

System diagnostyczny układu napędowego studenckiej lokomotywy PUTrain w skali 1:5,5

Raport z badań

Autorzy raportu:

mgr inż. Michał Koźlicki

inż. Jakub Żytkowski

inż. Michał Graban

Michał Strzelczyk

Julia Szaferska

Magdalena Golińska

Filip Pomin

WSTĘP

Celem projektu było wdrożenie innowacyjnego, prototypowego systemu diagnostycznego dla lokomotywy w skali 1:5,5, mającego na celu doskonalenie procesów monitorowania i analizy stanu technicznego pojazdów szynowych przez zespół PUTrain.

System diagnostyczny służy do analizy stanu technicznego podzespołów układu napędowego: czterech silników oraz czterech przekładni. System wykorzystuje przetworniki do rejestrowania sygnałów drganiowych w szerokim paśmie częstotliwości, co umożliwia zastosowanie zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów. Kluczową rolę w tej kwestii odgrywa transformata Hilberta $[x\hat{()}(t)]$ - narzędzie matematyczne liczące splot sygnału drgania $x(t)$ z funkcją $h(t)=1/\pi t$. Sygnał rzeczywisty i transformata Hilberta wspólnie tworzą zespolony sygnał analityczny $zx(t)=x(t)+ix\hat{()}(t)$, za pomocą którego poznać można fazę oraz obwiednię sygnału drgań, która uwidacznia zmiany związane z cyklicznymi uszkodzeniami typowymi dla elementów mechanicznych, w tym przypadku układu napędowego lokomotywy. W praktyce oznacza to, że system może identyfikować określone częstotliwości drgań charakterystyczne dla uszkodzeń różnych części podzespołu (np. bieżni, elementów tocznych).

Transformata Hilberta, choć implementowana przede wszystkim w kontekście diagnostyki łożysk, znalazła w przypadku projektu PUTrain zastosowanie również w analizie silników i przekładni. Pozwala na dokładne wykrycie impulsów charakterystycznych dla uszkodzeń takich jak pitting, pęknięcia bieżni czy defekty elementów tocznych. Zastosowanie transformaty Hilberta umożliwia wykrycie nawet subtelnych zaburzeń w sygnale, które w surowej postaci byłyby trudne do wychwycenia. Dzięki temu możliwa jest precyzyjna diagnoza stanu technicznego elementów, szybka lokalizacja źródła uszkodzenia oraz możliwość planowania serwisowania z wyprzedzeniem.

Najważniejszym z planowanych rezultatów projektu jest wdrożenie autorskiej metody serwisowania układu napędowego lokomotywy według rzeczywistej oceny stanu technicznego na zasadach Condition-Based Maintenance. Praktyka ta zakłada monitorowanie na bieżąco zużycia podzespołów, co pozwala dostosować harmonogramy przeglądów do rzeczywistego stanu technicznego, a nie tylko do założonej żywotności. Tym samym możliwe jest wcześniejsze wykrycie uszkodzeń i ograniczenie ich negatywnego wpływu na inne elementy układu. Dokładnie to umożliwia opracowany system diagnostyczny dla lokomotywy PUTrain. Zastosowanie go pozwala obniżyć koszty eksploatacji, zminimalizować ryzyko awarii oraz skrócić czas przestojów serwisowych.

System ten nie tylko umożliwia skuteczną diagnostykę, ale także stanowi platformę dydaktyczną, wspierającą rozwój umiejętności z zakresu analizy sygnałów i diagnostyki technicznej.

1. METODYKA BADAŃ

1.1. Założenia badawcze

Podstawowym założeniem badań było monitorowanie stanu technicznego elementów układu napędowego studenckiej lokomotywy PUTrain, w celu wykrycia i oszacowania momentu wymiany elementów układu napędowego to znaczy - kiedy ich stan techniczny wskazuje na zużycie lub uszkodzenie. Jest to więc wymiana elementu według strategii obsługi zależnej od stanu technicznego, a nie jak to ma obecnie miejsce w pojazdach szynowych, według strategii obsługi planowo zapobiegawczych. Oznacza to wymianę elementu, który jest już w pewnym stopniu uszkodzony, jednak nie na tyle, aby spowodować uszkodzenie współpracujących z nim elementów. Z powodu chęci

implementacji tego rozwiązania do studenckiej lokomotywy opracowano autorski system diagnostyki układu napędowego lokomotywy PUTrain.

Do wszystkich pomiarów zastosowano tą samą aparaturę pomiarową, w celu uzyskania wyników badań możliwych do merytorycznie poprawnego ich porównania i zestawienia. Z tego samego powodu do analizie poddano dane zarejestrowane podczas tożsamyh prędkości jazdy lokomotywy, odpowiednio 5, 10 oraz 15 km/h. Aby zwiększyć poprawność wyników pomiarów dla każdej z tych prędkości analizowano dane zarejestrowane podczas dwóch prób. Nadmienić należy, że podczas wszystkich przeprowadzonych badań montażu i kalibracji aparatury pomiarowej dokonano w identyczny sposób.

Badania przeprowadzono zarówno w warunkach laboratoryjnych (stanowiskowych) oraz w trakcie przejazdów lokomotywy po torze w Stapleford w Anglii w trakcie zawodów Railway Challenge 2024. Badania stanowiskowe przeprowadzono przed pomiarami zarejestrowanymi w trakcie eksploatacji lokomotywy oraz po powrocie z zawodów Railway Challenge. Pomiary laboratoryjne zostały przeprowadzone w takich samych warunkach pomiarowych, w tym otoczeniu, co pozwoliło na porównanie i zestawienie ze sobą ich wyników. Umożliwiło to również wyznaczenie wartości dopuszczalnych i granicznych drgań zarówno dla silników, jak i przekładni zastosowanych w lokomotywie PUTrain. Dzięki znajomości tych wartości, system jest w stanie wykryć, w jakim stanie technicznym znajdują się poszczególne badane elementy układu napędowego i wskazać element przeznaczony do wycofania z eksploatacji i w związku z tym przeznaczony do wymiany.

1.2. Obiekt Badań

Obiektem przeprowadzonych badań określono integralne elementy układu napędowego lokomotywy PUTrain, która stanowi interdyscyplinarny projekt naukowy studentów Politechniki Poznańskiej zrzeszonych w ramach Koła Naukowego Inżynierów Transportu Publicznego. Lokomotywę zbudowano w skali 1:5,5, natomiast jej funkcjonalnym przeznaczeniem jest poruszanie się po torze o szerokości 10 i ¼ cala. Widok poglądowy lokomotywy przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Studencka lokomotywa PUTrain

W ramach systemu diagnostycznego układu napędowego Lokomotywy PUTrain, przebadano silniki BLDC / PMSM HPM-3000B. Są to silniki bezszczotkowe prądu stałego, w których nieruchome i umieszczone w magnetowodach cewki są zasilane impulsami prądu przez układ elektroniczny

nazywany elektronicznym komutatorem. Badane silniki chłodzone są powietrzem. Podstawowe dane techniczne o badanych silnikach zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1 Podstawowe parametry techniczne badanych silników

Moc nominalna	3 – 5 [kW]
Moc maksymalna	5,9 [kW]
Nominalny moment obrotowy	9,4 [Nm]
Maksymalny moment obrotowy	25 [Nm]
Maksymalna prędkość obrotowa	4500 [obr/min]
Trwałość	10000 [h]
Napięcie zasilania	72 [V]
Masa silnika	7,6 [kg]

W ramach projektu, dokonano badań przekładni PLE34-G5 wyprodukowanych przez firmę Stepperonline. Są to przekładnie planetarne (obiegowe) dedykowane do pracy przy niskich prędkościach obrotowych i dużym obciążeniu. Cechą przekładni planetarnych, jest to, że wał wejściowy do przekładni i wyjściowy z przekładni znajdują się w tej samej osi, a przełożenie realizowane jest poprzez koła satelitarne i koło zewnętrzne przekładni. Podstawowe dane techniczno-użytkowe zastosowanych i badanych przekładni przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2 Podstawowe parametry przekładni zastosowanych w układzie napędowym lokomotywy PUTrain

Przełożenie przekładni	5
Sprawność przekładni	96%
Maksymalny moment obrotowy	90 [Nm]
Generowany hałas	≤ 60 [dB]
Maksymalne obciążenie promieniowe	1000 [N]
Maksymalne obciążenie osiowe	800 [N]
Trwałość	20000 [h]
Luz bez obciążenia	≤ 15 [arcmin]
Moment bezwładności przekładni	0,47 [kg*cm ²]

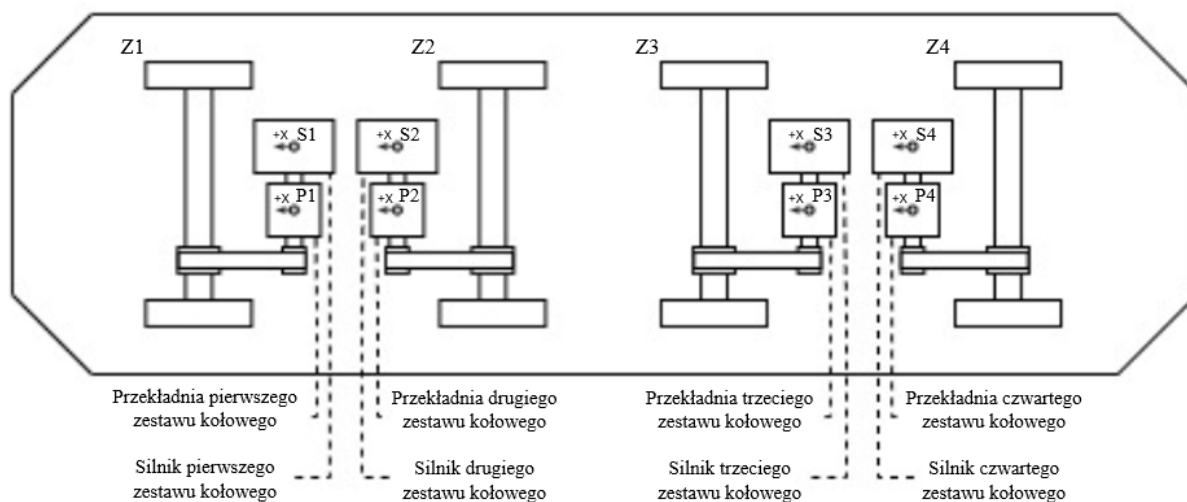
Lokomotywa PUTrain ma cztery osie, z których każda napędzana jest indywidualnie poprzez pojedynczy zespół składający się z opisanych powyżej silników i przekładni. Jeden ze zdemontowanych zespołów układu napędowego lokomotywy PUTrain, przed montażem do ramy wózka zaprezentowano na rysunku 2.



Rysunek 2 Badane w ramach projektu elementy zespołu napędowego przeznaczone do lokomotywy PUTrain

1.3. Lokalizacja punktów pomiarowych

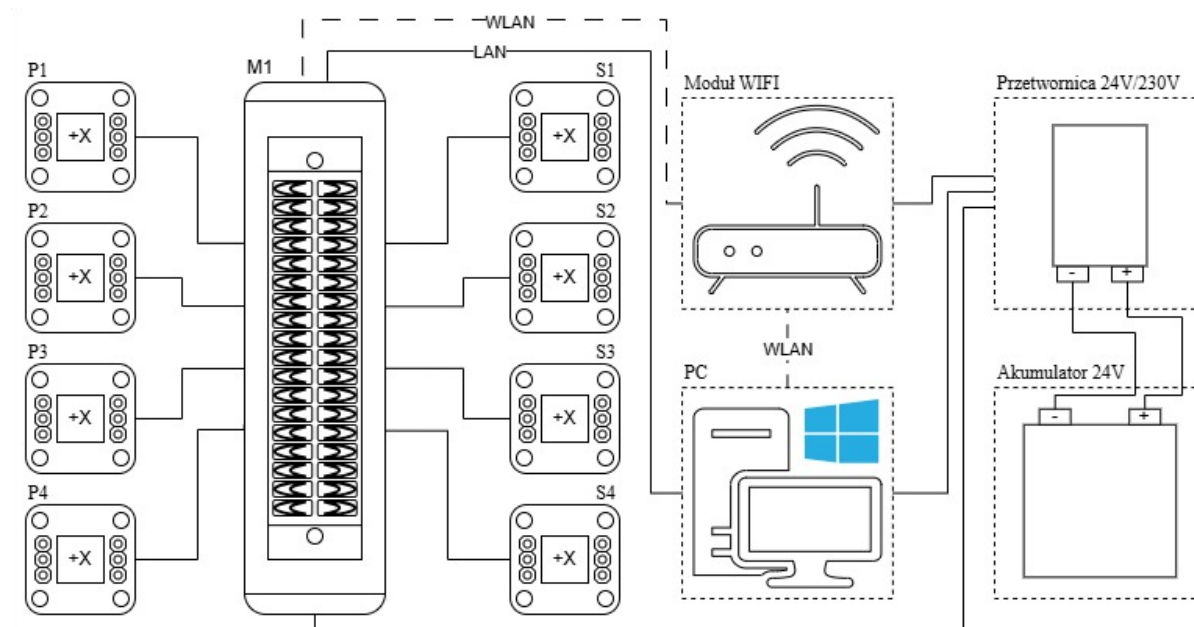
Proces prowadzenia działań badawczych na kluczowych elementach układu napędowego studenckiej lokomotywy PUTrain wymagał wyznaczenia stałych punktów pomiarowych, które dobrano odpowiednio na obudowach silników oraz przekładni. Aparaturę pomiarową każdorazowo rozmieszczano zgodnie z podstawowymi zasadami dotyczącymi procesu montażu [1]. Widok rozmieszczenia punktów pomiarowych na uproszczonym schemacie lokomotywy przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych

1.4. Rejestracja sygnałów

Przystępując do każdego z realizowanych badań szczególną uwagę zwracano na jednolitość procesu podłączania urządzeń umożliwiających prowadzenia działań pomiarowych, jak również montażu aparatury w wyznaczonych punktach pomiarowych. Przyjęty schemat połączenia aparatury przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Schemat połączenia aparatury badawczej

Do akwizycji sygnałów podczas prowadzonych badań wykorzystano dwunastokanałowy moduł akwizycji danych typu NI-9205. Sygnały drgań rejestrowano z częstotliwością próbkowania równą 12,8 kHz. Widok poglądowy wykorzystanego modułu przedstawiono na rysunku 5. Podstawowe specyfikacje techniczne wyznaczonego modułu zawarto w tabeli 3.



Rysunek 5. Moduł akwizycji danych typu NI-9205

Tabela 3. Wybrane specyfikacje techniczne wykorzystanego modułu akwizycji danych

Producent:	National Instruments
Typ:	NI-9205
Kanały wejściowe:	32 kanały jednobiegunowe lub 16 kanałów różnicowych
Zakres częstotliwości:	Do 100 [kHz]
Częstotliwość próbkowania:	250 próbek/s
Transfer danych:	16-bitowy
Zakres napięcia wejściowego:	0,2 – 10 [V _{ppeak}]
Absolutne maksimum wejściowe:	± 30 [V _{peak}]
Ogólna odpowiedź częstotliwościowa:	- 3 [dB]

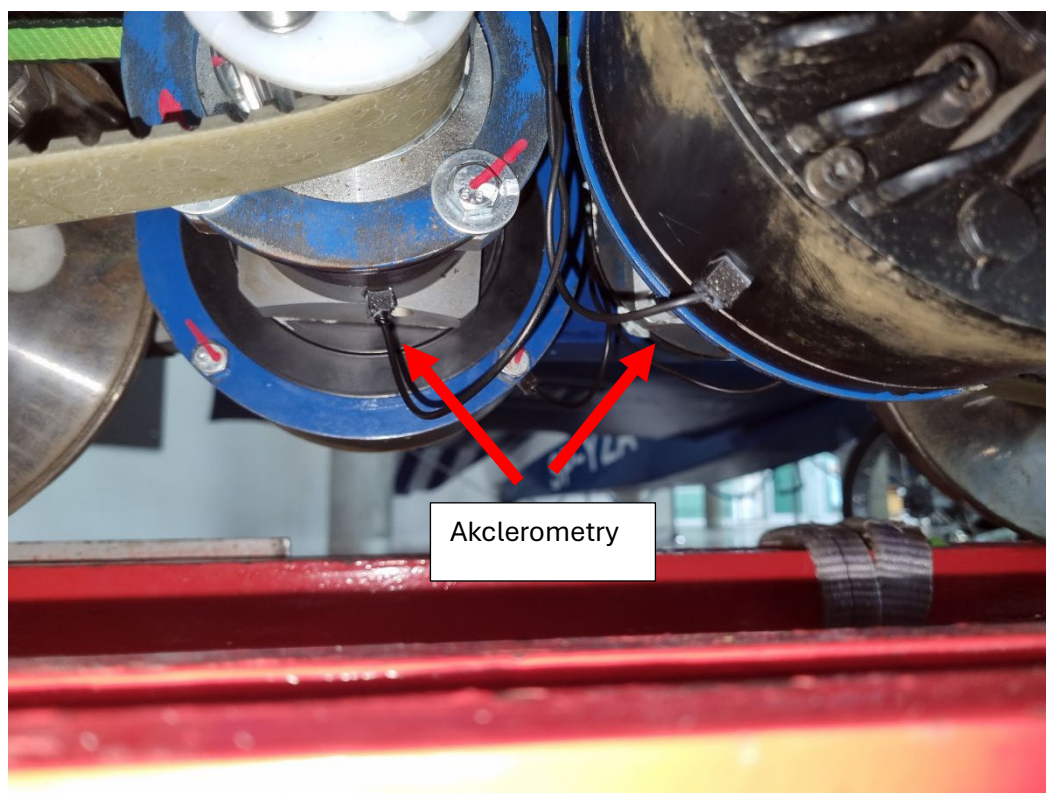
Rejestracje sygnałów przyspieszeń drgań badanych podzespołów układu napędowego prowadzono przy użyciu jednoosiowych przetworników drgań typu EVAL-ADXL1002Z. Wybrane przetworniki mikroelektromechaniczne (MEMS) oparte są na mikroukładach elektromechanicznych i rejestrują sygnały w jednym kierunku osiowym. Widok wykorzystanego przetwornika drgań przedstawiono na rysunku 6, zaś wybrane specyfikacje techniczne zawarto w tabeli 4, natomiast na rysunku 7 przedstawiono lokalizację przetworników na podzespołach układu napędowego.



Rysunek 6. Przetwornik drgań typu EVAL-ADXL1002Z

Tabela 4. Wybrane specyfikacje techniczne wykorzystanego przetwornika drgań

Producent:	Analog Devices, Inc
Typ:	ADXL1002Z
Zakres pomiarowy:	± 50 [g]
Pasmo przenoszenia:	≤ 11 [kHz]
Częstotliwość rezonansowa:	21 [kHz]
Czułość nominalna:	40 [mV/g]
Liniowość:	$\pm 0,1\%$ pełnego zakresu
Zakres temperatury pracy:	-40 – 125 [°C]
Odporność na przeciążenie	≤ 10000 [g]



Rysunek 7. Lokalizacja akcelerometrów na silniku oraz przekładni lokomotywy

2. WYNIKI BADAŃ

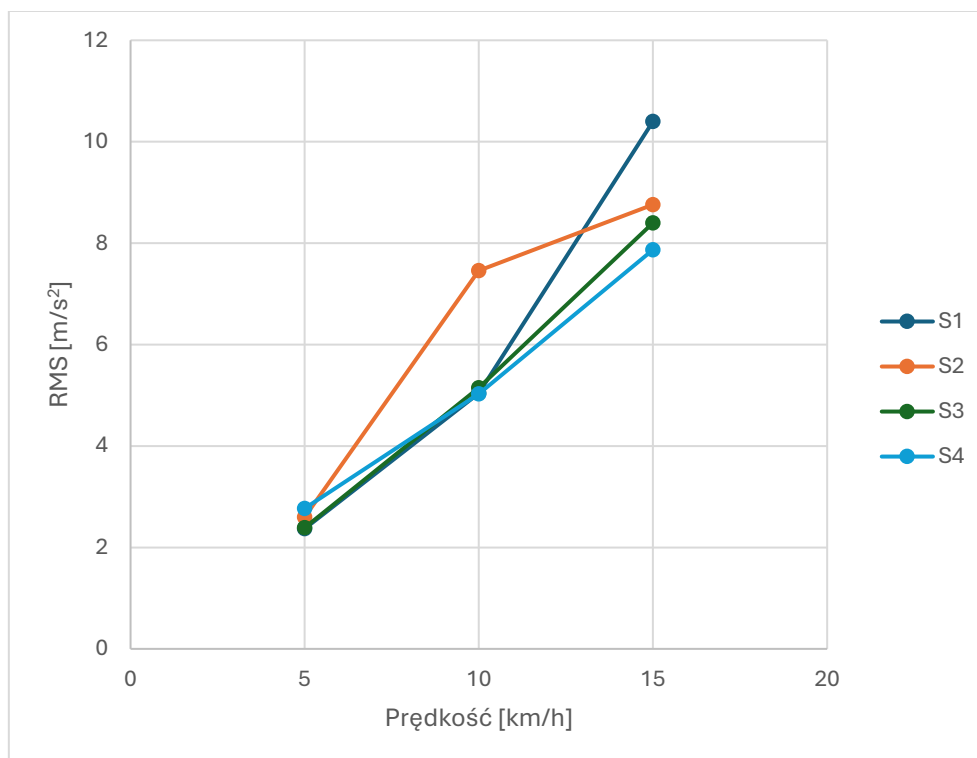
2.1. Wyniki laboratoryjne

W pierwszej kolejności analizie poddano wyniki badań przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych. Analiza została wykonana na sygnałach drganiowych pochodzących z silników i przekładni, które uprzednio poddano procesowi filtracji przy użyciu filtra dolno-przepustowego w zakresie 2-2000 Hz celem eliminacji potencjalnych zakłóceń. Następnie z odfiltrowanych sygnałów obliczono wartości skuteczne drgań (RMS). Z uwagi na proces prowadzenia badań w dwóch seriach pomiarowych, wyniki uśredniono i przedstawiono w formie tabelarycznej, gdzie Tabele 5-6 odnoszą się do średniej wyników z pierwszych badań laboratoryjnych elementów układu napędowego, zaś Tabele 7-8 zawierają uśrednione wyniki uzyskane podczas drugich pomiarów laboratoryjnych.

Tabela 5. Wyniki dla silników podczas pierwszych pomiarów laboratoryjnych realizowanych w dniu 07.11.2023 r. [m/s^2]

Prędkość [km/h]	S1	S2	S3	S4
min.	50% max. (laboratoryjnych pomiarów)			
5	2,37	2,60	2,39	2,77
10	5,04	7,46	5,15	5,03
15	10,40	8,76	8,40	7,87

Dla pierwszych pomiarów zaobserwowano, że wszystkie silniki wykazują wzrost wartości RMS wraz ze wzrostem prędkości. Najwyższą wartość wynoszącą $10,4 \text{ m/s}^2$ osiągnął silnik S1 dla prędkości 15 km/h. Ten sam silnik wykazał również większy przyrost wartości RMS pomiędzy prędkością 10 a 15 km/h. Charakterystykę osiągniętych wartości RMS w funkcji prędkości przedstawiono na rysunku 7.

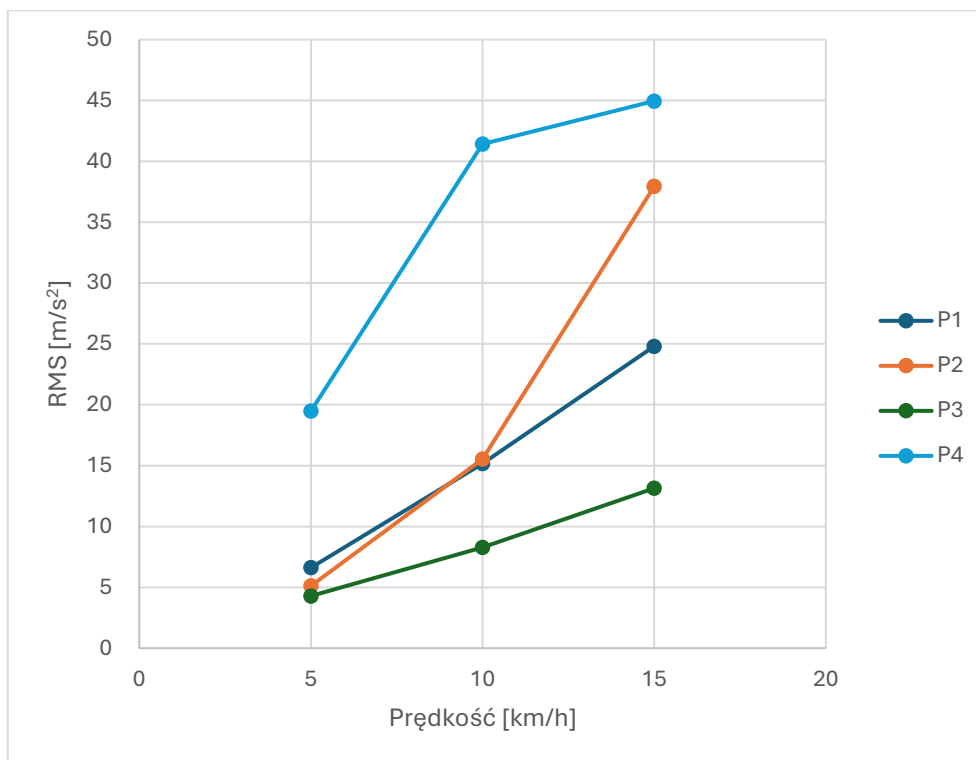


Rysunek 8. Wartości RMS silników dla pierwszych pomiarów

Tabela 6. Wyniki dla przekładni podczas pierwszych pomiarów laboratoryjnych realizowanych w dniu 07.11.2023 r. [m/s^2]

Prędkość [km/h]	P1	P2	P3	P4
min.	50% max. (laboratoryjnych pomiarów)			
5	6,62	5,12	4,29	19,49
10	15,18	15,54	8,28	41,41
15	24,81	37,94	13,14	44,96

Przekładnie analogicznie wykazują wzrost wartości RMS wraz ze wzrostem prędkości. Nie ma on jednak aż tak liniowego charakteru jak w przypadku silników. W przypadku przekładni czwartej (uszkodzonej) wzrost RMS pomiędzy prędkością 5 a 10 km/h wyniósł ponad 100%, a pomiędzy 10 a 15 km/h już tylko kolejne 10%. W przypadku przekładni drugiej zaobserwowano znaczny przyrost pomiędzy prędkością 10 a 15 km/h, z 15,54 m/s^2 do 37,94 m/s^2 . Charakterystykę osiągniętych wartości RMS w funkcji prędkości przedstawiono na rysunku 8.

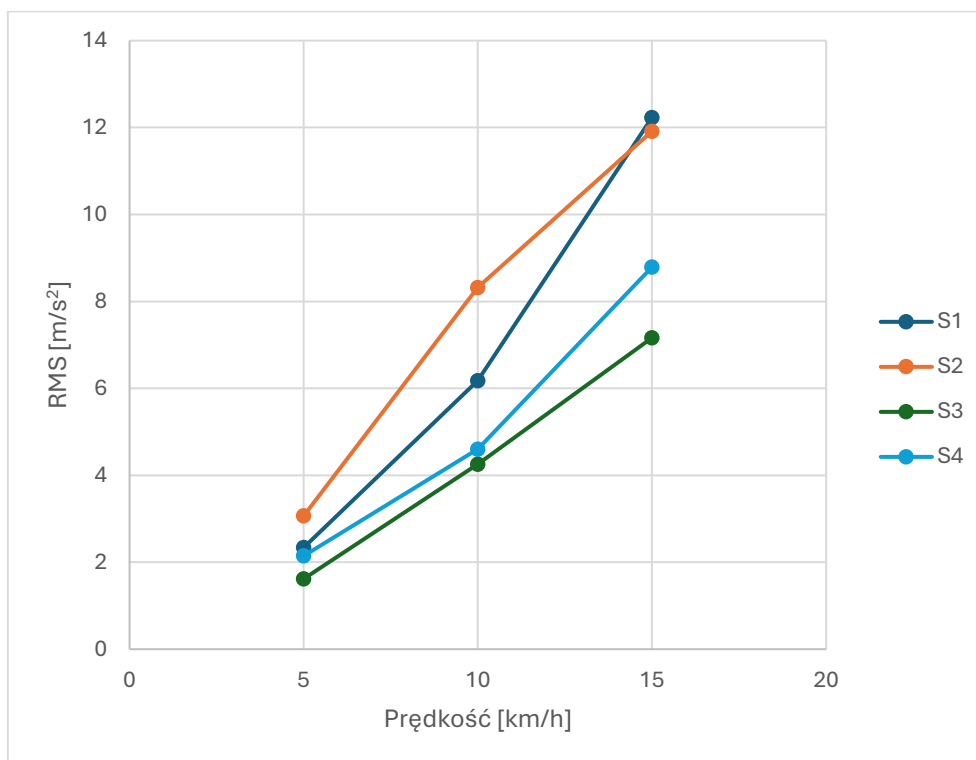


Rysunek 9. Wartości RMS przekładni dla pierwszy pomiarów

Tabela 7. Wyniki dla silników podczas drugich pomiarów laboratoryjnych realizowanych w dniu 21.03.2025 r. [m/s^2]

Prędkość [km/h]	S1	S2	S3	S4
min.	50% max. (laboratoryjnych pomiarów)			
5	2,34	3,07	1,62	2,15
10	6,18	8,32	4,26	4,60
15	12,23	11,92	7,16	8,79

Dla drugich pomiarów również zaobserwowano, że wszystkie silniki wykazują wzrost wartości RMS wraz ze wzrostem prędkości. Najwyższą wartość wynoszącą $12,23 \text{ m/s}^2$ osiągnął silnik S1 dla prędkości 15 km/h . Ten sam silnik wykazał również większy przyrost wartości RMS pomiędzy prędkością 10 a 15 km/h . Dla prędkości 5 oraz 10 kilometrów na godzinę najwyższe wartości RMS osiągnięto dla silnika S2, odpowiednio $3,07$ i $8,32 \text{ m/s}^2$. Charakterystykę osiągniętych wartości RMS w funkcji prędkości przedstawiono na rysunku 9.

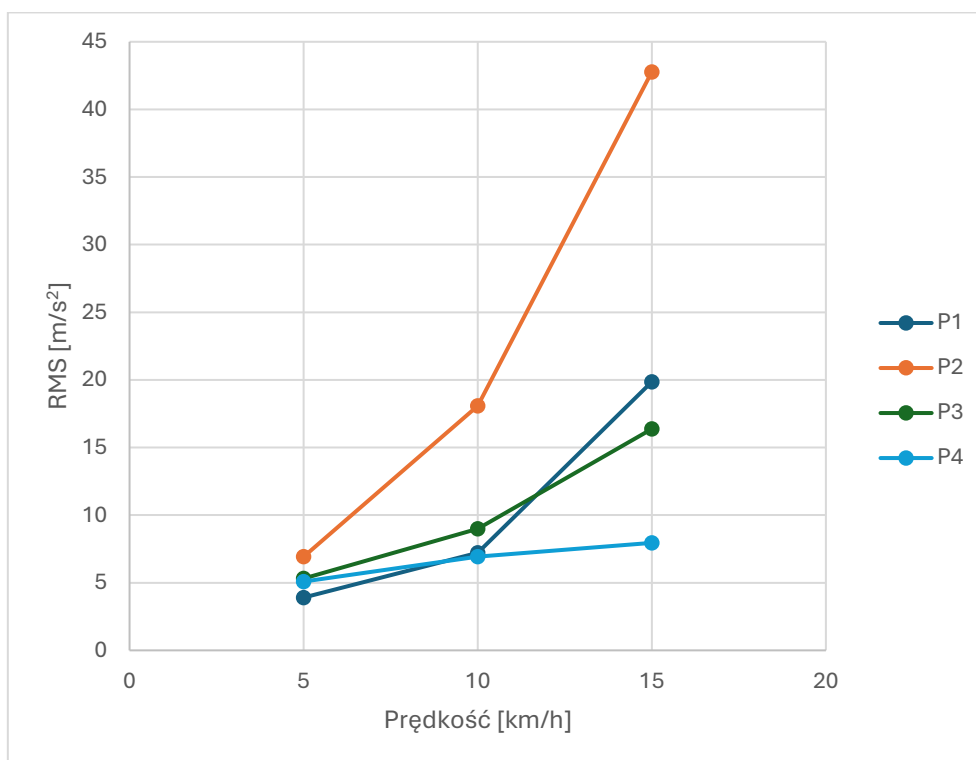


Rysunek 10. Wartości RMS silników dla drugich pomiarów

Tabela 8. Wyniki dla przekładni podczas drugich pomiarów laboratoryjnych realizowanych w dniu 21.03.2025 r. [m/s^2]

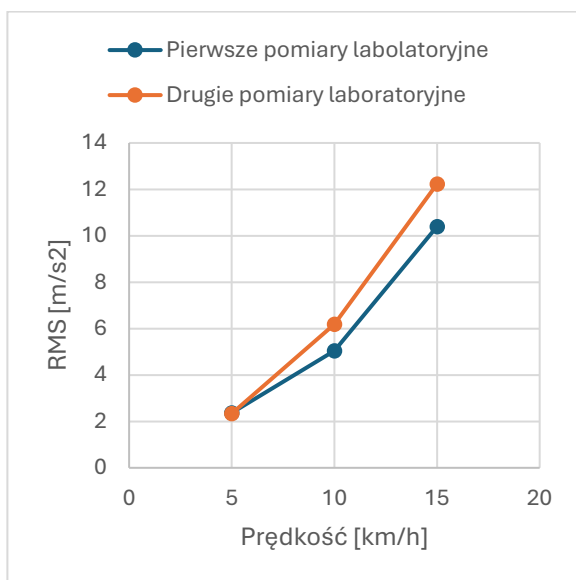
Prędkość [km/h]	P1	P2	P3	P4
min.	50% max. (laboratoryjnych pomiarów)			
5	3,91	6,92	5,31	5,09
10	7,22	18,08	9,00	6,93
15	19,86	42,77	16,37	7,95

Dla drugich pomiarów przekładnie analogicznie wykazują wzrost wartości RMS wraz ze wzrostem prędkości. Nie ma on jednak aż tak liniowego charakteru jak w przypadku silników. W przypadku przekładni czwartej, która została wymieniona po pierwszych pomiarach, wzrost RMS pomiędzy prędkością 5 a 15 km/h jest najniższy i wynosi zaledwie 56% . W przypadku przekładni drugiej zaobserwowano znaczny przyrost pomiędzy prędkością 10 a 15 km/h , z $18,08 \text{ m/s}^2$ do $42,77 \text{ m/s}^2$. Oznacza to wzrost aż o 136% . Wartości RMS dla przekładni drugiej znacząco odstają od tych dla pozostałych przekładni, co udowadnia charakterystyka osiągniętych wartości RMS w funkcji prędkości przedstawiona na rysunku 10.

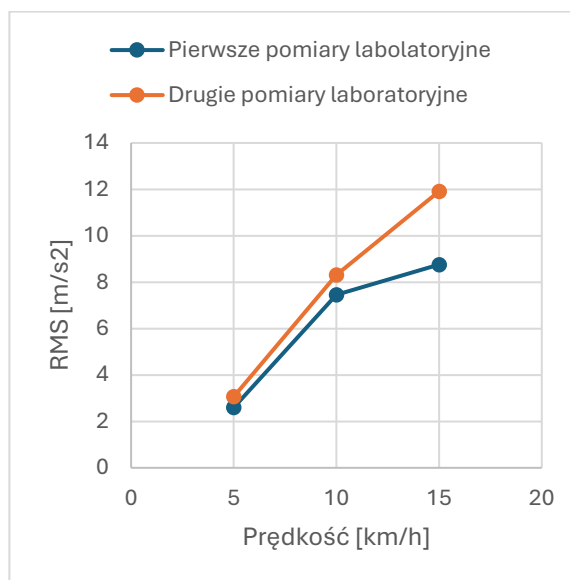


Rysunek 11. Wartości RMS przekładni dla drugich pomiarów

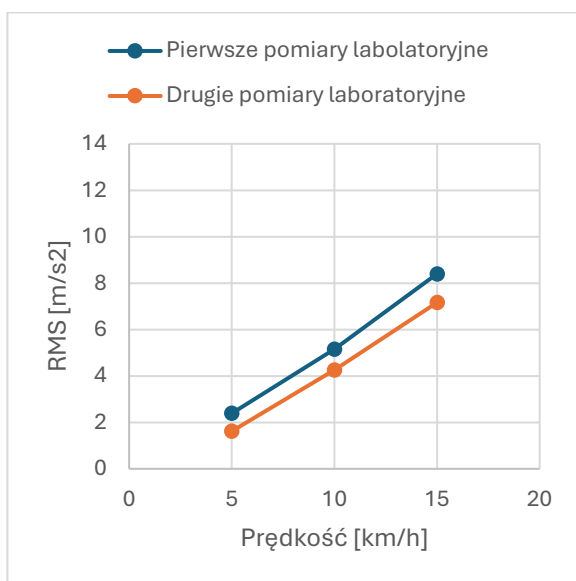
Poniżej na rysunkach 11-14 przedstawiono porównanie silników pomiędzy pierwszymi, a drugimi pomiarami laboratoryjnymi.



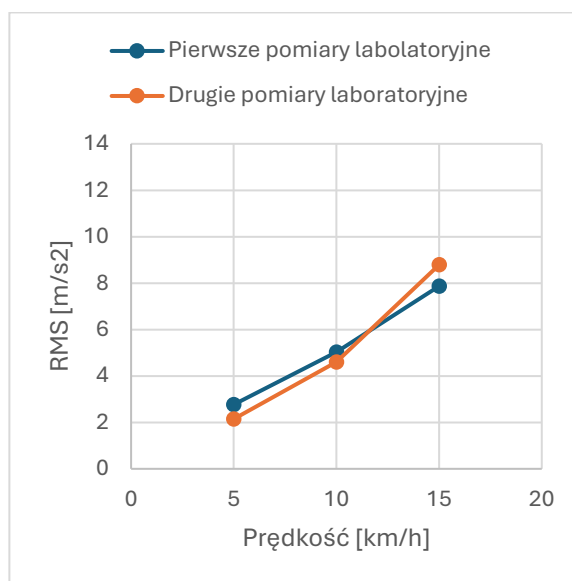
Rysunek 12. Porównanie silnika zlokalizowanego na pierwszej osi napędowej (S1)



Rysunek 13. Porównanie silnika zlokalizowanego na drugiej osi napędowej (S2)

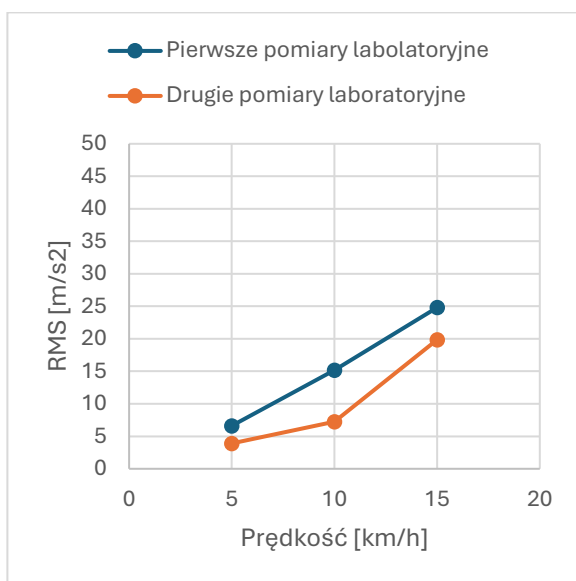


Rysunek 14. Porównanie silnika zlokalizowanego na trzeciej osi napędowej (S3)

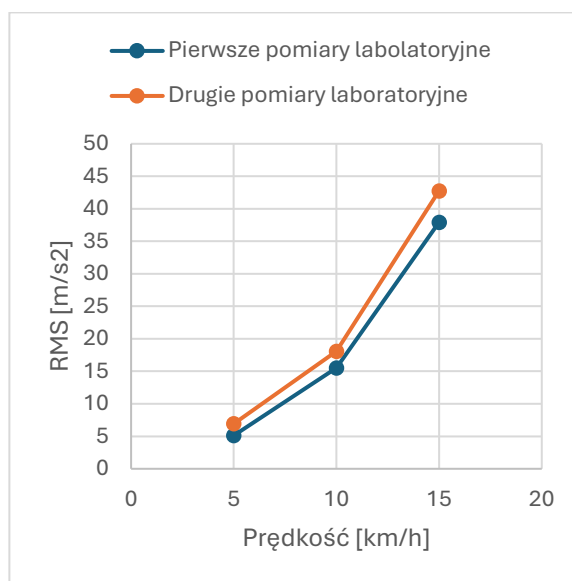


Rysunek 15. Porównanie silnika zlokalizowanego na czwartej osi napędowej (S4)

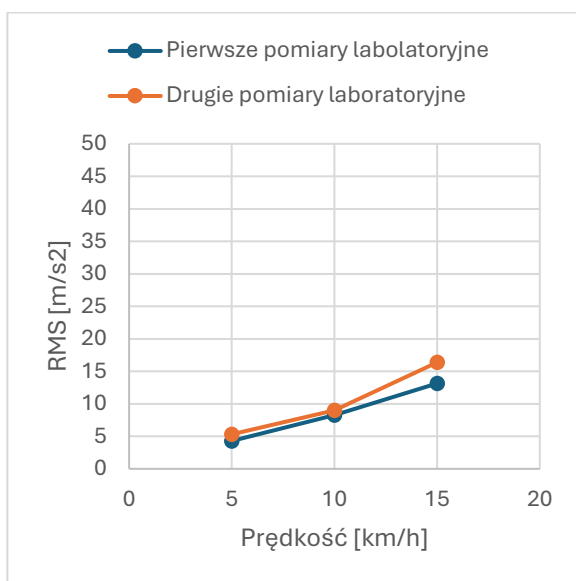
Analogicznie na rysunkach 15-18 przedstawiono szczegółowe różnice pomiędzy pierwszymi, a drugimi pomiarami laboratoryjnymi przekładni.



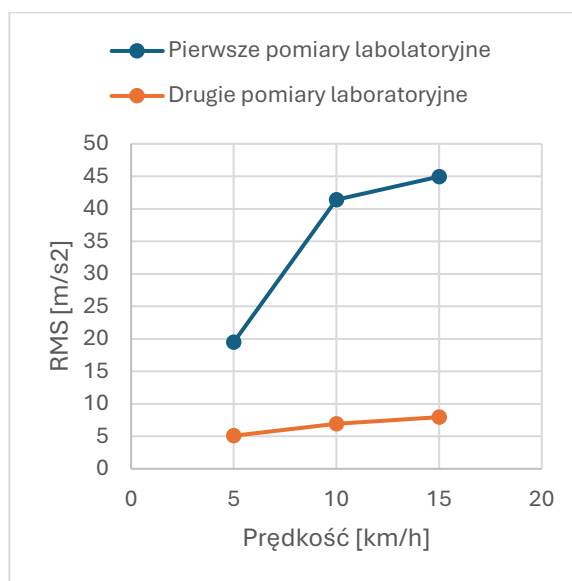
Rysunek 16. Porównanie przekładni zlokalizowanej na pierwszej osi napędowej (P1)



Rysunek 17. Porównanie przekładni zlokalizowanej na drugiej osi napędowej (P2)



Rysunek 18. Porównanie przekładni zlokalizowanej na trzeciej osi napędowej (P3)



Rysunek 19. Porównanie przekładni zlokalizowanej na czwartej osi napędowej (P4)

2.2. Wyznaczenie wartości progowych

Na podstawie wyników laboratoryjnych wyznaczono progowe wartości dopuszczalne oraz graniczne. Zakłada się, że żywotność komponentów podlega rozkładowi normalnemu, co umożliwia predykcję ich degradacji z wykorzystaniem metod statystycznych. Wartości progowe obliczono zgodnie z poniższymi równaniami.

$$\text{Wartość dopuszczalna} = \bar{x} + 2\sigma \quad (1)$$

$$\text{Wartość graniczna} = \bar{x} + 3\sigma \quad (2)$$

gdzie:

$\bar{x}$ - wartość średnia

σ - odchylenie standardowe

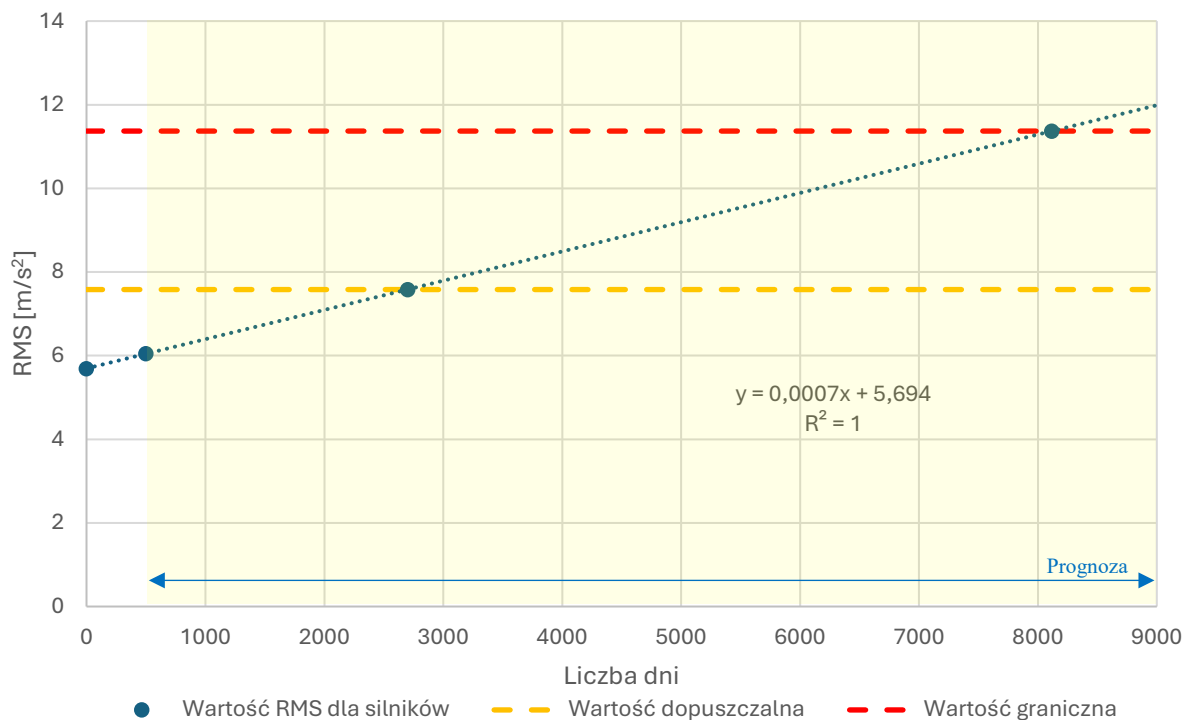
Należy nadmienić, że wartości dopuszczalne i graniczne zamieszczone w niniejszym raporcie wyznaczono na podstawie dotychczasowych pomiarów diagnostycznych realizowanych laboratoryjnie. Z uwagi na ograniczoną bazę zgromadzonych danych zaobserwowane przekroczenia wyznaczonych poziomów dopuszczalnych i granicznych powinno się interpretować jako anomalie, które mogą świadczyć o nieprawidłowościach. Rzeczywista reprezentatywność wyznaczonych poziomów wymaga aktualizacji zbioru danych poprzez dalsze prowadzenie badań diagnostycznych. Uzyskane wartości progowe dopuszczalne i graniczne dla poszczególnych elementów układu napędowego lokomotywy zawarto w tabeli 9.

Tabela 9. Wyliczone wartości progowe dopuszczalne i graniczne dla badanych podzespołów [m/s²]

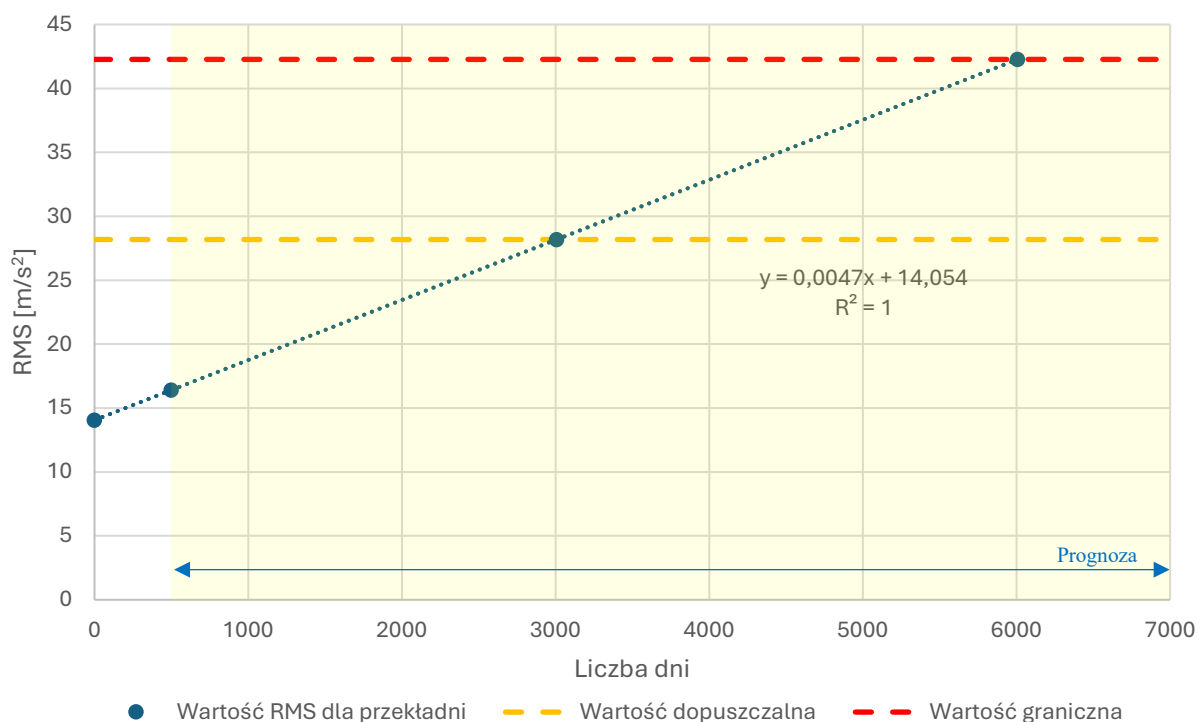
	Wartość dopuszczalna	Wartość graniczna
Silnik	7,58	11,37
Przekładnia	28,18	42,27

2.3. Prognozowanie stanu technicznego

W celu powiązania zużycia podzespołów z okresem ich eksploatacji wykluczono z analizy przekładnię P1, w której doszło w międzyczasie do wymiany smaru oraz P4, która pomiędzy pomiarami została wymieniona na fabrycznie nowy element. Na podstawie danych z pomiarów laboratoryjnych wyznaczono linie trendu z kolei, na podstawie których dokonano oszacowania liczby dni po których nastąpi osiągnięcie wartości dopuszczalnej i granicznej silnika oraz przekładni. Zależności wartości skutecznej drgań od liczby dni eksploatacji zaprezentowano na wykresach poniżej.



Rysunek 20. Wartości RMS dla silników w zależności od czasu eksploatacji



Rysunek 21. Wartości RMS dla przekładni w zależności od czasu eksploatacji

Na podstawie przedstawionych linii trendu możliwe było wyznaczenie prognozowanej liczby dni od momentu rozpoczęcia pracy podzespołu do uzyskania przez niego wartości dopuszczalnej i granicznej. Wartości te zaprezentowano w tabelach 10-11.

Tabela 10. Liczba dni do osiągnięcia danej wartości przez podzespół

	Silniki	Przekładnie
Wartość dopuszczalna	2701	3008
Wartość graniczna	8116	6006

Tabela 11. Szacunkowe wartości dla trzech następnych okresów [m/s²]

Prognoza	Silniki	Przekładnie
1000	6,39	18,75
1500	6,74	21,10
2000	7,09	23,45

W przypadku silników stwierdzono minimalny wzrost poziomu drgań w czasie, z bardzo niskim współczynnikiem nachylenia linii trendu wynoszącym 0,0007. Obserwowane wartości pozostają znacznie poniżej poziomu dopuszczalnego (7,7) i granicznego (11,5), co zgadza się z obserwowaną stabilnością i bezawaryjnością pracy jednostek napędowych.

Dla przekładni sytuacja przedstawia się inaczej. Drgania jednostek 2 i 3 wykazały sześciokrotnie większy wzrost w czasie (nachylenie linii trendu: 0,0047). Przekładnia 1, w której dokonano wymiany smaru, wykazała poprawę charakterystyki drgań (zgodnie z tabelami

w punkcie 1.1), co sugeruje pozytywny wpływ zabiegu serwisowego. Przekładnia 4 została wymieniona na nową, co w pełni tłumaczy jej niskie wartości drgań – poniżej 10 m/s^2 w warunkach laboratoryjnych w porównaniu z wartościami dla przekładni uszkodzonej – od ok. 20 do ok. 45 m/s^2 .

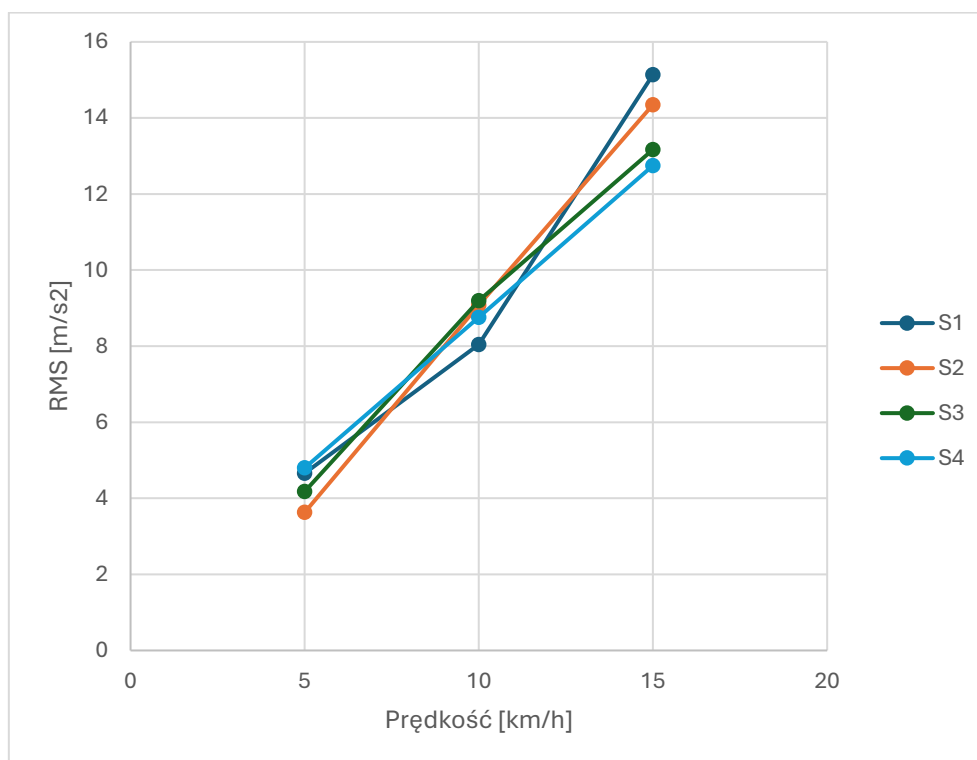
2.4. Porównanie wyników laboratoryjnych z terenowymi

W ramach przeprowadzonych badań wykonano również pomiary drgań dla wyszczególnionych elementów układu napędowego, które przeprowadzono w warunkach terenowych podczas zawodów Railway Challenge 2024, odbywających się w Anglii. Lokomotywa podczas rejestracji sygnałów drgań poruszała się po stalowym torze. Wyniki pomiarów terenowych dla silników przedstawiono w tabeli 12.

Tabela 12. Wyniki dla silników podczas pomiarów terenowych realizowanych w dniach 29-30.06.2024 r. [m/s^2]

Prędkość [km/h]	S1	S2	S3	S4
min.	50%			
	max. (terenowych pomiarów)			
5	4,66	3,63	4,18	4,80
10	8,04	9,08	9,20	8,76
15	15,14	14,35	13,17	12,75

Wartości RMS dla silników mieszczą się w zakresie od $3,63$ do $15,14 \text{ m/s}^2$. Wartości dla wszystkich silników rosną wraz ze wzrostem prędkości. Zależność tego wzrostu jest liniowa. Wartości uzyskane na poszczególnych silnikach są bardzo zbliżone do siebie – różnice nie przekraczają 18% dla poszczególnych prędkości. Najwyższą wartość ($15,14 \text{ m/s}^2$) uzyskano na silniku S1 napędzającym pierwszą oś pojazdu. Charakterystykę wartości RMS w funkcji prędkości jazdy dla poszczególnych silników przedstawiono na rysunku 21.



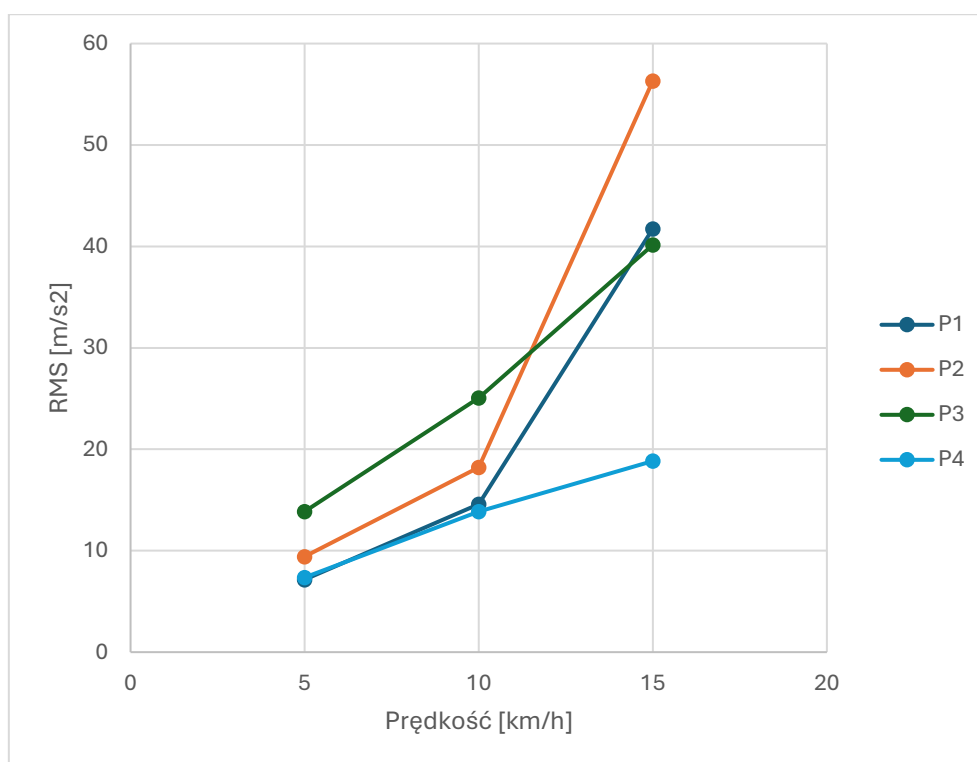
Rysunek 22. Wartości RMS silników dla pomiarów terenowych

Wyniki pomiarów terenowych dla przekładni przedstawiono w Tabeli 13.

Tabela 13. Wyniki dla przekładni podczas pomiarów terenowych realizowanych w dniach 29-30.06.2024 [m/s²]

Prędkość [km/h]	P1	P2	P3	P4
min.	50% max. (terenowych pomiarów)			
5	7,15	9,43	13,86	7,36
10	14,58	18,22	25,06	13,85
15	41,74	56,32	40,15	18,84

W przypadku przekładni wartości RMS wzrastają wraz ze wzrostem prędkości dla wszystkich elementów. Dla przekładni P3 oraz P4 przyrost ten ma charakterystykę liniową, natomiast w przypadku przekładni P1 oraz P2 następuje nieproporcjonalny wzrost wartości RMS pomiędzy prędkością 10 a 15 [km/h]. Dla przekładni P2 wzrost ten wynosi 209%, natomiast dla elementu P1 186%. Najwyższą wartość osiągnięto dla przekładni P2 przy prędkości 15 km/h wynoszącą 56,32 m/s². Charakterystykę wartości RMS w funkcji prędkości jazdy dla poszczególnych przekładni przedstawiono na rysunku 22.



Rysunek 23. Wartości RMS przekładni dla pomiarów terenowych

Ze względu na brak eksploatacji lokomotywy w okresie pomiędzy zawodami w Anglii, a drugimi pomiarami laboratoryjnymi (przedstawionymi w Tabelach 7-8) zdecydowano się przeprowadzić szczegółową analizę oceny wpływu warunków rzeczywistych na osiągane wartości poziomów drgań poszczególnych elementów układu napędowego.

Tabela 14. Porównanie wartości RMS osiągniętych przez silniki dla pomiarów laboratoryjnych i terenowych

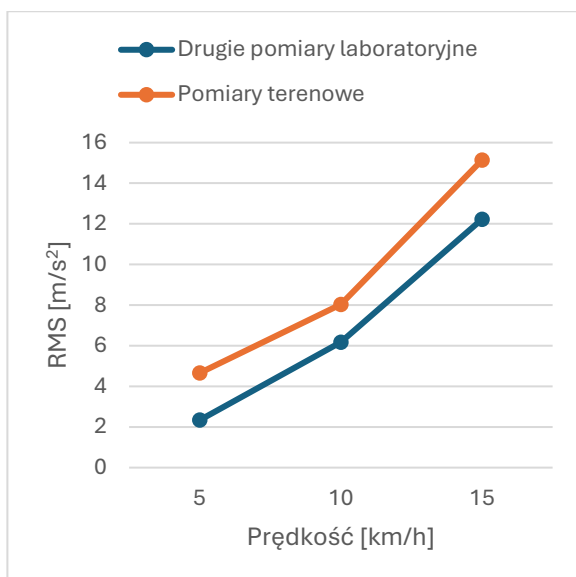
Prędkość [km/h]	Wyniki laboratoryjne [m/s ²]	Wyniki terenowe [m/s ²]	Różnica [%]
5	2,29	4,32	88
10	5,84	8,77	50
15	10,03	13,85	38
Średnia	6,05	8,98	48

Tabela 15. Porównanie wartości RMS osiągniętych przez przekładnię dla pomiarów laboratoryjnych i terenowych

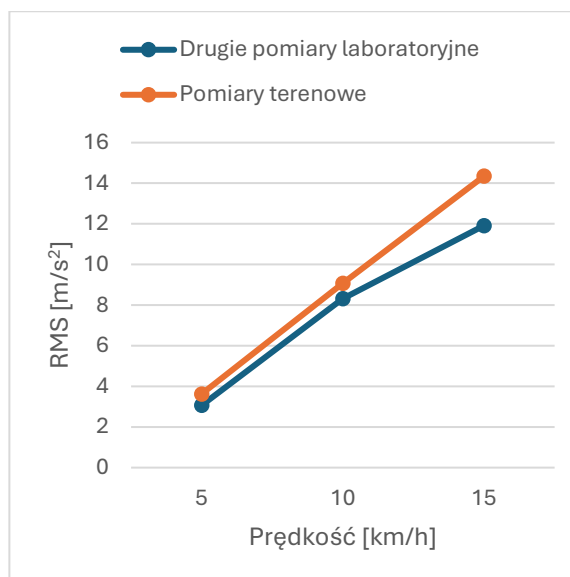
Prędkość [km/h]	Wyniki laboratoryjne [m/s ²]	Wyniki terenowe [m/s ²]	Różnica [%]
5	5,31	9,45	78
10	10,31	17,93	74
15	21,74	39,26	81
Średnia	12,45	22,21	78

Wszystkie badane elementy wykazały wzrost wartości RMS w warunkach rzeczywistych. Różnice wahały się od 16% dla silnika S2 aż do 158% dla przekładni P3. Średnio silniki wykazały wartości RMS wyższe o 48%, a przekładnie o 78%. Wzrost wartości skutecznej powyżej 100% odnotowano dla połowy badanych elementów.

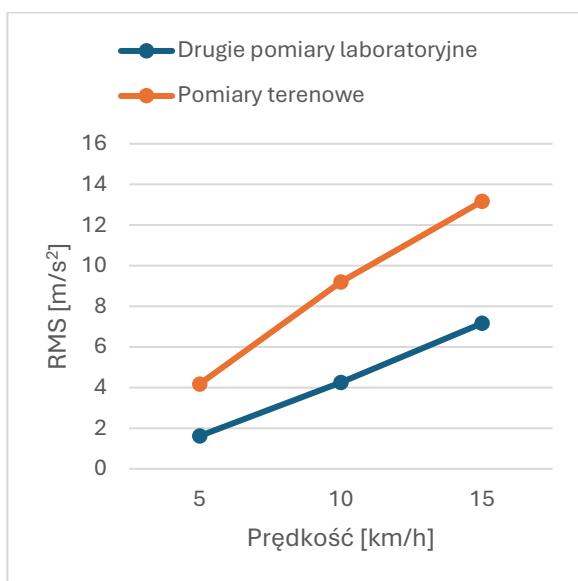
Zgodnie z ustaloną praktyką zdecydowano się przedstawić zestawienie porównawcze tożsamyh elementów układu napędowego lokomotywy między drugimi pomiarami laboratoryjnymi a przeprowadzonymi pomiarami terenowymi. Szczegółowe różnice dla silników przedstawiono na rysunkach 23-26.



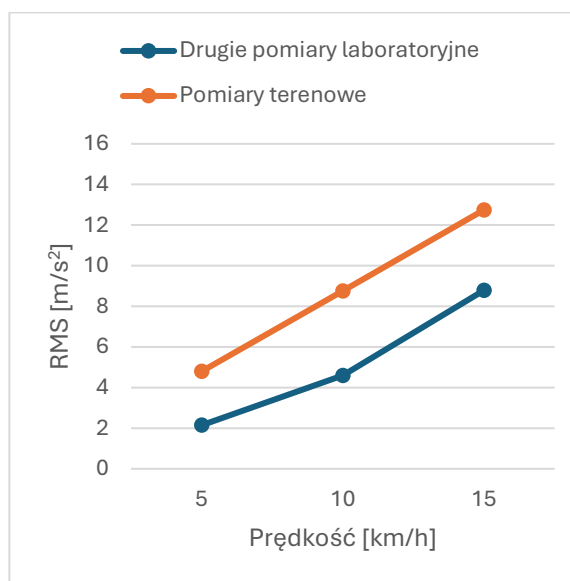
Rysunek 24. Zestawienie porównawcze pomiarów terenowych z laboratoryjnymi dla silnika zlokalizowanego na pierwszej osi napędowej (S1)



Rysunek 25. Zestawienie porównawcze pomiarów terenowych z laboratoryjnymi dla silnika zlokalizowanego na drugiej osi napędowej (S2)

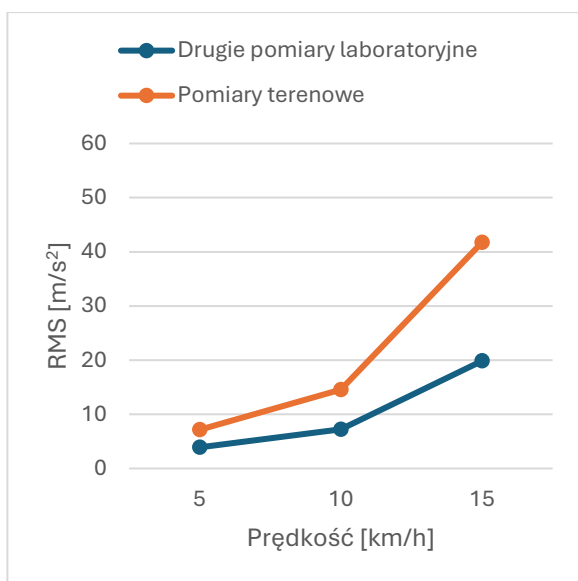


Rysunek 26. Zestawienie porównawcze pomiarów terenowych z laboratoryjnymi dla silnika zlokalizowanego na trzeciej osi napędowej (S3)

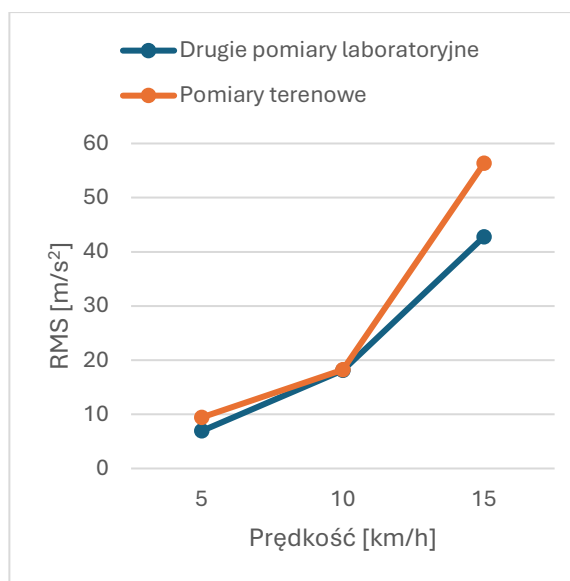


Rysunek 27. Zestawienie porównawcze pomiarów terenowych z laboratoryjnymi dla silnika zlokalizowanego na czwartej osi napędowej (S4)

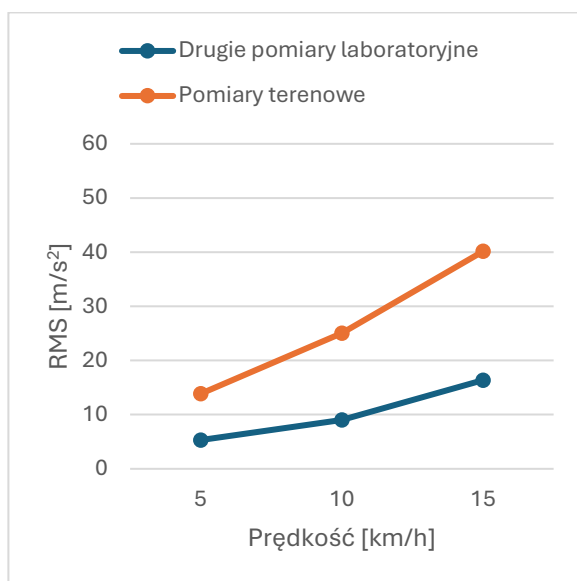
Analogicznie szczegółowe różnice pomiarów przekładni w warunkach laboratoryjnych i terenowych przedstawiono na rysunkach 27-30.



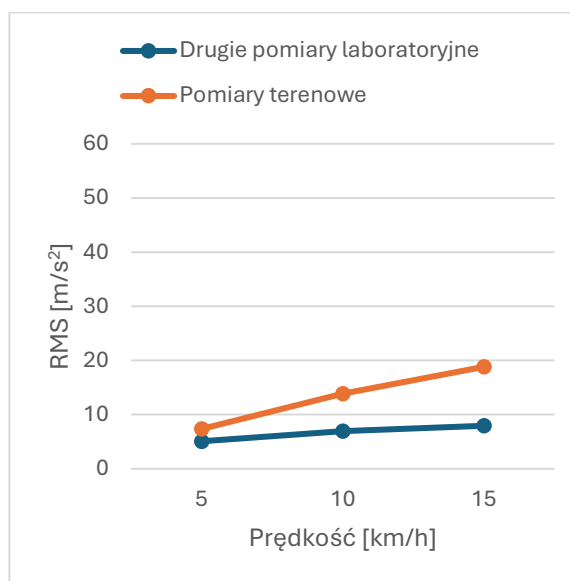
Rysunek 28. Zestawienie porównawcze pomiarów terenowych z laboratoryjnymi dla przekładni zlokalizowanej na pierwszej osi napędowej (P1)



Rysunek 29. Zestawienie porównawcze pomiarów terenowych z laboratoryjnymi dla przekładni zlokalizowanej na drugiej osi napędowej (P2)



Rysunek 30. Zestawienie porównawcze pomiarów terenowych z laboratoryjnymi dla przekładni zlokalizowanej na trzeciej osi napędowej (P3)



Rysunek 31. Zestawienie porównawcze pomiarów terenowych z laboratoryjnymi dla przekładni zlokalizowanej na czwartej osi napędowej (P4)

2.5. Podsumowanie

Wyniki badań potwierdzają skuteczność pomiarów drgań jako narzędzia diagnostycznego. Stwierdzono, że przekładnie jako elementy bardziej wrażliwe na warunki smarowania i zużycia, wymagają szczególnego nadzoru. Odrębnym wnioskiem wynikającym z badań jest zasadność wymiany lub konserwacji (np. smarowania) jako skutecznego środka profilaktycznego. Warto jednak zaznaczyć, że dane zostały pozyskane wyłącznie w warunkach laboratoryjnych – z pojazdem stacjonarnym. Tymczasem pomiary wykonane w Anglii w warunkach rzeczywistych wykazały wyższy poziom drgań, co sugeruje, że środowisko eksploatacji ma istotny wpływ na parametry drgań. Dlatego konieczne jest rozszerzenie badań o dane w funkcji rzeczywistego przebiegu pojazdu. Obecnie jednak rozwój systemu diagnostycznego jest ograniczony przez brak dostępu do toru doświadczalnego, z którego mogłoby korzystać koło naukowe. Umożliwienie takiego dostępu znacząco zwiększyłoby wartość badań oraz pozwoliło na validację modeli prognozujących degradację. Rozwój tego systemu umożliwiłby zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia awarii podczas eksploatacji oraz obniżyc jej koszty.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań układu napędowego studenckiej lokomotywy PUTrain stwierdzono istotne różnice pomiędzy wynikami pomiarów wykonanych w warunkach laboratoryjnych a rzeczywistych (terenowych). Średnie wartości skuteczne przyspieszeń drgań (RMS), uzyskane podczas eksploatacji lokomotywy na torze w Stapleford w Anglii podczas zawodów Railway Challenge 2024, były wyraźnie wyższe niż analogiczne wartości uzyskane w warunkach laboratoryjnych. W przypadku silników różnica wynosiła średnio około 48%, a w przypadku przekładni aż około 78%. Szczególnie istotna różnica została zaobserwowana dla przekładni zlokalizowanej na trzeciej osi (P3), gdzie wartość RMS zmierzona podczas jazdy była aż o 158% wyższa niż w warunkach laboratoryjnych.

Zaobserwowane różnice wynikają przede wszystkim z czynników środowiskowych oraz dynamicznych, które mają miejsce w realnych warunkach pracy pojazdu. Podczas pomiarów terenowych, na poziom drgań istotny wpływ mają nierówności toru, zmieniające się obciążenia dynamiczne, a także siły

działające na podzespoły układu napędowego wynikające z interakcji pomiędzy pojazdem a torem. W warunkach laboratoryjnych, gdzie pojazd jest stacjonarny, tego typu obciążenia oraz zmienność warunków pracy są praktycznie niemożliwe do pełnego odtworzenia. W związku z tym, wyniki pomiarów laboratoryjnych odzwierciedlają raczej teoretyczne i optymalne warunki pracy, podczas gdy wyniki terenowe reprezentują rzeczywiste obciążenia występujące podczas normalnej eksploatacji lokomotywy.

Prognozowany czas eksploatacji badanych elementów układu napędowego należy traktować jako wartość przybliżoną, uzyskaną za pomocą metod statystycznych, bazujących na dotychczas zebranych danych. Należy podkreślić, że podstawowym celem realizowanych badań nie było jedynie precyzyjne określenie czasu eksploatacji poszczególnych podzespołów, lecz przede wszystkim demonstracja możliwości i skuteczności działania zaprojektowanego przez studentów systemu diagnostycznego. Przeprowadzone pomiary jednoznacznie potwierdziły efektywność zastosowania diagnostyki drganiowej w ocenie stanu technicznego oraz w przewidywaniu momentu, w którym komponenty układu napędowego osiągają wartości graniczne, sygnalizujące konieczność ich wymiany bądź serwisowania.

Wyniki zrealizowanych badań wskazują, że system diagnostyczny wykorzystany w projekcie lokomotywy PUTrain posiada znaczący potencjał aplikacyjny w rzeczywistych warunkach eksploatacji pojazdów szynowych. Przeprowadzona analiza wykazała szczególną wrażliwość przekładni na zmiany stanu technicznego i warunków smarowania, co uwiaryściło się znacznymi różnicami w wartościach RMS uzyskanych w kolejnych pomiarach. Potwierdza to zasadność wdrożenia systemu diagnostyki drganiowej jako podstawy do przejścia z obecnego systemu eksploatacji opartego na obsłudze planowo-zapobiegawczych do bardziej efektywnej strategii eksploatacji zależnej od rzeczywistego stanu technicznego komponentów. Taka zmiana umożliwiłaby optymalizację kosztów obsługi technicznej, zmniejszenie ryzyka awarii i wydłużenie czasu użytkowania podzespołów poprzez bardziej precyzyjne planowanie wymian i napraw.

Bibliografia:

[1] C. Cempel, Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. Poznań 1985: Politechnika Poznańska.