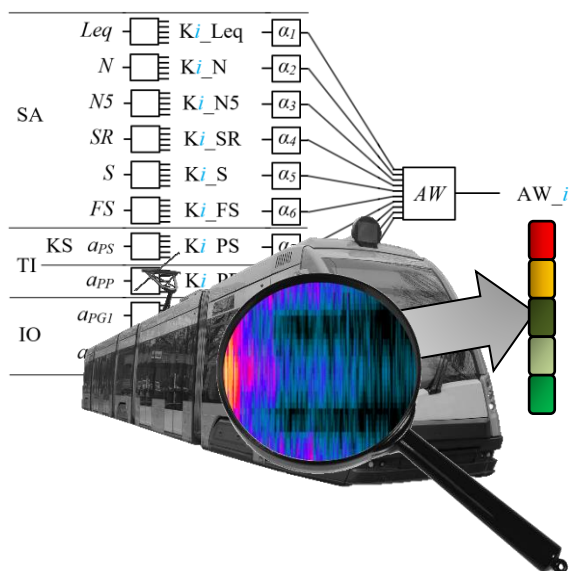


POLITECHNIKA POZNAŃSKA  
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU



PRACA DOKTORSKA

**Opracowanie metody oceny aktywności wibroakustycznej  
tramwaju w oparciu o pomiary przytorowe**

mgr inż. Tomasz Nowakowski

Promotor:

prof. dr hab. inż. Franciszek Tomaszewski

Promotor pomocniczy:

dr inż. Paweł Komorski

POZNAŃ 2020



*Składam serdeczne podziękowania wszystkim osobom, dzięki którym realizowanie niniejszej pracy było możliwe.*

*Szanownemu Panu profesorowi dr. hab. inż. Franciszkowi Tomaszewskiemu dziękuję za rzetelne kierowanie pracą i nieocenioną, merytoryczną pomoc w rozważanych zagadnieniach. Dziękuję Panu za życzliwość, wsparcie i zaufanie. Nasza współpraca będzie dla mnie wzorem w dalszych wyzwaniach naukowych.*

*Dziękuję Panu dr. inż. Pawłowi Komorskiemu za okazane wsparcie i merytoryczne dyskusje. Podziękowania kieruję również do pracowników Zakładu Transportu Szynowego PP, którzy wspierali mnie w podejmowanych działaniach. Szczególne podziękowania kieruję do Pana profesora PP dr. hab. inż. Grzegorza Szymańskiego i Pana dr. hab. Bartosza Firlika za wieloletnią współpracę i wskazówki związane z metodologią prac badawczych.*

*Serdecznie podziękowania pragnę przekazać dla Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Poznaniu za umożliwienie przeprowadzenia pomiarów na terenie zajezdni tramwajowej. Dziękuję również pracownikom firmy Brüel & Kjær Polska za udzielone wsparcie techniczne.*

*Szczególne podziękowania kieruje do mojej żony Olgi za niezłomną cierpliwość, wyrozumiałość oraz pomoc w obowiązkach domowych i rodzicielskich. Jej wsparcie było dla mnie kluczowe w chwilach zwątpienia.*

*Realizacja niniejszej pracy przyczyniła się do spełnienia mojego najważniejszego zawodowego celu i jest kamieniem milowym dla podjęcia nowych wyzwań naukowych.*

*Niniejszą pracę dedykuję Rodzicom i swojemu pierwszemu promotorowi  
śp. dr. inż. Bartoszowi Czechyrze.*



## SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE .....	11
2. ZJAWISKA WIBROAKUSTYCZNE GENEROWANE PRZEZ TRAMWAJE I ICH WPLYW NA ŚRODOWISKO MIEJSKIE .....	16
2.1. Źródła drgań i hałasu generowanych przez tramwaje .....	16
2.2. Wpływ drgań i hałasu pochodzenia komunikacyjnego na środowisko .....	27
2.3. Podsumowanie rozdziału 2 .....	33
3. AKTYWNOŚĆ WIBROAKUSTYCZNA TRAMWAJU .....	35
3.1. Definicja pojęcia aktywności wibroakustycznej tramwaju .....	35
3.2. Systemy monitorujące zjawiska wibroakustyczne pojazdów szynowych.....	39
3.3. Podsumowanie rozdziału 3 .....	42
4. PROBLEM BADAWCZY .....	44
4.1. Sformułowanie problemu badawczego .....	44
4.2. Cel i zakres pracy .....	46
5. ZAŁOŻENIA METODY OCENY AKTYWNOŚCI WIBROAKUSTYCZNEJ TRAMWAJÓW .....	49
6. ANALIZA KONSTRUCJI TRAMWAJÓW EKSPLOATOWANYCH W POLSCE .....	52
7. METODYKA BADAŃ .....	55
7.1. Obiekt badań .....	55
7.2. Lokalizacja badań.....	57
7.3. Lokalizacja punktów pomiarowych .....	59
7.4. Rejestracja sygnałów .....	63
8. ANALIZA WYBRANYCH WARUNKÓW BRZEGOWYCH OBSERWACJI.....	72
8.1. Wyznaczenie zakresów częstotliwości w analizach sygnałów .....	72
8.2. Podatność dynamiczna torowiska .....	84
8.3. Podsumowanie rozdziału 8 .....	88
9. DETEKcja NIEZDATNOŚCI PRZEKŁADNI TRAKCYJNEJ I POWIERZCHNI TOCZNYCH KÓŁ .....	89
9.1. Detekcja niezdatności przekładni trakcyjnej tramwaju .....	89
9.2. Wyznaczenie parametru diagnostycznego dla detekcji niezdatności przekładni trakcyjnej tramwaju .....	100
9.3. Detekcja niezdatności powierzchni tocznych kół tramwaju .....	113
9.4. Wyznaczenie parametru diagnostycznego dla detekcji niezdatności powierzchni tocznych kół tramwaju.....	114
9.5. Podsumowanie rozdziału 9 .....	125
10. ANALIZA SKŁADOWYCH AKTYWNOŚCI WIBROAKUSTYCZNEJ TRAMWAJU .....	127
10.1. Określenie miar punktowych i podstawowe założenia analizy .....	127

10.2.	Składowa SA - analiza poziomu równoważnego ciśnienia akustycznego $Leq$ ....	128
10.3.	Składowa SA - analiza wskaźnika psychoakustycznego głośności całkowitej dźwięku $N$ .....	132
10.4.	Składowa SA – analiza wskaźnika psychoakustycznego 5-percentyla głośności całkowitej dźwięku $N5$ .....	137
10.5.	Składowa SA - analiza wskaźnika psychoakustycznego chropowatości dźwięku $SR$ .....	140
10.6.	Składowa SA – analiza wskaźnika psychoakustycznego ostrości dźwięku $S$ .....	144
10.7.	Składowa SA – analiza wskaźnika psychoakustycznego siły fluktuacji dźwięku $FS$ .....	148
10.8.	Składowa TI – analiza przyspieszeń drgań szyny $SRSS_{PS}$ .....	156
10.9.	Składowa TI – analiza przyspieszeń drgań podkładu – $SRSS_{PP}$ .....	160
10.10.	Składowa IO – analiza drgań parasejsmicznych $SRSS_{PG1}$ , $SRSS_{PG2}$ .....	164
10.11.	Podsumowanie rozdziału 10.....	169
11.	OCENA AKTYWNOŚCI WIBROAKUSTYCZNEJ TRAMWAJU .....	171
11.1.	Obliczenia wskaźnika aktywności wibroakustycznej $AW$ .....	171
11.2.	Drzewa decyzyjne w ocenie aktywności wibroakustycznej tramwaju .....	179
11.3.	Podsumowanie rozdziału 11 .....	182
12.	METODA OCENY AKTYWNOŚCI WIBROAKUSTYCZNEJ W EKSPLOATACJI TRAMWAJÓW .....	184
13.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....	193
	BIBLIOGRAFIA .....	199
	ZAŁĄCZNIK NR 1 .....	221
	ZAŁĄCZNIK NR 2 .....	223
	ZAŁĄCZNIK NR 3 .....	225
	ZAŁĄCZNIK NR 4.....	229

## WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

- $\beta_1$  – estymowany współczynnik nachylenia wielomianu,
- $a_{RMSmax}$  – maksymalna wartość skuteczna przyspieszeń drgań ze zbioru wartości skutecznych z punktów pomiarowych na szynie PS1–4 [ $m/s^2$ ],
- AW – wskaźnik aktywności wibroakustycznej,
- AW\_SA – wskaźnik aktywności wibroakustycznej z uwzględnieniem priorytetu dla miar składowych sygnatury akustycznej,
- AW\_KS – wskaźnik aktywności wibroakustycznej z uwzględnieniem priorytetu dla miar składowych dynamicznego oddziaływania na styku koła z szyną,
- AW\_TI – wskaźnik aktywności wibroakustycznej z uwzględnieniem priorytetu dla miar składowych dynamicznego oddziaływania tramwaju z infrastrukturą torową,
- AW\_IO – wskaźnik aktywności wibroakustycznej z uwzględnieniem priorytetu dla miar składowych dynamicznego oddziaływania tramwaju z otoczeniem,
- B&K – skrócona nazwa producenta aparatury pomiarowej Brüel & Kjær
- CCLD – nazwa własna zasilania prądowego przetworników stosowana przez producenta Brüel & Kjær oznaczająca standard IEPE (ang. *Integrated Electronics Piezo-Electric*),
- CPB – (ang. *Constant Percentage Bandwidth*) oznaczenie stałej względnej szerokości pasma w widmie FFT,
- $f_{0\_wał\_gran\_m}$  – częstotliwość obrotowa  $m$ -tego wału dla granicznej średnicy koła [Hz],
- $f_{0\_wał\_nom\_m}$  – częstotliwość obrotowa  $m$ -tego wału dla nominalnej średnicy koła [Hz],
- $f_{k\_max\_gran}$  – częstotliwość obrotowa zestawu kołowego dla maksymalnej prędkości przejazdu w badaniach i dla przypadku granicznej średnicy koła [Hz],
- $f_{k\_min\_nom}$  – częstotliwość obrotowa zestawu kołowego dla minimalnej prędkości przejazdu w badaniach i dla przypadku nominalnej średnicy koła [Hz],
- $f_{zk\_gran\_i-j}$  – częstotliwość zazębienia  $i$ -tego i  $j$ -tego koła zębatego dla granicznej średnicy koła [Hz],
- $f_{zk\_nom\_i-j}$  – częstotliwość zazębienia  $i$ -tego i  $j$ -tego koła zębatego dla nominalnej średnicy koła [Hz],
- $F(\omega)$  – sygnał wymuszający w postaci widma FFT siły [N].
- $F_{0\_wał\_m}$  – przedział częstotliwości obrotowych  $m$ -tego wału,
- $F_{zk\_i-j}$  – przedział częstotliwości zazębienia  $i$ -tego i  $j$ -tego koła zębatego,
- $F_{UPIr}$  – rozszerzony zakres częstotliwości zazębienia przekładni,

$F_{UP2r}$  – rozszerzony zakres częstotliwości zazębienia przekładni wokół częstotliwości pierwszej harmonicznej,  
 $F_{UP3r}$  – rozszerzony zakres częstotliwości zazębienia przekładni wokół częstotliwości drugiej harmonicznej,  
 FFT – (ang. *Fast Fourier Transform*) szybka transformata Fouriera,  
 FRF – (ang. *Frequency Response Function*) częstotliwościowa funkcja przejścia,  
 $FS$  – wskaźnik psychoakustyczny siły fluktuacji dźwięku [vacil]  
 $i_{c\_wał\_m}$  - całkowite przełożenie na  $m$ -tym wale,  
 IO – składowa aktywności wibroakustycznej tramwaju związana z dynamicznym oddziaływaniem tramwaju z otoczeniem,  
 KS – składowa aktywności wibroakustycznej tramwaju związana z dynamicznym oddziaływaniem na styku koła z szyną  
 $Leq$  – poziom równoważny ciśnienia akustycznego [dB],  
 MM – mikrofon matrycowy,  
 MR – mikrofon zlokalizowany 3,75 m od osi toru,  
 $N$  – wskaźnik psychoakustyczny głośności całkowitej dźwięku [son],  
 $N(x | \bar{x}_k, \Sigma_k)$  – wielowymiarowa funkcja gęstości prawdopodobieństwa obserwacji opisywana rozkładem normalnym,  
 $N5$  – wskaźnik psychoakustyczny 5-percentyla głośności całkowitej dźwięku  $N$  [son],  
 OW#1 – obszar pierwszego, napędowego wózka tramwaju licząc od jego czoła,  
 OW#2 – obszar drugiego, tocznego wózka tramwaju licząc od jego czoła,  
 OW#3 – trzeciego, napędowego wózka tramwaju licząc od jego czoła,  
 $p(x | GMM)$  – superpozycja danego modelu klastra w kombinacji modeli normalnych GMM,  
 PG1 – przetwornik przyspieszeń drgań sejsmicznych zlokalizowany przy źródle drgań,  
 PG2 – przetwornik przyspieszeń drgań sejsmicznych zlokalizowany na drodze propagacji,  
 PP – przetwornik drgań na podkładzie,  
 PS1–4 – przetworniki drgań na szynie,  
 $S$  – wskaźnik psychoakustyczny ostrości dźwięku [acum],  
 SA – składowa aktywności wibroakustycznej tramwaju związana z sygnaturą akustyczną,  
 $Sd_s$  – wartość dopuszczalna parametru diagnostycznego w metodzie Smiley’a,  
 $Sg_s$  – wartość graniczna parametru diagnostycznego w metodzie Smiley’a,  
 $Sd_c$  – wartość dopuszczalna parametru diagnostycznego w metodzie Cempla,  
 $Sg_c$  – wartość graniczna parametru diagnostycznego w metodzie Cempla,



$SR$  – wskaźnik psychoakustyczny chropowatości dźwięku [asper],  
 $SRSS$  – pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów wartości skutecznych przyspieszeń mierzonych kierunków drgań w danym punkcie pomiarowym PS1 [ $m/s^2$ ],  
 $STFT$  – (*ang. Short-Time Fourier Transform*) krótkoczasowa transformata Fouriera,  
 $TI$  – składowa aktywności wibroakustycznej tramwaju związana z dynamicznym oddziaływaniem tramwaju z infrastrukturą torową,  
 $U_{G_{1,2,3}}$  – kumulanta oparta na średniej geometrycznej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP1r}$ ,  $F_{UP2r}$ ,  $F_{UP3r}$ ,  
 $U_{G_{2,3}}$  – kumulanta oparta na średniej geometrycznej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP2r}$ ,  $F_{UP3r}$ ,  
 $U_{G_3}$  – kumulanta oparta na średniej geometrycznej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakres częstotliwości  $F_{UP3r}$ ,  
 $U_{N_{1,2,3}}$  – kumulanta oparta na pierwiastku z sumy kwadratów poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP1r}$ ,  $F_{UP2r}$ ,  $F_{UP3r}$ ,  
 $U_{N_{2,3}}$  – kumulanta oparta na pierwiastku z sumy kwadratów poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP2r}$ ,  $F_{UP3r}$ ,  
 $U_{N_3}$  – kumulanta oparta na pierwiastku z sumy kwadratów poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakres częstotliwości  $F_{UP3r}$ ,  
 $U_{S_{1,2,3}}$  – kumulanta oparta na wartości średniej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP1r}$ ,  $F_{UP2r}$ ,  $F_{UP3r}$ ,  
 $U_{S_{2,3}}$  – kumulanta oparta na wartości średniej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP2r}$ ,  $F_{UP3r}$ ,  
 $U_{S_3}$  – kumulanta oparta na wartości średniej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakres częstotliwości  $F_{UP3r}$ ,  
 $X[k]$  – wartość transformaty FFT dla  $k$ -tej częstotliwości w sygnale (amplituda, faza, liczba zespolona),  
 $XI[k]$  – wartość transformaty STFT dla  $k$ -tej częstotliwości w sygnale i numeru okna  $l$ ,  
 $z_m$  – liczba zębów  $m$ -tego wału.



## 1. WPROWADZENIE

W odniesieniu do pojęcia nowoczesnego transportu, obecnie promowana jest idea transportu zrównoważonego. Spośród wielu definicji tego pojęcia można wyróżnić taką pochodzącą z pracy [222] ujmującą zrównoważony transport jako transport, który ma na celu promowanie lepszych i zdrowszych sposobów zaspokajania potrzeb transportowych przy jednoczesnej redukcji skutków społecznych i środowiskowych. Ma to szczególne znaczenie w obszarach miejskich, w których potrzeba transportowa mieszkańców jest szczególnie istotna z uwagi na procesy społeczne i gospodarcze [166, 230]. Obszary te są również obecnie ukierunkowywane na zrównoważony rozwój. Zgodnie z definicjami zawartymi w pracach [90, 185], gwarantuje utrzymanie potencjału rozwoju miasta i jego mieszkańców dla kolejnych pokoleń, będąc miejscem przyjaznym do życia z punktu widzenia środowiskowego.

Szczegółowy opis koncepcji zrównoważonego transportu w odniesieniu do komunikacji tramwajowej w wybranych miastach Europy został szczegółowo opisany w pracy [259]. Zagadnienia te są ściśle związane ze zrównoważonym transportem w obszarach zurbanizowanych. W tym kontekście istotne jest dążenie do rozwoju alternatywnych dla samochodów środków transportu, takich jak tramwaje. Ich wykorzystanie zapewnia mobilność mieszkańców w realizacji procesów transportowych z jednoczesnym zmniejszeniem zatłoczenia ulic w mieście oraz z mniejszym w stosunku do innych środków transportu negatywnym wpływem na środowisko. Wśród wielu zalet tramwajów wymienia się [33, 252, 259]:

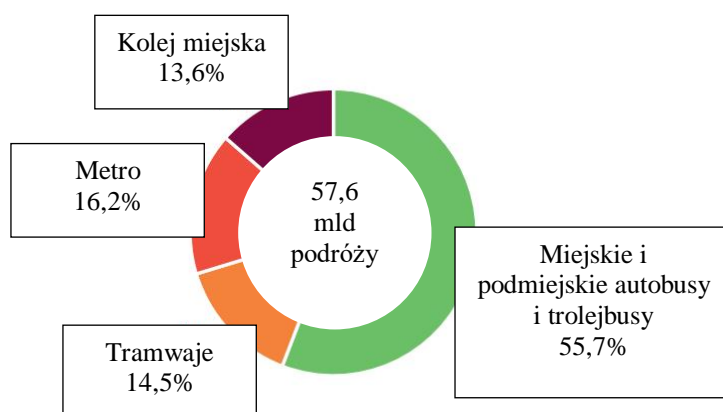
- dużą pojemność w odniesieniu do gabarytów pojazdu,
- brak bezpośredniej emisji zanieczyszczeń powietrza (szczególnie dwutlenek węgla),
- zmniejszenie zatłoczenia ulic,
- brak kolidowania z ruchem samochodowym na torowisku wydzielonym,
- kreowanie rozwoju urbanistycznego miasta w odniesieniu do atrakcyjnego wizerunku,
- wykazanie, że dany obszar jest inwestowany,
- zainteresowanie przedsiębiorstw i turystów,
- pomaganie ludziom w dostępie do miejsc pracy i usług (zwiększenie mobilności).

Wykorzystanie tramwajów w obszarze miejskim promuje Międzynarodowa Unia Transportu Publicznego – UITP (fr. *Union Internationale des Transports Publics*) poprzez ideę miast przyjaznych dla ludzi, w której transport publiczny stanowi ich fundament. Według

organizacji tramwaje są najlepszym lądowym środkiem publicznym w miastach. UITP również wskazuje ich zalety w postaci [100]:

- stymulacji gospodarki,
- tworzenia miejsc pracy,
- mobilności zgodnej z zasadami zrównoważonego transportu,
- pozytywnego wpływu na zdrowie i bezpieczeństwo mieszkańców,
- zapewnienia spójności społecznej.

Zasadność wykorzystania tramwajów w miastach jest obecnie przedmiotem wielu rozważań naukowych, a ich przykłady opisano w pracach [28, 96]. Zgodnie ze statystykami przedstawionymi w pracy [101], ponad 14% całkowitego zapotrzebowania na transport publiczny w krajach Unii Europejskiej dotyczyło przejazdów realizowanych z wykorzystaniem tramwajów (rys. 1.1). Wraz z wykorzystaniem kolei miejskich udział ten wynosił łącznie 29,8%.

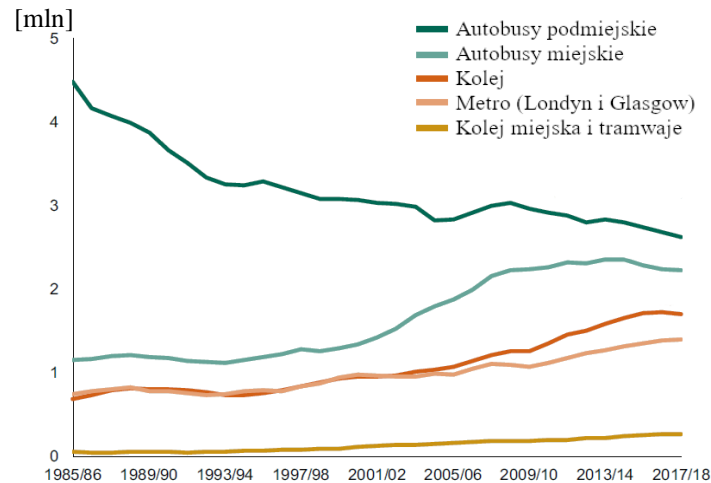


Rys. 1.1. Lokalne przejazdy transportem publicznym w Unii Europejskiej w 2014 r. [101]

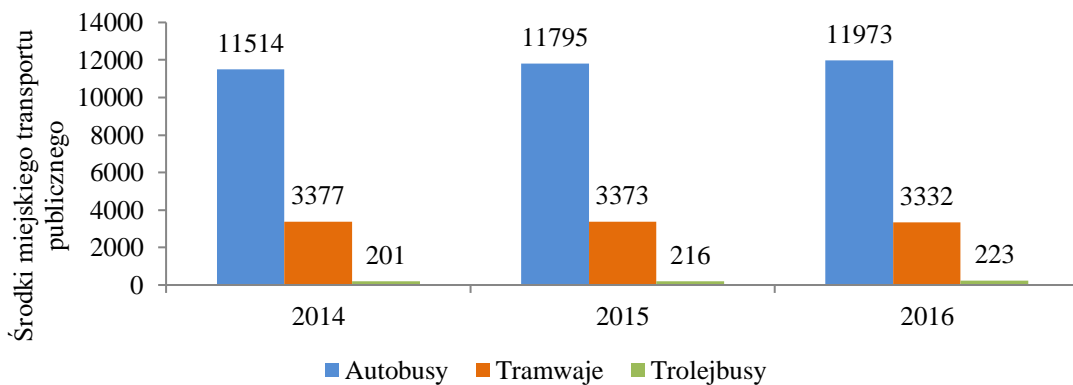
Długookresowe obserwacje liczby podróży mieszkańców Wielkiej Brytanii wskazują na sukcesywną tendencję wzrostową wykorzystania w tym celu tramwajów i kolei miejskiej w okresie 1985–2018 (rys. 1.2). Co więcej, analizy [33] wskazują, że z powodu funkcjonowania tramwajów w Wielkiej Brytanii zmniejsza się tam liczba podróży samochodem o około 22 miliony rocznie.

Jak wynika z opracowania Głównego Urzędu Statystycznego dotyczącego działalności transportu miejskiego w Polsce w latach 2014–2016 [79], ogólna liczba tramwajów pozostaje na zbliżonym poziomie ze zmianą w analizowanym okresie o około 1% (rys. 1.3). Mimo zbliżonej liczności obserwowany jest rozwój tramwajów w postaci zwiększania ogólnej liczby miejsc w tramwajach. Jest to ściśle związane z realizowanym procesem wymiany

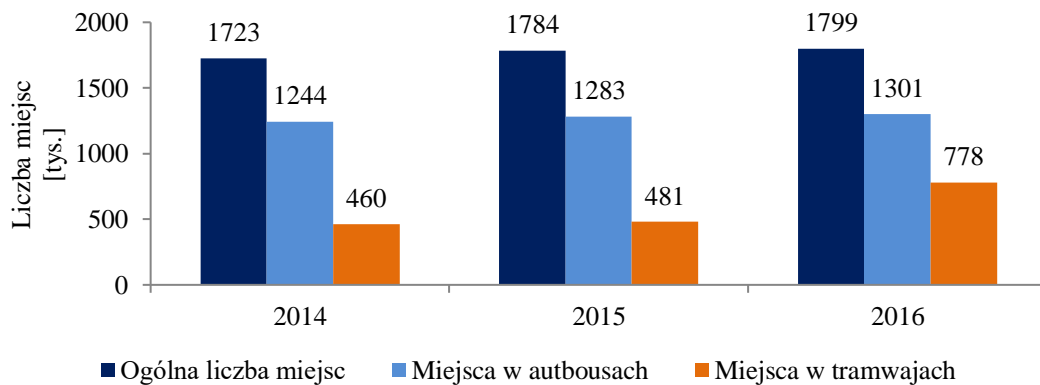
eksploatowanych tramwajów na nowoczesne pojazdy spełniające obecne wymagania podmiotów zamawiających. Wskazuje na to widoczna w analizie ogólna liczba miejsc w tramwajach, która w latach 2014–2016 zwiększyła się o 41% za sprawą nowoczesnych tramwajów wieloczłonowych (rys. 1.4).



Rys. 1.2. Liczba podróży publicznymi środkami transportu w Wielkiej Brytanii w latach 1985–2018 [55]

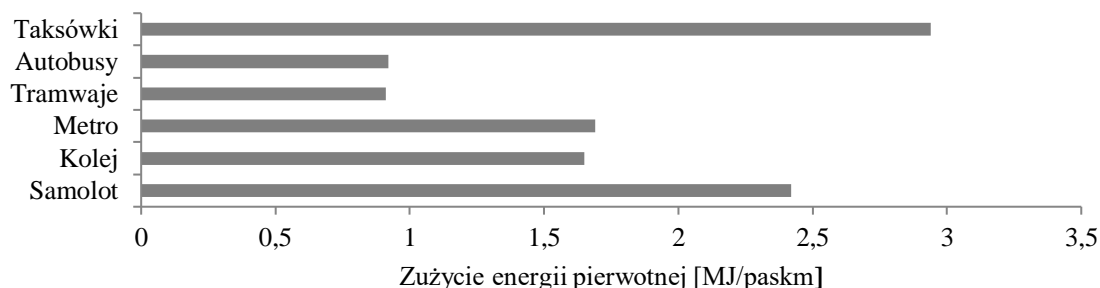


Rys. 1.3. Liczba środków transportu miejskiego w Polsce w latach 2014–2016 [79, 282]



Rys. 1.4. Liczba środków transportu miejskiego w Polsce w latach 2014–2016 [79, 282]

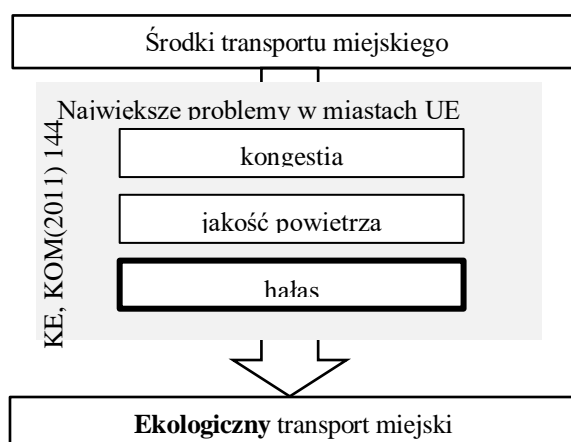
Szczegółową analizę zapotrzebowania na transport miejski w Polsce przedstawiono w pracy [282]. W przypadku tramwajów obserwuje się również najmniejszy stosunek zużycia energii pierwotnej do jednostki miary pracy przewozowej jaką jest pasażerokilometr (paskm) w odniesieniu do innych środków transportu publicznego [8] (rys. 1.5).



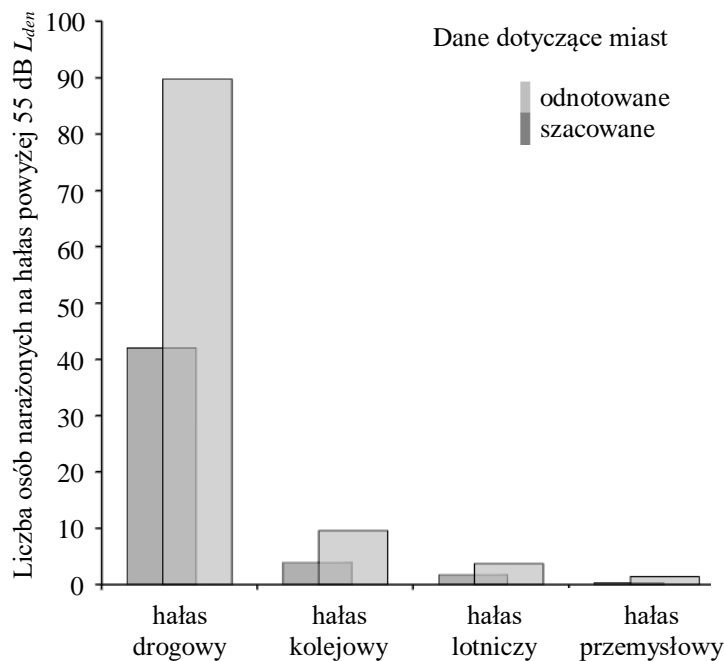
Rys. 1.5. Zużycie energii pierwotnej w zależności od środka transportu publicznego [8]

Mimo wielu zalet tramwajów związanych z ich funkcjonowaniem w obszarach miejskich, wymagają one ponoszenia dalszych nakładów pracy związanych z polepszeniem realizowanego procesu transportowego.

Problematykę i wytyczne dla transportu miejskiego opisano w Białej Księdze Transportowej [128], gdzie wśród najważniejszych problemów miast wymieniony jest hałas generowany przez środki transportu miejskiego (rys. 1.6). Jako drugie, najbardziej dominujące źródło hałasu środowiskowego w obszarze miast europejskich, sklasyfikowany został hałas kolejowy – w tym pochodzący od tramwajów (rys. 1.7). Dodatkowo według analiz podanych w raporcie [67] na jego oddziaływanie na poziomie wskaźnika  $L_{den} > 55$  dB narażonych jest prawie osiem milionów osób. Wskaźnik  $L_{den}$  (ang. *day-evening-night noise level*) odpowiada średniemu poziomowi dźwięku w ciągu dnia, wieczoru i nocy, na który narażony jest obywatel w ciągu roku [66].



Rys. 1.6. Największe problemy na drodze ekologicznego transportu miejskiego w miastach Unii Europejskiej (opracowanie własne na podstawie [128])



Rys. 1.7. Liczba osób narażonych na hałas powyżej 55 dB  $L_{den}$  [67]

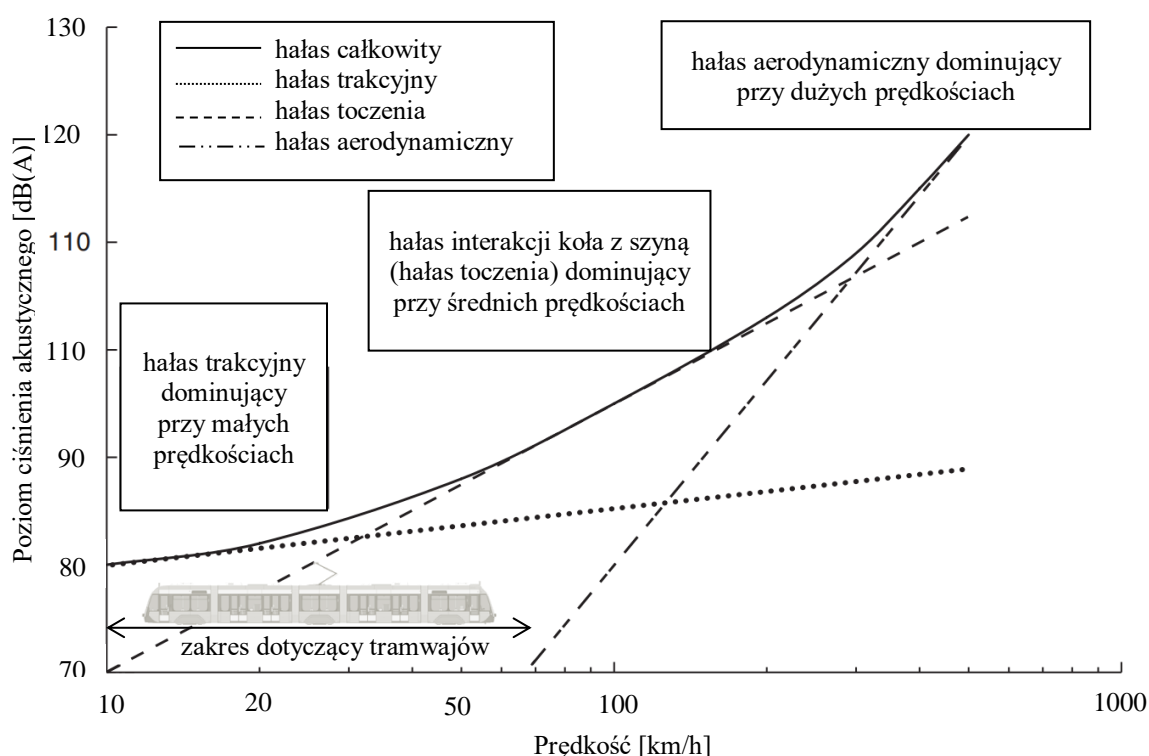
Jak zaznaczono, pominięcie tramwajów i innych lekkich pojazdów szynowych w analizach przyczynia się do znacznych różnic w zgłaszanej liczbie osób narażonych na hałas. Ponadto środki transportu publicznego w tym tramwaje są głównym źródłem drgań w miastach.

Wdrożenie celów zrównoważonego rozwoju Białej Księgi Transportowej w aspekcie funkcjonowania tramwajów możliwe jest między innymi poprzez zminimalizowanie emisji hałasu. Zatem przedstawione dotychczas rozważania ukierunkowują nakłady pracy wokół rozwiązania problemu rozwojowego (zgodnie z definicją klas problemów badawczych [34]). Problemy te zawierają w swojej istocie poszukiwanie lepszego sposobu działania niż obecnie dostępne. W omawianym zagadnieniu dotyczy to wszelkich działań związanych z poprawą eksploatowanych tramwajów poprzez wdrożenie nowych rozwiązań służących minimalizacji zjawisk wibroakustycznych. Konieczne jest przy tym bieżące monitorowanie i kompleksowa ocena tych zjawisk w warunkach rzeczywistej eksploatacji tramwajów. Działania te umożliwią poznanie stanu obecnego, jak również sprawdzenie skuteczności wdrażanych środków minimalizujących zjawiska wibroakustyczne w taborze.

## 2. ZJAWISKA WIBROAKUSTYCZNE GENEROWANE PRZEZ TRAMWAJE I ICH WPŁYW NA ŚRODOWISKO MIEJSKIE

### 2.1. Źródła drgań i hałasu generowanych przez tramwaje

Źródła hałasu generowanego przez pojazdy szynowe dotyczą głównie urządzeń trakcyjnych, zjawisk przy toczeniu się kół po szynach i przepływu powietrza wokół konstrukcji pojazdu [161, 262, 263]. Udział wymienionych czynników w generowanym dźwięku zależy głównie od prędkości i typu pojazdu szynowego, co przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji prędkości pojazdu szynowego [95, 155, 206]

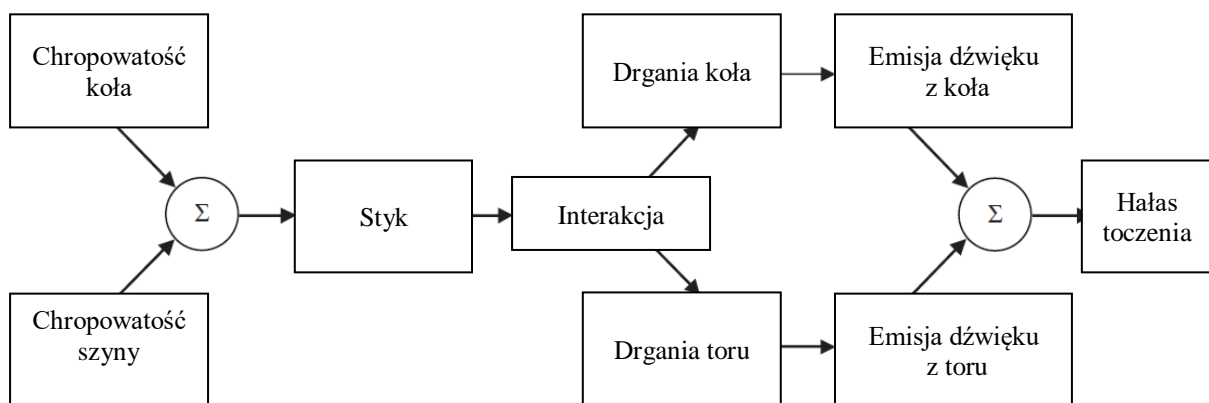
W zakresie prędkości jazdy tramwajów wynoszących maksymalnie 50–70 km/h generowany jest głównie hałas od urządzeń trakcyjnych będący dominującym do około 30 km/h oraz dźwięk związany ze zjawiskiem toczenia, który jest dominujący od około 40 km/h. Zagadnienia hałasu aerodynamicznego dotyczą kolei dużych prędkości i szczegółowo omówiono je na przykład w pracach [113, 280].

Zjawisko toczenia się kół po szynach dla większości prędkości jest dominującym źródłem drgań i hałasu generowanego przez pojazdy szynowe. Podczas ruchu pojazdu w miejscu styku koła z szyną generowane są drgania spowodowane siłami dynamicznymi.

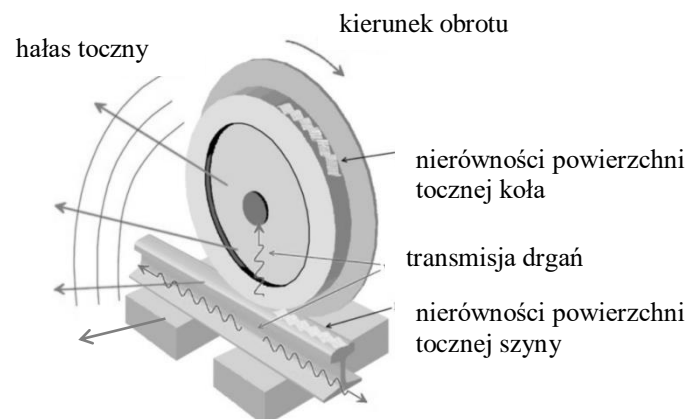


Te wynikają ze zjawisk kontaktowych zależnych od prędkości oraz pionowych nierówności ich powierzchni toczonej takich jak chropowatość czy zużycie faliste (nazwane również korugacją). Generowane w miejscu styku drgania są następnie transmitowane w głąb struktury pojazdu i toru prowadząc do częściowej emisji akustycznej ich poszczególnych elementów – zależnie od właściwości dynamicznych.

Mechanizm powstawania zjawisk wibroakustycznych związanych z toczeniem kół po szynach został przedstawiony w formie schematu blokowego na rysunku 2.2 i wizualizacji na rysunku 2.3.



Rys. 2.2. Schemat blokowy powstawania dźwięku toczenia [161, 262]



Rys. 2.3. Wizualizacja generowania dźwięku toczenia [4]

Nierówności powierzchni toczonej szyn i kół powodują ich wzajemne przemieszczenia względne podczas jazdy. Stopień, w jakim porusza się koło lub szyna w odpowiedzi na to względne przemieszczenie zależy od ich odkształcalności mechanicznej (przemieszczenia w odpowiedzi na działającą siłę) [18, 262].

Powstałe na wskutek opisywanych nierówności drgania o charakterze sinusoidalnym są generowane z częstotliwością zależną od długości fali chropowatości szyn i kół oraz od prędkości pojazdu, jak w równaniu [4, 262]:

$$f_f = \frac{V}{\lambda} \quad (2.1)$$

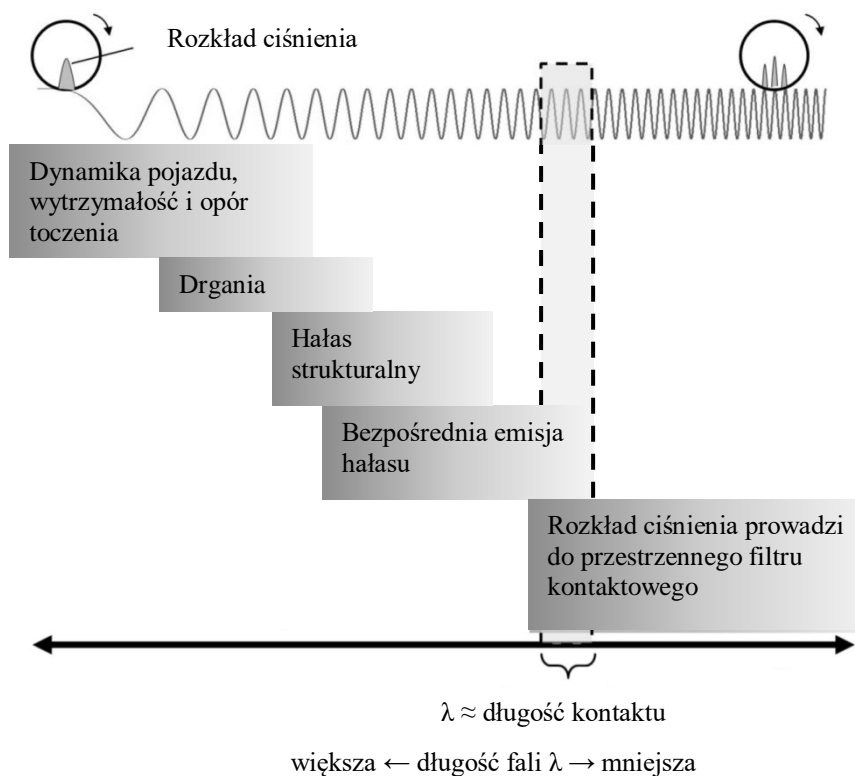
gdzie:

$f_f$  – częstotliwość wzbudzenia sił [Hz],

$V$  – prędkość pojazdu [m/s],

$\lambda$  – długość fali [m].

Na rysunku 2.4 przedstawiono schematycznie zależność pomiędzy długością fali chropowatości powierzchni tocznej szyny a zjawiskami wibroakustycznymi wywołanymi oddziaływaniami dynamicznymi przy toczeniu.










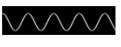


Rys. 2.4. Zależność pomiędzy długością fali powierzchni tocznej a zjawiskami wibroakustycznymi wywołanymi oddziaływaniami dynamicznymi przy toczeniu [4]

Im większe długości fali tym wzbudzone zjawiska wibroakustyczne charakteryzują się niższymi częstotliwościami. Wzbudzone niskie częstotliwości mogą pokrywać się z częstotliwościami rezonansowymi konstrukcji pojazdu i prowadzić do problemów z ich trwałością i zwiększonym oporem toczenia. Częstotliwości te mogą również pokrywać się z częstotliwościami rezonansowymi ciała człowieka wpływając na komfort jazdy. W przypadku niższych długości fali wzbudzone częstotliwości są wyższe i powodują zwiększone drgania struktur, a w konsekwencji ich emisję akustyczną.

Zgodnie z pracą [262] długości fal istotne dla hałasu toczenia obejmują zakres od dziesiątek centymetrów do długości związanej z powierzchnią styku (około 1 cm). W tabeli 2.1. przedstawiono zakresy długości fali nierówności szyny i odpowiadające im częstotliwości generowanych częstotliwości hałasu na przykładzie pojazdu metra przy prędkości 72 km/h.

Tabela 2.1. Zakresy długości fali nierówności szyny i odpowiadające im częstotliwości hałasu na przykładzie pojazdu metra (opracowanie własne na podstawie [262])

Częstotliwości zakresu słyszalności ucha [Hz]		20÷20000
Długości fali nierówności dla hałasu w zakresie słyszalności ucha [mm]		1÷1000
Częstotliwości dla największej czułości ucha [Hz]		2000÷5000
Długości fali nierówności generujące hałas w zakresie największej czułości ucha [mm]		2÷10
Częstotliwości hałasu toczenia [Hz]		100÷5000
Długości fali nierówności hałasu toczenia [mm]		4÷200
Częstotliwości hałasu strukturalnego [Hz]		100÷2000
Długości fali nierówności hałasu strukturalnego [mm]		10÷200
Częstotliwości słyszalnego hałasu z gruntu [Hz]		25÷250
Długości fali nierówności hałasu z gruntu [mm]		80÷800
1      10      100      1000      10000      100000		
Zakres [mm]/[Hz]		

Jak wskazano w tabeli 2.1, generowane składowe hałasu w analizowanym przypadku dotyczą hałasu przekazywanego poprzez grunt (ang. *ground-borne noise*), hałasu strukturalnego (ang. *structure-borne noise*) i hałasu toczenia (ang. *rolling noise*). Poszczególnemu typowi hałasu przyporządkowano długości fal nierówności zgodnie z równaniem (2.1). Za hałas toczenia w analizowanym przypadku odpowiadają długości fal nierówności w zakresie 4–200 mm. Wyróżnione zakresy są źródłem hałasu o częstotliwości pokrywającej się z zakresem słyszalnym ludzkiego ucha. Przypadek długości fal nierówności w zakresie 2–10 mm dotyczy źródła hałasu w zakresie częstotliwości odpowiadających największej wrażliwości ludzkiego ucha [122]. W badaniach eksperymentalnych tramwajów przedstawionych w pracy [130], wykazano, że największa zależność pomiędzy chropowatością powierzchni toczyń szyn i kół tramwaju a poziomem ciśnienia akustycznego występuje przy częstotliwościach 63–500 Hz.

Istotne częstotliwości hałasu toczenia zawierają się w zakresie 200–2000 Hz zgodnie z pracą [73], 100–5000 Hz zgodnie z pracą [262], czy też 63–5000 Hz zgodnie z opracowaniami [110, 262]. W przypadku badań [18] częstotliwość tą określono na 1600 Hz. Za hałas poniżej wskazanych częstotliwości toczenia odpowiedzialne są głównie drgania szyn (od 250 Hz) i podkłady (poniżej 400 Hz) [263]. Jest to spowodowane większą odkształcalnością szyny w porównywaniu do koła, przez co przemieszczenie względne jest przekształcane głównie w drgania szyny. Częstotliwości powyżej wskazanych wartości związane są z głównym udziałem kół w hałasie tocznym. Emitowany hałas jest wówczas ściśle związany z częstotliwościami drgań własnych kół. Częstotliwości te są jednak zależne od typu konstrukcji i zastosowanych rozwiązań tłumiących w kole tramwajowym. Analiza rozwiązań tłumiących w kołach pojazdów szynowych w aspekcie zjawisk wibroakustycznych i procesów zużycia opisano między innymi w pracach [14, 66, 69, 163, 171, 195, 262, 273].

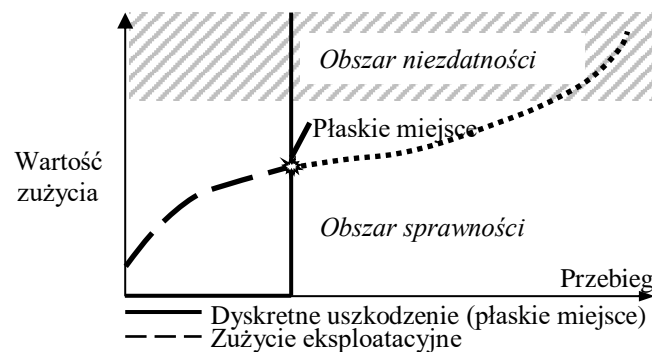
Wykazano również, że w przypadku prędkości osiągniętych przez tramwaje, główny udział w generowaniu całkowitego hałasu toczenia ma szyna (różnica do 2 dB w stosunku do hałasu całkowitego) [262, 263]. W przypadku hałasu strukturalnego, zgodnie z pracą [276] jest to zakres częstotliwości 250–2000 Hz lub z zgodnie z opracowaniem [92] zakres 100–2000 Hz.

Nierówności szyn w postaci zużycia falistego (korugacja) charakteryzuje się długością fali w zakresie 50–1200 Hz i jest głównie związane ze zużyciem zmęczeniowym styku tocznego RCF (ang. *Rolling Contact Fatigue*) [126]. W przypadku lekkich pojazdów szynowych zakres długości fali dotyczy 50–100 Hz i związany jest z odkształceniem plastycznym szyny na skutek oddziaływania masy nieuspreżynowanej [84].

Do hałasu toczenia zalicza się również tonalne zjawiska akustyczne generowane podczas przejazdów w lukach, które wywołane jest przez pełzanie poprzeczne koła po szynie (hałas typu ang. *squeling noise*) lub kontakt obrzeża koła z szyną (hałas typu ang. *flanging noise*). Zjawiska te związane są z częstotliwościami drgań własnych kół – szczególnie osiowe i radialne mody. W zależności od literatury określane są różne zakresy częstotliwości obu tych zjawisk na przykład od 1 do 10 kHz dla hałasu typu *flanging* oraz poniżej 5 kHz dla *squeling* [120, 205, 232, 265].

Ponadto do hałasu toczenia zalicza się dźwięki impulsowe związane z wystąpieniem na powierzchniach tocznych kół płaskich miejsc oraz z przejazdem przez nieregularności szyn w postaci ich połączeń, spoin i krzyżownic. Płaskie miejsce jest uszkodzeniem obręczy koła w postaci płaskiego obszaru na jej powierzchni wynikającego z ubytku lub rozwalcowania jej materiału. Przyczyna powstawania jest dobrze znana i opisana w licznych opracowaniach

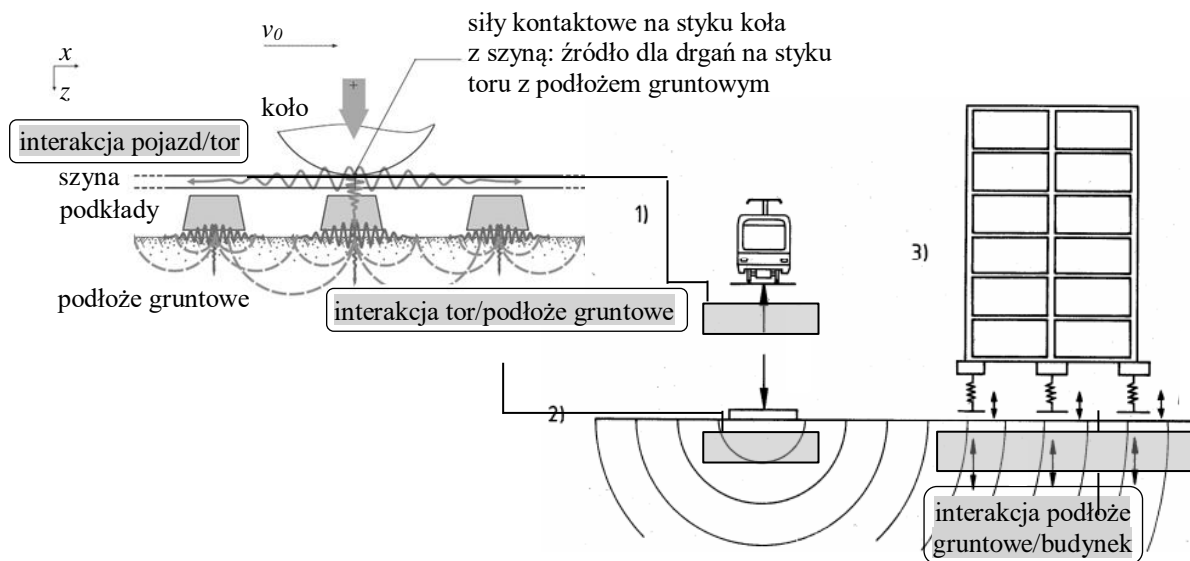
na przykład [192, 262]. Główną przyczyną jest całkowite lub chwilowe zablokowanie osi w wyniku nieprawidłowego działania hamulców lub zmniejszenia przyczepności w obszarze styku koła z szyną (zanieczyszczenia, wilgotność). Następuje wówczas przesuwanie zablokowanych kół wzdłuż szyny z intensywnym procesem zużycia ściernego powierzchni toczonej. Skrawany materiał jest często przemieszczany na powierzchni i rozwałcowywany tuż za płaskim miejscem tworząc nalepy. Uszkodzenie to powoduje nagłą utratę pierwotnych własności koła w eksploatacji definiując jego niezdatność techniczną (rys. 2.5).



Rys. 2.5. Proces zmiany stanu technicznego koła wskutek wystąpienia płaskiego [197]

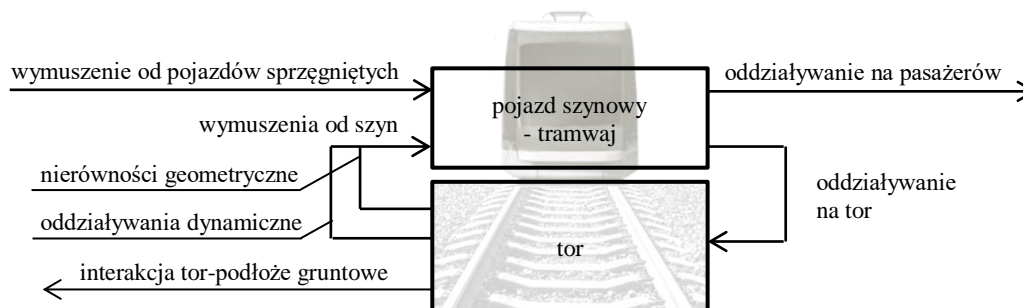
Obserwowane jest to jako utrata cichobieżności przy toczeniu oraz jako zwiększone oddziaływania dynamiczne przekazywane na tor. Oddziaływania te są znaczne i różnią się od oddziaływań wynikających z nierówności w ciągłym kontakcie styku powierzchni koła z szyną. Zakres częstotliwości związany z tym zjawiskiem jest zakresem szerokopasmowym, zależnym od siły wymuszenia. Badania dotyczące zjawisk dynamicznych związanych z płaskim miejscem na powierzchniach toczonej kół oraz metody ich wykrywania przedstawiono między innymi w pracach [112, 191, 214, 237, 279].

Drgania w miejscu styku koła z szyną propagują poprzez poszczególne elementy składowe torowiska, a następnie w wyniku oddziaływań na styku z gruntem dochodzi do generowania drgań parasejsmicznych. Generowane w ten sposób drgania propagują do środowiska zewnętrznego poprzez podłoże gruntowe i są transmitowane do fundamentów budynków negatywnie oddziałując na jego konstrukcję i ludzi. Proces rozchodzenia się drgań parasejsmicznych w gruncie należy do zjawisk falowych [254]. Analizowane zjawiska przypisane do obszarów obserwacji przedstawiono schematycznie na rysunku 2.6. Podział tych obszarów obejmuje emisję, transmisję i imisję zjawisk wibroakustycznych.



Rys. 2.6. Wzbudzenie drgań przez pojazdy szynowe: 1) emisja: wzbudzenie wymuszeniem dynamicznym, 2) transmisja: propagacja fali w gruncie, 3) imisja: przeniesienie drgań z gruntu na budynek (opracowanie własne na podstawie [231, 264])

Wartości oddziaływań siłowych w układzie dynamicznym pojazd szynowy–tor, jak również poziom i charakter powstających w ich konsekwencji drgań i hałasu, zależą od czynników związanych zarówno z pojazdem szynowym, jak i z nawierzchnią torowiska, ponieważ tworzą one układ o wzajemnym sprzężeniu zwrotnym. Układ ten może być przedstawiony schematycznie jak na rysunku 2.7.

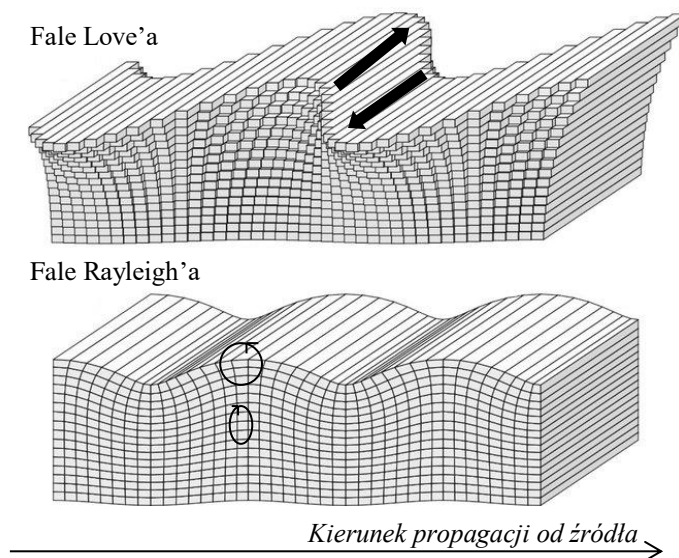


Rys. 2.7. Schemat układu pojazd-tor (opracowanie własne na podstawie [220])

Drgania parasejsmiczne generowane przez pojazdy komunikacji miejskiej nazywane są drganiami komunikacyjnymi. Specyfika oddziaływania drgań komunikacyjnych charakteryzowana jest głównie w postaci fal powierzchniowych – Love’a i Rayleigh’a, które zawierają ich największą energię [135]. Charakterystykę tych fal przedstawiono w tabeli 2.2 a ich postacie przedstawiono na rysunku 2.8.

Tabela 2.2. Charakterystyka fal powierzchniowych gruntu [31, 135, 229]

Rodzaj i nazwa fali	Charakterystyka fal	Prędkość
Powierzchniowa Rayleigh'a	Fala zawierająca zarówno ruch pionowy jak i promieniowy. Charakteryzuje się kombinacją kompresji wzdłużnej i dylatacji oraz eliptycznym przemieszczeniem powierzchni w płaszczyźnie pionowej w kierunku rozchodzenia się fali.	2–4,5 km/s
Powierzchniowa Love'a	Fala podłużna (zwana dylatacyjną). Charakteryzuje się ruchem poprzecznym z naprzemiennym ściskaniem i rozprężaniem podłoża w kierunku propagacji. Fala posiada względnie małą amplitudę, przez co towarzyszy jej mniej destrukcyjne oddziaływanie niż w przypadku fali powierzchniowej Rayleigh'a.	5–8 km/s



Rys. 2.8. Postacie fal powierzchniowych gruntu Love'a i Rayleigh'a [31]

Głównymi czynnikami generującymi drgania parasejsmiczne w eksploatacji pojazdów szynowych są [143]:

- dynamiczne oddziaływania w miejscu styku koła z szyną zależne między innymi od nierówności ich powierzchni toczych,
- przenoszenie obciążeń poszczególnych zestawów kołowych w miejscu styku wzdłuż toru (obciążenie quasi–statyczne),
- występowanie nieregularności powierzchni toczych w miejscu styku koła z szyną w postaci połączeń szyn, rozjazdów, krzyżownic czy też płaskich miejsc.

Częstotliwości wzbudzanych drgań parasejsmicznych podczas przejazdu pojazdów szynowych zależą od wielu czynników zależnych od pojazdu, torowiska i właściwości gruntu. Zgodnie z pracą [3] zakresy wzbudzanych częstotliwości są zależne od:

- dynamiki pojazdu, w zakresie niskich częstotliwości od 15 Hz, przy czym górna granica tego zakresu zależy od postaci drgań własnych, mas usprężynowanych i nieusprężynowanych oraz od rozkładu tych mas,

- konstrukcji torowiska w zakresie od 15 Hz do 150 Hz, w którym może dochodzić do wzmocnienia drgań z uwagi na częstotliwości rezonansowe gruntu,
- zjawisk kontaktowych koła z szyną, w zakresie powyżej 150 Hz, które są silnie tłumione.

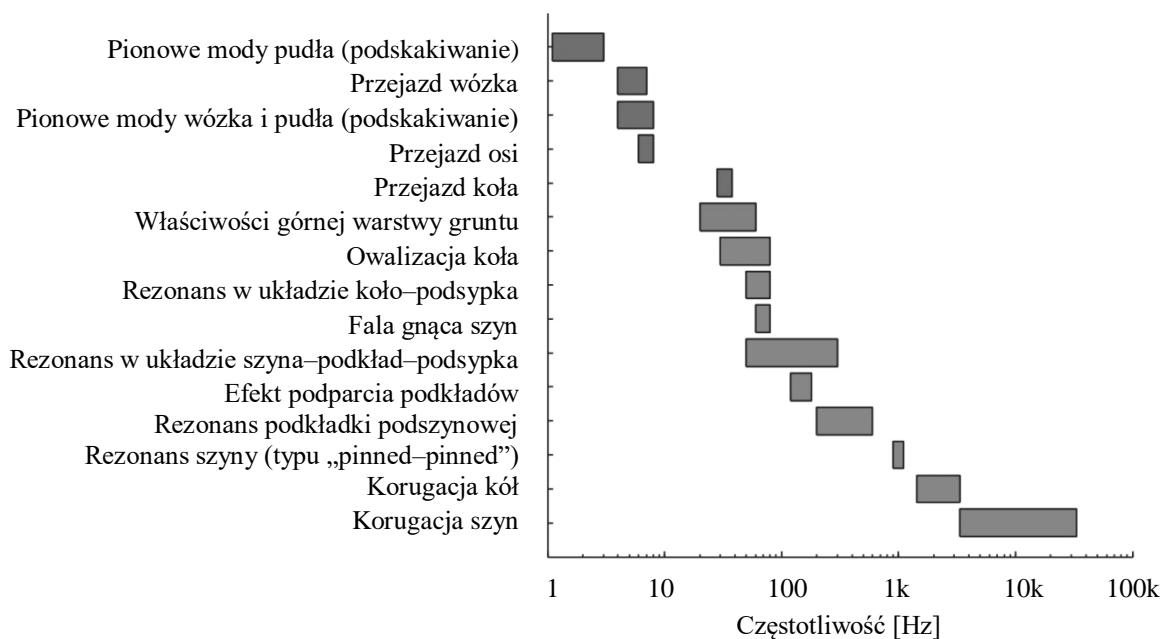
Ocena generowanych drgań parasejsmicznych pochodzenia komunikacyjnego odbywa się w oparciu o wiele metod naukowych, a ich stosowanie w praktyce zależne jest głównie od aktów prawnych obowiązujących w danym kraju. Zgodnie z danymi zawartymi w normach na przykład ISO 4866:2010 [103] i PN-B-02170:2016 [215], typowy zakres częstotliwości przyspieszeń drgań gruntu związany z drganiami komunikacyjnymi dotyczy częstotliwości 0–100 Hz. Taki główny udział oddziaływań dynamicznych potwierdza wiele dotychczas przeprowadzonych badań na przykład przedstawionych w pracach [1, 12, 138, 194].

W przypadku drgań komunikacyjnych i hałasu przenoszonego przez grunt, który wywołuje imisję akustyczną (ang. *ground-borne noise*) długości fali nierówności pionowych zawierają się w zakresie 0,4–100 m dla prędkości pojazdów szynowych wynoszącej 36–360 km/h. Nieregularności powierzchni szyny w tym korugacja charakteryzują się długością fali nierówności poniżej 1 m, a nieregularności powierzchni koła w postaci utraty okrągłości (ang. *out of roundness*) poniżej 3 m [84]. Przy czym amplituda nierówności dla szyn i kół jest zbliżona przy długościach fal poniżej 0,1 m. W przypadku większych długości fal nierówności, ich amplituda jest znacznie mniejsza dla koła, przez co jest pomijana w ocenie generowanych drgań parasejsmicznych. Co więcej, uznaje się korelację nierówności obu toków szynowych dla długości fal powyżej 3 m zarówno w odniesieniu do amplitudy jak i fazy [201]. Wpływ nieregularności powierzchni tocznych na generowane drgania parasejsmiczne został opisany w pracach [2, 140, 141].

Na rysunku 2.9 przedstawiono zakresy głównych składowych dynamicznych oddziaływań w układzie pojazd–torowisko–grunt. Zgodnie z pracą [143], w przypadku lekkich pojazdów szynowych głównym czynnikiem są dynamiczne oddziaływania w miejscu styku koła z szyną oraz zakłócenia i uszkodzenia w tym obszarze.

Eksploatacja lekkich pojazdów szynowych charakteryzuje się ich względnie małą masą i prędkością jazdy w porównaniu do pojazdów kolejowych. Z tego powodu nie występują względnie większe oddziaływania quasi-statyczne niż na kolei, gdzie są głównym źródłem drgań.





Rys. 2.9. Główne składowe dynamicznych oddziaływań układu pojazd–torowisko–grunt [143, 145]

Charakter generowanych drgań gruntu różni się w zależności od typu pojazdu szynowego i jego prędkości jazdy. W przypadku tramwajów częstotliwości wymuszeń zwierają się w niższych zakresach częstotliwości w porównaniu do pojazdów kolejowych z uwagi na uzyskiwane mniejsze prędkości jazdy [142, 143]. Wzrost prędkości przyczynia się do wzrostu obserwowanych drgań parasejsmicznych. W przypadku pojazdów kolejowych, zależność ta może być odwrotna dla poszczególnego zakresu prędkości z uwagi na dynamikę pojazdu i udział poszczególnych modów w generowaniu sił dynamicznych na styku koła z szyną [141].

Analizy przedstawione w pracy [143] dotyczące szczytowej wartości prędkości drgań parasejsmicznych PPV (ang. *Peak Particle Velocity*) w funkcji prędkości jazdy tramwaju przez lokalne uszkodzenia toru wskazują, że ich największe wartości dotyczą zakresu od około 10 km/h do 20 km/h. Przy czym wartość ta maleje wykładniczo wraz ze wzrostem prędkości. Natomiast te same analizy w funkcji odległości od torowiska wskazują, że największe wartości PPV zawierają się do około 2,5–3,5 m od osi toru. W przypadku przejazdu przez torowisko z nieregularnościami powierzchni tocznej szyn (bez lokalnych uszkodzeń), największe wartości PPV dotyczą prędkości 60–80 km/h.

Zgodnie z pracami [42, 145] w przypadku torowisk, spośród parametrów je charakteryzujących takich jak rozstaw punktów podparcia czy też masa poszczególnych elementów, największy udział w generowaniu drgań parasejsmicznych ma sztywność ich elementów składowych. Jak wskazano w pracy [198] zwiększenie masy torowiska również

może przyczyniać się do zmiany warunków brzegowych w generowaniu drgań w postaci przesunięcia głównych składowych częstotliwości. W przypadku podłoża gruntowego istotne parametry dla poziomu generowanych drgań i ich tłumienia w funkcji odległości (szczególnie dla wysokich częstotliwości) dotyczą jego sztywności, modułu Younga i Kirchoffa (ściananie) [5]. Zagadnienia modelowania, symulacji i oceny drgań parasejsmicznych generowanych przez pojazdy szynowe opisano przekrojowo w pracy [264].

W pracy [168] opisano dostępne technologie zabezpieczeń przed drganiami wywołanymi ruchem środków komunikacji miejskiej i wskazano najefektywniejsze sposoby ochrony związane z redukcją emisji drgań w źródle. Metody minimalizacji drgań komunikacyjnych opisano między innymi w pracach [65, 109, 138, 167]. Minimalizację drgań parasejsmicznych na skutek zmniejszenia masy nieusprężynowanej pojazdu, masy wózka i sztywności usprężynowania pierwszego stopnia wykazano w pracy [264]. Co więcej, redukcja masy zestawu kołowego zmniejsza drgania parasejsmiczne o maksymalnie o 5 dB w tercjach 2–80 Hz istotnych dla wrażliwości ludzkiego ciała i trwałości konstrukcji pobliskich budynków. Jednocześnie może nastąpić wzrost drgań w zakresie hałasu przenoszonego przez grunt (ang. *ground-borne noise*) powyżej tercji o częstotliwości środkowej 125 Hz. W przypadku redukcji masy wózka zaobserwowano zmniejszenie drgań w tercjach 2–6 Hz przy jednoczesnym wzroście drgań powyżej 10 Hz.

Wpływ skuteczności tłumienia kół na drgania parasejsmiczne został opisany między innymi w pracy [146]. Badania [47] wskazują na istotny wpływ zwiększenia charakterystyk mobilności kół tramwajowych w zakresie częstotliwości 1800–4100 Hz na obserwowane drgania parasejsmiczne. W opisywanym przypadku zaobserwowano wzrost o około 60% wartości względnych w tercjach do 1000 Hz. Wpłynęło to na ponad dwukrotny wzrost wartości skutecznych lokalnego poziomu drgań. Przy czym w badaniach tych nie zaobserwowano znaczących dla percepcji słuchu zmian w stosunku do hałasu ocenianego według normy ISO 3095:2005 [102].

W pracy [117] przedstawiono wyniki analiz, których wnioski potwierdzają konieczność prowadzenia również analiz symulacyjnych planowanych rozwiązań wibroizolacyjnych torowisk. W Polsce eksperymentalne badania dotyczące wpływu drgań parasejsmicznych pochodzenia komunikacyjnego prowadzi się również w stosunku do pojazdów metra. Tego typu badania przedstawiono w pracy [139], w której zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych dla wielokondygnacyjnego obiektu.

Ponadto zgodnie z pracami [6, 119, 144, 145] wśród właściwości wpływających na generowane drgania wyróżnia się moduł Younga i charakterystykę tłumienia gruntu.

Badania dotyczące wpływu typów pojazdów szynowych, torowisk, parametrów gruntu na poziomy i charakterystykę drgań parasejsmicznych przedstawiono na przykład w pracach [94, 143, 158].

## 2.2. Wpływ drgań i hałasu pochodzenia komunikacyjnego na środowisko

Zgodnie z obowiązującą Ustawą „Prawo ochrony środowiska” [59] hałas i drgania wymienione są jako emisje szkodliwe dla zdrowia ludzi, stanu środowiska, powodujące szkody materialne, pogorszające walory estetyczne środowiska czy też kolidujące z innymi sposobami korzystania ze środowiska. Należy je zatem traktować jako zanieczyszczenia środowiska. Ustawa ta nakłada podmiotom podejmującym działalność negatywnie oddziałującą na środowisko, obowiązek zapobiegania temu oddziaływaniu. Zjawiska wibroakustyczne w transporcie w aspekcie ochrony środowiska omówiono szczegółowo w opracowaniach [65, 89, 151, 213].

Oddziaływanie hałasu na organizm człowieka rozpatrywane jest w aspekcie wpływu bezpośredniego na narząd słuchu, wpływu pośredniego na układ nerwowy i psychikę oraz wpływu na pozostałe narządy (rys. 2.10) [152, 160, 274]. Skalę problemu negatywnego oddziaływania hałasu komunikacyjnego potwierdzają badania [67] wskazujące, że w Polsce około 50% mieszkańców miast narażonych jest na ten hałas na poziomie powyżej 55 dB  $L_{den}$ . Tendencja ta jest wzrostowa i ma związek z postępującym rozwojem miast zarówno w kwestii urbanistycznej jak i rozwoju komunikacji.



Rys. 2.10. Główne skutki oddziaływania drgań i hałasu komunikacyjnego na organizm człowieka (opracowanie własne)

Ludzkie ucho odbiera dźwięki w zakresie częstotliwości od 20 Hz do 20 kHz. Jednak percepcja dźwięku nie jest równa w całym tym zakresie – co reprezentuje charakterystyka korekcyjna A, gdzie największa percepcja dotyczy zakresu 1–5 kHz [64]. Zakres ten pokrywają

częstotliwości dźwięku generowane przez tramwaj (do około 5 kHz). Konsekwencje oddziaływania hałasu na narząd słuchu zależą głównie od poziomu ciśnienia akustycznego i czasu narażenia. Wysokie poziomy hałasu mogą powodować uszkodzenie struktur anatomicznych ucha osłabiając słuch, co może prowadzić do jego utraty [274]. Jednak trwała utrata słuchu z powodu hałasu komunikacyjnego stanowi zagrożenie głównie dla dzieci [72]. Wśród osób dorosłych nie stanowi on obecnie ryzyka, w przeciwieństwie do innych źródeł hałasu w mieście w postaci na przykład wybuchów petard. Mimo to, anatomiczne połączenie nerwowej drogi słuchowej z korą mózgową umożliwia bodźcom słuchowym oddziaływanie na inne ośrodki w mózgowiu – zwłaszcza ośrodkowy układ nerwowy i układ gruczołów wydzielania wewnętrznego, a w konsekwencji na stan i funkcje wielu narządów wewnętrznych.

Wzmożenie pogorszonego stanu psychofizycznego przypisuje się również cechom sygnału zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości [15, 125, 184, 208]. Zmienność sygnałów dźwiękowych w czasie przyczynia się do odczucia większej uciążliwości. Przyczyną jest funkcjonowanie receptorów słuchowych, które wraz z czasem są coraz mniej podatne na stałe bodźce i stają się bardziej wrażliwe na ich zmiany. Przy rozpatrywaniu składowych częstotliwościowych hałasu większą szkodliwość przypisuje się składowym w zakresie wysokich częstotliwości. Natomiast kwestia większej uciążliwości dotyczy składowych niskoczęstotliwościowych od 10 Hz do 250 Hz. Wśród rozważań, należy wyróżnić również zakres częstotliwościowy infradźwięków, których wpływ na organizm człowieka opisano przeglądowo w pracy [209]. Przy analizie wpływu hałasu na organizm człowieka wyróżnia się najbardziej niebezpieczniejszy charakter hałasu w postaci impulsowej lub tonalnej [75]. W przypadku narażania na jego oddziaływanie w uchu środkowym nie występuje odruch obronny przed dźwiękami o zbyt dużym poziomie – tak zwany odruch strzemiączkowy [239]. Jest to istotne w eksploatacji tramwajów, ponieważ częste skargi mieszkańców na ich funkcjonowanie dotyczą hałasu związanego z tonalnymi dźwiękami generowanymi przez tramwaje na przykład w łukach, na nieciągłościach szyn. Ma to swoje potwierdzenie w doniesieniach medialnych w Polsce z ostatnich lat na przykład w informacjach [63, 108, 153, 204, 269]. Dźwięki te zawierają się w zakresie częstotliwości 400–1000 Hz z tonalną składową przy częstotliwości 500 Hz lub 600 Hz [13, 206]. Przejazdy przez łuki generują dźwięki tonalne charakteryzujące się większym o około 10 dB(A) poziomem  $Leq(A)$  w porównaniu do hałasu toczenia, co może przyczynić się do przekraczania wartości granicznych obowiązujących w nocy.

Głównym powodem zdefiniowania przez mieszkańców dźwięku jako uciążliwego są jego następstwa w postaci zakłóceń w sferze komunikacji werbalnej, wypoczynku,

koncentracji, pracy czy śnie [208]. Odczucie uciążliwości, mimo jej subiektywnej oceny zależnej od percepcji danego człowieka, zwiększa się wraz z czasem narażenia. Zbadano, że poziom  $L_{den} \geq 42$  dB(A) jest poziomem progowym odczucia uciążliwości dla hałasu komunikacyjnego [175, 210]. Badania przedstawione w pracy [275] wyróżniły, że około 20% osób narażonych w mieście na hałas tramwajowy wykazuje zrytowanie tym zjawiskiem. Natomiast w badaniach [174] wykazano, że dla 44% z 798 respondentów dźwięk pochodzący z ruchu tramwajów był najistotniejszym źródłem uciążliwych dźwięków w mieście, ważniejszym niż inne analizowane w badaniach źródła (takie jak ruch drogowy). Co więcej, dla 76% badanych uciążliwość tramwajów była większa lub równa uciążliwości ruchu drogowego. Ponadto wskazano, że ogólny poziom dokuczliwości dźwięków (uwzględniający ruch tramwajów i ruch drogowy) maleje, gdy zmianie ulegnie jedynie poziom dokuczliwości dźwięków spowodowany ruchem tramwajów.

W pracy [41] przedstawiono przypadek analizy skarg mieszkańców na hałas po wprowadzeniu do eksploatacji nowego typu tramwaju. W badaniach uwzględniono analizę podstawowych miar punktowych dźwięku jak również wskaźniki psychoakustyczne. Wykazano, że zróżnicowanie pomiędzy poszczególnymi typami tramwajów pod względem generowanego dźwięku przy użyciu równoważnego poziomu dźwięku możliwe jest przy zastosowaniu charakterystyki korekcyjnej C. Pozwoliło to na zróżnicowanie nowych tramwajów względem już eksploatowanych o 6 dB. Jest to skutek charakterystyk częstotliwościowych generowanych przez tramwaje dźwięków, które różnią się między sobą o ponad 15 dB głównie w zakresie niskich częstotliwości. Ma to szczególne znaczenie w ocenie irytacji dźwięku i zakłócenia snu [123]. Istotne w tym aspekcie okazało się również uwzględnienie poziomu tła ciśnienia akustycznego w postaci stosunku wartości szczytowej poziomu  $L_{eq}(C)$  do referencyjnego poziomu tła ciśnienia akustycznego. Największe tak utworzone współczynniki zaobserwowano w obszarach miejskich, co może powodować istotne autonomiczne reakcje sercowo–naczyniowe podczas snu [11, 97, 277]. Współczynniki te różnicowały również poszczególne typy tramwajów, przy czym większe wartości charakteryzowały nowo eksploatowane pojazdy.

W pracy [41], że wykazano, że wprowadzone do ruchu nowe tramwaje mają pogorszone parametry psychoakustyczne szczególnie pod względem głośności, chropowatości i ostrości dźwięku, co jest głównym czynnikiem zgłaszania skarg przez mieszkańców na ich funkcjonowanie w mieście. Jednocześnie poziom generowanych przez nie drgań był poniżej wartości progowych ich odczucia dla wszystkich analizowanych typów tramwajów. Wartości parametrów akustycznych definiują pojęcie „jakości akustycznej” tramwaju, określonej przez

autorów pracy [41]. Zmienność tych parametrów była istotna i prowadziła do upośledzenia adaptacji dźwięków układu słuchowego, co znajduje potwierdzenie w literaturze [71, 234, 242]. Ponadto średnie wartości szczytowe drgań były większe dla nowych tramwajów. Wskazano przy tym zasadność wykorzystania filtra korekcyjnego  $W_k$  w zróżnicowaniu tramwajów i ocenie wpływu drgań na człowieka. Poziomy drgań wskazywały, że 15% obserwacji dotyczyło dużej irytacji mieszkańców, a 25% z nich osiągnęła poziom przyczyniający się do przerwania snu. Potwierdzono również, że niski poziom tła akustycznego zarówno przy analizie dźwięku i drgań podczas przejazdu tramwaju, powoduje zwiększenie odczuwalności tych zjawisk przez człowieka [159, 207].

W zakresie jakości dźwięku, warto odnotować działania przedsiębiorstwa Tramwaje Warszawskie, które dokonały przeprogramowania sterowników falowników w tramwajach typu 120Na. Dzięki temu zabiegowi usunięto tonalne dźwięki, które irytowały pasażerów i mieszkańców [270]. Ponadto jednym ze sposobów ograniczenia hałasu tocznego i hałasu związanego z pracą urządzeń zasilających są osłony wózków, które mogą obniżyć równoważny poziom dźwięku o 2 dB i o około 4 dB w tercjach do 200 Hz [49, 199, 262].

Oddziaływanie hałasu związane jest również z zaburzeniami snu, których konsekwencje mogą dotyczyć obniżenia jakości snu, liczby przebudzeń w nocy, czy też problemów z zasypianiem [87]. Wykazano, że w godzinach 5:00–7:00 i 22:00–00:00 mieszkańcy są najbardziej wrażliwi na oddziaływania drgań i hałasu, które w istotny sposób ingerują w proces snu i odpoczynku prowadząc do irytacji [86, 97, 121]. Według [91, 97] szacuje się, że poziom  $L_{night, outside}$  wynoszący 55 dB(A) jest poziomem granicznym dla zaburzeń snu. Zgodnie z pracą [243] poziom  $Leq(A)$  powinien być mniejszy niż 55 dB w dzień i 45 dB w nocy, aby uniknąć poważnych irytacji lub zaburzeń snu ten poziom jako wysoko prawdopodobny dla wybudzenia ze snu. Narażenie na hałas w nocy może zwiększyć ryzyko zawału mięśnia sercowego z uwagi na zwiększenie produkcji kortyzolu [72, 170]. Podniesienie jego wartości w organizmie może skutkować między innymi zmianą metabolizmu, przyspieszonym tętnem, czy też zwiększeniem lepkości krwi [188]. Stres wywołany oddziaływaniem hałasu może być również powodem braku koncentracji, agresją i zwiększoną liczbą wypadków w pracy [66, 152, 160]. Narażenie na uciążliwy hałas pacjentów szpitali może być skutkiem wydłużenia leczenia i pogorszenia stanu psychicznego pacjentów [32]. Hałas traktowany jest jako jeden z głównych czynników tak zwanego stresu miejskiego [9], który wykazuje tendencję wzrostową zajmując obecnie według Światowej Organizacji Zdrowia drugie miejsce wśród czynników stresogennych [72] i prowadzi do niekorzystnego gospodarowania zasobami miasta [154].

Ocena uciążliwości jest zależna również od wielu czynników niezwiązanych bezpośrednio ze zjawiskiem akustycznym. Wśród nich wymienia się percepcję danej osoby, porę dnia, czy też wykonywane czynności. W czasie koncentracji na przykład w pracy lub w czasie wypoczynku, hałas będzie bardziej uciążliwy, niż przy takim samym narażeniu podczas wykonywania innych czynności. Przy czym czas ekspozycji na hałas może zmniejszyć ocenę uciążliwości [156]. Narażenie na hałas związane jest również z niekorzystnym wpływem na układ sercowo–naczyniowy, który jest spowodowany brakiem zdolności współczulnego układu nerwowego do przyzwyczajania się do hałasu [189]. Badania [57] wykazały wpływ hałasu kolejowego i drogowego na ciśnienie krwi zarówno w nocy jak i w dzień. Według badań [7] przekroczenie hałasu środowiskowego powyżej 65 dB(A) zwiększa ryzyko wystąpienia nadciśnienia tętniczego.

Drgania pochodzenia komunikacyjnego propagują do pobliskich zabudowań, gdzie przenoszona się poprzez konstrukcję i oddziałują na organizm człowieka w sposób ogólny. Organizm odbiera te drgania biernie i dla niskich częstotliwości 1–80 Hz wrażliwość na nie jest niezależna od pozycji ciała [88, 264]. Ich skutki biologiczne to między innymi chorobowe zmiany w układzie kostnym, zespół bólowy kręgosłupa będący następstwem zmian chorobowych. Skutkom biologicznym towarzyszą tak zwane skutki funkcjonalne. Zalicza się do nich między innymi: zwiększenie czasu reakcji ruchowej i wzrokowej, nadmierne zmęczenie, bezsenność czy też osłabienie pamięci. Niekorzystne zmiany funkcjonalne prowadzą do obniżenia efektywności i jakości wykonywanej pracy, a czasami w ogóle ją uniemożliwiają [149].

Zakres częstotliwości uwzględniany w ocenie narażenia ludzi na drgania wynosi 1–80 Hz i jest związany z percepcją drganiową organizmu [216]. Wskazuje się charakterystyki korekcyjne filtrów  $W_b$  i  $W_k$  jako najbardziej zbliżone dla percepcji organizmu, uwzględniając ścieżkę propagacji drgań w budynkach [157]. Generowane częstotliwości drgań przy przejazdach pojazdów szynowych pokrywają się z częstotliwościami rezonansowymi narządów wewnętrznych, które zawierają się głównie w zakresie 2–18 Hz [88]. Oddziaływanie drganiowe w tym zakresie częstotliwości może zaburzyć ich funkcjonowanie, czy też w zależności od poziomu drgań – doprowadzić do krwotoków wewnętrznych [97]. Zgodnie z pracą [29], drgania mogą być odczuwalne przez człowieka przy wartości maksymalnej  $0,015 \text{ m/s}^2$  oraz przy wartości skutecznej wynoszącej  $0,01 \text{ m/s}^2$  uwzględniając dla tych wartości charakterystykę korekcyjną  $W_b$ . W pracy [81] wskazano, że prędkości drgań na poziomie  $5 \text{ mm/s}$  są dla człowieka wyraźnie zauważalne, a prędkości powyżej  $0,0015 \text{ mm/s}$  są określane jako silnie zauważalne [81]. Drgania wewnątrz budynków powodują również wtórne efekty

w postaci imisji akustycznej konstrukcji (ang. *ground-borne noise*) w zakresie częstotliwości 20–250 Hz, która ma charakter dudniący [264]. Ponadto występują również wtórne efekty tego zjawiska w postaci drgań elementów pomieszczeń takie jak okna, drzwi czy też meble.

Zgodnie z wynikami pracy [258], częściej obserwowany jest problem z nadmiernym wpływem drgań generowanych przez tramwaje przekazywanych na ludzi, niż na budynki. Jednak liczne przykłady badań eksperymentalnych drgań generowanych przez tramwaje w mieście wciąż wskazują przypadki przekraczania progu odczuwalności drgań przez ludzi, czy też poziomu zapewnienia wymaganego komfortu w pomieszczeniach [147, 258, 264]. Tego typu analizy dotyczące pojazdów metra w Polsce przedstawiono na przykład w pracach [116, 118].

Opis wytycznych obowiązujących w Polsce dotyczących oceny narażenia ludzi na drgania przedstawiono w pracy [148]. Analiza przyczyn i postaci uszkodzeń budynków powstałych na skutek drgań generowanych przez środki transportu opisano w pracy [254]. Mogą one powodować powierzchniowe i strukturalne uszkodzenia budynków poprzez:

- wprawienie konstrukcji budynku w ruch wywołując siły dynamiczne dodatkowo obciążające konstrukcję,
- wywołanie osiadania lub osuwania podłoża budynku.

Uszkodzenia powierzchniowe widoczne są w postaci na przykład rys, spękań wypraw malarskich i tynku, czy też ścian działowych. Uszkodzenia strukturalne prowadzą do zmniejszenia wytrzymałości elementów konstrukcyjnych i przyjmują postać na przykład rys, pęknięć fundamentów i ścian nośnych. Oddziaływanie drgań na człowieka może wywoływać strach przed uszkodzeniem domu i zaburzenia snu [124].

Badania [202] wskazały, że hałas związany z ruchem kolejowym i tramwajowym jest dla mieszkańców bardziej dokuczliwy w obszarach, gdzie występuje dodatkowe oddziaływanie drgań pochodzące z tych przejazdów. Wśród dokuczliwych czynników wymieniono problemy w komunikacji werbalnej zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz mieszkania. W obszarach bez oddziaływań drganiowych, dźwięki na poziomie  $L_{max}(A) > 80$  dB i  $Leq(A) > 55$  dB świadczyły o narażeniu 5% populacji na największy określony poziom dokuczliwości (raczej dokuczliwy lub bardzo dokuczliwy hałas).

Według badań [76] na ocenę poziomu uciążliwości hałasu ma wpływ liczba przejazdów pojazdów szynowych i generowane przez nie drgania przekazywane przez podłoże na budynki i ludzi w ich wnętrzu. Wykazano również ważną rolę usytuowania balkonu i okna sypialni na ocenę uciążliwości. Wiele opracowań potwierdza, że dokuczliwość hałasu generowanego



przez pojazdy szynowe jest większa przy jednoczesnym narażeniu na generowane przez nie drgania [76, 281]. Co więcej, badania dotyczące hałasu pochodzącego od turbin wiatrowych wskazują jego większą uciążliwość dla osób mających turbiny w zasięgu wzroku [210]. Wnioski z tych badań mogą być pomocne w analizach uciążliwości hałasu tramwajowego. Utworzenie bariery wzrokowej w postaci drzew i szaty roślinnej stanowiłoby dodatkowo naturalną barierę dla dźwięku na drodze jego propagacji, co wspólnie zminimalizowałoby odbierany hałas komunikacyjny przez mieszkańców [53].

W Polsce obowiązują normy oceny szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki PN-B-02170:2016 [215] oraz wpływu tych drgań na ludzi w budynkach PN-B-02171:2017 [216]. Wytyczne dla prowadzenia badań normatywnych w tym zakresie, szczególnie w obszarze sporządzania ekspertyz przedstawiono w pracy [255], a zestawienie najczęściej popełnianych przy tym błędów opisano w opracowaniu [115].

### **2.3. Podsumowanie rozdziału 2**

Według wielu źródeł tramwaje są środkiem transportu rekomendowanym do realizacji przewozów w miastach. Zapewniają dużą mobilność mieszkańców i są przy tym ekologicznym środkiem transportu biorąc pod uwagę bezpośrednią emisję cząstek stałych w powietrzu czy zużycie energii pierwotnej. Negatywne aspekty oddziaływania tramwajów w mieście dotyczą generowanych zjawisk wibroakustycznych, które wpływają na jakość życia w mieście.

Z analiz wynika, że główne źródło zjawisk wibroakustycznych tramwaju dotyczy pracy urządzeń trakcyjnych oraz zjawiska toczenia się kół po szynie. Generowane drgania i hałas w układzie pojazd szynowy–torowisko transmitowane są do środowiska zewnętrznego oddziałując negatywnie na konstrukcje budynków i ludzi w nich przebywających. Zjawiska te, podobnie jak cząstki stałe w powietrzu, traktowane są jako zanieczyszczenia środowiska, które muszą podlegać zapobieganiu zgodnie z obowiązującą Ustawą „Prawo ochrony środowiska” [59].

Hałas komunikacyjny generowany przez tramwaje rozpatrywany jest głównie w aspekcie wpływu pośredniego na układ nerwowy i psychikę. Traktowany jest jako uciążliwy, powodujący zakłócenia snu, wypoczynku, pracy oraz irytację i stres. Jego uciążliwość jest większa lub odbierana na równi z uciążliwością hałasu samochodowego. Szczególnie uciążliwe, będące powodem częstych skarg mieszkańców są dźwięki tonalne i impulsowe w eksploatacji tramwajów, związane między innymi z nieregularnościami powierzchni tocznych kół i szyn.

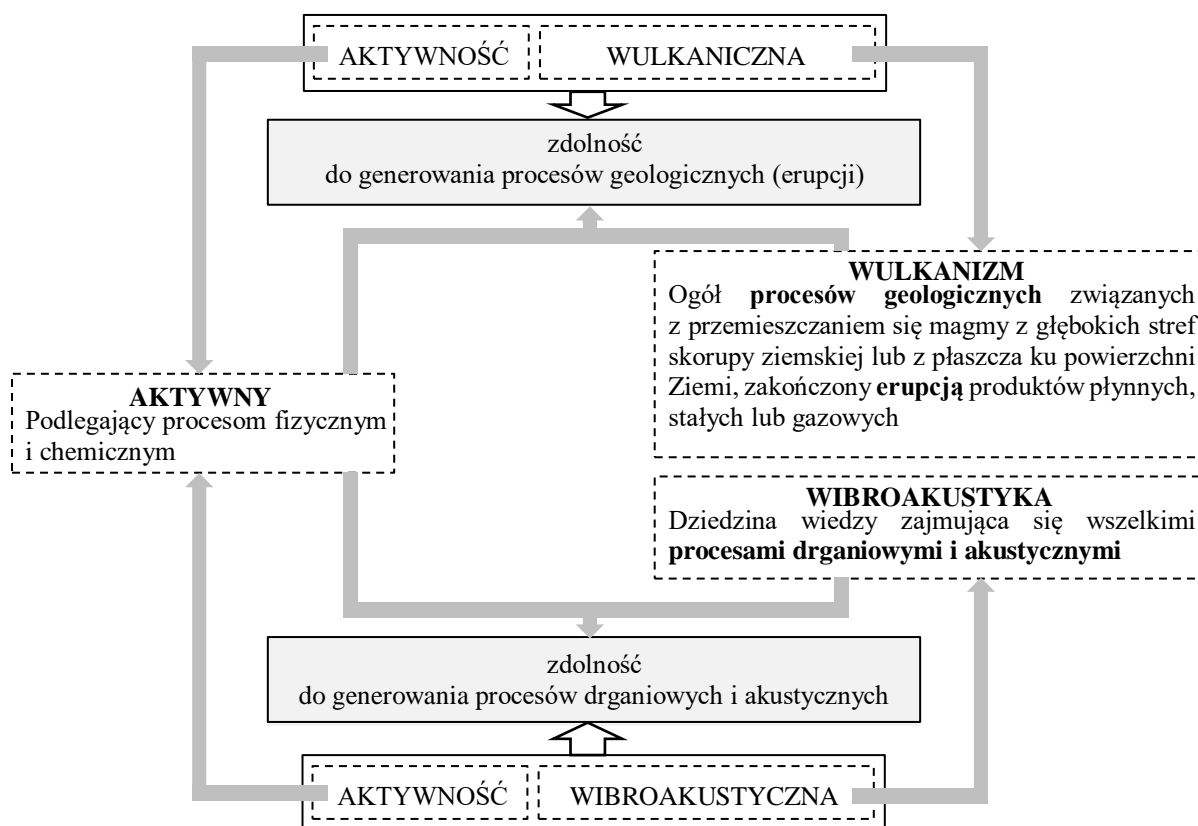
Zjawiska wibroakustyczne są czynnikiem różnicującym tramwaje pomiędzy typami, a nawet w obrębie poszczególnych egzemplarzy danego typu. Szczegółne rozróżnienie możliwe jest przy wykorzystaniu wskaźników psychoakustycznych dźwięku. W przypadku drgań generowanych przez tramwaje, główny problem dotyczy nadmiernego wpływu drgań przekazywanych na ludzi niż na budynki. Przy czym zaznacza się możliwą wrażliwość na te drgania konstrukcji zabytkowych.

Przedstawione analizy źródeł drgań i hałasu w tramwajach oraz ich wpływu na środowisko opisują je jako problem powszechny w miastach i wymagający nakładów pracy w celu ich kontroli i minimalizacji. Cel ten wpisuje się w realizację założeń idei zrównoważonego transportu, Białej Księgi Transportu i Ustawy „Prawo ochrony środowiska” [59]. Scharakteryzowane źródła drgań i dźwięku w eksploatacji tramwajów stanowią podstawę dla zagadnienia aktywności wibroakustycznej tramwaju.

### 3. AKTYWNOŚĆ WIBROAKUSTYCZNA TRAMWAJU

#### 3.1. Definicja pojęcia aktywności wibroakustycznej tramwaju

Pojęcie aktywności wibroakustycznej jest stosowane w technice w odniesieniu do drgań i hałasu. Jego definicja nie jest jednak ściśle określona przez normy i akty prawne. Stąd też, w pierwszej kolejności definicji pojęcia aktywności wibroakustycznej można upatrywać w znaczeniu poszczególnych członów wyrażenia, a w konsekwencji znaczenia wyrażenia. Pojęcie aktywny definiowane jest w Słowniku Języka Polskiego [219] między innymi jako podlegający intensywnym procesom fizycznym lub chemicznym. Ponadto z języka łacińskiego *activus* [78] oznacza czynny. W wielu dziedzinach wiedzy występują określenia związane z aktywnością. Wśród nich wyróżnić można geologię i aktywność w wulkanizmie. Zdefiniowana tam aktywności wulkaniczna rozumiana jest jako zdolność do erupcji, której efektem są produkty wulkaniczne (stałe, ciekłe i gazowe) oraz energia [77]. Na drodze rozumowania dedukcyjnego w odniesieniu do tej definicji można podjąć próbę zdefiniowania aktywności wibroakustyczną, co ideowo przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Ideowe przedstawienie definicji aktywności wibroakustycznej na bazie definicji pojęcia aktywności wulkanicznej (opracowanie własne na podstawie [35, 77, 211, 219, 285])

Aktywność w obu wyrażeniach oznacza podleganie procesom fizycznym i chemicznym. W odniesieniu do geologii i wulkanizmu są to procesy geologiczne, a w odniesieniu do wibroakustyki są to procesy drganiowe i akustyczne. Zatem aktywność wibroakustyczną można zdefiniować jako zdolność obiektów technicznych do generowania procesów drganiowych i akustycznych. Definicja ta znajduje również swoje odzwierciedlenie w opracowaniu [164], w którym autor wskazuje, że jest ona jedną z miar jakości realizowania zadań przekładni zębatych. Jakość ta definiowana jest między innymi przez niski poziom drgań i hałasu generowanego przez przekładnię. W pracy [35] wskazano, że aktywnością wibroakustyczną można sterować poprzez zmiany konstrukcyjne obiektów technicznych, co z kolei ściśle odwołuje się do zagadnień dynamiki strukturalnej maszyn. Autor opracowania [211] definiuje wprost aktywność wibroakustyczną jako proces generowania przez obiekt drgań i hałasu. Pojęcie aktywności wibroakustycznej wykorzystano również w pracy [285], gdzie definiowano główne zadania wibroakustyki. Wśród nich syntezę wibroakustyczną maszyn i obiektów, która ma prowadzić do ich optymalnej aktywności wibroakustycznej. W swojej definicji synteza ta zawiera: syntezę wielkości wibroakustycznych i syntezę maszyn i obiektów.

Pojęcie aktywności wibroakustycznej w nawiązaniu do tramwajów zastosowano między innymi w pracach [45, 46] i przedstawiono jako ogół zjawisk wibroakustycznych towarzyszących eksploatacji pojazdu w warunkach normalnej eksploatacji, które tworzą miarę globalnego oddziaływania wibroakustycznego pojazdu na środowisko. Definicja ta jest rozwinięciem aktywności wibroakustycznej w odniesieniu do tramwajów. W niniejszej pracy przyjęto, że aktywność wibroakustyczna tramwajów jest rozpatrywana z uwzględnieniem jej czterech składowych związanych z obszarami generowania zjawisk oraz z ich transmisją. Taki podział jest ściśle związany z przyjmowanymi obszarami analiz, na przykład w pracach [50, 262, 264], co również zilustrowano na rysunku 2.6. Przyjęte w niniejszej pracy składowe opisujące aktywność wibroakustyczną przedstawiono na rysunku 3.2.

Pierwsza składowa dotyczy sygnatury akustycznej (SA) rozumianej jako niepowtarzalny i charakterystyczny „ślad” dźwiękowy obiektu, umożliwiający jego identyfikację i lokalizację w przestrzeni. Reprezentowana jest przez zmiany ciśnienia akustycznego w obszarze transmisji. Druga składowa dotyczy obszaru emisji i związana jest z dynamicznym oddziaływaniem na styku koła z szyną (KS), które reprezentowane jest przez drgania szyny. Trzecia składowa obejmuje obszar emisji w przypadku dynamicznego oddziaływania tramwaju z infrastrukturą torową (TI), które reprezentowane są przez drgania podkładu jak i drgania szyny (zależność:  $KS \subset TI$ ).



Rys. 3.2. Składowe aktywności wibroakustycznej tramwaju

Dynamiczne oddziaływania na styku infrastruktury torowej z otoczeniem (IO) stanowią czwartą składową związaną z transmisją drgań i są reprezentowane przez generowane drgania parasejsmiczne. Zgodnie z przyjętym podziałem w pracy [136], składowe IO można przypisać do początku strefy oddziaływania, natomiast pozostałe składowe aktywności wibroakustycznej do transportowych źródeł oddziaływań.

Badania związane z aktywnością wibroakustyczną tramwajów w Polsce opisano między innymi w pracach [43, 44, 135–138, 194, 199, 200, 45, 47–52, 131]. W pracy [51] przedstawiono dyskusję na temat techniki i metody skoncentrowanej na ocenie jakości tramwaju pod względem efektów wibroakustycznych generowanych podczas normalnej eksploatacji. Zgodnie z wynikami prac [51, 200], aktywność wibroakustyczna jest czynnikiem rozróżniającym tramwaje pomiędzy typami, jak również pomiędzy poszczególnymi egzemplarzami danego typu. Wykazano, że przy zachowaniu tych samych parametrów jazdy i napełnienia pasażerami, różne egzemplarze tramwajów danego typu charakteryzują się odmiennym oddziaływaniem dynamicznym scharakteryzowanym przez zjawiska wibroakustyczne. Przyczyn takiego stanu rzeczy upatruje się w bieżącym stanie technicznym poszczególnych pojazdów. Ponadto w ocenie aktywności wibroakustycznej kluczowe jest poznanie struktury dynamicznej torowiska dla sprawdzenia warunków brzegowych obserwowanych zjawisk podczas przejazdów.

Obowiązujące w Polsce normy i akty prawne nie definiują i nie regulują aktywności wibroakustycznej w omawianym zakresie. Jedyne obowiązujące wymagania dla tramwajów w aspekcie wibroakustycznym dotyczą równoważnego poziomu dźwięku z korekcją częstotliwościową A, zarówno na postoju jak i podczas jazdy. Są one określone

w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury [61] oraz rozszerzone w osobnych dokumentach takich jak akty prawne [60, 102]. Zgodnie z podanymi aktami prawnymi, poziom dźwięku na zewnątrz dla poruszającego się tramwaju bez obciążenia przy stałej prędkości 50 km/h  $\pm$  2 km/h powinien wynosić 80 dB(A). Wskazane w Rozporządzeniu [61] poziomy dźwięku stanowią wymagania obligatoryjne dla tramwajów wprowadzanych do eksploatacji podczas procesu ich dopuszczenia.

Istnieje jednak możliwość zmniejszenia pożądanego poziomu dźwięku podczas formułowania wymagań dla tramwajów w Specyfikacjach Istotnych Warunków Zamówienia (SIWZ). W prowadzonych postępowaniach przetargowych na dostawę tramwajów w Polsce wyróżnić można dostawę piętnastu tramwajów do Olsztyna w 2014 r. W tym przypadku gmina Olsztyn w zapisach SIWZ nadała kryterium techniczne oceny ofert związane z poziomem dźwięku mierzonym zgodnie z Rozporządzeniem [60]. Tego typu zabieg umożliwia uzyskanie większej liczby punktów w ogólnej ocenie oferty i jednocześnie jest to pośredni sposób na wymuszenie na producentach opracowywania konstrukcji tramwajów pod względem możliwej aktywności wibroakustycznej. Zjawiska drganiowe generowane przez tramwaje nie są obecnie ujęte w obowiązujących aktach prawnych i nie były ujęte w aspekcie formułowanych dotąd SIWZ. Wyjątek stanowi pośrednie ujęcie tramwajów w normach wpływu drgań przekazywanych na budynek i ludzi w nich przebywających, czyli odpowiednio normy PN-B-02170:2016 [215] i PN-B-02171:2017 [216]. Są to jednak normy odnoszące się do pomiarów drgań w budynku, a nie w źródle czy w strefie transmisji.

Nie istnieją obecnie żadne regulacje prawne związane z oceną aktywności wibroakustycznej w czasie eksploatacji tramwaju. Przedsiębiorstwa komunikacyjne nie dysponują zatem narzędziami umożliwiającymi obiektywną ocenę zjawisk wibroakustycznych taboru. Ma to istotne znaczenie w przypadku skarg mieszkańców dotyczących uciążliwości wibroakustycznej poszczególnych tramwajów. W momencie wystąpienia takiej skargi przedsiębiorstwa nie mają możliwości sprawdzenia poziomu obecnego i przeszłego poziomu aktywności wibroakustycznej danego tramwaju. Co więcej, z uwagi na administracyjny obieg dokumentów reakcja na skargę może wystąpić po kilku dniach, w których stan techniczny tramwaju, a w konsekwencji jego aktywność wibroakustyczna może ulec zmianie. Dotyczy to szczególnie uszkodzeń w postaci płaskich miejsc na powierzchni toczonej kół. Te mogą już nie stanowić problemu z uwagi na zmianę ich wymiarów na skutek procesów zużycia.

W niniejszych rozważaniach pominięto aspekt map hałasu, których obowiązek sporządzania wynika z Dyrektywy 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego oraz Rady odnoszącej się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku [62]. Jest to związane

z wykorzystywanymi miarami  $L_{DWN}$  i  $L_N$ , które uśredniają zdarzenia akustyczne w porze dnia i nocy. Mapy hałasu są odzwierciedleniem ogólnego stanu narażenia na hałas w danym obszarze. Dostarczają danych do państwowego monitoringu środowiska i są podstawą aktualizacji programów ochrony przez hałasem. Mapy te nie różnicują jednak poszczególnych źródeł hałasu w aspekcie pojedynczych zdarzeń akustycznych. Nie jest zatem możliwe poznanie przy ich wykorzystaniu oceny funkcjonowania poszczególnych tramwajów pod względem wibroakustycznym. Ponadto mapy hałasu uwzględniają jedynie zjawiska akustyczne.

### 3.2. Systemy monitorujące zjawiska wibroakustyczne pojazdów szynowych

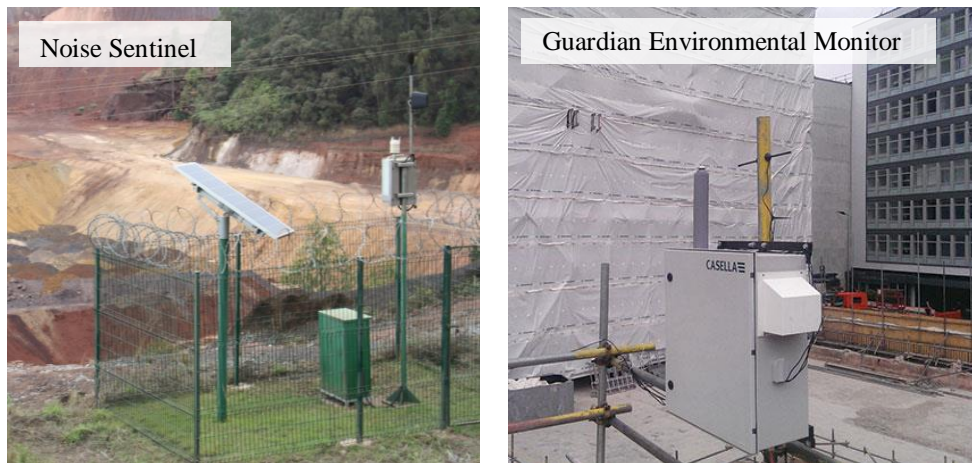
Systemy bazujące na kontroli zjawisk wibroakustycznych tramwajów nie są obecnie stosowane w Polsce. Wyjątek stanowią systemy do wykrywania płaskich miejsc na powierzchniach tocznych zestawów kołowych, oparte na ocenie zjawisk drganiowych. Spośród piętnastu przedsiębiorstw komunikacyjnych, jedynie cztery przedsiębiorstwa mają na wyposażeniu taki system, z czego dwa bazują na zjawiskach drganiowych (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Systemy wykrywania płaskich miejsc w Polsce

W użytkowaniu są dwa systemy WF firmy GRAW i Agulia firmy Revenga. Pierwszy z nich stosowany jest w Warszawie i Olsztynie. Natomiast w Poznaniu i Szczecinie wykorzystywane są systemy Aguila. System WF działa w oparciu o pomiary drgań szyny [85, 165], natomiast system Aguila działa w oparciu o pomiary sił przekazywanych na stopkę szyny [176]. W przypadku metod wykrywania płaskich miejsc w Polsce wyróżnić można dwie metody testowane eksperymentalnie w Poznaniu. Pierwsza z nich bazuje na pomiarze drgań szyny z wykorzystaniem transformaty Hilberta [196, 197], natomiast druga – na pomiarze dźwięku z wykorzystaniem krótkoczasowej transformaty Fouriera STFT (*ang. Short-Time Fourier Transform*) [132].

Konieczność monitorowania zanieczyszczeń w środowisku w wielu dziedzinach techniki była genezą powstania wielu systemów stacjonarnych monitorowania zjawisk wibroakustycznych. Wielu producentów oferuje systemy monitorowania hałasu, które umożliwiają długookresowe pomiary dźwięku wewnątrz budynków lub w środowisku zewnętrznym. Takimi systemami są na przykład Guardian Environmental Monitor firmy NoiseMeters [193] czy system Noise Sentinel firmy Brüel & Kjær (rys. 3.4) [20].

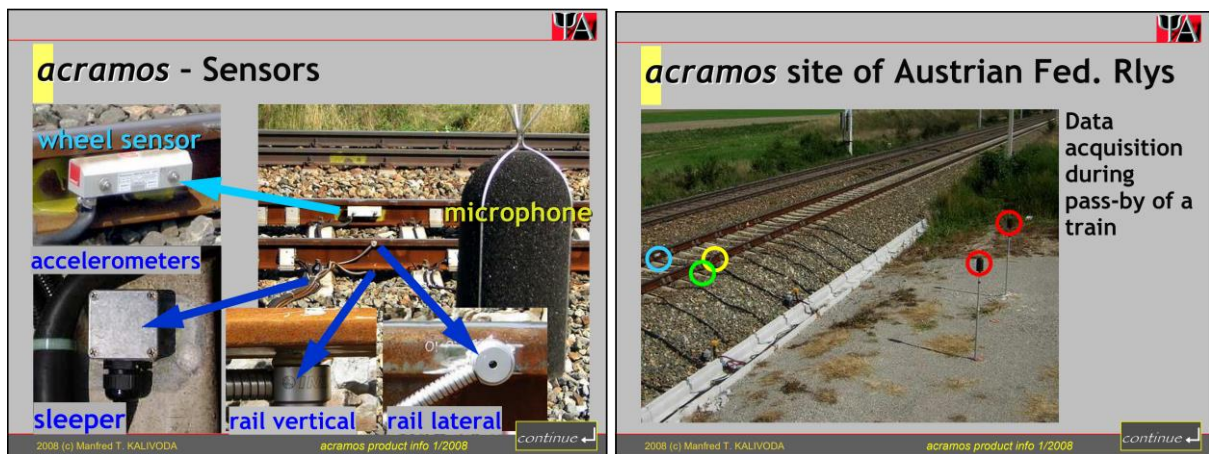


Rys. 3.4. Przykład zastosowania systemów okresowego monitoringu zjawisk wibroakustycznych [20, 193]

Systemy te wyposażone są w mikrofony, geofony i analizatory cząstek stałych powietrza. Ich główne zastosowanie dotyczy pomiarów wibroakustycznych w środowisku pracy człowieka takich jak lotniska, obszary prac wydobywczych i budowlanych. Producenci tych systemów wskazują również na możliwość monitorowania zjawisk wibroakustycznych generowanych przez przejeżdżające pojazdy przy drogach lub torach kolejowych i tramwajowych. Rozwiązania te odnoszą się jednak do monitorowania zjawisk sparametryzowanych miarami uśrednionymi w długim okresie w aspekcie przekroczeń dopuszczalnych wartości wynikających z norm.

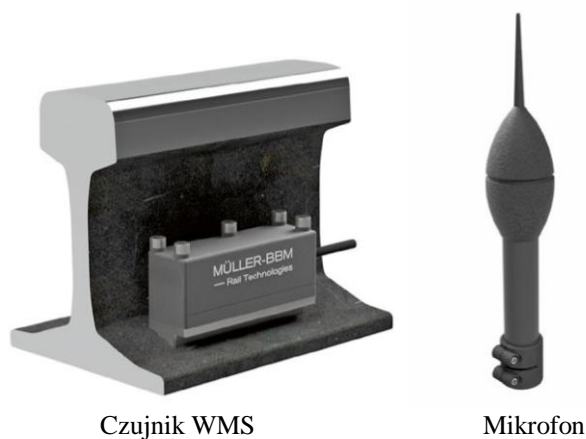
Usługi ściśle ukierunkowane na pomiary w środowisku transportu szynowego oferuje na przykład firma Psiacoustic wykorzystująca własny, automatyczny system pomiarowy Acramos (rys. 3.5). System ten wyposażony jest w czujniki do detekcji kół, przetworniki drgań na szynie i podkładach oraz mikrofony [223]. System Acramos umożliwia zdefiniowanie przez użytkownika kategorii pociągu i jej rozpoznanie z wykorzystaniem czujników detekcji kół. System z zarejestrowanych sygnałów oblicza wiele miar punktowych takich jak poziom równoważny dźwięku, wartość skuteczna drgań oraz miary jakościowe takie jak widma oktafowe wraz z ich dalszą analizą statystyczną.





Rys. 3.5. Przykład zastosowania systemu Acramos na linii kolejowej [223]

Firma Müller-BBM stworzyła system monitorowania kół WMS (ang. *Wheel Monitoring System*) przystosowany do automatycznego wykrywania poligonizacji na powierzchniach tocznych kół i płaskich miejsc. System wyposażony jest w czujnik detekcji koła i czujniki wykrywania płaskich miejsc WMS (rys. 3.6).



Rys. 3.6. Widok toru testowego systemu WMS wraz z czujnikiem WMS i mikrofonem (opracowane własne na podstawie [186, 187])

System WMS monitoruje stan kół tramwajów w przejeździe przy minimalnej prędkości 30 km/h lub 15 km/h. Ponadto wyposażony jest w czujniki RFID (ang. *Radio-Frequency Identification*) do identyfikacji pojazdu. Opcjonalnie system może być wyposażony w mikrofon do rejestracji dźwięku przejeżdżającego tramwaju by monitorować sygnaturę akustyczną. W przyszłości producent zamierza rozszerzyć funkcjonalność systemu do monitorowania stanu poszczególnych zespołów pojazdu takich jak silniki i wentylatory za pośrednictwem analizy dźwięku.

W pracy [136], przedstawiono założenia budowy ogólnego Systemu Oceny Transportowych Oddziaływań Dynamicznych (SOTOD) generowanych przez środki

transportu komunikacji miejskiej zarówno w odniesieniu do obiektów inżynierskich jak i ludzi w nich przebywających. System dokonuje oceny oddziaływań dynamicznych w oparciu o analizę drgań (od źródła do odbiornika) przy jednoczesnej ocenie skali oddziaływań w ujęciu badań eksperymentalnych i symulacyjnych. Ocena obejmuje cztery poziomy uszczegółowienia mikro, makro, lokalna i globalna, a sposób jej przedstawienia bazuje na czytelnych dla użytkowników wskaźnikach odniesionych do obowiązujących aktów prawnych.

Warto wyróżnić również system stosowany w warszawskim metrze do monitorowania wpływu drgań na budynki i na ludzi w budynkach [256, 257]. System bazuje na pomiarach drgań w wybranych budynkach z obserwacją trendów i analizą widmową zgodną z normami [215, 216].

### **3.3. Podsumowanie rozdziału 3**

Przedstawiona definicja aktywności wibroakustycznej uwzględnia w swojej postaci zagadnienia językowe, jak również dotychczasowe określenia wykorzystywane w pracach naukowych, szczególnie w odniesieniu do eksploatacji tramwajów. Powiązanie opracowanej definicji z obszarami analiz zjawisk wibroakustycznych w układzie pojazd szynowy–torowisko oraz w odniesieniu do ich oddziaływania na otoczenie pozwoliło na zdefiniowanie jej czterech składowych SA, KS, TI i IO.

Dotychczasowe badania związane z aktywnością wibroakustyczną tramwajów wykazują, że aktywność ta różnicuje tramwaje zarówno pomiędzy ich typami, jak również pomiędzy egzemplarzami danego typu. Wpływ na aktywność wibroakustyczną tramwaju ma głównie jego stan techniczny, który zmienia warunki brzegowe obserwacji zjawisk.

Wykazano, że obecnie obowiązujące regulacje prawne w Polsce nie uwzględniają kompleksowej kontroli zjawisk wibroakustycznych w procesie dopuszczenia do eksploatacji, a kontrola jakiegokolwiek z tych zjawisk jest pominięta w eksploatacji. W konsekwencji nie istnieją obecnie w Polsce kompleksowe systemy monitorujące te zjawiska w eksploatacji tramwajów.

Wiele z dostępnych rozwiązań monitorowania zjawisk wibroakustycznych w środowisku odnosi się do długookresowych pomiarów sparametryzowanych uśrednionymi miarami, których wartości są regulowane normami. Wyróżnić można system SOTOD i Acramos. System SOTOD jest zaawansowanym rozwiązaniem predykcji oddziaływań drganiowych pochodzenia komunikacyjnego, ale nie obejmuje w swoich założeniach analiz zjawisk akustycznych. Natomiast system Acramos kontroluje zjawiska wibroakustyczne pojazdów kolejowych w eksploatacji w układzie pojazd szynowy – torowisko. Nie ujmuje

jednak oceny drgań parasejsmicznych i nie opisuje zjawisk z wykorzystaniem jednego wskaźnika.

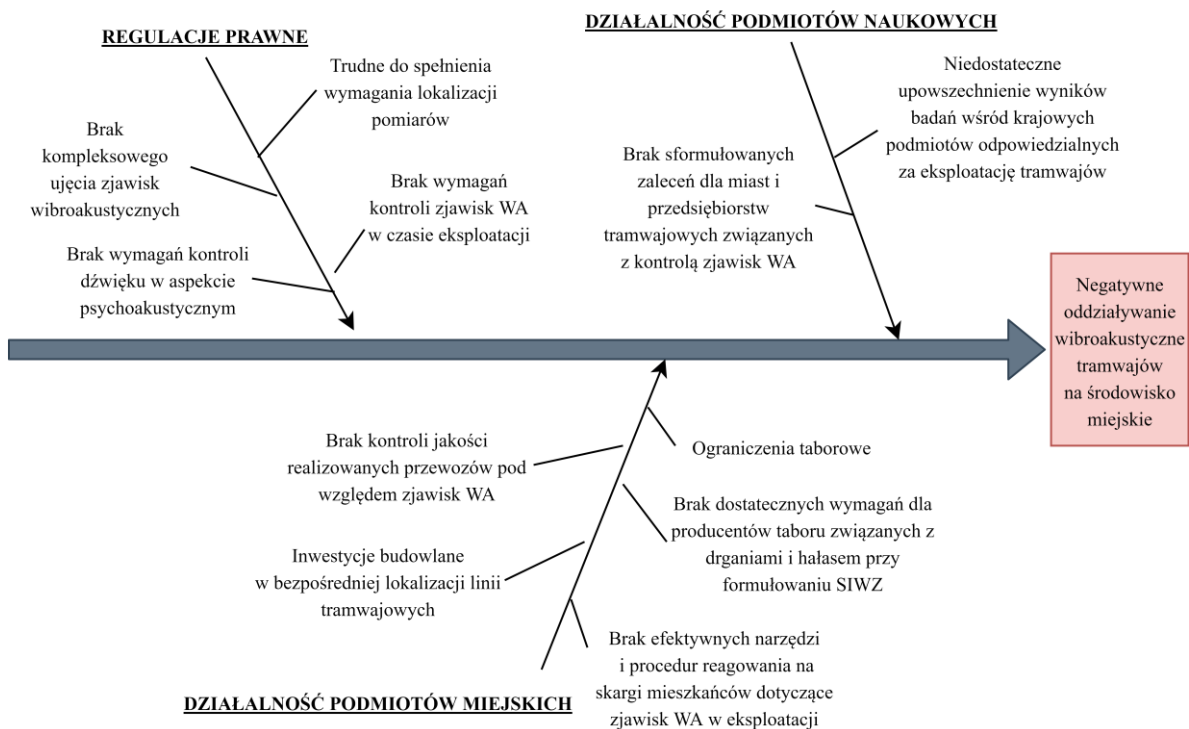
Obecny stan daje podstawy do opracowania metody oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju obejmującej ocenę zjawisk drganiowych i akustycznych w obszarze emisji i transmisji.

## 4. PROBLEM BADAWCZY

### 4.1. Sformułowanie problemu badawczego

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że w środowisku miejskim, w którym funkcjonuje miejski transport szynowy, tramwaje są jednym z głównych źródeł drgań i hałasu. Dowiedziono, że generowane przez nie drgania i hałas wpływają na ogólne samopoczucie mieszkańców wywołując irytację i stres, wpływają na trwałość obiektów inżynierskich w okolicy torowisk – szczególnie obiektów zabytkowych oraz pogarszają jakość życia w mieście. Przeprowadzone studium literatury obejmujące również dotychczasowe badania autora wskazują, że tramwaje mogą być zróżnicowane pod względem analizowanych zjawisk zarówno pomiędzy poszczególnymi typami, jak również pomiędzy egzemplarzami danego typu.

Przyczyny negatywnego oddziaływania zjawisk wibroakustycznych w środowisku zurbanizowanym są wieloaspektowe. Przyczyny w ujęciu mechanizmu generowania tych zjawisk omówiono w rozdziale 2. Ponadto, wykonano analizę możliwych przyczyn organizacyjnych wykorzystując założenia diagramu Ishikawy [80]. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Diagram Ishikawy – możliwe przyczyny organizacyjne negatywnego oddziaływania wibroakustycznego tramwajów na środowisko miejskie

Możliwe przyczyny podzielono na trzy główne obszary, czyli regulacja prawna, działalność podmiotów naukowych i działalność podmiotów miejskich. W regulacjach prawnych brakuje ujęcia holistycznego uwzględniającego zarówno zjawiska drganiowe i akustyczne. Jedynym aktem prawnym związanym z poruszaniem zagadnieniem jest Rozporządzenie [61], które reguluje poziom dźwięku w czasie jazdy i na postoju. Przy czym dotyczy to tylko aspektu dopuszczenia do eksploatacji. Wymagania lokalizacji punktu pomiarowego i typu torowiska są trudne do spełnienia w obszarach silnie zurbanizowanych. Analizy autora na przykładzie Poznania wskazują jeden odcinek na całej infrastrukturze tramwajowej, na którym możliwe jest przeprowadzenie tych pomiarów [183]. Nie istnieją przepisy uwzględniające kontrolę jakichkolwiek zjawisk wibroakustycznych po procesie dopuszczenia do eksploatacji. Obowiązujące przepisy nie wskazują również konieczności kontroli dźwięku w aspekcie psychoakustycznym.

Działalność podmiotów naukowych jest kolejną przyczyną stanu przede wszystkim przez brak wystosowania syntetycznych propozycji zaleceń dla miast i przedsiębiorstw tramwajowych związanych z kontrolą zjawisk wibroakustycznych. Wśród możliwych przyczyn jest również niedostateczne zabieganie o upowszechnianie wyników badań związanych z tematyką wśród potencjalnie najbardziej zainteresowanych podmiotów odpowiedzialnych za eksploatację tramwajów.

Ostatni obszar możliwych przyczyn to działalność podmiotów miejskich, które pomimo braku wymagań prawnych nie realizują wewnętrznej kontroli jakości przewozów pod względem zjawisk wibroakustycznych w celu podniesienia ogólnej jakości świadczonych usług. Ponadto formułowane dokumenty SIWZ nie zawierają dostatecznych wymagań dla producentów taboru odnosząc się jedynie do Rozporządzenia [61]. Podmioty te nie dysponują efektywnymi narzędziami i procedurami reagowania na skargi mieszkańców dotyczące zjawisk wibroakustycznych w eksploatacji tramwajów. Ograniczenia taborowe również stanowią możliwe przyczyny stanu, ponieważ możliwość wyłączenia z eksploatacji tramwajów z uwagi na zjawiska wibroakustyczne nie stanowi motywacji do przeciwdziałania negatywnym oddziaływaniom. Zagadnienie inwestycji budowlanych w bezpośredniej lokalizacji linii tramwajowych jest kolejną z przyczyn, jednak ich ograniczenie wpływa również na zahamowanie rozwoju miast.

Minimalizowanie negatywnego oddziaływania może nastąpić poprzez ocenę aktywności wibroakustycznej tramwajów i konsekwencje płynące z tych działań obserwowane zarówno w procesie obsługi jak i użytkowania. Te mogą obejmować wykrycie konieczności wykonania niezbędnych prac zmierzających do zminimalizowania aktywności

wibroakustycznej danego tramwaju włączenie z jego czasowym wycofaniem z eksploatacji. Przeprowadzenie klasyfikacji tramwajów pod względem aktywności wibroakustycznej umożliwi dodatkowo wsparcie procesu eksploatacji. W założeniu umożliwi ona między innymi przydzielanie najlepszych egzemplarzy do obsługi linii tramwajowych obejmujących ścisłą zabudowę miejską, jak i linie nocne. Bieżące monitorowanie zjawisk wibroakustycznych w eksploatacji tramwajów przyczyni się również do realizacji celów zrównoważonego rozwoju opisanego w Białej Księdze Transportowej [128] oraz realizacji zadań zapobiegania oddziaływaniom emisji szkodliwych wymienionych w Ustawie „Prawo ochrony środowiska” [59]. Przedstawione dotąd rozważania są genezą do podjęcia prac nad opracowaniem metody oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju.

#### **4.2. Cel i zakres pracy**

Dotychczasowe analizy wskazują, że monitorowanie zjawisk wibroakustycznych tramwaju w czasie przejazdu z pozycji toru jest możliwe i potrzebne w aspekcie minimalizowania negatywnego oddziaływania tramwajów na środowisko. W związku z tym sformułowano następujący cel pracy:

***Celem pracy jest opracowanie metody oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju w oparciu o pomiary przytorowe.***

Realizacja założonego celu pracy wymagała określenia i realizacji następujących głównych zadań badawczych:

- analiza literaturowa zagadnień zjawisk wibroakustycznych generowanych przez tramwaje i ich wpływu na otoczenie,
- selekcja tramwajów do badań na podstawie analizy konstrukcji tramwajów eksploatowanych w Polsce,
- opracowanie metodyki rejestracji sygnałów wibroakustycznych przy torze,
- dobór aparatury pomiarowej do akwizycji sygnałów wibroakustycznych,
- opracowanie metody diagnozowania przekładni trakcyjnej tramwaju w oparciu o zjawiska dźwiękowe,
- opracowanie metody detekcji płaskich miejsc na powierzchni tocznej kół tramwaju w oparciu o zjawiska drganiowe,
- opracowanie metody oceny zjawisk wibroakustycznych wraz z ich klasyfikacją,
- opracowanie metody oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju w oparciu o zrealizowane pomiary przytorowe.

Ze względu na złożony charakter badań, zadania badawcze podzielono na zadania szczegółowe. Ich podział i zakres przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Szczegółowe zadania badawcze i ich zakres

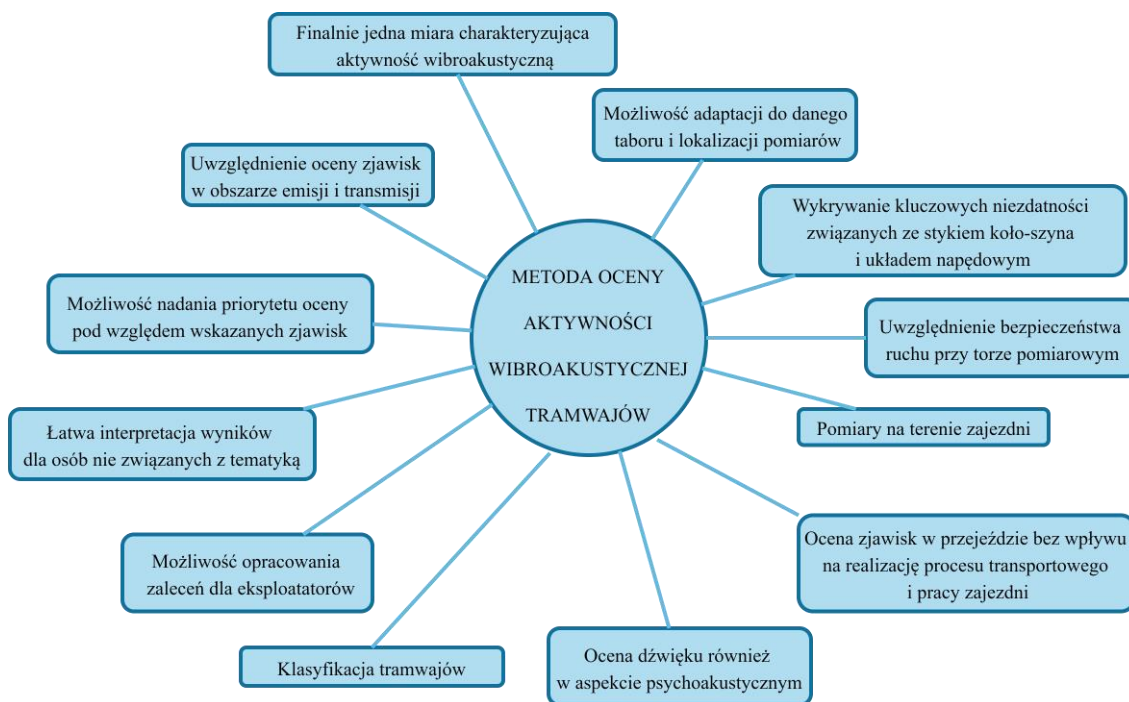
Lp.	Zadanie badawcze	Zakres szczegółowy zadania badawczego
1.	Analiza literatury zagadnień zjawisk wibroakustycznych w eksploatacji tramwajów	<ul style="list-style-type: none"> <li>– koncepcja zrównoważonego transportu ze szczególnym uwzględnieniem tramwajów,</li> <li>– zasadność, rozwój i problematyka funkcjonowania tramwajów w obszarach miejskich,</li> <li>– źródła drgań i hałasu generowane przez tramwaje,</li> <li>– wpływ drgań i hałasu pochodzenia komunikacyjnego na środowisko z uwzględnieniem przykładów dotyczących tramwajów,</li> <li>– systemy monitorujące zjawiska wibroakustyczne pojazdów szynowych w przejeździe,</li> <li>– akty prawne i normy związane ze zjawiskami wibroakustycznymi pochodzącymi od tramwajów,</li> <li>– cyfrowe przetwarzanie sygnałów DSP (ang. <i>Digital Signal Processing</i>),</li> <li>– akty prawne i normy związane z możliwym obszarem zabudowy wokół torowiska,</li> <li>– zagadnienia analizy dynamiki strukturalnej obiektów technicznych z wykorzystaniem testu impulsowego,</li> <li>– diagnostyka wibroakustyczna obiektów technicznych,</li> <li>– wskaźniki psychoakustyczne dźwięku,</li> <li>– uczenie maszynowe z wykorzystaniem drzew decyzyjnych.</li> </ul>
2.	Analiza literatury zagadnień techniki pomiarowej	<ul style="list-style-type: none"> <li>– budowa i zasada działania aparatury pomiarowej, w tym modułów akwizycji danych i przetworników,</li> <li>– technika pomiarowa związana z mocowaniem przetworników,</li> <li>– metodyka przeprowadzania pomiarów wibroakustycznych w odniesieniu do zjawisk pochodzących od pojazdów szynowych,</li> <li>– wzorcowanie przetworników i bieżąca kalibracja toru pomiarowego.</li> </ul>
3.	Wybór obiektów do badań	<ul style="list-style-type: none"> <li>– analiza konstrukcji tramwajów eksploatowanych w Polsce,</li> <li>– zdefiniowanie warunków selekcji tramwajów do badań,</li> <li>– analiza układu torowego na zajezdni tramwajowej Franowo w Poznaniu,</li> <li>– zdefiniowanie warunków selekcji odcinka toru do badań,</li> <li>– selekcja obiektów do badań.</li> </ul>
4.	Rejestracja sygnałów wibroakustycznych	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wybór lokalizacji punktów pomiarowych zjawisk wibroakustycznych przy źródle i na drodze propagacji,</li> <li>– opracowanie i budowa podstaw do przetworników drgań parasejsmicznych,</li> <li>– określenie częstotliwości próbkowania modułu akwizycji sygnałów,</li> <li>– ustalenie selekcji czasowej sygnałów,</li> <li>– kalibracja toru pomiarowego,</li> <li>– analizy podatności dynamicznej torowiska,</li> <li>– rejestracja sygnałów wibroakustycznych podczas zjazdów tramwajów.</li> </ul>
5.	Diagnozowanie stanu przekładni trakcyjnej w oparciu o zjawiska akustyczne	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wybór punktów pomiarowych uwzględnionych w diagnozowaniu stanu,</li> <li>– analiza kinematyczna przekładni trakcyjnej,</li> <li>– obliczenie częstotliwości zazębienia poszczególnych par kół zębatach,</li> <li>– selekcja tramwajów o znanym stanie technicznym przekładni trakcyjnej z uwzględnieniem wybranych postaci uszkodzeń,</li> <li>– selekcja parametru diagnostycznego,</li> <li>– obliczenie wartości dopuszczalnych i granicznych parametru diagnostycznego,</li> <li>– detekcja niezdatności w zarejestrowanych przejazdach.</li> </ul>
6.	Detekcja płaskich miejsc na kołach tramwaju w oparciu o drgania szyny	<ul style="list-style-type: none"> <li>– adaptacja metody wykrywania płaskich miejsc z dotychczasowych prac autora,</li> <li>– wyznaczenie parametru diagnostycznego,</li> <li>– obliczenie wartości dopuszczalnej i granicznej parametru diagnostycznego,</li> <li>– detekcja niezdatności w zarejestrowanych przejazdach.</li> </ul>

Lp.	Zadanie badawcze	Zakres szczegółowy zadania badawczego
7.	Analiza sygnałów wibroakustycznych z przejazdów	<ul style="list-style-type: none"> <li>– obliczenie i analiza miar punktowych zjawisk wibroakustycznych w tym wskaźników psychoakustycznych dźwięku,</li> <li>– analizy dopasowania danych do rozkładów statystycznych,</li> <li>– analizy zależności uzyskanych danych od prędkości przejazdu,</li> <li>– analizy regresji liniowej i nieliniowej poszczególnej miary,</li> <li>– wyznaczenie granic przedziałów dla klas danej miary punktowej,</li> <li>– klasyfikacja poszczególnej miary.</li> </ul>
8.	Ocena aktywności wibroakustycznej tramwaju	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zdefiniowanie wskaźnika aktywności wibroakustycznej tramwaju w oparciu o założenia analizy wielokryterialnej,</li> <li>– wyznaczenie przedziałów dla klasyfikacji miar składowych wskaźnika aktywności wibroakustycznej,</li> <li>– zdefiniowanie wag dla klas miar składowych przy obliczaniu wskaźnika aktywności wibroakustycznej,</li> <li>– klasyfikacja wskaźnika aktywności wibroakustycznej,</li> <li>– zdefiniowanie priorytetów oceny wskaźnika aktywności wibroakustycznej według składowych w oparciu o modyfikacje wag klas,</li> <li>– klasyfikacja wskaźnika aktywności wibroakustycznej tramwaju z założonymi priorytetami oceny,</li> <li>– zastosowanie drzew decyzyjnych w ocenie wskaźnika aktywności wibroakustycznej tramwaju wraz z analizą rankingu istotności poszczególnych miar z analizą skuteczności predykcji.</li> </ul>
9.	Metodyka oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju	<ul style="list-style-type: none"> <li>– opracowanie schematu funkcjonowania dla badań pilotażowych z wykorzystaniem metody oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju dla docelowego użytkownika,</li> <li>– wskazanie miejsca dla oceny aktywności wibroakustycznej w cyklu obsługowym tramwajów,</li> <li>– opracowanie schematu funkcjonalnego systemu oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju wraz ze szczegółowymi algorytmami w oparciu o zaproponowaną metodykę badań,</li> <li>– propozycja interfejsu systemu.</li> </ul>



## 5. ZAŁOŻENIA METODY OCENY AKTYWNOŚCI WIBROAKUSTYCZNEJ TRAMWAJÓW

Prace badawcze rozpoczęto od sformułowania najistotniejszych założeń dla metodyki oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju. Założenia te przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Główne założenia metody oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju

Zgodnie z przedstawionymi założeniami, ocena aktywności wibroakustycznej następuje w normalnych warunkach eksploatacji w ściśle określonej, stałej lokalizacji na terenie zajezdni. Założono, że rejestracja sygnałów odbywa się przy torze pomiarowym z zapewnieniem bezpieczeństwa ruchu i bez wpływu na realizowany proces transportowy oraz prace zajezdni. Scharakteryzowanie poszczególnego tramwaju uwzględnia miary punktowe drgań i dźwięku, w tym również wskaźniki psychoakustyczne, które szczególnie kwantyfikują akustyczne efekty fizyczne zachodzące w uchu [64].

Do każdej zdefiniowanej składowej aktywności wibroakustycznej obejmujących obszar emisji i transmisji (zgodnie z rys. 4.2) założono przypisanie poszczególnych miar je parametryzujące. Stanowią one zbiór miar składowych, które są klasyfikowane, a następnie w postaci klas stanowią dane wejściowe do obliczeń wskaźnika aktywności wibroakustycznej (AW). Opieranie się na klasach umożliwi łatwą interpretację wyników dla osób niezwiązanych z poruszaną tematyką. Przyjęto, że analizowane miary punktowe drgań i dźwięku oraz wskaźnik AW zostaną podzielone na pięć klas. Pierwsza klasa o oznaczeniu K1 oznacza klasę

najlepszą, a klasa piąta o oznaczeniu K5 oznacza klasę najgorszą pod względem aktywności wibroakustycznej. Opis klas został przedstawiony w tabeli 5.1.

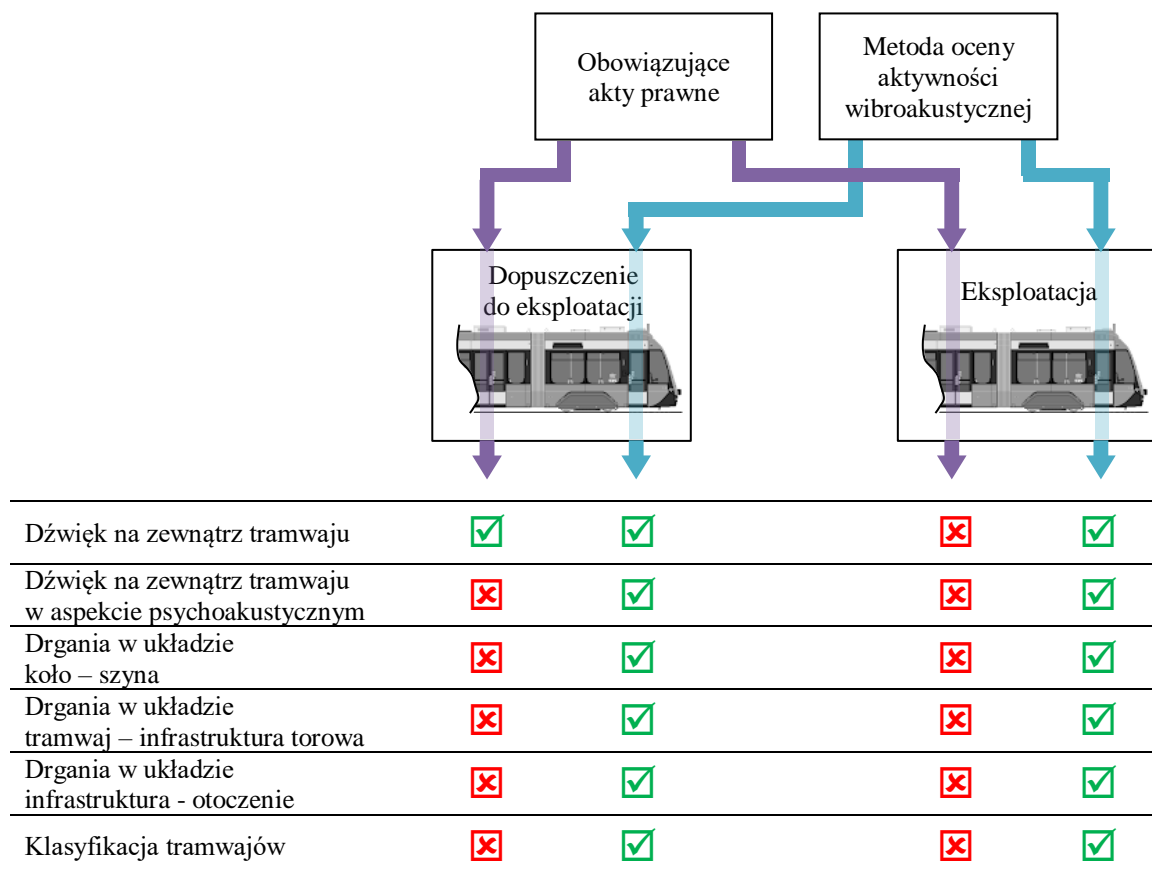
Tabela 5.1. Interpretacja klas miar punktowych zjawisk wibroakustycznych

Oznaczenie	Nazwa klasy	Opis
K5	Klasa graniczna	Zbiór najbardziej niekorzystnych wyników danej miary (reprezentacja zbioru wartości granicznych danej miary)
K4	Klasa dopuszczalna	Zbiór dopuszczalnych wyników danej miary (reprezentacja zbioru wartości dopuszczalnych danej miary)
K3	Klasa umiarkowana	Zbiór umiarkowanych wyników danej miary
K2	Klasa dobra	Zbiór dobrych wyników danej miary
K1	Klasa bardzo dobra	Zbiór najbardziej korzystnych wyników danej miary

Założono również możliwość nadania priorytetu dla oceny aktywności wibroakustycznej pod względem przyjętego podziału składowych aktywności wibroakustycznej.

Opracowana metodyka oceny aktywności wibroakustycznej tramwajów powinna być możliwa do zastosowania w różnych typach tramwajów eksploatowanych w przedsiębiorstwach tramwajowych. W tym celu przyjęto, że wskaźnik aktywności wibroakustycznej AW powinien być wynikiem sparometryzowania i klasyfikacji zjawisk wibroakustycznych tramwajów w obrębie zbiorowości danego typu. Przy czym nie założono opracowania wartości granicznych poszczególnych miar drgań i dźwięku, obligatoryjnych dla wszystkich tramwajów w Polsce. Spójność powinna być zachowana w sposobie obliczania miar i klasyfikacji uwzględniającej aspekty statystyczne poszczególnych miar w zbiorowości tramwajów danego typu. W ten sposób możliwe będzie uwzględnienie cech danego typu tramwaju, a w konsekwencji ocenę aktywności wibroakustycznej dla dowolnego taboru. Przedstawione założenia są wynikiem dyskusji autora z gremium Specjalistów Techniki Tramwajowej powołanej w Krajowym Instytucie Polityki Przestrzennej i Mieszkalnictwa oraz z przedstawicielami Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej.

Założone różnice pomiędzy stosowaniem obecnych regulacji prawnych, a stosowaniem opracowywanej metodyki w celu kontrolowania zjawisk wibroakustycznych przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Różnice w kontrolowaniu zjawisk wibroakustycznych wynikające z obowiązujących aktów prawnych a koncepcją wykorzystania metody oceny aktywności wibroakustycznej

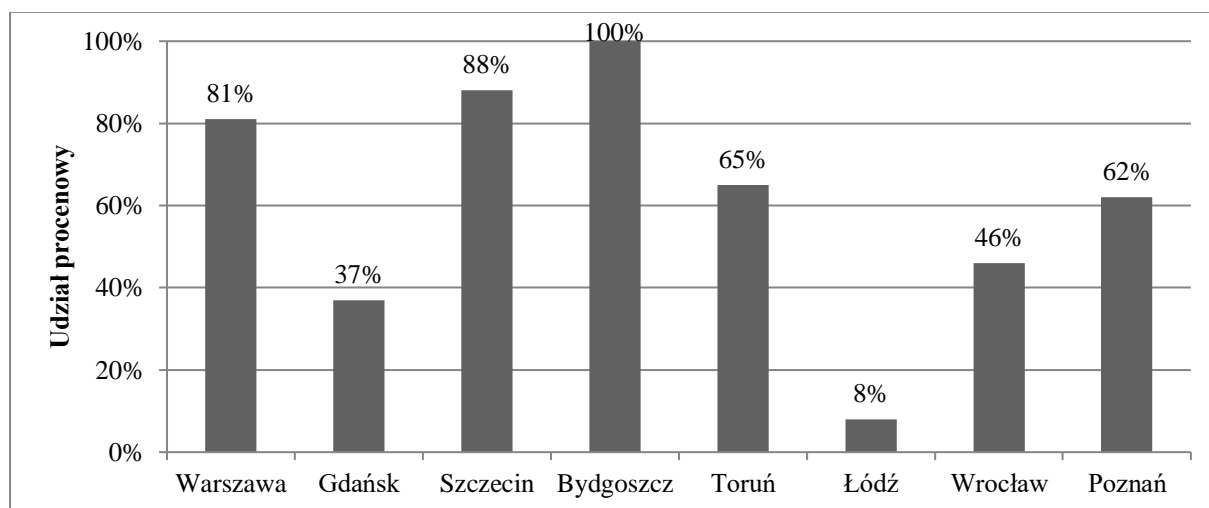
Założono, że opracowywana metoda uwzględni aspekt diagnostyczny związany z wykrywaniem niezdatności, których wystąpienie w czasie eksploatacji prowadzi do nadmiernych zjawisk wibroakustycznych w otoczeniu tramwaju. Do niezdatności tych zaliczono uszkodzenie przekładni trakcyjnej oraz wystąpienie płaskich miejsc na powierzchni toczonej kół. Niezdatności te określono na potrzeby niniejszej pracy jako stany awaryjne.

Powyższe założenia uwzględniono w opracowywaniu metodyki badań jak i analizie uzyskanego materiału badawczego, co przedstawiono w dalszej części pracy.

## 6. ANALIZA KONSTRUKCJI TRAMWAJÓW EKSPLOATOWANYCH W POLSCE

Wybór typu tramwaju do badań poprzedzono analizą obecnie eksploatowanych konstrukcji tramwajów w Polsce. Efektem analizy jest wskazanie konstrukcji tramwaju, w obrębie której będzie wyselekcjonowany typ tramwaju do badań. Założenie to pozwoli na przeprowadzenie badań na tramwajach o konstrukcji powszechnie występującej w Polsce.

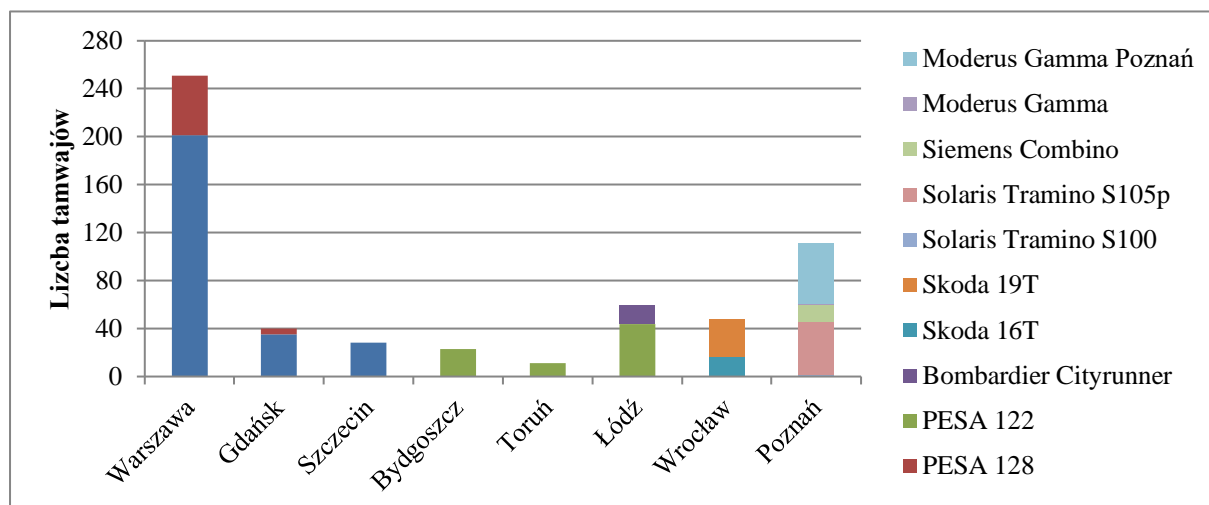
Jak wynika z danych statystycznych, największa liczba nowoczesnych tramwajów częściowo lub całkowicie niskopodłogowych dotyczy tramwajów pięcioczlonych, których konstrukcja oparta jest na trzech wózkach jezdnych. Udział tych tramwajów w ogólnej liczbie taboru częściowo i całkowicie niskopodłogowego w danym mieście w Polsce przedstawiono na rysunku 6.1.



Rys. 6.1. Udział procentowy pięcioczlonych tramwajów opartych na trzech wózkach jezdnych w ogólnej liczbie tramwajów w danym mieście – stan na lipiec 2020  
(opracowanie własne na podstawie: [82, 83, 267, 278, 98, 99, 111, 114, 134, 177, 212, 253])

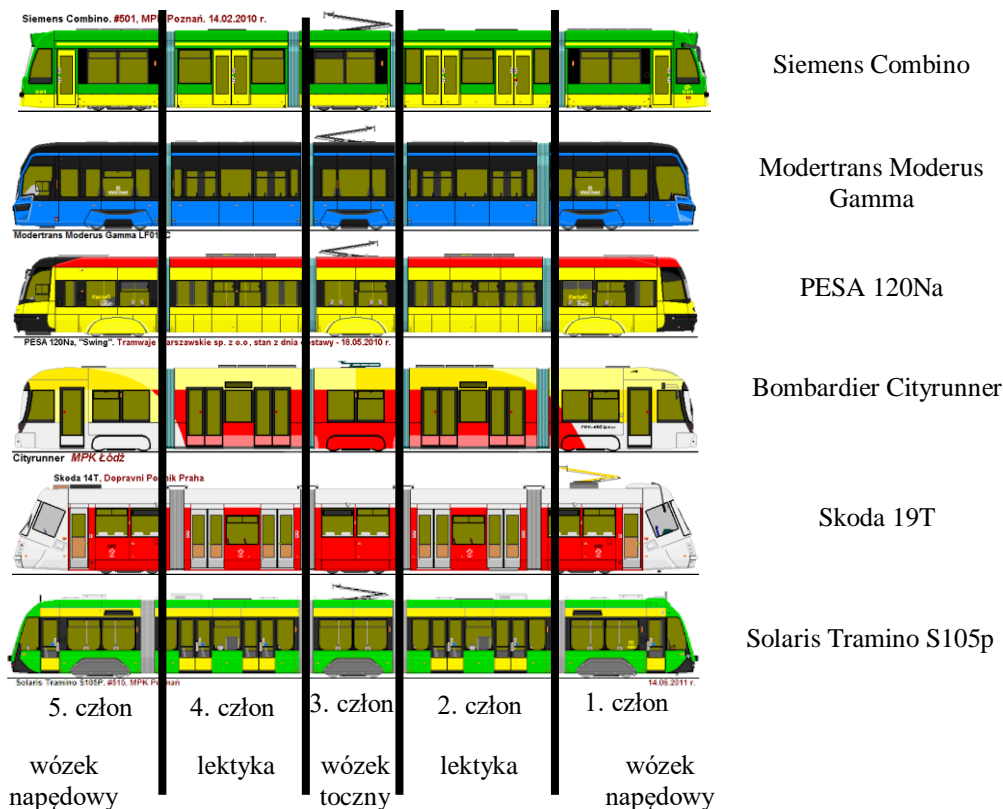
Z danych przedstawionych na rysunku 6.1 wynika, że w Bydgoszczy wśród taboru częściowo i całkowicie niskopodłogowego eksploatowane są tylko tramwaje pięcioczlone oparte na trzech wózkach jezdnych. W Szczecinie i Warszawie stanowią one ponad 80% całego taboru niskopodłogowego. W Toruniu jest to udział na poziomie 65%, we Wrocławiu około 45%, a Poznaniu około 62%. W Gdańsku udział tych tramwajów wśród taboru częściowo i całkowicie niskopodłogowego to 37%, a w Łodzi 8%. Z przedstawionej analizy wynika, że opisana konstrukcja tramwaju jest w Polsce powszechnie eksploatowana jako tramwaj niskopodłogowy, co wpisuje się w obecne preferencje podmiotów zamawiających tabor w Polsce ukierunkowane na dostawy tramwajów z częściową lub całkowicie niską podłogą (na przykład [268, 271, 272]).

Obecnie eksploatowane w Polsce typy tramwajów o zbliżonej konstrukcji w poszczególnych miastach przedstawiono na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Statystyka pięciocłonowych typów tramwajów opartych na trzech wózkach jezdnych w Polsce – stan na 07.2020 r. (opracowanie własne na podstawie: [82, 83, 267, 278, 98, 99, 111, 114, 134, 177, 212, 253])

Zgodnie z przedstawionymi danymi na rysunku 6.2, największa liczba tramwajów pięciocłonowych opartych na trzech wózkach jezdnych eksploatowana jest w Warszawie w liczbie dwustu pięćdziesięciu jeden egzemplarzy typu PESA 120 i PESA 128. Tramwaje te eksploatowane są również w Gdańsku łącznie w liczbie czterdziestu egzemplarzy. W Poznaniu najwięcej tramwajów tej konstrukcji dotyczy tramwaju Solaris Tramino S105p (czterdzieści pięć egzemplarzy). Poza nimi w flocie pojazdów znajdują się również tramwaje typu Moderus Gamma (osiem egzemplarzy) i Siemens Combino (czternaście egzemplarzy). We Wrocławiu eksploatowanych jest natomiast ogółem czterdzieści osiem egzemplarzy tego typu konstrukcji tramwajów. Wśród nich jest siedemnaście tramwajów Skoda 16T i trzydzieści jeden egzemplarzy tramwaju Skoda 19T. Operator taboru w Łodzi ma do dyspozycji ogółem pięćdziesiąt dziewięć tramwajów tej konstrukcji. Wśród nich jest tramwaj typu PESA 122 w liczbie czterdziestu czterech egzemplarzy oraz tramwaj typu Bombardier Cityrunner w liczbie piętnastu egzemplarzy. W pozostałych wymienionych miastach, czyli Toruń i Bydgoszcz eksploatowane są tramwaje typu PESA 122, odpowiednio w liczbie jedenastu i dwudziestu trzech egzemplarzy. Wizualizacje przykładowych tramwajów pięciocłonowych przedstawiono na rysunku 6.3.



Rys. 6.3. Wygląd przykładowych pięcioczłonowych tramwajów (opracowanie własne na podstawie: [30, 106])

Również wielu operatorów na świecie ma tramwaje pięcioczłonowe oparte na trzech wózkach w swojej flocie takich producentów jak AnsaldoBreda, Alstom, czy też Bombardier Transportation. Przykładem może być tramwaj Flexity 2 firmy Bombardier Transportation, który eksploatowany jest na świecie w łącznej liczbie pięćdziesięciu jeden egzemplarzy w Blackpool (Wielka Brytania) [16], Antwerpii (Belgia) [225], Suzhou (Chiny) [17] i Bazylei (Szwajcaria) [173]. Dużą liczbę tramwajów tej konstrukcji wyprodukowała również firma Alstom – tramwaje pod nazwą Citadis 302. Obecnie na świecie eksploatowanych jest około osiemset dwadzieścia siedem egzemplarzy tego tramwaju, z czego najliczniej w Rotterdamie (Holandia) – sto trzynaście egzemplarzy [260].

Przedstawiona analiza konstrukcji wskazuje tramwaje pięcioczłonowe, oparte na trzech wózkach jezdnych jako jedne z najliczniej występujących w polskich miastach. Przeprowadzenie badań aktywności wibroakustycznej tramwajów wskazanej konstrukcji staje się zasadne z uwagi na możliwość powiązania metodyki badań w aspekcie obiektu z innymi, zbliżonymi konstrukcjami.

## 7. METODYKA BADAŃ

### 7.1. Obiekt badań

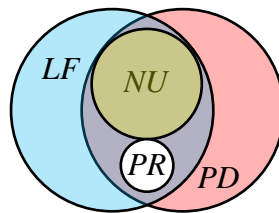
Spośród tramwajów Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Poznaniu wybrano do badań tramwaj typu Solaris Tramino S105p o powszechnie występującej w Polsce konstrukcji, czyli pięć członów opartych na trzech wózkach jezdnych. Wybrany typ tramwajów spełniał poniższy warunek:

$$ob \in (NU \subset (LF \cap PD \setminus PR)) \Leftrightarrow ob \in LF \wedge ob \in PU \wedge ob \notin PR \quad (7.1)$$

gdzie:

- ob* – tramwaje wyselekcjonowane do badań,
- LF* – tramwaje częściowo lub całkowicie niskopodłogowe,
- PD* – tramwaje wyprodukowane po 2. marca 2011 r.,
- NU* – największa liczba tramwajów jednego typu we flocie operatora,
- PR* – tramwaje prototypowe.

Warunek ten zilustrowano również na diagramie Venna (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Diagram Venna ilustrujący warunek wyboru typu tramwaju do badań

Wymagania związane z datą produkcji dotyczą wyselekcjonowania tramwajów objętych większym ograniczeniem ekspozycyjnego poziomu dźwięku w czasie przejazdu zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 2 marca 2011 r. w sprawie warunków technicznych tramwajów i trolejbusów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia [61].

Solaris Tramino S105p został wyprodukowany przez firmę Solaris Bus & Coach dla Miasta Poznań. Widok wybranego typu tramwaju przedstawiono na rysunku 7.2. Podstawowe dane techniczne tramwaju zamieszczono w tabeli 7.1.



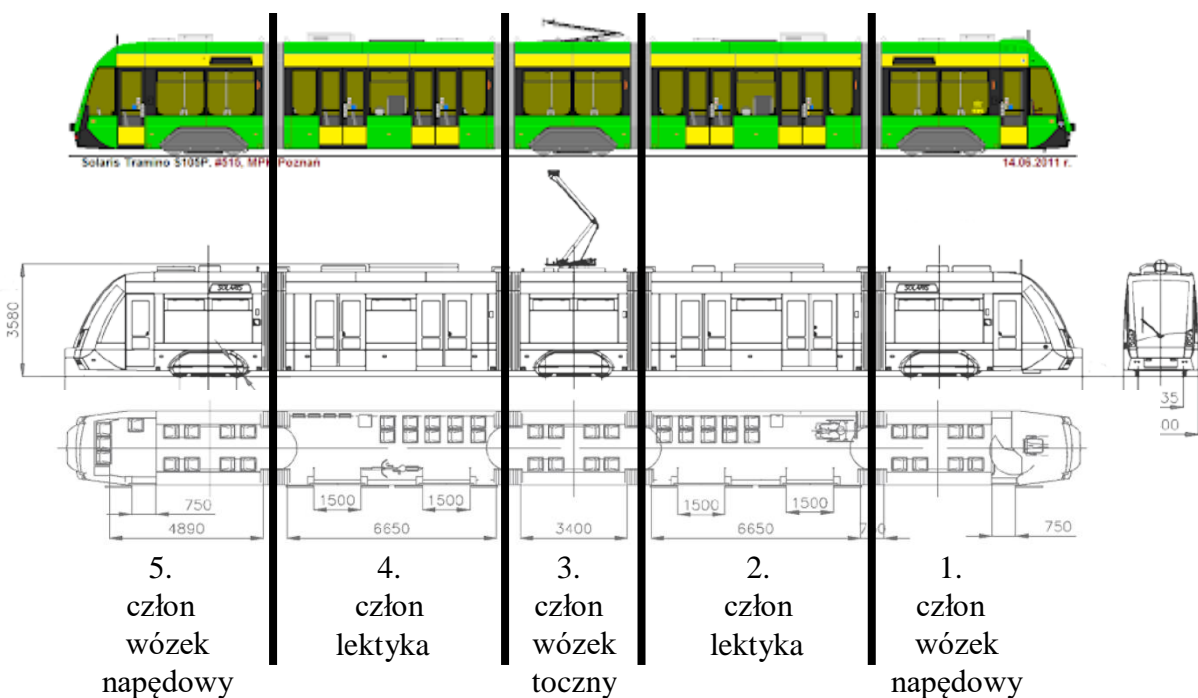
Rys. 7.2. Widok tramwaju Solaris Tramino S105p [107]

Tabela 7.1. Podstawowe dane techniczne tramwaju Solaris Tramino S105p [178]

Długość całkowita	32,03 m
Szerokość podła	2400 mm
Masa własna	42,5 t
Wysokość przy złożonym pantografie	3760 mm
Liczba członów	5
Liczba wózków	3
Wózki napędowe	2
Przystosowanie do rozstawu szyn	1435 mm
Średnica kół (nowe/zużyte)	620/540 mm
Minimalny promień łuku	18 m
Wysokość podłogi (niska podłoga/wysoka podłoga)	350/480 mm
Procentowy udział obszaru niskopodłogowego	100%
Napięcie zasilające	600 V DC
Liczba i moc silników trakcyjnych	4x105 kW
Silniki trakcyjne	asynchroniczne
Maksymalna prędkość	70 km/h
Liczba miejsc siedzących + siedzenia rozkładane	48 + 5
Liczba miejsc dla pasażerów (4 pas. /m <sup>2</sup> )	197

Tramwaj ten jest eksploatowany w MPK Poznań od 2011 roku. Jest przystosowany do ruchu jednokierunkowego z maksymalną prędkością 70 km/h. Schemat tramwaju przedstawiono na rysunku 7.3.





Rys. 7.3. Schemat tramwaju Solaris Tramino S105p (opracowanie własne na podstawie [106, 244])

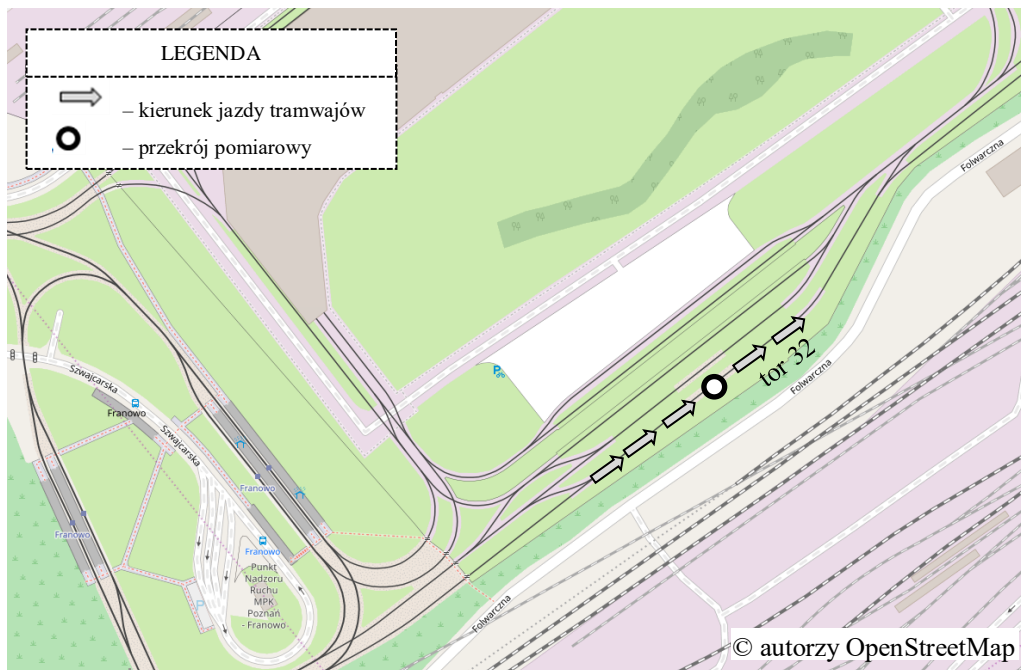
Jest to tramwaj przegubowy i całkowicie niskopodłogowy składający się z pięciu członów. Dwa człony (lektyki) opierają się na sąsiednich członach opartych na trzech wózkach w układzie osi Bo'2'Bo'.

## 7.2. Lokalizacja badań

Wybrany tramwaj Solaris Tramino S105p jest obsługiwany na terenie zajezdni tramwajowej Franowo. Pomiary wibroakustyczne tramwajów były realizowane na terenie tej zajezdni na odcinku toru nr 32. Tor ten został wybrany ze względu na spełnienie następujących kryteriów:

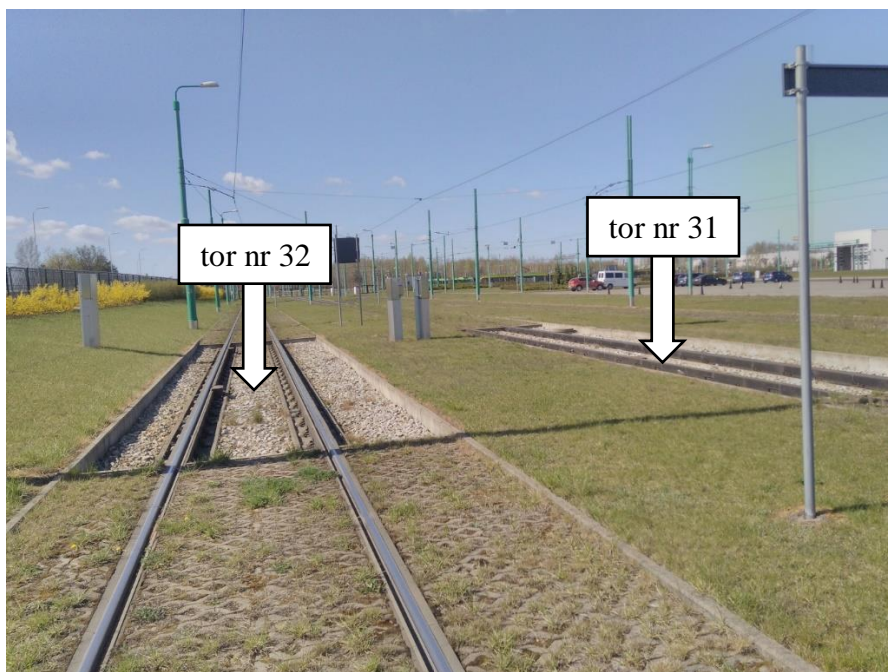
- lokalizacja zapewniająca minimalizację wpływu zakłóceń zewnętrznych,
- dostępność dla możliwie największej liczby przejeżdżających tramwajów,
- lokalizacja w swobodnym polu akustycznym.

Tor nr 32 stanowi przebieg trasy tramwajów kierujących się na obsługę po zakończeniu realizacji procesu transportowego. Stąd też lokalizacja przekroju pomiarowego na tym torze umożliwi rejestrację zjawisk wibroakustycznych wszystkich użytkowanych w danym czasie tramwajów. Ponadto zapewnia brak elementów umożliwiających znaczne odbijanie fal akustycznych. Lokalizacja punktu pomiarowego na torze 32 przedstawiono na rysunku 7.4.



Rys. 7.4. Tor 32 oraz lokalizacja punktu pomiarowego na terenie zajezdni Franowo [203]

Wybrany odcinek toru jest zbudowany z szyn tramwajowych typu 60R2 przymocowanych poprzez połączenie sprężysto-śrubowe typu Sk1 do podłużnych belek podszynowych typu Moll o wzajemnym rozstawie 0,75 m. Widok torowiska na torze nr 32 przedstawiono na rysunku 7.5.



Rys. 7.5. Widok torowiska toru nr 32 i 31 na terenie zajezdni tramwajowej WS2 w Poznaniu

Na odcinku tym znajduje się również system Aguila do wykrywania płaskich miejsc na kołach, działający w oparciu o pomiary nacisków kół na szynę.

### 7.3. Lokalizacja punktów pomiarowych

Punkty pomiarowe zlokalizowano w jednym przekroju torowiska od strony charakteryzującej się najmniejszą liczbą czynników zakłócających. Odległości tych punktów od osi toru wyznaczono z uwzględnieniem aspektów prawnych i bezpieczeństwa ruchu. W tym celu, przeanalizowano obowiązujące wytyczne i akty prawne dotyczące możliwej zabudowy wokół torowiska, czyli normę z wymaganiami dla torowisk PN-K-92011:1998 [218], normę skrajni kinemajycznej tamwajów [217] oraz Ustawę o drogach publicznych [58].

Założono dwie lokalizacje dla punktów pomiarowych, z których pierwsza ( $l_{min}$ ) dotyczy najbliższej możliwej odległości od osi toru, a druga ( $l_{max}$ ) dotyczy odległości przed najdalszą możliwą odległością w warunkach miejskich. Pierwsza odległość  $l_{min}$  dla punktów pomiarowych w najbliższej możliwej odległości od osi toru związana jest ściśle z zagadnieniem skrajni kinemajycznej taboru tramwajowego. Zewnątrz kontur skrajni tramwajów  $K_{sk}$  znajduje się w odległości 1,35 m od osi toru. Przyjęto również uwzględnienie normatywnego pasa bezpieczeństwa  $P_b$  wynoszącego 0,75 m od poszycia pudła tramwaju. Za punkt związany z poszyciem tramwaju, przyjęto granicę skrajni kinemajycznej, będącą reprezentacją największego możliwego poszycia tramwaju. Założenie to pozwoli na zastosowanie wymiaru uwzględniając wszystkie eksploatowane w Polsce tramwaje. Ostateczną odległość  $l_{min}$  od osi toru obliczono następująco:

$$l_{min} = K_{sk} + P_b \quad (7.2)$$

$$l_{min} = 1,35 \text{ m} + 0,75 \text{ m} = 2,1 \text{ m} \quad (7.3)$$

gdzie:

$l_{min}$  – odległość dla punktów pomiarowych w najbliższej możliwej odległości od osi toru [m],

$K_{sk}$  – odległość zewnętrznego konturu skrajni kinemajycznej od osi toru [m],

$P_b$  – odległość pasa bezpieczeństwa od poszycia pudła tramwaju [m].

W odległości  $l_{min}$  zlokalizowano punkt pomiarowy dla przetworników drgań parasejsmicznych przy źródle drgań (PG1).

Maksymalną możliwą odległość punktów pomiarowych od osi toru  $l_{max}$  zdefiniowano zgodnie z granicą zabudowy budynków przy torowisku  $G_z$ , która zgodnie z Ustawą [58] liczona jest według zależności:

$$l_{max} = G_z = l_b + K_{sk} + P_b \quad (7.4)$$

$$l_{max} = G_z = 6 \text{ m} + 1,35 \text{ m} + 0,75 \text{ m} = 8,1 \text{ m} \quad (7.5)$$

gdzie:

$l_{max}$  – maksymalna możliwa odległość punktów pomiarowych od osi toru [m],

$l_b$  – minimalna odległość zewnętrzna krawędzi jezdni [m],

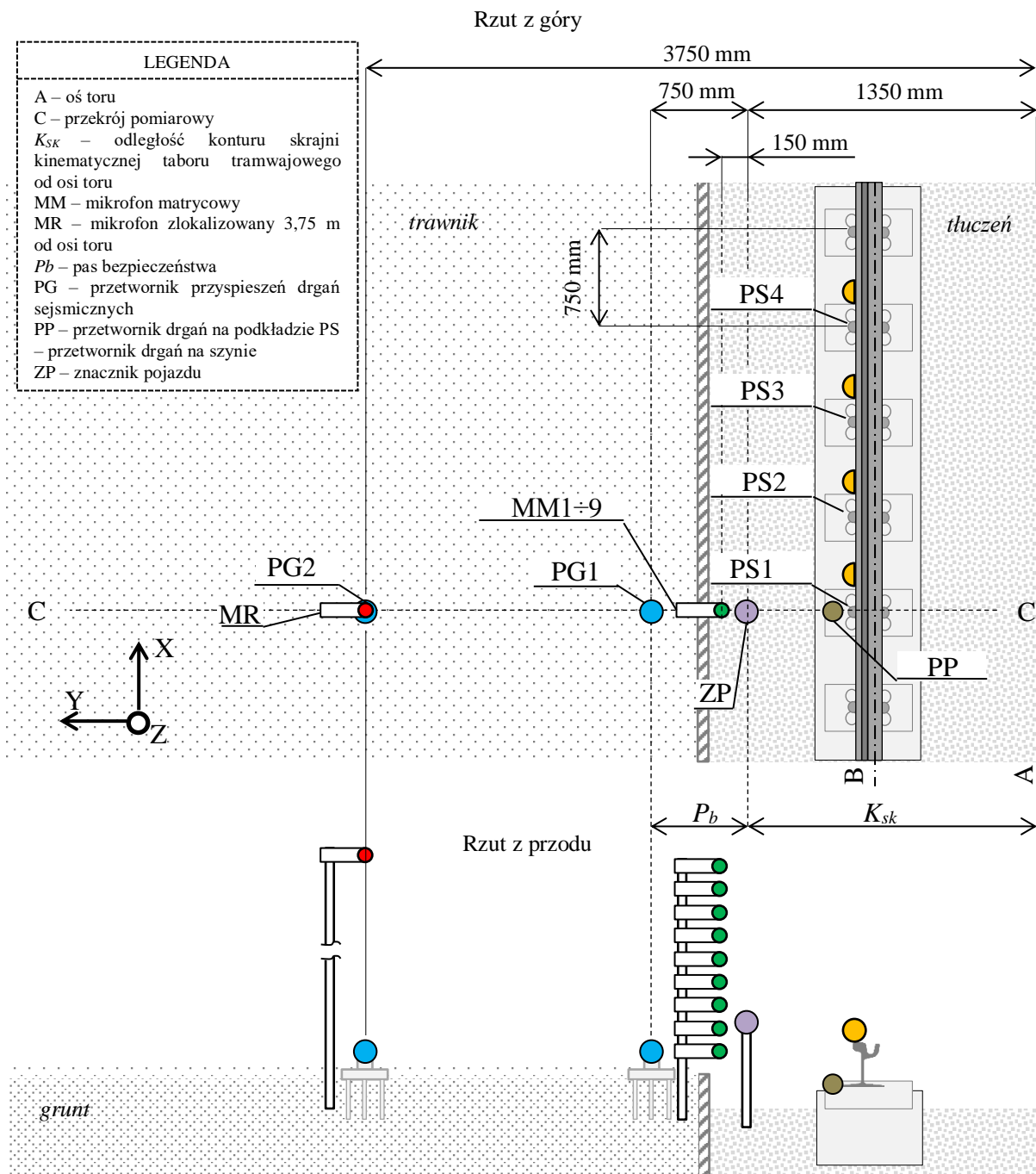
$K_{sk}$  – odległość zewnętrznego konturu skrajni kinematycznej od osi toru [m],

$P_b$  – odległość pasa bezpieczeństwa od poszycia pudła tramwaju [m].

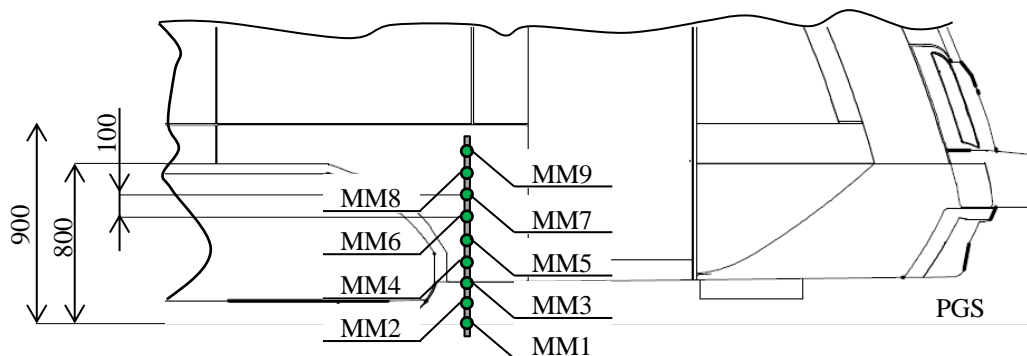
Zgodnie z formułowanym założeniem punkty pomiarowe powinny znaleźć się przed wymiarem  $l_{max} = 8,1$  m. Odległość od osi toru dla punktu pomiarowego rejestracji ciśnienia akustycznego na drodze propagacji ( $l_{MR}$ ) wyznaczono przy uwzględnieniu trudności w umiejscowieniu punktu pomiarowego w odległości 7,5 m od osi toru (zgodnie z Rozporządzeniem [61]) w terenie zurbanizowanym, które opisano w pracy [183]. W związku z tym, punkt pomiarowy dla poziomu ciśnienia akustycznego został wyznaczony w połowie tej odległości, czyli  $l_{MR} = 3,75$  m, spełniając warunek  $l_{MR} > l_{max}$ . Odległość tą przyjęto również dla drugiego punktu pomiarowego przyspieszeń drgań parasejsmicznych PG2 ( $l_{MR} = l_{PG2}$ ) z uwagi na spełnienie warunku  $l_{MR} > l_{max}$  oraz zgodność z założeniami pracy [143].

W celu uwzględnienia w badaniach zjawisk akustycznych w obszarze wózków jezdnych i urządzeń znajdujących się w ich sąsiedztwie, zrealizowano pomiary matrycowe ciśnienia akustycznego obejmujące ten obszar. Pierwszy punkt pomiarowy matrycy mikrofonowej MM1 zlokalizowano na wysokości poziomu główki szyny (PGS) – celem objęcia obszaru styku koła z szyną. Natomiast drugi skrajny wymiar dla ostatniego mikrofonu MM9, był ściśle zależny od geometrii pojazdu. Z analizy wysokości wnęki wózka jeźdnego wynika, że wysokość matrycy nad poziomem główki szyny powinna wynosić minimum 0,8 m w odległości 0,15 m od konturu skrajni dynamicznej tramwaju. Matrycę mikrofonową zlokalizowano w odległości mniejszej niż założona minimalna odległość od osi toru  $l_{min}$ . Było to spowodowane koniecznością ujęcia obszaru styku koła z szyną znajdującego się poniżej poziomu gruntu.

Schemat punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 7.6. Zachowano przy tym zależność  $l_{min} > K_{sk}$ . Lokalizację punktów pomiarowych matrycy mikrofonów przedstawiono na tle pudła tramwaju Solaris Tramino S105p na rysunku 7.7.

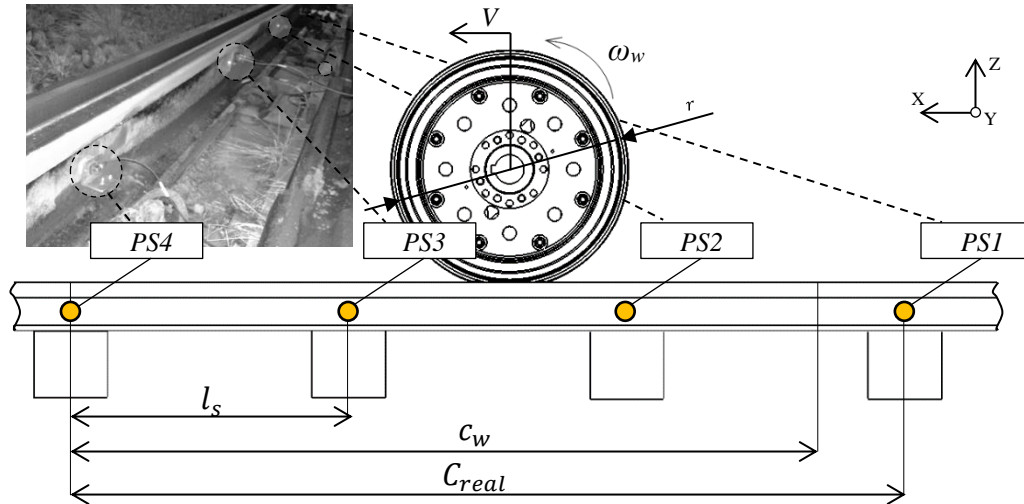


Rys. 7.6. Schemat lokalizacji punktów pomiarowych



Rys. 7.7. Lokalizacja punktów pomiarowych matrycy mikrofonów na tle tramwaju Solaris Tramino S105p

Z uwagi na klasyczne zestawy kołowe tramwaju Solaris Tramino S105p, niepożądane zjawiska w postaci nieregularności powierzchni toczonej kół (płaskie miejsca i nalepy) często występują na obu kołach jednocześnie. Stąd też punkty pomiarowe dla przetworników drgań na szynie zlokalizowane były na jednym toku szynowym nad podkładami. Schemat lokalizacji punktów pomiarowych na szynie przedstawiono na rysunku 7.8.



Rys. 7.8. Schemat punktów pomiarowych przetworników drgań na szynie wraz z podstawowymi wielkościami:  $\omega_w$  – prędkość kątowa koła,  $V$  – prędkość liniowa koła,  $PS1-4$  – kolejne przetworniki drgań na szynie [196]

Liczbę niezbędnych punktów pomiarowych ( $I_r$ ) ustalono z kryterium uwzględniającego maksymalny obwód koła ( $c_{w,max}$ ) i rozstaw podkładów ( $l_s$ ), jak w równaniu:

$$I_r = \text{ent}\left(\frac{c_{w,max}}{l_s} + 1\right) \mid I_r \in \mathbb{N} \quad (7.6)$$

gdzie:

$I_r$  – niezbędna liczba punktów pomiarowych na szynie w detekcji płaskich miejsc,

$c_{w,max}$  – maksymalny obwód koła [m],

$l_s$  – rozstaw podkładów [m].

Tor zbudowany był na podkładach rozłożonych w odstępach 0,75 m ( $l_s$ ). Największy spodziewany obwód koła w taborze MPK Poznań przy założeniu wymiarów nominalnych średnicy tocznej 0,654 m ( $R$ ) to około 2,054 m ( $c_{w,max}$ ). Podstawiając wartości do wzoru (6.6) otrzymano minimalną liczbę czterech punktów pomiarowych zlokalizowanych na szynie. Rzeczywista odległość kontrolowana na szynie wynosiła 2,25 m ( $C_{real}$ ), która obejmuje obwód koła z ewentualnymi niezdatnościami w postaci płaskich miejsc.

## 7.4. Rejestracja sygnałów

### Parametry rejestracji sygnałów

Dla celów przeprowadzenia pomiarów wykorzystano aparaturę firmy Brüel & Kjær. Akwizycja sygnałów odbywała się z wykorzystaniem trzech modułów akwizycji sygnałów LAN-XI. Jeden sześciokanałowy moduł wejścia typu B&K 3050 oraz dwa dwunastokanałowe moduły wejścia typu B&K 3053. Moduły połączono z laptopem dla celów konfiguracji toru pomiarowego, wysterowania i bieżącego monitorowania procesu akwizycji sygnałów. Połączenie modułów zrealizowano poprzez przełącznik sieciowy (ang. *switch*). Zapewniał on synchroniczną rejestrację sygnałów z wykorzystaniem protokołu PTPv2 (ang. *Precision Time Protocol version 2*) z dokładnością do jednej próbkki.

Obliczono niezbędną częstotliwość próbkowania  $f_p$  dla zapewnienia odtworzenia sygnałów ciągłych z próbek rejestrowanych sygnałów dyskretnych. W tym celu zdefiniowano największą spodziewaną częstotliwość rejestrowaną w torze pomiarowym  $f_n$ . Jest to częstotliwość 20 000 Hz, która odpowiada górnemu zakresowi częstotliwości słyszalnych ludzkiego ucha. Zgodnie z twierdzeniem Whittakera–Nyquista–Kotielnikova–Shannona (WNKS), w celu uniknięcia nieodwracalnego zniekształcenia sygnału w procesie próbkowania (ang. *aliasing*) dla częstotliwości 20 000 Hz przyjęto minimalną częstotliwość próbkowania sygnału  $f_{p,WNKS} = 40\,000$  Hz, zgodnie z wzorem:

$$f_{p,WNKS} \geq 2,56 \cdot f_n \quad (7.7)$$

gdzie:

$f_{p,WNKS}$  – minimalna częstotliwość próbkowania sygnału zgodnie z twierdzeniem Whittakera–Nyquista–Kotielnikova–Shannona [Hz],

$f_n$  – największa częstotliwość spodziewana w sygnale w czasie pomiarów [Hz].

Wykorzystane w badaniach oprogramowanie do wysterowania parametrów akwizycji sygnałów oraz do monitorowania przebiegu ich rejestracji PULSE Time Data Recorder (wersja 20.0.0.455) umożliwiało wybór częstotliwości próbkowania  $f_{p,PULSE}$ , zgodnie z równaniem:

$$f_{p,PULSE} = 2^c \mid c \in \mathbb{N} \quad (7.8)$$

gdzie:

$f_{p,PULSE}$  – częstotliwość próbkowania ustalana w oprogramowaniu PULSE Time Data Recorder [Hz],

$c$  – liczba naturalna stanowiąca wykładnik potęgi,

Przy założeniu  $c = 16$ , spełniono równanie:

$$f_{p,WNKs} \leq f_{p,PULSE} \quad (7.9)$$

Zatem częstotliwość próbkowania w badaniach wynosiła  $f_{p,PULSE} = 65536$  Hz. Krok czasowy próbkowania sygnału czasowego  $\Delta t$  wynosił zatem:

$$\Delta t = \frac{1}{f_{p,PULSE}} \approx 1,52600 \cdot 10^{-5} \quad (7.10)$$

gdzie:

$\Delta t$  – krok czasowy próbkowania sygnału czasowego [s].

W badaniach przyjęto również minimalną rozdzielczość częstotliwościową sygnału  $df = 1$  Hz. Oznacza to, że niezbędny ogólny czas trwania jednego sygnału  $t_{sig}$  powinien wynosić minimalnie 1 sekundę, zgodnie ze wzorem:

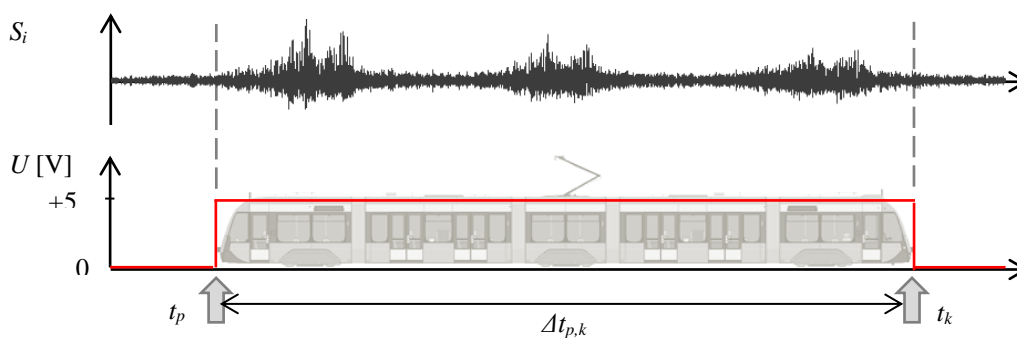
$$t_{sig} = \frac{f_{p,PULSE}}{f_s} \quad (7.11)$$

gdzie:

$t_{sig}$  – niezbędny czas trwania jednego sygnału [s],

$f_s$  – niezbędna liczba próbek w sygnale,

Selekcja czasowa zarejestrowanych sygnałów prowadzona była na bazie okna czasowego, w którym tramwaj znajdował się w linii przekroju pomiarowego. Do tego celu wykorzystano znacznik początku i końca tramwaju w postaci sygnału napięciowego fotokomórki typu nadajnik–odbiornik umieszczonej pomiędzy torem. Pojawienie się tramwaju w przestrzeni kontrolowanej wyzwało napięcie wyjściowe fotokomórki o wartości 5 V rejestrowane synchronicznie wraz z innymi sygnałami. Schemat selekcji czasowej sygnałów przedstawiono schematycznie na rysunku 7.9.



Rys. 7.9. Schemat selekcji czasowej sygnałów i sposób pomiaru średniej prędkości przejazdu:  $t_p$  – chwila czasowa dla znacznika początkowego sygnału do analiz,  $t_k$  – chwila czasowa dla znacznika końcowego sygnału do analiz,  $\Delta t_{p,k}$  – czas przejazdu tramwaju przez przekrój pomiarowy,  $S_i$  –  $i$ -ty sygnał



Przedstawiony sposób selekcji sygnałów w porównaniu do normy ISO 3095:2005 [102] został przedstawiony w pracy [129] na przykładzie pomiarów dźwięku. Średnia prędkość przejazdu tramwajów przez przekrój pomiarowy  $V$  była obliczona na podstawie wskazań sygnału napięcia fotokomórki według zależności:

$$V = \frac{l_{tram}}{\Delta t_{p,k}} \quad (7.12)$$

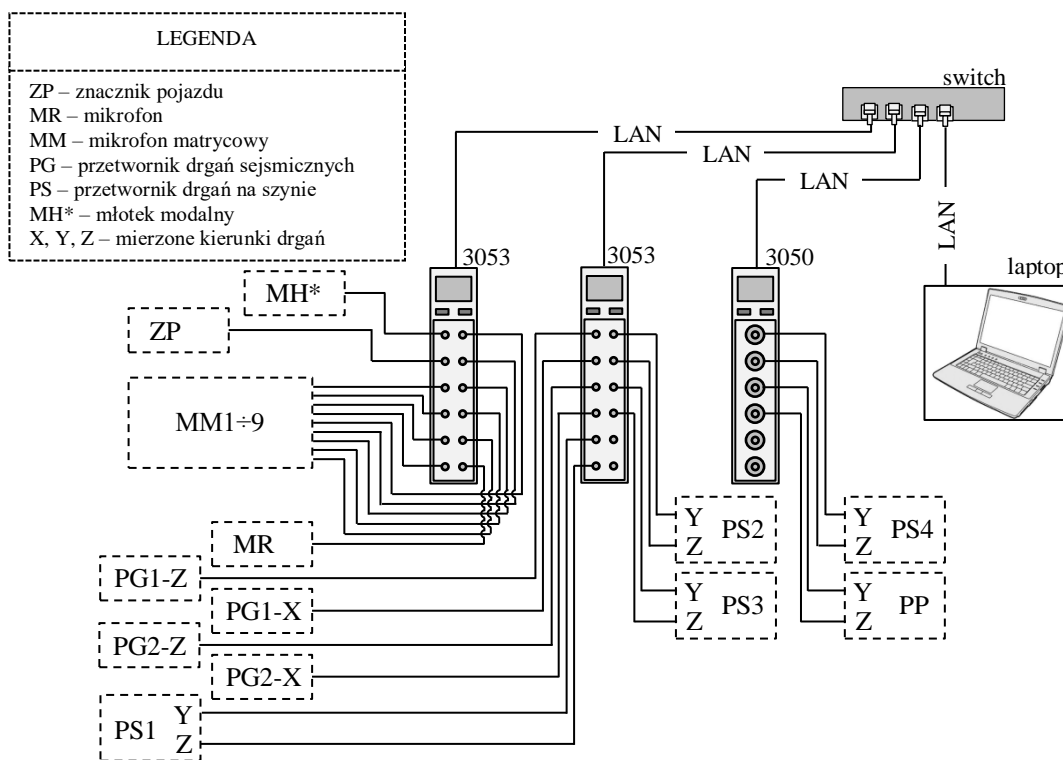
gdzie:

$V$  – średnia prędkość przejazdu tramwaju [km/h].

$\Delta t_{p,k}$  – czas przejazdu tramwaju przez przekrój pomiarowy [s],

$l_{tram}$  – całkowita długość tramwaju [m].

W ten sposób analizowane sygnały uwzględniały przejazd tramwaju przez przekrój pomiarowy od czoła pojazdu do jego końca. Tor pomiarowy wykorzystany do przeprowadzenia badań został przedstawiony schematycznie na rysunku 7.10.

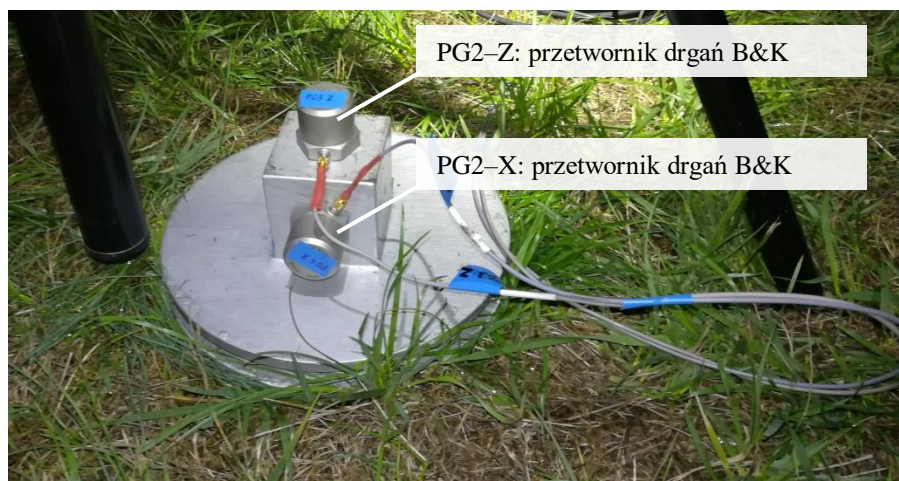


Rys. 7.10. Tor pomiarowy

W celu rejestracji parasejsmicznych sygnałów drganiowych wykorzystano piezoelektryczny przetwornik drgań sejsmicznych B&K 8344. Przetwornik ten spełniał wymagania techniczne dla prawidłowego rejestrowania drgań generowanych przez elementy infrastruktury transportowej o charakterze sejsmicznym opisane w opracowaniach [135, 215].

Widok wykorzystanych przetworników drgań przedstawiono na rysunku 7.11. Wybrane specyfikacje techniczne przedstawiono w tabeli 7.2.

Przetworniki drgań parasejsmicznych przymocowano za pomocą połączenia śrubowego M5 ze sztywną podstawą z trzema prętami M20 wbitymi w grunt, które zapewniły związanie punktu pomiarowego z gruntem.

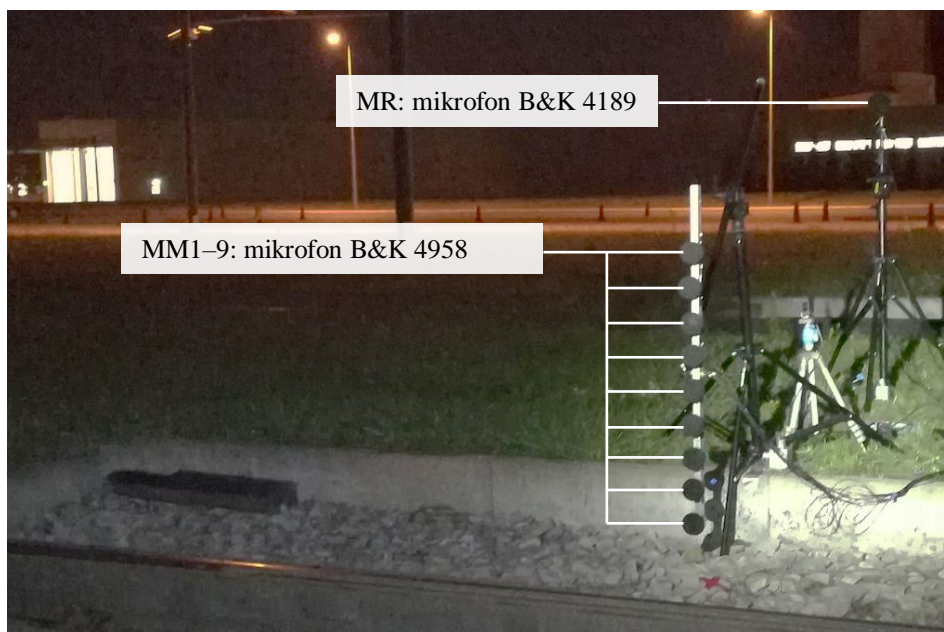


Rys. 7.11. Widok przetworników drgań B&K 8344 na przykładzie punktów pomiarowych PG2-Z i PG2-X

Tabela 7.2. Wybrane dane techniczne przetwornika B&K 8344 [21]

Typ:	Przetwornik drgań
Model:	B&K 8344
Wzmacniacz:	wbudowany
Zasilanie:	CCLD
Masa:	176 gramów
Zakres częstotliwościowy rejestracji sygnałów:	0,2–3000 Hz
Częstotliwość rezonansowa:	10000 Hz
Czułość:	250 mV/ms <sup>2</sup>
Zakres temperatur środowiska pracy:	-50–100°C
Maksymalny, chwilowy poziom drgań:	350 g $\approx$ 3432 m/s <sup>2</sup>
Punkty pomiarowe:	PG1, PG2

Do rejestracji poziomu ciśnienia akustycznego wykorzystano dwa typy mikrofonów. Pierwszy typ stanowił mikrofon pojemnościowy B&K 4189 (z przedwzmacniaczem typu B&K 2671) przeznaczony do pomiarów w polu swobodnym. Drugi typ stanowił mikrofon B&K 4958 przeznaczony do pomiarów matrycowych. Pierwszy typ wykorzystano do pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego w punkcie pomiarowym MR, natomiast drugi typ posłużył do rejestracji poziomu ciśnienia akustycznego w matrycy mikrofonowej (punkty pomiarowe MM1–9). Mocowanie mikrofonów realizowano poprzez dedykowane statywy. Widok zastosowanych mikrofonów w obszarze przekroju pomiarowego przedstawiono na rysunku 7.12, a ich wybrane specyfikacje techniczne przedstawiono w tabeli 7.3.



Rys. 7.12. Widok zastosowanych mikrofonów w obszarze przekroju pomiarowego

Tabela 7.3. Wybrane dane techniczne mikrofonów B&K 4958 i B&K 4189 [22, 23]

Typ:	Mikrofon pojemnościowy	Mikrofon pojemnościowy
Model:	B&K 4958	B&K 4189
Wzmacniacz:	wbudowany	wbudowany
Zasilanie:	CCLD	CCLD
Masa:	3,8 gramów	1 gram
Zakres częstotliwościowy liniowej rejestracji sygnałów:	10–20000 Hz	6,3–20000 Hz
Czułość:	11,2 mV/Pa	50 mV/Pa
Zakres temperatur środowiska pracy:	-10–55°C	-30–150°C
Maksymalny poziom ciśnienia powietrza:	140 dB	146 dB
Punkty pomiarowe:	MR	MM1–9

Rejestrację przyspieszeń drgań szyny realizowano z wykorzystaniem piezoelektrycznych przetworników drgań typu B&K 4504 mocowanych za pomocą dedykowanych podkładek magnesowych. Widok przetworników drgań w B&K 4504–A w punktach pomiarowych przedstawiono na rysunku 7.13, a wybrane specyfikacje techniczne w tabeli 7.4.



Rys. 7.13. Widok przetworników drgań B&K 4504-A w punktach pomiarowych PS1–4

Tabela 7.4. Wybrane dane techniczne przetwornika B&K 4504-A

Typ:	Przetwornik drgań
Model:	B&K 4504-A
Wzmacniacz:	wbudowany
Zasilanie:	CCLD
Masa:	4,4 gramy
Zakres częstotliwościowy rejestracji sygnałów:	1–9000 Hz
Częstotliwość rezonansowa:	44000 Hz
Czułość:	1 mV/ms <sup>2</sup>
Zakres temperatur środowiska pracy:	-50–125°C
Maksymalny, chwilowy poziom drgań:	3000 g $\approx$ 29420 m/s <sup>2</sup>
Punkty pomiarowe:	PS1–4

Przyspieszenia drgań podkładu rejestrowano z wykorzystaniem piezoelektrycznego przetwornika drgań typu B&K 4524 mocowanego adhezyjnie (klej cyjanoakrylowy). Widok punktów pomiarowych z zastosowanymi przetwornikami przedstawiono na rysunku 7.14. Jego wybrane specyfikacje techniczne przedstawiono w tabeli 7.5.



Rys. 7.14. Widok przetwornika drgań B&K 4524-B w punkcie pomiarowym PP

Tabela 7.5. Wybrane dane techniczne przetwornika B&K 4524-B

Typ:	Przetwornik drgań
Model:	B&K 4524-B
Wzmacniacz:	wbudowany
Zasilanie:	CCLD
Masa:	4,4 gramy
Zakres częstotliwościowy rejestracji sygnałów:	0,25–3000 Hz
Częstotliwość rezonansowa:	9000 Hz
Czułość:	10 mV/ms <sup>2</sup>
Zakres temperatur środowiska pracy:	-54–100°C
Maksymalny, chwilowy poziom drgań:	5000 g $\approx$ 49033 m/s <sup>2</sup>
Punkty pomiarowe:	PP

Przetworniki typu B&K 4504-A zamocowano w czterech punktach pomiarowych PS1–4 dla spełnienia wymagań metodyki związanej z identyfikacją i lokalizacją nieregularności powierzchni toczonej kół.

W celu realizacji wymuszeń impulsowych torowiska wykorzystano młotek modalny typu B&K 8210 przeznaczony do wymuszeń dużych struktur takich jak mosty i budynki. Widok młotka modalnego przedstawiono na rysunku 7.15. Wybrane dane techniczne młotka przedstawiono w tabeli 7.6.



Rys. 7.15. Widok młotka modalnego B&K 8210 (opracowanie własne na podstawie [19])

Tabela 7.6. Wybrane dane techniczne młotka modalnego B&K 8210 [24]

Typ:	Młotek modalny
Model:	B&K 8210
Wzmacniacz:	wbudowany
Zasilanie:	CCLD
Masa:	5448 gramy (głowica)
Zakres częstotliwościowy rejestracji sygnałów:	0,25–3000 Hz
Częstotliwość rezonansowa:	9000 Hz
Czułość:	0,225 mV/N
Zakres temperatur środowiska pracy:	-79–121°C
Maksymalny poziom siły:	22240 N

Widok stanowiska akwizycji sygnałów w czasie kontroli parametrów rejestracji przed przystąpieniem do pomiarów przedstawiono na rysunku 7.16.



Rys. 7.16. Widok stanowiska akwizycji sygnałów w czasie kontroli parametrów rejestracji sygnałów

Każdorazowo zachowywano jednakowy proces przygotowywana aparatury do pomiarów w kwestii kalibracji aparatury i spójności kanałów pomiarowych z punktami pomiarowymi.

### Wektor sterowania w badaniach

W badaniach wykorzystano zależności wynikające z podstawowego równania diagnostyki technicznej przy obserwacji sygnałów zgodnie z implikacją [36]:

$$S(\theta) = \Phi[(U(\theta), E(\theta) + Z(\theta))] \quad (7.13)$$

gdzie:

- $S(\theta)$  – wektor sygnału,
- $U(\theta)$  – wektor parametrów stanu,
- $E(\theta)$  – wektor parametrów sterowania,
- $Z(\theta)$  – zakłócenia.
- $\theta$  – eksploatacyjna miara starzenia,
- $\Phi$  – operator przyporządkowania.

Z uwagi na fakt, że aktywność wibroakustyczna tramwaju jest ściśle powiązana z jego stanem technicznym, obserwacja sygnałów wibroakustycznych musi być dokonywana przy założeniu stałego wektora sterowania  $U = const.$  i minimalnych zakłóceń  $Z = min.$  W badaniach określono niezbędny wektor parametrów sterowania w postaci obciążenia pasażerami, prędkości przejazdu tramwajów i podatności dynamicznej torowiska. Wpływ obciążenia pasażerami zminimalizowano poprzez realizację badań bez udziału pasażerów podczas zjazdów tramwajów do zajezdni po zakończeniu realizacji procesu transportowego.

Przedział prędkości przejazdów tramwajów w przeprowadzonych badaniach zawierał się w przedziale:

$$V \in \langle 16,8 \text{ km/h}; 27,2 \text{ km/h} \rangle \quad (7.14)$$

W przedziale tym uwzględniono łącznie sto pięćdziesiąt pięć przejazdów tramwajów. Uwzględniony w badaniach rozrzut prędkości wynosił 10,4 km/h, a współczynnik zmienności wynosił 13%.

Podatność dynamiczna torowiska stanowiła odrębne zagadnienie badań z wykorzystaniem testu impulsowego opisanego w rozdziale 8.2. Dla zachowania zbliżonych warunków realizacji pomiarów w przekroju pomiarowym ograniczono wpływ zakłóceń na zarejestrowane sygnały. W tym celu pomiary odbywały się w ustalonych warunkach terminowych i pogodowych umożliwiającym przeprowadzenie badań wibroakustycznych. Pomiary odbywały się podczas zjazdów tramwajów na obsługę po zakończeniu realizacji procesu transportowego w godzinach 22:00–00:00. W czasie pomiarów nie występowały opady atmosferyczne, a przedział prędkości wiatru wynosił od 0,7 m/s do 4,2 m/s ze współczynnikiem zmienności równym 5%. Temperatura w czasie pomiarów wynosiła od 18,1°C do 24,4°C ze współczynnikiem zmienności równym 10%. Szczegółowe dane dotyczące warunków atmosferycznych panujących podczas wykonywania pomiarów wibroakustycznych znajdują się w załączniku nr 1.

## 8. ANALIZA WYBRANYCH WARUNKÓW BRZEGOWYCH OBSERWACJI

### 8.1. Wyznaczenie zakresów częstotliwości w analizach sygnałów

Analizę materiału badawczego rozpoczęto od wyznaczenia zakresów częstotliwości oddziaływania zjawisk w celu ukierunkowania dalszych kroków obliczeń w tym filtracji sygnałów. Analizy tej nie prowadzono dla punktów pomiarowych związanych z rejestracją sygnałów dźwiękowych. W ich przypadku przyjęto zakres liniowej charakterystyki rejestracji sygnałów przez mikrofony wynoszący 10–20000 Hz, który umożliwił ujęcie połowy zakresu częstotliwości infradźwięków oraz ujęcie częstotliwości związanych z percepcją ludzkiego ucha. Przeprowadzone analizy posłużyły do wyznaczenia górnych granic filtrów pasmowo–przepustowych przyjętych do dalszych obliczeń sygnałów poszczególnego punktu pomiarowego. Przyjęto przy tym, że dolna granica tych filtrów odpowiada dolnej granicy zakresu rejestracji danego przetwornika.

W pierwszej kolejności przeanalizowano zmiany generowanych częstotliwości w funkcji czasu przejazdu. W tym celu dla każdego punktu pomiarowego obliczono spektrogramy sygnałów z wykorzystaniem analizy STFT obejmującej zakres częstotliwości liniowej rejestracji danego punktu, zgodnie z poniższym równaniem [228, 241]:

$$X_l[k] = \sum_{n=0}^{N-1} w[n]x[n + lH]e^{\frac{j2\pi kn}{N_p}} \quad l = 0,1 \dots, \quad (8.1)$$

gdzie:

$X_l[k]$  – wartość transformaty STFT dla  $k$ -tej częstotliwości w sygnale i numeru okna  $l$ ,

$n$  – próbka sygnału,

$N_p$  – liczba próbek sygnału,

$w$  – analizowane okno czasowe,

$l$  – numer okna sygnału,

$H$  – rozmiar skoku okien w próbkach,

$x$  – wartość sygnału [m/s<sup>2</sup>].

W analizie sygnałów wykorzystano okienkowanie z wykorzystaniem okna *Hanninga* [25, 26, 209, 283]. Spektrogramy obliczono dla każdego punktu pomiarowego z uwzględnieniem przejazdów charakteryzujących się skrajnymi prędkościami, czyli 16,8 km/h oraz 27,2 km/h. Wykorzystanie analizy STFT umożliwiło obserwację zmian częstotliwości



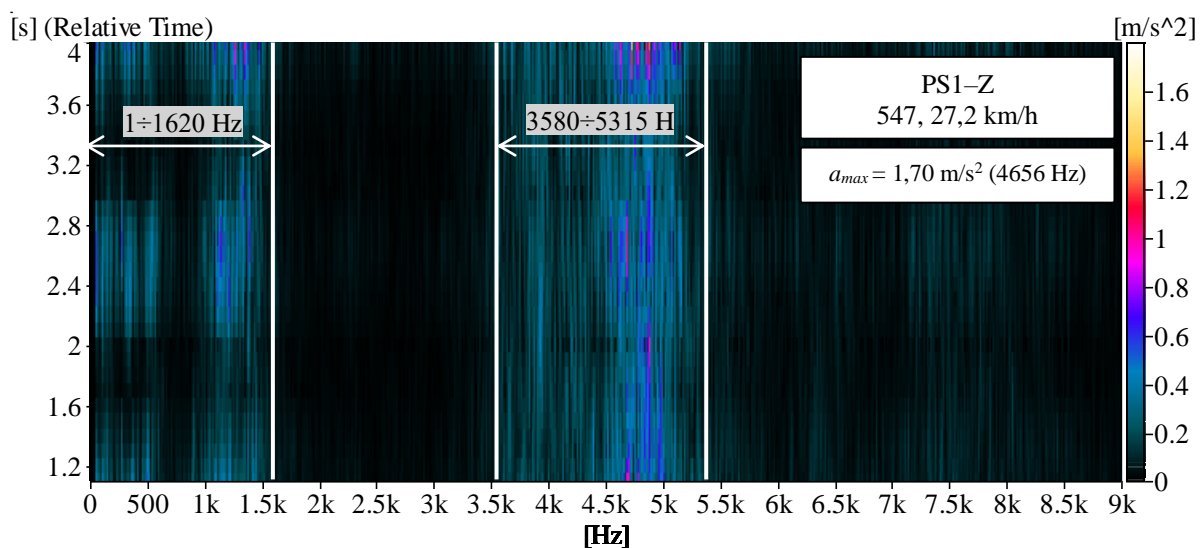
i zmian odpowiadających im amplitud w funkcji czasu. Dla wszystkich przypadków rozdzielczość widma wynosiła 1 Hz.

Następnie w celu obserwacji zakresu generowanych częstotliwości z uwzględnieniem wszystkich prędkości przejazdu wykonano analizy widm o stałej względnej szerokości pasma CPB (ang. *Constant Percentage Bandwidth*) wynoszącej 1/12 oktawy. W tym przypadku relacja pomiędzy szerokością pasma  $B_p$ , a jego częstotliwością środkową  $f_{sr}$  jest wielkością stałą i wynosi:

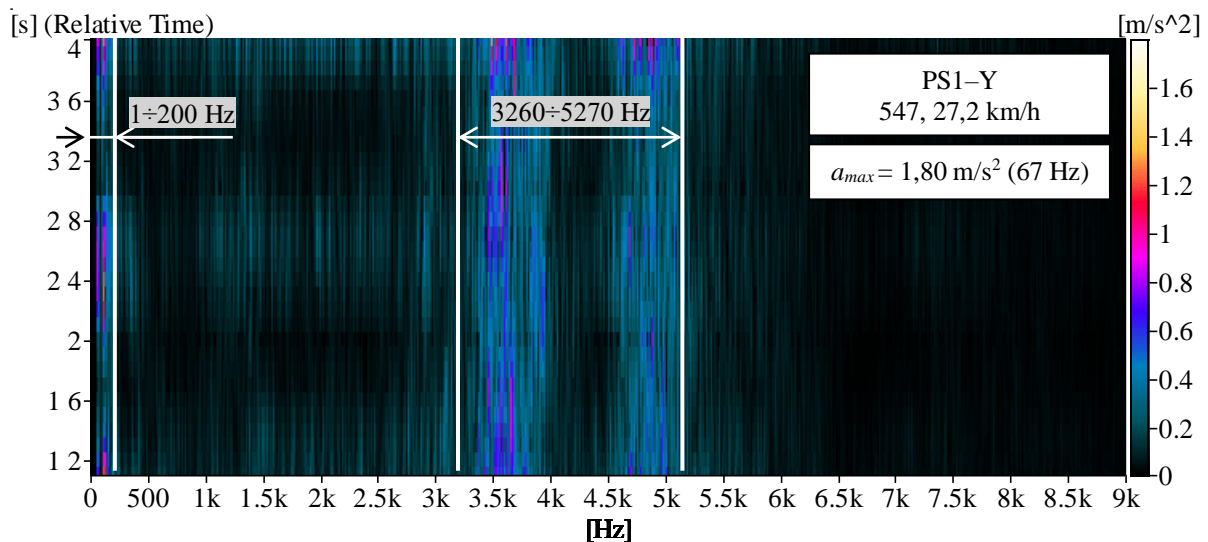
$$\frac{B_p}{f_{sr}} = \frac{1}{12\sqrt{2}} \quad (8.2)$$

Widma CPB obliczono z wykorzystaniem Szybkiej Transformaty Fouriera – FFT (ang. *Fast Fourier Transform*) zgodnie z równaniem (8.3). Dla każdego punktu pomiarowego obliczono średnie, minimalne i maksymalne widmo CPB w danym punkcie pomiarowym. W pierwszej kolejności analizy STFT i CPB wykonano dla punktów pomiarowych zlokalizowanych na szynie PS1–Z i PS1–Y. Analizy wykonano w zakresie częstotliwości rejestracji sygnałów 1–9000 Hz. Spektrogramy dla przejazdu z maksymalną prędkością w przedstawiono na rysunku 8.1 i 8.2 odpowiednio dla punktu PS1–Z i PS1–Y. Natomiast dla przejazdu z minimalną prędkością w przedstawiono je analogicznie na rysunku 8.3 i 8.4.

Jak przedstawiono na rysunku 8.1 i 8.2, główny zakres pobudzanych częstotliwości drgań dla maksymalnej prędkości w punkcie PS1–Z wynosił 1–1620 Hz i 3580–5315 Hz. Natomiast w punkcie PS1–Y zakres ten wynosił 1–200 Hz i 3260–5270 Hz. W spektrogramie z punktu PS1–Z wyróżnić można zakres 4550–5000 Hz, w którym zawierały się największe obserwowane amplitudy przyspieszeń drgań.



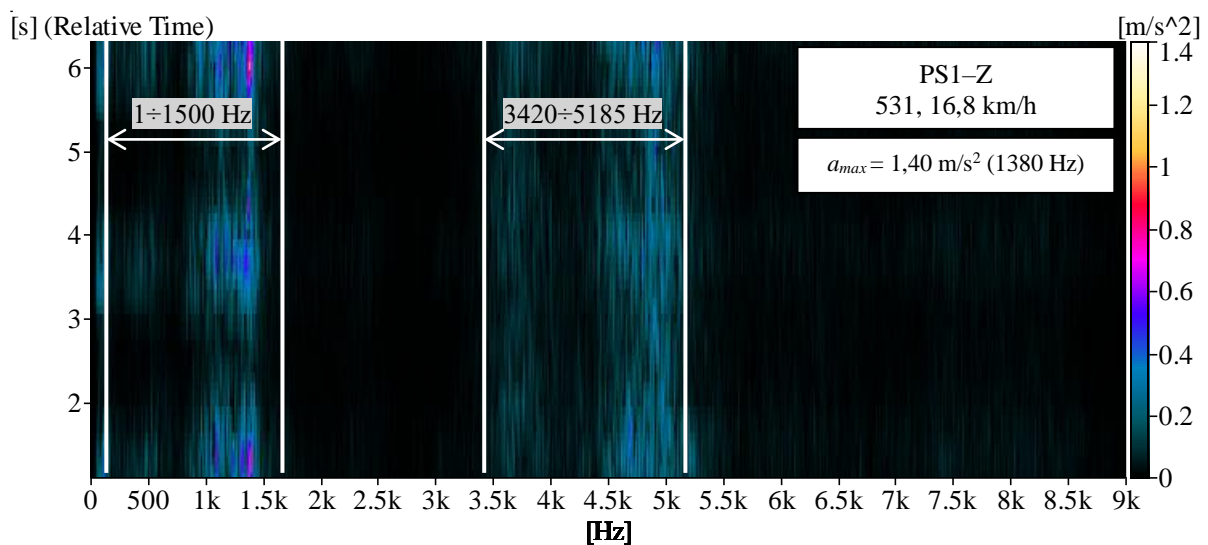
Rys. 8.1. Spektrogramy sygnałów z punktu PS1–Z dla przejazdu tramwaju 547 z prędkością 27,2 km/h



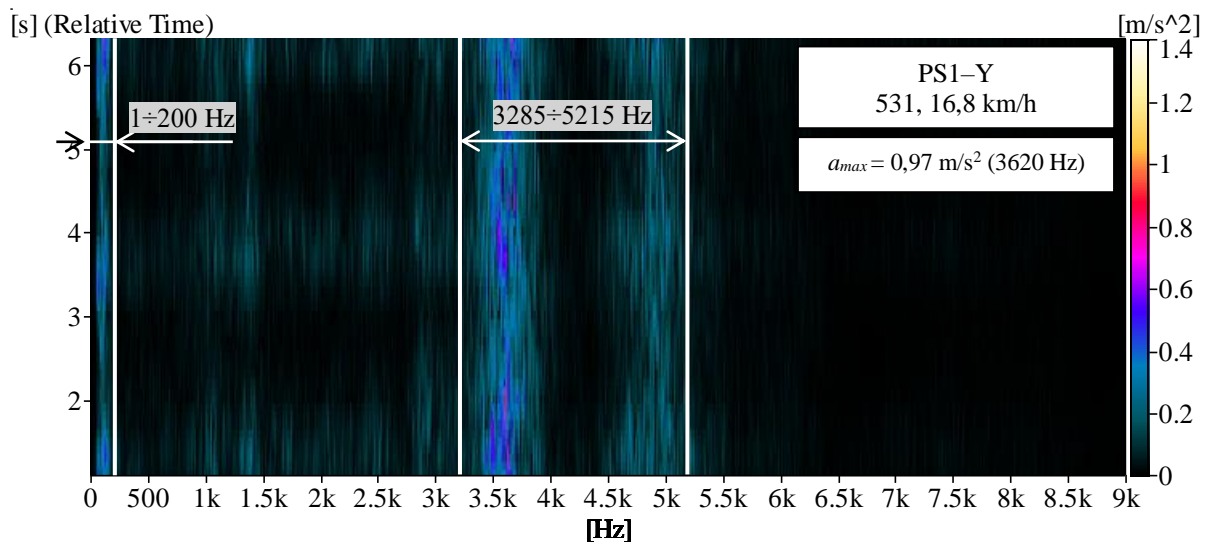
Rys. 8.2. Spektrogramy sygnałów z punktów PS1–Y dla przejazdu tramwaju 547 z prędkością 27,2 km/h

W przypadku punktu PS1–Y największe amplitudy drgań dotyczyły zakresu 1–190 Hz. Wartość maksymalna przyspieszeń drgań w punkcie PS1–Z wynosiła  $1,70 \text{ m/s}^2$  i dotyczyła częstotliwości 4656 Hz. Wartość maksymalna dla punktu PS1–Y była o około 6% ( $1,80 \text{ m/s}^2$ ) większa i dotyczyła częstotliwości 67 Hz.

Jak przedstawiono na rysunku 8.3 i 8.4, główny zakres pobudzanych częstotliwości drgań przy dla minimalnej prędkości przejazdu w punkcie PS1–Z wynosił 1–1500 Hz i 3420–5185 Hz. Natomiast w punkcie PS1–Y zakres ten wynosił 1–200 Hz i 3285–5215 Hz. W spektrogramie z punktu PS1–Z wyróżnić można zakres 1250–1450 Hz, w którym zawierały się największe obserwowane amplitudy przyspieszeń drgań. W przypadku punktu PS1–Y największe amplitudy drgań dotyczyły zakresu 3550–3700 Hz.



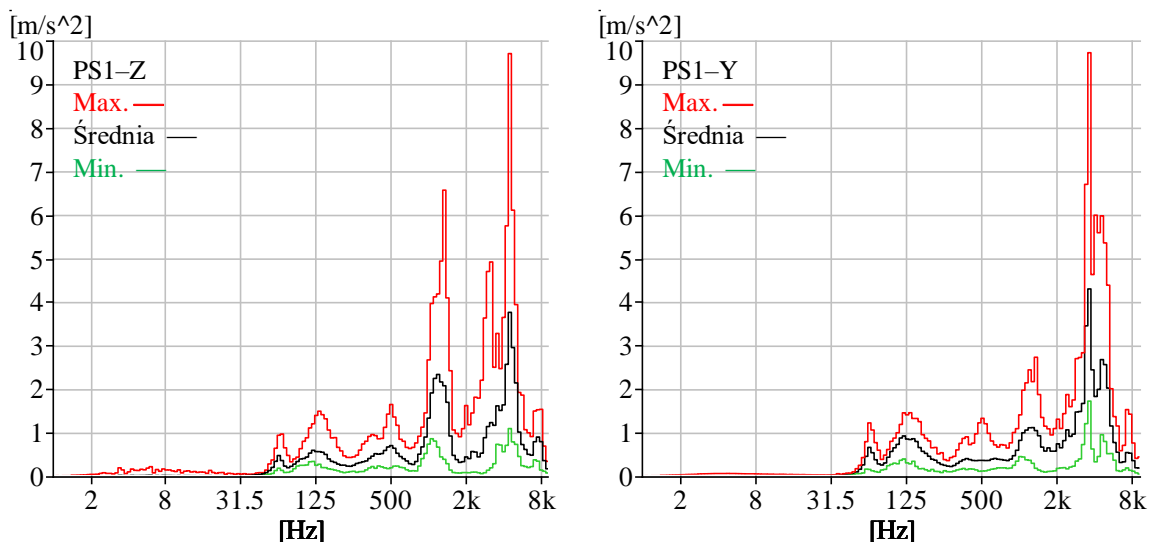
Rys. 8.3. Spektrogram sygnału z punktu PS1–Z dla przejazdu tramwaju 531 z prędkością 16,8 km/h



Rys. 8.4. Spektrogram sygnału z punktu PS1–Y dla przejazdu tramwaju 531 z prędkością 16,8 km/h

Wartość maksymalna przyspieszeń drgań w punkcie PS1–Z wynosiła  $1,40 \text{ m/s}^2$  i dotyczyła częstotliwości 1380 Hz. Wartość maksymalna dla punktu PS1–Y była o około 31% ( $0,97 \text{ m/s}^2$ ) mniejsza i dotyczyła częstotliwości 3620 Hz.

Wyniki analiz widmowych CPB przedstawiono na rysunku 8.5. Zgodnie z przedstawionymi wynikami, dla wszystkich punktów pomiarowych, górną granicę zakresu generowanych częstotliwości stanowiła 1/12 oktawy o częstotliwości środkowej 8660 Hz.



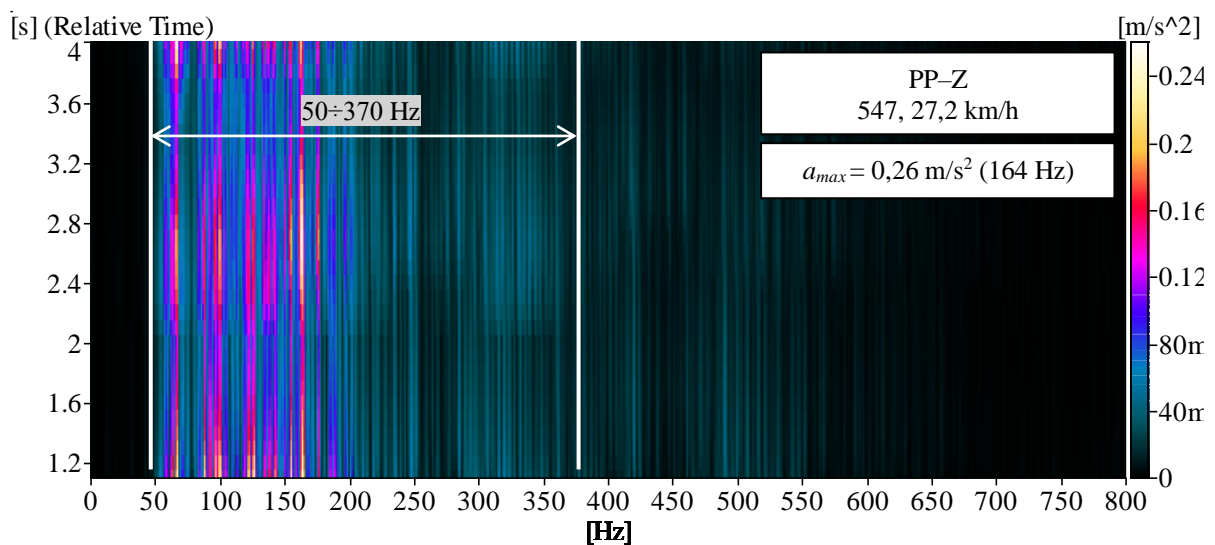
Rys. 8.5. Obliczone maksymalne, średnie i minimalne widma CPB dla punktów pomiarowych na szynie

W związku z tym, dla punktów PS1–Z i PS1–Y wybrano najszerszy możliwy zakres częstotliwości dla dalszych analiz, czyli zakres częstotliwości rejestracji 1–9000 Hz.

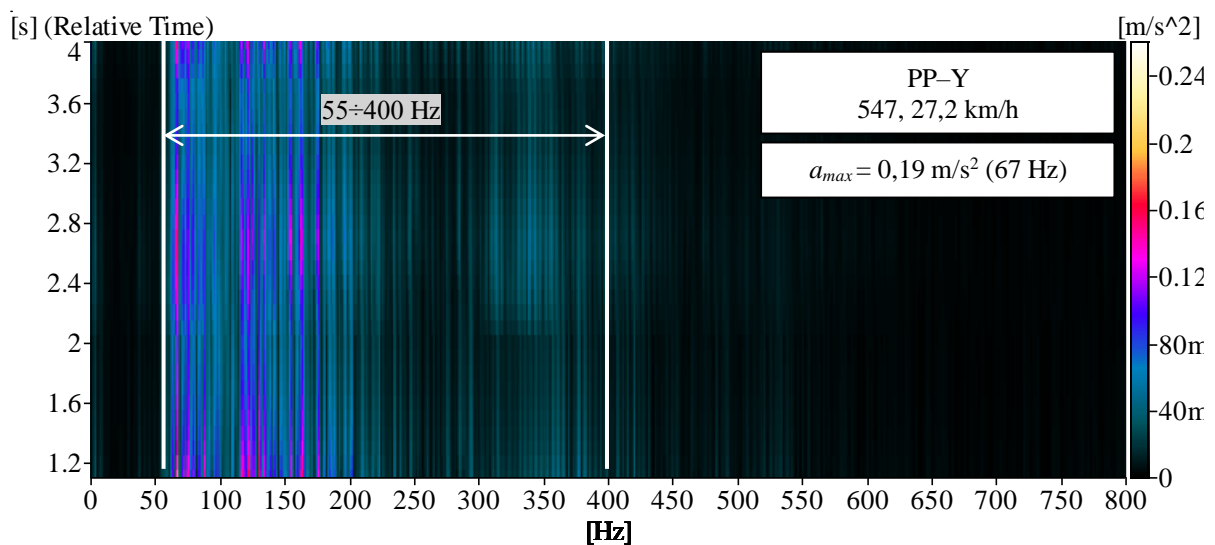
Następnie wykonano analizy sygnałów z punktów pomiarowych na podkładzie PP–Z i PP–Y. Analizy wykonano w zakresie częstotliwości rejestracji sygnałów wynoszącym 0,25–3000 Hz. Spektrogramy dla przejazdu z maksymalną prędkością przedstawiono

na rysunku 8.6 i 8.7 odpowiednio dla punktu PP-Z i PP-Y. Natomiast dla przejazdu z minimalną prędkością w przedstawiono je analogicznie na rysunku 8.8 i 8.9.

Jak przedstawiono na rysunku 8.6 i 8.7, główny zakres pobudzanych częstotliwości drgań w punkcie PP-Z dla maksymalnej prędkości przejazdu wynosił 50–370 Hz, a w punkcie PP-Y 55–400 Hz. W spektrogramie z punktu PP-Z wyróżnić można zakres 60–180 Hz, w którym zawierały się największe obserwowane amplitudy przyspieszeń drgań. W przypadku punktu PP-Y największe amplitudy drgań dotyczyły zakresu 55–190 Hz. Wartość maksymalna przyspieszeń drgań w punkcie PP-Z wynosiła  $0,26 \text{ m/s}^2$  i dotyczyła częstotliwości 164 Hz. Wartość maksymalna dla punktu PP-Y była o około 27% ( $0,19 \text{ m/s}^2$ ) mniejsza i dotyczyła częstotliwości 97 Hz.

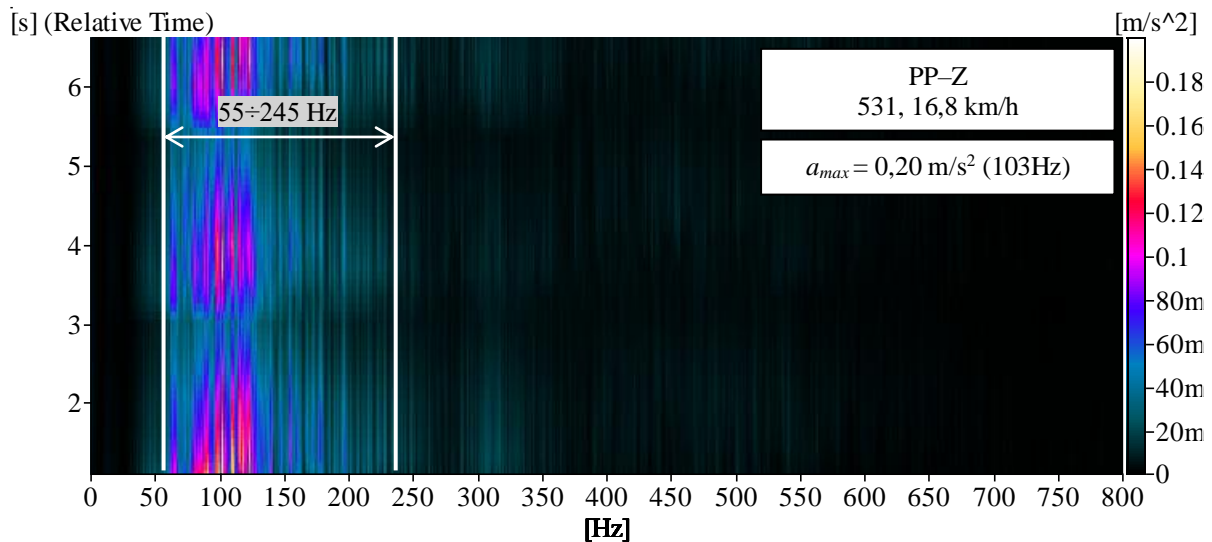


Rys. 8.6. Spektrogram sygnału z punktu PP-Z dla przejazdu tramwaju 547 z prędkością 27,2 km/h

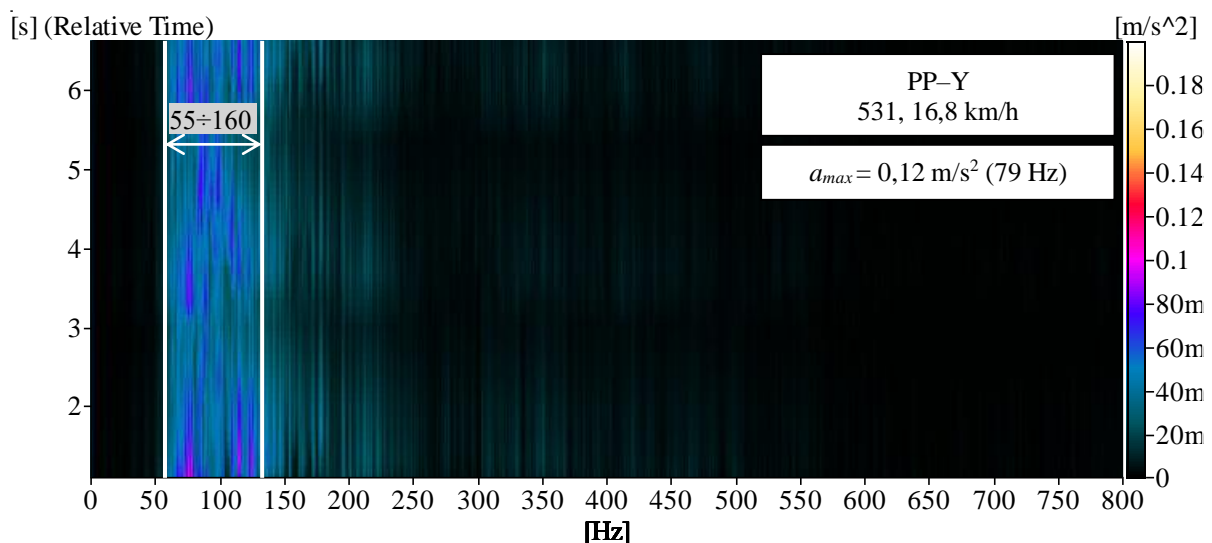


Rys. 8.7. Spektrogram sygnału z punktu PP-Y dla przejazdu tramwaju 547 z prędkością 27,2 km/h

W przypadku punktów na podkładzie przy minimalnej prędkości przejazdu (rys. 8.8, rys. 8.9), główny zakres pobudzanych częstotliwości drgań dla kierunku Z wynosił 55–245 Hz, a dla kierunku Y wynosił 55–160 Hz. W spektrogramie z punktu PP–Z wyróżnić można zakres 80–130 Hz, w którym zawierały się największe obserwowane amplitudy przyspieszeń drgań. W przypadku punktu PP–Y największe amplitudy drgań dotyczyły zakresu 70–85 Hz. Wartość maksymalna przyspieszeń drgań w punkcie PP–Z wynosiła  $0,20 \text{ m/s}^2$  i dotyczyła częstotliwości 103 Hz. Wartość maksymalna dla punktu PP–Y była o około 40% ( $0,12 \text{ m/s}^2$ ) większa i dotyczyła częstotliwości 79 Hz. Przedstawione spektrogramy z analizy STFT dla punktów PP–Z i PP–Y wskazują, że najszerszy zakres częstotliwości charakteryzujący przejazd ze skrajnymi prędkościami wynosi 50–370 Hz dla punktu PP–Z i 55–400 Hz dla punktu PP–Y.

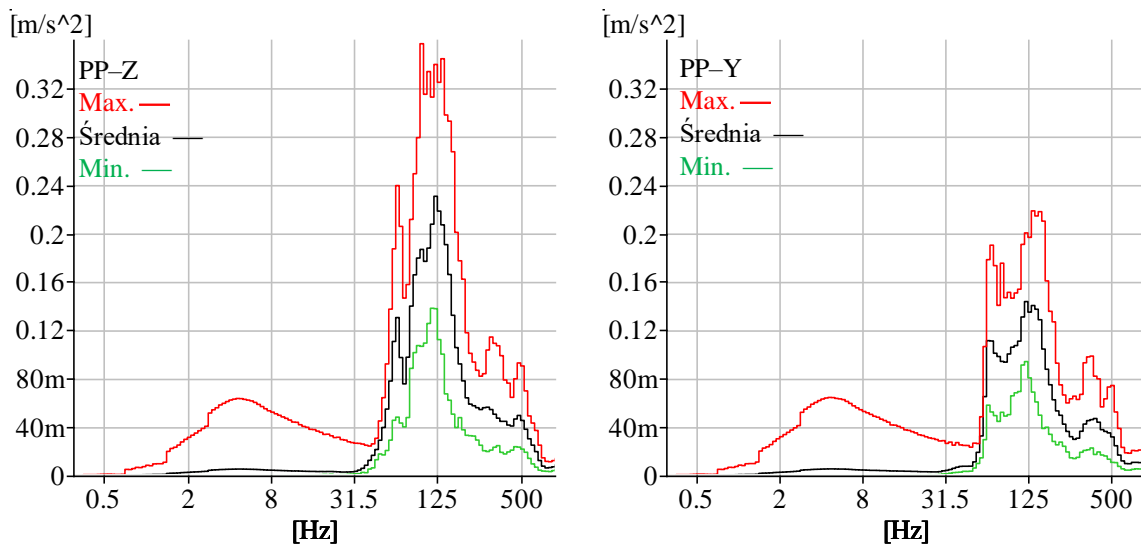


Rys. 8.8. Spektrogram sygnału z punktu PP–Z dla przejazdu tramwaju 531 z prędkością 16,8 km/h



Rys. 8.9. Spektrogram sygnału z punktu PP–Y dla przejazdu tramwaju 531 z prędkością 16,8 km/h

Następnie dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów przeprowadzono analizę CPB w paśmie 1/12 oktawy. Dla każdego punktu pomiarowego obliczono maksymalne, średnie i minimalne widmo CPB. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 8.10. Zgodnie z przedstawionymi wynikami ze wszystkich punktów pomiarowych na podkładzie, górną granicę zakresu generowanych częstotliwości stanowiła 1/12 oktawy o częstotliwości środkowej 500 Hz, co przyjęto jako górną granicę zakresu częstotliwości do dalszych analiz sygnałów.



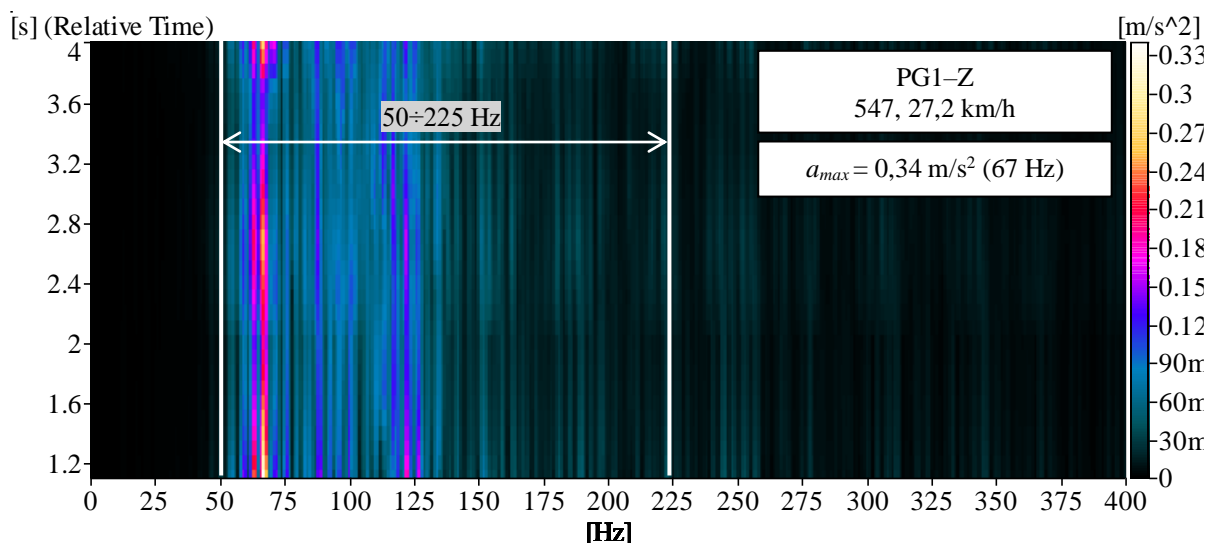
Rys. 8.10. Obliczone maksymalne, średnie i minimalne widma CPB 1/12 oktawy dla punktów pomiarowych na podkładzie

W przypadku drgań parasejsmicznych na początku wyznaczano zakres częstotliwości w analizach. W tym celu wykonano analizy STFT sygnałów drganiowych z punktów PG1 i PG2 dla dwóch kierunków pomiarowych – wzdłużny X i pionowy Z. Analizy wykonano w zakresie częstotliwości rejestracji sygnałów 0,2–3000 Hz dla przejazdów charakteryzujących się skrajnymi prędkościami 16,8 km/h oraz 27,1 km/h.

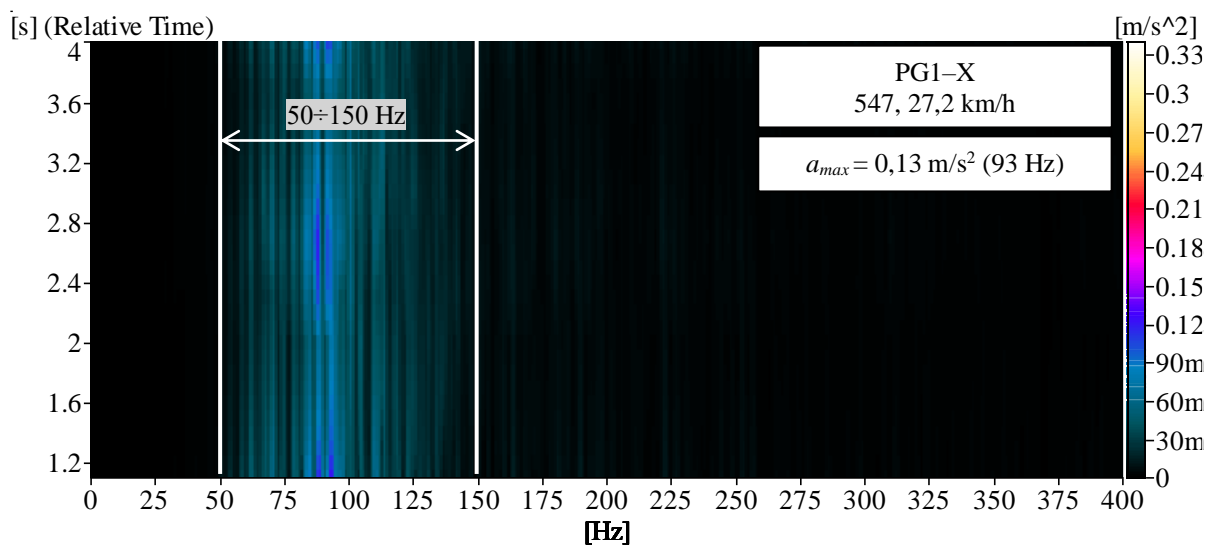
Spektrogramy dla przejazdu z maksymalną prędkością dla punktu PG1 przedstawiono na rysunku 8.11 i 8.12, a dla punktu PG2 na rysunku 8.13 i 8.14. Wyniki dla przejazdu z minimalną prędkością dla punktów PG1 na rysunku 8.15 i 8.16, a dla punktu PG2 na rysunku 8.17 i 8.18.

Jak przedstawiono na rysunku 8.11 i 8.12, główny zakres pobudzanych częstotliwości drgań w punkcie PG1–Z wynosił 50–225 Hz, a w punkcie PG1–X 50–150 Hz. W spektrogramie z punktu PG1–Z wyróżnić można zakres 60–75 Hz, w którym zawierały się największe obserwowane amplitudy przyspieszeń drgań. W przypadku punktu PG1–X największe amplitudy drgań dotyczyły zakresu 80–100 Hz. Wartość maksymalna przyspieszeń

drgań w punkcie PG1–Z wynosiła  $0,34 \text{ m/s}^2$  i dotyczyła częstotliwości 67 Hz. Wartość maksymalna dla punktu PG1–X była o około 62% ( $0,13 \text{ m/s}^2$ ) mniejsza i dotyczyła częstotliwości 93 Hz.

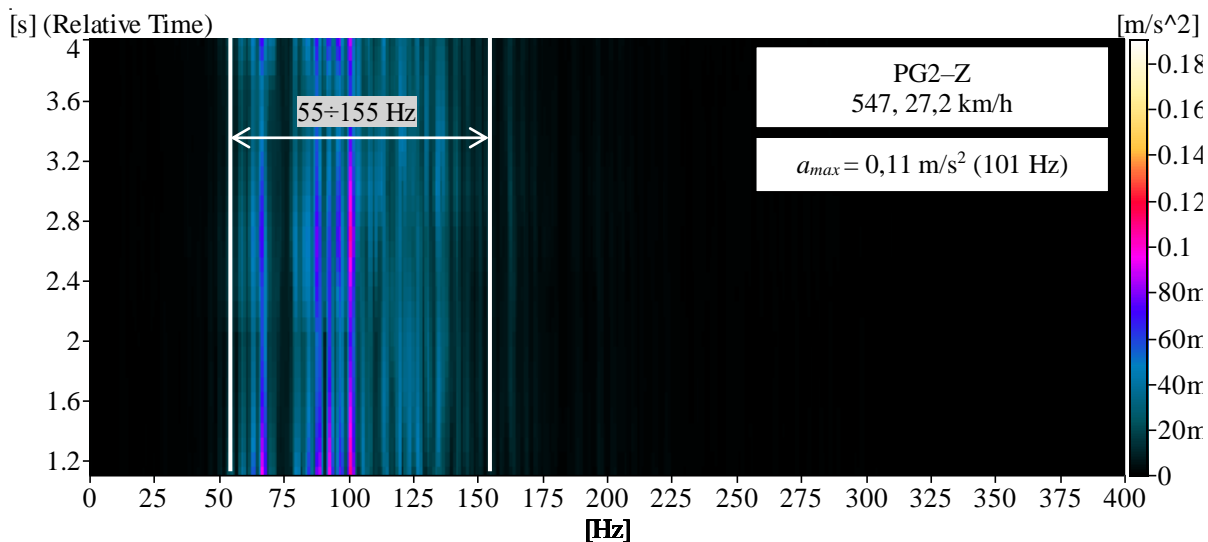


Rys. 8.11. Spektrogram sygnału z punktu PG1–Z dla przejazdu tramwaju 547 z prędkością 27,2 km/h

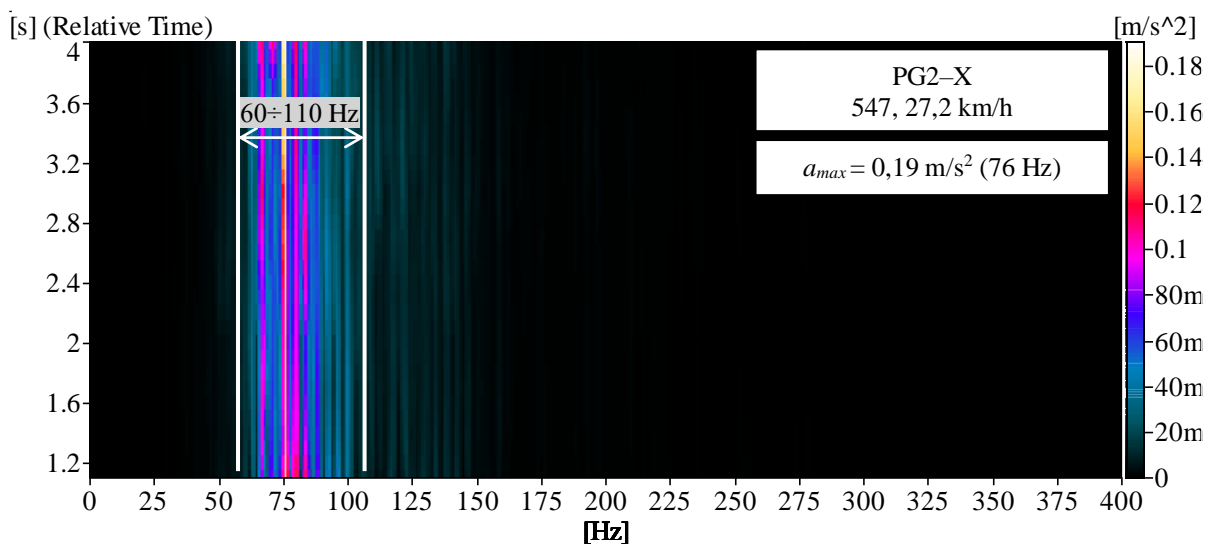


Rys. 8.12. Spektrogramy sygnałów z punktów PG1–X dla przejazdu tramwaju 547 z prędkością 27,2 km/h

W przypadku punktu PG2 (rys. 8.13 i 8.14), główny zakres pobudzanych częstotliwości drgań dla kierunku Z wynosił 55–155 Hz, a dla kierunku X wynosił 60–110 Hz. W spektrogramie z punktu PG2–Z wyróżnić można zakres 85–105 Hz, w którym zawierały się największe obserwowane amplitudy przyspieszeń drgań. W przypadku punktu PG2–X największe amplitudy drgań dotyczyły zakresu 75–85 Hz. Wartość maksymalna przyspieszeń drgań w punkcie PG2–Z wynosiła  $0,11 \text{ m/s}^2$  i dotyczyła częstotliwości 101 Hz. Wartość maksymalna dla punktu PG2–X była o około 42% ( $0,19 \text{ m/s}^2$ ) większa i dotyczyła częstotliwości 76 Hz.



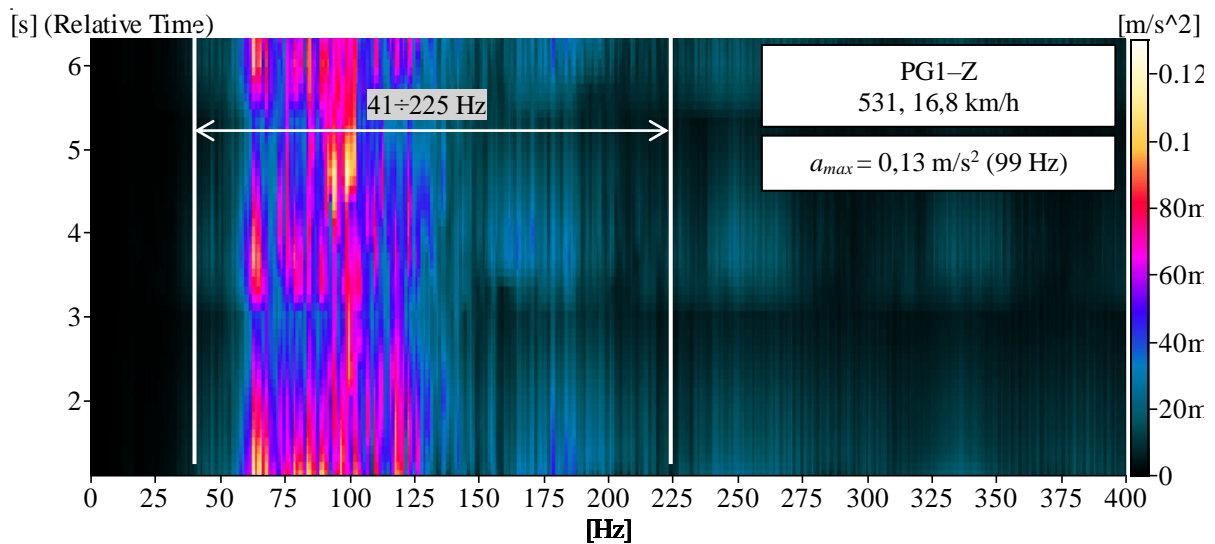
Rys. 8.13. Spektrogram sygnału z punktu PG2-Z dla przejazdu tramwaju 547 z prędkością 27,2 km/h



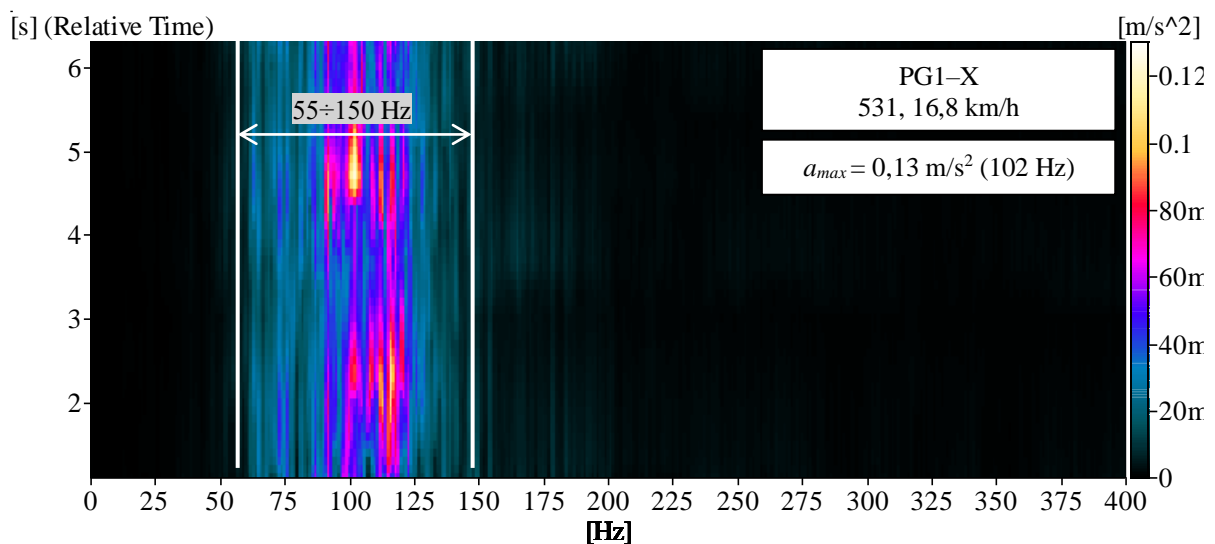
Rys. 8.14. Spektrogram sygnału z punktu PG2-X dla przejazdu tramwaju 547 z prędkością 27,2 km/h

Jak przedstawiono na rysunku 8.15 i 8.16, główny zakres pobudzanych częstotliwości drgań w punkcie PG1-Z wynosił 41–225 Hz, a w punkcie PG1-X wynosił 55–150 Hz. W spektrogramie z punktu PG1-Z wyróżnić można zakres 60–127 Hz, w którym zawierały się największe obserwowane amplitudy przyspieszeń drgań. W przypadku punktu PG1-X największe amplitudy drgań dotyczyły zakresu 90–120 Hz. Wartości maksymalne przyspieszeń drgań w punkcie PG1-Z i PG1-X wynosiły 0,34 m/s<sup>2</sup> i dotyczyły częstotliwości odpowiednio 99 Hz i 102 Hz.



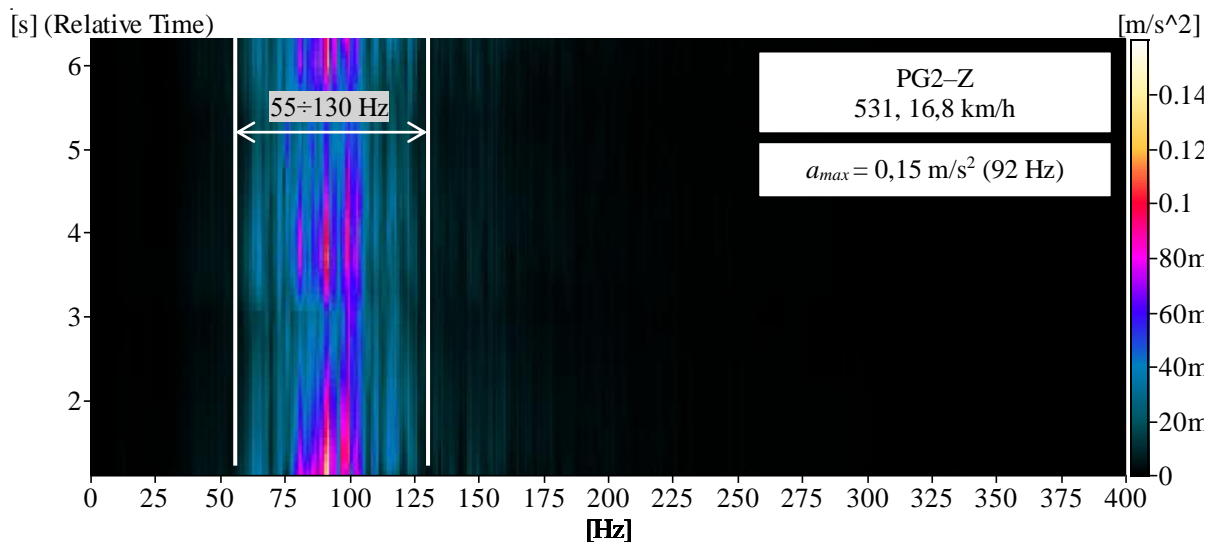


Rys. 8.15. Spektrogram sygnału z punktów PG1–Z dla przejazdu tramwaju 531 z prędkością 16,8 km/h

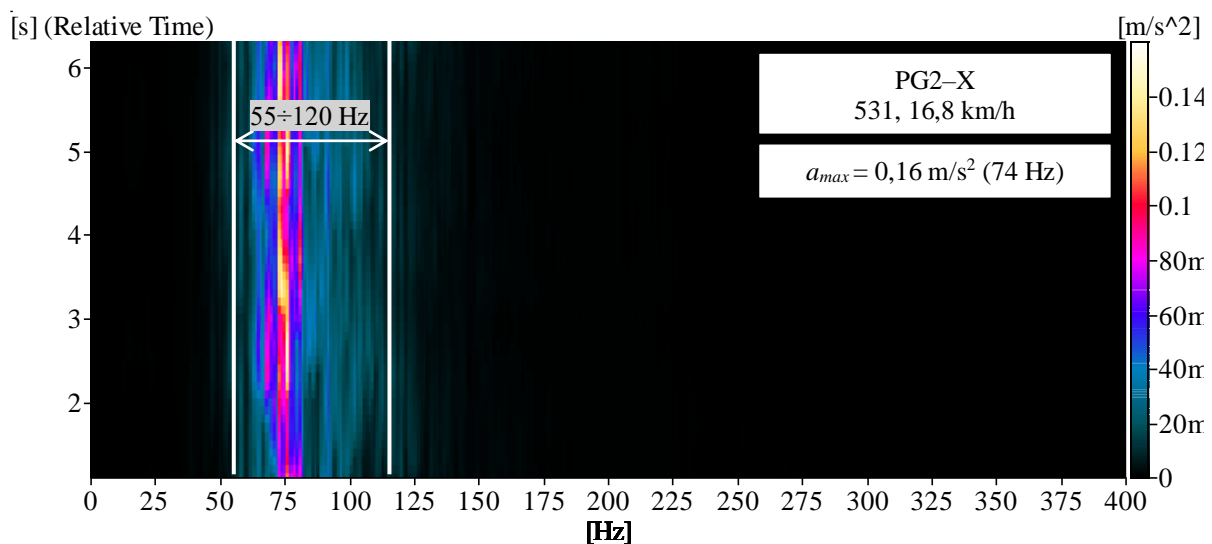


Rys. 8.16. Spektrogramy sygnałów z punktów PG1–X dla przejazdu tramwaju 531 z prędkością 16,8 km/h

Jak przedstawiono na rysunku 8.17 i 8.18, główny zakres pobudzanych częstotliwości drgań w punkcie PG2–Z wynosił 55–130 Hz, a w punkcie PG2–X 55–120 Hz. W spektrogramie z punktu PG2–Z wyróżnić można zakres 60–127 Hz w którym zawierały się największe obserwowane amplitudy przyspieszeń drgań. W przypadku punktu PG2–Z największe amplitudy drgań dotyczyły zakresu 90–120 Hz. Wartość maksymalna przyspieszeń drgań w punkcie PG2–Z wynosiła 0,15 m/s<sup>2</sup> i dotyczyła częstotliwości 92 Hz. Wartość maksymalna dla punktu PG2–X była o około 5% (0,16 m/s<sup>2</sup>) większa i dotyczyła częstotliwości 74 Hz.



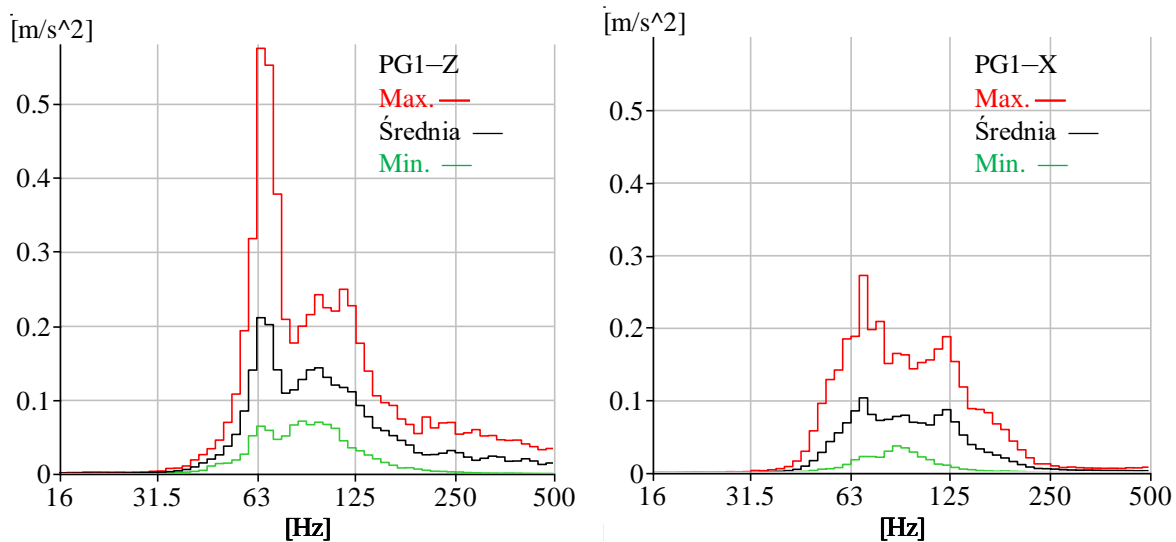
Rys. 8.17. Spektrogramy sygnałów z punktów PG2–Z dla przejazdu tramwaju 531 z prędkością 16,8 km/h



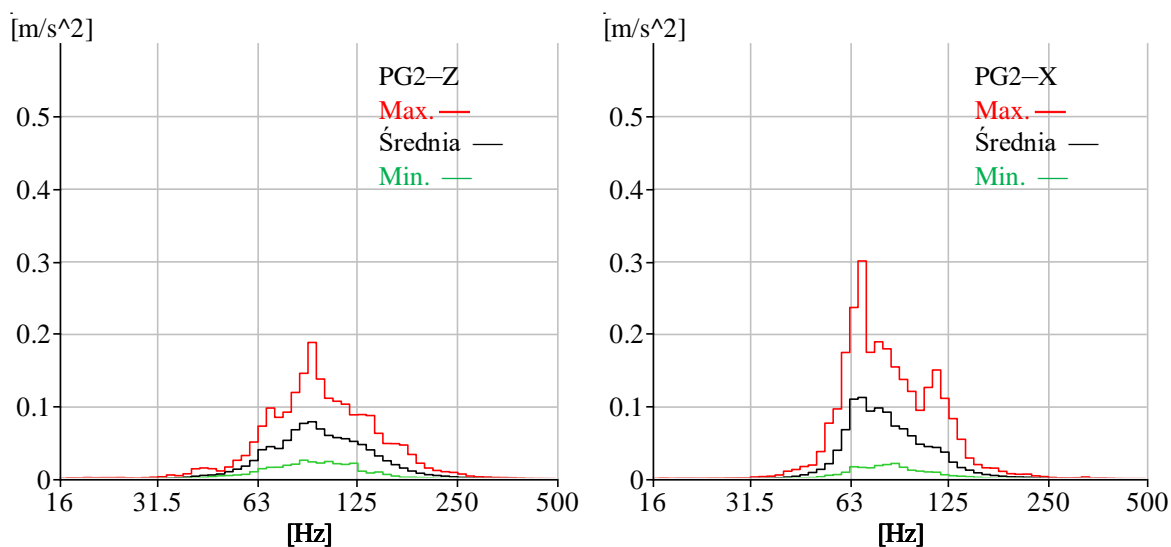
Rys. 8.18. Spektrogramy sygnałów z punktów PG2–X dla przejazdu tramwaju 531 z prędkością 16,8 km/h

Następnie dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów przeprowadzono analizę CPB w paśmie 1/12 oktawy. Dla każdego punktu pomiarowego obliczono maksymalne, średnie i minimalne widmo CPB. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 8.19 dla punktów PG1–Z i PG1–X oraz na rysunku 8.20 dla punktów PG2–Z i PG2–X. Zgodnie z wynikami przedstawionymi na rysunku 8.19 i 8.20, dla wszystkich punktów pomiarowych, górną granicę zakresu generowanych częstotliwości stanowiła 1/12 oktawy o częstotliwości środkowej 145,4 Hz. Jednak jak wskazują wyniki zarejestrowane w punkcie PG1–Z, można zaobserwować generowane drgania w wyższych pasmach 1/12 oktawy.

Przedstawione analizy STFT dla punktów PG1 i PG2 wskazują, że najszerszy zakres częstotliwości charakteryzujący przejazdy ze skrajnymi prędkościami wynosi 41–225 Hz dla punktu PG1 i 55–155 Hz dla punktu PG2.



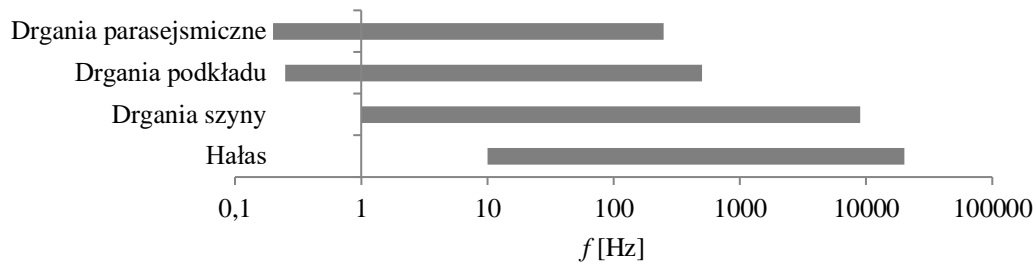
Rys. 8.19. Obliczone maksymalne, średnie i minimalne widma CPB 1/12 oktawy dla punktu pomiarowego PG1-Z i PG1-X



Rys. 8.20. Obliczone maksymalne, średnie i minimalne widma CPB 1/12 oktawy dla punktu pomiarowego PG2-Z i PG2-X

Ostatecznie, na podstawie wykonanych analiz zdefiniowano zakres analizowanych częstotliwości do 250 Hz w celu uwzględnienia drgań niskoczęstotliwościowych oraz częstotliwości związanych z hałasem strukturalnym.

Częstotliwości zjawisk wibroakustycznych uwzględnionych w analizach sygnałów zestawiono w rysunku 8.21.



Rys. 8.21. Zestawienie zakresów częstotliwości zjawisk wibroakustycznych uwzględnionych w analizach sygnałów

Zakresy przyjętych częstotliwości znajdują swoje potwierdzenie w licznych opracowaniach literaturowych na przykład [42, 201, 236, 262, 264].

## 8.2. Podatność dynamiczna torowiska

Zjawiska dynamiczne w układzie pojazd szynowy – torowisko zależą zarówno od właściwości mechanicznych pojazdu jak i torowiska. Obserwacja zjawisk wibroakustycznych będących konsekwencją ich oddziaływań, jak również ich prawidłowa interpretacja możliwa jest przy założeniu, że właściwości dynamiczne torowiska nie uległy zmianie podczas obserwacji. Zmiany te mogą wpływać na obserwowane zjawiska szczególnie w obszarze drgań parasejsmicznych, które reprezentują energię drgań dysypowaną poprzez poszczególne elementy torowiska [45, 200, 262].

Zbadano właściwości dynamiczne torowiska przed przystąpieniem do pomiarów wibroakustycznych tramwajów (pierwszy pomiar) i po ich zakończeniu (drugi pomiar). Celem była identyfikacja podatności dynamicznej torowiska, w postaci możliwych odpowiedzi obiektu na zadane wymuszenie [37, 38, 56, 284, 285]. Wykorzystano jedną z wielu metod eksperymentalnych – metodę identyfikacji prostej tak zwany test impulsowy. Test ten polegał na pobudzeniu obiektu siłą impulsową o charakterze zbliżonym do impulsu Diraca. Wymuszenie realizowano uderzając młotkiem modalnym w główkę szyny nad podkładem z jednoczesnym pomiarem sił i odpowiedzi w postaci przyspieszeń drgań parasejsmicznych.

Uzyskane wyniki przetransformowano z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości z wykorzystaniem analizy FFT [228]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-i2\pi kn/N_p} \quad (8.3)$$

gdzie:

$X[k]$  – wartość transformaty FFT dla  $k$ -tej częstotliwości w sygnale (amplituda, faza, liczba zespolona),

- $N_p$  – liczba próbek sygnału,
- $n$  – próbka sygnału,
- $x$  – wartość sygnału [m/s<sup>2</sup>]
- $k$  – bieżąca częstotliwość (od 0 Hz do  $N-1$  Hz).

Analizę FFT przeprowadzono z wykorzystaniem okna czasowego typu przejściowego (ang. *transient*). Celem wykonanego testu impulsowego i analiz było uzyskanie charakterystyk inertancji  $A(\omega)$  jako wyniku częstotliwościowej funkcji przejścia FRF (ang. *Frequency Response Function*) wyrażonej przez stosunek sygnału wyjściowego w postaci widma przyspieszeń drgań  $a(\omega)$  do sygnału wejściowego w postaci widma siły  $F(\omega)$ , jak poniżej [56, 68]:

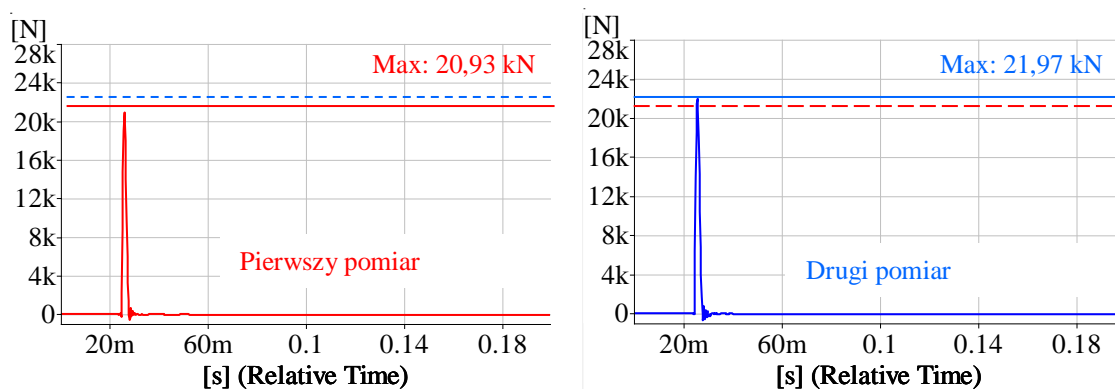
$$A(\omega) = \frac{a(\omega)}{F(\omega)} \quad (8.4)$$

gdzie:

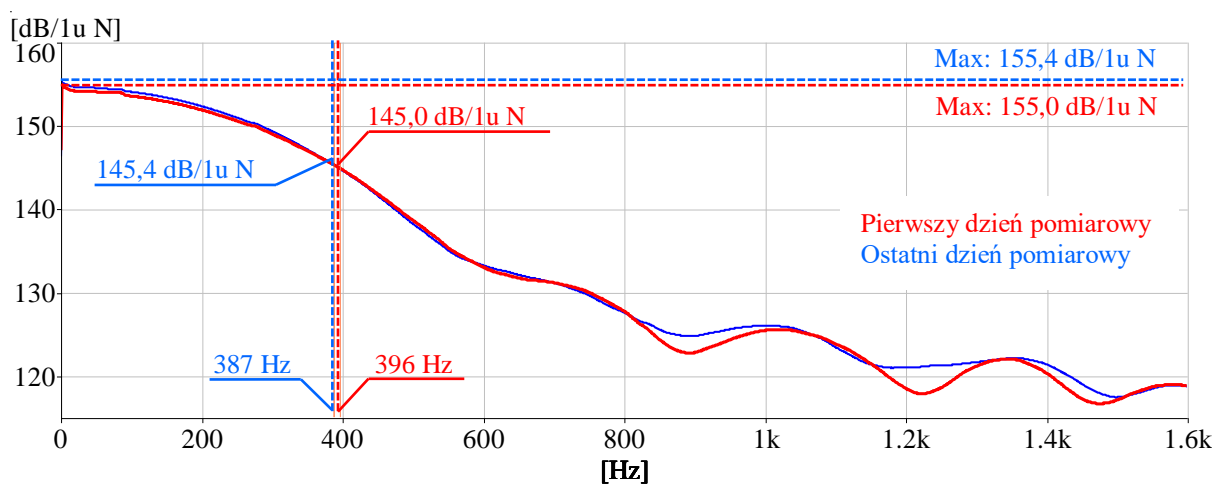
- $A(\omega)$  – charakterystyka inertancji [N/ms<sup>-2</sup>]
- $a(\omega)$  – odpowiedź obiektu na wymuszenie w postaci widma FFT przyspieszeń drgań [m/s<sup>2</sup>],
- $F(\omega)$  – sygnał wymuszający w postaci widma FFT siły [N].

Uzyskano charakterystyki inertancji dla punktów pomiaru drgań na powierzchni gruntu PG1–Z, PG1–X, PG2–Z, PG2–X. Analizę porównawczą właściwości dynamicznych torowiska rozpoczęto od wyznaczenia zakresu częstotliwości uwzględnionej w badaniach porównawczych widm odpowiedzi częstotliwościowej FRF torowiska. W tym celu przebadano pobudzany zakres częstotliwości przy wymuszeniach młotkiem modalnym.

Wyznaczono uśrednione przebiegi czasowe sił ze realizowanych 50 wymuszeń dla obu pomiarów. W analizach uwzględniono sygnały sił, których wartość osiągnęła lub przekroczyła 5 kN i przedstawiono je na rysunku 8.22. Wyniki analiz dla pozostałych punktów zestawiono w załączniku nr 2. Uzyskane uśrednione wartości sił w obu pomiarach są do siebie zbliżone na poziomie 95%. Następnie sprawdzono przebiegi widm sił z poszczególnych wymuszeń z obu pomiarów przy użyciu analizy FFT. Założono, że górna granica zakresu częstotliwości dla dalszych analiz FRF wyznacza częstotliwość, dla której wartości siły jest mniejsza o 10 dB od największej wartości zarejestrowanej w widmie. Wyniki przedstawione na rysunku 8.23, wskazują, że górna granica analiz wynosi 387 Hz, przez co możliwe było zachowanie spójności warunków brzegowych analizy w obu przypadkach.



Rys. 8.22. Uśredniony przebieg czasowy sygnału siły wymuszenia w pierwszym i ostatnim dniu pomiarowym



Rys. 8.23. Uśrednione widma sygnałów siły wymuszeń

Ostatecznie analiza FRF zarejestrowanych sygnałów dotyczyła zakresu częstotliwości do 400 Hz, ze względu na funkcjonalność oprogramowania do analizy danych BK Connect [27] dotycząca możliwych zakresów częstotliwości analizy.

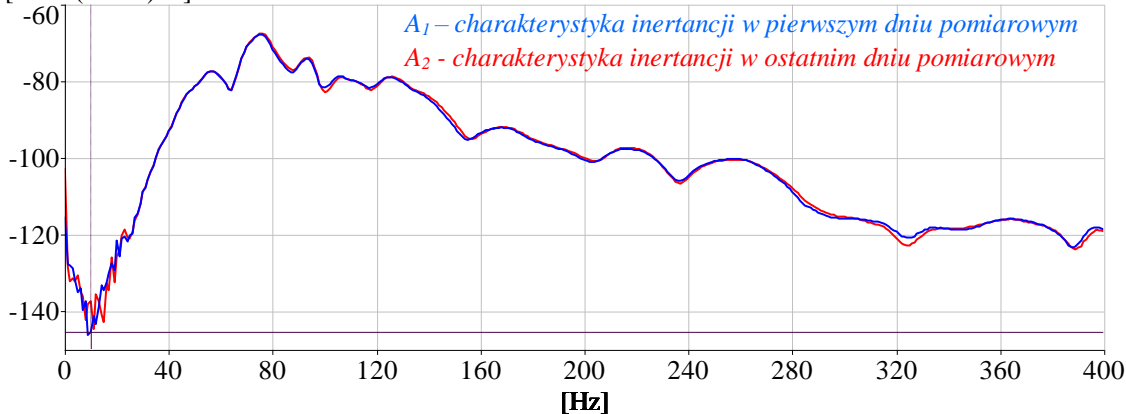
Na rysunku 8.24 przedstawiono wybraną analizę FRF dotyczącą punktu PG4–X jako najniekorzystniejszego przypadku w obserwacjach pod względem identyfikacji zakresu częstotliwości w analizach. Te scharakteryzowano szerokością pasma ograniczoną częstotliwościami odcięcia  $f_1$  i  $f_2$  wyznaczone przez asymptotę znajdującą się 3 dB poniżej wartości amplitudy rozpatrywanej częstotliwości (rys. 8.25). Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 8.1.

Współczynnik korelacji Pearsona  $r_{(A_1, A_2)}$  pomiędzy analizowanymi charakterystykami inertancji (z pomiaru pierwszego i ostatniego w punkcie pomiarowym PG4–X) z funkcji FRF (rys. 8.24) wynosił 0,99, co świadczy o bardzo silnej zależności badanych charakterystyk. Jak przedstawiono w tabeli 8.1, maksymalne przesunięcie pomiędzy zidentyfikowanymi częstotliwościami wynosiło 1 Hz, co ma swoje odzwierciedlenie w rozdzielczości widma. Maksymalna różnica w wartości tłumienia wynosiła 1,1%.

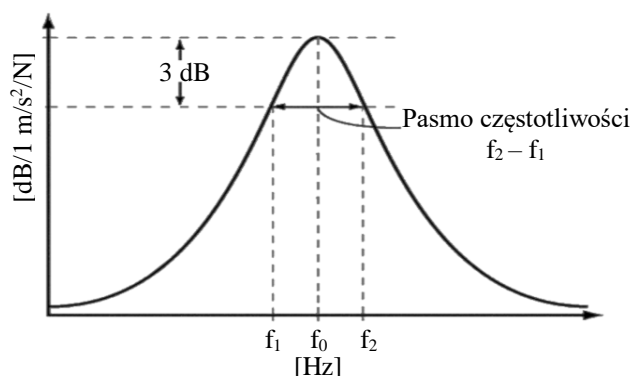
PG4-X pierwszy dzień pomiarowy (czerwony)

PG4-X ostatni dzień pomiarowy (niebieski)

[dB/1 (m/s<sup>2</sup>)/N]



Rys. 8.24. Porównanie charakterystyk inercyjności w punkcie PG4-X dla pierwszego i ostatniego dnia pomiarowego



Rys. 8.25. Identyfikacja charakterystycznych częstotliwości w widmie FRF

Tabela 8.1. Zestawienie głównych częstotliwości z charakterystyk inercyjności i ich współczynniki tłumienia w punkcie PS4-X

PG4-X				Max Δ	
Pierwszy dzień pomiarowy		Ostatni dzień pomiarowy		współczynnik tłumienia ξ[%]	
f [Hz]	współczynnik tłumienia ξ1 [%]	f [Hz]	współczynnik tłumienia ξ2 [%]	f [Hz]	ξ [%]
10	10,5	nd	nd	1,0	1,1
12	7,5	11*	nd		
18	2,9	18	3,2		
56	9	56	9		
76	6,1	75	6,1		
94	4,3	93	4		
106	6,9	106	8		
126	5,7	125*	nd		
168	6,8	168	6,8		
217	4,8	216	5,2		
258	5,4	258	5,4		
364	6,6	364	6,7		

Wśród częstotliwości niezidentyfikowanych w ostatnim dniu pomiarowym są 10 Hz, 11 Hz i 125 Hz. Były one, poza częstotliwością 10 Hz, charakteryzowane jako częstotliwości

rezonansowe, jednak nie spełniały kryterium szerokości pasma 3 dB. W przypadku pozostałych punktów pomiarowych PG1–Z, PG1–X oraz PG2–Z, współczynnik korelacji Pearsona charakterystyk inertancji wynosił 0,99 i oznaczał bardzo silną korelację danych. Maksymalne przesunięcie w częstotliwości wynosiło 2 Hz, poza jednostkowym przypadkiem 8 Hz dla punktu PG1–Z.

### **8.3. Podsumowanie rozdziału 8**

Przedstawione analizy umożliwiły wyznaczenie zakresu częstotliwości rzeczywistych oddziaływań występujących podczas przejazdów tramwajów. Zakresy te są zgodne ze źródłami literaturowymi. Uzyskane informacje posłużą do określenia górnych granic filtrów pasmowo-przepustowych w dalszych analizach poszczególnych sygnałów wibroakustycznych.

Analizy podatności dynamicznej torowiska wskazują na zachowanie zbliżonych charakterystyk inertancji torowiska w analizowanym przekroju pomiarowym przed przystąpieniem do pomiarów jak i po ich przeprowadzeniu. Uwzględniając uzyskane charakterystyki inertancji oraz okres prowadzenia badań wynoszący dziewięć dni, pominięto wpływ zmiany dynamiki torowiska i właściwości gruntu na uzyskane wyniki.

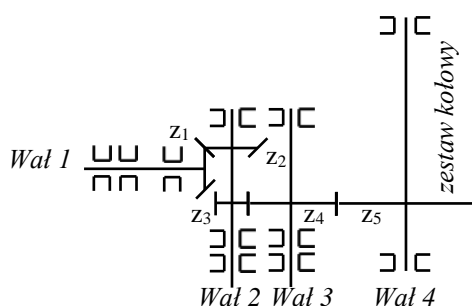


## 9. DETEKCCJA NIEZDATNOŚCI PRZEKŁADNI TRAKCYJNEJ I POWIERZCHNI TOCZNYCH KÓŁ

### 9.1. Detekcja niezdatności przekładni trakcyjnej tramwaju

Realizację badań wibroakustycznych rozpoczęto od detekcji niezdatności, których wystąpienie w czasie eksploatacji prowadzi do generowania nadmiernych zjawisk wibroakustycznych w otoczeniu tramwaju. Do niezdatności tych zaliczono uszkodzenie przekładni trakcyjnej oraz wystąpienie płaskich miejsc na powierzchniach toczyń kół. Niezdatności te określono również w niniejszej pracy jako stany awaryjne w eksploatacji tramwajów.

Analizy rozpoczęto od detekcji niezdatności przekładni trakcyjnej tramwaju. Zgodnie z dokumentacją techniczną tramwaju Solaris Tramino S105p [178] zastosowane przekładnie (reduktory) są dwustopniowe. Schemat kinematyczny przekładni został przedstawiony na rysunku 9.1.



Rys. 9.1. Schemat kinematyczny przekładni tramwaju Solaris Tramino S105p

Wyliczenie charakterystycznych częstotliwości pracy przekładni wymagało znajomości częstotliwości zazębienia poszczególnych kół zębatych. Obliczono je przyjmując za dane wejściowe częstotliwości obrotowe zestawu kołowego. Częstotliwości te obliczono dla dwóch skrajnych średnic kół, czyli nominalnej  $d_{k\_nom} = 0,62$  m i granicznej  $d_{k\_gran} = 0,54$  m oraz dla dwóch skrajnych prędkości jazdy tramwaju uwzględnionych w analizach, czyli  $V_{min} = 16,8$  km/h i  $V_{max} = 27,2$  km/h. Częstotliwości te obliczono zgodnie z poniższymi równaniami:

$$f_{k\_min\_nom} = \frac{V_{min}}{3,6 \cdot \pi \cdot d_{k\_nom}} \quad (9.1)$$

gdzie:

$f_{k\_min\_nom}$  – częstotliwość obrotowa zestawu kołowego dla minimalnej prędkości przejazdu w badaniach i dla przypadku nominalnej średnicy koła [Hz],

$V_{min}$  – minimalna prędkość jazdy tramwaju uwzględniona w badaniach [km/h],

$dk_{nom}$  – nominalna średnica koła [m].

$$f_{k_{max\_gran}} = \frac{V_{max}}{3,6 \cdot \pi \cdot dk_{gran}} \quad (9.2)$$

gdzie:

$f_{k_{max\_gran}}$  – częstotliwość obrotowa zestawu kołowego dla maksymalnej prędkości przejazdu w badaniach i dla przypadku granicznej średnicy koła [Hz],

$V_{max}$  – maksymalna prędkość jazdy tramwaju uwzględniona w badaniach [km/h],

$dk_{gran}$  – graniczna średnica koła [m].

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 9.1.

Tabela 9.1. Wyniki obliczeń skrajnych częstotliwości obrotowych kół

Skrajne prędkości jazdy tramwaju	Średnica koła nominalna $dk_{nom} = 0,62$ m	Średnica koła graniczna $dk_{gran} = 0,54$ m
$V_{min} = 16,8$ km/h	$f_{k_{min\_nom}} = 2,40$ Hz	
$V_{max} = 27,2$ km/h		$f_{k_{max\_gran}} = 4,45$ Hz

Zgodnie z uzyskanymi wynikami częstotliwości obrotowe zestawu kołowego w przedziale  $F_k \in \langle f_{k_{min\_nom}}; f_{k_{max\_gran}} \rangle$  stanowią dane wejściowe do obliczeń częstotliwości zazębienia na poszczególnym wale przekładni trakcyjnej. Charakterystyczne częstotliwości pracy przekładni dla skrajnych przypadków prędkości i średnicy kół obliczono zgodnie z równaniami:

$$f_{0\_wał\_nom\_m} = i_{c\_wał\_m} \cdot f_{k_{min\_nom}} \quad (9.3)$$

$$f_{0\_wał\_gran\_m} = i_{c\_wał\_m} \cdot f_{k_{max\_gran}} \quad (9.4)$$

$$f_{zk\_nom\_i-j} = Z_i \cdot f_{0\_wał\_nom\_m} \quad (9.5)$$

$$f_{zk\_gran\_i-j} = Z_i \cdot f_{0\_wał\_gran\_m} \quad (9.6)$$

gdzie:

$f_{0\_wał\_nom\_m}$  – częstotliwość obrotowa  $m$ -tego wału dla nominalnej średnicy koła [Hz],

$f_{0\_wał\_gran\_m}$  – częstotliwość obrotowa  $m$ -tego wału dla granicznej średnicy koła [Hz],

$f_{zk\_nom\_i-j}$  – częstotliwość zazębienia  $i$ -tego i  $j$ -tego koła zębatego dla nominalnej średnicy koła [Hz],

$f_{zk\_gran\_i-j}$  – częstotliwość zazębienia  $i$ -tego i  $j$ -tego koła zębatego dla granicznej średnicy koła [Hz],

$i_{c\_wał\_m}$  – całkowite przełożenie na  $m$ -tym wału,

$z_m$  – liczba zębów  $m$ -tego wału.

Liczba zębów poszczególnych kół zębatych wynosiła:

- pierwsze koło zębate:  $z_1 = 14$ ,
- drugie koło zębate:  $z_2 = 27$ ,
- trzecie koło zębate:  $z_3 = 19$
- czwarte koło zębate:  $z_4 = 51$ ,
- piąte koło zębate:  $z_5 = 66$ .

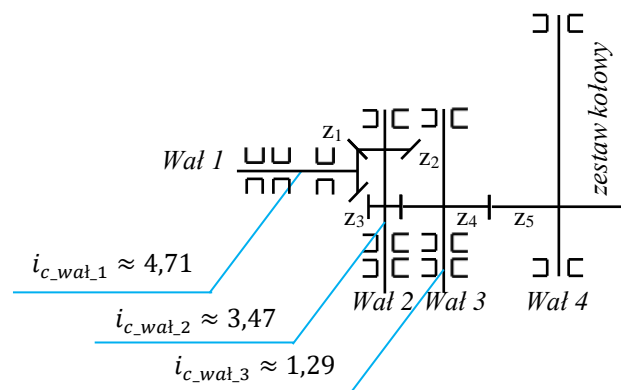
Całkowite przełożenie poszczególnego wału obliczono zgodnie z poniższymi równaniami:

$$i_{c\_wał\_1} = \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_5}{z_4} \quad (9.7)$$

$$i_{c\_wał\_2} = \frac{z_4}{z_3} \cdot \frac{z_5}{z_4} \quad (9.8)$$

$$i_{c\_wał\_3} = \frac{z_5}{z_4} \quad (9.9)$$

Wyniki obliczeń całkowitego przełożenia poszczególnych wałów przedstawiono na rysunku 9.2.



Rys. 9.2. Całkowite przełożenie poszczególnych wałów na tle schematu kinematycznego przekładni trakcyjnej tramwaju Solaris Tramino S105p

Możliwe zakresy częstotliwości obrotowych poszczególnych wałów  $F_{0\_wał\_m}$  w zależności od skrajnych prędkości zdefiniowano następująco:

$$F_{0\_wał\_m} = \langle f_{0\_wał\_nom\_m}, f_{0\_wał\_gran\_m} \rangle \quad (9.10)$$

gdzie:

$F_{0\_wał\_m}$  – przedział częstotliwości obrotowych  $m$ -tego wału,

Zgodnie z równaniem (32) częstotliwości obrotowe poszczególnych wałów w zależności od skrajnych prędkości mieszczą się w następujących zakresach:

- pierwszy wał:  $F_{0\_wał\_1} = \langle 16,08 \text{ Hz}; 29,81 \text{ Hz} \rangle$ ,
- drugi wał:  $F_{0\_wał\_2} = \langle 8,34 \text{ Hz}; 15,46 \text{ Hz} \rangle$ ,
- trzeci wał  $F_{0\_wał\_3} = \langle 3,11 \text{ Hz}; 5,76 \text{ Hz} \rangle$ .

Możliwe częstotliwości zazębienia poszczególnych wałów  $F_{z\_k\_i-j}$  w zależności od skrajnych prędkości zdefiniowano w następującym zakresie:

$$F_{z\_k\_i-j} = \langle f_{zk\_nom\_i-j}; f_{zk\_gran\_i-j} \rangle \quad (9.11)$$

gdzie:

$F_{z\_k\_i-j}$  – przedział częstotliwości zazębienia  $i$ -tego i  $j$ -tego koła zębatego.

Zgodnie z powyższymi równaniami częstotliwości zazębienia poszczególnych par kół zębatach mieszczą się w następujących przedziałach:

- pierwsze i drugie koło zębate:  $F_{z\_k\_1-2} = \langle 225,09 \text{ Hz}; 417,36 \text{ Hz} \rangle$ ,
- trzecie i czwarte koło zębate:  $F_{z\_k\_3-4} = \langle 158,40 \text{ Hz}; 293,70 \text{ Hz} \rangle$ ,
- czwarte i piąte koło zębate:  $F_{z\_k\_4-5} = F_{z\_k\_3-4}$ .

Zakres wszystkich możliwych częstotliwości zazębienia  $F_{UP}$  zdefiniowano następująco:

$$F_{UP} = \langle f_{UP\_1}; f_{UP\_2} \rangle \quad (9.12)$$

gdzie:

$$f_{UP\_1} = \min\{F_{z\_k\_1-2}; F_{z\_k\_3-4}\},$$

$$f_{UP\_2} = \max\{F_{z\_k\_1-2}; F_{z\_k\_3-4}\}.$$

Zgodnie z powyższym równaniem (34), częstotliwości zazębienia poszczególnych par kół zębatach mieszczą się w zakresie  $F_{UP1} = \langle 158,40 \text{ Hz}, 417,36 \text{ Hz} \rangle$ . W obliczeniach założono rozszerzenie granic tego przedziału o 5% zakładając możliwe chwilowe zmiany prędkości jazdy tramwaju, zgodnie z równaniem:

$$F_{UP1r} = \text{ent}(f_{UP\_1} - (f_{UP\_1} \cdot 5\%), f_{UP\_2} + (f_{UP\_2} \cdot 5\%)) \mid F_{UP\_r} \in \mathbb{N} \quad (9.13)$$

gdzie:

$F_{UP1r}$  – rozszerzony zakres częstotliwości zazębienia przekładni trakcyjnej,

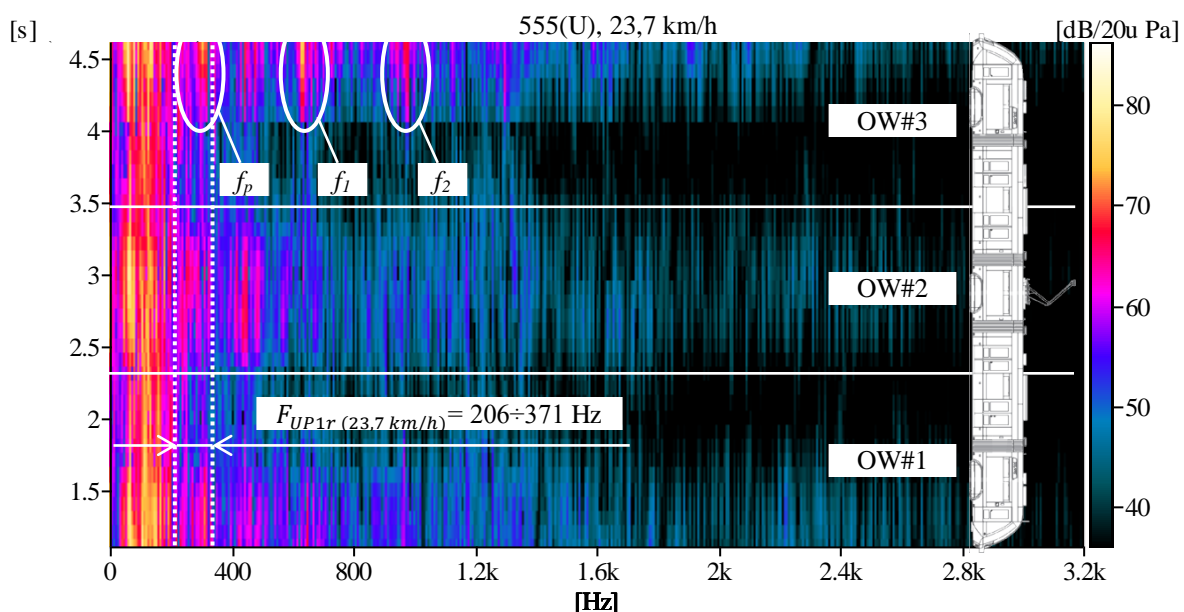
$f_{UP\_1}$  – dolna granica zakresu częstotliwości zazębienia przekładni trakcyjnej,

$f_{UP\_2}$  – górna granica zakresu częstotliwości zazębienia przekładni trakcyjnej.

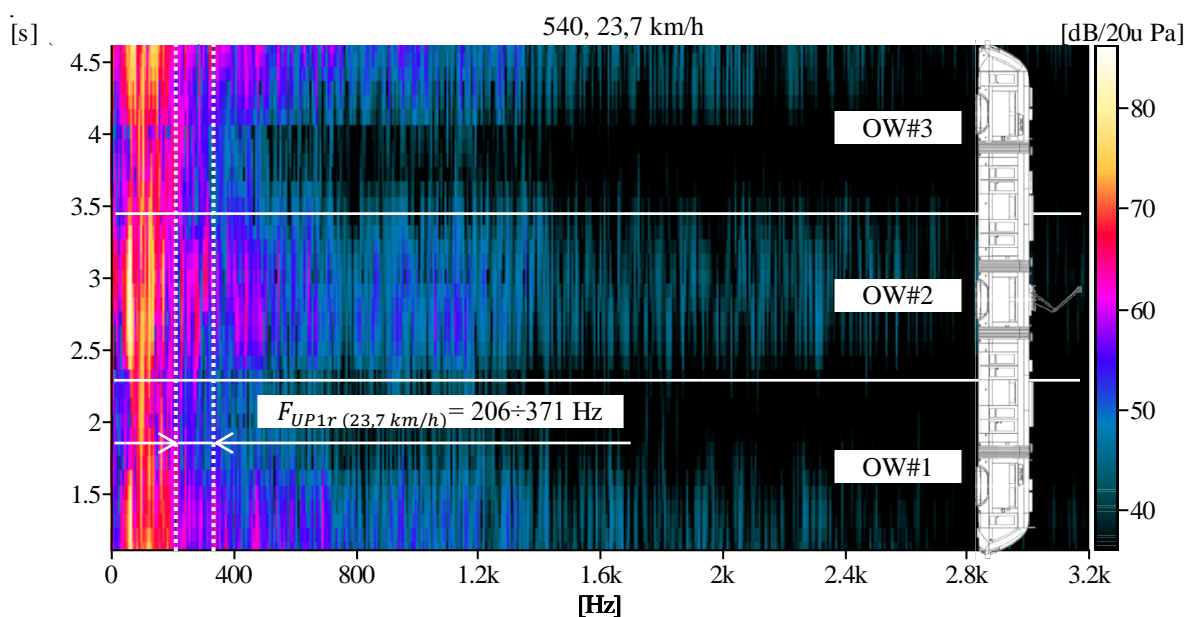
Zgodnie z przedstawionym równaniem (9.13) przyjęto, że częstotliwości zazębienia przekładni trakcyjnej tramwaju Solaris Tramino S105p zawierają się w zakresie  $F_{UP1r} = \langle 150 \text{ Hz}; 438 \text{ Hz} \rangle$ .

W badaniach uszkodzeń przekładni uwzględniono cztery przejazdy tramwajów o znanym stanie technicznym przekładni zidentyfikowanym przy współpracy z eksploatatorem tramwajów. Utworzono dwa zestawienia przejazdów obejmujące tramwaj z uszkodzoną przekładnią i tramwaj bez uszkodzonych przekładni, które poruszały się z tą samą średnią prędkością jazdy. W celu uproszczenia nazewnictwa przyjęto symbol „(U)” przy numerze egzemplarza dla tramwajów z uszkodzoną przekładnią. Pierwszą parę stanowiło zestawienie tramwajów 555(U) i 540 poruszające się ze średnią prędkością 23,7 km/h, a drugą parę tramwaje 519(U) i 526 poruszające się ze średnią prędkością 25,7 km/h. W tramwaju 555(U) stwierdzono uszkodzenie przekładni na ostatnim, trzecim wózku, natomiast w tramwaju 519(U) na pierwszym wózku. W obu przypadkach nastąpiły wykruszenia kół zębatach oraz nieznaczne wycieki oleju. Możliwe częstotliwości podstawowe pracy przekładni wybranych par tramwajów wynoszą  $F_{UP1r(23,7 \text{ km/h})} = \langle 206 \text{ Hz}; 371 \text{ Hz} \rangle$ ,  $F_{UP1r(25,7 \text{ km/h})} = \langle 230 \text{ Hz}; 414 \text{ Hz} \rangle$ .

W celu obserwacji zjawiska dokonano analizy dźwięku z punktu pomiarowego MM5 znajdującego w połowie wysokości matrycy mikrofonowej. W tym celu przeprowadzono analizę STFT w zakresie od 1 Hz do 3,2 kHz. Analizę STFT prowadzono w oparciu o obliczenia numeryczne zgodne z równaniem (8.1). Wyniki dla pierwszej pary tramwajów 555(U) i 540 przedstawiono na rysunku 9.3, a dla drugiej pary 519(U) i 526 na rysunku 9.4.



Rys. 9.3. Spektrogram z przejazdu tramwaju 555(U) z niezdatną przekładnią trakcyjną

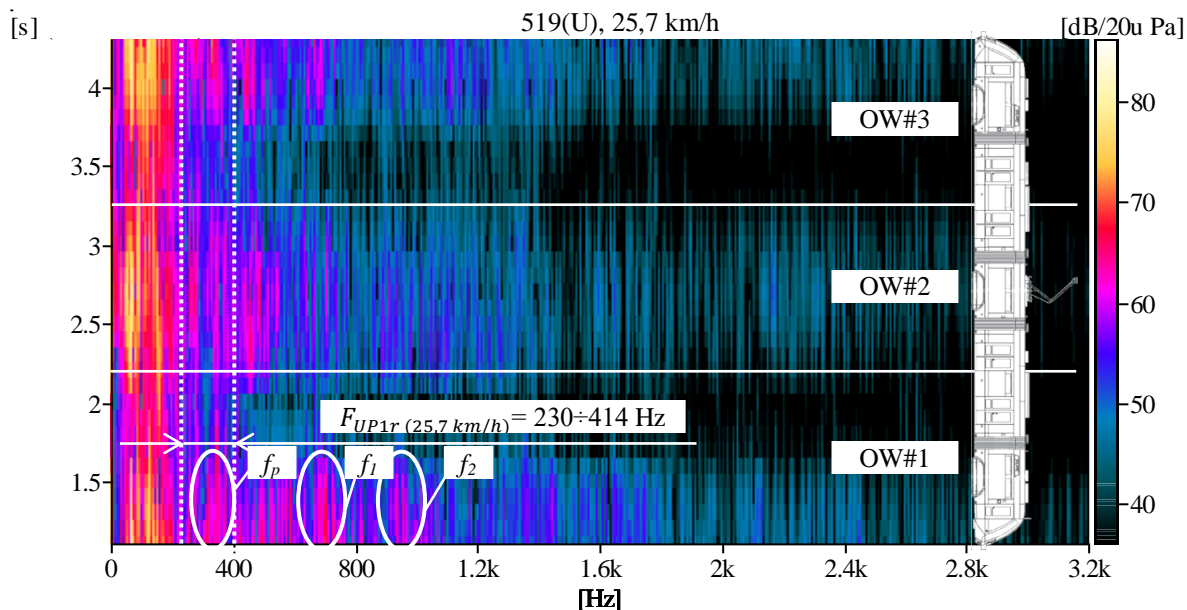


Rys. 9.4. Spektrogram z przejazdu tramwaju 540 ze zdatną przekładnią trakcyjną

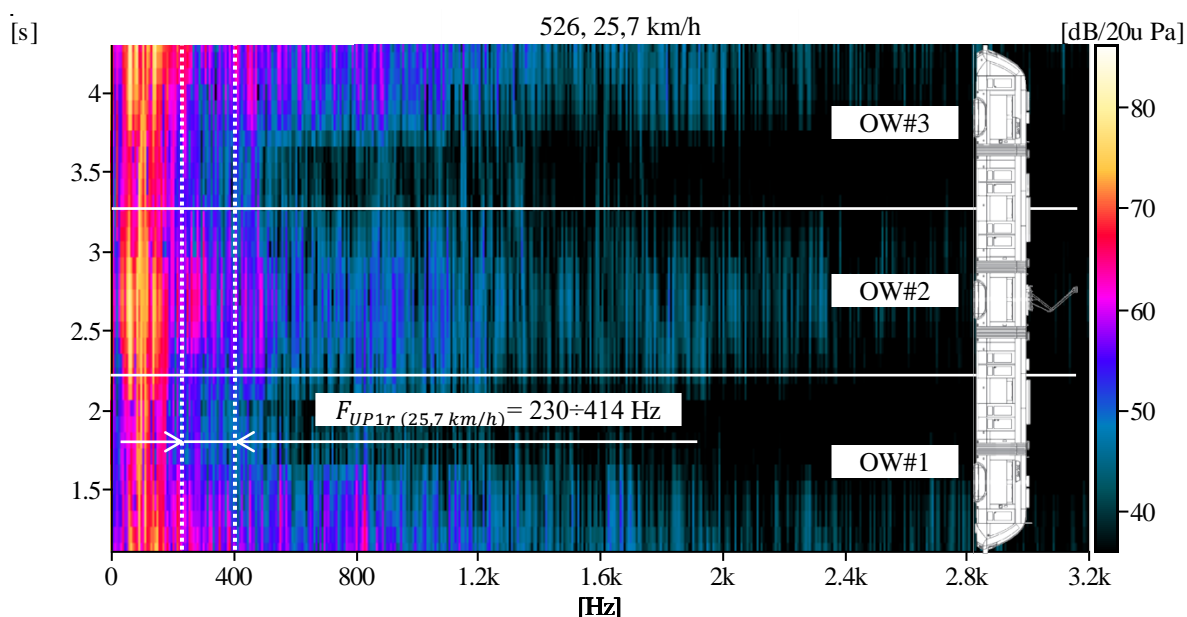
Przyjęto oznaczenia dla obszarów wózków w spektrogramie jako OW#1, OW#2 i OW#3 kolejno dla obszaru wózka pierwszego (nabiegającego), drugiego i trzeciego licząc od czoła pojazdu.

Analizując przebieg spektrogramów na rysunku 9.3, można zauważyć względnie duży poziom dźwięku w OW#3 na poziomie 70–75 dB w zakresie częstotliwości  $f_p = 294\text{--}318 \text{ Hz}$ , który pokrywa się z przyjętym zakresem częstotliwości zazębienia  $F_{UP1r(23,7 km/h)}$ . Poziom ten w OW#1 był mniejszy o 4–5 dB wynosił 59–63 dB. Ponadto zaobserwowano zwiększony poziom dźwięku w przedziałach odpowiadających częstotliwości harmonicznym  $f_1 = 627\text{--}651 \text{ Hz}$  i  $f_2 = 815\text{--}846 \text{ Hz}$ . W porównaniu do wyników dla tramwaju 540 na rysunku 9.4, poziom dźwięku w obu obszarach OW#1 i OW#3 mieścił się w przedziale 63–65 dB.

Analizując przebieg spektrogramów na rysunku 9.5 można zauważyć względnie duży poziom dźwięku na poziomie 64–68 dB w OW#1 w przedziale częstotliwości  $f_p = 316\text{--}371 \text{ Hz}$ , który pokrywa się z przyjętym przedziałem częstotliwości zazębienia  $F_{UP1r(25,7 km/h)}$ . Poziom ten w OW#3 był mniejszy o 5 dB i wynosił od 59–63 dB. Ponadto zaobserwowano zwiększony poziom dźwięku w przedziałach odpowiadających częstotliwości harmonicznych  $f_1 = 695\text{--}751 \text{ Hz}$  i  $f_2 = 917\text{--}1019 \text{ Hz}$ . W porównaniu do wyników dla tramwaju 540 na rysunku 9.6, poziom dźwięku w obu obszarach OW#1 i OW#3 mieścił się w przedziale 54–64 dB.



Rys. 9.5. Spektrogram z przejazdu tramwaju 519(U) z niezdadną przekładnią trakcyjną



Rys. 9.6. Spektrogram z przejazdu tramwaju 526 ze zdadną przekładnią trakcyjną

We wszystkich analizowanych przejazdach w spektrogramach zaobserwowano dźwięk w częstotliwościach zazębienia przekładni, który był zwiększony w przypadku przekładni uszkodzonych o około 8–10 dB w poszczególnej chwili czasowej. Ponadto przejazdy tramwajów z uszkodzoną przekładnią charakteryzowały się pobudzeniem zakresów częstotliwości wokół częstotliwości harmoniczných, czego nie zaobserwowano przy przejazdach tramwajów z przekładnią bez zidentyfikowanych uszkodzeń. Stanowi to wnioski poznawcze i podstawę do opracowania metody detekcji niezdadności przekładni trakcyjnych.

Założono analizę sygnałów akustycznych dla wszystkich punktów pomiarowych matrycy mikrofonowej w trzech zakresach częstotliwości zależnych od średniej prędkości jazdy. Pierwszy zakres częstotliwości  $F_{UP1r}$  obliczane jest zgodnie z równaniem (34), a kolejne dwa zakresy  $F_{UP2r}$  i  $F_{UP3r}$  obliczane są z uwzględnieniem możliwości obserwacji częstotliwości harmonicznych, jak w równaniach:

$$F_{UP2r} = \text{ent}\langle (f_{UP\_1} - (f_{UP\_1} \cdot 5\%) \cdot 2), (f_{UP\_2} + (f_{UP\_2} \cdot 5\%) \cdot 2) \rangle \mid F_{UP2r} \in \mathbb{N} \quad (9.14)$$

$$F_{UP3r} = \text{ent}\langle (f_{UP\_1} - (f_{UP\_1} \cdot 5\%) \cdot 3), (f_{UP\_2} + (f_{UP\_2} \cdot 5\%) \cdot 3) \rangle \mid F_{UP3r} \in \mathbb{N} \quad (9.15)$$

Dla obserwacji różnic pomiędzy poszczególnymi parami wykonano analizę miar punktowych dźwięku w OW#1 i OW#3 w trzech zakresach częstotliwości  $F_{UPr}$ ,  $F_{UP1r}$  i  $F_{UP2r}$ . Celem analizy była estymacja wrażliwego parametru różnicującego pojazdy pod względem zjawisk akustycznych zarejestrowanych z matrycy mikrofonowej. Dla każdego fragmentu sygnału odpowiadającemu obszarom przekładni, czyli OW#1 i OW#3 obliczono równoważny poziom dźwięku z każdego punktu pomiarowego matrycy mikrofonowej ( $L_{eq(MMi)}$ ) zgodnie z równaniem:

$$L_{eq(MMi)} = 10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{p(n)}{p_0} \right)^2 \quad (9.16)$$

gdzie:

$L_{eq(MMi)}$  – poziom równoważny ciśnienia akustycznego dla  $i$ -tego punktu pomiarowego matrycy mikrofonowej ( $i = \langle 1; 9 \rangle$ ) [dB],

$N$  – liczba próbek sygnału,

$n$  – kolejna próbka sygnału,

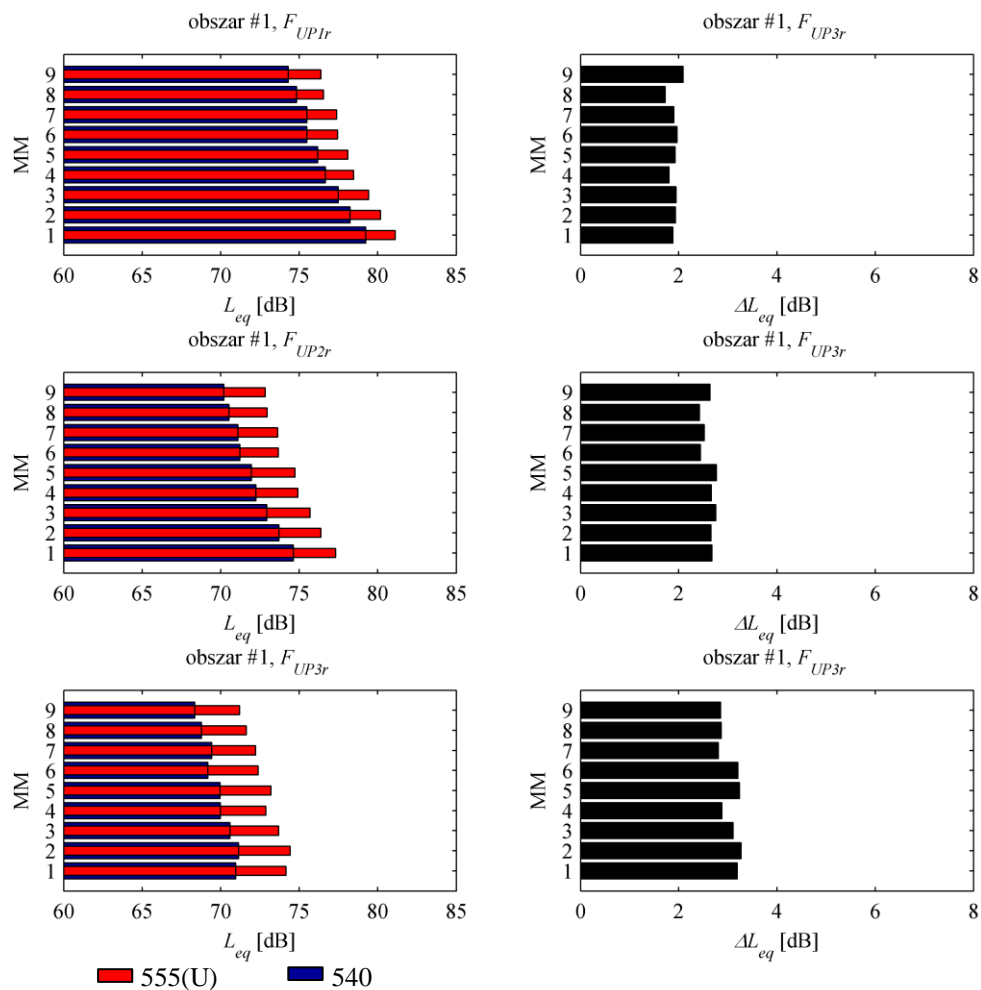
$p(n)$  – zmierzone ciśnienie akustyczne w danej próbce [Pa],

$p_0$  – wartość ciśnienia odniesienia,  $p_0 = 20 \cdot 10^{-5}$  Pa [Pa].

Wyniki dla pierwszej pary pojazdów 555(U) i 540 przedstawiono na rysunku 9.7 dla OW#1 i na rysunku 9.8 dla OW#3, a dla drugiej pary 519(U) i 526 na rysunku 9.9 dla OW#1 i na rysunku 9.10 dla OW#3.

Jak wynika z rysunku 9.7, w przypadku pierwszej pary tramwajów poziom równoważny ciśnienia akustycznego w OW#1 we wszystkich punktach pomiarowych i zakresach częstotliwości był zawsze większy dla tramwaju 555(U) z niezdatną przekładnią. W przypadku analizy OW#1, największe różnice zaobserwowano w zakresach częstotliwości  $F_{UP2r}$  i  $F_{UP3r}$ . W zakresie  $F_{UP2r}$  różnica pomiędzy przejazdami uwzględnionych tramwajów wynosiła od 2,4 dB w punktach MM6 i MM8 do 2,7 dB w punktach MM3 i MM5.

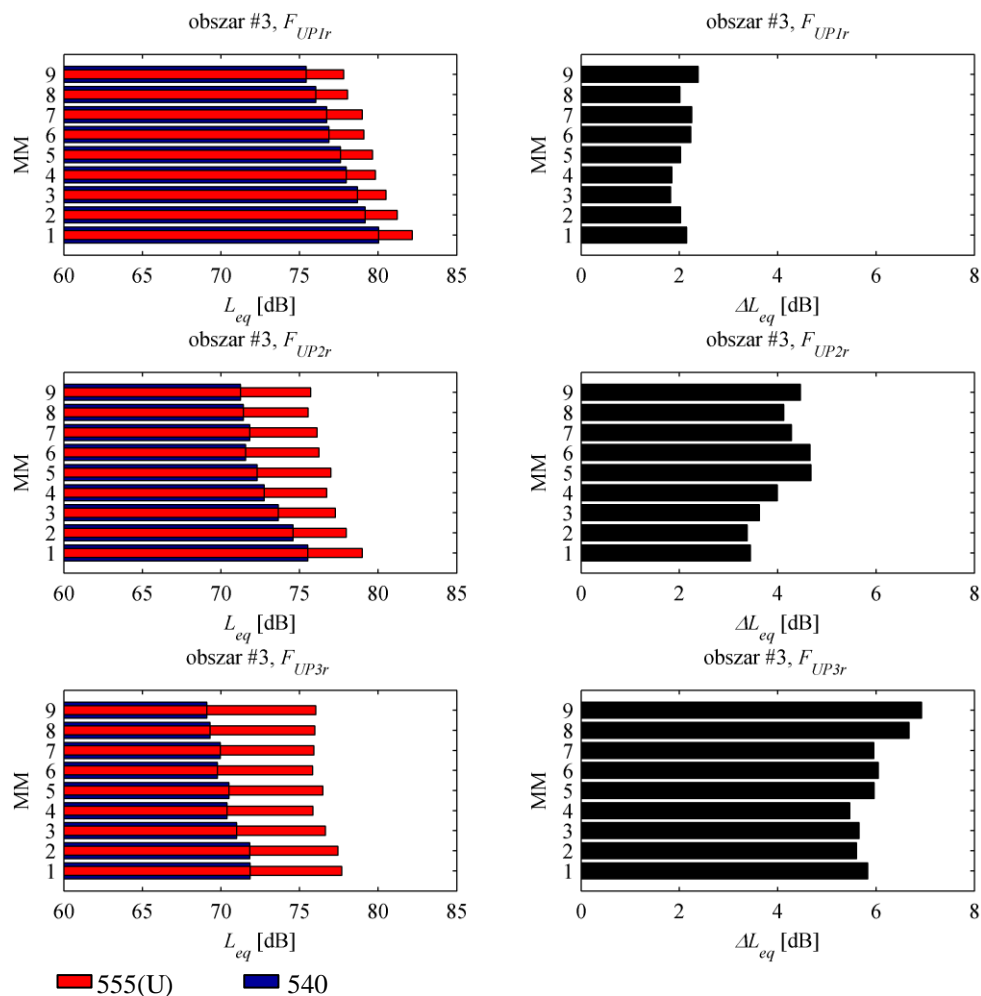




Rys. 9.7. Poziomy  $L_{eq}$  dla obszaru OW#1 z punktów pomiarowych matrycy mikrofonowej dla przejazdów tramwajów 555(U) i 540

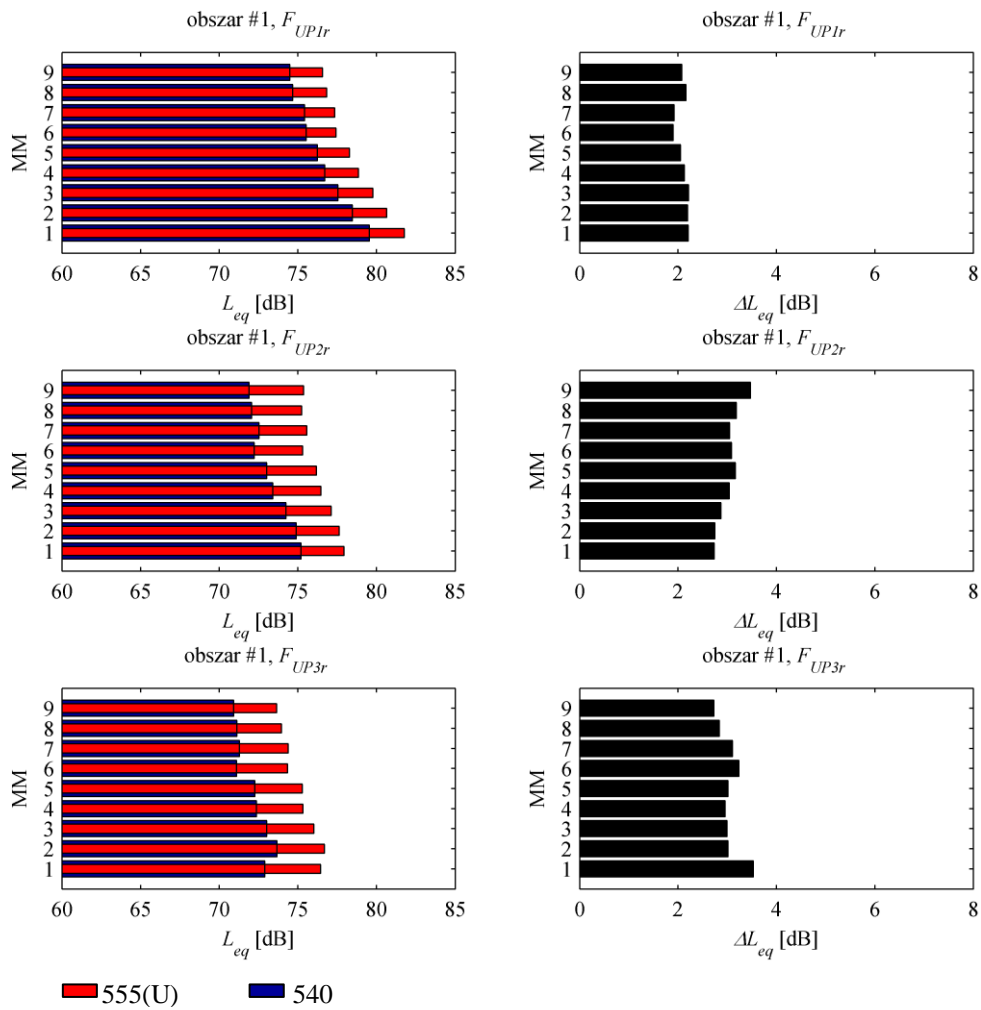
W zakresie częstotliwości  $F_{UP3r}$  różnica ta wynosiła od 2,8 dB w punktach MM4 i MM7–9 do 3,2 dB w punktach MM1 i MM2. Różnica w przypadku zakresu  $F_{UPr}$  wynosiła od 1,7 dB w punkcie MM7 do 2 dB w punkcie MM9.

Jak wynika z rysunku 9.8, poziom równoważny ciśnienia akustycznego również w OW#3 był we wszystkich punktach pomiarowych i zakresach częstotliwości większy dla tramwaju 555(U) z niezdatną przekładnią. Najmniejsze różnice zaobserwowano w zakresie  $F_{UPr}$  od 1,8 dB w punkcie MM3 i MM4 do 2,3 dB w punkcie MM9. W przypadku zakresu  $F_{UP2r}$  różnica wynosiła od 3,4 dB w punktach MM1 i MM2 do 4,7 dB w punktach MM5 i MM6. W trzecim zakresie częstotliwości  $F_{UP2r}$  różnica ta wynosiła od 5,5 dB w punkcie MM3 do 7,0 dB w punkcie MM9.



Rys. 9.8. Poziomy  $L_{eq}$  dla OW#3 z punktów pomiarowych matrycy mikrofonowej dla przejazdów tramwajów 555(U) i 540

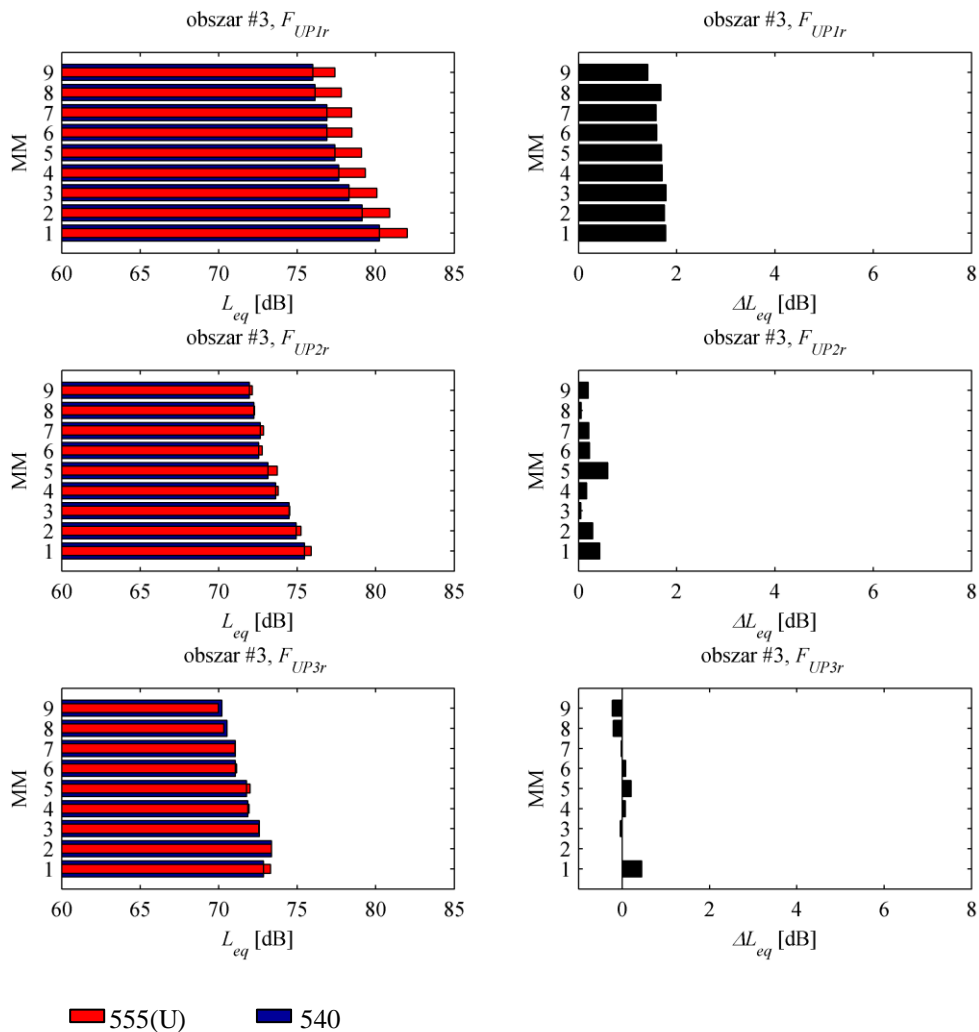
W przypadku drugiej pary tramwajów zbliżone wyniki uzyskano jedynie w OW#1, co przedstawiono na rysunku 9.9. W obszarze tym poziom równoważny ciśnienia akustycznego we wszystkich punktach pomiarowych i zakresach częstotliwości był zawsze większy dla tramwaju 519(U) z niezdatną przekładnią. Różnica w przypadku pierwszego zakresu  $F_{UPr}$  wynosiła od 1,9 dB w punktach MM6 i MM7 do 2,2 dB w punktach MM1–3 i MM8



Rys. 9.9. Poziomy  $L_{eq}$  dla OW#1 z punktów pomiarowych matrycy mikrofonowej dla przejazdów tramwajów 519(U) i 526

W przypadku drugiego zakresu  $F_{UP1r}$  różnica wynosiła od 2,7 dB w punktach MM1 i MM2 do 3,5 dB w punkcie MM9. W trzecim zakresie częstotliwości  $F_{UP2r}$  różnica ta wynosiła od 2,7 dB w punkcie MM9 do 3,5 dB w punkcie MM1.

Jak wynika z rysunku 9.10, poziom równoważny ciśnienia akustycznego w OW#3 był większy dla tramwaju 519(U) tylko głównie w pierwszym zakresie częstotliwości  $F_{UPr}$ . W zakresie tym różnica wynosiła od 1,6 dB w punkcie MM6 i MM7 do 1,8 dB w punktach MM1–5 i MM8.



Rys. 9.10. Poziomy  $L_{eq}$  dla OW#1 z punktów pomiarowych matrycy mikrofonowej dla przejazdów tramwajów 519(U) i 526

W pozostałych zakresach  $F_{UP1r}$  i  $F_{UP2r}$  różnica pomiędzy poziomami wynosiła poniżej 1 dB.

## 9.2. Wyznaczenie parametru diagnostycznego dla detekcji niezdatności przekładni trakcyjnej tramwaju

Przedstawione dotąd wyniki pozwalają na zróżnicowanie obszarów obejmujących uszkodzone przekładnie pod względem równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w punktach pomiarowych matrycy mikrofonowej. Miary te wykorzystano do stworzenia kumulant mogących posłużyć jako parametr diagnostyczny w detekcji uszkodzenia przekładni. Kumulanty utworzono wykorzystując pierwiastek z sumy kwadratów  $U_N$ , wartość średnią  $U_S$  i średnią geometryczną  $U_G$ , jak w równaniach:

$$U_{N_{1,2,3}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j)r}}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+1)r}}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+2)r}}^2} \quad (9.17)$$

$$U_{N_{2,3}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP2r}}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP3r}}^2} \quad (9.18)$$

$$U_{N_3} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP3r}}^2} \quad (9.19)$$

gdzie:

$U_{N_{1,2,3}}$  – kumulanta oparta na pierwiastku z sumy kwadratów poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP1r}, F_{UP2r}, F_{UP3r}$ ,

$U_{N_{2,3}}$  – kumulanta oparta na pierwiastku z sumy kwadratów poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP2r}, F_{UP3r}$ ,

$U_{N_3}$  – kumulanta bazująca na pierwiastku z sumy kwadratów poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakres częstotliwości  $F_{UP3r}$ ,  
 $L_{eq(MMi)F_{UP(j)r}}$  – poziom równoważny ciśnienia akustycznego dla  $i$ -tego punktu pomiarowego matrycy mikrofonowej i dla  $j$ -tego zakresu częstotliwości  $F_{UPjr}$  [dB],

$$U_{S_{1,2,3}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j)r}}}{n_{MM}} + \frac{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+1)r}}}{n_{MM}} + \frac{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+2)r}}}{n_{MM}} \quad (9.20)$$

$$U_{S_{2,3}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+1)r}}}{n_{MM}} + \frac{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+2)r}}}{n_{MM}} \quad (9.21)$$

$$U_{S_3} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+2)r}}}{n_{MM}} \quad (9.22)$$

gdzie:

$U_{S_{1,2,3}}$  – kumulanta bazująca na wartości średniej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP1r}, F_{UP2r}, F_{UP3r}$ ,

$U_{S_{2,3}}$  – kumulanta bazująca na wartości średniej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP2r}, F_{UP3r}$ ,

$U_{S_3}$  – kumulanta oparta na wartości średniej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakres częstotliwości  $F_{UP3r}$ ,

$L_{eq(MMi)F_{UP(j)r}}$  – poziom równoważny ciśnienia akustycznego dla  $i$ -tego punktu pomiarowego matrycy mikrofonowej i dla  $j$ -tego zakresu częstotliwości  $F_{UPjr}$  [dB],

$n_{MM}$  – liczba punktów pomiarowych matrycy mikrofonowej.

$$U_{G_{1,2,3}} = \frac{\sqrt[3]{\prod_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j)r}} + \sqrt[3]{\prod_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+1)r}} + \sqrt[3]{\prod_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+2)r}}}}}{1000} \quad (9.23)$$

$$U_{G_{2,3}} = \frac{\sqrt[3]{\prod_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+1)r}} + \sqrt[3]{\prod_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+2)r}}}}}{1000} \quad (9.24)$$

$$U_{G_3} = \frac{\sqrt[3]{\prod_{i=1}^{n_{MM}} L_{eq(MMi)F_{UP(j+2)r}}}}{1000} \quad (9.25)$$

gdzie:

$U_{G_{1,2,3}}$  – kumulanta oparta na średniej geometrycznej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP1r}$ ,  $F_{UP2r}$ ,  $F_{UP3r}$ ,

$U_{G_{2,3}}$  – kumulanta oparta na średniej geometrycznej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakresy częstotliwości  $F_{UP2r}$ ,  $F_{UP3r}$ ,

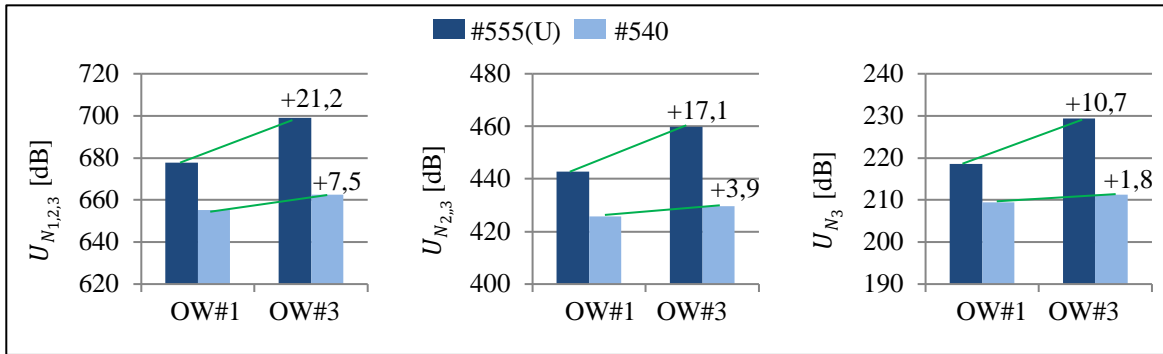
$U_{G_3}$  – kumulanta oparta na średniej geometrycznej poziomów równoważnych ciśnienia akustycznego matrycy mikrofonowej uwzględniająca zakres częstotliwości  $F_{UP3r}$ ,

$L_{eq(MMi)F_{UP(j)r}}$  – poziom równoważny ciśnienia akustycznego dla  $i$ -tego punktu pomiarowego matrycy mikrofonowej i dla  $j$ -tego zakresu częstotliwości  $F_{UP(j)r}$  [dB],

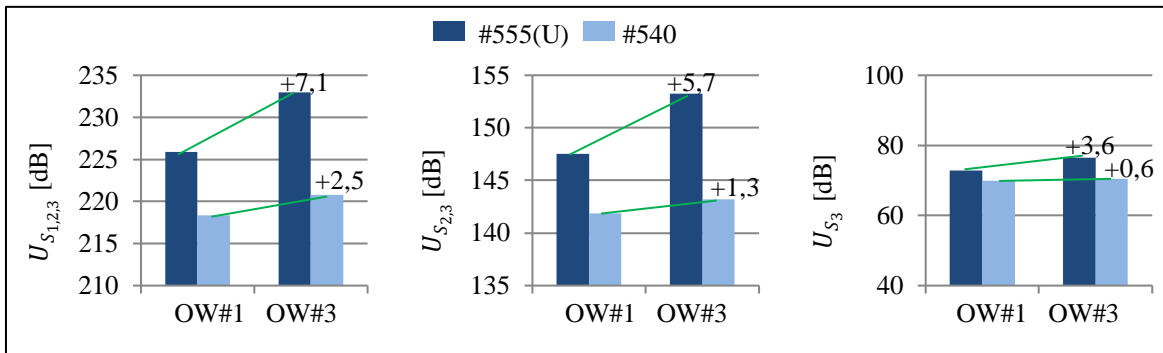
$n_{MM}$  – liczba punktów pomiarowych matrycy mikrofonowej.

Wyniki obliczeń kumulant dla pierwszej pary tramwajów 555(U) i 540 przedstawiono na rysunku 9.11, 9.12 i 9.13 odpowiednio dla pierwiastka z sumy kwadratów  $U_N$ , wartości średniej  $U_S$  i średniej geometrycznej  $U_G$ . Wyniki dla drugiej pary tramwajów 519(U) i 526 przedstawiono w analogiczny sposób na rysunku 9.14, 9.15 i 9.16.

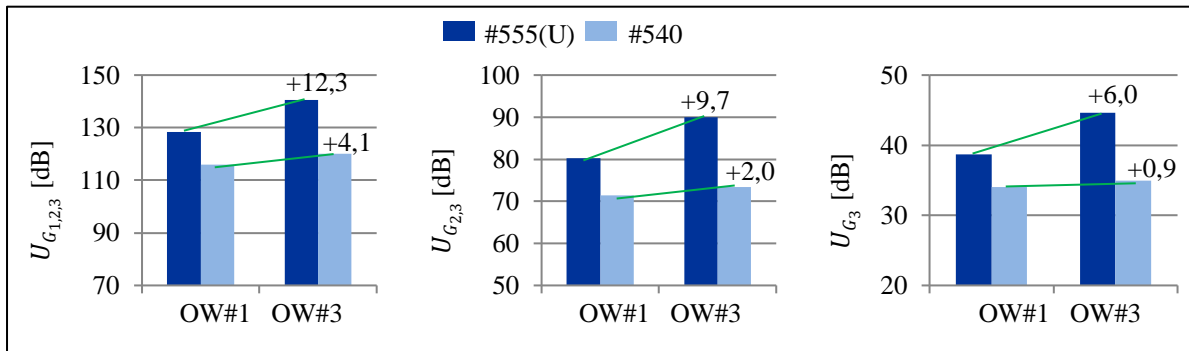
Największą różnicę wynoszącą 21,2 dB pomiędzy zdatną przekładnią w OW#1 a niezdatną przekładnią w OW#3 dla tramwaju 555(U) uzyskano dla kumulanty bazującej na pierwiastku z sumy kwadratów  $U_{N_{1,2,3}}$ . Jednocześnie analogiczne analizy dla tramwaju ze zdatnymi przekładniami wskazują na różnice pomiędzy OW#1 i OW#3 na poziomie 7,5 dB, czyli mniejszym o 65%.



Rys. 9.11. Wartości kumulant  $U_N$  dla pierwszej pary tramwajów 555(U) i 540

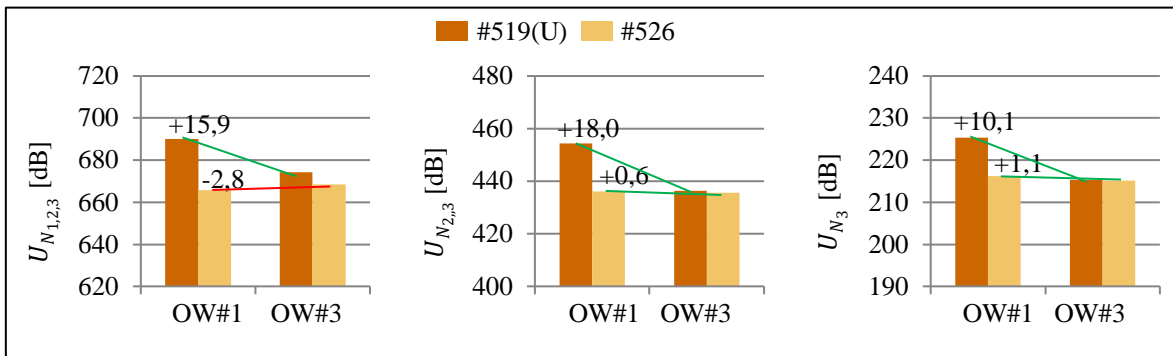


Rys. 9.12. Wartości kumulant  $U_S$  dla pierwszej pary tramwajów 555(U) i 540

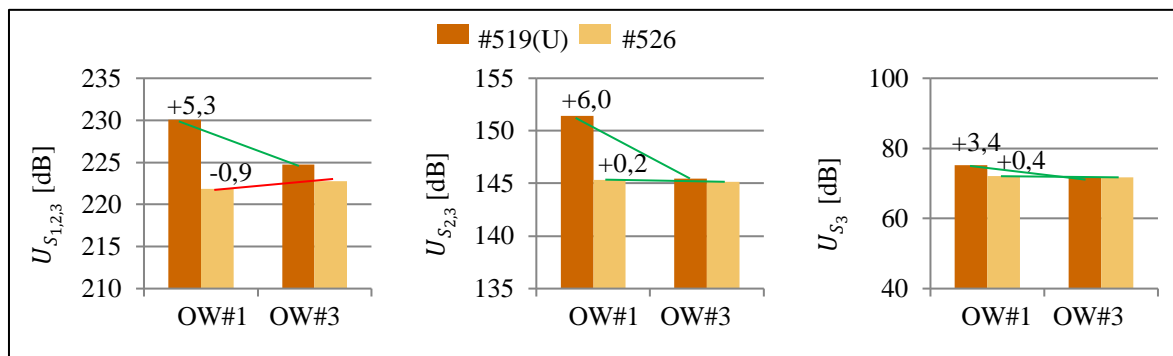


Rys. 9.13. Wartości kumulant  $U_G$  dla pierwszej pary tramwajów 555(U) i 540

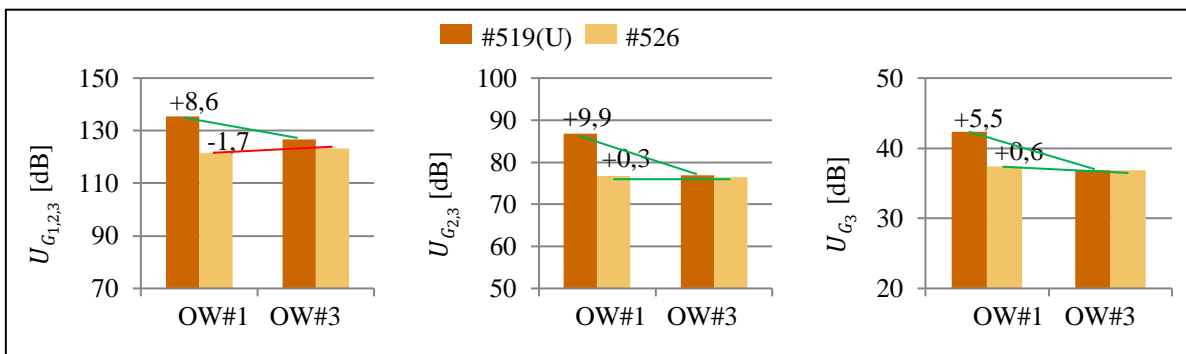
Zbliżone wyniki dla analizowanej pary tramwajów uzyskano również dla kumulanty bazującej na pierwiastku z sumy kwadratów, ale uwzględniającej tylko dwa zakresy częstotliwości  $F_{UP2r}$  i  $F_{UP3r}$ , czyli  $U_{N_{2,3}}$ . W tym przypadku rozróżnienie stanu przekładni tramwaju 555(U) charakteryzowało się zmianą wartości kumulanty wynoszącą 17,1 dB. Jednocześnie dla tramwaju 540 różnica kumulanty  $U_{N_{2,3}}$  pomiędzy zdatnymi przekładniami w OW#1 i OW#3 wynosiła 3,9 dB. W przypadku pozostałych kumulant różnice pomiędzy przekładniami w OW#1 i OW#3 nie przekraczały 12,3 dB dla tramwaju 555(U) z niezdatną przekładnią i 4,1 dB dla tramwaju 540 ze zdatnymi przekładniami.



Rys. 9.14. Wartości kumulant  $U_N$  dla drugiej pary tramwajów 519(U) i 526



Rys. 9.15. Wartości kumulant  $U_S$  dla drugiej pary tramwajów 519(U) i 526



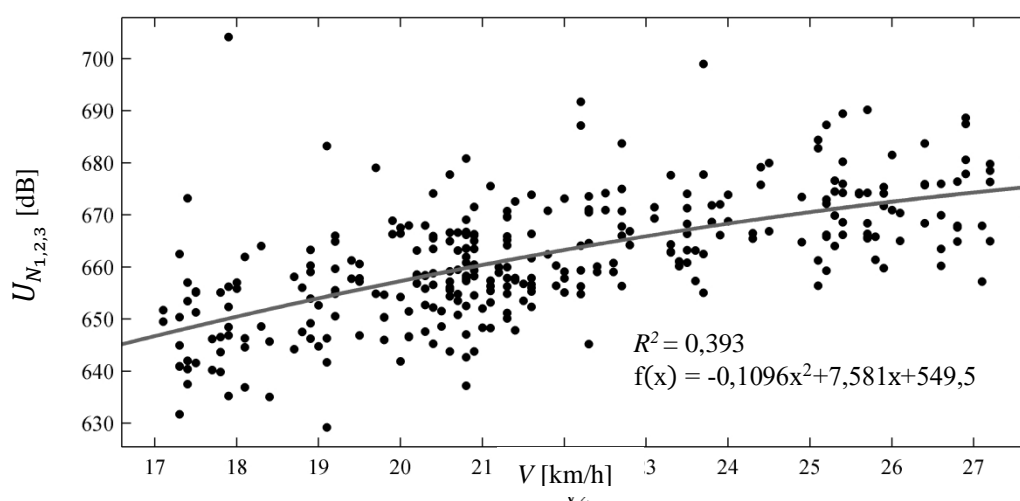
Rys. 9.16. Wartości kumulant  $U_G$  dla drugiej pary tramwajów 519(U) i 526

W przypadku drugiej pary tramwajów 519(U) i 526, największe różnice pomiędzy niezdatną przekładnią w OW#1 a zdatną przekładnią w OW#3 również dotyczyły kumulant  $U_{N_{1,2,3}}$  i  $U_{N_{2,3}}$ . Dla pierwszej kumulanty różnica ta wynosiła 15,9 dB, a dla drugiej 18,0 dB. Dla porównania różnice dla tych kumulant w przypadku tramwaju 526 ze zdatnymi przekładniami wynosiły odpowiednio -2,8 dB i 0,6 dB. W przypadku pozostałych kumulant różnice pomiędzy przekładniami w OW#1 i OW#3 nie przekraczały 10,1 dB dla tramwaju 519(U) z niezdatną przekładnią i różnicy bezwzględnej wynoszącej 1,7 dB dla tramwaju 540 ze zdatnymi przekładniami.

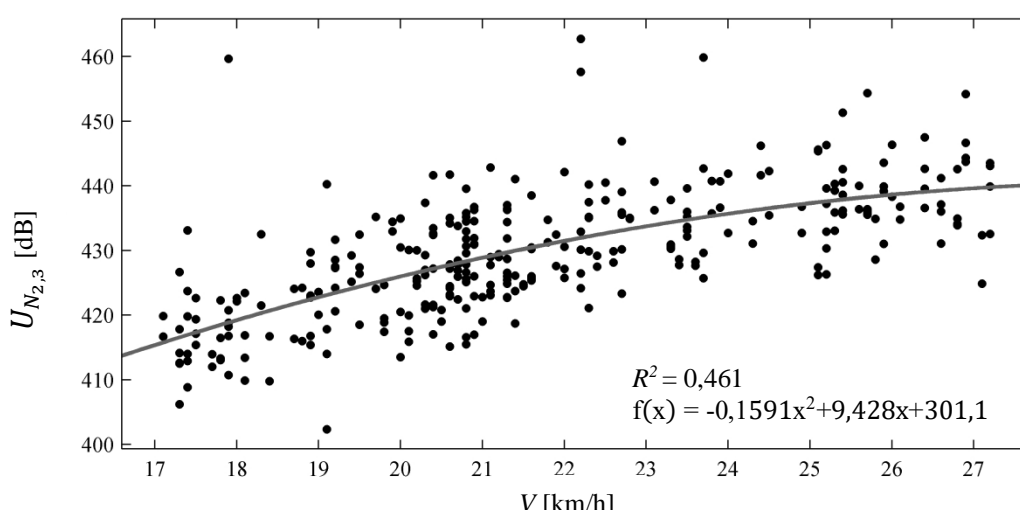
Uzyskane wyniki wskazują na dużą wrażliwość kumulant  $U_{N_{1,2,3}}$  i  $U_{N_{2,3}}$  na zmianę stanu technicznego przekładni. Z tego względu uwzględniono je w dalszych analizach.



Przeanalizowano zależność wartości wybranych kumulant od prędkości przejazdu tramwajów. Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartością  $U_{N_{1,2,3}}$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(U_{N_{1,2,3}}, V) = 0,69$ , co świadczy o średniej zależności. Natomiast dla wartości  $U_{N_{2,3}}$  współczynnik ten wynosił  $r(U_{N_{2,3}}, V) = 0,71$ , co również świadczy o średniej zależności. Dla obu badanych kumulant dokonano analizy regresji liniowej i nieliniowej zmiennej w funkcji prędkości przejazdu. Wyniki analizy dla kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$  przedstawiono na rysunku 9.17, a dla kumulanty  $U_{N_{2,3}}$  na rysunku 9.18. Największą wartość współczynnika determinacji  $R^2$  dla obu kumulant uzyskano poprzez model wielomianowy. Jednak w obu przypadkach obliczone modele wyjaśniają zmienne na podstawie współczynnika  $R^2$  na poziomie 39–46%, co uniemożliwia ich wykorzystanie w estymacji wskazanych zmiennych.



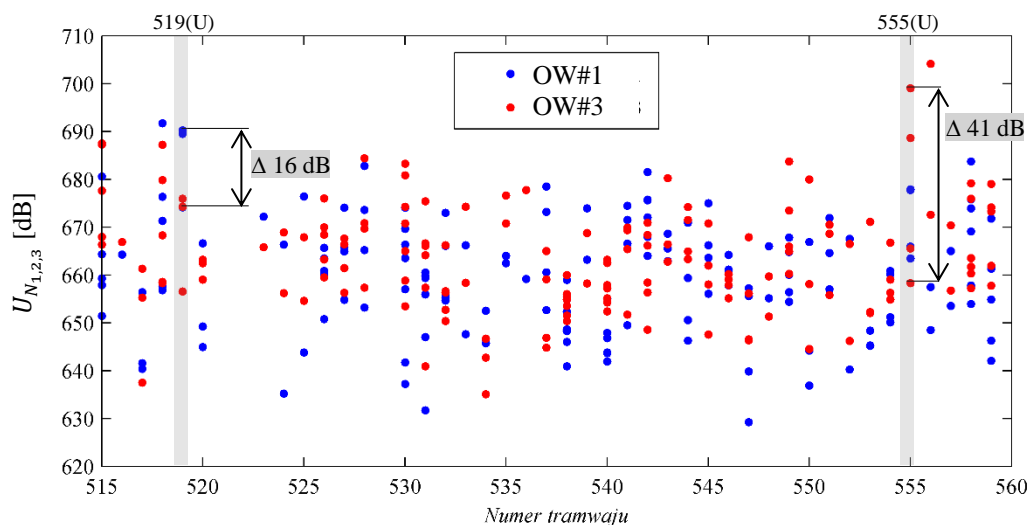
Rys. 9.17. Wartości  $U_{N_{1,2,3}}$  w funkcji prędkości przejazdów



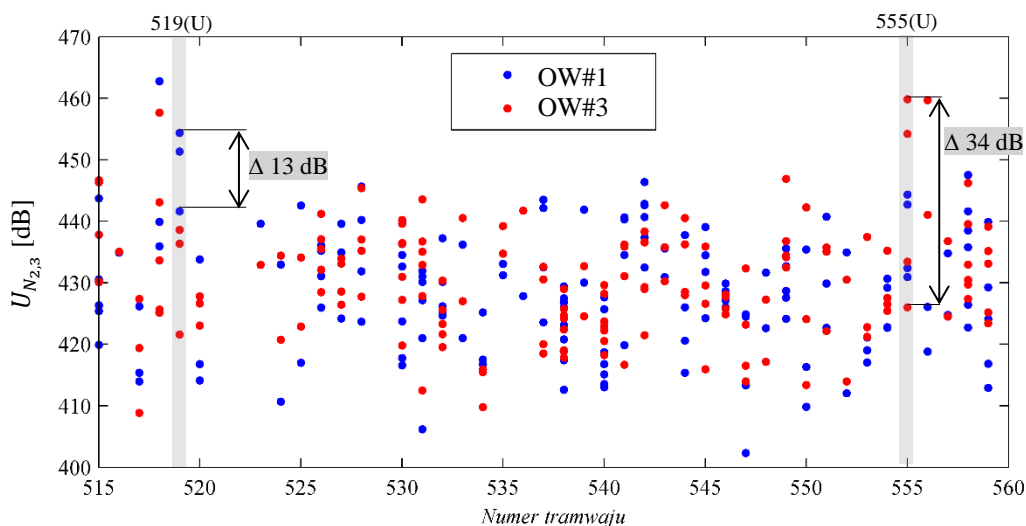
Rys. 9.18. Wartości  $U_{N_{2,3}}$  w funkcji prędkości przejazdów

Na rysunku 9.19 i 9.20 przedstawiono wartości kumulant odpowiednio  $U_{N_{1,2,3}}$  i  $U_{N_{2,3}}$  obliczone dla przejazdów poszczególnych tramwajów z wyróżnieniem wyników dla obszarów tramwaju OW#1 i OW#3.

Jak zaobserwowano na rysunku 9.19 i 9.20, obie wyróżnione kumulanty dla tramwajów 555(U) i 519(U) cechuje względnie duży rozrzut wartości. W przypadku tramwaju 519(U) rozrzut wartości kumulant obliczonych dla OW#1 z niezdatną przekładnią wynosi 16 dB dla kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$  i 13 dB dla  $U_{N_{2,3}}$ . W przypadku tramwaju 555(U) rozrzut ten w OW#3 z niezdatną przekładnią wynosi analogicznie 41 dB i 34 dB.



Rys. 9.19. Wartości kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$  dla przejazdów poszczególnych tramwajów



Rys. 9.20. Wartości kumulanty  $U_{N_{2,3}}$  dla przejazdów poszczególnych tramwajów

Wśród czynników wpływających na obserwowany rozrzut wartości kumulant można uwzględnić obciążenie przekładni. W przypadku przekładni nieobciążonej podczas jazdy na wybiegu, równoważne poziomy ciśnienia akustycznego rejestrowane matrycą mikrofonów

mogą być mniejsze z uwagi na mniejsze oddziaływania dynamiczne zachodzące w parach kinematycznych przekładni [39].

W toku prowadzonych prac obsługowych zajezdni tramwajowej w okresie po przeprowadzonych badaniach, do napraw (przywrócenie zdatności) skierowano cztery tramwaje z uwagi na niezdatność przekładni. Wśród wcześniej omawianych tramwajów 519(U) i 555(U) zakwalifikowano do obsługi przekładnie tramwajów o numerach 518 i 556. W tramwaju 518 stwierdzono uszkodzenie przekładni na pierwszym i ostatnim wózku (obszar OW#1 i OW#3), a w tramwaju 556 uszkodzenie przekładni na ostatnim wózku (obszar OW#3). W przypadkach tych zaobserwowano te same postacie uszkodzeń jak w tramwajach 555(U) i 519(U).

Ustalono liczbę stanów przekładni  $W_p$  bazując na trójwartościowej ocenie stanu z wykorzystaniem poniższych klas [39, 246]:

$$W_p = \{w^1, w_n^1, w^0\} \quad (9.26)$$

gdzie:

$W_p$  – zbiór stanów technicznych w diagnostyce przekładni trakcyjnej,

$w^1$  – klasa stanów zdatności technicznej,

$w_n^1$  – klasa stanów zdatności częściowej (dopuszczalnej),

$w^0$  – klasa stanów niezdatności technicznej.

Stan zdatności  $w^1$  oznacza, że wartość parametru diagnostycznego  $y$  nie osiągnęła i nie przekroczyła wartości granicznej  $Sg$ . Stan niezdatności technicznej  $w^0$  jest osiągnięty, gdy wartość parametru diagnostycznego osiągnie lub przekroczy wartość graniczną. Natomiast stan niedopuszczalny  $w_n^1$  oznacza, że parametr diagnostyczny osiągnął lub przekroczył wartość dopuszczalną, ale nie osiągnął wartości granicznej.

Zależności pomiędzy parametrem diagnostycznym a stanami można przedstawić, jak poniżej:

$$y \leq Sg \rightarrow w^1 \quad (9.27)$$

$$y \geq Sd \wedge y < Sg \rightarrow w_n^1 \quad (9.28)$$

$$y \geq Sg \rightarrow w^0 \quad (9.29)$$

Dalsza eksploatacja obiektu, który osiągnął stan  $w^0$  jest niecelowa w aspekcie ekonomicznym, technicznym i środowiskowym. Przy wyznaczaniu wartości granicznej i dopuszczalnej porównano dwie metody ich wyznaczania. Pierwsza metoda według Smiley'a

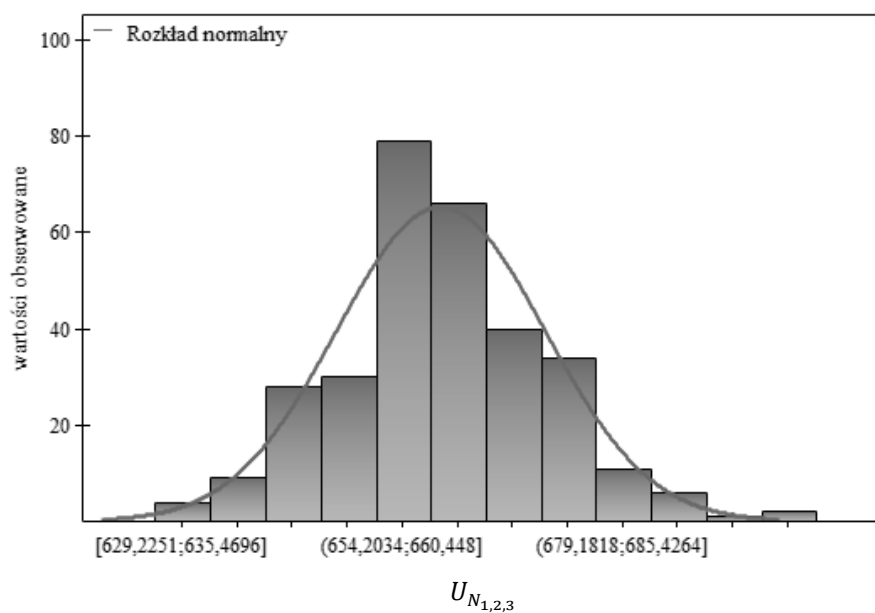
zakłada, że rozkład wartości parametru diagnostycznego w obserwowanej grupie jest opisywany rozkładem normalnym [179, 182, 240, 266]. Sprawdzono dopasowanie rozkładu obu kumulant do rozkładu normalnego wykonując test na normalność Shapiro–Wilka w środowisku oprogramowania PQStat [221]. Przyjęto następujące hipotezy testów:

$$H_0: \text{rozkład badanej obserwacji jest rozkładem normalnym} \quad (9.30)$$

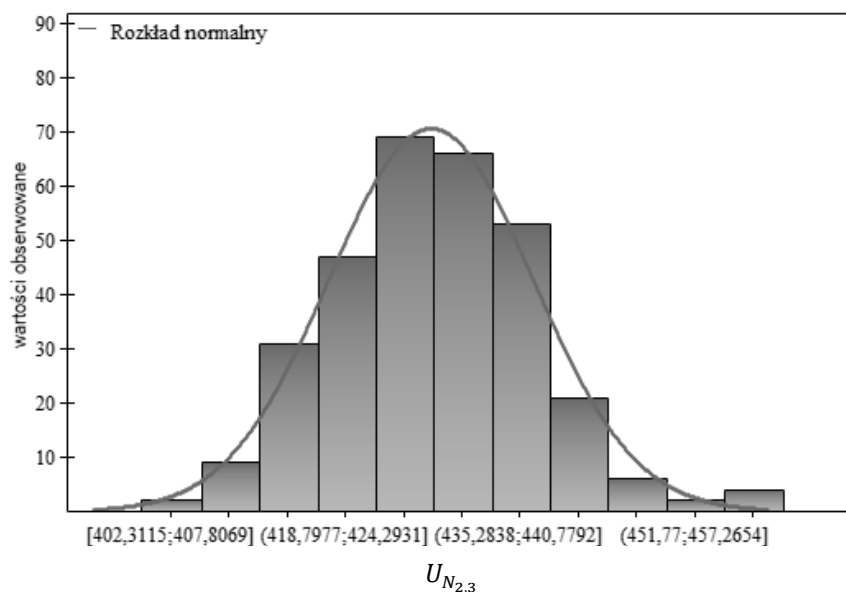
$$H_1: \text{rozkład badanej obserwacji jest różny od rozkładu normalnego} \quad (9.31)$$

Przyjęto poziom istotności w badaniu na poziomie  $\alpha = 0,01$ . Wykonano test Shapiro–Wilka z uwagi na największą moc testu, która oznacza, że dla ustalonego  $\alpha$  prawdopodobieństwo odrzucenia hipotezy  $H_0$ , jeśli jest ona fałszywa, jest większe niż w przypadku innych tego typu testów. Przedstawiony sposób badania przyjęto w pracy jako procedurę badania normalności rozkładu we wszystkich dalszych analizach dopasowania obserwacji do rozkładu normalnego.

Szczegółowe wyniki przedstawiono w załączniku nr 3 a) i 3 b). Histogram rozkładu kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$  przedstawiono na rysunku 9.21, a histogram rozkładu kumulanty  $U_{N_{2,3}}$  przedstawiono na rysunku 9.22.



Rys. 9.21. Histogram wartości kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$



Rys. 9.22. Histogram wartości kumulanty  $U_{N_{2,3}}$

Jak wynika z danych zawartych w załączniku, wyniki wskazują na brak odstępstwa od rozkładu normalnego, ponieważ wartość istotności statystycznej  $p$  znajduje się powyżej standardowego poziomu istotności  $\alpha = 0,01$ .

Zgodnie z metodą Smiley'a, wartość graniczną stanowią wartości skrajne rozkładu powyżej  $3\sigma$ , a wartość dopuszczalną – wartości nietypowe powyżej  $2\sigma$ . Wartości te obliczono zgodnie z równaniami:

$$Sd_s = \bar{x} + 2\sigma \quad (9.32)$$

$$Sg_s = \bar{x} + 3\sigma \quad (9.33)$$

gdzie:

$Sd_s$  – wartość dopuszczalna parametru diagnostycznego w metodzie Smiley'a,

$Sg_s$  – wartość graniczna parametru diagnostycznego w metodzie Smiley'a,

$\bar{x}$  – średnia wartość parametru diagnostycznego,

$\sigma$  – odchylenie standardowe.

Druga metoda według Cempla bazuje na dopuszczalnym poziomie zbędnych napraw, która jest modyfikacją metody Neymana–Pearsona [35, 36, 40]. W tej metodzie przy określaniu wartości granicznej przyjmowany jest dopuszczalny poziom zbędnych napraw  $An$ . Wartość graniczną w tej metodzie wyznacza się zgodnie z równaniem:

$$Sg_c = \bar{x} + \sigma \sqrt{\frac{P}{2An}} \quad (9.34)$$

gdzie:

$Sg_C$  – wartość graniczna parametru diagnostycznego w metodzie Cempla,

$\bar{x}$  – średnia wartość parametru diagnostycznego,

$P$  – współczynnik gotowości badanego obiektu technicznego,

$\sigma$  – odchylenie standardowe parametru diagnostycznego,

$An$  – poziom zbędnych napraw dla badanego obiektu technicznego.

Wartość współczynnika gotowości tramwajów wynosi  $P \leq 0,97$ . Poziom zbędnych napraw  $An$  zależy od planu obsługi danego przedsiębiorstwa i zgodnie z literaturą [39] zawiera się zazwyczaj w przedziale wartości 0,02–0,05. Przyjęto zatem następujące wartości w analizie  $P=0,97$  i  $An=0,05$ . Zgodnie z założeniami metody, wartość dopuszczalną obliczono zgodnie z równaniem:

$$Sd_C = Sg_C - \sigma \quad (9.35)$$

gdzie:

$Sd_C$  – wartość dopuszczalna parametru diagnostycznego w metodzie Cempla,

$\sigma$  – odchylenie standardowe parametru diagnostycznego.

Wyniki dla obu metod zestawiono w tabeli 9.2.

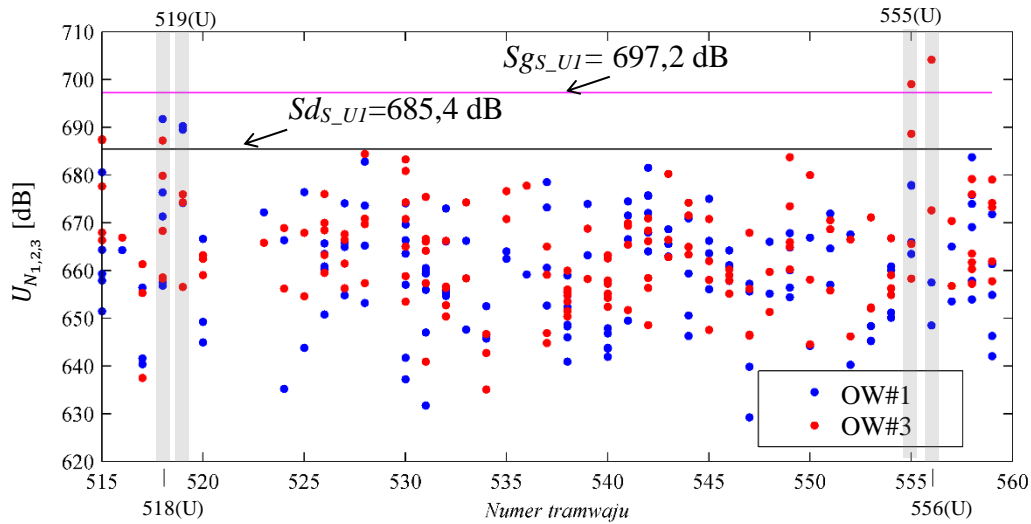
Tabela 9.2. Wyniki obliczeń wartości dopuszczalnych i granicznych zgodnie z metodami Smiley'a i Cempla

	$U_{N_{1,2,3}}$				$U_{N_{2,3}}$				
	Smiley	Cempel	$\Delta S/C$ [dB]	$\Delta S/C$ [%]	Smiley	Cempel	$\Delta S/C$ [dB]	$\Delta S/C$ [%]	
$Sg$	697,2	713,8	-16,6	2,3	$Sg$	458,6	472,1	-13,5	2,9
$Sd$	685,4	702,0	-16,6	2,4	$Sd$	448,9	462,2	-13,5	2,9
$\Delta Sg/Sd$ [dB]	11,8	11,8			$\Delta Sg/Sd$ [dB]	9,6	9,6		
$\Delta Sg/Sd$ [%]	1,7	1,7			$\Delta Sg/Sd$ [%]	2,1	2,0		

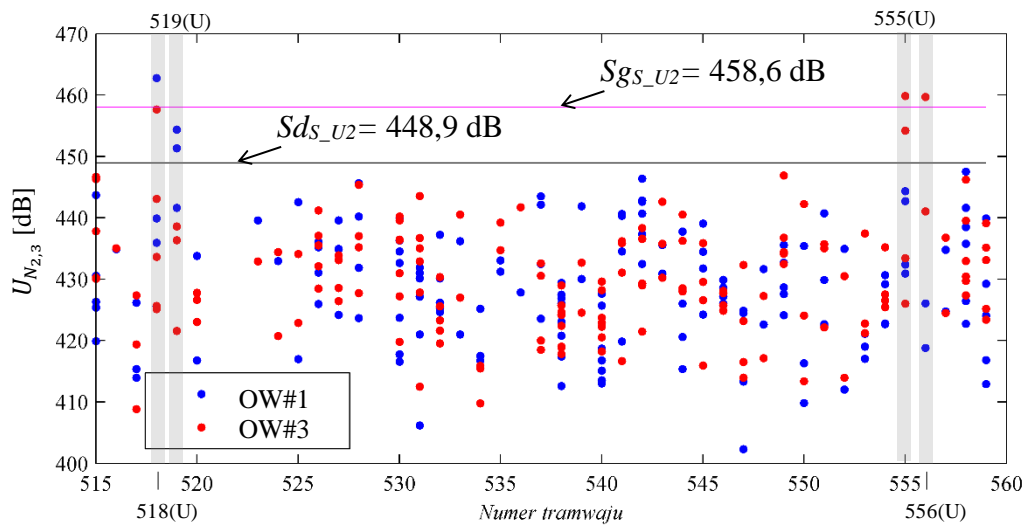
Zgodnie z przedstawionymi danymi, metoda Smiley'a charakteryzuje się mniejszymi wartościami granicznymi i dopuszczalnymi o około 16 dB dla kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$  i o około 13,5 dB dla kumulanty  $U_{N_{2,3}}$ . Przyjęto wariant obliczeń zgodnych z metodą Smiley'a z uwagi na zgodność danych z rozkładem normalnym oraz z uwagi na mniejszy próg wartości granicznej i dopuszczalnej.

Wartości graniczne i dopuszczalne uzyskanych wyników zgodnie z równaniami (9.32) i (9.33) przedstawiono na rysunku 9.23 dla kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$  i na rysunku 9.24 dla kumulanty  $U_{N_{2,3}}$ . Wobec wybranych kumulant przyjęto uproszczenie ich zapisu w symbolach wartości dopuszczalnych i granicznych. W indeksach dolnych symbol  $U_1$  oznacza kumulantę  $U_{N_{1,2,3}}$ ,

a symbol  $U_2$  kumulantę  $U_{N_{2,3}}$ . Dla kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$  wartość graniczna wynosiła  $S_{gs\_U1} = 697,2$  dB, a wartość dopuszczalna wynosiła  $S_{ds\_U1} = 685,4$  dB. Natomiast dla kumulanty  $U_{N_{2,3}}$  wartość graniczna wynosiła  $S_{gs\_U2} = 458,6$  dB, wartość dopuszczalną wynoszącą  $S_{ds\_U2} = 448,9$  dB.



Rys. 9.23. Wartości graniczne i dopuszczalne dla kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$



Rys. 9.24. Wartości graniczne i dopuszczalne dla kumulanty  $U_{N_{2,3}}$

Zweryfikowano dane eksploatatora z otrzymanymi wynikami. Zgodnie z nimi, obie kumulanty zidentyfikowały przejazdy tramwajów z uszkodzonymi przekładniami uwzględniając przypadki przekroczeń wartości dopuszczalnych. Jednak w przypadku kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$  wystąpiło również jedno przekroczenie wartości dopuszczalnej dla przejazdu tramwaju 515, dla którego nie wykryto uszkodzeń przekładni. Bazując na otrzymanych

wynikach kumulanty  $U_{N_{2,3}}$  stan techniczny przekładni tramwaju 519(U) zredefiniowano klasę stanu jako zdatność częściowa.

Następnie obliczono różnice pomiędzy wartościami poszczególnych kumulant a wyliczonymi dla nich wartościami dopuszczalnymi i granicznymi. W ten sposób otrzymano informacje o położeniu poszczególnego wyniku względem wartości dopuszczalnej i granicznej. Następnie unormowano otrzymane wyniki dzieląc poszczególną wartość w danej obserwacji przez jej największą wartość. Wyniki zestawiono zbiorczo w tabeli 9.3, gdzie kolorem zielonym oznaczono wartości przekraczające wartości dopuszczalne i graniczne.

Tabela 9.3. Unormowane różnice kumulant  $U_{N_{1,2,3}}$  i  $U_{N_{2,3}}$  względem wartości dopuszczalnych i granicznych

Nr egzemplarza tramwaju	Stan przekładni	Unormowane różnice kumulanty $U_{N_{1,2,3}}$ względem wartości:		Unormowane różnice kumulanty $U_{N_{2,3}}$ względem wartości:	
		$Sds_{U1}$	$Sgs_{U1}$	$Sds_{U2}$	$Sgs_{U2}$
555	zdatny	-0,4	-2,8	-0,3	-3,4
519	dopuszczalny	0,3	-1,0	0,4	-1,0
518	zdatny	-1,5	-5,8	-1,7	-7,9
555	zdatny	-0,4	-2,8	-0,4	-3,8
556	zdatny	-1,5	-5,7	-1,6	-7,7
518	niezdatny	0,3	-0,8	1,0	1,0
518	zdatny	-0,7	-3,7	-0,9	-5,4
556	zdatny	-2,0	-7,0	-2,2	-9,4
555	zdatny	-1,2	-4,9	-1,3	-6,6
518	zdatny	-1,5	-5,7	-1,7	-7,8
555	zdatny	-1,0	-4,5	-1,2	-6,2
519	dopuszczalny	0,2	-1,1	0,2	-1,7
519	zdatny	-0,6	-3,3	-0,5	-4,0
518	zdatny	-0,5	-3,0	-0,7	-4,4
555	dopuszczalny	0,2	-1,2	0,4	-1,0
519	zdatny	-0,6	-3,3	-0,9	-5,3
518	zdatny	-1,4	-5,6	-1,7	-7,8
555	niezdatny	0,7	0,3	0,8	0,3
556	zdatny	-0,7	-3,5	-0,6	-4,2
518	zdatny	0,1	-1,4	0,6	-0,2
518	zdatny	-0,9	-4,2	-1,1	-5,9
556	niezdatny	1,0	1,0	0,8	0,3
555	zdatny	-1,4	-5,6	-1,7	-7,7
518	zdatny	-1,4	-5,6	-1,7	-7,9
555	zdatny	-1,1	-4,6	-1,1	-6,0
519	zdatny	-0,5	-3,1	-0,7	-4,7
519	zdatny	-1,5	-5,8	-2,0	-8,8
518	zdatny	-0,3	-2,5	-0,4	-3,7

Jak przedstawiono w tabeli 9.3, większą dynamiką zmian w przypadku wartości dopuszczalnych charakteryzowała się kumulanta  $U_{N_{2,3}}$ . Jej obserwacja wskazuje na trzy przejazdy ze zdiagnozowaną niezdatnością oraz trzy przejazdy ze zdiagnozowaną przekładnią



w stanie częściowej zdadności. Dla tej kumulanty zaobserwowano więcej o jeden przypadek przejazdu, dla którego wystąpiło przekroczenie wartości granicznej niż dla kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$ .

Przedstawione wyniki analiz wskazują na możliwość zastosowania kumulanty  $U_{N_{2,3}}$  jako parametru diagnostycznego w detekcji niezdatności przekładni tramwaju.

### 9.3. Detekcja niezdatności powierzchni tocznych kół tramwaju

Płaskie miejsca na kołach są powodowane przez stałe lub tymczasowe zablokowanie osi kół w wyniku nieprawidłowego procesu hamowania lub zmniejszonej przyczepności w obszarze koła z szyną (wilgoć, zanieczyszczenia). W takich przypadkach zablokowane koła są przemieszczane wzdłuż szyny, a zwiększone tarcie pomiędzy powierzchniami tocznymi powoduje ścieranie materiału i w konsekwencji utworzenie płaskiego miejsca na powierzchni tocznej koła. Starty materiał jest często przenoszony również na powierzchnię toczną za płaskim miejscem, powodując łuszczenie. Płaskie miejsca na kołach mogą powodować podobne rodzaje obciążeń dynamicznych, jak nieregularności szyn, a amplitudy tych obciążeń mogą wynosić 100% lub więcej obciążenia statycznego [127]. Charakter powstałych obciążeń jest impulsowy, a częstotliwość ich wystąpień zależy od częstotliwości obrotowych kół. Taki charakter oddziaływań umożliwia adaptację metod wykorzystywanych na przykład w detekcji uszkodzeń łożysk tocznych w maszynach wirnikowych znanych jako analiza obwiedni [74, 133, 227].

Zarówno w przypadku uszkodzeń łożysk jak i płaskich miejsc na kole, częstotliwości związane z impulsowymi wymuszeniami widoczne są w widmie FFT, ale są maskowane przy niższych częstotliwościach przez inne częstotliwości drgań. Konieczne jest wyodrębnienie tych charakterystycznych częstotliwości poprzez wykonanie demodulacji amplitudowej – ekstrakcję niskoczęstotliwościowych składowych sygnałów reprezentujących wymuszenia impulsowe w sygnałach wysokoczęstotliwościowych. Takie podejście przedstawiono w pracach [196, 197] i zaadaptowano w niniejszej pracy rozszerzając zakres opracowań o wyznaczenie miary punktowej służącej jako parametr diagnostyczny w detekcji płaskiego miejsca na kole wraz z określeniem wartości dopuszczalnych i granicznych.

Zgodnie z opracowaniem [226] konieczna jest w tym celu demodulacja amplitudowa sygnałów wysokoczęstotliwościowych w paśmie rezonansowym struktury odbierającej drgania lub w paśmie ustalonym przy częstotliwości 10 kHz. W artykułach [196, 197] wykorzystano znajomość struktury dynamicznej szyny do zdefiniowania częstotliwości obserwacji sygnałów zmodulowanych. W niniejszej pracy wykonano ekstrakcję niskoczęstotliwościowych

składowych sygnałów wokół częstotliwości 10 kHz ( $f_c$ ) z rozdzielczością 100 Hz ( $df_c$ ), zgodnie z pracą [226]. Ostatecznie analizowany zakres częstotliwości zawierał się w przedziale  $F_{wf} \in \langle 9,95 \text{ kHz}; 10,05 \text{ kHz} \rangle$ .

Do uzyskania obwiedni sygnałów czasowych w zadanym przedzie częstotliwości  $F_{wf}$  wykorzystano transformatę Hilberta, jak w równaniu [38]:

$$\vec{a}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h_{k-n} a(n) \quad (9.36)$$

gdzie:

$a(n)$  – wartość amplitudy przyspieszeń drgań dla  $n$ -tej próbki,

$$h_n = \begin{cases} \frac{2}{N} \sin^2(0,5\pi n) \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi n}{N}\right) & \forall f(n) = 2n \\ \frac{2}{N} \left[1 - \cos(\pi n) \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi n}{N}\right) / \cos\left(\frac{\pi n}{N}\right)\right] & \forall f(n) = 2n + 1 \end{cases}$$

Widmo FFT tak wyznaczonej obwiedni drgań umożliwia detekcję częstotliwości modulujących [133, 283]. Częstotliwości te w analizowanym zagadnieniu związane są z wystąpieniem płaskiego miejsca na kole. Ich detekcja związana jest z obserwacją w widmie obwiedni wartości charakteryzujących drgania w zakresie częstotliwości obrotowych kół  $F_k$ , gdzie zaobserwowana będzie częstotliwość modulująca.

#### 9.4. Wyznaczenie parametru diagnostycznego dla detekcji niezdatności powierzchni tocznych kół tramwaju

W zaproponowanym w niniejszej pracy rozwiązaniu posłużono się wartością skuteczną przyspieszeń drgań  $a_{RMS}$  obliczoną w zakresie częstotliwości obrotowych kół  $F_k$  z sygnału obwiedni otrzymanego z procesu demodulacji w zakresie częstotliwości  $F_{wf}$ . Wartość  $a_{RMS}$  obliczono zgodnie z równaniem:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^{N-1} a^2} \quad (9.37)$$

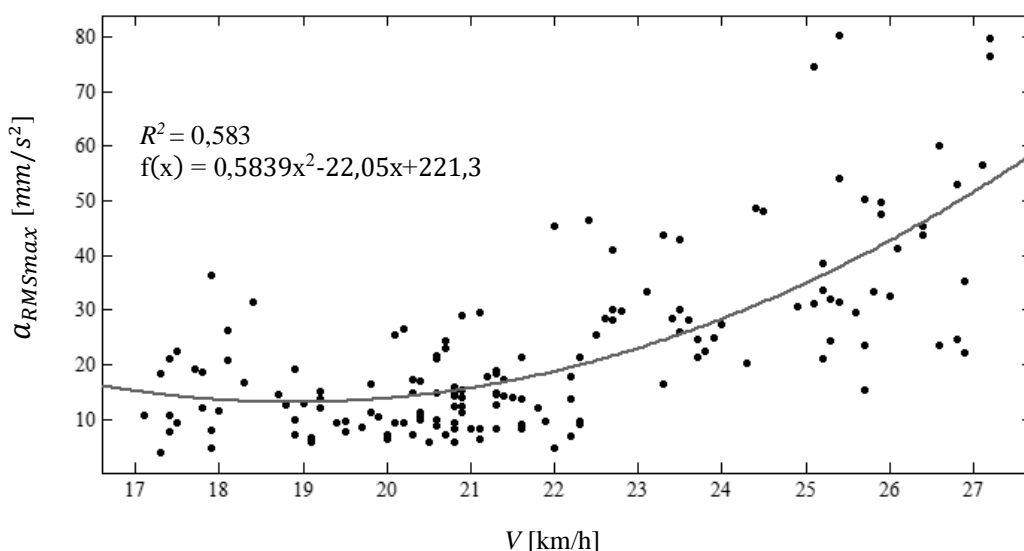
Obliczenia przeprowadzono dla sygnałów z przetworników drgań zlokalizowanych na szynie w kierunku pionowym Z i poprzecznym Y, jak na rysunku 7.8. Kinematyka zjawiska wskazuje na jednorazowy kontakt płaskiego miejsca poszczególnego koła z szyną w odległości kontrolowanej  $C_{real}$  (rys. 7.8). W zależności od położenia kąтового koła względem szyny, kontakt ten może wystąpić w bliskiej odległości jednego z czterech przetworników drgań. Dla każdego przejazdu otrzymano łącznie osiem wartości skutecznych przyspieszeń drgań.

W analizach uwzględniono maksymalną wartość skuteczną przyspieszeń drgań z czterech przetworników uwzględniając wszystkie kierunki pomiaru, jak w równaniu:

$$a_{RMSmax} = \begin{cases} a_{RMS(PS1-Y)} \\ a_{RMS(PS2-Y)} \\ a_{RMS(PS3-Y)} \\ a_{RMS(PS4-Y)} \\ a_{RMS(PS1-Z)} \\ a_{RMS(PS2-Z)} \\ a_{RMS(PS3-Z)} \\ a_{RMS(PS4-Z)} \end{cases} \quad (9.38)$$

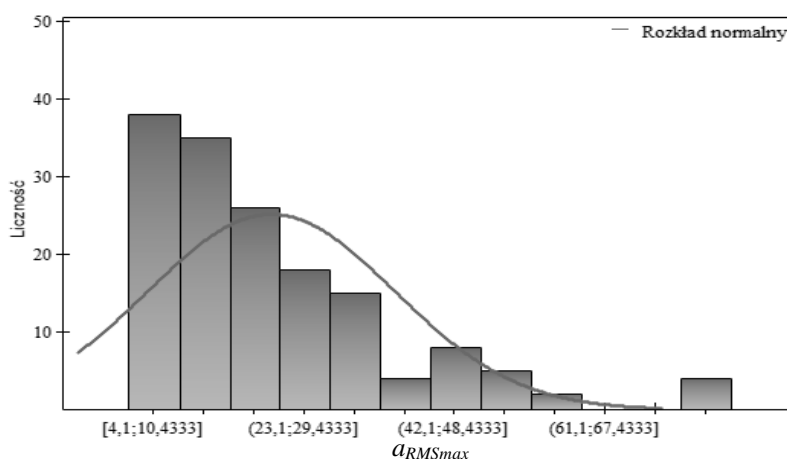
Wartość ta posłużyła jako parametr diagnostyczny dla detekcji niezdatności kół w postaci płaskich miejsc na kole. Wyniki poszczególnych wartości  $a_{RMS}$  i  $a_{RMSmax}$  przedstawiono tabelarycznie w załączniku nr 4. W celu przedstawienia danych przeliczono wartości  $a_{RMSmax}$  dla wyrażenia ich w jednostce  $mm/s^2$ . Zgodnie z pracami [196, 197], konieczne jest wyznaczenie wartości granicznej parametru dla detekcji wystąpienia płaskich miejsc na kole. Wykorzystano w tym celu metodę Smiley'a bazującą na rozkładzie parametru diagnostycznego [179, 182, 240, 266].

W pierwszej kolejności zbadano zależność wartości  $a_{RMSmax}$  od prędkości przejazdu tramwajów. Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartościami  $a_{RMSmax}$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(a_{RMSmax}, V) = 0,67$ , co świadczy o średniej zależności. Wykonano również analizę regresji liniowej i nieliniowej wskazanej zmiennej w funkcji prędkości przejazdu. Na rysunku 9.25 przedstawiono model wielomianowy charakteryzujący się najlepszym dopasowaniem wartości  $a_{RMSmax}$  w funkcji prędkości.



Rys. 9.25. Wartości  $a_{RMSmax}$  w funkcji prędkości przejazdów

Wartości  $a_{RMSmax}$  charakteryzują się dopasowaniem obliczonego modelu regresji do danych ze współczynnikiem determinacji równym  $R^2=0,58$ , co uniemożliwia jego wykorzystanie w estymacji wskazanych zmiennych. Wykonano również test na normalność rozkładu wartości  $a_{RMSmax}$  zgodnie z przyjętą w pracy procedurą badania normalności rozkładu. Przyjęto analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$ , jak w równaniach (9.30) i (9.31). Szczegółowe wyniki przedstawiono załączniku nr 3 c). Histogram rozkładu wartości  $a_{RMSmax}$  przedstawiono na rysunku 9.26.



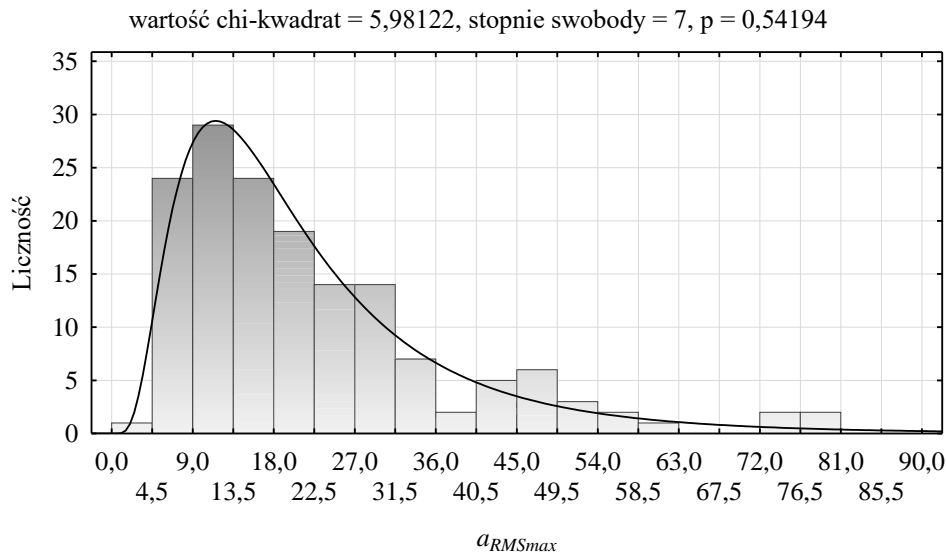
Rys. 9.26. Histogram wartości  $a_{RMSmax}$

Jak wynika z danych zawartych w załączniku, wyniki wskazują na odstępstwo od rozkładu normalnego, ponieważ ich wartości istotności statystycznej  $p$  znajdują się poniżej standardowego poziomu istotności  $\alpha = 0,01$ . Z uwagi na rozkład wartości  $a_{RMSmax}$  w przedstawionym histogramie, wykonano analizę dopasowania rozkładu tych wartości do rozkładu logarytmiczno–normalnego w środowisku oprogramowania Statistica 12 [248]. W analizie wykorzystano test chi-kwadrat i przyjęto następujące hipotezy testów:

$H_0$ : rozkład obserwacji jest zgodny z rozkładem logarytmiczno–normalnym (9.39)

$H_1$ : rozkład obserwacji jest różny od rozkładu logarytmiczno–normalnego (9.40)

Histogram rozkładu wraz z wynikami analizy testu chi–kwadrat przedstawiono na rysunku 9.27.



Rys. 9.27. Histogram wartości  $a_{RMSmax}$  z wynikami testu chi-kwadrat

W związku z tym, że poziom istotności statystycznej  $p$  testu chi-kwadrat znajduje się powyżej poziomu istotności  $\alpha = 0,01$ , to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Zatem rozkład wartości  $a_{RMSmax}$  jest zgodny z rozkładem logarytmiczno-normalnym.

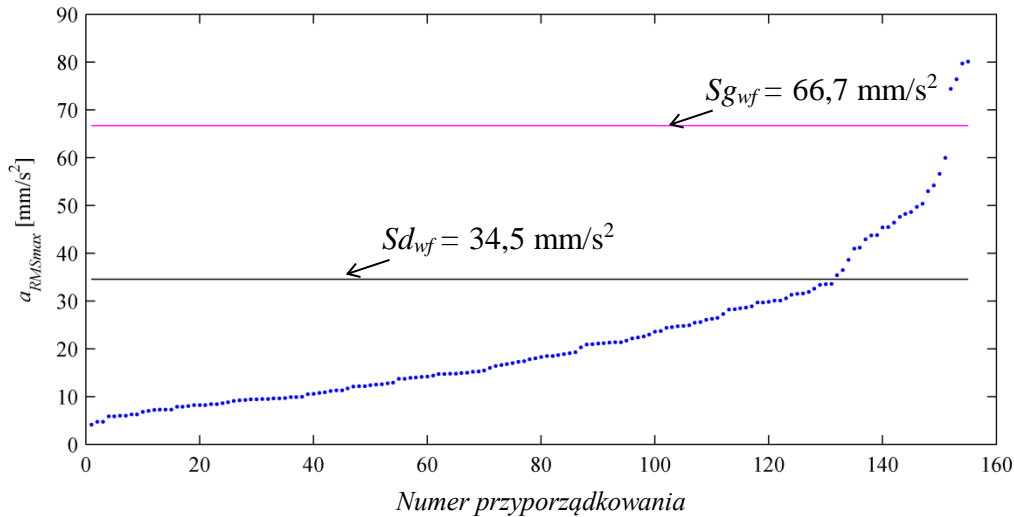
Zgodnie z uzyskanymi danymi zaadaptowano wyznaczenie wartości granicznych i dopuszczalnych zgodnych z równaniami (8.36) i (8.37) wykorzystując cechy rozkładu logarytmiczno-normalnego [162, 245]. Wyznaczenie wartości średnich i odchylenia standardowego poprzedzono wyliczeniem logarytmu naturalnego z wartości  $a_{RMSmax}$ . Wartość średnia wyniosła  $\bar{x}_{wf} = 2,9$  mm/s<sup>2</sup>, a wartość odchylenia standardowego wynosiła  $\sigma_{wf} = 0,7$  mm/s<sup>2</sup>. Wartość graniczną dla wartości  $a_{RMSmax}$  opisywanej rozkładem logarytmiczno-normalnym reprezentowaną przez górną granicę 95% obserwacji wyliczono zgodnie z poniższym równaniem [162]:

$$Sg_{wf} = e^{\bar{x}} \cdot e^{\sigma^2} \quad (9.41)$$

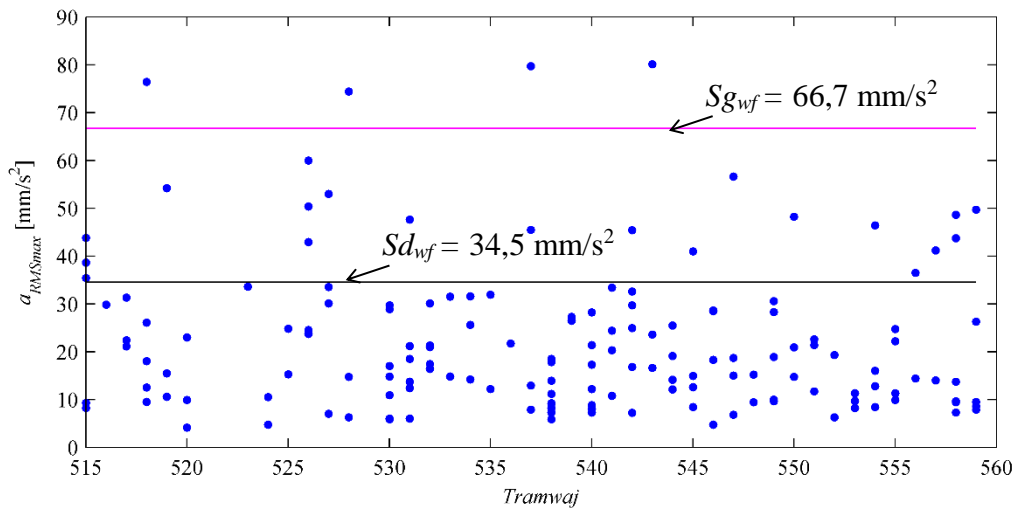
Natomiast wartość dopuszczalna dla tej wartości reprezentowana jest przez górną granicę 68% obserwacji obliczono zgodnie z równaniem [162]:

$$Sd_{wf} = e^{\bar{x}} \cdot e^{\sigma} \quad (9.42)$$

Wartość graniczną wynoszącą  $Sg_{wf} = 66,7$  mm/s<sup>2</sup> oraz wartość dopuszczalną wynoszącą  $Sd_{wf} = 34,5$  mm/s<sup>2</sup> przedstawiono na wykresie wartości  $a_{RMSmax}$  uszeregowanych od najmniejszej do największej na rysunku 9.28. Natomiast wartości te w odniesieniu do wyników uzyskiwanych dla danego przejazdu tramwaju przedstawiono na rysunku 9.29.



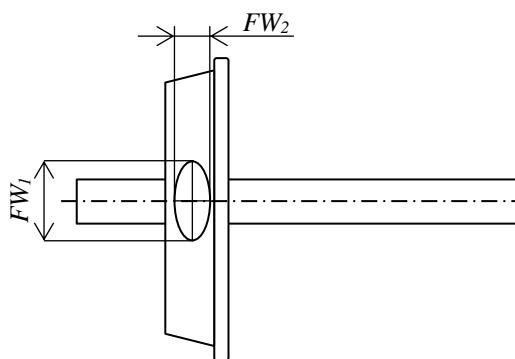
Rys. 9.28. Wartości graniczne  $Sg_{wf}$  i dopuszczalne  $Sd_{wf}$  dla uszeregowanych wartości  $a_{RMSmax}$



Rys. 9.29. Wartości graniczne  $Sg_{wf}$  i dopuszczalne  $Sd_{wf}$  dla wartości  $a_{RMSmax}$  uzyskiwanych dla poszczególnego przejazdu

Zgodnie z przedstawionymi na rysunku 9.28 i 9.29 danymi, przekroczenie wartości granicznej dotyczyło czterech przejazdów tramwajów 528, 518, 537 i 543. Największe przekroczenie o około 20% dotyczyło przejazdu tramwaju 543, dla którego wartość  $a_{RMSmax}$  wynosiła  $80,1 \text{ mm/s}^2$ . Różnica między pierwszą wartością przekraczającą wartość graniczną  $Sg_{wf}$  ( $74,4 \text{ mm/s}^2$ ), a ostatnią wartością w zakresie wartości dopuszczalnych  $Sd_{wf}$  ( $60,0 \text{ mm/s}^2$ ) wynosi 24%. Wartość graniczną  $Sg_{wf}$  przekroczone w analizowanych przypadkach o 12–20%.

Obserwacja powierzchni toczyń kół potwierdziła wystąpienie płaskich miejsc we wszystkich czterech przypadkach przejazdów, dla których wartość  $a_{RMSmax}$  przekroczyła wartość graniczną. Parametryzację ich płaskich miejsc wykonano zgodnie z wymiarami przedstawionymi na rysunku 9.30. Szczegóły dotyczące uszkodzeń powierzchni toczyń przedstawiono w tabeli 9.4.



Rys. 9.30. Oznaczenia wymiarów płaskiego miejsca na powierzchni tocznej koła:  
 $FW_1$  – oś główna,  $FW_2$  – oś drugorzędna

Tabela 9.4. Szczegóły dotyczące uszkodzeń powierzchni tocznych kół

Tramwaj	Diagnoza	Numer zestawu kołowego	Przybliżone wymiary eliptyczne uszkodzenia $FW_1 \times FW_2$
543	Płaskie miejsce	3	5,6 cm x 2,8 mm
537	Płaskie miejsce	5	3,5 cm x 1,8 cm
518	Płaskie miejsce	5	3,8 cm x 1,5 cm
528	Płaskie miejsce	1	3,6 cm x 1,7 cm

Dla przejazdów, dla których parametr  $a_{RMSmax}$  przekroczył wartość dopuszczalną nie stwierdzono płaskich miejsc na powierzchni tocznej kół. Obserwowane wartości mogą być spowodowane brakiem dostatecznej szczegółowości obserwacji okiem nieuzbrojonym. Zwiększone zjawiska dynamiczne w kontakcie koła z szyną mogą być również spowodowane owalizacją koła (ang. *out-of-roundness*), co znajduje odniesienie w pracach [10, 105, 247].

Z uwagi na brak jednoznaczności dla wartości dopuszczalnych zdecydowano się na przyjęcie liczby stanów  $W_{wf}$  bazując na dwuwartościowej ocenie stanu z wykorzystaniem klas [39, 246]:

$$W_{wf} = \{w^1, w^0\} \quad (9.43)$$

gdzie:

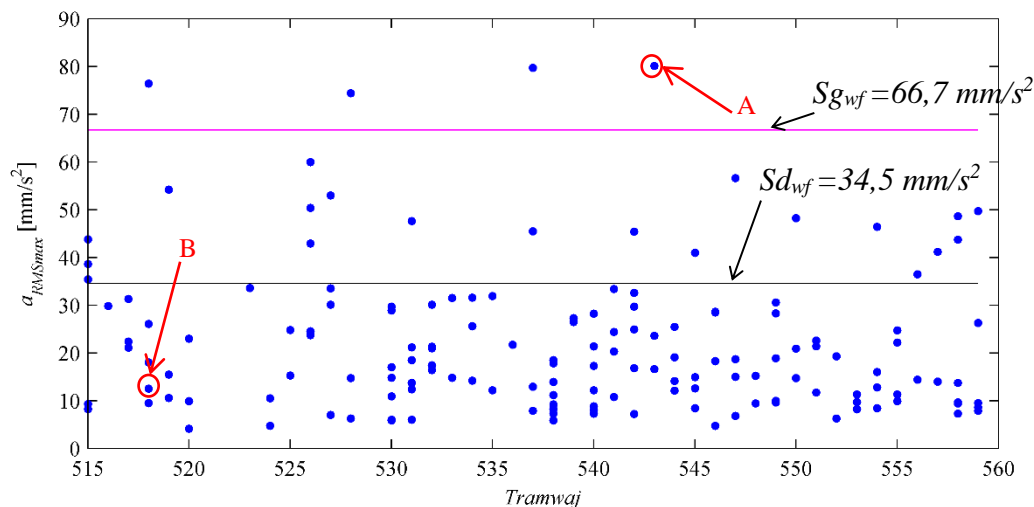
$W_{wf}$  – zbiór stanów technicznych w diagnostyce powierzchni tocznych kół,

$w^1$  – klasa stanów zdadności technicznej,

$w^0$  – klasa stanów niezdatności technicznej.

Zależności pomiędzy parametrem diagnostycznym a stanami można przedstawić jak w równaniach (9.27) i (9.29). Wykonano analizę porównawczą sygnałów czasowych obwiedni drgań i ich widm dla przypadku przejazdu charakteryzującego się największą wartością  $a_{RMSmax}$  dla tramwaju 543 ( $a_{RMSmax} = 80,1 \text{ mm/s}^2$ ) – przypadek A, oraz dla losowego przypadku

z przedziału poniżej wartości dopuszczalnej dla tramwaju 518 ( $a_{RMSmax} = 12,5 \text{ mm/s}^2$ ) – przypadek B. Opisane przypadki przedstawiono na tle uzyskanych wyników na rysunku 9.31.



Rys. 9.31. Analizowane wartości  $a_{RMSmax}$  oznaczone jako przypadki A i B

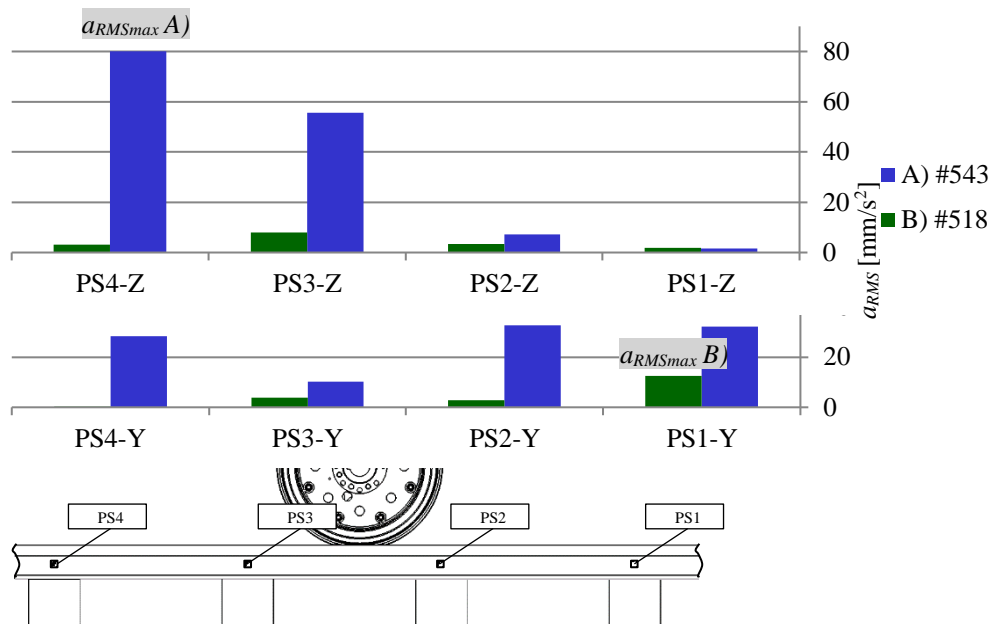
Wartości  $a_{RMS}$  obliczone w zakresie częstotliwości obrotowych kół  $F_k$  w punktach pomiarowych na szynie przedstawiono zbiorczo w tabeli 9.5 oraz na rysunku 9.32. Wartości  $a_{RMS}$  wyróżniono kolorem oznaczającym położenie danego wyniku w odniesieniu do analizowanych danych, przy czym kolor zielony oznacza najmniejszą wartość, kolor żółty oznacza wartość pięćdziesiątego percentyla, a kolor czerwony oznacza największą wartość.

Tabela 9.5. Zestawienie wartości  $a_{RMS}$  z poszczególnych punktów pomiarowych na szynie dla wybranych przypadków przejazdu A i B

Przypadek przejazdu	Prędkość [km/h]	Kierunek poprzeczny Y				Kierunek pionowy Z			
		PS1-Y	PS2-Y	PS3-Y	PS4-Y	PS1-Z	PS2-Z	PS3-Z	PS4-Z
		$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]
A: 543	25,4	32,1	32,6	10,2	28,3	1,6	7,2	55,7	80,1
B: 518	20,8	12,5	2,9	3,9	0,3	1,8	3,5	7,9	3,1
$\Delta A \setminus B$		+61%	+91%	+62%	+99%	-12%	+52%	+86%	+96%

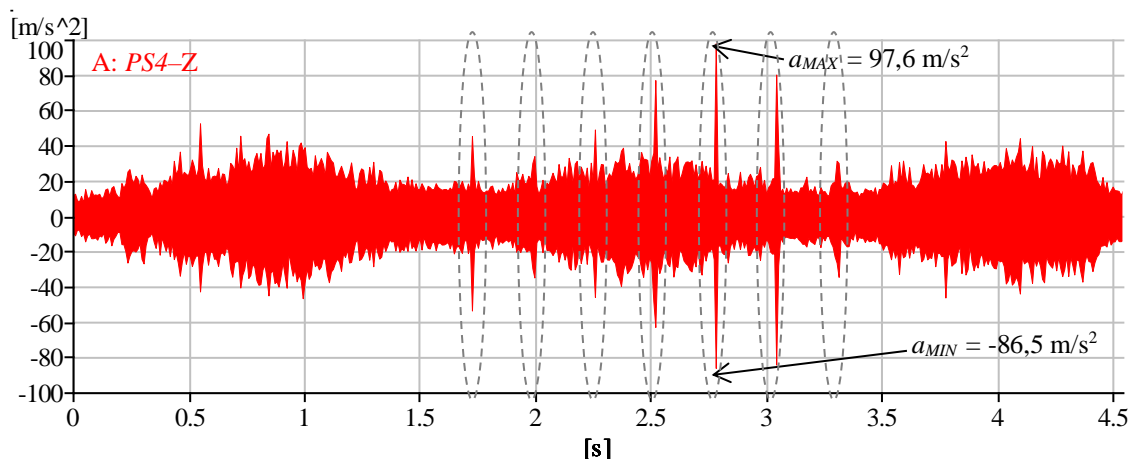
Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli 9.5, największa wartość  $a_{RMS} = 80,1 \text{ mm/s}^2$  dla przypadku przejazdu A dotyczyła punktu PS4-Z, a w przypadku przejazdu B dotyczyła punktu PS1-Y, przy czym wartość  $a_{RMS}$  wynosiła  $12,5 \text{ mm/s}^2$ . Różnica pomiędzy największymi wartościami wynosiła około 84%. Przypadek przejazdu A charakteryzował się większymi wartościami  $a_{RMS}$  o 52–96% we wszystkich punktach pomiarowych poza punktem PS1-Z, dla którego wartość ta była mniejsza o 12% w porównaniu do przypadku przejazdu B. Różnice te wynikają z ustawienia kąтового koła podczas przejazdu i wynikającego z niego lokalnego wymuszenia szyny pochodzącego od płaskiego miejsca na kole.



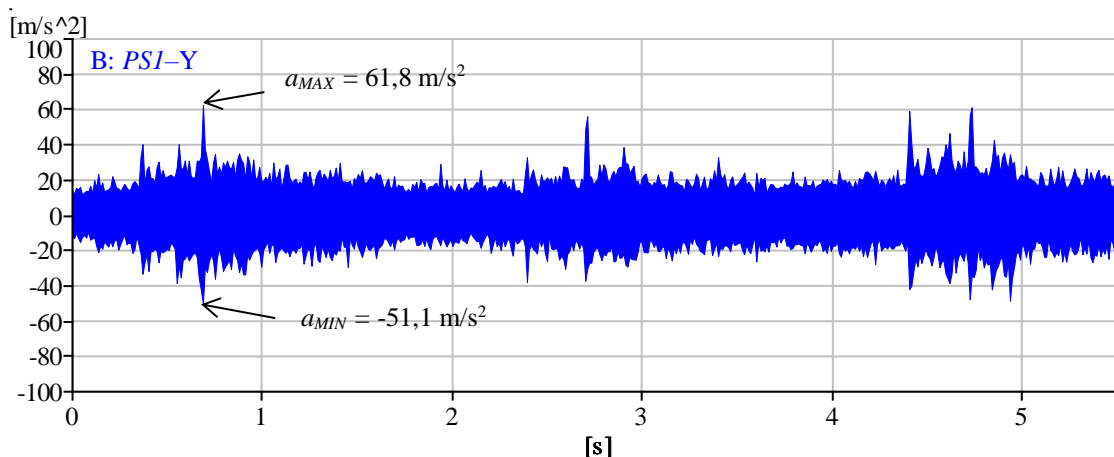


Rys. 9.32. Wartości  $a_{RMS}$  z poszczególnych punktów pomiarowych na szynie dla wybranych przypadków przejazdu A i B

Przeanalizowano sygnały czasowe przyspieszeń drgań dla punktów PS1–Y i PS4–Z, których wartości były największe i które uwzględniono w procesie detekcji płaskich miejsc zgodnie z przyjętą metodyką. Na rysunku 9.33 i 9.34 przedstawiono dla tych punktów przebiegi czasowe przyspieszeń drgań w pełnym paśmie pomiarowym. Przebiegi sygnałów czasowych przyspieszeń drgań przedstawionych na rysunku 9.33 i 9.34 są zbliżone z uwagi na zwiększone oddziaływania dynamiczne pojazdu w obszarze wózków jezdnych. W przypadku przejazdu A (rys. 9.33) zauważalne są jednostkowe krótko-czasowe impulsy w obszarze wózka tocznego o zbliżonym okresie.



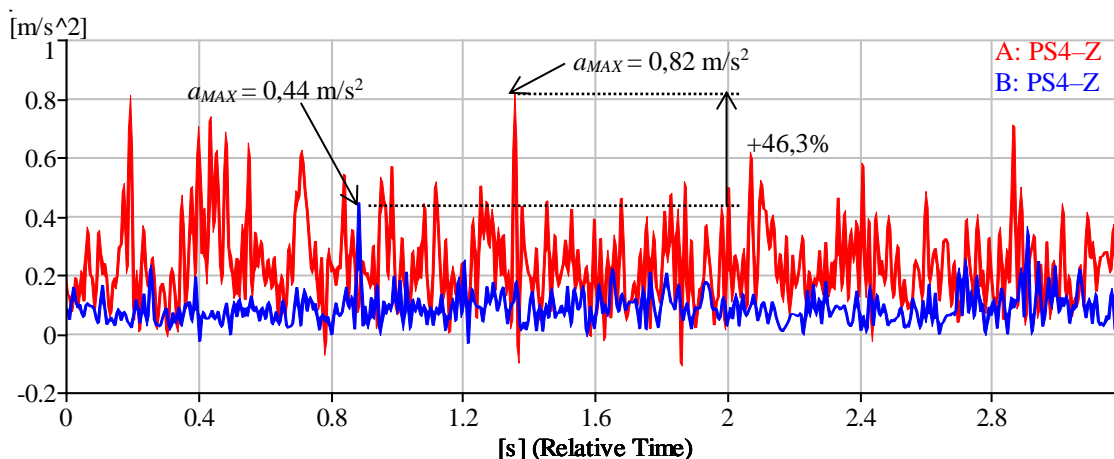
Rys. 9.33. Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań dla przypadku przejazdu A z punktu pomiarowego PS4–Z uwzględnionego w detekcji płaskich miejsc



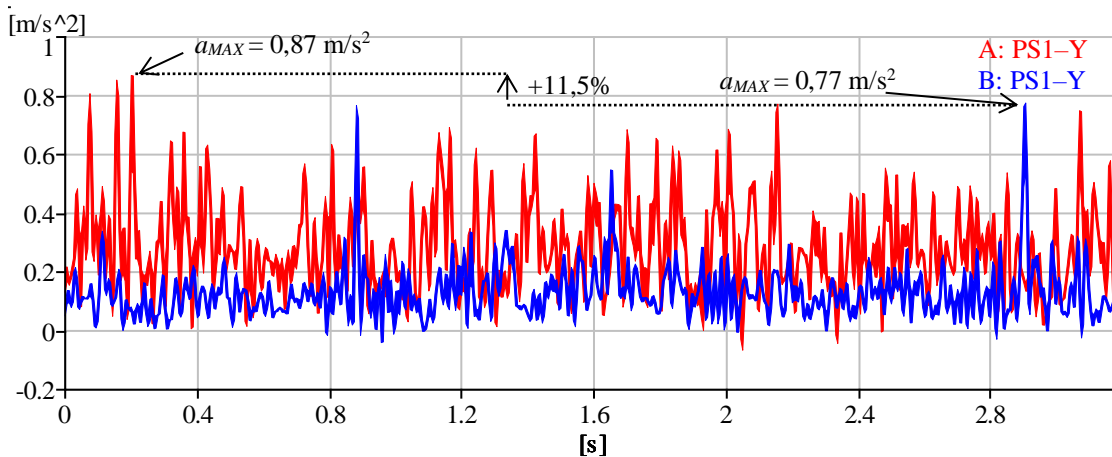
Rys. 9.34. Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań dla przypadku przejazdu B z punktu pomiarowego PS1-Y uwzględnionego w detekcji płaskich miejsc

Największa amplituda w przebiegu czasowym wynosi  $97,6 \text{ m/s}^2$  i dotyczy wymuszenia impulsowego. W przypadku przejazdu B (rys. 9.34) nie zaobserwowano analogicznych wymuszeń impulsowych. Największa amplituda wynosiła  $61,8 \text{ m/s}^2$  i była związana z przejazdem zestawu kołowego.

Na rysunku 9.35 i 9.36 przedstawiono obwiednie sygnałów czasowych dla obu analizowanych przypadków i wybranych punktów pomiarowych. Sygnały filtrowano filtrem pasmowo-przepustowym w zakresie częstotliwości  $F_k$  związanym z częstotliwościami obrotowymi kół.



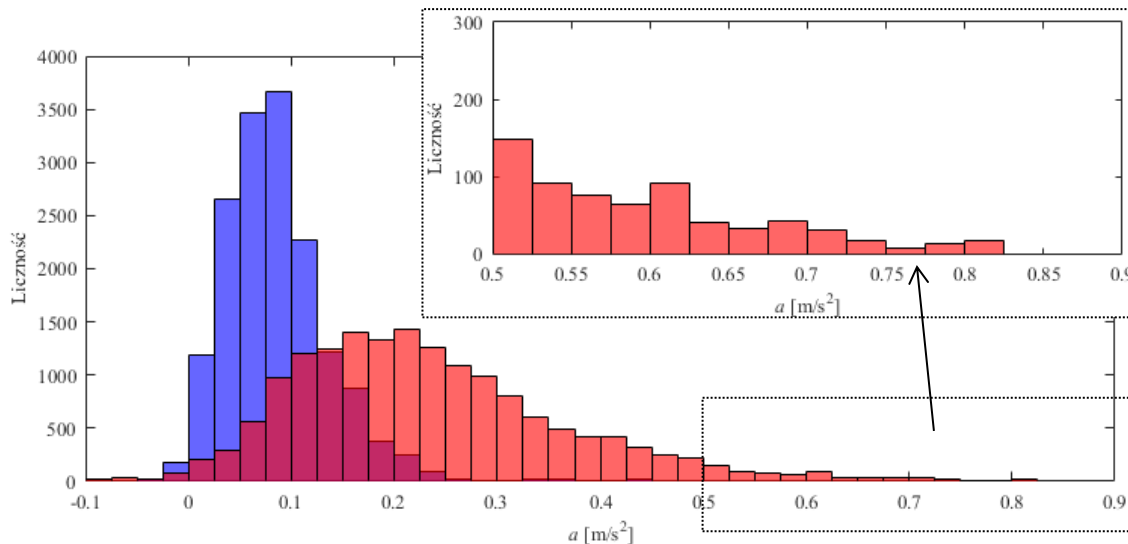
Rys. 9.35. Obwiednia sygnałów przyspieszeń drgań dla przypadku przejazdu A i B z punktu pomiarowego PS4-Z w zakresie częstotliwości  $F_k$



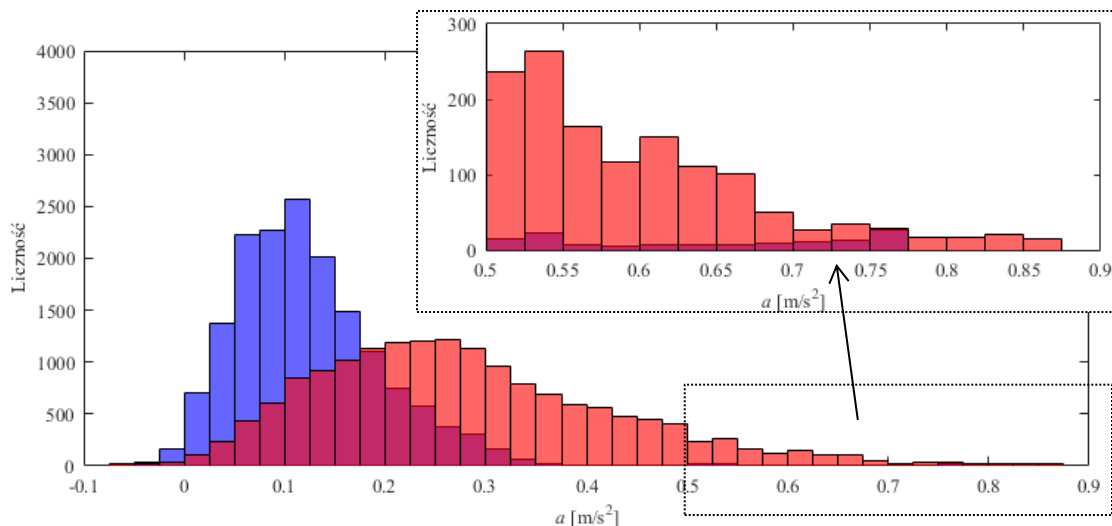
Rys. 9.36. Obwiednia sygnałów przyspieszeń drgań dla przypadku przejazdu A i B z punktu pomiarowego PS1–Y w zakresie częstotliwości  $F_k$

Analizowane przypadki obwiedni sygnałów wykazują zróżnicowanie pomiędzy przypadkiem A i B pod względem osiągniętych amplitud przyspieszeń drgań zarówno w punkcie pomiarowym PS4–Z (rys. 9.35) jak i PS1–Y (rys. 9.36). Największa amplituda drgań dla przypadku A w punkcie PS4–Z wynosiła  $0,82 \text{ m/s}^2$  i była większa o 46% w porównaniu do przypadku B.

Z przedstawionych sygnałów czasowych obwiedni utworzono histogramy przedstawione na rysunku 9.37 i 9.38.



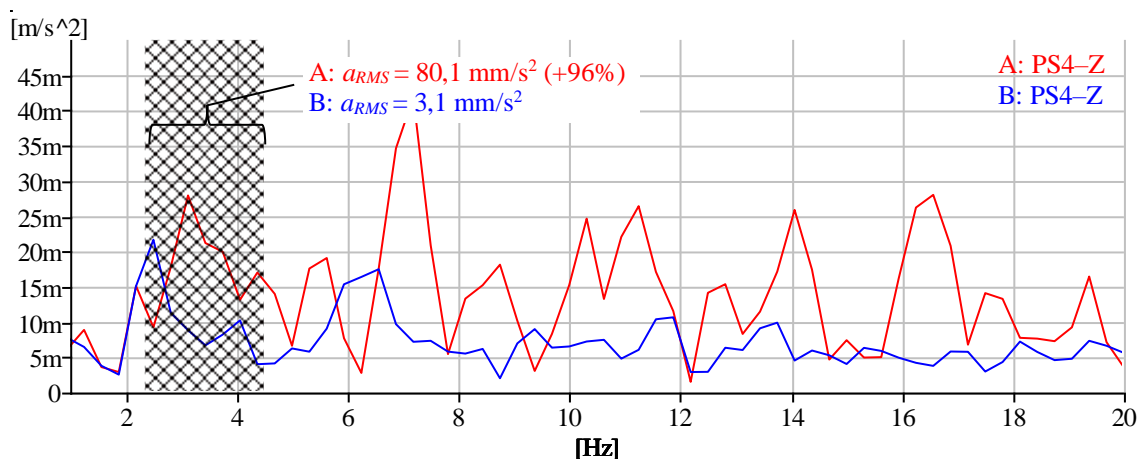
Rys. 9.37. Histogram wartości przyspieszeń drgań z obwiedni dla przypadku przejazdu A i B z punktu pomiarowego PS4–Z w zakresie częstotliwości  $F_k$



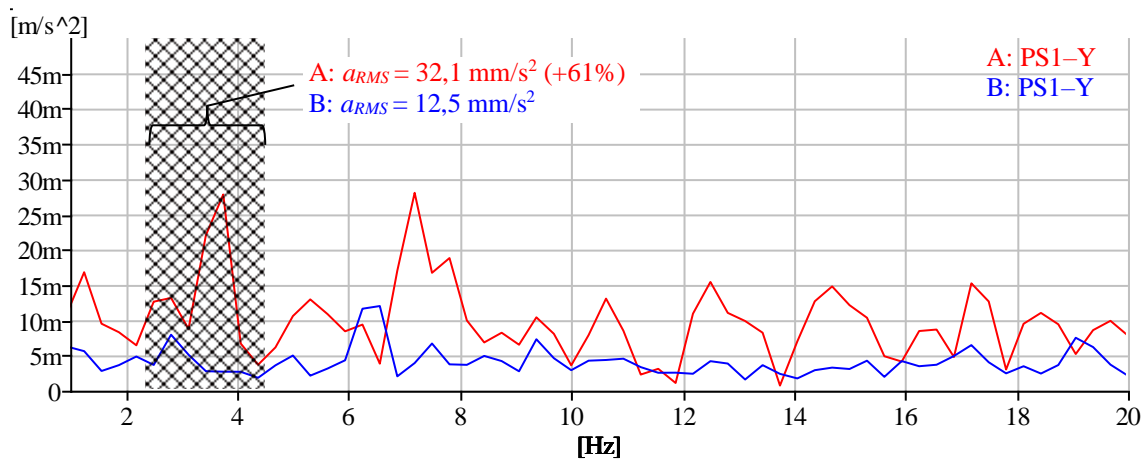
Rys. 9.38. Histogram wartości przyspieszeń drgań z obwiedni dla przypadku przejazdu A i B z punktu pomiarowego PS1–Y w zakresie częstotliwości  $F_k$

Jak wskazuje histogram na rysunku 9.37, nie zaobserwowano amplitud o wartości powyżej  $0,5 \text{ m/s}^2$  w sygnale PS4–Z dla przypadku B. Dla przypadku A zaobserwowano około dziewięciuset takich wystąpień, z czego w przedziałach powyżej wartości  $0,8 \text{ m/s}^2$  ponad trzydzieści. Histogram na rysunku 9.38, wskazuje na prawie sto wystąpień amplitud o wartości powyżej  $0,5 \text{ m/s}^2$  w sygnale PS1–Y dla przypadku B. Dla przypadku A zaobserwowano około tysiąca dwustu takich wystąpień, z czego w przedziałach powyżej wartości  $0,8 \text{ m/s}^2$  ponad trzydzieści, analogicznie jak w sygnale PS4–Z.

Widmo obwiedni analizowanych sygnałów przedstawiono na rysunku 9.39 dla punktu PS1–Y oraz na rysunku 9.40 dla punktu PS4–Z.



Rys. 9.39. Widmo obwiedni sygnałów przyspieszeń drgań dla przypadku przejazdu A i B z punktu pomiarowego PS4–Z



Rys. 9.40. Widmo obwiedni sygnałów przyspieszeń drgań dla przypadku przejazdu A i B z punktu pomiarowego PS1-Y

Jak zaobserwowano na widmach obwiedni drgań przejazdów, większe amplitudy w zakresie częstotliwości obrotowych kół  $F_k$  dotyczą każdorazowo przypadku A. Dotyczy to również wartości  $a_{RMS}$  obliczonych z tego zakresu. W punkcie PS4-Z dla przypadku A, wartości  $a_{RMS}$  były większe o 96% a w punkcie PS1-Y o 61%.

Przedstawione wyniki wskazują na możliwość wykorzystania miary  $a_{RMSmax}$  jako parametru diagnostycznego w detekcji niezdatności powierzchni tocznej kół w postaci płaskich miejsc.

## 9.5. Podsumowanie rozdziału 9

Przeprowadzona analiza wskazuje, że uszkodzona przekładnia tramwaju wpływa na obserwowane zjawiska akustyczne w otoczeniu tramwaju – szczególnie na wysokości lokalizacji przekładni w obszarze wózka napędowego. Wykazano, że możliwa jest obserwacja zmian stanu przekładni na podstawie zmian poziomu równoważnego ciśnienia akustycznego mierzonego wielopunktowo na matrycy mikrofonowej. Spośród zaproponowanych sześciu kumulant uwzględniających wyniki z matrycy mikrofonowej, najlepsza w detekcji niezdatności jest kumulanta oparta na obliczeniu pierwiastka z sumy kwadratów  $U_{N_{2,3}}$ . Kumulanta ta liczona jest z uwzględnieniem dwóch zakresów obejmujących częstotliwości związane z harmonicznymi zazębienia przekładni z pominięciem podstawowej częstotliwości zazębienia. Obliczenia dla wszystkich zarejestrowanych przejazdów z uwzględnieniem wartości dopuszczalnej i granicznej znajdują swoje odzwierciedlenie w stanie technicznym przekładni.

W przypadku analiz związanych z detekcją niezdatności powierzchni tocznych kół zaadaptowano metodę bazującą na analizie obwiedni drgań z wykorzystaniem transformaty Hilberta. Analizy wykazały możliwość obserwacji częstotliwości modulujących, które

reprezentują impulsowy charakter sygnału pochodzący od dyskretnych uszkodzeń powierzchni tocznych kół (płaskie miejsca). Zaproponowany parametr diagnostyczny  $a_{RMSmax}$  umożliwił detekcję stanu awaryjnego. Zdefiniowane wartości graniczne umożliwiły wyselekcjonowanie tramwajów z kołami, na których wystąpiły płaskie miejsca, które następnie sparametryzowano.

Na podstawie uzyskanych wyników detekcji stanów awaryjnych wyeliminowano ze zbioru obserwacji egzemplarze wskazujące ich wystąpienie. W ten sposób zminimalizowano wpływ zakłóceń od skrajnych przypadków uszkodzeń na wyniki dalszych obliczeń związanych z aktywnością wibroakustyczną tramwaju.

## 10. ANALIZA SKŁADOWYCH AKTYWNOŚCI WIBROAKUSTYCZNEJ TRAMWAJU

### 10.1. Określenie miar punktowych i podstawowe założenia analizy

Dalsze analizy związane z aktywnością wibroakustyczną tramwajów wykonywano dla zredukowanej liczby przejazdów. Redukcję wykonano w oparciu o wyniki analiz związanych z oceną niezdatności przekładni i oceną niezdatności powierzchni tocznych kół. Z uwagi na wykryte niezdatności odrzucono sześć przejazdów. Ponadto podczas analizy materiału badawczego odrzucono dwa przejazdy z uwagi na możliwe zakłócenia wynikające z przejazdu innego tramwaju w bliskiej odległości od miejsca pomiarowego.

Ostatecznie uwzględniono sto czterdzieści siedem przejazdów w obliczeniach miar parametryzujących poszczególne składowe aktywności wibroakustycznej tramwaju opisane w rozdziale 3.1. Składowa SA reprezentowana przez zmianę ciśnienia akustycznego była sparametryzowana z wykorzystaniem sześciu miar punktowych dźwięku. Pierwsza z nich to poziom równoważny ciśnienia akustycznego (bez korekcji częstotliwościowej A) obliczony liniowo w pełnym zakresie pomiarowym. Taki sposób analizy, z uwagi na specyfikację mikrofonów, umożliwił ujęcie połowy zakresu częstotliwości infradźwięków do górnej ich granicy (10–20 Hz) oraz pełne częstotliwościowe ujęcie mechanicznych źródeł dźwięku bez względu na wrażenia słuchowe człowieka. Ponadto w nawiązaniu do badań [41] obliczono wskaźniki psychoakustyczne dźwięku w postaci głośności całkowitej, 5–percentyla głośności całkowitej, chropowatości, ostrości i fluktuacji dźwięku. W przypadku zjawisk drganiowych składowych KS, TI, IO opierano się na miarach odnoszących się do energii sygnału w dziedzinie czasu w postaci wartości skutecznej przyspieszeń drgań. W celu scharakteryzowania ogólnego poziomu oddziaływań drganiowych w danym punkcie pomiarowym drgań obliczono miarę *SRSS* (ang. *Square Root of the Sum of Squares*), czyli pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów. Podstawą obliczeń były wartości skuteczne z sygnałów mierzonych kierunków drgań. Zestawienie analizowanych miar przedstawiono w tabeli 10.1.

Tabela 10.1. Zestawienie obliczanych miar punktowych drgań i dźwięku w odniesieniu do składowych aktywności wibroakustycznej

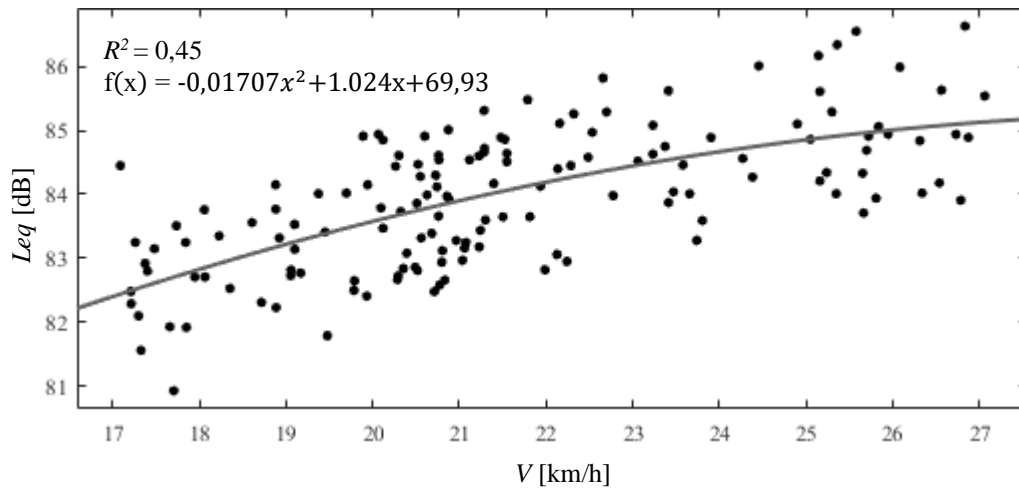
Składowa aktywności wibroakustycznej	Punkty pomiarowe	Miary reprezentujące daną składową	Symbol
SA Sygnatura akustyczna	MR	Poziom równoważny ciśnienia akustycznego	$Leq$
		Wskaźnik psychoakustyczny głośności całkowitej	$N$
		Wskaźnik psychoakustyczny 5-pecentyla głośności całkowitej	$N5$
		Wskaźnik psychoakustyczny chropowatości dźwięku	$SR$
		Wskaźnik psychoakustyczny ostrości dźwięku	$S$
		Wskaźnik psychoakustyczny fluktuacji dźwięku	$FS$
KS Dynamiczne oddziaływanie na styku koła z szyną	PS1	Pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów (SRSS) bazujący na wartościach skutecznych przyspieszeń drgań z kierunków poprzecznego Y i pionowego Z	$SRSS_{PS}$
TI Dynamiczne oddziaływanie tramwaju z infrastrukturą torową	PP		$SRSS_{PP}$
IO Dynamiczne oddziaływanie infrastruktury torowej z otoczeniem	PG1, PG2		$SRSS_{PG1}$ $SRSS_{PG2}$

Uwzględnione miary punktowe w analizach zdefiniowano w dalszej części pracy. Zgodnie z założeniami opisanymi w rozdziale 5, miary te zaklasyfikowano do pięciu klas.

## 10.2. Składowa SA - analiza poziomu równoważnego ciśnienia akustycznego $Leq$

W pierwszej kolejności wykonano dla każdego przejazdu obliczenia podstawowej miary punktowej hałasu, czyli równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego  $Leq$  bez korekcji częstotliwościowej w całym rejestrowanym zakresie częstotliwości. Równoważny poziom  $Leq$  obliczono analogicznie jak w równaniu (9.16). Pomiar realizowano z bieżącym uśrednianiem sygnału wynoszącym 125 ms (stała czasowa FAST). Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartością  $Leq$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(Leq, V) = 0,67$ , co świadczy o średniej zależności. Dokonano analizy regresji liniowej i nieliniowej pomiędzy zmiennymi. Na rysunku 10.1 przedstawiono model wielomianowy charakteryzujący się najlepszym dopasowaniem do danych ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,45$ .

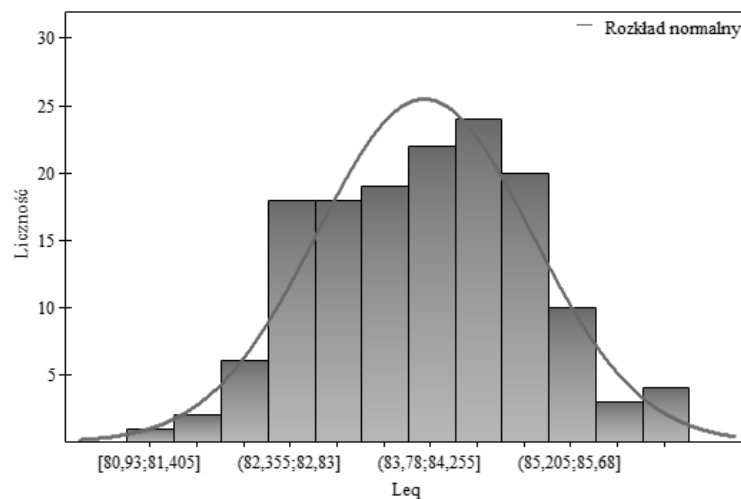




Rys. 10.1. Zależność wartości  $Leq$  w funkcji prędkości przejazdu

Zgodnie z przedstawionymi wynikami, nie stwierdzono silnej zależności wartości  $Leq$  od prędkości przejazdu tramwajów w analizowanym zakresie.

Sprawdzono dopasowanie wartości  $Leq$  do rozkładu normalnego zgodnie z przyjętą w pracy procedurą badania normalności rozkładu. Przyjęto analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$ , jak w równaniach (9.30) i (9.31). Szczegółowe wyniki przedstawiono w załączniku nr 3 d). Histogram rozkładu wartości  $Leq$  przedstawiono na rysunku 10.2.



Rys. 10.2. Histogram rozkładu wartości  $Leq$

Jak wynika z danych zawartych w załączniku, wyniki wskazują na brak odstępstw wartości  $Leq$  od rozkładu normalnego. Wartości  $Leq$  w obserwacjach charakteryzują się współczynnikiem zmienności  $CV_{Leq} = 1,3\%$  i rozstępem  $R_{Leq} = 5,7$  dB.

Z uwagi na zgodność rozkładu wartości  $Leq$  z rozkładem normalnym, wartości dopuszczalne i graniczne wyznaczone w oparciu o metodę Smiley'a zgodnie z równaniami

(9.32), (9.33). Przypisanie wartości  $Leq$  do najwyższej piątej klasy  $K5\_Leq$  związane było z osiągnięciem lub przekroczeniem wartości granicznej i zachodziło jak w implikacji:

$$Leq \geq Sg_{Leq} \rightarrow K5\_Leq \quad (10.1)$$

W przypadku klasy czwartej  $K4\_Leq$ , wartości  $Leq$  powiązane były z osiągnięciem lub przekroczeniem wartości dopuszczalnej jak w implikacji:

$$Sg_{Leq} > Leq \geq Sd_{Leq} \rightarrow K4\_Leq \quad (10.2)$$

Granice klasy trzeciej i drugiej –  $K3\_Leq$  i  $K2\_Leq$  wyznaczały odpowiednio górna i dolna granica obserwacji typowych stanowiących około 68% obserwacji w rozkładzie normalnym, jak w równaniach:

$$K3\_Leq = \bar{x}_{Leq} + \sigma_{Leq} \quad (10.3)$$

$$K2\_Leq = \bar{x}_{Leq} - \sigma_{Leq} \quad (10.4)$$

Przypisanie wartości  $Leq$  do klasy trzeciej, drugiej i pierwszej zachodziło jak w poniższych implikacjach:

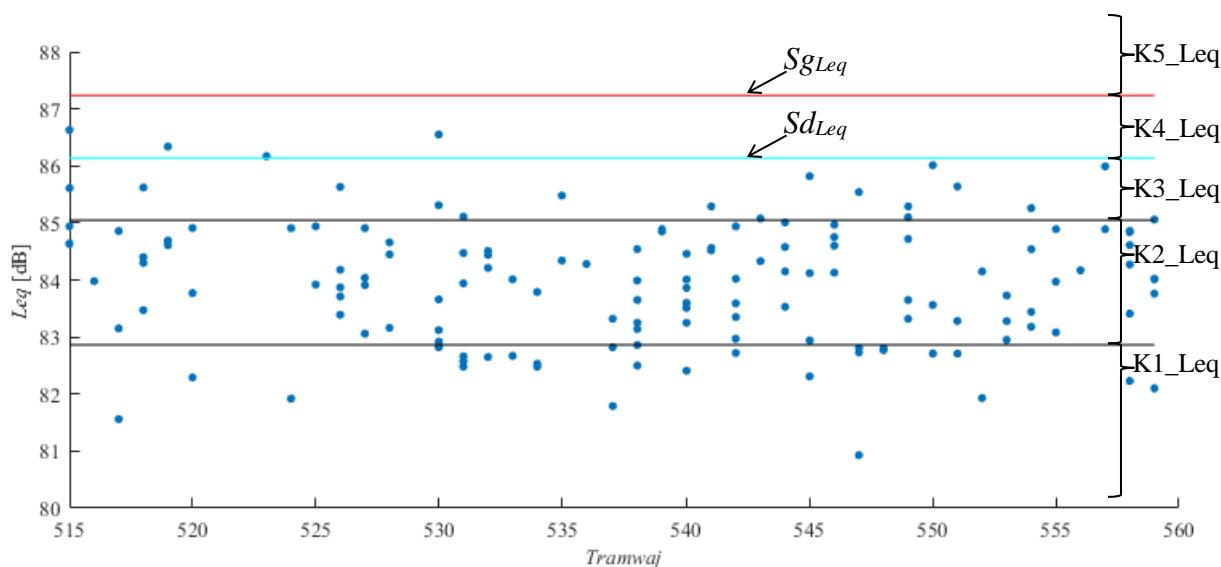
$$K3\_Leq > Leq \geq K2\_Leq \rightarrow K3\_Leq \quad (10.5)$$

$$K2\_Leq \geq Leq \rightarrow K2\_Leq \quad (10.6)$$

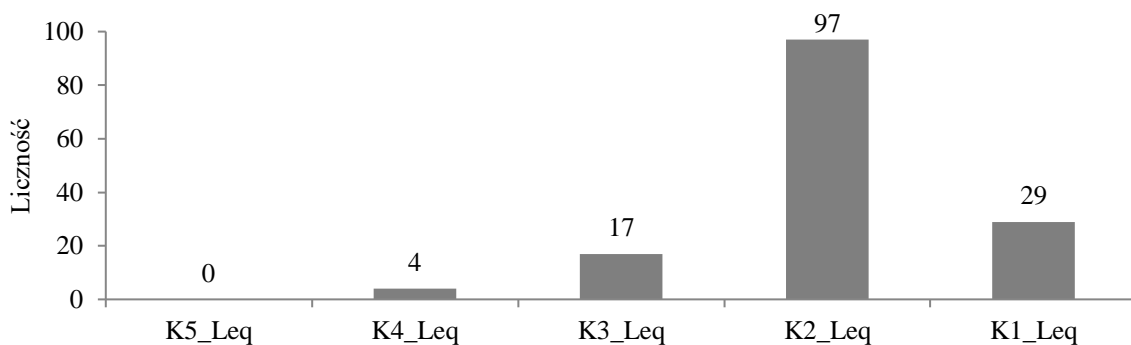
$$Leq < K2\_Leq \rightarrow K1\_Leq \quad (10.7)$$

Uzyskane wartości  $Leq$  przyporządkowane do tramwajów na tle zdefiniowanych klas przedstawiono na rysunku 10.3, a ich licznosci w danej klasie zestawiono na rysunku 10.4. W opisach klasyfikacji przyjęto w pracy uproszczony zapis traktujący o klasyfikacji przejazdów do danej klasy. Rozwinięcie tego uproszczenia oznacza w rzeczywistości klasyfikację miar punktowych opisujących dane zjawisko wibroakustyczne generowane przy przejeździe tramwaju.

Zgodnie z przedstawionymi danymi dla wartości  $Leq$  najliczniejszą klasę stanowi klasa druga  $K2\_Leq$ , do której przypisano 97 przejazdów, co stanowi około 66% obserwacji. Do najbardziej korzystnej klasy  $K1\_Leq$  przypisano 29 przejazdów, a do klasy  $K3\_Leq$  – 17 przejazdów, czyli odpowiednio 20% i 12% obserwacji. Zaobserwowano cztery przejazdy, które przekroczyły wartość dopuszczalną i przypisano je do klasy  $K4\_Leq$ , co stanowi 3% obserwacji. Nie zaobserwowano przejazdów przypisanych do klasy  $K5\_Leq$ .

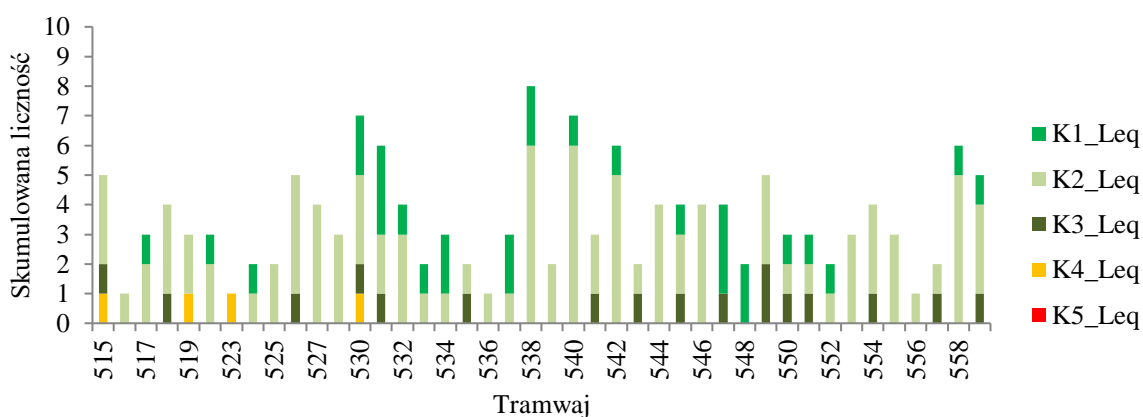


Rys. 10.3. Klasy wartości  $Leq$  na tle uzyskanych wyników



Rys. 10.4. Histogram klas dla wartości  $Leq$

Na rysunku 10.5 przedstawiono skumulowaną licznosc klas wartosci  $Leq$  osiagnanych przez poszczególne tramwaje.



Rys. 10.5. Skumulowana licznosc klas wartosci  $Leq$  dla przejazdow danego tramwaju

Na tle wszystkich analizowanych tramwajow wyroznic mozna liczne przejazdy tramwajow 538, 540, 542, 558, ktore kwalifikowaly sie jedynie do klas K1\_Leq i K2\_Leq, przy realizacji ponad czterech przejazdow. Tramwaje 515, 519, 523 i 530 osiagnely klase K4\_Leq

dla jednego przejazdu. Przy czym przejazdy tramwaju 530 osiągały również klasę K1\_Leq dla trzech przejazdów.

### **10.3. Składowa SA - analiza wskaźnika psychoakustycznego głośności całkowitej dźwięku $N$**

Kolejną miarą uwzględnioną w ocenie aktywności wibroakustycznej dotyczącej zjawisk akustycznych był wskaźnik głośności całkowitej  $N$  (ang. *total loudness*). Jest on jednym ze wskaźników psychoakustycznych rankingującym wrażenie słuchowe intensywności sygnału akustycznego w skali liniowej. Głośność na poziomie 1 sona odpowiada tonalnemu poziomowi dźwięku wynoszącemu 40 dB dla częstotliwości 1000 Hz (co odpowiada również głośności równej 40 fonów) [238].

W przypadku złożonych dźwięków konieczne jest uwzględnienie w obliczeniach głośności krytycznych pasm częstotliwości dla ludzkiej percepcji ucha. Definiowane są one jako szczególne pasma częstotliwości przy których bodźce słuchowe znajdujące się blisko siebie w rozkładzie częstotliwości są odbierane łącznie. Jest to związane z efektem maskowania, który jest ściśle związany z własnościami ucha wewnętrznego [190, 224]. Ponadto w obrębie pasma krytycznego trudno jest rozpoznać zmiany częstotliwości dźwięków tonalnych. Uszeregowanie tych pasm krytycznych tworzy skale częstotliwości oznaczoną jako krytyczne pasma częstotliwości w jednostce bark. Zgodnie z pracą [70] ustalono 24 pasma krytyczne w skali od 0 do 24 barków.

W pierwotnej postaci algorytmu obliczeń, sygnał akustyczny jest rozkładany na poszczególne składowe częstotliwości z wykorzystaniem algorytmu FFT. Częstotliwości te są grupowane zgodnie z nieliniową skalą pasma krytycznego. Następnie oblicza się dla nich poziom ciśnienia akustycznego w skali decybelowej, które są następnie przekształcane na równe poziomy głośności w fonach. Następnie przekształca się wyniki do postaci liniowej tworząc wskaźnik głośności całkowitej.

W obliczeniach możliwe jest również zastosowanie pasm tercjowych jako przybliżenie pasm krytycznych [70]. Wskaźnik głośności całkowitej obliczono bazując na widmach tercjowych CPB zgodnie z metodą Zwickera wskazaną w normie ISO 532-1:2017 [104] zaimplementowaną w oprogramowaniu BK Connect. W metodzie tej obliczono dwadzieścia osiem średnich poziomów trzeciej oktawy w zakresie częstotliwości 25–12500 Hz.

Obliczenia opierały się na zsumowaniu głośności właściwych z poszczególnych grup częstotliwości, jak w poniższym równaniu [70, 93]:

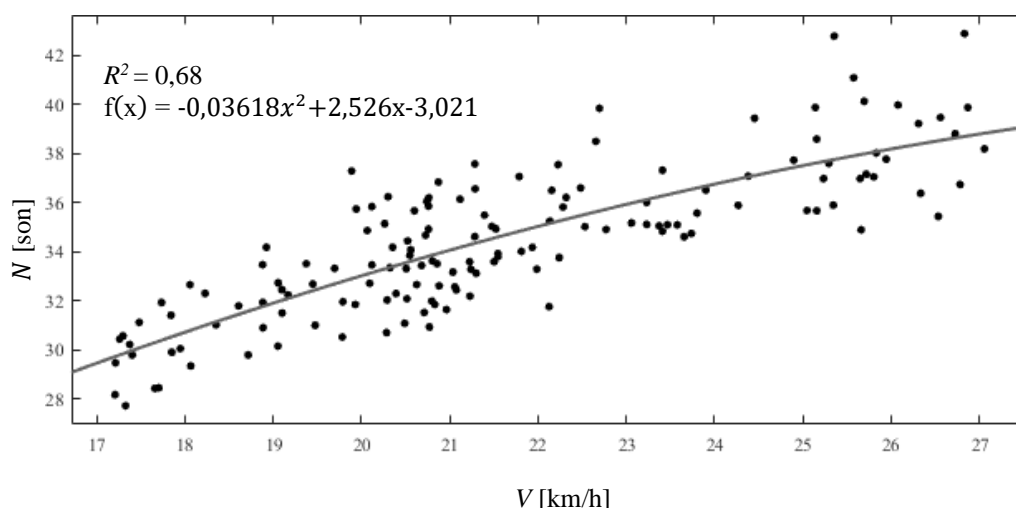
$$N = \int_0^{24 \text{ Bark}} N'(z) dz \quad (10.8)$$

gdzie:

$N$  – wskaźnik psychoakustyczny głośności całkowitej dźwięku [son],

$N'$  – głośność właściwa w danym paśmie tercjowym (krytycznym)  $z$  [son].

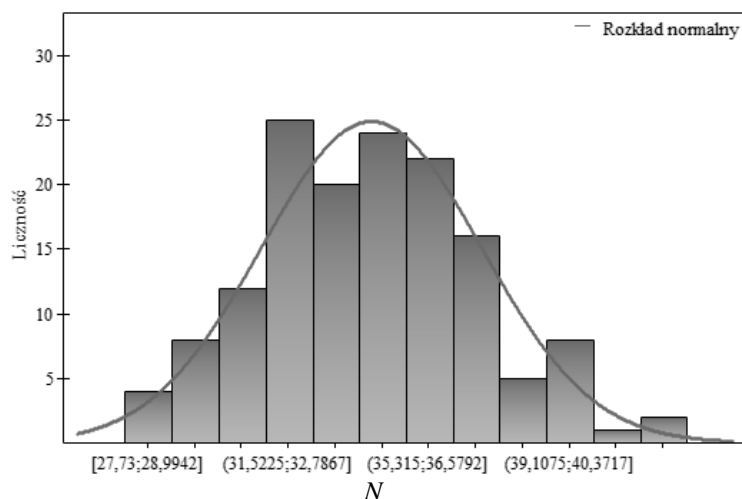
Obliczenia wskaźnika głośności całkowitej  $N$  prowadzono dla wyników pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego w punkcie  $MR$ . Dla obliczonych wskaźników głośności całkowitej  $N$  dokonano analizy regresji liniowej i nieliniowej zmiennej w funkcji prędkości przejazdu. Na rysunku 10.6 przedstawiono wyniki obliczeń wskaźnika głośności całkowitej  $N$  dla poszczególnego przejazdu wraz z modelem wielomianowym charakteryzującym się najlepszym dopasowaniem danych ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,68$ .



Rys. 10.6. Wartości  $N$  w funkcji prędkości przejazdów

Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartością  $N$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(N, V) = 0,82$ , co świadczy o silnej zależności. Wartości  $N$  w obserwacjach charakteryzują się współczynnikiem zmienności  $CV_N = 8,7\%$  i rozstępem  $R_N = 15,2$  sonów.

Sprawdzono dopasowanie wartości  $N$  do rozkładu normalnego zgodnie z przyjętą w pracy procedurą badania normalności rozkładu. Przyjęto analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$  jak w równaniach (9.30) i (9.31). Szczegółowe wyniki analiz testu na normalność rozkładu wskaźnika  $N$  przedstawiono w załączniku nr 3 e). Histogram rozkładu wartości  $N$  przedstawiono na rysunku 10.7. Jak wynika z danych zawartych w załączniku, wyniki wskazują na brak odstępstwa wartości  $N$  od rozkładu normalnego.



Rys. 10.7. Histogram rozkładu wartości  $N$

Z uwagi na zgodność wartości  $N$  z rozkładem normalnym, wartość graniczną i dopuszczalną obliczono zgodnie z metodą Smiley'a. Wartość graniczna dla głośności  $Sg_N$  stanowi zatem górną granicę około 99% wyników, a wartość dopuszczalna  $Sg_N$  stanowi górną granicę około 95% wyników. Z uwagi na zależność wartości  $N$  od prędkości wyznaczono krzywe wartości granicznych i dopuszczalnych bazując na korekcie współczynnika nachylenia  $\beta_1$  w utworzonym modelu wielomianowym, zgodnie z równaniem:

$$\beta_{1(1-\alpha)} = (\beta_1 - t_{(1-\alpha/2, No-p)}SE, \beta_1 + t_{(1-\alpha/2, No-p)}SE) \quad (10.9)$$

gdzie:

$\beta_1$  – estymowany współczynnik nachylenia wielomianu,

$SE$  – błąd standardowy obserwacji,

$No$  – liczba obserwacji,

$p$  – liczba współczynników wielomianu,

$t$  – statystyka t-studenta,

$\alpha$  – poziom istotności.

Dla krzywej wartości dopuszczalnych  $Sd_N$  przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ , co odpowiada kwantylowi rzędu 0,95, a dla krzywej wartości granicznych  $Sg_N$  przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,01$ , co odpowiada kwantylowi rzędu 0,99. Założenia te pozwalają na stwierdzenie, że na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  rzeczywista wartość  $N$  mieści się w określonym przez krzywe przedziale z prawdopodobieństwem 95%, a na poziomie istotności  $\alpha = 0,01$  z prawdopodobieństwem 99%.

Statystyki t-studenta dla obserwowanej licznosci i współczynników wielomianu wynosiły odpowiednio 1,656 dla  $\alpha = 0,05$  i 2,353 dla  $\alpha = 0,01$ . Obliczone współczynniki

nachylenia wynosiły  $\beta_{0,95} = 2,689$  oraz  $\beta_{0,99} = 2,741$ , a równania krzywych miały postać, jak w równaniach:

$$f_{sd\_N} = -0,03618x^2 + 2,689x - 3,021 \quad (10.10)$$

$$f_{sg\_N} = -0,03618x^2 + 2,741x - 3,021 \quad (10.11)$$

Następnie podzielono uzyskane wyniki na pięć klas zgodnie z tabelą 5.1. Przypisanie wartości  $N$  do najwyższej piątej klasy K5\_N związane było z osiągnięciem lub przekroczeniem krzywej wartości granicznej i zachodziło jak w implikacji:

$$N \geq f_{sg\_N} \rightarrow K5\_N \quad (10.12)$$

W przypadku klasy czwartej K4\_N, wartości  $N$  powiązane były z osiągnięciem lub przekroczeniem krzywej wartości dopuszczalnej jak w implikacji:

$$f_{sg\_N} > N \geq f_{sd\_N} \rightarrow K4\_N \quad (10.13)$$

Krzywe dla klas K3\_N i K2\_N wyznaczono bazując na korekcie współczynnika nachylenia  $\beta_1$  w utworzonym modelu wielomianowym (rys. 10.6). Założono, że dla krzywych klas K3\_N i K2\_N współczynniki nachylenia korygowano dla poziomu istotności  $\alpha = 0,32$ , co odpowiada kwantylowi 0,68. Reprezentuje on prawdopodobieństwo 68% zlokalizowania obserwacji w klasie drugiej. Statystyka t-studenta dla poziomu istotności  $\alpha = 0,02$ , który dotyczy kwantyla rzędu 0,68 wynosi 0,844. Obliczone współczynniki nachylenia wynosiły  $\beta_{0,68}(2,457; 2,597)$ , a równania krzywych miały postać, jak w równaniach:

$$f_{K2\_N} = -0,03618x^2 + 2,457x - 3,021 \quad (10.14)$$

$$f_{K3\_N} = -0,03618x^2 + 2,597x - 3,021 \quad (10.15)$$

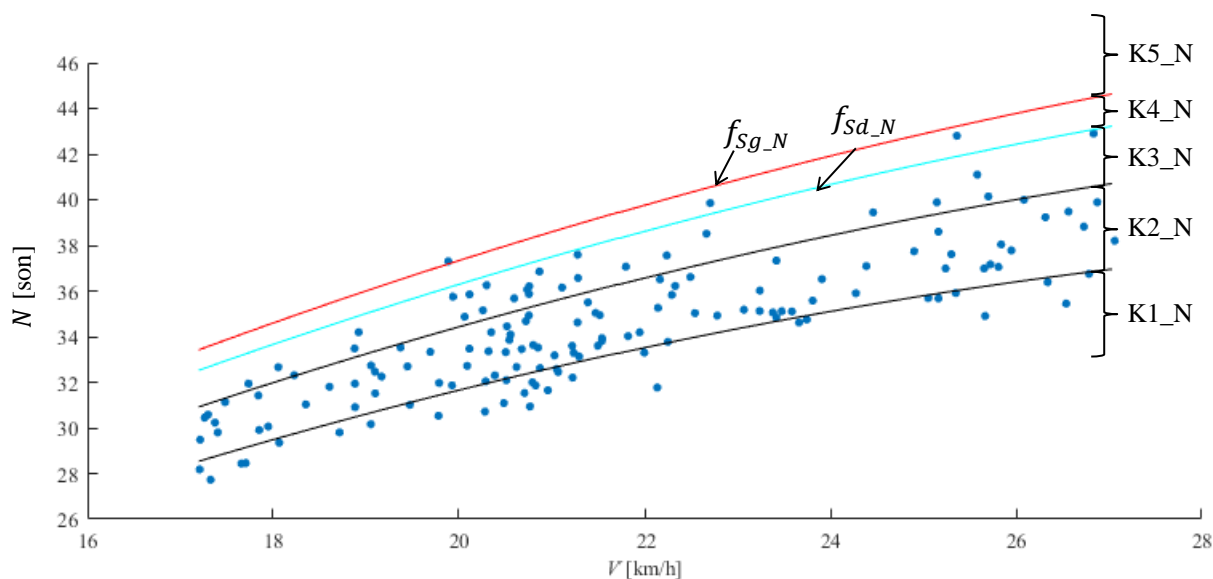
Przypisanie wartości  $N$  do klasy trzeciej, drugiej i pierwszej zachodziło jak w poniższych implikacjach:

$$f_{K3\_N} > N \geq f_{K2\_N} \rightarrow K3\_N \quad (10.16)$$

$$f_{K2\_N} \geq N \rightarrow K2\_N \quad (10.17)$$

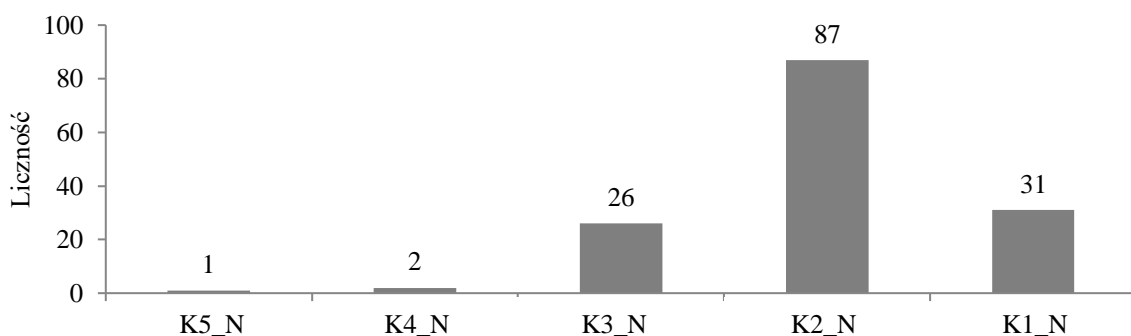
$$N < f_{K2\_N} \rightarrow K1\_N \quad (10.18)$$

Uzyskane wartości  $N$  przyporządkowane do tramwajów na tle zdefiniowanych klas przedstawiono na rysunku 10.8, a ich licznosci w danej klasie zestawiono na rysunku 10.9.



Rys. 10.8. Krzywe klas na tle wartości  $N$  w funkcji prędkości

Wyniki przyporządkowania przejazdów do poszczególnych klas przedstawiono na rysunku 10.9.

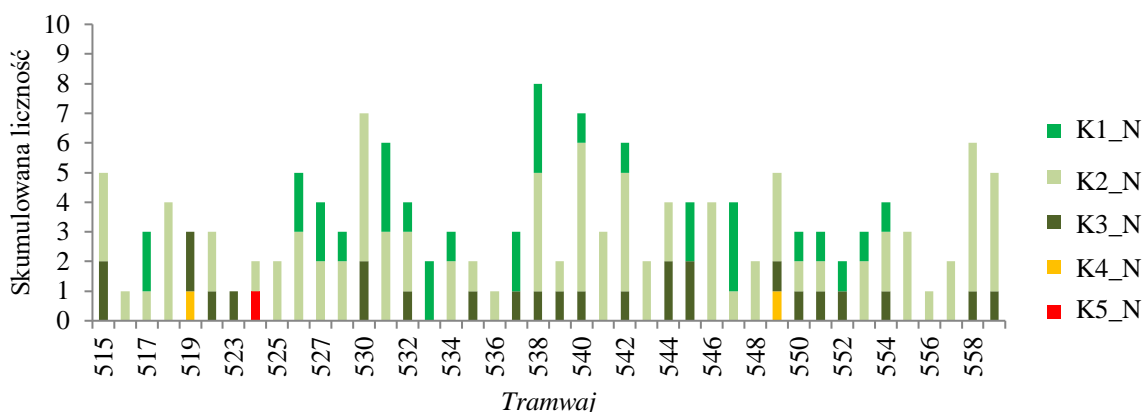


Rys. 10.9. Histogram licznosci klas wartosci  $N$

Zgodnie z przedstawionymi danymi dla wartości  $N$  najliczniejszą klasę stanowi klasa druga K2\_N, do której przypisano 87 przejazdów, co stanowi około 59% obserwacji. Do najbardziej korzystnej klasy K1\_N przypisano 31 przejazdów, a do klasy K3\_N – 26 przejazdów, czyli odpowiednio 21% i 18% obserwacji. Zaobserwowano dwa przejazdy, które przekroczyły wartość dopuszczalną i które przypisano do klasy K4\_N, oraz jeden przejazd przekraczający wartość graniczną, stanowiące łącznie 2% obserwacji.

Wyniki przyporządkowania przejazdów do poszczególnych klas w zależności od tramwaju przedstawiono na rysunku 10.10. Uzyskane dane pozwalają wskazać trzy tramwaje 526, 531, 547, których przejazdy charakteryzowały się wskaźnikami głośności  $N$  przyporządkowanymi do dwóch najniższych klas K1\_N i K2\_N przy liczności przejazdów powyżej czterech.





Rys. 10.10. Skumulowana licznosc klas  $N$  przyporzadkowana do poszczegolnego tramwaju

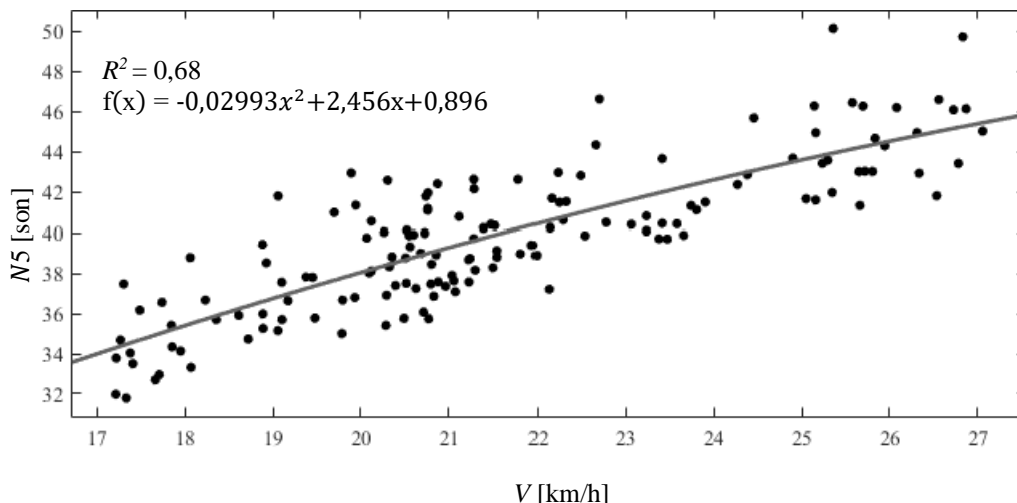
Brak zmienności w klasyfikacji wykazywało siedem tramwajów 518, 525, 541, 546, 548, 555, 557, które charakteryzowały się zawsze sklasyfikowaniem do klasy K2\_N. Tramwaje 519, 549 osiągnęły klasę K4\_N dla jednego przejazdu. Przy czym przejazdy tramwaju 549 osiągały również klasę K2\_N dla trzech przejazdów. Z kolei tramwaj 519 osiągnął również dwa razy klasę K3\_N.

#### 10.4. Składowa SA – analiza wskaźnika psychoakustycznego 5-percentyla głośności całkowitej dźwięku $N5$

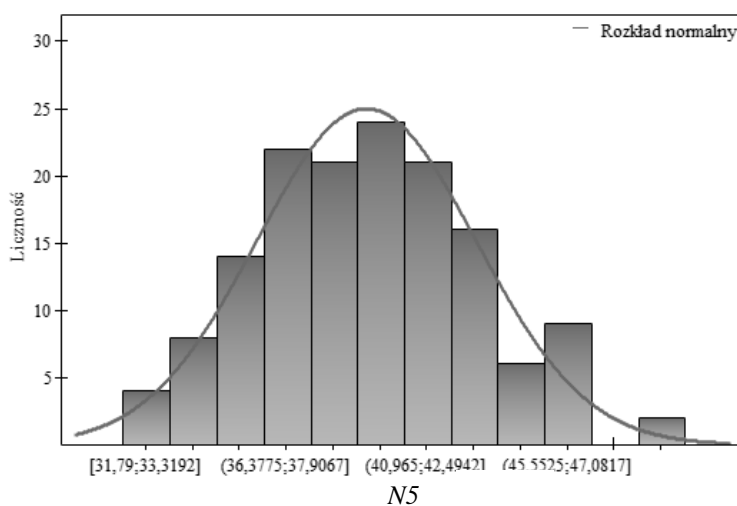
W badaniach uwzględniono również obliczenie 5–percentyla wskaźnika głośności, uwzględniającego wartość głośności całkowitej osiągniętą lub przekroczoną w 5% czasu pomiaru danego sygnału akustycznego [172]. Wykazano, że 5–percentyl głośności całkowitej dla hałasu lotniczego, drogowego czy kolejowego jest ściśle skorelowany z subiektywną oceną głośności słuchaczy [70]. Wskaźniki  $N5$ , podobnie jak dla wskaźników  $N$  obliczono dla sygnałów poziomego ciśnienia akustycznego w punkcie  $MR$ .

Przeprowadzono analizy regresji liniowej i nieliniowej pomiędzy wskaźnikami głośności  $N5$  a prędkością. Na rysunku 10.11 przedstawiono model wielomianowy charakteryzujący się najlepszym dopasowaniem do danych ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,68$ . Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartością  $N5$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(N5, V) = 0,83$ , co świadczy o silnej zależności. Wartości  $N5$  w obserwacjach charakteryzują się współczynnikiem zmienności  $CV_{N5} = 9,0\%$  i rozstępem  $R_{N5} = 18,4$  sonów.

Sprawdzono dopasowanie wartości  $N5$  do rozkładu normalnego zgodnie z przyjętą w pracy procedurą badania normalności rozkładu. Przyjęto analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$  jak w równaniach (9.30) i (9.31). Szczegółowe wyniki przedstawiono w załączniku nr 3 f). Histogram rozkładu wartości  $N5$  przedstawiono na rysunku 10.12.



Rys. 10.11. Wartości  $N5$  w funkcji prędkości przejazdów



Rys. 10.12. Histogram rozkładu wartości  $N5$

Jak wynika z danych zawartych w załączniku, wyniki wskazują na brak odstępstwa wartości  $N5$  od rozkładu normalnego.

Z uwagi na zgodność wartości  $N5$  z rozkładem normalnym, wartość graniczną i dopuszczalną obliczono zgodnie z metodą opartą o rozkład normalny. Wykonano analogicznie obliczenia jak dla wartości  $N$ , wykorzystując korektę współczynnika nachylenia  $\beta_1$  w utworzonym modelu wielomianowym (rys. 10.11). Równania krzywych miały postać, jak w równaniach:

$$f_{Sd\_N5} = -0,02993x^2 + 2,618x + 0,896 \quad (10.19)$$

$$f_{Sg\_N5} = -0,02993x^2 + 2,670x + 0,896 \quad (10.20)$$

Następnie podzielono uzyskane wyniki na pięć klas zgodnie z tabelą 5.1, w sposób jak dla wartości  $N$ . Równania krzywych klas  $K3\_N5$  i  $K2\_N5$  miały postać, jak w równaniach:

$$f_{K2\_N5} = -0,02993x^2 + 2,387x + 0,896 \quad (10.21)$$

$$f_{K3\_N5} = -0,02993x^2 + 2,525x + 0,896 \quad (10.22)$$

Przypisanie wartości  $N5$  do klas wykonano zgodnie z poniższymi implikacjami:

$$N5 \geq f_{Sg_{N5}} \rightarrow K5\_N5 \quad (10.23)$$

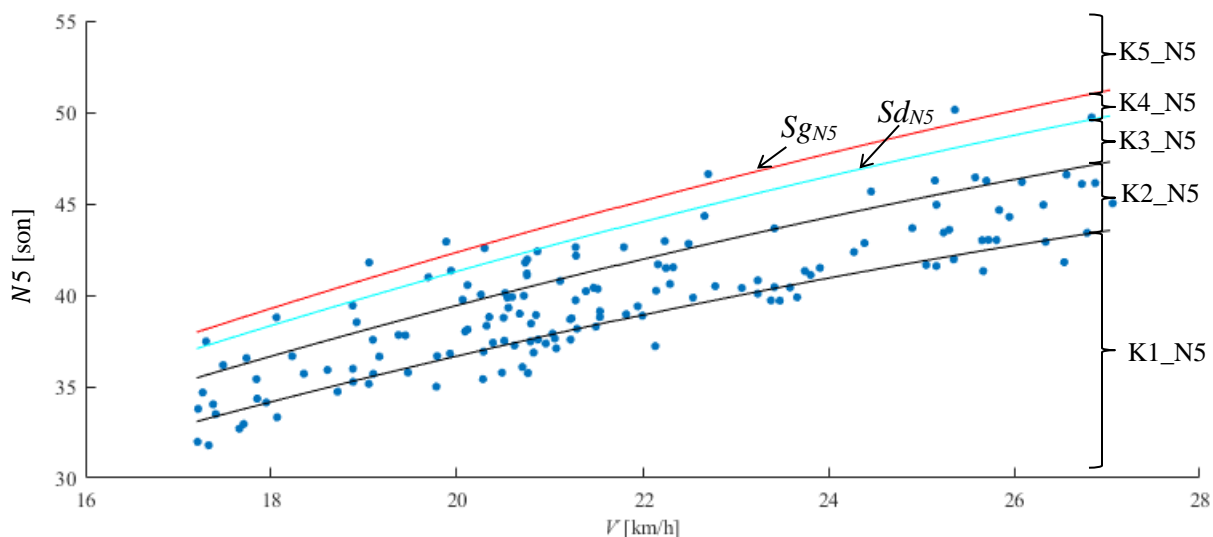
$$f_{Sg_{N5}} > N5 \geq f_{Sd_{N5}} \rightarrow K4\_N5 \quad (10.24)$$

$$f_{Sd_{N5}} < N5 \geq f_{K3\_N5} \rightarrow K3\_N5 \quad (10.25)$$

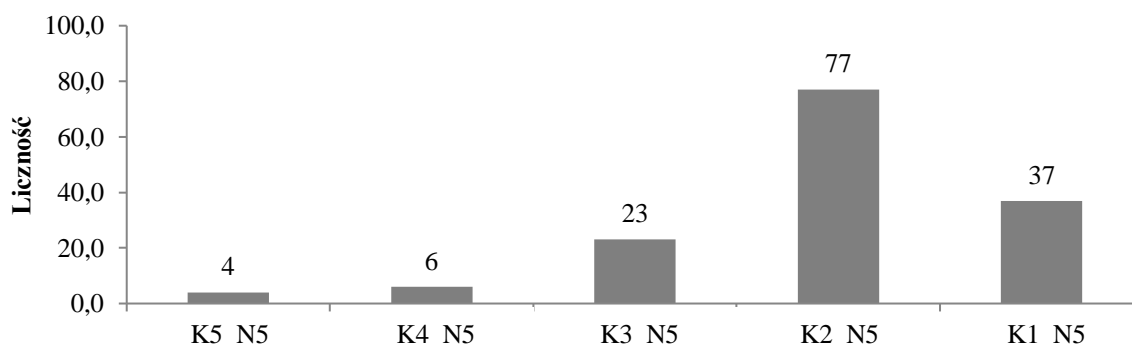
$$K2\_N5 \geq N5 \rightarrow K2\_N5 \quad (10.26)$$

$$N5 < K2\_N5 \rightarrow K1\_N5 \quad (10.27)$$

Uzyskane wartości  $N5$  przyporządkowane do tramwajów na tle zdefiniowanych klas przedstawiono na rysunku 10.13, a ich licznosci w danej klasie zestawiono na rysunku 10.14.



Rys. 10.13. Krzywe klas na tle wartości  $N5$  w funkcji prędkości

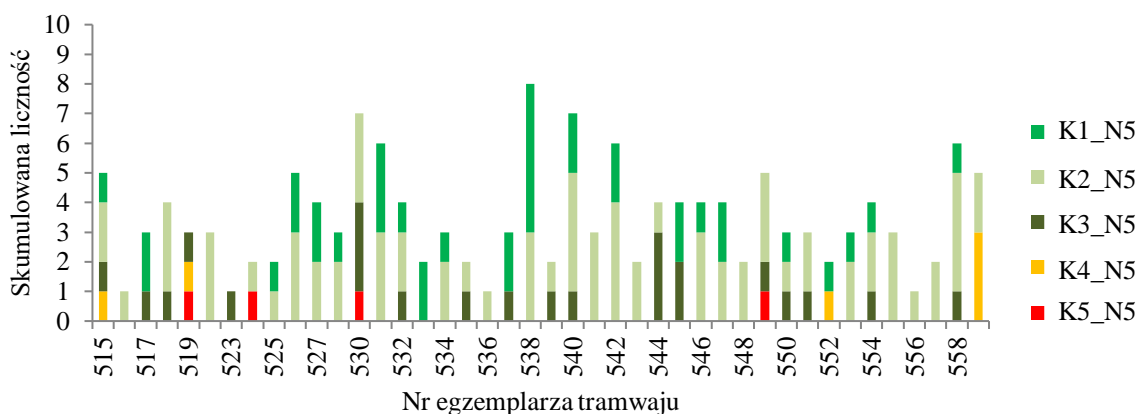


Rys. 10.14. Histogram licznosci klas  $N5$

Zgodnie z przedstawionymi danymi dla wartości  $N5$  najliczniejszą klasę stanowi klasa druga  $K2\_N5$ , do której zaklasyfikowano 77 przejazdów, co stanowi około 52% obserwacji.

Do najbardziej korzystnej klasy K1\_N5 przypisano 37 przejazdów, a do klasy K3\_N5 – 23 przejazdy, czyli odpowiednio 25% i 16% obserwacji. Zaobserwowano sześć przejazdów (4%), które przekroczyły wartość dopuszczalną i które przypisano do klasy K4\_N5, oraz cztery przejazdy przekraczające wartość graniczną, stanowiące 3% obserwacji.

Wyniki przyporządkowania przejazdów do poszczególnych klas w zależności od tramwaju przedstawiono na rysunku 10.15.



Rys. 10.15. Skumulowana liczność klas N5 przyporządkowana do poszczególnego tramwaju

Jak przedstawiono na rysunku 10.15, można wskazać cztery tramwaje 526, 531, 538, 542 których przejazdy charakteryzowały się wskaźnikami głośności N5 przyporządkowanymi do dwóch najniższych klas K1\_N5 i K2\_N5 przy liczności przejazdów powyżej czterech. Brak zmienności w klasyfikacji wykazywało sześć tramwajów 520, 541, 543, 548, 555, 557, które przypisano każdorazowo do klasy K2\_N5. Tramwaje 515, 519, 552 i 559 zaklasyfikowano do klasy K4\_N5, przy czym tramwaj 559 trzykrotnie. Ponadto dwa przejazdy tramwaju 552 zaklasyfikowano do klasy K1\_N5 i K4\_N5. Do klasy K5\_N5 zakwalifikowano po jednym przejeździe tramwajów 519, 524, 530, 549. Przy czym trzy przejazdy tramwaju 519 zaklasyfikowano do trzech najwyższych klas.

### 10.5. Składowa SA - analiza wskaźnika psychoakustycznego chropowatości dźwięku SR

Wskaźnik chropowatości dźwięku SR opisuje złożony efekt psychoakustyczny oceniając w sposób ilościowy subiektywne postrzeganie modulacji amplitudy dźwięku w zakresie częstotliwości 15–300 Hz. Jednostką wskaźnika chropowatości jest asper zdefiniowany jest jako efekt chropowatości dźwięku wytwarzany przez dźwięk o częstotliwości 1000 Hz na poziomie 60 dB, który jest modulowany częstotliwością 70 Hz. Sygnały modulowane dla ludzkiego ucha odbierane są jako chropowate. Chropowatość dźwięku wzrasta

wraz z częstotliwością modulacji jedynie do pewnej częstotliwości. Dla tonu 1000 Hz chropowatość jest największa dla modulacji częstotliwością 70 Hz. Ponadto chropowatość wzrasta w zależności od głębokości modulacji definiowanej jako stosunek amplitudy sygnału modulującego do amplitudy sygnału nośnego [70].

Wykazano, że wartości maksymalne wskaźnika chropowatości dźwięku osiągane są przy coraz niższych częstotliwościach modulacji, gdy częstotliwość nośna wynosi poniżej 1000 Hz. Chropowatość dźwięku jest ściśle związana z subiektywnym czasem trwania dźwięku zależnym od własności adaptacyjnych ludzkiego ucha. Dźwięki trwające poniżej 0,3 s są subiektywnie odbierane jako dłuższe, ponieważ odbierany przez ucho dźwięk nie zanika tak szybko jak obiektywnie zmierzony dźwięk. Chropowatość dźwięku określa się na podstawie równania [54]:

$$SR = c \cdot \int_0^{24 \text{ Bark}} f_{mod} \cdot \Delta L \cdot dz \quad (10.28)$$

gdzie:

$SR$  – wskaźnik psychoakustyczny chropowatości dźwięku [asper]

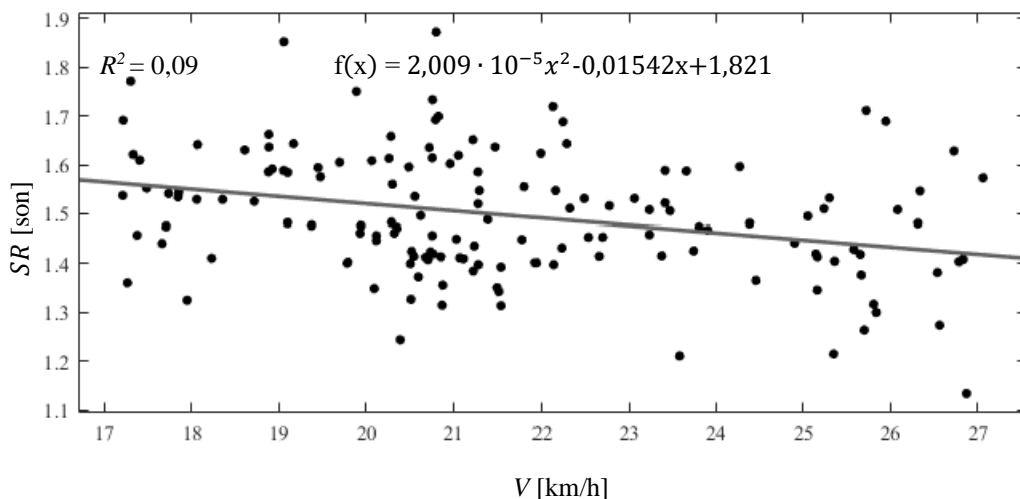
$c$  – współczynnik kalibracji,

$f_{mod}$  – częstotliwość modulacji [Hz],

$\Delta L$  – głębokość maskowania [dB],

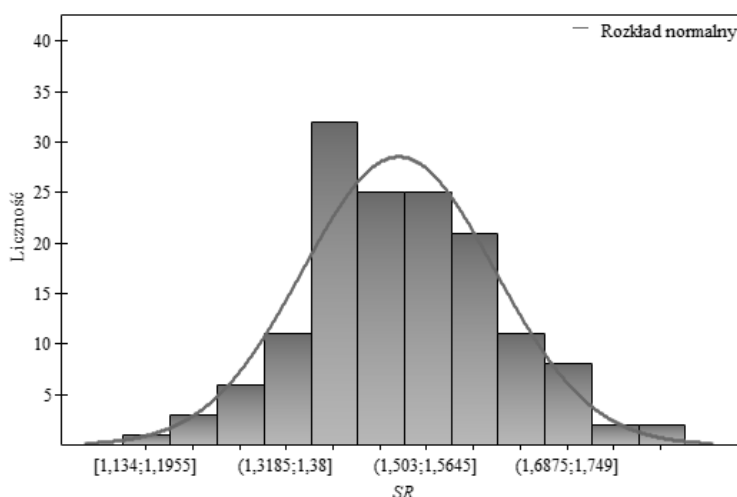
Stwierdzono, że maksymalna chropowatość występuje przy coraz niższych częstotliwościach modulacji, gdy częstotliwość nośna jest poniżej 1000 Hz. Właśnie zauważalny poziom różnicy w chropowatości szacuje się na 17% [2]. Następnie dokonano analizy regresji liniowej i nieliniowej pomiędzy wskaźnikami chropowatości  $SR$  a prędkością. Na rysunku 10.16 przedstawiono model wielomianowy charakteryzujący się najlepszym dopasowaniem do danych ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,09$ .

Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartością  $SR$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(SR, V) = -0,30$ , co świadczy o braku zależności. Wartości  $SR$  w obserwacjach charakteryzują się współczynnikiem zmienności  $CV_{SR} = 8,4\%$  i rozstępem  $R_{SR} = 0,7$  asperów.



Rys. 10.16. Wartości  $SR$  w funkcji prędkości przejazdów

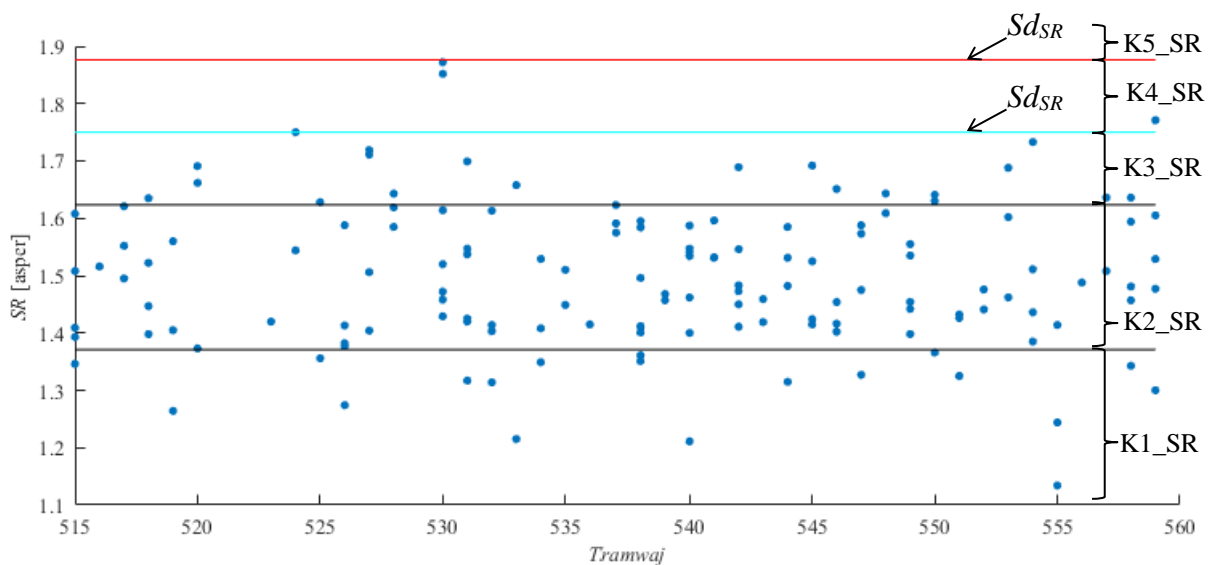
Sprawdzono dopasowanie wartości  $SR$  do rozkładu normalnego zgodnie z przyjętą w pracy procedurą badania normalności rozkładu. Przyjęto analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$  jak w równaniach (9.30) i (9.31). Szczegółowe wyniki przedstawiono w załączniku nr 3 g). Histogram rozkładu wartości  $SR$  przedstawiono na rysunku 10.17.



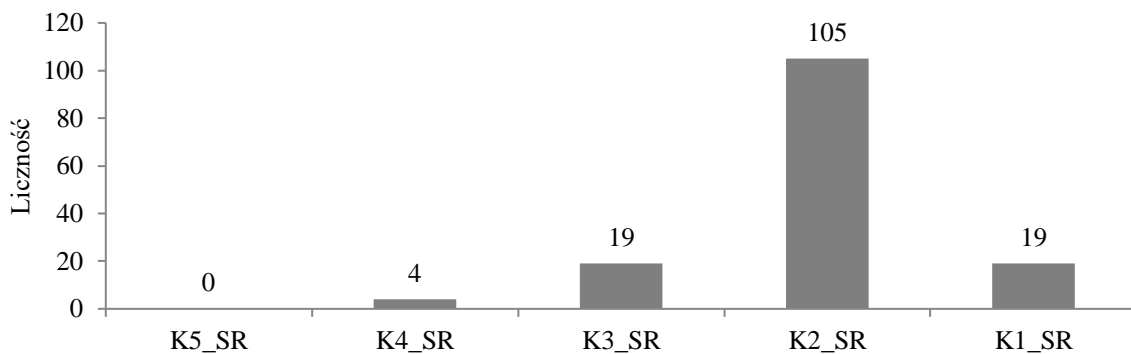
Rys. 10.17. Histogram rozkładu wartości  $SR$

Jak wynika z danych zawartych w załączniku, wyniki wskazują na brak odstępstwa wartości  $SR$  od rozkładu normalnego. Z uwagi na zgodność rozkładu wartości  $SR$  z rozkładem normalnym, wartości dopuszczalne i graniczne wyznaczono w oparciu o metodę Smiley'a zgodnie z równaniami (9.32) i (9.33).

Następnie podzielono uzyskane wyniki na pięć klas zgodnie z tabelą 5.1 i analogicznie jak dla wartości  $Leq$  w równaniach (10.3)–(10.18). Uzyskane wartości  $SR$  przyporządkowane do tramwajów na tle zdefiniowanych klas przedstawiono na rysunku 10.18, a ich licznosci w danej klasie zestawiono na rysunku 10.19.



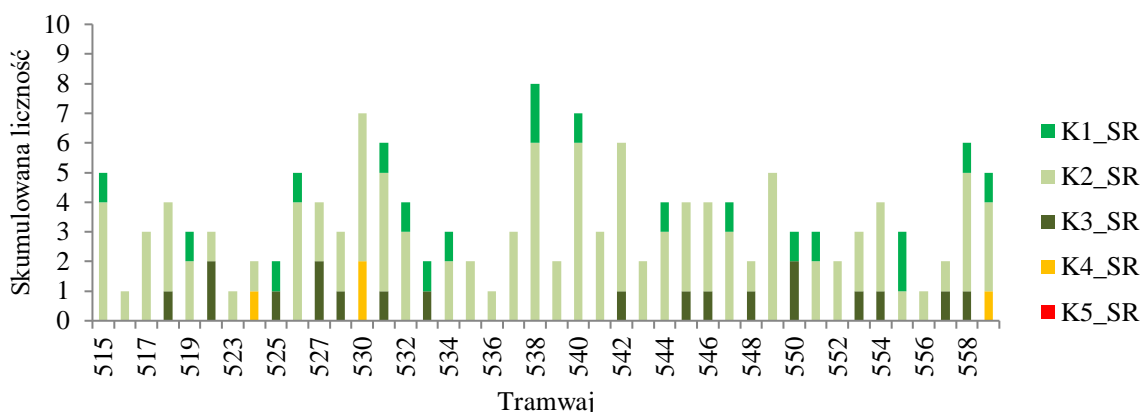
Rys. 10.18. Klasy wartości  $SR$  na tle uzyskanych wyników



Rys. 10.19. Histogram klas dla wartości  $SR$

Zgodnie z przedstawionymi danymi dla wartości  $SR$  najliczniejszą klasę stanowi klasa druga  $K2\_SR$ , do której przypisano 105 przejazdów, co stanowi około 71% obserwacji. Do najbardziej korzystnej klasy  $K1\_SR$  oraz  $K3\_SR$  przypisano po 19 przejazdów, czyli po 13% obserwacji. Zaobserwowano cztery przejazdy, które przekroczyły wartość dopuszczalną i które przypisano do klasy  $K4\_SR$ , co stanowi 3% obserwacji. Nie zaobserwowano przejazdów przypisanych do klasy  $K5\_SR$ .

Na rysunku 10.20 przedstawiono skumulowaną licznosc klas wartości  $SR$  osiągniętych przez poszczególne tramwaje. Jak wynika z uzyskanych danych, wyróżnić można liczne przejazdy tramwajów 515, 526, 538, 540, 549, które zaklasyfikowano jedynie do klas  $K1\_SR$  i  $K2\_SR$ , przy realizacji ponad czterech przejazdów.



Rys. 10.20. Skumulowana licznosc klas wartosci SR dla przejazdow danego tramwaju

Dwa tramwaje 524 i 559 osiagnely klase K4\_SR dla jednego przejazdu i jeden tramwaj 530 dla dwuch przejazdow.

### 10.6. Skladowa SA – analiza wskaznika psychoakustycznego ostrosci dzwiuku S

Ostrosc dzwiuku jest wskaznikiem psychoakustycznym informujacym o zawartosci wysokiej czestotliwosci dzwiuku w sygnale. Im wiekszy udzial wysokich czestotliwosci, tym wrazenie dzwiuku jest ostrzejsze. Jednostka ostrosci dzwiuku jest acum. Dzwiek o ostrosci rownej 1 zdefiniowany jest jako waskopasmowy (ponizej 150 Hz) szum o szerokosci jednego krytycznego pasma przy czestotliwosci srodkowej 1 kHz o poziomie 60 dB [70, 93]. W niniejszej pracy przyjeta model obliczenia ostrosci dzwiuku zgodny z pracą [70], ktora jest wersja rownania von Bismarcka ze zmodyfikowana krzywa wazenia. Wartoosc ostrosci dzwiuku S (ang. *sharpness*) oblicza sie ja jako wazony moment pierwszego rzędu glosności wlasciwej, jak w rownaniu [70, 169]:

$$S = C_1 \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' g(z) z dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz} \quad (10.29)$$

gdzie:

S – wskaznik psychoakustyczny ostrosci dzwiuku [acum],

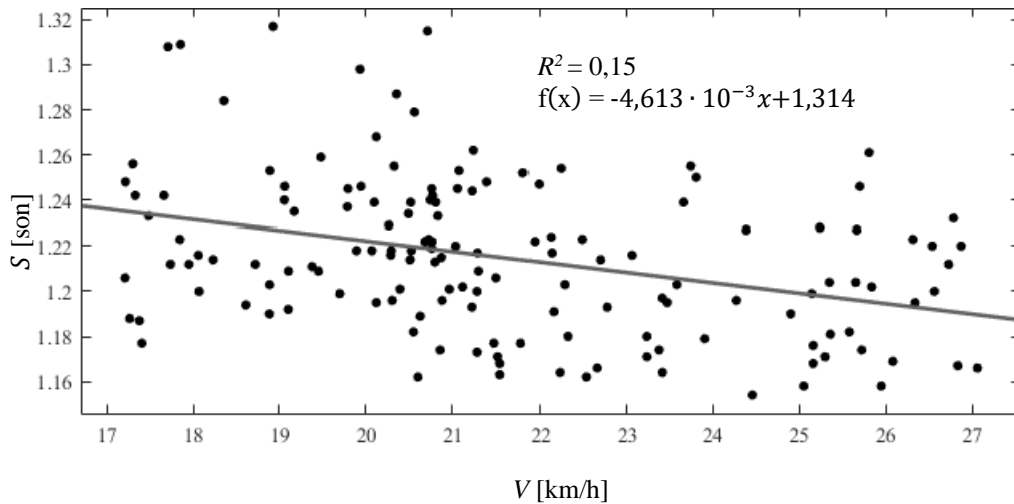
N' – glosnosc wlasciwa w danym pamie krytycznym z [son],

C<sub>1</sub> – stala proporcjonalnosc wynosząca 0,11,

g(z) – funkcja wazenia, zwiekszajaca wage wartosci dla czestotliwosci powyzej 15,8 barka.

Dokonano analizy regresji liniowej i nieliniowej pomiedzy wskaznikami ostrosci dzwiuku S a predkoscia. Na rysunku 10.21 przedstawiono model liniowy charakteryzujacy sie najlepszym dopasowaniem do danych ze wspolczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,15$ .

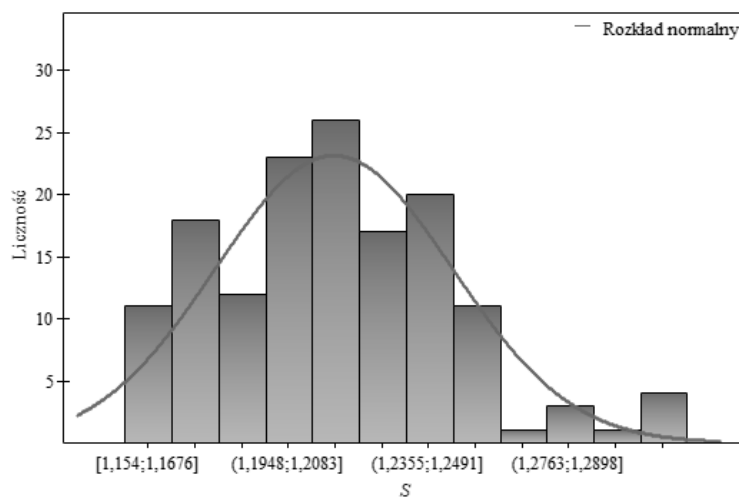




Rys. 10.21. Wartości  $S$  w funkcji prędkości przejazdów

Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartością  $S$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(S, V) = -0,35$ , co świadczy o braku zależności.

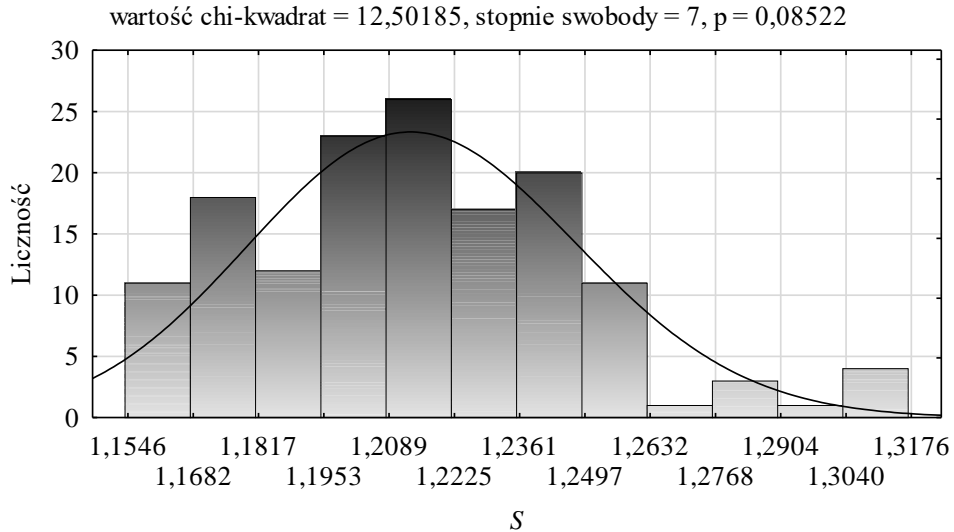
Wykonano test na normalność rozkładu wartości  $S$  zgodnie z przyjętą w pracy procedurą badania normalności rozkładu. Przyjęto analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$  jak w równaniach (9.30) i (9.31). Szczegółowe wyniki przedstawiono w załączniku nr 3 h). Histogram rozkładu wartości  $S$  przedstawiono na rysunku 10.22.



Rys. 10.22. Histogram rozkładu wartości  $S$

Jak wynika z danych zawartych w załączniku, wyniki wskazują na odstępstwo wartości  $S$  od rozkładu normalnego. Z uwagi na postać przedstawionego histogramu wartości  $S$  wykonano analizę dopasowania rozkładu tych wartości do rozkładu logarytmiczno-normalnego w środowisku oprogramowania Statistica 12 [248]. W analizie wykorzystano test chi-kwadrat i przyjęto analogiczne hipotezy testów jak w równaniach (9.39) i (9.40).

Histogram rozkładu wraz z wynikami analizy testu chi-kwadrat przedstawiono na rysunku 10.23.



Rys. 10.23. Histogram wartości  $S$  z wynikami testu chi-kwadrat

W związku z tym, że poziom istotności statystycznej  $p$  testu chi-kwadrat znajduje się powyżej poziomu istotności  $\alpha = 0,01$  (warunek  $p \geq \alpha$ ), to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Zatem rozkład wartości  $S$  jest zgodny z rozkładem logarymiczno-normalnym. Zgodnie z uzyskanymi danymi zaadaptowano wyznaczenie wartości granicznych i dopuszczalnych w oparciu o metodę Smiley'a zgodnie z równaniami (9.32) i (9.33) wykorzystując cechy rozkładu logarymiczno-normalnego [162, 245]. Wyznaczenie wartości średnich i odchylenia standardowego poprzedzono wyliczeniem logarytmu naturalnego z wartości  $S$ . Wartość średnia wynosiła  $\bar{x}_S = 1,21$  acum, a wartość odchylenia standardowego wynosiła  $\sigma_S = 0,03$  acum. Wartość graniczną reprezentowaną przez górną granicę 99% obserwacji wyliczono zgodnie z poniższym równaniem [162]:

$$Sg_S = e^{\bar{x}_S} \cdot e^{\sigma_S^3} \quad (10.30)$$

Natomiast wartość dopuszczalną reprezentowaną przez górną granicę 95% obserwacji obliczono zgodnie z równaniem [162]:

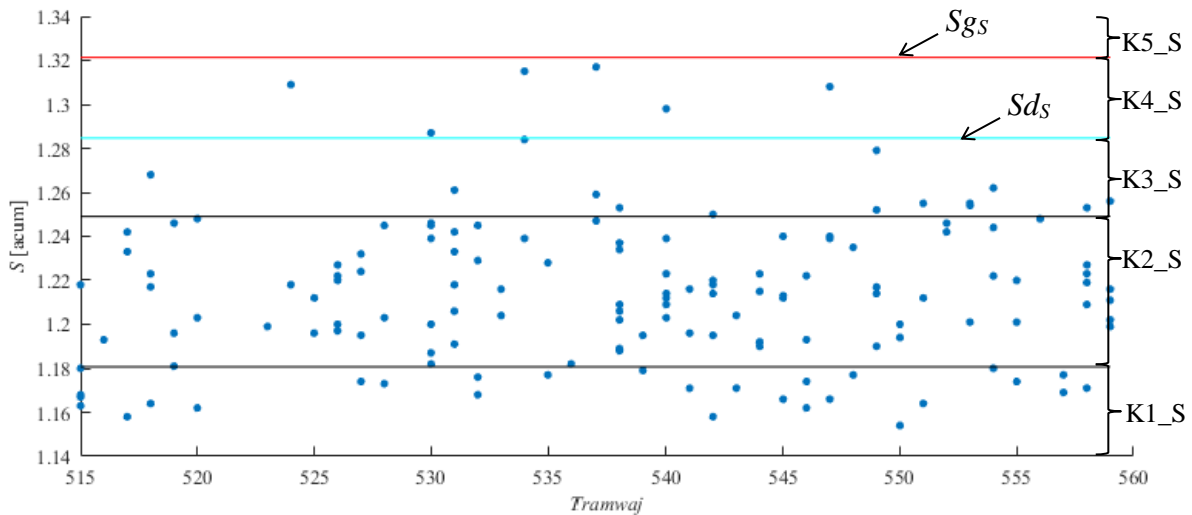
$$Sd_S = e^{\bar{x}_S} \cdot e^{\sigma_S^2} \quad (10.31)$$

Wartość graniczna wynosiła  $Sg_S = 1,32$  acum a wartość dopuszczalna wynosiła  $Sd_S = 1,28$  acum. Następnie podzielono uzyskane wyniki na pięć klas zgodnie z tabelą 5.1 i analogicznie jak dla wartości  $Leq$  w równaniach (10.3)–(10.18) z zastosowaniem własności rozkładu logarymiczno-normalnego. Przy czym granicę klasy trzeciej  $K3_S$  i drugiej  $K2_S$  wyznaczono zgodnie z równaniami:

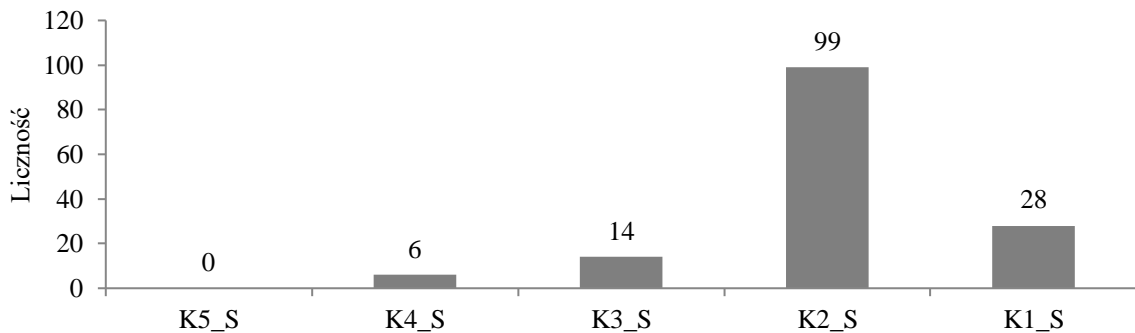
$$K3_S = e^{\bar{x}_S} \cdot e^{\sigma_S} \quad (10.32)$$

$$K2\_S = \frac{e^{\bar{x}_S}}{e^{\sigma_S}} \quad (10.33)$$

Uzyskane wartości  $S$  przyporządkowane do tramwajów na tle zdefiniowanych klas przedstawiono na rysunku 10.24, a ich licznosci w danej klasie zestawiono na rysunku 10.25.



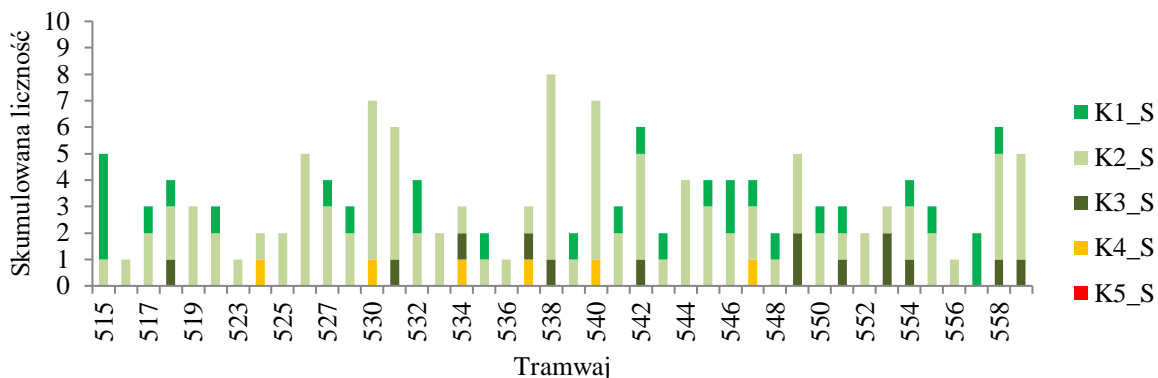
Rys. 10.24. Klasy wartości  $S$  na tle uzyskanych wyników



Rys. 10.25. Histogram klas dla wartości  $S$

Zgodnie z przedstawionymi danymi dla wartości  $S$  najliczniejszą klasę stanowi klasa druga  $K2\_S$ , do której przypisano 99 przejazdów, co stanowi około 67% obserwacji. Do najbardziej korzystnej klasy  $K1\_S$  przypisano 28 przejazdów, a do klasy  $K3\_S$  – 14 przejazdów, czyli odpowiednio 19% i 10% obserwacji. Zaobserwowano sześć przejazdów, których wartość  $S$  przekroczyła wartość dopuszczalną i które przypisano do klasy  $K4\_S$ , co stanowi 4% obserwacji. Nie zaobserwowano przejazdów przypisanych do klasy  $K5\_S$ .

Na rysunku 10.26 przedstawiono skumulowaną licznosc klas wartości  $S$  osiągniętych przez poszczególne tramwaje.



Rys. 10.26. Skumulowana liczność klas S przyporządkowana do poszczególnego tramwaju

Na tle wszystkich analizowanych tramwajów wyróżnić można przejazdy tramwaju 515, które poza jednym przypadkiem przejazdu w klasie K2\_S zaklasyfikowano do najniższej klasy K1\_S. Ponadto przejazdy tramwaju 526 zaklasyfikowano jedynie do klas K1\_S i K2\_S, przy realizacji ponad czterech przejazdów. Pojedyncze przejazdy tramwajów 524, 530, 534, 537, 540, 547 zaklasyfikowano do klasy K4\_S, świadczącej o przekroczeniu wartości dopuszczalnej  $S_{ds}$ . Przy czym pozostałe przejazdy tramwajów 530 i 540 zaklasyfikowano do klasy K2\_S. Nie zaobserwowano przejazdów zaklasyfikowanych do klasy K5\_S.

### 10.7. Składowa SA – analiza wskaźnika psychoakustycznego siły fluktuacji dźwięku $FS$

Wskaźnik siły fluktuacji dźwięku jest zbliżony do wskaźnika chropowatości. Dotyczy jednak ilościowej oceny subiektywnego postrzegania modulacji amplitudowej związanej z niższymi częstotliwościami do 20 Hz. Powyżej tej wartości odczucia związane są z głównie z chropowatością dźwięku. Jednostką wskaźnika siły fluktuacji dźwięku jest vacil, który definiowany jest jako siła fluktuacji wytwarzana przez ton o częstotliwości 1000 Hz na poziomie 60 dB, który jest modulowany amplitudą o częstotliwości 4 Hz. Stwierdzono, że maksymalne wartości wskaźnika siły fluktuacji występują przy częstotliwości modulacji 4 Hz. Zgodnie z pracą [70] wskaźnik siły fluktuacji oblicza się zgodnie z równaniem:

$$FS = \frac{0,008 \cdot \int_0^{24 \text{ Bark}} \Delta L \cdot dz}{\left(\frac{f_{mod}}{4 \text{ Hz}}\right) + \left(\frac{4 \text{ Hz}}{f_{mod}}\right)} \quad (10.34)$$

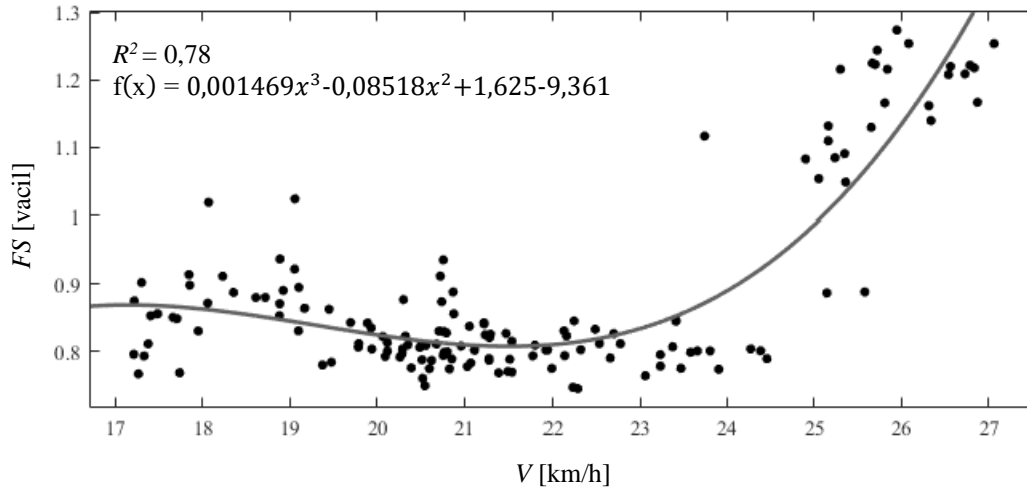
gdzie:

$FS$  – wskaźnik psychoakustyczny siły fluktuacji dźwięku [vacil]

$f_{mod}$  – częstotliwość modulacji [Hz],

$\Delta L$  – głębokość maskowania [dB],

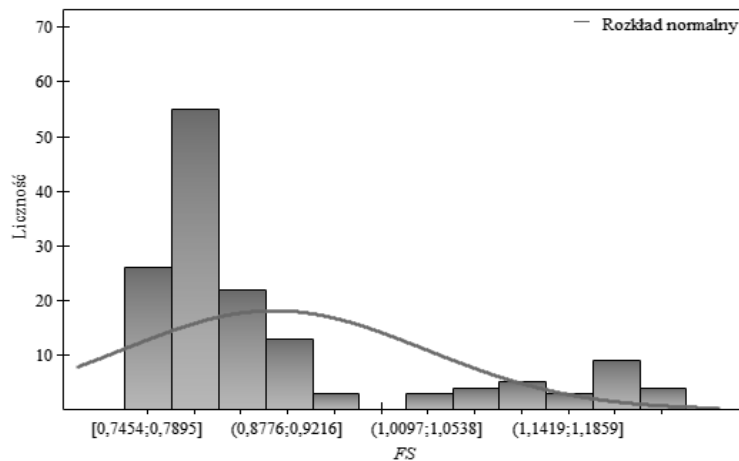
Dokonano analizy regresji liniowej i nieliniowej pomiędzy wskaźnikami siły fluktuacji dźwięku  $FS$  a prędkością. Na rysunku 10.27 przedstawiono model wielomianowy charakteryzujący się najlepszym dopasowaniem do danych ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,78$ .



Rys. 10.27. Zależność wartości  $FS$  w funkcji prędkości przejazdu

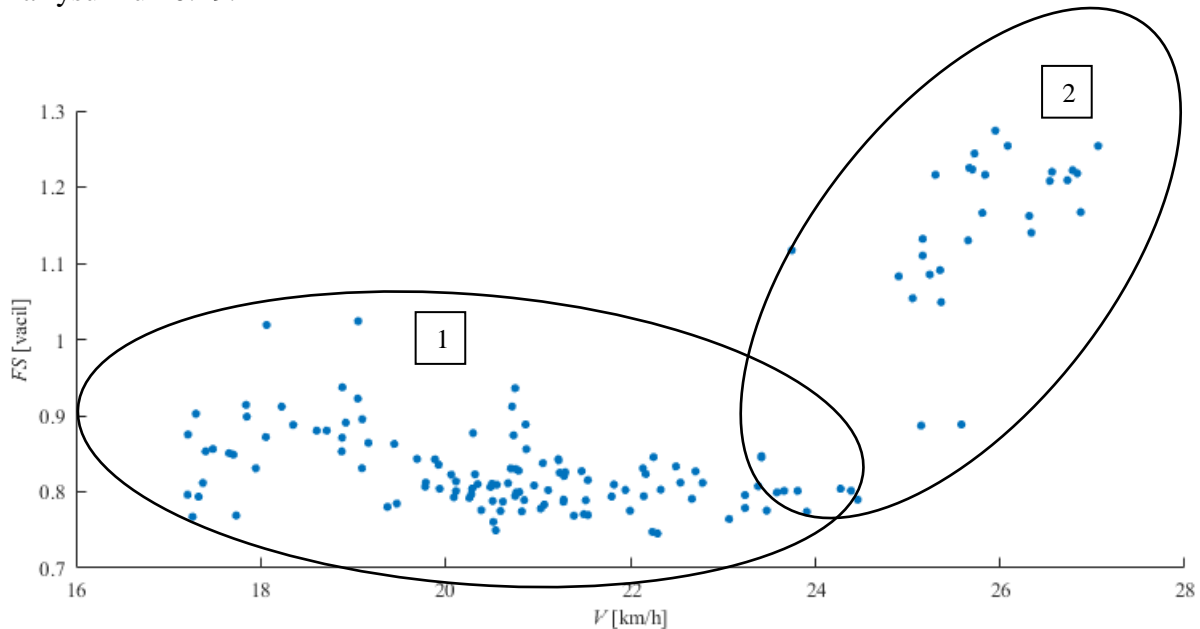
Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartością  $FS$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(FS, V) = 0,64$ , co świadczy o średniej zależności. Wartości  $N5$  w obserwacjach charakteryzują się współczynnikiem zmienności  $CV_{FS} = 16,1\%$  i rozstępem  $R_{FS} = 0,5$  vacilów.

Sprawdzono rozkład wartości  $FS$  w badanej próbie wykonując zdefiniowaną wcześniej procedurę badania normalności rozkładu. Przyjęto analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$  jak w równaniach (9.30) i (9.31). Szczegółowe wyniki przedstawiono w załączniku nr 3 i). Histogram rozkładu wartości  $FS$  przedstawiono na rysunku 10.28. Jak wynika z danych zawartych w załączniku, wyniki wskazują na odstępstwo wartości  $FS$  od rozkładu normalnego. Z uwagi na rozkład wartości  $FS$  w funkcji prędkości dokonano klasyfikacji danych przed przystąpieniem do oceny parametru  $FS$  tramwajów.



Rys. 10.28. Histogram rozkładu wartości  $FS$

Nieuwzględnienie klasyfikacji danych mogłoby doprowadzić do błędnej oceny paramteru z uwagi na uproszczenie założenia zakładając, że każda obserwacja pochodzi z jednego rozkładu normalnego. Bazując na rozkładzie wartości  $FS$  jak i jej zależności względem prędkości dokonano podziału danych *a priori* wyznaczając dwa skupienia jak na rysunku 10.29.



Rys. 10.29. Skupienia wyselekcjonowane *a priori* dla wartości  $FS$  w funkcji prędkości

Spośród wielu metod klasyfikacji wykorzystano metodę wyodrębniania grup obserwacji podobnych – klastrów (tak zwana analiza skupień) wykorzystująca kombinację modeli normalnych GMM (ang. *Gaussian Mixture Models*) w algorytmie EM (ang. *Expectation, Maximization*) [233, 261]. GMM opisuje poszczególne klastry  $k$  poprzez modele opisane rozkładem Gaussa o określonych parametrach rozkładu, czyli wektor wartości średnich  $\bar{x}_k$  i macierz kowariancji  $\Sigma_k$  – określane jako parametry Gaussa  $\theta = \{\bar{x}_k, \Sigma_k\}$ . Jest to nienadzorowana metoda uczenia maszynowego, w której skupienia definiowane są w oparciu o wartości zmiennych ciągłych (ilościowych) i skategoryzowanych (jakościowych). Superpozycja poszczególnych modeli klastrów jest określana jako:

$$p(x | GMM) = \sum_{k=1}^k \pi_k N(x | \bar{x}_k, \Sigma_k) \quad (10.35)$$

gdzie:

$p(x | GMM)$  – superpozycja danego modelu klastra w kombinacji modeli normalnych GMM,

$\pi_k$  – waga poszczególnego klastra (współczynnik mieszania),

$N(x | \bar{x}_k, \Sigma_k)$  – wielowymiarowa funkcja gęstości prawdopodobieństwa obserwacji opisywana rozkładem normalnym.

Współczynniki mieszania  $\pi_k$  zależą od liczności poszczególnego klastra i w modelu GMM spełniają warunek:

$$\sum_{k=1}^k \pi_k = 1 \quad (10.36)$$

Funkcja GMM jest zatem kombinacją klastrów określonych wielowymiarową funkcją gęstości prawdopodobieństwa obserwacji:

$$N(x | \bar{x}_k, \Sigma_k) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^D |\Sigma_k|}} e \left\{ -\frac{1}{2} (x - \bar{x}_k)^T \Sigma_k^{-1} (x - \bar{x}_k) \right\} \quad (10.37)$$

gdzie:

$D$  – macierz cech  $D$ -wymiarowa.

Estymacja parametrów dla poszczególnych klastrów wykonana jest przez algorytm EM poprzez maksymalizację wiarygodności. Algorytm przypisuje dla poszczególnych klastrów losowe parametry Gaussa ( $\theta$ ), a następnie wylicza prawdopodobieństwo przypisania danej obserwacji do danego klastra  $k$  w oparciu o wybrany rozkład na przykład normalny:

$$p(x_i | z_i = k, \bar{x}_k, \Sigma_k) = N(x_i | \bar{x}_k, \Sigma_k) \quad (10.38)$$

gdzie:

$p$  – prawdopodobieństwo przypisania wartości do klastra  $k$ ,

$z_{nk}$  – zmienna ukryta dla  $n$ -tej wartości i klastra  $k$ .

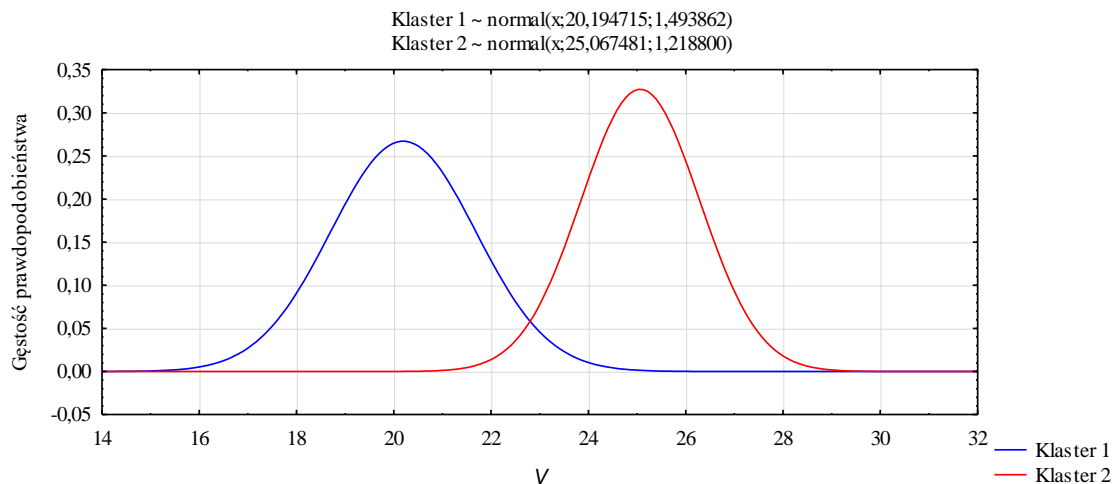
Zmienna ukryta  $z_i$  jest przypisywana do każdej wartości obserwacji jako etykieta, która wskazuje, do którego klastra należy analizowana obserwacja:

$$z_i \in \{1, \dots, k\} \quad (10.39)$$

Następnie realizowany jest krok maksymalizacji, czyli zaktualizowanie parametrów Gaussa ( $\theta$ ) dla dopasowania przypisanych do nich punktów. Ostatecznie algorytm EM oblicza rozwiązania klastrów, które maksymalizują prawdopodobieństwo dla danych, biorąc pod uwagę zadaną liczbę klastrów [249, 250].

Wykorzystanie metody GMM dla danych *FS* zakładało, że są one opisywane rozkładem normalnym dla dwóch klastrów ( $k = 2$ ). Analizy wykonano z wykorzystaniem aplikacji *Generalized Cluster Analysis* w środowisku oprogramowania Statistica 12 [248]. Dane wejściowe do analizy stanowiły wartości prędkości jako zmienne kategoryzujące

i odpowiadająca im wartość  $FS$  jako zmienne ciągłe. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa dla utworzonych klastrów  $FS$  wraz z oszacowanymi parametrami dla ich rozkładów przedstawiono na rysunku 10.30. Natomiast statystykę utworzonych klastrów przedstawiono w tabeli 10.2.



Rys. 10.30. Gęstość prawdopodobieństwa klastrów  $V$

Tabela 10.2. Statystyka wartości  $FS$  w utworzonych klastrach

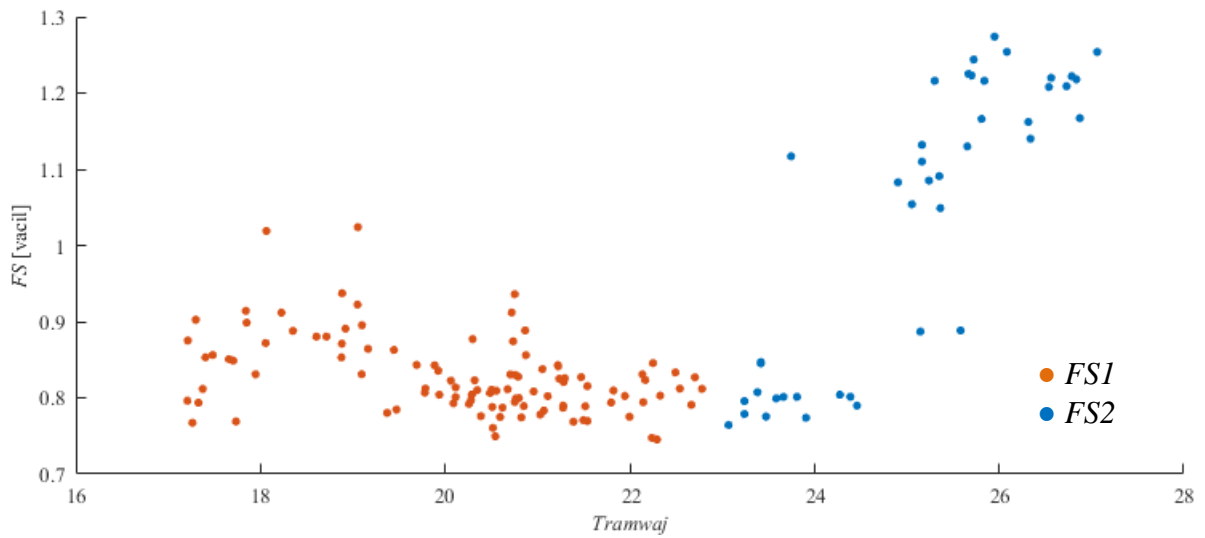
	Klaster 1 [km/h]	Klaster 2 [km/h]
Wartość minimalna	17,2	23,1
Wartość maksymalna	22,8	27,1
Średnia	20,2	25,1
Odchylenie standardowe	1,5	1,2

Dalsza analiza związana z oceną parametru  $FS$  dotyczyła dwóch grup obserwacji przypisanych do klastru 1 i 2. Wartość  $FS$  przypisaną do klastra 1 oznaczono jako  $FS1$ , a przypisaną do klastra 2 oznaczono jako  $FS2$ . Wartości  $FS1$  i  $FS2$  w funkcji prędkości przejazdu przedstawiono na rysunku 10.31.

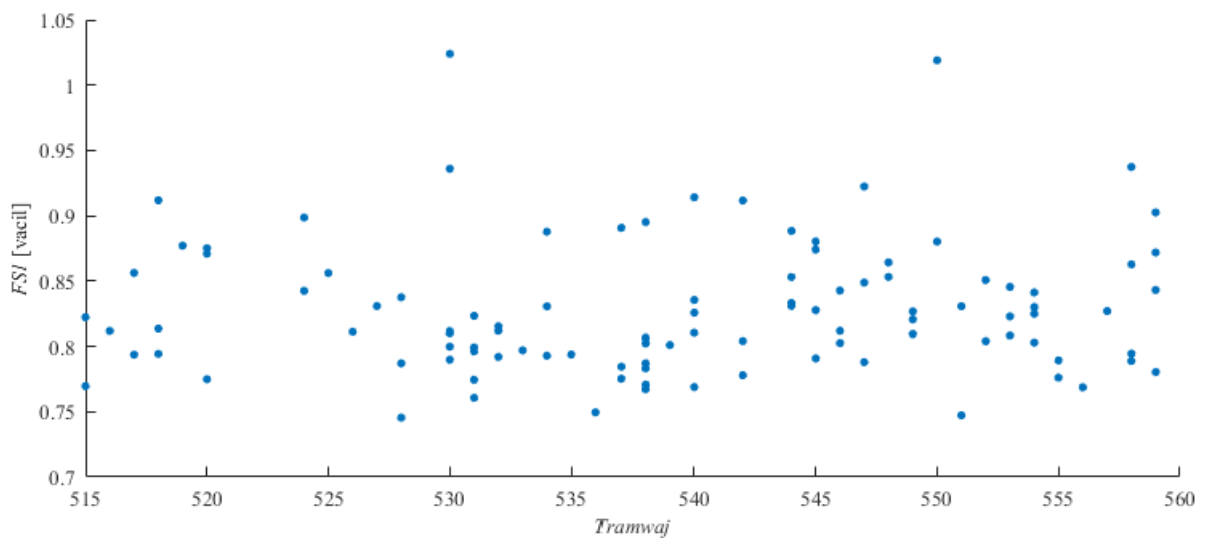
Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartością  $FS1$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(FS1, V) = -0,42$ , co świadczy o słabej zależności. Natomiast dla wartości  $FS2$  wynosił  $r(FS2, V) = 0,87$ , co świadczy o silnej zależności.

W związku z uzyskanymi wynikami, na rysunku 10.32 przedstawiono wartości  $FS1$  przyporządkowane do tramwaju. Natomiast na rysunku 10.33 przedstawiono model wielomianowy parametru  $FS2$  charakteryzujący się dopasowaniem obliczonego modelu regresji do danych ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,87$ .

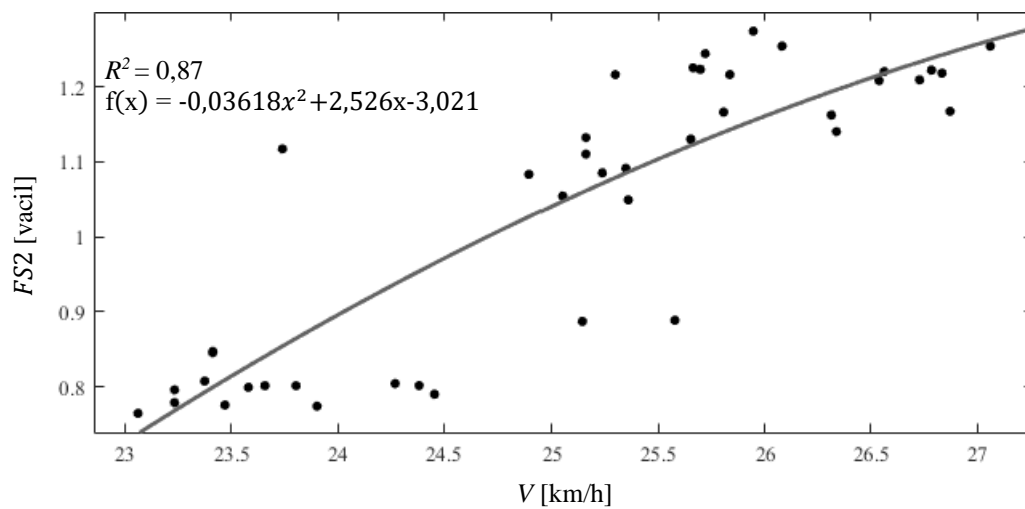




Rys. 10.31. Wartości *FS1* i *FS2* w funkcji prędkości przejazdu



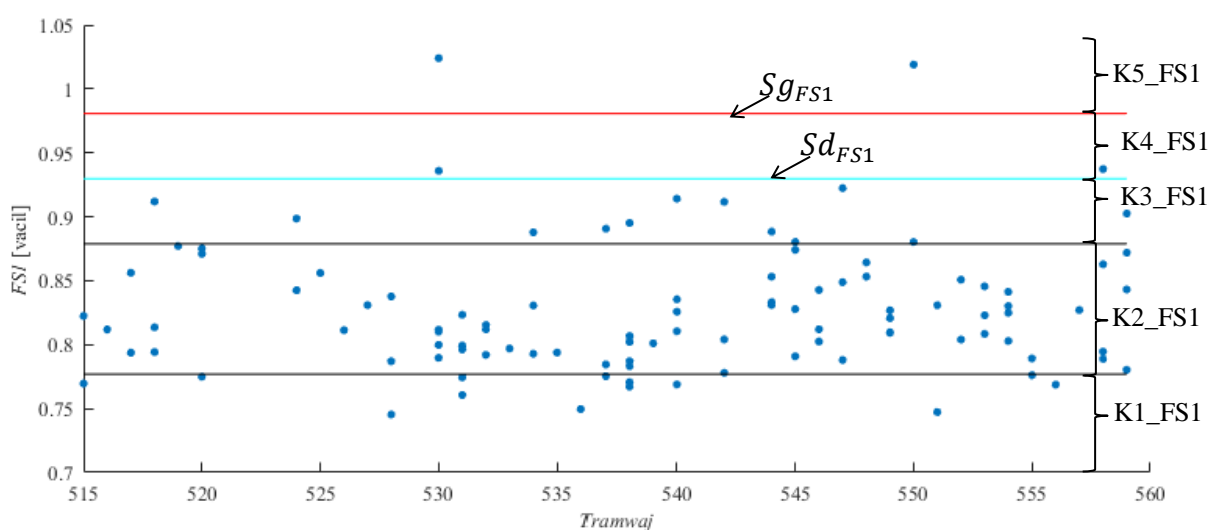
Rys. 10.32. Wartości *FS1* przyporządkowane do tramwaju



Rys. 10.33. Wartości *FS2* w funkcji prędkości przejazdów

Wartości  $FSI$  w obserwacjach charakteryzowały się współczynnikiem zmienności  $CV_{FS1} = 6,2\%$  i rozstępem  $R_{FS1} = 0,3$  vacilów. Natomiast wartości  $FS2$  charakteryzowały się współczynnikiem zmienności  $CV_{FS2} = 18,1\%$  i rozstępem  $R_{FS2} = 0,5$  vacilów.

Wartości dopuszczalne i graniczne dla  $FSI$  wyznaczono w oparciu o metodę Smiley'a zgodnie z równaniami (9.32) i (9.33), zgodnie z opisanym rozkładem wartości  $FSI$ . Wartość dopuszczalna wyniosła  $Sd_{FS1} = 0,92$  vacilów, a wartość graniczna  $Sg_{FS1} = 0,98$  vacilów. Następnie podzielono uzyskane wyniki na pięć klas zgodnie z tabelą 5.1 i analogicznie jak dla wartości  $Leq$  w równaniach (10.3)–(10.18). Uzyskane wartości  $FSI$  przyporządkowane do tramwajów na tle zdefiniowanych klas przedstawiono na rysunku 10.34.



Rys. 10.34. Klasy wartości  $FSI$  na tle uzyskanych wyników

Z uwagi na zgodność wartości  $FS2$  z rozkładem normalnym, wartość graniczną i dopuszczalną obliczono zgodnie z metodą opartą o rozkład normalny. Wykonano analogicznie obliczenia jak dla wartości  $N$ , wykorzystując korektę współczynnika nachylenia  $\beta_1$  w utworzonym modelu wielomianowym. Równania krzywych miały postać, jak w równaniach:

$$f_{Sd\_FS2} = -0,01219x^2 + 0,7748x - 9,894 \quad (10.40)$$

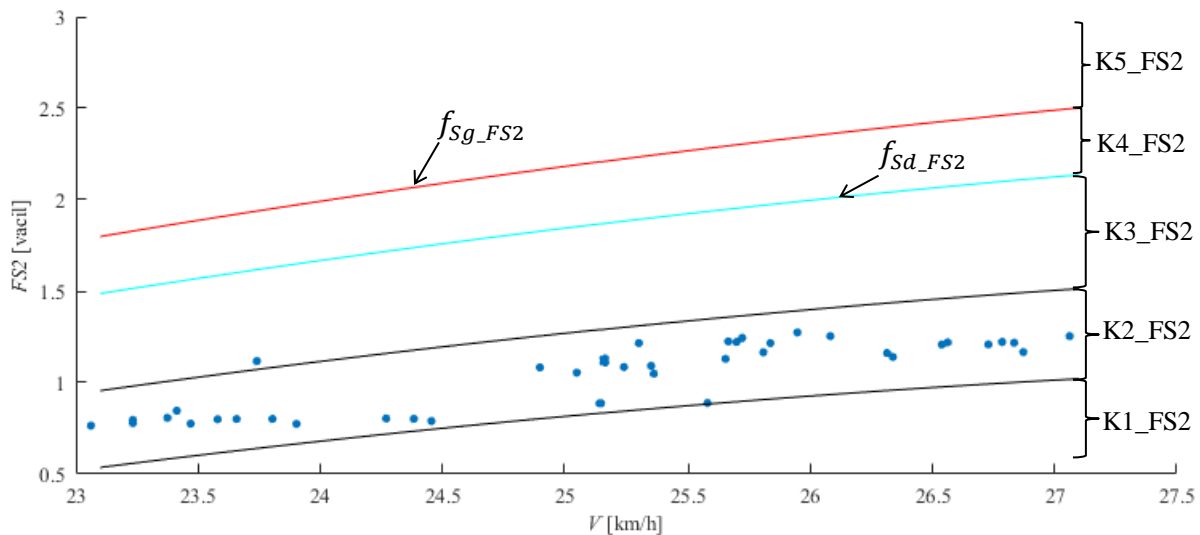
$$f_{Sg\_FS2} = -0,01219x^2 + 0,7890x - 9,894 \quad (10.41)$$

Następnie podzielono uzyskane wyniki na pięć klas zgodnie z tabelą 5.1, w sposób jak dla wartości  $N$ . Równania krzywych klas  $K3\_N5$  i  $K2\_N5$  miały postać, jak w równaniach:

$$f_{K2\_FS2} = -0,01219x^2 + 0,73412x - 9,894 \quad (10.42)$$

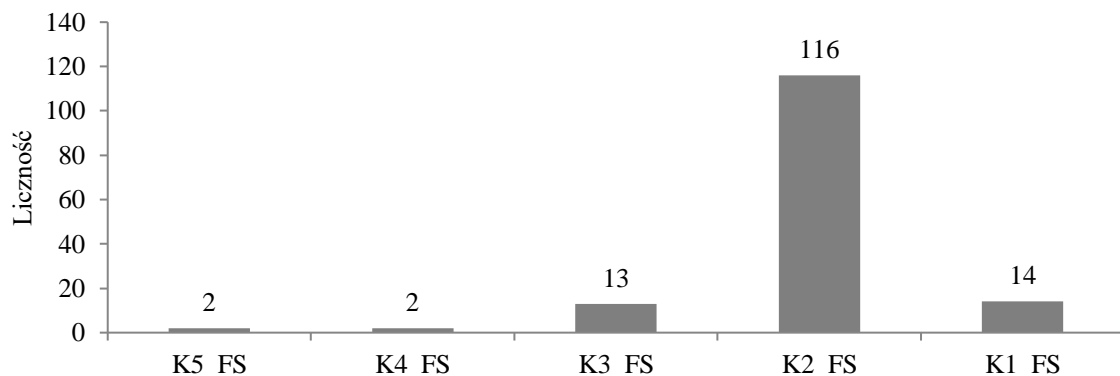
$$f_{K3\_FS2} = -0,01219x^2 + 0,75028x - 9,894 \quad (10.43)$$

Przypisanie wartości  $FS2$  do klas zachodziło analogicznie jak w implikacjach (10.14), (10.15) oraz (10.16)–(10.18). Uzyskane wartości  $FS2$  przyporządkowane do tramwajów na tle zdefiniowanych klas przedstawiono na rysunku 10.35. W przypadku wartości  $FS1$  i  $FS2$  zsumowano licznosci ich poszczególnych klas, co przedstawiono na rysunku 10.36.



Rys. 10.35. Klasy wartości  $FS2$  na tle uzyskanych wyników

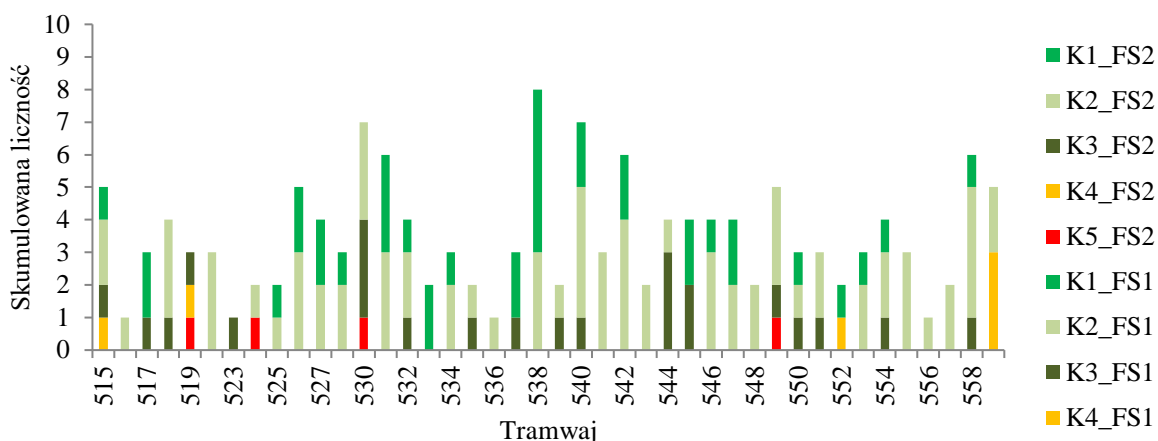
Zgodnie z przedstawionymi danymi dla wartości  $FS$  najliczniejszą klasę stanowi klasa druga  $K2\_FS$ , do której zaklasyfikowano 116 przejazdów, co stanowi około 79% obserwacji. Do najbardziej korzystnej klasy  $K1\_FS$  przypisano 14 przejazdów, a do klasy  $K3\_FS$  – 13 przejazdów, czyli odpowiednio 10% i 9% obserwacji.



Rys. 10.36. Histogram klas dla wartości  $FS$

Zaobserwowano po dwa przejazdy, które przekroczyły wartość dopuszczalną i graniczną oraz przypisano je odpowiednio do klasy  $K4\_FS$  i  $K5\_FS$ , co stanowi po 1% obserwacji.

Na rysunku 10.37 przedstawiono skumulowaną licznosc klas wartości  $FS$  osiąganych przez poszczególne tramwaje.



Rys. 10.37. Skumulowana liczność klas FS przyporządkowana do poszczególnego tramwaju

Jak przedstawiono powyżej, wyróżnić można liczne przejazdy tramwajów 526, 531, 538, 540 i 542, które zaklasyfikowano jedynie do klas K1\_FS i K2\_FS, przy realizacji ponad czterech przejazdów. Szczególna uwaga dotyczy tramwaju 538, którego większość przejazdów zaklasyfikowano do klasy K1\_FS. Pojedyncze przejazdy tramwajów 515, 519, 552 zaklasyfikowano do klasy K4\_FS. Ponadto do klasy tej zaklasyfikowano trzy przejazdy tramwaju 559. Do klasy K5\_FS zaklasyfikowano po jednym przejeździe tramwaju 519, 530 i 549.

### 10.8. Składowa TI – analiza przyspieszeń drgań szyny $SRSS_{PS}$

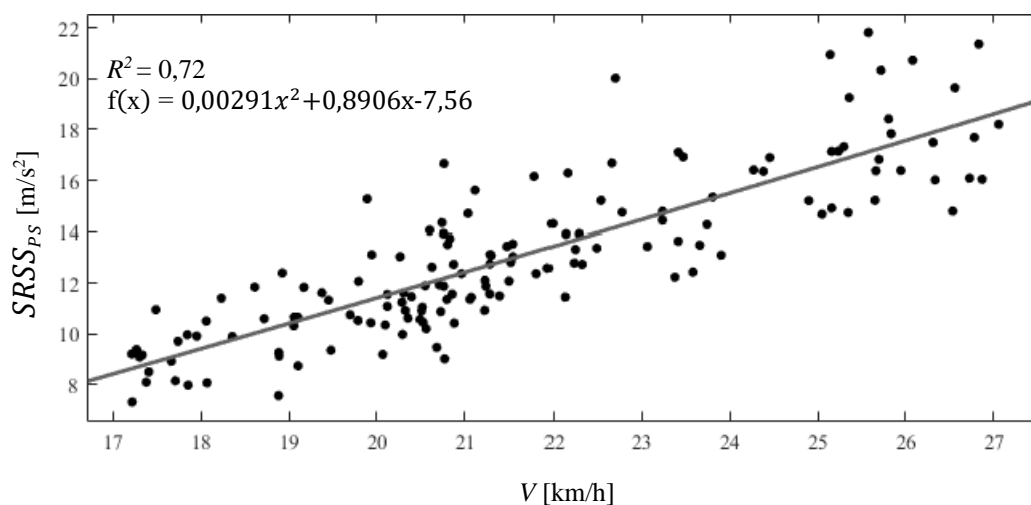
Analizy drgań szyny opierały się na sygnałach przyspieszeń z punktu pomiarowego PS1 znajdującego się w linii przekroju pomiarowego. W celu scharakteryzowania ogólnego poziomu oddziaływań drganiowych obliczono pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów (SRSS) dla wartości skutecznych z mierzonych kierunków drgań. Wartości skuteczne obliczono zgodnie z równaniem (9.37), natomiast wartość  $SRSS$  jak w równaniu:

$$SRSS_{PS} = \sqrt{a_{RMS_{PS1-Y}}^2 + a_{RMS_{PS1-Z}}^2} \quad (10.44)$$

Zbadano zależność pomiędzy obliczonymi wartościami miary a prędkością przejazdu. Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartością  $SRSS_{PS}$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(SRSS_{PS}, V) = 0,83$ , co świadczy o silnej zależności. Wartości  $SRSS_{PS}$  w obserwacjach charakteryzują się współczynnikiem zmienności  $CV_{SRSS_{PS}} = 0,24\%$  i rozstępem  $R_{SRSS_{PS}} = 0,62 \text{ m/s}^2$ .

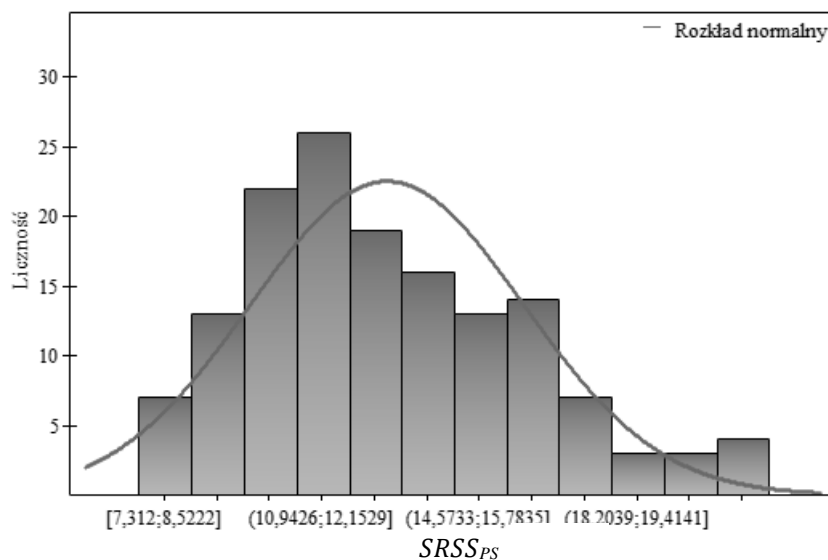
Wykonano analizy regresji liniowej i nieliniowej pomiędzy zmiennymi. Na rysunku 10.38 przedstawiono model wielomianowy charakteryzujący się najlepszym dopasowaniem do danych ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,72$ . Obliczony model

z uwagi na wartość współczynnika  $R^2$  może być wykorzystany w estymacji wartości  $SRSS_{PS}$  w funkcji prędkości przejazdu.



Rys. 10.38. Zależność wartości  $SRSS_{PS}$  w funkcji prędkości przejazdu

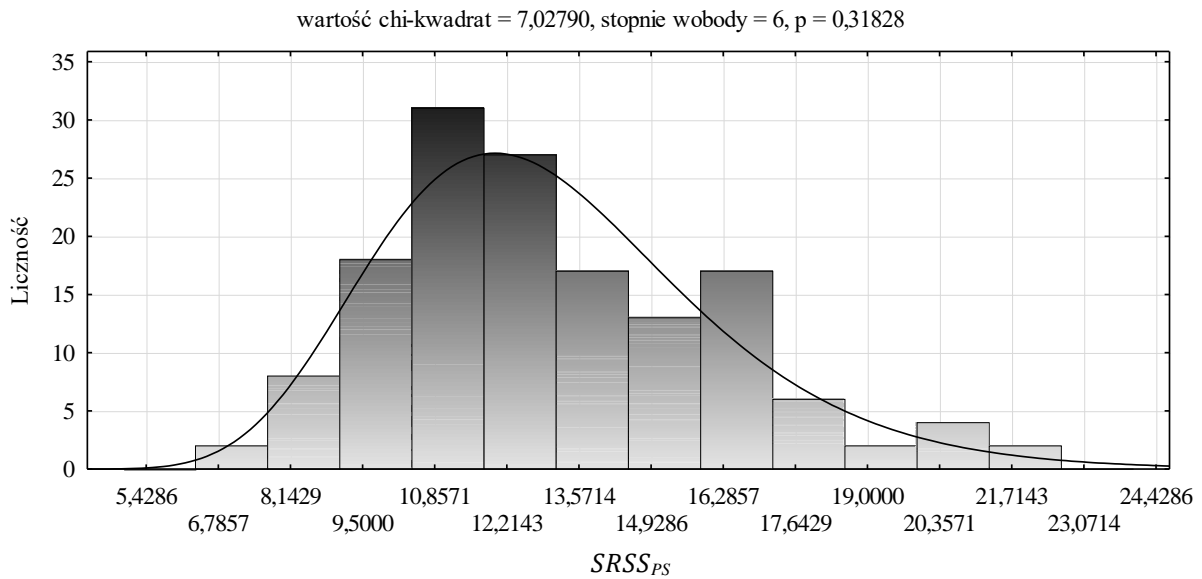
Zbadano dopasowanie wartości  $SRSS_{PS}$  do rozkładu normalnego wykonując zdefiniowaną procedurę badania normalności rozkładu. Przyjęto analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$  jak w równaniach (9.30) i (9.31). Szczegółowe wyniki przedstawiono w załączniku nr 3 m). Histogram rozkładu wartości  $SRSS_{PS}$  przedstawiono na rysunku 10.39.



Rys. 10.39. Histogram rozkładu wartości  $SRSS_{PS}$

Z uwagi na odstępstwa od rozkładu normalnego oraz z uwagi na otrzymany rozkład wartości  $SRSS_{PS}$  w przedstawionym histogramie, wykonano analizę dopasowania do rozkładu logarytmiczno-normalnego w środowisku oprogramowania Statistica 12 [248]. Wykonano test chi-kwadrat przyjmując analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$  jak w równaniach (9.39) i (9.40).

Histogram wartości  $SRSS_{PS}$  z dopasowanym rozkładem logarytmiczno–normalnym i wynikami analizy testu chi–kwadrat przedstawiono na rysunku 10.40.



Rys. 10.40. Histogram wartości  $SRSS_{PS}$  z wynikami testu chi-kwadrat

W związku z tym, że poziom istotności statystycznej  $p$  testu chi–kwadrat znajduje się powyżej poziomu istotności  $\alpha = 0,01$ , to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Zatem rozkład wartości  $SRSS_{PS}$  jest zgodny z rozkładem logarytmiczno–normalnym.

Zgodnie z uzyskanymi danymi zaadaptowano wyznaczenie wartości granicznych i dopuszczalnych analogicznie jak w równaniach (9.41) i (9.42), wykorzystując cechy rozkładu logarytmiczno–normalnego [162, 245].

Wartość graniczna  $Sg_{SRSS_{PS}}$  stanowi zatem górną granicę około 99% wyników, a wartość dopuszczalna  $Sd_{SRSS_{PS}}$  stanowi górną granicę około 95% wyników. Z uwagi na zależność wartości  $SRSS_{PS}$  od prędkości wyznaczono krzywe wartości granicznych i dopuszczalnych bazując na korekcie współczynnika nachylenia  $\beta_1$  zgodnie z równaniem (10.9). Dla krzywej wartości dopuszczalnych  $Sd_{SRSS_{PS}}$  przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ , co odpowiada kwantylowi rzędu 0,95, a dla krzywej wartości granicznych  $Sg_{SRSS_{PS}}$  przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,01$ , co odpowiada kwantylowi rzędu 0,99. Założenia te pozwalają na stwierdzenie, że na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  rzeczywista wartość  $SRSS_{PS}$  mieści się w określonym przez krzywe graniczne przedziale z prawdopodobieństwem 95%, a na poziomie istotności  $\alpha = 0,01$  z prawdopodobieństwem 99%. Równania krzywych wartości dopuszczalnych i granicznych miały postać:

$$f_{Sd_{SRSS_{PS}}} = -0,001387x^2 + 0,1104x - 0,5835 \quad (10.45)$$

$$f_{Sg\_SRSS_{PS}} = -0,001387x^2 + 0,1148x - 0,5835 \quad (10.46)$$

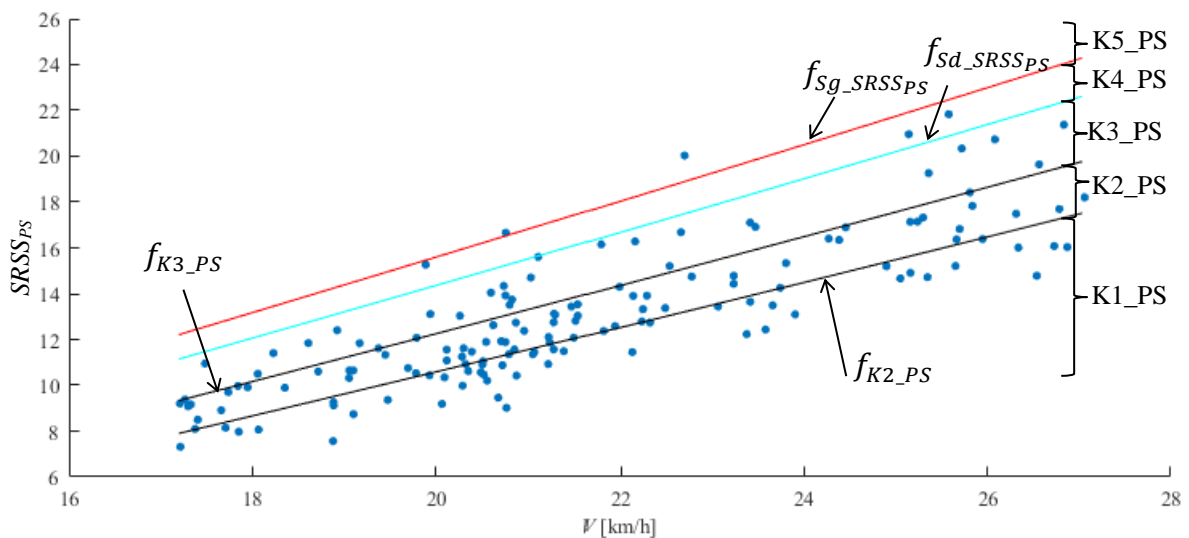
Następnie podzielono uzyskane wyniki na pięć klas zgodnie z tabelą 5.1. w sposób jak dla wartości  $N$ . Równania krzywych klas  $K3\_PS$  i  $K2\_PS$  miały postać, jak w równaniach:

$$f_{K2\_PS} = -0,001387x^2 + 0,84896x - 0,5835 \quad (10.47)$$

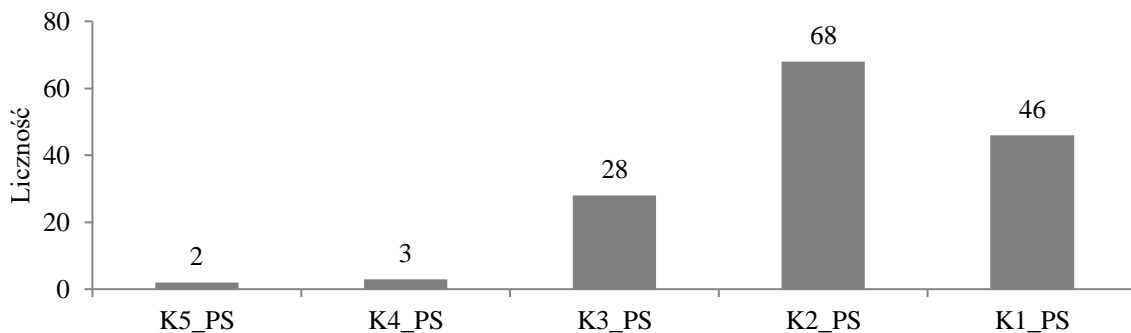
$$f_{K3\_PS} = -0,001387x^2 + 0,93224x - 0,5835 \quad (10.48)$$

Obliczone krzywe z wyróżnieniem klas dla wartości  $SRSS_{PS}$  przedstawiono na tle uzyskanych wyników na rysunku 10.41, a ich licznosci w danej klasie zestawiono na rysunku 10.42.

Wyniki przyporządkowania przejazdów do poszczególnych klas przedstawiono na rysunku 10.42. Najliczniejszą klasę wartości  $SRSS_{PS}$  stanowi klasa druga  $K2\_PS$ , do której przypisano 68 przejazdów, co stanowi około 46% obserwacji. Do najbardziej korzystnej klasy  $K1\_PS$  zaklasyfikowano 46 przejazdów, co stanowi 31% obserwacji. Do klasy  $K3\_PS$  przypisano 28 przejazdów, czyli 19% obserwacji. Zaobserwowano trzy przejazdy, które przekroczyły wartość dopuszczalną i które zaklasyfikowano do klasy  $K4\_PS$ , co stanowi 2% obserwacji. Wartość graniczną przekroczyły dwa przejazdy (1% obserwacji).

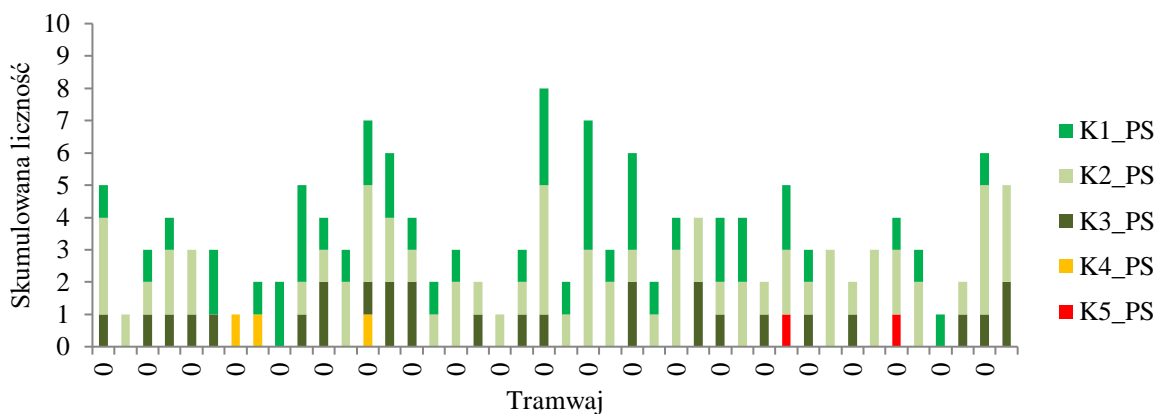


Rys. 10.41. Krzywe klas na tle wartości  $SRSS_{PS}$  w funkcji prędkości



Rys. 10.42. Histogram licznosci klas wartosci  $SRSS_{PS}$

Wyniki przyporządkowania przejazdów do poszczególnych klas w zależności od tramwaju przedstawiono na rysunku 10.43.



Rys. 10.43. Skumulowana licznosc klas  $SRSS_{PS}$  przyporzadkowana do poszczegolnego tramwaju

Na tle wszystkich analizowanych tramwajów wyróżnić można przejazdy tramwaju 540 których cztery przejazdy zaklasyfikowano do najkorzystniejszej klasy K1\_PS, a trzy przejazdy do klasy K2\_PS. Klasyfikacja do dwóch najniższych klas dotyczyła również ośmiu tramwajów 528, 533, 534, 539, 541, 544, 547 i 555. Liczba ich przejazdów nie przekraczała jednak czterech. Pojedyncze przejazdy trzech tramwajów 523, 524 i 530 zaklasyfikowano do klasy K4\_PS. Jednostkowe przejazdy dwóch tramwajów 549 i 554 zaklasyfikowano do klasy K5\_PS.

### 10.9. Składowa TI – analiza przyspieszeń drgań podkładu – $SRSS_{PP}$

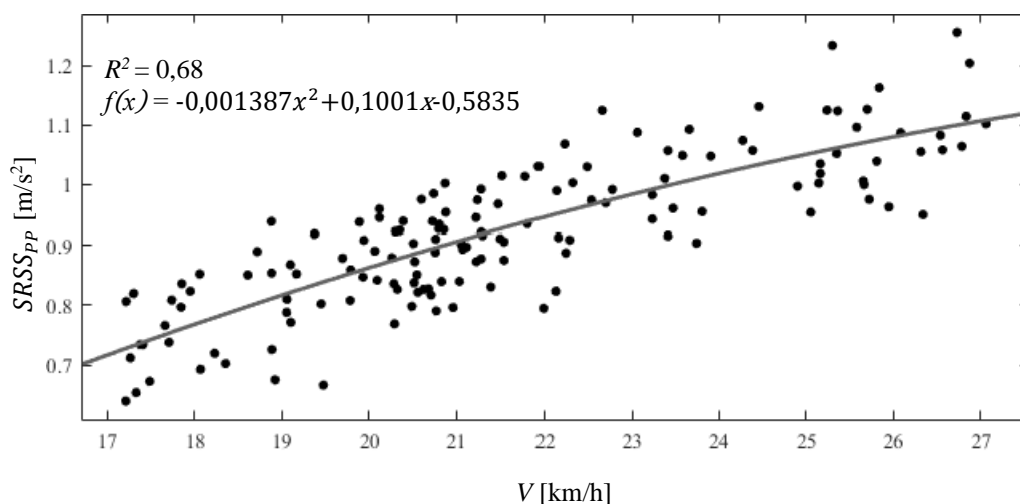
W analizie drgań podkładu uwzględniono sygnały przyspieszeń z punktu pomiarowego PP. Obliczenia wykonano analogicznie jak dla miary  $SRSS_{PS}$ , jak w równaniu:

$$SRSS_{PP} = \sqrt{a_{RMS_{PP-Y}}^2 + a_{RMS_{PP-Z}}^2} \quad (10.49)$$



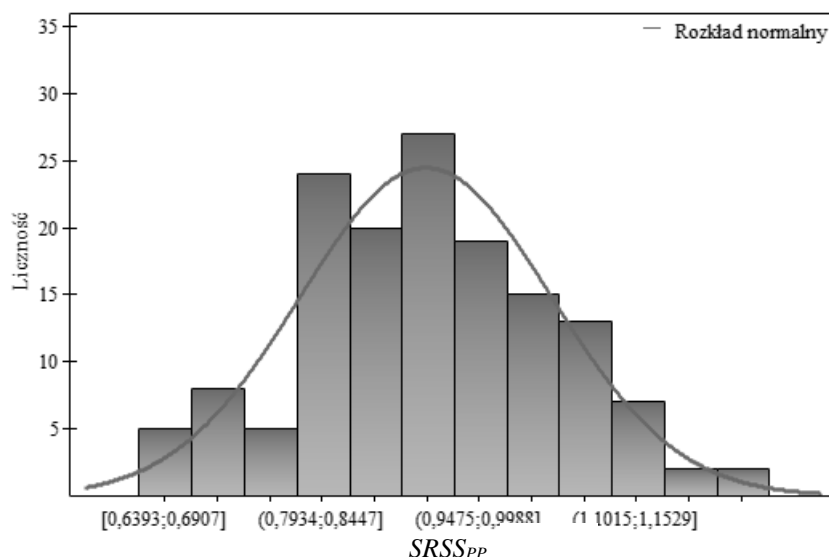
Zbadano zależność obliczonej miary względem prędkości przejazdu. Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wartością  $a_{PG1}$  a prędkością przejazdu wynosił  $r(SRSS_{PP}, V) = 0,85$ , co świadczy o silnej zależności. Wartości  $SRSS_{PP}$  w obserwacjach charakteryzują się współczynnikiem zmienności  $CV_{SRSS_{PP}} = 0,13\%$  i rozstępem  $R_{SRSS_{PP}} = 0,62 \text{ m/s}^2$ .

Dokonano również analizy regresji liniowej i nieliniowej pomiędzy zmiennymi. Na rysunku 10.44 przedstawiono model wielomianowy charakteryzujący się najlepszym dopasowaniem do danych ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,68$ . Z uwagi na wartość współczynnika determinacji możliwe jest wykorzystanie przedstawionego modelu w estymacji wartości  $SRSS_{PP}$  w funkcji prędkości przejazdu.



Rys. 10.44. Zależność wartości  $SRSS_{PP}$  w funkcji prędkości przejazdu

Zbadano dopasowanie wartości  $SRSS_{PP}$  w badanej próbie do rozkładu normalnego wykonując zdefiniowaną procedurę badania normalności rozkładu. Przyjęto analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$  jak w równaniach (9.30) i (9.31). Szczegółowe wyniki przedstawiono w załączniku nr 3 l). Histogram rozkładu wartości  $SRSS_{PP}$  przedstawiono na rysunku 10.45. Jak wynika z danych zawartych w załączniku, wyniki wskazują na brak odstępstw wartości  $SRSS_{PP}$  od rozkładu normalnego.



Rys. 10.45. Histogram rozkładu wartości  $SRSS_{PP}$

Z uwagi na zgodność wartości  $SRSS_{PP}$  z rozkładem normalnym, wartość graniczną i dopuszczalną obliczono zgodnie z metodą Smiley'a. Wykonano analogicznie obliczenia jak dla wartości  $N$ , wykorzystując korektę współczynnika nachylenia  $\beta_1$  w utworzonym modelu wielomianowym. Równania krzywych miały postać, jak w równaniach:

$$f_{Sd\_SRSS_{PP}} = -0,001387x^2 + 0,1104x - 0,5835 \quad (10.50)$$

$$f_{Sg\_SRSS_{PP}} = -0,001387x^2 + 0,1148x - 0,5835 \quad (10.51)$$

Następnie podzielono uzyskane wyniki na pięć klas zgodnie z tabelą 5.1, w sposób jak dla wartości  $N$ . Równania krzywych klas  $K2\_PP$  i  $K3\_PP$  miały postać, jak w równaniach:

$$f_{K2\_PP} = -0,001387x^2 + 0,0972x - 0,5835 \quad (10.52)$$

$$f_{K3\_PP} = -0,001387x^2 + 0,1030x - 0,5835 \quad (10.53)$$

Przypisanie wartości  $SRSS_{PP}$  do klas wykonano zgodnie z poniższymi implikacjami:

$$SRSS_{PP} \geq f_{Sg\_SRSS_{PP}} \rightarrow K5\_PP \quad (10.54)$$

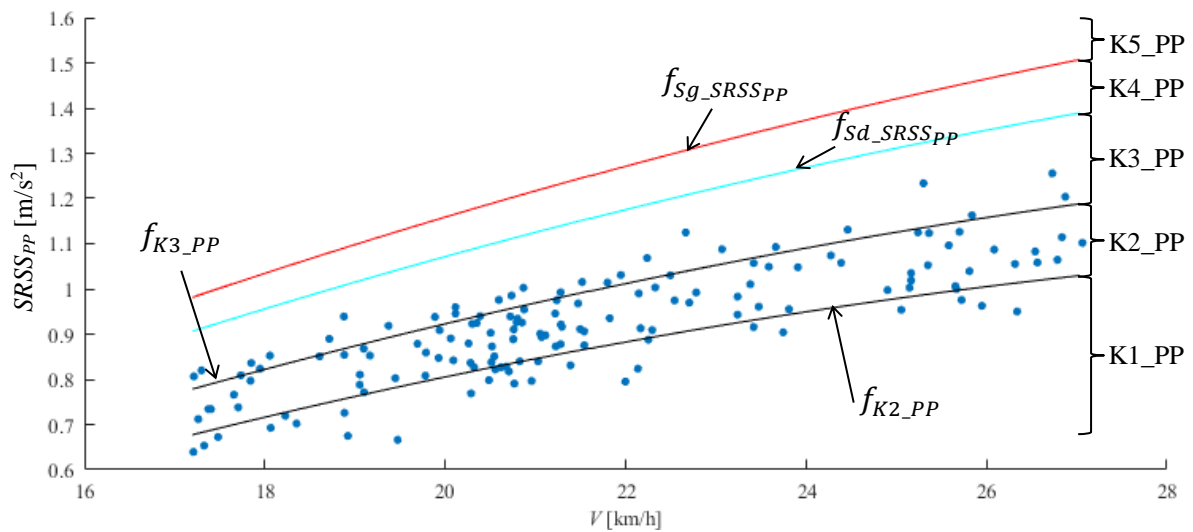
$$f_{Sg\_SRSS_{PP}} > SRSS_{PP} \geq f_{Sd\_SRSS_{PP}} \rightarrow K4\_PP \quad (10.55)$$

$$f_{Sd\_SRSS_{PP}} < SRSS_{PP} \geq f_{K3\_SRSS_{PP}} \rightarrow K3\_PP \quad (10.56)$$

$$K2\_PP \geq SRSS_{PP} \rightarrow K2\_PP \quad (10.57)$$

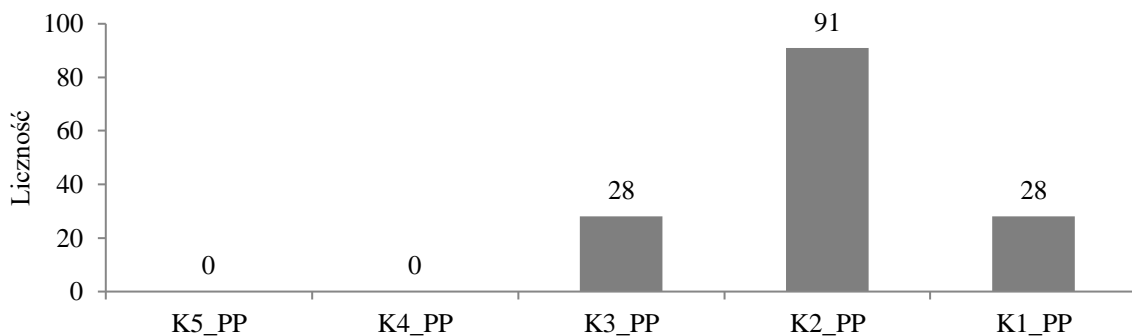
$$SRSS_{PP} < K2\_PP \rightarrow K1\_PP \quad (10.58)$$

Uzyskane wartości  $SRSS_{PP}$  przyporządkowane do tramwajów na tle zdefiniowanych klas przedstawiono na rysunku 10.46, a ich licznosci w danej klasie zestawiono na rysunku 10.47.



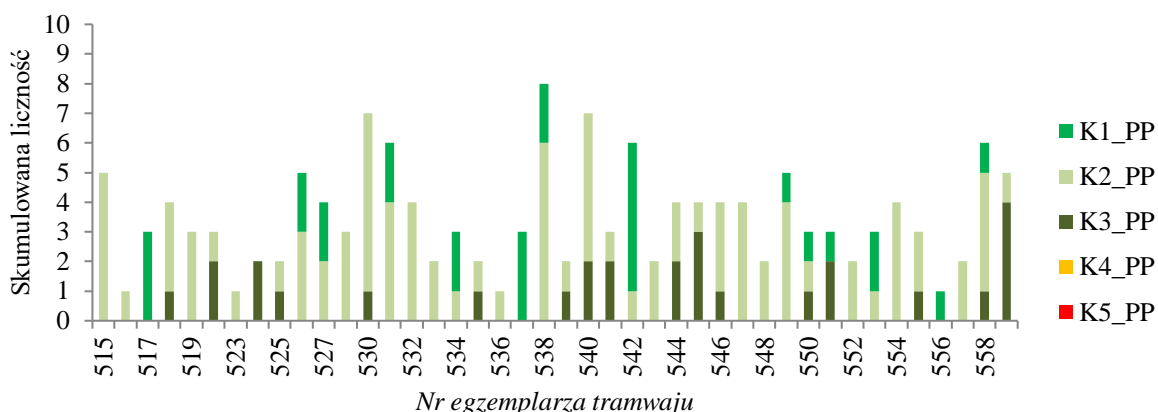
Rys. 10.46. Krzywe klas na tle wartości  $SRSS_{PP}$  w funkcji prędkości

Zgodnie z przedstawionymi danymi dla wartości  $SRSS_{PP}$  najliczniejszą klasę stanowi klasa druga K2\_PP, do której zaklasyfikowano 91 przejazdów, co stanowi około 62% obserwacji. Do najbardziej korzystnej klasy K1\_PP i klasy K3\_PP przypisano po 28 przejazdów, czyli odpowiednio po 19% obserwacji.



Rys. 10.47. Histogram licznosci klas wartosci  $SRSS_{PP}$

Wyniki przyporządkowania przejazdów do poszczególnych klas w zależności od tramwaju przedstawiono na rysunku 10.48.



Rys. 10.48. Skumulowana licznosc klas  $SRSS_{PP}$  przyporzadkowana do poszczegolnego tramwaju

Jak przedstawiono na rysunku 10.48, wszystkie trzy przejazdy tramwajow 517 i 537 zaklasyfikowano do najkorzystniejszej klasy K1\_PP. Ponadto poza jednym przejazdem w klasie K2\_PP, piec przejazdow tramwaju 542 zaklasyfikowano do klasy K1\_PP. Mozna rowniez wskazać cztery tramwaje 526, 531, 538 i 549, ktorzych przejazdy charakteryzowaly sie wartoscia  $SRSS_{PP}$  przyporzadkowanà do dwóch najniższych klas K1\_PP i K2\_PP przy licznosci przejazdow powyzej czterech. Ponadto wszystkie piec przejazdow tramwaju 515, zaklasyfikowano do klasy K2\_PP.

### 10.10. Skladowa IO – analiza drgan parasejsmicznych $SRSS_{PG1}$ , $SRSS_{PG2}$

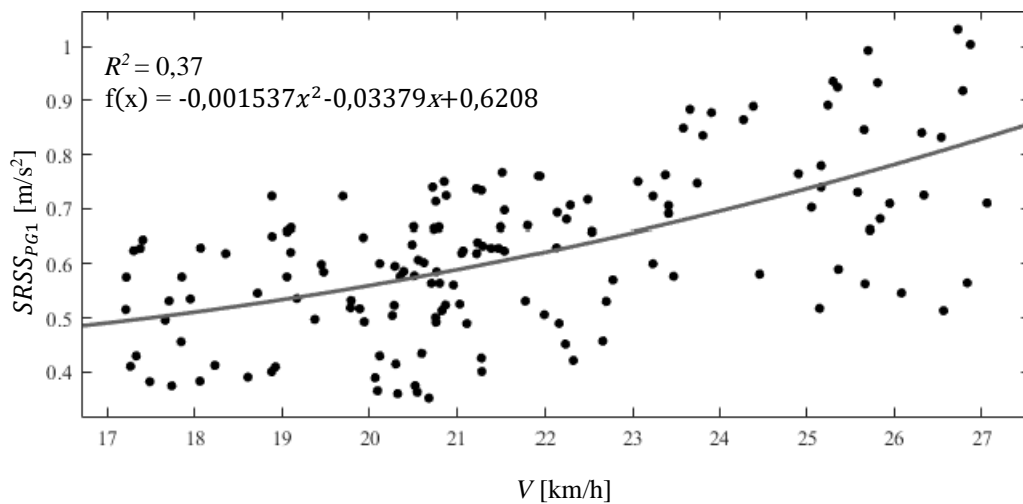
W analizie drgan parasejsmicznych uwzględniono sygnaly przyspieszen z punktow pomiarowych w bliskiej odleglosci od zrodla PG1 i na sciezce propagacji PG2 uwzględniajac wszystkie uwzględnione kierunki pomiarowe. Dla kazdego z tych punktow obliczenia przeprowadzono analogicznie jak dla miary  $SRSS_{PS}$ , jak w rownaniach:

$$SRSS_{PG1} = \sqrt{a_{RMS\_PG1-X}^2 + a_{RMS\_PG1-Z}^2} \quad (10.59)$$

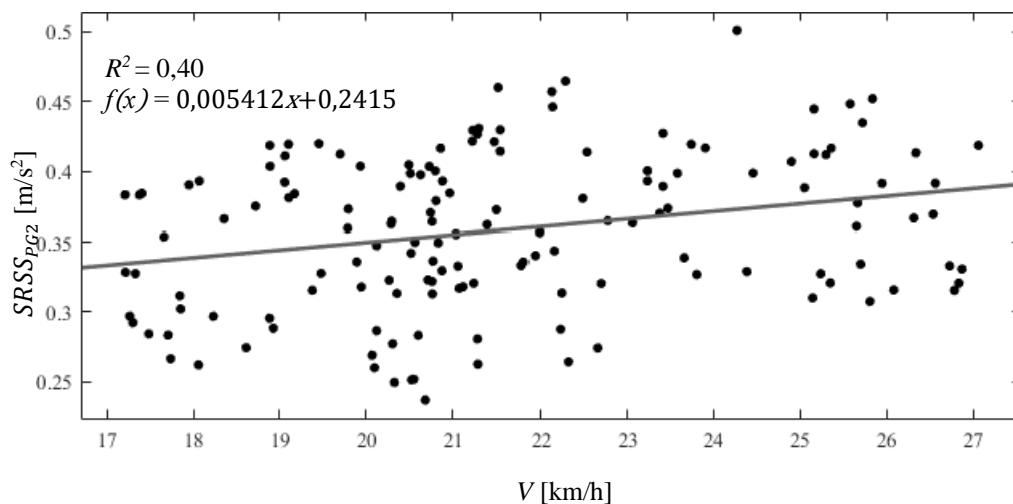
$$SRSS_{PG2} = \sqrt{a_{RMS\_PG2-X}^2 + a_{RMS\_PG2-Z}^2} \quad (10.60)$$

Zbadano zaleznosc pomiedzy obliczonymi wartosciami miar a predkoscia przejazdu. Wspolczynnik korelacji Pearsona pomiedzy wartosciami  $SRSS_{PG1}$  a predkoscia przejazdu wynosil  $r(SRSS_{PG1}, V) = -0,19$ , co swiadczy o braku zaleznosci. Analogiczny wniosek dotyczy miary  $SRSS_{PG2}$ , dla ktorej wspolczynnik ten wynosil  $r(SRSS_{PG2}, V) = -0,11$ . Wartosci  $SRSS_{PG1}$  i  $SRSS_{PG2}$  w obserwacjach charakteryzuja sie wspolczynnikiem zmiennosci  $CV_{SRSS_{PG1}} \wedge CV_{SRSS_{PG2}} = 0,2\%$ . Rozstep wartosci dla  $a_{PG1}$  byl wiekszy o 57% i wynosil  $R_{SRSS_{PG1}} = 0,7 \text{ m/s}^2$ .

Wykonano również analizy regresji liniowej i nieliniowej pomiędzy wartościami  $SRSS_{PG1}$  i  $SRSS_{PG2}$  a prędkością przejazdu. Na rysunku 10.49 i rysunku 10.50 przedstawiono modele wielomianowe charakteryzujące się najlepszym dopasowaniem analizowanych miar do danych. Dla obu miar współczynnik determinacji był zbliżony i wynosił  $R^2 = 0,37$  dla  $SRSS_{PG1}$  i  $R^2 = 0,40$  dla  $SRSS_{PG2}$ . Obliczone modele uniemożliwiają wykorzystanie ich w estymacji wskazanych zmiennych.

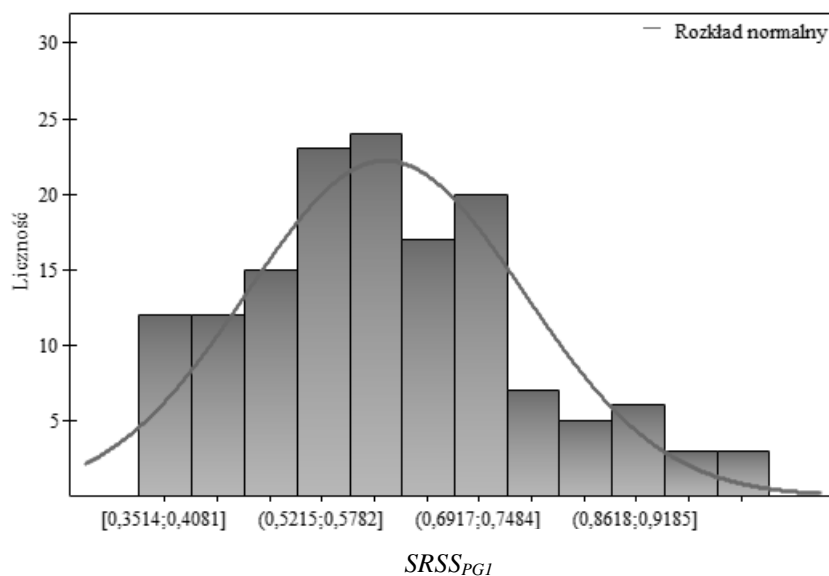


Rys. 10.49. Zależność wartości  $SRSS_{PG1}$  w funkcji prędkości przejazdu

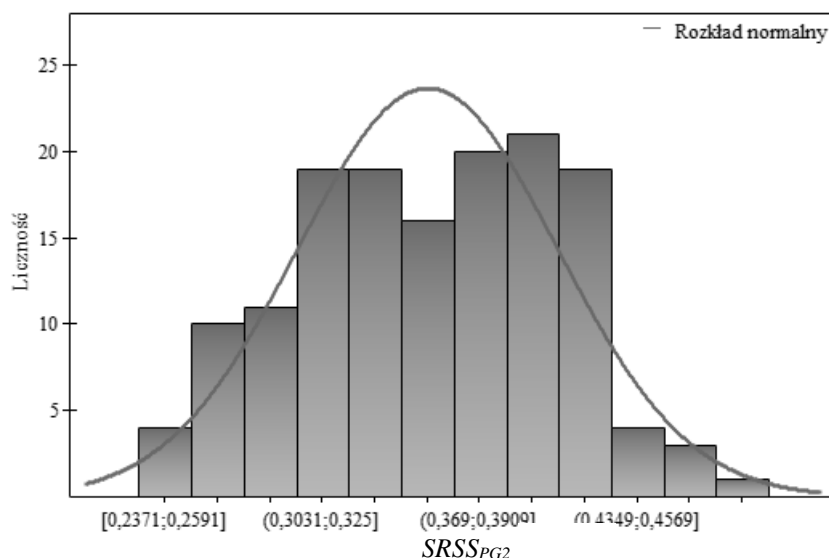


Rys. 10.50. Zależność wartości  $SRSS_{PG2}$  w funkcji prędkości przejazdu

Zbadano dopasowanie wartości  $SRSS_{PG1}$  i  $SRSS_{PG2}$  do rozkładu normalnego wykonując zdefiniowaną procedurę badania normalności rozkładu. Przyjęto analogiczne hipotezy testów  $H_0$  i  $H_1$  jak w równaniach (9.30) i (9.31). Szczegółowe wyniki przedstawiono w załączniku nr 3 j) dla miary  $SRSS_{PG1}$  i w załączniku nr 3 k) dla  $SRSS_{PG2}$ . Histogramy rozkładów wartości  $SRSS_{PG1}$  i  $SRSS_{PG2}$  przedstawiono odpowiednio na rysunku 10.51 i rysunku 10.52.



Rys. 10.51. Histogram rozkładu wartości  $SRSS_{PG1}$

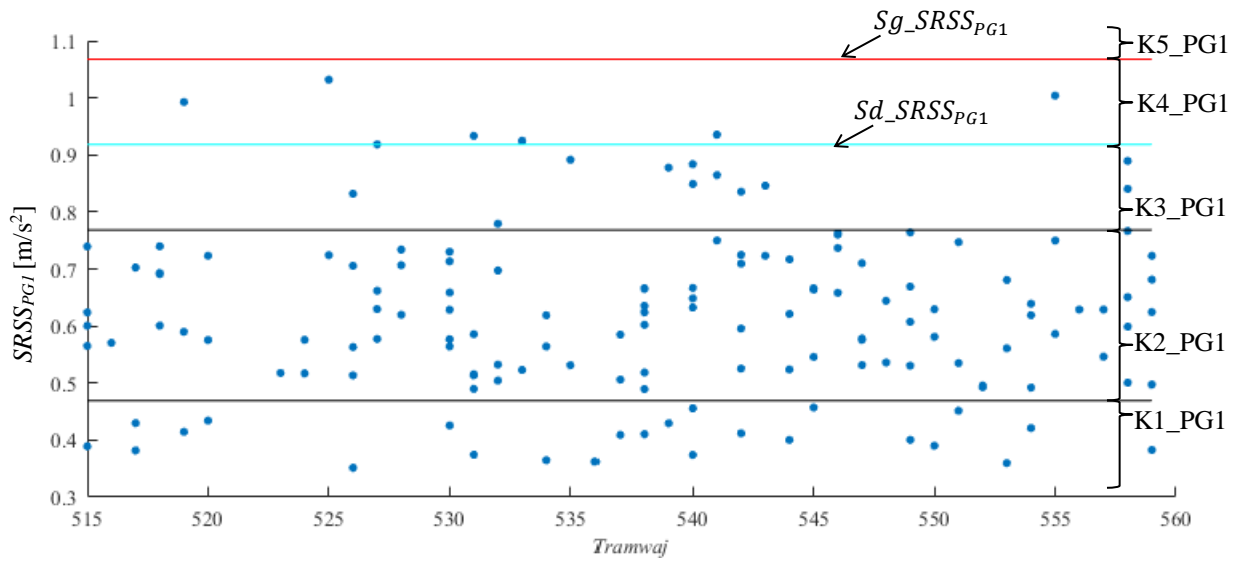


Rys. 10.52. Histogram rozkładu wartości  $SRSS_{PG2}$

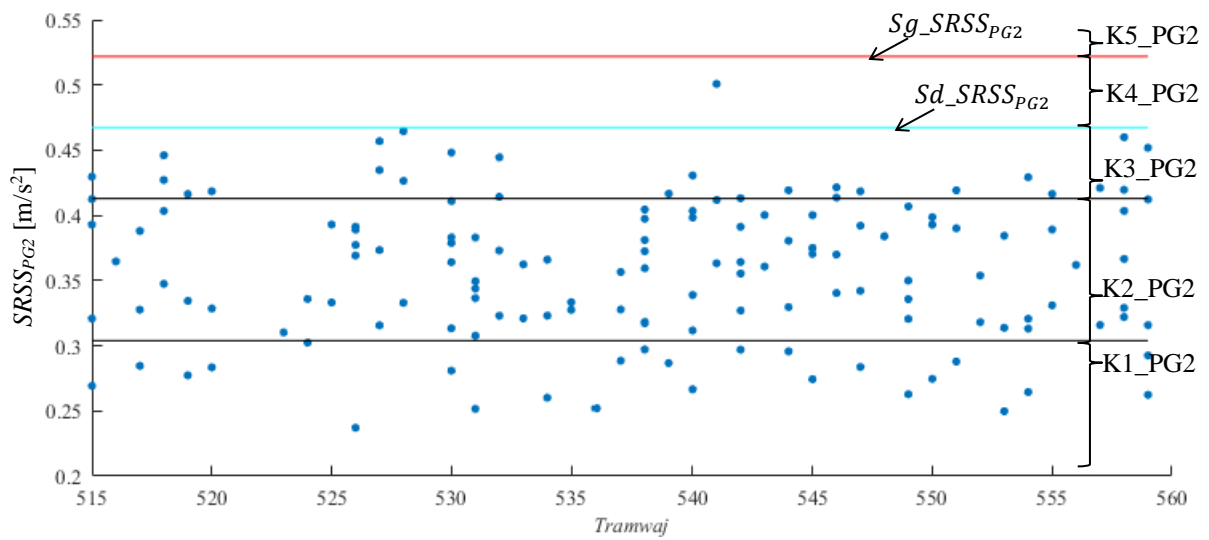
Jak wynika z danych zawartych w załącznikach, wyniki wskazują na brak odstępstw obu miar od rozkładu normalnego.

Z uwagi na zgodność rozkładów obu miar z rozkładem normalnym, wartości dopuszczalne i graniczne wyznaczono zgodnie z metodą Smiley'a, zgodnie z równaniami (9.32) i (9.33). Następnie podzielono uzyskane wyniki na pięć klas zgodnie z tabelą 5.1. i analogicznie jak dla wartości  $Leq$  w równaniach (10.3)–(10.18).

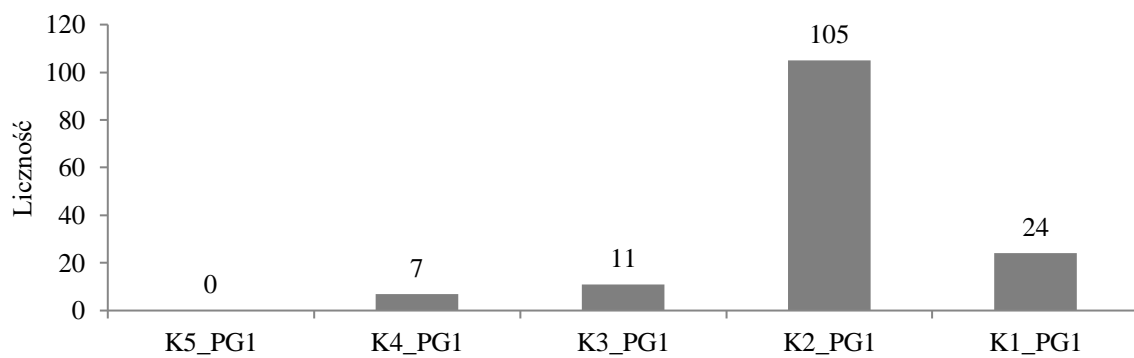
Uzyskane wartości  $SRSS_{PG1}$  przyporządkowane do tramwajów na tle zdefiniowanych klas przedstawiono na rysunku 10.53, a ich licznosci w danej klasie zestawiono na rysunku 10.55. Dane dla wartości  $SRSS_{PG2}$  przedstawiono analogicznie na rysunku 10.54 i rysunku 10.56.



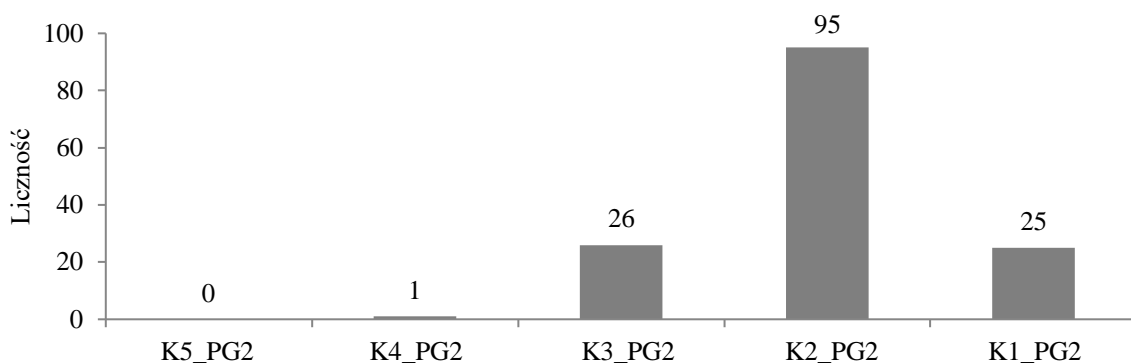
Rys. 10.53. Klasy wartości  $SRSS_{PG1}$  na tle uzyskanych wyników



Rys. 10.54. Klasy wartości  $SRSS_{PG2}$  na tle uzyskanych wyników



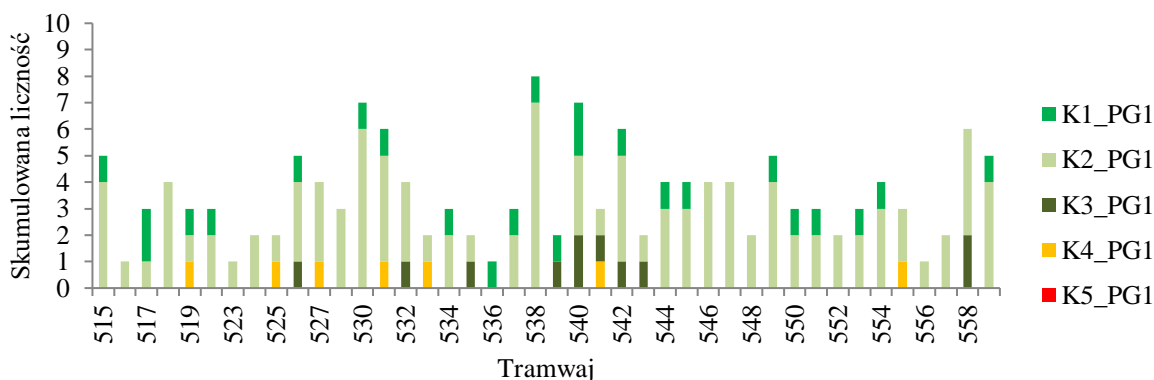
Rys. 10.55. Histogram liczności klas  $SRSS_{PG1}$



Rys. 10.56. Histogram liczności klas  $SRSS_{PG2}$

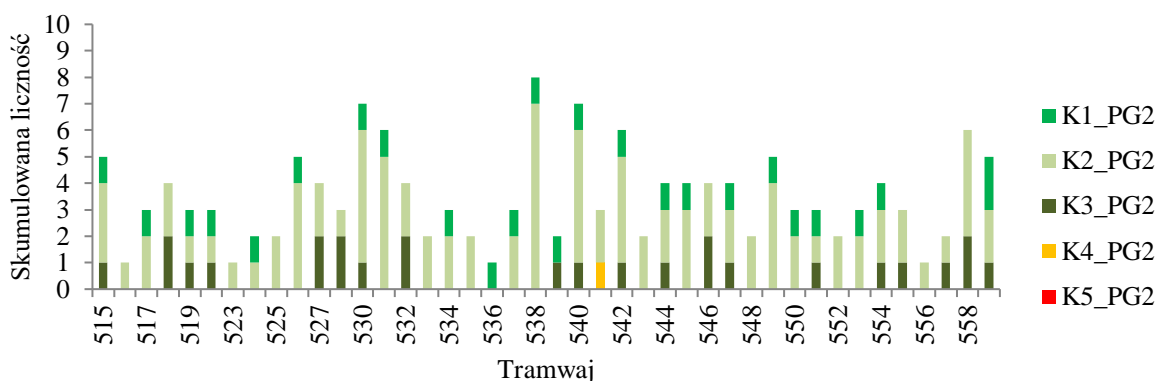
Jak przedstawiono powyżej, najliczniejszą klasę dla wartości  $SRSS_{PG1}$  i  $SRSS_{PG2}$  stanowi klasa druga K2. W przypadku miary  $SRSS_{PG1}$  przypisano do niej 105 przejazdów (71% obserwacji), a w przypadku  $SRSS_{PG2}$  – 95 przejazdów (65% obserwacji). Do najbardziej korzystnej klasy K1 zaklasyfikowano 24 przejazdy (16% obserwacji) w przypadku  $SRSS_{PG1}$  i 25 przejazdów (17% obserwacji) w przypadku  $SRSS_{PG2}$ . Do klasy K3 przypisano 11 przejazdów (7% obserwacji) w przypadku miary  $SRSS_{PG1}$  i 26 przejazdów (18% obserwacji) w przypadku miary  $SRSS_{PG2}$ . Zaobserwowano siedem przejazdów dla miary  $SRSS_{PG1}$ , które przekroczyły wartość dopuszczalną i które przypisano do klasy K4, co stanowi 5% obserwacji. Dla miary  $SRSS_{PG2}$  przypisano w tej klasie jeden przejazd (1% obserwacji). W przypadku obu miar nie zaobserwowano przejazdów przypisanych do klasy K5.

Na rysunku 10.57 przedstawiono skumulowaną licznosc klas wartości  $SRSS_{PG1}$  osiągniętych przez poszczególne tramwaje. Licznosc tą dla wartości  $SRSS_{PG2}$  przedstawiono na rysunku 10.58.



Rys. 10.57. Skumulowana licznosc klas wartości  $SRSS_{PG1}$  przyporządkowana do poszczególnego tramwaju





Rys. 10.58. Skumulowana liczność klas  $SRSS_{PG2}$  przyporządkowana do poszczególnego tramwaju

Zgodnie z uzyskanymi danymi, wyróżnić można liczne przejazdy tramwajów 515, 530, 538, 549 i 559, które zaklasyfikowano jedynie do klas K1\_PG1 i K2\_PG1, przy realizacji ponad czterech przejazdów. Siedem tramwajów 519, 525, 257, 531, 533, 541 i 555 osiągnęły klasę K4\_PG1 dla jednego zrealizowanego przejazdu.

W przypadku  $SRSS_{PG2}$ , wyróżnić można liczne przejazdy tramwajów 531, 538 i 549, które zaklasyfikowano jedynie do klas K1\_PG2 i K2\_PG2, przy realizacji ponad czterech przejazdów. Jeden tramwaj 541 osiągnął klasę K4\_PG2 dla jednego przejazdu. Jedynie szesnaście tramwajów (62%) zaklasyfikowano do tej samej klasy w obu miarach.

### 10.11. Podsumowanie rozdziału 10

Na podstawie przedstawionych założeń podstawowych zrealizowano parametryzację zjawisk wibroakustycznych generowanych podczas przejazdu tramwajów. Wykorzystano w tym celu analizy ilościowe bazujące na miarach punktowych drgań i dźwięku. Dla każdej z obliczonych miar sprawdzono jej zależność z prędkością przejazdu. Silną zależność stwierdzono dla wskaźników  $N$ ,  $N5$  i  $FS2$  oraz miar  $SRSS_{PS}$  i  $SRSS_{PP}$ . Stwierdzono możliwość wykorzystania utworzonych dla nich modeli wielomianowych w estymacji ich wartości w funkcji prędkości przejazdu.

Wyniki poszczególnej miary zaklasyfikowano do pięciu klas z uwzględnieniem statystyki obserwacji. W przypadku braku silnej korelacji danej obserwacji z prędkością i równoczesną zgodnością z rozkładem normalnym wykorzystano w klasyfikacji cechy rozkładu normalnego i założenia metody Smiley'a. W przypadku wskaźnika  $S$  i miary  $SRSS_{PS}$  wykorzystano cechy rozkładu logarytmiczno-normalnego. Dla obserwacji silnie skorelowanych z prędkością opierano się na korekcie współczynnika nachylenia modelu wielomianowego z poziomami istotności ustalonymi dla uzyskania kwantyli analogicznych

do cech rozkładu normalnego. W ten sposób uzyskano jednakową interpretację uzyskanych wyników w obrębie wszystkich miar składowych aktywności wibroakustycznej. Przejazdy tramwajów z prędkością powyżej 23 km/h wykazały inny charakter rozkładu wartości  $FS$ . Wyznaczono dwa różne skupiska obserwacji, dla których wykonano analizę skupień z wykorzystaniem kombinacji modeli normalnych GMM. Analiza ta pozwoliła wyekstrahować skupienia w celu ich dalszej indywidualnej analizy i klasyfikacji analogicznie jak dla innych miar.

Zaobserwowano, że przejazdy egzemplarzy tramwajów są klasyfikowane do różnych klas przy uwzględnieniu danej miary. Oznacza to, że poszczególne egzemplarze tramwaju nie zachowują stałego poziomu poszczególnej miary w obserwowanym okresie. Co więcej, dany egzemplarz tramwaju nie jest przypisywany do tej samej klasy w ramach różnych miar. Konieczne jest określenie jednego wskaźnika uwzględniającego rozłożenie poszczególnych miar składowych na różne klasy.

## 11. OCENA AKTYWNOŚCI WIBROAKUSTYCZNEJ TRAMWAJU

### 11.1. Obliczenia wskaźnika aktywności wibroakustycznej $AW$

Zdefiniowane i obliczone parametry wibroakustyczne wykorzystano do utworzenia wskaźnika oceny aktywności wibroakustycznej  $AW$  zgodnie z definicją sformułowaną w rozdziale 2. Dane wejściowe do obliczeń wskaźnika  $AW$  stanowiły klasy poszczególnych miar składowych danego przejazdu tramwaju. Wskaźnik  $AW$  utworzony został z wykorzystaniem analizy wielokryterialnej w oparciu o sumę ważoną, co przedstawia równanie:

$$AW = \alpha_1 K_i_{Leq} + \alpha_2 K_i_N + \alpha_3 K_i_{N5} + \alpha_4 K_i_{SR} + \alpha_5 K_i_S + \alpha_6 K_i_{FS} + \\ + \alpha_7 K_i_{PG1} + \alpha_8 K_i_{PG2} + \alpha_9 K_i_{PP} + \alpha_{10} K_i_{PS1}, i \in \langle 1,5 \rangle, i \in \mathbb{N} \quad (11.1)$$

gdzie:

$AW$  – wskaźnik oceny aktywności wibroakustycznej,

$\alpha_1$  – waga dla klasy  $Leq$ ,

$\alpha_2$  – waga dla klasy  $N$ ,

$\alpha_3$  – waga dla klasy  $N5$ ,

$\alpha_4$  – waga dla klasy  $SR$ ,

$\alpha_5$  – waga dla klasy  $S$ ,

$\alpha_6$  – waga dla klasy  $FS$ ,

$\alpha_7$  – waga dla klasy  $SRSS_{PS}$ ,

$\alpha_8$  – waga dla klasy  $SRSS_{PP}$ ,

$\alpha_9$  – waga dla klasy  $SRSS_{PG1}$ ,

$\alpha_{10}$  – waga dla klasy  $SRSS_{PG2}$ ,

$K_i$  –  $i$ -ta klasa danego parametru.

Przy czym zastosowane w równaniu wagi charakteryzują się poniższą zależnością:

$$\sum_{i=1}^{10} \alpha_i = 1 \quad (11.2)$$

Dla wskaźnika oceny aktywności wibroakustycznej  $AW$  zastosowano poniższą zależność dla wag:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \alpha_7 = \alpha_8 = \alpha_9 = \alpha_{10} \quad (11.3)$$

Wówczas wartości poszczególnych wag wynoszą  $\alpha_i=0,1$ . Otrzymane wyniki przypisano dla klas  $AW$  proporcjonalnie zgodnie z zależnościami:

$$0 \leq AW < 0,2 \rightarrow AW\_1 \quad (11.4)$$

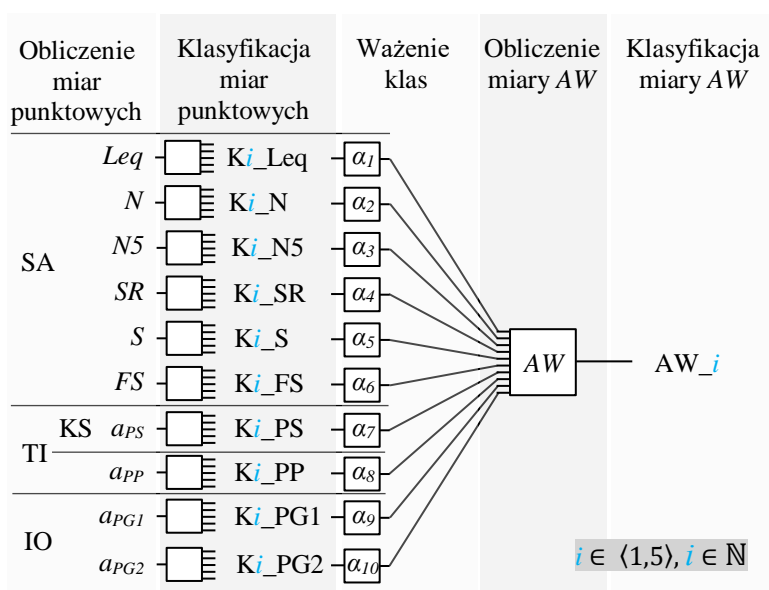
$$0,2 \leq AW < 0,4 \rightarrow AW\_2 \quad (11.5)$$

$$0,4 \leq AW < 0,6 \rightarrow AW\_3 \quad (11.6)$$

$$0,6 \leq AW < 0,8 \rightarrow AW\_4 \quad (11.7)$$

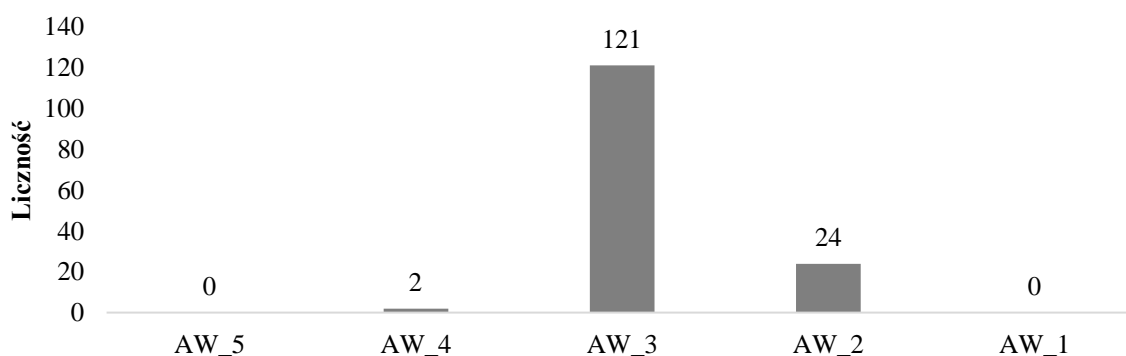
$$0,8 \leq AW \leq 1,0 \rightarrow AW\_5 \quad (11.8)$$

Schemat obliczeń wskaźnika aktywności wibroakustycznej  $AW$  wraz z klasyfikacją przedstawiono na rysunku 11.1.



Rys. 11.1. Schemat obliczeń miary aktywności wibroakustycznej  $AW$

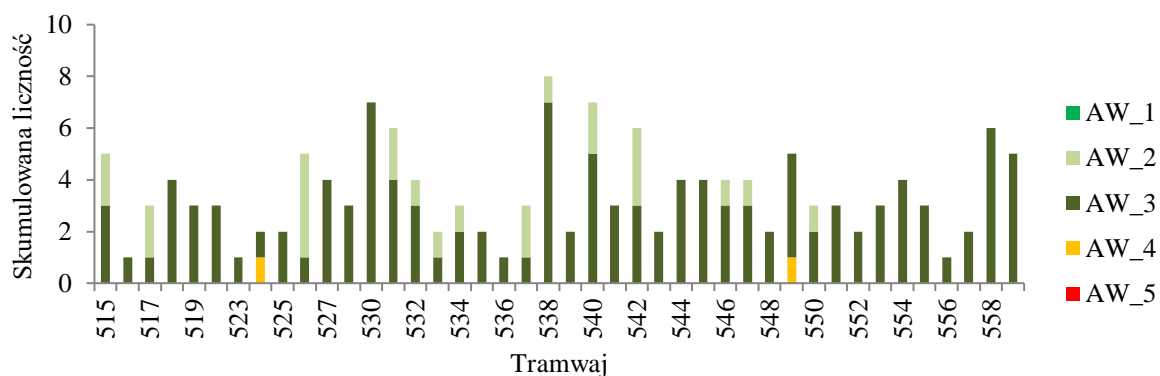
Histogram przedstawiający licznosci klas miary  $AW$  przedstawiono na rysunku 11.2.



Rys. 11.2. Licznosci klas wskaźnika  $AW$

Jak wynika z danych przedstawionych na rysunku 11.2, najwięcej przejazdów zakwalifikowano do klasy  $AW\_3$ . W klasie  $AW\_2$  zakwalifikowano o 80% mniej przejazdów, a w klasie  $AW\_4$  znajdowały się dwa przejazdy (około 2%).

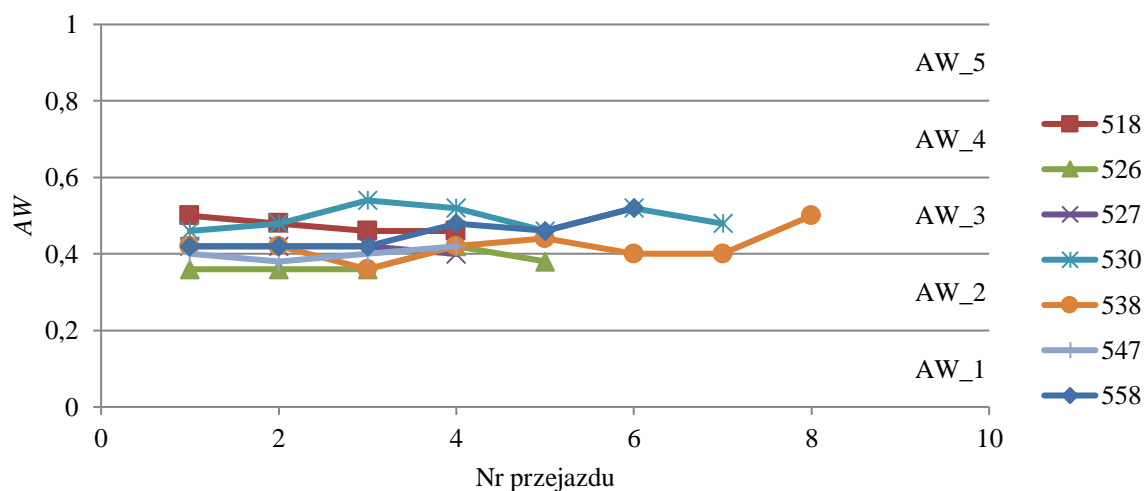
Skumulowaną licznosc klas AW dla poszczegolnego przejazdu danego tramwaju przedstawiono na rysunku 11.3. Z grupy tramwajow mozna wyroznic egzemplarze, ktore charakteryzuja sie licznymi przejazdami w obrębie tylko jednej klasy AW. Wyróżnić można egzemplarze o numerach 530, 558 w klasie AW\_3. W przypadku tramwajów 526 i 542 zaobserwowano również odpowiednio cztery i trzy przejazdy w klasie AW\_2. Przejazdy tramwajów 549 i 524 jednostkowo zakwalifikowano do klasy AW\_4.



Rys. 11.3. Skumulowana licznosc klas miary AW dla przejazdow danego tramwaju

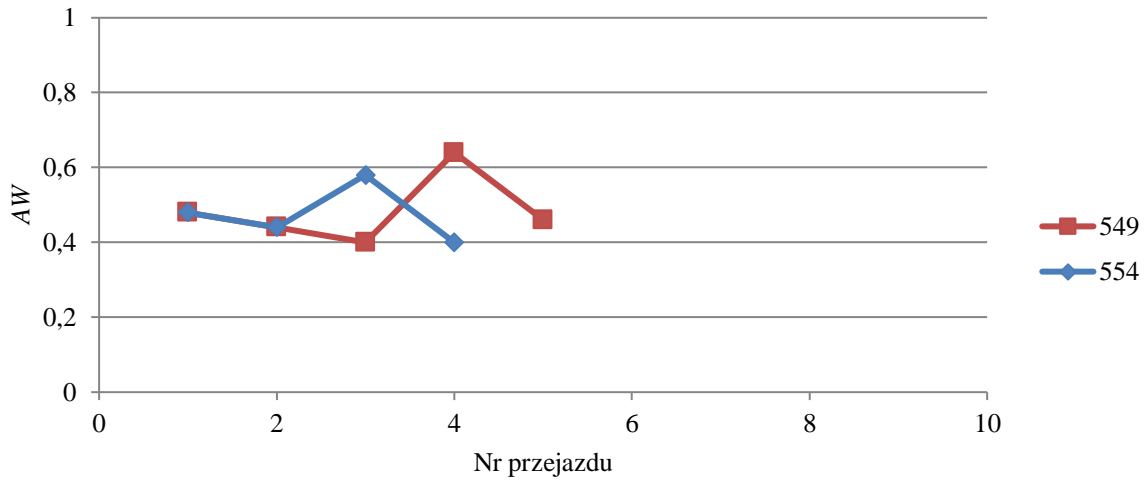
Przypisanie danej klasy AW do zbioru wartosci granicznych jest ściśle uwarunkowane wymaganiami operatora taboru. Zgodnie z przeprowadzonymi analizami założono przypisanie tym wartościom odpowiednio klasy AW\_5 i AW\_4.

Oprócz przyporządkowania przejazdów tramwajów do klas, możliwa jest obserwacja zmian wskaźnika AW dla poszczegolnego egzemplarza tramwaju w obserwowanym okresie eksploatacji. Na rysunku 11.4 przedstawiono wybrane przypadki tramwajow, ktorych wyniki AW dla przejazdow charakteryzowaly sie współczynnikiem zmienności  $CV_{AW} < 10\%$ .



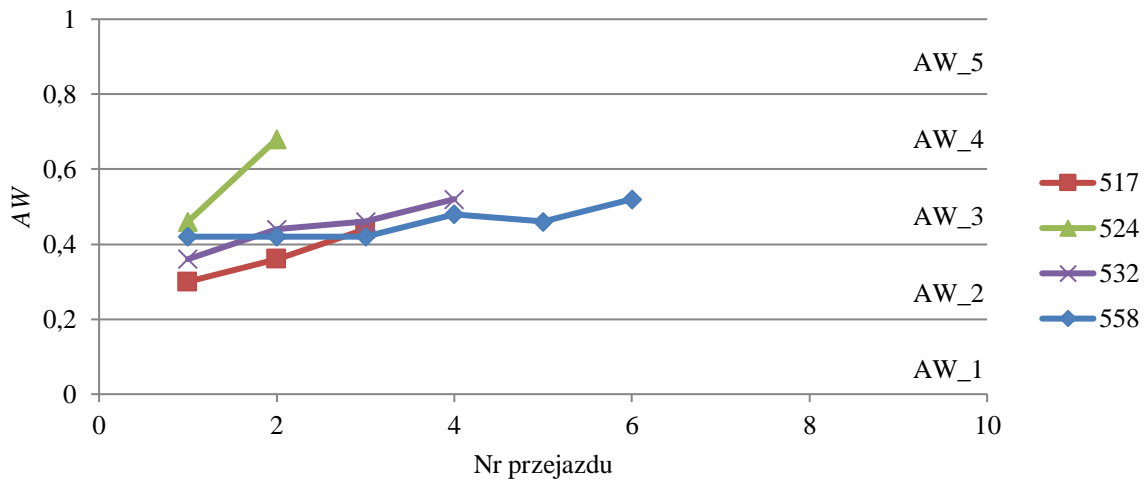
Rys. 11.4. Egzemplarze tramwajow spelniajace warunek  $CV_{AW} < 10\%$

Na rysunku 11.5 przedstawiono dwa przypadki tramwajów, dla których współczynnik zmienności wynosił  $19\% > CV_{AW} > 16\%$ .



Rys. 11.5. Egzemplarze tramwajów spełniające warunek  $19\% > CV_{AW} > 16\%$

Natomiast na rysunku 11.6 przedstawiono wybrane przypadki z zaobserwowanym trendem wzrostowym wartości  $AW$ .



Rys. 11.6. Egzemplarze tramwajów z trendem wzrostowym wartości  $AW$

Przedstawione wyniki na rysunku 11.4, rysunku 11.5 i rysunku 11.6 wskazują, że możliwe jest monitorowanie trendu zmian wartości  $AW$  dla danego egzemplarza tramwaju. Podstawą skierowania tramwaju do obsługi może być również (oprócz przypisania przejazdów do klas) wartość współczynnika zmienności w wybranym przedziale obserwacji. Ponadto obserwacja trendu w czasie eksploatacji może posłużyć do predykcji czasu do zmian klas i ostatecznie do zakwalifikowania tramwaju do obsługi. Wymaga to jednak podjęcia prac

związanych ze skorelowaniem obserwowanych wartości  $AW$  z parametrami stanu technicznego tramwaju.

Możliwe jest ukierunkowanie wskaźnika  $AW$  na priorytetowe uwzględnienie zjawisk zgodnie z przyjętymi składowymi aktywności wibroakustycznej. W tym celu konieczna jest modyfikacja wartości wag poszczególnych miar. Ustalenie tych wartości jest ściśle uzależnione od użytkowników proponowanej metody i w niniejszej pracy przedstawiono przykładowy sposób ich sformułowania. Wartości wag dla poszczególnych miar zestawiono w tabeli 11.1.

Tabela 11.1. Szczegółowe dane dotyczące wag dla poszczególnych ocen miar składowych wskaźnika  $AW$

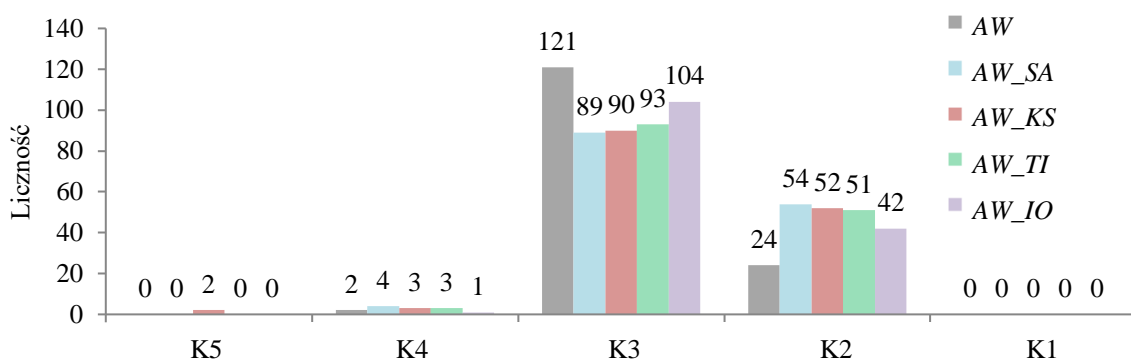
Klasy miar składowych	Symbol wagi	Wartości poszczególnych wag dla miar składowych wskaźnika $AW$				
		$AW$	$AW_{SA}$ z priorytetem oceny miar SA	$AW_{KS}$ z priorytetem oceny miar KS	$AW_{TI}$ z priorytetem oceny miar TI	$AW_{IO}$ z priorytetem oceny miar IO
$Ki_{Leq}$	$\alpha_1$	0,1	<b>0,10*</b>	0,02	0,025	0,025
$Ki_N$	$\alpha_2$	0,1	<b>0,15*</b>	0,02	0,025	0,025
$Ki_{N5}$	$\alpha_3$	0,1	<b>0,15*</b>	0,02	0,025	0,025
$Ki_{SR}$	$\alpha_4$	0,1	<b>0,15*</b>	0,02	0,025	0,025
$Ki_S$	$\alpha_5$	0,1	<b>0,10*</b>	0,02	0,025	0,025
$Ki_{FS}$	$\alpha_6$	0,1	<b>0,10*</b>	0,02	0,025	0,025
$Ki_{PG1}$	$\alpha_7$	0,1	0,05	0,02	0,025	<b>0,4*</b>
$Ki_{PG2}$	$\alpha_8$	0,1	0,05	0,02	0,025	<b>0,4*</b>
$Ki_{PP}$	$\alpha_9$	0,1	0,05	0,02	<b>0,4*</b>	0,025
$Ki_{PS}$	$\alpha_{10}$	0,1	0,05	<b>0,8*</b>	<b>0,4*</b>	0,025
$\Sigma$		1	1	1	1	1
$\Sigma$ priorytet		nie dotyczy	0,8	0,8	0,8	0,8

\* wartość dla wagi dla miar priorytetowych

Założono, że suma wag dla składowych ocenianych priorytetowo stanowić będzie 80% całości wag, by znacznie zwiększyć ich udział w ocenie końcowej. W przypadku priorytetowego uwzględnienia miar związanych ze składową SA założono największe wagi wynoszące 0,15 dla poziomu głośności, chropowatości i ostrości dźwięku, zgodnie z wynikami pracy [41]. W pozostałych miarach składowej SA waga ta wynosiła 0,1 dla proporcjonalnego uzupełniania wartości. W przypadku oddziaływań na styku koła z szyną (KS) największy priorytet dotyczył drgań szyny, a w przypadku oddziaływań tramwaju z infrastrukturą (TI) uwzględniono dodatkowo drgania podkładu. Natomiast dla oddziaływań infrastruktury torowej (IO) z otoczeniem założono największy priorytet dla drgań parasejsmicznych.

W ten sposób utworzono zmodyfikowane wskaźniki aktywności wibroakustycznej w postaci  $AW_{SA}$ ,  $AW_{KS}$ ,  $AW_{TI}$  i  $AW_{IO}$ . Dla poszczególnych ocen z uwzględnieniem priorytetów przyporządkowano odpowiadające im klasy analogicznie jak w równaniach (11.4)–(11.8). Na rysunku 11.7 przedstawiono zbiorcze zestawienie licznosci klas poszczególnych wskaźników.

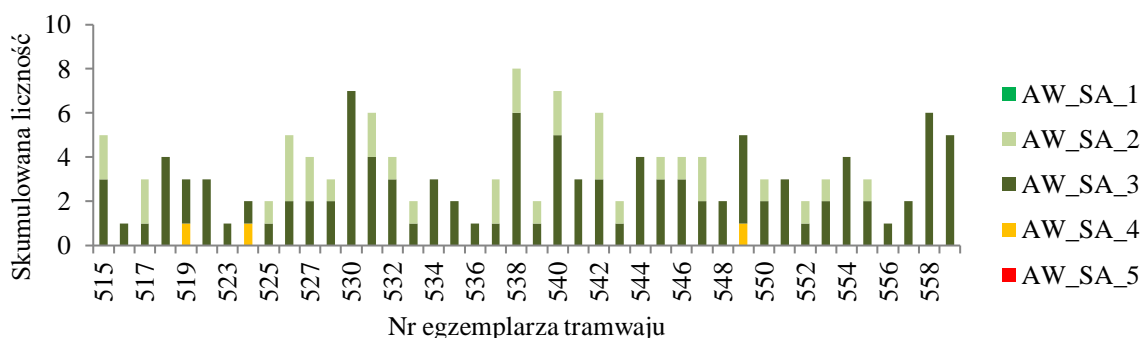
Jak wynika z rysunku 11.7, liczność przejazdów zakwalifikowanych do poszczególnych klas różni się w zależności od założonego priorytetu w ocenie aktywności wibroakustycznej. W przypadku uwzględnienia w ocenie oddziaływań dynamicznych na styku koła z szyną (AW\_KS), do najwyższej zaobserwowanej drugiej klasy zakwalifikowano 52 przejazdy, co stanowi większą o około 54% licznosc w stosunku do wskaźnika AW bez priorytetu oceny.



Rys. 11.7. Zestawienie licznosci klas dla miar AW, AW\_SA, AW\_KS, AW\_TI i AW\_IO

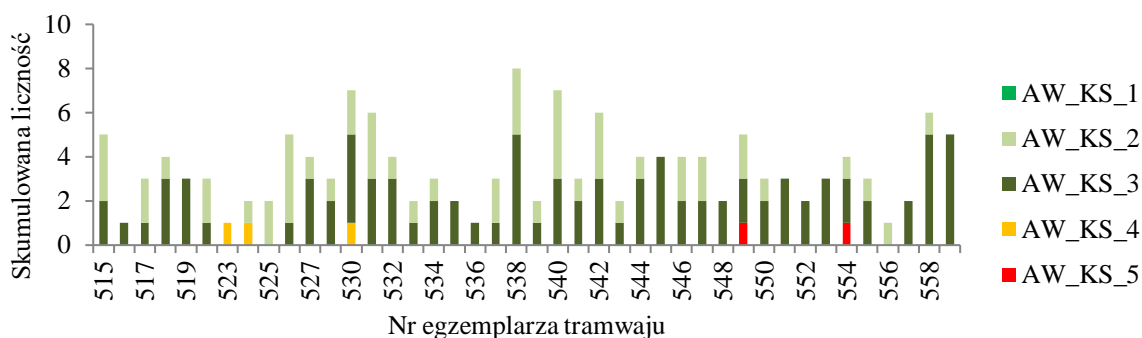
Podobna sytuacja dotyczy pozostałych wskaźników za wyjątkiem AW\_IO, dla którego licznosc była większa o około 43% w porównaniu do AW. Większą liczbę przejazdów sklasyfikowano do wyższych klas, gdy uwzględniono zadane priorytety. Wskaźnik AW\_SA wskazuje na zaklasyfikowanie o 4% więcej przejazdów do najwyższej zaobserwowanej klasy drugiej w porównaniu do wskaźnika AW\_KS. Największe rozróżnienie w tej klasie zaobserwowano dla wskaźnika AW\_IO. W tym przypadku do klasy drugiej zakwalifikowano około 20% mniej przejazdów w porównaniu do innych wskaźników priorytetowych. Jedynie w przypadku wskaźnika AW\_KS, dwa przejazdy zakwalifikowano do najniższej, piątej klasy. W klasie czwartej największą licznosc stanowiły przejazdy ocenione według wskaźnika AW\_SA z różnicą względem innych wskaźników o 1–3 przejazdy.

Skumulowane licznosci klas oceny aktywności wibroakustycznej z uwzględnieniem priorytetów przedstawiono na rysunku 11.8, 11.9, 11.10 i 11.11.

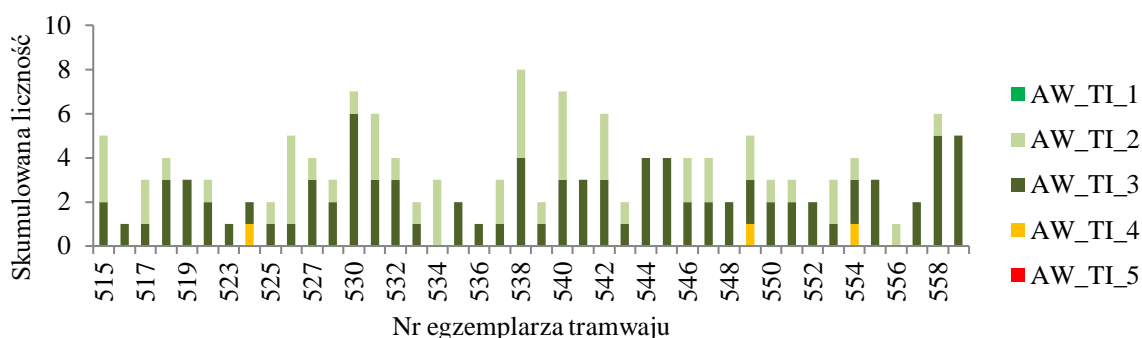


Rys. 11.8. Skumulowana licznosc klas wskaźnika AW\_SA dla przejazdów danego tramwaju

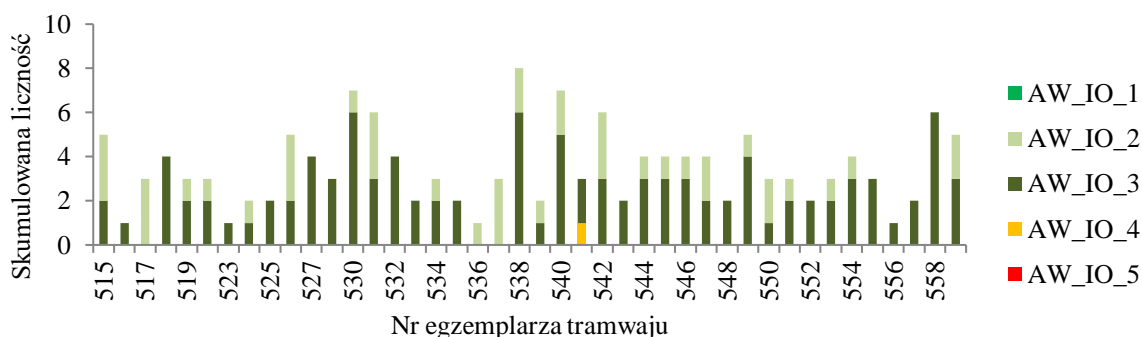




Rys. 11.9. Skumulowana licznosc klas wskaźnika AW\_KS dla przejazdów danego tramwaju



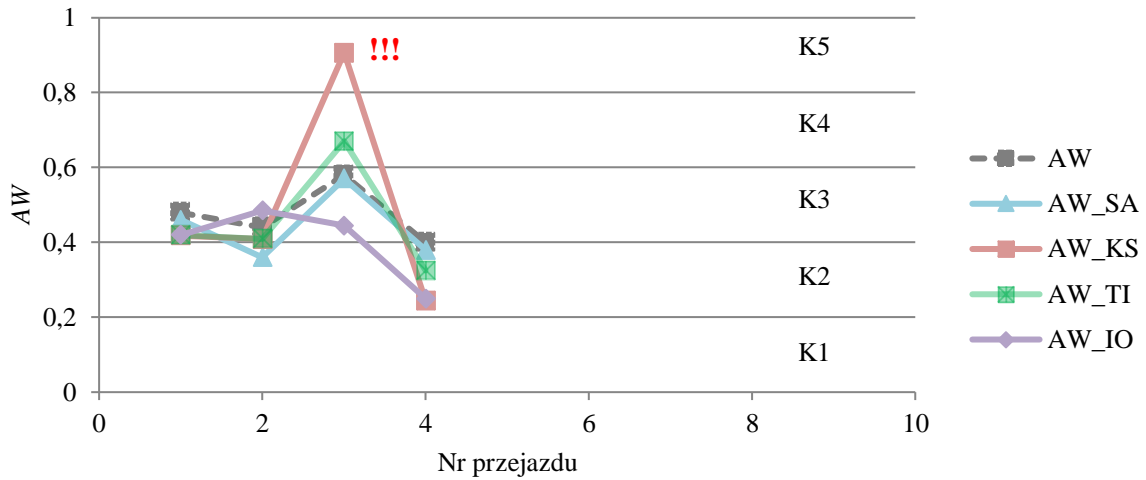
Rys. 11.10. Skumulowana licznosc klas wskaźnika AW\_TI dla przejazdów danego tramwaju



Rys. 11.11. Skumulowana licznosc klas wskaźnika AW\_IO dla przejazdów danego tramwaju

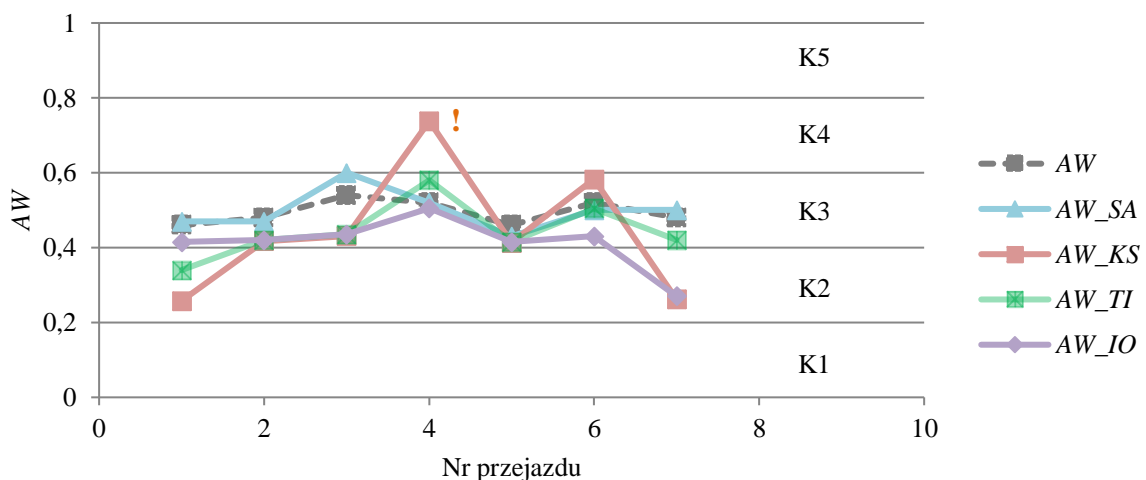
Przedstawione powyżej analizy pozwalają obserwować zmiany licznosci klas dla poszczególnego tramwaju w zależności od założonych priorytetów oceny. Przejazdy tramwaju 554 każdorazowo zakwalifikowano do klasy trzeciej w ocenie priorytetowej miar związanych z sygnaturą akustyczną – wskaźnik AW\_SA. W przypadku wskaźnika AW\_IO jeden przejazd został zakwalifikowany do drugiej klasy – najwyższej zaobserwowanej w analizie. Jednak w przypadku wskaźnika AW\_KS jeden przejazd zakwalifikowany został do najniższej, piątej klasy. Z kolei jeden przejazd w ocenie AW\_TI został zakwalifikowany do klasy czwartej. Z uwagi na uzyskane klasy dla poszczególnych wskaźników przedstawiono przypadek

klasyfikacji tramwaju 554 na rysunku 11.12, tramwaju 530 na rysunku 11.13 i tramwaju 559 na rysunku 11.14.



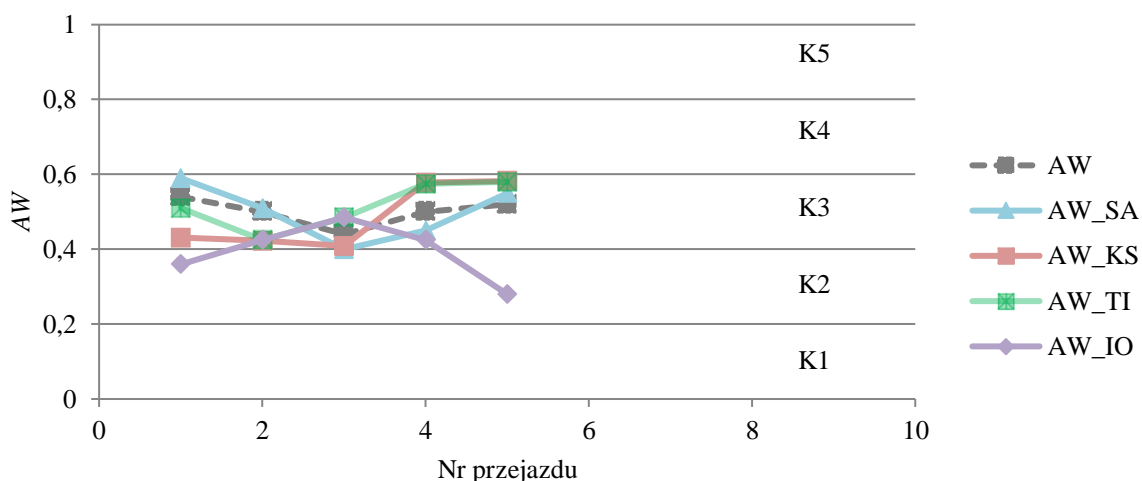
Rys. 11.12. Wartości wskaźników aktywności wibroakustycznej dla przejazdów tramwaju 554

Zarejestrowany trzeci przejazd tramwaju 554 był najbardziej korzystny w klasyfikacji aktywności wibroakustycznej przy uwzględnieniu wskaźnika *AW\_IO*. Przeciwny wynik dotyczył wskaźnika *AW\_KS*. Wskaźnik ten w obserwacji osiągnął raz najwyższą klasę w trzecim przejeździe. Może to świadczyć o pogorszonej jakości powierzchni tocznej koła bez wystąpienia płaskiego miejsca. Obserwowane przypadki przejazdów są wolne od tych uszkodzeń z uwagi na wykonaną wcześniej ich detekcję w algorytmie opisanym w rozdziale 9, co potwierdziły również przeprowadzone oględziny. Co więcej, obserwacja wskaźnika *AW* dla przejazdu trzeciego (bez założonego priorytetu oceny) wskazuje zwiększoną aktywność wibroakustyczną w porównaniu do pozostałych przejazdów tego tramwaju. Jest to spowodowane udziałem składowej *KS* w ogólnej wartości wskaźnika *AW*.



Rys. 11.13. Wartości wskaźników aktywności wibroakustycznej dla przejazdów tramwaju 530

Pierwszy zarejestrowany przejazd tramwaju 530 był najkorzystniejszy dla wskaźnika  $AW_{KS}$  podczas, gdy najbardziej niekorzystny dotyczył wskaźnika  $AW_{SA}$ . W czwartym i szóstym przejeździe przy uwzględnieniu wskaźnika  $AW_{KS}$  klasyfikacja była najbardziej niekorzystna. W przypadku wskaźnika  $AW_{SA}$  najbardziej niekorzystnym przejazdem był przejazd pierwszy, trzeci i siódmy. Wskaźnik  $AW_{IO}$  w większości rejestracji wskazywał jedną z najbardziej korzystnych klasyfikacji dla tego tramwaju.



Rys. 11.14. Wartości wskaźników aktywności wibroakustycznej dla przejazdów tramwaju 559

Tramwaj 559 w porównaniu do wybranych przypadków tramwajów 554 i 530 w żadnej ocenie priorytetowej aktywności wibroakustycznej nie przekroczył klasy 3.

## 11.2. Drzewa decyzyjne w ocenie aktywności wibroakustycznej tramwaju

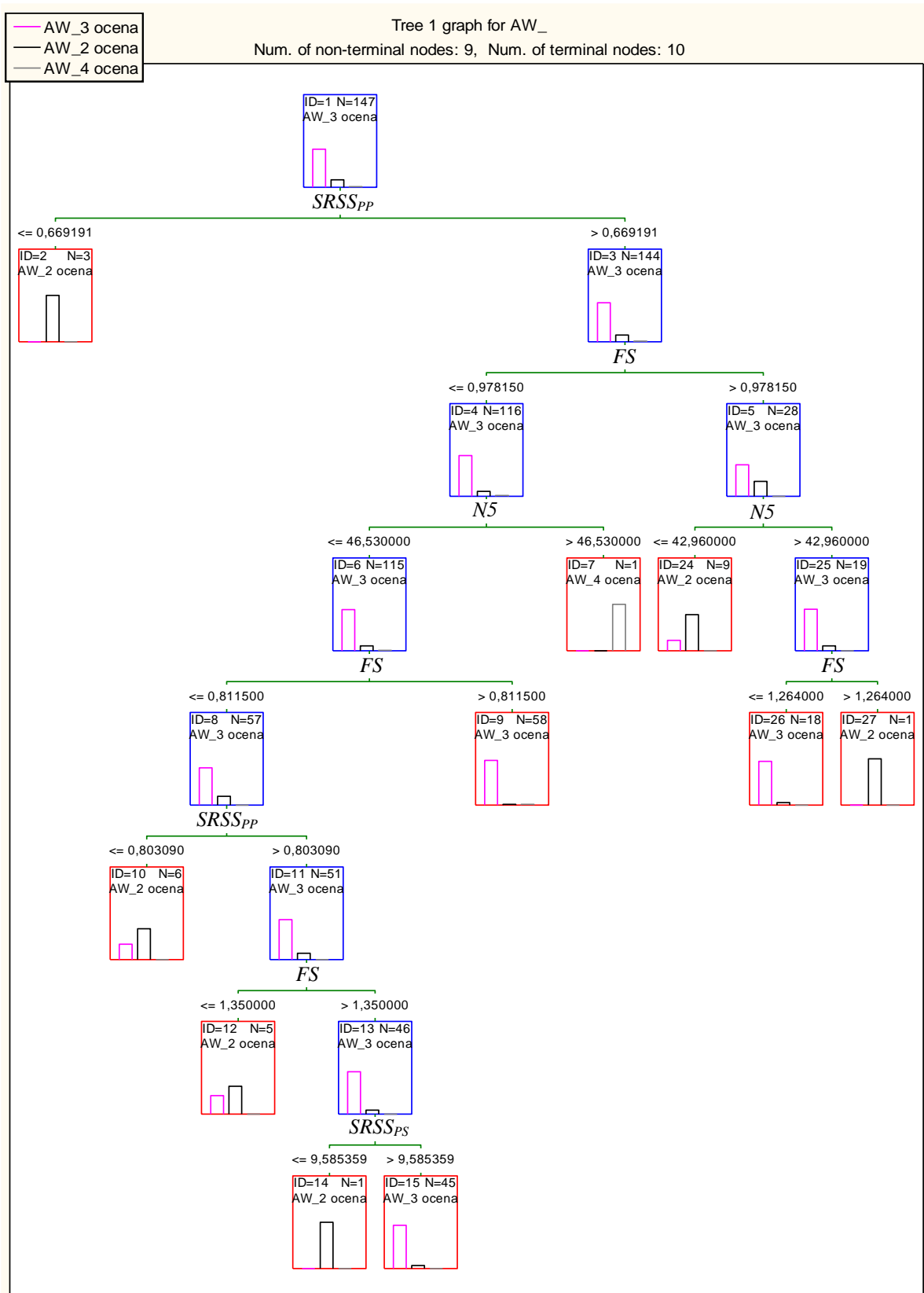
Kolejną częścią pracy było wykorzystanie do klasyfikacji uzyskanych wyników jednej z podstawowych metod zgłębiania danych (ang. *data mining*) w postaci drzew decyzyjnych zwanych również klasyfikacyjnymi. Wykorzystuje się je do wyznaczenia przynależności wyników do klas jakościowej zmiennej zależnej na podstawie pomiarów zmiennych objaśniających – predyktorów [251]. Drzewo decyzyjne jest graficzną reprezentacją rekurencyjnego podziału zbioru obserwacji. Podział ten polegał na przeszukiwaniu w przestrzeni cech wszystkich możliwych podziałów zbioru danych na dwie części, tak aby w każdym kolejnym kroku wybierany był taki podział, który daje w wyniku najsilniej odseparowane podzbiory.

W niniejszej analizie wykorzystano drzewa binarne typu CART (ang. *Classification And Regression Trees*) w środowisku oprogramowania Statistica 12 [248], które są drzewami binarnymi – z każdego węzła wychodzą tylko dwie krawędzie [180, 181]. Kryteria automatycznego zatrzymywania rozwoju drzewa opierały się na minimalnej liczbie obiektów

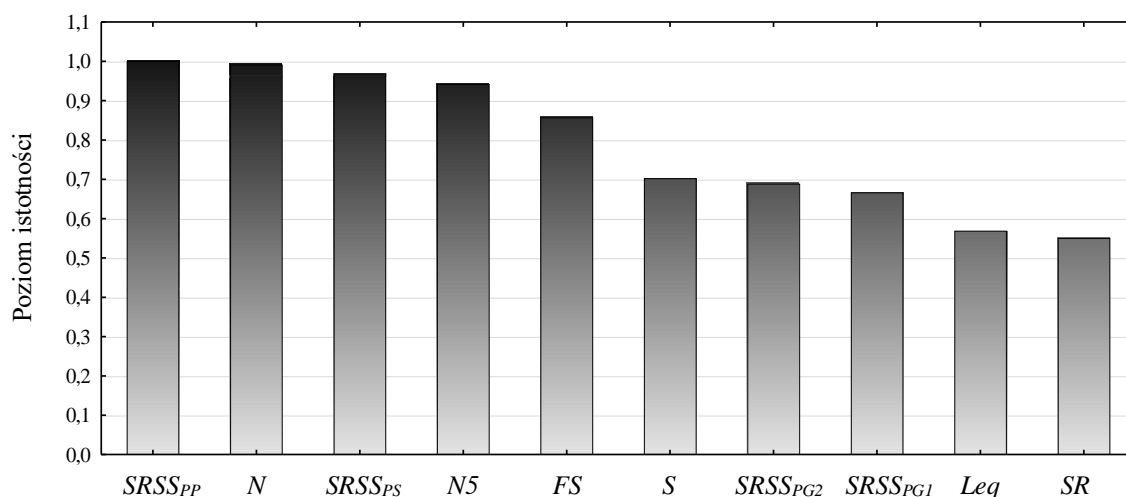
w liściu równej 1. W przedstawionych analizach do klas jakościowej zmiennej zależnej (zmienna kategorialna) przypisano wyniki klas wskaźnika *AW*, a jako zmienne objaśniające (zmienne ciągłe) poszczególne miary składowe tego wskaźnika. Zastosowany w budowie drzewa algorytm dzielił klasy w sposób minimalizujący błąd predykcji (metoda najmniejszych kwadratów).

Celem wykonanej analizy z wykorzystaniem drzewa decyzyjnego było wyjaśnienie zdefiniowanych ocen aktywności wibroakustycznej będących jakościowymi zmiennymi zależnymi. Wyniki niniejszej analizy służą jako alternatywne porównanie metody klasyfikacji wyników. Przy czym utworzenie modelu bazującego na drzewie decyzyjnym może być również zastosowane jako rozwinięcie opisywanej wcześniej metody klasyfikacji wskaźników *AW* upraszczające proces oceny. Otrzymane drzewo decyzyjne przedstawiono na rysunku 11.15. Wygenerowany model w postaci drzewa decyzyjnego składał się z dziewięciu węzłów decyzyjnych i dziesięciu węzłów końcowych. Wygenerowane drzewo charakteryzowało się uwzględnieniem do podziału pięciu spośród dziesięciu miar składowych aktywności wibroakustycznej – *SRSS<sub>PP</sub>*, *FS*, *N5*, *SR*, *SRSS<sub>PS</sub>*, które umożliwiły utworzenie najbardziej jednorodnych podzbiorów.

Na rysunku 11.16 przedstawiono ranking zmiennych według ich właściwości predykcyjnych. Najistotniejsze zmienne dla podziału względem oceny *AW* stanowiły kolejno miary *SRSS<sub>PP</sub>*, *N*, *PS*, *N5* i *FS*, których poziom istotności wynosił powyżej wartości 0,8. Przedstawione wyniki wskazują, że na ocenę końcową aktywności wibroakustycznej większe znaczenie mają wartości wskaźników psychoakustycznych (poza chropowatością *SR*) niż poziom równoważny dźwięku *Leq*. Wniosek ten ma swoje odzwierciedlenie w badaniach przedstawionych w pracy [41]. Statystykę skuteczności predykcji przedstawiono w tabeli 11.2.



Rys. 11.15. Drzewo decyzyjne dla oceny aktywności wibroakustycznej



Rys. 11.16. Ranking istotności miar składowych wskaźnika AW w drzewie decyzyjnym

Tabela 11.2. Statystyka skuteczności predykcji wskaźnika AW z drzewa decyzyjnego

		Predykcja		
		Klasa AW_2	Klasa AW_3	Klasa AW_4
Rzeczywista ocena	Klasa AW_2	19	5	0
	Klasa AW_3	6	115	0
	Klasa AW_4	0	1	1

Jak wynika z tabeli 11.2, pięć przejazdów ocenionych w klasie AW<sub>2</sub> błędnie przypisano do klasy AW<sub>3</sub>. W przypadku klasy AW<sub>3</sub>, sześć przejazdów zakwalifikowano błędnie do klasy AW<sub>2</sub>. Natomiast klasę AW<sub>4</sub> zakwalifikowano raz jako AW<sub>3</sub>. Łączna, procentowa skuteczność drzewa decyzyjnego oznaczającego prawidłowe przypisanie klasy dla wskaźnika AW przejazdów wynosi 92%.

Wykorzystanie drzew decyzyjnych do klasyfikacji przejazdów bazując na wskaźniku AW pozwoliło na czytelną wizualizację zagadnienia klasyfikacji danych. Przedstawione podejście z wykorzystaniem uczenia maszynowego nie stanowi nowej metody oceny klasyfikacji, a jedynie jej rozwinięcie. Jest to spowodowane faktem, że klasy jakościowej zmiennej zależnej wykorzystano z wcześniej przedstawionych analiz. Tworzone z wykorzystaniem tego drzewa reguły logiczne są czytelne dla człowieka z uwagi na graficzne przedstawienie decyzji i ich konsekwencje.

### 11.3. Podsumowanie rozdziału 11

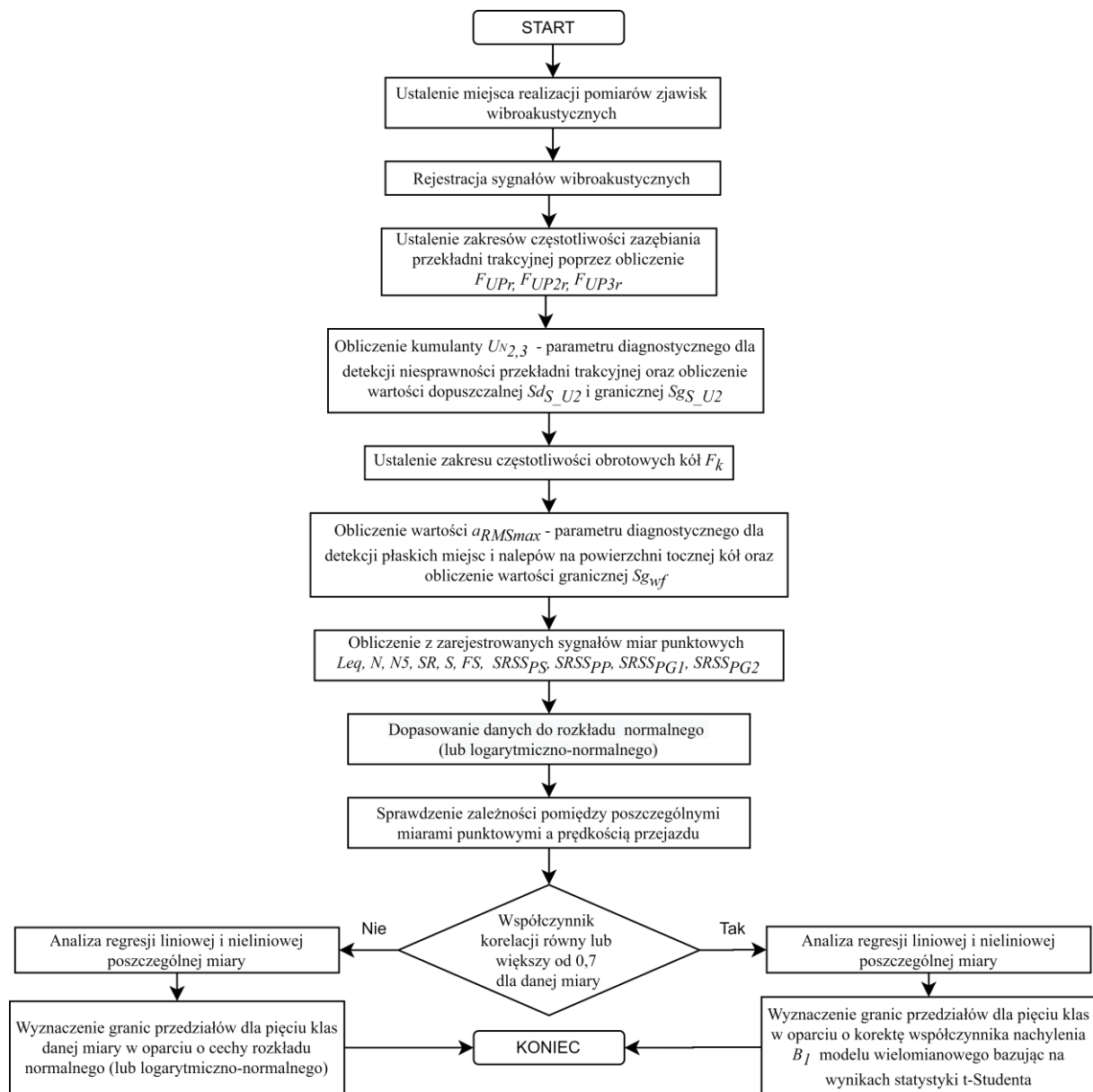
Zastosowanie analiz drzew decyzyjnych pozwoliło wyjaśnić udział poszczególnych miar w przypisaniu oceny aktywności wibroakustycznej. Z przeprowadzonych analiz wynika, że udział 50% miar umożliwi predykcję oceny AW na poziomie 92%. Przy czym najistotniejsze miary to SRSS<sub>PP</sub>, N, PS i N5 i FS, dla których istotność określono powyżej wartości 0,8.

Co więcej, wykazano większe znaczenie w ocenie aktywności wibroakustycznej tramwaju wskaźników psychoakustycznych (poza chropowatością *SR*) w porównaniu do poziomu równoważnego dźwięku *Leq*.

Utworzone drzewo decyzyjne stanowi algorytm umożliwiający alternatywny sposób oceny poszczególnego przejazdu pod względem wskaźnika *AW*.

## 12. METODA OCENY AKTYWNOŚCI WIBROAKUSTYCZNEJ W EKSPLOATACJI TRAMWAJÓW

Przedstawione dotychczas wyniki obliczeń pozwalają na ich ogólne podsumowanie w formie schematów funkcjonalnych dla opracowanej metody oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju. Przed przystąpieniem do oceny, przyszły użytkownik metody powinien przystąpić do badań pilotażowych w celu określenia wartości dopuszczalnych i granicznych ustalonych parametrów diagnostycznych oraz przedziałów klas dla miar oceny aktywności wibroakustycznej. Schemat badań pilotażowych przedstawiono na rysunku 12.1.

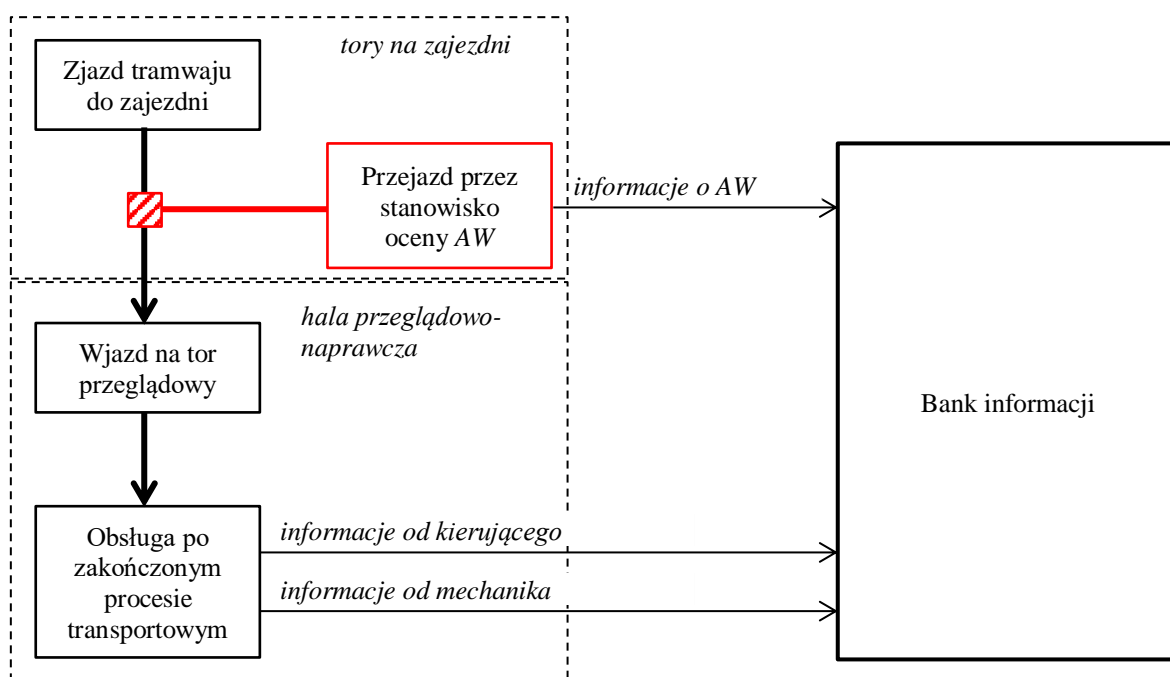


Rys. 12.1. Schemat funkcjonalny badań pilotażowych dla ustalenia wartości granicznych parametrów diagnostycznych oraz granic przedziałów dla klas danej miary punktowej



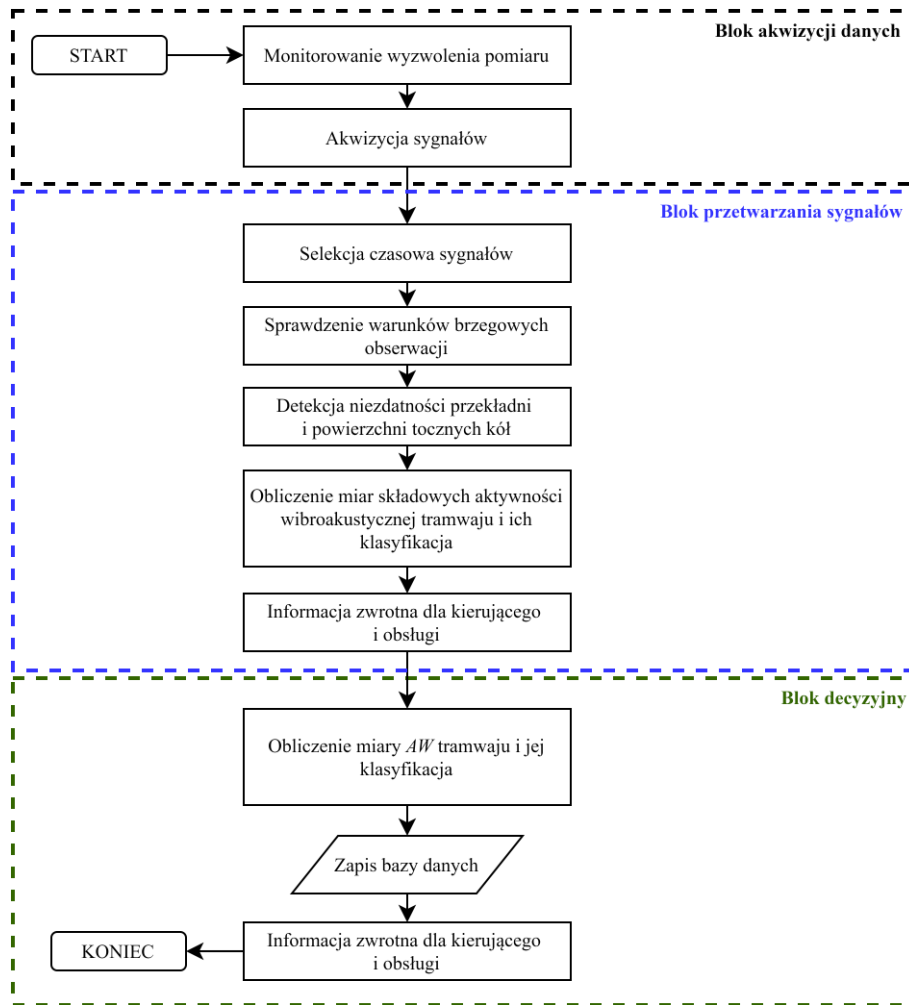
Badania pilotażowe należy rozpocząć od wyselekcjonowania odcinka toru zgodnie z wymaganiami przedstawionymi w rozdziale 7.2. Zaleca się zarejestrowanie minimalnej liczby przejazdów z kryterium wielkości próby dla populacji skończonej uwzględniając liczebność taboru danego typu. Następnie konieczne jest obliczenie wartości dopuszczalnych i granicznych dla detekcji uszkodzeń przekładni i powierzchni tocznych kół. Kolejny krok dotyczy obliczenie miar punktowych zjawisk wibroakustycznych z uwzględnieniem wskaźników psychoakustycznych. Analizy ich dopasowania do rozkładu normalnego lub logarytmiczno-normalnego, określenie stopnia zależności z prędkością jazdy oraz opracowanie modelu estymacji tych wartości umożliwi klasyfikację wartości poszczególnych miar do pięciu klas.

Uwzględniając dotychczasowe wyniki badań wyznaczono algorytm działania systemu pomiarowego bazującego na opracowanej metodzie oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju. W cyklu obsługowym tramwaju zastosowanie metody oceny aktywności wibroakustycznej powinno zostać włączone w proces obsługi każdorazowo po wykonanym procesie transportowym. Zebranie materiału badawczego do oceny aktywności wibroakustycznej odbywa się w sposób nieinwazyjny i automatyczny oraz nie wymaga dodatkowych nakładów pracy podczas zjazdu tramwajów. Uzyskane informacje o klasie aktywności wibroakustycznej danego tramwaju wraz z informacjami pozyskiwanymi w czasie obsługi po zjeździe jak i na drodze wywiadu z kierowcą tworzą bank informacji (rysunek 12.2).



Rys. 12.2. Ocena AW w procesie obsługi tramwaju po realizacji procesu transportowego

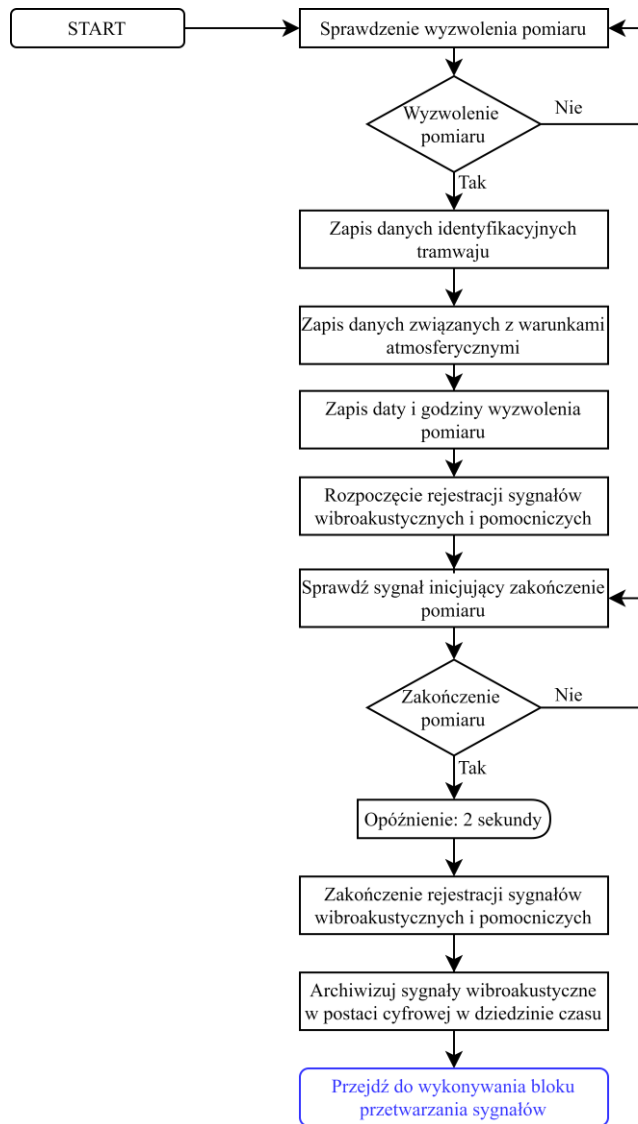
Schemat funkcjonalny metody oceny aktywności wibroakustycznej przedstawiono na rysunku 12.3.



Rys. 12.3. Schemat funkcjonalny systemu oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju

Oznaczone na schemacie bloki funkcjonalne na rysunku 12.3 realizowane są według zdefiniowanych algorytmów. Każdy z nich składa się z ściśle określonych kroków właściwych dla zapewnienia funkcjonalności algorytmu [150].

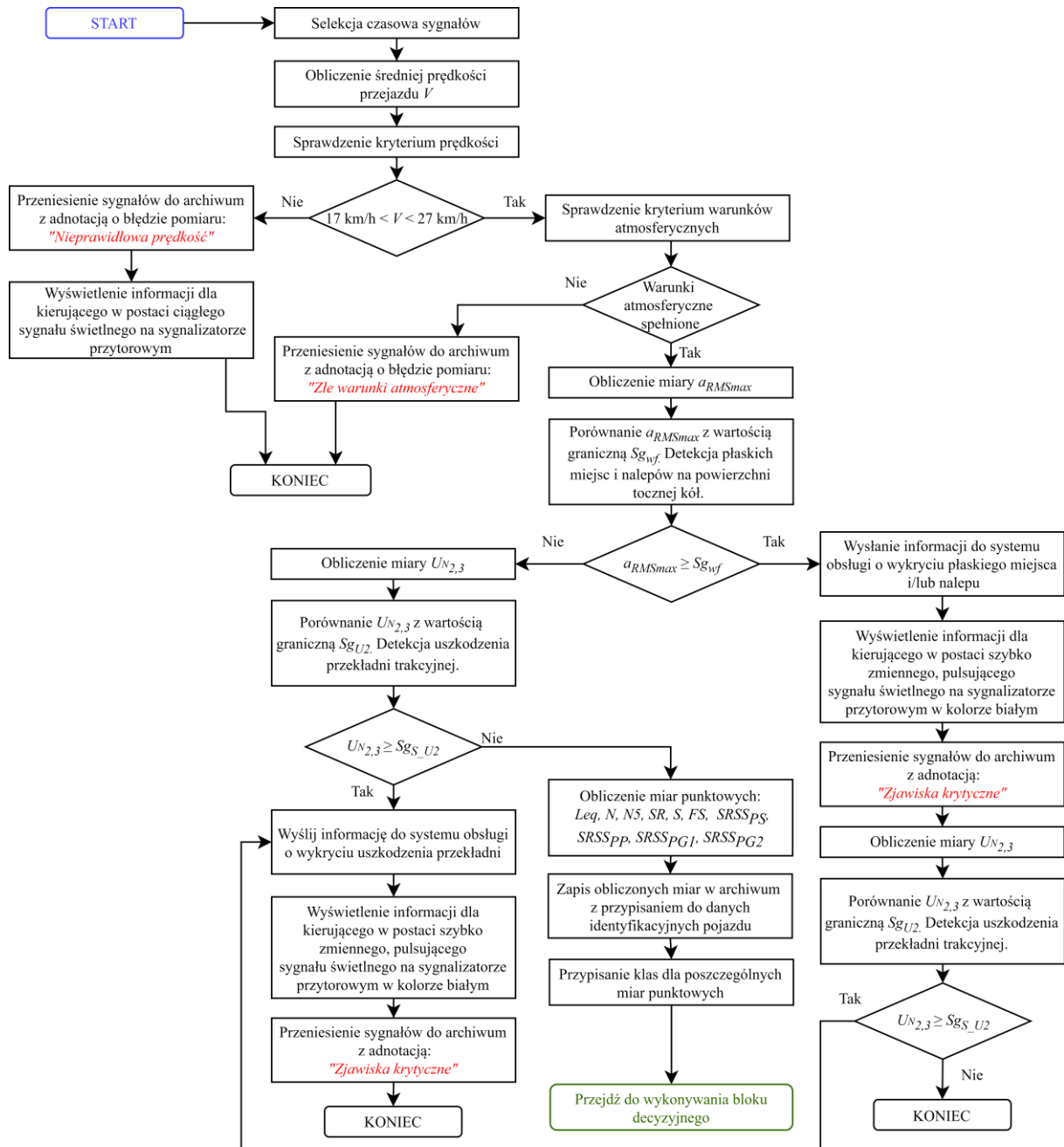
Zadaniem bloku akwizycji danych jest bieżąca kontrola pomiaru oraz sprawdzenie poprawności funkcjonowania toru pomiarowego z jednoczesnym przetworzeniem sygnałów wibroakustycznych do postaci cyfrowej. Realizację zadań tego bloku zawarto w algorytmie przedstawionym w formie schematu blokowego na rysunku 12.4.



Rys. 12.4. Algorytm funkcjonowania bloku akwizycji danych

Zaproponowany na rysunku 12.4 schemat uwzględnia monitorowanie wyzwolenia pomiaru, które może zostać zrealizowane poprzez obserwację wartości napięcia z czujnika indukcyjnego wykrywającego obecność koła w torze. Wyzwolenie odpowiedniego poziomu napięcia z czujnika uruchamia przejście systemu pomiarowego z trybu uśpienia (ang. *standby*) do stanu pracy. Odległość czujnika od przekroju pomiarowego powinna być dobrana przy uwzględnieniu maksymalnej prędkości przejazdu oraz czasu przejścia systemu ze stanu uśpienia w stan pracy. Kolejnym krokiem jest odczyt i zapis danych identyfikacyjnych tramwaju w postaci numeru taborowego. Może się to odbywać poprzez odczyt danych w oparciu o technologię RFID (ang. *Radio-Frequency Identification*) lub na podstawie zdjęcia czoła tramwaju z wykorzystaniem technik rozpoznawania tekstu w graficie OCR (ang. *Optical Character Recognition*). Możliwe jest również pobranie danych z systemu obsługi zajezdni. Następnie wyzwolana jest rejestracja sygnałów we wszystkich kanałach pomiarowych.

W momencie wykrycia skokowego spadku napięcia sygnału pomocniczego z fotokomórki następuje proces zakończenia pomiaru po dwóch sekundach. Opóźnienie czasowe związane jest z zabezpieczeniem przed utratą danych na skutek przepełniania bufora pamięci. Spadek napięcia fotokomórki związany jest z wykryciem końca pojazdu. Po zakończeniu rejestracji następuje archiwizacja danych w pamięci wewnętrznej lub zewnętrznej (przesłanie danych na serwer). Kolejny krok związany jest z wykonaniem algorytmu bloku przetwarzania sygnałów, który przedstawiono w formie schematu blokowego na rysunku 12.5.



Rys. 12.5. Algorytm funkcjonowania bloku przetwarzania sygnałów

Pierwszy krok algorytmu dotyczy selekcji czasowej sygnałów w oparciu o wskazania napięcia fotokomórki. Na podstawie jej wskazań obliczana jest średnia prędkość przejazdu. Gdy prędkość ta nie będzie zawierała się w ustalonym przedziale, sygnały nie zostaną poddane analizie, a ich postać czasowa zostanie zapisana w archiwum z adnotacją o nieprawidłowej prędkości. Dodatkowo zostanie wyświetlony ciągły sygnał świetlny w kolorze białym na sygnalizatorze umieszczonym w torze. Sygnał ten będzie pełnił rolę informacji zwrotnej o nieprawidłowości dla kierującego pojazdem. Gdy średnia prędkość przejazdu będzie zawierała się w określonym przedziale nastąpi pobranie bieżących informacji o warunkach atmosferycznych. Kluczowy w tym względzie jest brak opadów atmosferycznych i prędkość wiatru. Warunki te powinny jednak zostać zdefiniowane przez docelowego użytkownika systemu indywidualnie. Niespełnienie wymagań warunków atmosferycznych skutkować będzie zapisem sygnałów do archiwum z adnotacją o złych warunkach atmosferycznych. Sygnały te nie będą poddane dalszej analizie.

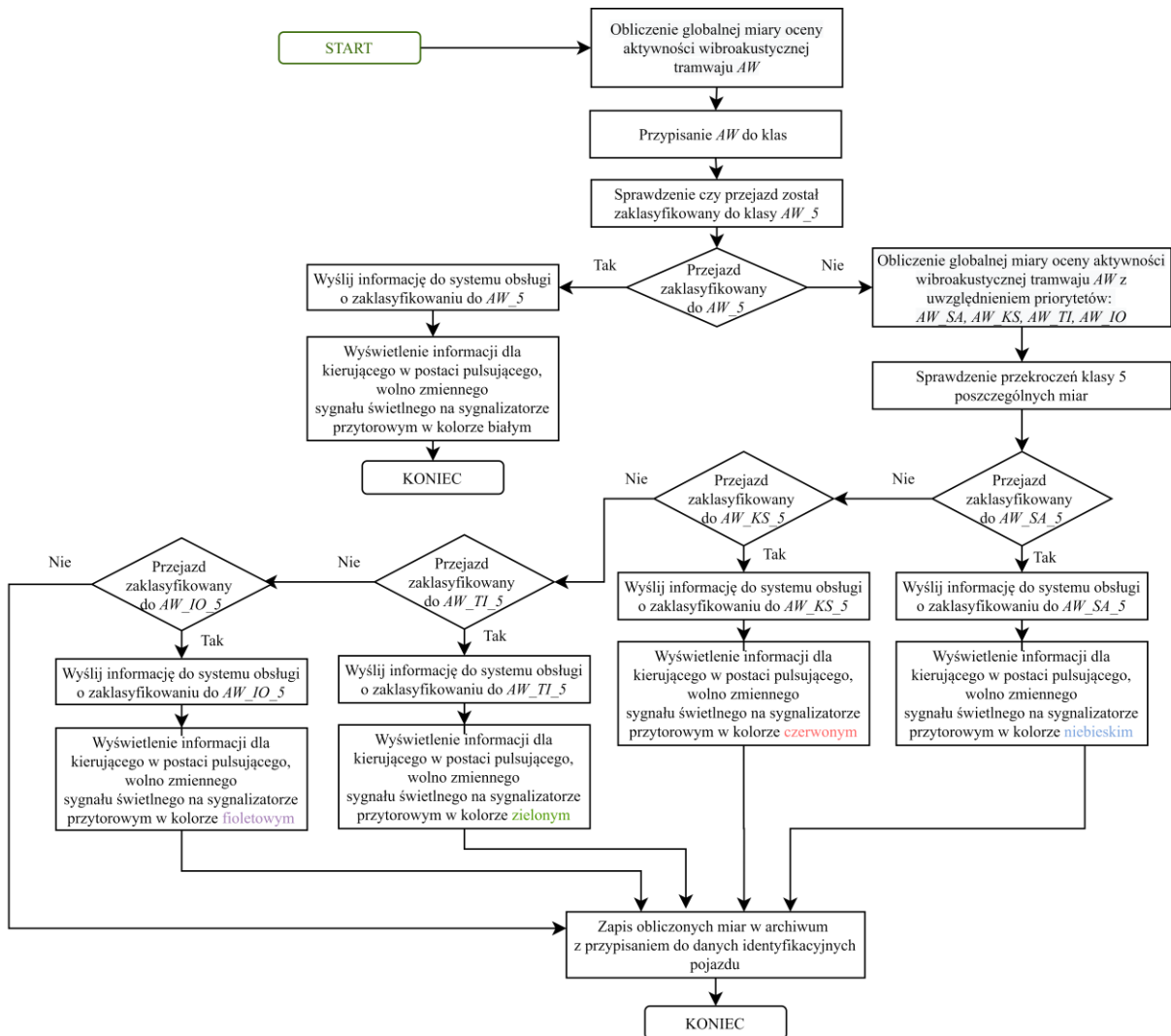
Przy spełnieniu wymagań warunków atmosferycznych zostanie obliczona miara  $a_{RMSmax}$  będąca parametrem diagnostycznym w detekcji płaskich miejsc na powierzchni tocznej kół. Przekroczenie wartości granicznej  $Sg_{wf}$  parametru diagnostycznego skutkować będzie wysłaniem informacji do systemu obsługi o wykryciu niezdatności. Informacja ta w systemie obsługi powinna wywołać proces skierowania tramwaju na tor obsługowy w celu wykonania oględzin powierzchni tocznych kół oraz na tor z tokarką podtorową w celu nadania wymiarów naprawczych konturu bieżni kół (tak zwana reprofilacja). Proces przywrócenia zdatności kół powinien zostać potwierdzony ponownym przejazdem przez tor pomiarowy świadczącym o nieosiągnięciu i nieprzekroczeniu wartości granicznej.

Niezależnie od przekroczenia wartości granicznej, następnie obliczana jest miara  $U_{N_{2,3}}$  będąca parametrem diagnostycznym w detekcji uszkodzeń przekładni trakcyjnej. Przekroczenie wartości granicznej  $Sg_{U2}$  skutkować będzie wysłaniem informacji do systemu obsługi o wykryciu niezdatności przekładni. Informacja ta powinna wywołać proces skierowania tramwaju na tor obsługowy w celu przywrócenia zdatności przekładni trakcyjnej.

Przekroczenie wartości granicznych obu wymienionych parametrów diagnostycznych skutkuje przeniesieniem sygnałów do archiwum z adnotacją o wystąpieniu zjawisk krytycznych. Dodatkowo zostanie wyświetlony szybko zmienny, pulsujący sygnał świetlny w kolorze białym na sygnalizatorze umieszczonym w torze. Sygnał ten będzie pełnił rolę informacji zwrotnej dla kierującego pojazdem o wystąpieniu zjawisk krytycznych.

W przypadku niewystąpienia zjawisk krytycznych zostaną obliczone miary punktowe  $Leq$ ,  $N$ ,  $N5$ ,  $SR$ ,  $S$ ,  $FS$ ,  $SRSS_{PS}$ ,  $SRSS_{PP}$ ,  $SRSS_{PG1}$ ,  $SRSS_{PG2}$  stanowiące podstawę do obliczeń

wskaźnika aktywności wibroakustycznej  $AW$ . Jej obliczenie wykonywane jest w bloku decyzyjnym przedstawionym w formie schematu blokowego na rysunku 12.6.



Rys. 12.6. Algorytm funkcjonowania bloku decyzyjnego

Pierwszy krok algorytmu bloku decyzyjnego związany jest z obliczeniem wskaźnika aktywności wibroakustycznej  $AW$  wraz z przyporządkowaniem go do pięciu klas. Po tym następuje sprawdzenie czy przejazd pod względem wartości  $AW$  został przyporządkowany do klasy  $AW_5$ . W przypadku takiego zaklasyfikowania nastąpi przesłanie informacji do systemu obsługi o wykryciu klasy  $AW_5$ .

W następnym kroku następuje obliczenie wskaźnika aktywności wibroakustycznej przy uwzględnieniu priorytetów oceny  $AW_{SA}$ ,  $AW_{KS}$ ,  $AW_{TI}$  i  $AW_{IO}$ . Po obliczeniu następuje sprawdzenie czy przejazd pod względem wartości tych miar został przyporządkowany do klasy piątej. Każdorazowo po zaklasyfikowaniu przejazdu do piątej klasy pod względem miar  $AW$ ,  $AW_{SA}$ ,  $AW_{KS}$ ,  $AW_{TI}$  i  $AW_{IO}$  zostanie wyświetlony wolno zmienny, pulsujący sygnał świetlny na sygnalizatorze umieszczonym w torze. Kolor biały sygnału oznaczać będzie

wykrycie piątej klasy dla wskaźnika AW. Kolor czerwony dotyczyć będzie wskaźnika AW\_KS. Kolor zielony i kolor fioletowy dotyczyć będzie odpowiednio wskaźnik AW\_TI i AW\_IO. Sygnał ten będzie pełnił rolę informacji zwrotnej o dla kierującego pojazdem o zaklasyfikowaniu przejazdu do najgorszej klasy pod względem globalnej miary aktywności wibroakustycznej tramwaju zarówno bez jak i z założonymi priorytetami oceny. Po wykonaniu sprawdzenia zaklasyfikowania pojazdu do klasy piątej następuje zapis obliczonych miar w archiwum z przypisaniem danych identyfikacyjnych pojazd, co stanowi ostatni krok działania algorytmu.

Na rysunku 12.7 przedstawiono proponowany wygląd interfejsu użytkownika na przykładzie podglądu wyników wskaźnika AW dla tramwaju 538.



Rys. 12.7. Przykładowy interfejs oprogramowania do wyświetlania wyników

Jak pokazano na rysunku 12.7 interfejs umożliwia podgląd oceny wskaźników *AW* dla wszystkich eksploatowanych tramwajów. W przedstawionym interfejsie możliwe jest wyświetlenie dwóch wykresów, skumulowanej liczności ocen dla wszystkich tramwajów oraz zmian oceny wskaźnika *AW* w funkcji kolejnych przejazdów danego tramwaju. Dla ułatwienia obserwacji zmian wskaźnika *AW* wybranego egzemplarza tramwaju możliwe jest podświetlenie jego wyników na tle pozostałych wartości. Oprogramowanie umożliwia ponadto:

- kontrolę dostępu poprzez logowanie użytkowników,
- podgląd przebiegów czasowych wybranych sygnałów,
- wyświetlanie wyników w zależności od zmiany priorytetu oceny *AW*,
- wyświetlenie wyników dla konkretnego egzemplarza tramwaju,
- selekcję dat w podglądzie wyników,
- generowanie automatycznych raportów,
- wydruk danych z bieżącego widoku interfejsu.

Utworzenie przedstawionego interfejsu możliwe jest przy zastosowaniu na przykład programowania w języku Microsoft Visual C# [235].



### 13. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Pracę ukierunkowano na zagadnienie opracowania metodyki oceny aktywności wibroakustycznej tramwajów z pozycji toru podczas ich przejazdu. Pierwsza część pracy obejmuje studium literaturowe zagadnień funkcjonowania tramwajów, źródeł i wpływu generowanych przez nie zjawisk wibroakustycznych do otoczenia. Druga część pracy dotyczy zdefiniowania aktywności wibroakustycznej, analiz istniejących rozwiązań w tym zakresie oraz sformułowania problemu badawczego wraz z celem i opisem zakresu pracy. Trzecia część dotyczy założeń opracowywanej metody, selekcji obiektów do badań, przedstawienia metodyki oraz analizy wyników przeprowadzonych analiz. Czwarta część pracy dotyczy opracowania oceny aktywności wibroakustycznej wraz z jej klasyfikacją i opracowaniem schematów funkcjonalnych zaproponowanych rozwiązań.

W pracy przedstawiono problematykę funkcjonowania tramwajów w mieście wykazując, że kluczowym obszarem poprawy ich jakości jest minimalizacja negatywnego oddziaływania wibroakustycznego na środowisko. Zidentyfikowano przy tym źródła zjawisk wibroakustycznych w eksploatacji tramwajów wskazując ich główny związek z pracą urządzeń trakcyjnych i ze zjawiskiem toczenia się kół po szynie. Z analiz wpływu drgań i hałasu pochodzenia komunikacyjnego na środowisko wynika, że w przypadku człowieka zjawiska te oddziałują głównie na układ nerwowy i psychikę wywołując irytację, problemy ze snem i skupieniem. W przypadku budynków wykazano ich negatywny wpływ szczególnie dla zabytkowych konstrukcji. Przedstawione oddziaływania tramwajów na środowisko określono jako problem rozwojowy, którego istota polega na poszukiwaniu lepszego sposobu działania. Konieczność monitorowania i kompleksowej oceny zjawisk wibroakustycznych w eksploatacji tramwajów i pierwszy etap działań związanych z rozwiązywaniem problemu rozwojowego. Umożliwią poznanie stanu obecnego, jak również sprawdzenie skuteczności wdrażanych środków minimalizujących zjawiska wibroakustyczne w taborze.

Wykazano istotne braki w obowiązujących regulacjach prawnych związanych z monitorowaniem zjawisk wibroakustycznych tramwajów. Przeanalizowano również możliwe przyczyny organizacyjne negatywnego oddziaływania wibroakustycznego tramwajów. Analiza istniejących rozwiązań monitorowania zjawisk wibroakustycznych wskazała brak kompleksowej metody do oceny aktywności wibroakustycznej w eksploatacji tramwajów.

Następnie sformułowano cel i zakres pracy oraz przedstawiono główny zakres zadań badawczych z podziałem i opisem zadań szczegółowych. Metodę oceny aktywności wibroakustycznej opracowano z wykorzystaniem dwunastu podstawowych założeń. Wśród

nich najistotniejsze dotyczyły detekcji kluczowych niezdatności związanych ze stykiem koła z szyną i układem napędowym, opracowania jednego wskaźnika aktywności wibroakustycznej (AW), klasyfikacji tramwajów, czy też adaptacji metody do różnego typu taboru. Zaproponowano przy tym klasyfikację tramwajów na podstawie wskaźnika AW do pięciu klas. Porównano również funkcjonalność opracowanej metody do obecnego podejścia kontrolowania tych zjawisk, które wynika z obowiązujących aktów prawnych.

Przedstawiono metodykę badań z opisem obiektów oraz opisem lokalizacji badań i punktów pomiarowych. Wskazano metodę selekcji punktów pomiarowych, które uwzględniały drgania zlokalizowane na podłożu gruntowym, podkładzie i szynie oraz ciśnienie akustyczne na drodze propagacji i w obszarze źródła wykorzystując matrycę mikrofonową. Opisano również wektor parametrów sterowania i zakłóceń w prowadzonych badaniach. Wyznaczono zakresy częstotliwości analiz zarejestrowanych sygnałów. Przeprowadzono również badania podatności dynamicznej torowiska, które nie wykazały zmiany warunków brzegowych obserwacji w okresie badań.

Następnie wykonano analizy związane z wykrywaniem niezdatności przekładni trakcyjnej i niezdatności powierzchni tocznych kół w postaci płaskich miejsc. Analizy wskazują na możliwość rozróżniania stanu przekładni bazując na utworzonym parametrze diagnostycznym w postaci kumulanty  $U_{N_{2,3}}$ . Natomiast diagnozowanie powierzchni tocznych możliwe jest przy zastosowaniu opracowanego parametru diagnostycznego  $a_{RMSmax}$ .

W pracy obliczono miary punktowe reprezentujące zdefiniowane składowe aktywności wibroakustycznej. Uwzględniono łącznie sześć miar dla zjawisk akustycznych, z czego pięć stanowiły wskaźniki psychoakustyczne oraz cztery miary punktowe dla zjawisk drganiowych. Analizy miar składowych aktywności wibroakustycznej wskazały, że silną zależnością względem prędkości przejazdu charakteryzowało się pięć spośród dziesięciu miar, dla których utworzono modele wielomianowe umożliwiające ich estymację w funkcji prędkości przejazdu. Klasyfikację poszczególnych miar do pięciu klas wykonano w oparciu o cechy rozkładów ich wartości, założenia metody wyznaczania wartości dopuszczalnych i granicznych Smiley'a oraz w przypadku miary  $FS$  – analizę skupień z wykorzystaniem kombinacji modeli normlanych GMM.

Wskaźnik aktywności wibroakustycznej AW zdefiniowano z wykorzystaniem analizy wielokryterialnej w oparciu o sumę ważoną. Przy czym dane wejściowe do obliczenia wskaźnika AW dla danego przejazdu stanowiły klasy poszczególnych miar. Wykazano, że możliwa jest klasyfikacja przejazdów tramwajów pod względem wskaźnika AW do pięciu klas. Zróznicowanie pod względem tego wskaźnika zaobserwowano pomiędzy tramwajami, jak

również w poszczególnych przejazdach danego egzemplarza tramwaju. Możliwe jest utworzenie statystyki przejazdów danego tramwaju pod względem wskaźnika *AW*. Wykazano również możliwość śledzenia trendu zmian wskaźnika w założonym okresie. Obserwacja poszczególnych egzemplarzy tramwaju pod względem wskaźnika *AW* pozwoliła na wytypowanie egzemplarzy zachowujących względnie stałe wskaźniki *AW* w analizowanym okresie. Wykazano również przypadki egzemplarzy o względnie dużej zmienności wartości *AW* jak i takich, których wskaźniki *AW* mają tendencję rosnącą.

W pracy zaproponowano również ocenę aktywności wibroakustycznej tramwajów z zadaniem priorytetem oceny poszczególniej składowej. Priorytet ten ustalony został poprzez modyfikację wag dla miar danej składowej. Zaobserwowano wpływ priorytetu oceny na klasyfikację zarejestrowanych przejazdów. Obrazuje to zmienność w ocenie aktywności wibroakustycznej w zależności od zadanego priorytetu oceny danej składowej.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano również klasyfikację miar składowych wskaźnika *AW* z wykorzystaniem uczenia maszynowego na podstawie drzew decyzyjnych. Zastosowanie drzew decyzyjnych pozwoliło wyjaśnić udział poszczególnych miar w przypisaniu klasy wskaźnika *AW* ze skutecznością predykcji na poziomie 92%. Przy czym wykorzystano do tego 50% obliczonych miar. Utworzone drzewo decyzyjne stanowi algorytm umożliwiający alternatywny sposób oceny poszczególnego przejazdu pod względem wskaźnika *AW*. Opracowana metoda oceny aktywności wibroakustycznej na podstawie wskaźnika *AW* stanowi spełnienie założonego celu pracy.

Przedstawione w pracy schematy funkcjonalne umożliwiają wdrożenie opracowanej metody w eksploatacji. Natomiast przedstawiona propozycja interfejsu oprogramowania wskazuje możliwość wizualizacji wyników analiz wraz jego podstawowymi funkcjonalnościami.

**Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski poznawcze:**

1. Możliwe jest wnioskowanie o stanie technicznym przekładni trakcyjnej tramwaju na podstawie procesów towarzyszących w postaci dźwięku mierzonego przy torze podczas przejazdu.
2. Obserwacja poziomu dźwięku w zakresach częstotliwości związanych z drugą i trzecią harmoniczną ząbienia przekładni wykazuje największą wrażliwość na zmianę stanu technicznego przekładni trakcyjnej.

3. Zastosowanie transformaty Hilberta w analizie sygnałów przyspieszeń drgań szyny umożliwia ekstrakcję składowych niskoczęstotliwościowych, które reprezentują wymuszenia impulsowe od uszkodzeń powierzchni tocznych kół w postaci płaskich miejsc.
4. Spośród obliczonych miar składowych aktywności wibroakustycznej silną zależnością z prędkością przejazdu charakteryzuje się pięć spośród dziesięciu miar  $N$ ,  $N5$ ,  $FS2$ ,  $SRSS_{PS}$ , i  $SRSS_{PP}$ .
5. Rozkład obserwacji pięciu miar  $N$ ,  $N5$ ,  $FS2$ ,  $SRSS_{PS}$  i  $SRSS_{PP}$  jest opisywany rozkładem normalnym, a rozkład dwóch miar  $S$  i  $SRSS_{PS}$  jest opisywany rozkładem logarytmiczno-normalnym.
6. Wskaźnik fluktuacji dźwięku  $FS$  charakteryzuje się dwoma rozróżnialnymi skupiskami obserwacji w funkcji prędkości, którego granicą jest wartość 23 km/h i których opisanie możliwe jest przy zastosowaniu kombinacji modeli normalnych GMM.
7. Najistotniejsze miary wpływające na ocenę aktywności wibroakustycznej tramwaju stanowią  $SRSS_{PP}$ ,  $N$ ,  $PS$ ,  $N5$  i  $FS$ .
8. W przypadku zjawisk akustycznych, poza chropowatością dźwięku  $SR$  wskaźniki psychoakustyczne mają większe znaczenie w ocenie aktywności wibroakustycznej niż poziom równoważony dźwięku  $Leq$ .
9. Egzemplarze tramwajów nawet w obrębie jednego typu różnią się pod względem poziomu aktywności wibroakustycznej opisywanej wskaźnikiem  $AW$ .
10. Zastosowanie priorytetów w ocenie aktywności wibroakustycznej ukierunkowanych na jej poszczególne składowe wpływa na końcową klasyfikację przejazdów tramwajów.

### **Przeprowadzone badania umożliwiają sformułowanie następujących wniosków**

#### **utylitarnych:**

1. Możliwe jest zastosowanie kumulanty  $U_{N_{2,3}}$  i miary  $a_{RMSmax}$  jako parametru diagnostycznego w detekcji odpowiednio niezdatności przekładni trakcyjnych tramwaju i niezdatności powierzchni tocznych kół w postaci płaskich miejsc.
2. Utworzone modele wielomianowe miar  $N$ ,  $N5$ ,  $FS2$ ,  $SRSS_{PS}$  i  $SRSS_{PP}$  mogą posłużyć do estymacji ich wartości w funkcji prędkości przejazdu tramwaju.
3. Zastosowanie opracowanej metody w systemie eksploatacji tramwajów pozwala na gromadzenie i przetwarzanie informacji o bieżącym stanie pojazdów pod względem aktywności wibroakustycznej. Wskaźniki  $AW$  mogą zatem posłużyć do weryfikacji

tramwajów w aspekcie zapytań i skarg kierowanych do operatorów taboru przez mieszkańców miast.

4. Możliwe jest dokonanie selekcji egzemplarzy tramwajów do realizacji procesu transportowego na poszczególnych liniach tramwajowych bazując na wskaźniku AW. Szczególnie istotna selekcja dotyczy obsługi linii nocnych i linii w ścisłej zabudowie miejskiej.
5. Możliwe jest nadanie większego znaczenia określonym zjawiskom wibroakustycznym w obliczaniu wskaźnika AW poprzez sterowanie wartościami wag dla poszczególnych miar składowych aktywności wibroakustycznej.
6. Zastosowanie opracowanej metody pozwala na wskazanie egzemplarzy tramwajów wymagających podjęcia niezbędnych prac w kierunku minimalizacji zjawisk wibroakustycznych. Uzyskane w ten sposób informacje mogą być podstawą do dopuszczenia tramwaju do dalszej eksploatacji lub skierowania go na obsługę w celu wykonania koniecznych napraw. Postępowanie takie pozwoli wykluczyć z eksploatacji pojazdy, których oddziaływanie negatywnie wpływa na otoczenie.
7. Możliwe jest zaadaptowanie opracowanej metody oceny aktywności wibroakustycznej w dowolnym przedsiębiorstwie komunikacyjnym dla dowolnego typu tramwajów.
8. Opracowana metoda może posłużyć jako narzędzie zapobiegania negatywnemu oddziaływaniu zanieczyszczeń na środowisko zgodnie obowiązującą Ustawą „Prawo ochrony środowiska” przy jednoczesnym spełnieniu idei rozwoju zrównoważonego transportu zawartej w Białej Księdze Transportowej.
9. Wykorzystanie metody pozwoli na optymalne zarządzanie procesami użytkowania i obsługiwanego taboru minimalizując ryzyko wystąpienia stanów awaryjnych oraz minimalizując negatywne oddziaływania pojazdów na środowisko miejskie.
10. Informacje uzyskane przy zastosowaniu wskaźnika AW tramwajów mogą przyczynić się do obniżenia kosztów zewnętrznych transportu ponoszonych przez społeczeństwo z jednoczesnym pozytywnym oddziaływaniem na jakość życia w mieście.
11. Opracowana metoda oceny aktywności wibroakustycznej może być narzędziem weryfikującym skuteczność wdrażanych środków minimalizujących zjawiska wibroakustyczne w taborze.

**Kierunki dalszych prac w dziedzinie oceny aktywności wibroakustycznej tramwajów określono jako:**

1. Weryfikacja metody w warunkach jazdy z prędkością powyżej 27 km/h.

2. Budowa autonomicznego systemu pomiarowego dla oceny aktywności wibroakustycznej tramwajów.
3. Zintegrowanie systemu pomiarowego z automatycznie uzupełniającą się bazą danych centralnego systemu zarządzania eksploatacją zajezdni.
4. Opracowanie propozycji wykorzystania uzyskanych danych do sterowania zadaniami przewozowymi uwzględniając minimalizację aktywności wibroakustycznej pojazdów i oddziaływania taboru na środowisko miejskie.
5. Badania i modelowanie aktywności wibroakustycznej wybranych typów tramwajów w warunkach normalnej eksploatacji poza zajezdnią.
6. Zastosowanie technik modelowania niejawnego do budowy modeli działaniowych oceny aktywności wibroakustycznej bazujące na pomiarach przytorowych.
7. Zastosowanie opracowanej metody oceny aktywności wibroakustycznej dla wszystkich tramwajów danego przedsiębiorstwa komunikacyjnego.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ainalis D., Ducarne L., Kaufmann O., Tshibangu J.P., i in., Improved analysis of ground vibrations produced by man-made sources. *Science of the Total Environment*, nr 616–617, 2018, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.291.
- [2] Alexandrou G., Kouroussis G., Verlinden O., A comprehensive prediction model for vehicle/track/soil dynamic response due to wheel flats. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, nr 230(4), 2015, DOI: 10.1177/0954409715576015.
- [3] Alias J., *La voie ferrée – technique de construction et d’entretien*, wyd. 2, Eyrolles, Paris 1984.
- [4] Arteaga L., Rolling noise in road and rail transportation systems, w: *Proceedings of International Congress on Noise Control Engineering - INTERNOISE 2019*, Spanish Acoustical Society SEA, Madrid 2019.
- [5] Athanasopoulos G.A., Pelekis P.C., Anagnostopoulos G.A., Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nr 19(4), 2000, DOI: 10.1016/S0267-7261(00)00009-9.
- [6] Auersch L., Said S., Attenuation of ground vibrations due to different technical sources. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, nr 9(3), 2010, DOI: 10.1007/s11803-010-0018-0.
- [7] Babisch W., Health aspects of extra-aural noise research. *Noise & Health - A Bimonthly Inter-disciplinary Interantional Journal*, nr 6(22), 2004.
- [8] Banister D., Sustainable transport and public policy, w: Kim, T.J. (Red.), *Transportation Engineering and Planning*, Encyclopedia of Life Support Systems, 2009.
- [9] Bańka A., *Spółeczna psychologia środowiskowa*, Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa 2002.
- [10] Barkow B., Mittermayr P., Identifying causes of out-of-round wheels: measuring field experience against simulations. *Interface Journal*, nr October, 2008.
- [11] Basner M., Brink M., Bristow A., De Kluizenaar Y., i in., ICBEN review of research on the biological effects of noise 2011-2014. *Noise and Health*, nr 17(75), 2015, DOI: 10.4103/1463-1741.153373.
- [12] Bednarz, J. Brożek, G. Targosz J., Symulacja rozchodzenia się fali drganiowej od torowiska tramwajowego. *Autobusy*, nr 6, 2016, DOI: 10.24136/atest.2018.426.
- [13] Belleville V., Vincent N., Betgen B., Curve squeal control of metros and trams,

- w: *Deutsche Jahrestagung für Akustik 2011*, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Dusseldorf 2011.
- [14] Betgen B., Bouvet P., Thompson D., Demilly F., i in., Assessment of the efficiency of railway wheel dampers using laboratory methods within the STARDAMP project. *Acoustics 2012*, nr April 2012, 2012.
- [15] Bockstael A., De Coensel B., Lercher P., Botteldooren D., Influence of temporal structure of the sonic environment on annoyance, w: *Proceedings of the International Congress on Noise as a Public Health Problem - ICBEN 2011*, Institute of Acoustics IOA, Londyn 2011.
- [16] Bombardier Transportation, Flexity 2, <http://lrt.daxack.ca/LRTvsHRT/TransitCity/FLEXITY2.pdf> [dostęp: 12.07.2017].
- [17] Bombardier Transportation, Bombardier Partner CSR Puzhen Wins Order for Low-Floor Trams in China, <https://www.bombardier.com/en/media/newsList/details.41232-bombardier-partner-csr-puzhen-wins-order-for-low-floor-trams-in-china.bombardiercom.html?> [dostęp: 12.07.2017].
- [18] Bouvet P., Vincent N., Coblenz A., Demilly F., Optimization of resilient wheels for rolling noise control. *Journal of Sound and Vibration*, nr 231(3), 2000, s. 765–777, DOI: 10.1006/jsvi.1999.2561.
- [19] Brüel & Kjaer, Type 8210 modal sledge hammer, 12 lb. head, calbe included, <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/impact-hammers/8210> [dostęp: 17.02.2017].
- [20] Brüel & Kjær, Noise, vibration, dust and air quality monitoring with Sentinel, <https://www.emsbk.com/sentinel/> [dostęp: 21.02.2019].
- [21] Brüel & Kjær, Karta katalogowa przetwornika drgań B&K 8344, <https://www.bksv.com/media/doc/bp2262.pdf> [dostęp: 12.02.2017].
- [22] Brüel & Kjær, Karta katalogowa mikrofonu pojemnościowego B&K 4958, <https://www.bksv.com/media/doc/bp2173.pdf> [dostęp: 12.02.2017].
- [23] Brüel & Kjær, Karta katalogowa mikrofonu pojemnościowego B&K 4189, <https://www.bksv.com/media/doc/bp2210.pdf> [dostęp: 12.02.2017].
- [24] Brüel & Kjær, Karta katalogowa młotka modalnego B&K 8210, <https://www.bksv.com/media/doc/bp2079.pdf> [dostęp: 17.02.2017].
- [25] Brüel & Kjær, Windows to FFT analysis (part I). Brüel & Kjaer Technical review, no 3/1987.
- [26] Brüel & Kjær, Windows to FFT analysis (part II). Brüel & Kjaer Technical review,



no 4/1987.

- [27] Brüel & Kjær, BK Connect 2018.1.
- [28] De Bruijn H., Veeneman W., Decision-making for light rail. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2009.
- [29] BS 6472-1-2008, Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock.
- [30] Bujkiewicz I., Butelkowy stuff, <https://sites.google.com/site/butelkowystuff/rysunki> [dostęp: 21.02.2020].
- [31] Burtin A., Hovius N., Turowski J.M., Seismic monitoring of torrential and fluvial processes. Earth Surface Dynamics, nr 4, 2016.
- [32] Buxton O., Ellenbogen J.M., Wang W., Sleep disruption due to hospital noises: A prospective evaluation. Annals of internal medicine, nr 157(3), 2012, DOI: 10.7326/0003-4819-157-3-201208070-00472.
- [33] Cat H., Campaign for Better Transport. Light Rail and City Regions: a 21 st Century Mode of Transport (Light Rail Inquiry by the All-Party Parliamentary Light Rail and pteg), 2005.
- [34] Cempel C., Nowoczesne zagadnienia metodologii i filozofii badań - wybrane zagadnienia dla studiów doktoranckich i podyplomowych, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2003.
- [35] Cempel C., Diagnostyka wibroakustyczna maszyn, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1989.
- [36] Cempel C., Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa 1982.
- [37] Cempel C., Drgania mechaniczne: wprowadzenie. Siedem wykładów z drgań mechanicznych. Skrypt dla kierunku Mechanika studiów i kursów podyplomowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1982.
- [38] Cempel C., Wibroakustyka stosowana (ang. Applied vibroacoustics), Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Poznań 1978.
- [39] Cempel C., Tomaszewski F., Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań., Wydawnictwo MCNEMT, Radom 1992.
- [40] Cholewa K., Kaźmierczak J., Diagnostyka techniczna maszyn. Przetwarzanie cech sygnałów, Politechnika Śląska - skrypty uczelniane nr 1693, Gliwice 1992.
- [41] Cik M., Lienhart M., Lercher P., Analysis of psychoacoustic and vibration-related parameters to track the reasons for health complaints after the introduction of new

- Tramways. Applied Sciences, nr 6(12), 2016, DOI: 10.3390/app6120398.
- [42] Connolly D.P., Kouroussis G., Laghrouche O., Ho C.L., i in., Benchmarking railway vibrations - Track, vehicle, ground and building effects. Construction and Building Materials, nr 92, 2015, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.042.
- [43] Czechyra B., Noise and Vibration activity of trams as a development of a tram acoustic signature, w: *Proceedings of International Congress on Sound and Vibration - ICSV 2012*, International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Wilno 2012.
- [44] Czechyra B., Vibroacoustic properties and interactions of an urban tram, w: Cempel, C. (Red.), *Vibrations in physical systems*, Volume XXV, Poznan University of Technology, Poznań-Będlewo 2013.
- [45] Czechyra B., Firlik B., Nowakowski T., The case of using a vehicle-track interaction parameters and impact test to monitor of the tramway, w: *Proceedings of International Congress on Sound and Vibration - ICSV 2015*, International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Florencja 2015.
- [46] Czechyra B., Firlik B., Tomaszewski F., Monitoring system of the tram vibroacoustic activity level: general concept, w: Pombo, J. (Red.), *Proceedings of the second international conference on railway technology: research, development and maintenance*, Civil-Comp Press, 2014.
- [47] Czechyra B., Komorski P., Nowakowski T., The impact of changes in the dynamic characteristics of a tram wheels on vibroacoustic effects generated by tram in pass-by test, w: *Proceedings of International Congress on Sound and Vibration - ICSV 2016*, International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Ateny 2016.
- [48] Czechyra B., Kwaśnikowski J., Tomaszewski F., Możliwości wykorzystania metod wibroakustycznych w procesie oceny własności eksploatacyjnych tramwaju. Logistyka, 2011, s. 172–180.
- [49] Czechyra B., Nowakowski T., Komorski P., Amplitude and frequency characteristics of acoustic field influenced by tram, w: *Proceedings of International Congress on Noise Control Engineering - INTERNOISE 2016*, Deutsche Gesellschaft Fuer Akustik, Hamburg 2016.
- [50] Czechyra B., Tomaszewski F., Acoustic signature of trams, w: *Proceedings of 16TH International Congress on Sound and Vibration*, International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Kraków 2009.
- [51] Czechyra B., Tomaszewski F., Nowakowski T., The influence of the tramway infrastructure type on vibroacoustic effects in tram operation, w: *Proceedings*

- of International Congress on Sound and Vibration - ICSV 2015*, International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Florencja 2015.
- [52] Czechyra B., Tomaszewski F., Nowakowski T., Orczyk M., Repeatability of vibroacoustic processes for tram diagnostics in normal operating conditions, w: *Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, Civil-Comp Proceedings, 2016.
- [53] Czerniak A., Poszyler-Adamska A., Kayzer D., Ocena propagacji hałasu komunikacyjnego na terenach zadrzewionych. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, nr 1, 2007.
- [54] Daniel P., Weber R., Psychoacoustical Roughness: Implementation of an Optimized Model. *Acta Acustica united with Acustica*, nr 83, 1997.
- [55] Department for Transport, *Transport Statistics Great Britain 2018 - Moving Britain Ahead*, 2018.
- [56] Døssing O., *Structural Testing. Part 1: Mechanical Mobility Measurements*, Brüel & Kjaer, 1988.
- [57] Dratva J., Phuleria H.C., Foraster M., Gaspoz J.M., i in., Transportation noise and blood pressure in a population-based sample of adults. *Environmental Health Perspectives*, nr 120(1), 2012, DOI: 10.1289/ehp.1103448.
- [58] Dz.U. 1985 nr 14 poz. 60, Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych.
- [59] Dz.U. 2001 nr 62 poz. 627, Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 Prawo ochrony środowiska.
- [60] Dz.U. 2011 nr 65 poz. 343, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 28 stycznia 2011 r. w sprawie zakresu, warunków, terminów i sposobu przeprowadzania badań technicznych tramwajów i trolejbusów oraz jednostek wykonujących te badania, 2011.
- [61] Dz.U. 2011 nr 65 poz. 344, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 2 marca 2011 r. w sprawie warunków technicznych tramwajów i trolejbusów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia, 2011.
- [62] Dziennik urzędowy wspólnot europejskich L189/12, Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 25 czerwca 2002 r. odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku.
- [63] E-Poznań.pl, Pętla Ogrody: „piski” tramwajów uciążliwe dla mieszkańców, [https://epoznan.pl/news-news-77928-Petla\\_Ogrody\\_&](https://epoznan.pl/news-news-77928-Petla_Ogrody_&) [dostęp: 08.08.2019].
- [64] Edward O., *Dźwięk i jego percepcja. Aspekty fizyczne i psychoakustyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018, ISBN: 9788301201166.
- [65] Engel Z., *Ochrona środowiska przed drganiem i hałasem*, Wydawnictwo Naukowe

- PWN, Warsaw 2001.
- [66] Esteban B.S., Serrano B.J., Rodríguez P., Blanquer J.F., Comparison of vibration and rolling noise emission of resilient and solid monobloc railway wheels in underground lines. Proceedings of the 7th World Congress on Railway Research, 2006, s. 4–8.
- [67] European Environment Agency, EEA Report No 10/2014 Noise in Europe, Publications Office of the European Union, Luksemburg 2014.
- [68] Fahy F., Walker J., Fundamentals of Noise and Vibration, CRC Press, Londyn 1998.
- [69] Färm J., Evaluation of wheel dampers on an intercity train. Journal of Sound and Vibration, nr 267(3), 2003, DOI: 10.1016/S0022-460X(03)00737-5.
- [70] Fastl H., Zwicker E., Psychoacoustics Facts and Models, Springer-Verlag, Berlin 1990.
- [71] Fidell S., Teffeteller S., Scaling the annoyance of intrusive sounds. Journal of Sound and Vibration, nr 3, 1981.
- [72] Fritschi L., Brown A., Kim R., Schwela D., i in., Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen 2011.
- [73] Galaitsis A.G., Bender E.K., Wheel/rail noise-Part V : Measurement of wheel and rail roughness. Journal of Sound and Vibration, nr 46(3), 1976, DOI: 10.1016/0022-460X(76)90865-8.
- [74] Geropp B., Envelope Analysis - A Signal Analysis Technique for Early Detection and Isolation of Machine Faults. IFAC Proceedings Volumes, nr 30(18), 1997, DOI: 10.1016/s1474-6670(17)42527-4.
- [75] Van Gerven P.W.M., Vos H., Van Boxtel M.P.J., Janssen S.A., i in., Annoyance from environmental noise across the lifespan. The Journal of the Acoustical Society of America, nr 126(1), 2009, DOI: 10.1121/1.3147510.
- [76] Gidlöf-Gunnarsson A., Ögren M., Jerson T., Öhrström E., Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and building situational factors. Noise & Health - A Bimonthly Inter-disciplinary International Journal, nr 14(59), 2012, DOI: 10.4103/1463-1741.99895.
- [77] Gierszewski P., Karasiewicz M.T., Współczesna aktywność wulkaniczna Ziemi, w: *Idee i praktyczny uniwersalizm geografii : geografia fizyczna*, Polska Akademia Nauk IGiPZ, Toruń 2006, s. 135–140.
- [78] Glosbe, Słownik łacińsko-polski, <https://pl.glosbe.com/la/pl> [dostęp: 12.05.2019].
- [79] Główny Urząd Statystyczny, Wyniki działalności transportowej w latach 2014-2016, 2016.

- [80] Gołaś H., Mazur A., *Zasady, metody i techniki wykorzystywane w zarządzaniu jakością*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
- [81] Göransson C., *Vibrations from railway traffic - Comparison of two methods of measurement and different guideline values*. Report 1991:44, Sweden 1999.
- [82] Graff M., *Nowy tabor tramwajowy w Polsce*. TTS Technika Transportu Szynowego, nr 7–8, 2015.
- [83] Graff M., *Nowe tramwaje w Polsce w 2015 r.* TTS Technika Transportu Szynowego, nr 5, 2016.
- [84] Grassie S.L., *Rail irregularities, corrugation and acoustic roughness: Characteristics, significance and effects of reprofiling*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, nr 226(5), 2012, DOI: 10.1177/0954409712443492.
- [85] GRAW, *Sytem wykrywania płaszczyzn i napełów kół taboru*, <http://www.graw.com/downloadprod/system-wykrywania-płaszczyzn-i-nalep-kol-taboru-ulotka.pdf> [dostęp: 19.07.2019].
- [86] Griefahn B., *Sleep disturbances related to environmental noise*. Noise and Health, nr 4(15), 2002.
- [87] Griefahn B., Bröde P., Marks A., Basner M., *Autonomic arousals related to traffic noise during sleep*. Sleep, nr 31(4), 2018.
- [88] Griffin M.J., *Handbook of Human Vibration*, Elsevier, London 1996.
- [89] Gronowicz J., *Ochrona środowiska w transporcie lądowym*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2004.
- [90] Hall P., *Toward Sustainable, Liveable and Innovative cities for 21st century*, w: *Proceedings of the Third conference of the World Capitals*, 1993.
- [91] Halonen J.I., Vahtera J., Stansfeld S., Yli-Tuomi T., i in., *Associations between nighttime traffic noise and sleep: The Finnish public sector study*. Environmental Health Perspectives, nr 120(10), 2012, DOI: 10.1289/ehp.1205026.
- [92] Harrison M.F., Thompson D.J., Jones C.J.C., *The calculation of noise from railway viaducts and bridges*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, nr 214(3), 2000, DOI: 10.1243/0954409001531252.
- [93] HEAD Acoustic, *Psychoacoustic analyses I*. Application note 02/18, 2018.
- [94] Heckl M., Hauck G., Wettschureck R., *Structure-borne sound and vibration from rail traffic*. Journal of Sound and Vibration, nr 193(1), 1996, DOI: 10.1006/jsvi.1996.0257.
- [95] Hemsworth B., *Environmental Noise Directive Development of Action Plans for*

- Railways, Interational Union of Railways, Paris 2008.
- [96] Hodgson P., Potter S., Warren J., Gillingwater D., Research in Transportation Economics Can bus really be the new tram? Research in Transportation Economics, nr 39(1), 2013, DOI: 10.1016/j.retrec.2012.06.009.
- [97] Hume K.I., Brink M., Basner M., Effects of environmental noise on sleep. Noise Health, nr 14, 2012, DOI: 10.4103/1463-1741.104897.
- [98] Infobus.pl, Komplet Jazzów Duo w Warszawie, [http://infotram.pl/komplet-jazzow-duo-w-warszawie\\_more\\_79981.html](http://infotram.pl/komplet-jazzow-duo-w-warszawie_more_79981.html) [dostęp: 12.07.2017].
- [99] InfoTram.pl, Bydgoskie Swingi w komplecie gotowe do jazdy, [http://infotram.pl/bydgoskie-swingi-w-komplecie-gotowe-do-jazdy\\_more\\_81239.html](http://infotram.pl/bydgoskie-swingi-w-komplecie-gotowe-do-jazdy_more_81239.html) [dostęp: 07.02.2017].
- [100] International Association of Public Transport, International Association of Public Transport. Public transport: driving Europe forward in 2014-2019, [https://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/UITP\\_PL\\_Driving\\_Europe\\_Forward\\_in\\_2014-2019.pdf](https://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/UITP_PL_Driving_Europe_Forward_in_2014-2019.pdf) [dostęp: 03.04.2019].
- [101] International Association of Public Transport, Statistics brief. Local public transport in the European Union, <https://mylibrary.uitp.org/KENTIKA-19303510124911217929-STATISTICS-BRIEF-LOCAL-PUBLIC-.htm> [dostęp: 03.04.2019].
- [102] ISO 3095:2005, Kolejnictwo. Akustyka. Pomiar hałasu emitowanego przez pojazdy szynowe.
- [103] ISO 4866:2010, Mechanical vibration and shock. Vibration of buildings - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings.
- [104] ISO 532-1:2017, Acoustics. Methods for calculating loudness. Part 1: Zwicker method.
- [105] Iwnicki S., Handbook of Railway Vehicle Dynamics, CRC Press, 2006.
- [106] Jakubowski J., TRANSPORT131, czyli komunikacja zbiorowa..., <http://transport131.com.pl/> [dostęp: 21.02.2020].
- [107] Jakubowski J., Solaris Tramino S105p, #524, MPK Poznań, <https://www.flickr.com/photos/129661548@N06/15753028119/> [dostęp: 03.05.2020].
- [108] Jankowska E., Skrzypiące tramwaje doprowadzają do szału mieszkańców. „Zamykanie okien nic nie daje”, <http://metrowarszawa.gazeta.pl/metrowarszawa/7,141637,22165333,skrzypiace-tramwaje-doprowadzaja-do-szalu-mieszkancow-zamykanie.html> [dostęp: 08.08.2019].
- [109] Jankowski R., Nonlinear rate dependent model of high damping rubber bearing. Bulletin of Earthquake Engineering, nr 1(3), 2003,

DOI: 10.1023/B:BEEE.0000021512.74990.45.

- [110] Janssens M.H.A., Ditttrich M.G., Beer F.G. De, Jones C.J.C., Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay. *Journal of Sound and Vibration*, nr 293, 2006, DOI: 10.1016/j.jsv.2005.08.070.
- [111] Jerczyński T., Łódzkie swingi na trasie WZ. *Świat Kolei*, nr 2, 2016.
- [112] Jergéus J., Odenmarck C., Lundén R., Sotkovszki P., i in., Full-scale railway wheel flat experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, nr 213(1), 1999, DOI: 10.1243/0954409991530985.
- [113] Jiang S., Yang S., Wu D., Bang-Chun W., Prediction and validation for the aerodynamic noise of high-speed train power car. *Transport Problems*, nr 13(2), 2018, DOI: 10.20858/tp.2018.13.2.9.
- [114] Kalinowski D., Tramwaje Pesa Swing 121NbT i 122NbT w Toruniu. *Świat Kolei*, nr 7, 2015.
- [115] Kawecki J., Błędy w prognozowaniu i diagnostyce wpływów dynamicznych na budynki. *Czasopismo techniczne*, nr 1–M, 2008.
- [116] Kawecki J., Kozioł K., Stypuła K., Wpływ konstrukcji obudowy tunelu metra na prognozowany odbiór drgań przez ludzi przebywających w pobliskim budynku. *Czasopismo techniczne - Budownictwo*, nr 107(11), 2010.
- [117] Kawecki J., Stecz P., O konieczności wykonywania obliczeń symulacyjnych wibroizolacji w torze tramwajowym. *Czasopismo techniczne - Budownictwo*, nr 19, 2011.
- [118] Kawecki J., Stypuła K., Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływanie komunikacyjne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2013, ISBN: 978-83-7242-710-6.
- [119] Kim D.S., Lee J.S., Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nr 19(2), 2000, DOI: 10.1016/S0267-7261(00)00002-6.
- [120] Kim J.C., Yun Y.S., Noh H.M., Analysis of wheel squeal and flanging on curved railway tracks. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, nr 20(12), 2019, s. 2077–2087, DOI: 10.1007/s12541-019-00225-7.
- [121] Kim R., Van Den Berg M., Summary of night noise guidelines for Europe. *Noise and Health*, nr 12(47), 2010, DOI: 10.4103/1463-1741.63204.
- [122] Kinsler L.E., Frey A., *Fundamentals of acoustics*, 2 edycja, John Wiley and Sons, New York 1962, ISBN: 978-0471847892.

- [123] Kjellberg A., Tesarz M., Holmberg K., Landström U., Evaluation of frequency-weighted sound level measurements for prediction of low-frequency noise annoyance. *Environment International*, nr 23(4), 1997, DOI: 10.1016/S0160-4120(97)00054-8.
- [124] Klaeboe R., Turunen-Rise I., Hårvik L., Madhus C. V., Vibration in dwellings from road and rail traffic - Part II: Exposure effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models. *Applied Acoustic*, nr 64, 2003.
- [125] Klein A., Marquis-Favre C., Weber R., Trollé A., Spectral and modulation indices for annoyance-relevant features of urban road single-vehicle pass-by noises. *The Journal of the Acoustical Society of America*, nr 137(3), 2015, DOI: 10.1121/1.4913769.
- [126] Knothe K., Grassie S.L., Workshop on rail corrugations and out-of-round wheels. *Journal of Sound and Vibration*, nr 227(5), 1999, DOI: 10.1006/jsvi.1999.2053.
- [127] Knothe K., Stichel S., *Rail Vehicle Dynamics*, Springer International Publishing, Cham 2017, ISBN: 978-3-319-45374-3.
- [128] Komisja Europejska, Biała księga. Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu. KOM(2011) 144, 2011.
- [129] Komorski P., Czechyra B., Nowakowski T., Możliwości uproszczenia procedury monitorowania hałasu tramwajowego z punktu widzenia automatyzacji procesu analitycznego. *Problemy Kolejnictwa*, nr 170, 2016.
- [130] Komorski P., Nowakowski T., Firlik B., Szymanski G.M., Analysis of wheel and track irregularities impact on the vibroacoustic signals emission in rail vehicles, w: *Proceedings of International Congress on Sound and Vibration - ICSV 2018*, International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Hiroshima 2018.
- [131] Komorski P., Nowakowski T., Szymański G.M., Motyl M., The Comparison Analysis of Sound Level Emitted By Various Tram Bogies Under Normal Operating Conditions, w: *Proceedings of International Congress on Sound and Vibration - ICSV 2017*, London 2017.
- [132] Komorski P., Nowakowski T., Szymański G.M., Tomaszewski F., Application of time-frequency analysis of acoustic signal to detecting flat places on the rolling surface of a tram wheel, w: *Dynamical Systems in Applications. DSTA 2017. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, vol 249, Springer, Cham 2018.
- [133] Konstantin-Hansen H., Application note: Envelope Analysis for Diagnostics of Local Faults in Rolling Element Bearings, <https://www.bksv.com/media/doc/BO0247.pdf> [dostęp: 17.03.2019].



- [134] Korycki T., Wrocławska Škoda 16T. Świat Kolei, nr 7, 2013.
- [135] Korzeb J., Analiza drgań komunikacyjnych z zastosowaniem teorii falek. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, nr z. 77, 2011.
- [136] Korzeb J., Założenia do budowy systemu oceny transportowych oddziaływań dynamicznych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, nr 98, 2013.
- [137] Korzeb J., Zastosowanie analizy falkowej w ocenie propagacji drgań w strefach oddziaływania infrastruktury transportowej, w: *Transport XXI wieku*, Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej, Białawieža 2010.
- [138] Korzeb J., Ilczuk P., Drgania i hałas w strefie oddziaływania linii tramwajowych. Logistyka, nr 4, 2014.
- [139] Korzeb J., Nader M., Gągorowski A., Różowicz J., Oddziaływania wibroakustyczne na przykładzie eksploatowanej linii metra. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, nr 119, 2017.
- [140] Kouroussis G., Connolly D.P., Alexandrou G., Vogiatzis K., Railway ground vibrations induced by wheel and rail singular defects. *Vehicle System Dynamics*, nr 53(10), 2015, DOI: 10.1080/00423114.2015.1062116.
- [141] Kouroussis G., Connolly D.P., Alexandrou G., Vogiatzis K., The effect of railway local irregularities on ground vibration. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, nr 39, 2015, DOI: 10.1016/j.trd.2015.06.001.
- [142] Kouroussis G., Connolly D.P., Forde M.C., Verlinden O., Train speed calculation using ground vibrations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, nr 229(5), 2015, DOI: 10.1177/0954409713515649.
- [143] Kouroussis G., Connolly D.P., Verlinden O., Railway-induced ground vibrations – a review of vehicle effects. *International Journal of Rail Transportation*, nr 2(2), 2014, DOI: 10.1080/23248378.2014.897791.
- [144] Kouroussis G., Conti C., Verlinden O., Investigating the influence of soil properties on railway traffic vibration using a numerical model. *Vehicle System Dynamics*, nr 51(3), 2013, DOI: 10.1080/00423114.2012.734627.
- [145] Kouroussis G., Verlinden O., Conti C., Influence of some vehicle and track parameters on the environmental vibrations induced by railway traffic. *Vehicle System Dynamics*, nr 50(4), 2012, DOI: 10.1080/00423114.2011.610897.
- [146] Kouroussis G., Verlinden O., Conti C., Efficiency of resilient wheels on the alleviation of railway ground vibrations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, nr 226(4), 2012,

DOI: 10.1177/0954409711429210.

- [147] Kowalska-Koczwara A., Stypuła K., A comparative analysis of two methods for determining the influence of vibrations on people in buildings. *Technical Transactions*, nr 1, 2017, DOI: 10.4467/2353737XCT.17.004.6101.
- [148] Kowalska-Koczwara A., Stypuła K., New Polish guidelines regarding human exposure to vibrations in buildings. *Technical Transactions*, nr 7, 2019, DOI: 10.4467/2353737XCT.19.074.10725.
- [149] Kowalski P., Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy. *Drgania mechaniczne. Założenie i profilaktyka. Materiały szkoleniowe*, <http://archiwum.ciop.pl/56487> [dostęp: 05.05.2018].
- [150] Krok E., Zbigniew S., *Podstawy algorytmów. Schematy blokowe*, Wydawnicwo Difin, Warszawa 2013, ISBN: 978-83-7251-938-2.
- [151] Krystek J., *Ochrona środowiska dla inżynierów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018, ISBN: 978-83-01-20059-6.
- [152] Kryter K.D., *The handbook of hearing and the effects of noise: physiology, psychology, and public health*, Academic Press, Boston 1994.
- [153] Kurs T., *Tramwaje zaczęły hałasować. Będzie naprawa torów*, <http://olsztyn.wyborcza.pl/olsztyn/1,48726,20175304,tramwaje-zaczely-halasowac-bedzie-naprawa-torow.html> [dostęp: 08.08.2019].
- [154] Kwiecień J., Szopińska K., Sztubecka M., Problem ochrony przed hałasem na terenach zurbanizowanych na przykładzie miasta Bydgoszczy. *Ekologia i Technika*, nr 18(4), 2010.
- [155] Lakušić S., Dragčević V., Ahac M., Ahac S., *Zaštita od buke željezničkih kolodvora*, w: *Projektiranje prometne infrastrukture*, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb 2011.
- [156] Laszlo H.E., McRobie E.S., Stansfeld S.A., Hansell A.L., Annoyance and other reaction measures to changes in noise exposure - A review. *Science of the Total Environment*, nr 435–436, 2012, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.112.
- [157] Lee P.J., Lee B.K., Griffin M.J., Evaluation of floor vibrations induced by walking barefoot in heavyweight buildings. *Acta Acustica united with Acustica*, 2015, DOI: 10.3813/AAA.918913.
- [158] Lefeuvre-Mesgouez G., Peplow A.T., Le Houédec D., Surface vibration due to a sequence of high speed moving harmonic rectangular loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, nr 22(6), 2002, DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00034-9.

- [159] Lercher P., Combined Noise Exposure at Home, w: *Encyclopedia of Environmental Health*, Elsevier, Burlington 2011.
- [160] Leśnikowska-Matusiak I., Wpływ hałasu komunikacyjnego na stan środowiska akustycznego człowieka (ang. Impact of traffic noise on the state of human acoustic environment). *Transport Samochodowy*, nr 3, 2014.
- [161] Lewis R., Olofsson U., *Wheel-Rail Interface Handbook*, 2009, ISBN: 9781845694128.
- [162] Limpert E., Stahel W.A., Abbt M., Log-normal Distributions across the Sciences : Keys and Clues. *BioScience*, nr 51(5), 2001.
- [163] Lopez I., Vinolas J., Busturia J., Castanares A., Railway wheel ring dampers. 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, nr August, 2000.
- [164] Madej H., Modelowanie przekładni zębatych na potrzeby diagnostyki konstrukcyjnej. *Diagnostyka'29*, 2003.
- [165] Madejski J., Gola A., Tram wheel geometry monitoring system. *WIT Transactions on the Built Environment*, nr 89(June 2006), 2006, DOI: 10.2495/UT060401.
- [166] Mądziel M., Potrzeby transportowe w odniesieniu do systemów komunikacji miejskiej. *Autbusy*, nr 12, 2016.
- [167] Mahmoud S., Austrell P.E., Jankowski R., Simulation of the response of base-isolated buildings under earthquake excitations considering soil flexibility. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, nr 11(3), 2012, DOI: 10.1007/s11803-012-0127-z.
- [168] Major M., Minda I., Drgania i oddziaływania dynamiczne na budynki i budowle. *Budownictwo*, nr 22, 2016, DOI: 10.17512/znb.2016.1.22.
- [169] Marui A., Martens W.L., Predicting perceived sharpness of broadband noise from multiple moments of the specific loudness distribution. *The Journal of the Acoustical Society of America*, nr 119(2), 2006, DOI: 10.1121/1.2152294.
- [170] Maschke C., Harder J., Ising H., Hecht K., i in., Stress hormone changes in persons exposed to simulated night noise. *Noise & Health - A Bimonthly Inter-disciplinary Interantional Journal*, nr 5(17), 2002.
- [171] Merideno I., Nieto J., Gil-Negrete N., Landaberea A., i in., Constrained layer damper modelling and performance evaluation for eliminating squeal noise in trams. *Shock and Vibration*, nr 2014, 2014, DOI: 10.1155/2014/473720.
- [172] Meunier S., Marchioni A., Loudness of sounds with temporal variable intensity, <https://pdfs.semanticscholar.org/eeeb/c90ebd6a927556786f0b651071e13c2c234d.pdf> [dostęp: 12.02.2019].

- [173] Meyer T., BVB Flexity Basel, [https://www.tramoldtimer-basel.ch/flexity\\_basel\\_1.html](https://www.tramoldtimer-basel.ch/flexity_basel_1.html) [dostęp: 12.07.2017].
- [174] Miedema H.M.E., Van der Berg R., Community response to tramway noise. *Journal of Sound and Vibration*, nr 120, 1988.
- [175] Miedema H.M.E., Oudshoorn C.G.M., Annoyance from Transportation Noise : Relationships with Exposure Metrics DNL and DENL and Their Confidence Intervals. *Environmental Health Perspectives*, nr 109(4), 2001.
- [176] Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Poznaniu, Dokumentacja Techniczno Ruchowa stanowisk do wykrywania płaskich miejsc na torach nr 31 oraz 32 w zajezdni MPK Franowo w Poznaniu. Materiał niepublikowany, Poznań 2014.
- [177] Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Poznaniu, Stan taboru tramwajowego MPK Poznań. Materiał niepublikowany, Poznań 2020.
- [178] Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Poznaniu, Dane techniczne i eksploatacyjne tramwaju Solaris Tramino S105p. Materiał niepublikowany, Poznań 2011.
- [179] Migdalski J., Inżynieria niezawodności. Poradnik., Wydawnictwo Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1992.
- [180] Migut G., Drzewa interakcyjne. StatSoft Polska, [https://www.statsoft.pl/?post\\_type=page&p=5539&redirect\\_to=https://www.statsoft.pl/?post\\_type=post&p=1018](https://www.statsoft.pl/?post_type=page&p=5539&redirect_to=https://www.statsoft.pl/?post_type=post&p=1018) [dostęp: 12.08.2019].
- [181] Migut G., Zastosowanie technik analizy skupień i drzew decyzyjnych do segmentacji rynku. Materiały szkoleniowe StatSoft Polska, 2009.
- [182] Morel J., Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego, wyd. 94., Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Warszawa 1994.
- [183] Motyl M., Nowakowski T., Czechyra B., Firlik B., Certification requirements for tram noise measurements in terms of today's expectations in cities. *Sustainable Development and Planning*, nr VIII(December), 2016, s. 591–596, DOI: 10.2495/SDP160491.
- [184] De Muer T., Botteldooren D., De Coensel B., Berglund B., i in., A model for noise annoyance based on notice-events, w: *Proceedings of International Congress on Noise Control Engineering - INTERNOISE 2005*, Institute of Noise Control Engineering INCE-USA, Rio de Janeiro 2005.
- [185] Mukoko S., On sustainable urban development in sub-Saharan Africa. *Cities*, nr 13, 1996.
- [186] Müller-BBM, Wheel Monitoring System (WMS) For rail-bound urban traffic systems -

- smoothly running trains and reduced maintenance costs Wheel Monitoring System (WMS), <http://www.mbbm.com/news/article/wheel-monitoring-system-wms-for-rail-bound-urban-traffic-systems-smoothly-running-trains-and-reduced-maintenance-costs-wheel-monitoring-system-w/> [dostęp: 16.04.2018].
- [187] Müller-BBM, Wheel Monitoring System for railway, tram and subway, [http://rail-en.mbbm-dev.de/fileadmin/user\\_upload/rail-technologies/Broschueren/MBBM\\_WMS-EN-06.pdf](http://rail-en.mbbm-dev.de/fileadmin/user_upload/rail-technologies/Broschueren/MBBM_WMS-EN-06.pdf) [dostęp: 18.01.2019].
- [188] Münzel T., Gori T., Babisch W., Basner M., Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *European Heart Journal*, nr 35(13), 2014, DOI: 10.1093/eurheartj/ehu030.
- [189] Münzel T., Schmidt F.P., Steven S., Herzog J., i in., Environmental noise and the cardiovascular system. *Journal of the American College of Cardiology*, nr 71(6), 2018, DOI: 10.1016/j.jacc.2017.12.015.
- [190] Musiek F.E., Chermak G.D., The Human Auditory System, w: Feigin, A.S., Anderson, K.E. (Red.), *Handbook of Clinical Neurology*, Elsevier, 2015.
- [191] Newton S., Clark R., An Investigation into the dynamic effects on the track of wheel flats on railway vehicles. *Journal Mechanical Engineering Science*, nr 21, 1979.
- [192] Nielsen J.C.O., Igeland A., Vertical dynamic interaction between train and track— influence of wheel and track imperfections. *Journal of Sound and Vibration*, nr 187(5), 1995, DOI: 10.1006/jsvi.1995.0566.
- [193] Noise Meters, Guardian Environmental Monitor - Noise, Dust, Vibration, <https://www.noisemeters.com/product/cel/guardian/> [dostęp: 18.02.2019].
- [194] Nowakowski T., Czechyra B., Low frequency noise and paraseismic vibration in using of chosen tram types and different type of track, w: *Proceedings of International Congress on Sound and Vibration - ICSV 2016*, International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Ateny 2016.
- [195] Nowakowski T., Firlik B., Staśkiewicz T., Assumptions development of the noise attenuation passive system for tram using the noise maps analysis method. *Archives of Acoustics*, nr 44(4), 2019.
- [196] Nowakowski T., Komorski P., Szymański G.M., Application of Hilbert transform in detection flat spots on tram wheels, w: *Mathematical and Numerical Aspects of Dynamical System Analysis*, Łódź 2017, s. 2017.
- [197] Nowakowski T., Komorski P., Szymański G.M., Tomaszewski F., Wheel-flat detection on trams using envelope analysis with Hilbert transform. *Latin American Journal*

- of Solids and Structures, nr 16(1), 2017, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78255010>.
- [198] Nowakowski T., Staśkiewicz T., Wpływ balastowania torowiska na drgania parasejsmiczne w eksploatacji infrastruktury tramwajowej. *Problemy Kolejnictwa*, nr 172, 2016.
- [199] Nowakowski T., Staśkiewicz T., Finke S., Firlik B., Wybrana problematyka konstrukcji tramwaju w aspekcie jego oddziaływania z otoczeniem, w: *Polskie inwestycje transportowe - doświadczenia, badania i przyszłość. Annały inżynierii ruchu i badań transportowych*, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej oddział w Poznaniu, Poznań 2017.
- [200] Nowakowski T., Tomaszewski F., Analysis of dynamic tram-track interactions based on paraseismic vibration, w: *Proceedings of International Congress on Sound and Vibration - ICSV 2017*, International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), Londyn 2017.
- [201] Ntotsios E., Thompson D., Hussein M., The effect of track load correlation on ground-borne vibration from railways. *Journal of Sound and Vibration*, nr 402, 2017, DOI: 10.1016/j.jsv.2017.05.006.
- [202] Öhrström E., Effects of exposure to railway noise – A comparison between areas with and without vibration. *Journal of Sound and Vibration*, nr 205, 1997.
- [203] Open Street Map, Mapy Open Street Map (OSM), <https://www.openstreetmap.org/> [dostęp: 25.07.2018].
- [204] Ossowski J., Tramwaje nie chcą piszczeć na zakrętach. Będzie smarowanie szyn, <http://warszawa.wyborcza.pl/warszawa/7,54420,24788370,tramwaje-nie-chca-piszczec-na-zakretach-bedzie-smarowanie-szyn.html> [dostęp: 08.08.2019].
- [205] Pallas M.A., Legon J., Chatagnom R., Noise Emitted by Trams – Part 2: Development of Tram Noise Emission Model., w: *Proceedings of International Congress on Noise Control Engineering - INTERNOISE 2007*, Turkish Acoustical Society, Istanbul 2007.
- [206] Panulinova E., Harabinová S., Argalášová L., Tram squealing noise and its impact on human health. *Noise & Health - A Bimonthly Inter-disciplinary International Journal*, nr 18(85), 2016, DOI: 10.4103/1463-1741.195799.
- [207] Paulsen R., Kastka J., Effects of combined noise and vibration on annoyance. *Journal of Sound and Vibration*, nr 181(2), 1995, DOI: 10.1006/jsvi.1995.0141.
- [208] Pawlas K., Hałas jako czynnik zanieczyszczający środowisko – aspekty medyczne. *Medycyna Środowiskowa - Environmental Medicine*, nr 18(4), 2015.
- [209] Pawlas K., Wpływ infradźwięków i hałasu o niskich częstotliwościach na człowieka –

- przegląd piśmiennictwa. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, nr Nr 2 (60)(2), 2009.
- [210] Pedersen E., Waye K.P., Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occupational and Environmental Medicine*, nr 64(7), 2007, DOI: 10.1136/oem.2006.031039.
- [211] Peruń G., Wpływ wybranych czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na wibroaktywność przekładni zębatej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr Transport(1878)*, 2012.
- [212] PESA Bydgoszcz S.A., Niskopodłogowy tramwaj miejski 122N dla spółki MZK Bydgoszcz.
- [213] Pieniak A., Environmental legal regulations in dealing with noise. *Polish Yearbook of Environmental Law*, nr 3, 2003.
- [214] Pieringer A., Kropp W., Nielsen J.C.O., The influence of contact modelling on simulated wheel/rail interaction due to wheel flats. *Wear*, 2013, DOI: 10.1016/j.wear.2013.12.005.
- [215] PN-B-02170:2016, Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłóżę na budynki.
- [216] PN-B-02171:2017, Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.
- [217] PN-K-92008:1998, Komunikacja miejska. Skrajnia kinematyczna wagonów tramwajowych.
- [218] PN-K-92011:1998, Torowiska tramwajowe. Wymagania i badania.
- [219] Polskie Wydawnicwo Naukowe, Słownik Języka Polskiego, [www.sjp.pwn.pl](http://www.sjp.pwn.pl) [dostęp: 12.12.2018].
- [220] Porębski R., Dynamiczne oddziaływania nawierzchni na podtorze podczas ruchu pociągów (rozprawa doktorska), Politechnika Poznańska, 1983.
- [221] PQStat Software, PQStat 1.8.0.
- [222] Preston L.S., Kenworthy J., An introduction to sustainable transportation. Policy, planning and implementation, wyd. 2., Routledge, London 2017.
- [223] Psiacoustic, General information on the acramos system, [http://www.acramos.at/pdf/acramosInfo03-2009\\_en.pdf](http://www.acramos.at/pdf/acramosInfo03-2009_en.pdf) [dostęp: 18.04.2018].
- [224] Pulkki V., Karjalainen M., Communication Acoustics: An Introduction to Speech, Audio and Psychoacoustics, Willey, 2015, ISBN: 978-1-118-86654-2.
- [225] Railway Gazette, De Lijn orders Flexity 2 trams for Antwerpen and Gent, <https://www.railwaygazette.com/de-lijn-orders-flexity-2-trams-for-antwerpen-and-gent/37171.article> [dostęp: 12.07.2017].

- [226] Randall R.B., *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, Wiley, Chichester 2011, ISBN: 978-0-470-97758-3.
- [227] Randall R.B., Antoni J., Rolling element bearing diagnostics-A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, nr 25(2), 2011, s. 485–520, DOI: 10.1016/j.ymsp.2010.07.017.
- [228] Randall R.B., Tech. B., B.A., *Frequency analysis*, Brüel & Kjær, 1987.
- [229] Romanowicz B., Surface Waves, w: Gupta, H.K. (Red.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Springer, Dordrecht 2011.
- [230] Rucińska D., *Potrzeby transportowe*, w: *Transport: nowe wyzwania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
- [231] Rücker W., Auersch L., A User-Friendly Prediction Tool for Railway Induced Ground Vibrations: Emission – Transmission – Immission, w: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Springer, Berlin 2008.
- [232] Van Ruiten C.J.M., Mechanism of squeal noise generated by trams. *Journal of Sound and Vibration*, nr 120(2), 1988.
- [233] Rutkowski L., *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
- [234] Schomer P.D., Wagner L.R., On the contribution of noticeability of environmental sounds to noise annoyance. *Noise Control Engineering*, nr 44, 1996.
- [235] Sharp J., *Microsoft Visual C# 2017. Krok po kroku*, APN Promise, Warszawa 2018, ISBN: 9788375413625.
- [236] Shen C., Li Z., Dollovoet R., A novel method for railway crossing monitoring based on ambient vibration caused by train-track interaction, w: Klomp, M., Bruzelius, F., Nielsen, J., Hillemyr, A. (Red.), *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. IAVSD 2019*, Springer, Goteborg 2020.
- [237] Sheng X., Xiao X., Zhang S., The time domain moving Green function of a railway track and its application to wheel–rail interactions. *Journal of Sound and Vibration*, nr 377, 2016, DOI: 10.1016/j.jsv.2016.05.011.
- [238] Skrodzka E., Sęk A., Marszałkiewicz M., *Psychoakustyka w pigułce*, Instytut Akustyki UAM, Poznań 2000.
- [239] Śliwińska-Kowalska M., *Audiologia kliniczna*, wyd. 1., Mediton, Łódź 2005.
- [240] Smiley R.G., Rotating Machinery: Monitoring and Fault Diagnosis. *Journal of Sound and Vibration*, nr 15(9), 1983.



- [241] Smith J.O., Spectral Audio Signal Processing, W3K Publishing, 2011.
- [242] Sneddon M., Pearsons K., Fidell S., Laboratory study of the noticeability and annoyance of low signal-to-noise ratio sounds. *Noise Control Engineering Journal*, nr 51(5), 2003, DOI: 10.3397/1.2839726.
- [243] Sobotova L., Jurkovicova J., Stefanikova Z., Sevcikova L., i in., Community response to environmental noise and the impact on cardiovascular risk score. *Science of the Total Environment*, nr 408(6), 2010, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.12.033.
- [244] Solaris Bus & Coach, Tramino. Katalog produktowy 2017/2018, [https://www.solarisbus.com/public/assets/content/pojazdy/katalog/Tramino\\_PL.pdf](https://www.solarisbus.com/public/assets/content/pojazdy/katalog/Tramino_PL.pdf) [dostęp: 03.04.2019].
- [245] Stahel W., The normal distribution is the log-normal distribution - Seminar für Statistik, <https://stat.ethz.ch/~stahel/talks/lognormal.pdf> [dostęp: 22.05.2019].
- [246] Stanisław N., Michalski R., Diagnostyka obiektów technicznych, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2002, ISBN: 83-7204-290-X.
- [247] Staśkiewicz T., Firlik B., Out-of-round tram wheels – Current state and measurements. *Archives of Transport*, nr 45(1), 2018, s. 93–103, DOI: 10.5604/01.3001.0012.0946.
- [248] StatSoft, Statistica 12.
- [249] StatSoft, Moduły data mining, <https://www.statsoft.pl/Programy/Ogolna-charakterystyka/Moduly-analityczne/Data-Miner/#em> [dostęp: 12.02.2019].
- [250] StatSoft, Example 2: Illustration of EM Clustering with a synthetic data set. STATISTICA Help, <https://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/GeneralizedEMandkMeansClusterAnalysis/Example2IllustrationofEMClusteringwithaSyntheticDataSet> [dostęp: 12.02.2019].
- [251] StatSoft, Drzewa klasyfikacyjne. StatSoft Electronic Textbook, [https://www.statsoft.pl/textbook/stathome\\_stat.html](https://www.statsoft.pl/textbook/stathome_stat.html) [dostęp: 23.08.2019].
- [252] Steer Davies Gleave, Passenger Transport Executive Group: What light rail can do for cities. A review of the evidence - final report, [http://www.urbantransportgroup.org/system/files/general-docs/WhatLightRailCanDoforCitiesMainText\\_0218.pdf](http://www.urbantransportgroup.org/system/files/general-docs/WhatLightRailCanDoforCitiesMainText_0218.pdf).
- [253] Stefańczyk Ł., Tramwaj Cityrunner Łódź. TTS Technika Transportu Szynowego, 2003.
- [254] Stypuła K., Uszkodzenia budynków jako efekt oddziaływań parasejsmicznych pochodzenia transportowego i budowlanego. Morfologia, diagnostyka, zabezpieczenie,

- w: *Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych: geotechnika: XXXII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła 7-10 marca 2017 r. T.2, Wykłady, referaty firmowe i informacje techniczno-promocyjne*, Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa. Oddział Małopolski, Kraków 2017, s. 223–242.
- [255] Stypuła K., Wpływ drgań na budynki i ludzi w budynkach - normy i sporządzanie opinii, w: *Metodologia opracowania opinii i ekspertyz w budownictwie dla potrzeb postępowań sądowych*, Małopolska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa, Kraków 2018.
- [256] Stypuła K., Kozioł K., Metro w Warszawie jako przykład uwzględniania ochrony przed drganiami w procesie tworzenia infrastruktury transportu szynowego. *Przegląd Komunikacyjny*, nr R. 71, 4, 2016, s. 18–23.
- [257] Stypuła K., Kozioł K., Doświadczenia z metra w Warszawie w zakresie ochrony budynków i ludzi w budynkach przed drganiami 1. *Transport miejski i regionalny*, 2015.
- [258] Stypuła K., Tataro T., Wybrane wyniki badań wpływu drgań tramwajowych na budynki w Krakowie. *Transport miejski i regionalny*, nr 7, 2015.
- [259] Taczanowski J., Przypadek komunikacji tramwajowej w wybranych miastach Europy Środkowej i Zachodniej. *Prace Geograficzne*, nr 144, 2016, DOI: 10.4467/20833113PG.16.006.5131.
- [260] *Technika Transportu Szynowego*, Tramwaje Alstom Citadis – ponad 1000 zamówionych pojazdów. *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 12, 2007.
- [261] The MathWorks, *Matlab Statistics Toolbox User's Guide R2012a*.
- [262] Thompson D., *Railway noise and vibration: mechanism, modeling and means of control*, Elsevier, 2008, ISBN: 9780080914435.
- [263] Thompson D.J., On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, nr 193, 1996.
- [264] Thompson D.J., Kouroussis G., Ntotsios E., Modelling, simulation and evaluation of ground vibration caused by rail vehicles. *Vehicle System Dynamics*, nr 57(7), 2019, DOI: 10.1080/00423114.2019.1602274.
- [265] Tickell, C.E., Downing P., Rail wheel squeal – some causes and a case study of freight-car wheel squeal reduction. *Proceedings of the Acoustics*, nr November, 2004.
- [266] Tomaszewski F., Możliwości szacowania wartości granicznej symptomu diagnostycznego w zależności od bieżącego poziomu niezawodności obiektu. *Diagnostyka '30*, nr 30, 2004.
- [267] Toruń M., Tramwaje dwukierunkowe w komplecie, <https://mzk-torun.pl/40-aktualnosci/519-tramwaje-dwukierunkowe-w-komplecie> [dostęp: 06.02.2017].

- [268] Transport-Publiczny.pl, Jakie tramwaje dla Krakowa?, <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/jakie-tramwaje-dla-krakowa-mpk-z-przetargiem-na-zakup-do-60-wagonow-61570.html> [dostęp: 07.02.2017].
- [269] Urbanowicz W., Tramwaje Warszawskie biorą się za „piski” na łukach. Będą smarownice., <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/tramwaje-warszawskie-biora-sie-za-piski-na-lukach-beda-smarownice-61634.html> [dostęp: 08.08.2019].
- [270] Urbanowicz W., Tramwaje Warszawskie wyciszyły Swingi, [transport-publiczny.pl/mobile/tramwaje-warszawskie-wyciszyly-swingi-58107.html](https://www.transport-publiczny.pl/mobile/tramwaje-warszawskie-wyciszyly-swingi-58107.html) [dostęp: 07.02.2017].
- [271] Urbanowicz W., Olsztyn czeka na tureckie tramwaje. Umowa z Durmazlarem, <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/olsztyn-czeka-na-tureckie-tramwaje-umowa-z-durmazlarem-podpisana-59120.html> .
- [272] Urbanowicz W., Elbląg zwiększa budżet na kolejny tramwaj Modertransu, <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/elblag-zwieksza-budzet-na-kolejny-tramwaj-modertransu-60472.html> [dostęp: 04.01.2019].
- [273] Vinolas J., Nieto F.J., Lopez I., Egana J., The effect of damping the wheels and varying wheel/rail friction coefficient on railway noise, w: *International Congress on Acoustics - ICA 2007*, International Commission for Acoustic, Madrid 2007.
- [274] Western Region Universities Consortium WRUC, Noise: Health Effects and Controls. University of California., <https://web.archive.org/web/20070925221754/http://ist-socrates.berkeley.edu/~lohp/graphics/pdf/hw24en08.pdf> [dostęp: 08.08.2019].
- [275] Wijnia Y.K., Noise emission from trams. *Journal of Sound and Vibration*, nr 120, 1988.
- [276] Wittig L.E., Railway elevated structure noise-A review. *Journal of Sound and Vibration*, nr 87(2), 1983, DOI: 10.1016/0022-460X(83)90561-8.
- [277] World Health Organization, Night Noise Guidelines for Europe, WHO Regional Office for Europe, Kopenhaga 2009, ISBN: 978-92-890-4173-7.
- [278] Wroclaw.wyborcza.pl, Jest umowa - Skoda wyprodukuje nam tramwaje, [http://wroclaw.wyborcza.pl/wroclaw/1,35771,6459557,Jest\\_umowa\\_\\_\\_Skoda\\_wyprodukuje\\_nam\\_tramwaje.html](http://wroclaw.wyborcza.pl/wroclaw/1,35771,6459557,Jest_umowa___Skoda_wyprodukuje_nam_tramwaje.html) [dostęp: 14.01.2017].
- [279] Yang J., Thompson D.J., Time-domain prediction of impact noise from wheel flats based on measured profiles. *Journal of Sound and Vibration*, nr 333(17), 2014, DOI: 10.1016/j.jsv.2014.04.026.
- [280] Yao Y., Sun Z., Yang G., Liu W., i in., Analysis of Aerodynamic Noise Characteristics of High-Speed Train Pantograph with Different Installation Bases. *Applied Sciences*,

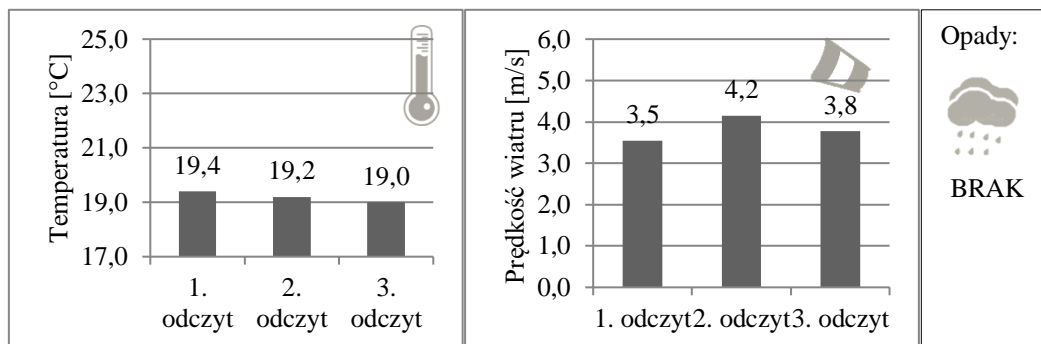
nr 9(2332), 2019, DOI: <https://doi.org/10.3390/app9112332>.

- [281] Yokoshima S., Tamura A., Combined annoyance due to the Shinkansen railway noise and vibration, w: *Proceedings of International Congress on Noise Control Engineering - INTERNOISE 2005*, Institute of Noise Control Engineering INCE-USA, Rio de Janeiro 2005.
- [282] Zielińska E., Analiza zapotrzebowania na transport miejski w Polsce. *Autobusy*, nr 6, 2018.
- [283] Zieliński T.P., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów: od teorii do zastosowań*, wyd. 2, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007, ISBN: 978-83-206-1640-8.
- [284] Żółtowski B., *Badania dynamiki maszyn*, Makar, Bydgoszcz 2002, ISBN: 83-916198-3-4.
- [285] Żółtowski B., Łuksiewicz M., *Diagnostyka drganiowa maszyn*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - Państwowego Instytutu Badawczego, Radom-Bydgoszcz 2012, ISBN: 978-83-7789-138-4.

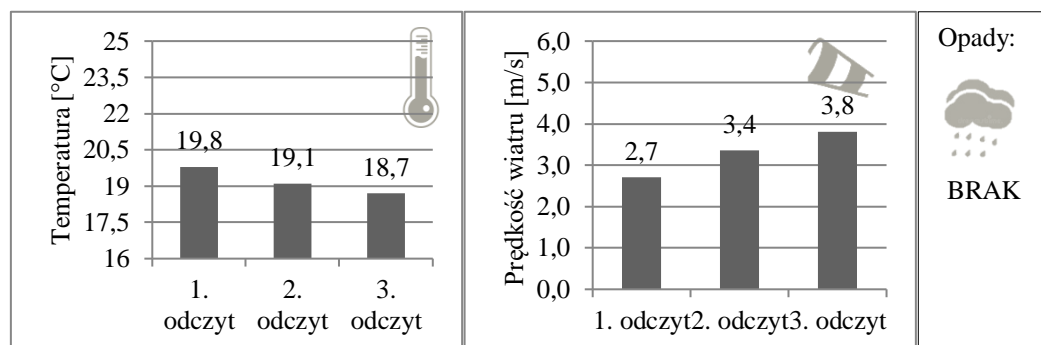
## ZAŁĄCZNIK NR 1

Dane dotyczące warunków atmosferycznych w czasie wykonywania pomiarów wibroakustycznych

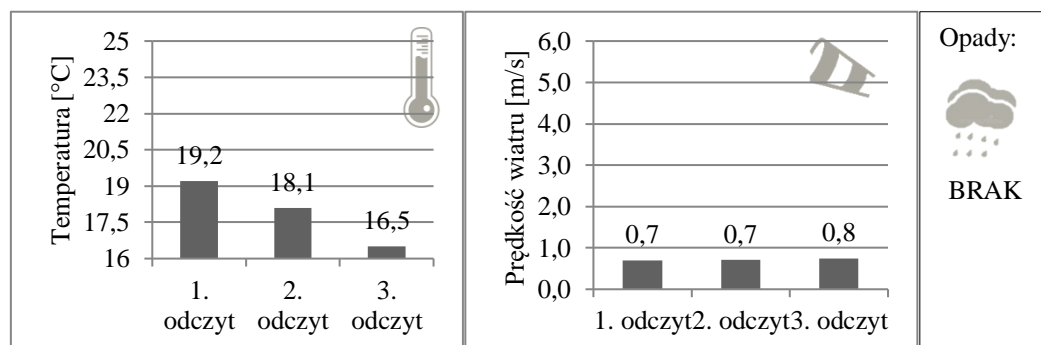
**18.07.2018 – 1 dzień pomiarowy, 22:48 – 23:48**



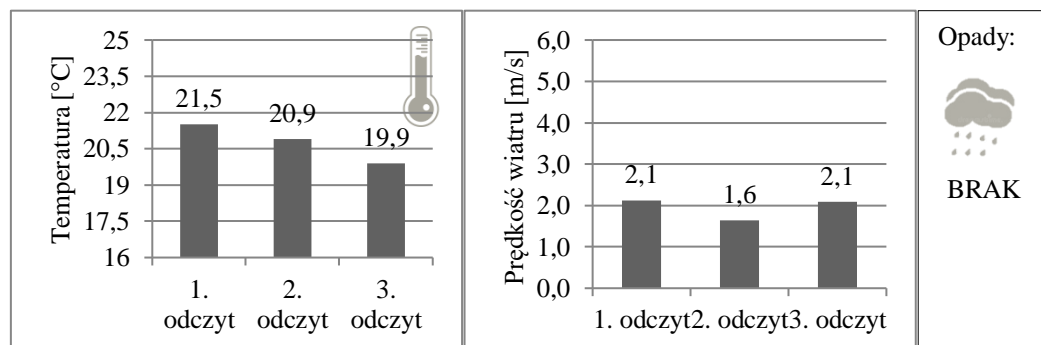
**19.07.2018 – 2 dzień pomiarowy, 22:48 – 23:45**



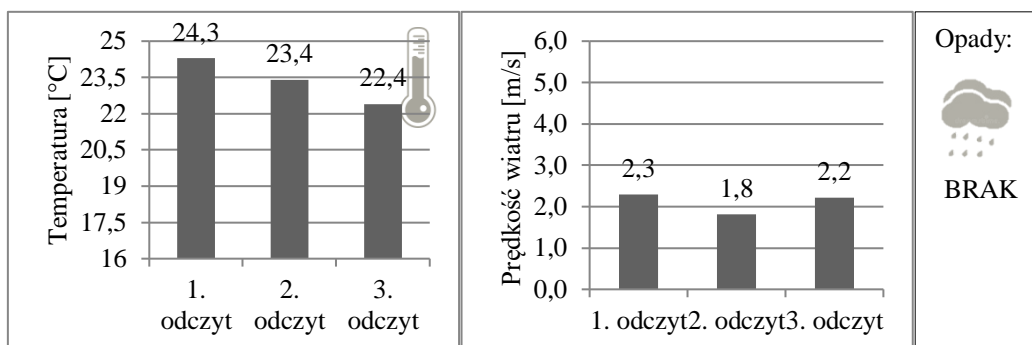
**20.07.2018 – 3 dzień pomiarowy, 22:56 – 23:39**



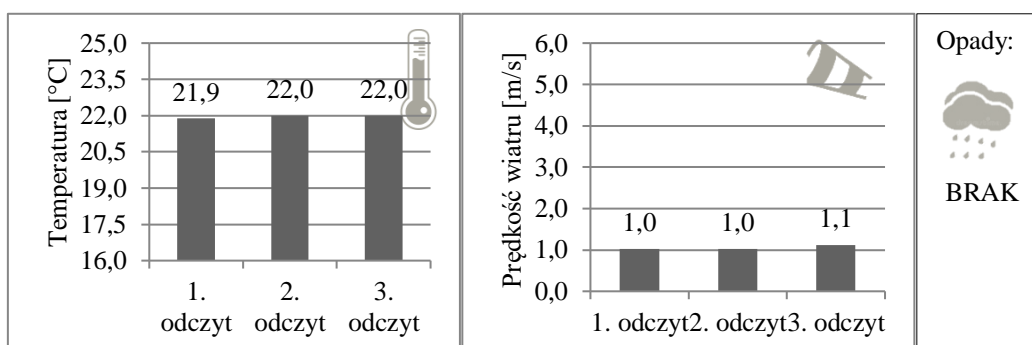
**21.07.2018 – 4 dzień pomiarowy, 22:18 – 23:53**



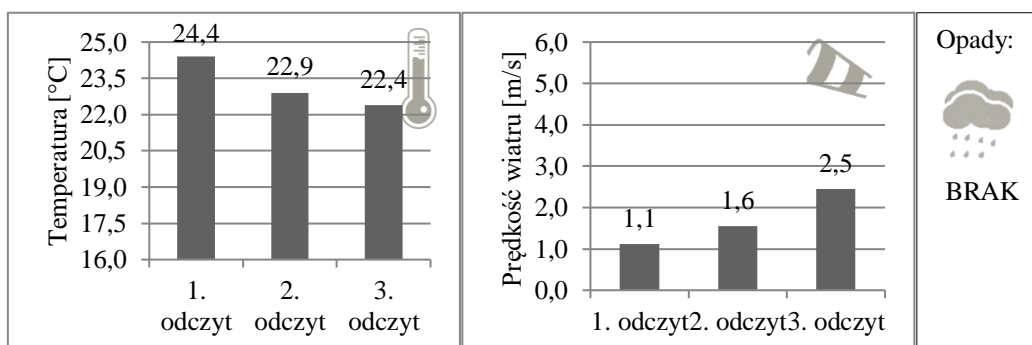
**24.07.2018 – 5 dzień pomiarowy, 22:33 – 23:49**



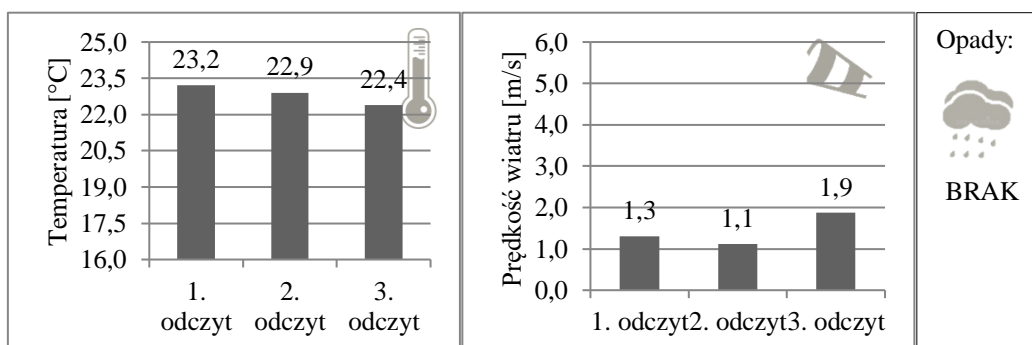
**25.07.2018 – 6 dzień pomiarowy, 22:55 – 23:50**



**26.07.2018 – 7 dzień pomiarowy, 22:55 – 23:50**



**27.07.2018 – 8 dzień pomiarowy, 22:36 – 23:53**



## ZALĄCZNIK NR 2

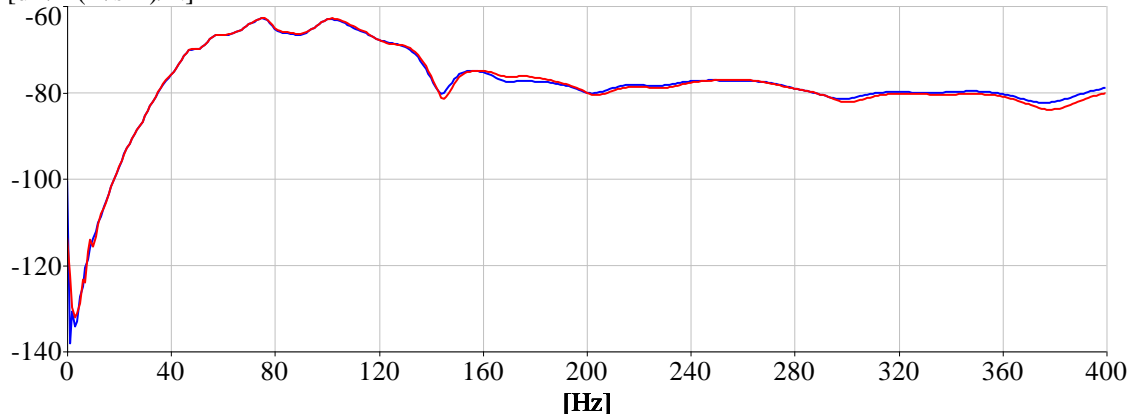
Wyniki analiz porównawczych charakterystyk inertancji dla punktów pomiarowych PG1-Z, PG2-X oraz PG3-Z

### - PG1-Z

PG1-Z pierwszy dzień pomiarowy (czerwony)

PG1-Z ostatni dzień pomiarowy (niebieski)

[dB/1 (m/s<sup>2</sup>)/N]



PG1-Z			
Pierwszy dzień pomiarowy		Ostatni dzień pomiarowy	
$f$ [Hz]	$\xi_1$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi_2$ [%]
75	10,3	75	10,7
102	10,7	101	10,6
158	13	156	13
257	15,6	249	17,2

Max $\Delta$	
$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
8,0	1,6

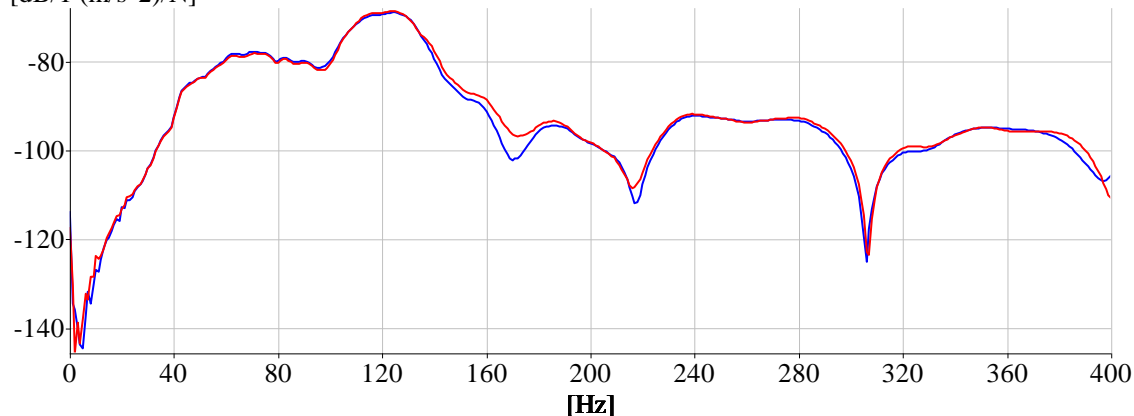
$$r_{xy}=0,99$$

### - PG2-X

PG2-X pierwszy dzień pomiarowy (czerwony)

PG2-X ostatni dzień pomiarowy (niebieski)

[dB/1 (m/s<sup>2</sup>)/N]



PG2-X			
Pierwszy dzień pomiarowy		Ostatni dzień pomiarowy	
$f$ [Hz]	$\xi_1$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi_2$ [%]
71	25,8	71	25,5
124	9,2	124	9,5
186	5,2	186	4,9
239*	nd	240	12
351	7,2	353	6,4

Max $\Delta$	
$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
2,0	0,8

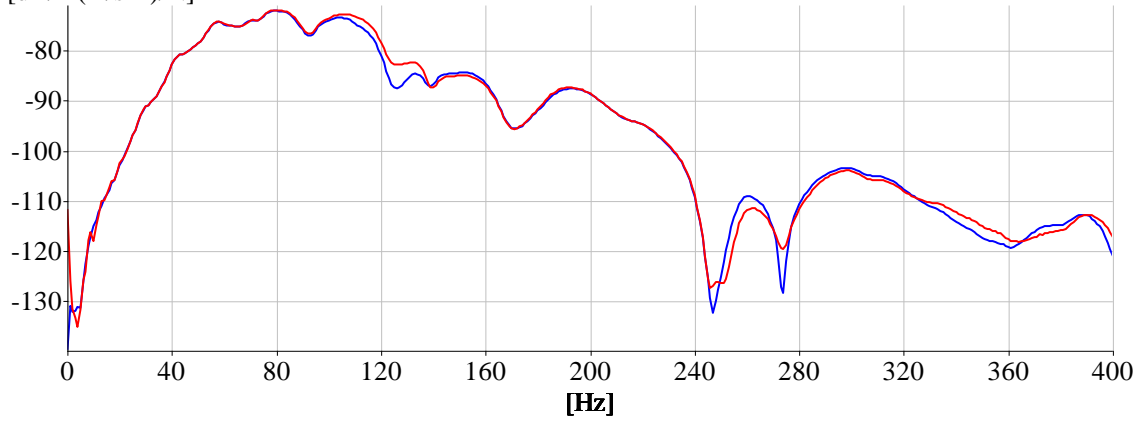
$$r_{xy}=0,99$$

- PG3-Z

PG3-Z pierwszy dzień pomiarowy (czerwony)

PG3-Z ostatni dzień pomiarowy (niebieski)

[dB/1 (m/s<sup>2</sup>)/N]



PG3-Z			
Pierwszy dzień pomiarowy		Ostatni dzień pomiarowy	
$f$ [Hz]	$\xi_1$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi_2$ [%]
80	13,7	79	22,4
106	22,1	104	10
192	5,8	193	5,9
262	2,3	260	2,2
298	5	298	5,2
391	2,3	389	3,1

Max $\Delta$	
$f$ [Hz]	$\xi$ [%]
2,0	12,1

$$r_{xy}=0,99$$



## ZALĄCZNIK NR 3

Wyniki testów na normalność rozkładu poszczególnych obserwacji

a) Wynik testu na normalność kumulanty  $U_{N_{1,2,3}}$

Test normalności Shapiro-Wilka	
Analizowane zmienne	$U_{N_{1,2,3}}$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	310
Średnia grupy	661,701302
Odchylenie standardowe grupy	11,836764
<b>Statystyka W</b>	<b>0,994783</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>0,316931</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,375648</b> <input checked="" type="checkbox"/>

b) Wynik testu na normalność kumulanty  $U_{N_{2,3}}$

Test normalności Shapiro-Wilka	
Analizowane zmienne	$U_{N_{2,3}}$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	310
Średnia grupy	429,631884
Odchylenie standardowe grupy	9,640468
<b>Statystyka W</b>	<b>0,991155</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>1,55806</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,05961</b> <input checked="" type="checkbox"/>

c) Wynik testu na normalność  $a_{RMSmax}$

Test normalności Shapiro-Wilka	
Analizowane zmienne	$a_{RMSmax}$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	155
Średnia grupy	22,15871
Odchylenie standardowe grupy	15,568586
<b>Statystyka W</b>	<b>0,85052</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>6,549812</b>
<b>Wartość p</b>	<b>&lt;0,000001</b> <input checked="" type="checkbox"/>

d) Wynik testu na normalność  $L_{eq}$

Test normalności Shapiro-Wilka	
Analizowane zmienne	$L_{eq}$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	147
Średnia grupy	83,955782
Odchylenie standardowe grupy	1,093058
<b>Statystyka W</b>	<b>0,993966</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>-0,840275</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,799623</b> <input checked="" type="checkbox"/>

e) Wynik testu na normalność  $N$

<b>Test normalności Shapiro-Wilka</b>	
Analizowane zmienne	$N$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	147
Średnia grupy	34,406667
Odchylenie standardowe grupy	2,980076
<b>Statystyka W</b>	<b>0,991809</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>-0,148014</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,558834</b> <input checked="" type="checkbox"/>

f) Wynik testu na normalność  $N5$

<b>Test normalności Shapiro-Wilka</b>	
Analizowane zmienne	$N5$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	147
Średnia grupy	39,766327
Odchylenie standardowe grupy	3,587733
<b>Statystyka W</b>	<b>0,99257</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>-0,36896</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,643921</b> <input checked="" type="checkbox"/>

g) Wynik testu na normalność  $SR$

<b>Test normalności Shapiro-Wilka</b>	
Analizowane zmienne	$SR$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	147
Średnia grupy	1,497286
Odchylenie standardowe grupy	0,126299
<b>Statystyka W</b>	<b>0,992015</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>-0,205781</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,581519</b> <input checked="" type="checkbox"/>

h) Wynik testu na normalność  $S$

<b>Test normalności Shapiro-Wilka</b>	
Analizowane zmienne	$S$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	147
Średnia grupy	1,214837
Odchylenie standardowe grupy	0,034423
<b>Statystyka W</b>	<b>0,966614</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>3,034021</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,001207</b> <input checked="" type="checkbox"/>

i) Wynik testu na normalność  $FS$

Test normalności Shapiro-Wilka	
Analizowane zmienne	$FS$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	147
Średnia grupy	0,886774
Odchylenie standardowe grupy	0,142714
<b>Statystyka W</b>	<b>0,742365</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>7,661644</b>
<b>Wartość p</b>	<b>&lt;0,000001</b> <input checked="" type="checkbox"/>

j) Wynik testu na normalność  $SRSS_{PG1}$

Test normalności Shapiro-Wilka	
Analizowane zmienne	$SRSS_{PG1}$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	147
Średnia grupy	0,618684
Odchylenie standardowe grupy	0,149718
<b>Statystyka W</b>	<b>0,976795</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>2,210165</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,013547</b> <input checked="" type="checkbox"/>


k) Wynik testu na normalność  $SRSS_{PG2}$

Test normalności Shapiro-Wilka	
Analizowane zmienne	$SRSS_{PG2}$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	147
Średnia grupy	0,358354
Odchylenie standardowe grupy	0,054506
<b>Statystyka W</b>	<b>0,984563</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>1,287169</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,099018</b> <input checked="" type="checkbox"/>

l) Wynik testu na normalność  $SRSS_{PP}$

Test normalności Shapiro-Wilka	
Analizowane zmienne	$SRSS_{PP}$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	147
Średnia grupy	0,920815
Odchylenie standardowe grupy	0,123126
<b>Statystyka W</b>	<b>0,994506</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>-1,052623</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,853743</b> <input checked="" type="checkbox"/>

m) Wynik testu na normalność  $SRSS_{PS}$

<b>Test normalności Shapiro-Wilka</b>	
Analizowane zmienne	$SRSS_{PS}$
Liczność - niezinterpretowane	0
Liczność - braki danych	0
Poziom istotności	0,01
Liczność - grupy	147
Średnia grupy	13,051223
Odchylenie standardowe grupy	3,152124
<b>Statystyka W</b>	<b>0,965801</b>
<b>Statystyka Z</b>	<b>3,08853</b>
<b>Wartość p</b>	<b>0,001006</b> 

## ZALĄCZNIK NR 4

Wyniki obliczeń wartości  $a_{RMS}$  dla sygnałów z przetworników drgań zlokalizowanych na szynie dla celów detekcji płaskich miejsc na kole

Tramwaj	Prędkość [km/h]	PS1-Y	PS2-Y	PS3-Y	PS4-Y	PS1-Z	PS2-Z	PS3-Z	PS4-Z	max
		$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]
543	25,4	32,1	32,6	10,2	28,3	1,6	7,2	55,7	80,1	80,1
537	27,2	63,0	29,7	31,2	48,5	22,1	19,6	29,5	79,7	79,7
518	27,2	9,6	9,9	8,0	18,3	4,4	4,8	26,5	76,4	76,4
528	25,1	44,9	6,3	7,0	19,8	6,1	14,1	62,8	74,4	74,4
526	26,6	23,4	13,6	5,5	53,2	1,9	6,3	60,0	53,3	60,0
547	27,1	56,6	10,8	13,8	16,8	10,8	30,6	18,1	40,1	56,6
519	25,4	54,2	30,3	4,0	30,1	5,2	9,9	20,4	41,4	54,2
527	26,8	53,0	10,1	3,6	14,3	27,4	3,4	3,1	11,5	53,0
526	25,7	48,8	22,3	27,6	22,2	7,4	6,4	9,7	50,4	50,4
559	25,9	42,1	36,6	16,0	25,8	7,1	3,3	36,0	49,7	49,7
558	24,4	48,6	10,6	8,2	27,3	23,0	4,5	6,0	28,3	48,6
550	24,5	25,2	14,1	3,6	24,3	3,7	7,8	39,9	48,2	48,2
531	25,9	47,6	6,7	2,5	4,2	19,2	2,9	0,7	2,9	47,6
554	22,4	46,4	2,3	7,4	9,8	7,8	5,9	25,7	30,5	46,4
537	22,0	45,5	4,2	5,0	4,6	13,2	1,0	10,6	6,6	45,5
542	26,4	13,5	45,4	22,6	9,8	2,3	12,2	11,6	12,4	45,4
515	23,3	33,1	43,8	7,0	6,1	6,5	2,1	30,4	8,4	43,8
558	26,4	10,6	10,2	3,3	17,4	43,7	13,4	4,3	20,6	43,7
526	23,5	42,9	18,5	42,0	11,3	14,5	18,1	8,9	16,4	42,9
557	26,1	41,2	13,0	8,7	34,7	6,8	5,7	32,5	30,8	41,2
545	22,7	19,2	4,1	7,7	24,5	12,1	17,0	16,5	41,0	41,0
515	25,2	30,4	6,4	14,2	20,2	6,2	14,5	17,7	38,6	38,6
556	17,9	19,2	36,5	2,6	3,5	2,1	3,5	3,5	3,6	36,5
515	26,9	8,4	12,3	7,8	4,7	3,6	7,0	23,8	35,4	35,4
523	25,2	17,4	8,8	3,9	25,2	3,7	1,7	11,6	33,6	33,6
527	25,8	30,1	33,5	18,2	4,3	1,5	3,4	10,5	7,2	33,5
541	23,1	33,4	7,4	5,0	7,3	14,5	3,1	4,5	3,5	33,4
542	26,0	24,7	6,4	13,3	18,5	4,3	16,0	6,2	32,6	32,6
535	25,3	31,9	7,1	4,8	3,2	15,8	2,2	2,1	14,1	31,9
534	18,4	31,6	7,0	12,7	12,6	13,9	23,2	4,5	25,3	31,6
533	25,4	31,5	5,2	2,4	16,7	9,4	2,6	1,6	4,6	31,5
517	25,1	31,3	3,5	26,9	5,8	11,6	26,6	4,2	13,0	31,3
549	24,9	30,6	6,9	21,7	5,8	4,3	14,3	11,2	11,4	30,6
532	22,7	30,1	2,1	3,0	21,7	12,7	9,0	3,7	21,5	30,1
527	23,5	30,1	29,2	7,5	3,3	6,6	5,1	19,7	14,3	30,1
516	22,8	29,8	10,8	17,5	2,1	4,1	5,3	8,0	11,2	29,8
530	25,6	29,7	9,3	13,4	9,2	6,3	2,0	12,8	14,3	29,7
542	21,1	14,6	29,7	2,0	6,5	2,7	1,5	6,1	3,5	29,7
530	20,9	28,9	8,8	5,8	7,2	4,7	1,3	6,0	4,1	28,9
546	23,4	4,0	28,6	1,2	3,4	26,4	3,5	0,6	6,7	28,6
546	22,6	2,2	28,5	3,5	5,9	0,9	4,3	6,1	6,6	28,5
549	22,7	28,3	6,8	10,4	13,1	0,8	2,4	17,8	7,5	28,3
540	23,6	6,1	9,5	0,6	4,7	28,2	5,9	0,9	8,5	28,2
539	24,0	5,4	12,5	3,7	10,7	27,3	9,0	4,0	10,6	27,3
539	20,2	26,5	6,3	14,6	6,0	6,5	13,9	13,8	10,4	26,5
559	18,1	26,3	15,4	3,4	5,1	2,5	5,2	3,6	22,4	26,3
518	23,5	17,7	12,8	26,1	11,7	6,1	2,6	5,0	18,0	26,1
534	20,1	25,6	4,8	4,7	2,5	5,9	6,9	3,5	13,9	25,6
544	22,5	3,5	25,5	3,3	18,5	20,5	13,1	2,4	16,2	25,5

Tramwaj	Prędkość [km/h]	PS1-Y	PS2-Y	PS3-Y	PS4-Y	PS1-Z	PS2-Z	PS3-Z	PS4-Z	max
		$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]
542	23,9	24,9	15,7	4,4	10,6	10,3	6,5	2,7	12,7	24,9
525	26,8	21,1	12,8	8,9	3,4	17,7	5,4	4,9	24,8	24,8
555	23,7	1,6	16,9	2,4	2,4	24,7	9,6	0,5	10,2	24,7
526	20,7	24,5	4,1	7,6	1,6	6,5	9,1	15,0	11,1	24,5
541	25,3	5,0	19,4	2,0	1,8	24,4	3,0	3,6	1,9	24,4
526	26,6	6,3	23,7	2,8	14,4	18,9	7,0	1,7	13,5	23,7
543	25,7	4,9	22,9	3,8	9,4	23,6	1,7	3,2	4,0	23,6
520	20,7	23,0	6,8	7,9	3,5	3,8	5,5	7,6	5,4	23,0
551	23,8	17,8	22,6	19,6	11,4	2,2	5,8	14,5	9,3	22,6
517	17,5	12,8	22,4	1,4	8,7	0,5	8,9	3,9	13,2	22,4
555	26,9	22,2	13,4	3,7	5,9	7,0	4,7	1,3	8,9	22,2
536	20,6	15,3	4,0	15,8	3,9	21,7	3,9	6,9	4,5	21,7
551	22,3	7,4	21,4	11,5	7,1	14,1	7,7	6,8	13,2	21,4
540	23,7	21,4	9,3	2,9	2,0	7,3	3,9	1,5	10,0	21,4
532	21,6	9,6	4,1	8,3	3,7	2,4	11,5	4,9	21,3	21,3
531	20,6	21,2	8,9	4,6	7,5	3,9	6,3	4,5	13,9	21,2
517	17,4	16,6	21,1	3,6	3,2	5,7	2,5	6,4	5,6	21,1
532	25,2	21,0	8,5	11,4	10,0	3,8	4,1	3,5	5,6	21,0
550	18,1	20,9	7,4	2,4	1,8	3,8	8,0	3,4	12,4	20,9
541	24,3	12,0	12,7	20,3	13,0	1,7	11,6	18,5	6,7	20,3
552	17,7	19,3	11,5	3,3	4,9	1,0	1,1	3,3	7,1	19,3
544	18,9	2,2	9,3	4,0	7,9	4,3	6,6	3,6	19,1	19,1
549	21,3	13,3	13,0	18,9	11,1	10,3	7,2	3,4	14,9	18,9
547	17,8	18,7	6,6	0,6	5,6	7,3	2,7	0,6	6,9	18,7
538	17,3	18,5	7,3	3,8	6,1	0,8	6,1	11,6	8,4	18,5
531	17,3	18,5	5,8	6,5	1,7	4,5	1,8	3,4	4,0	18,5
546	21,3	18,3	6,6	5,0	4,4	4,7	18,2	4,4	6,7	18,3
518	22,2	18,0	10,5	16,7	6,4	3,2	3,3	1,5	7,0	18,0
538	21,2	17,8	10,4	1,4	8,0	3,3	7,3	3,7	5,1	17,8
532	20,3	12,7	7,1	1,7	9,4	1,4	1,4	2,1	17,4	17,4
540	21,4	3,8	17,3	2,0	1,8	2,3	1,6	4,1	4,6	17,3
530	20,4	17,0	2,4	0,3	10,8	5,6	1,2	1,1	7,4	17,0
542	18,3	3,8	11,6	4,7	3,1	3,5	9,0	14,5	16,8	16,8
543	23,3	8,8	6,3	16,6	4,5	8,9	5,2	10,4	15,1	16,6
532	19,8	5,6	16,4	1,8	3,9	1,3	2,5	0,9	10,6	16,4
554	20,8	8,8	9,6	1,7	14,2	2,6	2,6	16,0	4,7	16,0
519	25,7	7,4	15,5	7,4	12,8	1,7	7,1	5,9	10,4	15,5
525	20,9	15,3	0,5	5,9	0,4	5,1	11,1	1,9	1,5	15,3
548	19,2	15,0	15,2	4,7	6,5	4,0	1,6	6,5	10,8	15,2
547	20,6	3,9	1,6	1,5	3,2	15,0	1,2	1,3	5,7	15,0
545	20,8	14,9	7,5	7,8	9,4	4,7	13,9	10,5	13,7	14,9
533	20,3	14,8	6,3	2,3	3,6	4,1	1,7	8,8	7,4	14,8
530	21,3	14,8	9,6	4,7	7,8	5,9	8,3	7,9	8,9	14,8
528	21,3	12,1	5,6	4,3	3,8	3,2	14,7	2,7	7,7	14,7
550	18,7	3,8	5,5	6,1	6,1	5,1	12,3	14,7	5,0	14,7
556	21,4	4,8	6,5	0,2	5,3	14,4	3,5	0,8	6,1	14,4
534	20,8	14,2	4,8	1,0	6,0	6,5	2,1	0,7	7,5	14,2
544	20,9	14,1	3,2	1,5	5,9	2,7	0,6	7,3	5,4	14,1
557	21,5	14,0	9,5	1,7	8,0	4,3	1,4	5,8	8,4	14,0
538	19,2	6,5	8,5	2,0	2,4	2,4	13,9	2,6	3,3	13,9
531	22,2	13,7	3,0	0,7	2,9	3,2	3,8	11,9	1,2	13,7
558	21,6	13,7	4,7	4,0	4,2	4,1	7,5	4,9	5,3	13,7
537	19,0	1,9	0,7	1,0	12,9	1,0	0,9	4,5	7,8	12,9
554	21,3	12,8	3,2	1,4	4,6	6,6	1,5	0,9	1,5	12,8
545	18,8	3,7	12,6	2,9	3,1	0,4	0,4	2,0	7,0	12,6

Tramwaj	Prędkość [km/h]	PS1-Y	PS2-Y	PS3-Y	PS4-Y	PS1-Z	PS2-Z	PS3-Z	PS4-Z	max
		$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]	$a_{RMS}$ [mm/s <sup>2</sup> ]
518	20,8	12,5	2,9	3,9	0,3	1,8	3,5	7,9	3,1	12,5
531	20,9	7,6	12,4	1,9	6,0	3,1	2,2	4,1	2,6	12,4
535	21,8	12,2	6,5	3,2	0,7	2,5	2,9	6,0	6,6	12,2
540	17,8	8,8	12,2	6,5	3,3	8,6	4,9	5,9	10,2	12,2
544	19,2	6,3	12,1	7,6	6,2	2,1	2,5	6,3	9,6	12,1
551	18,0	8,7	10,3	3,0	5,1	2,5	4,1	11,7	9,5	11,7
553	20,4	3,9	11,3	10,3	7,6	7,0	6,2	11,2	4,8	11,3
555	20,9	11,3	3,0	4,2	4,8	4,2	2,2	3,7	6,3	11,3
538	19,8	8,0	11,2	1,3	3,2	1,5	2,3	3,8	7,9	11,2
530	17,4	10,9	1,7	6,0	2,9	1,9	7,3	2,3	4,4	10,9
541	17,1	10,8	1,6	3,1	2,1	1,3	1,6	2,9	3,8	10,8
519	20,4	4,6	9,2	8,0	1,0	7,5	9,4	9,9	10,6	10,6
524	19,9	5,6	10,5	1,9	8,9	3,7	1,8	5,4	5,0	10,5
549	20,6	2,7	2,9	0,4	9,3	8,7	2,3	0,7	10,0	10,0
520	18,9	9,9	3,6	2,2	2,8	4,4	8,3	3,0	0,9	9,9
555	20,4	9,9	8,4	1,8	3,5	2,4	0,1	8,3	7,1	9,9
553	22,3	5,8	3,7	1,4	9,7	3,5	1,0	0,9	7,5	9,7
549	21,9	9,6	1,8	2,4	5,4	4,3	0,7	1,1	2,8	9,6
558	19,5	1,8	9,6	2,7	3,0	0,6	1,6	4,8	5,6	9,6
559	19,4	5,8	4,5	2,3	8,0	1,3	2,8	4,1	9,5	9,5
518	20,2	9,5	1,5	0,3	7,1	4,4	0,4	0,8	4,4	9,5
558	20,8	4,8	4,9	2,8	9,4	1,1	3,9	5,6	6,6	9,4
548	17,5	9,4	1,5	6,1	1,8	5,4	7,3	3,8	4,1	9,4
515	20,1	9,3	7,5	7,7	4,2	6,2	4,9	4,2	6,4	9,3
538	22,3	6,4	7,2	7,6	2,2	1,8	2,5	9,2	1,5	9,2
538	21,6	2,0	9,1	0,6	1,8	6,2	4,8	0,7	0,4	9,1
540	20,6	8,8	1,8	2,4	3,7	2,0	7,7	1,2	6,2	8,8
559	19,7	2,7	5,4	2,8	5,3	2,4	3,3	0,7	8,6	8,6
554	21,3	8,4	3,5	0,5	3,6	0,4	4,4	0,6	3,3	8,4
545	20,8	8,4	2,3	2,5	0,7	0,4	2,2	6,3	1,5	8,4
538	21,1	8,2	3,8	0,3	4,2	1,5	2,0	0,5	4,0	8,2
515	21,6	6,5	8,2	2,5	2,0	2,0	1,1	6,6	5,9	8,2
553	21,0	8,2	2,2	2,0	2,5	1,4	1,3	4,6	5,8	8,2
540	17,9	4,7	8,0	0,4	3,4	1,2	3,7	7,3	6,6	8,0
537	19,5	1,3	2,0	0,4	4,7	7,9	1,1	0,4	6,3	7,9
559	17,4	7,9	3,7	0,2	2,5	4,4	1,3	0,7	2,9	7,9
558	18,9	7,3	6,1	3,7	5,4	2,4	0,9	6,4	4,0	7,3
540	20,0	5,4	7,3	1,2	2,6	1,4	1,0	2,6	2,0	7,3
538	20,7	7,3	4,5	0,6	2,5	4,3	1,5	2,1	2,3	7,3
542	20,3	2,1	5,4	1,6	6,6	7,2	2,5	1,6	4,9	7,2
527	22,2	5,4	4,1	5,5	2,6	2,2	4,0	7,0	2,0	7,0
547	19,1	4,9	5,1	6,8	3,3	2,1	1,0	1,3	5,5	6,8
528	21,1	6,3	2,3	1,3	2,1	2,6	0,7	1,5	1,9	6,3
552	20,0	3,6	5,0	0,6	6,3	0,9	1,6	5,7	5,3	6,3
530	20,8	1,4	2,6	1,3	4,8	3,5	1,8	0,9	6,0	6,0
531	20,8	0,2	2,8	0,6	3,8	3,1	1,4	0,5	6,0	6,0
530	19,1	5,9	4,9	4,4	2,3	0,6	0,6	5,3	1,6	5,9
538	20,5	5,2	2,7	3,8	3,3	0,5	5,9	0,4	3,9	5,9
546	22,0	4,5	4,7	0,9	3,5	1,3	1,9	1,0	3,5	4,7
524	17,9	3,2	2,0	1,5	4,0	4,7	0,7	0,7	3,2	4,7
520	17,3	4,1	2,8	0,6	1,7	2,9	1,4	1,0	2,4	4,1