawie danych pomiarowych z tabel 7 i 8. Dystrybuantę empiryczną obliczono ze wzoru:

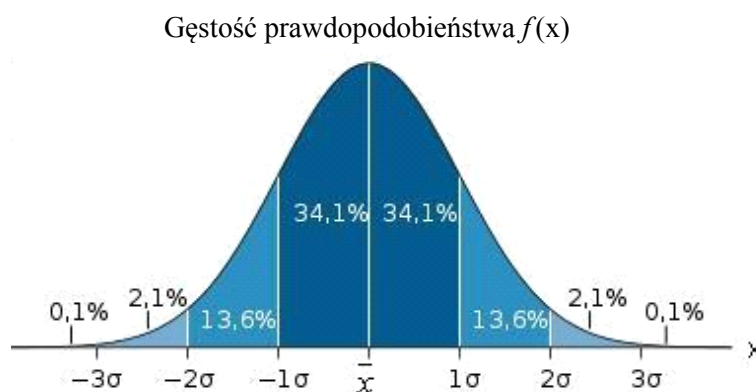
$$F_e(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x < x_1 \\ i/n & \text{dla } x_i \leq x < x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \\ 1 & \text{dla } x \geq x_n \end{cases} \quad (14)$$

gdzie: $n = 16$ oraz x_1, x_2, \dots, x_n są uporządkowanymi rosnąco wynikami pomiarów z tabel 7 i 8.

Jak widać na rysunku 89, dystrybuanty empiryczne o postaci krzywych schodkowych z dobrą dokładnością odwzorowują dystrybuantę $F(x)$ dla rozkładu normalnego. W związku z tym w dalszej analizie statystycznej do aproksymacji niepewności wyników pomiarów wykorzystano zależność (12) opisującą gęstość prawdopodobieństwa dla rozkładu normalnego. Obliczone z tego wzoru rozkłady gęstości prawdopodobieństwa $f(x)$ dla rozpylaczy nowych i zużytych przy progu wykrywalności 50 mV przedstawiono na rysunku 90.



Rys. 90. Gęstość prawdopodobieństwa $f(x)$ dla rozpylaczy nowych i zużytych przy progu wykrywalności 50 mV



Rys. 91. Procent wyników pomiarów mieszczących się w przedziałach o szerokości jednego odchylenia standardowego dla rozkładu normalnego

Znając postać funkcji $f(x)$, można wyznaczyć prawdopodobieństwo P , przy założeniu, że mierzona wielkość x przyjmie wartości z wybranego przedziału liczbowego (x_1, x_2) , ponieważ:

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (15)$$

W praktyce najczęściej interesuje nas zagadnienie, jakie jest prawdopodobieństwo P , gdy przedział ten jest symetryczny względem wartości średniej \bar{x} , zaś jego długość jest wielokrotnością odchylenia standardowego σ . Jak pokazano na rysunku 91, dla rozkładu normalnego prawdopodobieństwa P , mierzona wielkość x znajdzie się w przedziale $\bar{x} \pm m\sigma$, gdzie $m = 1, 2, 3$, wynosi odpowiednio:

$$\begin{aligned} P(\bar{x} - \sigma < x < \bar{x} + \sigma) &= 0,682 \\ P(\bar{x} - 2\sigma < x < \bar{x} + 2\sigma) &= 0,954 \\ P(\bar{x} - 3\sigma < x < \bar{x} + 3\sigma) &= 0,996 \end{aligned} \quad (16)$$

W teorii pomiarów prawdopodobieństwo P wyznaczone dla przedziału symetrycznego względem wartości średniej \bar{x} nosi nazwę poziomu ufności, natomiast prawdopodobieństwo przeciwne, czyli $1 - P$ określa się terminem poziom istotności. Z równania (16) wynika, że dla przedziału określonego przez dwukrotne odchylenie standardowe prawdopodobieństwo P wynosi aż 0,954, co oznacza, że na 1000 pomiarów tylko 46 da wynik spoza tego przedziału.

5.2. Kryterium oceny stanu węzła tribologicznego – stożka iglicy i gniazda rozpylacza paliwa silników okrętowych typu SW38

Z analizy rezultatów pomiarów trzech deskryptorów sygnału emisji akustycznej przeprowadzonych dla rozpylaczy nowych i zużytych wynika, że średnia energia zdarzeń dla progu wykrywalności 50 mV jest miarą najbardziej przydatną do oceny stanu badanego węzła tribologicznego. Uzyskane eksperymentalnie wartości tego deskryptora mogą stanowić kryterium oceny jakości rozpylaczy paliwa silników okrętowych typu SW38 jedynie w przypadku, gdy wymuszenie mechaniczne działające na rozpylacz powstaje w efekcie swobodnego opadania z wysokości $H = 23$ mm ciężarka stalowego o masie $m = 0,5$ kg.

Proponowane kryterium oceny stanu rozpylaczy opracowano na podstawie badań eksperymentalnych, których rezultaty przedstawiono w tabelach 7–23, oraz na podstawie analizy statystycznej wyników badań. W zapisie symbolicznym kryterium to ma postać:

$$x = \bar{x} \pm 2\sigma \quad (16)$$

gdzie: x to średnia energia zdarzeń przy progu wykrywalności 50 mV, tak więc do oceny stanu rozpylaczy przyjęto wysoki, bo ponad 95-procentowy poziom ufności. Zgodnie z danymi

pomiarowymi w tabeli 21, stosując to kryterium, rozpylacz uznaje się za dobry (nowy), gdy zmierzona wartość średniej energii zdarzeń dla progu wykrywalności 50 mV mieści się w przedziale $13\,127\text{ mJ} \pm 1512\text{ mJ}$, natomiast zostaje on zakwalifikowany jako zły (naturalnie zużyty lub lejący), gdy wartość tego deskryptora uzyskana przy tym samym progu wykrywalności pochodzi z przedziału $7804\text{ mJ} \pm 2330\text{ mJ}$.

6. WNIOSKI

1. Zaproponowano metodę diagnostyczną do oceny stanu stożkowych powierzchni iglicy i gniazda rozpylaczy paliwa spalinowych silników tłokowych z zapłonem samoczynnym polegającą na wzbudzeniu sygnału EA za pomocą mechanicznego impulsu wymuszającego. Stanowisko pomiarowe do badań diagnostycznych zostało zaprojektowane i przygotowane samodzielnie przez autora.
2. Badania przeprowadzone przez autora wykazały, że dla nowych rozpylaczy paliwa zarejestrowany sygnał EA jest prawie identyczny dla wszystkich badanych rozpylaczy, natomiast zmierzone sygnały EA dla rozpylaczy używanych różnią się od siebie w zależności od stopnia zużycia powierzchni iglicy i gniazda rozpylaczy.
3. Do analizy zarejestrowanych sygnałów EA wykorzystano trzy miary sygnału emisji akustycznej: średnią energię zdarzeń, średnią wartość amplitudy oraz średnią liczbę zdarzeń, przy progu wykrywalności od 50 mV do 4 V.
4. Pomiary udowadniają, że klasyfikatorem sygnału EA dającym jednoznaczną ocenę jakości rozpylaczy jest średnia energia zdarzeń, ponieważ dla najmniejszego progu wykrywalności jej wartość jest znacznie mniejsza dla zużytych rozpylaczy (ponad 40%). Pozostałe dwie miary sygnału EA, a szczególnie średnia liczba zdarzeń, są dużo mniej wrażliwe na stan zużycia powierzchni iglicy i gniazda rozpylacza.
5. Przedstawiona metoda do diagnostyki stanu powierzchni iglicy i gniazda rozpylaczy paliwa spalinowych silników jest oryginalna. Należy ją dalej rozwijać w celu wdrożenia do przemysłu jako narzędzia do szybkiej oceny jakości rozpylaczy.

LITERATURA

1. Baranowska J., Garbiak M.: *Badania Ultradźwiękowe*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1999.
2. Batko W.: *Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej*. ZN AGH, Mechanika, Zeszyt 4, Kraków 1984.
3. Batko W., Dąbrowski Zb., Kiciński J.: *Zjawiska nieliniowe w diagnostyce wibroakustycznej*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji PIB, Radom 2008.
4. Bejger A.: *Analiza pasm częstotliwości sygnału emisji akustycznej zależnych od zjawisk zachodzących we wtryskiwaczu*. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2008, 14(86), 5–8.
5. Bejger A.: *Diagnostyka wtryskiwaczy z wykorzystaniem emisji akustycznej*. [Rozprawa doktorska]. Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Szczecin 2000.
6. Berthelot J.M., Ben Souda M., Robert J.L.: *Frequency analysis of acoustic emission signal in concrete*. Journal of Acoustic Emission 1992, Vol. 11, no. 1, 11–18.
7. Będkowski L., Dąbrowski T.: *Wybrane kierunki badań w obszarze podstaw diagnostyki technicznej*. IV Krajowa Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urządzeń” Diag’98, Szczecin – Międzyzdroje – Ystad 1998, tom 1, 5–24.
8. Bielawski P.: *Elementy diagnostyki drganiowej mechanizmów tłokowo-korbowych maszyn okrętowych*. Wydawnictwo WSM w Szczecinie, Szczecin 2002.
9. Bielawski P.: *Sensory systemów diagnostycznych maszyn z mechanizmem tłokowo-korbowym*. Zeszyty Naukowe WSM, Szczecin 2004, nr 73, 49–56.
10. Blichowski M.: *Inżynieria powierzchni*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.
11. Bocheński C., Janiszewski T.: *Diagnostyka silników wysokoprężnych*. WKŁ, Warszawa 1966.
12. Broch T. J.: *Mechanical Vibration and Shock Measurements*. Brüel & Kjær, Denmark 1980.
13. Burakowski T.: *Transformacja warstw powierzchniowych systemów areologicznych*. Inżynieria Materiałowa 2008, nr 6, 543–547.
14. Burnos T.: *Model diagnostyczny okrętowych agregatów typu steru strumieniowego*, [Rozprawa doktorska], Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2007.

15. Buttle D.J., Scruby C.B.: *Characterization of fatigue of aluminum alloys by acoustic emission, part I – identification of source mechanism*. Journal of Acoustic Emission 1990, Vol. 9, no. 4, 243–253.
16. Cempel Cz.: *Teoria i Inżynieria Systemów – zasady i zastosowania myślenia systemowego* (Wykłady dla studentów i doktorantów wydziałów politechnicznych). Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB. Radom 2008.
17. Cempel Cz.: *Diagnostyka Wibroakustyczna Maszyn – Historia, Stan Obecny, Perspektywy Rozwoju*. Problemy Eksploatacji 2005, 3, 7–25.
18. Cempel Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN, Warszawa 1989.
19. Cempel Cz.: *Wibroakustyka stosowana*. PWN, Warszawa 1989.
20. Cempel Cz., Bossak J., Żółtowski B.: *Proste metody prognozowania stanu maszyn*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Warszawa 1989, 3(79), 379–389.
21. Chandroth G.: *Condition monitoring: the case for integrating data from independent sources*. Journal of Marine Engineering and Technology 2004, no. A4, 1–8.
22. Chandroth G.O., Sharkey A.J.C.: *Utilising the rotational motion of machinery in a high resolution data acquisition system*. University of Sheffield, UK
23. Chandroth G.O., Sharkey A.J.C., Sharkey N.E.: *Cylinder pressure and vibration in internal engine condition monitoring*. The work carried out in this paper is a part of the research project sponsored by the EPSRC grant no. GR/K84257. Department of Computer Science, University of Sheffield, UK.
24. Charchalis A.: *Diagnostics of Vessel Power Plants*. 4th International Congress on Technical Diagnostics, Olsztyn 2008.
25. Charter A.: *Locomotive Diesel Engine – Stress Wave Analysis*. Maintenance & Asset Management 2010, Vol. 25, no. 2, 42–45,
26. Cholewa W., Moczulski W.: *Diagnostyka techniczna maszyn*. Pomiar i Analiza Sygnałów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993.
27. Dąbrowski Zb., Madej H.: *O użyteczności symptomów wibroakustycznych w nowoczesnej diagnostyce silników spalinowych*. Przegląd Mechaniczny 2007, 1, 32–35.
28. Douglas R., Steel J., Reuben R.: *A study of tribological behaviour of piston ring/cylinder liner interaction in diesel engines using acoustic emission*. Tribology International 2006, Vol. 39, 1634–1642.
29. Drzewieniecki J.: *Opracowanie miar drgań wzdłużnych wału korbowego średnioobrotowego silnika okrętowego jako symptomu diagnostycznego niezależnego od obciążenia*. [Rozprawa doktorska], Politechnika Szczecińska, Wydział Techniki Morskiej, Szczecin 2002.
30. Elamin F.: *Fault detection and diagnosis in diesel engine using acoustic emission (AE)*. University of Huddersfield Research Festival, 23rd March – 2nd April 2009, University of Huddersfield (Unpublished). This version is available at www.eprints.hud.ac.uk/5216.

31. Elamin F., Fan Y., Gu F., Ball A.: *Detection of diesel engine valve clearance by acoustic emission*. Computing and Engineering Researchers' Conference, University of Huddersfield, 2009.
32. Elamin F., Fan Y., Gu F., Ball A.: *Diesel engine valve clearance detection using acoustic emission*. Hindawi Publishing Corporation. Advances in Mechanical Engineering 2010, Article ID 495741, 7 pages. Doi:10.1155/2010/495741.
33. 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 2005, Vol. 19, 751–765.
34. Engel Zb.: *Wibroakustyka a diagnostyka*. Problemy Eksploatacji 2005, 5, 57–67.
35. Engel Zb.: *Współczesna wibroakustyka – zadania, metody*. Przegląd Mechaniczny 1998, 11–12, 5–9.
36. Falkowski H., Krępeć T.: *Obsługa i naprawa aparatury paliwowej silników wysokoprężnych*. WKŁ, Warszawa 1979.
37. Gätjens H.: *Zukünftige Antriebsanlagen werden an geänderte Rahmenbedingungen angepasst*. Schiff & Hafen 1999, 7, 88–92.
38. Gąsowski Wł.: *Studium wpływu wybranych czynników na działanie rozpylaczy kolejowych silników wysokoprężnych*. Rozprawy Nr 126, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1981.
39. Gąsowski Wł., Gotz R.: *Badania wpływu rodzaju materiałów i ich obróbki cieplnochemicznej na trwałość aparatury paliwowej wysokoprężnych silników kolejowych, cz. I. Silniki Spalinowe* 1976, 4, 4–13.
40. Goldman S.: *Vibration spectrum analysis*. Industrial Press Inc, New York 1999.
41. Grosse C.U., Ohtsu M.: *Acoustic emission testing*. Verlag Berlin–Heidelberg–Springer 2008.
42. Gryboś R.: *Drgania maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
43. Hebda M., Wachal A.: *Tribologia*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
44. Hebda M.: *Procesy tarcia, smarowania i zużycia maszyn*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Warszawa – Radom 2007.
45. Holroyd T.J.: *The Acoustic Emission & Ultrasonic Monitoring Handbook*. Coxmoor Publishing Company's, Oxford, UK 2000.
46. Idzior M.: *Studium optymalizacji parametrów rozpylaczy silników o zapłonie samoczynnym w aspekcie kształtowania ich własności użytkowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004, nr 384.
47. Idzior M.: *Współczesne aspekty doboru ciśnienia wtrysku paliwa w silnikach o zapłonie samoczynnym*. Combustion Engines 2007, SC2, 4–10.
48. Idzior M., Merkisz J.: *Przegląd nieniszczących metod oceny powierzchni przylgni gniazd korpusów rozpylaczy paliwa*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Poznań 1993, nr 40.

49. *Instrukcja obsługi urządzenia pomiarowego Talyrond 290* firmy Taylor Hobson, 2005.
50. *Instrukcja techniczno-ruchowa silnika Stork-Wärtsilä SW 38*. Zwolle 1997.
51. Kluj S.: *Diagnostyka urządzeń okrętowych*. Studium Doskonalenia Kadr WSM w Gdyni, Gdynia 2000.
52. Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W.: *Diagnostyka procesów*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
53. Krautkramer J., Krautkramer H.: *Ultrasonic Testing of Materials*. New York, 1997.
54. Kucharski T.: *System pomiaru drgań mechanicznych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
55. Kurowski W.: *Podstawy diagnostyki systemów technicznych – metodologia i metodyka*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2008.
56. Landau L., Lifszyc J.: *Teoria sprężystości*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
57. Larose D.T.: *Odkrywanie wiedzy z danych*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2006.
58. Lawrowski Zb.: *Trybologia – tarcie, zużywanie i smarowanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
59. *Low speed engines show less damage*. The Motor Ship 2005, 11, 18–22.
60. Madej H.: *Diagnozowanie uszkodzeń mechanicznych silników spalinowych metodami wibroakustycznymi*. Przegląd Mechaniczny 2008, 1, 19–23.
61. Marczak M.: *Emisja akustyczna procesu tribologicznego*. [Rozprawa doktorska]. Sulejówek 2001.
62. Meltzer G.: *Technical Diagnosis – an Introduction*. Praca napisana w ramach projektu Tempus Phare Join European Project, Dresden University of Technology – Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, Szczecin 2000.
63. Michalski R.: *Diagnostyka maszyn roboczych*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2004.
64. Moczulski W.A.: *Diagnostyka techniczna – Metody pozyskiwania wiedzy*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
65. Morel J.: *Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego*. Wydawca Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Warszawa 1992.
66. Mrowec St., Werber T.: *Nowoczesne materiały żaroodporne*. WNT, Warszawa 1982.
67. Mubarak M., Al Sh., Leahy M., Mba D.: *A fundamental study on the source location capabilities of acoustic emission for shaft-seal rubbing on large power generation turbines*. 18th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management – COMADEM 2005, Cranfield University Press 2005, UK, 589–598.
68. 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 2007, 21, 1084–1102.

69. Nivesrangan P., Steel J.A., Reuben R.L.: *Sources location of acoustic emission in diesel engines*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21, 1103–1114.
70. Niziński S.: *Elementy diagnostyki obiektów technicznych – Zagadnienia ogólne*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2001.
71. Niziński S., Michalski R.: *Diagnostyka obiektów technicznych*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2002.
72. Niziński S., Michalski R.: *Diagnostyka urządzeń mechanicznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
73. Niziński S., Michalski R.: *Utrzymanie pojazdów i maszyn*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2007.
74. Olszowski Sł.: *Zaawansowane technologie informatyczne w diagnozowaniu stanu silników o zapłonie samoczynnym z układem common rail*. Monografia CR. Projekt nadzorowany przez Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości, współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, 2009.
75. Piaseczny L.: *Technologia naprawy okrętowych silników spalinowych*. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1992.
76. Pietrzyk A., Uhl T.: *Optymalizacja eksploatacji maszyn i urządzeń*. Diagnostyka, Warszawa 2002, 26, 9–36.
77. Piotrowski I., Witkowski K.: *Okrętowe silniki spalinowe*. Trademar, Gdynia 1996.
78. Pontoppidan N.H., Sigurdsson S.: *Independent components in acoustic emission energy signals from large diesel engines*. International Journal of COMADEM 2005, 1–11.
79. Praca zbiorowa. Falkowski H., Hauser G., Janiszewski T., Jaskuła A.: *Układy wtryskowe silników wysokoprężnych*. WKŁ, Warszawa 1989.
80. Praca zbiorowa. Falkowski H., Janiszewski T., Łojek A., Michalski A.: *Aparatura paliwowa silników wysokoprężnych. Budowa i sprawdzanie, część I i II*. WKŁ, Warszawa 1977.
81. Praca zbiorowa pod red. Maleckiego I. i Ranachowskiego J.: *Emisja Akustyczna. Źródła metody, zastosowanie*. Wydanie IPPT PAN, Warszawa 1991.
82. Ranachowski Zb.: *Emisja akustyczna w badaniach żywności*. [w:] *Jakość i bezpieczeństwo żywności*. Praca zbiorowa pod redakcją Witrowej-Rajcher D., Marzec A. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2008, 135–160.
83. Ranachowski Zb.: *Metody pomiaru i analiza sygnału emisji akustycznej*. IPPT-PAN, Warszawa 1997.
84. Randall R.B.: *Frequency Analysis*. Brüel & Kjær, Denmark 1987.
85. Raunmiagi Z.: *Naprawy wybranych okrętowych elementów maszyn za pomocą obróbki ubytkowej*. Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie. Szczecin 2010.
86. Raunmiagi Z.: *Ocena stanu powierzchni iglicy i gniazda rozpylaczy paliwa silników okrętowych z wykorzystaniem emisji akustycznej – badania wstępne*. 56th Open Seminar on Acoustic OSA 2009, Warszawa–Goniądz 2009, 457–462.

87. Raunmiagi Z.: *Weryfikacja przed naprawą rozpylaczy paliwowych silników wysoko-
prężnych*. V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Explo-Ship, Kołobrzeg–Bornholm (Dania) 2008.
88. Raunmiagi Z., Ranachowski Zb.: *Laboratoryjna metoda oceny stanu stożkowego węzła
tribologicznego rozpylaczy spalinowych silników okrętowych*. Motrol – Motorization
and Power Industry in Agriculture, Lublin 2009, tom 11 C, 165–169.
89. Rumszyski L.Z.: *Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu*. Wydawnictwo
Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
90. Sharkey A.J.C., Chandroth G.O., Sharkey N.E.: *Acoustic emission, Cylinder Pressure
and Vibration: A Multisensor Approach to Robust Fault Diagnosis*. The work carried
out in this paper is a part of project sponsored by the EPSRC Grant no. GR/K84257
Department of Computer Science. University of Sheffield, UK 2000.
91. Staszewski W., Boller Ch., Tomlinson G.: *Health Monitoring of Aerospace Structures*.
Copyright 2004 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West
Sussex PO19 8SQ, England 2004.
92. *Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym*. Informator techniczny firmy BOSCH.
Wydanie 2004.
93. Szabatin J.: *Podstawy Teorii Sygnałów*. WKŁ, Warszawa 2000.
94. Szymański G.: *Analiza możliwości zastosowania wybranych charakterystyk sygnału
drganowego do diagnostyki silnika spalinowego*. [Rozprawa doktorska], Politechnika
Poznańska, Poznań 2005.
95. Tan Ch.K., Irving Ph., Mba D.: *An acoustic emission prognostic model for spur gears*.
18th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic
Engineering Management – COMADEM 2005, Cranfield University Press 2005, UK,
509–514.
96. Tan Ch.K., Irving Ph., Mba D.: *Diagnostics and prognostics with acoustic emission,
vibration and spectrometric oil analysis for spur gears; a comparative study*. Insight –
Non-Destructive Testing and Condition Monitoring 2005, Vol. 47, no. 8, 478–480.
97. Tomaszewski F.: *Zagadnienia wyznaczania stanu technicznego złożonego obiektu me-
chanicznego za pomocą sygnału wibroakustycznego na przykładzie silnika spalinowego
pojazdu szynowego*. Politechnika Poznańska, Poznań 1998, nr 337.
98. *Układy wtryskowe*. Informator techniczny firmy BOSCH. Wydanie 2000/2001.
99. Witkowski K.: *Stan diagnostyki technicznej okrętowych silników tłokowych*. Diagnostyka
2005, Vol. 34.
100. Witkowski K.: *Wykorzystanie badań eksperymentalnych do pozyskiwania wiedzy dia-
gnostycznej na przykładzie okrętowych silników tłokowych*. Problemy Eksploatacji
2005, 4, 144–163.
101. Włodarski J.K.: *Eksploatacja maszyn okrętowych*. Wydawnictwo Uczelniane WSM,
Gdynia 1998.
102. Włodarski J.K.: *Tłokowe silniki spalinowe procesy trybologiczne*. Wydawnictwa
Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.

103. Ziętek B.: *Opracowanie wyników pomiaru*. Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 1997.
104. Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1996.
105. Żółtowski B., Ćwik Z.: *Leksykon Diagnostyki Technicznej*. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1996.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

106. Alfayez L., Mba D.: *Acoustic emission and pump monitoring*. 18th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management – COMADEM 2005, Cranfield University Press 2005, UK.
107. Bielawski P.: *Agregaty okrętowe – możliwości diagnozowania celem planowania remontów*. Zeszyty Naukowe WSM, Szczecin 2002, nr 66, 81–90.
108. Bielawski P.: *Metody procedury i algorytmy diagnozowania*. IV Krajowa Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urządzeń” Diag’98, Szczecin–Międzyzdroje–Ystad 1998, t. 1, 201–206.
109. Dąbrowska-Kauf G.: *Po diagnostyczne metody oceny stanu technicznego*. IV Krajowa Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urządzeń” Diag’98, Szczecin–Międzyzdroje–Ystad 1998, t. 2, 89–94.
110. Klyus O., Michalski R., Tilipałow Wł.: *Procesy naprawy maszyn*. Wydawnictwo UWM w Olsztynie, Olsztyn–Kaliningrad 2002.
111. Kowalewicz A.: *Podstawy procesów spalania*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
112. Michalski R., Rychlik A.: *Zastosowanie systemu ekspertowego w utrzymaniu silników wysokoprężnych maszyn roboczych*. II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna *Explo-Diesel & Gas Turbine’01*, Gdańsk–Międzyzdroje–Kopenhaga 2001, 441–448.
113. Monieta J.: *Wiarygodność diagnozy wtryskiwaczy silników okrętowych z zastosowaniem analizy widmowej wybranych sygnałów*. IV Krajowa Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urządzeń” Diag’98, Szczecin–Międzyzdroje–Ystad 1998, t. 3, 73–78.
114. Niziński S., Ligier K.: *Modele w diagnostyce obiektów technicznych*. IV Krajowa Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urządzeń” Diag’98, Szczecin–Międzyzdroje–Ystad 1998, t. 1, 139–151.
115. Oczóś K.: *Sposoby kształtowania ubytkowego. Klasyfikacja i terminologia*. *Mechanik*, 2005, 2, 57–59.
116. Piętak A.: *Problemy diagnozowania silników o ZS – prędkość obrotowa parametrem diagnostycznym*. MODES, Gdańsk 2001.

117. Raunmiagi Z.: *Badania i próby szczelności maszyn i urządzeń okrętowych*. [Praca magisterska niepublikowana]. Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Szczecin 1998.
118. Raunmiagi Z.: *Result of collaboration under Tempus Program between Chris-Marine Company and Department of Diagnosis and Maintenance of Marine Machinery*. Tempus S_JEP-12253-97 Seminarium „Obsługiwanie maszyn okrętowych w nauczaniu i badaniach”, Szczecin 2001.
119. Turzeniecka D.: *Ocena niepewności wyniku pomiarów*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
120. Wehr J.: *Pomiary prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych*. PWN, Warszawa 1972.
121. Wojnowski W.: *Okrętowe silownie spalinowe*. Część I–III. Wydawnictwo Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1991.

NORMY

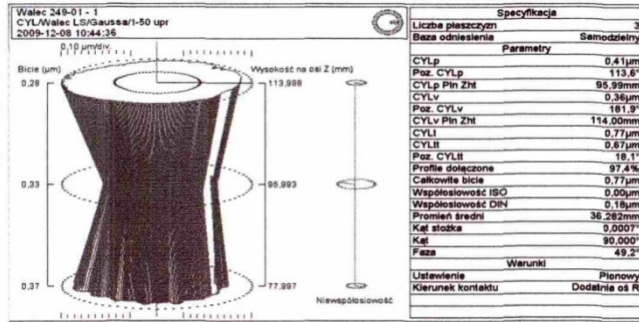
122. ASTM designation: E750-88 *Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrumentation*.
123. PN-79/M-01502 *Silniki spalinowe tłokowe. Nazwy i określenia*.
124. PN-87/M-04250 *Warstwa wierzchnia. Terminologia*.
125. PN-90/N-04002 *Diagnostyka techniczna. Terminologia ogólna*.
126. PN-91/M-01503.02 *Silniki spalinowe tłokowe. Nazwy części i układów. Układ korbowy*.
127. PN-93/H-04357 *Tablice porównawcze twardości określonej sposobem Rockwella, Vickersa, Brinella, Shore'a i wytrzymałości na rozciąganie*.
128. PN-93/M-01503.04 *Silniki spalinowe tłokowe. Nazwy części i układów. Układ doładowania i wylotu*.
129. PN-93/M-01521 *Silniki spalinowe tłokowe. Terminologia*.
130. PN-EN 10027-1 *Systemy oznaczania stali. Znaki stali, symbole główne*.
131. PN-EN 1330-9 *Badania nieniszczące. Terminologia część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną*.
132. PN-EN 13477-1 *Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Charakteryzowanie aparatury. Część 1: Opis aparatury*.
133. PN-EN 13477-2 *Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Charakteryzowanie aparatury. Część 2: Weryfikacja działania*.
134. PN-EN 13554:2004/A1 *Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Zasady ogólne*.
135. PN-EN 20286-1/2:1996 *Układ tolerancji i pasowań ISO*.
136. PN-ISO 2602 *Statystyczna interpretacja wyników badań. Estymacja wartości średniej. Przedział ufności*.

137. PN-ISO 2854 *Statystyczna interpretacja danych. Techniki estymacji oraz testy związane z wartościami średnimi i wariancjami.*
138. PN-ISO 4287:1999 *Struktura geometryczna powierzchni.*
139. PN-ISO 7967-5 *Silniki spalinowe tłokowe. Nazwy części i układów. Układ chłodzenia.*
140. PN-ISO 7967-6 *Silniki spalinowe tłokowe. Nazwy części i układów. Układ smarowania.*

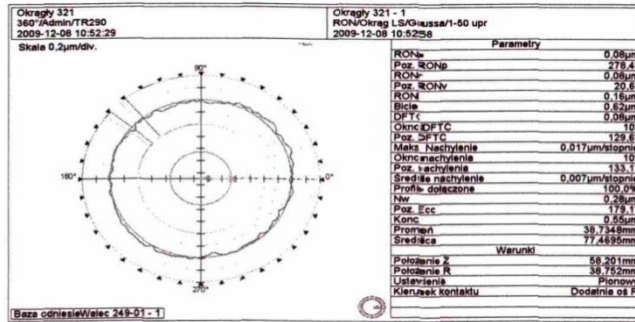
ZAŁĄCZNIKI

1. Pomiary korpusów rozpylaczy RU1–RU3	88
2. Pomiary korpusów rozpylaczy RU4–RU6	89
3. Pomiary korpusów rozpylaczy RU7–RU8	90
4. Pomiary iglic rozpylaczy RU1–RU4	91
5. Pomiary iglic rozpylaczy RU5–RU7	92
6. Pomiary iglic rozpylaczy RU8	93
7. Parametry iglic rozpylaczy RU1–RU8	94
8. Przedmiot badań (badania metalograficzne)	95
9. Ocena metalograficzna	96
10. Wyniki badań iglicy – analiza chemiczna	97
11. Ocena metalograficzna	98

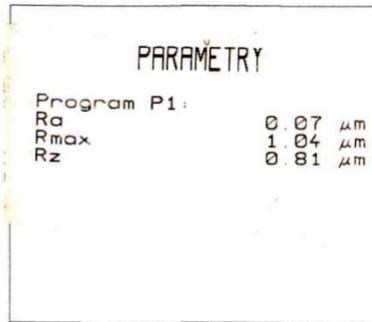
Załącznik 1. Pomiary korpusów rozpylaczy RU1 – RU3



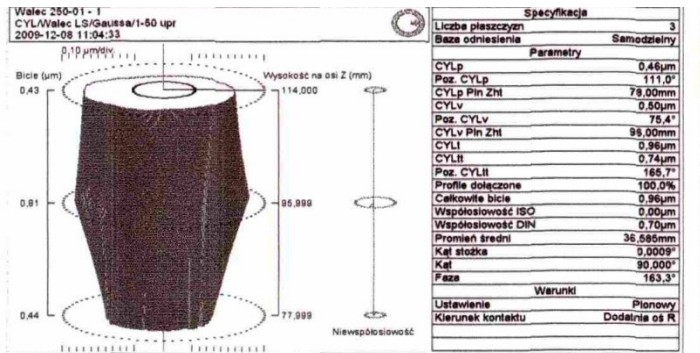
Rozpylacz RU1: dla $\phi 9$ mm



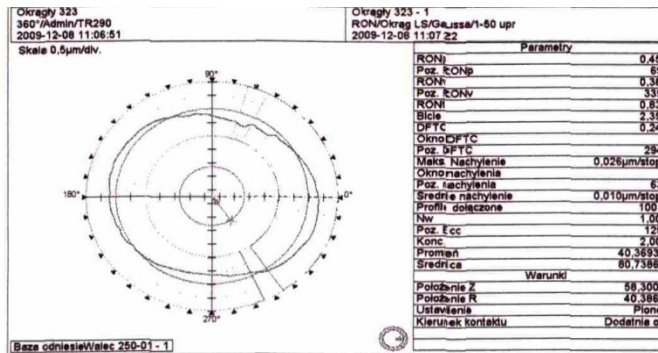
dla stożka



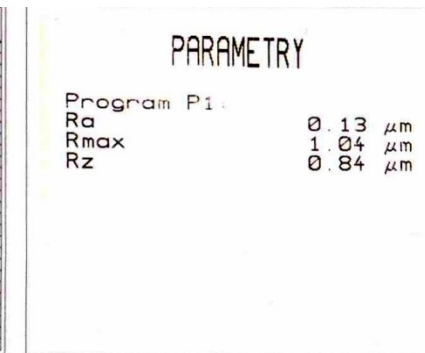
Parametry stożka



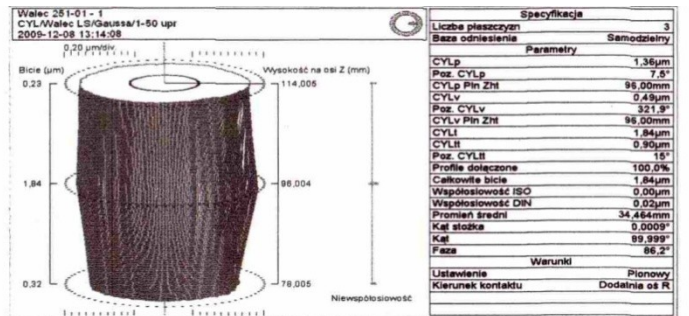
Rozpylacz RU2: dla $\phi 9$ mm



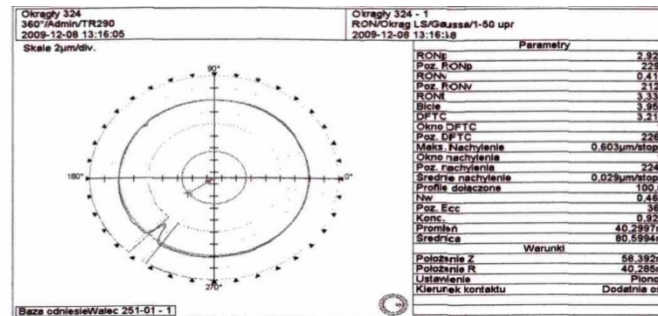
dla stożka



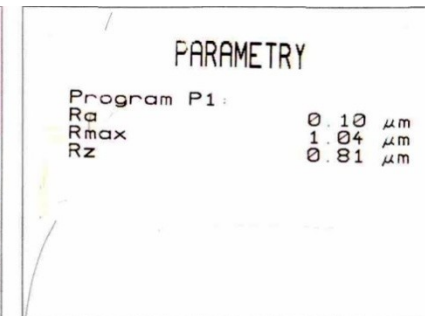
Parametry stożka



Rozpylacz RU3: dla $\phi 9$ mm

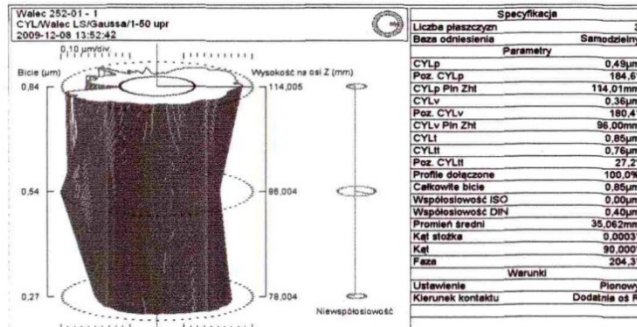


dla stożka

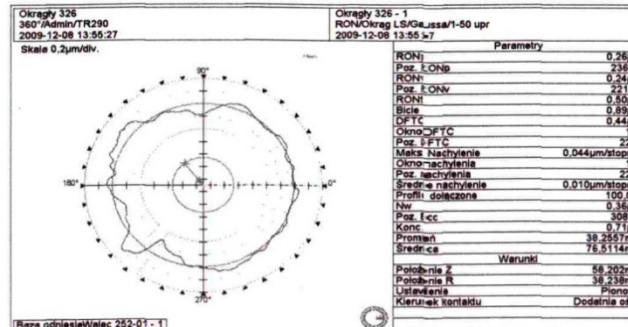


Parametry stożka

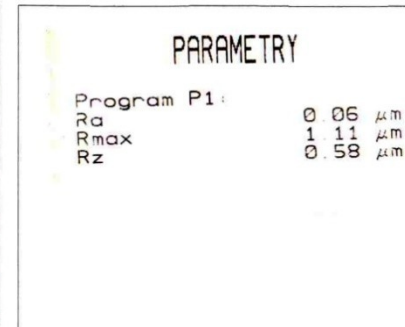
Załącznik 2. Pomiary korpusów rozpylaczy RU4 – RU6



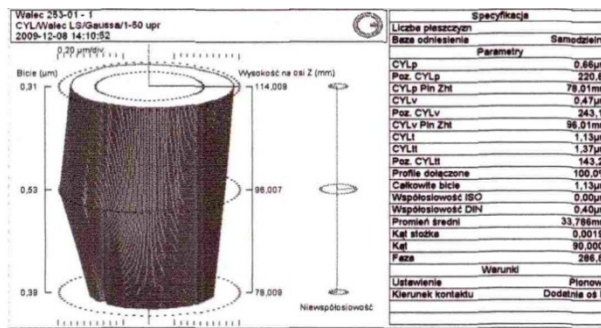
Rozpylacz RU4: dla $\phi 9$ mm



dla stożka



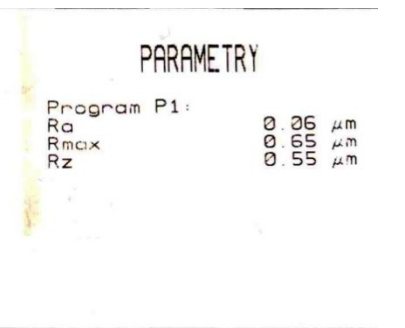
Parametry stożka



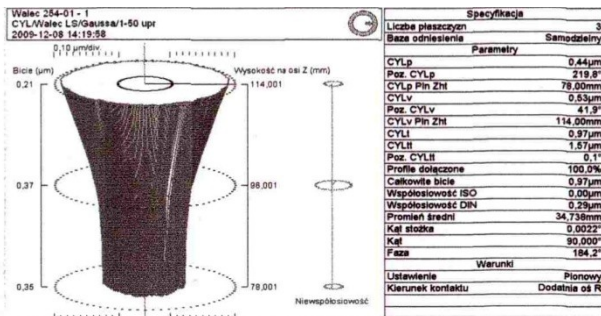
Rozpylacz RU5: dla $\phi 9$ mm



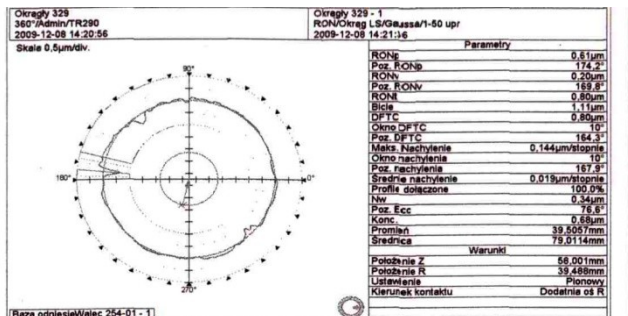
dla stożka



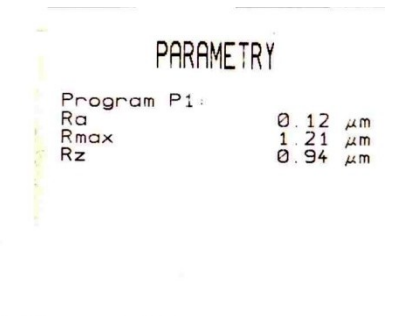
Parametry stożka



Rozpylacz RU6: dla $\phi 9$ mm

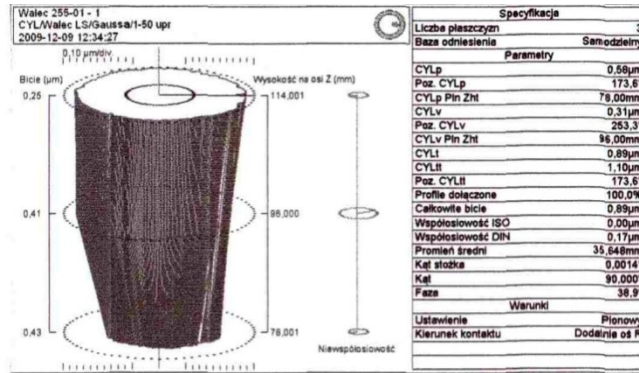


dla stożka

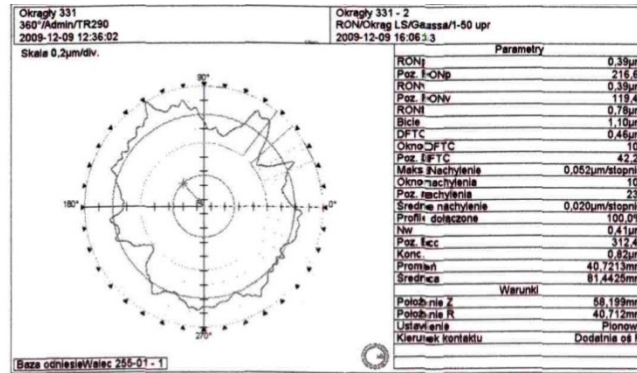


Parametry stożka

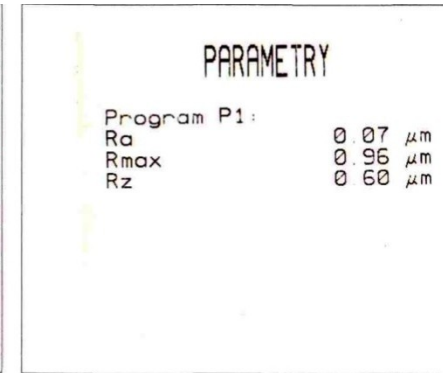
Załącznik 3. Pomiary korpusów rozpylaczy RU7 – RU8



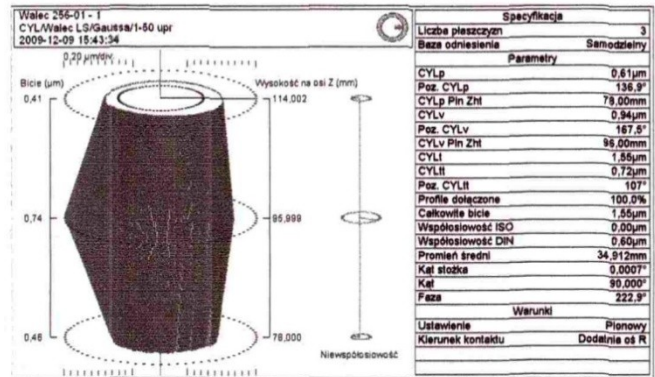
Rozpylacz RU7: dla $\phi 9$ mm



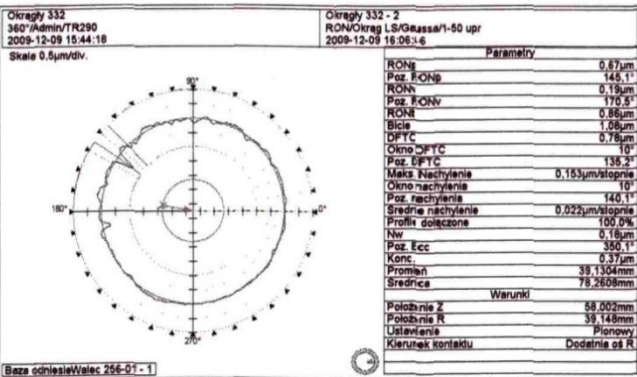
dla stożka



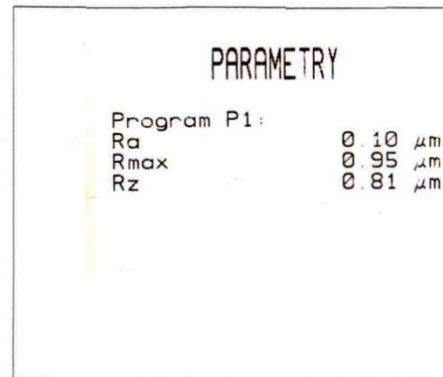
Parametry stożka



Rozpylacz RU8: dla $\phi 9$ mm

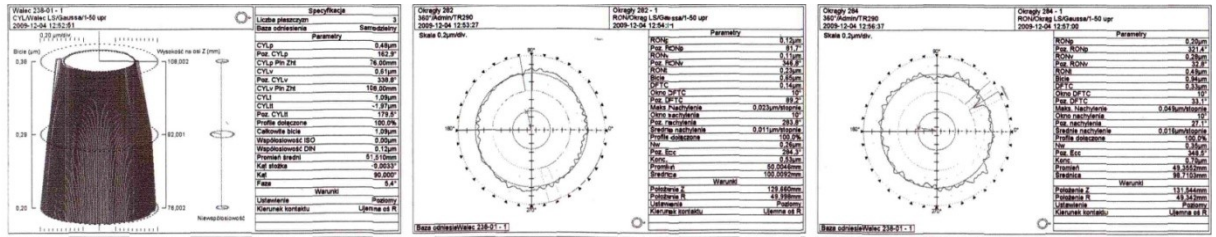


dla stożka



Parametry stożka

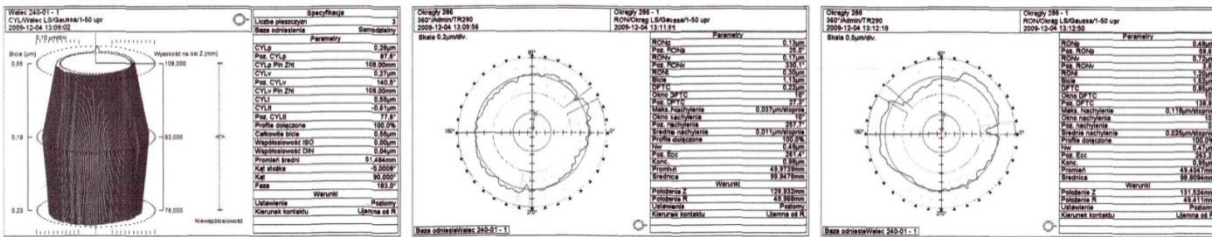
Załącznik 4. Pomiary iglic rozpylaczy RU1 – RU4



Iglica RU1: dla $\phi 9$ mm

dla $\phi 6$ mm

dla stożka



Iglica RU2: dla $\phi 9$ mm

dla $\phi 6$ mm

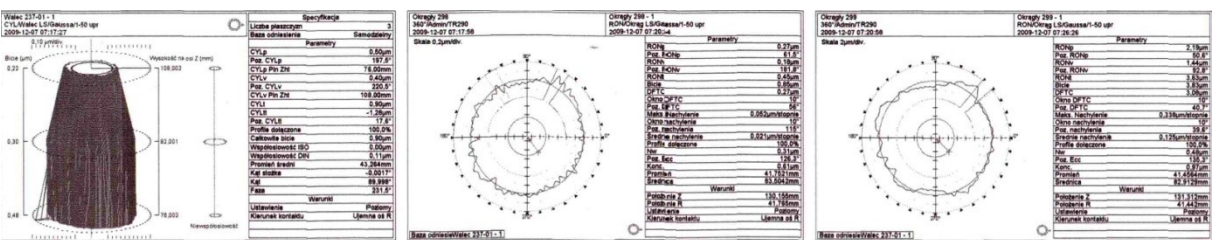
dla stożka



Iglica RU3: dla $\phi 9$ mm

dla $\phi 6$ mm

dla stożka

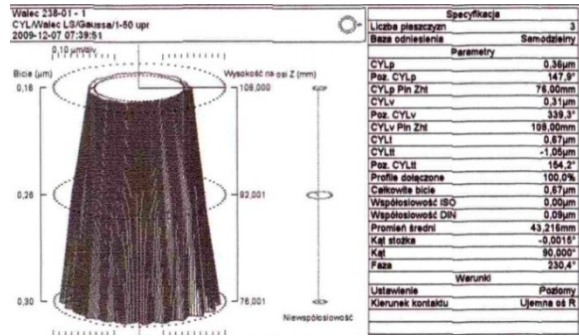


Iglica RU4: dla $\phi 9$ mm

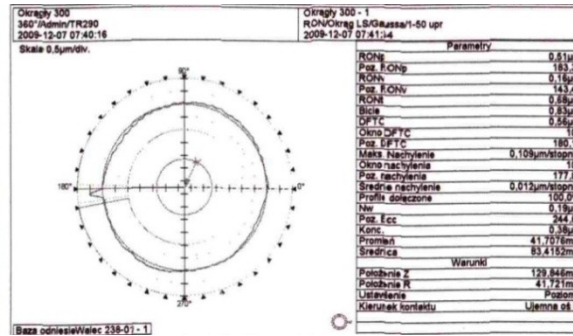
dla $\phi 6$ mm

dla stożka

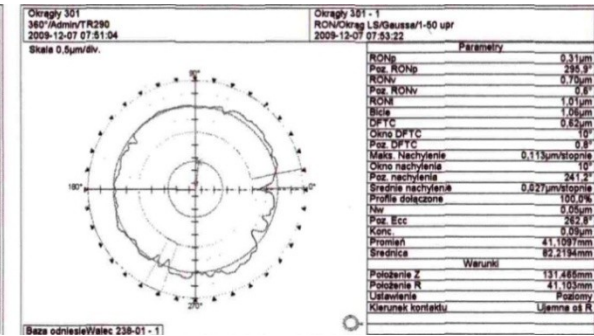
Załącznik 5. Pomiary iglic rozpylaczy RU5 – RU7



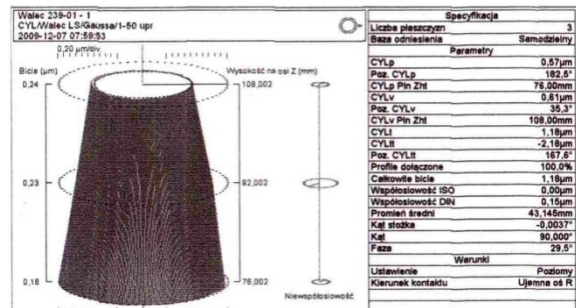
Iglica RU5: dla $\phi 9$ mm



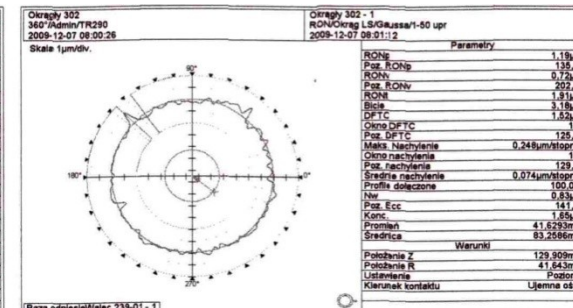
dla $\phi 6$ mm



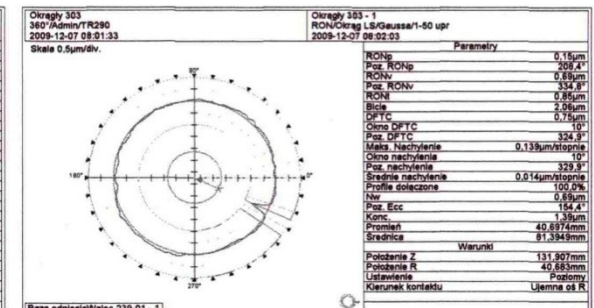
dla stożka



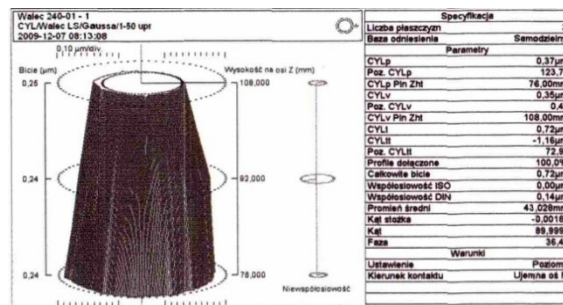
Iglica RU6: dla $\phi 9$ mm



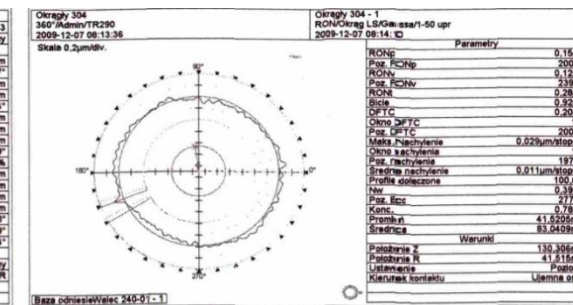
dla $\phi 6$ mm



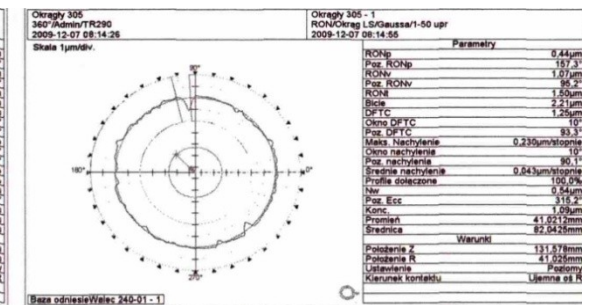
dla stożka



Iglica RU7: dla $\phi 9$ mm

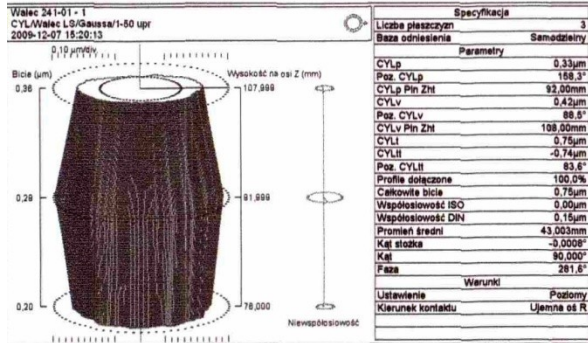


dla $\phi 6$ mm

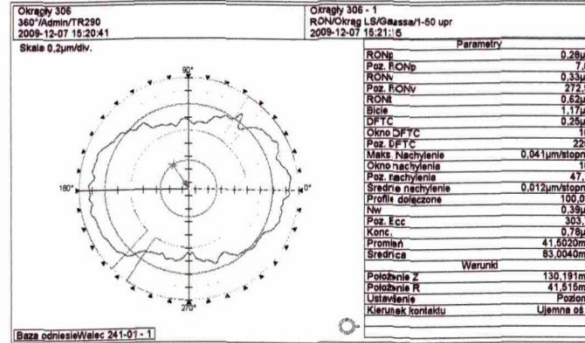


dla stożka

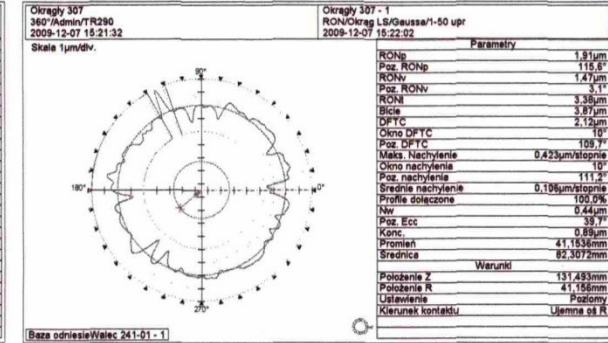
Załącznik 6. Pomiary iglic rozpylaczy RU8



Iglica RU8: dla ϕ 9 mm



dla ϕ 6 mm



dla stożka

Załącznik 7. Parametry iglic rozpylaczy RU1 – RU8

Parametry iglicy rozpylacza RU1

Program P1

R_a 0,07 μm

R_{max} 0,61 μm

R_z 0,55 μm

Parametry iglicy rozpylacza RU5

Program P1

R_a 0,08 μm

R_{max} 0,65 μm

R_z 0,61 μm

Parametry iglicy rozpylacza RU2

Program P1

R_a 0,06 μm

R_{max} 0,62 μm

R_z 0,51 μm

Parametry iglicy rozpylacza RU6

Program P1

R_a 0,06 μm

R_{max} 0,57 μm

R_z 0,49 μm

Parametry iglicy rozpylacza RU3

Program P1

R_a 0,09 μm

R_{max} 1,22 μm

R_z 0,77 μm

Parametry iglicy rozpylacza RU7

Program P1

R_a 0,09 μm

R_{max} 0,75 μm

R_z 0,64 μm

Parametry iglicy rozpylacza RU4

Program P1

R_a 0,08 μm

R_{max} 0,66 μm

R_z 0,61 μm

Parametry iglicy rozpylacza RU8

Program P1

R_a 0,05 μm

R_{max} 1,66 μm

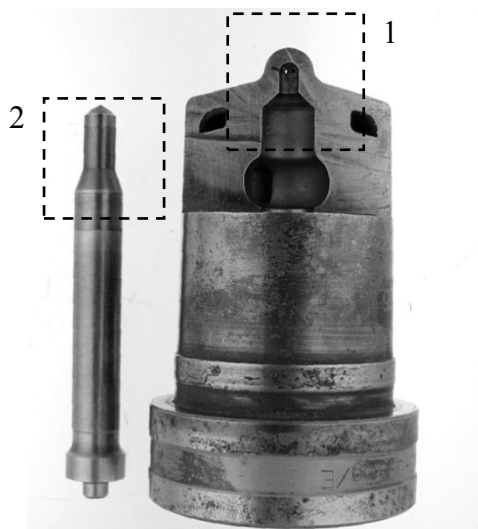
R_z 0,66 μm

Załącznik 8. Przedmiot badań (badania metalograficzne)

1) Przedmiot badań: Próbki fot. 1;

nr 1 – rozpylacz paliwa;

nr 2 – iglica;



Fot. 1

2) Cel badań: badania materiałowe wg uzgodnionego programu

3) Zakres badań:

- analiza chemiczna (wg procedury PT-08-DL2 ed. 01 z 15.11.2004 r.),
- pomiary twardości (wg PN-EN ISO 6507-1:2006),
- ocena mikrostruktury (wg procedury PT-04-DL3 ed. 04 z 12.02.2007 r.).

Uwaga: Badania wykonano na aparaturze posiadającej aktualne sprawdzenia / wzorcowania – do wglądu w poszczególnych pracowniach.

4) Wyniki badań rozpylacza

Analizę składu chemicznego przeprowadzono przy zastosowaniu spektrometrii emisyjnej (ARL 3460 nr fab. 705) zgodnie z PT-08/DL2 edycja 01 z 15.11.2004 r. Wyniki podano w tabeli 1.

Tabela 1.

Oznaczenie próbki	Zawartość [%]										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al
Rozpylacz	0,329	0,484	0,210	0,007	0,002	2,933	0,117	0,053	0,799	0,263	0,001

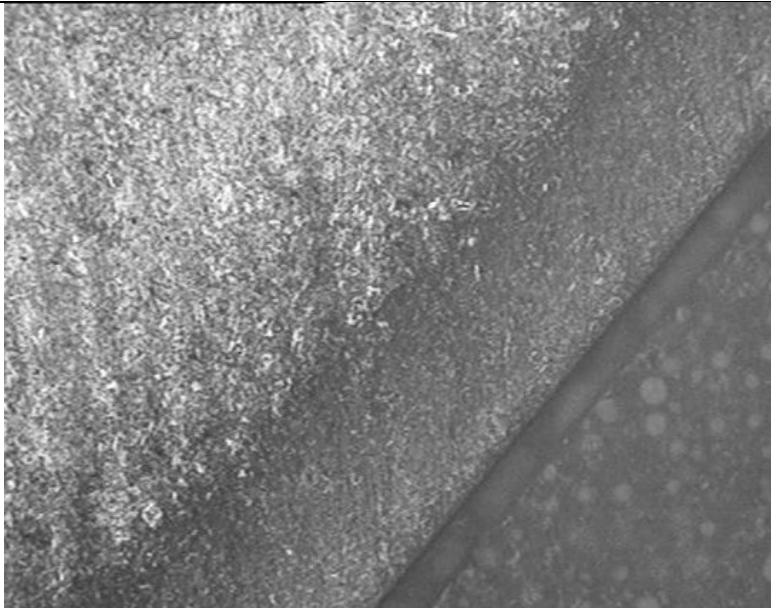
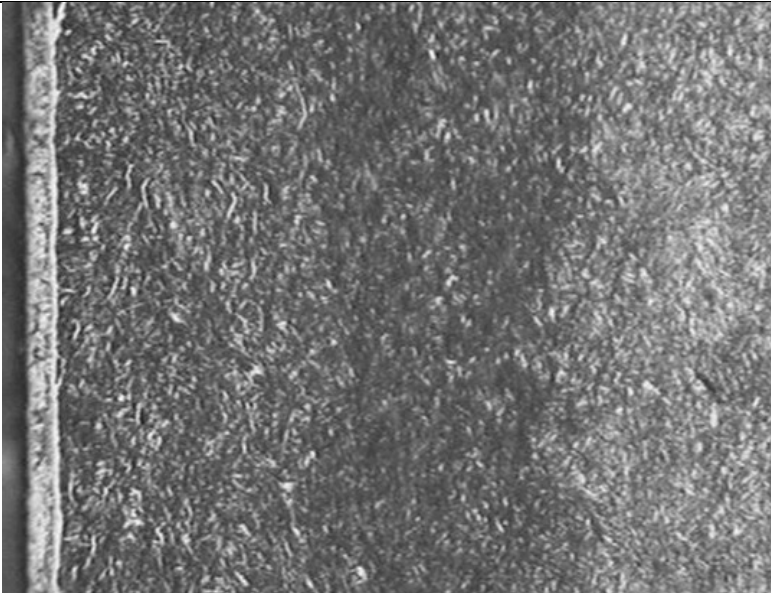
Skład chemiczny odpowiada wymaganiom PN-EN 10085:2003 dla gatunku stali do azotowania 33CrMoV12-9 (1.8522).

Opracowali: K. Kotkowski, E. Mrowicka

Załącznik 9. Ocena metalograficzna

Próbkę rozpylacza wypreparowano z miejsca, jak na fot. 1. Zgodnie z ustaleniami zgląd metalograficzny obejmował gniazdo stożkowe współpracujące z iglicą. Stwierdzono tutaj obecność warstwy dyfuzyjnej azotowanej, w stanie po szlifowaniu (umniejszonej o naddatek szlifierski). Oryginalną warstwę obserwowano w otworze $\phi 3,5$. Porównanie parametrów warstwy azotowanej: w miejscu szlifowanym i w miejscu oryginalnym – przedstawiono na rysunku 21b.

Szczegółowe wyniki oceny warstwy azotowanej w stożkowym gnieździe podano na rysunku 21b.

<p>Gniazdo stożkowe azotowane, szlifowane:</p> <ul style="list-style-type: none">– Grubość warstwy dyfuzyjnej: 0,20 mm;– Rdzeń w stanie ulepszonym: 390 HV1 <p>Fot. 1. pow. x 200</p>	
<p>Otwór $\phi 3,5$ azotowany:</p> <ul style="list-style-type: none">– Grubość warstwy dyfuzyjnej wraz z warstwą azotków: 0,35 mm;– Rdzeń w stanie ulepszonym: 390 HV1	

Opracowali: K. Kotkowski, E. Mrowicka

Załącznik 10. Wyniki badań iglicy – analiza chemiczna

Analizę składu chemicznego iglicy przeprowadzono przy zastosowaniu spektrometrii emisyjnej (ARL 3460 nr fab. 705) zgodnie z PT-08/DL2 edycja 01 z 15.11.2004 r. Wyniki podano poniżej:

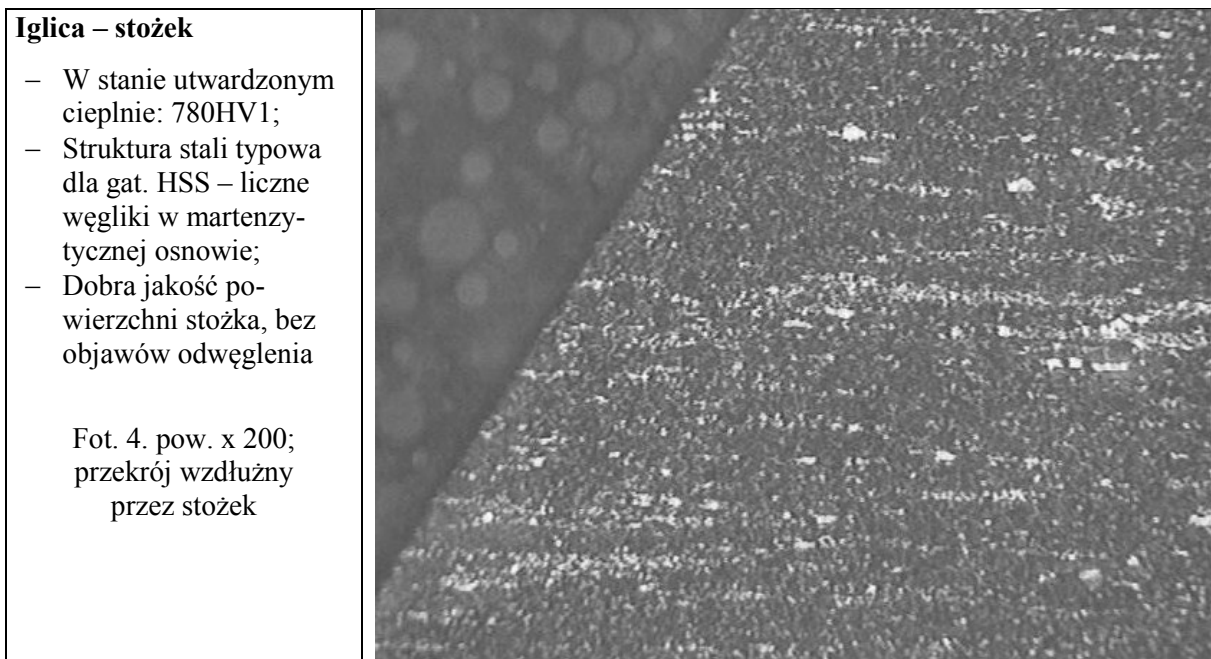
Oznaczenie próbki	Zawartość [%]											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	W	Co
Iglica	0,920	0,260	0,271	0,018	0,005	3,817	0,139	0,079	4,775	1,688	6,083	0,166

Skład chemiczny odpowiada wymaganiom PN-EN ISO 4957:2004 dla gatunku stali narzędziowej HS6-5-2C.

Opracowali: K. Kotkowski, E. Mrowicka

Załącznik 11. Ocena metalograficzna

Próbkę iglicy wypreparowano z miejsca jak na fot. 1 (zał. 9). Przygotowano zgląd metalograficzny wzdłużny z wierzchołka iglicy. Wyniki obserwacji mikroskopowej podano poniżej:



Opracowali: K. Kotkowski, E. Mrowicka

SPIS RYSUNKÓW

1. Procentowy udział uszkodzeń elementów wtryskiwaczy paliwa	8
2. Tłokowy silnik spalinowy przedstawiony jako system przekształcania energii oraz źródło informacji o procesach w nim zachodzących	10
3. Klasyfikacja metod badań diagnostycznych maszyn roboczych	11
4. Zakresy częstotliwości sygnału emisji akustycznej pochodzące z różnych źródeł	15
5. Kształty sygnałów emisji	16
6. Charakterystyki sygnału impulsowego emisji akustycznej	17
7. Schemat funkcjonalny nowoczesnego systemu diagnostycznego wykorzystującego metodę emisji akustycznej	19
8. Model warstwy wierzchniej (WW) stalowego elementu maszyny	21
9. Uproszczony model budowy warstwy wierzchniej	21
10. Schemat transformacji warstwy powierzchniowej w cyklu wytwarzania i użytkowania wyrobu w funkcji czasu	22
11. Typowy przebieg zużycia w funkcji czasu (tzw. Krzywa Lorenza): tribologicznego, korozyjnego i wytrzymałościowego (zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej)	23
12. Metoda wyznaczania krzywych nośności	24
13. Elementarny system tribologiczny dwóch warstw wierzchnich	26
14. Uproszczony system tribologiczny dwóch warstw wierzchnich dla przyjętych warunków laboratoryjnych	27
15. Widok promu MF „Polonia” podczas podróży morskiej	29
16. Ogólny widok promu MF „Polonia”	30
17. Schemat napędu promu MF „Polonia”	30
18. Badany wtryskiwacz	31
19. Pomiary korpusu rozpylacza na maszynie pomiarowej Talyrod 290	32
20. Geometria badanych rozpylaczy	33
21. a) Elementy rozpylacza, b) rozkład twardości w warstwie azotowanej	34
22. Zmiany w gnieździe stożkowym rozpylacza w wyniku zużycia	35
23. Partia badanych rozpylaczy	36
24. Rodzaje diagnostycznych badań eksperymentalnych obiektów technicznych	38
25. Zdjęcie stanowiska pomiarowego	39
26. Model siły / impulsu wymuszającego	40
27. Budowa czujnika 4371V firmy B&K	41
28. Charakterystyka częstotliwościowa piezoelektrycznego czujnika 4371V	41
29. Schemat blokowy wzmacniacza	42
30. Wzmacniacz pasmowo-przepustowy czujnika drgań	42

31. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa pasma przenoszenia wzmacniacza dla wzmocnienia 50-krotnego	42
32. Schemat układu do badania dokładności toru pomiarowego	43
33. Badanie gniazd stożkowych korpusów rozpylaczy paliwa za pomocą endoskopu	44
34. Sygnał EA dla nowego rozpylacza R40	46
35. Sygnał EA dla uszkodzonego rozpylacza RU1	46
36. Akustogram dla nowego rozpylacza R40	47
37. Akustogram dla nowego rozpylacza R50	47
38. Akustogram dla nowego rozpylacza R60	47
39. Akustogram dla nowego rozpylacza R70	47
40. Akustogram dla zużytego rozpylacza RU1	48
41. Akustogram dla zużytego rozpylacza RU2	48
42. Akustogram dla zużytego rozpylacza RU5	48
43. Akustogram dla zużytego rozpylacza RU6	48
44. Nowy rozpylacz R40	49
45. Nowy rozpylacz R50	49
46. Nowy rozpylacz R60	49
47. Nowy rozpylacz R70	49
48. Nowy rozpylacz R80	49
49. Nowy rozpylacz R90	49
50. Rozpylacz nowy R100	50
51. Rozpylacz nowy R110	50
52. Rozpylacz zużyty RU1	50
53. Rozpylacz zużyty RU2	50
54. Rozpylacz zużyty RU3	50
55. Rozpylacz zużyty RU4	50
56. Rozpylacz zużyty RU5	51
57. Rozpylacz zużyty RU6	51
58. Rozpylacz zużyty RU7	51
59. Rozpylacz zużyty RU8	51
60. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 50 mV	60
61. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 100 mV	60
62. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 250 mV	60
63. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 500 mV	61
64. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 1000 mV	61
65. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 2000 mV	61
66. Średnia energia zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 4000 mV	62

67. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 50 mV.....	62
68. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 100 mV.....	62
69. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 250 mV.....	63
70. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 500 mV.....	63
71. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 1000 mV.....	63
72. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 2000 mV.....	64
73. Średnia wartość amplitudy dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 4000 mV.....	64
74. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 50 mV.....	64
75. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 100 mV.....	65
76. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 250 mV.....	65
77. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 1000 mV.....	65
78. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 2000 mV.....	66
79. Średnia liczba zdarzeń dla fabrycznie nowych i zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 4000 mV.....	66
80. Wykres słupkowy średniej energii zdarzeń dla różnych progów wykrywalności.....	68
81. Wykres punktowy średniej energii zdarzeń dla różnych progów wykrywalności.....	68
82. Aproksymacja zależności średniej energii zdarzeń od progu wykrywalności.....	68
83. Wykres słupkowy średniej wartości amplitudy przy różnych progach wykrywalności.....	69
84. Wykres punktowy średniej wartości amplitudy przy różnych progach wykrywalności.....	69
85. Aproksymacja zależności średniej wartości amplitudy od progu wykrywalności.....	69
86. Wykres słupkowy średniej liczby zdarzeń przy różnych progach wykrywalności.....	70
87. Wykres punktowy średniej liczby zdarzeń przy różnych progach wykrywalności.....	70
88. Aproksymacja zależności średniej liczby zdarzeń od progu wykrywalności.....	70
89. Zależność dystrybuant F i F_e od średniej energii zdarzeń x dla rozpylaczy nowych (a) i zużytych (b) przy progu wykrywalności 50 mV.....	73
90. Gęstość prawdopodobieństwa $f(x)$ dla rozpylaczy nowych i zużytych przy progu wykrywalności 50 mV.....	74
91. Procent wyników pomiarów mieszczących się w przedziałach o szerokości jednego odchylenia standardowego dla rozkładu normalnego.....	74

SPIS TABEL

1. Najczęściej stosowane deskryptory EA	18
2. Podstawowe metody pomiaru rzeczywistej powierzchni styku i udziału nośności	25
3. Obiekt badań – partia rozpylaczy	36
4. Wyniki pomiarów zużytych rozpylaczy	37
5. Wyniki pomiaru dokładności toru pomiarowego	44
6. Zdjęcia stożków iglicy i gniazd badanych rozpylaczy	45
7. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 50 mV	53
8. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 50 mV	53
9. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 100 mV	54
10. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 100 mV	54
11. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 250 mV	55
12. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 250 mV	55
13. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 500 mV	56
14. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 500 mV	56
15. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 1000 mV	57
16. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 1000 mV	57
17. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 2000 mV	58
18. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 2000 mV	58
19. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla fabrycznie nowych rozpylaczy przy progu wykrywalności 4000 mV	59
20. Wartości średnie trzech wybranych miar sygnału emisji akustycznej dla zużytych rozpylaczy przy progu wykrywalności 4000 mV	59
21. Średnia energia zdarzeń dla różnych progów wykrywalności	67
22. Średnia wartość amplitudy dla różnych progów wykrywalności	67
23. Średnia liczba zdarzeń dla różnych progów wykrywalności	67