

Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Grzegorz Piotrowicz

SYSTEMY OCENY STANU DYNAMICZNEGO ŁOŻYSK TOCZNYCH ZA POMOCĄ USTALENIA POZIOMU DRGAŃ GENEROWANYCH PRZEZ ŁOŻYSKA

Promotor:
prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak, dr h.c.(multi)

Kielce 2025

*Pragnę wyrazić moje najgłębsze podziękowania za nieocenioną
pomoc i wsparcie, jakie otrzymałem od Pana Profesora
Stanisława Adamczaka podczas pisania mojej pracy doktorskiej.
Dzięki Pana wskazówkom i cennym radom udało mi się pokonać
wiele trudności oraz osiągnąć zamierzony cel. Jestem niezwykle
wdzięczny za każdą poświęconą mi chwilę i wszystkie
konstruktywne uwagi, które przyczyniły się do
powstania tej pracy.*

*Pracę tę dedykuję mojej żonie Magdalenie i córce Annie.
Ich cierpliwość, wyrozumiałość i nieustanna wiara we mnie były
dla mnie niezwykle ważne i dodawały mi sił
w momentach zwątpienia.*

SPIS TREŚCI

1. SPIS NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	9
2. WSTĘP	12
3. AKTUALNY STAN WIEDZY	15
3.1. Charakterystyka osi obrotu.....	15
3.2. Pomiar drgań łożysk w warunkach przemysłowych	18
3.3. Metody pomiaru drgań łożysk.....	20
3.3.1. Pomiar przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia.....	21
3.3.2. Pomiar względny lub bezwzględny	22
3.3.3. Pomiar stykowy i bezstykowy.....	24
3.4. Właściwości metrologiczne przyrządów pomiarowych.....	25
3.5. Diagnostyka łożysk	28
3.5.1. Metody diagnostyki łożysk	28
3.5.2. Analiza drgań w dziedzinie czasu	31
3.6. Analiza drgań łożysk oraz nowoczesne metody diagnostyki uszkodzeń	49
4. CEL PRACY.....	54

5. ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE URZĄDZEŃ BADAWCZYCH DO POMIARU DRGAŃ ŁOŻYSK KULKOWYCH	55
5.1. Wrzeciono badawcze	57
5.2. Głowica pomiarowa	59
5.3. Czujnik drgań	60
5.4. Zespół docisku badanego łożyska	62
5.5. Napęd wrzeciona	65
5.6. Zespół sterowania, kontroli i monitoringu	67
5.7. Oprogramowanie badawcze	68
5.8. Korpus stanowiska i osprzęt.....	68
6. ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE NOWO ZAPROJEKTOWANEGO SYSTEMU DO POMIARU DRGAŃ ŁOŻYSK KULKOWYCH	70
6.1. Wstępne rozwiązania konstrukcyjne	70
6.2. Ostateczny projekt systemu pomiarowego.....	76
6.2.1. Wrzeciono hydrodynamiczne.....	79
6.2.2. Głowica pomiarowa	79
6.2.3. Czujnik drgań	80
6.2.4. Zespół docisku.....	82
6.2.5. Napęd wrzeciona	84

6.2.6. Zespół sterowania i oprogramowanie badawcze	85
6.2.6.1. Tor pomiarowy do badania drgań	85
6.2.6.2. Oprogramowanie badawcze do pomiarów drgań łożysk ..	86
6.2.7. Konstrukcja nośna systemu i elementy amortyzacji	92
7. PRZENOŚNY SYSTEM DO OCENY POZIOMU DRGAŃ ŁOŻYSK	95
7.1. Budowa przenośnego systemu do oceny poziomu drgań łożysk	96
7.1.1. Czujnik pomiarowy	96
7.1.2. Zespół wzmacniacza sygnału pomiarowego	97
7.2. Jednostka centralna i oprogramowanie	99
7.3. Kalibracja systemu	100
8. WSTĘPNE TESTY SYSTEMU (STANOWISKA) POMIAROWEGO	102
9. STATYSTYCZNE BADANIA PORÓWNAWCZE SYSTEMÓW POMIAROWYCH.....	112
9.1. Charakterystyki badanych systemów	112
9.2. Podstawowe testy systemów pomiarowych	115
9.3. Charakterystyki metrologiczne systemów pomiarowych	137
9.4. Dokładność pomiarowa DP analizowanych systemów pomiarowych.....	142

9.5. Powtarzalność i odtwarzalność systemów pomiarowych	149
---	-----

10. WNIOSKI Z BADAŃ NAD SYSTEMAMI DO POMIARÓW

DRGAŃ ŁOŻYSK.....	158
LITERATURA	164
STRESZCZENIE	179
SUMMARY	182

1. SPIS NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

f_w	–	częstotliwość obrotowa pierścienia wewnętrznego;
f_{pz}	–	częstotliwość uszkodzenia pierścienia zewnętrznego;
f_{pw}	–	częstotliwość uszkodzenia pierścienia wewnętrznego;
f_{ET}	–	częstotliwość uszkodzenia elementów tocznych;
f_K	–	częstotliwość uszkodzenia koszyka;
z	–	liczba elementów tocznych;
p_w	–	prędkość obrotowa łożyskowanego wału;
d	–	średnica elementów tocznych;
D_m	–	średnica podziałowa łożyska;
α	–	kąt działania łożyska tocznego;
q_{p-p}	–	wartość międzyszczytowa (ang. Peak-to-Peak);
q_i	–	kolejne wartości próbkowanego sygnału przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia drgań;
q_p	–	wartość szczytowa (ang. Peak Level);
q_{RMS}	–	wartość skuteczna drgań RMS (ang. Root Mean Square);
$q(t)$	–	sygnał przyspieszenia, prędkości lub przemieszczenia drgań w funkcji czasu;
t	–	czas pomiaru;
s	–	kolejne punkty próbkowania;
RA	–	amplituda pierwiastkowa (ang. Root Amplitude);
S	–	skośność (ang. Skewness);
Ku	–	kurtoza (ang. Kurtosis);
CR	–	współczynnik szczytu (ang. Crest Factor);
IF	–	współczynnik impulsywności (ang. Impulse Factor);
MF	–	współczynnik luzu (ang. Margin Factor);
SF	–	współczynnik kształtu (ang. Shape Factor);
SPM	–	metoda impulsów pomiarowych;
D_i	–	średnica bieżni wewnętrznej łożyska;
SV	–	wielkość impulsu uderowego obliczonego z sygnału czasowego prędkości;

BCU	–	jednostka miary stanu łożyska (ang. Bearing Condition Unit);
VL	–	parametr do określenia poziomu prędkości drgań (ang. Velocity Level);
qV_{RMS}	–	wartość skuteczna prędkości drgań badanego łożyska tocznego;
qV_{RMS0}	–	wartość skuteczna prędkości drgań łożyska referencyjnego;
And	–	Anderon;
f_h	–	najwyższa częstotliwość w paśmie;
f_l	–	najwyższa częstotliwość w paśmie;
$\%FAG$	–	parametr prędkości drgań wyrażony w % wartości odniesienia;
$V_{\%FAG}$	–	wartość skuteczna szumu w $\%FAG$;
V_A	–	wartość skuteczna szumu w Anderonach;
W_R	–	współczynnik osłabienia dla danego typu łożyska;
W	–	współczynnik ustawiany oddzielnie dla każdego pasma częstotliwości;
DP	–	dokładność pomiarowa analizowanych metod;
k_p	–	zmienna standaryzowana dla określonego poziomu ufności P;
s	–	odchylenie średnie błędu pomiaru;
$\bar{w}_{\Delta Z}$	–	średni eksperymentalny względny błąd pomiaru;
ΔZ_{pi}	–	wartość skuteczna drgań kolejnego łożyska dla danego pasma częstotliwości, otrzymana dla systemu badanego;
ΔZ_{aj}	–	wartość skuteczna drgań kolejnego łożyska dla tego samego pasma częstotliwości, otrzymana dla systemu wzorcowego;
χ^2	–	test sprawdzający zgodność otrzymanego rozkładu z rozkładem normalnym;
χ^2_{kr}	–	krytyczna wartość sprawdzająca zgodność otrzymanego rozkładu z rozkładem normalnym;
i	–	kolejne przedziały histogramu;
k	–	liczba wszystkich przedziałów;
m_i	–	ilość wyników z próby w przedziale;

n	–	ilość pomiarów w serii;
p_i	–	teoretyczne prawdopodobieństwo znalezienia się wyniku w przedziale i ;
U	–	statystyka porównania średnich;
U_{kr}	–	statystyka krytyczna porównania średnich określona na podstawie przyjętego poziomu prawdopodobieństwa z tablicy rozkładu normalnego;
$\bar{x}_i, \bar{x}_j$	–	średnie arytmetyczne porównywalnych serii pomiarowych;
s_i^2, s_j^2	–	wariancje porównywalnych serii pomiarowych;
n_i, n_j	–	ilość pomiarów w serii;
F	–	statystyka porównania wariancji;
F_{kr}	–	statystyka krytyczna dobrana z tablic F-Snedecora;
e_j	–	błąd poprawności;
x_i	–	kolejna wartość pomiaru;
$\bar{x}_i$	–	średnia arytmetyczna wskazań x_i ; systemu pomiarowego;
x_p	–	wartość poprawna wielkości mierzonej;
p	–	poprawka systemu pomiarowego;
σ	–	odchylenie średnie kwadratowe dla pomiaru wartości poprawnej;
u_p	–	błąd graniczny wierności (precyzji);
d	–	dokładność systemu pomiarowego;
δ	–	klasa dokładności systemu pomiarowego;
W_{max}	–	górną granicę zakresu systemu pomiarowego (najwyższe wskazania jakie określa system);
R_i	–	rozstęp między pomiarami;
x_{min}	–	najmniejszy wynik pomiaru z pary wyników;
x_{max}	–	największy wynik pomiaru z pary wyników;
$\bar{R}$	–	średni rozstęp;
EV	–	powtarzalność systemu pomiarowego;
%R&R	–	rozrzut systemu pomiarowego;
T	–	tolerancja poziomu drgań łożysk.

2. WSTĘP

Łożyska kulkowe, będące fundamentem współczesnej inżynierii mechanicznej, stanowią istotny element wpływający na wydajność i trwałość różnorodnych maszyn. Historia ich rozwoju, ich budowa oraz znaczenie w konstrukcjach mechanicznych jest przedmiotem intensywnych badań, a także nieustających innowacji.

Pierwsze formy łożysk, choć prymitywne, pojawiły się już w starożytności, gdzie używano rolek i ślizgów do redukcji tarcia w różnych mechanizmach. W średniowieczu zaczęto stosować bardziej złożone mechanizmy, jednak prawdziwy przełom w tej technologii nastąpił dopiero w XIX wieku. W 1869 roku Philipp Moritz Fischer opatentował pierwsze nowoczesne łożysko kulkowe, co otworzyło nowy rozdział w historii inżynierii mechanicznej. Kolejny istotny krok w rozwoju tej technologii miał miejsce w 1883 roku, kiedy to Friedrich Fischer opracował maszynę do szlifowania stalowych kulek o wysokiej precyzji, co z kolei umożliwiło masową produkcję łożysk kulkowych o znacznie lepszych parametrach użytkowych.

Współczesne łożyska kulkowe są produktem nie tylko rozwiniętej technologii, ale także zaawansowanego materiałoznawstwa. Charakteryzują się one wyjątkową precyzją wykonania oraz wysoką wytrzymałością, co jest wynikiem ciągłych innowacji w procesach produkcyjnych. Łożyska (Rys. 1) te składają się z kilku kluczowych elementów: pierścienia wewnętrznego, pierścienia zewnętrznego, zestawu kulek oraz koszyka (separatora). Każdy z tych elementów odgrywa istotną rolę w zapewnieniu płynnego ruchu obrotowego przy minimalnym tarcu. Ponadto, materiały stosowane do produkcji łożysk kulkowych, takie jak wysokogatunkowe stale, ceramika czy tworzywa sztuczne, są dobierane w zależności od specyficznych wymagań aplikacyjnych, co pozwala na dostosowanie łożysk do różnych warunków pracy.

Łożyska kulkowe są nieodzownym elementem wielu maszyn i urządzeń, począwszy od małych silników elektrycznych, przez maszyny przemysłowe, aż po ciężki sprzęt budowlany i motoryzacyjny. Ich zastosowanie pozwala na znaczną redukcję strat energii spowodowanych tarciami, a także zwiększa precyzję ruchu i wydłuża żywotność maszyn. W obliczu rosnących wymagań przemysłowych, łożyska kulkowe muszą spełniać coraz bardziej rygorystyczne standardy dotyczące wytrzymałości, niezawodności i wydajności [57]. Dzięki nowoczesnym technologiom produkcji, takim jak precyzyjne obróbki mechaniczne oraz zaawansowane metody hartowania, współczesne łożyska kulkowe są w stanie sprostać tym wyzwaniom, zapewniając niezawodną pracę nawet w najbardziej wymagających warunkach.



Rys. 1. Widok ogólny łożyska kulkowego [S1].

Dobór odpowiedniego łożyska kulkowego do danej aplikacji wymaga uwzględnienia wielu kluczowych czynników, które mają bezpośredni wpływ na jego wydajność i trwałość. Należą do nich m.in. obciążenie, prędkość obrotowa, warunki środowiskowe, precyzja wykonania, smarowanie oraz przewidywana żywotność. Każdy z tych czynników musi być dokładnie analizowany, aby zapewnić optymalne działanie łożyska

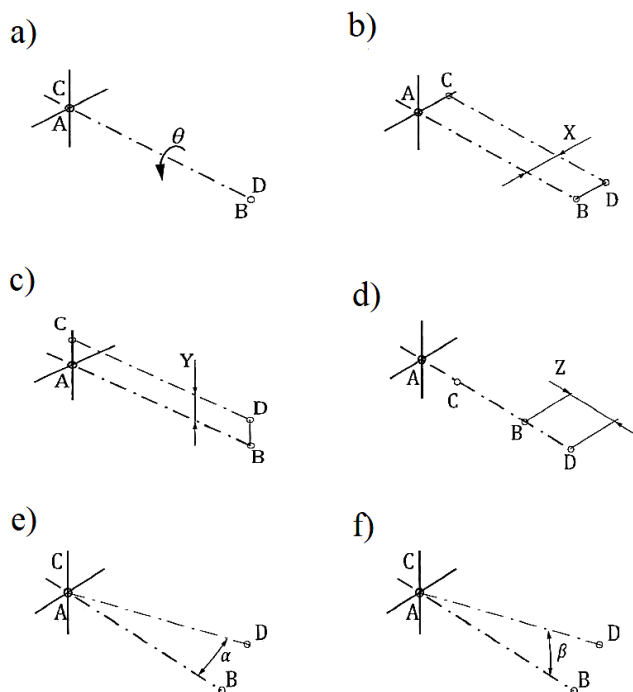
w danym kontekście. Dodatkowo, cichobieżność, czyli poziom generowanych drgań, stała się jednym z najistotniejszych parametrów jakości łożysk w nowoczesnych zastosowaniach. Pomiar drgań pozwala na monitorowanie stanu łożyska i identyfikację potencjalnych problemów na wczesnym etapie, co przyczynia się do zwiększenia jego trwałości i niezawodności.

Podsumowując, łożyska kulkowe odgrywają kluczową rolę w konstrukcji współczesnych maszyn, wpływając bezpośrednio na ich wydajność, niezawodność i trwałość. Zrozumienie historii, budowy oraz kryteriów doboru łożysk kulkowych jest niezbędne do optymalizacji ich zastosowania w różnych aplikacjach, co z kolei przyczynia się do wydłużenia żywotności maszyn oraz redukcji kosztów operacyjnych. W dalszej części pracy szczegółowo omówiono i przetestowano system pomiarowy do oceny poziomu drgań generowanych przez łożyska, co pozwala na precyzyjne monitorowanie ich stanu technicznego na etapie produkcji oraz wczesne wykrywanie potencjalnych problemów, wpływając na poprawę ich niezawodności i wydajności w praktycznych zastosowaniach.

3. AKTUALNY STAN WIEDZY

3.1. Charakterystyka osi obrotu

Oś pracującego łożyska jest osią obrotową części wirujących w maszynie i oś ta może wykonywać ruch w sześciu stopniach swobody (Rys. 2). Oś AB jest osią referencyjną, natomiast rzeczywistą osią obrotu łożyska tocznego jest oś CD.



Rys. 2. Stopnie swobody osi obrotu łożyska tocznego: a) ruch obrotowy względem osi Z (osi referencyjnej); b) ruch w kierunku promieniowym względem osi X; c) ruch w kierunku promieniowym względem osi Y; d) ruch w kierunku osiowym względem osi Z; e) ruch obrotowy o pewien kąt w płaszczyźnie poziomej; f) ruch obrotowy o pewien kąt w płaszczyźnie pionowej [N1].

W idealnych warunkach pracy łożyska wskazany jest przypadek (a), pozostałe przypadki wskazują różnego rodzaju nieprawidłowości. Takie przemieszczenia osi obrotu wskazują na błędy związane z ruchem łożyska. Zmiany spowodowane zmianami temperatury oraz zmianami przyłożonego obciążenia nie są brane pod uwagę. Na dokładność obrotu mają wpływ między innymi błędy geometryczne powierzchni wewnętrznych łożyska oraz niedokładności wymiarowe i kształtu łożysk. Źródłem powstania tych błędów mogą być błędy podczas etapu produkcji albo eksploatacji, czyli niewłaściwy proces montażu lub zabudowy łożysk. Produkcyjne błędy wpływające na błędy związane z ruchem łożyska to: produkcja podzespołów łożyskowych niezgodnie z procesem technologicznym, czyli błędy kształtu, falistości czy chropowatości. Do błędów produkcyjnych należy zaliczyć też niewłaściwy sposób montażu czy niedostateczne starania dotyczące mycia łożysk. Do niezamierzonych błędów produkcyjnych uwzględnić należy też braki materiałowe, czyli ubytki materiałowe, wżery, pęknięcia. Eksploatacyjne błędy wpływające na błędny ruch łożyska to niewłaściwy sposób zabudowy łożysk w maszynach, nadmierne obciążenie łożysk czy wyciek smaru. Niewłaściwa eksploatacja łożysk może spowodować nadmierne zużycie powierzchniowe (np. pitting). W wyniku błędów produkcyjnych i eksploatacyjnych zmienia się położenie osi łożyska [22,57,N1].

Te same czynniki, które wywołują błąd związany z ruchem łożyska, powodują powstawanie drgań dynamicznych łożyska. Drgania te zależne są od prędkości obrotowej oraz przyłożonego obciążenia. Drgania generowane przez łożyska mogą mieć wpływ na charakterystykę pracy całego urządzenia oraz powodują hałas w powietrzu.

Badaniami drgań łożysk tocznych zajmuje się wielu naukowców. Skupiają się głównie na analizie drgań generowanych przez uszkodzone łożysko. Do takiej analizy drgań wykorzystują szybką transformatę Fouriera FFT [62,71,94,104] lub transformatę falkową WT [35,45,51,61,71]. Metody te poddają analizie poszczególne składowe lub pasma przebiegu czasowego. Charakterystyczne elementy przebiegu powiązane są parametrami konstrukcyjnymi łożysk tocznych i pozwalają określić błędy występujące

w łożyskach. Znając podstawowe parametry konstrukcyjne łożysk tocznych oraz ich prędkość obrotową możemy obliczyć częstotliwości uszkodzonych elementów łożyska [60,72,104]:

- Częstotliwość obrotowa pierścienia wewnętrznego:

$$f_w = p_w \quad (1)$$

- Częstotliwość uszkodzenia pierścienia zewnętrznego:

$$f_{pz} = \frac{z}{2} \cdot p_w \cdot \left(1 - \frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right) \quad (2)$$

- Częstotliwość uszkodzenia pierścienia wewnętrznego:

$$f_{pw} = \frac{z}{2} \cdot p_w \cdot \left(1 + \frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right) \quad (3)$$

- Częstotliwość uszkodzenia elementów tocznych:

$$f_{ET} = \frac{2d}{D_m} \cdot p_w \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right)^2\right] \quad (4)$$

- Częstotliwość uszkodzenia koszyka:

$$f_K = \frac{1}{2} \cdot p_w \cdot \left(1 - \frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right) \quad (5)$$

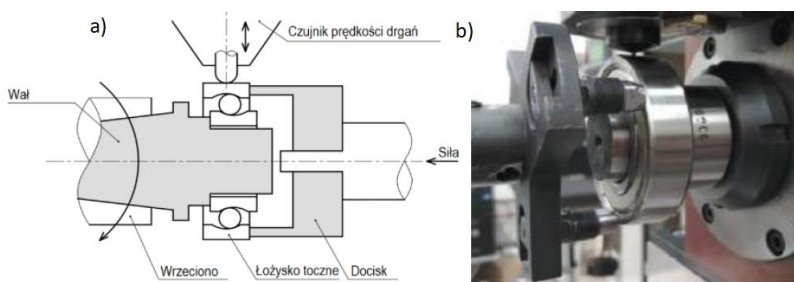
Gdzie:

z – liczba elementów tocznych, p_w – prędkość obrotowa łożyskowanego wału, d – średnica elementów tocznych, D_m – średnica podziałowa łożyska, α – kąt działania łożyska tocznego.

Otrzymany sygnał drgań łożyska tocznego podlega zakłóceniom. Zakłócenia mogą być generowane przez czujnik pomiarowy wraz z elektroniką, błędy wykonawcze stanowiska pomiarowego (np. bicie wału obrotowego) czy też drgania otoczenia (niewłaściwe wy tłumienie stanowiska pomiarowego).

3.2. Pomiar drgań łożysk w warunkach przemysłowych

Pomiar poziomu drgań łożysk tocznych w przedsiębiorstwach produkujących łożyska oparty jest na instrukcjach i procedurach zgodnych z obowiązującymi normami [N1, N2, N3]. Badane łożysko obsadzone jest na obracającym się wale pomiarowym, które zamocowane jest we wrzecionie obrotowym urządzenia pomiarowego. Gniazdo wrzeciona, dzięki zastosowaniu np. stożka Morse'a, posiada możliwość mocowania wielu wałów pomiarowych do różnych typów łożysk. Prędkość obrotowa wrzeciona, wału pomiarowego jest ściśle określona. Standardowa prędkość obrotowa wrzeciono – wał – badane łożysko wynosi 1800 obr/min. Czasami w wyniku uzgodnień pomiędzy producentem a klientem możliwy jest pomiar poziomu drgań przy większych obrotach: od 2400 obr/min do 3600 obr/min, ale także przy mniejszych obrotach: od 600 obr/min do 1200 obr/min. W trakcie pomiaru prędkość obrotowa nie powinna przekraczać wartości obrotów nominalnych o więcej niż 1% i nie powinna być niższa niż 2%. Podczas pomiaru poziomu drgań mierzone łożysko obciążone jest siłą osiową. Mechanizm docisku badanego łożyska powinien zapewnić drgania swobodne łożyska w kierunkach zgodnych z typem łożyska, np. drgania promieniowe w łożyskach kulkowych zwykłych. Ponadto mechanizm docisku powinien charakteryzować się pracą w osi badanego łożyska, siła docisku powinna być równomiernie rozłożona na powierzchni czołowej pierścienia zewnętrznego i być zmienną w zależności od wielkości badanego łożyska. Zaletą mechanizmu dociskowego jest stabilna siła docisku. Do pomiarów drgań generowanych przez obracające się łożyska stosujemy najczęściej elektrodynamiczny czujnik prędkości drgań. Czujnik drgań zamocowany jest w uchwycie i podlega regulacji w dwóch płaszczyznach. Podczas pomiarów czujnik ma ciągły kontakt z nieruchomym pierścieniem zewnętrznym łożyska tocznego, a końcówka pomiarowa czujnika powinna być prostopadła do osi mierzonego łożyska i wypadać w środku szerokości pierścienia zewnętrznego (Rys. 3).

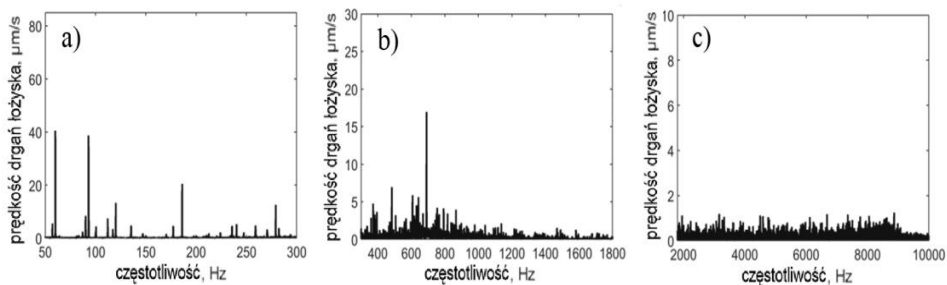


Rys. 3. Zasada pomiaru drgań łożyska tocznego: a) schemat; b) głowica pomiarowa przemysłowego systemu pomiarowego [6].

Sygnal drgań łożyska tocznego mierzony jest w trzech pasmach częstotliwości (Rys. 4). Dla prędkości obrotowej 1800 obr/min zakres pasm częstotliwości wygląda następująco, pasmo niskich częstotliwości 50-300 Hz, pasmo średnich częstotliwości 300-1800 Hz oraz pasmo wysokich częstotliwości 1800-10000 Hz. Wartości pasm częstotliwości dla innych prędkości obrotowych (uzgodnionych z klientem) określone są w normie [N2].

W celu zminimalizowania wpływu czynników zewnętrznych, konieczne jest skuteczne umycie badanego łożyska przed pomiarem. Dodatkowo, przed pomiarem, należy zakropić łożysko za pomocą czystego oleju oraz równomiernie rozprowadzić po całej powierzchni bieżni i kulek. Pomiar drgań tylko tak naoliwionego łożyska upewnia producenta co do jakości swoich wyrobów. Poziom generowanych drgań przez łożyska nasmarowane jest mniejszy niż poziom drgań generowany przez łożyska tylko naoliwione.

Czas pomiaru sygnału powinien być nie mniejszy niż 0,5 sekundy. Pomiar należy wykonać po ustabilizowaniu się odczytów. Na zmienność wyników mogą wpływać czynniki przypadkowe. Dlatego należy ograniczyć do minimum wpływ niestabilnego stanu dynamicznego łożyska tocznego. Wpływa na to rozpoczęcie współpracy podzespołów łożyska, bieżni pierścieni z elementami tocznymi oraz niedostateczna ilość rozprowadzonego smaru.



Rys. 4. Zakres częstotliwości sygnału drgań łożyska tocznego podzielonego na trzy pasma:
a) pasmo 50-300Hz, b) pasmo 300-1800Hz, c) pasmo 1800-10000Hz.

Szerokie spektrum częstotliwości drgań jakie generuje łożysko pozwala na wykrycie nieprawidłowości w tym łożysku. Każdemu pasmu częstotliwości przypisane są inne wady. W niskim paśmie częstotliwości można wykryć defekt bieżni zewnętrznej czy też odchyłki okrągłości. W paśmie średnich częstotliwości określić można błędy bieżni wewnętrznej, uszkodzenie kulki oraz błędy falistości współpracujących powierzchni. Natomiast w paśmie wysokich częstotliwości można zdiagnozować niewłaściwe smarowanie, brud w łożysku czy też niewłaściwą chropowatość bieżni lub kulki.

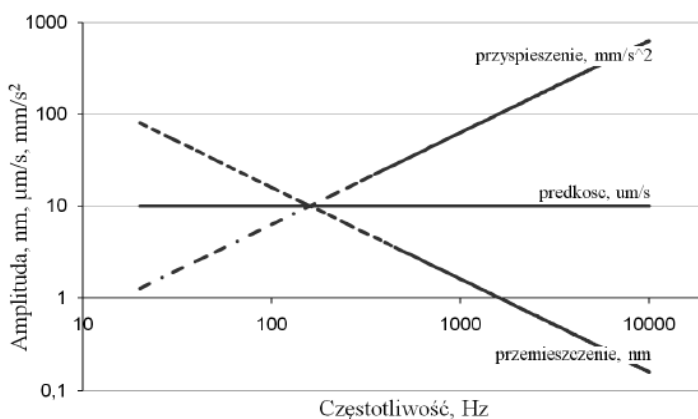
3.3. Metody pomiaru drgań łożysk

Pomiar poziomu drgań generowanych przez łożyska toczne realizowany jest różnymi metodami. Metody te możemy podzielić ze względu na:

- mierzoną wielkość, czyli pomiar przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia;
- rodzaj odniesienia, czyli pomiar względny lub bezwzględny;
- sposób kontaktu głowic pomiarowych z badanym łożyskiem, czyli pomiar stykowy lub pomiar bezstykowy.

3.3.1. Pomiar przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia

Drgania promieniowe lub osiowe generowane przez obracające się łożysko mierzone jest za pomocą czujnika drgań, czyli przetwornika elektromechanicznego. Czujnik przetwarza przemieszczenie mechaniczne na sygnał elektryczny. Wyróżniamy trzy rodzaje przetworników pomiarowych, które generują sygnał proporcjonalny do przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia. Na rysunku 5 przedstawiono zależności amplitudowe pomiędzy przemieszczeniem, prędkością a przyspieszeniem ruchu drgającego. Łożysko toczne pomimo prostej konstrukcji może emitować bardzo szerokie spektrum częstotliwości. Metoda oparta na pomiarze przemieszczenia może być stosowana do obserwacji drgań niskoczęstotliwościowych np. łożyska wolnoobrotowe. Do tego celu stosuje się czujniki indukcyjne (dławikowe lub transformatorowe), pojemnościowe, wiropądowe i konfokalne. Do pomiaru drgań o wysokich częstotliwościach służą akcelerometry piezoelektryczne lub piezorezystancyjne. Wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem do pomiaru w pośrednich zakresach częstotliwości jest zastosowanie metody opartej o pomiar prędkości drgań. Można to osiągnąć za pomocą czujników elektrodynamicznych lub dopplerowskich wibrometrów laserowych [19,35].

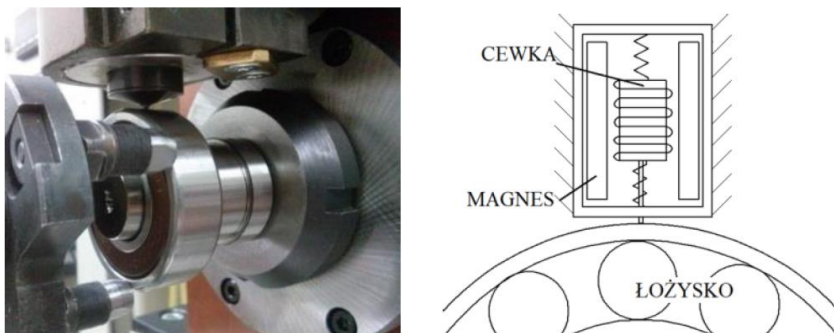


Rys. 5. Relacje amplitudowe pomiędzy przemieszczeniem, prędkością a przyspieszeniem ruchu drgającego [N1].

3.3.2. Pomiar względny lub bezwzględny

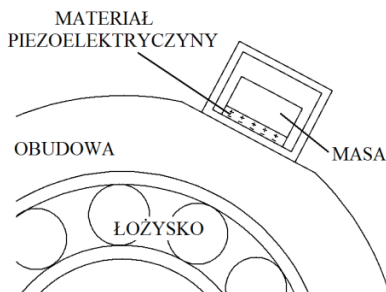
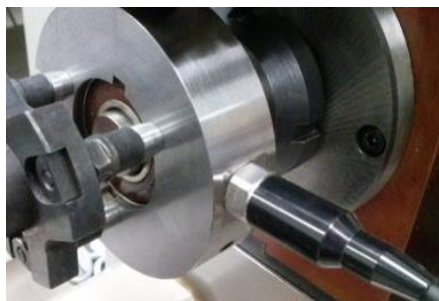
Ze względu na rodzaj odniesienia podczas pomiaru drgań rozróżniamy względny lub bezwzględny pomiar drgań.

Pomiar drgań łożysk za pomocą nieruchomego uchwytu głowicy pomiarowej, czyli nieruchomego punktu odniesienia jest pomiarem względnym. Rysunek 6 przedstawia głowicę pomiarową w urządzeniu badawczym STPPD [3] opracowanym przez naukowców na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach. Stanowisko to przystosowane jest do pomiaru poziomu drgań łożysk tocznych różnymi metodami. W tym przypadku do pomiaru względnej prędkości drgań. Badane łożysko osadzone jest na obracającym się trzpieniu pomiarowy. Pierścień wewnętrzny badanego łożyska oparty jest o kołnierz trzpienia pomiarowego, natomiast na czołową powierzchnię pierścienia zewnętrznego przyłożone jest obciążenie osiowe. Obciążenie osiowe realizowane jest za pomocą trójpunktowego, elastycznego docisku [P1]. Głowica pomiarowa (czujnik SG 4.3 firmy FAG), w którą wyposażone jest urządzenie badawcze zamocowane jest w nieruchomej obudowie stanowiącej układ odniesienia. Zasada działania głowicy pomiarowej jest prosta. Wewnątrz obudowy czujnika znajduje się magnes, a wewnątrz magnesu uzwojona cewka zakończona końcówką pomiarową, która ma bezpośredni kontakt z mierzonym łożyskiem. W wyniku obrotu łożyska, generowane drgania poprzez końcówkę pomiarową wprawiają w ruch cewkę, co powoduje powstanie siły elektromotorycznej. Wartość siły elektromotorycznej jest proporcjonalna do prędkości drgań obracającego się łożyska [66]. Takiego rodzaju czujniki są najczęściej stosowane w zakładach produkujących łożyska do kontroli poziomu drgań generowanych przez te łożyska.



Rys. 6. Stanowisko STPPD Politechniki świętokrzyskiej do pomiaru poziomu drgań łożysk tocznych wyposażone w czujnik elektrodynamiczny oraz schemat względnego pomiaru prędkości drgań [7].

Bezwzględny pomiar drgań przedstawiony jest na rysunku 7. W tym przypadku czujnik zamocowany jest bezpośrednio na obudowie badanego łożyska, a drgania łożyska przenoszone przez obudowę trafiają bezpośrednio do czujnika. Do czujników, które wykorzystywane są tego typu pomiaru, zaliczyć należy czujniki elektrodynamiczne z masą sejsmiczną oraz akcelerometry piezoelektryczne. Czujniki elektrodynamiczne z masą sejsmiczną rejestrują sygnał proporcjonalny do prędkości drgań łożyska, natomiast akcelerometry piezoelektryczne rejestrują sygnał proporcjonalny do przyspieszeń drgań. Czujniki do bezpośredniego pomiaru drgań generowanych przez łożyska najczęściej stosują diagnosty w służbach utrzymania ruchu. Zaletą takiej metody pomiaru jest prostota jej stosowania. Bez większych trudności, demontażu łożyska, diagnosty mogą zdiagnozować wszystkie łożyska w sprawdzanej maszynie. Wadą tego sposobu pomiaru jest fakt, że czujniki te zacytują nie tylko drgania generowane przez łożysko, ale także tło, czyli drgania pochodzące z maszyny.



Rys. 7. Stanowisko STPPD Politechniki Świętokrzyskiej do pomiaru poziomu drgań łożysk tocznych wyposażone w akcelerometr piezoelektryczny oraz schemat bezwzględnego pomiaru przyspieszenia drgań [7].

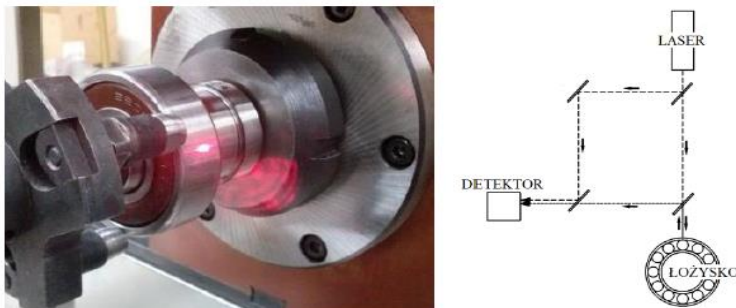
3.3.3. Pomiar stykowy i bezstykowy

Pomiar stykowy polega na tym, że głowica pomiarowa ma bezpośredni kontakt z badanym łożyskiem, czyli pierścieniem zewnętrznym łożyska lub zabudową łożyska. Omówione poprzednio czujniki realizują pomiar stykowy. Do bezdotykowego pomiaru drgań łożysk tocznych stosuje się czujniki, które nie mają fizycznego kontaktu z badanym łożyskiem lub obudową łożyska.

Taki pomiar można zrealizować za pomocą wibrometru laserowego (Rys. 8). Wibrometr laserowy mocowany jest np. na statywie poza strefą pracy łożyska, a wiązka laserowa skierowana jest na badany obiekt. Pomiar wibrometrem laserowym polega na porównaniu za pomocą interferometru wysłanej wiązki lasera z wiązką lasera odbitej od badanego łożyska [37].

Wydawałoby się, że czujniki laserowe, czyli pomiar bezkontaktowy szybko zajmie miejsce klasycznych czujników drgań. Dzięki zastosowaniu czujników laserowych, skomplikowane urządzenia do pomiarów drgań łożysk uległy znacznemu uproszczeniu. Głowice pomiarowe zostały zlikwidowane a czujniki laserowe można było mocować poza urządzeniem bez narażenie czujnika na drgania własne urządzenia. Tak jednak się nie stało. Po chwilowym zachłyśnięciu nową technologią pomiaru, wszyscy światowi producenci (nawet SKF, który mocno był zaangażowany

w upowszechnianie pomiaru laserowego) łożysk, kontrolę poziomu drgań generowanego przez łożyska powierzchni czujnikom kontaktowym.



Rys. 8. Stanowisko STPPD Politechniki Świętokrzyskiej do pomiaru poziomu drgań łożysk tocznych wyposażone w wibrometr laserowy oraz schemat zasady pomiaru [7].

3.4. Właściwości metrologiczne przyrządów pomiarowych

Właściwości metrologiczne przyrządów pomiarowych odgrywają kluczową rolę w dokładności, powtarzalności i wiarygodności wyników pomiarów. Ich zrozumienie i ocena są niezbędne dla każdej dziedziny nauki i technologii, gdzie pomiary są integralną częścią procesów badawczych i przemysłowych. Norma [N4] określa szereg najważniejszych cech, które charakteryzują przyrządy pomiarowe i decydują o ich przydatności do określonych celów pomiarowych.

W niniejszej pracy skupiono się na określeniu kluczowych cech przyrządów pomiarowych drgań łożysk tocznych, które są najłatwiejsze do ustalenia i jednocześnie najistotniejsze dla oceny ich dokładności [1,2]. Charakterystyka pojedynczych systemów oraz zaproponowane badania porównawcze będą opierały się na precyzyjnej ocenie wierności wskazań tych przyrządów, przy użyciu zarówno błędu średniokwadratowego, jak i rozstępu. Celem pracy jest nie tylko przedstawienie jakościowej analizy poprawności wskazań, ale także wyłonienie systemu wzorcowego na podstawie powtarzalności i odtwarzalności pomiarów.

Wierność (precyzja) wskazań przyrządów pomiarowych jest kluczowa dla każdej analizy metrologicznej. W niniejszej pracy przyjęto dwa główne wskaźniki wierności (precyzji): błąd średniokwadratowy oraz rozstęp. Błąd średniokwadratowy jest miarą odchylenia rzeczywistych wyników pomiarów od wartości oczekiwanych, natomiast rozstęp określa różnicę między wartościami maksymalnymi a minimalnymi uzyskanymi podczas serii pomiarów. Oba te wskaźniki są powszechnie stosowane w metrologii, ponieważ dostarczają informacji o precyzji i dokładności systemu pomiarowego.

Poprawność wskazań systemów pomiarowych jest kluczowym elementem oceny ich użyteczności. W pracy przedstawiono próbę zdiagnozowania jak największej liczby błędów systematycznych generowanych przez działanie systemu pomiarowego. Błędy systematyczne mogą wynikać z wielu czynników, takich jak nieprawidłowe skalowanie przyrządów, wpływ czynników zewnętrznych, czy też zużycie mechaniczne elementów pomiarowych. Identyfikacja i minimalizacja tych błędów jest kluczowa dla zapewnienia wysokiej jakości pomiarów.

Jednym z istotnych celów pracy było zaproponowanie metod wyboru systemu wzorcowego spośród badanych systemów pomiarowych. Jedna z metod opiera się na bezwzględnej ocenie systemów poprzez obliczenie współczynników powtarzalności i odtwarzalności pomiaru. Powtarzalność odnosi się do zgodności wyników pomiarów wykonywanych w tych samych warunkach na tym samym obiekcie i przez ten sam zespół pomiarowy. Odtwarzalność z kolei odnosi się do zgodności wyników pomiarów wykonywanych w różnych warunkach, przez różne zespoły pomiarowe lub przy użyciu różnych przyrządów. Wysokie współczynniki powtarzalności i odtwarzalności wskazują na wysoką stabilność i niezawodność systemu pomiarowego.

Kolejnym elementem analizy była ocena dokładności pomiarów różnych systemów pomiarowych z wykorzystaniem przenośnych systemów pomiarowych. W pracy porównano wyniki uzyskane z różnych systemów, aby określić ich dokładność w odniesieniu do wartości rzeczywistych. Zbadano również korelacje między wynikami pomiarów uzyskanymi

w różnych jednostkach pomiarowych, co pozwoliło na ocenę spójności i niezawodności przyrządów pomiarowych.

Jednym z ważnych aspektów badań była analiza korelacji między wynikami pomiarów uzyskanych w różnych jednostkach. Korelacje te pozwalają na ocenę, na ile wyniki uzyskane z jednego systemu pomiarowego są zgodne z wynikami uzyskanymi z innego systemu. Wysoka korelacja wskazuje na spójność wyników i potwierdza wysoką jakość przyrządów pomiarowych. W pracy przeanalizowano korelacje między wynikami uzyskanymi z różnych systemów pomiarowych, co pozwoliło na wyłonienie najdokładniejszych i najbardziej niezawodnych przyrządów.

Dalsze badania nad systemami pomiarowymi drgań łożysk tocznych powinny skupić się na określeniu innych właściwości metrologicznych tych systemów. Ważne jest, aby uwzględnić wpływ różnych czynników zewnętrznych na wyniki pomiarów, takich jak temperatura, wilgotność, czy też warunki eksploatacyjne. Dodatkowo, warto przeprowadzić badania nad trwałością i odpornością systemów pomiarowych na zużycie, co jest kluczowe dla ich długoterminowej niezawodności.

W pracy przedstawiono kompleksową analizę cech przyrządów pomiarowych drgań łożysk tocznych, ze szczególnym uwzględnieniem wierności (precyzji) wskazań oraz metod wyboru systemu wzorcowego. Analiza jakościowa i ilościowa poprawności wskazań, a także badania korelacji między wynikami pomiarów, pozwoliły na wyłonienie najbardziej niezawodnych systemów pomiarowych. Dalsze badania nad tymi systemami powinny skupić się na określeniu innych właściwości metrologicznych, co pozwoli na jeszcze dokładniejszą ocenę ich jakości i niezawodności. Dzięki temu możliwe będzie wypracowanie jeszcze bardziej precyzyjnych i niezawodnych przyrządów pomiarowych, co jest kluczowe dla optymalizacji procesów przemysłowych i zapewnienia wysokiej jakości produkcji.

3.5. Diagnostyka łożysk

3.5.1. Metody diagnostyki łożysk

Łożyska są kluczowymi elementami maszyn, a ich niezawodne działanie ma bezpośredni wpływ na ogólną wydajność i trwałość urządzeń [9,10,15,17, N6]. W związku z tym, skuteczna diagnostyka stanu technicznego łożysk jest niezbędna w celu zapobiegania awariom oraz minimalizacji kosztów związanych z przestojami i naprawami. Istnieje szereg metod diagnostycznych stosowanych w monitorowaniu stanu łożysk, z których najczęściej stosowane to pomiary drgań, pomiary akustyczne, pomiary temperatury oraz analiza zanieczyszczeń smaru [13,24,39,42,88]. Każda z tych metod dostarcza istotnych informacji na temat stanu łożysk i potencjalnych uszkodzeń, co pozwala na wczesną detekcję problemów i odpowiednie działania prewencyjne.

1. Pomiary drgań

Pomiary drgań są jedną z najbardziej rozpowszechnionych i skutecznych metod diagnostyki stanu łożysk. Drgania są generowane przez różne elementy łożyska podczas jego pracy, a ich charakterystyka może dostarczyć szczegółowych informacji na temat stanu technicznego łożyska. Analiza drgań polega na rejestrowaniu sygnałów drganiowych przy użyciu czujników piezoelektrycznych, które są umieszczane w pobliżu łożyska. Sygnały te są następnie analizowane pod kątem amplitudy, częstotliwości oraz przebiegu czasowego.

Najbardziej charakterystycznymi wskaźnikami w diagnostyce drganiowej są amplituda drgań oraz częstotliwości charakterystyczne dla danego typu uszkodzenia. Na przykład, zwiększona amplituda drgań na częstotliwościach odpowiadających częstotliwości obrotów wału lub częstotliwości charakterystycznych dla uszkodzeń powierzchni bieżni, kulek czy koszyka, może wskazywać na obecność uszkodzenia w danym łożysku [42,60,67,79].

Jednym z najczęściej stosowanych wskaźników w diagnostyce drganiowej jest wskaźnik RMS (Root Mean Square) [47,85], który pozwala na ocenę ogólnego poziomu drgań. Wysoki poziom wskaźnika RMS może sugerować, że łożysko jest w złym stanie technicznym i wymaga natychmiastowej wymiany lub szczegółowej analizy. Ponadto, zaawansowane metody analizy drgań, takie jak analiza cepstralna czy demodulacja sygnałów, umożliwiają bardziej precyzyjną identyfikację rodzaju uszkodzenia oraz jego lokalizację.

2. Pomiary akustyczne

Pomiary akustyczne stanowią kolejną istotną metodę diagnostyki łożysk. Technika ta opiera się na analizie dźwięków emitowanych przez łożysko podczas jego pracy. Dźwięki te mogą być wynikiem tarcia, zacierania się powierzchni lub innych nieprawidłowości, które występują w łożysku. Podobnie jak w przypadku drgań, analiza akustyczna może dostarczyć informacji na temat rodzaju i stopnia uszkodzenia [14,23,48].

W praktyce, pomiary akustyczne są realizowane za pomocą mikrofonów lub akcelerometrów, które rejestrują sygnały dźwiękowe w określonym zakresie częstotliwości. Następnie, za pomocą technik takich jak analiza widmowa czy analiza czasowo-częstotliwościowa, dźwięki te są przetwarzane i analizowane. Charakterystyczne szумы lub hałas o podwyższonej intensywności mogą wskazywać na uszkodzenia, takie jak pęknięcia w bieżniach, zużycie kulek czy uszkodzenia koszyka.

Jedną z zalet pomiarów akustycznych jest ich nieinwazyjność i możliwość stosowania ich w warunkach przemysłowych bez konieczności wyłączania maszyny z eksploatacji. Dodatkowo, technika ta jest szczególnie skuteczna w identyfikacji wczesnych stadiów uszkodzeń, które jeszcze nie generują wyraźnych sygnałów drganiowych [36].

3. Pomiary temperatury

Pomiary temperatury łożysk stanowią prostą, lecz efektywną metodę diagnostyczną, która pozwala na monitorowanie stanu termicznego łożyska podczas jego pracy. Zwiększenie temperatury łożyska [50,100] może być wskaźnikiem nieprawidłowości, takich jak nadmierne tarcie, zacieranie, niewłaściwe smarowanie, przeciążenie lub obecność zanieczyszczeń [55,97].

Temperatura łożyska może być mierzona za pomocą czujników kontaktowych (np. termopar) lub bezkontaktowych (np. pirometrów), umieszczonych w bezpośrednim sąsiedztwie łożyska. Wartości temperatury są następnie analizowane i porównywane z wartościami nominalnymi, ustalonymi dla danego typu łożyska i warunków pracy.

Przekroczenie dopuszczalnej temperatury pracy łożyska może prowadzić do jego przyspieszonego zużycia, a w skrajnych przypadkach do zatarcia lub uszkodzenia termicznego. Dlatego regularne monitorowanie temperatury łożysk jest kluczowe dla zapewnienia ich niezawodności. W systemach zintegrowanych, pomiary temperatury są często połączone z systemami alarmowymi, które automatycznie wyłączają maszynę w przypadku przekroczenia krytycznych wartości, co zapobiega poważnym awariom.

4. Analiza smarowania i zanieczyszczeń smaru

Analiza zanieczyszczeń smaru stanowi uzupełniające narzędzie diagnostyczne, które dostarcza informacji na temat stanu smarowania oraz stopnia zużycia łożyska. Smar jest kluczowym elementem wpływającym na trwałość i wydajność łożysk, a jego stan i skład mogą bezpośrednio wpływać na pracę łożyska. Zanieczyszczenia takie jak cząstki metalu, woda, kurz czy produkty degradacji smaru mogą wskazywać na uszkodzenia łożyska, nieszczelności lub niewłaściwe warunki pracy [11,92,93].

Analiza smaru polega na pobraniu próbki smaru z łożyska i przeprowadzeniu jej szczegółowego badania laboratoryjnego [11,12].

Techniki takie jak analiza spektrometryczna, analiza cząstek stałych, analiza lepkości oraz analiza chemiczna pozwalają na ocenę jakości smaru i identyfikację potencjalnych zanieczyszczeń.

Na przykład, obecność metalicznych cząstek w smarze może sugerować, że elementy łożyska ulegają zużyciu lub uszkodzeniu, co wymaga natychmiastowej interwencji. Z kolei zmiana lepkości smaru może wskazywać na degradację chemiczną lub termiczną, co może wpływać na jego właściwości smarne i ochronne.

Analiza zanieczyszczeń smaru jest szczególnie użyteczna w połączeniu z innymi metodami diagnostycznymi, takimi jak pomiary drgań czy pomiary temperatury, ponieważ pozwala na holistyczną ocenę stanu technicznego łożyska i identyfikację przyczyn ewentualnych problemów.

Diagnostyka łożysk jest kluczowym elementem utrzymania ruchu w nowoczesnym przemyśle, zapewniającym wydajną i niezawodną pracę maszyn [20]. Pomiary drgań, pomiary akustyczne, pomiary temperatury oraz analiza zanieczyszczeń smaru to cztery fundamentalne metody stosowane w monitorowaniu stanu technicznego łożysk. Każda z tych metod dostarcza unikalnych informacji, które mogą być wykorzystane do wczesnej detekcji uszkodzeń oraz zapobiegania awariom. Wspólne zastosowanie tych technik diagnostycznych pozwala na kompleksową ocenę stanu łożysk, co w efekcie przyczynia się do wydłużenia ich żywotności oraz zwiększenia niezawodności i efektywności maszyn przemysłowych.

3.5.2. Analiza drgań w dziedzinie czasu

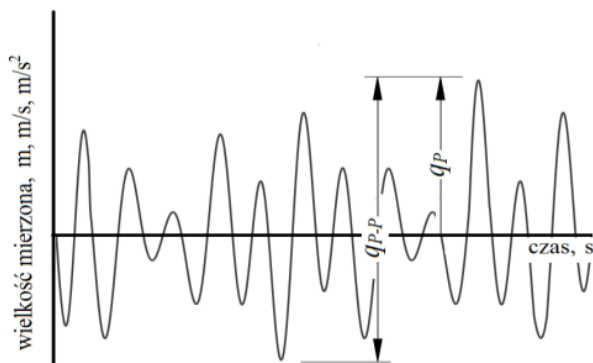
Analiza drgań w dziedzinie czasu jest powszechnie stosowaną i prostą techniką oceny stanu technicznego łożysk tocznych. Polega na pomiarze oraz ilościowej ocenie parametrów uzyskanych z sygnału drganiowego w funkcji czasu. Parametry te odzwierciedlają charakterystyki dynamiczne łożyska, a ich prawidłowa interpretacja pozwala na wczesne wykrycie nieprawidłowości w jego pracy. W analizie drgań wyróżnia się cztery

podstawowe grupy parametrów: amplitudowe, statystyczne, mieszane oraz specjalne [85]. Parametry amplitudowe odnoszą się do bezwzględnych wartości sygnału drganiowego, natomiast statystyczne pozwalają na ocenę rozkładu wartości sygnału w czasie. Parametry mieszane łączą cechy zarówno amplitudowe, jak i statystyczne, oferując szerszy kontekst diagnostyczny. Parametry specjalne natomiast, są dedykowane do wykrywania specyficznych typów uszkodzeń. Analiza tych parametrów jest kluczowa dla efektywnej diagnostyki i zapobiegania awariom łożysk.

3.5.2.1. Parametry amplitudowe

Wartość szczytowa q_p (ang. **Peak Level):** Jest parametrem w analizie sygnałów, który reprezentuje najwyższą wartość amplitudy sygnału (6) wibracyjnego w danym czasie (Rys. 9). Parametr ten umożliwia wykrywanie ekstremalnych zjawisk, takich jak gwałtowne uderzenia, niewyważenie lub luzy w elementach wirujących, które mogą prowadzić do uszkodzeń. Wartość szczytowa pozwala na szybkie zidentyfikowanie potencjalnie destrukcyjnych stanów, co jest kluczowe dla zapobiegania awariom i utrzymania wysokiej niezawodności systemów mechanicznych.

$$q_p = \max(|q_i|) \quad (6)$$



Rys. 9. Parametry amplitudowe

Wartość międzyszczytowa q_{p-p} (ang. Peak-to-Peak): Jest to parametr analizy sygnałów drgań, określający różnicę między maksymalnym a minimalnym wychyleniem sygnału w danym przedziale czasowym (7). Jest szeroko stosowany w diagnostyce statystycznej, w szczególności przy ocenie stanu łożysk i innych elementów maszyn wirujących. Peak-to-peak jest szczególnie użyteczny w identyfikacji szczytowych wartości wibracji, co umożliwia wykrywanie niepożądanych zjawisk, takich jak luz w łożyskach, niewyważenie czy błędy montażowe [24]. Pomiar ten dostarcza precyzyjnych informacji o amplitudzie wibracji, będąc kluczowym wskaźnikiem stanu dynamicznego urządzeń.

$$q_{P-P} = \max(q_i) - \min(q_i) \quad (7)$$

gdzie: q_i - kolejne wartości próbkowanego sygnału przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia drgań

3.5.2.2. Parametry statystyczne

Wartość skuteczna drgań RMS q_{RMS} (ang. Root Mean Square): jest jednym z najważniejszych parametrów stosowanych w diagnostyce maszyn, szczególnie w ocenie stanu łożysk i innych elementów wirujących. RMS jest miarą efektywnej wartości sygnału wibracyjnego, która dostarcza informacji o całkowitej energii zawartej w drganiach. Ze względu na swoją zdolność do uśredniania sygnału w czasie, RMS jest szczególnie użyteczna w ocenie stanu technicznego maszyn w warunkach eksploatacyjnych, gdzie sygnały mogą być złożone i zmienne [23,59].

RMS jest obliczana jako pierwiastek kwadratowy z wartości średniej kwadratu sygnału wibracyjnego. Matematycznie można ją wyrazić wzorem (8):

$$q_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t q^2(t) dt} \approx \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s q_i^2} \quad (8)$$

gdzie: $q(t)$ – sygnał przyspieszenia (m/s^2), prędkości ($\mu m/s$) lub przemieszczenia drgań (mm) w funkcji czasu, t – czas pomiaru (s), s – kolejne punkty próbkowania.

Wartość RMS jest szczególnie cenna w monitorowaniu stanu maszyn, ponieważ jest czuła na zmiany w poziomach drgań, które mogą być wynikiem zużycia lub uszkodzeń. Wyższe wartości RMS mogą wskazywać na problemy takie jak niewyważenie, niewspółosiowość, zużycie łożysk lub inne defekty mechaniczne. W diagnostyce maszyn wartość RMS jest często używana jako wskaźnik ogólnego stanu zdrowia maszyny. Przemysłowe normy, takie jak [N6], definiują progi wartości RMS, które określają akceptowalne poziomy drgań dla różnych typów maszyn. Przekroczenie tych progów sugeruje konieczność podjęcia działań konserwacyjnych. RMS jest również wykorzystywana do monitorowania stanu łożysk. W normalnych warunkach pracy, RMS pozostaje na stałym poziomie. Wraz ze wzrostem zużycia łożysk, wartość RMS zaczyna rosnąć, co pozwala na wczesne wykrycie problemów i zaplanowanie konserwacji, zanim dojdzie do awarii. Wartość RMS ma kilka zalet w porównaniu z innymi parametrami drgań, takimi jak wartość szczytowa (peak level) czy wartość międzyszczytowa (peak-to-peak). RMS uśrednia sygnał drgań, co sprawia, że jest mniej podatna na chwilowe skoki lub anomalie, które mogą wynikać z pojedynczych zdarzeń, takich jak uderzenia czy przepięcia. Dlatego RMS jest bardziej reprezentatywna dla długoterminowego stanu maszyny.

Kolejnym aspektem wartości RMS jest jej związek z zużyciem energii przez maszynę. Maszyny z wyższymi wartościami RMS często wymagają więcej energii do pokonania oporów mechanicznych związanych z wyższym poziomem drgań. W dłuższej perspektywie może to prowadzić do zwiększenia kosztów operacyjnych oraz szybszego zużycia komponentów. Monitorowanie RMS umożliwia optymalizację pracy maszyn poprzez identyfikację i eliminację źródeł nadmiernych drgań, co prowadzi do oszczędności energii i wydłużenia żywotności maszyn.

Wartość skuteczna drgań (RMS) jest nieodzownym narzędziem w monitorowaniu i diagnostyce stanu maszyn. Dzięki zdolności do uśredniania sygnału wibracyjnego, RMS dostarcza wiarygodnych informacji o ogólnej energii drgań, co pozwala na efektywne zarządzanie stanem technicznym maszyn. Pomimo pewnych ograniczeń, RMS pozostaje jednym z najważniejszych parametrów w analizie drgań, szczególnie w kontekście predykcyjnego utrzymania ruchu i optymalizacji efektywności energetycznej maszyn.

Amplituda pierwiastkowa RA (ang. Root Amplitude): Jest miarą stosowaną w analizie sygnałów drganiowych, która opisuje wielkość drgań obiektu. RA wyraża średnią wartość kwadratową amplitudy drgań, co oznacza, że jest to pierwiastek z sumy kwadratów wartości chwilowych amplitudy, podzielonej przez liczbę próbek (9).

$$RA = \left[\frac{1}{t} \int_0^t \sqrt{|q(t)|} dt \right]^2 \approx \left[\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \sqrt{|q_i|} \right]^2 \quad (9)$$

Amplituda pierwiastkowa RA (ang. Root Amplitude) jest to wskaźnik bardziej reprezentatywny dla oceny intensywności drgań w porównaniu z wartościami szczytowymi, ponieważ eliminuje przypadkowe odchylenia, ukazując bardziej stabilny obraz charakterystyki drgań. Wartość RA jest powszechnie używana w monitorowaniu stanu maszyn, szczególnie w diagnostyce drgań, do oceny poziomu zużycia lub występowania usterek [80].

Skośność S (ang. Skewness): Skewness (skośność) jest statystycznym wskaźnikiem, który mierzy asymetrię rozkładu wartości w zbiorze danych względem jego średniej. Innymi słowy, skewness informuje nas o tym, czy rozkład danych jest symetryczny, czy też wykazuje tendencję do

wydłużania się w jednym kierunku – w prawo lub w lewo. Skośność może przyjmować wartości dodatnie, ujemne lub równe zero, co determinuje charakterystykę asymetrii rozkładu [34,41].

W praktyce, dla dużych zbiorów danych, uproszczone wzory na skośność mogą być stosowane, ale zasada pozostaje ta sama: skośność mierzy trzeci moment rozkładu wokół średniej, znormalizowany przez sześćcian odchylenia standardowego, aby uzyskać bezwymiarową miarę.

Skośność jest obliczana za pomocą wzoru matematycznego (10):

$$S = \frac{\frac{1}{t} \int_0^t q^3(t) dx}{\left(\frac{1}{t} \int_0^t q^2(t) dx \right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s q_i^3}{q_{RMS}^3} \quad (10)$$

Skośność jest szeroko stosowana w różnych dziedzinach nauki, finansów, ekonomii i analizy danych, aby lepiej zrozumieć charakterystykę rozkładu danych:

1. Statystyka opisowa: Skośność jest jednym z kluczowych wskaźników, obok kurtozy, używanych do opisu kształtu rozkładu danych. Pomaga to w identyfikacji odchyleń od normalności, co jest ważne przy doborze odpowiednich metod analizy.
2. Finanse: W analizie ryzyka i zwrotu, skośność jest używana do oceny asymetrii rozkładu zwrotów z inwestycji. Rozkłady z dodatnią skośnością sugerują większą możliwość uzyskania wysokich zwrotów, ale z większym ryzykiem dużych strat, podczas gdy ujemna skośność może sugerować większe ryzyko dużych, ale rzadkich strat.
3. Ekonomia: W badaniach ekonomicznych, skośność może być wykorzystywana do analizy rozkładów dochodów, cen, czy innych

wskaźników ekonomicznych, aby zrozumieć nierówności lub inne asymetrie rynkowe.

4. Nauki przyrodnicze i techniczne: W dziedzinach takich jak meteorologia, geologia czy inżynieria, skośność może być używana do analizy danych o naturalnych zjawiskach, takich jak rozkłady wielkości ziaren, opadów, czy obciążeń strukturalnych.

Wartość skośności może być interpretowana na różne sposoby w zależności od znaku:

1. Skośność dodatnia ($S > 0$): Rozkład z dodatnią skośnością ma dłuższy "ogon" po prawej stronie średniej. Oznacza to, że wartości większe niż średnia są bardziej rozproszone i mniej liczne, co wskazuje na możliwość występowania kilku dużych wartości odstających po prawej stronie.
2. Skośność ujemna ($S < 0$): Rozkład z ujemną skośnością ma dłuższy "ogon" po lewej stronie średniej. W tym przypadku wartości mniejsze niż średnia są bardziej rozproszone, co sugeruje obecność wartości odstających po lewej stronie.
3. Skośność zerowa ($S = 0$): Rozkład symetryczny wokół średniej. Najbardziej typowym przykładem jest rozkład normalny, gdzie skośność jest równa zero. W takim przypadku liczba dużych odchyleń powyżej i poniżej średniej jest zrównoważona.

Skośność jest kluczową miarą w analizie danych, która pozwala zrozumieć asymetrię rozkładów statystycznych. Jej znajomość i prawidłowa interpretacja są niezbędne w wielu dziedzinach nauki i praktyki, aby zapewnić rzetelną analizę i odpowiednie wnioski.

Kurtoza Ku (ang. Kurtosis): Jest miarą opisującą „spiczastość” rozkładu wartości w zbiorze danych, czyli stopień koncentracji danych wokół średniej. W przeciwieństwie do skośności, która mierzy asymetrię rozkładu, kurtoza określa, jak bardzo dane są skupione w pobliżu średniej

w porównaniu do rozkładu normalnego. Wartość kurtozy może wskazywać na to, czy rozkład jest bardziej płaski (leptokurtyczny) lub bardziej wypłaszczony (platykurtyczny) niż rozkład normalny [34,41].

Standardowa kurtoza rozkładu normalnego wynosi 3, ale często w praktyce używa się „kurtozy zredukowanej”, czyli odejmując od wyniku 3, uzyskuje się wartość równą zero dla rozkładu normalnego.

Kurtoza jest obliczana za pomocą wzoru (11):

$$Ku = \frac{\frac{1}{t} \int_0^t q^4(t) dx}{\left(\frac{1}{t} \int_0^t q^2(t) dx \right)^2} = \frac{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s q_i^4}{q_{RMS}^4} \quad (11)$$

Kurtoza jest używana w różnych dziedzinach do oceny rozkładów danych:

1. Statystyka opisowa: Kurtoza, obok skośności, jest kluczową miarą kształtu rozkładu, która pomaga zrozumieć, jak dane są rozmieszczone w stosunku do rozkładu normalnego. Jest to przydatne w ocenie normalności danych, co jest istotne przy doborze odpowiednich testów statystycznych.
2. Finanse: W analizie ryzyka kurtoza może wskazywać na występowanie dużych ekstremalnych wartości (np. skrajnych strat lub zysków). Wyższa kurtoza (leptokurtyczna) sugeruje większe ryzyko dużych odchyłeń od średniej, co może mieć znaczenie przy ocenie ryzyka portfela inwestycyjnego.
3. Jakość danych: W badaniach naukowych i inżynierskich kurtoza może być używana do oceny jakości danych i identyfikacji ewentualnych błędów lub odstających wartości, które mogą zniekształcać wyniki.

Wartość kurtozy może być interpretowana w następujący sposób:

1. Kurtoza dodatnia: Rozkład leptokurtyczny, charakteryzujący się "spiczastością". Wskazuje na to, że dane są bardziej skoncentrowane wokół średniej, z większą liczbą wartości skrajnych (w długich ogonach) niż w rozkładzie normalnym. Takie rozkłady mogą wskazywać na większą niestabilność lub zmienność w danych.
2. Kurtoza ujemna: Rozkład platykurtyczny, cechujący się spłaszczeniem. Oznacza to, że dane są bardziej rozproszone, z mniejszą liczbą wartości skrajnych, a rozkład ma krótsze i grubsze ogony niż rozkład normalny. Takie rozkłady sugerują mniejszą zmienność i mniejsze prawdopodobieństwo występowania ekstremalnych wartości.
3. Kurtoza równa 0: Wskazuje na rozkład mesokurtyczny, który ma takie same właściwości jak rozkład normalny pod względem „spiczastości”. W takim rozkładzie liczba wartości skrajnych oraz koncentracja wokół średniej są podobne do tych obserwowanych w rozkładzie normalnym.

Kurtoza jest istotnym wskaźnikiem, który pomaga w analizie kształtu rozkładu danych, szczególnie w kontekście oceny ryzyka i jakości danych. Jej znajomość i interpretacja pozwalają na lepsze zrozumienie, jak dane są rozłożone wokół średniej, co jest kluczowe w wielu dziedzinach nauki, finansów i techniki.

3.5.2.3. Parametry mieszane

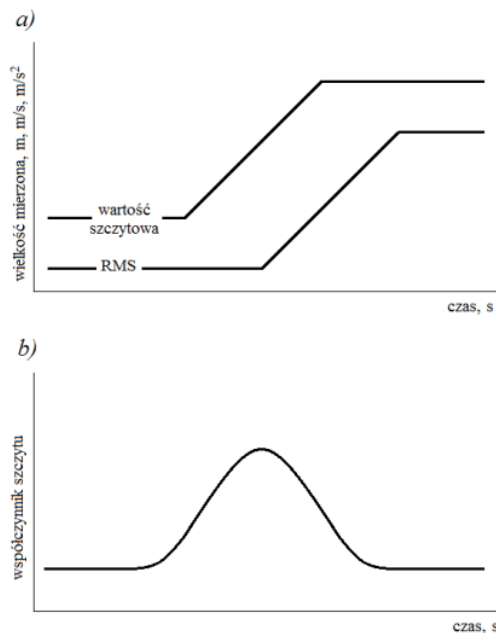
Współczynnik szczytu CR (ang. Crest Factor): Jest miarą stosowaną do oceny charakterystyki sygnałów, szczególnie w dziedzinie analizy drgań, akustyki i elektroniki. CR jest definiowany jako stosunek wartości szczytowej sygnału (największa wartość chwilowa) do jego wartości skutecznej (RMS, Root Mean Square) (Rys. 10) i wyraża się wzorem (12). Jest to miara stosowana do oceny „spiczastości” sygnału, która wskazuje,

jak ekstremalne wartości występują w porównaniu do średniego poziomu energii sygnału [24].

$$CR = \frac{q_P}{q_{RMS}} = \frac{\max(|q_i|)}{\sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s q_i^2}} \quad (12)$$

Współczynnik szczytu jest używany w wielu dziedzinach inżynierii i nauki do oceny jakości i charakterystyki sygnałów:

1. **Analiza drgań:** W monitorowaniu stanu maszyn i urządzeń, CR jest wykorzystywany do oceny intensywności i charakterystyki drgań. Wysoki CR może wskazywać na występowanie gwałtownych uderzeń, nierówności lub innych problemów mechanicznych.
2. **Akustyka i dźwięk:** W analizie dźwięku i muzyki, CR informuje o dynamice sygnału dźwiękowego. Wysoki CR oznacza, że sygnał ma duże piki w stosunku do średniego poziomu, co może być charakterystyczne dla niektórych stylów muzycznych lub problematyczne w nagraniach o dużej dynamice.
3. **Energetyka i elektronika:** W inżynierii elektrycznej, CR jest wykorzystywany do oceny jakości sygnałów napięcia lub prądu. Sygnały z wysokim współczynnikiem szczytu mogą wskazywać na obecność zakłóceń, takich jak szpilki napięciowe, które mogą uszkodzić urządzenia elektroniczne.
4. **Analiza sygnałów medycznych:** W diagnostyce medycznej, np. w analizie sygnałów EKG, CR może być używany do identyfikacji nieregularności rytmu serca, gdzie wysoki współczynnik szczytu może sugerować występowanie nieprawidłowości.



Rys. 10. Tendencja zmian współczynnika szczytu w miarę rozwijania się uszkodzeń na bieżniach łożyska: a) krzywe trendu zmian wartości szczytowej i skutecznej, b) krzywa tendencji zmian współczynnika szczytu [24].

Interpretacja wartości współczynnika szczytu zależy od kontekstu zastosowania:

1. Niski współczynnik szczytu ($CR \approx 1$): Wskazuje na to, że sygnał jest stosunkowo równomierny i pozbawiony gwałtownych pików. Takie sygnały są często bardziej stabilne i przewidywalne. Przykładem może być sygnał sinusoidalny, gdzie wartość CR wynosi około 1,414.
2. Wysoki współczynnik szczytu ($CR > 3$): Sygnał ma wyraźne, ostre piki w porównaniu do swojej wartości skutecznej. Może to sugerować obecność nagłych i intensywnych zdarzeń w sygnale, które mogą być istotne w diagnostyce lub mogą wymagać dodatkowego filtrowania w aplikacjach inżynierskich.

3. Ekstremalnie wysoki współczynnik szczytu: W niektórych sytuacjach ekstremalnie wysokie wartości CR mogą wskazywać na problemy lub anomalie w systemie, takie jak uderzenia w maszynach, przepięcia w systemach elektrycznych lub silne zakłócenia w sygnałach akustycznych.

Współczynnik szczytu (CR) jest kluczowym wskaźnikiem w analizie sygnałów, który dostarcza informacji na temat „spiczastości” sygnału, czyli relacji między jego wartościami szczytowymi a średnim poziomem energii. Jego prawidłowa interpretacja jest istotna w wielu dziedzinach technicznych i naukowych, aby zrozumieć charakterystykę analizowanych sygnałów i podejmować odpowiednie działania na podstawie uzyskanych wyników.

Współczynnik impulsywności IF (ang. Impulse Factor): Jest miarą używaną do oceny dynamiki sygnałów, szczególnie w kontekście analiz drgań, akustyki oraz diagnostyki maszyn i urządzeń [21]. Określa on, jak bardzo sygnał jest „impulsywny”, czyli jak często i z jaką intensywnością pojawiają się w nim gwałtowne zmiany. W praktyce, współczynnik impulsywności jest stosowany do identyfikacji i oceny krótkotrwałych, ale intensywnych zdarzeń w sygnale, takich jak uderzenia, szумы lub inne zakłócenia (13).

$$IF = \frac{q_P}{q_A} = \frac{\max(|q_i|)}{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s |q_i|} \quad (13)$$

Współczynnik impulsywności jest szeroko stosowany w różnych dziedzinach techniki i nauki:

1. Diagnostyka maszyn: IF jest wykorzystywany do identyfikacji problemów takich jak luzy, pęknięcia lub uderzenia w maszynach. Wysoki współczynnik impulsywności może wskazywać na obecność

niepożądanych zdarzeń mechanicznych, które mogą prowadzić do awarii.

2. Akustyka i analiza dźwięku: W analizie akustycznej IF jest używany do oceny jakości dźwięku i identyfikacji zakłóceń. Sygnały z wysokim współczynnikiem impulsywności są charakterystyczne dla hałasów impulsowych, takich jak trzaski, które mogą być niepożądane w środowisku akustycznym.
3. Kontrola jakości: W branżach takich jak produkcja, IF jest używany do oceny procesów, w których istotne są gwałtowne zmiany, np. w obróbce metali lub w procesach chemicznych. Analiza IF może pomóc w identyfikacji problemów, które mogą prowadzić do defektów w produkcie końcowym.
4. Monitorowanie stanu konstrukcji: IF jest także wykorzystywany w monitorowaniu stanu technicznego konstrukcji, takich jak mosty, budynki czy samoloty, gdzie impulsywne zmiany mogą wskazywać na uszkodzenia lub zmęczenie materiału.

Wartość współczynnika impulsywności może być interpretowana w następujący sposób:

1. Niski współczynnik impulsywności ($IF \approx 1$): Wskazuje na to, że sygnał jest stosunkowo równomierny, bez znaczących impulsów. Taki sygnał jest typowy dla stabilnych, jednorodnych procesów, w których nie występują gwałtowne zmiany.
2. Średni współczynnik impulsywności ($IF 1.5-3$): Sugeruje obecność umiarkowanych impulsów w sygnale. Taki zakres jest typowy dla sygnałów, w których występują sporadyczne, ale wyraźne zmiany, takie jak regularne uderzenia lub cykliczne zakłócenia.
3. Wysoki współczynnik impulsywności ($IF > 3$): Wskazuje na obecność znacznych, gwałtownych impulsów w sygnale. Wysoki IF jest charakterystyczny dla sygnałów z dużymi skokami, takimi jak uderzenia, szumy o wysokiej intensywności, czy inne krótkotrwałe zdarzenia o dużej amplitudzie.

Współczynnik impulsywności (IF) jest wskaźnikiem w analizie sygnałów, który pozwala na ocenę dynamiki i charakterystyki impulsów w sygnale. Jego znajomość i umiejętność interpretacji są niezbędne w wielu dziedzinach techniki i nauki, aby skutecznie monitorować, diagnozować i kontrolować różnorodne procesy oraz systemy.

Współczynnik luzu MF (ang. **Margin Factor**): Jest miarą stosowaną w analizie sygnałów drgań i diagnostyce maszyn, szczególnie do oceny stopnia zużycia i stanu technicznego łożysk [21]. Wskazuje on na „luźność” lub „zwartość” sygnału drgań, co może być bezpośrednio związane z obecnością luzów w łożyskach lub innych elementach mechanicznych (14). MF pozwala ocenić, jak dobrze elementy mechaniczne są ze sobą spasowane, a także identyfikować potencjalne uszkodzenia lub nadmierne luzy, które mogą prowadzić do awarii.

$$MF = \frac{q_P}{RA} = \frac{\max(|q_i|)}{\left[\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \sqrt{|q_i|}\right]^2} \quad (14)$$

Współczynnik luzu MF znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach inżynierii, takich jak lotnictwo, budownictwo oraz mechanika, gdzie jest kluczowym parametrem w procesie oceny bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji. W praktyce dokładne monitorowanie MF pozwala na wczesne wykrycie potencjalnych problemów i zapobieganie awariom.

Współczynnik kształtu SF (ang. **Shape Factor**): Jest miarą stosowaną w analizie sygnałów, szczególnie w dziedzinach takich jak drgania, akustyka, analiza obrazu i przetwarzanie sygnałów. SF służy do oceny kształtu sygnału, określając, jak rozkłada się jego energia w odniesieniu do jego wartości szczytowej i wartości średniej. Jest to wskaźnik (15), który pozwala na określenie, jak „spiczasty” lub „rozmyty” jest dany sygnał, co

może mieć kluczowe znaczenie w diagnostyce maszyn oraz ocenie jakości sygnałów [82].

$$SF = \frac{q_{RMS}}{q_A} = \frac{\sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s q_i^2}}{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s |q_i|} \quad (15)$$

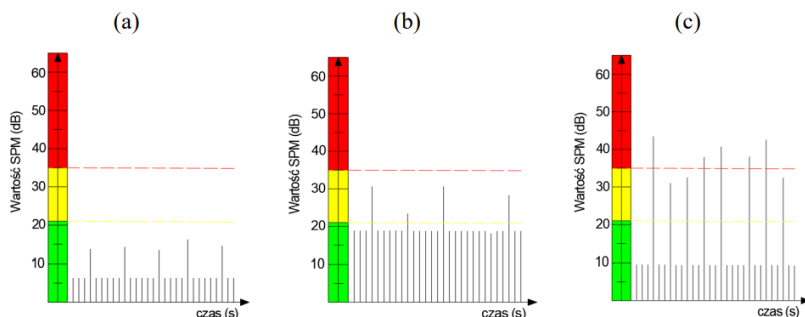
Współczynnik kształtu (SF) jest wskaźnikiem w analizie sygnałów, który dostarcza informacji o kształcie i charakterystyce sygnału. Dzięki jego zastosowaniu można zidentyfikować różnorodne zjawiska i zakłócenia, co jest kluczowe w diagnostyce technicznej, akustyce oraz innych dziedzinach inżynierii i nauki. Regularne monitorowanie SF umożliwia ocenę stabilności procesów oraz wczesne wykrywanie problemów, co przekłada się na lepsze zarządzanie stanem technicznym maszyn i urządzeń.

3.5.2.4. Parametry specjalne

Parametr SPM (ang. Shock Pulse Method): Jest to metoda diagnostyczna stosowana do oceny stanu technicznego łożysk tocznych oraz smarowania w maszynach [58,84,87]. Polega na pomiarze i analizie impulsów uderzeniowych generowanych przez elementy łożyska podczas jego pracy. Impulsy te są efektem oddziaływania między bieżniami łożyska a toczącymi się po nich elementami (kulki, wałeczki), szczególnie w przypadku uszkodzeń, takich jak mikropęknięcia, ubytki materiału czy problemy z odpowiednim smarowaniem (Rys. 11). Parametr SPM wyliczany jest według wzoru (16).

$$SPM = 20 \log \frac{2000 \cdot SV}{p_w \cdot D_i^{0.6}} \quad (16)$$

gdzie: SV - wielkość impulsu udarowego obliczonego z sygnału czasowego prędkości,
D_i – średnica bieżni wewnętrznej łożyska



Rys. 11. Ocena stanu łożyska na podstawie stosunku amplitud impulsów uderowych do szumu: a) łożysko pracujące poprawnie, SPM poniżej 21 dB, b) łożysko z niedostatecznym smarowaniem, wykazuje niewielkie uszkodzenie, SPM w przedziale od 21 dB do 35 dB, c) łożysko uszkodzone, wartości SPM powyżej 35 dB [23].

Metoda SPM (Shock Pulse Method) jest skutecznym narzędziem diagnostycznym do monitorowania stanu łożysk w maszynach. Poprzez analizę impulsów uderzeniowych, metoda ta pozwala na wczesne wykrycie problemów z łożyskami, takich jak zużycie, uszkodzenia czy niewłaściwe smarowanie. Regularne stosowanie SPM umożliwia planowanie działań konserwacyjnych oraz zapobieganie awariom, co jest kluczowe dla utrzymania ciągłości pracy maszyn i urządzeń.

Parametr BCU (ang. Bearing Condition Unit): Jest to kluczowy wskaźnik stosowany w diagnostyce łożysk, który ocenia stan techniczny łożysk tocznych w maszynach. Jest to miara poziomu zużycia lub uszkodzeń łożyska, uzyskiwana na podstawie pomiarów drgań lub impulsów uderzeniowych generowanych przez łożysko [83].

BCU służy do monitorowania stanu łożysk, co pozwala na wczesne wykrycie uszkodzeń, takich jak pęknięcia czy problemy z smarowaniem. Pomaga również w planowaniu konserwacji, co zmniejsza ryzyko awarii i zwiększa niezawodność maszyn.

Wartość BCU jest obliczana na podstawie analizy parametrów drgań lub impulsów uderzeniowych, takich jak wartości szczytowe i RMS. BCU jest zazwyczaj wyrażana jako liczba bezwymiarowa.

- Niskie wartości BCU: Oznaczają dobry stan łożyska.
- Średnie wartości BCU: Wskazują na początkowe zużycie.
- Wysokie wartości BCU: Sugerują poważne uszkodzenia, wymagające interwencji.

BCU umożliwia efektywne monitorowanie stanu łożysk i planowanie działań konserwacyjnych.

Parametr VL (ang. Velocity Level): Jest to poziom prędkości, to wskaźnik stosowany w diagnostyce drgań maszyn, który mierzy amplitudę drgań w funkcji prędkości. Jest to kluczowy parametr w analizie wibracji, który ocenia intensywność drgań poprzez pomiar wartości skutecznej (RMS) prędkości drgań. VL jest używany do oceny stanu technicznego maszyn i ich komponentów, zwłaszcza łożysk i wirujących części (17).

$$VL = 20 \log \left(\frac{qV_{RMS}}{qV_{RMS0}} \right) \quad (17)$$

gdzie: qV_{RMS} – wartość skuteczna prędkości drgań badanego łożyska tocznego,
 qV_{RMS0} – wartość skuteczna prędkości drgań łożyska referencyjnego.

Parametr VL (Velocity Level) [33] jest kluczowym wskaźnikiem w diagnostyce drgań, który pomaga zapewnić niezawodną pracę poprzez identyfikację potencjalnych problemów na podstawie analizy prędkości drgań.

Parametr And (Anderon): Parametr And jest miarą stosowaną w diagnostyce stanu technicznego maszyn i systemów monitorowania

drgań [3,59]. Jest to wskaźnik oceniający amplitudę drgań w kontekście ich dominujących częstotliwości, często używany do analizy drgań w systemach rotacyjnych. Parametr And jest częścią metod monitorowania stanu maszyn, które pomagają w ocenie kondycji i identyfikacji problemów związanych z drganiami (18).

$$1 \text{ And} = 2\pi \cdot 30 \sqrt{\log_2 \frac{f_h}{f_l}} \quad (18)$$

gdzie: f_h - najwyższa częstotliwość w paśmie, f_l - najniższa częstotliwość w paśmie.

Parametr %FAG: Jest to parametr prędkości drgań wyrażony w % wartości odniesienia przyjęty przez FAG (producenta urządzeń do pomiaru poziomu drgań łożysk, m.in. MGG-11C) i stosowanym przez firmę „Leroy Somer”. Wymagania te ustalone są w oparciu o warunki [N5].

$$V_{\%FAG} = \frac{V_A}{W_R \cdot W} \cdot 100\% \quad (19)$$

gdzie: $V_{\%FAG}$ – wartość skuteczna szumu w %FAG; V_A – wartość skuteczna szumu w Anderonach; W_R – współczynnik osłabienia dla danego typu łożyska, ustawiany oddzielnie dla każdego pasma częstotliwości; W – współczynnik ustawiany oddzielnie dla każdego pasma częstotliwości.

Wartości współczynników osłabienia (dla typu łożyska) W_R i współczynników W (dla pasma częstotliwości) określone są w tabelach w instrukcjach [I4,I5].

3.6. Analiza drgań łożysk oraz nowoczesne metody diagnostyki uszkodzeń

Łożyska toczne są kluczowymi elementami w różnorodnych systemach mechanicznych, od maszyn przemysłowych po środki transportu, takie jak pociągi. Ich stan ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo i efektywność działania tych systemów. W związku z tym pomiar poziomu drgań łożysk stanowi fundamentalny proces kontroli jakości zarówno podczas produkcji, jak i po montażu. Wykrywanie usterek łożysk, szczególnie w kontekście krytycznych aplikacji, takich jak łożyska kół pociągów, ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i komfortu podróżowania pasażerów [31,88]. Mimo to, tradycyjne metody kontroli jakości są dość ograniczone, co stymuluje rozwój nowych, bardziej zaawansowanych technik diagnostycznych. Natomiast diagnozowanie usterek maszyn rolniczych ma kluczowe znaczenie dla automatyzacji rolnictwa, a identyfikacja sygnałów z uszkodzonych łożysk ważna jest do diagnostyki usterek maszyn rolniczych i konserwacji predykcyjnej [64,95].

Drgania łożysk są wynikiem różnych czynników, w tym przemieszczeń wywołanych niedoskonałościami wykonania wewnętrznych powierzchni łożysk, z czego jednym z najistotniejszych jest falistość. Falistość odnosi się do nierówności powierzchni, które mają regularny, falowy charakter. Badania pokazują, że prędkość obrotowa łożysk jest jednym z kluczowych parametrów wpływających na poziom drgań. Analizy przeprowadzone w [8,46,73,76,98] wskazują na istotne zależności pomiędzy falistością a głównymi częstotliwościami drgań w łożyskach operujących przy wyższych prędkościach obrotowych (powyżej 30 obr/s).

W pracy [12] autorzy modelowali sztywny wał jako układ sprężyna–masa z trzema stopniami swobody (3DOF), co pozwoliło na zbadanie dynamicznych zachowań wirnika. Tandon i Choudhury [86] rozwinęli ten model, uwzględniając ruchy pierścienia wewnętrznego (wału), pierścienia zewnętrznego (mocowanie łożyska) oraz obciążenia w kierunku promieniowym. Ich symulacje wykazały, że amplitudy falistości bieżni wewnętrznej są znacząco mniejsze niż amplitudy falistości bieżni

zewnętrznej, co sugeruje różnice w wpływie tych dwóch powierzchni na generowanie drgań.

Modelowanie dynamiczne zostało dalej rozwinięte przez Janga i Jeonga [49], którzy zaproponowali model 5DOF, uwzględniający dwa ruchy kątowe i trzy translacyjne wirnika. Badania te wykazały, że falistość elementów łożyska oraz falistość pomiędzy łożyskami podporowymi wpływają na siebie nawzajem, a siła odśrodkowa kulek ma istotny wpływ na podstawowe częstotliwości drgań. Kolejne badania [18] wprowadziły model sztywnego wirnika 6DOF, dodając ruch wokół osi z. Wyniki sugerowały, że wpływ falistości bieżni wewnętrznej na poziom drgań łożysk jest większy niż wpływ falistości bieżni zewnętrznej oraz elementów tocznych. Eksperymenty przeprowadzone przy niższych prędkościach obrotowych (15 obr/s) przez autorów [81] wykazały, że drgania łożysk rosły wraz ze wzrostem falistości. Z kolei badania Adamczaka i Zmarzęłego [8] przy prędkości 30 obr/s wskazały, że najbardziej widoczny wpływ falistości bieżni na poziom drgań obserwowany jest w średnim paśmie częstotliwości (300-1800 Hz).

Emisja akustyczna (AE) stanowi nową, obiecującą technikę monitorowania stanu łożysk tocznych, która potencjalnie oferuje korzyści w zakresie wykrywania początkowych uszkodzeń na wczesnym etapie awarii. W badaniach Cockerilla [29,30] zbadano wpływ zwiększonej prędkości obrotowej i obciążenia na generowanie emisji akustycznej w łożyskach walcowych. Wyniki pokazały, że średniokwadratowy poziom sygnału AE wzrasta znacząco wraz ze wzrostem prędkości, podczas gdy wzrost obciążenia ma znacznie słabszy wpływ na sygnał AE. Korelacje pomiędzy cechami sygnałów emisji akustycznej a mechanizmami zużycia badali również Hase, Mishina i Wada [44], co dostarczyło istotnych informacji na temat związków pomiędzy procesami zużycia a emisją AE. W dalszych badaniach [32,91] analizowano wpływ prędkości obrotowej, przyłożonego obciążenia oraz współczynnika Λ na sygnał emisji akustycznej, co pozwoliło na lepsze zrozumienie mechanizmów generowania AE w różnych warunkach operacyjnych. Choudhury i Tandon [28] doszli do wniosku, że wzrost badań nad parametrami AE wynikał

z rosnących naprężeń dynamicznych spowodowanych zwiększoną prędkością obrotową, co podkreśla znaczenie emisji akustycznej jako narzędzia diagnostycznego. Testy emisji akustycznej (AE) odgrywają kluczową rolę w monitorowaniu stanu technicznego łożysk, zwłaszcza w kontekście wykrywania zanieczyszczeń i oceny poziomu smarowania [103]. Miettinen i współpracownicy [69] zastosowali metodę zliczania impulsów do analizy łożysk smarowanych smarem plastycznym, co pozwoliło na skuteczne monitorowanie poziomu zanieczyszczeń i prognozowanie niedoboru smaru. Z kolei Yoshioka i in. [99] opracowali zintegrowany czujnik AE i drgań, który w testach zmęczeniowych wykazał wyższą czułość w wykrywaniu uszkodzeń niż tradycyjne czujniki przyspieszenia drgań. Fan i współpracownicy [40], wykorzystując nowoczesne technologie komputerowe, przeprowadzili badania AE na łożyskach tocznych z różnymi warunkami smarowania, gdzie analiza w dziedzinie częstotliwości umożliwiła wyraźne rozróżnienie między różnymi stanami łożysk. Badania Krishnamoorthy'ego i in. [56] z kolei wykazały istotną korelację między sygnałami AE generowanymi podczas tarcia a współczynnikiem tarcia, co podkreśla znaczenie RMS sygnału AE w analizie tribologicznej. Te badania potwierdzają, że AE jest niezastąpioną techniką w zaawansowanej diagnostyce stanu łożysk.

Postęp w dziedzinie sztucznej inteligencji (AI) przyczynił się do powstawania nowoczesnych metod diagnozy usterek łożysk. W ostatnich latach szczególną popularność zyskały głębokie sieci neuronowe (DNN), a zwłaszcza konwolucyjne sieci neuronowe (CNN), które znajdują zastosowanie w diagnostyce uszkodzeń łożysk. Zhang i współpracownicy [102] wprowadzili jednomiarową sieć CNN do diagnozowania sygnałów drgań łożysk, co pozwoliło na automatyzację procesu identyfikacji usterek.

Li i inni [63] wykorzystali CNN do diagnozy dwuwymiarowego wykresu czasowo-częstotliwościowego sygnałów uszkodzeń łożyska, co stanowiło krok naprzód w analizie sygnałów złożonych. Z kolei Łuczak [65] zaproponował zastosowanie CNN do przetwarzania spektrogramów w celu diagnozowania usterek, co umożliwia bardziej precyzyjne wykrywanie anomalii w sygnałach drgań.

Aby jeszcze bardziej zwiększyć dokładność diagnozowania uszkodzeń łożysk, w artykule [101] zaproponowano zastosowanie CNN z mechanizmem uwagi i wizualną analizą sygnału drgań. Ta innowacyjna metoda pozwala na bardziej efektywne wychwytywanie istotnych cech sygnałów, co prowadzi do lepszej jakości diagnozy.

Zhou [105] zaproponował nową architekturę rozpoznawania stanu zużycia łożyska tocznego, w której najpierw wyodrębniane są cechy sygnałów drgań, takie jak RMS, kurtoza, skośność, oraz RMSEE. Dane te są następnie grupowane za pomocą algorytmu k-średnich, a model CNN przyjmuje te sygnały jako dane wejściowe, dostarczając informacji na temat stanu zużycia łożysk. Dzięki temu model eliminował zakłócenia spowodowane przez czynnik ludzki i umożliwiał szybkie reagowanie na postępujące zużycie łożysk.

Ostatnie badania Xu i współpracowników [96] dotyczyły zastosowania głębokiej konwolucyjnej sieci dopasowania najbliższego sąsiada (DC-NNMN) opartej na technice Deep Few-Shot Learning. Metoda ta osiągnęła imponującą dokładność diagnozowania na poziomie ponad 82% dla przekładni i łożysk, przy użyciu jedynie jednej próbki dla każdej kategorii usterek. Jest to przełomowe podejście, szczególnie w kontekście sytuacji, w których dostęp do dużej ilości danych treningowych jest ograniczony.

W ostatnich latach rozwój sztucznej inteligencji, w szczególności sztucznych sieci neuronowych (SNN), znacząco wpłynął na diagnostykę i prognozowanie parametrów technicznych w inżynierii mechanicznej. W literaturze, zastosowanie SNN w badaniach nad łożyskami kulkowymi jest szeroko udokumentowane, co odzwierciedla ich rosnącą rolę w analizie i przewidywaniu parametrów drgań oraz innych istotnych cech łożysk. Przykłady zastosowania sztucznych sieci neuronowych do przewidywania amplitud drgań łożysk kulkowych zwykłych są szczegółowo opisane w pracach [53]. Modele te, bazujące na parametrach technologicznych oraz smarowaniu, pozwalają na precyzyjne określenie charakterystyki drgań, co jest kluczowe dla optymalizacji pracy łożysk w różnych warunkach

operacyjnych. Dodatkowo, w [54], SNN zostały efektywnie wykorzystane do przewidywania wewnętrznego luzu promieniowego w łożyskach kulkowych, co ma istotne znaczenie dla ich długoterminowej trwałości oraz niezawodności. Ponadto, szerokie zastosowanie sztucznej inteligencji, w tym SNN, w diagnostyce łożysk, znajduje odzwierciedlenie w badaniach nad wykrywaniem usterek [27,38,43,68,89]. W tych pracach, sieci neuronowe stanowią podstawowe narzędzie do analizy drgań, umożliwiając wczesne wykrywanie anomalii, które mogą prowadzić do awarii urządzeń. Z kolei w badaniach [25,26,77,90,106] SNN są stosowane do przewidywania pozostałego okresu użytkowania łożysk, co pozwala na efektywniejsze planowanie konserwacji i minimalizowanie ryzyka nieplanowanych przestojów. Wreszcie, praca [52] podkreśla wszechstronność modeli opartych na SNN, które zdolne są przewidywać poziom drgań łożysk kulkowych na podstawie parametrów geometrycznych pierścienia łożyskowego. Modele te pozwalają również na analizę wpływu chropowatości powierzchni bieżni oraz luzu promieniowego na drgania łożysk, co ma bezpośrednie przełożenie na ich wydajność oraz żywotność.

Zarówno tradycyjne, jak i nowoczesne metody monitorowania stanu łożysk, takie jak pomiar drgań, emisja akustyczna i wykorzystanie sztucznej inteligencji, odgrywają kluczową rolę w diagnostyce i konserwacji systemów mechanicznych. Falistość powierzchni bieżni łożysk stanowi jeden z głównych czynników wpływających na generowanie drgań, a zaawansowane modele dynamiczne pozwalają na lepsze zrozumienie tych zjawisk.

Emisja akustyczna jako technika monitorowania oferuje nowe możliwości w zakresie wczesnego wykrywania usterek, co jest szczególnie istotne w kontekście utrzymania ruchu. Z kolei rozwój sztucznej inteligencji, a w szczególności konwolucyjnych sieci neuronowych, przynosi nową jakość w diagnostyce łożysk, umożliwiając bardziej precyzyjne i automatyczne wykrywanie uszkodzeń. Integracja tych technologii stanowi przyszłość monitorowania stanu łożysk, przyczyniając się do zwiększenia niezawodności i bezpieczeństwa systemów mechanicznych.

4. CEL PRACY

Problem badawczy: Ocena właściwości metrologicznych oryginalnego systemu pomiaru stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą oceny drgań i szumów.

Cele pomocnicze:

- przeprowadzenie oceny zrealizowanych dotychczas prac teoretycznych i eksperymentalnych oraz ocena stosowanych systemów pomiarowych stanów dynamicznych łożysk tocznych;
- przeprowadzenie analizy stosowanych parametrów wykorzystywanych do pomiarów drgań i szumów łożysk tocznych;
- ocena dotychczas zbudowanego systemu pomiarowego dla potrzeb przemysłu łożyskowego na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem statystyki matematycznej;
- określenie właściwości użytkowych i metrologicznych nowo zbudowanego stanowiska pomiarowego oraz analiza dotychczas stosowanych procedur i instrukcji ustalenia stanu dynamicznego łożysk;
- wdrożenie zbudowanego systemu w warunkach produkcji oraz opracowanie nowych procedur i instrukcji badawczych.

Wstępnie ustalona hipoteza badawcza: Uwzględniając właściwości metrologiczne zbudowanego systemu pomiarowego istnieją teoretyczne i praktyczne przesłanki do jego zastosowania w warunkach przemysłowych w celu podniesienia jakości wyprodukowanych wyrobów.

5. ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE URZĄDZEŃ BADAWCZYCH DO POMIARU DRGAŃ ŁOŻYSK KULKOWYCH

Producenci łożysk do badań drgań stosują najczęściej stanowiska badawcze własnej konstrukcji. Urządzenie te mają dość podobną budowę, ale rozwiązania konstrukcyjne najważniejszych podzespołów różnią się między sobą.

Rysunki 12-15 przedstawiają urządzenia do pomiaru drgań łożysk kulkowych czołowych producentów łożysk.



Rys. 12. Urządzenia do pomiaru drgań łożysk firmy Sugawara (Japonia) [S2]



Rys. 13. Urządzenie do pomiaru drgań łożysk firmy SKF (Szwecja) [S3]



Rys. 14. Urządzenie do pomiaru drgań łożysk firmy ZYS (Chiny) [S6]



Rys. 15. Urządzenie do pomiaru drgań łożysk firmy PDI (USA) [S4]

Podstawowe podzespoły wszystkich tych konstrukcji to:

- wrzeciono,
- głowica pomiarowa
- czujnik drgań,
- zespół docisku badanego łożyska,

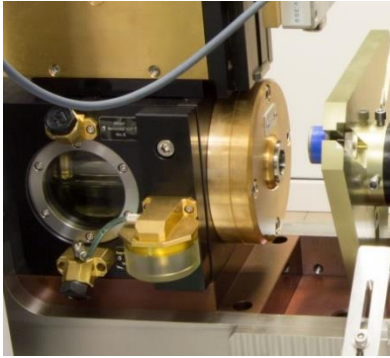
- napęd wrzeciona,
- korpus stanowiska i osprzęt,
- zespół sterowania, kontroli i monitoringu,
- oprogramowanie umożliwiające kolekcjonowanie i obróbkę zebranych danych, ich wizualizację, analizę i ocenę uzyskanych wyników.

Każdy z wymienionych podzespołów systemu pomiarowego jest istotny dla poprawności jego funkcjonowania, ale najistotniejsze dla dokładności prowadzonych na nim pomiarów są czujnik ze wzmacniaczem sygnału, wrzeciono o wysokiej precyzji obrotów i moduł obciążenia zapewniający równomierność docisku osiowego na całym obwodzie pierścienia zewnętrznego. Różnice w budowie stanowisk dotyczą zarówno konstrukcji poszczególnych podzespołów, jak głowica badawcza, rodzaj wrzeciona badawczego, sposób realizacji docisku czy przenoszenie napędu, jak również systemu obróbki sygnału, akwizycji danych, oprogramowania analitycznego i wizualizacji wyników.

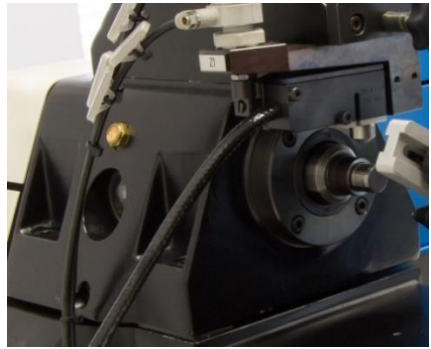
5.1. Wrzeciono badawcze

W systemach do pomiarów drgań najpowszechniej stosowane są wrzeciono hydrodynamiczne (Rys. 16, 17). Mają one wiele zalet, z których do najistotniejszych należy zaliczyć brak generowania istotnych dla pomiarów drgań własnych, stabilną pracę po uzyskaniu odpowiedniej temperatury, trwałość i stosunkowo nieduże koszty pozyskania w warunkach FŁT Kraśnik. Nie są one jednak pozbawione wad. Mają ograniczony zakres obrotów, w których mogą pracować, są wrażliwe na jakość smarowania, którego nawet chwilowy brak może spowodować trwałe uszkodzenia. Mają ograniczoną możliwość obciążeń i są nieodporne na ich przekroczenia. Aby mieć pewność, że będą prawidłowo smarowane, najczęściej stosuje się pompę olejową i blokuje się możliwość pracy wrzeciona bez wcześniejszego uruchomienia pompy lub w przypadku jej wyłączenia. Ograniczone możliwości pracy wrzeciona pod obciążeniem

przy niskich obrotach, czy jego startu przy dużym obciążeniu, ograniczają możliwości stanowiska.



Rys. 16. Wrzeciono hydrodynamiczne firmy Sugawara (Japonia) [S2]



Rys. 17. Wrzeciono hydrodynamiczne firmy SKF (Szwecja) (zasoby własne)



Rys. 18. Wrzeciono pneumatyczne firmy Sugawara (Japonia) [S2]



Rys. 19. Wrzeciono pneumatyczne SS-250 firmy NEWWAY Air Bearings (USA) [S5]

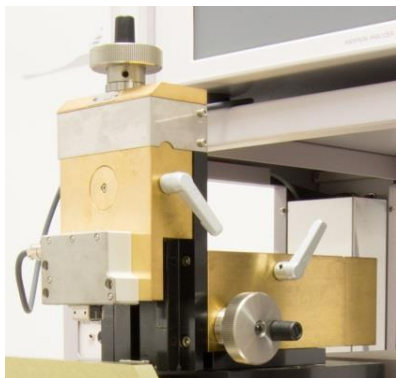
Drugim rodzajem stosowanych wrzecion są wrzeciona pneumatyczne (Rys. 18, 19). Wrzeciona te pozbawione są ograniczeń występujących we wrzecionach hydrodynamicznych. Dobrze działają w szerszym zakresie prędkości (począwszy od zera) i są zasilane sprężonym powietrzem.

Charakteryzują się bardzo wysoką precyzją obrotu, nie wymagają specjalnego systemu smarowania i są gotowe do pracy bezpośrednio po podłączeniu powietrza.

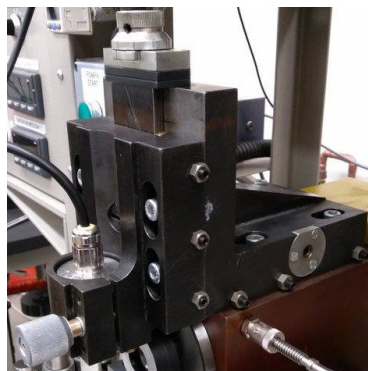
Dodatkowe wymagania jakie muszą spełnić wrzeciona to pozioma oś obrotu oraz obroty rzędu 1800 rpm.

5.2. Głowica pomiarowa

Producenci systemów pomiarowych stosują różne rozwiązania konstrukcyjne głowic pomiarowych. Na ogół są one oparte na prostopadle usytuowanych względem siebie prowadnicach w formie jaskółczego ogona, po których za pomocą mechanizmu śrubowego przesuwany jest element konstrukcji odpowiedzialny za ruch w określonej płaszczyźnie. Jedna z prowadnic musi być równoległa do osi wrzeciona, druga prowadnica musi zapewniać ruch prostopadły do osi wrzeciona. Po ustawieniu prowadnic w pozycji pomiarowej wymagane jest ich zablokowanie za pomocą śrub umocowanych w owalnych kanałkach.



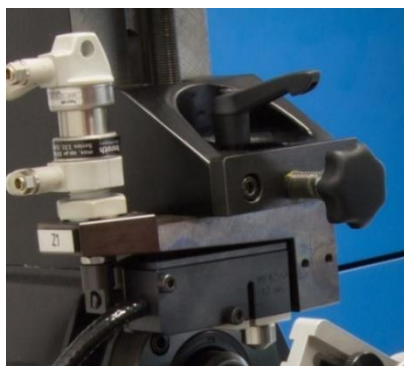
Rys. 20. Głowica pomiarowa firmy Sugawara (Japonia) [S2]



Rys. 21. Głowica pomiarowa zastosowana przez Politechnikę Świętokrzyską (Polska) (zasoby własne)

W większości głowic pomiarowych czujnik po ustawieniu pozycji pomiarowej mocowany jest w stałym położeniu (Rys. 20, 21). Jego pozycja jest niezmienna podczas podania łożyska do pomiaru, pomiaru, jak i podczas rozładunku. Takie rozwiązanie powoduje, że pomiar jest stabilny, odporny na zakłócenia, ale powoduje szybsze zużycie czujnika pomiarowego.

Pojawiają się też nowe rozwiązania. Firma SKF zastosowała rozwiązanie, w którym czujnik pomiarowy dosuwany jest do mierzonego łożyska tylko na czas pomiaru (Rys. 22). Jest to rozwiązanie znacznie bezpieczniejsze dla pracy czujnika, szczególnie w przypadku pomiarów łożysk stożkowych i dużych łożysk kulkowych. Należy jednak zabezpieczyć głowicę pomiarową przed przenoszeniem drgań z napędu pneumatycznego.



Rys. 22. Ruchoma głowica pomiarowa firmy SKF (Szwecja) (zasoby własne)

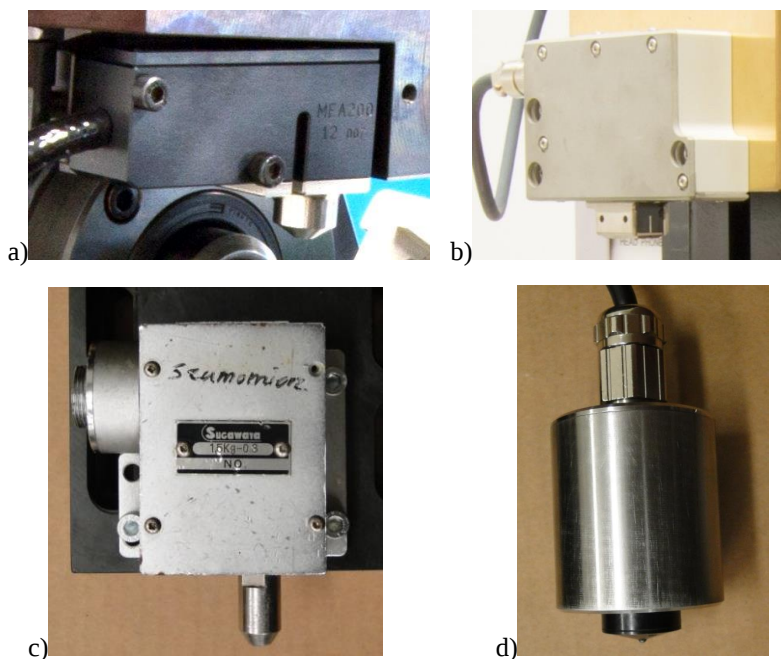
5.3. Czujnik drgań

Konstrukcja czujników stosowanych do pomiarów drgań determinowana jest wyborem wielkości, która ma być mierzona. W przypadku drgań, jak w każdym ruchu, wartością mierzoną może być przemieszczenie, prędkość lub przyspieszenie. Z uwagi na zależność czułości tych parametrów, od zakresu częstotliwości w którym prowadzony

jest pomiar, rodzaj czujnika dobiera się odpowiednio do badanego zakresu częstotliwości.

Oceny łożysk w liniach produkcyjnych przemysłu łożyskowego, dokonuje się przeważnie w szerokim zakresie częstotliwości od 50 do 10 000 Hz, podzielonym na trzy podzakresy: od 50 do 300 Hz, od 300 do 1800 Hz oraz od 1800 do 10 000 Hz. Zadaniu takiemu najlepiej odpowiada pomiar prędkości drgań, która w najistotniejszym dla pomiarów zakresie częstotliwości zachowuje się najstabilniej.

Czujniki prędkościowe mają wprawdzie swoje wady. Mają skomplikowaną konstrukcję, są drogie i wrażliwe na uszkodzenia. Dlatego też nie są stosowane w monitoringu maszyn i urządzeń. Sprawdzają się natomiast znakomicie w urządzeniach do kontroli jakości łożysk.



Rys. 23. Czujnik drgań: a) firmy SKF; b), c) firmy Sugawara; d) firmy FAG (zasoby własne)

Czujniki wytwarzane do szumomierzy, mają wprawdzie bardzo podobną konstrukcję wewnętrzną, ale zewnętrznym wyglądem różnią się znacząco. Ich konstrukcja wynika z przyjętych rozwiązań systemów mocowania do urządzenia badawczego i realizacji wstępnego obciążenia badawczego. Na rysunku 23 przedstawiono konstrukcje czujników, które stosowane są przez znanych producentów urządzeń do pomiarów drgań łożysk w liniach produkcyjnych.

Alternatywą dla czujników kontaktowych są czujniki laserowe. Czujniki takie stosuje firma SKF jako alternatywne rozwiązanie dla urządzeń do pomiaru drgań (Rys. 24). Podobne czujniki produkuje firma Polytec (Rys. 25). Na obecną chwilę nie są to rozwiązania powszechnie stosowane w przemyśle.



Rys. 24. Laserowy czujnik pomiarowy
firmy SKF (Szwecja)[S7]



Rys. 25. Laserowy czujnik pomiarowy
firmy Polytec (Niemcy)[S8]

5.4. Zespół docisku badanego łożyska

Obciążenie badawcze łożyska podczas testu realizowane jest przez zespół docisku. Jego konstrukcja ma zapewnić równomiernie rozłożoną na całym obwodzie łożyska siłę osiową. Niedopuszczalne jest przekoszenie łożyska podczas pomiaru, które drastycznie wpływa na uzyskiwane wyniki. Większość stosowanych rozwiązań preferuje docisk pneumatyczny (Rys. 26). Część z nich wykorzystuje go tylko do przesunięcia głowicy

dociskającej w położenie robocze, zaś o sile docisku decyduje mechanizm sprężynowy, nastawiany odpowiednio do potrzeb. W rozwiązaniu tym siłownik pneumatyczny musi podawać siłę większą od nastawianej na mechanizmie sprężynowym. Inne rozwiązania wielkość siły docisku wiążą bezpośrednio z ciśnieniem powietrza w siłowniku, pomijając ewentualne błędy wynikające ze zmiennych oporów tłoczyska w cylindrze siłownika. Interesujące rozwiązanie zrealizowała firma Sugawara, dostawcy urządzeń badawczych dla NSK. Docisk realizowany jest w systemie czysto sprężynowym. Kompletny moduł siłownika przemieszcza się swobodnie w osi wrzeciona szumomierza na łożyskach liniowych, a nastawialna mechanizmem śrubowym blokada pozycjonuje go w miejscu zaplanowanym do pomiaru (Rys. 27). Blokada ta jest odsuwana na czas zakładania łożyska do pomiaru, a następnie powracając na pozycję roboczą, uwalnia docisk realizowany przez mechanizm sprężynowy, poprzez jego niewielki przesuw do przodu.



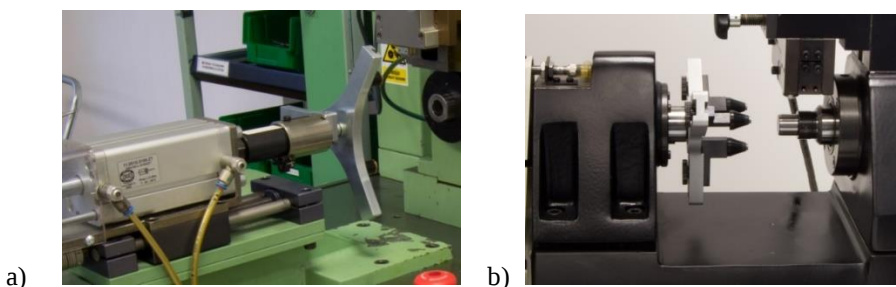
Rys. 26. Pneumatyczny docisk
firmy SKF (Szwecja) [S3]



Rys. 27. Pneumatyczno-sprężynowy docisk
firmy Sugawara (Japonia) [S2]

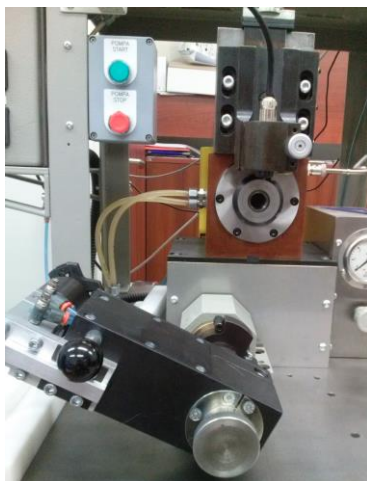
Aby zapewnić łożysku równomierny docisk na całym obwodzie, najczęściej stosuje się zawieszoną na przegubie kulowym trzyramienną głowicę (Rys. 28a), zapewniającą trójpunktowy styk z czołem pierścienia zewnętrznego i kompensację błędów współosiowości wrzeciona i docisku. To powszechnie stosowane rozwiązanie nie do końca jednak spełnia oczekiwania, ponieważ rozrzut wyników uzyskiwanych podczas pomiarów na tym samym łożysku w różnych odstępach czasu jest dość znaczny, za

jeden z istotnych tego powodów uważa się między innymi niedostateczną powtarzalność w realizacji obciążenia badawczego. Bardzo poważnie traktuje ten problem firma SKF, której konstrukcje preferują bardzo zwartą budowę zespołu docisku i wrzeciona (Rys. 28b). W ślad za tym rozwiązaniem, poszło zastosowanie sztywnego osadzenia głowicy dociskowej na tłoczysku siłownika, które prowadzone dokładnie w osi wrzeciona, wprowadza ją precyzyjnie i powtarzalnie na czoło pierścienia zewnętrznego badanego łożyska. Drobne, mierzone w mikronach niedokładności, wystarczająco skutecznie kompensowane są przez gumowe elementy wkomponowane w konstrukcję docisku. W opinii użytkowników tego rozwiązania, konstrukcja SKF pozwala uzyskiwać najmniejszy rozrzut wyników pomiarów.



Rys. 28. Trójpunktowy pneumatyczny docisk: a) firmy Sugawara (Japonia)[S2];
b) firmy SKF [S3]

Rozwiązanie (Rys. 29) zastosowane w szumomierzu znajdującym się na wyposażeniu Politechniki Świętokrzyskiej, polegające na zamocowaniu docisku na obrotowym ramieniu jest wprawdzie wygodne z punktu widzenia zakładania i zdejmowania łożysk do pomiaru, ale wydaje się mało pewne w zapewnieniu współosiowości z osią wrzeciona. O ile może się w jakimś stopniu sprawdzać w zastosowaniu do niewielkich obciążeń, to dla dużych łożysk, wymagających większych obciążeń jest stanowczo za mało sztywne.



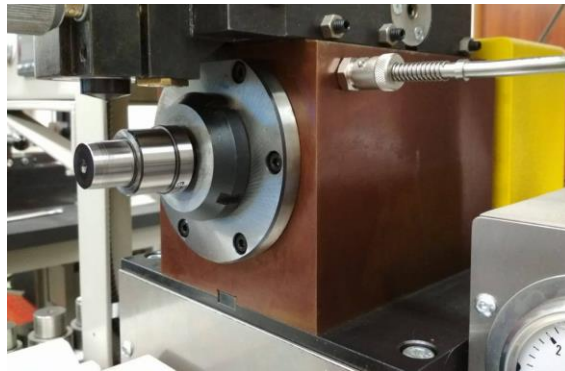
Rys. 29. Obrotowy pneumatyczny docisk na urządzeniu STPPD (Politechnika Świętokrzyska)

5.5. Napęd wrzeciona

Napęd wrzeciona musi spełniać wysokie wymagania w zakresie zabezpieczenia przed przenoszeniem się drgań z silnika i elementów zespołu przekazania napędu na wrzeciono oraz utrzymywać stabilne obroty podczas pomiaru. Producenci urządzeń do badania drgań różnie podchodzą do rozwiązywania tego problemu. Duże znaczenie ma oczywiście rodzaj i jakość zastosowanego silnika i jego systemu sterowania, ale nie mniejsze znaczenie ma również sposób jego zawieszenia, rodzaj i jakość przekładni obrotów oraz lokalizacja w urządzeniu. Wysokiej jakości, cichy silnik specjalnej konstrukcji, na dobrze dobranym zawieszeniu, może pracować w pobliżu wrzeciona. Większość jednak rozpoznanych rozwiązań preferuje przeniesienie silnika poza płytę, na której posadowione jest wrzeciono, a napęd przekazywany jest przez przekładnię pasową, czasem na dość dużym dystansie. Przykłady różnych rozwiązań konstrukcyjnych przedstawiono na rysunkach 30, 31.



Rys. 30 Napęd realizowany przez firmę Sugawara



Rys. 31. Napęd realizowany na Politechnice Świętokrzyskiej

Zastanawiające jest rozwiązanie zastosowane przez firmę SKF w urządzeniach typ MVH 90E (Rys. 32), gdzie silnik umieszczono na dnie podstawy stanowiska, w najdalszym możliwym miejscu w stosunku do wrzeciona. W rozwiązaniu takim istotne jest zapewne zastosowanie odpowiedniej jakości kół i paska transmisyjnego. Dobór silnika pozostaje w zależności od zakładanego systemu sterowania obrotami wrzeciona. Może to być realizowane przy pomocy falownika lub poprzez zastosowanie serwonapędu. W każdym przypadku silnik musi spełniać najwyższe

wymagania w zakresie cichobieżności i minimalizacji generowanych drgań. Poza wyżej wymienionymi wymaganiami, sinik musi dysponować odpowiednią mocą, która w przypadku badania dużych łożysk, a szczególnie stożkowych może być dość znaczna.



Rys. 32. Napęd w urządzeniu MVH firmy SKF

5.6. Zespół sterowania, kontroli i monitoringu

Zespoły sterowania, kontroli i monitoringu mają zapewnić bezpieczną pracę urządzeń, nadzorując przebieg wszystkich procesów przez nie realizowanych. Z punktu widzenia prowadzonego przez urządzenia procesu badawczego, szczególnie istotne dla szumomierzy jest utrzymanie i rejestracja parametrów określających warunki w jakich są realizowane, czyli obroty wrzeciona i wielkość docisku. Zespoły sterowania, odpowiedzialne za realizację procesów, muszą efektywnie współpracować z oprogramowaniem, wymieniając z nim informacje z monitoringu, czujników pomiarowych i oprogramowania sterowników, oraz prawidłowo reagując na polecenia wynikające z wysyłanych do wykonania procedur.

5.7. Oprogramowanie badawcze

Oprogramowanie badawcze ma realizować dwie podstawowe funkcje. Jedną z nich jest przekazywanie do wykonania systemom sterowania, kontroli i monitoringu procedur niezbędnych do realizacji programu badawczego, nadzorowanie ich i reagowanie na nieprawidłowości poprzez ich korektę lub zatrzymanie. Drugą zaś kolekcjonowanie informacji z prowadzonych pomiarów, ich analizowanie, opracowywanie, wizualizację i przygotowywanie raportów z badań.

5.8. Korpus stanowiska i osprzęt

Badanie drgań wymaga odizolowania przestrzeni pomiarowej od zakłóceń z otoczenia. Dlatego korpus stanowiska badawczego powinien być odpowiednio masywny i wyposażony w elementy tłumiące wibracje od podłoża, a własne zespoły generujące drgania, zawieszone w nim na odpowiednio dobranych elementach antywibracyjnych. Płyta główna na której montowane są podstawowe podzespoły, jak wrzeciono i docisk powinna być wykonana z materiału tłumiącego drgania, żeliwa lub materiałów kompozytowych. W rozwiązaniach SKF płytę zastępuje odlewana podstawa, osadzona poprzez poduszki antywibracyjne na konstrukcji stalowej, odizolowanej od podłoża kolejnymi elementami antywibracyjnymi. Rozwiązania stosowane przez firmę Sugawara i innych producentów, izolację od podłoża zapewniają różnej konstrukcji stopkami antywibracyjnymi (Rys. 33).



Rys. 33. Stopki antywibracyjne

Sam korpus może być wykonany z profili zamkniętych w technologii spawania lub skręcony z profili aluminiowych. Ta druga wersja ma wiele zalet, takich jak łatwość montażu w nim podzespołów urządzenia i osłon, czy brak konieczności zabezpieczeń antykorozyjnych i malowania.

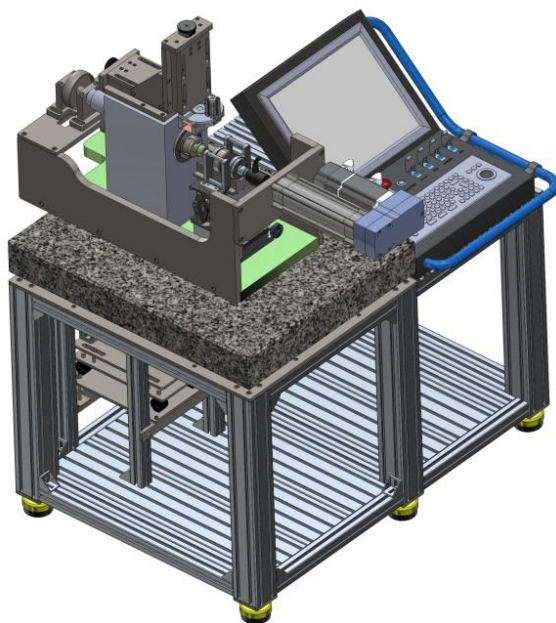
Do korpusu, mocowane są elementy podzespołów zasilania, kontroli i monitoringu oraz pulpit sterowniczy z jednostką centralną, zawierającą oprogramowanie do kolekcjonowania, obróbki i analizy danych oraz wizualizacji wyników badań.

6. ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE NOWO ZAPROJEKTOWANEGO SYSTEMU DO POMIARU DRGAŃ ŁOŻYSK KULKOWYCH

6.1. Wstępne rozwiązania konstrukcyjne

Po przeanalizowaniu istniejących rozwiązań konstrukcyjnych systemów do pomiaru drgań łożysk produkowanych przez czołowych producentów, zostały opracowane wstępne konstrukcje, które poddane zostały dalszej weryfikacji.

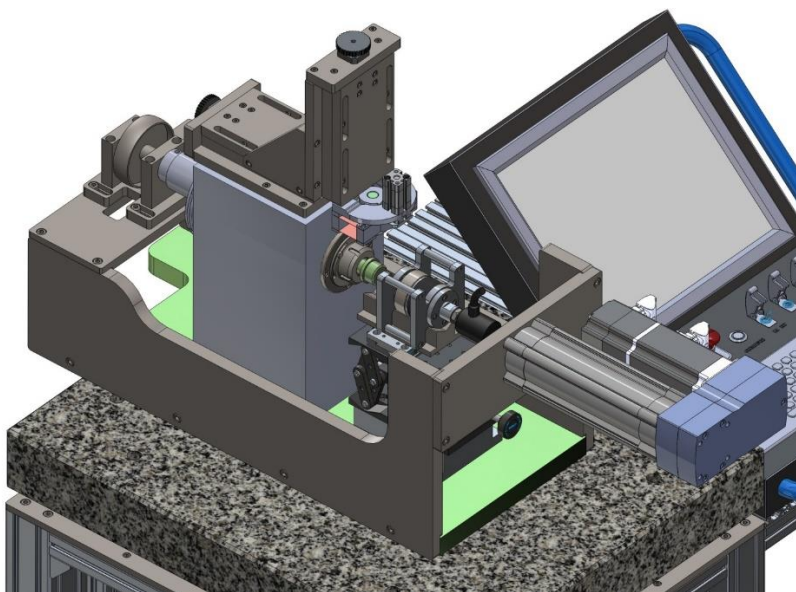
Proponowane koncepcje rozwiązań przedstawiono na rysunkach od numeru 34 do 45.



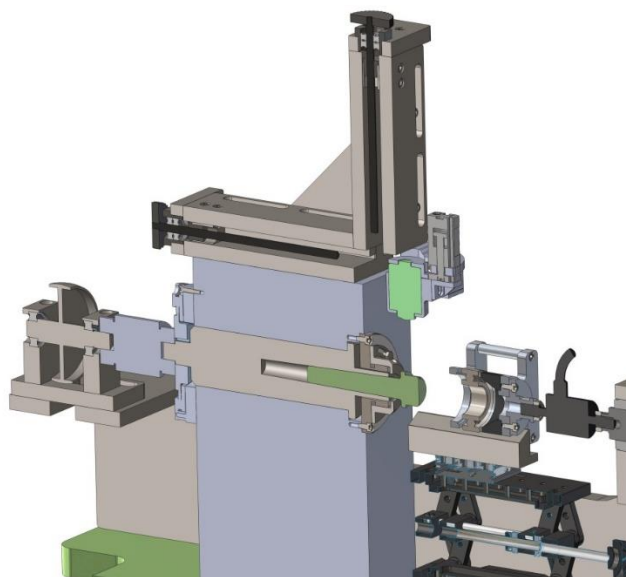
Rys. 34. Widok szumomierza - przód



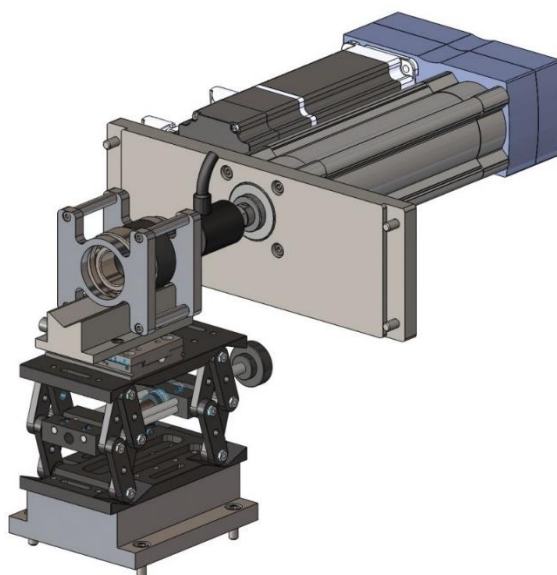
Rys. 35. Widok szumomierza – tył



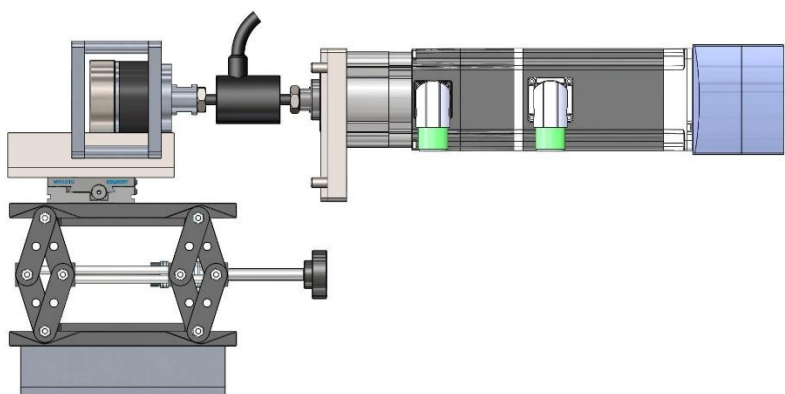
Rys. 36. Widok na podstawowe podzespoły szumomierza



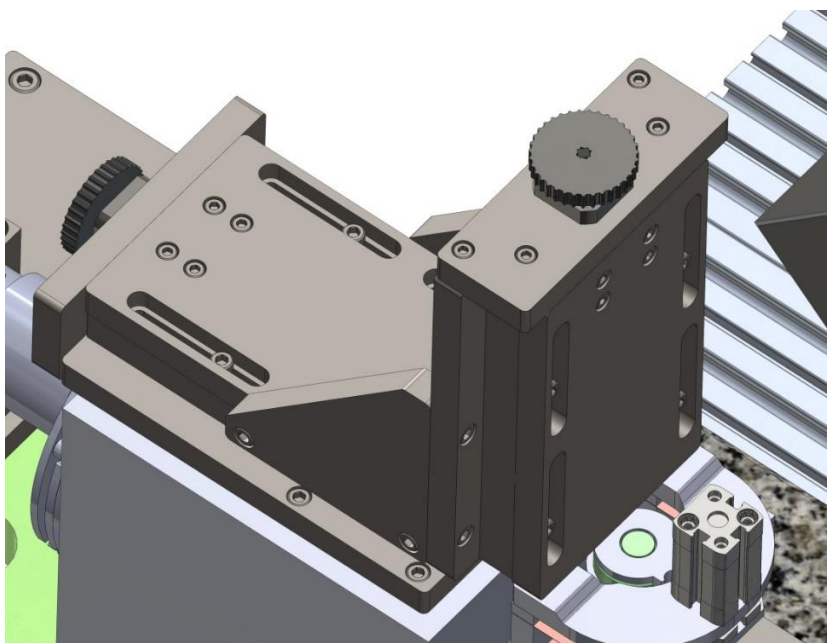
Rys. 37. Przekrój przez podstawowe zespoły szumomierza



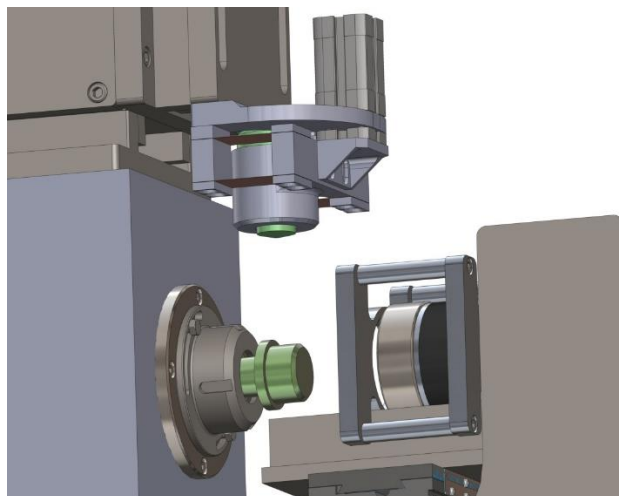
Rys. 38. Widok na zespół docisku z kieszenią i podzespołem pozycjonowania podpory badanego łożyska.



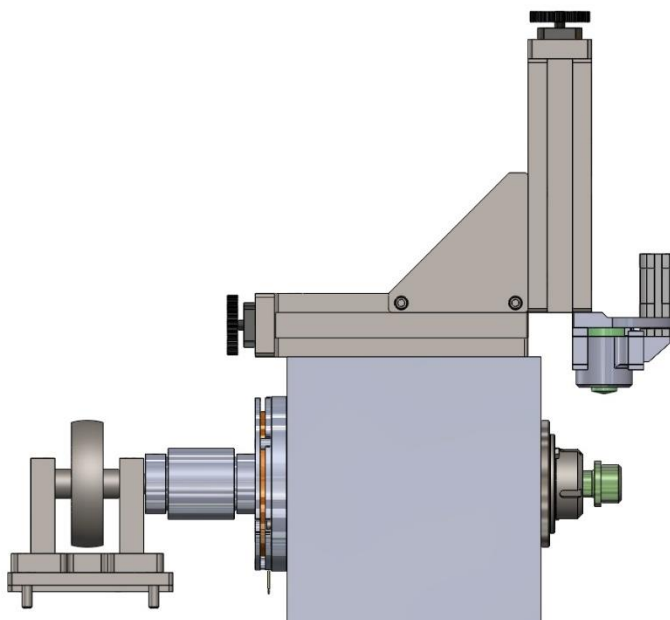
Rys. 39. Schemat pracy zespołu docisku.



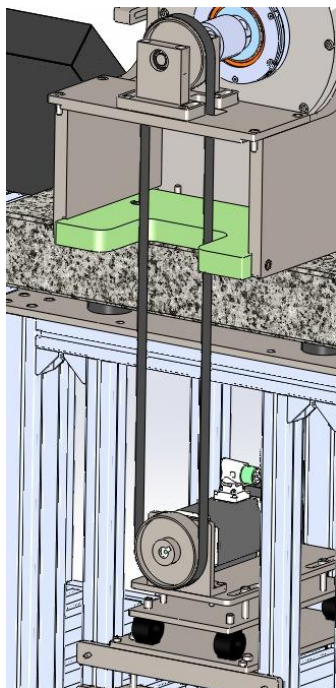
Rys. 40. Zespół pozycjonowania głowicy pomiarowej



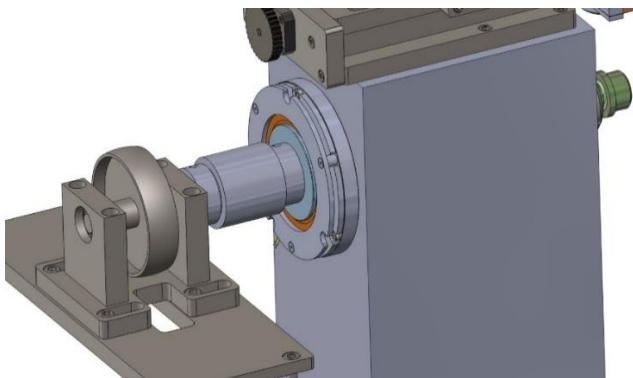
Rys. 41. Głowica pomiarowa z czujnikiem zawieszonym na sprężynach płaskich, dosuwana do łożyska za pomocą siłownika pneumatycznego



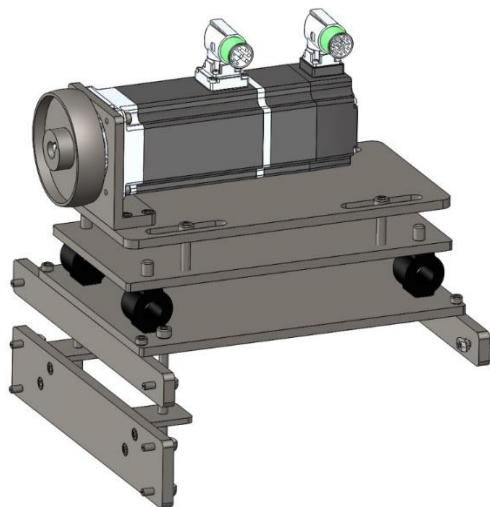
Rys. 42. Wrzeciono hydrodynamiczne z głowicą pomiarową i elementami układu napędowego



Rys. 43. Zespół przenoszenia napędu.



Rys. 44. Wrzeciono z elementami napędu – fortunka z kołem pasowym, sprzęgło magnetyczne i hamulec (możliwe rozwiązanie opcjonalne, bezpośredniego osadzenia koła pasowego na wałku wrzeciona z pominięciem hamulca).



Rys. 45. Zawieszenie serwonapędu w korpusie.

6.2. Ostateczny projekt systemu pomiarowego

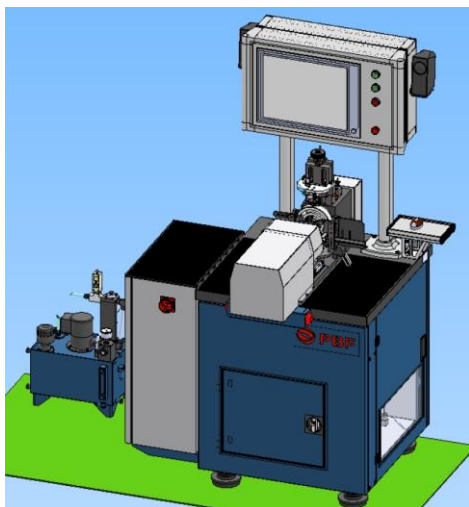
Analiza dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń do pomiaru drgań łożysk, oferowanych przez wiodących producentów, stanowi istotny etap w procesie projektowania nowoczesnych, innowacyjnych systemów. Główne cele tej analizy obejmują zrozumienie aktualnie stosowanych technologii i metod, ocenę ich mocnych i słabych stron, a także identyfikację obszarów, w których możliwe jest wprowadzenie ulepszeń. Na podstawie zgromadzonych danych można przystąpić do tworzenia wstępnych koncepcji nowych urządzeń, które następnie poddaje się szczegółowej weryfikacji w celu oceny ich efektywności, niezawodności oraz przydatności w praktycznych zastosowaniach.

Pierwszym krokiem w analizie dostępnych rozwiązań było przeprowadzenie przeglądu literatury technicznej oraz patentów, a także zapoznanie się z katalogami i materiałami promocyjnymi czołowych producentów takich jak SKF, Schaeffler, Sugawara czy NSK. Firmy te oferują zaawansowane systemy monitorowania stanu łożysk,

wykorzystujące różnorodne technologie, w tym czujniki piezoelektryczne, akcelerometry oraz zaawansowane metody analizy sygnałów, takie jak transformacja Fouriera czy analiza obwiedni. Każde z tych rozwiązań posiada unikalne cechy, które mogą stanowić cenną inspirację przy projektowaniu nowych urządzeń.

Po zebraniu odpowiedniej ilości informacji przystąpiono do opracowywania wstępnych projektów urządzeń. Kluczowe na tym etapie było uwzględnienie zarówno wymagań technicznych, jak i praktycznych aspektów użytkowania. Wstępne projekty mogą obejmować różnorodne podejścia, od innowacyjnych układów mechanicznych po zaawansowane rozwiązania elektroniczne i programistyczne. Przykładowo, możliwe jest zaprojektowanie nowego typu czujnika o zwiększonej czułości na drgania w określonym zakresie częstotliwości lub opracowanie algorytmu, który skuteczniej wykrywa wczesne objawy uszkodzeń łożysk. Kolejnym krokiem po opracowaniu wstępnych projektów była ich weryfikacja. Ten proces obejmuje zarówno symulacje komputerowe, jak i testy laboratoryjne. Symulacje umożliwiają szybkie sprawdzenie, jak zaprojektowane urządzenie będzie się zachowywać w różnych warunkach, bez konieczności budowania fizycznego prototypu. W ten sposób można przeanalizować wpływ różnych parametrów konstrukcyjnych na działanie urządzenia i zoptymalizować je przed przystąpieniem do budowy prototypu.

Po zakończeniu symulacji i wprowadzeniu ewentualnych poprawek przystąpiono do etapu budowy prototypów. Testy laboratoryjne pozwoliły na dokładniejszą ocenę wydajności systemu w rzeczywistych warunkach, co zostanie szczegółowo omówione w dalszej części pracy. Przeprowadzono różnorodne testy, mające na celu ocenę czułości czujników, precyzji pomiarów oraz niezawodności systemu w długookresowej eksploatacji. Testy te obejmowały zarówno badania w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, jak i testy w warunkach przemysłowych, gdzie systemy było narażone na rzeczywiste obciążenia i zakłócenia.



a)



b)

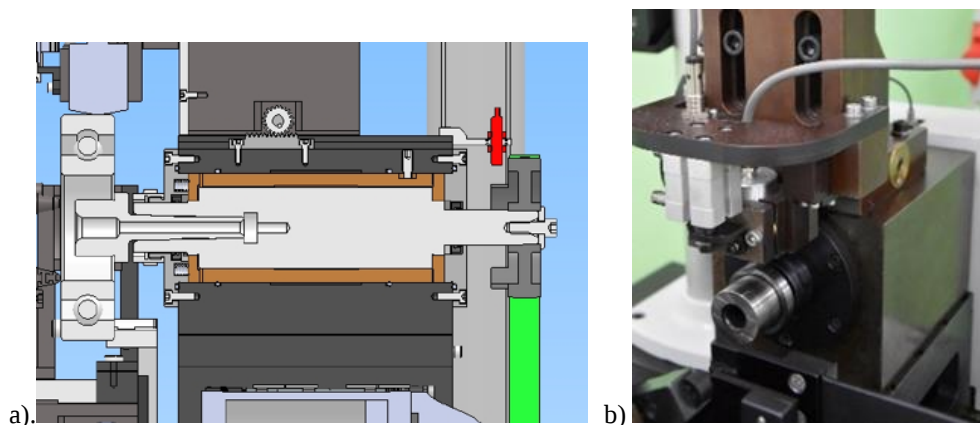
Rys. 46. System do pomiaru poziomu drgań MDL-54: a) projekt, b) widok rzeczywisty.

Wyniki weryfikacji pozwoliły na ocenę, czy wstępne projekty spełniają założone wymagania. Na tym etapie często okazuje się, że konieczne są dalsze modyfikacje i usprawnienia. Proces ten może obejmować iteracyjne poprawki konstrukcji, wprowadzanie nowych rozwiązań technologicznych oraz optymalizację parametrów pracy urządzenia. Celem jest stworzenie systemu, który nie tylko spełnia techniczne wymagania, ale również jest ekonomiczny w produkcji, łatwy w obsłudze i niezawodny w eksploatacji.

Podsumowując, analiza istniejących rozwiązań konstrukcyjnych oraz proces opracowywania i weryfikacji wstępnych projektów są kluczowymi etapami w tworzeniu nowoczesnych urządzeń do pomiaru drgań łożysk. Dzięki dogłębnej analizie dostępnych technologii oraz starannemu procesowi weryfikacji, możliwe było zaprojektowanie innowacyjnego, efektywnego i niezawodnego systemu pomiarowego MDL-54 (Rys. 46), które przyczyni się do poprawy monitorowania i diagnostyki stanu technicznego łożysk w różnych zastosowaniach przemysłowych [74,75]. Praca tego systemu jest zgodna z wymaganiami norm [N1,N2,N3].

6.2.1. Wrzeciono hydrodynamiczne

Zastosowanie wrzecion hydrodynamicznych w urządzeniach do pomiaru drgań łożysk przynosi szereg korzyści, w tym zwiększenie dokładności pomiarów, redukcję zakłóceń, wydłużenie żywotności komponentów oraz możliwość pracy w szerokim zakresie prędkości obrotowych. Te zalety sprawiają, że wrzeciona hydrodynamiczne są niezastąpionym elementem w zaawansowanych systemach monitorowania stanu technicznego maszyn, zarówno w przemyśle, jak i w laboratoriach badawczych. Dzięki nim możliwe jest nie tylko wykrywanie wczesnych oznak uszkodzeń, ale także prowadzenie dokładnych badań i analiz, co przyczynia się do rozwoju nowych technologii i zwiększenia efektywności produkcji. Mając to wszystko na uwadze oraz doświadczenie w konstruowaniu i produkcji wrzecion hydrodynamicznych, wykorzystaliśmy wrzeciono własnej konstrukcji (Rys. 47).

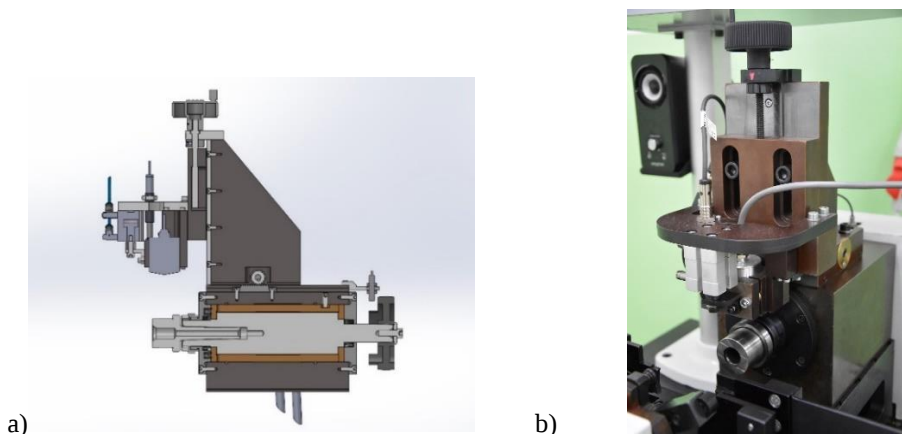


Rys. 47. Wrzeciono hydrodynamiczne: a) projekt, b) widok rzeczywisty.

6.2.2. Głowica pomiarowa

Głowica pomiarowa w systemach do pomiaru drgań pełni kluczową rolę w precyzyjnym ustawieniu czujnika pomiarowego względem badanego łożyska. Jej konstrukcja, dokładność i niezawodność są fundamentalne dla skutecznego pomiaru drgań w łożyskach. Głowica ta, to układ dwóch

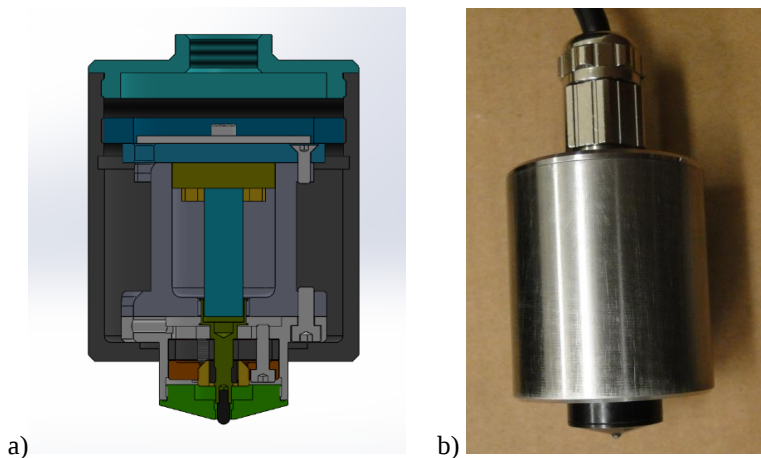
suportów (pionowy i poziomy) i wykonana jest z żeliwa, materiału, który tłumi drgania. Poniżej przedstawiono (Rys. 48) zastosowaną głowicę pomiarową.



Rys. 48. Głowica pomiarowa (z wrzecionem hydrodynamicznym): a) projekt, b) widok rzeczywisty.

6.2.3. Czujnik drgań

W wyniku prac przeprowadzonych w ramach projektu, opracowany został czujnik (Rys. 49), którego gabaryty zewnętrzne są kompatybilne z przetwornikiem drgań stanowiącym wyposażenie systemów pomiarowych produkowanych przez firmę FAG. Konstrukcja wewnętrzna czujnika została opracowana z myślą o możliwej do realizacji technologii wykonania elementów oraz w miarę prostego montażu, zarówno w procesie wytwarzania jak i ewentualnych napraw.



Rys. 49. Czujnik drgań: a) projekt, b) widok rzeczywisty.

Zasada działania czujnika, oparta na indukowaniu się prądu w cewce drgającej w polu magnetycznym, narzuca określone wymagania w zakresie precyzji wykonania współpracujących ze sobą elementów. Cewka powinna mieć zapewnioną możliwość swobodnego przemieszczania się z wymuszoną przez drgające łożysko częstotliwością i amplitudą, w odpowiednio skonfigurowanym polu magnetycznym. Powinna przy tym być możliwie lekka i składać się z dużej ilości zwojów, aby generowany prąd miał parametry umożliwiające uzyskanie możliwie dużej rozdzielczości sygnału. Powinna przy tym mieć zapewniony podczas pomiaru ciągły styk z obiektem badanym, zapewniony przez sprężysty docisk o powtarzalnej wartości. Obwód magnetyczny powinien z kolei zapewnić stałe i odpowiednio silne pole w obszarze ruchu nawiniętej na karkas cewki. Obydwa zespoły powinny być połączone ze sobą przy zapewnionej współosiowości, zabezpieczającej przed ocieraniem się karkasu z cewką w bardzo wąskiej szczelinie obwodu magnetycznego. Chcąc zapewnić te warunki, czujnik zbudowany z dwóch zespołów – obwodu magnetycznego i zespołu przenoszenia drgań – musi być montowany w sposób zapewniający współosiowość. Elementy obwodu magnetycznego wykonano z żelaza armco, zapewniając strumieniowi magnetycznemu minimalny opór. Elementy drgające – karkas z przekładką

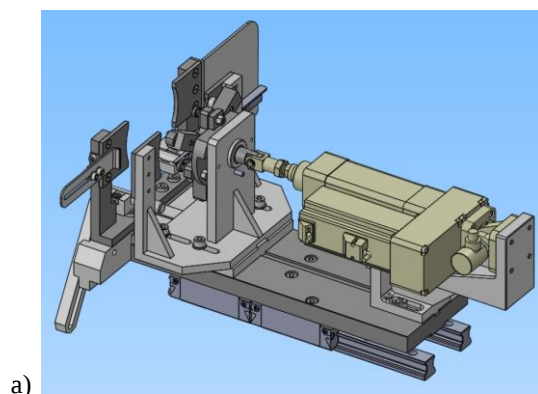
i nakrętką wykonano z lekkiego stopu aluminium o podwyższonej wytrzymałości. Tylko niewielki trzpień stykający się podczas pomiarów z łożyskiem, wykonany został ze stali łożyskowej. Korpus i pozostałe elementy zespołu przenoszenia drgań wykonano ze stali i mosiądzu, a sprężynki z brązu berylowego. Obudowę i pokrywę czujnika wykonano ze stopu aluminium. Cewkę nawinięto z drutu miedzianego o średnicy 30 μm .

Montaż czujnika, z uwagi na konieczność zachowania współosiowości karkasu z cewką w stosunku do szczeliny w obwodzie magnetycznym, wymaga specjalnego oprzyrządowania, pozwalającego na połączenie wszystkich elementów w sposób gwarantujący im bezkolizyjną współpracę.

6.2.4. Zespół docisku

W procesach pomiarowych łożysk kluczowym elementem, który zapewnia dokładność i powtarzalność wyników, jest zastosowanie odpowiednich mechanizmów docisku osiowego. Opatentowany mechanizm docisku do łożysk kulkowych, zaprezentowany na rysunku 50 i opisany w patencie [P2], stanowi innowacyjne rozwiązanie, które zapewnia stabilny oraz elastyczny docisk osiowy. System ten opiera się na wykorzystaniu elektrycznego siłownika, umożliwiającego płynną regulację siły docisku w zależności od rozmiaru badanego łożyska. Mechanizm ten odgrywa kluczową rolę w równomiernym rozkładzie siły na całym obwodzie łożyska, co jest niezbędne dla uzyskania dokładnych pomiarów.

Mechanizm docisku osiowego do łożysk kulkowych składa się z przegubowego, trójpunktowego mechanizmu dociskowego oraz zawulkanizowanych elementów dociskowych, które gwarantują stabilność oraz równomierność rozkładu siły. Elektryczny siłownik umożliwia precyzyjne sterowanie siłą docisku, co jest szczególnie istotne w przypadku łożysk o różnych rozmiarach i wymaganiach dotyczących siły docisku. Siłownik ten jest programowalny, co pozwala na automatyczne dostosowanie parametrów docisku do specyficznych wymagań badanego łożyska.



a)



b)

Rys. 50. Zespół docisku: a) projekt, b) widok rzeczywisty.

Dodatkowo, konstrukcja obejmuje kieszeń na łożyska, w której operator umieszcza badane łożysko. Podczas pomiaru łożysko jest dociskane w sposób stabilny i równomierny, co minimalizuje ryzyko wystąpienia błędów pomiarowych spowodowanych nierównomiernym rozkładem sił. Po zakończeniu pomiaru, operator łatwo wyjmie łożysko z kieszeni, co upraszcza proces pomiarowy i zwiększa jego efektywność.

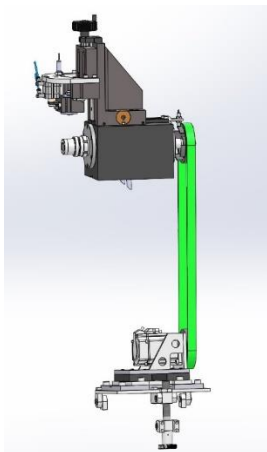
Opatentowany mechanizm docisku osiowego do łożysk kulkowych stanowi kluczowy komponent precyzyjnych urządzeń do pomiaru drgań. Jego innowacyjna konstrukcja oraz zastosowanie elektrycznego siłownika umożliwiają płynną regulację siły docisku, co w znaczący sposób wpływa

na dokładność i powtarzalność uzyskiwanych wyników pomiarowych. Dzięki temu rozwiązaniu możliwe jest skuteczne monitorowanie stanu technicznego łożysk.

W 2021 roku omawiany mechanizm docisku osiowego zdobył pierwszą nagrodę w konkursie „Student – Wynalazca”, organizowanym przez Politechnikę Świętokrzyską, a także otrzymał dwa srebrne medale na międzynarodowych targach wynalazków w Genewie i w Warszawie.

6.2.5. Napęd wrzeciona

Napęd wrzeciona (Rys. 51) hydrodynamicznego realizowany jest za pomocą silnika o specjalnym łożyskowaniu, sterowany serwonapędem. Obroty wrzeciona są kontrolowane za pomocą czujnika indukcyjnego i sygnał ten przekazywany jest do sterownika, który utrzymuje obroty na stałym poziomie 1800 obr/min ($\pm 1\%$) dla łożysk kulkowych. Silniki posadowione są na amortyzowanej płycie, a napęd przekazywany jest płaskimi paskami przeznaczonymi do takich aplikacji.



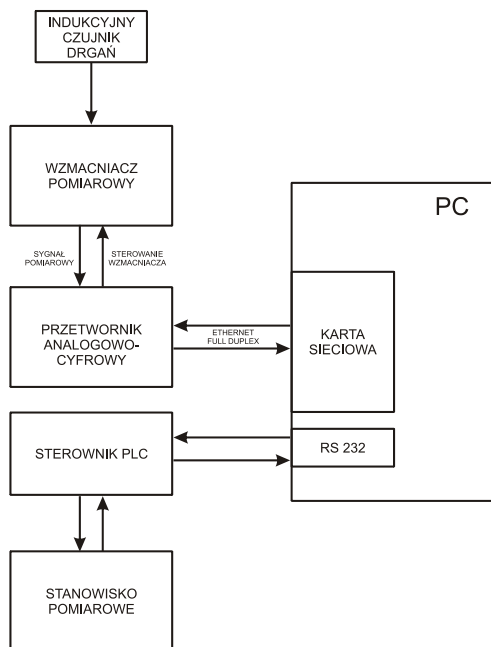
Rys. 51. Zespół napędu wrzeciona (projekt).

6.2.6. Zespół sterowania i oprogramowanie badawcze

Oprogramowanie przeznaczone dla systemów do pomiaru drgań generowanych przez łożyska toczne (zarówno kulkowe jak i stożkowe), ma za zadanie zbieranie sygnałów z czujnika drgań. Z uwagi na stosunkowo niewielką moc i podatność na zakłócenia tych sygnałów, muszą one być silnie wzmacniane, do wartości pozwalających na ich transformację i analizę w różnych wymaganych aspektach. Systemy wzmacniające muszą równocześnie identyfikować i odseparowywać zakłócenia z otoczenia, których wielkość może wielokrotnie przekraczać poziom interesujących nas sygnałów drganiowych. Do analizy musi trafić czysty sygnał, z którego odfiltrowano wszystko, co go nie dotyczy. Dlatego elektronika obrabiająca sygnały z pomiarów musi odpowiadać najwyższemu standardowi, gwarantującym możliwie najniższy poziom szumów własnych. Oprogramowanie badawcze obsługujące pomiary drgań musi bazować na odpowiednio wysokiej częstotliwości próbkowania, pozwalającej przy dokonywać analizy widma w wysokich pasmach częstotliwości. Efektem pracy tego oprogramowania ma być zarówno rzetelna ocena poziomu drgań badanych łożysk w trzech zakresach częstotliwości, jak również ocena wpływu poszczególnych elementów konstrukcyjnych łożyska na ten poziom. Nie mniej istotna jest również funkcja gromadzenia i analizy danych, pozwalająca na ich archiwizowanie, analizę i opracowywanie w formie sprawozdań.

6.2.6.1. Tor pomiarowy do badania drgań

Tor pomiarowy zawiera indukcyjny czujnik prędkościowy, wzmacniacz pomiarowy i przetwornik analogowo-cyfrowy. Komputer komunikuje się ze stanowiskiem pomiarowym za pośrednictwem sterownika PLC korzystając z portu szeregowego RS 232. Schemat blokowy toru przedstawiono na rysunku 52.



Rys. 52. Schemat blokowy toru pomiarowego.

6.2.6.2. Oprogramowanie badawcze do pomiarów drgań łożysk

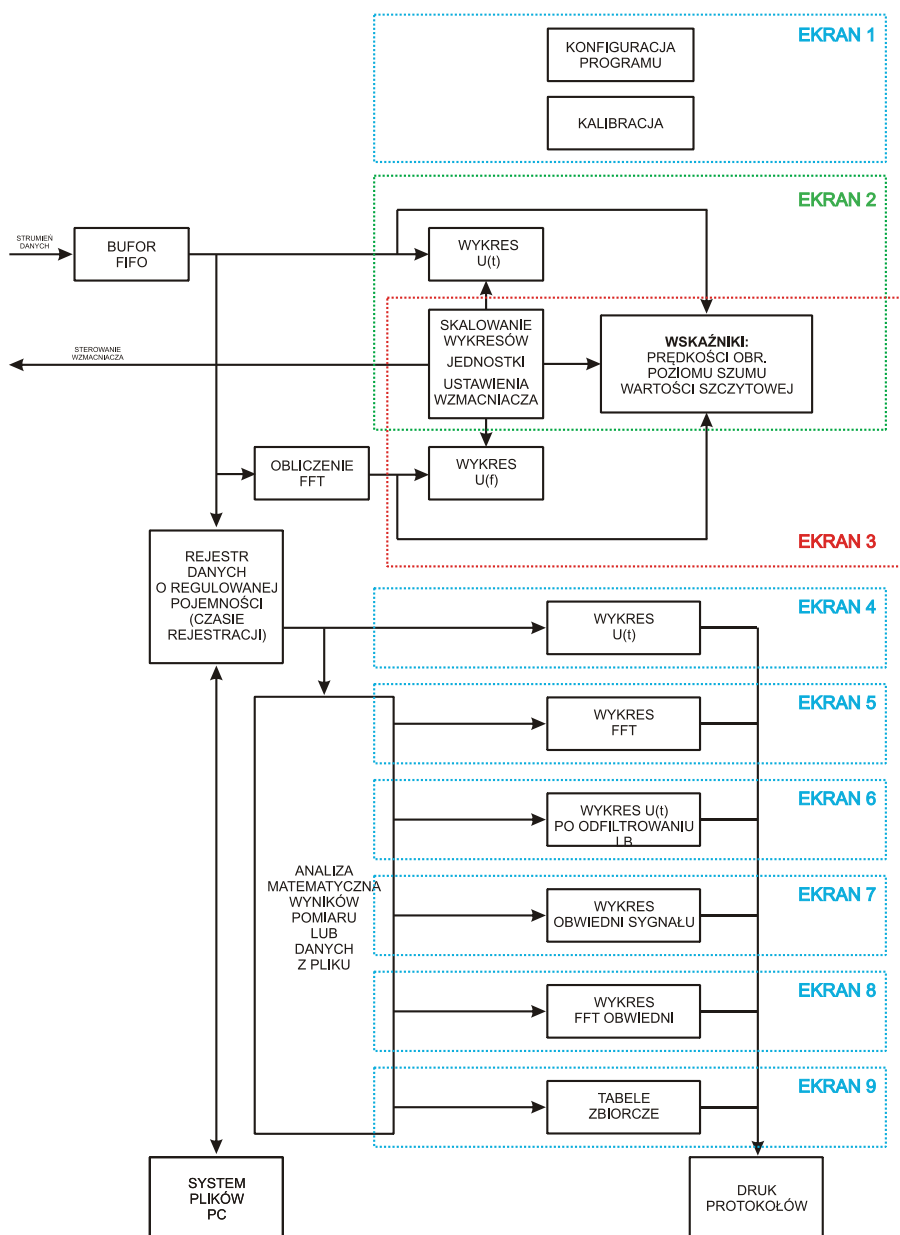
Oprogramowanie stworzono w środowisku *DELPHI*, wykorzystując biblioteki *Advantech DAQNav Device Drivers* oraz komponenty *SDL Component Suite* firmy Epina GmbH.

Istotne funkcje programu:

- konfiguracja programu,
- wprowadzenie typu badanego łożyska i parametrów z nim związanych,
- określenie pasm częstotliwości, dopuszczalnych wartości szumu,
- określenie trybu wykonywania pomiarów,
- kalibracja toru pomiarowego,
- bieżąca wizualizacja przebiegu drgań łożyska w czasie, widma drgań, wartości skutecznych, sygnalizacja przekroczenia wartości granicznych,

- rejestracja szumu w określonym przedziale czasowym, z możliwością zapisu w pliku,
- wykresy zarejestrowanego szumu i jego widma,
- wykresy obwiedni zarejestrowanego szumu i widma obwiedni,
- obliczenie i pokazanie na wykresach składowych szumu pochodzących od określonych elementów łożyska,
- wydruk protokołów z pomiarów.

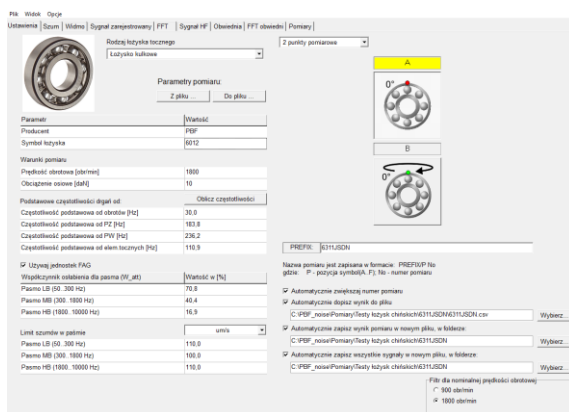
Strumień danych liczbowych jest na bieżąco poddawany procedurze szybkiej transformaty Fouriera (FFT), co umożliwia ciągłą obserwację widma szumów. Na podstawie widma wyznaczane są wartości skuteczne szumów w poszczególnych pasmach częstotliwości: dolnym (50 – 300 Hz), środkowym (300 – 1800 Hz), górnym (1800 – 10 000 Hz). Do obserwacji przebiegu czasowego szumu i do realizowanej w czasie rzeczywistym analizy Fouriera zastosowano częstotliwość próbkowania 25 600 Hz. W razie zaistnienia takiej potrzeby istnieje możliwość podniesienia tej częstotliwości do 125 kHz. Do bieżącej obserwacji widma zastosowano algorytm FFT wykorzystujący 2^{14} (16 384) próbek, zbieranych w czasie 0,64 s, co daje rozdzielczość wyświetlanego na monitorze widma równą 1,56 Hz. Przy analizie zarejestrowanego sygnału widmo jest wyznaczane na podstawie ilości próbek zgromadzonych w zadeklarowanym czasie rejestracji i tak na przykład dla czasu rejestracji 2,5 s FFT jest obliczana na podstawie 2^{16} (65 536) próbek, dając rozdzielczość wyznaczonego widma 0,4 Hz. Struktura oprogramowania przedstawiona jest na rysunku 53.



Rys. 53. Struktura oprogramowania

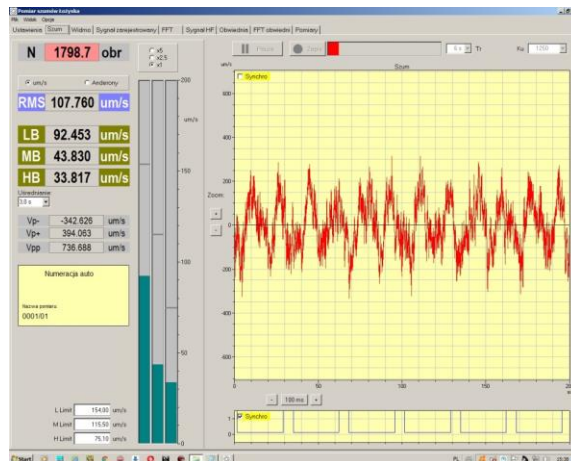
Program posiada kilka okien w formie zakładek:

- okno konfiguracyjne (Rys. 54) programu umożliwia:
 - zdefiniowanie podstawowych parametrów dla badanego typu łożyska,
 - zapisanie parametrów w pliku,
 - odczyt parametrów z pliku,
 - określenie procedury dla serii pomiarów.



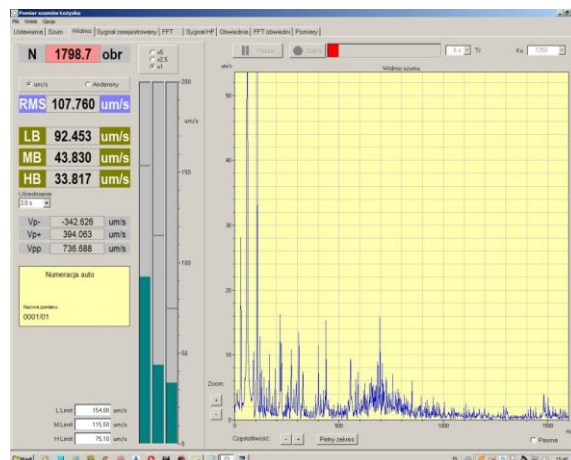
Rys. 54. Okno konfiguracyjne programu

- okno dla bieżącej obserwacji sygnału szumu (Rys. 55) w czasie umożliwia:
 - pomiar prędkości obrotowej łożyska,
 - ustawienie optymalnego zakresu pracy wzmacniacza pomiarowego,
 - zdefiniowanie dopuszczalnego poziomu szumów w zdefiniowanych pasmach częstotliwości,
 - ciągłą obserwację poziomu szumów w określonych pasmach częstotliwości,
 - zmianę skali wykresu – szum w funkcji czasu,
 - zdefiniowanie czasu rejestracji, uruchomienie rejestracji.



Rys. 55. Okno bieżącej obserwacji sygnału szumu w czasie

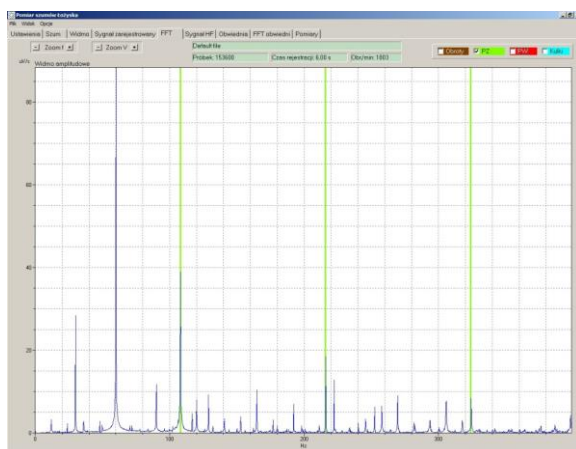
- okno dla bieżącej obserwacji widma szumu (Rys. 56), przy zachowaniu wszystkich możliwości, jakie posiada okno poprzednio omówione pozwala na bieżąco śledzić widmo szumu badanego łożyska.



Rys. 56. Okno dla bieżącej obserwacji widma szumu

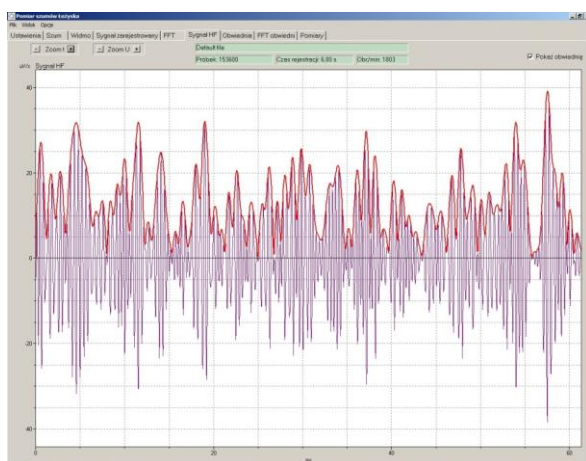
- okno dla analizy zarejestrowanego szumu (Rys. 57) pozwalają prześledzić przebieg sygnału szumu w czasie oraz jego widma w pełnym

zakresie badanych częstotliwości. Na wykresie widma można uaktywnić markery, pokazujące charakterystyczne dla danego typu łożyska częstotliwości drgań, związane z poszczególnymi elementami łożyska.



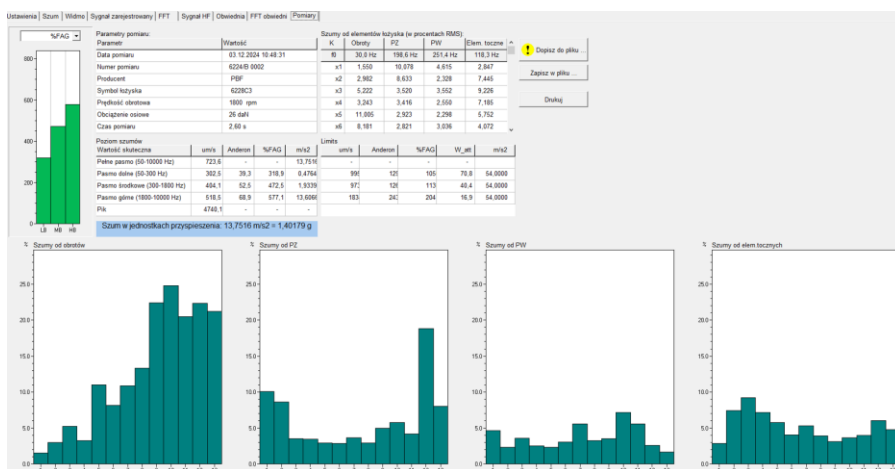
Rys. 57. Okno dla analizy zarejestrowanego szumu

- okna dla analizy zarejestrowanej obwiedni szumu (Rys. 58) umożliwiają analizę obwiedni sygnału szumu oraz jej widma.



Rys. 58. Okno dla analizy zarejestrowanej obwiedni szumu

- okno z wynikami analizy zarejestrowanego szumu (Rys. 59).



Rys. 59. Okno z wynikami analizy zarejestrowanego szumu

Forma protokołów z pomiarów, sposób archiwizacji i udostępniania wyników pomiarów w sieci jest dostosowany do wymogów użytkownika, ale ma możliwość dalszego rozwijania i modernizowania.

6.2.7. Konstrukcja nośna systemu i elementy amortyzacji

Efektywność i precyzja systemów przeznaczonych do pomiaru drgań są ściśle związane z ich zdolnością do minimalizacji wpływu zarówno drgań zewnętrznych, jak i wewnętrznych. Kluczowym aspektem w konstrukcji takich urządzeń jest zastosowanie odpowiednich elementów tłumiących, które nie tylko stabilizują pomiary, ale także chronią delikatne komponenty pomiarowe. Poniżej przedstawiono szczegółową analizę konstrukcji nośnej systemu, składającej się z dwóch ram wykonanych z profili stalowych oraz zastosowanych technologii i materiałów tłumiących drgania.

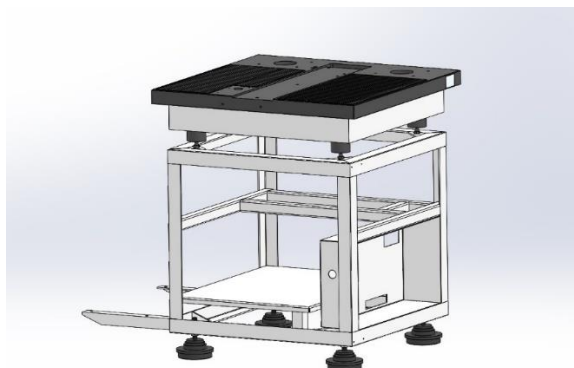
Konstrukcja nośna systemu pomiarowego składa się z dwóch głównych elementów: dolnej ramy nośnej oraz górnej ramy. Obie ramy wykonano z profili stalowych, które zapewniają wysoką wytrzymałość mechaniczną i sztywność całej konstrukcji. Stalowe profile są powszechnie stosowane w inżynierii mechanicznej ze względu na ich doskonałe właściwości mechaniczne, takie jak wysoka odporność na odkształcenia oraz zdolność do wytrzymywania obciążeń dynamicznych.

Dolna rama nośna wyposażona jest w amortyzatory, których głównym zadaniem jest tłumienie drgań pochodzących z otoczenia. Amortyzatory te wykonano z materiałów takich jak guma i elastomery, które są zdolne do efektywnego absorbowania oraz rozpraszania energii drgań zewnętrznych, mogących negatywnie wpływać na dokładność pomiarów. Dodatkowe amortyzatory umieszczono pomiędzy dolną a górną ramą, aby tłumić drgania wewnętrzne, generowane przez komponenty urządzenia podczas jego pracy. Drgania te mogą być wynikiem ruchu wrzeciona, głowicy pomiarowej lub innych ruchomych części systemu. Amortyzatory te, również wykonane z elastomerów, skutecznie redukują przenoszenie drgań między poszczególnymi elementami konstrukcji.

Górna rama jest połączona z płytą główną, która wykonana jest z żeliwa sferoidalnego. Żeliwo sferoidalne, ze względu na swoją unikalną strukturę wewnętrzną, charakteryzuje się doskonałymi właściwościami tłumiącymi. W porównaniu do stali, żeliwo sferoidalne ma wyższą zdolność do absorbowania i rozpraszania energii drgań, co czyni je idealnym materiałem w konstrukcjach wymagających wysokiej precyzji pomiarowej.

Konstrukcja nośna systemu do pomiaru drgań, zaprezentowana na rysunku 60, oparta na dwóch stalowych ramach i wykorzystująca zaawansowane technologie tłumienia, zapewnia wysoką stabilność i precyzję pomiarów. Strategicznie rozmieszczone amortyzatory skutecznie tłumią zarówno drgania zewnętrzne, jak i wewnętrzne, co jest kluczowe dla uzyskania dokładnych wyników pomiarowych. Dodatkowo, zastosowanie żeliwa sferoidalnego w płycie głównej oraz korpusach wrzeciona i głowicy

pomiarowej zwiększa zdolność do tłumienia drgań, minimalizując ich wpływ na precyzję pomiarów. Dzięki tak przemyślanej konstrukcji, systemy do pomiaru drgań mogą efektywnie realizować swoje zadania, zapewniając niezawodne i precyzyjne wyniki w różnych zastosowaniach przemysłowych i badawczych.



Rys. 60. Zespół ramy z amortyzatorami

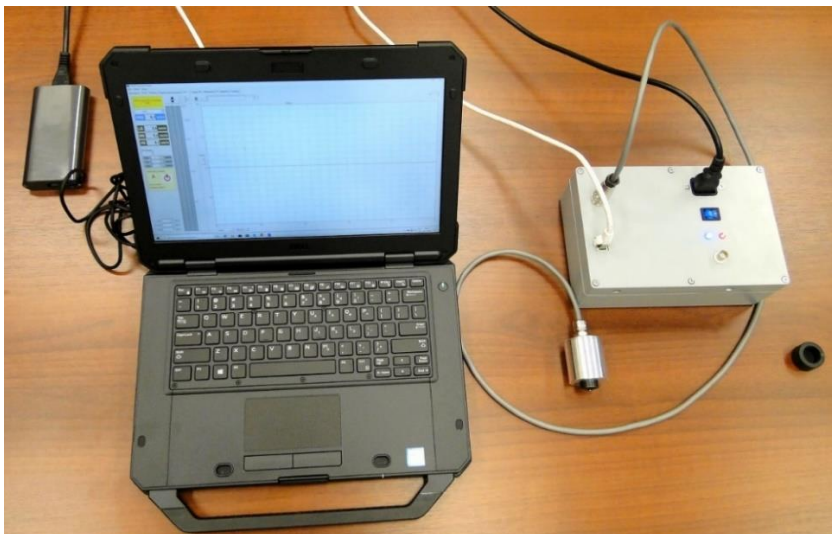
7. PRZENOŚNY SYSTEM DO OCENY POZIOMU DRGAŃ ŁOŻYSK

Potrzeba budowy elektronicznego systemu analizatora drgań, do prowadzenia testów porównawczych przy użyciu zróżnicowanych algorytmów obliczeń i metod oceny, wynikała z powodu rosnącej ilości specyficznych wymagań niektórych odbiorców w zakresie badania jakości zamawianych łożysk. Odbiorcy ci, opierający swe wymagania na wytycznych otrzymanych od swoich klientów bądź dysponujący nietypowym wyposażeniem badawczym, żądają przeprowadzania testów zgodnie z wymaganiami, których spełnienie wymaga specjalnego wyposażenia. Badania takie wykonywane są na stanowiskach, wyposażonych w unikalną elektronikę i oprogramowanie. Dane z nich otrzymywane są nieporównywalne z uzyskiwanymi przy użyciu standardów stosowanych w branży łożyskowej, a ich przeliczanie (z uwagi na sposób przetwarzania danych, uniemożliwiający powrót do surowych danych wejściowych) jest niewykonalne. Z powyższych względów niemożliwe jest używanie tych systemów do pomiarów dla innych klientów, oczekujących oceny łożysk według kryteriów wyrażonych w innych jednostkach.

Z uwagi na rosnącą w okresie ostatnich lat liczbę odbiorców, stawiających specyficzne wymagania w zakresie sposobu oceny poziomu drgań, stwarzające poważne problemy techniczne i organizacyjne, najrozsądniej było doposażyć fabrykę w specjalny elektroniczny system pomiarowy. System ten jest możliwy do wykorzystania na każdym z urządzeń funkcjonującym w oparciu o prędkościowe czujniki drgań i wyposażony w oprogramowanie pozwalające na analizę i opracowywanie wyników w różnych jednostkach, bazując na tych samych surowych danych wejściowych zebranych podczas pomiarów. Systemy takie nie są dostępne na rynku, dlatego został zaprojektowany i wykonany.

Elementy systemu połączone w zestaw gotowy do pracy na stanowisku badawczym przedstawiono na rysunku 61. Tak przygotowany

system, po zainstalowaniu czujnika w uchwycie głowicy szumomierza, na którym ma pracować jest gotowy do użytku.

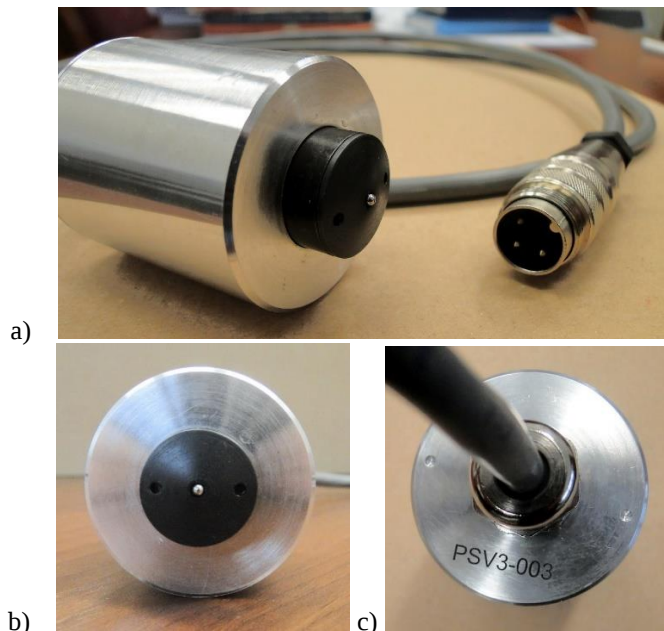


Rys. 61. Skompletowany system gotowy do pracy

7.1. Budowa przenośnego systemu do oceny poziomu drgań łóżysk

7.1.1. Czujnik pomiarowy

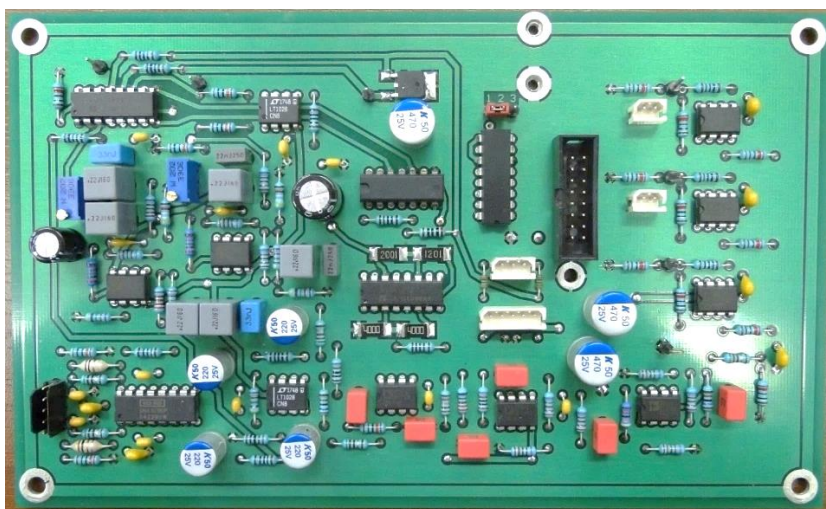
W urządzeniu zastosowano czujnik pomiarowy podobny do używanego w stanowisku do pomiarów drgań MDL-54. Konstrukcja czujnika została zmodernizowana, by mogła spełniać wysokie standardy jakościowe. Ostateczna wersja konstrukcji przedstawiona została na rysunku 62.



Rys. 62. Czujnik pomiarowy: a) z wtykiem, b) widok z przodu, c) widok z tyłu.

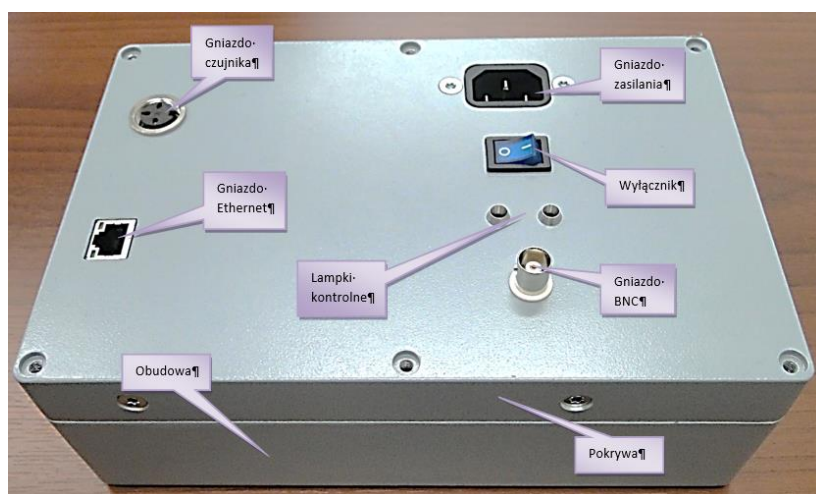
7.1.2. Zespół wzmacniacza sygnału pomiarowego

Wzmacniacz sygnału pomiarowego musi spełniać wysokie kryteria jakościowe, na tym samym poziomie co zastosowany w stanowisku do pomiarów drgań zrealizowanych w ramach projektu. Podstawowy zespół wzmacniacza zastosowano taki sam jak w stanowisku MDL-54, z niewielkimi adaptacjami (Rys. 63). Z uwagi jednak na potrzebę zmniejszenia masy i wymiarów urządzenia, które powinno ze względów praktycznych mieć charakter przenośny, zastosowano zaadaptowane dla potrzeb tego urządzenia moduły AD CPU karty sieciowej i przetwornika SAR oraz zasilacza.



Rys. 63. Wzmacniacz sygnału pomiarowego

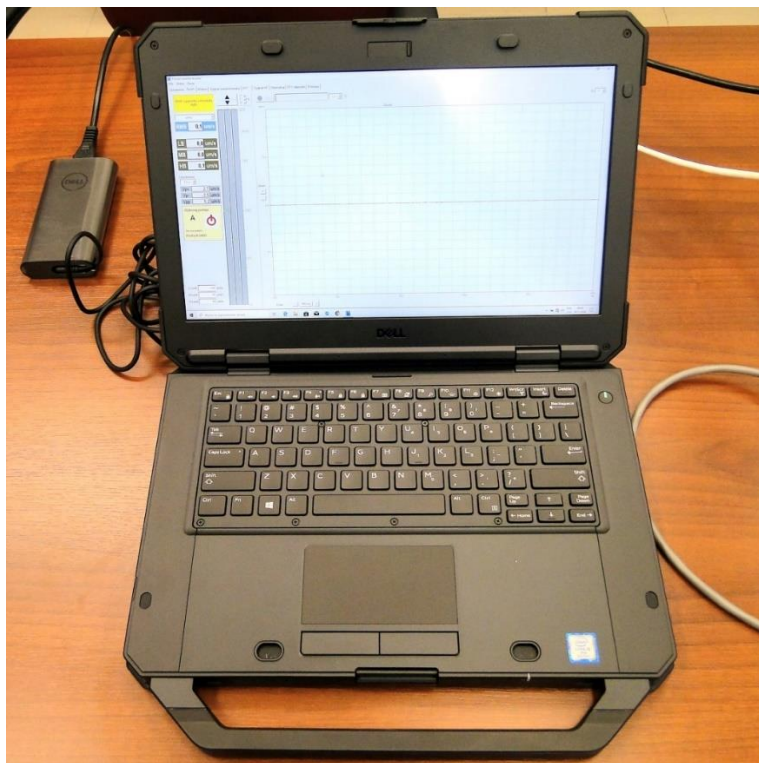
Całość zespołu zamontowano w obudowie aluminiowej, na podwieszanej do pokrywy konstrukcji opartej na płycie montażowej, umożliwiającej serwisowanie go po wyjęciu z pudła obudowy. Zmontowany zespół wzmacniacza sygnału pomiarowego, przedstawiono na rysunku 64.



Rys. 64. Zespół wzmacniacza pomiarowego – widok ogólny

7.2. Jednostka centralna i oprogramowanie

Jednostkę centralną stanowi laptop DELL RUGGET 5420 IPS FHD 14 wyposażony w procesor Intel Core i5-8350U, pamięć operacyjną 16GB oraz dysk 1TB SSD. Komputer ten wykonany jest w wersji wzmocnionej, przeznaczonej do pracy w trudnych warunkach otoczenia (Rys. 65).

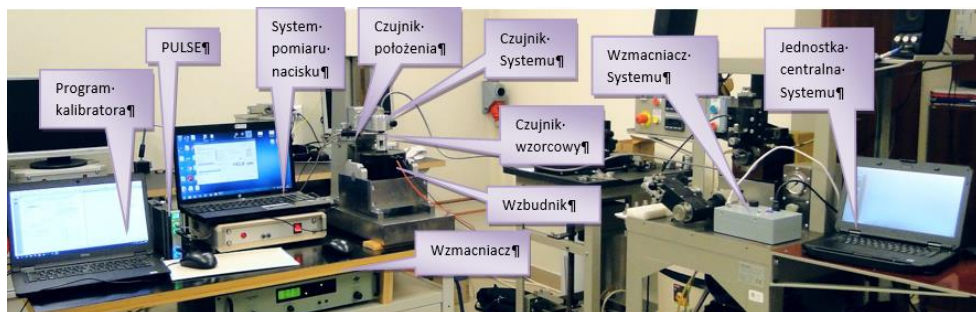


Rys. 65. Jednostka centralna, komputer DELL RUGGET 5420

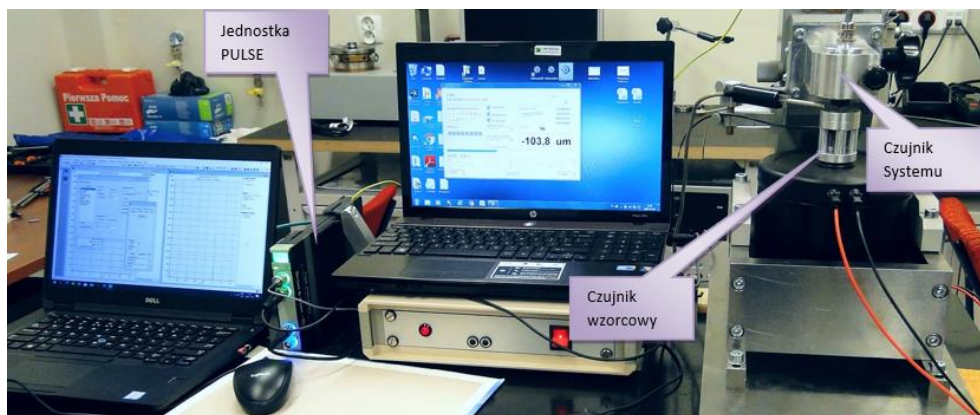
W komputerze zaimplementowano oprogramowanie „PBF NOISE”, zastosowane w systemach do pomiaru drgań MDL-54, w wersji przystosowanej do zadań jakie ma spełniać system.

7.3. Kalibracja systemu

Jak każde urządzenie pomiarowe, elektroniczny system analizatora drgań musi być zgodnie z księgą wzorcowania, systematycznie kalibrowany. Na rysunkach 66 i 67 przedstawiono warunki prowadzenia procesu kalibracji dla przedmiotowego zestawu.



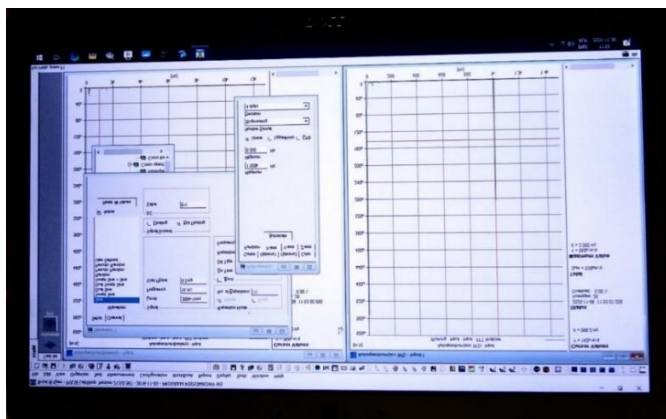
Rys. 66. System analizatora drgań podczas kalibracji



Rys. 67. Zestaw kalibracyjny firmy Brüel & Kjaer z zestawem do pomiaru położenia

Na rysunku 68 przedstawione jest przykładowe okno programu obsługi generatora drgań firmy Brüel&Kjaer, natomiast na rysunku 69 przedstawione są świadectwa legalizacji szumomierza oraz czujnika pomiarowego typu SG 4.X. Tylko czujniki poddane kalibracji mogą być

wykorzystywane w pracy do kontroli poziomu drgań łożysk. Sposób obsługi urządzenia i kalibracji czujników opisany jest instrukcji [13] będącej w posiadaniu firmy FŁT Kraśnik S.A.



Rys. 68. Okno programu obsługi generatora drgań firmy Brüel & Kjaer



a)



b)

Rys. 69. Świadczenia legalizacji: a) szumomierza; b) czujnika pomiarowego typu SG 4.X

8. WSTĘPNE TESTY SYSTEMU (STANOWISKA) POMIAROWEGO

Stanowisko pomiarowe MDL-54 zostało poddane weryfikacji, mającej na celu ocenę jego poprawności działania. W ramach tego procesu przeprowadzono testy porównawcze na łożysku kulkowym typu 6208. Aby zagwarantować obiektywność i wiarygodność wyników, jako system odniesienia wykorzystano urządzenie MVH-200C firmy SKF, użytkowane w laboratorium FLT Kraśnik S.A.

Celem badań było sprawdzenie czy stanowisko pomiarowe MDL-54 dostarcza wyniki porównywalne z wynikami uzyskanymi za pomocą urządzenia MVH-200C. Proces weryfikacji obejmował szczegółową analizę statystyczną danych, zebranych podczas dwóch etapów pomiarów. Pierwszy etap koncentrował się na analizie drgań pojedynczego łożyska, podczas gdy drugi etap obejmował badanie drgań 51 różnych łożysk tego samego typu.

W pierwszym etapie badań przeprowadzono 51 pomiarów drgań jednego łożyska typu 6208. Taka liczba powtórzeń pozwoliła na dokładne określenie podstawowych parametrów statystycznych, takich jak średnia arytmetyczna, odchylenie średnie kwadratowe oraz rozstęp.

Średnia arytmetyczna, obliczana jako suma wszystkich wartości pomiarów podzielona przez ich liczbę, stanowi podstawowy wskaźnik centralnej tendencji danych, dający ogólne pojęcie o przeciętnej wartości drgań łożyska. Odchylenie średnie kwadratowe, zwane również standardowym odchyleniem, jest miarą rozproszenia wyników wokół średniej arytmetycznej. Wysoka wartość tej miary wskazuje na dużą zmienność pomiarów, podczas gdy niska sugeruje, że wyniki są blisko siebie i średniej. Rozstęp, definiowany jako różnica między najwyższą a najniższą wartością w zestawie danych, jest najprostszą miarą zmienności, choć nie uwzględnia wewnętrznego rozkładu wyników.

Drugi etap badań skupiał się na analizie drgań 51 różnych łożysk typu 6208. Głównym celem tego etapu było nie tylko porównanie wyników

uzyskanych za pomocą MDL-54 i MVH-200C, ale również ocena precyzji i niezawodności obu systemów pomiarowych. W tym etapie zastosowano metody statystyczne, takie jak testy porównania średnich i wariancji, współczynnik korelacji Pearsona oraz współczynnik dokładności analizowanych metod DP.

Test porównania średnich (t-test) umożliwia ocenę czy różnice między średnimi wartościami drgań uzyskanymi za pomocą dwóch systemów są statystycznie istotne. Przeprowadzenie tego testu pozwala stwierdzić, czy różnice w wynikach są przypadkowe, czy mają istotne znaczenie. Test porównania wariancji (F-test) z kolei sprawdza, czy zmienność wyników uzyskanych za pomocą dwóch systemów jest porównywalna, co pozwala ocenić, czy jeden z systemów cechuje się wyższą precyzją niż drugie.

Współczynnik korelacji Pearsona mierzy siłę i kierunek liniowej zależności między wynikami uzyskanymi za pomocą MDL-54 i MVH-200C. Wartość bliska 1 wskazuje na silną dodatnią korelację, co oznacza, że oba urządzenia dostarczają bardzo podobne wyniki. Natomiast wartość bliska -1 oznacza silną ujemną korelację, a wartość bliska 0 sugeruje brak istotnej zależności liniowej.

Współczynnik dokładności DP jest miarą precyzji stanowiska MDL-54 w porównaniu do wyników referencyjnych uzyskanych za pomocą MVH-200C. Ten wskaźnik jest kluczowy dla oceny ogólnej wiarygodności i precyzji MDL-54.

Podsumowując, przeprowadzone testy dostarczyły istotnych danych na temat działania stanowiska MDL-54, umożliwiając jego ocenę w kontekście dokładności, precyzji i zgodności z systemem referencyjnym MVH-200C. Wyniki badań mogą posłużyć jako podstawa do dalszych modyfikacji i optymalizacji stanowiska, w celu zapewnienia jego jeszcze wyższej efektywności w zastosowaniach przemysłowych.

$$DP = |\bar{w}_{\Delta Z} \pm k_p s|_{max} \quad (20)$$

Gdzie:

k_p – współczynnik rozszerzenia ($P=0,95$) określony z tablic rozkładu normalnego, s – odchylenie średnie błędu pomiaru, $\bar{w}_{\Delta Z}$ – średni eksperymentalny względny błąd pomiaru dla porównywalnych przyrządów.

$$\bar{w}_{\Delta Z} = \frac{\Delta Z_{pi} - \Delta Z_{aj}}{\Delta Z_{aj}} \quad (21)$$

Gdzie:

ΔZ_{pi} – wartość skuteczna drgań kolejnego łożyska dla danego pasma częstotliwości, otrzymana dla systemu badanego, ΔZ_{aj} – wartość skuteczna drgań kolejnego łożyska dla tego samego pasma częstotliwości, otrzymana dla systemu wzorcowego.

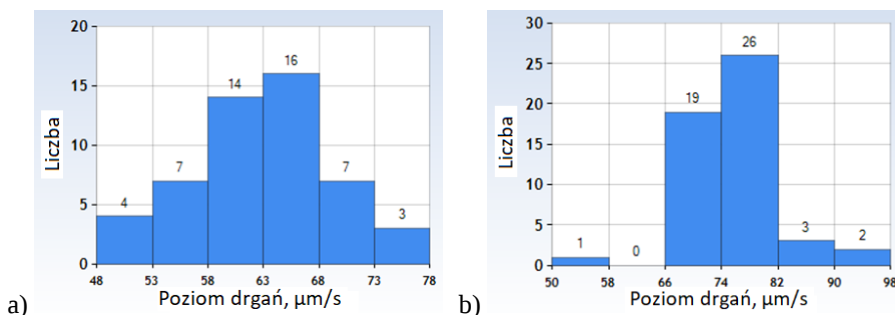
Dostępne narzędzia statystyczne oprócz określenia indywidualnych cech rozkładu serii pomiarowej dla każdego systemu pomiarowego, pozwalają też na wykonanie testów porównawczych takich jak średnia arytmetyczna czy wariancja, pomiędzy najważniejszymi parametrami tych rozkładów.

Test porównania wartości średnich z dwóch populacji opiera się na wyborze jednej z dwóch hipotez. Hipoteza zerowa H_0 mówi, że nie ma podstaw by stwierdzić, iż rozpatrywane średnie arytmetyczne dwóch serii pomiarowych różnią się od siebie w sposób istotny (różnica błędów jest przypadkowa). Natomiast hipoteza alternatywna H_1 stwierdza, że otrzymane średnie dwóch serii różnią się od siebie w sposób istotny (co oznacza błąd systematyczny). Wybór hipotezy podejmujemy na podstawie porównania otrzymanej wartości U z wartością U_{kr} dobraną na podstawie przyjętego poziomu prawdopodobieństwa z tablic rozkładu normalnego. Jeżeli $U < U_{kr}$ wówczas prawdziwa jest H_0 , natomiast jeśli $U \geq U_{kr}$ wybieramy H_1 .

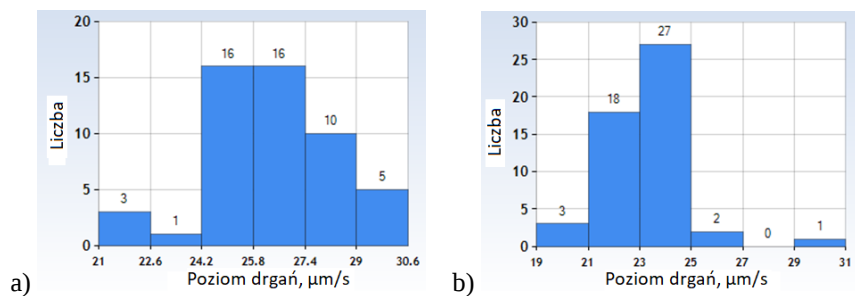
Test porównania wariancji z dwóch populacji o rozkładach normalnych opiera się na wyborze jednej z dwóch hipotez. Hipoteza zerowa H_0 mówi, że nie ma podstaw by stwierdzić, że rozpatrywane wariancje dwóch serii pomiarowych różnią się od siebie w sposób istotny (różnica błędów jest przypadkowa). Natomiast hipoteza alternatywna H_1 stwierdza, że otrzymane wariancje dwóch serii różnią się od siebie w sposób istotny (co oznacza błąd systematyczny). Wybór hipotezy podejmujemy na podstawie porównania otrzymanej wartości statystyki F z wartością F_{kr} dobraną z tablic F-Snedecora na podstawie przyjętego poziomu prawdopodobieństwa i liczby stopni swobody wynikającej z ilości pomiarów w każdej z serii. Jeżeli $F < F_{kr}$ wówczas prawdziwa jest H_0 , natomiast jeśli $F \geq F_{kr}$ wybieramy hipotezę H_1 .

Wyniki pomiarów podzielone są na trzy analizowane pasma częstotliwości: pasmo niskich częstotliwości (LB), pasmo średnich częstotliwości (MB) oraz pasmo wysokich częstotliwości (HB).

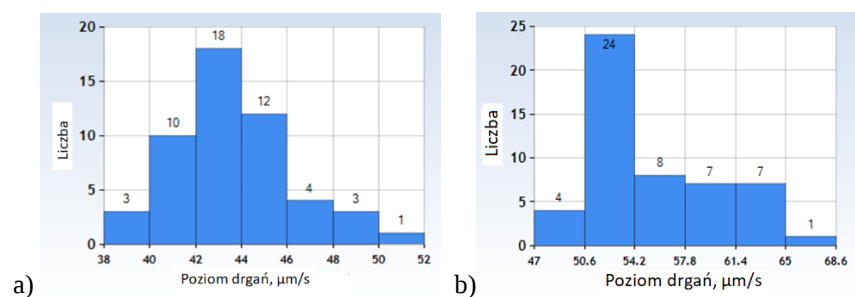
Histogramy pierwszego etapu pomiarów przedstawione na rysunku 70, 71 i 72.



Rys. 70. Histogram dla pasma niskich częstotliwości: a) MDL-54, b) MVH-200C

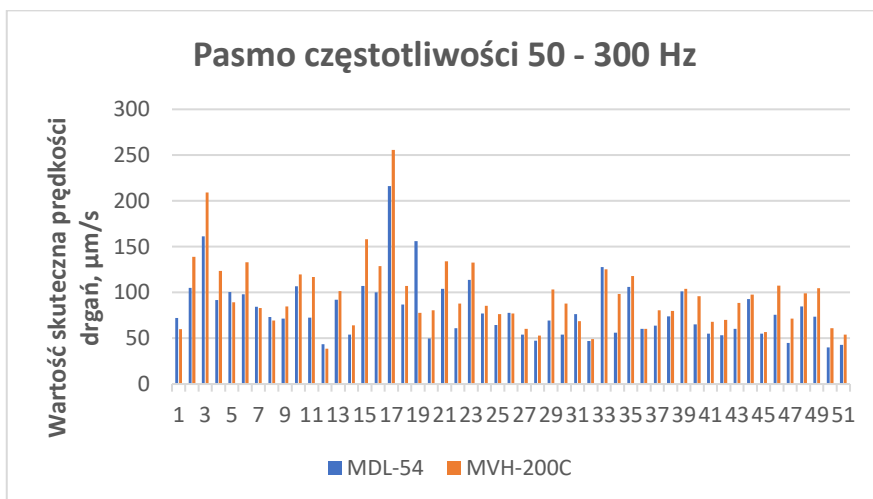


Rys. 71. Histogram dla pasma średnich częstotliwości: a) MDL-54, b) MVH-200C

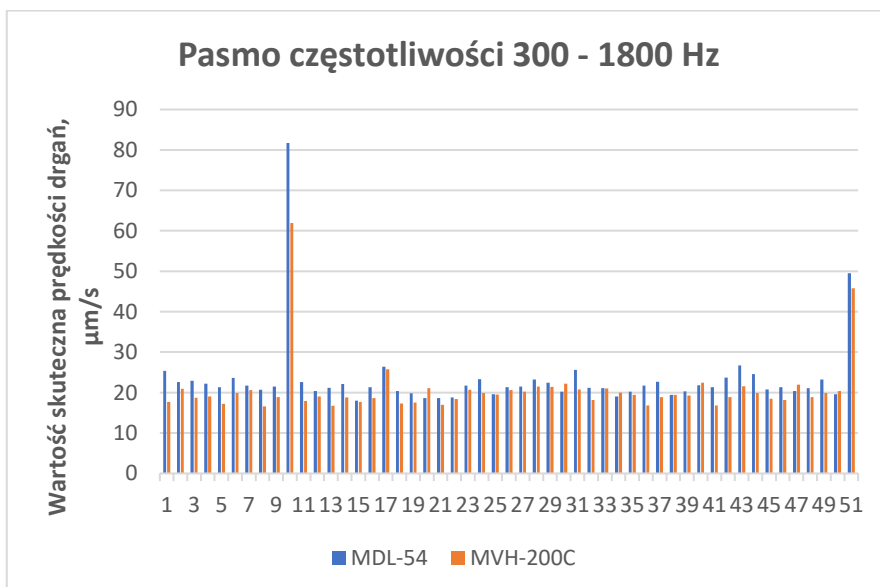


Rys. 72. Histogram dla pasma wysokich częstotliwości: a) MDL-54, b) MVH-200C

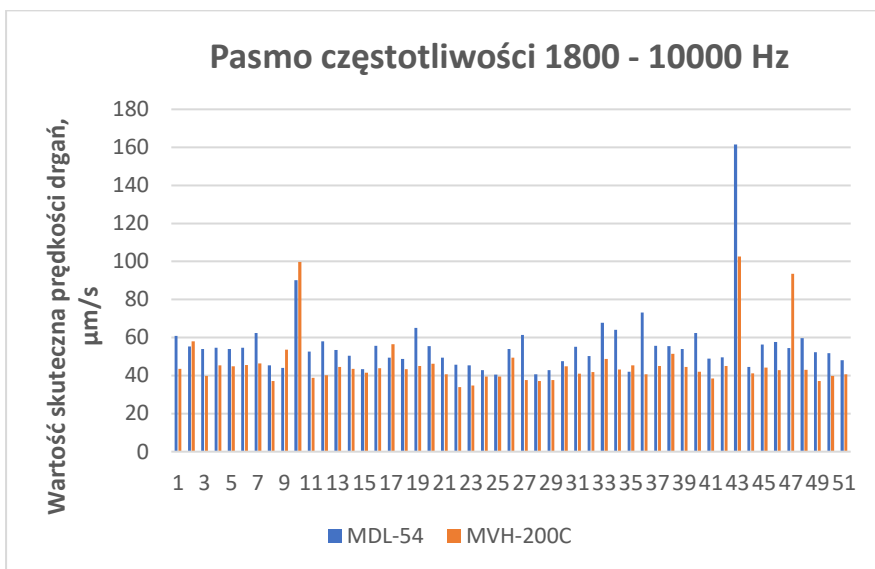
Rysunki 73, 74 i 75 przedstawiają drugi etap badań, czyli pomiar 51 łożysk na dwóch systemach pomiarowych, systemie badanym MDL-54 i systemie referencyjnym MVH-200C.



Rys. 73. Wykres słupkowy wyników pomiarów serii łożysk uzyskanych za pomocą systemu badanego i referencyjnego w niskim paśmie częstotliwości 50 – 300 Hz



Rys. 74. Wykres słupkowy wyników pomiarów serii łożysk uzyskanych za pomocą systemu badanego i referencyjnego w średnim paśmie częstotliwości 300 – 1800 Hz



Rys. 75. Wykres słupkowy wyników pomiarów serii łożysk uzyskanych za pomocą systemu badanego i referencyjnego w wysokim paśmie częstotliwości 1800 – 10000 Hz.

Wyniki analiz przedstawiono w tabelach 1, 2 i 3.

Tabela 1. Wyniki analizy porównawczej w paśmie częstotliwości 50-300 Hz

System pomiarowy	MDL-54	MVG-200C
Liczność pomiarów	51	
Średnia arytmetyczna, $\mu\text{m/s}$	62,86	75,23
Błąd średni kwadratowy pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$	6,11	6,19
Wartość minimalna, $\mu\text{m/s}$	48,8	52,7
Wartość maksymalna, $\mu\text{m/s}$	73,8	93,7
Rozstęp, $\mu\text{m/s}$	25,0	41,0
Ostateczny wynik pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$ ($p=0,95$)	$62,86 \pm 11,98$	$75,23 \pm 12,14$
Test porównania średnich, statystyka U; U_{kr}	-1,23; 1,96	
Test porównania wariancji, statystyka F; F_{kr}	1,01; 1,6	
Współczynnik korelacji Pearsona	0,84	
Dokładność pomiarowa DP, %	57,35%	

Tabela 2. Wyniki analizy porównawczej w paśmie częstotliwości 300-1800 Hz

System pomiarowy	MDL-54	MVG-200C
Liczność pomiarów	51	
Średnia arytmetyczna, $\mu\text{m/s}$	26,37	23,17
Błąd średni kwadratowy pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$	1,9	1,61
Wartość minimalna, $\mu\text{m/s}$	21,2	19,8
Wartość maksymalna, $\mu\text{m/s}$	30,0	29,7
Rozstęp, $\mu\text{m/s}$	8,8	9,9
Ostateczny wynik pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$ ($p=0,95$)	26,37 $\pm$ 3,71	23,17 $\pm$ 3,14
Test porównania średnich, statystyka U; U_{kr}	0,79; 1,96	
Test porównania wariancji, statystyka F; F_{kr}	1,39; 1,6	
Współczynnik korelacji Pearsona	0,96	
Dokładność pomiarowa DP, %	35,13%	

Tabela 3. Wyniki analizy porównawczej w paśmie częstotliwości 1800-10000 Hz

System pomiarowy	MDL-54	MVG-200C
Liczność pomiarów	51	
Średnia arytmetyczna, $\mu\text{m/s}$	43,52	55,33
Błąd średni kwadratowy pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$	2,5	4,75
Wartość minimalna, $\mu\text{m/s}$	38,7	47,9
Wartość maksymalna, $\mu\text{m/s}$	50,7	66,8
Rozstęp, $\mu\text{m/s}$	12,0	18,9
Ostateczny wynik pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$ ($p=0,95$)	43,52 $\pm$ 4,88	55,33 $\pm$ 9,26
Test porównania średnich, statystyka U; U_{kr}	-1,37; 1,96	
Test porównania wariancji, statystyka F; F_{kr}	3,59; 1,6	
Współczynnik korelacji Pearsona	0,70	
Dokładność pomiarowa DP, %	64,13%	

Przeprowadzone badania pozwalają wysunąć następujące spostrzeżenia.

Otrzymane średnie arytmetyczne są zbliżone. W paśmie średnich częstotliwości średnie arytmetyczne są bardzo do siebie zbliżone i nie różnią się od siebie w istotny sposób (różnica wynika z błędów przypadkowych). Natomiast w pozostałych zakresach pasm częstotliwości (czyli w zakresie pasma niskiego i wysokiego) różnice te są większe, ale generalnie sytuacja jest podobna jak w paśmie średnim. Oznacza to, że wskazania nowoprojektowanego przyrządu pomiarowego są zgodne ze wskazaniami przyrządu referencyjnego.

Test porównania wariancji wykazał, że w dwóch pasmach częstotliwości (niskim i średnim paśmie częstotliwości) różnica otrzymanych wariancji jest nieistotna. Natomiast w wysokim paśmie częstotliwości różnica wariancji jest zdecydowana, co może świadczyć o istnieniu znaczącego błędu systematycznego.

Obliczony współczynnik korelacji Pearsona dla wyników uzyskanych we wszystkich zakresach częstotliwości jest dodatni i bardzo silny.

Dokładność analizowanych metod pomiarowych DP w paśmie średnich częstotliwości jest na poziomie 35%. W paśmie niskich i wysokich częstotliwości dokładność DP jest zbliżona do siebie na poziomie w granicach $60\% \pm 4\%$. Dokładność DP dynamicznych systemów pomiarowych mieszczącą się w granicach do 30% należy uznać za bardzo dobre, natomiast DP w zakresie 30%-50% pozwala warunkowo dopuścić urządzenie do pomiaru poziomemu drgań łożysk.

Rezultaty badań analizowanego systemu pomiarowego są niezadawalające i system ten należy poddać kolejnym testom.

W celu upewnienie się co do przyczyn rozbieżności wyników należy przeprowadzić następujące działania:

- przeprowadzić badania na większej ilości systemów pomiarowych;

- zbadać wpływ różnic w konstrukcji systemów pomiarowych i dokonać oceny możliwości wprowadzenia korekt minimalizujących ich wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów;
- wybrać najlepszy system referencyjny do przeprowadzenia badań porównawczych i opracowanie ewentualnych współczynników korekcyjnych dla porównywalnych stanowisk pomiarowych;
- spróbować określić poziom drgań tła, który może wpływać na ostateczny wynik pomiaru poziomu drgań generowanych przez łożyska toczne.

9. STATYSTYCZNE BADANIA PORÓWNAWCZE SYSTEMÓW POMIAROWYCH

9.1. Charakterystyki badanych systemów

Porównanie wyników pomiarów drgań łożysk na różnych systemach pomiarowych jest trudne z kilku powodów. Nie ma łożysk wzorcowych, które określałyby poziom drgań generowanych przez łożysko i na tej podstawie moglibyśmy określić jakość systemu pomiarowego. Nie ma również wzorcowych systemów pomiarowych, za pomocą których można by było zmierzyć łożysko z dużą dokładnością i mieć możliwość porównania różnych systemów pomiarowych. Z tego powodu, obecnie w firmie FŁT Kraśnik, kontrola poprawności pracy systemów pomiarowych polega na: kontroli toru pomiarowego, kalibracji czujnika pomiarowego, pomiaru bicia wrzeciona i trzpienia pomiarowego oraz ogólnego poprawnego stanu technicznego systemu. Z tych powodów (brak wzorcowych łożysk i systemów pomiarowych) przeprowadzono badania, które pozwolą wskazać system wzorcowy. Ponadto badania łożysk przeprowadza się trzech pasmach częstotliwości: niskim paśmie częstotliwości (LB) w zakresie 50 – 300 Hz, średnim paśmie częstotliwości (MB) w zakresie 300 – 1800 Hz oraz wysokim paśmie częstotliwości (HB) w zakresie 1800 – 10000 Hz. Do oceny poprawnej pracy łożysk analizowane są wyniki z każdego pasma częstotliwości oddzielnie.

Badaniom zostały poddane cztery systemy pomiarowe drgań łożysk tocznych. Jest to system pomiarowy MDL-54, dwa inne systemy używane przez FŁT Kraśnik: MGG-11, GPW-8 oraz urządzenie STPPD będące na wyposażeniu laboratorium badawczym Politechniki Świętokrzyskiej. Wszystkie te systemy pomiarowe mają dwie cechy wspólne. We wszystkich tych systemach można zamocować ten sam czujnik pomiaru drgań oraz ten sam trzpień pomiarowy we wrzecionie obrotowym do mocowania łożysk. Opis porównywanych systemów pomiarowych przedstawiono poniżej.

System pomiarowy MDL-54: Wrzeciono tego systemu ma oś poziomą i jest łożyskowane hydrodynamicznie. Docisk łożyska realizowany jest za pomocą siłownika elektrycznego, umocowanego w osi badanego łożyska. Opatentowany systemem docisku [P2] zapewnia stabilny i elastyczny trójpunktowy docisk osiowy. Napęd usytuowany jest z tyłu systemu, niezbyt daleko od wrzeciona a obroty przekazywane są za pomocą płaskiego paska średniej długości. Czujnik pomiarowy zamocowany jest w ruchomym podzespole, który powoduje, że czujnik jest dostawiany do badanego łożyska tylko podczas pomiaru. Natomiast podczas podania i zdjęcia łożyska z trzpienia czujnik jest odstawiany. Ma to tę zaletę, że nie ulegnie uszkodzeniu przy pomiarze łożysk, które mają np. kanałek na pierścieniu zewnętrznym. Sygnał pomiarowy przetwarzany jest cyfrowo, posiada możliwość elektronicznych ustawień urządzenia, cyfrowego zapisu pomiarów oraz wizualizacji sygnału.

System pomiarowy MGG-11: Wrzeciono ma oś poziomą, łożyskowaną hydrodynamicznie. Docisk łożyska realizowany jest za pomocą siłownika pneumatycznego, zamocowanego na uchylnym ramieniu. Współosiowość trójpunktowego docisku występuje wyłącznie na czas pomiaru. Napęd umiejscowiony jest z tyłu obok wrzeciona, a obroty przekazywane są za pomocą krótkiego płaskiego paska. Czujnik pomiarowy mocowany jest nieruchomo w oprawie nad badanym łożyskiem. Ustawianie siły docisku jest analogowe. Natomiast sygnał pomiarowy przetwarzany jest cyfrowo, posiada możliwość elektronicznych ustawień oraz zapisu pomiarów.

System pomiarowy GPW-8: Wrzeciono ma oś poziomą, łożyskowaną hydrodynamicznie. Docisk łożyska realizowany jest za pomocą siłownika pneumatycznego, zamocowanego na uchylnym ramieniu. Współosiowość trójpunktowego docisku występuje wyłącznie na czas pomiaru. Napęd umiejscowiony jest z tyłu wrzeciona, na dolnej ramie korpusu urządzenia, a obroty przekazywane są za pomocą długiego płaskiego paska. Czujnik pomiarowy mocowany jest nieruchomo w oprawie nad badanym łożyskiem. Ustawianie siły docisku jest analogowe. Sygnał pomiarowy przetwarzany jest cyfrowo, a wizualizacja polega jedynie na

przedstawieniu wyniku pomiaru w postaci wykresu słupkowego i cyfrowego.

System pomiarowy STPPD: Wrzeczono ma oś poziomą, łożyskowaną hydrodynamicznie. Docisk łożyska realizowany jest za pomocą siłownika pneumatycznego, zamocowanego na uchylnym ramieniu. Współosiowość trójpunktowego docisku występuje wyłącznie na czas pomiaru. Napęd umiejscowiony jest z tyłu wrzeciona, na dolnej ramie korpusu urządzenia, a obroty przekazywane są za pomocą długiego płaskiego paska. Czujnik pomiarowy mocowany jest nieruchomo w oprawie nad badanym łożyskiem. Ustawianie siły docisku jest analogowe. Sygnał pomiarowy przetwarzany jest cyfrowo, posiada możliwość elektronicznych ustawień urządzenia, cyfrowego zapisu pomiarów oraz wizualizacji sygnału.

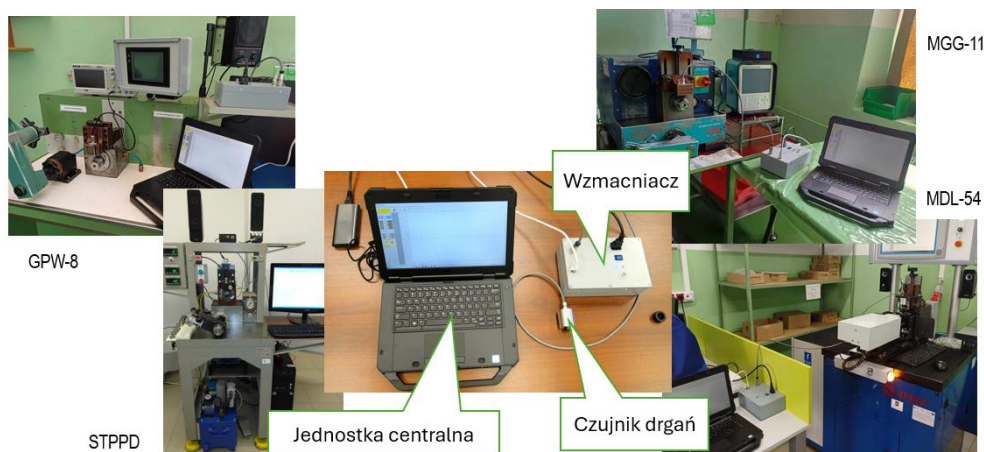
Podstawowe informacje dotyczące systemów pomiarowych przedstawia tabela 4.

Tabela 4. Charakterystyka systemów pomiarowych

Podzespól		MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
Wrzeczono		hydrodynamiczne	hydrodynamiczne	hydrodynamiczne	Hydrodynamiczne
Docisk	Typ	elektryczny, współosiowy	pneumatyczny, uchylny przegub	pneumatyczny, uchylny przegub	pneumatyczny, uchylny przegub
	Styk	trójpunktowy	trójpunktowy	trójpunktowy	trójpunktowy
Czujnik		ruchomy	nieruchomy	nieruchomy	nieruchomy
Przetwarzanie sygnału		cyfrowe	analogowo - cyfrowe	analogowo - cyfrowe	analogowo – cyfrowe

Przedstawione powyżej systemy pomiarowe zostały poddane badaniom wraz z wykorzystaniem przenośnego systemu pomiarowego (Rys. 77). We wszystkich badanych systemach pomiarowych zastosowano ten sam czujnik pomiarowy (Rys. 62), wzmacniacz sygnału pomiarowego (Rys. 64) oraz jednostkę centralną z programem analizującym wyniki pomiarów (Rys. 65) oraz ten sam program badań. Badania polegać będą na

pomiarze, tych samych, 50-ciu łożysk typu 6208, w ten sam sposób na wszystkich systemach pomiarowych, czyli pomiary drgań łożysk wykonane będą z tej samej strony i w tym samym punkcie.



Rys. 77. Zestawienie badanych systemów pomiarowych wraz z przenośnym systemem pomiarowym.

9.2. Podstawowe testy systemów pomiarowych

Po przeanalizowaniu słabych wyników badań wstępnych testów systemów pomiarowych, urządzenie MDL-54 poddane zostało przeglądowi technicznemu, wymieniono trzpień pomiarowy, pasek w napędzie wrzeczona, przeprowadzono kalibrację toru pomiarowego (wynik był pozytywny) i przeprowadzono ponowne badania [1,2,4,5,34,70,78].

Badania na tym etapie polegały na wykonaniu serii 50 pomiarów tego samego łożyska 6208, z taką samą: prędkością obrotową 1800 obr/min, siłą docisku 10 daN, czasem pomiaru 2,6 sekundy, z tej samej strony i w tym samym miejscu na pierścieniu zewnętrznym łożyska, w trzech pasmach częstotliwości, na wszystkich testowanych systemach pomiarowych (MDL-54, MGG-11, GPW-8 oraz STPPD).

Obliczono powszechnie stosowane parametry statystyczne: średnia arytmetyczna, odchylenie średnie kwadratowe pojedynczego pomiaru, rozstęp, kurtozę, skośność oraz ostateczny wynik pojedynczego pomiaru, z prawdopodobieństwem wynoszącym 0,95, a zgodność rozkładu wyników z rozkładem normalnym sprawdzono obliczając statystykę χ^2 . Statystykę χ^2 porównano z wartością krytyczną χ_{kr}^2 , dobraną z tabel rozkładu normalnego.

Wartość χ^2 wyrażona jest wzorem:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i} \quad (22)$$

Gdzie:

i – kolejne przedziały histogramu; k – liczba wszystkich przedziałów (widoczna na histogramach, Rys. 78,79, 80); m_i – ilość wyników z próby w przedziale; p_i – teoretyczne prawdopodobieństwo znalezienia się wyniku w przedziale i liczone dla uzyskanych wartości średnich, błędu średniego kwadratowego i przyjętego poziomu prawdopodobieństwa; n – ilość pomiarów w serii.

Test χ^2 polega na przyjęciu jednej z dwóch hipotez. Hipoteza zerowa H_0 mówi, że nie ma podstawy by twierdzić, że wyniki w serii pomiarowej różnią się od rozkładu normalnego. Natomiast hipoteza alternatywna H_1 twierdzi, że wyniki w serii pomiarowej różnią się od rozkładu normalnego. Porównując obliczoną wartość χ^2 z dobraną z tablic χ_{kr}^2 (na podstawie określonego poziomu prawdopodobieństwa i liczby stopni swobody $k=1-3$). Jeżeli $\chi^2 < \chi_{kr}^2$ wówczas prawdziwa jest hipoteza H_0 , natomiast jeśli $\chi^2 \geq \chi_{kr}^2$ przyjmujemy hipotezę H_1 .

Wyniki przeprowadzonych pomiarów zaprezentowane w tabelach 5, 6 i 7.

Tabela 5. Zestawienie wyników 50 pomiarów jednego łożyska w niskim paśmie częstotliwości (LB)

	LB			
	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
	$\mu\text{m/s}$			
1	82,8	72,3	78,1	93,2
2	82,7	76	78,4	90,7
3	82,6	73,4	79,3	87,6
4	82,4	70,6	79,7	90,7
5	82,4	69,4	78	85,8
6	82,7	71	79,3	85,7
7	82,6	64,1	77,7	86,9
8	82,6	67,3	79,2	89,6
9	83	66,4	78,5	88,2
10	82,6	69,5	77,9	88,1
11	82,8	70,5	79,2	87,4
12	82,6	74,3	78,4	81,7
13	82,8	75,4	78,2	85,8
14	82,5	78,3	77,2	82,8
15	82,4	76,9	79,5	83,1
16	82,3	75,5	78,4	85,3
17	82,5	78,8	77,4	91,5
18	82,4	74,1	77,9	90,1
19	82,4	72,8	76,6	87,6
20	82,5	71	75,5	91,8
21	82,5	73,4	75,7	82,5
22	82,1	67,3	75,5	84,8
23	82,4	67,4	76,4	83,4
24	82,1	69	76,4	91,2
25	82,1	64,2	75,7	87,4

26	82,3	66,2	76,4	84,5
27	82,4	67,5	75,6	82,2
28	82,2	68,7	76,1	81,6
29	81,8	74,5	76,1	83,2
30	81,5	77,9	78,2	83
31	81,4	77,4	77,2	82,4
32	81,4	81,6	75,3	86,2
33	81,5	81,1	75,5	81,6
34	81,2	80,2	76,3	83,5
35	81,3	80,1	75,4	90,2
36	81,4	77,8	76,9	81,7
37	81,4	74,5	75	89,5
38	81,5	77,7	75,1	91,2
39	81,8	75,7	75,1	87,7
40	81,7	69,6	75	82,4
41	81,5	68,4	75,5	84,2
42	81,9	67,2	75,8	83,6
43	81,5	69,9	74,9	81,8
44	82,2	72,2	77	83,1
45	82	73,9	75,8	93,1
46	82,2	78,2	75,7	80,4
47	81,8	82,5	78,1	80,3
48	82,1	80,7	76,5	79,5
49	81,8	74,6	77,1	82,7
50	82,3	79,1	76,1	85,2

Tabela 6. Zestawienie wyników 50 pomiarów jednego łożyska w średnim paśmie częstotliwości (MB)

	MB			
	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
	µm/s			
1	32,3	21	32,6	48,1
2	32,3	22	32,6	52,5
3	32,7	20,9	32,7	51,1
4	32,6	20,6	32,5	50,9
5	32,2	20,4	32,8	52,9
6	31,9	20,8	32,6	54,1
7	32,8	24,3	32,9	56,1
8	32,7	22	32	54,5
9	32,2	22	32,6	51,7
10	32,8	22,7	32,7	53,3
11	32,2	23,9	30,9	54,4
12	32,4	22,9	32,8	54,2
13	32,5	22,7	33	48,8
14	32,6	23,7	30,6	56
15	33,5	22,5	33,2	52,3
16	32,6	21,5	31,5	52
17	32,1	22,9	33,8	52,3
18	32,3	24,2	31,6	53,1
19	32,4	22,3	33,5	50,7
20	33	22,2	31,3	55
21	32,1	23,4	31	51,1
22	32,2	22,4	31,1	50,6
23	32,8	21,8	32,6	55,3
24	32,4	22,2	32,5	49,9
25	32,7	20,2	32,8	53,4

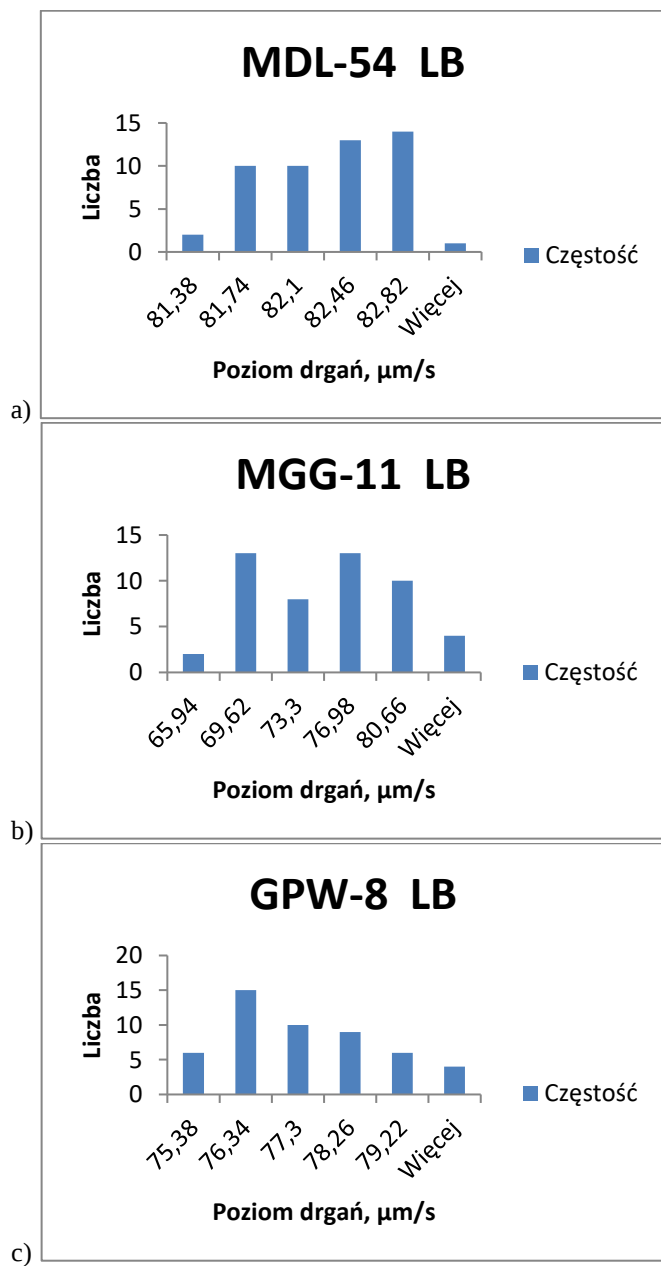
26	32,9	21,4	33,3	49,6
27	32,7	20,5	30,3	52,5
28	32,4	20,1	32,4	52
29	32,8	21,2	31,9	51,2
30	32,1	21,4	32,1	54,1
31	32,4	21,5	31,9	51,2
32	32,4	22	32,4	52,9
33	32,4	23,8	31,9	50,9
34	33,5	21,8	31,2	51,3
35	32,7	22	30,9	52,1
36	32,9	21,9	31	55,3
37	31,6	20,9	30,6	53,6
38	32,9	21,7	30,5	53,1
39	32,1	25,3	30,4	53
40	32,3	21,3	30,3	55,2
41	32,5	21,9	30,4	54,8
42	31,9	20,5	30,7	49,4
43	32,3	20,6	30,8	53
44	32,2	25,3	31,8	55,2
45	32	20,8	31,7	50,5
46	31,8	22,4	31,8	52,8
47	32,1	25,5	32,3	51,4
48	32,1	24,5	32,8	50,8
49	32,5	23	31,7	52,5
50	32,5	22,3	31,4	51,4

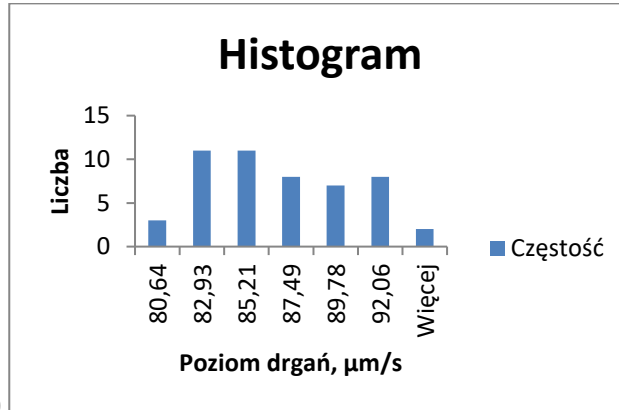
Tabela 7. Zestawienie wyników 50 pomiarów jednego łożyska w wysokim paśmie częstotliwości (HB)

	HB			
	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
	$\mu\text{m/s}$			
1	55	49,2	73,8	56,9
2	55,3	52,1	72,7	52,6
3	52,9	50,3	72,2	52,4
4	54,9	52,6	75,1	53,9
5	53	48,7	75,2	51,4
6	52	48,5	77,5	54
7	54,7	49	80,2	51,4
8	53	51,3	75,7	53
9	54,5	48,9	83,7	50,1
10	56	49	76,8	52,2
11	53,2	49,8	78,6	51,3
12	53,8	49,7	82,9	55,6
13	54,6	49,1	79,5	54,3
14	54,6	47,9	78,4	52,7
15	54,8	48,7	80	53,6
16	54,6	49	83	51,5
17	52,4	46,3	86,4	51,8
18	53,4	47,7	88,1	51
19	52	51,9	83,1	53,8
20	54,8	52,7	85	51,6
21	52,5	48,3	80,1	51,6
22	53,8	52,5	85,5	48,4
23	53,4	50,7	87	51,9
24	53,9	47,8	83,7	49,8
25	55,8	51,7	88,8	52,5

26	54,2	50	85,4	49,7
27	53,1	48,4	77,5	51,2
28	53,4	48,4	76,9	50,4
29	54,1	48,8	77,2	54,6
30	55	49,4	72,4	51,1
31	53,6	50,3	76,5	50,4
32	53,6	48,7	75,4	51,2
33	54	48,8	72,7	51,7
34	54,6	47,7	73,8	49,7
35	52,3	49,1	90,9	51
36	51,9	48	95	50,7
37	52,3	49,3	89,5	48,3
38	51,5	48,4	92,1	51,9
39	51,5	47,8	92,9	51,2
40	52,9	52,2	82,4	52,8
41	52,2	47,7	87	51,8
42	52	48,9	79,2	53
43	53,1	49,1	87,8	51,9
44	52	46,4	88,6	50,2
45	52,1	49,5	88,7	51
46	52,3	46,4	86,5	49,4
47	52,4	45,2	85,9	52,2
48	51,9	45,3	85,3	51,2
49	53	50,8	84,1	51,5
50	52	47,9	93,3	55

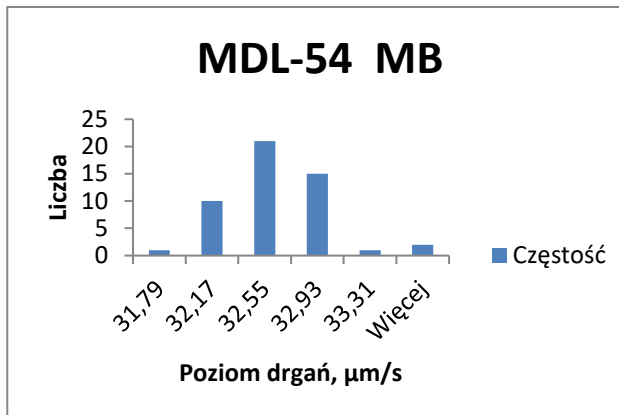
Zestawienie histogramów pomiarów dla każdej analizowanej częstotliwości drgań pokazują rysunki 78, 79 i 80.



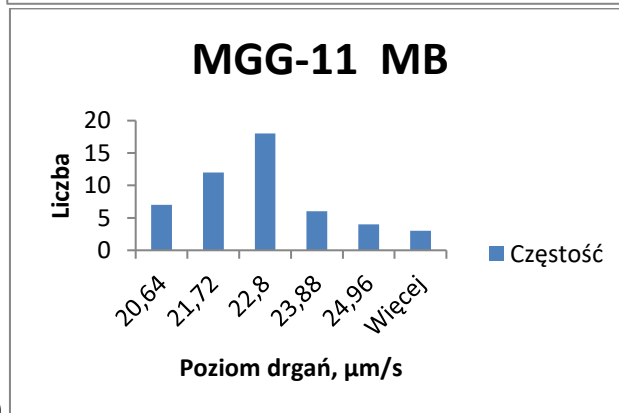


d)

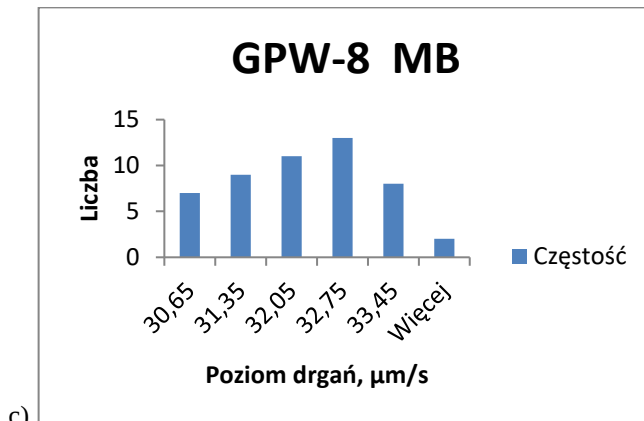
Rys. 78. Rozkład wyników poziomego drgań serii 50 pomiarów w paśmie niskich częstotliwości 50-300 Hz dla łóżyska 6208: a) MDL-54; b) MGG-11; c) GPW-8; d) STPPD



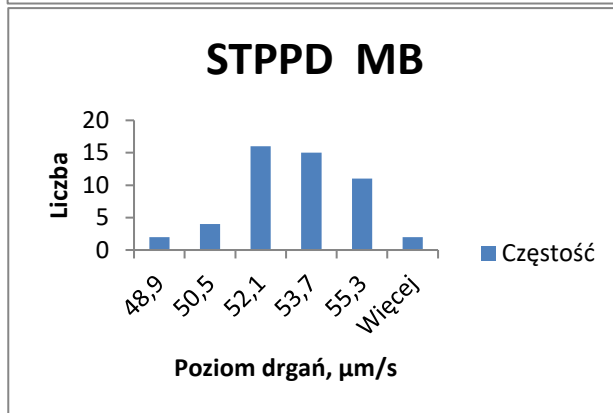
a)



b)

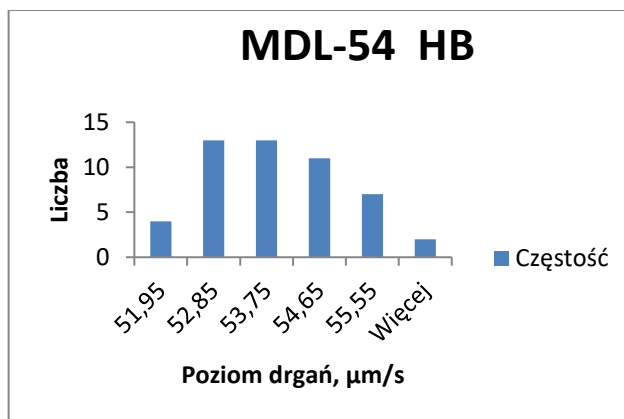


c)

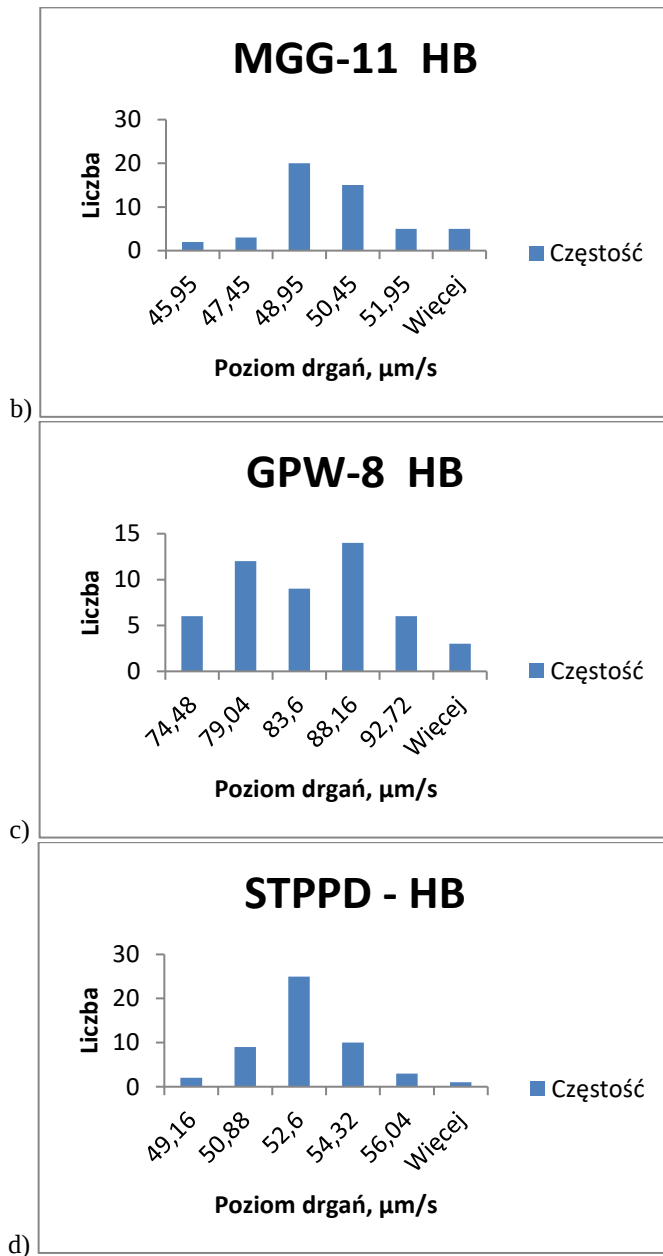


d)

Rys. 79. Rozkład wyników poziomu drgań serii 50 pomiarów w paśmie średnich częstotliwości 300-1800 Hz dla łożyska 6208: a) MDL-54; b) MGG-11; c) GPW-8; d) STPPD



a)



Rys. 80. Rozkład wyników poziomu drgań serii 50 pomiarów w paśmie wysokich częstotliwości 1800-10000 Hz dla łożyska 6208: a) MDL-54; b) MGG-11; c) GPW-8; d) STPPD

Natomiast w tabelach 8, 9 i 10 zamieszczone są wyniki analizy porównawczej dla każdego pasma częstotliwości.

Tabela 8. Wyniki analizy porównawczej w niskim paśmie częstotliwości (LB) 50-300 Hz

	LB			
System pomiarowy	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
Liczność pomiarów	50	50	50	50
Średnia arytmetyczna, $\mu\text{m/s}$	82,14	72,32	76,92	85,75
Odchylenie średnie kwadratowe pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$	0,48	4,92	1,42	3,72
Wartość minimalna, $\mu\text{m/s}$	81,2	64,1	74,9	79,5
Wartość maksymalna, $\mu\text{m/s}$	83	82,5	79,7	93,2
Rozstęp, $\mu\text{m/s}$	1,8	18,4	4,8	13,7
Kurtoza	-1,04	-1	-1,11	-0,98
Skośność	-0,36	0	0,36	0,37
Statystyka χ^2 ; wartość krytyczna χ_{kr}^2 (p=0,95)	7,599; 7,815	6,614; 7,815	4,523; 7,815	6,614; 9,488
Ostateczny wynik pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$ (p=0,95)	82,14±0,94	72,32±9,64	76,92±2,78	85,75±7,29
Średnia arytmetyczna wszystkich serii pomiarowych, $\mu\text{m/s}$	79,53			
Rozstęp średniej arytmetycznej serii pomiarowej od średniej arytmetycznej wszystkich serii pomiarowych, $\mu\text{m/s}$	2,61	7,21	2,61	6,22

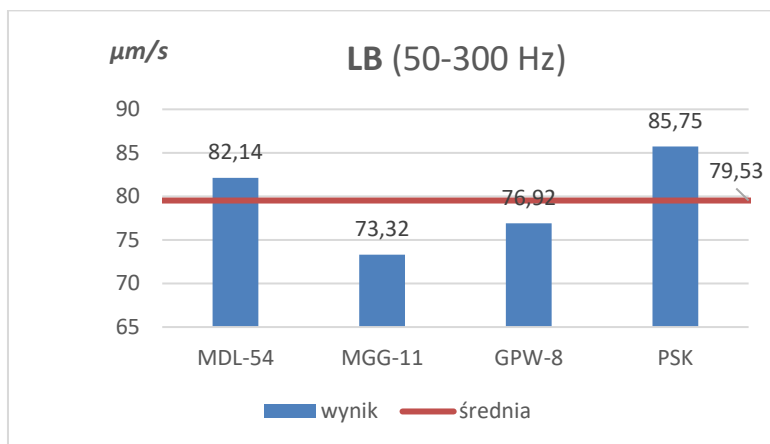
Tab. 9. Wyniki analizy porównawczej w średnim paśmie częstotliwości (MB) 300-1800 Hz

	MB			
System pomiarowy	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
Liczność pomiarów	50	50	50	50
Średnia arytmetyczna, $\mu\text{m/s}$	32,45	22,18	31,89	52,48
Odchylenie średnie kwadratowe pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$	0,38	1,37	0,94	1,9
Wartość minimalna, $\mu\text{m/s}$	31,6	20,1	30,3	48,1
Wartość maksymalna, $\mu\text{m/s}$	33,5	25,5	33,8	56,1
Rozstęp, $\mu\text{m/s}$	1,9	5,4	3,5	8
Kurtoza	0,94	0,05	-1,05	-0,48
Skośność	0,55	0,74	-0,11	-0,05
Statystyka χ^2 ; wartość krytyczna χ_{kr}^2 (p=0,95)	7,235; 7,815	6,212; 7,815	2,368; 7,815	1,986; 7,815
Ostateczny wynik pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$ (p=0,95)	32,45 $\pm$ 0,74	22,18 $\pm$ 2,69	31,89 $\pm$ 1,84	52,48 $\pm$ 3,72
Średnia arytmetyczna wszystkich serii pomiarowych, $\mu\text{m/s}$	34,75			
Rozstęp średniej arytmetycznej serii pomiarowej od średniej arytmetycznej wszystkich serii pomiarowych, $\mu\text{m/s}$	2,3	12,57	2,86	17,7

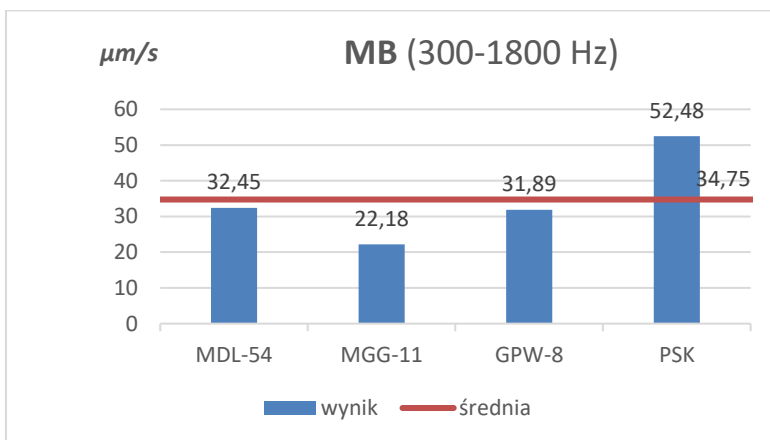
Tab.10. Wyniki analizy porównawczej w wysokim paśmie częstotliwości (HB)
1800-10000 Hz

	HB			
System pomiarowy	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
Liczność pomiarów	50	50	50	50
Średnia arytmetyczna, $\mu\text{m/s}$	53,4	49,12	82,2	51,85
Odchylenie średnie kwadratowe pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$	1,2	1,77	6,21	1,72
Wartość minimalna, $\mu\text{m/s}$	51,5	45,2	72,2	48,3
Wartość maksymalna, $\mu\text{m/s}$	56	52,7	95	56,9
Rozstęp, $\mu\text{m/s}$	4,5	7,5	22,8	8,6
Kurtoza	-0,98	0,1	-1	0,84
Skośność	0,27	0,18	0,12	0,56
Statystyka χ^2 ; wartość krytyczna χ_{kr}^2 (p=0,95)	1,671; 7,815	7,617; 7,815	3,091; 7,815	4,256; 7,815
Ostateczny wynik pojedynczego pomiaru, $\mu\text{m/s}$ (p=0,95)	53,4±2,35	49,12±3,47	82,2±12,17	51,85±3,37
Średnia arytmetyczna wszystkich serii pomiarowych, $\mu\text{m/s}$	59,14			
Rozstęp średniej arytmetycznej serii pomiarowej od średniej arytmetycznej wszystkich serii pomiarowych, $\mu\text{m/s}$	5,74	10,02	23,06	7,55

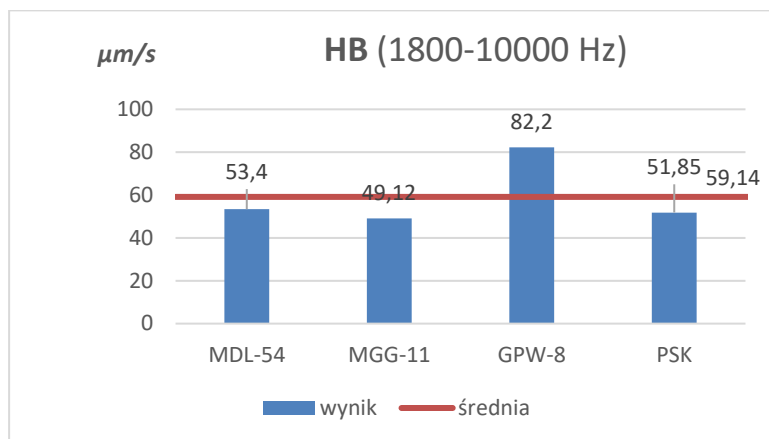
Zestawienie średnich serii pomiarowych w trzech pasmach częstotliwości przedstawiono na rysunkach 81, 82, 83.



Rys. 81. Zestawienie średnich serii pomiarowych dla niskiego pasma częstotliwości (LB) 50 – 300 Hz



Rys. 82. Zestawienie średnich serii pomiarowych dla średniego pasma częstotliwości (MB) 300 – 1800 Hz



Rys. 83. Zestawienie średnich serii pomiarowych dla wysokiego pasma częstotliwości (HB) 1800–10000 Hz

Oprócz wykonania analiz danych serii pomiarowych, możliwe są testy statystyczne porównujące średnie arytmetyczne i wariancje pomiędzy seriami pomiarowymi w analizowanych systemach pomiarowych.

Test porównania wartości średnich dwóch populacji dwóch systemów pomiarowych polega na przyjęciu jednej z dwóch hipotez. Hipoteza zerowa H_0 mówi, że nie ma podstaw by twierdzić, że rozpatrywane średnie arytmetyczne dwóch serii pomiarowych różnią się od siebie w sposób istotny (różnica błędów jest przypadkowa). Natomiast hipoteza alternatywna H_1 twierdzi, że rozbieżności średnich arytmetycznych tych dwóch serii różnią się od siebie w sposób istotny (nieprzypadkowy). Hipotezę przyjmujemy na podstawie porównania obliczonej wartości statystyki U (23) z wartością U_{kr} , określoną na podstawie przyjętego poziomu prawdopodobieństwa z tablicy rozkładu normalnego. Jeżeli $|U| < U_{kr}$ wówczas hipoteza H_0 jest prawdziwa, natomiast jeśli $|U| \geq U_{kr}$ wówczas prawdziwa jest hipoteza H_1 .

$$U = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{\sqrt{\frac{s_i^2}{n_i} + \frac{s_j^2}{n_j}}} \quad (23)$$

Gdzie:

$\bar{x}_i, \bar{x}_j$ – średnie arytmetyczne porównywalnych serii pomiarowych; s_i^2, s_j^2 – wariancje porównywalnych serii pomiarowych; n_i, n_j – ilość pomiarów w serii.

Wyniki testów porównania średnich pomiędzy badanymi systemami pomiarowymi w trzech pasmach częstotliwości przedstawione są w tabelach 11, 12 i 13. Wartość krytyczna statystyki została przyjęta dla poziomu prawdopodobieństwa $p=0,95$.

Tabela 11. Wyniki porównania wartości średnich w niskim paśmie częstotliwości (LB)
50 – 300 Hz

LB		U	U _{kr}	
MDL-54	MGG-11	12,58	1,96	rozbieżność średnich wartości jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	GPW-8	24,43	1,96	rozbieżność średnich wartości jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	STPPD	6,85	1,96	rozbieżność średnich wartości jest istotna (nieprzypadkowa)

Tabela 12. Wyniki porównania wartości średnich w średnim paśmie częstotliwości (MB)
300 – 1800 Hz

MB		U	U _{kr}	
MDL-54	MGG-11	51,34	1,96	rozbieżność średnich wartości jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	GPW-8	3,73	1,96	rozbieżność średnich wartości jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	STPPD	73,56	1,96	rozbieżność średnich wartości jest istotna (nieprzypadkowa)

Tabela 13. Wyniki porównania wartości średnich w wysokim paśmie częstotliwości (HB)
1800 – 10000 Hz

HB		U	U _{kr}	
MDL-54	MGG-11	14,15	1,96	rozbieżność średnich wartości jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	GPW-8	32,22	1,96	rozbieżność średnich wartości jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	STPPD	5,22	1,96	rozbieżność średnich wartości jest istotna (nieprzypadkowa)

Test porównania wariancji dwóch populacji dwóch systemów pomiarowych polega na przyjęciu jednej z dwóch hipotez. Hipoteza zerowa H_0 mówi, że nie ma podstaw by twierdzić, że rozpatrywane wariancje dwóch serii pomiarowych różnią się od siebie w sposób istotny (różnica błędów jest przypadkowa). Natomiast hipoteza alternatywna H_1 twierdzi, że rozbieżności wariancji tych dwóch serii różnią się od siebie w sposób istotny (nieprzypadkowy). Hipotezę przyjmujemy na podstawie porównania obliczonej wartości statystyki F (24) z wartością F_{kr} , dobraną z tablic F-Snedecora na podstawie przyjętego poziomu prawdopodobieństwa i liczby stopni swobody uzależnionych od liczby pomiarów w serii. Jeżeli $F < F_{kr}$ wówczas hipoteza H_0 jest prawdziwa, natomiast jeśli $F \geq F_{kr}$ wówczas prawdziwa jest hipoteza H_1 . Aby statystyka F była poprawnie obliczona, wariancja s_i^2 musi być większa od wariancji s_j^2 .

$$F = \frac{s_i^2}{s_j^2} \quad (24)$$

Wyniki testu porównania wariancji pomiędzy wszystkimi systemami pomiarowymi zamieszczone są w tabelach: 14, 15 16.

Tabela 14. Wyniki porównania wariancji w niskim paśmie częstotliwości (LB)
50 – 300 Hz

LB		F	F _{kr}	
MDL-54	MGG-11	95,32	1,61	rozbieżność porównywanych wariancji jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	GPW-8	7,93	1,61	rozbieżność porównywanych wariancji jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	STPPD	54,44	1,61	rozbieżność porównywanych wariancji jest istotna (nieprzypadkowa)

Tabela 15. Wyniki porównania wariancji w średnim paśmie częstotliwości (MB)
300 – 1800 Hz

MB		F	F _{kr}	
MDL-54	MGG-11	15,27	1,61	rozbieżność porównywanych wariancji jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	GPW-8	7,3	1,61	rozbieżność porównywanych wariancji jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	STPPD	29,37	1,61	rozbieżność porównywanych wariancji jest istotna (nieprzypadkowa)

Tabela 16. Wyniki porównania wariancji w wysokim paśmie częstotliwości (HB)
1800 – 10000 Hz

HB		F	F _{kr}	
MDL-54	MGG-11	2,18	1,61	rozbieżność porównywanych wariancji jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	GPW-8	26,77	1,61	rozbieżność porównywanych wariancji jest istotna (nieprzypadkowa)
MDL-54	STPPD	2,06	1,61	rozbieżność porównywanych wariancji jest istotna (nieprzypadkowa)

Analiza porównawcza systemów pomiarowych stosowanych w badaniach drgań łożysk opiera się na przeprowadzonych badaniach czterech różnych systemów: MDL-54, MGG-11, GPW-8 oraz STPPD.

Celem badań była ocena precyzji i dokładności tych systemów w kontekście pomiarów drgań łożysk. Eksperyment przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, gdzie każdy z systemów dokonał 50 pomiarów tego samego łożyska. Aby zapewnić porównywalność wyników, zadbane o zachowanie stałych warunków pomiarowych, takich jak stan łożyska, użyty film smarny, ten sam operator, tor pomiarowy, trzpień obrotowy oraz miejsce i punkt pomiaru na pierścieniu zewnętrznym łożyska.

1. Normalność rozkładu wyników pomiarów. Wyniki pomiarów uzyskane z każdego z systemów zostały poddane analizie statystycznej, w tym testowi χ^2 (chi-kwadrat), który miał na celu zweryfikowanie czy wyniki te odpowiadają rozkładowi normalnemu. Wyniki tego testu wykazały, że rozkład pomiarów dla każdego z systemów i dla wszystkich pasm częstotliwości nie odbiega od rozkładu normalnego, co wskazuje na brak istotnych odchyleń w rozkładzie wyników pomiarowych.

2. Kurtoza i skośność. Dalsza analiza wyników obejmowała wyliczenie kurtozy i skośności dla każdego z urządzeń oraz dla wszystkich badanych pasm częstotliwości. Wartości tych parametrów mieściły się w przedziale od -2 do 2, co sugeruje, że rozkład wyników nie wykazuje znaczącej asymetrii ani odchyleń od normalności [41]. Ten wynik dodatkowo umacnia wnioski z testu χ^2 , potwierdzając, że wyniki pomiarów są zgodne z oczekiwaniami wynikającymi z rozkładu normalnego.

3. Rozstęp wyników pomiarów. Jednym z kluczowych wskaźników jakości systemu pomiarowego jest rozstęp wyników, który informuje o rozpiętości wartości mierzonych. Przy założeniu, że wszystkie elementy ruchome łożyska generują te same drgania, im mniejszy rozstęp wyników, tym bardziej dokładny jest system pomiarowy. Analiza rozstępu wyników pomiarowych we wszystkich pasmach częstotliwości wykazała, że najmniejszy rozstęp zarejestrowano w systemie MDL-54. Świadczy to o wysokiej precyzji tego systemu w odniesieniu do pozostałych systemów pomiarowych.

4. Odchylenie średnie kwadratowe. Odchylenie średnie kwadratowe jest kolejnym ważnym wskaźnikiem oceny systemu pomiarowego.

W niniejszych badaniach najmniejsze odchylenie średnie kwadratowe pojedynczego pomiaru zaobserwowano również w systemie MDL-54, we wszystkich badanych pasmach częstotliwości. Wskazuje to na większe skupienie wyników pomiarów wokół średniej, co z kolei oznacza mniejszą zmienność pomiarową i wyższą dokładność systemu MDL-54 w porównaniu do pozostałych urządzeń.

5. Brak wzorcowego łożyska. Jednym z problemów napotkanych w badaniach systemów pomiarowych była konieczność korzystania z wyników pomiarów tego samego łożyska, gdyż brakowało wzorcowego łożyska. Aby zniwelować ten problem, przyjęto średnią arytmetyczną z 200 pomiarów tego samego łożyska jako wartość odniesienia. W dalszej części analiz porównano średnie arytmetyczne wyników pomiarowych każdego urządzenia z tą wartością odniesienia. Najmniejsze odchylenie średniej arytmetycznej serii pomiarowej od średniej arytmetycznej wszystkich serii pomiarowych zaobserwowano w systemie MDL-54, co potwierdza wysoką precyzję tego systemu.

6. Test porównania wariancji. Porównanie wariancji wyników pomiarowych pomiędzy systemem MDL-54 a pozostałymi systemami również przyniosło istotne wyniki. Test porównania wariancji wykazał, że różnice pomiędzy wariancjami w systemie MDL-54 a pozostałymi systemami są istotne statystycznie, co sugeruje, że system MDL-54 charakteryzuje się większą stabilnością pomiarową i mniejszą zmiennością wyników.

7. Test porównania średnich. Ostatnim etapem analizy było porównanie średnich wartości pomiarowych z różnych systemów. Wyniki tego testu były jednak niejednoznaczne, co wskazuje na możliwość wystąpienia błędów systematycznych w pomiarach. Pomimo tego, opierając się na doświadczeniu oraz uzyskanych danych, można stwierdzić, że opatentowany osiowy docisk w systemie MDL-54 jest bardziej precyzyjny i generuje mniejsze błędy w porównaniu do przegubowych docisków łożysk zastosowanych w pozostałych systemach pomiarowych.

Przeprowadzone badania jasno wskazują na wyższość systemu MDL-54 nad pozostałymi analizowanymi systemami pomiarowymi w kontekście precyzji i dokładności pomiarów drgań łożysk. System MDL-54 charakteryzuje się najmniejszym rozstępem wyników pomiarowych, najmniejszym odchyleniem średnim kwadratowym oraz najmniejszym odchyleniem średniej arytmetycznej od wartości odniesienia. Wysoka precyzja tego systemu wynika prawdopodobnie z opatentowanego osiowego docisku, który redukuje błędy systematyczne i zapewnia większą stabilność pomiarów.

9.3. Charakterystyki metrologiczne systemów pomiarowych

Charakterystyki metrologiczne systemów pomiarowych odgrywają kluczową rolę w ocenie ich przydatności do przeprowadzania pomiarów. Informacje na ten temat można znaleźć w odpowiednich normach [N4]. Szczególnie ważne są te charakterystyki, które wpływają na dokładność systemu pomiarowego, ponieważ są one decydujące przy wyborze systemu umożliwiającego porównanie wymiaru rzeczywistego z wzorcem lub dopuszczalną tolerancją.

Do charakterystyk systemów metrologicznych, które są związane z dokładnością pomiaru, zalicza się: poprawność, wierność i dokładność. Każda z tych cech ma przypisany odpowiedni współczynnik ilościowy: dla poprawności określa się błąd poprawności, dla wierności - błąd wierności (niepewności pomiarowej), a dla dokładności - błąd dokładności.

Poprawność jest cechą, która opisuje zdolność systemu pomiarowego do wyznaczania prawidłowych wartości mierzonych, niezależnie od błędu wierności (precyzji) wskazań. Błąd poprawności to algebraiczna suma błędów systematycznych. W praktyce, błąd poprawności systemu pomiarowego (25) jest definiowany jako różnica między średnią arytmetyczną wartości wskazań x_i a wartością prawidłową x_p mierzonej wielkości.

$$e_j = \bar{x}_i - x_p \quad (25)$$

Gdzie:

$\bar{x}_i$ – średnia arytmetyczna wskazań x_i ; systemu pomiarowego; x_p – wartość poprawna wielkości mierzonej.

Mając określony błąd poprawności, możemy ustalić poprawkę poprawności systemu pomiarowego (26), który jest równy przeciwnej wartości błędu poprawności.

$$p = -e_j = -(\bar{x}_i - x_p) \quad (26)$$

Wierność (precyzja) odnosi się do zdolności systemu pomiarowego do uzyskiwania zgodnych ze sobą wyników dla tej samej mierzonej wielkości, bez uwzględniania zmiennych błędów systematycznych.

Wierność systemu pomiarowego (precyzja systemu pomiarowego) [16,N8,N9], czyli niepewność typu A, jest oceniana za pomocą takich wskaźników jak: błąd średni kwadratowy wierności (precyzji) wskazań (odchylenie standardowe) oznaczane jako σ lub s ; błąd prawdopodobny oraz błąd graniczny.

Odchylenie standardowe σ (27), które odnosi się do pomiaru wartości prawidłowej (niepewności standardowej), jest obliczane w następujący sposób:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_p)^2}{n}} \quad (27)$$

Gdzie:

x_i – kolejna wartość pomiaru; x_p – wartość poprawna wielkości mierzonej; n – liczba pomiarów.

Dla analizowanych systemów pomiarowych określono błąd graniczny wierności (precyzji) u_p , pomijając błędy poprawności, przy poziomie prawdopodobieństwa P równym 0,95 (28).

$$u_p = k_p \cdot \sigma \quad (28)$$

Gdzie:

k_p – zmienna standaryzowana dla określonego poziomu ufności P ; σ – odchylenie średnie kwadratowe.

Dokładność jest cechą, która opisuje zdolność systemu pomiarowego do uzyskiwania wyników zbliżonych do rzeczywistej wartości mierzonej wielkości i jest wyrażana za pomocą wzoru (29).

$$d = e_j \pm u_p \quad (29)$$

Z kolei klasa dokładności jest parametrem charakteryzującym system pomiarowy, który spełnia te same wymagania dotyczące dokładności, i jest wyznaczana za pomocą odpowiedniego wzoru (30).

$$\delta = \left| \frac{e_j \pm u_p}{W_{max}} \right| \quad (30)$$

Gdzie: W_{max} – górna granica zakresu systemu pomiarowego (najwyższe wskazania jakie określa system).

Wszystkie powyższe charakterystyki metrologiczne badanych systemów pomiarowych można znaleźć w tabelach 17, 18 i 19.

Tabela 17. Charakterystyki metrologiczne badanych systemów pomiarowych w niskim paśmie częstotliwości (LB) 50 – 300 Hz

		LB (50 – 300 Hz)			
Systemy pomiarowe		MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
Błąd poprawności e_j , $\mu\text{m/s}$		2,61	-6,21	-2,62	6,22
Błąd wierności (precyzji) u_p , $\mu\text{m/s}$, dla $k_p=1,96$		5,19	15,47	5,82	14,17
Błąd dokładności	$d_{\max}$, $\mu\text{m/s}$	7,8	9,26	3,2	20,39
	$d_{\min}$, $\mu\text{m/s}$	-2,58	-21,68	-8,44	-7,95
Klasa dokładności, %		0,69	1,92	0,75	1,8

Tabela 18. Charakterystyki metrologiczne badanych systemów pomiarowych w średnim paśmie częstotliwości (MB) 300 – 1800 Hz

		MB (300 – 1800 Hz)			
Systemy pomiarowe		MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
Błąd poprawności e_j , $\mu\text{m/s}$		-2,31	-12,57	-2,86	17,73
Błąd wierności (precyzji) u_p , $\mu\text{m/s}$, dla $k_p=1,96$		4,58	24,78	5,89	34,95
Błąd dokładności	$d_{\max}$, $\mu\text{m/s}$	2,28	12,21	3,03	52,68
	$d_{\min}$, $\mu\text{m/s}$	-6,89	37,35	-8,75	-17,22
Klasa dokładności, %		0,6	3,31	0,77	4,66

Tabela 19. Charakterystyki metrologiczne badanych systemów pomiarowych w wysokim paśmie częstotliwości (HB) 1800 – 10000 Hz

		HB (1800 -10000Hz)			
Systemy pomiarowe		MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
Błąd poprawności e_p , $\mu\text{m/s}$		-5,74	-10,02	23,06	-7,29
Błąd wierności (precyzji) u_p , $\mu\text{m/s}$, dla $k_p=1,96$		11,49	19,94	46,77	14,68
Błąd dokładności	$d_{\max}$, $\mu\text{m/s}$	5,75	9,92	69,83	7,39
	$d_{\min}$, $\mu\text{m/s}$	-17,23	-29,96	-23,71	-21,97
Klasa dokładności, %		1,53	2,65	6,18	1,94

Przeprowadzone badania mające na celu ocenę właściwości metrologicznych czterech systemów pomiarowych (MDL-54, MGG-11, GPW-8, STPPD) wykazały istotne różnice w ich zdolności do precyzyjnego pomiaru poziomu drgań generowanych przez łożyska toczne. W obliczu braku wzorcowego łożyska o określonym poziomie drgań, analizę oparto na wynikach uzyskanych ze średniej arytmetycznej 200 pomiarów badanego łożyska. Kluczowymi wskaźnikami oceny były błędy poprawności oraz wierności (precyzji) pomiarów, które pozwoliły na szczegółową analizę zgodności wyników pomiarowych z teoretycznym modelem wzorcowym.

System MDL-54 uzyskał najlepsze wyniki we wszystkich analizowanych pasmach częstotliwości, co wskazuje na jego wyższość w zakresie precyzji i dokładności pomiarów. Wyniki uzyskane przez MDL-54 były najbardziej zgodne z teoretycznymi wartościami wzorcowymi, co świadczy o jego wysokiej wiarygodności metrologicznej. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że jedynie MDL-54 spełniło ustalony limit klasy dokładności na poziomie 3, co jest istotnym wskaźnikiem

w kontekście zastosowań wymagających wyjątkowo wysokiej precyzji pomiarowej. Ponadto, urządzenie to osiągnęło najmniejsze wartości błędów w porównaniu z pozostałymi systemami pomiarowymi, co dodatkowo podkreśla jego przewagę.

Analiza wyników pozostałych systemów pomiarowych (MGG-11, GPW-8, STPPD) ukazuje, że nie zawsze spełniały one ustalone kryteria dokładności. W niskim paśmie częstotliwości wszystkie systemy pomiarowe spełniły założone wymagania, co wskazuje na ich wystarczającą precyzję w tym zakresie. Jednakże w średnim paśmie częstotliwości systemy MGG-11 i STPPD nie osiągnęły wymaganych kryteriów, co ogranicza ich przydatność w tym obszarze. Wysokie pasmo częstotliwości okazało się szczególnie problematyczne dla systemu GPW-8, który również nie spełnił wymaganego poziomu dokładności.

Podsumowując, badania jednoznacznie wskazują na wyższość systemu MDL-54 nad pozostałymi systemami pomiarowymi pod względem precyzji i zgodności z teoretycznymi standardami. Jego zdolność do spełnienia wymagań klasy dokładności na poziomie 3 czyni je najbardziej odpowiednim narzędziem do pomiaru drgań łożysk tocznych w aplikacjach wymagających najwyższej precyzji. Wyniki te sugerują, że MDL-54 dostarcza najbardziej wiarygodne dane pomiarowe, co ma kluczowe znaczenie w kontekście zaawansowanych zastosowań metrologicznych. Z kolei pozostałe systemy, choć spełniają pewne minimalne standardy, nie oferują porównywalnej jakości danych, co ogranicza ich zastosowanie w bardziej wymagających środowiskach pomiarowych.

9.4. Dokładność pomiarowa DP analizowanych systemów pomiarowych

W rozdziale tym wszystkie systemy pomiarowe poddano testom polegającym na wyznaczeniu średniego względnego błędu pomiaru $\bar{w}_{\Delta z}$, przedziału ufności dla średniego błędu pomiarowego (na poziomie prawdopodobieństwa P równym 0,95) oraz dokładność pomiaru systemów pomiarowych DP. Wzory dotyczące obliczania tych parametrów

przedstawione zostały w rozdziale 8.1. Pomiary wykonano na 50-ciu łożyskach serii 6208 z tej samej strony oraz w tym samym miejscu na pierścieniu zewnętrznym na czterech systemach pomiarowych: MDL-54, MGG-11, GPW-8 oraz STPPD (tabela 20). Ze względu na brak łożysk wzorcowych, wymiarami względem, którym obliczane są błędy względne pomiaru to średnie z czterech pomiarów danego łożyska.

Tabela 20. Zestawienie pomiarów 50 łożysk we wszystkich pasmach częstotliwości

	MDL-54			MGG-11			GPW-8			STPPD		
	LB	MB	HB	LB	MB	HB	LB	MB	HB	LB	MB	HB
	μm/s	μm/s	μm/s	μm/s	μm/s	μm/s	μm/s	μm/s	μm/s	μm/s	μm/s	μm/s
1	93,6	32,2	58,2	60,1	23,2	63,9	84,7	34,7	70,8	78,5	64,5	51,6
2	71,1	33,5	82,9	36,6	19,5	74,5	35,6	32,3	111,9	40,2	49	71,3
3	102,6	32,1	48,1	84,3	17,7	35,5	88,2	32,3	45,7	76	73,3	40,2
4	105,9	25,8	45,8	221,5	102,8	55,8	113,1	34,5	60,1	82	46,3	42,5
5	48,1	33	64,2	61,9	20	58,6	73,2	33,3	81,5	51,3	49,8	65,3
6	61,7	37,6	51	66,8	29,6	35,3	67,7	35,6	50,6	67,8	49,1	41
7	63,9	29	52,2	51,2	22,8	37,5	61,5	31,9	56,1	68,6	65,8	49,6
8	163,5	34	92,8	153,1	24	84,2	198,8	32,4	160,6	154,5	64,1	106,5
9	37,1	26,6	57	39	21,7	34,4	43,1	32,9	50,7	55,6	43,7	36,5
10	75,5	31,9	42,9	68,5	22,7	33	67,3	44,6	52	72,2	56,8	39,5
11	118,2	29,7	42,7	99,9	24,9	36,9	142,9	34	58,8	146,4	45,4	48,6
12	89,8	29,1	39,1	80,6	20,6	31,1	91,1	31,9	51,9	94,5	46,3	37,6
13	57,8	34,1	52,4	55,9	20,4	43,5	69,6	35,2	68,4	43,4	48,8	58,7
14	58,7	30,1	39,7	73,5	15,5	37,1	94,2	36,4	48,2	79,8	40,4	42,3
15	53,4	33,4	47,9	67,2	19,6	44,6	64,2	31,3	62,6	52,5	61,9	50,9
16	42,1	29,5	46,5	33,9	18,7	46,7	28,8	32	70,2	37,9	51,3	59,4
17	77,3	26,7	42,6	60,5	16,8	36,5	78,3	31,1	47,5	77,2	49,8	36,2
18	110,5	29,7	51,8	88,3	18,6	40,2	89	31,6	52	109	67,5	49,3
19	38,1	30	44,8	19,4	20,8	40,7	39,5	45,4	49,1	29,5	57,4	39,2
20	70,9	32	47	98,7	38,4	41,4	75,6	31,1	52,6	74,4	64,8	48,9
21	60,3	32,9	53,5	68,2	22,1	34,9	55,2	31,7	46,9	35	57,8	41,9

22	81,8	32,2	54,3	73,9	20,2	40,6	79,4	33,5	49,8	82,4	61,6	43,4
23	90,8	32,7	51,1	97,6	19,2	40,6	103	32	52,8	87	61,5	44,5
24	93,4	32,8	39	81,1	19,6	33	80,5	35,2	48,2	90,7	38,6	56,5
25	133,1	33,4	50,5	138,7	27,3	41	110,7	33,9	63,6	112,7	47,3	51,8
26	50,2	34,5	46,5	60,9	21,6	36,7	51,6	31,3	51,8	38,2	58,7	44,7
27	61,8	30,3	51,4	47,3	17,3	38,9	67,2	31	51,8	63,9	61,4	49,5
28	73,6	33	49,8	50,2	25,1	39,8	85,7	32	52,9	62,3	51,7	45
29	81,8	33,3	44,1	75,7	22,5	36,3	72,8	30,4	42,3	84,5	45,3	34,6
30	73,1	30,1	40,7	55,3	16,3	34,3	83,2	30,7	53,7	59,9	47,2	39,2
31	106	32,2	50,2	94,8	19,6	38,2	90,6	33,5	51,5	103,5	56,7	50,1
32	64,7	27,8	43,9	81,1	16,1	35,9	74,6	34,6	49,5	88,9	40,9	37,3
33	74,7	34,8	45,3	69,3	21,2	36,8	79,5	33,8	49,2	82,6	43,5	37,9
34	45,3	28,6	50,7	39	16,6	39,8	62	34,9	45,2	60,7	56,4	47
35	58,4	40,9	48,3	67	18,8	39,4	67,4	39,1	44	69,3	54,3	37,1
36	114,8	29,7	40,8	98,2	18,7	32,7	102	35,2	42,4	84,1	50,9	35,8
37	87	40,2	41,9	100,7	24,7	31,4	82,2	32,2	46,4	72,1	50,2	33,4
38	51,2	30,1	45,3	66,9	15,2	38	73,5	33,9	58	77,7	47	36,6
39	81,1	31,1	53,8	79,5	15,9	34,4	75,9	32,3	46,6	91,4	60,9	45,8
40	48,3	33,8	46,7	67	19,6	35,6	66	31,7	46,6	60,4	45,1	40,8
41	59,4	31,1	47,4	74,8	22,8	37	85,1	35,7	54,7	66,6	41	42,7
42	73,9	33,7	41,7	60,7	19,4	36,3	73,6	32,3	39,5	69,1	61	38,2
43	72,3	33,3	52,2	82,5	21,6	43,2	60,4	32,2	54,3	65,9	69,5	42,3
44	64,5	32,6	44	81,6	25,1	34,2	60,8	34,3	49,7	75,6	41,1	41,8
45	36,6	31,3	64	75,8	19,6	47,7	72,5	32,3	82,1	64,5	43,9	63,3
46	62,4	34,6	47,7	67,5	18,1	38,3	83	34,7	48	67,6	44,3	38,9
47	38,8	29,6	44,8	57,7	22,9	34,6	63,5	40,2	47,6	41,4	57,4	41,3
48	104,4	31,2	46,3	89,5	19,9	39,5	98,8	33,5	45,6	77,2	57,3	44,7
49	67,6	30,3	44	54,5	19,6	35,3	70,2	43,7	49,7	77,4	50,1	42,1
50	157,6	34,2	91,1	151,3	19,7	80	191,7	34,4	156,3	163,4	65,3	106,5

Wyniki statystycznych badań eksperymentalnego błędu pomiaru oraz dokładność pomiaru DP zostały zaprezentowane w tabelach 21, 22 i 23.

Tabela 21. Wyniki statystycznych badań eksperymentalnego błędu pomiaru w niskim paśmie częstotliwości (LB) 50 – 300 Hz

	LB (50 – 300 Hz)			
Systemy pomiarowe	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
Średni względny błąd pomiaru $\bar{w}_{\Delta Z}$, $\mu\text{m/s}$	-0,010	-0,017	0,047	-0,020
Przedział ufności dla średniego błędu pomiarowego, $\mu\text{m/s}$, dla $k_p=1,96$	-0,010 $\pm$ 0,30	-0,017 $\pm$ 0,35	-0,047 $\pm$ 0,25	-0,020 $\pm$ 0,26
Dokładność pomiaru DP, %	31,06	36,33	29,49	28,07

Tabela 22. Wyniki statystycznych badań eksperymentalnego błędu pomiaru w średnim paśmie częstotliwości (MB) 300 – 1800 Hz

	MB (300 – 1800 Hz)			
Systemy pomiarowe	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
Średni względny błąd pomiaru $\bar{w}_{\Delta Z}$, $\mu\text{m/s}$	-0,092	-0,379	-0,033	0,503
Przedział ufności dla średniego błędu pomiarowego, $\mu\text{m/s}$, dla $k_p=1,96$	-0,092 $\pm$ 0,2	-0,379 $\pm$ 0,42	-0,033 $\pm$ 0,22	0,503 $\pm$ 0,37
Dokładność pomiaru DP, %	28,82	79,99	25,65	87,17

Tabela 23. Wyniki statystycznych badań eksperymentalnego błędu pomiaru w wysokim paśmie częstotliwości (HB) 1800 – 10000 Hz

	HB (1800 – 10000 Hz)			
Systemy pomiarowe	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
Średni względny błąd pomiaru $\bar{w}_{\Delta Z}$, $\mu\text{m/s}$	0,035	-0,156	0,163	-0,041
Przedział ufności dla średniego błędu pomiarowego, $\mu\text{m/s}$, dla $k_p=1,96$	$0,035 \pm 0,19$	$-0,156 \pm 0,14$	$0,163 \pm 0,19$	$-0,041 \pm 0,16$
Dokładność pomiaru DP, %	22,04	29,3	35,47	19,75

W przeprowadzonych badaniach dokonano analizy dokładności pomiarowej DP czterech systemów pomiarowych (MDL-54, MGG-11, GPW-8, STPPD) pod kątem ich zdolności do precyzyjnego pomiaru drgań generowanych przez łożyska toczne. W związku z brakiem systemu wzorcowego, umożliwiającego uzyskanie wzorcowych wyników pomiaru, opracowano serię quasi wzorcowych wyników poprzez uśrednienie wyników pomiarów każdego z łożysk, uzyskanych na wszystkich badanych systemach. W ten sposób stworzono odniesienie, do którego porównano wyniki poszczególnych systemów, co pozwoliło na wyznaczenie dokładności pomiaru DP dla każdego z nich.

Przyjęte kryteria oceny dokładności pomiarowej DP wskazują, że systemy o wartości DP poniżej 30% mogą być stosowane bez zastrzeżeń, w granicach 30-50% mogą być używane z pewnymi ograniczeniami, natomiast systemy z DP powyżej 50% wymagają przeglądu technicznego, co sugeruje ich niezdolność do precyzyjnych pomiarów drgań łożysk tocznych.

Analiza wyników w niskim paśmie częstotliwości wykazała, że systemy GPW-8 i STPPD osiągnęły wartości DP poniżej 30%, co kwalifikuje je do stosowania w tym zakresie bez zastrzeżeń. Natomiast MDL-54 i MGG-11 nieznacznie przekroczyły tę granicę, odpowiednio o 1% i 6%, co sugeruje, że mogą być stosowane z pewnymi ograniczeniami. Wyniki te wskazują na względnie dobrą precyzję tych systemów w niskim paśmie częstotliwości, choć nie są one całkowicie wolne od błędów.

W średnim paśmie częstotliwości zaobserwowano znaczące różnice w dokładności pomiarowej między systemami. MDL-54 i GPW-8 utrzymały dokładność DP poniżej 30%, co świadczy o ich wysokiej precyzji i przydatności do pomiarów w tym zakresie. Z kolei systemy MGG-11 i STPPD osiągnęły wartości DP na poziomie około 80%, co je dyskwalifikuje w tym paśmie częstotliwości i sugeruje konieczność przeglądu technicznego lub kalibracji, aby mogły być dalej stosowane w precyzyjnych pomiarach drgań.

W wysokim paśmie częstotliwości wyniki wskazują, że system GPW-8 osiągnął DP na poziomie 35%, co oznacza, że może być stosowany z pewnymi ograniczeniami. Pozostałe systemy, w tym MDL-54, uzyskały wyniki poniżej 30%, co potwierdza ich wysoką precyzję i zdolność do dokładnych pomiarów drgań w tym zakresie częstotliwości.

Podsumowując, wyniki badań wykazały, że tylko system pomiarowy MDL-54 zapewnia wystarczającą dokładność pomiaru we wszystkich analizowanych pasmach częstotliwości. Jego zdolność do utrzymania wartości DP poniżej lub blisko 30% we wszystkich pasmach wskazuje na jego wysoką przydatność do precyzyjnych pomiarów drgań łożysk tocznych. Systemy GPW-8, MGG-11 oraz STPPD, mimo że wykazują pewną przydatność w określonych pasmach częstotliwości, nie spełniają w pełni wymagań precyzyjnych pomiarów w całym zakresie częstotliwości, co ogranicza ich zastosowanie w zaawansowanych aplikacjach metrologicznych.

Dodatkową analizą było porównanie dokładności pomiarowej (DP) systemów MGG-11, GPW-8 oraz STPPD względem systemu wzorcowego

MDL-54 w trzech pasmach częstotliwości: niskim (LB), średnim (MB) oraz wysokim (HB). Wyniki zawarte są w tabeli 24.

Tabela 24. Wyniki dokładności pomiaru DP względem systemu MDL-54

System pomiarowy	DP, %		
	LB	MB	HB
MGG-11	64,01	76,71	38,08
GPW-8	60,06	22,06	51,78
STPPD	47,94	97,49	21,01

Przeprowadzona analiza potwierdziła, że system MDL-54 jest najlepszym systemem pomiarowym wśród badanych. Wyniki wskazują, że żaden z pozostałych systemów (MGG-11, GPW-8 i STPPD) nie może w pełni zastąpić MDL-54, choć niektóre z nich mogą być porównywane z systemem wzorcowym w wybranych pasmach częstotliwości.

System STPPD uzyskał zadowalające wyniki w dwóch pasmach częstotliwości: niskim i wysokim. Oznacza to, że w tych zakresach jego dokładność pomiarowa jest porównywalna z MDL-54. Jednakże w średnim paśmie częstotliwości STPPD nie spełnia standardów, co wyklucza jego uniwersalne zastosowanie jako alternatywy dla MDL-54.

Z kolei system MGG-11 wykazał zgodność ze standardami MDL-54 jedynie w wysokim paśmie częstotliwości, natomiast w pozostałych pasmach jego dokładność była niewystarczająca. GPW-8 osiągnął bardzo dobrą zgodność jedynie w średnim paśmie, jednak w niskim i wysokim paśmie jego wyniki były poniżej oczekiwań.

Podsumowując, system MDL-54 pozostaje niezastąpiony w szerokim zakresie częstotliwości. System STPPD jest najbliższą alternatywą w niskim i wysokim paśmie, natomiast MGG-11 i GPW-8 spełniają standardy wzorcowe tylko w wąskich, specyficznych pasmach (odpowiednio wysokim i średnim).

9.5. Powtarzalność i odtwarzalność systemów pomiarowych

Powtarzalność (ang. repeatability) odnosi się do stopnia zgodności wyników uzyskanych w serii pomiarów tego samego zjawiska, przeprowadzonych w krótkim czasie przez tę samą osobę, za pomocą tego samego sprzętu i w tych samych warunkach. Jest to miara precyzji metody badawczej, wskazująca na jej wewnętrzną spójność.

Odtwarzalność (ang. reproducibility) oznacza zdolność do uzyskania zgodnych wyników pomiarów tego samego zjawiska przez różne osoby, używające różnych urządzeń, w różnych miejscach i czasie. Odtwarzalność jest miarą, która pokazuje, jak wyniki badań są niezależne od zmiennych zewnętrznych i potwierdza ich uniwersalność.

Powtarzalność i odtwarzalność stanowią fundamenty rzetelności badań naukowych, będąc nieodzownymi elementami każdej metodyki badawczej. Zapewnienie powtarzalności i odtwarzalności wyników jest kluczowe dla potwierdzenia ich wiarygodności. Powtarzalność odnosi się do precyzji wyników uzyskanych w ramach jednego zestawu warunków eksperymentalnych, natomiast odtwarzalność dotyczy zgodności wyników uzyskanych przez różnych badaczy, w różnych miejscach i przy użyciu różnych narzędzi badawczych. Te dwa aspekty są nie tylko miarami jakości badań, ale także testem ich uniwersalności i niezależności od zmiennych zewnętrznych. W praktyce naukowej, badania o wysokiej powtarzalności i odtwarzalności są bardziej cenione, gdyż ich wyniki mogą być uznane za bardziej wiarygodne i obiektywne. Bez tych cech, wyniki badań mogą być kwestionowane i trudne do zastosowania w praktyce, co podważa ich wartość naukową. Dlatego też, w procesie opracowywania metod badawczych, szczególną uwagę przykładą się do testowania powtarzalności i odtwarzalności, co zapewnia, że wyniki eksperymentów będą mogły być z powodzeniem potwierdzone przez niezależnych badaczy, stanowiąc solidną podstawę do dalszych badań i aplikacji praktycznych.

Badaniom zostały poddane cztery systemy pomiaru poziomu drgań łożysk tocznych: MDL-54, MGG-11, GPW-8 oraz STPPD. Walidacja systemów pomiarowych została przeprowadzona w ramach

Procedury 3 [78]. W procedurze tej pracownik nie ma wpływu na testowany system pomiarowy. Testowana jest tylko powtarzalność EV. Ma to miejsce w przypadku, gdy pomiary przeprowadzane są automatycznie, rozproszenie systemów pomiarowych spowodowane przez błędy operatora są praktycznie wyeliminowane. W procedurze tej przeprowadzono dwie serie pomiarów 25 sztuk łożysk typu 6208 (50 wyników pomiarów). Pierwszą serię pomiarów przygotowanych i oznaczonych łożysk mierzono w kolejności od 1 do 25. Następnie wykonano drugą serię pomiarów, wykonał ten sam operator, w tej samej kolejności. Łożyska mierzono zawsze z tej samej strony oraz w tym samym miejscu pierścienia zewnętrznego.

Analiza powtarzalności systemu pomiarowego w Procedurze 3 jest wykonywana według jednego ze sposobu:

- przy użyciu odchylenia standardowego;
- przy użyciu rozstępów.

W tym przypadku powtarzalność systemów pomiarowych obliczona została metodą przy użyciu rozstępów.

Następujący tok obliczeń:

1. Obliczenie rozstępów R_i (31) między pomiarami 1 i 2 serii

$$R_i = x_{imax} - x_{imin} \quad (31)$$

Gdzie:

x_{imin} – mniejszy wynik pomiaru z pary wyników; x_{imax} – większy wynik pomiaru z pary wyników.

2. Obliczenie średniego rozstępu $\bar{R}$ (32)

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^{20} R_i}{20} \quad (32)$$

3. Oszacowanie powtarzalności systemu pomiarowego EV (33)

$$EV = K_1 \cdot \bar{R} \quad (33)$$

Gdzie:

K_1 – 5,32 na poziomie ufności 99,73%.

$$\%EV = \frac{EV}{T} \cdot 100\% \quad (34)$$

Gdzie:

T – tolerancja poziomemu drgań łożysk (różna dla każdego pasma częstotliwości).

4. Rozrzut systemu pomiarowego %R&R (35)

$$\%R\&R = \%EV = \frac{EV}{T} \cdot 100\% \quad (35)$$

Wyniki pomiarów, wyrażone w $\mu\text{m/s}$, zawarte są w tabelach 25, 26 i 27. Natomiast wyniki powtarzalności i odtwarzalności systemów pomiarowych analizowano w trzech pasmach częstotliwości (niskim LB, średnim MB i wysokim HB) zamieszczono w tabelach 28, 29 i 30.

Tabela 25. Dwie serie pomiarów w niskim paśmie częstotliwości (LB)

	LB							
	MDL-54		MGG-11		GPW-8		STPPD	
	I seria	II seria	I seria	II seria	I seria	II seria	I seria	II seria
1	93,9	93,6	65,2	60,1	84,8	84,7	76	78,5
2	71,4	71,1	29,3	36,6	37,7	35,6	35,6	40,2
3	102,6	102,6	89,1	84,3	89,3	88,2	74,9	76
4	109,3	105,9	88,5	85,1	113,3	113,1	82,2	82
5	49,8	48,1	66,2	61,9	71,8	73,2	54,7	51,3
6	59	61,7	62,3	66,8	55,7	67,7	62,6	67,8
7	62,3	63,9	47,7	51,2	62,9	61,5	54,6	68,6
8	167,6	163,5	153,3	153,1	165,5	198,8	160,4	154,5
9	34,5	37,1	44,5	39	39,3	43,1	57,5	55,6
10	74,8	75,5	57,5	58,5	66,8	67,3	60,1	52,2
11	119	118,2	94,2	99,9	135,7	142,9	140,8	146,4
12	89,1	89,8	81,4	80,6	90,2	91,1	89,4	94,5
13	57,4	57,8	53,2	55,9	70,5	69,6	37,1	43,4
14	59,9	58,7	76,9	73,5	94,9	94,2	72,7	79,8
15	57,6	53,4	69,4	67,2	66,9	64,2	59,3	52,5
16	41,4	42,1	31,9	33,9	31,7	28,8	37,4	37,9
17	75,9	77,3	69,3	60,5	77,5	78,3	85,2	77,2
18	109,1	110,5	91	88,3	87,6	89	92,7	89
19	38,5	38,1	24,3	19,4	38,8	39,5	28,6	29,5
20	71,2	70,9	75,7	98,7	71,5	75,6	57,2	54,4
21	60	60,3	60,9	68,2	56	55,2	38,7	35
22	84,8	81,8	78,1	73,9	82,5	79,4	88,2	82,4
23	91,8	90,8	99	97,6	103,3	103	87,4	87
24	95,6	93,4	86,8	81,1	77,5	80,5	88,1	90,7
25	136,3	133,1	60,9	64,4	113	110,7	120,4	112,7

Tabela 26. Dwie serie pomiarów w średnim paśmie częstotliwości (MB)

	MB							
	MDL-54		MGG-11		GPW-8		STPPD	
	I seria	II seria	I seria	II seria	I seria	II seria	I seria	II seria
1	22,6	22,2	23,9	23,2	34	34,7	66,6	64,5
2	23,7	23,5	22,5	19,5	31,4	32,3	50,1	49
3	21,8	22,1	18,1	17,7	32,9	32,3	76,2	73,3
4	17,4	15,8	23,7	21,8	34,1	34,5	41,3	46,3
5	24	23	17,9	20	31,8	33,3	56,4	49,8
6	27,6	27,6	21,6	29,6	34,3	35,6	51,4	49,1
7	21,2	19	21,9	22,8	31,8	31,9	84,1	65,8
8	23,7	24	24,3	24	34,4	32,4	67,5	64,1
9	16,9	16,6	21,9	21,7	31,6	32,9	45	43,7
10	21,7	21,9	24,9	22,7	41,6	44,6	57,8	56,8
11	19,4	19,7	22	24,9	34	34	50,6	45,4
12	19,7	19,1	19,3	20,6	30,9	31,9	48,2	46,3
13	24,6	24,1	24,1	20,4	33,8	35,2	46,9	48,8
14	20,6	20,1	16,6	15,5	37	36,4	40,3	40,4
15	25,2	23,4	17	19,6	31,5	31,3	52,5	61,9
16	20,2	19,5	17,2	18,7	31,4	32	49,7	51,3
17	15,9	16,7	20,9	16,8	32,1	31,1	51,3	49,8
18	18,7	19,7	19,3	18,6	30,1	31,6	66,9	67,5
19	19,8	20	20,6	20,8	40,8	45,4	74,6	57,4
20	21,9	22	21,1	38,4	31,1	31,1	62,6	64,8
21	22,5	22,9	19,1	22,1	31,8	31,7	53,4	57,8
22	22,8	22,2	19,6	20,2	31,2	33,5	62,8	61,6
23	22,1	22,7	18,4	19,2	31,7	32	53,3	61,5
24	22,9	22,8	21,1	19,6	33,2	35,2	38,8	38,6
25	23,9	23,4	21,6	24,3	34,2	33,9	51,6	47,3

Tabela 27. Dwie serie pomiarów w wysokim paśmie częstotliwości (HB)

	HB							
	MDL-54		MGG-11		GPW-8		STPPD	
	I seria	II seria	I seria	II seria	I seria	II seria	I seria	II seria
1	57,1	58,2	51,8	63,9	81,6	70,8	49,9	51,6
2	82,8	82,9	73,5	74,5	90,6	111,9	77	71,3
3	47,8	48,1	37,2	35,5	47,8	45,7	39,6	40,2
4	46,6	45,8	39,8	36,7	62,6	60,1	47	42,5
5	66,6	64,2	59,3	58,6	81,1	81,5	68,6	65,3
6	45,9	51	39,7	35,3	50,5	50,6	41,8	41
7	52,5	52,2	43,4	37,5	60,4	56,1	47,1	49,6
8	92,1	92,8	87	84,2	161,7	160,6	117,3	106,5
9	41,7	57	40,5	34,4	50,1	50,7	38	36,5
10	43,8	42,9	35,1	33	52	52	48,3	39,5
11	43,2	42,7	38,5	36,9	57,7	58,8	51,7	48,6
12	39,6	39,1	33,6	31,1	53,5	51,9	38,5	37,6
13	51,7	52,4	42	43,5	73,6	68,4	62,2	58,7
14	38,8	39,7	46,2	37,1	47,9	48,2	40,5	42,3
15	60,5	47,9	47,1	44,6	62,3	62,6	54,2	50,9
16	44,8	46,5	48,1	46,7	68,9	70,2	53,1	59,4
17	40,6	42,6	36,1	36,5	50,7	47,5	40,4	36,2
18	49	51,8	44,2	40,2	53,8	52	55,8	49,3
19	45,1	44,8	41,4	40,7	51,6	49,1	52,4	39,2
20	47	47	43,9	41,4	50,3	52,6	48,2	48,9
21	46,5	53,5	38	34,9	44,1	46,9	46,9	41,9
22	52,7	54,3	41,8	40,6	51,6	49,8	45,2	43,4
23	47,2	51,1	43,4	40,6	53,4	52,8	45,8	44,5
24	38,8	39	35,5	33	52,5	48,2	39,1	36,5
25	49,5	50,5	36,7	33,2	62,2	63,6	52	51,8

Tabela 28. Wyniki powtarzalności i odtwarzalności systemów pomiarowych w niskim paśmie częstotliwości (LB) 50 – 300 Hz

	LB (50 – 300 Hz)			
	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
EV	8,21	25,09	18,66	24,20
%EV	9,78	29,87	22,22	28,80
%R&R	9,78	29,87	22,22	28,80

Tabela 29. Wyniki powtarzalności i odtwarzalności systemów pomiarowych w średnim paśmie częstotliwości (MB) 300 – 1800 Hz

	MB (300 – 1800 Hz)			
	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
EV	3,23	13,56	5,89	22,11
%EV	4,37	18,32	7,97	29,88
%R&R	4,37	18,32	7,97	29,88

Tabela 30. Wyniki powtarzalności i odtwarzalności systemów pomiarowych w wysokim paśmie częstotliwości (HB) 1800 – 10000 Hz

	HB (1800 – 10000 Hz)			
	MDL-54	MGG-11	GPW-8	STPPD
EV	13,34	16,85	15,68	20,13
%EV	19,62	24,78	23,06	29,60
%R&R	19,62	24,78	23,06	29,60

Wyniki należy odnieść do granic zdolności systemów:

$0 \leq \%R\&R \leq 10\% (20\%)$	Przyrząd pomiarowy jest zdolny
$10\% (20\%) \leq \%R\&R \leq 30\%$	Przyrząd pomiarowy jest warunkowo zdolny
$\%R\&R > 30\%$	Przyrząd pomiarowy jest całkowicie niezdolny

Wyniki badań powtarzalności (EV) oraz rozrzutu systemu pomiarowego (%R&R) czterech analizowanych systemów pomiarowych: MDL-54, MGG-11, GPW-8 oraz STPPD, dostarczają istotnych informacji na temat ich zdolności pomiarowej w trzech różnych zakresach częstotliwości: niskim, średnim oraz wysokim. W badaniach tych, ze względu na automatyczny charakter pomiarów, zastosowano Procedurę 3, która jest odpowiednia dla tego rodzaju systemów (automatyczny pomiar).

W niskim paśmie częstotliwości, system MDL-54 wykazał się najwyższą precyzją pomiarową, osiągając wartość %R&R równą 9,78%. Oznacza to, że system ten mieści się w granicach pełnej zdolności pomiarowej, zgodnie z przyjętymi kryteriami, gdzie wartość %R&R poniżej 10% wskazuje na zdolność przyrządu pomiarowego. W przemyśle motoryzacyjnym stosowane są zaostrzone kryteria %R&R do 10% [70]. Z kolei systemy MGG-11, GPW-8 i STPPD z wartościami %R&R pomiędzy 10% a 30% zostały zakwalifikowane jako warunkowo zdolne. Wyniki te sugerują, że mimo iż systemy te mogą być stosowane w procesach pomiarowych, ich dokładność jest ograniczona, co może wymagać dodatkowej uwagi lub kalibracji w celu poprawy ich zdolności.

W średnim paśmie częstotliwości, system MDL-54 ponownie wykazał się najlepszą zdolnością pomiarową, osiągając wynik %R&R na poziomie 4,37%, co jednoznacznie kwalifikuje go jako zdolny do precyzyjnych pomiarów. Inne systemy, takie jak GPW-8 i MGG-11, również uzyskały zadowalające wyniki, odpowiednio 7,97% i 18,32%, co wskazuje na ich pełną zdolność pomiarową. Natomiast system STPPD z wynikiem 29,88% znalazł się na granicy warunkowej zdolności, co sugeruje, że choć może być

stosowany, jego precyzja w tym zakresie częstotliwości jest ograniczona i może nie spełniać wymagań w przypadku bardziej wymagających aplikacji.

Wysokie pasmo częstotliwości okazało się największym wyzwaniem dla analizowanych systemów. Żaden z systemów nie osiągnął wartości %R&R poniżej 10%, co oznacza, że wszystkie systemy są zdolne jedynie warunkowo. System MDL-54 uzyskał wynik 19,62%, co jest najlepszym rezultatem w tej grupie, ale nadal wskazuje na ograniczoną zdolność pomiarową. Systemy MGG-11, GPW-8 oraz STPPD osiągnęły odpowiednio 24,78%, 23,06% oraz 29,6%, co również klasyfikuje je jako warunkowo zdolne. Wyniki te sugerują, że w zakresie wysokich częstotliwości precyzja pomiarowa tych systemów może być niewystarczająca do pewnych zastosowań, a ich użycie wymaga szczególnej ostrożności oraz ewentualnego wsparcia innymi metodami kontrolnymi.

Podsumowując, badania wykazały, że system MDL-54 charakteryzuje się najlepszą zdolnością pomiarową we wszystkich trzech zakresach częstotliwości, co czyni go najbardziej odpowiednim do precyzyjnych zastosowań. Systemy GPW-8 i MGG-11 również wykazują zadowalającą zdolność pomiarową, szczególnie w średnim paśmie częstotliwości, jednak ich zdolność w wysokim paśmie jest ograniczona. System STPPD, choć warunkowo zdolny w każdym z badanych zakresów, wykazuje największe ograniczenia, zwłaszcza w wysokim paśmie częstotliwości, co może wpłynąć na jego zastosowanie w bardziej wymagających procesach pomiarowych. Wyniki te sugerują konieczność dalszej optymalizacji i kalibracji systemów, szczególnie w zakresie wysokich częstotliwości, aby poprawić ich zdolność pomiarową i spełnić wymagania dotyczące dokładności w bardziej wymagających aplikacjach.

10. WNIOSKI Z BADAŃ NAD SYSTEMAMI DO POMIARÓW DRGAŃ ŁOŻYSK

1. Ocena precyzji i dokładności systemów pomiarowych

Przeprowadzone badania wykazały, że system pomiarowy MDL-54 cechuje się najwyższą precyzją i dokładnością w porównaniu do pozostałych systemów pomiarowych analizowanych w eksperymencie, tj. MGG-11, GPW-8 oraz STPPD. Na tę przewagę składa się kilka kluczowych wskaźników metrologicznych, które jednoznacznie potwierdzają wyższość MDL-54.

2. Normalność rozkładu wyników pomiarów

Testy normalności przeprowadzone na wynikach pomiarów uzyskanych z każdego z systemów potwierdziły, że rozkłady te nie odbiegają od rozkładu normalnego. Test χ^2 (chi-kwadrat) oraz analiza kurtozy i skośności wskazują, że wyniki pomiarów dla wszystkich systemów pomiarowych w badanych pasmach częstotliwości mieszczą się w normach dla rozkładu normalnego, co świadczy o braku znaczących odchyień. Wartości kurtozy i skośności mieszczące się w przedziale od -2 do 2 dodatkowo potwierdzają, że wyniki pomiarów są zgodne z założeniami statystycznymi, co jest kluczowe w kontekście wiarygodności i porównywalności danych uzyskanych z różnych systemów pomiarowych.

3. Analiza rozstępu wyników pomiarowych

Rozstęp wyników, czyli różnica pomiędzy najwyższą a najniższą wartością pomiarową, jest istotnym wskaźnikiem precyzji systemu pomiarowego. W badaniach zaobserwowano, że system MDL-54 charakteryzuje się najmniejszym rozstępem wyników pomiarowych, co świadczy o jego wysokiej dokładności. Oznacza to, że system ten jest

w stanie generować wyniki o najmniejszej rozpiętości, co jest kluczowe w kontekście precyzyjnych pomiarów drgań łożysk tocznych.

4. Odchylenie średnie kwadratowe

Odchylenie średnie kwadratowe stanowi kolejny istotny wskaźnik oceny systemu pomiarowego. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że system MDL-54 wykazuje najniższe odchylenie średnie kwadratowe w porównaniu do pozostałych systemów. Niskie wartości odchylenia sugerują, że pomiary wykonane przez MDL-54 są bardziej skoncentrowane wokół średniej wartości, co przekłada się na większą stabilność i powtarzalność wyników. Jest to szczególnie istotne w kontekście zastosowań wymagających najwyższej precyzji, gdzie minimalizacja odchylenia od wartości średniej jest kluczowa.

5. Brak wzorcowego łożyska i wpływ na wyniki

Brak wzorcowego łożyska, stanowiącego punkt odniesienia dla pomiarów, stanowił jedno z głównych wyzwań badawczych. Aby zniwelować ten problem, przyjęto średnią arytmetyczną z 200 pomiarów tego samego łożyska jako wartość odniesienia. Pomimo tego, system MDL-54 wykazał najmniejsze odchylenie średniej arytmetycznej od tej wartości odniesienia, co potwierdza jego wysoką precyzję. Wyniki te sugerują, że opatentowany osiowy docisk w systemie MDL-54 minimalizuje błędy systematyczne i zapewnia większą stabilność pomiarową, co jest kluczowe dla uzyskania dokładnych wyników pomiarowych w sytuacji braku wzorca.

6. Porównanie wariancji wyników pomiarowych

Porównanie wariancji wyników pomiarowych pomiędzy różnymi systemami wykazało, że system MDL-54 charakteryzuje się najniższą wariancją, co jest istotnym wskaźnikiem jego stabilności i precyzji. Test

porównania wariancji jednoznacznie wskazał, że różnice pomiędzy wariancją wyników uzyskanych przez MDL-54 a pozostałymi systemami są istotne statystycznie. Oznacza to, że system MDL-54 jest bardziej odporny na zmienność warunków pomiarowych, co czyni go bardziej niezawodnym narzędziem w pomiarach drgań łożysk tocznych.

7. Analiza dokładności pomiarowej DP

Dokładność pomiarowa DP jest kluczowym wskaźnikiem oceny zdolności systemów pomiarowych do precyzyjnego odwzorowania rzeczywistych wartości drgań generowanych przez łożyska. W badaniach przyjęto, że systemy z DP poniżej 30% mogą być stosowane bez zastrzeżeń, w granicach 30-50% mogą być używane z pewnymi ograniczeniami, natomiast systemy z DP powyżej 50% wymagają przeglądu technicznego.

System MDL-54 wykazał się wartością DP poniżej 30% we wszystkich analizowanych pasmach częstotliwości, co kwalifikuje go jako system pomiarowy zdolny do precyzyjnych pomiarów drgań. W szczególności, w średnim paśmie częstotliwości, MDL-54 osiągnął wartość DP na poziomie poniżej 20%, co jednoznacznie potwierdza jego zdolność do precyzyjnych pomiarów w tym zakresie. Wysoka dokładność pomiarowa DP systemu MDL-54 we wszystkich pasmach częstotliwości wskazuje na jego wszechstronność i przydatność w różnorodnych zastosowaniach metrologicznych.

Przeprowadzona analiza dokładności pomiarowej (DP) systemów MGG-11, GPW-8 oraz STPPD w odniesieniu do wzorcowego systemu MDL-54 wykazała, że żaden z tych systemów nie jest w stanie w pełni zastąpić MDL-54.

System MDL-54 pozostaje niezastąpionym wzorcem, a pozostałe systemy (MGG-11, GPW-8 i STPPD) mogą być stosowane jedynie w ograniczonych warunkach, zależnych od pasma częstotliwości.

8. Ocena błędów systematycznych i test porównania średnich

Analiza błędów systematycznych w pomiarach wykazała, że system MDL-54 generuje najmniejsze błędy systematyczne w porównaniu do innych systemów pomiarowych. Wyniki testu porównania średnich wartości pomiarowych były jednak niejednoznaczne, co sugeruje, że niektóre systemy mogą być bardziej podatne na błędy systematyczne niż inne. Niemniej jednak, opatentowany osiowy docisk w systemie MDL-54 znacząco redukuje te błędy, co przekłada się na wyższą precyzję i dokładność pomiarów w porównaniu do przegubowych docisków stosowanych w pozostałych systemach.

9. Test powtarzalności (EV) i rozrzutu (%R&R)

Wyniki testów powtarzalności oraz analizy rozrzutu (%R&R) czterech analizowanych systemów pomiarowych dostarczyły istotnych informacji na temat ich zdolności pomiarowej w różnych zakresach częstotliwości. System MDL-54 wykazał się najwyższą precyzją pomiarową, osiągając wartość %R&R poniżej 10% w niskim i średnim paśmie częstotliwości, co jednoznacznie kwalifikuje go jako zdolny do precyzyjnych pomiarów. Wyniki te sugerują, że MDL-54 jest bardziej niezawodnym narzędziem w pomiarach drgań łożysk tocznych niż pozostałe systemy, zwłaszcza w zastosowaniach wymagających najwyższej precyzji.

10. Podsumowanie wyników dla różnych pasm częstotliwości

Analiza wyników pomiarowych w różnych pasmach częstotliwości wykazała, że system MDL-54 osiąga najlepsze wyniki we wszystkich analizowanych zakresach. W niskim paśmie częstotliwości, MDL-54 charakteryzował się najwyższą precyzją, osiągając najniższe wartości rozstępu wyników i odchylenia średniego kwadratowego. W średnim paśmie częstotliwości system MDL-54 ponownie wykazał się najwyższą zdolnością pomiarową, osiągając wartość %R&R na poziomie 4,37%. Wysokie pasmo częstotliwości okazało się największym wyzwaniem dla

wszystkich systemów, jednak MDL-54 osiągnął najlepsze wyniki, co sugeruje, że jest on najbardziej wszechstronnym narzędziem pomiarowym w szerokim zakresie częstotliwości.

11. Rekomendacje dotyczące przyszłych badań i rozwoju technologicznego

W oparciu o uzyskane wyniki, rekomenduje się dalsze prace nad udoskonaleniem systemu MDL-54, szczególnie w kontekście jego zdolności pomiarowej w wysokim paśmie częstotliwości. Wskazane byłoby również przeprowadzenie badań nad kalibracją i optymalizacją pozostałych systemów pomiarowych, takich jak MGG-11, GPW-8 oraz STPPD, aby poprawić ich dokładność i precyzję w różnych zakresach częstotliwości.

Kolejnym krokiem w rozwoju technologii powinno być opracowanie wzorcowego łożyska o znanym poziomie drgań, które mogłoby stanowić punkt odniesienia w przyszłych badaniach. Takie łożysko pozwoliłoby na jeszcze dokładniejsze porównanie wyników uzyskanych z różnych systemów pomiarowych i mogłoby stać się standardem w metrologii drgań łożysk tocznych.

12. Wnioski dotyczące zastosowania wyników w praktyce przemysłowej

Wyniki badań wskazują na wysoką użyteczność systemu MDL-54 w przemyśle, zwłaszcza w kontekście monitorowania stanu technicznego łożysk tocznych w maszynach o wysokich wymaganiach precyzyjnych. Jego zdolność do dokładnego pomiaru drgań w szerokim zakresie częstotliwości czyni go idealnym narzędziem do zastosowań w różnych gałęziach przemysłu, od produkcji maszyn precyzyjnych po przemysł lotniczy i motoryzacyjny.

Wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują na wyższość systemu MDL-54 nad pozostałymi analizowanymi systemami pomiarowymi, zarówno pod względem dokładności, jak i precyzji

pomiarów drgań łożysk tocznych. Wysoka zdolność pomiarowa, potwierdzona niskimi wartościami %R&R, czyni go niezastąpionym narzędziem w monitorowaniu i diagnozowaniu stanu technicznego łożysk w aplikacjach przemysłowych. Przyszłe badania powinny skupić się na dalszym doskonaleniu tego systemu oraz opracowaniu standardów metrologicznych, które zapewnią jeszcze wyższą jakość pomiarów w różnych warunkach operacyjnych.

Powyżej sformułowane wnioski pozwalają na udowodnienie wstępnie ustalonej hipotezy badawczej:

Uwzględniając właściwości metrologiczne zbudowanego systemu pomiarowego istnieją teoretyczne i praktyczne przesłanki do jego zastosowania w warunkach przemysłowych w celu podniesienia jakości wyprodukowanych wyrobów.

LITERATURA

- [1] Adamczak S.: Metrologia geometryczna powierzchni technologicznych. PWN Warszawa 2024, s. 309-326.
- [2] Adamczak S.: Pomiary geometryczne powierzchni. Zarys kształtu, falistości i chropowatości. WNT Warszawa 2003, s. 206-225.
- [3] Adamczak S., Domagalski R., Sender E., Zmarzły P., Gorycki Ł.: Research methods and testing stand developed to examine vibrations generated by rolling bearing. *Diagnostyka* 17(1) 2016, s. 41-49, ISSN 1641-6414.
- [4] Adamczak S., Domagalski R., Sender E., Zmarzły P., Gorycki Ł.: Research methods and testing stand developed to examine vibrations generated by rolling bearing. *Diagnostyka* 17(1) 2016, s. 41-49, ISSN 1641-6414.
- [5] Adamczak S., Makiela W.: Podstawy metrologii i inżynierii jakości dla mechaników. WNT Warszawa 2010, s. 36-66, 126-135.
- [6] Adamczak S., Wrzochal M.: Badania porównawcze wybranych systemów pomiarowych drgań łożysk tocznych. *Mechanik* 2018, vol. 7, s. 498-500,
DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.64>
- [7] Adamczak S., Wrzochal M., Zmarzły P.: Metody pomiaru drgań łożysk tocznych. *Mechanik* 2017, vol. 8-9, s. 734 – 736,
DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.8-9.107>
- [8] Adamczak S., Zmarzły P.: Influence of raceway waviness on the level of vibration in rolling element bearings. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences* 2017, vol. 65 (4), 541-551, DOI:10.1515/bpasts-2017-0059
- [9] Ahmed M., Baqqar F., Gu F., Ball A. D.: Fault detection and diagnosis using Principal Component Analysis of vibration data from a reciprocating compressor. *The 2012 UKACC International Conference on Control* 2012, s. 461-466, Cardiff, UK, DOI: 10.1109/CONTROL.2012.6334674

- [10] Ahmed M., Gu F., Ball A. D.: Feature selection and fault classification of reciprocating compressors using a genetic algorithm and a probabilistic Neural Network. *The 9th International Conference Damage Assessment of Structures*, DOI: 10.1088/1742-6596/305/1/012112
- [11] Atef M.M., Khair-Eldeen W., Yan J., Nassef M.: Investigating the Combined Effect of Multiple Dent and Bump Faults on the Vibrational Behaviour of Ball Bearings. *Machines* 2022, vol. 10 (11), 1062, <https://doi.org/10.3390/machines10111062>
- [12] Aktürk N.: The effect of waviness on vibrations associated with ball bearings. *Journal of Tribology* 1999, 121 (4), s. 667-677, <https://doi.org/10.1115/1.2834121>
- [13] Ambrożkiewicz B., Przystupa K., Wnuk S.: Czynniki wpływające na poziom drgań łożysk. *AUTOBUSY – Technika Eksploatacja Systemy Transportowe* 2018, 19(12), s. 273-276, DOI: 10.24136/atest.2018.397
- [14] Anantapadmanaban T, Radhakrishnan V. An investigation of the role of surface irregularities in the noise spectrum of rolling and sliding contacts. *Wear* 1982, vol. 83, s. 399-409, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(82\)90192-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(82)90192-2)
- [15] Antoni J.: The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2006, vol. 20 (2), s. 282-307, DOI: 10.1016/J.YMSSP.2004.09.001
- [16] Arendarski J.: Niepewność pomiaru. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2003.
- [17] Aslamov Y., Davydov I., Zolotarev A., Aslamov A.: Sparse wavelet decomposition of signals for solving vibration diagnostics problems. *The 15 th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies* 2018, s. 1726-1736, Corpus ID: 229377918.

- [18] Babu C.K., Tandon N., Pandey R.K.: Vibration modelling of a rigid rotor supported on the lubricated angular contact ball bearings considering six degrees of freedom and waviness on ball and races. *Journal of Vibration and Acoustics* 2012; vol. 134 (1), DOI: 10.1115/1.4005140
- [19] Broch J.T. (red.): Mechanical Vibration and Shock Measurements. *Brüel&Kjaer Søborg* 1984, s.97-100; 339-344.
- [20] Burda J.A., Zusman G. V., Kudryavtseva I.S.: An Overview of Vibration Analysis Techniques for the Fault Diagnostics of Rolling Bearings in Machinery. *Shock and Vibration* 2022, Article ID 6136231, 14 stron, <https://doi.org/10.1155/2022/6136231>
- [21] Caesarendra W., Tjahjowidodo T.: A review of feature extraction methods in vibration-based condition monitoring and its application for degradation trend estimation of low-speed slew Bearing. *Machines* 2017, vol. 5 (4), s.1-21, <https://doi.org/10.3390/machines5040021>
- [22] Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN Warszawa 1989, s.380.
- [23] Cempel C., Stepaniak Z. Noise and vibration of the new ball bearings. In: *Proceedings of 4th International Tribology Conference* 1979, s. 425-433.
- [24] Cempel C., Tomaszewski F. Diagnostyka maszyn: zasady ogólne, przykłady zastosowań. *Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego Radom* 1992, 147-150, 159-165.
- [25] Chen Y., Gaoliang P., Zhiyu Z., Sijue L. A: Novel Deep Learning Method Based on Attention Mechanism for Bearing Remaining Useful Life Prediction. *J. Applied Soft Computing* 2020, vol. 86, 105919–105930, DOI:10.1016/j.asoc.2019.105919.
- [26] Cheng C., Guijun M., Yong Z., Mingyang S., Fei T., Han D., Ye Y.: A Deep Learning-Based Remaining Useful Life Prediction Approach for Bearings. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2020, vol. 25, s. 1243–1254, DOI:10.1109/TMECH.2020.2971503

- [27] Choudhary A., Mian T., Fatima S.: Convolutional neural network-based bearing fault diagnosis of rotating machine using thermal images. *Measurement* 2021, vol. 176, 109196, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109196>
- [28] Choudhury A and Tandon N.: Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International* 2000; vol. 33, s. 39–45, DOI:10.1016/S0301-679X(00)00012-8
- [29] Cockerill A., Clarke A., Pullin R., Bradshaw T., Cole P., Holford KM.: Determination of rolling element bearing condition via acoustic emission. *Journal of Engineering Tribology* 2016, vol. 230(11), s. 1377-1388, <https://doi.org/10.1177/1350650116638612>
- [30] Cockerill A, Holford KM, Bradshaw T.: Use of high frequency analysis of acoustic emission signals to determine rolling element bearing condition. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015; 628, DOI 10.1088/1742-6596/628/1/012074
- [31] Coo H., Fan F., Zhou K., He Z.: Wheel-bearing fault diagnosis of trains using empirical wavelet transform. *Measurement* 2016, vol. 82, s. 439-449, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.023>
- [32] Couturier J and Mba D.: Operational bearing parameters and acoustic emission generation. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2008; 130 (2): 024502, DOI:10.1115/1.2776339
- [33] Crocker M.J. (red.): Handbook of Noise and Vibration Control. WILEY Hoboken 2007, s.444-450; 501-504.
- [34] Dietrych E., Schulze A.: Metody statystyczne w kwalifikacji środków pomiarowych maszyn i procesów produkcyjnych. Notika System, Warszawa 2000.
- [35] Dybała J., Zimroz R.: Rolling bearing diagnosing method based on Empirical Mode Decomposition of machine vibration signal. *Applied Acoustics* 2014, vol. 77, s. 195 – 203, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.09.001>

- [36] Dwojak J., Rzepiela M. Diagnostyka i obsługa techniczna łożysk tocznych. *Poradnik. Biuro Gamma*, Warszawa 2003, s. 57-58, 77-81, 90-93.
- [37] Dwojak J., Rzepiela M., Struzik I.: Wykorzystanie wibrometru laserowego do diagnostyki eksploatacyjnej silników elektrycznych na podstawie własnych doświadczeń. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne 2011*, vol. 89 (PGE Elektrownia OPOLE S.A.), s. 57 – 63.
- [38] El Idrissi A., Derouich A., Mahfoud S., El Ouanjli N., Chantoufi A., Al-Sumaiti S.A., Mossa A.M.: Bearing Fault Diagnosis for an Induction Motor Controlled by an Artificial Neural Network—Direct Torque Control Using the Hilbert Transform. *Mathematics* 2022, vol. 10 (22), 4258, <https://doi.org/10.3390/math10224258>
- [39] Ewert P., Kowalski Cz.: Neuronowy detektor uszkodzeń łożysk tocznych. *Zeszyty problemowe – Maszyny elektryczne 92/2011* (Politechnika Wrocławska), s. 205-210.
- [40] Fan Y.E., Harris G., Gu F., Ball A.: Monitoring the Lubrication Condition of Rolling Element Bearings Using the Acoustic Emission Technique. *Engineering Systems Design and Analysis, ASME 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis 2008, ESDA2006-95006*, s. 843-848, <https://doi.org/10.1115/ESDA2006-95006>
- [41] George D., Mallery P.: IBM SPSS Statistics 27 Step by Step, A Simple Guide and Reference. *Routledge* 2021.
- [42] Gupta P., Pradhan M., K. Fault detection analysis in rolling element bearing: A review. *5th International Conference of Materials Processing and Characterization, Materials Today: Proceedings*, vol. 4 (2A), 2017, s. 2085-2094, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.054>

- [43] Hasan M.J., Kim J.M.: Bearing fault diagnosis under variable rotational speeds using stockwell transform-based vibration imaging and transfer learning. *Applied Sciences* 2018, vol. 8 (12), 2357, <https://doi.org/10.3390/app8122357>
- [44] Hase A., Mishina H., Wada.: Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. *Wear* 2012; vol. 292–293: s. 144–150, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.019>
- [45] Hemmati F., Miraskari M., Gadala M.S.: Application of wavelet packet transform in roller bearing fault detection and life estimation. *Journal of Physics: Conference Series* 2018, 1074 012142, DOI 10.1088/1742-6596/1074/1/012142
- [46] Hou P.P., Wang L.Q., Peng Q.Y.: Vibration analysis of ball bearing considering waviness under high speed and axial load. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences* 2020, vol. 68 (3), 517-527, DOI: 10.24425/bpasts.2020.133382
- [47] Huang N.E., Wu Z.: A review on Hilbert-Huang Transform: Method and its applications to geophysical studies. *Reviews of Geophysics* 2008, vol. 46 (2), <https://doi.org/10.1029/2007RG000228>
- [48] Igarashi T., Yabe S. Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings (Second Report: Sound of ball bearings with one defect). *Bulletin of the JSME* 1983, vol. 26 (220), s. 1791–1800, DOI: 10.1299/JSME1958.26.1791.
- [49] Jang G.H., Jeong S.W.: Nonlinear excitation model of ball bearing waviness in a rigid rotor supported by two or more ball bearings considering five degrees of freedom. *Journal of Tribology* 2002, vol. 124 (1), s. 82-90, <https://doi.org/10.1115/1.1398289>
- [50] Janssens O., Schulz R., Sławkowikj W., Stockmana K., Loccufer M., Van de Walle R., Van Hoecke S.: Thermal image-based fault diagnosis for rotating machinery. *Infrared Physics & Technology* 2015, vol. 73, s. 78-87, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.09.004>

- [51] Klepka A.: Wavelet based signal demodulation technique for bearing fault detection. *Mechanics and Mechanical Engineering 2011*, vol. 15 (4), s. 63-71.
- [52] Knežević I., Rackov M., Kanović Ž., Buljević A., Antić A., Tica M., Živković A.: An Analysis of the Influence of Surface Roughness and Clearance on the Dynamic Behaviour of Deep Groove Ball Bearings Using Artificial Neural Networks. *Materials 2023*, vol. 16 (9), 3529, <https://doi.org/10.3390/ma16093529>
- [53] Knežević I., Živković, A., Rackov, M., Kanović, Ž., Bojanić Š.M.: Analysis of the impact of lubrication on the dynamic behaviour of ball bearings using artificial neural networks. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration 2019*, vol. 16 (2), s. 178-183, ISSN 1584-7284.
- [54] Knežević I., Živković A., Rackov M., Kanović Ž., Buljević A., Bojanić Š.M., Navalušić S.: Prediction of radial clearance based on bearing vibration using artificial neural network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, The 5th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering (CoSME'20) 2020*, 1009 012028, DOI 10.1088/1757-899X/1009/1/012028
- [55] Kostyukov V.N., Naumenko A.P.: Standardization In the sphere of Vibrodiagnostic monitoring of piston compressors. *Procedia Engineering 2015*, vol. 113, s. 370-380, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.290>
- [56] Krishnamoorthy V. Anitha John A., Bhaumik S., Paleu V.: Mapping Acoustic Frictional Properties of Self-Lubricating Epoxy-Coated Bearing Steel with Acoustic Emissions during Friction Test. *Technologies 2024*, vol. 12 (3), <https://doi.org/10.3390/technologies12030030>
- [57] Krzemiński-Freda H.: Łożyska toczne. PWN Warszawa 1989. s. 107-113.
- [58] Kucharski T.: System pomiaru drgań mechanicznych. PWN, Warszawa 2018, 14.

- [59] Kucharski T.: System pomiaru drgań mechanicznych. WNT Warszawa 2002, s.23-26.
- [60] Lacey S.J.: An overview of Bearing Vibration Analysis. *Maintenance & Asset Management 2008*, vol. 23 (6), s. 32 – 42, Corpus ID: 771122.
- [61] Li C.J., Jun M.: Wavelet decomposition of vibrations for detection of bearing – localized defects. *NDT & E International 1997*, vol. 30 (3), s. 143 – 149,
[https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(96\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(96)00052-7)
- [62] Lin H., Ye Y.C., Huang B.J., Su J.L.: Bearing vibration detection and analysis using enhanced fast Fourier transform algorithm. *Advances in Mechanical Engineering 2016*, vol. 8 (10), s. 1-14, DOI:10.1177/1687814016675080
- [63] Li S., Yang W., Zhang A., Liu H., Huang J., Li C., Hu J.: A novel Method of Bearing Fault Diagnosis in Time-Frequency Graphs Using Inception Resnet and Deformable Convolution Networks. *IEEE Access 2020*, vol. 8, 92743-92753, DOI 10.1109/ACCESS.2020.2995198
- [64] Li X., Li M., Liu B., Liu Ch.: A Novel Transformer Network Based on Cross-Spatial Learning and Deformable Attention for Composite Fault Diagnosis of Agricultural Machinery Bearings. *Agriculture*, 2024, vol. 14 (8)1397,
<https://doi.org/10.3390/agriculture14081397>
- [65] Łuczak D., Brock S., Siembab K.: Cloud Based Fault Diagnosis by Convolutional Neural Network as Connectivity. *Sensors 2023*, vol. 23 (7), 3755,
<https://doi.org/10.3390/s23073755>
- [66] Marynowski K. (red.): Laboratorium drgań mechanicznych. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Łódź 2002, s. 3-13.
- [67] McFadden P., Smith J.D.: Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration 1984*, vol. 96 (1), s. 69-82,
[https://doi.org/10.1016/0022-460X\(84\)90595-9](https://doi.org/10.1016/0022-460X(84)90595-9)

- [68] Meserkhani A., Jafari S.M., Rahi A.: Experimental comparison of acoustic emission sensors in the detection of outer race defect of angular contact ball bearings by artificial neural network. *Measurement* 2021, vol. 168, 108198, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108198>
- [69] Miettinen J., Adersson P., Wikströ V.: Analysis of Grease Lubrication of a Ball Bearing Using Acoustic Emission Measurement. 2001. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering tribology* 2001, vol. 215 (6), <https://doi.org/10.1243/1350650011543781>
- [70] MSA Measurement Systems Analysis, Fourth Edition 2010, s. 102-105, 118-123, 203
- [71] Nadabaică D.C., Nedeff V., Radkowski S., Mączak J.: The importance of FFT and BCS spectrums analysis for diagnostics and prediction of rolling bearing failure. *Diagnostyka* 2013, vol. 14 (4), s. 3-12, Corpus ID: 107393946.
- [72] Nivesrangsan P., Jantarajirojkul D.: Bearing Fault Monitoring by Comparison with Main Bearing Frequency Components Using Vibration Signal. *5th International Conference Business and Industrial Research (ICBIR), Bangkok 2018*, DOI: 10.1109/ICBIR.2018.8391209
- [73] Ono K., Takahasi K.: Theoretical analysis of shaft vibration supported by a ball bearings with small sinusoidal waviness. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, vol. 32 (3), s. 1709-1714, DOI: 10.1109/20.492853
- [74] Piotrowicz G.: Systemy oceny stanu dynamicznego łożysk tocznych za pomocą ustalenia poziomu drgań generowanych przez łożyska. *XIX krajowa, X międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Metrologia w Technikach Wytwarzania, Wrocław 2024*.
- [75] Piotrowicz G., Adamczak S.: System for the Assessment of the Dynamic State of Ball Bearings with Respect to Vibration They Generate. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2023, 17(4), s. 168-178, <https://doi.org/10.12913/22998624/169314>

- [76] Randall R.B., Antoni J.: Rolling element bearing diagnostics – A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2011, vol. 25 (2), s. 485-520, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>
- [77] Ren L., Sun Y., Wang H., Zhang L.: Prediction of bearing remaining useful life with deep convolution neural network. *IEEE Access* 2018, vol. 6, s. 13041–13049, DOI:10.1109/ACCESS.2018.2804930
- [78] Sałaciński T.: SPC Statistical Process Control. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2015, 124-128.
- [79] Saruhan H., Saridemir S., Çiçek A., Uygur I.: Vibration Analysis of Rolling Element Bearing Defects. *Journal of Applied Research and Technology*, 2014, vol. 12, s. 384-395, [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)71620-7](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)71620-7)
- [80] Sawczuk W.: Koncepcja wykorzystania wybranych charakterystyk amplitudowych sygnału drganiowego do diagnozowania kolejowego hamulca tarczowego. *Technika Transportu Szynowego* 2012, vol. 9, s. 1863-1871.
- [81] Shao Y., Wang P., Chen Z.: Effect of waviness on vibration and acoustic features of rolling element bearing. *ASME 2012, International Design Engineering Technical Conference, American Society of Mechanical Engineers, USA 2012*, s. 165-170, DOI:10.1115/DETC2012-70817
- [82] Shen C., Wang D., Hu F., Fanrang K., Tse P.: Recognition of rolling bearing fault patterns and sizes based on two-layer support vector regression machines. *Smart Structures and Systems* 2014. Vol. 13 (3), s.453-471, DOI:10.12989/sss.2014.13.3.453
- [83] Sørensen J.D.: Wind Energy Systems: Optimizing Design and Construction for Safe and Reliable Operation. *Woodhead Publishing* 2011, s. 342.
- [84] Sundström T.: An Introduction to the SPM HD Method. R&D, SPM Instrument AB, 2010.

- [85] Tandon N., Choudhury A.: A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International* 1999, vol. 32 (8), s.469-480, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00077-8)
- [86] Tandon N., Choudhury A.: A theoretical model to predict the vibration response of rolling bearings in a rotor bearing system to distributed defects under radial load. *Journal of Tribology*, 2000, vol. 122 (3), s. 609-615, DOI:10.1115/1.555409
- [87] Tandon N., Nakra B.C.: Comparison of vibration and acoustic measurement techniques for the condition monitoring of rolling element bearings. *Tribology International* 1992, vol. 25 (3), s. 205-212, [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(92\)90050-W](https://doi.org/10.1016/0301-679X(92)90050-W)
- [88] Tandon N., Nakra B.C.: Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings – a review. *The shock Vibration Digest* 1992, vol.24 (3), s. 3-11, DOI 10.1177/058310249202400303
- [89] Toma R.N., Prosvirin A.E., Kim J.M.: Bearing fault diagnosis of induction motors using a genetic algorithm and machine learning classifiers. *Sensors* 2020, vol. 20 (7), 1884, <https://doi.org/10.3390/s20071884>
- [90] Wang B., Lei Y., Yan T., Li N., Guo L.: Recurrent convolutional neural network: A new framework for remaining useful life prediction of machinery. *Neurocomputing* 2020, vol. 379, s. 117–129, DOI:10.1016/j.neucom.2019.10.0
- [91] Williams T., Ribadeneira X., Billington S.: Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2001; vol. 15 (5), s. 979–993, <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1418>
- [92] Wrzochal M., Adamczak S., Piotrowicz G., Wnuk S.: Industrial Experimental Research as a Contribution to the Development of an Experimental Model of Rolling Bearing Vibrations. *Strojnicki Vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 2022, 68(2022)9, 552-559, DOI; 10.5545/sv-jme.2022.184

- [93] Wrzochal M., Piotrowicz G., Adamczak S., Wnuk S.: Vibration measurement trends in the bearing industry. *DAAAM INTERNATIONAL SCIENTIFIC BOOK 2021*, vol. 14, s. 171-180.
- [94] Wysogład B.: Metody diagnozowania łożysk tocznych z zastosowaniem transformacji falkowej. *Diagnostyka 2003*, vol. 29, s. 47 – 52, ID: 117820236.
- [95] Xie F., Wang L., Wang G., Xiao Q.: Rolling Bearing Fault Diagnosis I Agricultural Machinery Based on Multi-Source Locally Adaptive Graph Convolution. *Agriculture 2024*, vol. 14 (8), 1333, <https://doi.org/10.3390/agriculture14081333>
- [96] Xu J., Xu P., Wei Z., Ding X., Shi L.: DC-NNMN: Across Components Fault Diagnosis Based on Deep Few-Shot Learning. *Shock and Vibration 2020*, s. 1-11, <https://doi.org/10.1155/2020/3152174>
- [97] Yang X., Zhou Y., Li X., Zhang D.: Effect of temperature changes on bearing motion of long-span steel truss continuous girder bridge. *Construction and Building Materials 2024*, vol. 430, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136440>
- [98] Yhland E.: A linear theory of vibrations caused by ball bearings with form errors operating at moderate speed. *Journal of Tribology 1992*, vol.114 (2), s. 348-359, <https://doi.org/10.1115/1.2920894>
- [99] Yoshioka T., Shimizu S.: Monitoring of Ball Bearing Operation under Grease Lubrication Using a New Compound Diagnostic System Detecting Vibration and Acoustic Emission. *Tribology Transactions 2009*, vol. 52 (6), s. 725-730, <https://doi.org/10.1080/10402000902913345>
- [100] Younus A., Yang B.: Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using infrared thermal image. *Expert Systems with Applications 2012*, vol. 39 (2), s. 2082-2091, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.004>

- [101] Zhang Q., Wei X., Wang Y., Hou Ch.: Convolutional Neural Network with Attention Mechanism and Vibration Signal Analysis for Bearing Fault Diagnosis. *Sensors* 2024, vol. 24 (6), 1831, <https://doi.org/10.3390/s24061831>
- [102] Zhang W., Peng G., Li C., Chen Y., Zhang Z.: A New Deep Learning Model for Fault Diagnosis with Good Anti-Noise and Domain Adaptation Ability on Raw Vibration Signals. *Sensors* 2017, vol. 17 (2), 425, [doi: 10.3390/s17020425](https://doi.org/10.3390/s17020425)
- [103] Zhang X., Zhang .X., Zhu L., Gao Ch., Ning B., Zhu Y.: A Graph-Data-Based Monitoring Method of Bearing Lubrication Using Multi-Sensor. *Lubricants* 2024, vol. 12 (6), 229, <https://doi.org/10.3390/lubricants12060229>
- [104] Zhou J., Qin Y., Kou L., Yuwono M., Su S.: Fault detections of rolling bearing based on FFT and classification. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing* 2015, vol. 9, s. 1-12, DOI: 10.1299/JAMDSM.2015JAMDSM0056
- [105] Zhou Q., Shen H., Zhao J., Liu X., Xiong X.: Degradation State Recognition of Rolling Bearing Based on K-Means and CNN Algorithm. *Shock and Vibration* 2019, vol.1, s. 1-9, DOI:10.1155/2019/8471732
- [106] Zhu J., Chen N., Peng W.: Estimation of bearing remaining useful life based on multiscale convolutional neural network. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2018, vol. 66, s. 3208–3216, DOI:10.1109/TIE.2018.2844856

Patenty:

- [P1] Adamczak S., Galant M., Kolczyński H., Domagalski R.: Zespół dociskowy obciążenia osiowego łożysk tocznych, zwłaszcza w urządzeniach do pomiaru poziomu drgań. PL 221 624 B1, 31 maja 2016 r.
- [P2] Adamczak S., Piotrowicz G., Pietrusiński L., Wrzochal M., Domagalski R.: Mechanizm dociskowy obciążenia osiowego łożysk tocznych, zwłaszcza w urządzeniach do pomiaru szumów i drgań. P.434731 A1, 21.07.2020 r.

Normy:

- [N1] Norma ISO 15242-1:2015, Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 1: Fundamentals.
- [N2] Norma ISO 15242-2:2015, Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 2: Radial ball bearings with cylindrical bore and outside surface.
- [N3] Norma ISO 15242-3:2006, Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 3: Radial spherical and tapered roller bearings with cylindrical bore and outside surface.
- [N4] Polska Norma PN-71/N-02050, Metrologia - Nazwy i określenia.
- [N5] CAHIER DES CHARGES A5.C.011 wyd. C z dn. 2005.03.07
- [N6] Norma ISO 10816-1:1995, Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts – Part 1.
- [N7] Norma ISO 10816-7:2009, Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts – Part 7.
- [N8] PKN; Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM). PKN-ISO/IEC Guide 99:2010.
- [N9] Praca zbiorowa: Wyrażanie niepewności pomiaru – przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa, 1999.

Instrukcje:

- [I1] IPL-110, wyd. F. Instrukcja oznaczania czystości mediów myjących, konserwujących, łożysk i elementów łożysk metodą mikroskopową.
- [I2] IPL-120, wyd. C. Instrukcja wykonywania badań czystości łożysk i detali łożysk metodą wagową.
- [I3] IRM-16, wyd. C. Instrukcja legalizacji szumomierzy trzypasmowych.
- [I4] ITŁ-18, wyd. E. Instrukcja pomiaru poziomego drgań łożysk kulkowych zwykłych.

- [I5] ITŁ-20, wyd. I. Instrukcja pomiaru poziomu drgań (szumu) łożysk dla odbiorcy „Leroy Somer” na urządzeniach MGG-11C, GPW-8/M i MDL-53.

Strony internetowe:

- [S1] Produkty FŁT Kraśnik, łożyska kulkowe, <https://www.flt.krasnik.pl/produkty/1-łożyska-kulkowe> (stan: 10.05.2021)
- [S2] Inspection of completed bearings, <https://www.sugawara-labs.co.jp/en/bearings/anderson> (stan: 21.09.2021)
- [S3] Vibration analysis and diagnostics, <https://evolution.skf.com/en/contactless-vibration-measurement-for-condition-monitoring> (stan: 21.09.2021)
- [S4] Anderometer® Bearing Test Instrument, Instrument To Measure Noise and Vibration In Assembled Bearings, <https://www.preved.com/anderometer.php> (stan: 22.09.2021)
- [S5] Air spindles, <https://www.newwayairbearings.com/catalog/air-spindles/> (stan: 10.10.2020)
- [S6] ZYS Bearing Vibration Testing Equipment S9912II for Tapered Roller Bearing, <https://chinazys.en.made-in-china.com/product/AdRJUmKxFrcg/China-Zys-Bearing-Vibration-Testing-Equipment-S9912II-for-Tapered-Roller-Bearing.html> (stan: 12.11.2021)
- [S7] Noise and vibration testers, <https://www.skf.com/my/products/test-measuring-equipment/noise-and-vibration-testers> (stan: 2.10.2021)
- [S8] Główny mechanik, Wibrometry, <https://glowny-mechanik.pl/2016/05/05/wibrometry/> (stan: 8.10.2021)

STRESZCZENIE

Streszczenie rozprawy doktorskiej:

„SYSTEMY OCENY STANU DYNAMICZNEGO ŁOŻYSK TOCZNYCH ZA POMOCĄ USTALENIA POZIOMU DRGAŃ GENEROWANYCH PRZEZ ŁOŻYSKA”

W ramach niniejszej rozprawy przeprowadzono kompleksową ocenę nowo zaprojektowanego systemu pomiarowego MDL-54, opracowanego przez FŁT Kraśnik S.A., dedykowanego do oceny stanu dynamicznego łożysk tocznych. Innowacyjność tego systemu polega na jego zdolności do precyzyjnego pomiaru drgań łożysk, mimo braku wzorców w postaci wzorcowych łożysk oraz dedykowanych systemów porównawczych. Celem pracy było przeanalizowanie dostępnych danych teoretycznych i eksperymentalnych, ocenienie stosowanych systemów pomiarowych stanów dynamicznych łożysk tocznych; przeprowadzenie analizy stosowanych parametrów wykorzystywanych do pomiarów drgań i szumów łożysk tocznych; ocenienie zbudowanego systemu pomiarowego dla potrzeb przemysłu łożyskowego na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem statystyki matematycznej; określenie właściwości użytkowych i metrologicznych nowo zbudowanego stanowiska pomiarowego oraz porównanie systemu MDL-54 z innymi, istniejącymi systemami pomiarowymi, w tym MGG-11 (FAG Niemcy), GPW-8 (używany w FŁT Kraśnik) oraz STPPD (Politechnika Świętokrzyska).

Rozprawa rozpoczyna się od przeglądu literatury dotyczącej pomiaru drgań łożysk tocznych, ze szczególnym uwzględnieniem ich roli w inżynierii mechanicznej. Przedstawiono aktualne metody pomiarowe, podkreślając istotność dokładnych pomiarów drgań jako czynnika wpływającego na jakość i niezawodność wyrobów mechanicznych. Omówiono także podstawowe zasady pomiaru oraz metody oceny

zarejestrowanego sygnału drgań, co stanowiło tło dla dalszej analizy porównawczej systemów pomiarowych.

Centralnym elementem rozprawy było potwierdzenie hipotezy badawczej, która zakładała, że zbudowany system MDL-54, z uwzględnieniem jego właściwości metrologicznych, posiada zarówno teoretyczne, jak i praktyczne przesłanki do zastosowania w przemyśle. Hipoteza ta opierała się na założeniu, że wdrożenie systemu MDL-54 w warunkach przemysłowych może znacząco przyczynić się do poprawy jakości produkowanych łożysk poprzez dokładniejsze monitorowanie ich stanu dynamicznego.

Badania porównawcze zostały przeprowadzone z udziałem czterech systemów pomiarowych: MDL-54, MGG-11, GPW-8 oraz STPPD. Każdy z systemów został poddany identycznym procedurom pomiarowym, obejmującym trzy zakresy częstotliwości: niską (LB), średnią (MB) oraz wysoką (HB). Test χ^2 (chi-kwadrat), analiza kurtozy oraz skośności wyników potwierdziły, że rozkłady wyników dla wszystkich systemów nie odbiegają od rozkładu normalnego. To zapewniło wiarygodność i porównywalność uzyskanych danych, co było kluczowe dla dalszej analizy.

Przeprowadzono szereg analiz statystycznych, takich jak obliczenia średniej arytmetycznej, rozstępu, odchylenia standardowego, a także testy porównania średnich i wariancji. Analiza ta była niezbędna do oceny dokładności i precyzji każdego z systemów. Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono ocenę błędów systemów pomiarowych, w tym błędów poprawności, wierności (precyzji) oraz dokładności, co pozwoliło na określenie klasy dokładności każdego systemu.

Szczególną uwagę poświęcono określeniu średniego względnego błędu pomiaru, który umożliwił oszacowanie dokładności pomiarowej (DP) każdego systemu. Wartości te były kluczowe dla potwierdzenia przydatności systemów do zastosowań przemysłowych, gdzie wysoka precyzja pomiarów drgań jest niezbędna. W końcowej fazie badań

wszystkie systemy zostały poddane testom powtarzalności, co pozwoliło na ocenę ich stabilności i niezawodności w dłuższej perspektywie.

Wyniki badań jednoznacznie potwierdziły wstępnie postawioną hipotezę badawczą. System MDL-54, opracowany przez FŁT Kraśnik, wykazał się wysoką dokładnością i precyzją pomiarów we wszystkich analizowanych zakresach częstotliwości. Dzięki temu może być skutecznie stosowany w warunkach produkcyjnych, przyczyniając się do poprawy jakości wytwarzanych łożysk tocznych. Analiza wyników potwierdziła, że system MDL-54 spełnia wszystkie wymagania metrologiczne, co czyni go odpowiednim narzędziem do monitorowania stanu dynamicznego łożysk w przemyśle.

Ponadto, badania wykazały, że system MDL-54 przewyższał pozostałe analizowane systemy pomiarowe, szczególnie pod względem dokładności pomiarowej (DP) oraz stabilności wyników. Wyniki te sugerują, że nowo zaprojektowany system może stać się standardem w pomiarach drgań łożysk tocznych, zwłaszcza w zastosowaniach wymagających wysokiej precyzji.

W ostatecznym rozrachunku, wdrożenie systemu MDL-54 w procesach produkcyjnych w FŁT Kraśnik może prowadzić do istotnych usprawnień w monitorowaniu jakości łożysk, co z kolei może przekładać się na wyższą niezawodność i trwałość wyrobów mechanicznych. Rozprawa stanowi solidne podstawy do dalszych prac badawczo-rozwojowych nad doskonaleniem systemu MDL-54 oraz jego adaptacją do szerszego zakresu zastosowań przemysłowych.

SUMMARY

Summary of the doctoral dissertation:

" SYSTEMS FOR ASSESSING THE DYNAMIC STATE OF ROLLING BEARINGS BY DETERMINING THE LEVEL OF VIBRATIONS GENERATED BY THE BEARINGS"

This dissertation included a comprehensive evaluation of the newly designed MDL-54 measurement system, developed by FŁT Kraśnik S.A., dedicated to the assessment of the dynamic state of rolling element bearings. The innovation of this system lies in its ability to accurately measure bearing vibrations, despite the lack of benchmarks in the form of standard bearings and dedicated comparison systems. The aim of the study was to analyse the available theoretical and experimental data, to evaluate the measurement systems used to measure the dynamic states of rolling element bearings; to analyse the parameters used to measure the vibration and noise of rolling element bearings; to evaluate the built measurement system for the needs of the bearing industry on the basis of experimental research using mathematical statistics; to determine the usability and metrological properties of the newly built measurement station and to compare the MDL-54 system with other existing measurement systems, including MGG-11 (FAG Germany), GPW-8 (used at FŁT Kraśnik) and STPPD (Kielce University of Technology).

The dissertation begins with a review of the literature on the measurement of rolling bearing vibration, with particular emphasis on its role in mechanical engineering. Current measurement methods are presented, emphasising the importance of accurate vibration measurements as a factor affecting the quality and reliability of mechanical products. The basic principles of measurement and methods of evaluating

the recorded vibration signal were also discussed, providing a background for further comparative analysis of measurement systems.

Central to the dissertation was the confirmation of the research hypothesis, which was that the MDL-54 system built, considering its metrological properties, has both theoretical and practical rationale for industrial application. The hypothesis assumed that the implementation of the MDL-54 system in an industrial setting could significantly contribute to improving the quality of manufactured bearings through more accurate monitoring of their dynamic state.

Comparative studies were carried out with four measurement systems: MDL-54, MGG-11, GPW-8 and STPPD. Each system was subjected to identical measurement procedures, covering three frequency ranges: low (LB), medium (MB) and high (HB). The χ^2 test (chi-square), kurtosis analysis and skewness of the results confirmed that the distributions of the results for all systems did not deviate from a normal distribution. This ensured the reliability and comparability of the data obtained, which was crucial for further analysis.

Several statistical analyses were carried out, such as calculations of the arithmetic mean, the interval, the standard deviation, as well as tests of comparison of means and variances. These analyses were necessary to assess the accuracy and precision of each system. Based on the results obtained, an assessment of the errors of the measurement systems was carried out, including correctness, fidelity and accuracy errors, which made it possible to determine the accuracy class of each system.

Particular attention was paid to determining the average relative measurement error, which enabled the estimation of the measurement accuracy (DP) of each system. These values were crucial to confirm the suitability of the systems for industrial applications, where high precision vibration measurements are essential. In the final phase of the study, all systems were subjected to repeatability tests, which allowed their long-term stability and reliability to be assessed.

The test results clearly confirmed the initial research hypothesis. The MDL-54 system, developed by FŁT Kraśnik, demonstrated high accuracy and precision of measurements in all analysed frequency ranges. As a result, it can be effectively applied in production conditions, contributing to improving the quality of manufactured rolling bearings. Analysis of the results confirmed that the MDL-54 system meets all metrological requirements, making it a suitable tool for monitoring the dynamic condition of bearings in industry.

Furthermore, the study showed that the MDL-54 system outperformed the other measurement systems analysed, especially in terms of measurement accuracy (DP) and stability of results. These results suggest that the newly designed system could become the standard for measuring rolling bearing vibration, especially in high-precision applications.

Ultimately, the implementation of the MDL-54 system in production processes at FŁT Kraśnik may lead to significant improvements in monitoring bearing quality, which in turn may translate into higher reliability and durability of mechanical products. The dissertation provides a solid basis for further research and development work on improving the MDL-54 system and its adaptation to a wider range of industrial applications.