

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
im. Tadeusza Kościuszki

WYDZIAŁ MECHANICZNY

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Jarosław Szczygieł

**Zastosowanie transformacji falkowej do oceny
ciężkich zaburzeń komfortu jazdy**

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Witold Grzegózek

Kraków 2013



Podziękowania dla Promotora

prof. dr hab. inż. Witolda Grzegorzka
za cierpliwość i cenne wskazówki.

Podziękowania składam również

Miejskiemu Przedsiębiorstwu Komutacyjnemu S.A. w Krakowie
za udostępnienie taboru tramwajowego
oraz *dr inż. Stanisławowi Jurdze*
za otwartość i patronat w czasie badań

jak również wszystkim *Znajomym*
za udział w badaniach.

SPIS TREŚCI

| | |
|---|-----------|
| 1. WSTĘP | 6 |
| 2. CHARAKTERYSTYKA KOMFORTU JAZDY | 7 |
| 2.1. Komfort jazdy..... | 7 |
| 2.2. Przyczyny i źródła drgań..... | 10 |
| 2.3. Wpływ drgań ogólnych na organizm człowieka..... | 11 |
| 2.4. Główne czynniki fizyczne i ich wpływ na dyskomfort..... | 12 |
| 2.4.1. Wpływ amplitudy przyspieszenia..... | 13 |
| 2.4.2. Wpływ częstotliwości i kierunku drgań..... | 15 |
| 2.4.3. Wpływ czasu ekspozycji na drgania..... | 16 |
| 3. STANDARDY OBIEKTYWNEJ OCENY KOMFORTU JAZDY | 26 |
| 3.1. Obiektywna ocena drgań wg ISO 2631-1:1997..... | 26 |
| 3.2. Obiektywna ocena komfortu wg ISO 2631-1:1997/-4:2001..... | 30 |
| 3.3. Obiektywna ocena drgań wg BS 6841:1997..... | 32 |
| 3.4. Obiektywna ocena drgań wg EN 12299:2009..... | 32 |
| 4. CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWA ANALIZA SYGNAŁÓW | 40 |
| 4.1. Transformata falkowa..... | 41 |
| 5. CEL, ZAKRESI TEZA PRACY | 44 |
| 6. BADANIA WSTĘPNE | 45 |
| 6.1. Badania..... | 45 |
| 6.2. Obiektywna ocena poziomu komfortu..... | 46 |
| 6.3. Interpretacja wyników ciągłej transformacji falkowej CWT..... | 47 |
| 6.4. Analiza czasowo-częstotliwościowa sygnałów przyspieszenia..... | 54 |
| 6.5. Wnioski..... | 59 |
| 7. BADANIA SUBIEKTYWNE | 60 |
| 7.1. Badania polowe..... | 60 |
| 7.2. Analiza kwestionariuszy..... | 63 |
| 7.3. Analiza zarejestrowanych danych..... | 65 |
| 8. MODEL LOGISTYCZNY | 73 |
| 8.1. Regresja logistyczna..... | 73 |
| 8.2. Model regresji logistycznej..... | 74 |
| 8.3. Model regresji logistycznej porządkowej..... | 76 |
| 8.4. Budowa modelu..... | 77 |

| | |
|--------------------------------------|------------|
| 9. WNIOSKI..... | 87 |
| 10. PLAN DALESZYCH PRAC | 91 |
| LITERATURA | 93 |
| SPIS RYSUNKÓW | 98 |
| SPIS TABEL..... | 102 |
| DODATKI..... | 103 |
| Załącznik A | 103 |
| Załącznik B | 104 |
| Załącznik C | 105 |
| Załącznik D | 107 |
| Załącznik E..... | 108 |
| Załącznik F | 113 |
| Załącznik G | 114 |

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a – skala (2-325),
- a_x - nieważone przyspieszenie podłużne,
- a_y - nieważone przyspieszenie poprzeczne,
- a_z - nieważone przyspieszenie pionowe,
- f_p – częstotliwość próbkowania sygnałów podczas badań komfortu,
- f_x – częstotliwość sygnału a_x , zidentyfikowana przez ciągłą transformatę falkową,
- f_y – częstotliwość sygnału a_y , zidentyfikowana przez ciągłą transformatę falkową,
- f_c – częstotliwość centralna falki matki,
- ψ – falka matka.

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW

- CWT – ciągła transformata falkowa,
- CZKJ – chwilowe zaburzenia komfortu jazdy,
- MTVV – maksymalna wartość średniokwadratowa dla okresu T,
- OUC – osobiste urządzenie oceny,
- r.m.s. – wartość średniokwadratowa (ang. root mean square),
- r.m.q. – wartość średniokwadratowa do potęgi 2 (ang. root mean quad),
- STFT – krótkoczasowa transformacja Fouriera,
- VDV – doza drgań (ang. vibration dose value).

1. WSTĘP

Pierwsze wzmianki o wpływie drgań na człowieka sięgają 1877 roku, kiedy to Erisman zaobserwował zmiany chorobowe u pracowników transportu. Pierwsze publikacje autorstwa G. Luriga w 1910 i 1911 dotyczące dolegliwości zdrowotnych u pracowników stosujących narzędzia udarowe zapoczątkowały badania nad wpływem drgań na organizm człowieka wielu ośrodków naukowych na całym świecie [1]. W miarę rozwoju gospodarczego podnosił się standard życia, co powodowało uwzględnienie drgań nie tylko ze względu na zdrowie człowieka, ale również na jego komfort. Wieloletnie badania zaowocowały odpowiednimi przepisami, normami i zaleceniami dającymi podstawę do jednolitego rejestrowania, analizowania i oceniania drgań działających na człowieka. Jednak obecne normy nie dają wyczerpującej informacji o wpływie wibracji na człowieka ze względu na niewystarczającą znajomością dynamicznych charakterystyk ciała człowieka oraz złożoność procesu drganiowego w układzie człowiek-maszyna jak również mnogość środowisk, których nie można wspólnie opisać ogólnymi normami. W obecnym czasie gdzie komfort podróżowania czy też pracy jest ważnym czynnikiem, szczególnego znaczenia zaczynają nabierać chwilowe zaburzenia komfortu jazdy. Z tego typu zaburzeniami komfortu mamy do czynienia w komunikacji miejskiej. Przystanki tramwajowe czy autobusowe oddalone od siebie o kilka minut, poruszanie się w korkach, częste zmiany kierunku jazdy lokalnie nienajlepszy stan torowisk. To czynniki, które mają główny wpływ na pojawienie się chwilowych zaburzeń komfortu jazdy, takich jak hamowanie i przyspieszenie, krótkookresowe drgania poprzeczne czy też pionowe. Zazwyczaj mają charakter losowy i pojawiają się w krótkich odcinkach czasu. Dla obliczenia wartości komfortu średniego chwilowe piki w sygnale przyspieszeń drgań są niezauważalne natomiast są odczuwane i oceniane przez pasażera.

Autor przeprowadził badania w kilku wybranych tramwajach krakowskiej komunikacji miejskiej. W ostatecznych badaniach udział wzięło 14 losowo wybranych osób, które miały za zadanie oceniać w sposób ciągły dyskomfort jazdy na sześciopozomowej skali. Dla opisanie relacji pomiędzy subiektywnymi ocenami pasażerów oraz wynikami transformaty falkowej sygnałów przyspieszeń drgań rejestrowanych w tym samym czasie wykorzystano regresję logistyczną porządkową. Dzięki transformacji falkowej uzyskano jednoczesny dostęp do wartości parametrów opisujących chwilowe zaburzenia komfortu jazdy tj. amplitudy, częstotliwości i położenia na osi czasu. Informacja ta nie są możliwe do uzyskania przy wykorzystaniu transformaty Fouriera. Ze względu na porządkowy charakter zmiennej opisywanej tj. subiektywnych ocen zastosowano model regresji logistycznej. Wprowadzono modyfikacje modelu polegającą na uwolnieniu hiperpłaszczyzn z warunku równoległości, co zwiększyło elastyczność modelu. Pozwoliło to na zaobserwowanie zmian wpływu poszczególnych zmiennych opisujących na ocenę poszczególnych poziomów komfortu. Analiza statystyczna wykazała znaczący wpływ tylko niektórych zmiennych opisujących, które zmieniły swój udział wraz ze zmianą poziomu oceny.

Model logistyczny ponadto może służyć, jako narzędzie oceny stanu technicznego tramwaju, torowiska czy też charakteru jazdy motocyklisty. Wykorzystując GPS często już montowany seryjnie na pokładzie tramwaju można zbudować mapę komfortowej prędkości jazdy dla sieci komunikacyjnej czy też system uczący się on-line.

2. CHARAKTERYSTYKA KOMFORTU JAZDY

2.1. Komfort jazdy

Komfort wg Władysława Kopalińskiego to – zespół urządzeń, warunków, zapewniający wygodę odpowiadającą w pełni wymaganiom estetyki [2].

Według Słownika Języka Polskiego [3] komfort definiowany jest następująco:

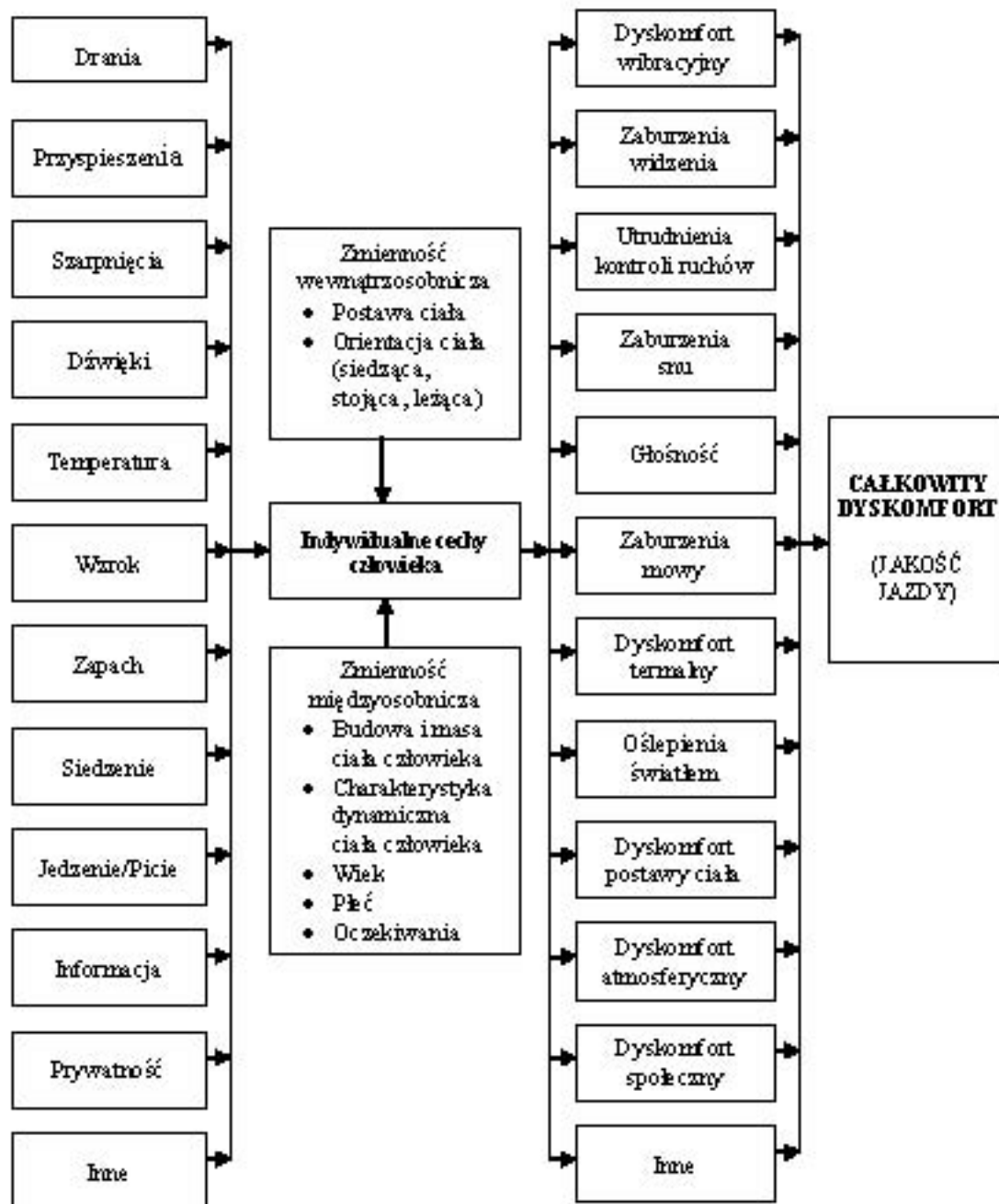
- ogół warunków zewnętrznych zapewniających człowiekowi wygodę, odznaczających się dostatkami i elegancją,
- stan zaspokojenia potrzeb fizycznych i psychicznych oraz braku kłopotów.

Ze względu na charakterystykę człowieka, jako struktury złożonej, aktywnej, inteligentnej i dynamicznej [4] [5] nie istnieje jedna uniwersalna definicja komfortu. Każdy człowiek ma swoją własną definicję zdeteminowaną wieloma czynnikami. Na rysunku nr 2.1 przedstawiono schematycznie główne czynniki mające wpływ na poziom jakości jazdy. Jakość jazdy (ang. *ride quality*) zdefiniowano, jako reakcja pasażera na warunki fizyczne panujące wewnątrz pojazdu takie jak zmienne dynamiczne pojazdu, zmienne środowiskowe i przestrzenne [6]. Na schemacie tym można zaobserwować bardzo dużą liczbę czynników tak zewnętrznych jak i ludzkich mogących wchodzić w interakcje, potęgując lub łagodząc poziom odczuwanej, jakości jazdy [4] [7]. Rzeczywistość ta przysparza wyjątkowych trudności w określeniu jednej uniwersalnej obiektywnej formuły opisującej poziom, jakości jazdy. Wśród skutków oddziaływania bodźców zewnętrznych jest *dyskomfort wibracyjny* zdefiniowany, jako dyskomfort spowodowany oddziaływaniem wyłącznie drgań na ciało człowieka [4].

Duży wpływ na ocenę dyskomfortu wibracyjnego mają indywidualne psychofizyczne cechy człowieka. Można je podzielić na dwie grupy. Zmienność wewnątrzsobnicza (zmiany zachodzące przez cały czas w ciele człowieka) i międzysobnicza (różnice pomiędzy osobami), które powodują różne oceny tych samych drgań przez różne osoby, co wyraźnie widoczne jest podczas badań grupy osób.

Jednym z czynników charakteryzujących zmienność międzysobniczą człowieka jest rozmiar ciała. Osoby o większych rozmiarach ciała są mniej wrażliwi na niskie częstotliwości (<6,3 Hz) oraz bardziej wrażliwi na wysokie częstotliwości w stosunku do osób o mniejszych rozmiarach ciała. Osoby o dużej wartości funkcji transmitancji (tzn. większej amplitudzie drgań głowy) są bardziej wrażliwe na drgania aniżeli osoby o małej wartości funkcji transmitancji. Podczas badań laboratoryjnych [4] zaobserwowano znikomy wpływ wieku człowieka na poziom oceny komfortu. Badania również wykazują większą wrażliwość na drgania kobiet niż mężczyzn. Dyskomfort wibracyjny może się zmienić wraz z doświadczeniami, które człowiek doznał w przeszłości. Im wyższego dyskomfortu osoby doznały w przeszłości tym łatwiej przychodzi im oceniać obecne doświadczenia, jako bardziej niekomfortowe. Oczekiwanie wysokiego poziomu komfortu np. w luksusowym samochodzie ma wpływ na zawyżanie ocen dyskomfortu, jeśli się już owy pojawi. Często wraz z drganiami pojawia się hałas. Jednoczesny wpływ tych dwóch bodźców jest dość złożonym zjawiskiem. Przy małych wartościach amplitudy drgań hałas może maskować dyskomfort pochodzący od drgań. Przy dużych wartościach amplitudy drgań i wysokim poziomie hałasu ocena staje się sumą ocen poszczególnych wielkości.

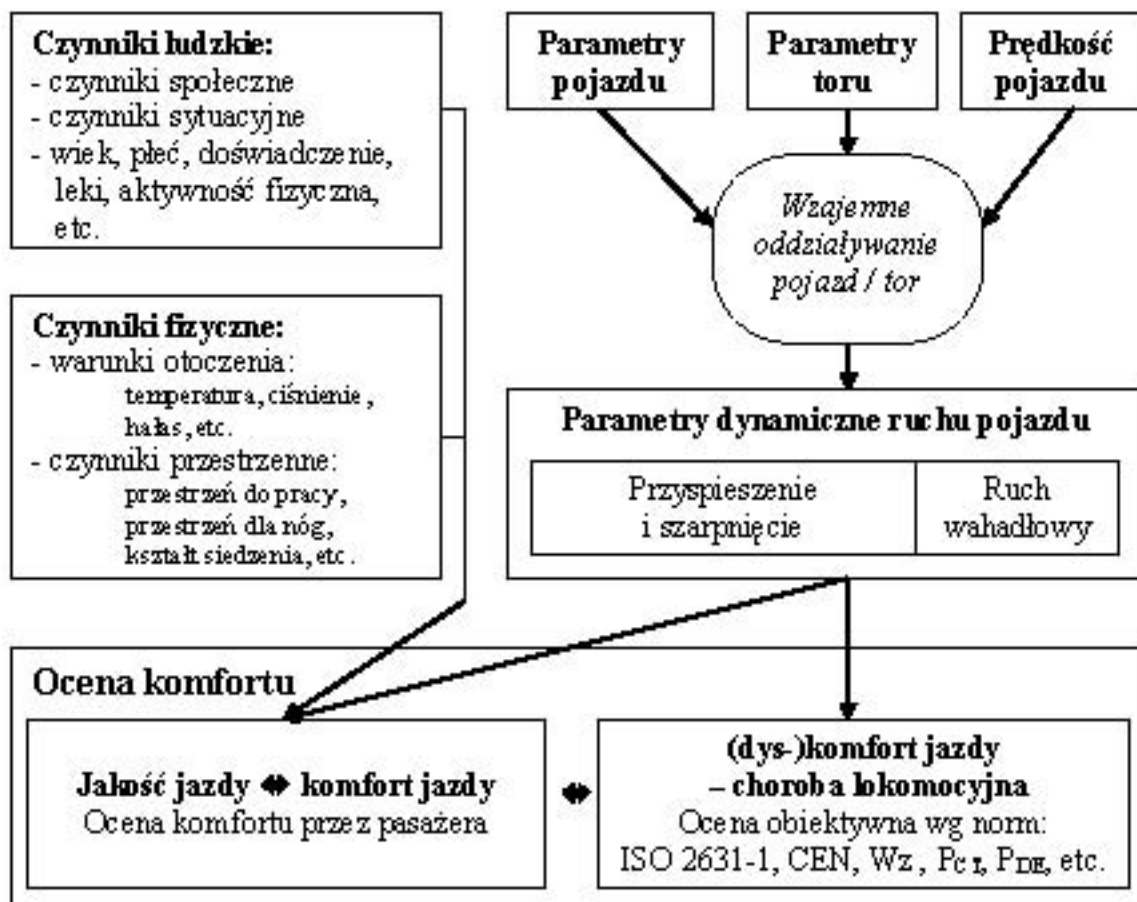
Zmienność wewnątrzsobnicza jest drugą grupą czynników mających wpływ na ocenę poziomu komfortu. Zmieniając orientację ciała w stosunku do pojazdu można zmniejszyć dyskomfort wibracyjny. Przykładem jest tutaj sytuacja, w której pasażer siedzący bokiem do kierunku jazdy odczuwa mniejszy dyskomfort niż pasażer siedzący przodem do kierunku jazdy podczas drgań podłużnych. W maszynach roboczych podczas ciągłych drgań w kierunku podłużnym operatorzy często pochylają się lekko do przodu, aby uniknąć kontaktu pleców z oparciem siedzenia.



Rys. 2.1 Czynniki środowiska zewnętrznego i indywidualne cechy człowieka mające wpływ na ocenę jakości jazdy [4].

Podczas poruszania się pojazdów szynowych dochodzi do interakcji pomiędzy parametrami pojazdu, parametrami torowiska oraz prędkością jazdy, które to interakcje powodują określoną dynamikę ruchu pojazdu. Parametry dynamiczne pojazdu tj. przyspieszenia, drgania i szarpnięcia bezpośrednio wpływają na pasażera i jego ocenę

komfortu jazdy. Forsberg [6] wprowadził termin *komfort jazdy* (ang. *raide comfort*) oraz zdefiniował go, jako techniczną (obiektywną) ocenę wielkości dynamicznych poruszającego się pojazdu.



Rys. 2.2 Interakcje subiektywnej oceny jakości jazdy oraz obiektywnej oceny komfortu jazdy. Ocena pasażera (jakość jazdy) jest wynikiem indywidualnych cech człowieka, czynników zewnętrznych jak i dynamiki ruchu pojazdu. i innych zmierzonych fizycznych, natomiast (dys-)komfort jazdy zależy tylko od wielkości dynamicznych ruchu pojazdu.

Na rys. 2.2 przedstawiono schemat blokowy z bardziej szczegółowym opisem dyskomfortu wibracyjnego dla transportu szynowego, który zawarł w swojej pracy Forsberg [6]. Na ogólną ocenę komfortu (*jakość jazdy*) mają wpływ czynniki ludzkie, fizyczne oraz parametry dynamiczne ruchu pojazdu [8] [9]. Na ocenę obiektywną komfortu jazdy mają wpływ tylko parametry dynamiczne pojazdu. Pomiędzy oceną subiektywną pasażera a oceną obiektywną również istnieje interakcja dająca możliwość formułowania odpowiednich wskaźników *komfortu jazdy* na podstawie ocen pasażerów.

Komfort jazdy, jako reakcja człowieka i ocena techniczna wielkości dynamicznych można podzielić na następujące kategorie:

- Średni poziom komfortu/ dyskomfortu jazdy dotyczący tylko przyspieszeń (podłużnych, poprzecznych i pionowych) w przedziale od 0.5 do 80 Hz. Wyższy średnia wartość wskazuje na obniżony poziom komfortu i podwyższony poziom dyskomfortu. Ocenę średniego komfortu jazdy można przeprowadzić posługując się niemieckim wskaźnikiem Sperlinga Wz,

brytyjskim wskaźnikiem Ride Index , N_{MV} [10], kartą UIC 513R [11] lub normami ISO 2631:97 [12], BS 6841:87 [13].

- *Subiektywny poziom komfortu jazdy* – osoby oceniają komfort jazdy na pięciopoziomowej skali od 1 (bardzo zły komfort jazdy) do 5 (bardzo wysoki komfort jazdy) [6].
- *Zaburzenia komfortu jazdy*
 - Pierwszy typ tych zaburzeń nazwany komfortem w warunkach *dyskretnych wymuszeń* (ang. *discrete event*, P_{DE}) wynika z nagłych wibracji spowodowanych przejazdami przez rozjazdy lub nierówności torowiska na odcinkach prostych lub łukach kołowych. Zaburzenia te zazwyczaj powodują trudności w chodzeniu, utrzymaniu stabilnej pozycji stojącej, czytaniu i pisaniu. Wibracje mogą występować tak w przedziale wysokich jak i niskich częstotliwości drgań.
 - Drugi typ zaburzeń to komfort na krzywych przejściowych (*curve transition*, P_{CT}) spowodowany wysokim przyspieszeniem poprzecznym a' lub szarpnięciem poprzecznym podczas pokonywania krzywych. Przyspieszenia i szarpnięcia są efektem zmieniającej się geometrii torowiska. Zaburzenia te mogą powodować trudności z utrzymaniem stabilnej pozycji stojącej lub z chodzeniem.

W niniejszej pracy Autor będzie posługiwał się pojęciem chwilowych zaburzeń komfortu jazdy (CZKJ) rozumianych, jako każdego rodzaju zaburzenie komfortu jazdy wynikające z nagłych wibracji spowodowanych jakąkolwiek sytuacją podczas jazdy czy też stanem i geometrią torowiska czy też pojazdu.

Publikacja autora [14] może być uzupełnieniem powyższego rozdziału szczególnie w zakresie komfortu psycho-fizycznego.

2.2. Przyczyny i źródła drgań

Pojazd szynowy podczas jazdy wykonuje ruch podstawowy, będący ruchem postępowym, oraz ruch wibracyjny określony, jako szkodliwy. Ruchy wibracyjne charakteryzują się określonym przyspieszeniem i częstotliwością drgań, nakładając się na ruch postępowy i przebiegają w sposób okresowy lub zbliżony do okresowego, a czasem mają charakter losowy. Stałe ich występowanie może być przyczyną różnych zjawisk szkodliwych, takich jak: pęknięcia zmęczeniowe elementów pojazdu i toru, zmniejszające ich trwałość, niebezpieczeństwo zjechania pojazdu z toru, szkodliwy wpływ na ludzi lub załogę jak również szkodliwy wpływ na przewożony towar.

Przyczynami drgań pojazdów szynowych są następujące czynniki:

- Charakterystyka toru, a więc jego właściwości dynamiczne, określone przez pionowe i poziome odkształcenia sprężyste oraz wszelkie geometryczne nierówności (na złączach szyn, na powierzchni toczonej główki szyny, lokalne pochyłości, zakrzywienia itp.)
- Charakterystyka powierzchni toczonej kół pojazdu, czyli kształt powierzchni wieńców kół o zarysie stożkowym lub krzywoliniowym, niedokładności wykonania kół, jak mimośrodowość i owalność oraz wszelkie zmiany kształtu powierzchni toczonej kół wskutek zużycia, uszkodzeń mechanicznych (spłaszczenia, nalepy), sprężyste i plastyczne odkształcenie kół;

- Tarcie powierzchni kół o szynę;
- Zmiany prędkości i kierunku jazdy, obejmujące ruch jednostajny i zmienny, oraz jazdę po prostej, wjazd w łuk, jazdę po łuku, wyjście z łuku na prostą;
- Dynamiczne oddziaływania układu napędowego na pojazd;
- Dynamiczne wzajemne oddziaływanie wagonów wchodzących w skład tramwaju.

2.3. Wpływ drgań ogólnych na organizm człowieka

Wiele czynników może powodować dyskomfort jazdy w poruszającym się pojeździe. Jednym z nich są drgania, których spektrum występuje w funkcji prędkości jazdy, rodzaju i stanu nawierzchni, konstrukcji zawieszenia pojazdu oraz jego stanu technicznego. Gdy drgania są wymuszone przez siedzenie i przenoszone są przez miednicę i plecy lub stopy, to mamy do czynienia z drganiami ogólnymi.

Ocena drgań ogólnych jest dość trudna ze względu na charakter ciała człowieka. Każdy człowiek inaczej tłumia drgania, każdy człowiek ma inne właściwości fizyczne, fizjologiczne i psychiczne. Największe zagrożenia dla ciała ludzkiego wywołują drgania rezonansowe narządów wewnętrznych, tzn. narządów klatki piersiowej i jamy brzusznej, ponieważ te narządy mają największe możliwości przemieszczania się. Uszkodzenie narządów wewnętrznych występuje wtedy, gdy tłumienie drgań (przez narządy, tkanki, płyny otrzewnowy, powietrze, gazy znajdujące się w narządach) jest niewystarczające, aby dostatecznie wytłumić drgania rezonansowe. U operatorów pojazdów, którzy pracują w pozycji siedzącej, największe wytłumienie drgań, szczególnie wysokich częstotliwości, następuje przez pośladki. Dalsze wytłumienie drgań ogólnych zachodzi przy przenoszeniu ich przez kręgosłup. Stopień tego tłumienia zależy od wielkości i wzrostu sił działających na kolejne pary sąsiadujących kręgów w kierunku długiej osi ciała.

Tab. 2.1 Orientacyjne częstotliwości rezonansowe części ciała człowieka dla drgań pionowych [5].

| Części ciała | Częstotliwość [Hz] |
|---------------------------|--------------------|
| Głowa | 4-6, 20-30 |
| Szczeka | 6-8 |
| Gałki oczne | 40 - 90 |
| Narządy klatki piersiowej | 5-9 |
| Narządy jamy brzusznej | 4,5-10 |
| Kończyny górne | 3, 6, 25 i 250 |
| Kończyny dolne | 2-20 |
| Pęcherz moczowy | 10-18 |
| Kręgosłup | 10-12 |
| Człowiek siedzący | 5-12 |
| Człowiek stojący | 4-6 |

Małe częstotliwości drgań powodują na przemienne ściskanie i rozciąganie kolumny kręgowej i rozchodzenie fali drganiowej wzdłuż ciała człowieka. W czasie tego rozchodzenia następuje wytłumienie amplitudy drgań i na głowę człowieka, która

jest podłożem procesów postrzegania, myślenia, zapamiętywania i świadomości człowieka, zostaje przeniesiona tylko nieznaczna część drgań [15].

Nasilenie zaburzeń fizjologicznych uzależnione jest od ilości energii zawartej w drganiach przekazywanej ciału człowieka. Ilość tej energii jest proporcjonalna do czasu narażenia na drgania, powierzchni kontaktu ciała z elementem drgającym, natężenia drgań.

Z badań przeprowadzonych w Instytucie Transportu Politechniki Warszawskiej wynika, że w pojazdach szynowych występują drgania w zakresie częstotliwości od 0 do 200 Hz, przy czym najczęściej występują pasma 0 – 4 Hz, 6 – 12 Hz, 60 – 120 Hz, dla których amplitudy przyspieszeń przyjmują szczególnie duże wartości. Pasma te wynikają z częstości własnych masy usprężynowanej i nieusprężynowanej pojazdu, nierówności toru, stanu toru i pojazdu, itp. [16].

W tabeli nr 2.1 przedstawiono wartości częstotliwości rezonansowych dla wybranych części ciała człowieka.

Oprócz skutków chorobowych takich jak: choroba wibracyjna i choroba lokomocyjna, wibracje mogą powodować przejściowe zaburzenia czynności wielu narządów i ośrodków nerwowych, przejawiające się między innymi w zmniejszeniu sprawności wykonywania określonej pracy [17]. W zależności od stopnia intensywności oddziaływujących drgań u człowieka powstaje stan zmęczenia ogólnego, tj. poczucia zmniejszonej wydolności psychofizycznej. Ludzie dotknięci tym stanem są ograniczeni w działaniu, wykazują niechęć do pracy umysłowej i fizycznej. Dłuższe przebywanie w zakresie drgań intensywnych powoduje zmiany czynności kory mózgowej, która jest podłożem procesów postrzegania, myślenia, zapamiętywania, odbierania wrażeń subiektywnych. Stwierdzono również zmniejszenie zdolności widzenia. Wykazano, że drgania oprócz powodowania zmian czynności kory mózgowej mechanicznie wpływają także na gałki oczne, powodując przesuwanie się obserwowanego obrazu na siatkówce oka, powstaje wówczas wrażenie obrazu zamazanego. Oprócz obniżenia zdolności widzenia zwiężają się granice pola widzenia i szybkości postrzegania. Narażenie narządu wzroku na drgania może być przyczyną obniżenia bezpieczeństwa ruchu na skutek trudności w odczytywaniu wskazań przyrządów, opóźnienia postrzegania przeszkód, mylnego rozróżniania barw itp. Szczególnie niebezpieczne dla organizmu ludzkiego są drgania o częstotliwości wymuszeń odpowiadających częstotliwościom drgań własnych poszczególnych narządów człowieka (tab. 2.1). Wówczas nawet małe drgania z otoczenia mogą wzbudzić drgania rezonansowe poszczególnych narządów, doprowadzając do wystąpienia zjawisk patologicznych wpływających negatywnie na wydajność pracy i zdrowia człowieka.

Liczbę osób narażonych na drgania i ich po wibracyjne skutki w transporcie należy ograniczyć jedynie do pracowników. Użytkowników transportu szynowego trudno uznać za osoby narażone ze względu na zbyt krótki czas ekspozycji. W tym przypadku możemy mówić raczej o przebijających zaburzeniach ustroju pod wpływem wibracji na skutek np. obniżenia *komfortu jazdy* (dyskomfortu).

2.4. Główne czynniki fizyczne i ich wpływ na dyskomfort

Wraz z postępem technologicznym pojęcie dyskomfortu wibracyjnego ulega unifikacji i normalizacji. Producenci samochodów, maszyn roboczych, narzędzi i innych urządzeń emitujących wibracje dążą do porównywania swych produktów. Z drugiej strony, przedstawiciele medycyny pracy dążą do ustalenia nieprzekraczalnych wartości standardowych. W celu zmniejszenia narażenia osób pracujących z urządzeniami emitującymi drgania wprowadzono wielkości obiektywne, których

średnie wartości statystyczne opisują różne stopnie dyskomfortu. Nie istnieją uniwersalne granice dyskomfortu spowodowane wibracjami. W obszarze klasy samochodów osobowych możemy mieć inne granice dla samochodu rajdowego a inne dla samochodu, którym dojeżdżamy do pracy. Poniżej opisano wpływ podstawowych wielkości na stopień dyskomfortu odczuwanego przez człowieka poddanego wibracjom ogólnym [5].

2.4.1. Wpływ amplitudy przyspieszenia

Amplitudy przyspieszenia drgań pionowych przy wibracji ogólnej, z zakresu częstotliwości od 1 do 100 Hz, rzędu $0,01 \text{ m/s}^2$ r.m.s. są absolutnym progiem percepcji drgań przez człowieka. Przyspieszenie $0,1 \text{ m/s}^2$ r.m.s. jest łatwo odczuwalne. Przyspieszenie rzędu 1 m/s^2 r.m.s. są zwykle odczuwane, jako niekomfortowe. Przyspieszenia powyżej 10 m/s^2 r.m.s. są uważane za niebezpieczne [5].

Wskaźnik wzrostu poziomu dyskomfortu wraz ze wzrostem amplitudy drgań jest opisany przez prawo Stevensa, gdzie relacja pomiędzy psychofizyczną wielkością, ψ (poziom dyskomfortu), i φ fizyczną wielkością (amplituda przyspieszeń drgań) jest opisany zależnością:

$$\psi(\varphi) = k \cdot \varphi^\beta \quad (2.1)$$

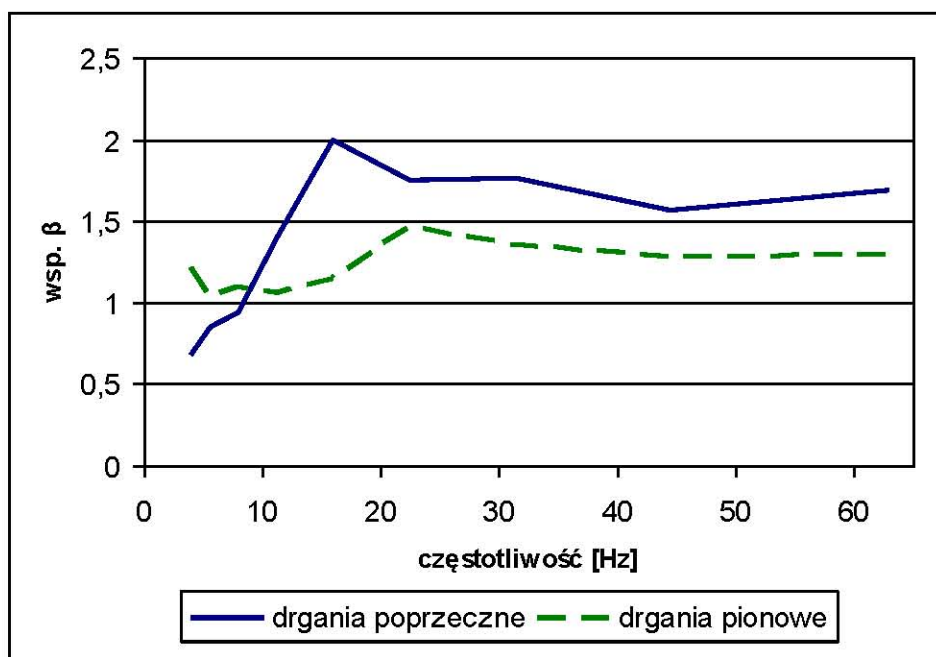
gdzie:

ψ - jest psychofizyczną funkcją (wyznaczoną doświadczalnie) wiążącą subiektywną wielkość odczucia (wrażenia) wywołanego przez bodziec z bodźcem,

k - stała zależna od rodzaju bodźca i użytych jednostek,

φ - jest fizycznym natężeniem bodźca,

β - wykładnik potęgowy zależny od rodzaju bodźca.



Rys. 2.3 Obliczona wartość wykładnika β wg prawa Stevensa na podstawie eksperymentu dla drgań ogólnych w przedziale wartości r.m.s. $0,04 - 0,4 \text{ m/s}^2$ [4].

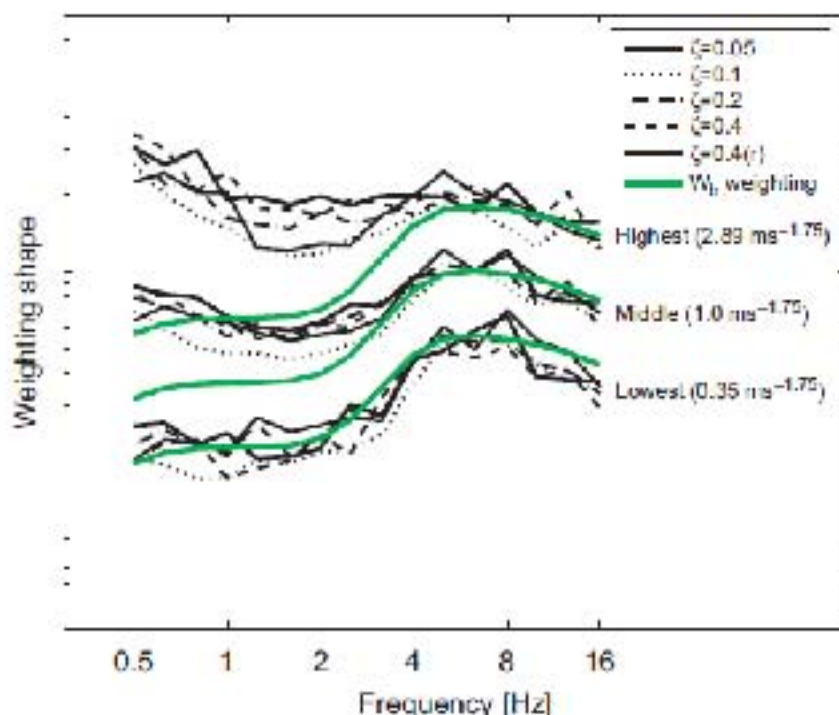
Pierwsze badania sugerowały, że podwojenie amplitudy drgań spowoduje podwojenie poziomu dyskomfortu ($\beta = 1$). W 1988 r. Howarth i Griffin przeprowadzili eksperyment mający na celu określenie wartości wykładnika β dla drgań ogólnych w kierunku osi pionowej Z i poziomej Y (rys. 3.1), dla dziewięciu wartości częstotliwości drgań sinusoidalnych. Wartość amplitudy drgań zawierała się w przedziale r.m.s. od 0,04–0,4 [m/s²]. W przypadku drgań poprzecznych możemy zaobserwować znaczące różnice w wartości wyliczonego wykładnika β w funkcji częstotliwości, natomiast w przypadku drgań pionowych wartości w mniejszym stopniu różnią się od siebie zgodnie z rys. 2.3. Przeprowadzony eksperyment dowodzi, że poziom dyskomfortu zmienia się nie tylko ze zmianą wartości amplitudy ale również ze zmianą częstotliwości drgań i ich kierunku. Zmniejszenie dwukrotnie amplitudy drgań dla jednej częstotliwości powodować będzie różną ocenę komfortu dla tej samej amplitudy, lecz innej częstotliwości. Na rys. 2.5 widoczne jest podobieństwo krzywej uzyskanej z eksperymentu i krzywej ważenia częstotliwościowego W_b [12].

Tab. 2.2 Wyprowadzona doświadczalnie przez Stevensa wartość wykładnika β dla różnych bodźców i warunków oddziaływania, Stevens (1975) [18].

| Bodziec | Wykładnik (β) | Warunki oddziaływania bodźca |
|------------------------------|-----------------------|---|
| Głośność | 0.67 | Cisnienie akustyczne dla 3 [kHz] |
| Światło | 0.5 | Źródło punktowe |
| Światło | 1 | Źródło punktowe, migające |
| Smak | 1.4 | Sól |
| Smak | 0.8 | Sacharyna |
| Zimno | 1 | Kontakt metalu z ramieniem |
| Ciepło | 1.6 | Kontakt metalu z ramieniem |
| Ciepło | 1.3 | Napromienianie skóry, mała powierzchnia |
| Ból | 1 | Ogrzewanie skóry |
| Siła mięśni | 1.7 | Statyczny skurcz mięśni |
| Porażenie prądem | 3.5 | Przepływ prądu przez palce |
| Dyskomfort, zimno | 1.7 | Napromienianie całego ciała |
| Dyskomfort, ciepło | 0.7 | Napromienianie całego ciała |
| Przyspieszenia kątowe | 1.4 | Ruch trwający 5 [s] |
| Drgania | 0.95 | Częstotliwość 60 [Hz] |
| Drgania | 0.6 | Częstotliwość 250 [Hz] |
| Natężenie głosu | 1.1 | Cisnienie akustyczne głosu |
| Węch | 0.6 | Heptan |
| Dotykanie chropowatości | 1.5 | Pocieranie szorstkiego materiału dłonią |
| Sprawdzanie twardości | 0.8 | Ściskanie palcami gumy |

Badania ostatnich lat [19] [20] wykazały wpływ nie tylko częstotliwości, ale również amplitudy na kształt krzywej ważenia częstotliwościowego W_b . Można zauważyć na rys. 2.4 silnie odbiegające charakterystyki uzyskane z badań w stosunku

do krzywej W_b dla coraz wyższych wartości VDV (2.4) i częstotliwości poniżej 4 Hz. Wraz ze wzrostem VDV drgań krzywa staje się bardziej płaska. Stosunek wrażliwości przy drganiach wysokiej częstotliwości do drgań niskiej częstotliwości maleje wraz ze wzrostem amplitudy drgań, ponieważ współczynnik wzrostu amplitudy drgań (eksponenta n w p. Stevensa - 2.1) jest mniejsza dla wyższych częstotliwości (tab. 2.2).



Rys. 2.4 Porównanie krzywej ważenia W_b [13] z krzywymi uzyskanymi w badaniach dla drgań pionowych o charakterze impulsowym dla różnych wartości amplitudy i współczynników tłumienia ($VDV = 2.89; 1.0; 0.35 \text{ ms}^{-1.75}$) [19].

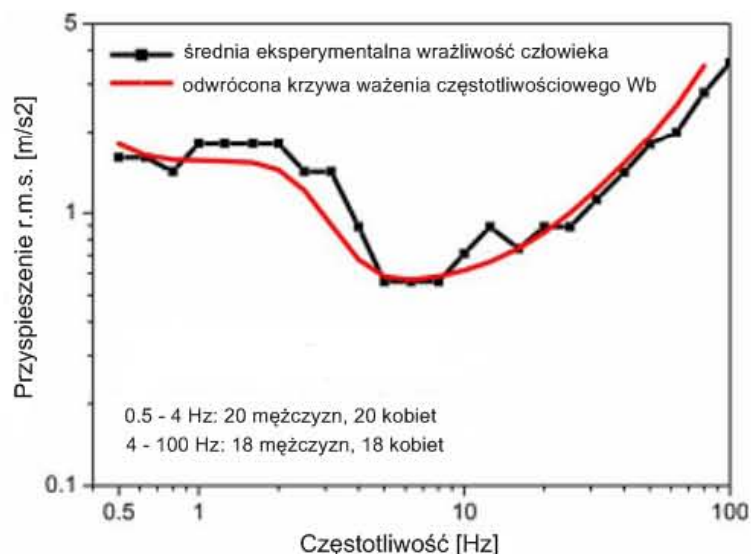
Rezultaty wyżej wspomnianych badań odsłaniają nowe oblicze wrażliwości człowieka na drgania. Okazuje się, że system postrzegania i oceny komfortu jest bardziej złożony niż wydawało się jakiś czas temu. Sytuacja ta wskazuje na potrzebę dalszych badań dla szerszego przedziału wartości zmiennych wpływających na dyskomfort.

2.4.2. Wpływ częstotliwości i kierunku drgań

Badania naukowe początku lat osiemdziesiątych [21] rozwinęły „kontury równego komfortu” pokazując jak dyskomfort zmienia się wraz z częstotliwością drgań w każdym kierunku oraz głównymi interfejsami przekazywania drgań na ciało człowieka. Interfejsami są tu części ciała człowieka będące w kontakcie z siedzeniem. Na rysunku 2.5 przedstawiono porównanie krzywych równego komfortu. Jedną z nich (linia ciągła) jest odwróconą krzywą ważenia częstotliwościowego W_b (rys. 3.2) dla drgań pionowych i pozycji siedzącej zdefiniowaną wg BS 6841:87 [13] oraz ISO 2631-4:2001 [22]. Druga krzywa powstała przez połączenie wyników badań prowadzonych przez Griffina i innych [23] w zakresie częstotliwości od 2 do 100 Hz oraz badań Corbridge i Griffin [24] dla zakresu od 0,5 do 5 Hz.

W jakim stopniu drgania transmitowane są do ciała człowieka zależy nie tylko od amplitudy drgań, ale również od częstotliwości i kierunku ich działania. Drgania o stałej

amplitudzie, ale różnej częstotliwości nie wywołują takiego samego dyskomfortu [21]. Ze względu na charakter ciała człowieka ta sama amplituda i częstotliwość drgań może powodować ten sam poziom dyskomfortu, ale nie musi, stąd pojawiają się krzywe ważenia częstotliwościowego W_f odpowiednio do kierunku działania drgań [19]. Dla niskich częstotliwości (poniżej 1 lub 2 Hz w zależności od kierunku drgań i pozycji ciała) działanie sił na ciało człowieka jest w przybliżeniu proporcjonalne do działającego przyspieszenia. Dla wyższych częstotliwości pojawia się obszar, w którym wiele narządów wewnętrznych człowieka posiada swoje częstotliwości rezonansowe, co powoduje obniżenie poziomu komfortu dla tego zakresu tj. od ok. 2 do 12 Hz. Przy dalszym wzroście częstotliwości drgań wrażliwość ciała człowieka zmniejsza się.



Rys. 2.5 Krzywe równego komfortu. Linia ciągła to odwrócona krzywa ważenia częstotliwościowego W_b dla drgań pionowych i pozycji siedzącej wg norm ISO 2631:97 [12] i BS 6841:87 [13]. Linia ciągła kropkowana pochodzi z badań subiektywnych dla drgań pionowych i pozycji siedzącej w zakresie od 0.5 do 100 Hz [21].

Aktualne standardy [10] [12] [13] [22] definiują krzywe ważenia częstotliwościowego, co zostało szczegółowo omówione w rozdziale 3.1.

2.4.3. Wpływ czasu ekspozycji na drgania

Wpływ czasu ekspozycji na drgania intuicyjnie wydaje się dość oczywisty. Dłuższa ekspozycja na drgania będzie powodować wyższy poziom dyskomfortu. Przykładowo 8 godzin pracy operatora koparki będzie powodować zdecydowanie wyższy dyskomfort niż 15 min pracy w tym samym pojeździe.

Dla scharakteryzowania sygnału zmiennego w czasie używa się bardzo często wielkości r.m.s. zapisanej następująco:

$$r.m.s. = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

gdzie:

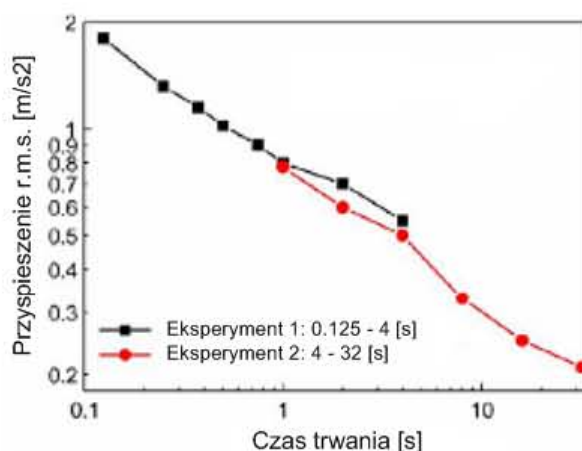
$a_w(t)$ - przyspieszenie ważone w dziedzinie częstotliwości m/s^2 ,

T - czas ekspozycji s.

Jeżeli drgania są procesem stacjonarnym wielkość r.m.s. może dostarczyć użytecznego wskaźnika określającego poziom uciążliwości drgań. Często drgania występujące w pojazdach nie są stacjonarne. Gdy zapytamy osoby o porównanie relatywnego dyskomfortu dwóch sygnałów drgań różniących się tylko czasem ekspozycji, osoby odpowiedzą, że aby uzyskać ekwiwalentny poziom komfortu należy zmniejszyć amplitudę dla drgań z dłuższym czasem ekspozycji. W wyniku badań eksperymentalnych [4], w których zwiększono dwukrotnie wartość amplitudy drgań, subiektywna ocena biorących udział w eksperymencie wskazywała na konieczność aż 16-krotnego zmniejszenia czasu ekspozycji, aby uzyskać taki sam poziom komfortu (rys. 2.6). Tą zależność dobrze opisuje funkcja czwartego stopnia, którą wykorzystano do budowy wskaźnika *r.m.q.* zapisanego poniżej:

$$r.m.q. = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.3)$$

Wskaźnik *r.m.q.* (2.3) daje relatywnie większy udział we wskaźniku przyspieszeń o wyższych wartościach amplitud i wydaje się bardziej wrażliwy na szarpnięcia i inne drgania zawierające okazjonalne piki przyspieszenia [4].



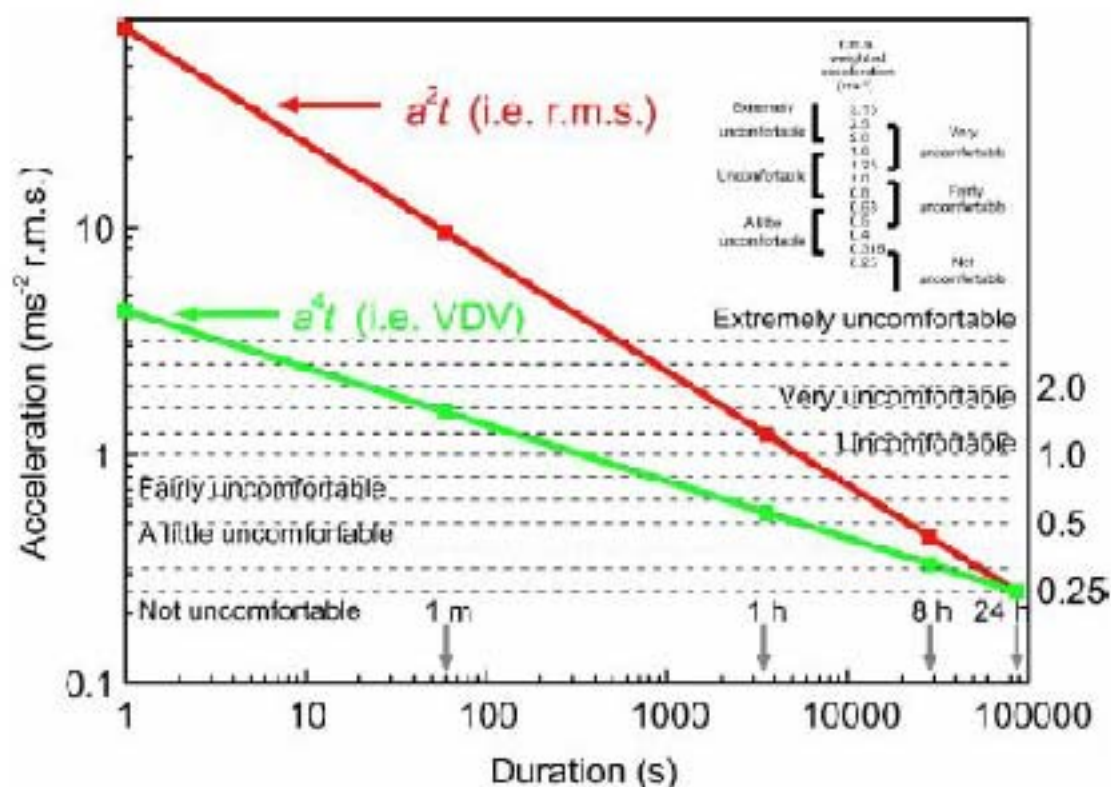
Rys. 2.6 Krzywe równego komfortu w funkcji czasu ekspozycji na drgania [21]. Aby uzyskać ten sam poziom komfortu wraz ze wzrostem amplitudy drgań należy szesnastokrotnie zmniejszyć czas ekspozycji.

Tak *r.m.s.* jak i *r.m.q.* są wartościami średnimi (dzielenie przez czas ekspozycji *T*), które nie wzrastają wraz ze wzrostem czasu ekspozycji w przypadku sygnałów stacjonarnych oraz mają tendencję do zmniejszania swojej wartości wraz ze wzrostem czasu ekspozycji dla sygnałów niestacjonarnych. Drgania w pojazdach są najczęściej sygnałami niestacjonarnymi, co powoduje trudność w zdefiniowaniu początku i końca czasu ekspozycji dla obliczenia *r.m.s.* lub *r.m.q.* dla wybranych zdarzeń. Rozwiązaniem tego problemu jest zależność *VDV* (Vibration Dose Value), bazująca na *r.m.q.* ale bez członu dzielenia przez czas ekspozycji.

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.4)$$

Wskaźnik ten może być używany do ilościowej oceny drgań każdego przebiegu sygnału. Według Griffina [21] wskaźnik ten jest łatwy w użyciu, wrażliwy na piki przyspieszenia i wydaje się bardziej odpowiedni do oszacowania drgań niż wskaźnik *r.m.s.*, który może zmniejszać się lub zwiększać wraz ze zmianą czasu ekspozycji.

Na rysunku 2.7 przedstawiono przebieg zależności a^2t wykorzystany we wskaźniku r.m.s. (czerwona linia) i przebieg zależności a^4t charakterystyczny dla VDV (zielona linia). Można zaobserwować, że przebieg zależności a^2t np. dla czasu ekspozycji 10 s podaje nieakceptowalną wartość amplitudy przyspieszeń ok. 25 m/s^2 r.m.s. Dla tego samego czasu ekspozycji zależność a^4t wskazuje na wartość ok. 2 m/s^2 r.m.s., która jest akceptowalna na poziomie początku granicy ekstremalnego dyskomfortu (rys. 3.3).



Rys. 2.7 Porównanie zależności czasowej a^2t (r.m.s.) oraz a^4t (r.m.s., VDV) [21] na tle poziomów dyskomfortu proponowanych przez normy ISO 2631-1 [12] i BS 6841 [13]. Widoczne jest lepsze dopasowanie krzywej w czwartej potęgze dla subiektywnej oceny drgań człowieka.

Przebieg a^4t wydaje się o tyle lepszym przebiegiem dla oceny komfortu i nie tylko, że pokrywa wszystkie poziomy dyskomfortu tak dla krótkich czasów ekspozycji jak i długich. Przebieg a^2t już dla ekspozycji ok. 1 min podaje wartości przyspieszeń wykraczających daleko poza możliwości akceptacji na poziomie ekstremalnego dyskomfortu. Prze to wskaźnik VDV jest bardziej odpowiedni i użyteczny dla oceny komfortu aniżeli r.m.s.

Powyżej przedstawiono przegląd dostępnej literatury z zakresu definiowania komfortu i subiektywnej jego oceny przez człowieka. Przedstawiono szereg czynników środowiskowych i personalnych mających wpływ na postrzeganie komfortu rozumianego, jako *jakość jazdy*. Następnie przedstawiono definicje *komfortu jazdy*, jako techniczną (obiektywną) ocenę wielkości dynamicznych poruszającego się pojazdu. Opisano przyczyny i źródła drgań nierozzerwalnie występujących w poruszającym się pojeździe. Zamykając rozdział opisano drgania ogólne i wpływ poszczególnych wielkości charakterystycznych na ocenę subiektywną pasażera obecnego w poruszającym się pojeździe.

Czynniki zewnętrzne, o których wspomniano w rozdziale 2.1 można stosunkowo łatwo scharakteryzować i opisać odpowiednimi wielkościami. Problem pojawia się w momencie oceny przez człowieka wpływu pojedynczej wielkości na poziom komfortu, *jakości jazdy*. Z jednej strony każda sobą ma swoją definicję komfortu, z drugiej człowiek jest na tyle dynamicznym obiektem, że poziom oceny może się zmieniać w czasie pod wpływem doświadczeń występujących pomiędzy ocenami tych samych bodźców. Sytuacja staje się jeszcze trudniejsza w momencie wspólnego oddziaływania kilku bodźców jednocześnie. Ze względu na złożony system oceny komfortu przez człowieka ciągle podejmowane są badania naukowe zmierzające do wyjaśnienia wpływu bodźców na ocenę subiektywną człowieka.

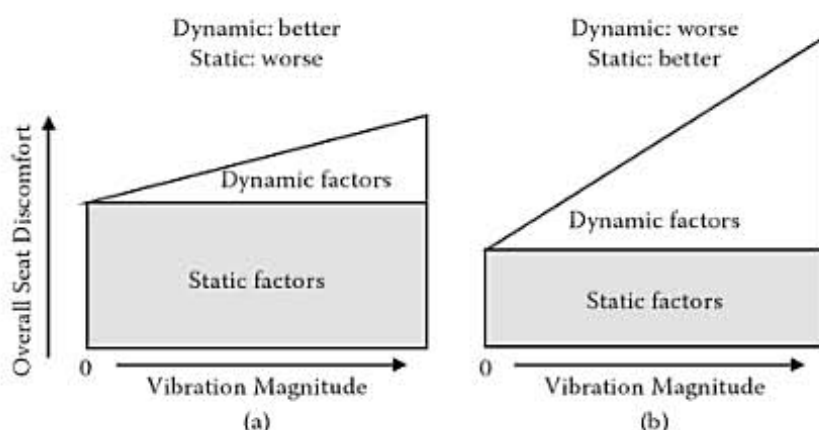
W ostatnim czasie podjęto badania nad dość nowym czynnikiem w sektorze kolejowym, jakim jest zmiana ciśnienia w przedziale pasażerskim w momencie wjeżdżania pociągu do tunelu lub opuszczania go [25]. Czynnikiem ten nie jest aż tak istotny jak komfort termiczny czy też przestrzenny jak zauważyli autorzy publikacji, ale ma wystarczający wpływ, aby się nim zająć. Okazuje się, że 50% pasażerów odczuwa dyskomfort przy wzroście ciśnienia o 30 mbar w przedziale 5 s. Świadomość ta pozwala na usunięcie tego czynnika poprzez zmiany konstrukcyjne pudła lub zredukowania go do akceptowalnego dla pasażerów poziomu. Griffin z zespołem przeprowadzili badania [26] sprawdzające wpływ położenia oparcia wzdłuż wysokości pleców, powierzchni kontaktu oparcia i postury ciała pasażera na ocenę dyskomfortu podczas drgań podłużnych (kierunek x , rys. 3.1). W pierwszym przypadku oparcie miało wysokość 12.5 cm i było umieszczone w pięciu możliwych położeniach. Okazało się, że niskie częstotliwości drgań (3 – 31.5 Hz) wywołują większy dyskomfort dla górnej części pleców niż dla dolnej. Natomiast dla wyższych częstotliwości na odwrót. W wynikach badań nie zauważono wpływu powierzchni kontaktu oparcia na poziom dyskomfortu. Dla częstotliwości niższych niż 10 Hz zauważono zwiększenie się dyskomfortu dla postury zrelaksowanej niż wyprostowanej.

Kolich [27], Lewis i Johnson [28] wskazują na dość pilną potrzebę usystematyzowania procesu projektowania, produkcji i oceny siedzeń pojazdów samochodowych dla zapewnienia właściwej ochrony kierowców przed szkodliwym wpływem drgań jak również zapewnieniem odpowiedniego poziomu komfortu.

Wassim El Falou z zespołem przeprowadził eksperyment [29] na grupie jedenastu mężczyzn. Zadaniem ich było siedzieć na fotelu przez 150 min. Pierwsze badanie przeprowadzono dla dwóch typów foteli: komfortowy i niekomfortowy. W czasie drugiego badania oba fotele były poddane drganiom. W czasie badania osoba była zobowiązana do subiektywnej oceny komfortu, co kilkanaście minut wg komputerowego kwestionariusza. W tych samych odstępach czasu była poddawana badaniu wydajności poprzez pomiar refleksu i sprawność w podążaniu za obiektem na monitorze komputera. W czasie pierwszej godziny znacznie spadła sprawność manualna osób, aby w późniejszym czasie ustabilizować się na stałym poziomie dla wszystkich przypadków z wyjątkiem siedzenia niekomfortowego poddanego wibracjom. W tym przypadku sprawność manualna utrzymywała się na niższym, ale stałym poziomie w czasie całego eksperymentu. Wynik ten sugeruje natychmiastowy wpływ niekomfortowego siedzenia na obniżenie czynności manualnych, którymi może być np. kierowanie samochodem. Natomiast ocena subiektywna wskazywała kilkukrotny wzrost dyskomfortu w czasie 150-cio minutowego badania bez szczególnie dużej różnicy dla niekomfortowego siedzenia poddanego wibracjom.

Z powodu wielu czynników zewnętrznych oddziałujących na człowieka samodzielnie amplituda ważonych przyspieszeń drgań jest niewystarczająca do ogólnej

oceny komfortu [30]. Czynnikiem zewnętrznym jest konstrukcja fotela, sztywność fotela, temperatura, itd. Ebe i Griffin [31] [32] [33] zbudowali model koncepcyjny, w którym sklasyfikowali czynniki nie związane z drganiami jako statyczne i te związane jako dynamiczne. Dla sytuacji gdzie nie występują drgania, ogólny komfort podyktowany jest wyłącznie czynnikami statycznymi. Taka sytuacja może wystąpić np. w salonie samochodowym gdzie klient może w każdej chwili sprawdzić komfort siedzeń. Podczas jazdy samochodem pojawiają się drgania, które zależne od drogi, pojazdu i stylu jazdy mogą zmieniać amplitudy w szerokim zakresie wartości. Relatywne znaczenie czynników dynamicznych siedzenia w porównaniu ze statycznymi czynnikami jest funkcją amplitudy drgań. Kiedy amplituda drgań wzrasta względny udział czynników dynamicznych również wzrasta, dlatego własności dynamiczne siedzenia stają się krytycznymi parametrami dla oceny komfortu.

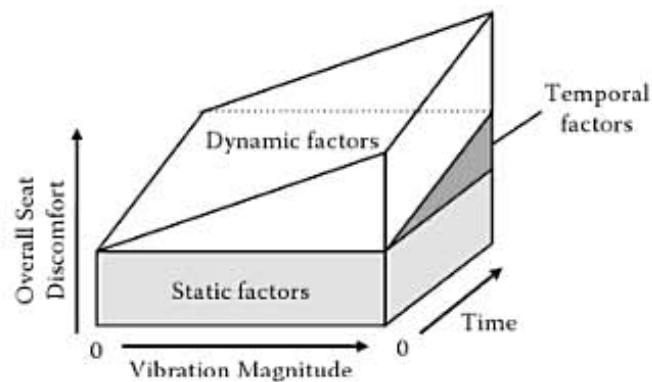


Rys. 2.8 Model koncepcyjny ogólnego komfortu zaproponowany przez Ebe. Względny udział w ocenie drgań czynników statycznych i dynamicznych zmienia się w zależności od amplitudy drgań [32].

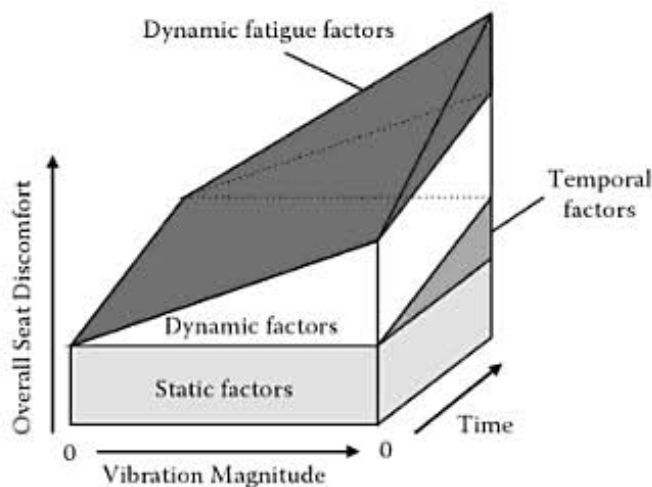
Na rysunku 2.8 przedstawiono model komfortu Ebe gdzie w przypadku (a) udział czynników statycznych jest stosunkowo duży w porównaniu z czynnikami dynamicznymi pomimo wzrastającej amplitudy drgań. Taki model siedzenia (gorsze parametry statyczne lepsze dynamiczne) można zastosować dla pojazdów mocno narażonych na drgania gdzie czynniki dynamiczne siedzenia mogą łagodzić ogólną ocenę drgań przenoszonych przez siedzenia na ciało człowieka. W przypadku (b) model pasuje raczej do siedzenia z luksusowego samochodu jeżdżącego po dobrych drogach. W sytuacji takiej duży udział w ocenie komfortu mają czynniki statyczne tj. sztywność fotela, możliwość dopasowania elementów fotela do ciała człowieka, kształt elementów fotela.

Model Ebe jest użyteczny dla oceny komfortu siedzeń, ale nie uwzględnia czynników chwilowych. Kiedy osoba zajmuje pozycję siedzącą przez dłuższy czas jej ocena dyskomfortu zwiększa się. Mansfield i jego zespół przeprowadzili eksperyment [34] na trzech grupach, z których każda liczyła 12 osób. Grupa pierwsza miała za zadanie siedząc w fotelu samochodowym przez 90 min oceniać poziom komfortu, co dziesięć minut. Grupa druga zobowiązana była do tego samego zadania z tym, że fotel został poddany drganiom o amplitudzie 0.3 m/s^2 r.m.s. w trzech kierunkach (rys. 3.1). Grupa trzecia była w podobnej sytuacji jak druga, z tym, że amplituda drgań wynosiła 0.6 m/s^2 r.m.s. Zaobserwowano wzrost poziomu dyskomfortu tak ze wzrostem amplitudy drgań jak i ze wzrostem czasu ekspozycji. Autorzy podkreślają, że nie można zaniedbać ani statycznych ani dynamicznych czynników dla prawidłowego określania ogólnego poziomu komfortu. Przyznają również, że czynniki te z różną wagą wpływają

w różnych sytuacjach. Podjęto również próbę zastosowania wskaźnika *VDV* dla obiektywnej oceny komfortu na podstawie sygnałów przyspieszeń. Pomiędzy oceną grupy drugiej i trzeciej różnica w ocenie obiektywnej pod koniec testu wyniosła 10% natomiast różnica wartości *VDV* aż 96%. Mansfield na podstawie wyników swoich badań dodał do modelu Ebe czynniki chwilowe poprzez dołożenie osi czasu, co przedstawiono na rysunku 2.9a. Dalsze badania [30] wykazały szybszy wzrost dyskomfortu w przypadku drgającego siedzenia aniżeli nie poddanego drganiom. Zatem obecność drgań staje się relatywnie ważniejsza podczas względnie długiego czasu jazdy np. samochodem. Dlatego też środki minimalizujące ekspozycje pasażerów na drgania w pojazdach stają się bardziej istotne dla uzyskania długoczasowego stałego poziomu komfortu dla pozycji siedzącej. To przyspieszenie wystąpienia dyskomfortu został nazwany zmęczeniem dynamicznym. Model ten przedstawiono na rysunku 2.9b.



(a)



(b)

Rys. 2.9 Modele koncepcyjne Ebe zmodyfikowane przez dodanie osi czasu z powodu czynników chwilowych mających wpływ na ogólną ocenę komfortu w pozycji siedzącej [30].

Na podstawie wyżej opisanego eksperymentu Mansfield ze współpracownikami używając analizy regresji opracował liniowy model uwzględniający jak dotąd cztery wielkości mające wpływ na komfort pozycji siedzącej. Mianowicie należą do nich statyczny dyskomfort (stałe dla siedzenia), zmęczeniowy dyskomfort (zależny od czasu), dyskomfort drgań (zależny od amplitudy) i dyskomfort pochodzący

ze zmęczenia dynamicznego (interakcja pomiędzy ekspozycją na drgania a czasem drgań). Model ten został zapisany poniżej zależnością 2.5.

$$\Psi = s_s + f_t t + d_v a + i_w t a \quad (2.5)$$

gdzie:

Ψ – poziom dyskomfortu,

s_s – stała dyskomfortu statycznego,

f_t – stała zmęczenia,

d_v – stała dyskomfortu drgań

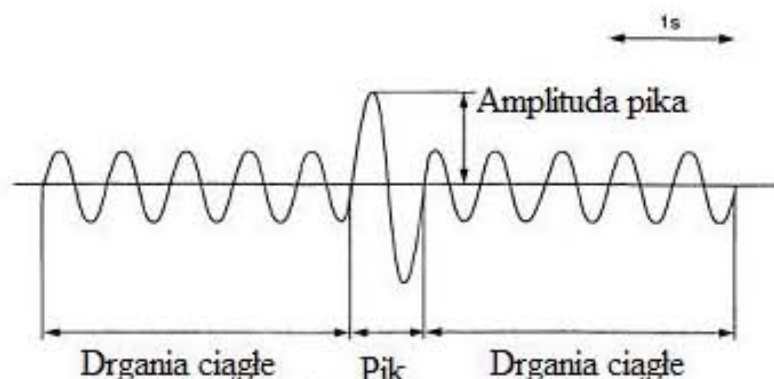
i_w – stała interakcji drgań i czasu ich trwania,

a – amplituda drgań ważonych,

t – czas.

Pomimo tego, że model jest dość prosty, obecnie nie ma dowodu wskazującego na potrzebę bardziej złożonego modelu dającego bardziej wiarygodne wyniki.

Suzuki przeprowadził badania [35], w których grupę dwudziestu dorosłych osób poddał narażeniu na drgania poprzeczne na symulatorze w laboratorium. Osoby zajmowały pozycję stojącą z rozsuniętymi stopami na szerokość ramion przytrzymując się jedną ręką, uchwytu przed sobą. Na pozycję stojącą zdecydowano się ze względu na charakter podróży w Japonii gdzie większość pasażerów podróżuje w pozycji stojącej. Każda osoba była narażona na drgania poprzeczne o strukturze przedstawionej na rysunku 2.10. Parametrami sygnału były dwie niezależne wielkości tj. wartość piku (PV , Peak Value) zmieniająca się w zakresie od 0.35 m/s^2 do 2.0 m/s^2 z interwałem 0.15 m/s^2 oraz wartość współczynnika szczytu CF zmieniająca się od 1.5 do 5.0 z interwałem 0.5, co dało 96 różnych sygnałów. W ten sposób pokryto przedział wartości wielkości wejściowych (PV , CF) zarejestrowany w czasie badań pilotażowych w rzeczywistych warunkach transportu kolejowego.



Rys. 2.10 Struktura sygnału przyspieszenia wykorzystana w eksperymencie Suzuki. Odcinek 5s sygnału z trzema fragmentami odzwierciedlającymi wibracje w tle oraz pik przyspieszenia. Częstotliwość sygnału - 2 Hz.

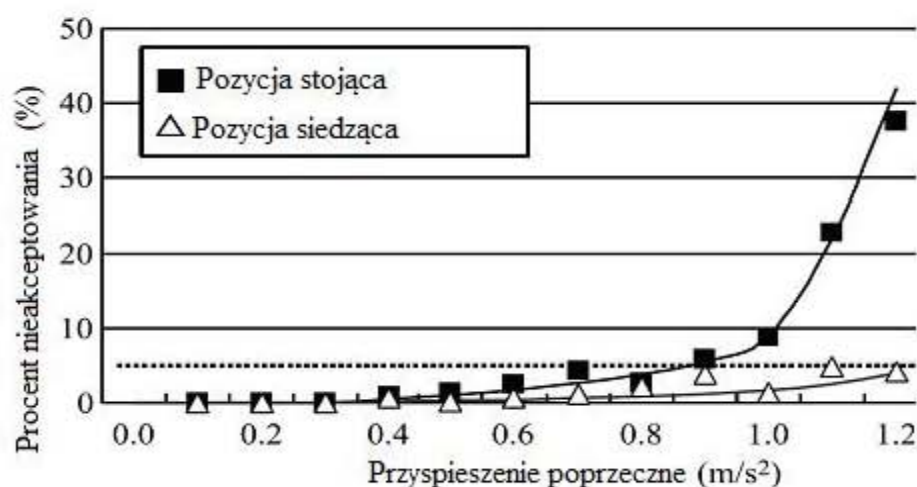
Osoby były zobowiązane do głosowania w czasie 10 s od zakończenia sygnału wg skali sześciostopniowej zaczerpniętej z normy ISO 2631-1. Współczynniki korelacji wyniosły odpowiednio dla PV $r = 0,951$, CF $r = 0,239$ i dla wartości r.m.s. sygnału $r = 0,534$. Na podstawie wyników Suzuki na podstawie swoich badań stwierdził, że PV jest najbardziej właściwym wskaźnikiem do obiektywnej oceny chwilowych zaburzeń komfortu oraz, że CF może być wykorzystywany równolegle dla poprawy korelacji PV

z odczuwanym dyskomfortem. Suzuki podaje trzy przyczyny z powodu, których CF nie jest dobrym wskaźnikiem poziomu dyskomfortu. Mianowicie jego zakres czasowy jest ustalony, jest bezwymiarowy oraz jeśli pojawi się w sygnale nawet duży pik to i tak może on stracić na wartości przy stosunkowo długim sygnale.

W innej publikacji [36] Suzuki wraz z zespołem wskazuje celowość rozwiązań technicznych redukujących drgania w pojazdach, ale także potrzebę rozwoju psychologicznych metod mierzenia odczucia człowieka narażonego na drgania. Suzuki podaje cztery kategorie wskaźników służących do oceny mało znanych obiektów takich jak dyskomfort.

- Ocena psychologiczna (ocena subiektywna poprzez kwestionariusz, metoda wyboru kategorii, itp.)
- Reakcja fizjologiczna (puls, oddychanie, elektroencefalogram EEG, itp.)
- Zmiany w wydajności/aktywności (stopień zaburzeń podczas pisania i czytania, zmiana postury, itp.)
- Biodynamiczne wskaźniki (częstotliwości własne narządów człowieka, funkcja transmitancji ciała człowieka, itp.)

Przyspieszenie boczne jest wskaźnikiem, który w Japonii jest wykorzystywany do oceny obiektywnej komfortu od kilkudziesięciu lat. Według japońskich badań sprzed kilkudziesięciu lat 5 % pasażerów w pozycji stojącej nie toleruje przyspieszenia bocznego o wartości przekraczającej 0.8 m/s^2 . Grupa Suzuki postanowiła sprawdzić te wartości dla obecnej infrastruktury kolejowej różniące się zdecydowanie od tej sprzed kilkudziesięciu lat. Zdecydowano o wprowadzeniu dodatkowej wielkości mierzonej pod czas badań mogącej lepiej opisać subiektywną oceny pasażerów. W badaniach w warunkach rzeczywistych wzięło udział 293 osób. Badania przeprowadzono dla pozycji stojącej i siedzącej.

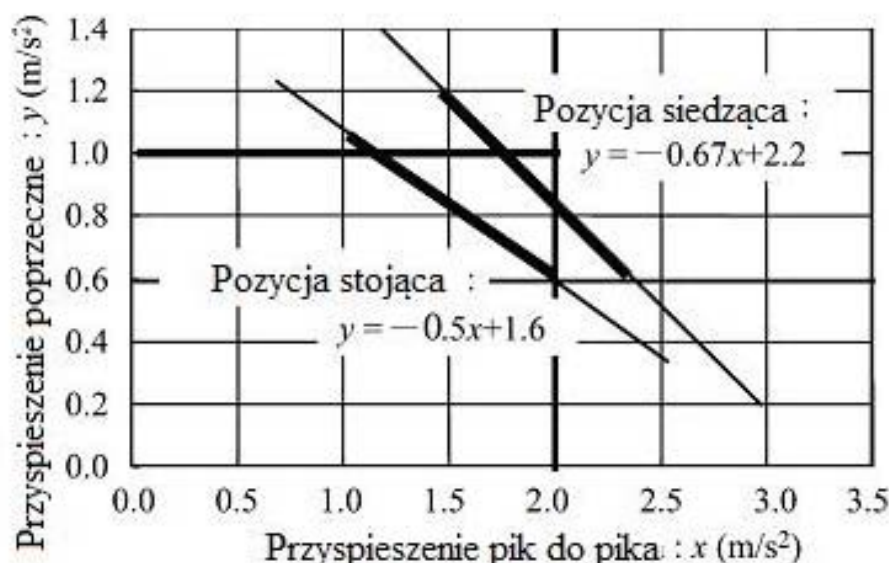


Rys. 2.11 Wyniki badań Suzuki dla komunikacji kolejowej [36]. Widoczny nagły wzrost odsetek osób niezadowolonych z komfortu dla pozycji stojącej dla przyspieszenia poprzecznego o wartości powyżej 1 m/s^2 .

Wyniki badań przedstawiono na rysunku 3.6. Można zauważyć dla pozycji stojącej gwałtowny wzrost poczucia dyskomfortu dla przyspieszeń poprzecznych o amplitudzie większej niż 1 m/s^2 . Dla pozycji siedzącej nie zanotowano gwałtownego wzrostu dyskomfortu w całym przedziale przyspieszenia bocznego tzn. do $1,2 \text{ m/s}^2$. Dla nie więcej niż 10 % osób pozycja siedząca był niekomfortowa dla zakresu

do $1,2 \text{ m/s}^2$. Dyskomfort tak dla siedzących jak stojących osób nie zmieniał się znacząco do wartości $0,8 \text{ m/s}^2$. Osoby, które oceniły przyspieszenie boczne $0,8 \text{ m/s}^2$, jako niekomfortowe było poniżej 5 %. Wartość ta potwierdza badania sprzed kilkadziesiąt lat. Oznacza to, że pomimo zmian infrastruktury kolejowej wibracje są nadal postrzegane w ten sam sposób.

Na podstawie dalszych analiz regresji znaleziono równania prostych osobno dla pozycji stojącej i siedzącej, co przedstawiono na rysunku 2.12. Za pomocą równań zdefiniowano wpływ przyspieszenia poprzecznego i przyspieszenia poprzecznego pik do pik na poziom dyskomfortu dla 5 % osób odczuwających nieakceptowalny dyskomfort.



Rys. 2.12 Zależność wartości przyspieszenia poprzecznego (na łuku torowiska) i przyspieszenia pik do pik (przed krzywą przejściową torowiska) dla 5% osób oceniających komfort, jako niezadowolający. Dla utrzymania odpowiedniego poziomu komfortu należy zadbać o odpowiednie proporcje ww. przyspieszeń. Widoczna jest większa wrażliwość pozycji stojącej na przyspieszenie poprzeczne niż pik do pik [36].

Można zauważyć większą wrażliwość człowieka na przyspieszenia poprzeczne w łukach torowiska w pozycji stojącej oraz jego mniejszą wrażliwość na dodatkowe przyspieszenia typu pik do pik.

Witold Groll w swojej publikacji [37] podaje 1 m/s^2 dla niezrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego jako wartość dla której możliwe jest zapewnienie komfortu podróżowania konwencjonalnym taborem na liniach PKP.

W ramach prac [38] Międzynarodowego Związku Kolei (UIC) dla pojazdu szynowego z wychylnym pułtem przeprowadzono badania komfortu jazdy oraz zaburzeń komfortu w krzywych przejściowych i łukach kołowych jako komfortu lokalnego. W badaniu wzięło udział 32 studentów, 50% kobiet i 50% mężczyzn. Osoby zostały podzielone na 8 grup, gdzie każda grupa zajęła miejsca w wybranym wagonie spośród trzech wchodzących w skład jednostki trakcyjnej. Jednostka wykonała przejazd z różnymi prędkościami przejazdu i różnymi wartościami przechyłu poprzecznego. Uczestnicy eksperymentu oceniali komfort średni i lokalny poprzez głosowanie na pięciopozomowej symetrycznej skali za pomocą urządzeń elektronicznych. Za pomocą regresji wieloczynnikowej zbudowano modele mogące być narzędziem obiektywnej oceny komfortu lokalnego oraz średniego z relatywnie dużą liczbą krzywych przejściowych i łuków kołowych. Modelem regresyjnym komfortu lokalnego

dla krzywych przejściowych jest suma przede wszystkim przyspieszenia poprzecznego i średniego komfortu $N_{v,d}$ mierzonego w odcinkach 5 s (patrz rozdział 3.4). W mniejszym stopniu wpływa wartość zrywu poprzecznego oraz prędkość kątowa przechyłu poprzecznego. W przypadku komfortu w łukach kołowych również duży wpływ ma średni komfort $N_{v,d}$ mierzony w odcinkach 5 s. Jednak największy wpływ ma przyspieszenia poprzeczne oraz wartość przyspieszenia poprzecznego pik do pik mierzone wg EN 12299. Dla komfortu średniego z dość dużą liczbą zaburzeń lokalnych wartości współczynników korelacji są dość niskie, co autorzy eksperymentu tłumaczą małą liczbą obserwacji przy zróżnicowanym charakterze ocen pasażerów wynikających z dynamiki ciała i psychiki człowieka. Na torowisku o relatywnie dużej liczbie krzywych głównymi wielkościami wpływającymi na komfort średni jest przyspieszenie poprzeczne oraz zryw poprzeczny. Również na komfort ten ma wpływ prędkość przechyłu i średni poziom komfortu $N_{v,d}$ mierzony w odcinkach 5 s.

Wicher i Więtkowski [39] oceniali komfort dla manekinów reprezentujących osobę dorosłą (HYBRID-3) posadowioną na tylnym siedzeniu oraz dziecko w foteliku z mocowaniem standardowym i ISOFIX. Badania polowe przeprowadzono na terenie ośrodka PIMOT z różnymi prędkościami jazdy oraz na różnych nawierzchniach. Analiza czasowa sygnałów przyspieszeń pionowych wykazała dwukrotnie wyższe amplitudy drgań dla dziecka w foteliku z mocowaniem ISOFIX ($\pm 0.5g$) niż dla manekina osoby dorosłej ($\pm 0.25g$). Okolicznością łagodzącą fakt dwukrotnie wyższych przyspieszeń w przypadku dziecka może być ograniczony stan wiedzy, co do wrażliwości ciała dziecka na drgania mechaniczne. Autorzy eksperymentu na podstawie dalszej analizy gęstości widmowej potwierdzają wyższe amplitudy drgań dla fotelików dziecięcych oraz wskazują na wyższe drgania dla fotelika niż dla podłogi samochodu, co oznacza większy dyskomfort dziecka. Zaobserwowano również, że największe przyspieszenia drgań występują w przedziale 1-3 Hz. Jest to poniżej największej wrażliwości organizmu człowieka na drgania, która występuje w przedziale 4-8 Hz. Niestety jest bardzo mało informacji o odczuwaniu drgań przez dziecko. Ze względu na mniejszą masę można przypuszczać, że częstość ta będzie większa. Zatem wspomniany wyżej przedział 1-3 Hz może obejmować dyskomfort odczuwany przez dziecko. Zdolność absorbowania drgań przez organizm małego dziecka najsilniej występuje w przedziale 3-16 Hz (średnio wokół częstości 7.4 Hz).

W powyższym rozdziale przedstawiono przegląd literatury na podstawie, którego można zauważyć usilne dążenie badaczy do poznania zależności pomiędzy oceną subiektywną drgań a ich wielkościami charakterystycznymi. Liczba czynników mających wpływ na subiektywną ocenę jest tak duża, że na dzień dzisiejszy nie ma przejrzystego, uniwersalnego modelu komfortu nawet tylko dla komfortu wibracyjnego. Sytuacja obecna wymaga większego nakładu pracy badawczej w szerszym zakresie wartości i wielkości wpływających na poziom dyskomfortu. Powodem następnyc h badań może być niedoskonałość zastosowania tej samej dwuwymiarowej krzywej ważenia częstotliwościowego do oceny komfortu dla każdej wartości amplitudy. Rozwiązaniem tego wydaje się szereg krzywych ważenia częstotliwościowego zbudowana na podstawie wyników kolejnych badań dla ogólnego zastosowania lub nadal dwuwymiarowe krzywe, ale ze specjalistycznym zastosowaniem odpowiednio dla warunków środowiskowych. W przypadku szeregu krzywych pojawia się problem wyboru odpowiedniej krzywej na podstawie amplitudy, która jest zmienna w czasie.

3. STANDARDY OBIEKTYWNEJ OCENY KOMFORTU JAZDY

W narodowych i międzynarodowych normach przedstawiono wytyczne prze prowadzania obiektywnych ocen narażenia człowieka na drgania ogólne i wstrząsy. Wytyczne te obejmują zasady pomiaru drgań w tym m.in. kierunek drgań, miejsca montażu czujników przyspieszeń czy też statystycznie reprezentatywny czas pomiaru drgań. Standardy przede wszystkim podają metody obiektywnej oceny sygnałów drgań na podstawie szeregu wskaźników uwzględniających wrażliwość człowieka na drgania oraz charakterystykę sygnału, który może być sygnałem okresowym, losowym czy też impulsowym.

3.1. Obiektywna ocena drgań wg ISO 2631-1:1997

Norma ISO 2631-1:1997 [12] dotyczy obiektywnej oceny ekspozycji zdrowego człowieka na drgania okresowe, losowe i przejściowe mogące wystąpić podczas podróży, w pracy lub podczas aktywnego wypoczynku. Wskazano szereg formuł, które wykorzystuje się do określenia akceptowalnych ekspozycji na drgania. W załącznikach normy można znaleźć wytyczne i opinie o możliwym wpływie drgań na zdrowie, komfort i percepcje drgań oraz chorobę lokomocyjną. Dla zdrowia, komfortu i percepcji drgań ograniczono zakres częstotliwości od 0.5 do 80 Hz. W przypadku możliwości wystąpienia choroby lokomocyjnej przedział zawiera się od 0.1 do 0.5 Hz. Norma ISO 2631 ma zastosowanie dla drgań przekazywanych ogólnie do ciała ludzkiego za pośrednictwem interfejsów: stopy stojącej osoby, pośladki, plecy i stopy siedzącej osoby lub powierzchnia oparcia leżącej osoby. Ten typ drgań występuje w pojazdach, maszynach, budynkach i w pobliżu pracujących maszyn. Miejsca pomiaru drgań powinny się znajdować jak najbliżej miejsc przekazywania drgań. Dla sztywnych powierzchni odległość pomiędzy tymi miejscami może sięgać maksymalnie 10 cm. W przypadku sprężystego materiału np. fotela czujnik przyspieszenia należy umieścić pomiędzy fotelem i ciałem człowieka. Sygnały przyspieszeń po zarejestrowaniu powinny być poddane filtrowaniu dolnoprzepustowemu o częstotliwości 1.5 razy większej niż autora badań interesuje dla zmaksymalizowania wartości S/N (signal-to-noise ratio). Długość zarejestrowanych sygnałów powinna być, co najmniej równa lub przekraczająca długości sygnałów zazwyczaj występujących w warunkach rzeczywistych.

Podstawową metodą obiektywnej oceny drgań wg normy jest wartość r.m.s. ważonych przyspieszeń drgań a_w , obliczana wg poniżej zależności:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

gdzie:

$a_w(t)$ – przyspieszenie ważne, jako funkcja czasu, m/s^2

T – długość pomiaru, s.

Na rysunku 3.1 przedstawiono zdefiniowano w normie orientacje i położenie globalnego układu współrzędnych ciała człowieka oraz orientacje i położenie układów współrzędnych interfejsów przekazywania drgań na ciało człowieka. W tabeli 3.1

przedstawiono rekomendowane i używane krzywe ważenia częstotliwościowego W_i dla różnych kierunków drgań i interfejsów przekazywania drgań (rys. 2.6). W normie zdefiniowano również mnożniki osi k , które zmieniają swoją wartość w zależności od celu ważenia sygnałów przyspieszeń (zdrowie, komfort, percepcja) dla oceny ogólnego poziomu drgań wg zależności 3.9. Wartości k w tabeli 3.1 są właściwe dla oceny wpływu drgań na zdrowie, komfort i percepcje dla pozycji siedzącej. W normie zdefiniowano również wartości k dla pozostałych pozycji tj. stojącej i leżącej.



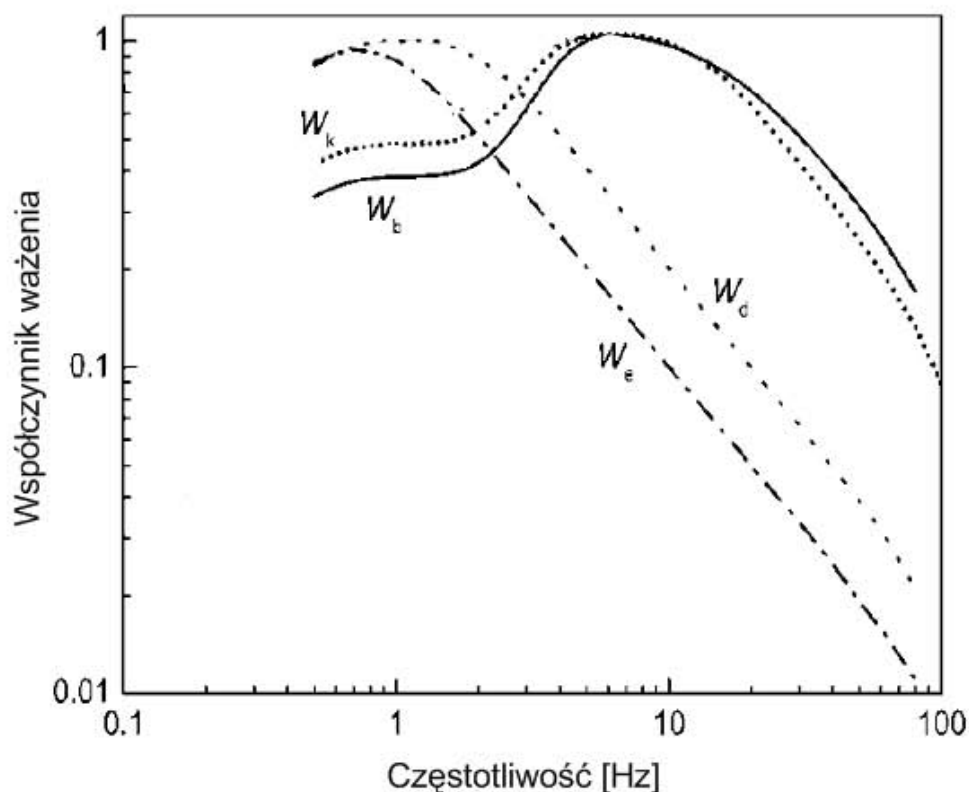
Rys. 3.1 Orientacja i położenie globalnego i lokalnych układów współrzędnych dla pozycji siedzącej.

Krzywa ważenia częstotliwościowego W_d odpowiada za ważenie drgań w kierunku x i y (podłużnym i poprzecznym). Krzywa W_k dla kierunku z drgań pionowych. Poza ww. krzywymi zdefiniowano krzywe dodatkowe, W_c dla drgań w kierunku x przekazywanych przez oparcie siedzenia i plecy na całe ciało człowieka oraz krzywą W_e dla drgań torsyjnych wokół osi x , y , z . W tabeli również widoczna jest krzywa W_b , która została opisana w rozdziale 3.2.

Tab. 3.1 Zastosowanie krzywych ważenia częstotliwościowego W_i dla różnych interfejsów i kierunków drgań dla oceny wpływu drgań na zdrowie, komfort i percepcje dla pozycji siedzącej wg ISO 2631-1 [12] oraz BS 6841 [13].

| Interfejs | Kierunek drgań | Krzywa ważenia częstotliwościowego | Mnożnik osi k (poz. siedząca) | | |
|-----------|----------------|------------------------------------|---------------------------------|---------|-----------|
| | | | Zdrowie | Komfort | Percepcja |
| Pośladki | x | W_d | 1.4 | 1 | 1 |
| | y | | 1.4 | | |
| | z | W_k / W_b | 1 | | |
| | r_x | W_e | - | 0.63 | - |
| | r_y | | - | 0.40 | - |
| | r_z | | - | 0.20 | - |
| Plecy | x | W_c | (0.8) | 0.80 | - |
| | y | W_d | - | 0.50 | - |
| | z | | - | 0.40 | - |
| Stopy | x | W_k / W_b | - | 0.25 | - |
| | y | | - | 0.25 | - |
| | z | | - | 0.40 | - |

Na rysunku 3.2 przedstawiono graficzną postać krzywych opisanych powyżej w odpowiednim zakresie częstotliwości.



Rys. 3.2 Krzywe ważenia częstotliwościowego zdefiniowane przez standardy ISO 2631-1:97 [12] i BS 6481:87 [13].

Dla sygnałów nieważonych przyspieszeń również możemy zastosować analizę spektralną. W normie możemy znaleźć wartości wag w_i dla poszczególnych centralnych częstotliwości filtrów tercjowych a także zależność 3.2, wg, której otrzymamy wynik ważenia ekwiwalentny zależności 3.1.

$$a_w = \left[\sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

W normie pojawia się wskaźnik *Crest Factor* (CF), który może być wykorzystany do oceny czy podstawowa metoda oceny drgań jest wystarczająca czy też powinniśmy zastosować dodatkowe metody oceny drgań. Wskaźnik CF definiowany jest, jako stosunek maksymalnej wartości amplitudy ważonego przyspieszenia do jego wartości r.m.s. Zapis normy zastrzega brak bezpośredniej informacji o uciążliwości drgań na podstawie wartości CF . W przypadku $CF \leq 9$ wystarczającą oceną jest metoda podstawowa aczkolwiek dla pewnych typów drgań szczególnie dla okazjonalnych pików przyspieszenia metoda podstawowa może bagatelizować uciążliwość drgań pomimo wartości $CF \leq 9$. W takim przypadku należy równolegle do metody podstawowej zastosować dodatkowe metody oceny opisane poniżej.

W przypadkach gdzie podstawowa metoda może nie być wystarczająca (wysoka wartość CF , okazjonalne piki, drgania przejściowe) równoległe należy zastosować jedną z metod: okienkowany *r.m.s.* (*running r.m.s.*) lub *Vibration Dose Value (VDV)*.

Metoda okienkowanego *r.m.s.* bierze pod uwagę okazjonalne piki i drgania przejściowe poprzez użycie krótkoczasowej stałej całkowania.

$$a_w(t_0) = \left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

gdzie:

$a_w(t)$ – przyspieszenie ważone, jako funkcja czasu, m/s^2

τ – czas całkowania dla uśredniania w oknie

t_0 – odcinek czasu poddany ocenie

Maksymalna wartość $a_w(t_0)$ w sygnale jest zdefiniowana, jako maksymalna wartość drgań chwilowych *MTVV* (*Maximum Transient Vibration Value*).

$$MTVV = \max[a_w(t_0)] \quad (3.4)$$

Gdzie najwyższa amplituda $a_w(t)$ zostaje odczytana dla odcinka pomiarowego tj. T (wzór 3.1). Jest rekomendowane użycie $\tau = 1$ dla pomiaru *MTVV* ze względu na dobrą korelację wartość *MTVV* dla tej długości okna i reakcji człowieka na chwilowe drgania o zwiększonej amplitudzie.

Wskaźnik *VDV* jest bardziej wrażliwa na piki niż metoda podstawowa ze względu na zastosowanie czwartej potęgi zamiast drugiej dla uśredniania sygnału przyspieszenia. Jednostką *VDV* jest $m/s^{1.75}$.

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.5)$$

gdzie:

$a_w(t)$ – przyspieszenie ważone, jako funkcja czasu, m/s^2

T – długość pomiaru, s.

W przypadku, gdy czas ekspozycji składa się z dwóch lub więcej odcinków o różnych amplitudach obliczana jest wartość VDV_{total} wg poniższej zależności:

$$VDV_{total} = \left[\sum_i VDV_i^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.6)$$

W normie sugeruje się, że wykorzystanie dodatkowych metod oceny drgań będzie szczególnie ważne dla oceny oddziaływania drgań na odczucie człowieka w momencie, kiedy wartości poniżej zapisanych zależności będą przekraczane, odpowiednio dla zdrowia i komfortu.

$$\frac{MTVV}{a_w} = 1.5 \quad (3.7)$$

$$\frac{VDV}{a_w T^{1.75}} = 1.75 \quad (3.8)$$

W przypadku, kiedy wykorzystywana jest dodatkowa metoda oceny drgań należy również zastosować podstawową metodę oceny drgań.

W przypadku drgań złożonych (wielokierunkowych) norma podaje zależność, według której można uzyskać całkowitą wartość r.m.s. drgań ważonych dla pojedynczego interfejsu a_v .

$$a_v = (k_x^2 a_{w_x}^2 + k_y^2 a_{w_y}^2 + k_z^2 a_{w_z}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

gdzie:

$a_{w_x}, a_{w_y}, a_{w_z}$ – wartość ważonych przyspieszeń odpowiednio dla każdego kierunku,
 k_x, k_y, k_z – mnożnik odpowiedniej osi.

Zastosowanie powyższej zależności 3.9 jest rekomendowane dla oceny drgań ze względu na komfort, chociaż można ją również zastosować dla oceny drgań ze względu na zdrowie przy braku dominujących drgań w pojedynczym kierunku.

3.2. Obiektywna ocena komfortu wg ISO 2631-1:1997/4:2001

W przypadku oceny drgań ze względu na komfort zakres ISO 2631 ogranicza się do określenia jednolitych i wygodnych metod wskazania subiektywnej oceny komfortu drgań a nie podania limitów. W kontekście środowiska ekspozycji na drgania zwrócono uwagę na wpływ dużej liczby czynników mających wpływ na ocenę poziomu komfortu. Prawidłowa ocena akceptowalnych drgań i określenie ich limitów jest możliwy wyłącznie przy znajomości wielu czynników. Oczekiwany komfort i tolerowany poziom dokuczliwości drgań jest zupełnie inny w środkach komunikacji niż biurach czy domach, blokach mieszkalnych. Zakłócenia w czynnościach (czytanie, pisanie, picie) spowodowanych drganiami mogą czasem być traktowane, jako dyskomfort. Efekt ten jest często uzależniony od szczegółów wykonywania danej czynności (dodatkowe podparcia, kubek do picia) i nie jest w zakresie tego standardu. W przypadku zmieniającej się kondycji sygnału przyspieszenia (np. pojazdy szynowe) ocena komfortu może być również przeprowadzona na podstawie analizy statystycznej rozkładu wartości r.m.s. właściwego dla danego sygnału. Ten sposób analizy jest również zalecany w czwartej części standardu ISO 2631 tj. ISO 2631-4 [22] dotyczącej komfortu pasażerów i załogi w pojazdach szynowych oraz został zastosowany w normie EN-12299:2009 [10] dotyczącej komfortu pasażerów w transporcie kolejowym. Do ważenia sygnałów można wykorzystać krzywą W_k , ale zalecana jest krzywa W_0 opublikowana w ISO 2631-4 oraz BS 6841. Krzywa W_0 filtruje w większym stopniu częstotliwości poniżej 8 Hz natomiast powyżej traktuje amplitudy drgań łagodniej.

Ocena drgań ze względu na komfort zaczyna się standardowo od oceny drgań wg zależności 3.1. Jeżeli sygnał składa się z kilku odcinków należy wykorzystać poniższą zależność. Dla każdego kierunku drgań należy dokonać oceny wg

$$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{w,i}^2 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

gdzie:

$a_{w,e}$ – ekwiwalentna wartość r.m.s. ważonych przyspieszeń drgań,
 $a_{w,i}$ – wartość r.m.s. ważonych przyspieszeń drgań dla odcinka pomiaru T_i .

Pomiary standardowo obejmują przyspieszenia we wszystkich trzech osiach odpowiednio dla każdego interfejsu znacząco wpływającego na ocenę człowieka. Jeśli dana sytuacja wymaga pomiaru w trzech punktach tj. stopy, pośladki i plecy to mamy do pomiaru i oceny 9 sygnałów przyspieszeń, gdzie każdy podlega indywidualnej ocenie. Dla pojedynczego interfejsu możemy ocenić wartość drgań wg zależności 3.9. Dla zaangażowanych interfejsów należy wykorzystać tą samą zależność tzn. sumę pod pierwiastkiem kwadratowym uzyskując całkowitą wartość r.m.s. drgań ważonych dla drgań ogólnych. Jak wspomniano wcześniej metoda sumowania kierunków i interfejsów zarezerwowana jest dla oceny drgań ze względu na komfort. Jeśli wartość r.m.s. ważonych drgań dla jednego kierunku drgań w jednym interfejsie jest mniejsza o 25% od maksymalnej wartości r.m.s. ważonych drgań z pozostałych kierunków to można ją odrzucić. Podobnie dla interfejsów, jeśli wartość r.m.s. drgań ważonych dla któregoś interfejsu jest mniejsza o 25% od maksymalnej wartości r.m.s. ważonych drgań z pozostałych interfejsów to można ją odrzucić.

W standardzie ISO 2631-1 podkreślono fakt, że nie ma jednoznacznych dowodów wpływu czasu ekspozycji na ocenę drgań ze względu na komfort. Pomimo to wartość r.m.s. ważonych drgań a_w / a_{we} można wykorzystać do oceny wpływu drgań podczas całodniowej ekspozycji na nie poprzez zastosowanie poniższej zależności.

$$eVDV = 1.4 \cdot a_w \cdot T^{\frac{1}{4}} \quad (3.11)$$

Estymowana wartość $eVDV$ ($m/s^{1.75}$) może wykorzystać również do porównania poziomu komfortu np. pomiędzy dwoma alternatywnymi środowiskami.

W przypadku, kiedy CF przekracza wartość 9 nie jest możliwe ocenić reakcji człowieka na drgania używając wartości r.m.s. ważonych drgań a_w . Dyskomfort w takiej sytuacji może być podyktowany dużą liczbą pików przyspieszeń, przez co nie doszacowany przez algorytm uśredniania r.m.s. Należy zastosować dodatkowe metody oceny drgań według reguł wspomnianych w rozdziale 3.1.

| r.m.s. przyspieszeń ważonych [m/s ²] | | | |
|---|---------------------------|-------------------------|-------|
| Ekstremalnie niekomfortowo | 3.15 2.5 | Bardzo niekomfortowo | |
| | | | 2.0 |
| Niekomfortowo | 1.6 1.25 | Dość niekomfortowo | |
| | | | 1.0 |
| Mały dyskomfort | 0.8 0.63 0.5 0.4 | Komfortowo | |
| | | | 0.315 |
| | | | 0.25 |
| | | | |

Rys. 3.3 Skala dyskomfortu proponowana przez normę ISO 2631-1:97 [12] i BS 6841:87 [13].

W dodatkach C norm ISO 2631-1 oraz BS 6841 przedstawiono orientacyjne przedziały wartości r.m.s. przyspieszeń ważonych odpowiadające subiektywnej ocenie pasażerów. Przedziały z odpowiadającymi wartościami r.m.s. i przypisanymi im poziomami oceny subiektywnej przedstawiono na rysunku 3.3. Przedstawione

wartości w przybliżeniu wskazują prawdopodobną reakcję pasażerów na różne wielkości całkowitej wartości r.m.s. drgań ważonych dla drgań ogólnych a_0 mogące wystąpić w transporcie publicznym.

3.3. Obiektywna ocena drgań wg BS 6841:1997

Brytyjska norma BS 6841:1987 różni się od ISO 2631-1:1997 [12] w kilku kwestiach. Sugeruje stosowanie dodatkowych metod oceny sygnału już powyżej wartości 6 dla wskaźnika CF . Nie znajdziemy wśród metod dodatkowych okienkowanego r.m.s. (MTVV). W zamian pojawia się wskaźnik r.m.q. (2.3), który jest bardziej wrażliwy na pojawiające się okazjonalnie piki w sygnale.

Krzywa ważenia częstotliwościowego dla drgań pionowych W_b jest mniej wrażliwa poniżej 8 Hz a bardziej wrażliwa powyżej, aniżeli odpowiednia krzywa W_k normy ISO 2631-1:1997 (rys. 3.2). Krzywa W_b jest zalecana w przypadku oceny komfortu dla pojazdów szynowych [12], [10].

3.4. Obiektywna ocena drgań wg EN 12299:2009

Norma EN 12299:2009 [10] w odróżnieniu od ww. uniwersalnych standardów podyktowana jest dla transportu szynowego. W normie tej można znaleźć krótką charakterystykę drgań, które najczęściej występują w pojazdach szynowych oraz wpływ rodzaju tych drgań na zaburzenia komfortu. Ze względu na rodzaj drgań w normie opisano kilka procedur obliczania wskaźników im odpowiadającym. Dla komfortu średniego przygotowano wskaźnik obiektywnej oceny komfortu średniego obliczany standardową metodą N_{wV} lub N_{wD} dla pozycji siedzącej oraz N_{wA} dla pozycji stojącej. Dla tych wskaźników wymagane są quasi-stacjonarne przebiegi sygnałów przyspieszeń. W drugiej grupie są dwa wskaźniki (P_{DB} , P_{CT}) odpowiedzialne za ocenę komfortu chwilowego (lokalnego) dla nagłych zmian średnich wartości sygnałów przyspieszeń lub/i prędkości. Krzywe ważenia W_z i W_d zostały zaadoptowane z normy ISO 2631 w niezmienionej formie. Zdefiniowano nowe wartości krzywej W_b dla drgań pionowych i wprowadzono krzywą W_p dla zaburzeń lokalnych. Poniżej przedstawiono formuły dla komfortu średniego i chwilowego.

Standardowa metoda oceny komfortu N_{wV} oparta jest o następującą formułę:

$$N_{wV} = 6 \cdot \sqrt{(a_{xP95}^w)^2 + (a_{yP95}^w)^2 + (a_{zP95}^w)^2} \quad (3.12)$$

gdzie:

a_{xP95}^w - 95 percentyl rozkładu wartości r.m.s. 5 s odcinków ważonych (W_d) drgań podłużnych (X) zarejestrowanych na podłodze (P) wagonu, dla czasu ekspozycji 5 min. Pozostałe wielkości pod pierwiastkiem odpowiednio do kierunku drgań. W tabeli 3.2 zapisano wartości wskaźnika N_{wV} i odpowiadające im poziomy subiektywnej oceny komfortu.

Innym wskaźnikiem opisującym komfort jest *komfort ciągły* $C_{CI}(f)$, zdefiniowany, jako wartość r.m.s. ważonego sygnału przyspieszenia dla odcinka 5 s z interwałem czasowym 5 s.

W tabeli 3.3 przedstawiono przedziały wartości $C_{c,i}(t)$ oraz odpowiadające im poziomy subiektywnej oceny komfortu.

$$C_{c_x}(t) = a_{x_p}^{\overline{y}}(t), \quad C_{c_y}(t) = a_{y_p}^{\overline{y}}(t), \quad C_{c_z}(t) = a_{z_p}^{\overline{y}}(t) \quad (3.13)$$

Tab. 3.2 Skala komfortu dla wskaźnika N_{dsv} [10].

| Wartość N_{dsv} | Subiektywny poziom komfortu |
|--------------------------|-----------------------------|
| $N_{dsv} < 1,5$ | Bardzo komfortowo |
| $1,5 \leq N_{dsv} < 2,5$ | Komfortowo |
| $2,5 \leq N_{dsv} < 3,5$ | Średnio |
| $3,5 \leq N_{dsv} < 4,5$ | Niekomfortowo |
| $N_{dsv} \geq 4,5$ | Bardzo niekomfortowo |

Tab. 3.3 Skala komfortu dla wskaźnika $C_{c,i}(t)$, $C_{c,i}(t)$ [10].

| Wartość $C_{c,i}(t)$, $C_{c,i}(t)$ | Subiektywny poziom komfortu |
|--|-----------------------------|
| $C_{c,i}(t), C_{c,i}(t) < 0,2 \text{ m/s}^2$ | Bardzo komfortowo |
| $0,2 \text{ m/s}^2 < C_{c,i}(t), C_{c,i}(t) < 0,3 \text{ m/s}^2$ | Komfortowo |
| $0,3 \text{ m/s}^2 < C_{c,i}(t), C_{c,i}(t) < 0,4 \text{ m/s}^2$ | Średnio |
| $0,4 \text{ m/s}^2 < C_{c,i}(t), C_{c,i}(t)$ | Mniej komfortowo |

Zaburzenia komfortu lokalnego są opisane dwoma wskaźnikami. Wartości wskaźników wskazują bezpośrednio procent pasażerów niezadowolonych lub bardzo niezadowolonych (4 i 5 poziom na skali pięciopoziomowej) z poziomu komfortu.

Wskaźnik P_{DE} dla dyskretnych zaburzeń na odcinkach prostych, rozjazdach i łukach kołowych.

$$P_{DE}(t) = 100\% \cdot \max \left[a \cdot \overline{y}_{pp}^{\overline{y}}(t) + b \cdot \left| \overline{y}_{z_s}^{\overline{y}}(t) \right| - c; 0 \right] \quad (3.14)$$

gdzie:

$\overline{y}_{pp}^{\overline{y}}(t)$ - przyspieszenia poprzecznego pik do pika dla przedziału 2 [s], [m/s^2],

$\left| \overline{y}_{z_s}^{\overline{y}}(t) \right|$ - średnie bezw. przyspieszenie poprzeczne dla przedziału 2 [s], [m/s^2]

Stałe a , b i c wyprowadzone zostały na podstawie badań. Ich wartość odpowiednio dla pozycji stojącej i siedzącej zapisano poniżej w tabeli 3.4.

Tab. 3.4 Stałe dla wskaźnika P_{DE} [10].

| Warunki | a [s^2/m] | b [s^2/m] | c [-] |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|
| Pozycja stojąca | 0.1662 | 0.2701 | 0.37 |
| Pozycja siedząca | 0.0846 | 0.1305 | 0.217 |

Drugim wskaźnikiem jest P_{Cr} stosowany dla oceny komfortu na krzywych przejściowych.

$$P_{Cr} = 100\% \cdot \left\{ \max \left[\left(A \cdot \left| \overline{y}_{1s} \right|_{\max} + B \cdot \left| \overline{\ddot{y}}_{1s} \right|_{\max} - C \right); 0 \right] + \left(D \cdot \left| \overline{\dot{\varphi}}_{1s} \right|_{\max} \right)^E \right\} \quad (3.15)$$

gdzie:

- $\left| \overline{y}_{1s} \right|_{\max}$ - maksymalne bezwzględne przyspieszenie poprzeczne dla 1 [s] [m/s^2],
- $\left| \overline{\ddot{y}}_{1s} \right|_{\max}$ - maksymalna bezwzględne szarpnięcie poprzeczne (ang. jerk) dla 1 [s] [m/s^3],
- $\left| \overline{\dot{\varphi}}_{1s} \right|_{\max}$ - maksymalna bezwzględna prędkość przechyłu poprzecznego [rad/s],

Stałe A , B , C , D i E wyprowadzone zostały na podstawie badań. Ich wartość odpowiednio dla pozycji stojącej i siedzącej zapisano poniżej w tabeli 3.5.

Tab. 3.5 Stałe dla wskaźnika P_{Cr} [10].

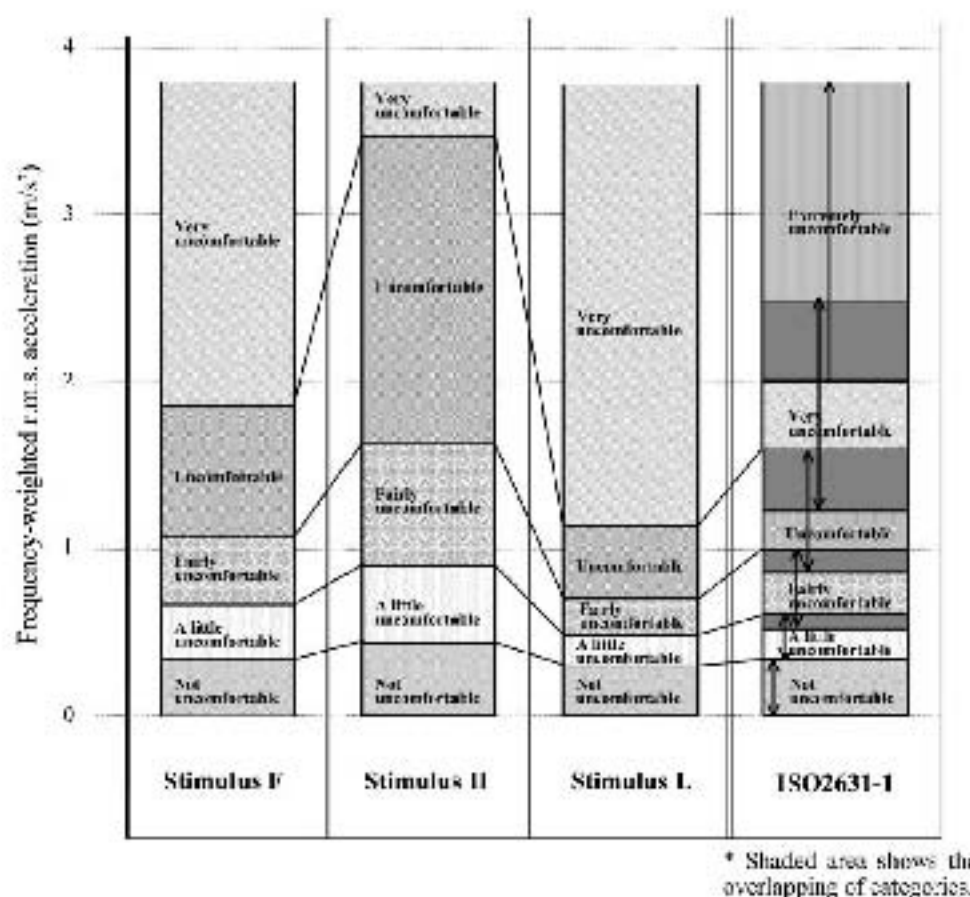
| Warunki | A [s^2/m] | B [s^2/m] | C [-] | D [s/rad] | E [-] |
|------------------|---------------|---------------|-------|---------------|-------|
| Pozycja stojąca | 0.2854 | 0.2069 | 0.111 | 3.64 | 2.283 |
| Pozycja siedząca | 0.0897 | 0.0968 | 0.059 | 0.916 | 1.626 |

Norma EN 12299 przeznaczona jest bezpośrednio dla transportu kolejowego międzymiastowego i podmiejskiego, ale również może być wykorzystana, jako prze wodnik dla transportu miejskiego, jakim jest np. komunikacja tramwajowa.

W powyższym rozdziale autor przedstawił przegląd przez obecnie obowiązujące normy dotyczące oceny ze względu na komfort. Aby mogły powstać te normy najpierw zauważono, że drgania mogą spowodować duży uszczerbek na zdrowiu człowieka narażonego na nie. Takimi sytuacjami na początku wieku dwudziestego były przypadki wtedy jeszcze nienazwanej choroby wibracyjnej pojawiającej się u osób narażonych na drgania ogólne lub miejscowe. Przypadki te zainicjowały wieloletnie badania laboratoryjne, które wskazywały zmienną ocenę drgań przez człowieka wraz ze zmianą parametrów tychże drgań. Od końca lat 70-tych, co kilka lat ukazują się aktualizacje norm dotyczących wpływu drgań na człowieka z uzupełnioną wiedzą i zaktualizowanymi metodami oceny. Normy te są zbiorem przepisów, które muszą zostać wypełnione, jeśli producent urządzeń mogących powodować narażenie człowieka na drgania, chce umieścić na rynku bezpieczny produkt. Aby wypełnić wymagania normy należy przeprowadzić pomiar wielkości wskazanych w normie, zarejestrowane sygnały odpowiednio obrobić a następnie poddać je ocenie według odpowiednich formuł wskazanych w normie.

W normach podkreślany jest znaczący wpływ indywidualnych cech człowieka a także bodźców zewnętrznych np. hałasu na subiektywną ocenę drgań. W związku z niestacjonarnością ciała i psychiki człowieka normy wskazują na trudność związaną z jednoznacznym zdefiniowaniem np. poziomów komfortu. Na skali poziomu komfortu (rys. 3.3) zawartej w ISO 2631 i BS 6841 widoczne są przedziały zachodzące na siebie.

Kaneko, Hagiwara i Maeda [40] [41] przeprowadzili eksperyment na grupie 13 osób gdzie każdy z uczestników był poddany pionowym drganiom losowym. Drgania losowe były podzielone na trzy rodzaje gdzie każdy rodzaj miał pięć różnych wartości r.m.s. od 0.2 do 1.8 m/s^2 oraz został ważony wg krzywej W_k . Pierwszy rodzaj drgań *F* z płaską charakterystyką PSD (widmowa gęstość mocy) na przedziale częstotliwości 1-100 Hz. Drugi *H* z wyższą amplitudą o 20 dB dla 100 Hz niż dla 1 Hz. Trzeci *L* z 20 dB niższą amplitudą dla 100 Hz niż dla 1 Hz. Każdy z 15 sygnałów drgań trzykrotnie powtórzony w kolejności losowej był oceniany przez uczestników wg pięciopoziomowej skali zaczerpniętej z ISO 2631-1 (rys. 3.3).



Rys. 3.4 Wartości przedziałów skal komfortu. Wyniki eksperymentu subiektywnej oceny sygnałów losowych o zadanej charakterystyce PSD [40]. Sygnał F o płaskiej charakterystyce widma, sygnał H o większych amplitudach dla częstotliwości bliskich 100 Hz i sygnał L o większych amplitud dla częstotliwości bliskich 1 Hz.

Wyniki subiektywnych ocen przedstawiono na rysunku 3.4. Dla każdego rodzaju sygnału uzyskano różne przedziały wartości odpowiadające pięciu poziomom dyskomfortu. Skala będąca wynikiem narażenia sygnałem *F* o płaskiej charakterystyce PSD jest najbliższa przedziałom opisanym przez ISO 2631-1. Sygnał *H* jest bardziej komfortowy niż sygnał *F* dla tych samych wartości r.m.s. ważonych przyspieszeń. Sygnał *L* jest najbardziej dyskomfortowy spośród trzech aplikowanych. Autorzy eksperymentu zauważają wpływ charakteru PSD sygnału na subiektywną ocenę drgań pomimo zastosowania tej samej krzywej ważenia dla wszystkich sygnałów i wskazują na potrzebę weryfikacji zastosowania krzywych ważenia w tej sytuacji.

Autorzy badania wskazali problem dotyczący niejednoznacznie określonych granic dla poszczególnych poziomów komfortu wg ISO 2631-1 co zostało zaznaczone na skali

położonej z prawej strony rysunku 3.4. Źródło problemu zauważają w zastosowanej metodzie ze wzorcem odniesienia (Constant Measurement Method) dla subiektywnej oceny drgań w badaniach przeprowadzonych na przełomie lat 70-tych i 80-tych. W metodzie tej do analizy subiektywnych odpowiedzi zastosowano wartość średnią i odchylenie standardowe, co spowodowało zachodzenie na siebie sąsiadujących poziomów komfortu. Na podstawie tych badań został opracowany standard ISO 2631-1. W swojej pracy eksperymentalnej zaproponowali rozwiązanie tego problemu poprzez zastosowanie jednej z metod subiektywnego skalowania (Subjective Scaling Method) tj. ocenę kategorii (Category Judgment Method) dla oceny sygnałów drgań oraz odpowiedniego algorytmu obliczenia przedziału wartości dla poszczególnych kategorii. Rezultaty ustalania nowych skal bez zachodzenia na siebie „sąsiadów” widoczne są na rysunku 3.4 dla trzech rodzajów sygnałów F , H , L . Maeda [42] zastosował tą samą technikę eksperymentu dla ustalenia skali komfortu dla drgań miejscowych przenoszonych na zaciśniętą dłoń. Na podstawie badań stwierdzono brak wpływu płci uczestników oraz rodzaju sygnału na wyniki oceny drgań.

Mansfield ze współpracownikami przeprowadził badania laboratoryjne [43] gdzie 24 osoby były narażone na 20 sekundowe drgania o pięciu charakterystykach (losowe, okresowe i mieszane) i trzech amplitudach wyrażonych przez wartość r.m.s. (0,5, 1,0, 1,5 m/s^2). Dodatkowo każdy sygnał był poddany ważeniu częstotliwościowemu wg krzywych W_b i W_k . Po każdej ekspozycji osoby były zobowiązane do odpowiedzi na pytanie: „Jak surowo oceniasz tę wibrację?”, używając skali od 1 (drgania wcale nie są uciążliwe) do 10 (drgania są bardzo uciążliwe). Dla każdego sygnału w kombinacji obliczono r.m.s., VDV , $MTVV$ i $eVDV$ wg. norm ISO 2631-1.

Tab. 3.6 Współczynniki korelacji Spermmana dla trzech różnych charakterystyk sygnałów, przyspieszeń ważonych wg dwóch krzywych i nieważonych oraz ocenianych wg trzech wskaźników [43].

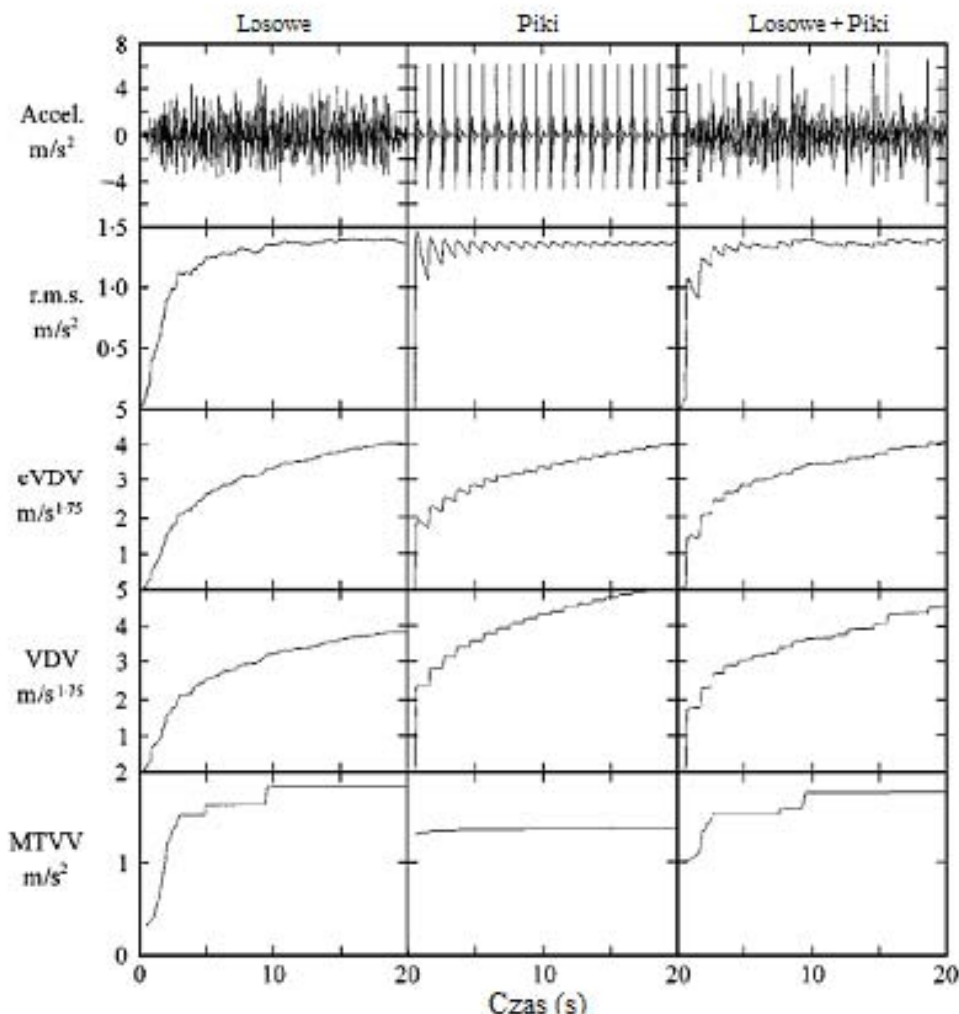
| Sygnał | r.m.s. | | | VDV | | | MTVV | | |
|----------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | Nieważony | W_b | W_k | Nieważony | W_b | W_k | Nieważony | W_b | W_k |
| Losowy | 0,73 | 0,73 | 0,74 | 0,73 | 0,73 | 0,74 | 0,76 | 0,75 | 0,75 |
| Piki | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,72 | 0,73 | 0,73 | 0,72 | 0,73 | 0,73 |
| Los+Piki | 0,79 | 0,78 | 0,78 | 0,83 | 0,82 | 0,82 | 0,77 | 0,76 | 0,76 |

Jak autorzy eksperymentu się spodziewali wszystkie osoby oceniały sygnał o większej amplitudzie, jako bardziej dyskomfortowy. Dla wszystkich trzech amplitud osoby generalnie oceniały sygnały z pikami, jako najbardziej dyskomfortowe a sygnały losowe, jako najmniej dyskomfortowe. Kobiety konsekwentnie oceniały dyskomfort sygnałów drgań nieco wyżej niż mężczyźni. Mężczyźni ocenili piki okresowe bardziej dyskomfortowe aniżeli nieokresowe. Kobiety oceniły piki okresowe, jako mniej dyskomfortowe aniżeli nieokresowe.

W tabeli 3.6 przedstawiono współczynniki korelacji Spermmana ocen drgań uczestników badania i wartości obiektywnych drgań obliczonych na podstawie ww. wskaźników tak dla drgań nieważonych jak i ważonych. Wśród metod ważenia częstotliwościowego najwyższe korelacje wystąpiły dla VDV dla wszystkich krzywych ważenia (0.82-0.83). Dla sygnałów najbardziej zbliżonych swoim charakterem do rzeczywistych, czyli połączenie losowych drgań i pików przyspieszenia najwyższą wartość korelacji uzyskano dla drgań nieważonych (0.79).

Wartości wszystkich współczynników korelacji są bardzo do siebie zbliżone, co autorzy eksperymentu tłumaczą charakterem zachowania się wskaźników oceny drgań. Mianowicie na rysunku 3.5 można zaobserwować stabilizację przebiegu

wskaźnika r.m.s. po około 10 s. A następnie bardzo małe zmiany wartości dla dalszej części sygnału. Jako że $eVDV$ jest funkcją ekspozycji i r.m.s. dla stacjonarnych sygnałów jednostajnie wzrasta on wraz ze wzrostem czasu ekspozycji. Podobnie VDV wzrasta wraz ze wzrostem czasu ekspozycji. Pomimo tego, że występuje dość duże podobieństwo w kształcie przebiegu czasowego $eVDV$ i VDV to jednak są pewne różnice. Dla okresowego sygnału pików $eVDV$ zmniejsza wartość pomiędzy poszczególnymi pikami, co spowodowane jest wzrostem czasu uśredniania. Dlatego też możliwe jest zanotowanie mniejszej wartości $eVDV$ w przypadku sygnałów zawierające piki na końcu sygnału niż tuż po wystąpieniu piku przyspieszenia. Z definicji, VDV nie może zmniejszyć wartości, gdy czas ekspozycji rośnie. $MTVV$ z definicji jest wskaźnikiem maksymalnej wartości amplitudy r.m.s. dla jedno sekundowego okna poruszającego się po osi czasu sygnału.



Rys. 3.5 Przebiegi wartości wskaźników r.m.s., $eVDV$, VDV i $MTVV$ dla trzech rodzajów drgań losowych, okresowych i mieszanego będącego połączeniem dwóch pierwszych [43].

Dla stacjonarnych sygnałów $MTVV$ może osiągnąć maksimum w ciągu kilku sekund i pozostać niewrażliwe na czas ekspozycji. Dla powtarzających się pików wartość maksymalna $MTVV$ pojawiła się już po pierwszym pikie i pozostała niewrażliwa na następne piki. Autorzy badania wskazują na kolejny problem z zastosowaniem $MTVV$, mianowicie długość okna uśredniania. W przypadku powyższych badań istnieje możliwość objęcia oknem dwóch pików sygnału, przez co zwiększenia wartości $MTVV$.

Istnieje możliwość zmiany długości okna, ale to z kolej pociągnęłoby zwiększenie wszystkich innych wartości $MTVV$. Dla analizy sygnałów zawierających piki, tak $eVDV$ jak i $MTVV$ mogą być mylące. Dla sygnałów niezawierających pików, $eVDV$ jak i VDV zachowują się podobnie. Z powodu problemu określenia wartości CF , przy której $eVDV$ przestaje obowiązywać wydaje się właściwe stosowanie wskaźnika VDV dla wszystkich typów sygnałów.

Marjanen w swoim pracy doktorskiej [44] przedstawił krytykę standardu ISO 2631. Przeprowadził swoje badania i zaproponował rozwiązania dla poprawy metod oceny drgań ze względu na komfort. Ocena drgań przez 22 osoby była prowadzona w laboratorium dla pozycji siedzącej z pięcioma wymuszeniami zarejestrowanymi w rzeczywistych warunkach dla pojazdów samochodowych, traktorów i maszyn budowlanych. Każdy sygnał został ograniczony do częstotliwości od 1 do 20 Hz i długości 15 s. Celem eksperymentu było znalezienie optymalnej kombinacji osi oraz mnożników osi dla oceny komfortu drgań. Na podstawie badań Marjanen stwierdził:

- Korelacja pomiędzy ekspozycją na drgania a poziomem dyskomfortu jest najwyższa w przypadku włączenia do oceny drgań wszystkich 12 osi, przy czym:
 - o Małą statystyczna różnica występuje pomiędzy oceną wykorzystującą tylko 3 osie translacyjne dla interfejsu siedzenie-pośladki z mnożnikami osi 1.4 a oceną na podstawie wszystkich 12 osi.
 - o Wpływ rotacji na ocenę komfortu jest znikomy
- Zastosowanie krzywych ważenia częstotliwościowego tylko nieznacznie poprawia korelację
- Mnożniki osi dla oparcia fotela i drgań rotacyjnych pogarsza korelację
- Wskaźnik r.m.s. jest lepszym wskaźnikiem dla oceny niż r.m.q.

Autor eksperymentu widzi potrzebę i możliwość poprawy obecnej metody lub opracowania kompletnie nowej metody oceny. Na chwilę obecną podstawowym celem rozwoju jest poprawa obecnej metody poprzez optymalizację procesu pomiarowego i procedury oceny drgań. Najlepszym rozwiązaniem dla poprawy korelacji wg autora badań wydaje się być zastosowanie na szerszą skalę mnożników osi.

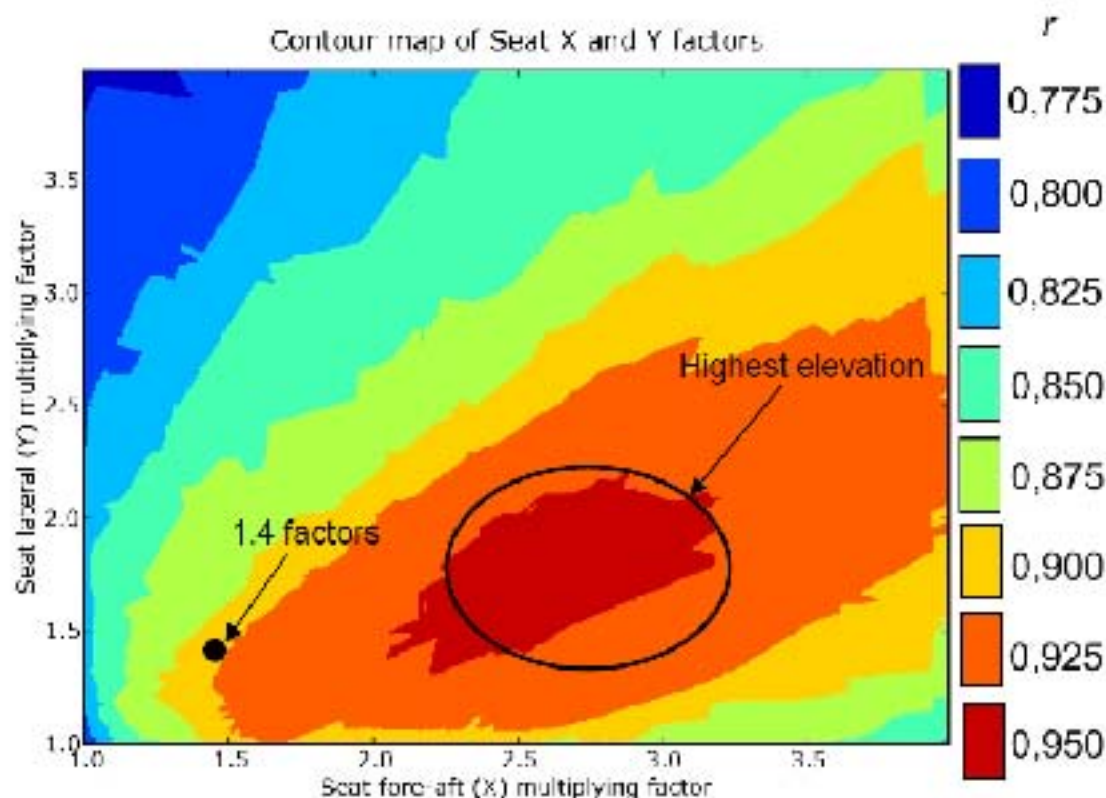
Marjanen przeprowadził analizę regresyjną oraz przeszukiwanie optymalnego rozwiązania metodą *brute force* zarejestrowanych wyników, co pozwoliło oszacować nowe wartości mnożników osi dla oceny komfortu. Nowe mnożniki zostały przedstawione w formule poniżej dla ogólnej oceny drgań.

$$a_v = (2.7^2 a_{wx}^2 + 1.8^2 a_{wy}^2 + 1.0^2 a_{wz}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

Dzięki metodzie *brute force* można zaobserwować położenie maksimum na tle pozostałych możliwych rozwiązań, co przedstawiono na rysunku 3.6 poniżej. Dla osi podłużnej mnożnik jest prawie dwukrotnie większy (2.7) natomiast dla osi poprzecznej o 28%. Standard ISO 2631 podaje dla obu kierunków drgań wartość mnożnika 1.4.

Na podstawie powyższego przeglądu publikacji można wnioskować o niewłaściwych metodach oceny drgań mechanicznych proponowanych przez międzynarodowy standard ISO 2631-1. Pojawiają się wątpliwości, co do zastosowania krzywych ważenia częstotliwościowego [43], mnożników osi [44] [45], metod oceny subiektywnej drgań [40] [41] czy też metod uśredniania [21] [43]. Sugeruje to, że obecne

metody oceny drgań nie dostarczają dokładnych wyników, które mogą być porównywane dla różnych środowisk [40]. Jak dotąd nie zaproponowano żadnej innej metody oceny drgań aczkolwiek Griffin w swojej publikacji [21] sugeruje, że metody oceny komfortu będą w przyszłości opierały się na przewodnikach, zunifikowanych metodach pomiaru, obliczeń i oceny subiektywnej drgań w zależności od środka transportu czy też środowiska ekspozycji na drgania. Przykładem takiego rozwiązania jest standard EN 12299 dla pojazdów szynowych.



Rys. 3.6 Mapa konturowa mnożników osi dla drgań podłużnych a_x i poprzecznych a_y dla jednostkowej wartości mnożnika osi. Wartość wsp. korelacji r wzrasta wraz ze zmianą koloru ku cieplejszej barwie.

Rozwiązaniem tych problemów może być weryfikacja i ewentualne uzupełnienie norm odpowiednio do środowiska oddziaływania drgań na człowieka, co sugeruje Griffin w swojej publikacji [21]. Takim rozwiązaniem jest norma EN 12299:09 [10] dla transportu szynowego.

4. CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWA ANALIZA SYGNAŁÓW

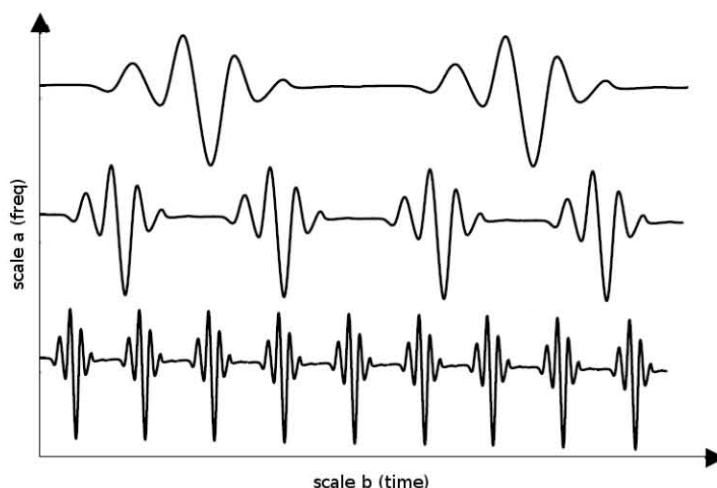
Analiza częstotliwościowa sygnałów stacjonarnych jest powszechnie znana i szeroko stosowana. Przedstawia się w niej badany sygnał $x(t)$, jako sumę sygnałów elementarnych (bazowych) $g(t)$:

$$x(t) = \sum_k a_k \cdot g_k(t) \quad (4.1)$$

gdzie

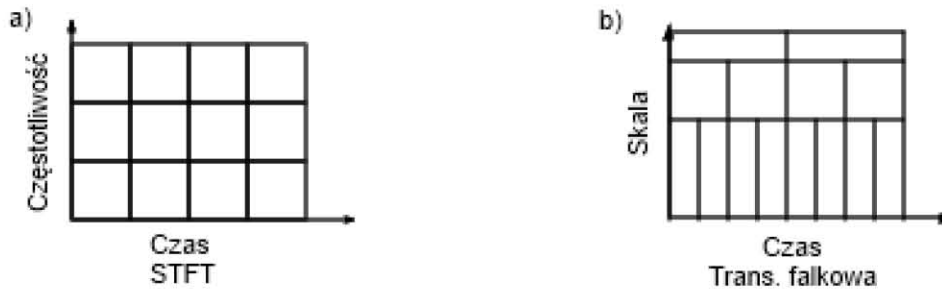
$$a_k = \int x(t) \cdot \gamma_k^*(t) dt \quad (4.2)$$

i $\gamma_k^*(t)$ jest sygnałem dualnym do $g_k(t)$, a znak „*” oznacza sprzężenie zespolone. Każdy z sygnałów bazowych ma inną częstotliwość. Wartości współczynników a_k określają, jakie częstotliwości występują w sygnale a jakie nie. Funkcje $g_k(t)$ i $\gamma_k(t)$ mogą mieć różny charakter w zależności od rodzaju analizowanego sygnału. W przypadku sygnałów stacjonarnych one także powinny być stacjonarnymi drganiami o nieskończonym nośniku, takimi np. jak sygnały (ko)sinusoidalne w bazie fourierowskiej. Dla sygnałów niestacjonarnych funkcje bazowe powinny zaś mieć postać niestacjonarnych oscylacji impulsowych o skończonym nośniku, takich np. jak w transformacji falkowej [46]. Im kształt funkcji bazowych będzie bardziej dopasowany do analizowanego sygnału tym mniejsza liczba tych funkcji wystarczy do jego aproksymacji.



Rys. 4.1 Ilustracja skalowania i przesunięcia falki matki.

Przykładowy zestaw funkcji bazowych wykorzystywanych do analizy sygnałów niestacjonarnych pokazano na rysunku 4.3. Każda funkcja bazowa pokrywa określony przedział czasowy i częstotliwościowy oraz na podstawie równania 4.2 wyznacza się ilość sygnału, przypadającą na określoną komórkę czasowo-częstotliwościową. Pola wszystkich takich komórek nie powinny się nakładać i dać po zsumowaniu całą przestrzeń czasowo-częstotliwościową.



Rys. 4.2 Podstawowe szachownice dekompozycji czasowo-częstotliwościowej sygnałów. Krótkoczasowej Transformacji Fouriera STFT (a) oraz transformacja falkowa (b).

Na rys. 4.2 przedstawiono dwie najczęściej wykorzystywane szachownice czasowo-częstotliwościowe wykorzystywane do podziału tej przestrzeni. Pierwsza z nich dotyczy krótkoczasowej transformacji Fouriera STFT a druga transformacji falkowej. W przypadku pierwszym komórki szachownicy mają zawsze taką samą wielkość i kształt, w przypadku drugim taką samą wielkość, lecz różny kształt: dla niskich częstotliwości mają lepszą rozdzielczość częstotliwościową a gorszą czasową. Dla wysokich częstotliwości odwrotnie – gorszą rozdzielczość częstotliwościową a lepszą czasową. Częstotliwość analizująca zmieniająca się wraz z długością okna czyni transformację falkową bardziej elastyczną i wrażliwą na chwilowe zmiany w sygnale w porównaniu z krótkoczasową transformacją Fouriera.

4.1. Transformata falkowa

Jak już wiadomo sygnały przyspieszenia rejestrowane w pojazdach są często sygnałami niestacjonarnymi, co ogranicza możliwość stosowania transformaty Fouriera do ich analizy. Wydaje się, że zastosowanie analizy czasowo-częstotliwościowej byłoby w takich przypadkach bardziej odpowiednie. Jednym z narzędzi analizy czasowo-częstotliwościowej jest ciągła transformata falkowa CWT, którą definiuje się następująco [47]:

$$CWT_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi_{a,b}(t) dt \quad (4.3)$$

gdzie:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (4.4)$$

$f(t)$ – sygnał badany w funkcji czasu, należący do przestrzeni $L^2(\mathbb{R})$,

a - współczynnik skali należący do \mathbb{R}^+ ,

b - współczynnik przesunięcia należący do \mathbb{R} ,

t - czas.

Człon $\frac{1}{\sqrt{a}}$ odpowiada za normalizację falki.

Funkcja falkowa powinna spełniać dwa założenia. Po pierwsze jej wartość średnia powinna być równa zero.

Na podstawie powyższej analizy sygnałów syntetycznych i rzeczywistych można wnioskować o dużej przydatności ciągłej transformacji falkowej CWT dla potrzeb pozyskiwania wartości parametrów sygnałów przyspieszenia w funkcji czasu. Daje to możliwość zastosowania CWT, jako wydajnego narzędzia monitoringu parametrów sygnału na potrzeby oceny chwilowych zaburzeń komfortu jazdy. Autor w dwóch publikacjach konferencyjnych [48] [49] przedstawił własne analizy sygnałów zarejestrowanych w czasie badań. Streszczenie tych publikacji zostało zawarte w rozdziale 6.3.

Transformacja falkowa jest stosunkowo nową i dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki analizy sygnałów. W ostatnim dziesięcioleciu ukazało się kilka podręczników na polskim rynku wyjaśniających obszernie teorię jak i zastosowanie praktyczne falek. Białasiewicz [47] i Wojtaszczyk [50] opisują podstawy teoretyczne falek i analizy falkowej. Zieliński [46] oraz Henel i Olejniczak [51] traktują analizę falkową jako jedno z narzędzi analizy i przetwarzania sygnałów. Hasiewicz i Sliwiński wykorzystują faleki o zwartym nośniku do nieparametrycznej identyfikacji systemów. Zajac [52] zastosował dyskretną transformatę falkowa do monitoringu i diagnostyki układów elektromechanicznych. Natomiast Augustyniak [53] wykorzystał transformację falkowa w diagnozowaniu sygnałów biomedycznych.

Poza publikacjami książkowymi ukazało się wiele artykułów poświęconych zastosowaniu transformacji falkowej w różnych dziedzinach techniki. Między innymi w zagadnieniach odszumiania sygnałów dla oceny stanu technicznego łożyskowania urządzenia wyciągowego [54], wykrywania uszkodzeń zazębienia przekładni zębatych [55] [56], monitoringu urządzeń mechanicznych [57] [58], czy też diagnostyki układów napędowych maszyn górniczych [59]. Za pomocą TF proponowano sprawdzanie luzu w połączeniu cylinder-tłok silnika spalinowego [60] lub ocenę pracy zawieszenia samochodu osobowego [61].

W swojej pracy doktorskiej Wawrzyniak [62] zastosowała TF do pozyskiwania informacji akustycznych o parametrach sprężystych i zbiornikowych skał. Ruchała [63] w rozprawie doktorskiej zastosował TF do identyfikacji parametrów modelu fundamentu pod turbozespół a Barański [64] dla zbudowania falkowej funkcji przejścia wykorzystywanej do analizy drgań układu narzędzie ręczne – ręka operatora. Można też zastosować TF do analizy czosowo-częstotliwościowej zmian parametrów orientacji przestrzennej Ziemi, co opisała w swojej rozprawie Rzeszótka [65].

Zastosowanie TF pojawia się coraz częściej tam gdzie poza informacją o częstotliwości sygnału również czas wystąpienia danej częstotliwości odgrywa ważną rolę podczas analizy sygnału.

5. CEL, ZAKRES I TEZA PRACY

Celem głównym rozprawy jest opracowanie nowej metody teoretycznej oceny komfortu jazdy dla tramwajowej komunikacji miejskiej z weryfikacją numeryczną oraz badawczą.

Celem naukowym rozprawy jest znalezienie parametrów drgań, które mają największy wpływ na subiektywną ocenę komfortu jazdy występujących w tramwajowej komunikacji miejskiej. Do oceny wpływu jakościowego i ilościowego poszczególnych parametrów drgań zostanie zastosowana ciągła transformacja falkowa oraz regresja logistyczna porządkowa.

Celem użytecznym rozprawy jest zbudowanie modelu matematycznego komfortu drgań dla tramwajowej komunikacji miejskiej. Model ten w przyszłości może zostać wykorzystany do oceny, prognozowania lub monitorowania poziomu komfortu jazdy.

Zakres rozprawy rozpoczyna się od przeglądu literatury, publikacji i norm, opisujących metody oceny drgań i ich krytykę oraz stan obecnej wiedzy i kierunku dalszych badań. Zakres ten został przedstawiony w rozdziale 2 i 3 niniejszej rozprawy. W dalszej części zakres rozprawy obejmuje wstępne badania polowe z rejestracją sygnałów przyspieszeń na podłodze tramwaju oraz ocenę możliwości zastosowania transformacji falkowej do analizy jakościowej i ilościowej ww. sygnałów przyspieszeń, co zostało zaprezentowane w rozdziale 6. Dalszy zakres obejmuje właściwe badania polowe z rejestracją sygnałów przyspieszeń na konstrukcji fotela pasażera i sygnałów ocen subiektywnych 14-stu osób zajmujących miejsca siedzące. Powyższy zakres łącznie z analizą falkową właściwych sygnałów został przedstawiony w rozdziale 7. W rozdziale 8 przedstawiono końcowy zakres rozprawy mianowicie opracowanie modelu matematycznego komfortu jazdy z wykorzystaniem regresji logistycznej porządkowej oraz ocenę możliwości predykcji poziomu komfortu jazdy.

TEZA PRACY

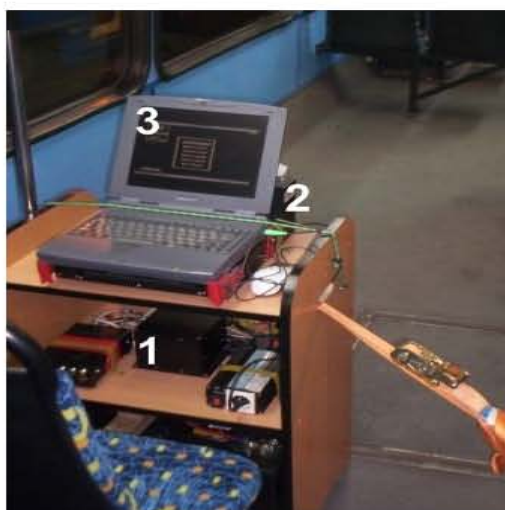
Poprzez wykorzystanie i analizy chwilowych zaburzeń komfortu jazdy istnieje możliwość oceny ogólnego komfortu jazdy dla krótkich odcinków przejazdu. Krótkie odcinki przejazdu są charakterystyczne dla tramwajowej komunikacji miejskiej. Charakter ruchu tramwaju jest silnie podyktowany jakością i geometrią torowiska, dużą liczbą łuków i rozjazdów oraz współużytkowania ulic miasta z pojazdami samochodowymi.

Poprzez zastosowanie transformaty falkowej istnieje możliwość precyzyjnej oceny wpływu chwilowych zaburzeń komfortu w pojazdach kołowych na odczucie komfortu jazdy w porównaniu ze stosowanymi konwencjonalnymi metodami analizy.

6. BADANIA WSTĘPNE

6.1. Badania

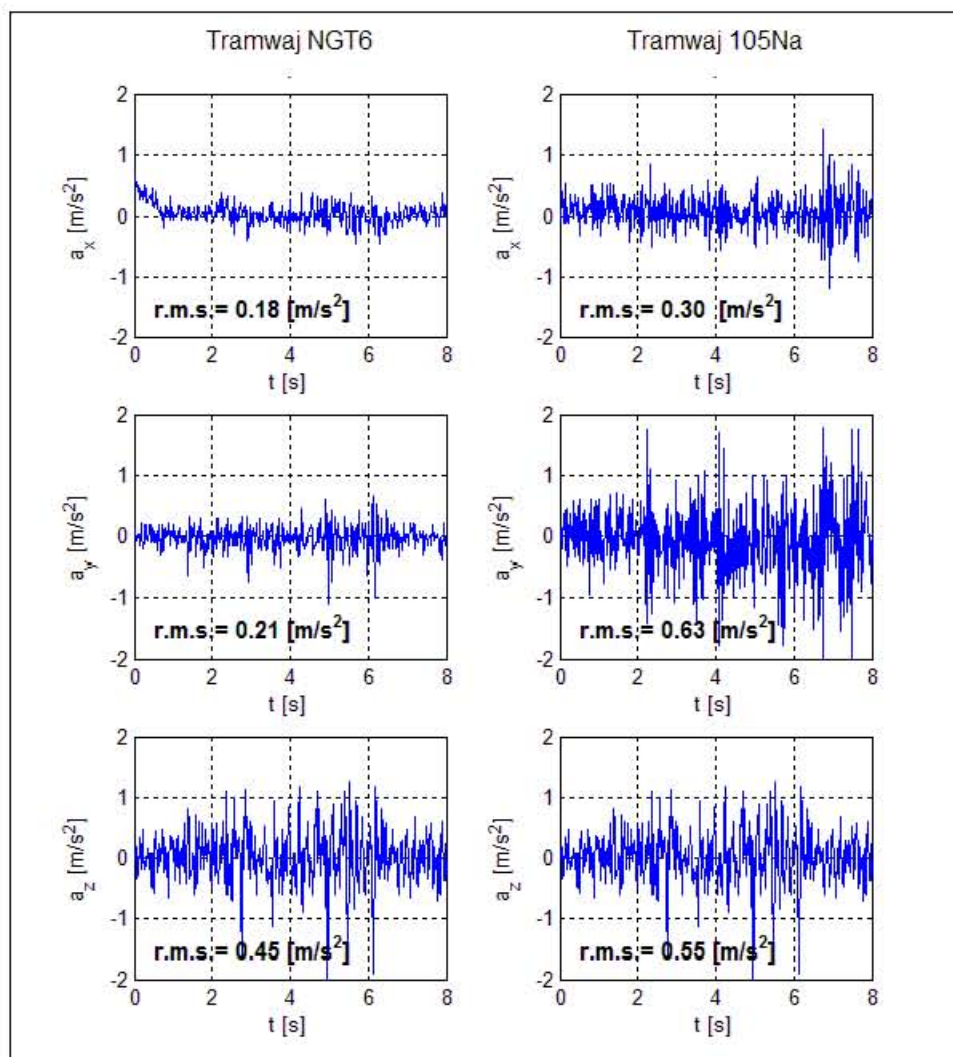
Zgodnie z tezą pracy ocenę komfortu w tramwajach przeprowadzono wykorzystując chwilowe zaburzenia komfortu jazdy (CZKJ). Jak wspomniano wcześniej czas przebywania pasażerów w tramwaju jest ograniczony i na poczucie komfortu wpływ mają jego chwilowe zaburzenia. Do analizy sygnałów przyspieszeń wykorzystano ciągłą transformację falkową. W celu zweryfikowania możliwości zastosowania ciągłej transformacji falkowej do oceny CZKJ autor wraz ze zespołem wykonał szereg pomiarów sygnałów przyspieszeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (rys. 3.1) w dwóch losowo wybranych tramwajach [66]. Pierwszych pomiarów dokonano na podłodze kilkudziesięcioletniego tramwaju 105Na. Drugim badanym tramwajem był kilkuletni tramwaj NGT6. Na rysunku 6.1 przedstawiono zamocowaną aparaturę pomiarową. Głównymi elementami toru pomiarowego był układ pomiarowy Crossbow® (1), przetwornik A/C AD8 (2) oraz komputer (3) z oprogramowaniem i zasobami pamięci. Układ pomiarowy Crossbow® umożliwiał rejestrowanie sygnałów przyspieszenia wzdłuż trzech prostopadłych osi. Sygnały przyspieszeń próbkowano z częstotliwością 50 [Hz]. Stan techniczny tramwajów nie został zweryfikowany przed badaniami i nie był brany pod uwagę, ponieważ Autorzy badania chcieli uzyskać przeciętne wskaźniki komfortu dla pojazdów będących w eksploatacji. Badania przeprowadzono bez udziału pasażerów na długim odcinku tracji Krakowskiej Komunikacji Miejskiej. Przejazd obejmował szereg ulic starego miasta, jak również odcinki wydzielonego torowiska poza centrum miasta. Przejazd ten pozwolił zarejestrować sygnały dla bardzo szerokiej charakterystyki tracji tramwajowej tj.: odcinki proste, krzywe przejściowe, łuki kołowe i rozjazdy, w różnym stanie technicznym. Badania w takich samych warunkach, z tą samą aparaturą, wielkościami mierzonymi i odcinkami torowiska przeprowadzono dla tramwaju NGT6 losowo wybranego z taboru Krakowskiej Komunikacji Miejskiej.



Rys. 6.1 Stanowisko pomiarowe. Czujnik przyspieszeń Crossbow® (1), przetwornik A/C AD8 (2) oraz komputer (3) z oprogramowaniem i zasobami pamięci.

6.2. Obiektywna ocena poziomu komfortu

Spośród zarejestrowanych sygnałów Autor wybrał do analizy porównawczej tramwaju 105Na i NGT6 odcinek torowiska znajdujący się na skrzyżowaniu ulic Dietla, Stradomska i Krakowska. Jest to przejazd przez skrzyżowanie z rozjazdem. Odcinek o niskiej jakości torowiska (lipiec 2008). Na rysunku 6.2 przedstawiono sygnały nieważonych przyspieszeń w trzech osiach zarejestrowane w czasie przejazdu przez ww. odcinek. Dla każdego kierunku danego tramwaju obliczono wartość skuteczną nieważonych przyspieszeń r.m.s. Można zauważyć większe amplitudy w każdym kierunku drgań dla tramwaju 105Na, co potwierdzają wartości r.m.s. W przypadku NGT6 największe przyspieszenia występują dla osi pionowej z, dla 105Na w osi y. W obu przypadkach najmniejsze amplitudy przyspieszeń występują w osi podłużnej x.



Rys. 6.2 Sygnały przyspieszenia rejestrowane na podłodze oraz ich wartości skuteczne r.m.s. [66].

Chcąc ocenić poziom komfortu dla zarejestrowanego na skrzyżowaniu ośmiosekundowego odcinka pomiarowego można wykorzystać zdefiniowane przez ISO 2631:1997 [12] i BS 6841:1987 [13] orientacyjne poziomy dyskomfort. Przedziały te przedstawiono na rysunku 3.3. Na podstawie wartości r.m.s. zarejestrowanych przyspieszeń można wnioskować, że poziom dyskomfortu podczas pokonywania

rozjazdu o nienajlepszym stanie technicznym kształtuje się na poziomie dość niekomfortowym lub o małym dyskomforcie dla przyspieszenia poprzecznego a_y tramwaju 105Na. Dla tramwaju NGT6 poziom dyskomfortu ocenić można, jako mały dyskomfort dla kierunku drgań pionowych a_z . Ważenie zarejestrowanych przyspieszeń w dziedzinie częstotliwości doprowadziłoby do obniżenia wartości r.m.s, przez co zbliżenia się do poziomu braku dyskomfortu wg skali sugerowanej przez ww. standardy.

W zakresie swoich badań autor przeprowadził pomiar przyspieszeń w trzech kierunkach dla dwóch różnych tramwajów (105Na, NGT6) Krakowskiej Komunikacji Miejskiej [66]. Przeprowadzono kalkulacje wartości r.m.s. przyspieszeń drgań dla odcinka przejazdu ze zbliżonymi prędkościami przez skrzyżowanie o obniżonej jakości torowiska.

Tab. 6.1 Zestawienie wartości r.m.s. sygnałów przyspieszeń zarejestrowanych w tramwaju 105Na i NGT6.

| Kierunek drgań Tramwaj | a_x [m/s ²] | a_y [m/s ²] | a_z [m/s ²] | a_v [m/s ²] |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 105Na | 0.30 | 0.63 | 0.55 | 0.89 |
| NGT6 | 0.18 | 0.21 | 0.45 | 0.53 |

W przypadku każdego z kierunków drgań wartość r.m.s była wyższa w przypadku tramwaju 105Na. Wykorzystując zależność 3.9 obliczono wartość a_v dla każdego z tramwajów dla pozycji siedzącej i miejsca przekazywania drgań przez pośladki (tab. 6.1). Wykorzystując skalę komfortu ISO 2631 (rys. 3.3) można ocenić komfort w tramwaju 105Na, jako ‘dość niekomfortowo’ lub ‘niekomfortowo’. W przypadku NGT6 byłoby to o jeden poziom niżej, czyli ‘mały dyskomfort’ lub ‘dość niekomfortowo’.

6.3. Interpretacja wyników ciągłej transformacji falkowej CWT

W niniejszej pracy do analizy sygnałów za pomocą ciągłej transformaty falkowej CWT wykorzystano pakiet oprogramowania YAWTb (Yet Another Wavelet Toolbox) pracujący w środowisku Matlab [67]. Pakiet ten został wykorzystany w rozprawie doktorskiej Rzeszótko [65]. Twórcami oprogramowania są pracownicy uczelni i ośrodków badawczo rozwojowych. Oprogramowanie dostępne jest na zasadach powszechnej licencji publicznej GPL. W pakiecie, dostępnych jest kilka możliwych do wyboru falek. Do analizy autor wybrał falekę Morleta, jako funkcję analizującą z częstotliwością centralną $f_c = 0.95$ Hz. Częstotliwość f_a związana jest ze skalą a następującą zależnością:

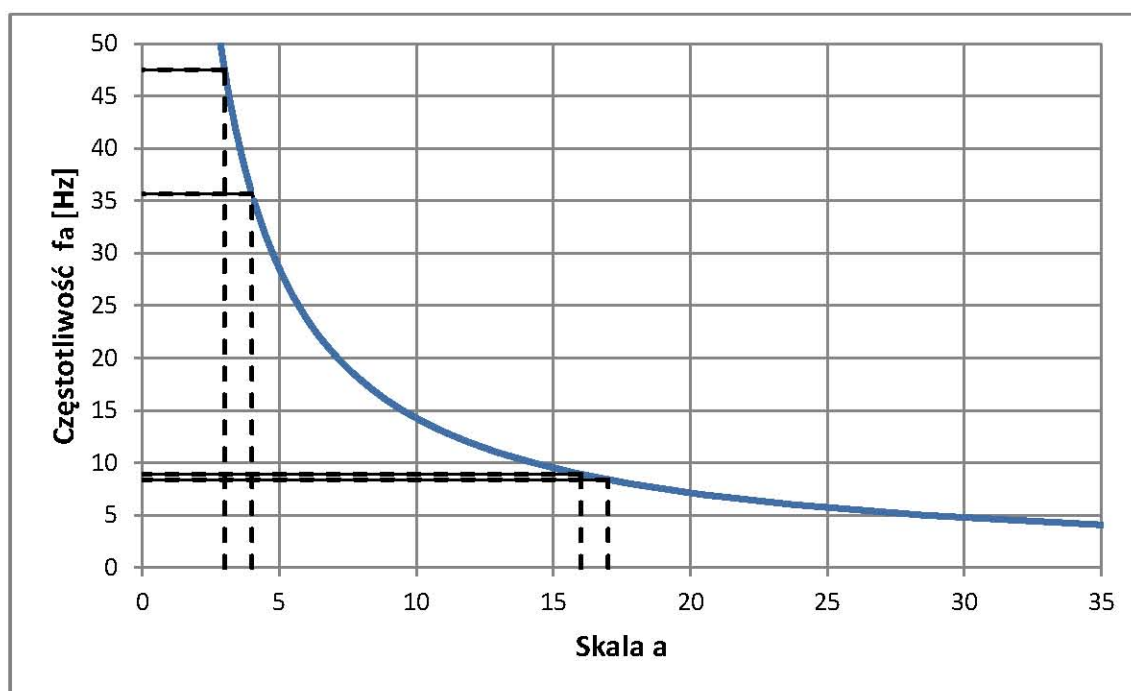
$$f_a = \frac{f_c}{a \cdot \Delta t} \quad (6.1)$$

gdzie:

f_a – częstotliwość (częstotliwość centralna dla skali a) [Hz],

f_c – częstotliwość centralna falki matki [Hz],
 a – nr skali [1/s],
 Δt - okres próbkowania [s].

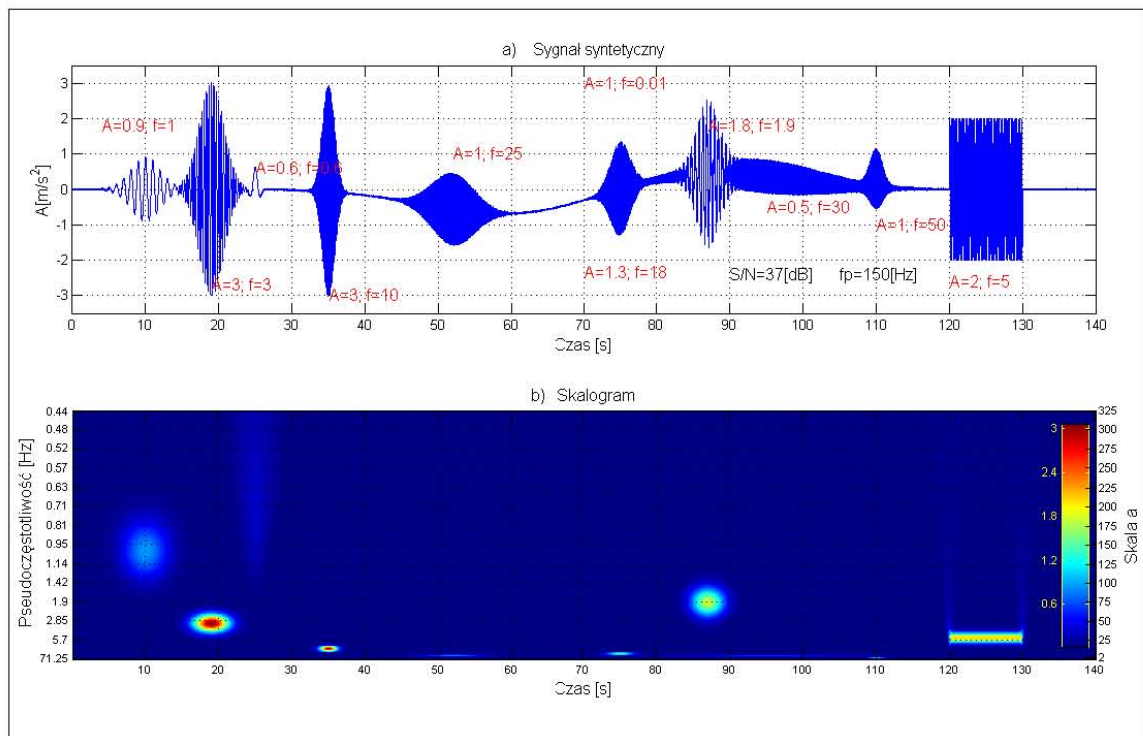
Zależność 6.1 przedstawiono na rysunku 6.3. Na rysunku można zauważyć zmieniającą się rozdzielczość częstotliwościową i tym samym czasową wraz ze zmianą skali. Przykładowo dla skal 3 i 4 mamy odpowiednio 47.50 Hz i 35.62 Hz. Różnica wynosi 11.87 Hz. Dla skal 16 i 17 mamy odpowiednio 8.90 Hz i 8.38 Hz. Różnica wynosi 0.52 Hz. Tą zmieniającą się rozdzielczość wraz ze zmianą nr skali a można zauważyć na skalogramie sygnału przyspieszenia (rys. 6.4b). Objawia się to różnym ułożeniem widm. Od podłużnych wzdłuż osi skali (wysoki nr skali a , niska częstotliwość w sygnale), co wskazuje na lepszą rozdzielczość częstotliwościową i gorszą rozdzielczość czasową i odwrotnie dla widm ułożonych podłużnie wzdłuż osi czasu (niski nr skali, wysoka częstotliwość w sygnale). Na skalogramie można zidentyfikować parametry poszczególnych fragmentów sygnału, co do położenia w czasie, częstotliwości i amplitudy (kolor).



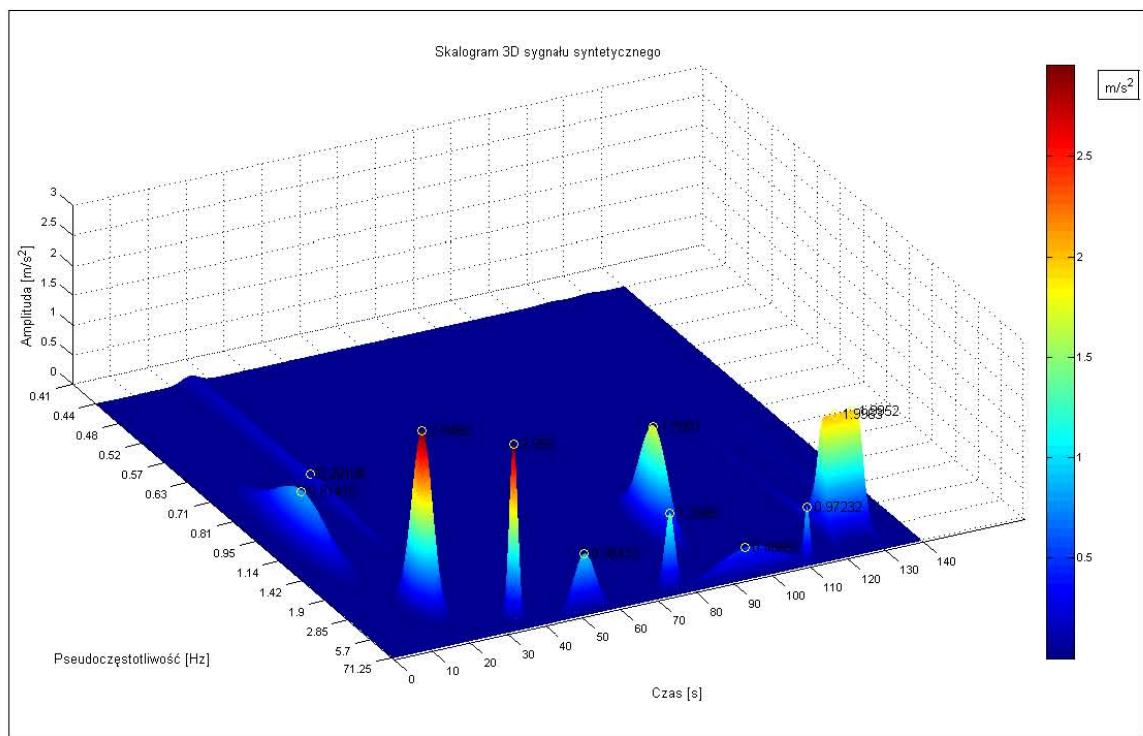
Rys. 6.3 Zależność między skalą a i częstotliwością środkową skalowanej falki Morleta f_a obliczoną dla sygnału próbkowanego z częstotliwością 150 Hz. Wraz ze zwiększaniem się nr skali (zmniejszaniem częstotliwości) wzrasta rozdzielczość częstotliwościowa w opozycji do rozdzielczości czasowej.

W poniższym przypadku przeprowadzono analizę dla 325 skal, co odpowiada przedziałowi częstotliwości od 71.25 Hz do 0.44 Hz. Zakres ten pokrywa się z zakresem częstotliwości ocenianym przez normy ISO 2631 i BS6841. Na rysunku 6.4a przedstawiono 140 sekundowy sygnał syntetyczny próbkowany z częstotliwością 150 Hz, składający się z 11 zróżnicowanych parametrów sygnałów. Sygnały składowe są przejściowymi sygnałami sinusoidalnymi ograniczonymi w czasie oknem Gaussa z wyjątkiem ostatniego sygnału składowego. Parametry sygnałów zostały zawarte w tabeli 6.1. Do sygnału został dodany szum biały o rozkładzie normalnym. Stosunek mocy średniej sygnału do mocy średniej szumu $S/N = 35$ dB.

Wynikiem analizy jest macierz zawierająca na przecięciu odpowiednich skal i próbek czasu wartości współczynników transformacji $CWT_f(a,b)$ czy też wprost wartości amplitud sygnału. Taką macierz wartości, przedstawioną w formie graficznej nazwano skalogramem.



Rys. 6.4 Wyniki transformaty falkowej: a) sygnał syntetyczny, b) skalogram współczynników ciągłej transformacji falkowej, reprezentacja czas-skala.



Rys. 6.5 Skalogram 3D sygnału syntetycznego z wartościami amplitud dla znalezionych częstotliwości.

Na skalogramie można odczytać położenie w czasie, amplitudę i wartość częstotliwości występujących w sygnale oraz określić przedział czasu występowania danej częstotliwości (rys. 6.4b). Wartości trzeciej współrzędnej, amplitudy przedstawione są w postaci odpowiedniego koloru. Skale dla amplitudy umieszczono po prawej stronie skalogramu. Skalogram można również przedstawić w postaci wykresu 3D, co zostało pokazane na rys. 6.5. Na skalogramie 3D zostały naniesione maksymalne wartości amplitud zidentyfikowanych przez CWT.

W przypadku wyników transformacji CWT na skalogramie nie pojawiła się częstotliwość 0.01 Hz. Wynika to z ograniczonych możliwości obliczeniowych komputerów klasy PC. Korzystając ze wzoru 4.7 i znając częstotliwość centralna falki matki ($f_c=0.95$ [Hz], falka Morleta) można się spodziewać, że częstotliwość 0.01 Hz zostanie odnaleziona na 14250 skali. Taka liczba skal oraz długość sygnału równa 21000 próbek daje ponad 2 TB (double precision) danych w macierzy. Z taką ilością danych mogą poradzić sobie jedynie komputery dużej mocy obliczeniowej. Częstotliwość 0.01 Hz jest poza zakresem niniejszej pracy. Została wykorzystana do sprawdzenia transformaty YAWTb ze względu na zdolność wykrywania sygnałów przejściowych o wyższych częstotliwościach znajdujących się na zboczach sygnałów o częstotliwościach niższych.

Do rozpoznania częstotliwości dla maksymalnej amplitudy pojawiającej się na skalogramie zastosowano algorytm wykorzystany w rozprawie doktorskiej Barańskiego [64]. Algorytm pozwala na obliczenie znormalizowanej wartości r.m.q. (2.3) z przebiegu współczynników $CWT_f(a,b)$ otrzymanych po transformacji falkowej dla każdej skali a oddzielnie.

$$r.m.q.(a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot X(a) \quad (6.2)$$

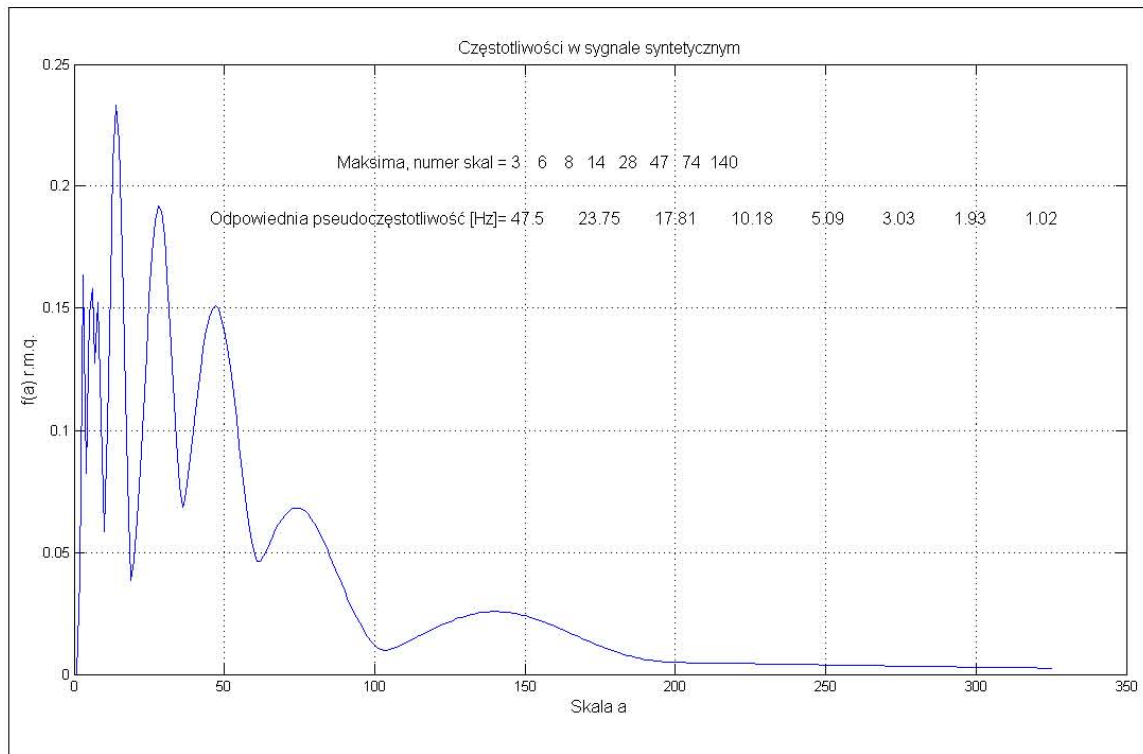
gdzie:

a – skala,

$X(a)$ – wartość r.m.q. współczynników falkowych dla skali a .

Na rysunku 6.6 pokazano 8 lokalnych maksimów odpowiadających ośmiu częstotliwościom występującym na skalogramie sygnału syntetycznego. Pozostałe dwie częstotliwości nie zostały wykryte. Sygnał o parametrach 30 Hz, 1 m/s^2 (najbliżej 5 skala, $f_a = 28.5$ Hz) nie ukazała się na powyższym przebiegu, jako maksimum lokalne tylko, jako wartość na lewym zboczach maksimum dla 6 skali (23.75 Hz), czyli sygnał składowy dla 25 Hz i 0.5 m/s^2 . Maksima położone na sąsiednich skalach nie zostaną wykryte przez ten algorytm. Drugi sygnał niewykryty, to trzeci sygnał składowy, 0.6 Hz i 0.6 m/s^2 . Nie pojawia się na powyższym wykresie, ponieważ wartość r.m.q. dla skali najbliższej 0.6 Hz (237 skala, 0.6 Hz) przysłonięte jest przez wyższe wartości ze zbocza dla sygnału pierwszego 1 Hz i 0.9 m/s^2 . Tylko niektóre maksima położone na tej samej skali zostaną wykryte przez ten algorytm. Dwa wyżej wymienione niedomagania powodują niemożliwość sprawnego działania tego algorytmu w sposób automatyczny.

Kolejnym algorytmem poszukiwania maksimów na skalogramie jest skrypt napisany w środowisku *Matlab* [68], dalej zwany *3DMaxAmp*, który to skrypt znajduje maksima i ich współrzędne dla macierzy współczynników transformacji falkowej. Wyniki pracy tego programu widoczne są na skalogramie 3D w postaci wartości amplitud naniesionych na skalogram (rys. 6.5).



Rys. 6.6 Znormalizowane wartości r.m.q. w funkcji numeru skali.

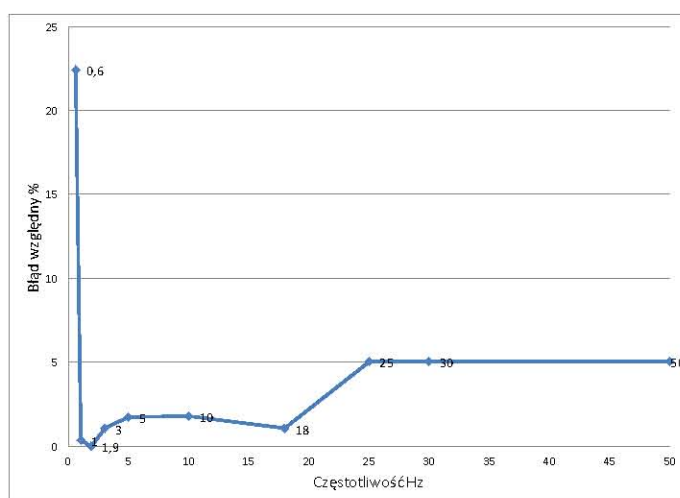
W tabeli 6.2 przedstawiono wyniki rozpoznania częstotliwości, amplitudy i położenia poszczególnych sygnałów składowych na osi czasu przy wykorzystaniu *3DMaxAmp*. W kolumnie drugiej zapisano wartości parametrów sygnałów składowych. Kolumna trzecia zawiera wartości parametrów sygnałów składowych odczytanych za pomocą *3DMaxAmp*. W czwartej kolumnie można znaleźć numer skali odpowiadający częstotliwości zadanej w sygnale oraz numer skali odpowiadający częstotliwości znalezionej przez *YAWTb* i *3DMaxAmp*. W piątej kolumnie znajdują się błędy względne dla każdego sygnału i jego parametrów wyrażone w procentach.

Na podstawie powyższej analizy można stwierdzić, że błędy względne dla położenia sygnałów składowych zawierają się w przedziale od 7 % do 66 %, poza dwoma sygnałami. Mianowicie dla sygnału sinus 5 Hz błąd wynosił 0.77 %. Co spowodowane było sygnałem nie mającym maksimum dla jednej chwili czasu, ale dla przedziału. W tym przypadku był to przedział 10 s. W drugim przypadku jest to sygnał o dość niskiej amplitudzie 0.5 m/s^2 , (w bliskim sąsiedztwie dwóch innych sygnałów), dla którego błąd równy jest 0.76 %.

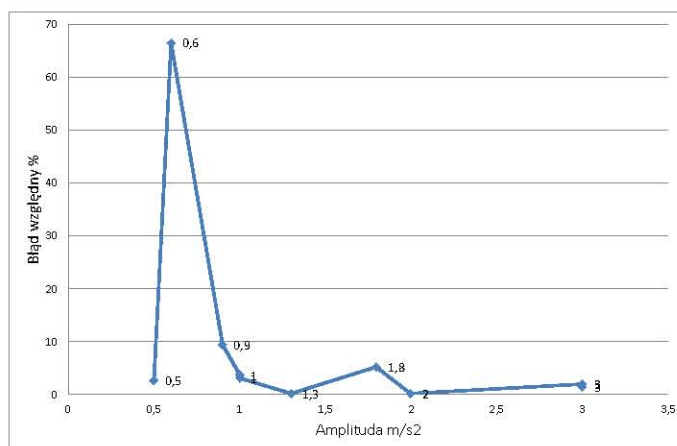
Poniżej zamieszczono dwa wykresy (rys. 6.7 i 6.8), na których przedstawiono błędy względne w funkcji częstotliwości i amplitudy zadanej. Pozwoli to na zdiagnozowanie możliwości analizy sygnału, przez pakiet *YAWTb* oraz przydatność *3DMaxAmp* w dalszej części pracy. Można zauważyć na rysunku 6.7 wzrost wartości błędu wraz ze zwiększającą się częstotliwością, co spowodowane jest zmniejszeniem się rozdzielczości częstotliwościowej dla niższych skal (wyższych częstotliwości). Jednak błąd ten utrzymuje się na rozsądnym poziomie do 5 %. W przypadku rozpoznania amplitud (rys. 6.8) nie można zaobserwować wyraźnej tendencji. Błąd utrzymuje się na średnio 5 % poziomie. Błąd kilkudziesięcioprocentowy występuje w połączeniu niskich wartości amplitudy i częstotliwości gdzie przykładem jest sygnał o amplitudzie 0.6 m/s^2 i częstotliwości 0.6 Hz. Odczytywanie położenia na osi czasu zadanych sygnałów utrzymuje się na niskim poziomie sięgającym 0,8 %.

Tab. 6.2 Wyniki rozpoznania częstotliwości, amplitudy i położenia na osi czasu. Opis w tekście.

| | Parametry | Sygnaly | 3DMaxAmp | Skala a , najbliższa zadanej/ YAWTb i 3DMaxAmp | Błąd 3DMaxAmp $ (2-3) /2\%$ |
|----|-----------------------|---------|----------|--|-----------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Częstot. zadana [Hz] | 0.6 | 0.7345 | 238/194 | 22.42 |
| | Położenie [s] | 25 | 25.0067 | | 0.026 |
| | Amplituda [m/s^2] | 0.6 | 0.1998 | | 66.49 |
| 2 | Częstot. zadana [Hz] | 1.0 | 1.0035 | 142/142 | 0.35 |
| | Położenie [s] | 10 | 10.0067 | | 0.066 |
| | Amplituda [m/s^2] | 0,9 | 0.8137 | | 9.47 |
| 3 | Częstot. zadana [Hz] | 1.9 | 1.9000 | 75/75 | 0 |
| | Położenie [s] | 87 | 87.0067 | | 0.007 |
| | Amplituda [m/s^2] | 1,8 | 1.7072 | | 5.15 |
| 4 | Częstot. zadana [Hz] | 3 | 2.9688 | 48/48 | 1.04 |
| | Położenie [s] | 19 | 19.0067 | | 0.035 |
| | Amplituda [m/s^2] | 3 | 2.9453 | | 1.88 |
| 5 | Częstot. zadana [Hz] | 5 | 4.9138 | 29/29 | 1.72 |
| | Położenie [s] | 120 | 124.6933 | | 0.768 |
| | Amplituda [m/s^2] | 2 | 1.9958 | | 0.18 |
| 6 | Częstot. zadana [Hz] | 10.0 | 10.1786 | 14/14 | 1.78 |
| | Położenie [s] | 35 | 35.0000 | | 0.019 |
| | Amplituda [m/s^2] | 3 | 2.9510 | | 1.41 |
| 7 | Częstot. zadana [Hz] | 18.0 | 17.8125 | 8/8 | 1.04 |
| | Położenie [s] | 75 | 75.0267 | | 0.08 |
| | Amplituda [m/s^2] | 1.3 | 1.2998 | | 0.20 |
| 8 | Częstot. zadana [Hz] | 25.0 | 23.75 | 6/6 | 5 |
| | Położenie [s] | 52 | 51.9667 | | 0.038 |
| | Amplituda [m/s^2] | 1.0 | 0.9629 | | 3.67 |
| 9 | Częstot. zadana [Hz] | 30 | 28.5 | 5/5 | 5 |
| | Położenie [s] | 95 | 95.3133 | | 0.757 |
| | Amplituda [m/s^2] | 0.5 | 0.4846 | | 2.62 |
| 10 | Częstot. zadana [Hz] | 50 | 47.5 | 3/3 | 5 |
| | Położenie [s] | 110 | 110.0067 | | 0.036 |
| | Amplituda [m/s^2] | 1 | 0.9729 | | 3.01 |



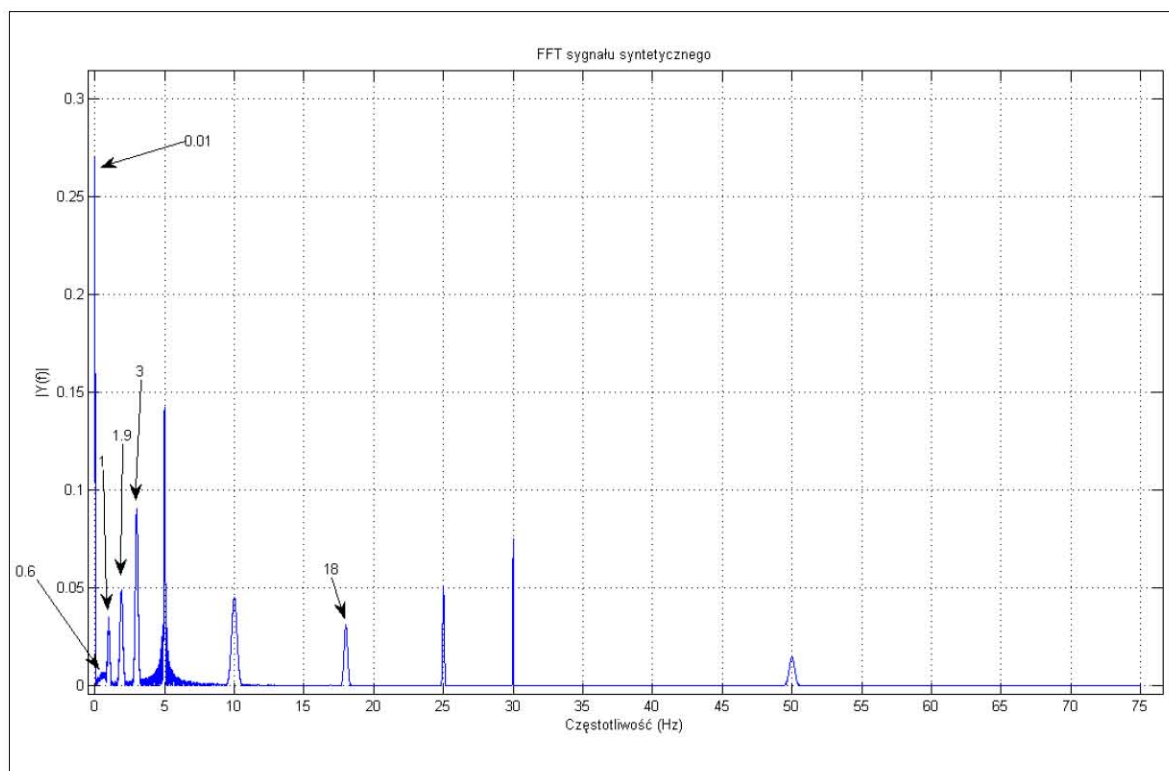
Rys. 6.7 Błędy względne identyfikacji wartości amplitudy w funkcji częstotliwości.



Rys. 6.8 Błędy względne identyfikacji wartości amplitudy w funkcji amplitudy.

Na widmie amplitudowo-częstotliwościowym Fouriera sygnału syntetycznego (rys. 6.9) można zauważyć wszystkie 11 zadanych częstotliwości. Wartość amplitud dla poszczególnych częstotliwości różni się zdecydowanie od wartości zadanych.

Dodatkowym i decydującym w przypadku tej pracy argumentem, przemawiającym za transformacją falkową w stosunku do transformacji Fouriera jest możliwość określenia chwili pojawienia danej częstotliwości. FFT przy transformacji z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości ztraca informacje o czasie występowania danej częstotliwości.



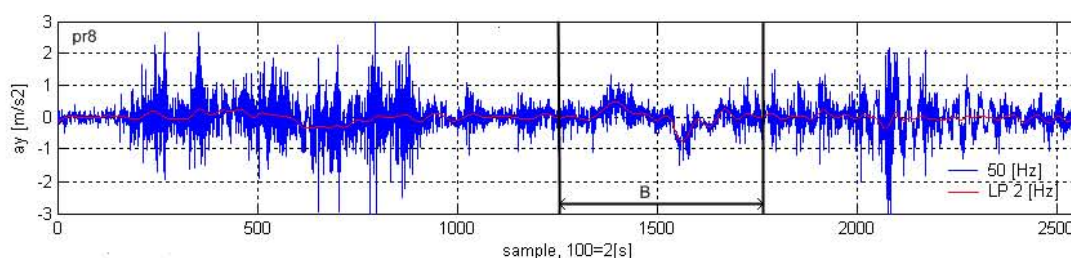
Rys. 6.9 Transformata Fouriera FFT sygnału syntetycznego. Są widoczne wszystkie częstotliwości, które zostały zadane. Wartości przy strzałkach w Hz.

Na podstawie powyższej analizy sygnału syntetycznego można wnioskować o wysokiej przydatności pakietu *Y4WTb* oraz skryptu *3DMaxAmp* dla identyfikacji parametrów drgań sygnałów. W następnym podrozdziale zostanie przedstawiona analiza sygnałów rzeczywistych zarejestrowanych podczas badań torowych.

6.4. Analiza czasowo-częstotliwościowa sygnałów przyspieszenia

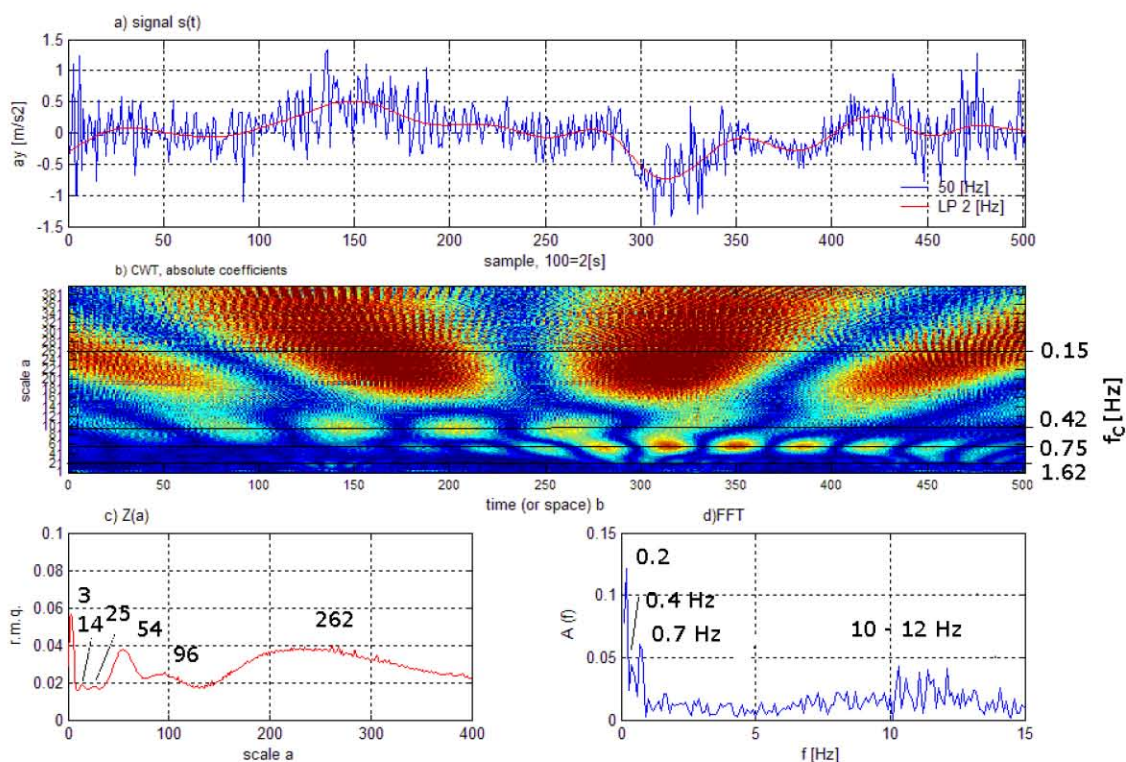
Poniżej przedstawiono analizę czasowo-częstotliwościową opisaną w rozdziale 4 trzech rzeczywistych sygnałów przyspieszenia zarejestrowanych na podłodze, podczas badań komfortu w tramwaju NGT6 [48] [49].

Na rysunku 6.10 przedstawiono 50-io sekundowy sygnał przyspieszenia bocznego a_y zarejestrowany na podłodze tramwaju NGT6 podczas badań opisanych w rozdziale 6.1. Sygnał próbkowano z częstotliwością 50 Hz. Z całego sygnału do dalszej analizy wybrano fragment oznaczony na rysunku litera B o długości 10 s, jako sytuację chwilowego zaburzenia komfortu jazdy. Fragment sygnału B opisuje dynamiczne zachowanie się nadwozia pojazdu przy przejeździe przez dwa łuki torowiska o przeciwnych krzywiznach (tzw. 's'). Na rys. 6.11 przedstawiono analizę fragmentu B. Przebieg sygnału (rys. 6.11a) zbliżony jest swoim kształtem do sinusoidy o amplitudzie ok. $0,5 \text{ m/s}^2$ i częstotliwości ok. $0,15 \text{ Hz}$. Na rys. 6.11b przedstawiono skalogram ciągłej transformaty falkowej dla 400 skal. Na rys. 6.11c przedstawiono numery skal, dla których wartość r.m.q. osiągała maksimum. Wykorzystując zależność 6.2 obliczono częstotliwości centralne i opisano nimi prawą oś skalogramu. Na rys. 6.11d przedstawiono szybką transformatę Fouriera FFT z podaniem wartości częstotliwości dla lokalnych maksimumów.



Rys. 6.10 Sygnał przyspieszenia bocznego a_y (niebieski) zarejestrowany na wydzielonym odcinku torowiska pomiędzy przystankiem Dworcowa i Kabel (ul. Wielicka). Sygnał a_y filtrowany filtrem dolnoprzepustowym 2 Hz (czerwony). Odcinek B – przejazd przez podwójny łuk.

Porównując przebieg sygnału oraz jego transformatę falkową można zauważyć zbieżność w czasie charakteru drgań sygnału z maksymalnymi wartościami współczynników falkowych $CWT_f(a,b)$ (im ciemniejszy odcień czerwonego, tym wyższa wartość współczynników, tym samym większa zgodność fragmentu sygnału i falki analizującej).



Rys. 6.11 Analiza fragmentu B sygnału a , z rys.6.10. a) fragment sygnału, b) wynik analizy CWT, c) wartości unormowane r.m.q. dla poszczególnych skal, d) wynik analizy FFT.

Analizując skalogram transformacji można zaobserwować, że po przejechaniu pierwszego łuku następuje zmiana częstotliwości centralnej z 0,42 Hz na 0,75 Hz. Zmianę tą można też zauważyć na filtrowanym przebiegu sygnału (czerwona linia, rys. 6.11a). Można też zaobserwować występowanie częstotliwości centralnej 1,62 Hz dla próbek od 140 do 150 i od 330 do 340. Niewidoczna na diagramie częstotliwość centralna 13,54 Hz występuje na niemalże całej długości sygnału. Na rysunku 6.11d przedstawiono transformatę Fouriera na podstawie, której można zaobserwować wyraźne widoczne niektóre częstotliwości spośród częstotliwości centralnych transformacji falkowej.

Tab. 6.3 Skale i częstotliwości centralne dla sygnału przedstawionego na rys. 6.11.

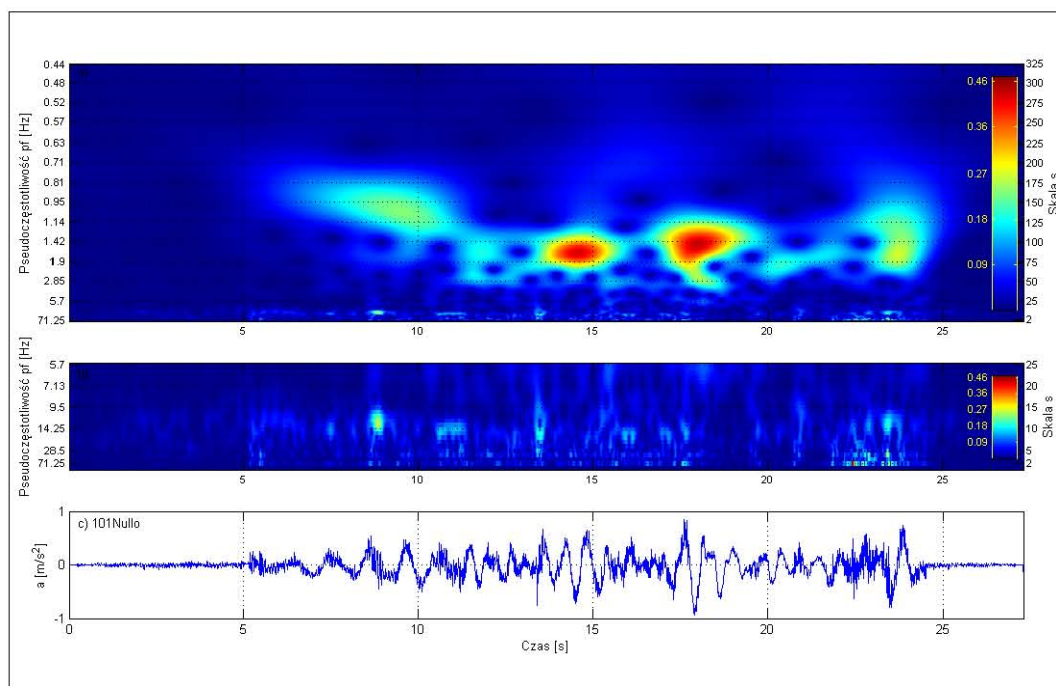
| Skala a | Częstotliwość centralna f_c [Hz] | FFT [Hz] | Błąd [%] |
|---------|------------------------------------|----------|----------|
| 262 | 0,16 | 0,20 | 28,95 |
| 96 | 0,42 | 0,40 | 5,48 |
| 54 | 0,75 | 0,70 | 6,95 |
| 25 | 1,62 | - | - |
| 14 | 2,90 | - | - |
| 3 | 13,54 | 10-12 | 26-11 |

W tabeli nr 6.3 przedstawiono błędy względne pomiędzy częstotliwością centralną rozpoznaną przez ciągłą transformację falkową i zależności 6.2 a częstotliwością będącą wynikiem szybkiego przekształcenia Fouriera. W przypadku

bardzo niskiej częstotliwości 0,16 Hz błąd względny sięga prawie 30% co jest dość dużą wartością. Dla częstotliwości 1.62 Hz i 2.9 Hz bardzo trudno zlokalizować maksima w wynikach FFT. Podobna sytuacja ma się z częstotliwością 13.54 Hz, która na przebiegu FFT jest silnie rozproszona. Jak dla CWT cały czas jest informacja o zmianie częstotliwościowego charakteru sygnału w czasie, tak dla FFT informacja ta jest niedostępna.

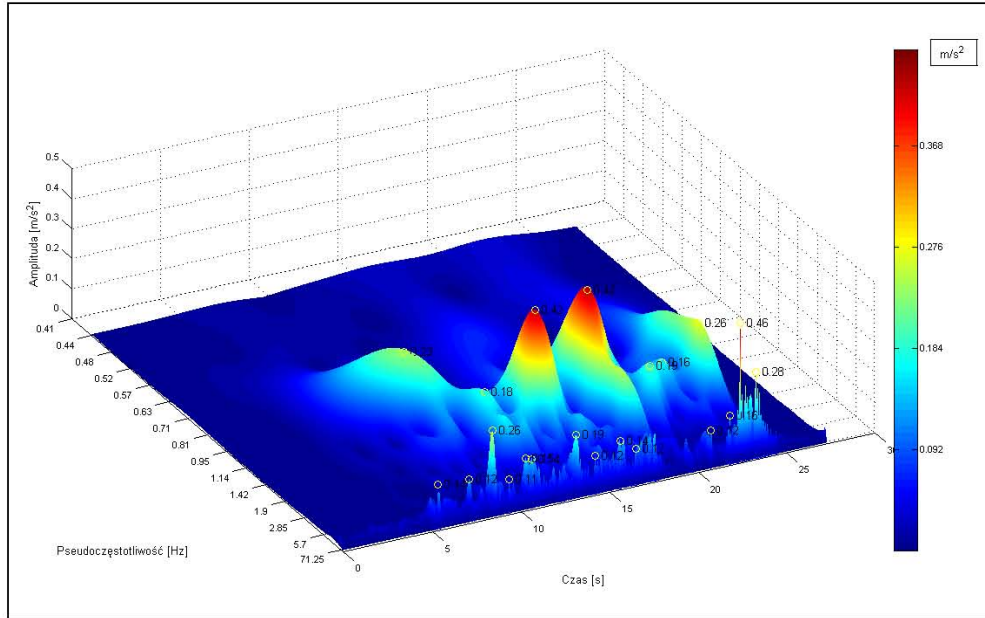
Poniżej przedstawiono kolejne dwa sygnały przyspieszeń zarejestrowane w tramwaju NGT6 podczas badań komfortu w tramwaju. Badania te opisano w rozdziale 7.

Na rysunku 6.12c przedstawiono spośród dwóch pierwszy sygnał *101Nullo*. Jest to sygnał przyspieszenia poprzecznego a_y , próbkowany z częstotliwością 150 Hz. Dokonując wizualnej analizy można powiedzieć, że jest to sygnał niestacjonarny ze względu na zmienną w czasie strukturę widmową, wartość średnią i wariancję. Na rys. 6.12a przedstawiono skalogram od 2 do 325 skali, co odpowiada przedziałowi częstotliwości od 71.25 Hz do 0.44 Hz. Na skalogramie widoczne są 4 wyróżniające się obszary sygnalizujące lokalizacje pików przyspieszenia w sygnale analizowanym o częstotliwości od 1.9 Hz do 0.96 Hz. Na rysunku 6.12b zostały przedstawione tylko skale od 2 do 25 dla lepszej analizy wizualnej. Można zaobserwować kilka lokalizacji pików przyspieszenia dla częstotliwości powyżej 9.5 Hz oraz stosunkowo duży pik przyspieszenia częstotliwości 71.25 Hz dla ok. 22.5 sekundy. Na rysunku 6.13 można zaobserwować przestrzenną strukturę analizowanego sygnału z podanymi wartościami amplitud u szczytu pików. Wartości położenie pików zostały zlokalizowane dzięki zastosowaniu skryptu *3DMaxAmp*.



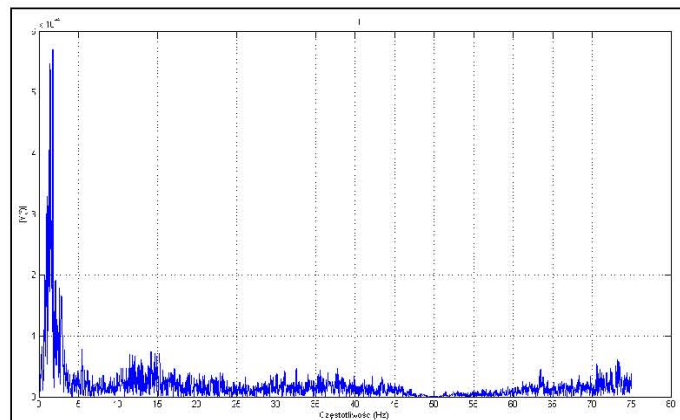
Rys. 6.12 Wyniki analizy CWT sygnału przyspieszenia poprzecznego a_y , 101Nullo (c). Na górnym skalogramie (a) widoczny jest wynik transformacji dla pełnego zakresu analizy tj. od 0.44 do 71.25 Hz. Dla lepszej wizualnej analizy wyników z powodu mniejszej rozdzielczości częstotliwościowej na środkowym skalogramie (b) przedstawiono węższy zakres częstotliwości od 5.7 do 71.25 Hz.

Na przestrzennym skalogramie - rys. 6.13 - można zauważyć przedział częstotliwości, dla którego nie występują drgania. Przedział ten obejmuje częstotliwości pomiędzy 2 Hz a 9.5 Hz. Są to częstotliwości największej wrażliwości człowieka na drgania (rys. 3.2). Zdaniem autora zostały one celowo usunięte przez konstruktorów tramwaju dla zminimalizowania wpływu najniekorzystniejszych częstotliwości drgań na komfort jazdy.



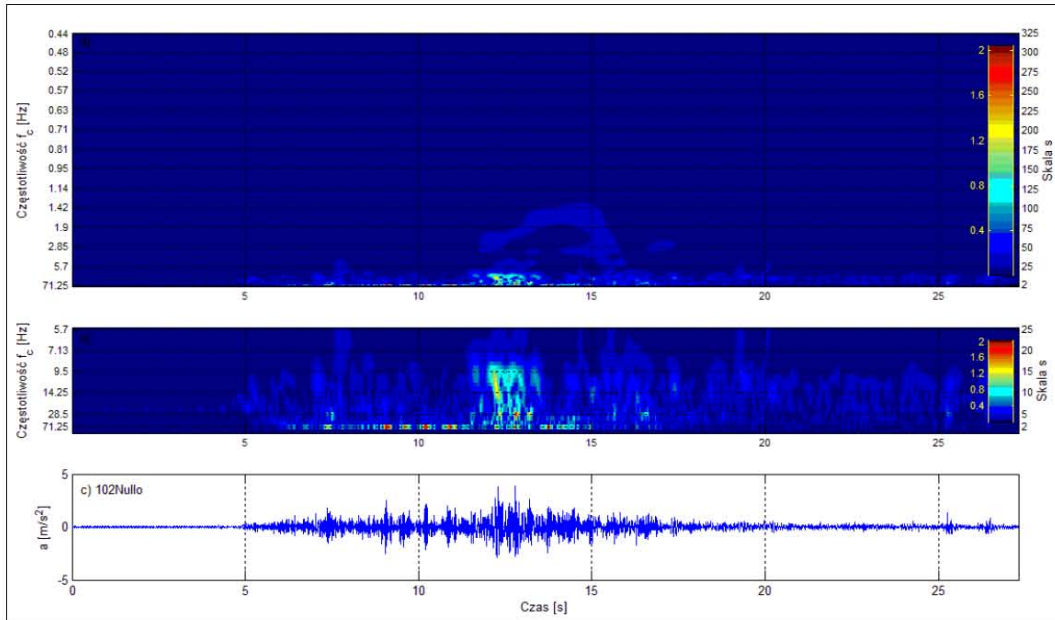
Rys. 6.13 Skalogram 3D sygnału a_y - rys. 4.11c (101Nullo). Pomędzy niskimi i wyższymi częstotliwościami widoczny jest brak amplitud sygnału dla częstotliwości od 2 Hz do 9.5 Hz, co zdaniem autora zostało osiągnięte poprzez odpowiednią konstrukcję zawieszenia tramwaju.

Na rysunku 6.14 przedstawiono szybką transformację Fouriera FFT sygnału 101Nullo. Obszary częstotliwości o podwyższonych wartościach amplitud pokrywają się z wynikami CWT (rys. 6.12). Transformacja Fouriera nie dostarcza nam zbyt wielu informacji, poza charakterem widma częstotliwościowego. Brak w niej rzeczywistych wartości amplitudy dla poszczególnych częstotliwości a przede wszystkim położenia na osi czasu tychże częstotliwości. Dzięki CWT możemy te wielkości stosunkowo szybko i precyzyjnie określić.



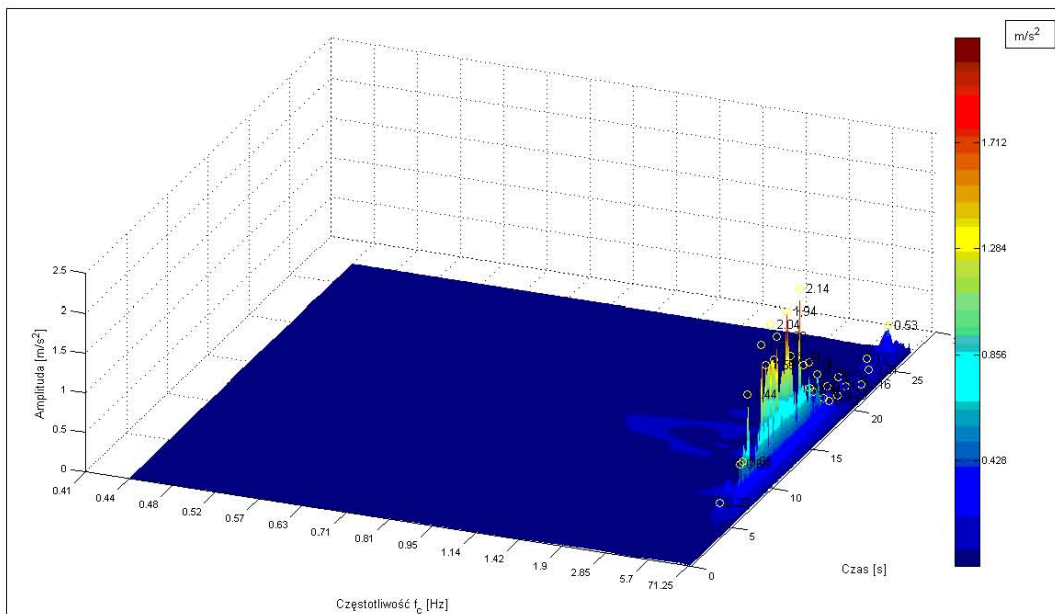
Rys. 6.14 Transformata Fouriera FFT sygnału 101Nullo. Największa część energii sygnału zawarta w przedziale częstotliwości od 1 do 3 Hz.

Na rysunku 6.14 przedstawiono wyniki analizy sygnału 102Nullo zarejestrowanego w tym samym miejscu, co poprzedni sygnał. Jest to sygnał nieważonego przyspieszenia pionowego a_z próbkowanego również z częstotliwością 150 Hz. Sygnał ten wykazuje niestacjonarność ze względu na zmienną w czasie wariancję.



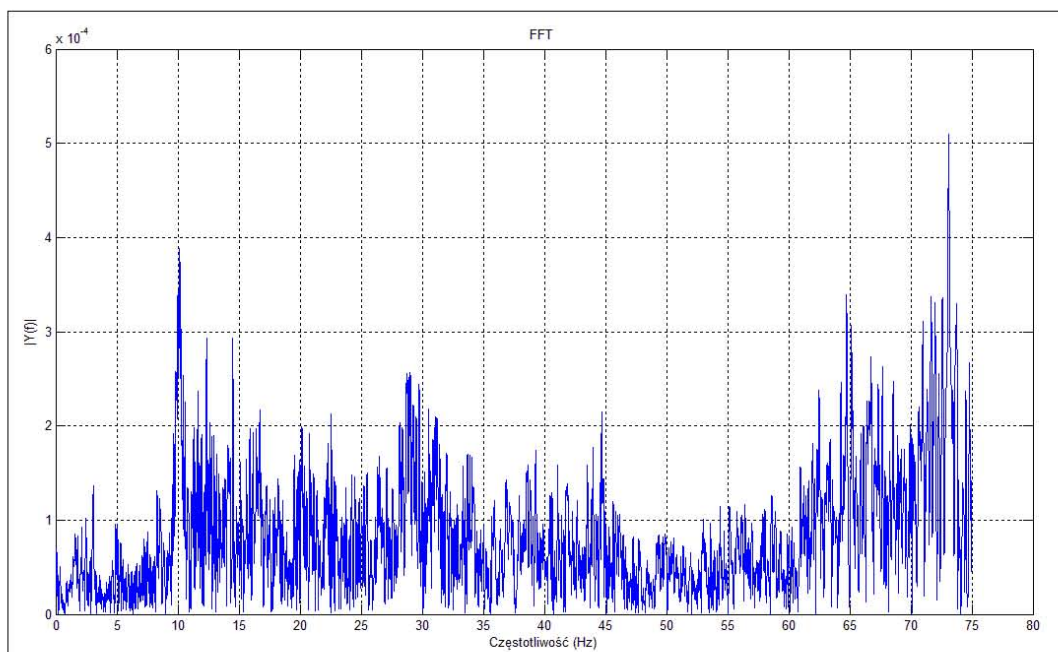
Rys. 6.15 Wyniki analizy sygnału przyspieszenia pionowego a_z 102Nullo (c). Pełny zakres transformaty CWT (a) i rozwinęty przedział wyższych częstotliwości (b).

Przedstawiony na rysunku 6.15a skalogram pozwala zaobserwować występowanie dużych amplitud dla wyższych częstotliwości tzn. powyżej 9.5 Hz a także na długości od 12 do 16 sekundy niższej częstotliwości około 2 Hz o mniejszej amplitudzie.



Rys. 6.16 Skalogram 3D sygnału a_z 102Nullo. Bardzo wyraźnie widoczne skupienie energii drgań w zakresie wyższych częstotliwości.

Wyniki transformaty Fouriera potwierdzają występowanie wyższych częstotliwości w sygnale. Największa część energii skupiona jest wokół częstotliwości ok. 10 Hz, 30 Hz oraz 70 Hz.



Rys. 6.17 Transformata Fouriera FFT sygnału $a_z 102Nullo$. Energia drgań skupiona w zakresie od 10 do 30 i od 65 do 75 Hz.

6.5. Wnioski

Na podstawie powyższej analizy sygnałów syntetycznych i rzeczywistych można wnioskować o dużej przydatności ciągłej transformacji falkowej CWT dla potrzeb pozyskiwania wartości parametrów sygnałów przyspieszenia w funkcji czasu. Daje to możliwość zastosowania CWT, jako wydajnego narzędzia monitoringu parametrów sygnału na potrzeby oceny chwilowych zaburzeń komfortu jazdy. Błędy (tab. 6.2) odczytu położenia potencjalnych CZKJ na osi czasu nie przekroczyły 0,8 %. Błędy odczytu dla częstotliwości i amplitudy parametrów sygnałów zawierają się w dopuszczalnych granicach odpowiednio 5% i 10% dla przedziałów istotnych ze względu na temat pracy. Na podstawie porównania CWT i FFT (tab. 6.3) widoczna jest słabość FFT rozpoznania częstotliwości i amplitudy jak również całkowity brak dostępności informacji o położeniu w czasie potencjalnego CZKJ.

7. BADANIA SUBIEKTYWNE

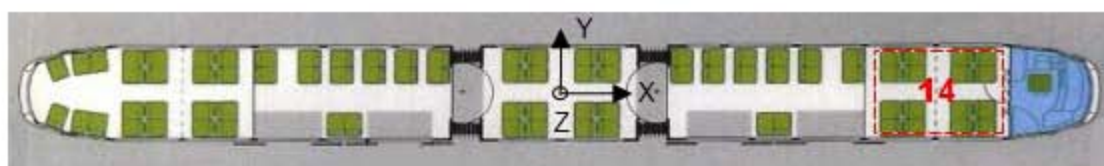
Subiektywna ocena drgań towarzyszyła człowiekowi od momentu, kiedy został pierwszy raz na nie narażony. Wieloletnie badania laboratoryjne subiektywnej oceny drgań dostarczyły wielu informacji o wrażliwości człowieka na drgania. Przemysł kolejowy wypracował własne normy dla oceny komfortu jazdy. Pojawia się pytanie, na ile normy dotyczące pociągów dużych prędkości mogą być w pełni adekwatne dla tramwajowej komunikacji miejskiej. Autor przeprowadził badania subiektywnej oceny komfortu jazdy dla wybranych odcinków tramwajowej komunikacji miejskiej. Do oceny komfortu jazdy przez pasażerów można wykorzystać metody pośrednie i bezpośrednie. Pośrednia metoda polegająca na ocenie czynności manualnych, które pasażer może wykonywać podczas podróży [69]. Dotyczy to czytania, pisania, mówienia, picia, jedzenia. Poprzez stopień zakłóceń ww. czynności można wnioskować o poziomie komfortu [4]. Pojawienie się zakłóceń w obszarze czynności związane jest z pojawieniem się drgań o częstotliwości drgań własnych narządów odpowiedzialnych za te czynności. Metody pośrednie nie zostały zastosowane w eksperymencie ze względu na dość niską ich przydatność w komunikacji miejskiej oraz dość dużą czasochłonność i złożoność ich przeprowadzania. Autor zastosował metodę bezpośrednią oceny drgań tj. oceny kategorii (Category Judgment Method) oznaczonych cyframi od 0 do 5. Autor wybrał skalę opisaną cyframi ze względu na brak powiązania emocjonalnego cyfr z doświadczeniami pasażerów, co mogło mieć miejsce w przypadku skali opisaną słownie. W poniższych podrozdziałach przedstawiono opis eksperymentu, analizę ocen oraz sygnałów przyspieszeń zarejestrowanych podczas badań

7.1. Badania polowe

W celu znalezienia korelacji wielkości obiektywnych z odczuciami subiektywnymi pasażerów w tramwajowej komunikacji miejskiej (TKM) przeprowadzono badania subiektywne na próbie 14 osób (7 kobiet, 7 mężczyzn), losowo wybranych w wieku od 22 do 53 lat. Badanie miało na celu pozyskanie oceny subiektywnej chwilowych CZKJ w normalnym ruchu TKM. Do badania wybrano losowo tramwaj Bombardier NGT6. Liczba pasażerów była poddyktowana kompromisem pomiędzy względami konstrukcyjnymi tramwaju, zastosowaniem jednego miejsca pomiaru drgań oraz przybliżonymi warunkami oddziaływania tych samych drgań na każdego z pasażerów. Miejscem łączącym ww. cechy jest miejsce tuż za kabiną motorniczego nad pierwszym wózkiem napędowym ograniczające się do maksymalnie 16 miejsc siedzących (rys. 7.1). W dalszej części pracy autor będzie posługiwał się pojęciem pasażerowie, jako próbki o liczebności 14 osób wybranych losowo z populacji. Równoległe z pomiarami ocen subiektywnych były rejestrowane sygnały przyspieszenia w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. W miejscu mocowania siedzeń do konstrukcji pudła tramwaju zamocowano trzy czujniki przyspieszenia HBM B12/200 (rys. 7.2), odpowiednio dla każdego z trzech kierunków drgań (rys. 3.1).

Pasażerowie byli wyposażeni w osobiste urządzenia oceny OOU (rys. 7.3), za pomocą, których w czasie rzeczywistym mogli oceniać CZKJ w skali od 1 (bardzo mały dyskomfort) do 5 (bardzo duży dyskomfort, patrz rys. 3.1). Sygnały z OOU

i czujników przyspieszenia były próbkowane za pomocą przetworników A/C HBM Spider z częstotliwością 150 Hz i rejestrowane na dysku twardym komputera w odcinkach od 2 min do 5 min.



Rys. 7.1 Lokalizacja czternastu pasażerów wewnątrz tramwaju Bombardier NGT6 [70].

Przed przystąpieniem do badania pasażerowie zostali poinformowani o celu i zakresie badania. W wybranym terminie zostały przeprowadzone badanie pilotażowe mające na celu zweryfikowanie założeń badania, pracy aparatury a także przygotowania i nauczanie pasażerów swobodnego rozpoznawania i oceniania CZKJ. W czasie badań pilotażowych pasażerowie byli narażeni na ekstremalne wartości parametrów CZKJ mogących pojawić się w liniowych przejazdach tramwaju. Doświadczenie ekstremalnych wartości dało pasażerom możliwość przypisania rozpiętości wartości parametrów CZKJ do rozpiętości skali ocen.



Rys. 7.2 Aparatura pomiarowa. 1 - Osobiste urządzenia oceny OUC, 2 - Czujniki przyspieszenia, 3 - Przetworniki A/C, 4 - Komputer z zasobami pamięci.

W ramach badań pilotażowych podjęto dwie próby z pasażerami. Pierwsza próba dotyczyła rozpoznawania kierunku (podłużny, poprzeczny lub pionowy) i oceny CZKJ natomiast druga tylko oceny CZKJ w wybranym, jednym kierunku drgań. Pomimo nabytego doświadczenia pasażerowie w większości przypadków mieli problem z wyborem kierunku CZKJ podczas pierwszej próby oraz braku pewności, co do kierunku drgań w przypadku drugim. Powyższe problemy mogły wpłynąć negatywnie

na jakość oceny CZKJ. Rozpoznanie i ocena CZKJ okazało się decyzją zbyt złożoną, co powodowało wydłużenie czasu oceny CZKJ. Mogło to powodować „nachodzenie” na siebie ocen różnych CZKJ. Powodem takiego stanu rzeczy są drgania o zbyt złożonej postaci przestrzennej. W ostatniej próbie pasażerowie mieli za zadanie oceniać CZKJ bez względu na kierunek. Odpowiedź pasażerów na tą próbę była jednoznacznie pozytywna. Decyzja dotycząca oceny CZKJ była wystarczająco prosta, aby ją można było swobodnie podejmować w czasie normalnej jazdy tramwajem.

Na podstawie powyższych prób można wnioskować, że podejmowanie decyzji, co do kierunku i oceny CZKJ jest procesem zbyt złożonym w warunkach funkcjonowania tramwajowej komunikacji miejskiej. Na podstawie powyższych prób autor zdecydował w badaniach właściwych zastosować scenariusz wg trzeciej próby kierując się komfortem podejmowania decyzji przez pasażerów. Ze względu na charakterystykę człowieka i złożoność drgań scenariusz ten nie pozwoli na dostarczenie bezpośredniej informacji, co do wpływu kierunku drgań na ocenę subiektywną CZKJ.



Rys. 7.3 Osobiste urządzenie oceny OUO. Napięcie zasilania 5V.

Przed rozpoczęciem badania właściwego pasażerowie zostali poproszeni o wypełnienie kwestionariusza A1 (Załącznik A) zawierającego pytania dotyczące swoich wymiarów antropometrycznych, doświadczeń oraz obecnego samopoczucia. Badania zostały przeprowadzone w godzinach od 20:00 do 21:40. Jest to okres o zmniejszonym natężeniu ruchu ulicznego a także ograniczonej widoczności ze względu na panujący zmrok o tej porze dnia, co mogło wpłynąć na zmniejszenie wpływu bodźców zewnętrznych, na jakość ocen pasażerów. Podczas badania zaniebano wpływ hałasu na ocenę CZKJ. Tramwaj nie był dodatkowo obciążony. Przejazd obejmował dwa odcinki ok. 40 minutowe z przerwą 20 min pomiędzy nimi. Odcinki przestawiono w załączniku G. W czasie przejazdów pasażerowie byli

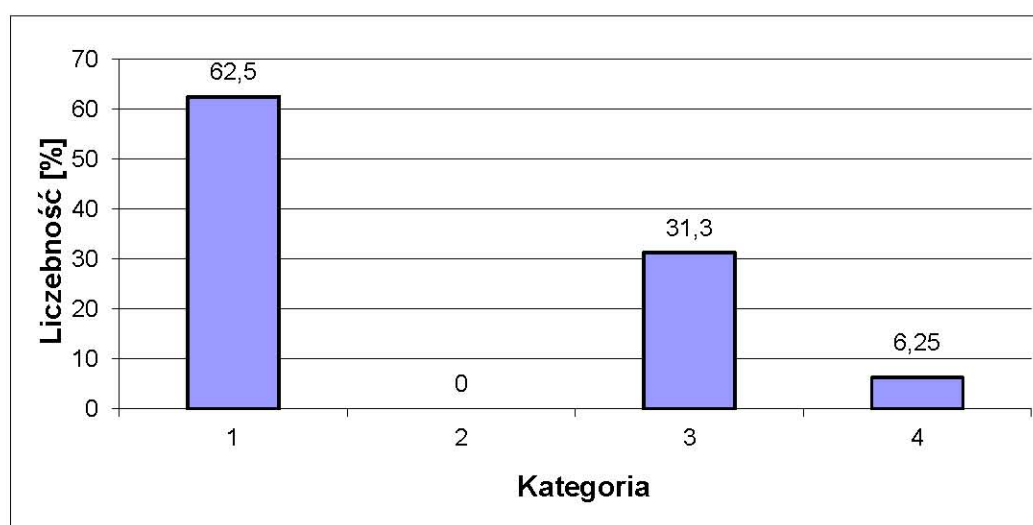
zobowiązani do oceniania CZKJ (bez względu na kierunek działania drgań) za pomocą osobistych urządzeń elektronicznych nie komunikując się pomiędzy sobą. W tym samym czasie były rejestrowane sygnały przyspieszeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach na konstrukcji siedzenia. Po zakończeniu badania pasażerowie zostali poproszeni o wypełnienie kwestionariusza A2 (Załącznik B). Kwestionariusz ten zawierał m.in. pytania dotyczące samopoczucia i poziomu dyskomfortu, którego pasażerowie nie chcieliby doświadczać w tramwajowej komunikacji miejskiej TKM.

7.2. Analiza kwestionariuszy

Kwestionariusze poddano analizie statystycznej. Pierwsze pytania dotyczyły wieku, masy ciała oraz średniego czasu korzystania z TKM. Pośród pasażerów 93,8 % to osoby korzystające z tramwajowej komunikacji miejskiej w mniejszym lub większym stopniu średnio ok. 30 min dziennie (rys. 7.4, Tab. 7.1). Zdecydowana większość część pasażerów (62,5%) doświadczyła drgań w TKM, co daje podstawę do stwierdzenia, że mogą ci pasażerowie oceniać CZKJ, jako bardziej komfortowe ze względu na przyzwyczajenie do nich, na co dzień. Część pasażerów z powyższej grupy tzn. 31,3 % ogółu próbki może oceniać, co najmniej dwójako CZKJ. Mianowicie, jeśli pasażerowie ci poruszają się, na co dzień środkami transportu o wyższym poziomie komfortu to mogą oceniać CZKJ w TKM, jako bardziej niekomfortowe aniżeli pasażerowie korzystający, na co dzień z TKM. I odwrotnie w przypadku korzystania ze środków transportu o niższym poziomie komfortu. Sytuacja powyższa odnosi się również dla 6,25 % pasażerów niekorzystających z TKM, ale mogących jeszcze bardziej surowo oceniać CZKJ w TKM.

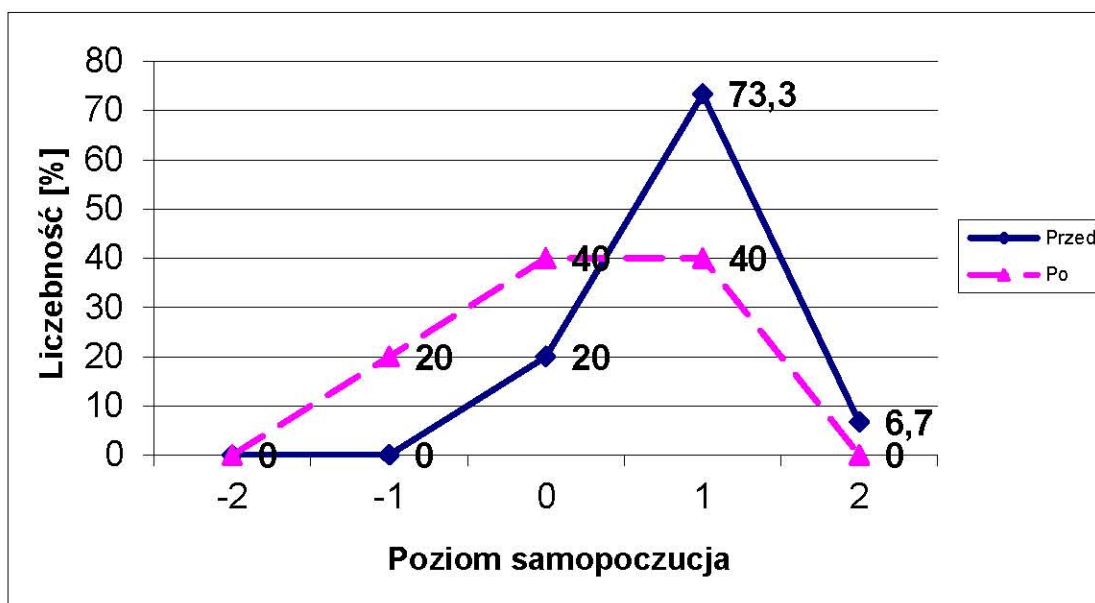
Tab. 7.1 Wielkości statystyczne grupy 14 pasażerów biorących udział w badaniach.

| | I kwartyl | Mediana | III kwartyl |
|------------------|-----------|---------|-------------|
| Wiek [rok] | 26 | 28,5 | 32 |
| BMI [kg/cm] | 0,35 | 0,37 | 0,40 |
| Czas jazdy [min] | 15 | 30 | 92,5 |



Rys. 7.4 Częstotliwość korzystania pasażerów z TKM; 1 – codziennie, 2 – kilka razy w tygodniu, 3 – okazjonalnie, 4 – nie korzystam z TKM, (Załącznik A, A1 - pyt.5).

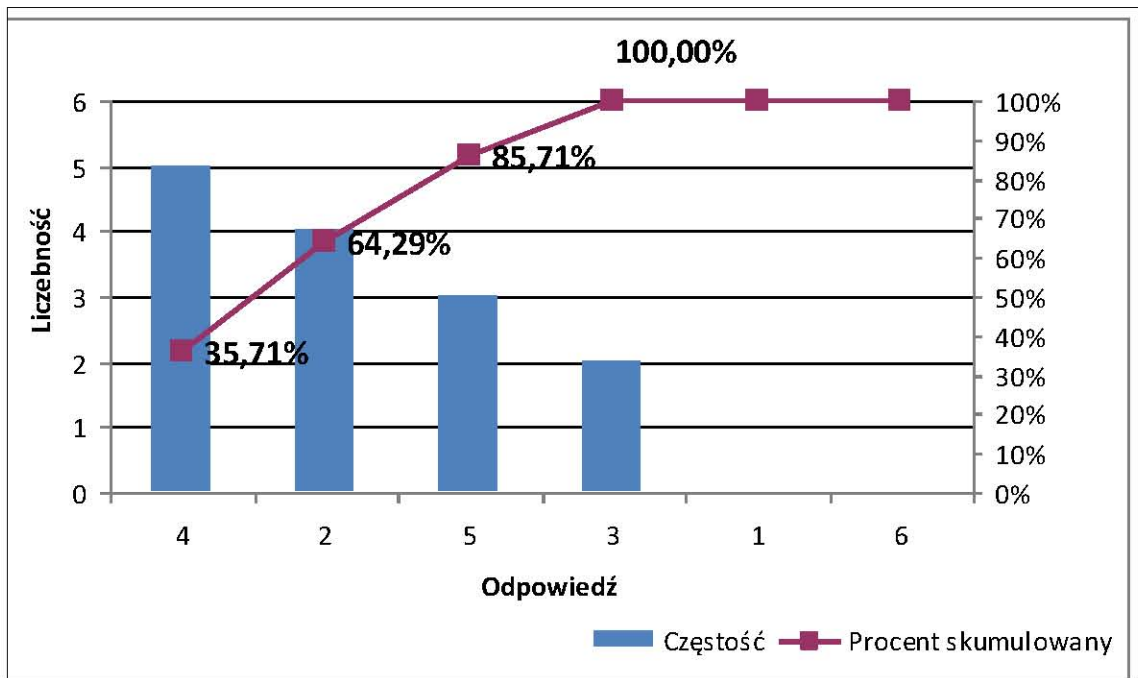
Kolejne pytanie na kwestionariuszu A1 dotyczyło samopoczucia. Takie samo pytanie zostało zadane po badaniu na kwestionariuszu A2. Na rysunku 7.5 przedstawiono odpowiedzi pasażerów przed (linia ciągła) i po badaniu (linia kreskowa). Przejazd tramwajem spowodował obniżenie samopoczucia u 53,3 % pasażerów o jeden stopień w skali 5 poziomowej (-2,-1,0,1,2). Jest wiadome, że ekspozycja na drgania powoduje zmęczenie i obniżenie samopoczucia [4] [29], co w efekcie może wpłynąć na ocenę CZKJ, jako bardziej dyskomfortowych. Na pytanie, jakiego rodzaju CZKJ były dla ciebie najbardziej uciążliwe 35,7 % pasażerów wskazało na drgania poprzeczne (rys. 7.6).



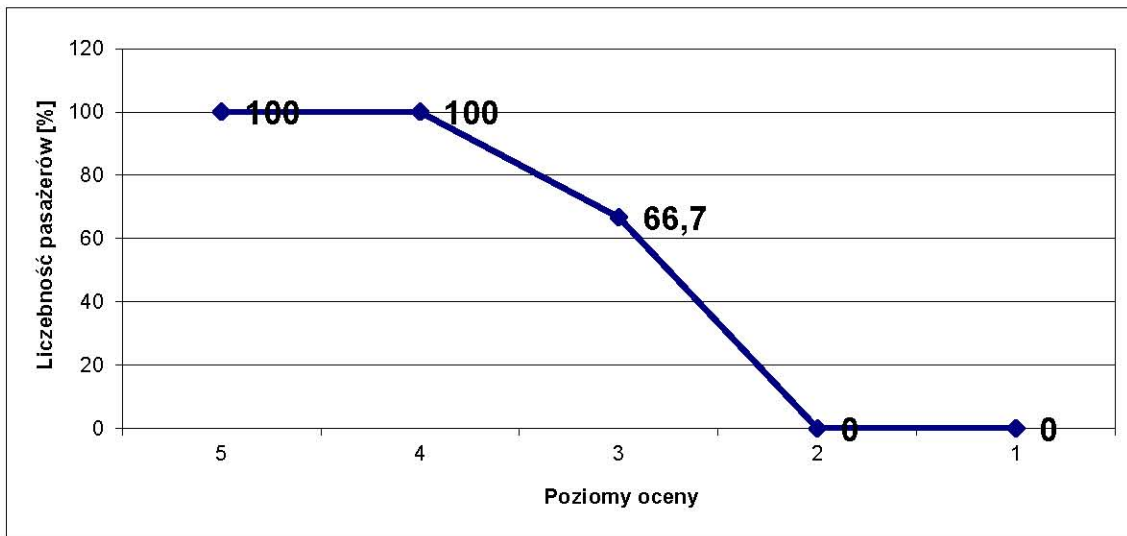
Rys. 7.5 Samopoczucia pasażerów w skali pięciopozomowej (-2 – bardzo złe; -1 – złe; 0 – ani złe, ani dobre; 1 - dobre; 2 – bardzo dobre) przed badaniem i po badaniu. Widoczna zmiana samopoczucia, (Załącznik A, A1 - pyt.6 i Załącznik B, A2 – pyt.4).

Drgania podłużne występujące przy ruszaniu z miejsca oraz przy hamowaniu wskazało 28,6 % pasażerów, 21,4 % wskazało na ruch wahadłowy oraz 14,3 % zaznaczyło drgania pionowe. Pasażerowie nie zanotowali podwyższonego dyskomfortu na łukach. Prawdopodobnie spowodowane jest to niską wartością przyspieszeń odśrodkowych wynikających z niskich prędkości tramwaju w tychże łukach. Pasażerowie nie rozpoznali żadnych innych sytuacji powodujących pojawienie się CZKJ.

Na rysunku 7.7 przedstawiono odpowiedzi pasażerów na pytanie, „Na których poziomach chwilowych zaburzeń komfortu nie chciałbyś/nie chciałabyś jeździć tramwajem?”. Z wykresu jednoznacznie można wywnioskować, że wszyscy pasażerowie akceptują poziom 1 i 2 dyskomfortu pochodzącego z CZKJ. Natomiast 66,7 % pasażerów nie chciałoby podróżować na 3 poziomie. Żaden z pasażerów nie chciałby podróżować na 4 i 5 poziomie. Na podstawie tej odpowiedzi można zdefiniować wartości obiektywnych wskaźników CZKJ, dające na podstawie analizy sygnałów przyspieszenia granice, powyżej której istnieje duże prawdopodobieństwo pojawienia się znacznego dyskomfortu u dowolnych pasażerów w tym samym przedziale wiekowym o podobnych parametrach antropometrycznych w TKM.



Rys. 7.6 Odpowiedzi pasażerów dotyczące najbardziej uciążliwych CZKJ. 1 – kiedy tramwaj poruszał się po łuku; 2 - kiedy tramwaj przyspieszał/hamował; 3 – kiedy odczuwałem/am drgania pionowe; 4 - kiedy odczuwałem/am drgania poprzeczne (boczne); 5 – kiedy odczuwałem kołysanie tramwaju; 6 – inne, (Załącznik B, A2 - pyt.1).



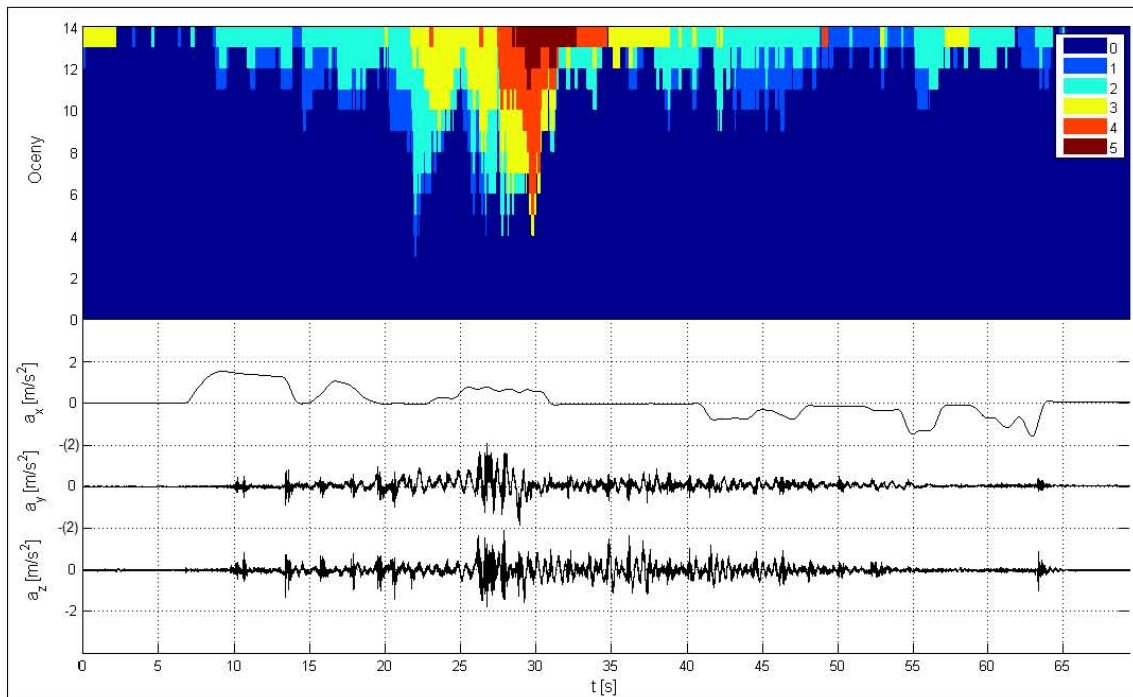
Rys. 7.7 Procentowa liczebność pasażerów w funkcji poziomu dyskomfortu, na którym pasażerowie nie chcieliby podróżować w TKM, (Załącznik B, A2 - pyt.3).

7.3. Analiza zarejestrowanych danych

Podczas badania zarejestrowano 23 odcinki pomiarowe o długości od 2 min do 5 min. Dane poddano wstępnej obróbce mającej na celu usunięcie fragmentów sygnału niemających znaczenia dla dalszej analizy. Po usunięciu fragmentów, zestaw danych ograniczał się do 42,2 min, który był poddany analizie statystycznej opisanej w rozdziale 8. W normach [12], [13] zakres częstotliwości drgań poddanych analizie został ograniczony do 0,5-80 Hz przez co sygnały przyspieszeń a_y i a_z poddano

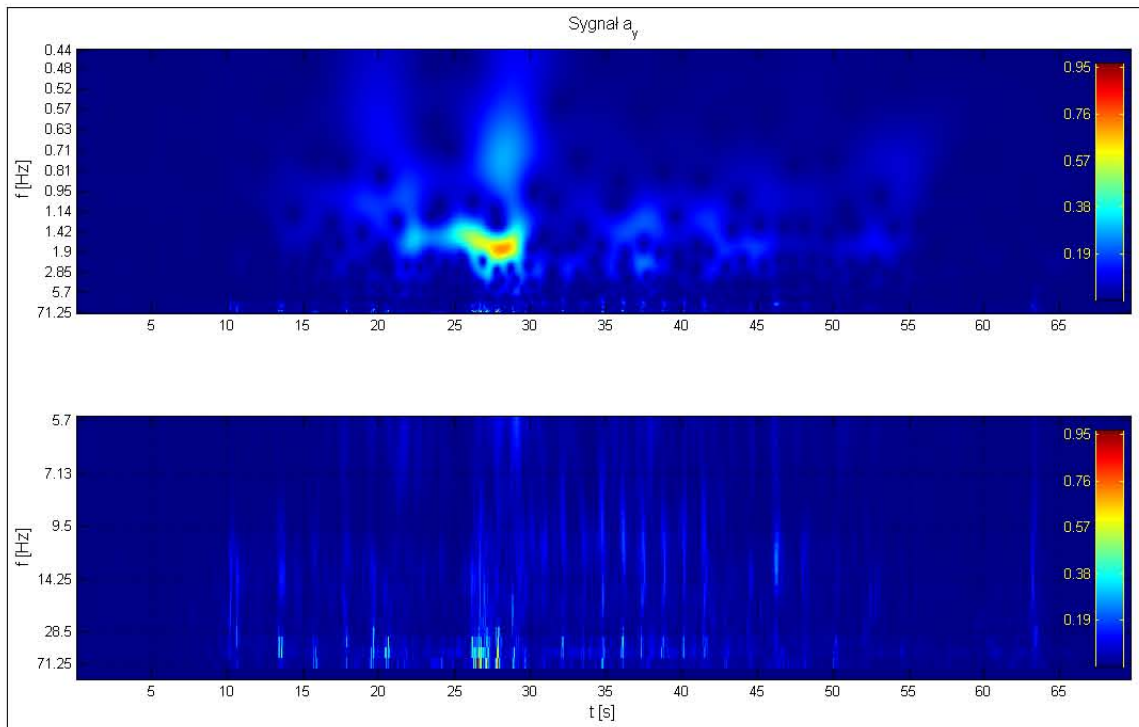
filtrowaniu górnoprzepustowemu (0,5 Hz) oraz dolnoprzepustowemu (75 Hz). Obniżona wartość filtra dolnoprzepustowego wynika z połowy częstotliwości próbkowania f_p (150 Hz). Powołując się na wyniki w rozdziale 7.2 tzn. trudności z analizą CWT tego sygnału. Sygnał ten będzie filtrowany dolnoprzepustowo filtrem o wartości 2 Hz i poddany analizie czasowej. Wartość dwóch Hz zaczerpnięto z normy PN -EN 12299 [10]. Sygnały z OOU również zostały poddane obróbce niemającej wpływu, na jakość i ilość informacji zawartych w sygnałach.

Poniżej opisano jeden z 23-ech odcinków zarejestrowany podczas badań. Na rysunku 7.8 przedstawiono wyniki głosowania pasażerów na tle filtrowanych sygnałów przyspieszenia a_x , a_y , a_z dla ww. odcinka przejazdu. Oceny pasażerów oznaczono kolorem ciemno niebieskim dla poziomu '0' (pełny komfort) przez paletę kolorów kończąc na brązowym dla poziomu '5' (bardzo niekomfortowo). Na rysunkach 7.9 i 7.10 przedstawiono wyniki analizy falkowej sygnałów przyspieszeń odpowiednio dla a_y i a_z . Na rysunkach można zaobserwować położenie na osi czasu konkretnych częstotliwości i amplitud odpowiadających charakterystyce czasowej sygnałów.

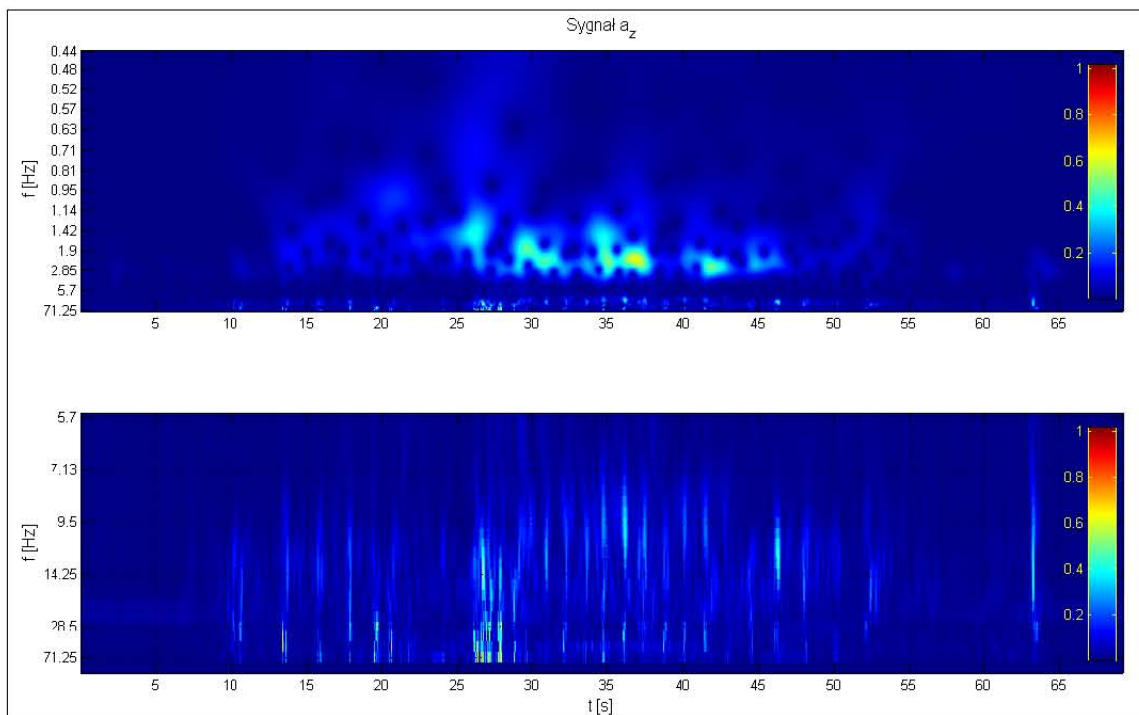


Rys. 7.8 Wyniki subiektywnych ocen pasażerów na tle trzech sygnałów przyspieszenia a_x , a_y i a_z , (sygnał: *11RondMogil_Wieczysta_WMPK_Odc3*). Kolor niebieski (0) odpowiada pełnemu komfortowi, kolor brązowy (5) maksymalnemu dyskomfortowi.

Sygnały a_y i a_z są podobne do siebie tak pod względem wartości występujących amplitud jak i częstotliwości drgań oraz dynamiki. Wyraźnie zauważalne jest pasmo częstotliwości (od 2 Hz do 9.5 Hz), w którym nie wstępują znaczące amplitudy drgań, co zostało zinterpretowane na rysunku 6.13. Wizualnie sygnały a_y i a_z można uznać za niestacjonarne ze względu na brak stałej wariancji w czasie, natomiast sygnał a_x nie jest stacjonarny ze względu na brak stałej wartości średniej.

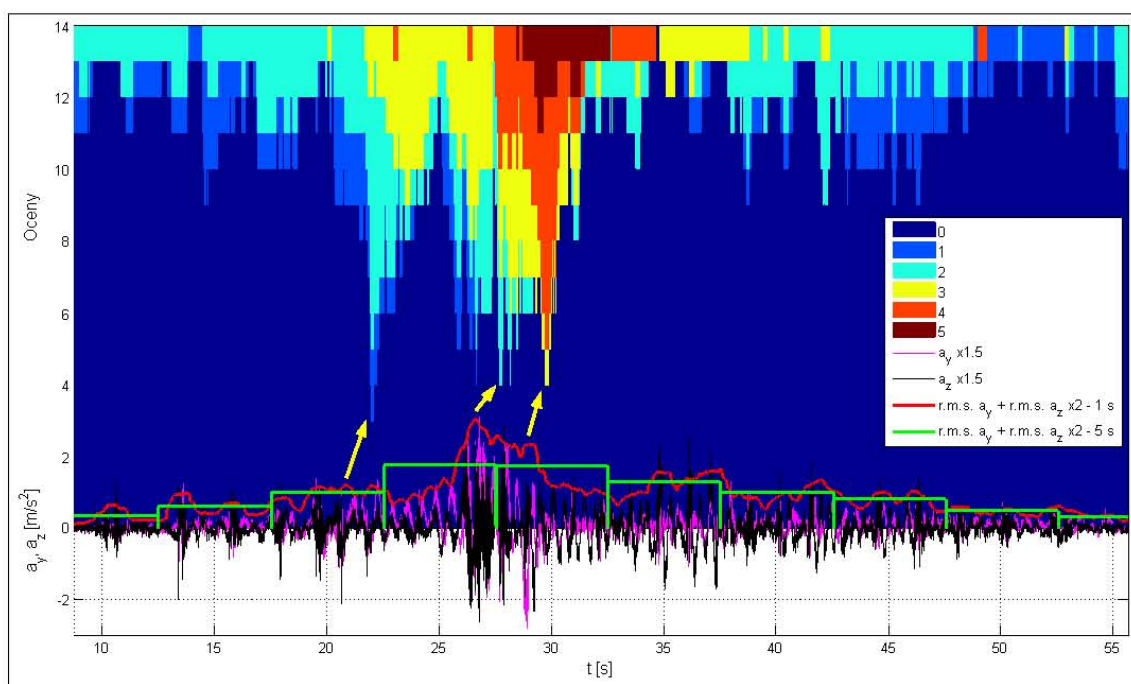


Rys. 7.9 Wynik transformacji falkowej CWT sygnału a_y , przedstawionego na rys. 7.8. Górny skalogram przedstawia wynik dla zakresu od 0,44 Hz (325 skala) do 71,25 Hz (2 skala). Dla poprawy analizy wizualnej wyższych częstotliwości (rzadka gradacja częstotliwości - patrz rys. 6.3) na dolnym wykresie przedstawiono skalogram dla przedziału od 5,7 Hz do 71,25 Hz. Widoczne maksima w przedziale od 25 do 30 s tak dla wysokich jak i niskich częstotliwości.



Rys. 7.10 Wynik transformacji falkowej CWT sygnału a_z , przedstawionego na rys. 7.8. Konfiguracja i opis okien taka sama jak na rysunku 7.9. Widoczne maksima dla niskich częstotliwości w przedziale od 25 do 45 s oraz dla wysokich pomiędzy 25 i 30 s.

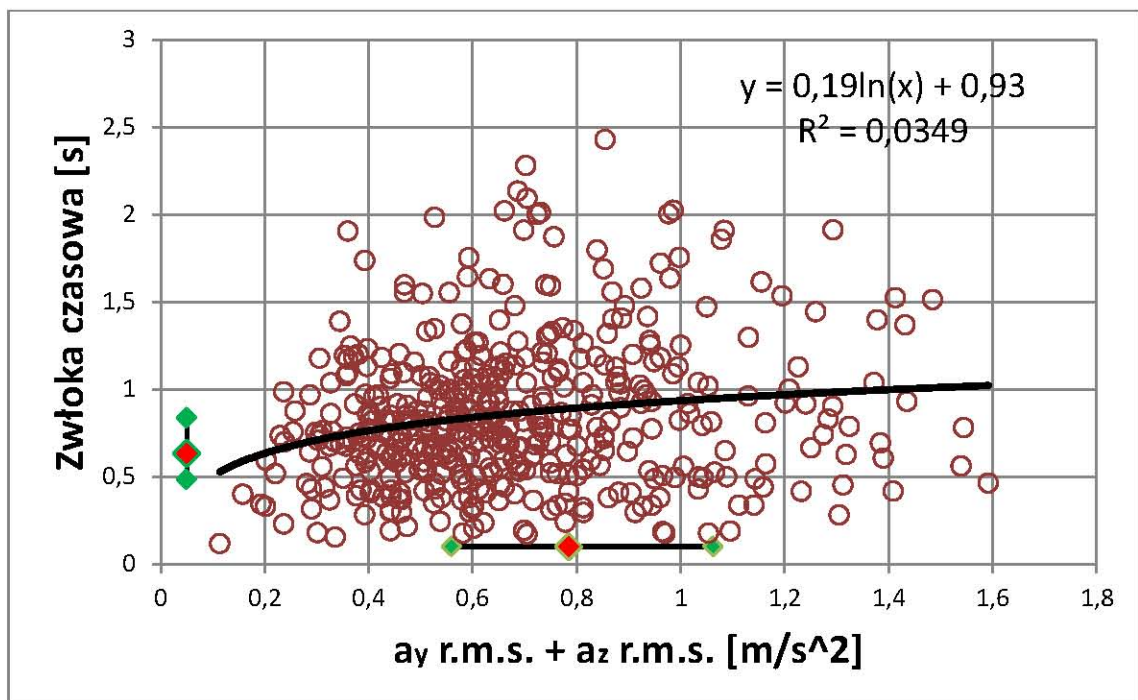
Widoczne są wyraźne korelacje pomiędzy maksimami sygnałów przyspieszeń i maksimami odpowiedzi pasażerów. Można też zaobserwować zwłokę czasową występującą pomiędzy tymi maksimami. Na rys. 7.11 przedstawiono wyniki ocen pasażerów, sygnały a_y i a_z oraz wartość sumy r.m.s. sygnałów a_y i a_z . Wartość r.m.s. poszczególnych sygnałów obliczono dla okna o długości 1 s. Wartość r.m.s. sygnału a_x pominięto tutaj ze względu na zdecydowanie inny charakter „drgań”. Żółtymi strzałkami oznaczono zdaniem autora skorelowane pary maksimów sum wartości r.m.s. i subiektywnych ocen pasażerów. Autor zdecydowała się na wskaźnik r.m.s. z oknem 1 s ze względu na dobrą dynamikę tego wskaźnika oraz zalecenia normy ISO 2631 [12]. Ze wszystkich 23-ech odcinków wybrano arbitralnie 457 par, co przedstawiono na rysunku 7.12. Dla wyselekcjonowanych danych obliczono funkcję regresji zapisaną na rysunku 7.12. Wartość współczynnika determinacji R^2 wskazuje na niezadowalające dopasowanie. Spośród dostępnych postaci funkcji regresji dla postaci logarymicznej wskaźnik ten ($R^2 = 3,49\%$) jest najwyższy. Dla coraz mniejszych wartości r.m.s. czas zwłoki dąży do małej wartości, natomiast od pewnej dość wysokiej wartości r.m.s. czas zwłoki stabilizuje się bez względu na wartość r.m.s. Według autora logarymiczny kształt zależność jest bliski rzeczywistości. Niska wartość R^2 może wynikać ze znacznych zakłóceń ze strony środowiska zewnętrznego, rozproszenia, zmęczenia czy też problemów pojawiających się w procesie decyzyjnym wyboru poziomu oceny.



Rys. 7.11 Wyniki ocen subiektywnych na tle sygnałów a_y i a_z oraz sumy wartości r.m.s. sygnałów a_y i a_z . Żółtymi strzałkami zaznaczono zdaniem autora skorelowane pary maksimów wykorzystane do zbudowania zależności przedstawionej na rysunku 7.12. Kolorem zielonym zaznaczono przebieg wskaźnika ciągłego komfortu $C_{Cyz}(t)$ zaproponowanego w normie PN-EN 12299 [10].

Dla porównania na rysunku 7.11 przedstawiono między innymi wyniki analizy sygnałów przyspieszeń wg standardu PN-EN 12299. Na tle ocen, sygnałów a_y i a_z oraz sumy wartości r.m.s. sygnałów pokazano wartości wskaźnika ciągłego komfortu $C_{Cyz}(t)$ (patrz zależność 3.13) zaproponowanego w standardzie PN-EN 12299 [10]. Przebieg schodkowy wskaźnika $C_{Cyz}(t)$ jest złożeniem kolejnych wartości r.m.s. sygnału o długości okna 5 s przesuwanego za każdym razem o 5 s. Wartość wskaźnika $C_{Cyz}(t)$ jest sumą wartości r.m.s. sygnału a_y i a_z . Wartość r.m.s. dla okna długości 1 s liczona

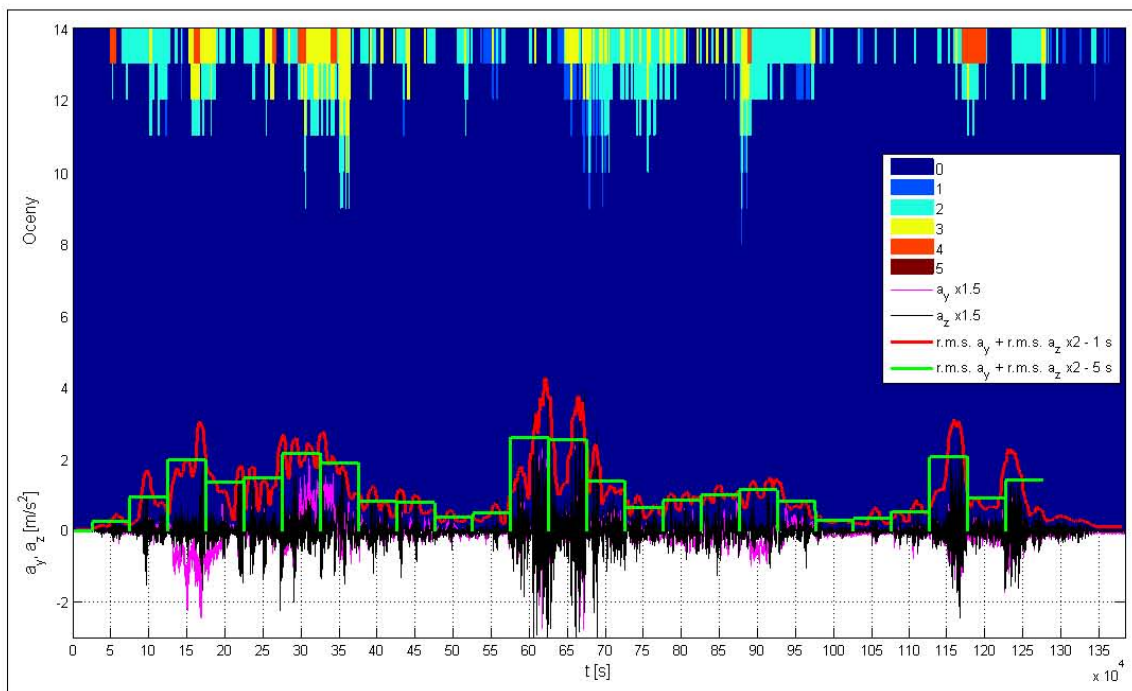
jest s przesunięciem co jedną próbkę. Na rysunku 7.11 widoczny jest bardziej dynamiczny przebieg r.m.s. dla okna 1 s niż 5 s próbkowanego co 5 s, czego można było się spodziewać. Porównując dynamikę ocen pasażerów i sygnałów r.m.s. widoczna jest zdecydowanie bliższa korelacja ocen z r.m.s. 1-no sekundowym niż z r.m.s. dla 5 s. Drugim słabym punktem ciągłego wskaźnika wg PN-EN 12299 jest przypadkowość położenia okna długości 5 s na osi czasu, co może powodować przypadkowe rozdzielanie amplitudy drgań na dwa sąsiednie okna, przez co zaniżoną wartość r.m.s. dla fragmentu sygnału. Taka sytuacja występuje na rysunku 7.11. Odcinek sygnałów od 25 s do 30 s jest przedziałem o maksymalnych wartościach amplitud. Wartość r.m.s. tych sygnałów została podzielona pomiędzy dwa okna, od 22,5 s do 27,5 oraz od 27,5 do 32,5 s, gdzie każde ma wartość ok. $0,9 \text{ m/s}^2$. Gdyby jedno okno obejmowało sygnały od 25 s do 30 s to wartość r.m.s. wynosiłaby $1,1 \text{ m/s}^2$. Wg autora, 20 % co do wartości r.m.s. jest różnicą, która może zdyskwalifikować ten fragment sygnału, jako wyjątkowo niekomfortowy, gdzie oceny pasażerów są szczególnie wysokie. Przebieg wartości r.m.s. dla okna 1 s zdecydowanie lepiej koreluje z odpowiedziami pasażerów.



Rys. 7.12 Prosta regresji dla zależności średniej zwłoki czasowej oceny komfortu jazdy (25 perc.:0,48 s, mediana:0,63 s, 75 perc.:0,83 s) w funkcji maksymalnej wartości sumy r.m.s. sygnałów a_y i a_z (25 perc.:0,55 m/s^2 , mediana:0,78 m/s^2 , 75 perc.:1,06 m/s^2).

Następną kwestią, o której można wnioskować na podstawie przebiegów czasowych są oceny pasażerów na ostatnim odcinku pomiarowym. W czasie badania pasażerowie nie mogli prowadzić rozmów między sobą. Mieli za zadanie zachować względne skupienie na ocenie komfortu jazdy. Na ostatnim odcinku pomiarowym zasada ta nie obowiązywała. Pasażerowie mogli między sobą rozmawiać z tym, że zadanie oceny komfortu pozostało. Wyniki ocen dla ostatniego odcinka przedstawiono na rysunku 7.13. Na rysunku widoczne są również sygnały a_y i a_z oraz przebiegi wartości sumy r.m.s. dla okna 1 s i przebieg wskaźnika $C_{Cyz}(t)$ wg PN-EN 12299 [10]. Porównując sygnały drgań i wartości r.m.s. z ostatniego odcinka i odcinka przedstawionego na rysunku 7.11, gdzie obowiązywała zasada skupienia nie są zauważalne znaczne różnice, co do wartości amplitud czy częstotliwości drgań tych sygnałów. Natomiast

zdecydowanie zauważalna jest różnica w subiektywnej ocenie komfortu jazdy. Zauważalny jest brak ocen dla drgań o małej amplitudzie natomiast dla maksimum oceny są dużo łagodniejsze w stosunku do ocen dla poprzednich odcinków pomiarowych. Zdaniem autora może to wynikać z pojawienia się rozluźnienia po godzinnej podróży tramwajem w stosunkowo dużym skupieniu lub zaistnieniu sytuacji gdzie część uwagi pasażerów została zaangażowana w komunikacje międzypersonalną. Pasażerowie przestali skupiać się na drganiach a zaczęli rozmawiać o sprawach, które ich najbardziej nurtowały. Wg autora ww. sytuacje nałożyły się na siebie, choć autor skłania się bardziej ku drugiemu wyjaśnieniu. Znanie jest to zjawisko chyba każdemu, gdzie czas podróży wydaje nam się mijać zdecydowanie szybciej wśród dobrych znajomych niż w podróży samodzielnej.

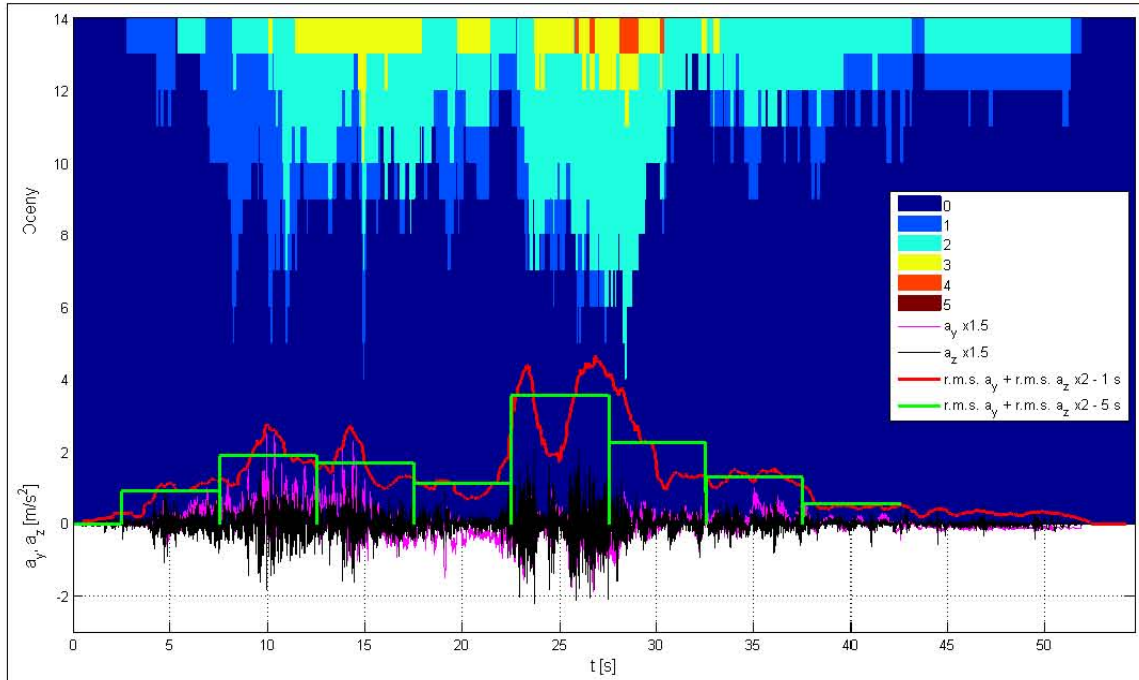


Rys. 7.13 Wyniki ocen subiektywnych na tle sygnałów a_y i a_z oraz dwóch przebiegów wartości r.m.s. dla ostatniego odcinka pomiarowego, na którym nie obowiązywała zasada zachowania względnego skupienia na procesie oceny komfortu jazdy.

Na rysunku 7.14 przedstawiono oceny pasażerów na tle sygnałów oraz dwóch przebiegów sumy wartości r.m.s. Sygnały zarejestrowano podczas przejeżdżania przez skrzyżowanie z ul. Stradom w ul. Krakowską (0 – 20 s) oraz przez pewien odcinek za skrzyżowaniem. Fragment torowiska dla tego skrzyżowania charakteryzuje się dość niską jakością. Na rysunku 7.15 umieszczono wyniki analizy falkowej dla sygnału przyspieszenia poprzecznego i pionowego dla ww. skrzyżowania. Można zauważyć brak znaczących amplitud w zakresie niskich częstotliwości natomiast w zakresie wyższych częstotliwości tj. od 40 do 70 Hz widoczne są amplitudy sięgające 2 m/s^2 . Pomimo większych wartości r.m.s. widoczne są niższe oceny pasażerów np. w porównaniu z wynikami przedstawionymi na rysunku 7.11. Potwierdza to mniejszą wrażliwość człowieka w zakresie wyższych częstotliwości.

Charakterystyka procesu podejmowania decyzji przez człowieka oraz zbyt duża prędkość poruszania się tramwaju nie pozwoliły oceniać CZKJ oddzielnie dla każdego kierunku drgań. Proces oceny, decyzji i reakcji dla każdej osi drgań oddzielnie był zbyt czasochłonny w stosunku do prędkości pojawiania się nowych bodźców drganiowych.

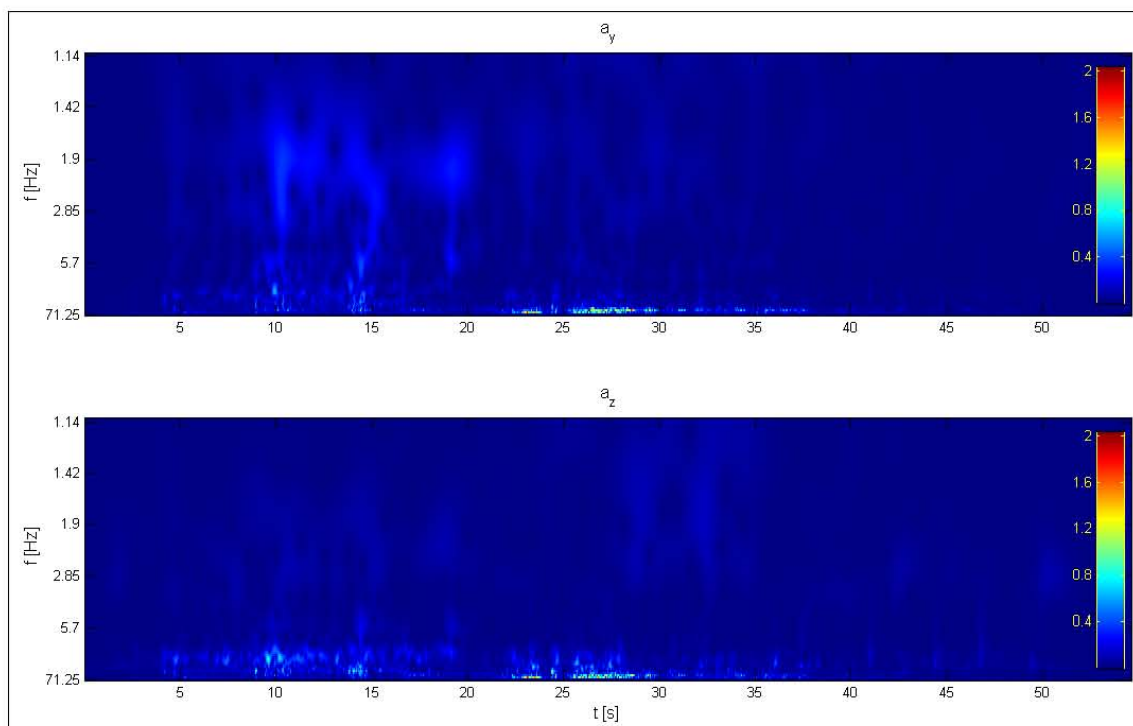
Proces oceny komfortu jazdy był możliwy w warunkach badania tylko dla drgań ogólnych, jako suma drgań kierunkowych. Na podstawie wyników ankiet wypełnianych przed i po badaniu przez pasażerów można wnioskować o wpływ drgań i czasu ekspozycji na obniżenie samopoczucia średnio o jeden stopień na skali pięciopoziomowej.



Rys. 7.14 Wyniki ocen subiektywnych na tle sygnałów a_y i a_z oraz dwóch przebiegów wartości r.m.s. dla sytuacji przejazdu przez skrzyżowanie z ul. Stradom w ul. Krakowską. Zauważalne są niższe oceny pomimo wyższych wartości r.m.s. sumy sygnałów.

Według opinii pasażerów, drgania poprzeczne oraz podłużne są czynnikami wpływającymi w największym stopniu na dyskomfort jazdy w TKM. W badaniach nie rejestrowano poziomu hałasu, który miał wpływ na ocenę samopoczucia oraz ocenę CZKJ [4] [71]. Wszyscy pasażerowie biorący udział w badaniach chcieliby korzystać z TKM doświadczając CZKJ tylko na poziomie 1 lub 2, a 1/3 pasażerów również na poziomie 3. Poziomy 4 i 5 były na tyle dyskomfortowe, że pasażerowie nie chcieliby doświadczać w ogóle drgań na tych poziomach w czasie podróży. Dla dwóch wybranych odcinków przedstawiono w załączniku G procent niezadowolonych pasażerów, głoszących w czasie badań na poziom 3 lub wyżej. Jest to odsetek pasażerów, którzy nie chcieliby podróżować na tych poziomach dyskomfortu. Na fotografiach widoczny jest odsetek niezadowolonych pasażerów dla miejsc, które wywoływały nieakceptowalne CZKJ. Dla miejsc gdzie dyskomfort jest bliski 100% można zaproponować ograniczenie prędkości poruszania się tramwaju lub zdecydować się na modernizację torowiska. W czasie badań tramwaj poruszał się z przeciętną prędkością, na jaką pozwalały warunki jazdy.

W zarejestrowanych sygnałach przyspieszeń dzięki analizie falkowej można zlokalizować na osi czasu fragmenty sygnałów mogących powodować CZKJ i opisać je wartością częstotliwości i amplitudy. Analiza sygnałów czasowych pozwoliła na zaobserwowanie dość silnej korelacji i podobnej dynamiki sygnałów ocen pasażerów i przebiegu wartości sumy r.m.s. sygnałów drgań poprzecznych i pionowych.



Rys. 7.15 Transformata CWT dla sygnałów a_y i a_z . Brak wyraźnych pików dla wysokich częstotliwości.

Dalsza analiza pozwoliła na wyprowadzenie zależności pomiędzy czasem zwłoki oceny na pojawienie się drgań i wartości sumy r.m.s. sygnałów drgań poprzecznych i pionowych. Mediana czasu zwłoki wyniosła 0,63 s przy medianie wartości r.m.s. równej 0,78 m/s². Charakter trendu dla zestawu danych wskazuje na ustalenie się pewnej wartości czasu zwłoki oceny i brak jego znaczących zmian w funkcji wartości r.m.s. drgań.

8. MODEL LOGISTYCZNY

Jak wspomniano w rozdziale 7 CZKI były oceniane przez pasażerów na skali porządkowej opisanej liczbowo od 0 do 5. Sygnały przyspieszeń, które można scharakteryzować wielkościami mierzalnymi (ilościowymi) opisano na skali ilorazowej. Chcąc zbudować model obiektywnej oceny dyskomfortu należy znaleźć zależność pomiędzy dyskretnymi wartościami odpowiedzi pasażerów i ciągłymi wartościami wielkości charakterystycznych sygnałów przyspieszeń. W celu znalezienia modelu dyskomfortu dla takiej konfiguracji zmiennych objaśnianych i objaśniających można zastosować regresję logistyczną porządkową (RLP).

8.1. Regresja logistyczna

Regresja logistyczna jest jedną z metod regresji używanych w statystyce, gdy zmienna objaśniana jest na skali dychotomicznej (przyjmuje tylko dwie wartości). Zwykle wartości zmiennej objaśnianej wskazują na wystąpienie, lub brak wystąpienia pewnego zdarzenia, które chcemy prognozować. Regresja logistyczna pozwala na obliczenie prawdopodobieństwa tego zdarzenia (tzw. prawdopodobieństwa sukcesu). Formalnie model regresji logistycznej jest uogólnionym modelem liniowym (GLM), w którym użyto *logitu*, jako funkcji wiążącej [72] [73]. Uogólniony model liniowy stanowi rozszerzenie modelu regresji liniowej umożliwiające testowanie efektów zarówno nieliniowych jak i liniowych dla predyktorów jakościowych jak również ciągłych w przypadku zmiennej zależnej, której rozkład jest jednym z kilku specjalnych rozkładów należących do rodziny rozkładów wykładniczych (np. gamma, Poissona, dwumianowym itp.) lub jest rozkładem normalnym [74].

Regresja logistyczna opiera się na specyficznym sposobie wyrażania prawdopodobieństwa, zwanym szansą (ang. *Odds*). Zamiast określać prawdopodobieństwo klasycznie, za pomocą stosunku liczby sukcesów do liczby wszystkich prób, oblicza się szansę, czyli stosunek liczby sukcesów do liczby porażek.

Można ją łatwo wyliczyć ze zwykłego prawdopodobieństwa p :

$$Odds = \frac{p}{1-p} \quad (8.1)$$

Istnieje też odwrotne przekształcenie:

$$p = \frac{Odds}{1+Odds} \quad (8.2)$$

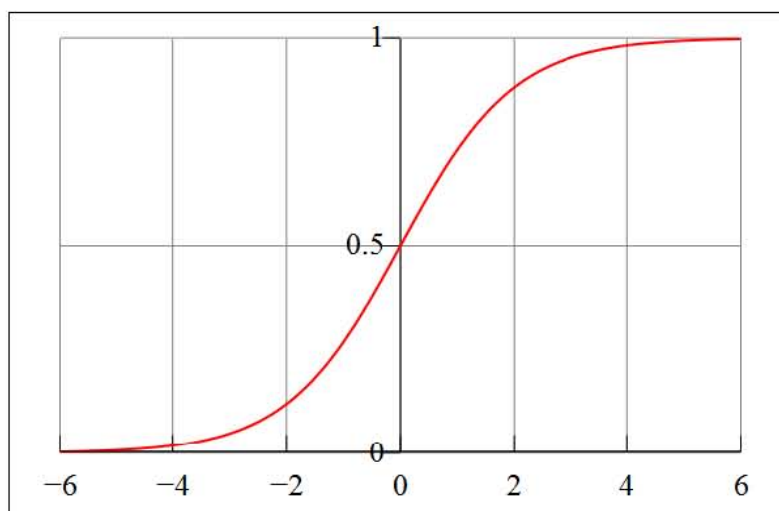
Szansa *Odds* ma pewną zaletę w porównaniu ze zwykłym zapisem prawdopodobieństwa. Przyjmuje ona dla $0 < p < 1$ wartości z zakresu $(0, +\infty)$ a jej logarytm wartości z zakresu $(-\infty, +\infty)$. Dzięki temu można stosować do szacowania logarytmu szansy metody regresji nieograniczone do przedziału $[0, 1]$, np. regresję liniową.

Funkcja przekształcająca prawdopodobieństwo na logarytm szansy zwana jest *logitem* (rys. 8.1):

$$\text{logit}(p) = \ln \frac{p}{1-p} \quad (8.3a)$$

Wartości logarytmu szansy zmieniają się na przedziale $(-\infty, \infty)$, co pozwala na szacowanie logarytmu szansy za pomocą regresji liniowej tj.:

$$\text{logit}(p) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (8.3b)$$



Rys. 8.1 Funkcja logistyczna z wartościami zmiennej opisującej x i wartościami prawdopodobieństwa $p(x)$ na osi y .

8.2. Model regresji logistycznej

Niech Y oznacza zmienną dychotomiczną o wartościach:

1 – najczęściej dla zdarzeń pożądanych, np. przeżycie, wyzdrowienie, niezarażenie, sukces;

0 – w przeciwnym przypadku, np. zgon lub choroba, zarażenie, porażka.

Wówczas logistyczny model regresji dla zmiennej dychotomicznej określony jest równaniem:

$$P(Y = 1 | x_1, x_2, \dots, x_k) = \frac{e^{\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i}}{1 + e^{\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i}} \quad (8.4)$$

gdzie: $\beta_i, i=1, \dots, k$ są współczynnikami regresji

x_1, x_2, \dots, x_k – zmienne niezależne, jakościowe lub ilościowe.

Lewa strona powyższej równości to warunkowe prawdopodobieństwo, że zmienna Y przyjmie wartość równą 1 dla wartości zmiennych niezależnych x_1, x_2, \dots, x_k .

Celem każdej regresji jest znalezienie takich współczynników regresji, które zapewnią nam jak najlepsze dopasowanie modelu do pewnego zestawu danych. Liczność próbek n musi być dostatecznie duża, co dla regresji logistycznej oznacza $n > 10(k+1)$, gdzie k jest liczba parametrów [75]. Metoda najmniejszych kwadratów wykorzystywana standardowo do szacowania współczynników regresji nie może być tutaj wykorzystana ze względu na niespełnienie warunku dotyczącego stałej wariancji.

Dla zmiennej dychotomicznej y_i o średniej μ wariancja jest równa $\mu(1-\mu)$. W przypadku regresji logistycznej stosujemy metodę największej wiarygodności (ang. maximum likelihood).

Postać funkcji największej wiarygodności l w przypadku rozkładu dwumianowego zmiennej zależnej wygląda następująco [73]:

$$l(\beta) = \prod_{i=1}^n \pi(x_i)^{y_i} [1 - \pi(x_i)]^{1-y_i} \quad (8.5)$$

Metoda maksymalnej wiarygodności wykorzystuje wektor poszukiwanych współczynników regresji β_i dla zmaksymalizowania równania 8.5. Ze względów matematycznych łatwiej jest pracować z logarytmem, przez co równanie 8.5 poddano logarytmowaniu nazywając *log likelihood* L :

$$L(\beta) = \ln[l(\beta)] = \sum_{i=1}^n \{y_i \cdot \ln[\pi(x_i)] + (1 - y_i) \cdot \ln[1 - \pi(x_i)]\} \quad (8.6)$$

Dla znalezienia współczynników regresji β_i obliczamy pochodną równania 8.6 ze względu na współczynniki β_i a następnie przyrównujemy do zera. Wynikiem obliczeń są dwa równania wiarygodności:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \pi(x_i)] = 0 \quad (8.7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i [y_i - \pi(x_i)] = 0 \quad (8.8)$$

Ponieważ równania 8.7 i 8.8 są nieliniowe ze względu na współczynniki β_i do ich obliczeń wykorzystuje się metody iteracyjne np. metoda ważonych najmniejszych kwadratów.

Generalnie w regresji najważniejszą rolę odgrywają współczynniki regresji i ich statystyczna istotność. W modelu logistycznym dochodzi dodatkowy parametr – iloraz szans *OR* (*Odds ratio*).

Przykładowo, jeśli prawdopodobieństwo zdarzenia A, $p = 0.8$, to szansa $O = 4$. Oznacza to, że prawdopodobieństwo pojawienia się zdarzenia A jest 4 razy większe niż pojawienia się zdarzenia przeciwnego B. Iloraz szans $OR_{A,B}$ dwóch grup porównywalnych A i B definiujemy, jako stosunek szansy O_A wystąpienia A do szansy O_B wystąpienia B.

Tab. 8.1 Przykładowe dane [75].

| Narażenie | Nowotwór płuca | |
|------------|----------------|--------------|
| | wystąpił | nie wystąpił |
| Palący | 243 | 30 |
| Nie palący | 48 | 240 |

Oznaczamy przez A grupę palaczy, a przez B grupę osób niepalących. Korzystając z powyższej tabeli można obliczyć iloraz szans porównując szanse rozwinięcia się nowotworu płuca u palących i niepalących. Wartość ta wynosi $OR_{A,B} = 8,10,2 = 40,5$. Szansa rozwoju nowotworu u palaczy jest czterdzieści razy większa niż u niepalących. Iloraz szans równy jeden oznacza równowagę ryzyka porównywanych grup. W powyższym przykładzie mówiliby to, że palenie nie ma wpływu na rozwój nowotworu w płucach.

8.3. Model regresji logistycznej porządkowej

Typowa regresja logistyczna opisana powyżej opiera się na zmiennej objaśnianej znajdującej się na skali dychotomicznej. W przypadku badań autora zmienna objaśniana znajdowała się na skali porządkowej, sześć poziomowej. Pasażerowie głosowali na skali od 1 do 5. Nie głosując na żaden ze wspomnianych poziomów, biernie głosowali na poziom 0. Dla tego przypadku można użyć regresji logistycznej porządkowej. Regresja ta opiera się na następującym modelu proporcjonalnych szans [76] [77]:

$$\text{logit} [P(Y \leq j | \mathbf{x})] = \ln \left[\frac{P(Y \leq j | \mathbf{x})}{P(Y > j | \mathbf{x})} \right] \quad (8.9a)$$

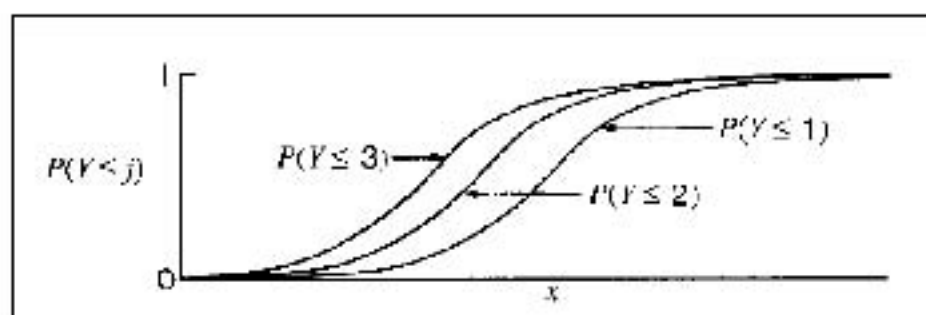
lub

$$\text{logit} [P(Y \leq j | \mathbf{x})] = \alpha_j + \beta \mathbf{x} \quad j = 1, \dots, J-1 \quad (8.9b)$$

gdzie: $j = 1, \dots, J-1, J$ - liczba kategorii na skali porządkowej,
 β - wektor współczynników,
 \mathbf{x} - wektor zmiennych.

Każdy *logit* odpowiedniej kategorii oceny j posiada własny punkt przecięcia z osią odciętych α_j . Wartość α_j wzrasta wraz z j ponieważ prawdopodobieństwo $P(Y \leq j | \mathbf{x})$ wzrasta dla kategorii j dla wybranych \mathbf{x} , i jednocześnie wzrasta wartość logitu jako funkcji prawdopodobieństwa. Model ten ma ten sam współczynnik kierunkowy prostej β dla każdego logitu odpowiedniego poziomu. Na rys. 8.2 przedstawiono model dla 4 kategorii, $J = 4$ i zmiennej ciągłej x . Dla wybranego j krzywa odpowiedzi jest krzywą logistyczną dla odpowiedzi binarnej z wynikami $Y \leq j$ i $Y > j$. Krzywe odpowiedzi dla $j = 1, 2$ i 3 mają ten sam kształt. Mają takie samo tempo wzrostu czy opadania, ale są wzajemnie przesunięte horyzontalnie.

Oznacza to taki sam wpływ zmiennych opisujących dla różnych funkcji *logit* w zależności od kategorii na skali porządkowej. Z tego też powodu model ten nazywany jest modelem proporcjonalnych szans.



Rys. 8.2 Skumulowany model logitowy dla czterech kategorii [76].

Dla kategorii $j = 4$, na skali porządkowej nie oblicza się prawdopodobieństwa ze względu na fakt występowania prawdopodobieństwa skumulowanego. Prawdopodobieństwo dla ostatniej kategorii J jest różnicą pomiędzy jednością a sumą prawdopodobieństw dla niższych kategorii.

Dla wyżej opisanego modelu hiperpłaszczyzny odpowiedzi są do siebie równoległe. Taki model nie daje możliwości zaobserwowania wpływu poszczególnych zmiennych objaśniających dla poszczególnych kategorii odpowiedzi.

Dla poprawy elastyczności modelu wprowadzono zmianę polegającą na uwolnieniu hiperpłaszczyzn odpowiedzi od wzajemnej równoległości. Model taki zapisano zależnością 8.10 [78].

$$\text{logit}[P(Y \leq j | \mathbf{x})] = \alpha_j + \beta_j' \mathbf{x} \quad j = 1, \dots, J-1 \quad (8.10)$$

W zaproponowanym modelu każda z hiperpłaszczyzn ma swój punkt przecięcia z osią x oraz własny współczynnik kierunkowy. Implikuje to potencjalny problem wzajemnego przecinania się hiperpłaszczyzn. Z tego względu wprowadzono obostrzenie wykluczające prognozowanie odpowiedzi dla wartości zmiennych objaśniających z poza zakresu zarejestrowanego podczas badań. Może też zaistnieć możliwość lokalnego przecinania się hiperpłaszczyzn wewnątrz zbioru danych. Sytuacja taka świadczyłaby o głosowaniu na dwie kategorie jednocześnie. W tym wypadku wymagana będzie ingerencja algorytmu dla uzyskania monotoniczności logitów. Dla tego modelu nadal zostaje zachowana zasada sumowania prawdopodobieństw do jedności. W dalszej części pracy autor wykorzysta model regresji logistycznej porządkowej z nie równoległymi hiperpłaszczyznami odpowiedzi.

8.4. Budowa modelu

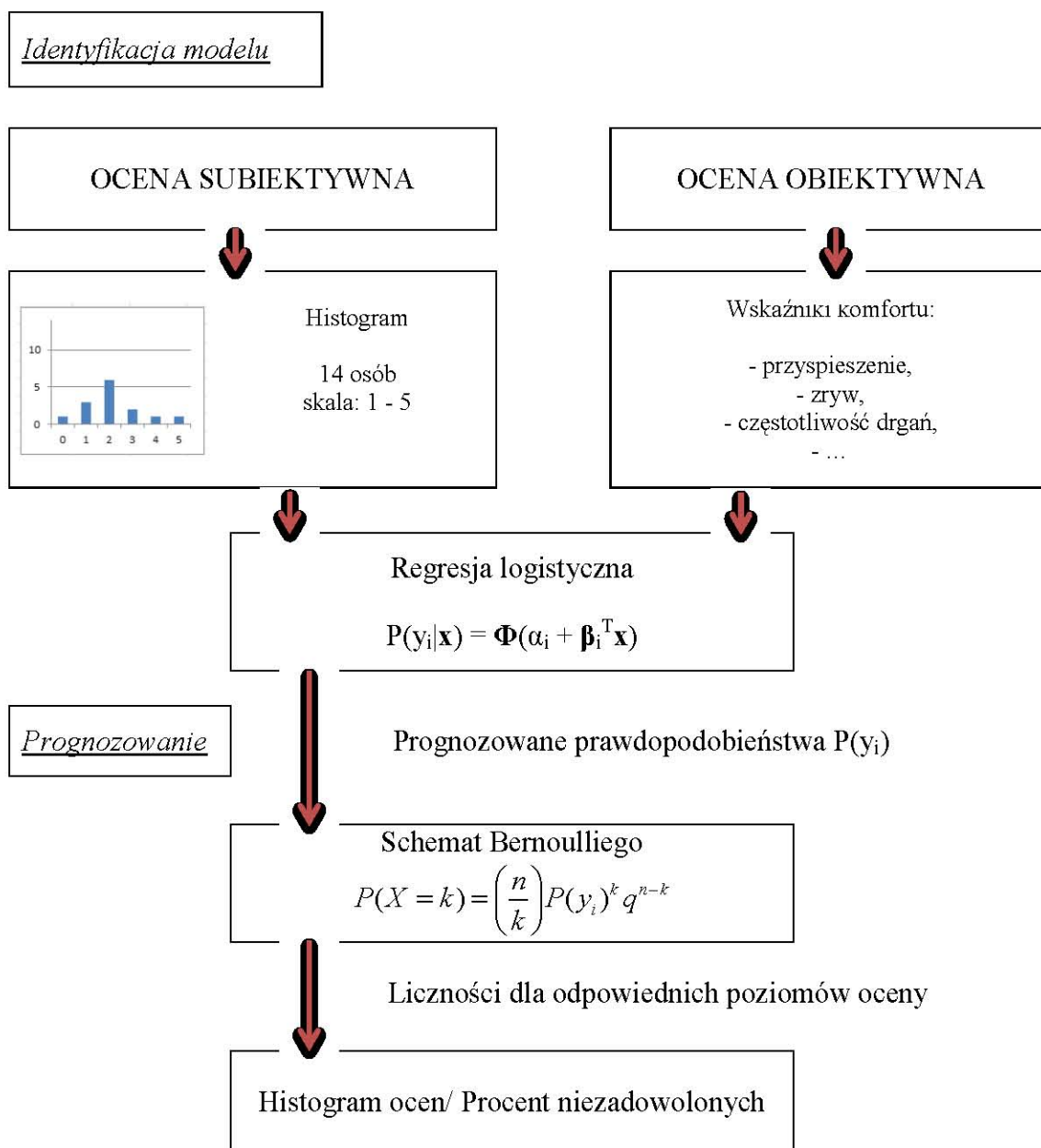
Proces budowy obiektywnego narzędzia oceny komfortu jazdy składa się z dwóch etapów. Pierwszy etap to identyfikacja modelu oparta o regresję logistyczną porządkową. Zmiennymi opisującymi są wartości wskaźników obliczone dla fragmentów sygnałów przyspieszeń zarejestrowanych równoległe z subiektywną oceną pasażerów, jako zmienną opisywaną na skali porządkowej. Gdzie dla kolejnych poziomów oceny prognozowane jest prawdopodobieństwo p na podstawie zależności 8.9a oraz transformacji

$$p = \frac{e^{\text{logit}}}{1 + e^{\text{logit}}} \quad (8.11)$$

Jak wspomniano wcześniej model łączy ocenę subiektywną pasażerów oraz ocenę obiektywną dynamicznych wielkości poruszającego się pojazdu, co przedstawiono schematycznie na rys. 8.3.

W niniejszej pracy autor wykorzystał pięciokrotnie regresję logistyczną odpowiednio dla każdego poziomu dyskomfortu. Na podstawie dostępnej literatury arbitralnie zostały wybrane zmienne objaśniające spośród zmiennych mogących mieć wpływ na dyskomfort jazdy. Ze względu na charakter pracy liczba danych wejściowych została ograniczona do zmiennych będących wynikiem analizy falkowej. Zestaw danych został zebrany z 23 odcinków pomiarowych. Łączny czas odcinków wyniósł 42,2 min. Dane zostały odczytane co 0.4 s. Dla czasu t_i , $i = 1:6340$, dane wejściowe zostały obliczone w oknie długości 1 s wstecz ($t_i - 1$ s). Dane wyjściowe odczytano w oknie długości 2 s do przodu ($t_i + 2$ s). zilustrowano to na rysunku 8.4. Wartość 1 s wstecz autor zaczerpnął z norm ISO 2631 [12] jako długości okna najlepiej charakteryzującego reakcje człowieka na chwilowe wibracje (MTVV – zależność 3.4).

Wartość 2 s do przodu autor wybrał na podstawie wizualnej analizy sygnałów przyspieszenia i odpowiedzi pasażerów.



Rys. 8.3 Algorytm identyfikacji modelu oraz prognozowania histogramu częstości odpowiedzi dla obiektywnej oceny komfortu drgań. Dla identyfikacji modelu wykorzystano porządkową regresję logistyczną z danymi wejściowymi w postaci histogramu częstości ocen komfortu drgań oraz obiektywnych wskaźników obliczonych dla sygnałów przyspieszeń. Proces prognozowania oparty został o schemat Bernoulliego z prawdopodobieństwem sukcesu prognozowanym dla poszczególnych poziomów oceny przez model porządkowej regresji logistycznej.

Wszystkie zmienne wejściowe są zmiennymi ciągłymi ilościowymi umieszczonymi na skali ilorazowej. Zmienną wyjściową jest histogram subiektywnych ocen pasażerów, jako zmienna jakościowa na skali porządkowej.

W przypadku sygnału przyspieszenia podłużnego a_x podczas analizy falkowej zaobserwowano w dużej mierze częstotliwości poniżej zakresu wskazanego przez normy [10] [12] [13] [22] tzn. 0.5 Hz dla znaczących amplitud sygnału (rozdział 6.4).

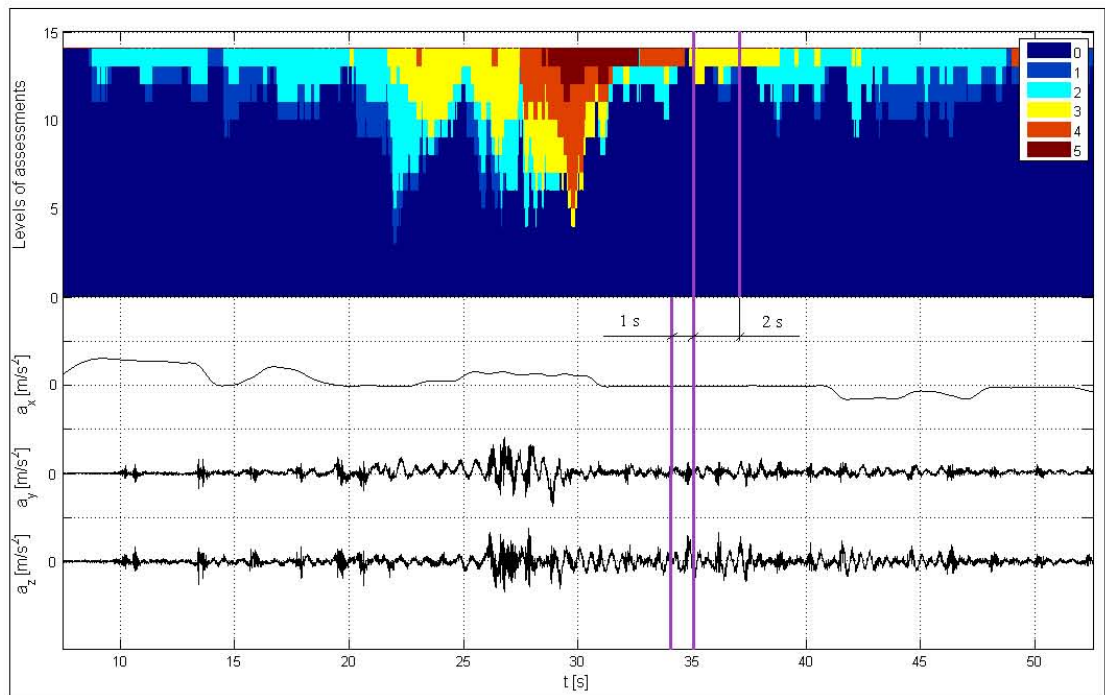
Biorąc pod uwagę istotny wpływ przyspieszenia podłużnego a_x na poziom komfortu autor nie może pominąć tych wielkości w modelu. Na podstawie analizy czasowej sygnału zostało wybranych kilka zmiennych charakteryzujących sygnał przyspieszenia podłużnego a_x . Są nimi:

- maksymalna amplituda sygnału przyspieszenia podłużnego a_x (A),
- maksymalna amplituda zrywu przyspieszenia podłużnego a_{x_zryw} (B),
- MTVV sygnału przyspieszenia w oknie 1 s $MTVV a_x$ (C),
- r.m.q. sygnału przyspieszenia dla okna 1 s $r.m.q. a_x$ (D),
- r.m.s. sygnału przyspieszenia dla okna 1 s $r.m.s. a_x$ (E),
- VDV sygnału przyspieszenia dla okna 1 s $VDV a_x$ (F).

Dla pozostałych sygnałów zmiennymi wejściowymi są:

- częstotliwość przyspieszenia poprzecznego pf_y dla a_y (G),
- maksymalna amplituda przyspieszenia poprzeczne a_y (H),
- częstotliwość przyspieszenia pionowego pf_z dla a_z (I),
- maksymalna amplituda przyspieszenia pionowego a_z (J).

Oznaczenie dużymi literami alfabetu wykorzystano w dalszych fragmentach rozprawy dla uproszczenia zapisu.



Rys. 8.4 Przedziały czasu, dla których pozyskano parametry sygnałów do obliczeń wartości zmiennych objaśniających. Dla tej samej próbki czasu t_i zbierano informacje o histogramie maksymalnych ocen subiektywnych dla okresu $t_i + 2$ s oraz wartości parametrów sygnałów dla odcinka $t_i - 1$ s.

Ponieważ celem analizy statystycznej jest znalezienie funkcji najlepiej opisującej zestaw danych oraz wykorzystującą w tym celu jak najmniejszą liczbę zmiennych autor przeprowadził analizę czynnikową w celu wybrania zmiennych najbardziej efektywnych dla modelu statystycznego.

Tab. 8.2 Wynik statystycznej analizy czynnikowej. Wybrano tylko 6 czynników ze względu na ich znaczący udział na wykresie osypiska.

| Zmienna | Współrzędne czynnikowe zmiennych, na podstawie korelacji | | | | | |
|--------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Czynn. 1 | Czynn. 2 | Czynn. 3 | Czynn. 4 | Czynn. 5 | Czynn. 6 |
| a_x | -0,985 | -0,060 | -0,012 | -0,030 | 0,000 | 0,003 |
| $a_{x, rpp}$ | -0,442 | 0,042 | -0,116 | 0,887 | 0,014 | 0,003 |
| $MTVV a_x$ | -0,989 | -0,050 | -0,014 | -0,020 | 0,000 | 0,000 |
| $r.m.q. a_x$ | -0,986 | -0,044 | -0,018 | 0,016 | 0,000 | -0,002 |
| $r.m.s. a_x$ | -0,964 | -0,066 | 0,006 | -0,209 | 0,001 | 0,007 |
| $VDV a_x$ | -0,976 | -0,063 | -0,001 | -0,159 | 0,000 | 0,006 |
| pf_x | 0,014 | -0,497 | 0,695 | 0,083 | -0,514 | -0,006 |
| a_y | 0,120 | -0,872 | -0,353 | 0,000 | 0,054 | -0,314 |
| pf_y | 0,035 | -0,515 | 0,688 | 0,059 | 0,503 | 0,066 |
| a_z | 0,164 | -0,792 | -0,498 | -0,011 | -0,064 | 0,305 |

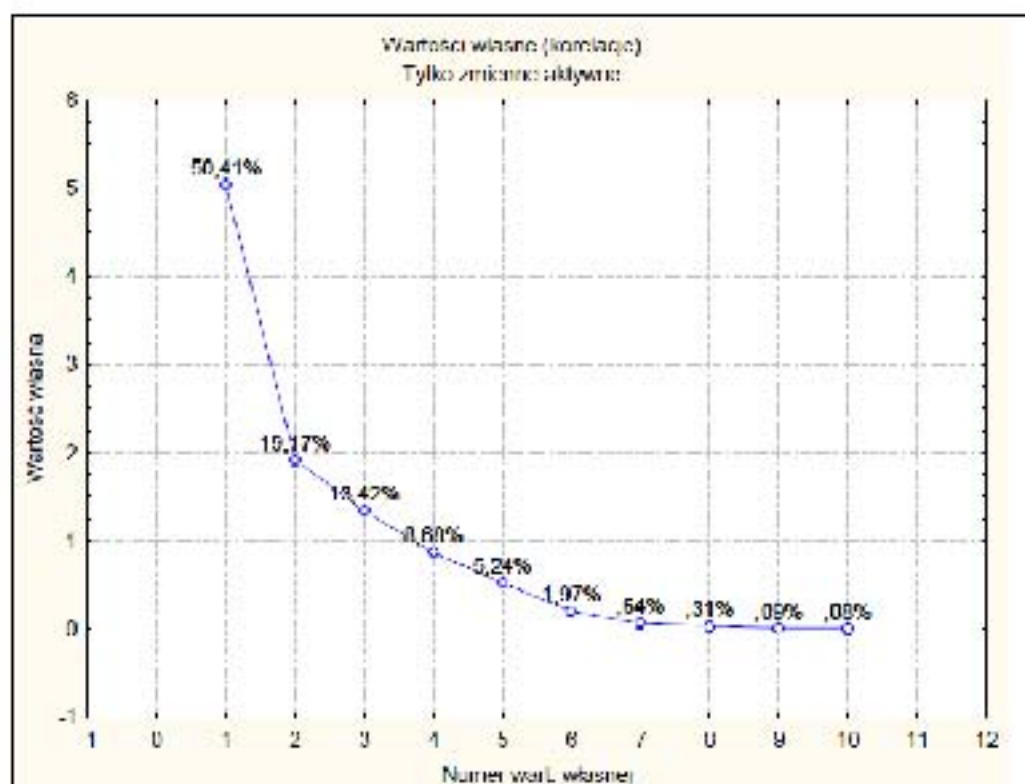
wynikach analizy czynnikowej (tab. 8.2) można zauważyć grupowanie się zmiennych powiązanych z sygnałem przyspieszenia podłużnego a_x , co świadczy o korelacji tych zmiennych. Dla następnego czynnika pojawia się silna korelacja dla amplitudy przyspieszenia pionowego a_y i poprzecznego a_z . Czynnikiem trzecim to korelacja częstotliwości przyspieszenia pionowego pf_y i podłużnego pf_x . Dla czwartego czynnika pojawia się tylko jedna zmienna $a_{x, rpp}$. Dla piątego czynnika powtarzają się zmienne z trzeciego czynnika i dla szóstego z drugiego czynnika. Przedstawiono wyniki tylko dla sześciu czynników ze względu na rezultaty wykresu osypiska (rys. 8.3). Krzywa na wykresie osypiska staje się bardziej płaska dla 7-go i wyższych czynników, co wskazuje na znikomą wpływ tych czynników dla wyjaśnienia zbioru danych.

Analizę czynnikową należy traktować, jako wstępną analizę zmiennych objaśniających. Jej wyniki nie mogą być decydujące w wyborze zmiennych dla dalszej analizy statystycznej. Jak wiadomo analiza czynnikowa opiera się na współczynnikach korelacji, które słuszne są tylko dla danych powiązanych liniową zależnością. Głównym powodem jest możliwość nieliniowego wpływu wielkości mierzonych na ocenę CZKJ. Wyraża się to w krzywych ważenia częstotliwościowego zawartych w normach [12], [13], [10] oraz w ostatnich badaniach laboratoryjnych gdzie zauważono zmianę oceny komfortu wraz ze zmianą wartości VDV drgań (rys. 2.4).

Dla poprawy elastyczności dopasowania płaszczyzny aktywacji dodano interakcje dwuczynnikowe dla wszystkich 10 zmiennych objaśniających, co dało 55 nowych zmiennych oznaczonych symbolami pochodzących z połączenia dużych liter poszczególnych zmiennych wchodzących w interakcje. W załączniku C przedstawiono ww. zmienne.

Do powiększonego zestawu zmiennych objaśniających autor dodał zmienną mogącą wskazać najbardziej niekorzystne warunki dla oceny CZKJ dla poszczególnych poziomów subiektywnej oceny. Tą zmienną jest kierunek lub kierunek i zwrot dominującego przyspieszenia. Jest to zmienna dyskretna, która może należeć do jednej z 5 możliwych grup opisanych cyframi wg tabeli 8.3. Dla wyodrębnienia spośród sygnałów przyspieszeń sygnału mogącego mieć największy wpływ na subiektywną ocenę CZKJ zastosowano klasyfikację sygnałów na podstawie maksymalnej wartości

r.m.s. poszczególnych sygnałów dla okna długości 1 s jak wspomniano na początku rozdziału 8.3. Na podstawie wymienionych w tabeli 8.3 pięciu grup będzie można wnioskować o wpływie kierunku lub kierunku i zwrocie przyspieszenia na subiektywną ocenę dla poszczególnych poziomów komfortu jazdy.



Rys. 8.5 Wykres osypiska. Sześciowymiarowy model wydaje się być optymalnym rozwiązaniem.

W sumie zestaw zmiennych składa się z 66 zmiennych objaśniających. Zbiór danych będący przedmiotem analizy jest zbiorem bardzo dużym. Dla ułatwienia obliczeń, wprowadzenia efektywnych estymatorów prawdopodobieństwa i normalizacji zbiór danych poddano analizie dyskretyzacji. W załączniku D przedstawiono wyniki dyskretyzacji.

Tab. 8.3 Warunki klasyfikacji dodatkowych zmiennych opisujących kierunek lub kierunku i zwrot przyspieszenia mogący mieć wpływ na poszczególne poziomy komfortu.

| Rodzaj przyspieszenia - oznaczenie | Warunek |
|------------------------------------|--|
| Przyspieszenie podłużne - 11 | $rms_{ax}Max \leq 0.1 \text{ m/s}^2$ $rms_{ay}Max \leq 0.1 \text{ m/s}^2$ $AmpAxZryw \geq 0.5 \text{ m/s}^3$ |
| Opóźnienie podłużne - 12 | $rms_{ax}Max \leq 0.1 \text{ m/s}^2$ $rms_{ay}Max \leq 0.1 \text{ m/s}^2$ $AmpAxZryw \leq 0.5 \text{ m/s}^3$ |
| Poprzeczne - 2 | $rms_{ax}Max \geq 2 * rms_{ay}Max$ $AmpAxZryw \leq 0.5 \text{ m/s}^3$ |
| Pionowe - 3 | $rms_{ax}Max \geq 2 * rms_{ay}Max$ $AmpAxZryw \leq 0.5 \text{ m/s}^3$ |
| Mieszane - 4 | Każdy inny przypadek nie objęty powyższymi warunkami |

Na podstawie wyników dyskretyzacji można zauważyć graniczną liczbę klas podziału przedziałów zmiennych objaśniających. Dla 5 i wyższych klas ponad połowa komórek niepustych jest obsadzona tylko dwoma wartościami pomiaru (mediana = 2). Tak duża liczba komórek o tak małej liczbie danych nie jest pożądanym rezultatem dyskretyzacji. Autor zdecydował dokonać dyskretyzacji dzieląc przedziały zmiennych na 5 klas. Każdej klasie przyporządkowano numer od 1 do 5.

W załączniku C przedstawiono fragment danych wejściowych z podziałem liczności głosowania dla wybranego poziomu oceny (L1-L5), zmiennymi, interakcjami dwuczynnikowymi oraz dyskretyzacją. Dla opisanego powyżej zbioru danych przeprowadzono identyfikację hiperpłaszczyzn odpowiedzi odpowiednio dla każdego poziomu dyskomfortu wykorzystując model opisany zależnością 8.10.

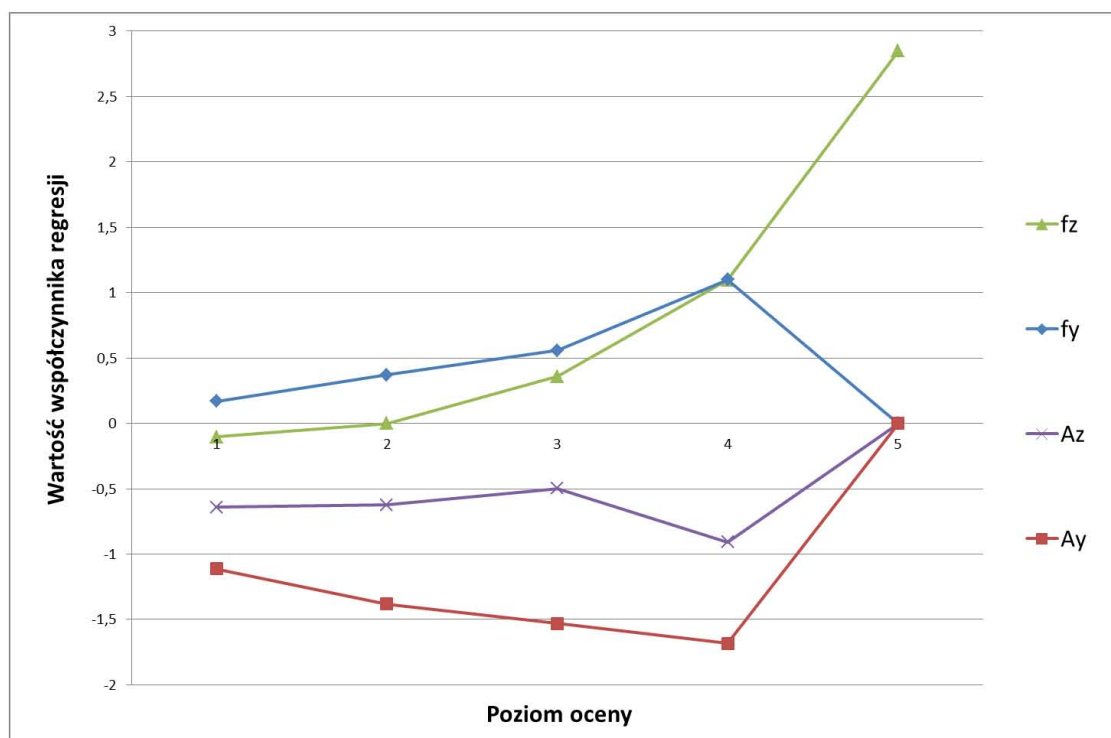
Do obliczenia istotności poszczególnych zmiennych zastosowano regresję krokową wsteczną. Wynikiem obliczeń jest duża liczba statystycznie nieistotnych zmiennych, również wśród zmiennych głównych. Dla każdego z pięciu poziomów dyskomfortu analizę prowadzono oddzielnie i dla każdego poziomu uzyskano inny zestaw zmiennych statystycznie istotnych. Na podstawie tych wyników można wnioskować o dużym stopniu skomplikowania hiperpłaszczyzn jak również o ich wzajemnej nierównoległości. Wyniki obliczeń dla poszczególnych płaszczyzn oraz zestawienie końcowe zawarto w załączniku E. Ze względu na proces dyskretyzacji wartości współczynników regresji dla poszczególnych poziomów oceny są znormalizowane, dzięki czemu można je bezpośrednio porównywać pomiędzy sobą. Wygodnym narzędziem do zobrazowania wpływu poszczególnych współczynników na ocenę wynikową dyskomfortu na poszczególnych poziomach jest wykres radarowy przedstawiony na rysunku E.1 załącznika E.

W tabeli E.6 (Załącznik E) przedstawiono statystycznie istotne współczynniki 31 zmiennych opisujących hiperpłaszczyzny oceny dyskomfortu na poziomie od L1 do L5. Wartości współczynników w funkcji poziomu oceny zmieniają się lub zerują. Świadczy to o wpływie różnych wielkości na ocenę poszczególnych poziomów dyskomfortu. Widoczny jest brak zmiennych A, B, C, E, F, co odpowiada wszystkim wielkościom związanym z sygnałem a_x . Wyjątkiem jest zmienna *r.m.g.* a_x (D), która pojawia się dla oceny poziomu drugiego L2. Zmienne od A do F pojawiają się natomiast w bardzo wielu interakcjach dwuczynnikowych szczególnie dla poziomu oceny L1 i L2. Świadczyć to może o łącznym wpływie przyspieszenia poprzecznego, pionowego i podłużnego na ocenę komfortu tych poziomów czy też o trudności oceny subiektywnej drgań dla małych wartości amplitud. Im wyższy poziom oceny tym mniej zmiennych głównych i dwuczynnikowych pojawia się w opisie hiperpłaszczyzn odpowiedzi. Można wnioskować, że tylko wybrane zmienne, tym samym charakterystyczne przypadki dyskomfortu powodują ocenę dyskomfortu na najwyższy poziom L5. Wielkościami tymi przede wszystkim jest częstotliwość drgań pionowych pf , oraz wielkość *MTVV* drgań podłużnych a_x . Znaczny udział w ocenie dyskomfortu dla poziomu L5 wnosi zmienna rodzaj odcinka tzn. *opóźnienie podłużne* 12. Dla poziomu L4 zmiennymi zwiększającymi prawdopodobieństwo głosowania jest częstotliwość drgań poprzecznych pf , i pionowych pf , oraz *opóźnienie podłużne* 12. Zmiennymi obniżającymi prawdopodobieństwo głosowania są amplitudy drgań a_x i a_z . Do głosowania na poziom L3 najbardziej przyczynia się częstotliwość drgań poprzecznych pf , oraz zmienne przyspieszenia 11 i *opóźnienia* 12. Najbardziej obniżają to prawdopodobieństwo amplitudy drgań a_x i a_z . Dla poziomu L2 prawdopodobieństwo głosowania na poziom L2 wzrasta wraz ze wzrostem wartości zmiennej dwuczynnikowej będącej iloczynem amplitudy drgań poprzecznych a_x i pionowych a_z , oraz zmiennej *opóźnienia podłużne* 12. Natomiast maleje prawdopodobieństwo za

przyczyną przyspieszenia poprzecznego a_y . Poziom L1 obejmuje najliczniejszy zestaw tj. 21 zmiennych. Wśród nich zwiększających prawdopodobieństwo pojawiają się zmienne powiązane z amplitudami drgań w kierunku podłużnym a_x . Zdecydowanie amplituda drgań a_y obniża to prawdopodobieństwo. Liczność zmiennych dla tego poziomu wynika prawdopodobnie z faktu, że jest to poziom graniczny pomiędzy komfortem (L0) a jego utratą, co może być spowodowane dowolną wielkością dynamiczną o niekoniecznie dużych wartościach.

Spośród 31 zmiennych (Załącznik E, Tab. E.6) tylko 9 z nich wykazuje znaczące zmiany w funkcji poziomu oceny. Cztery z spośród dziewięciu (a_y , a_z , pf_y , pf_z) to rodzaj dominującego przyspieszenia i jego częstotliwość. Cztery następne to zmienne dwuczynnikowe ($MTVV a_x^2$, $MTVV a_x * r.m.q. a_x$, $a_y * a_z$, pf_z^2). Ostatnią zmienną jest *rodzaj odcinka*.

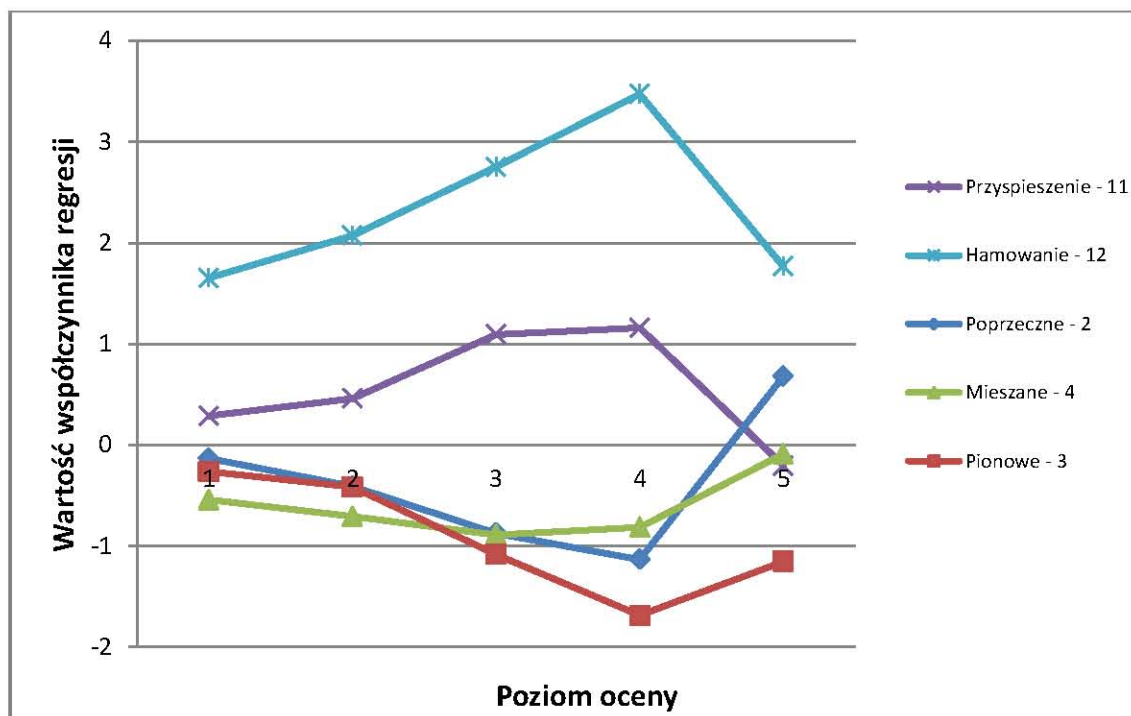
Na rysunku nr 8.6 przedstawiono przebieg zmiennych głównych w funkcji poziomu oceny L_i . Dla coraz wyższych poziomów dyskomfortu obserwuje się coraz większy udział częstotliwości drgań pionowych i poziomych w ocenie dyskomfortu natomiast coraz mniejszy amplitudy drgań pionowych i poziomych. Dla poziomu piątego pojawia się sytuacja gdzie tylko częstotliwość drgań pionowych znacząco wpływa na dyskomfort natomiast pozostałe trzy zmienne zerują się. Z praktycznego punktu widzenia sytuacja taka jest mało realna gdyż częstotliwość sygnału nie może występować bez jego amplitudy. Natomiast nie zaprzecza to poprawności modelu matematycznego.



Rys. 8.6 Zmiana współczynników zmiennych głównych f_y , f_z , a_y , a_z w funkcji poziomu oceny L_i .

Na rysunku 8.7 przedstawiono przebieg wartości współczynników zmiennej *rodzaj odcinka* w funkcji poziomów oceny L_i . Dla poziomów od L_1 do L_4 widoczny jest rosnący wpływ odcinka, na którym dominowało przyspieszenie '11' i hamowania '12' tramwaju na wzrost dyskomfortu jazdy. Dla poziomu L_5 wpływ ten znacząco spada na rzecz odcinka gdzie dominowało przyspieszenie poprzeczne '2'. Sytuacja jest odwrotna dla odcinków z przewagą przyspieszenia poprzecznego '2' i pionowego '3'. Ich udział

zmniejsza poziom dyskomfortu dla poziomu od L1 do L4. Odcinki '4' gdzie wszystkie sygnały główne a_x , a_y i a_z , uzyskiwały podobną wartość nie zmienia swej wartości znacznie w funkcji poziomu oceny. Mieszane odcinki nie mają znaczącego wpływu na ocenę komfortu. Wyraźniej oceniane są odcinki z dominującym sygnałem.



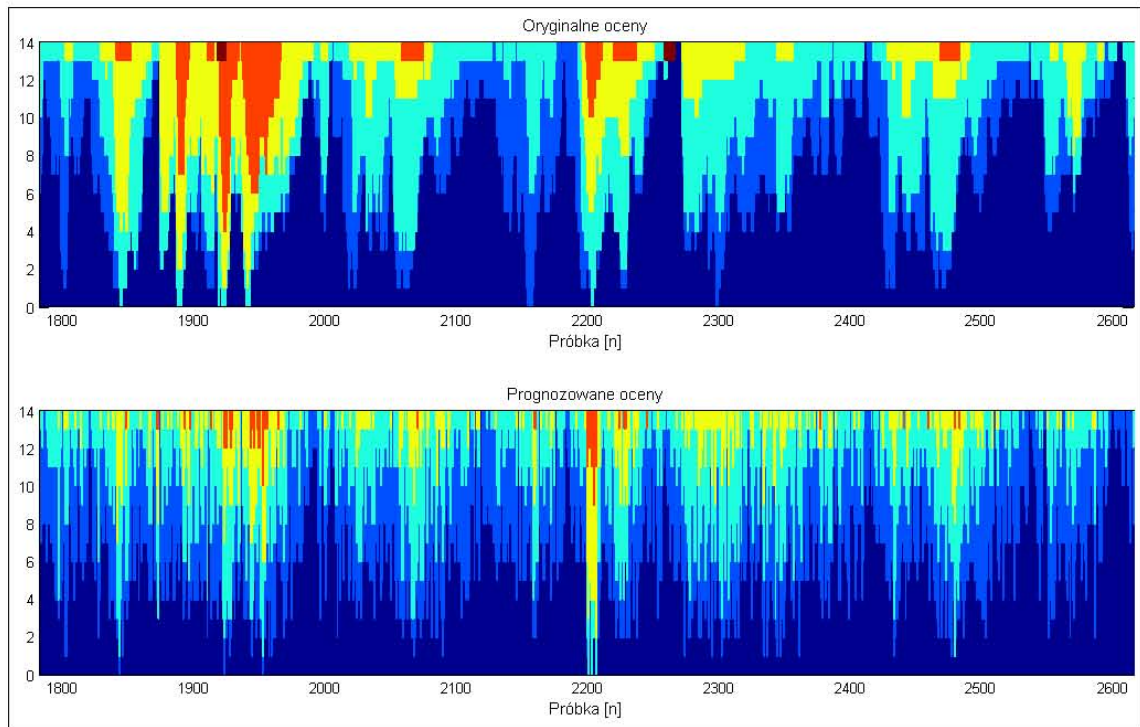
Rys. 8.7 Wartość współczynników zmiennej 'rodzaj przyspieszenia' w funkcji poziomu odpowiedzi.

Na rysunku 8.8 przedstawiono fragment porównania ocen komfortu jazdy zarejestrowanego podczas badania oraz ocen prognozowanych przez model regresji logistycznej porządkowej. Na podstawie porównania można zauważyć korelację pomiędzy ocenami natomiast różnią się one, co do liczności poszczególnych odpowiedzi na poszczególnych poziomach.

Na rysunku 8.9 w górnej części przedstawiono błędy bezwzględne predykcji modelu regresji logistycznej dla poszczególnych poziomów oceny L_i . W dolnej części wykorzystując *boxplot* przedstawiono parametry statystyczne dla poszczególnych poziomów oceny.

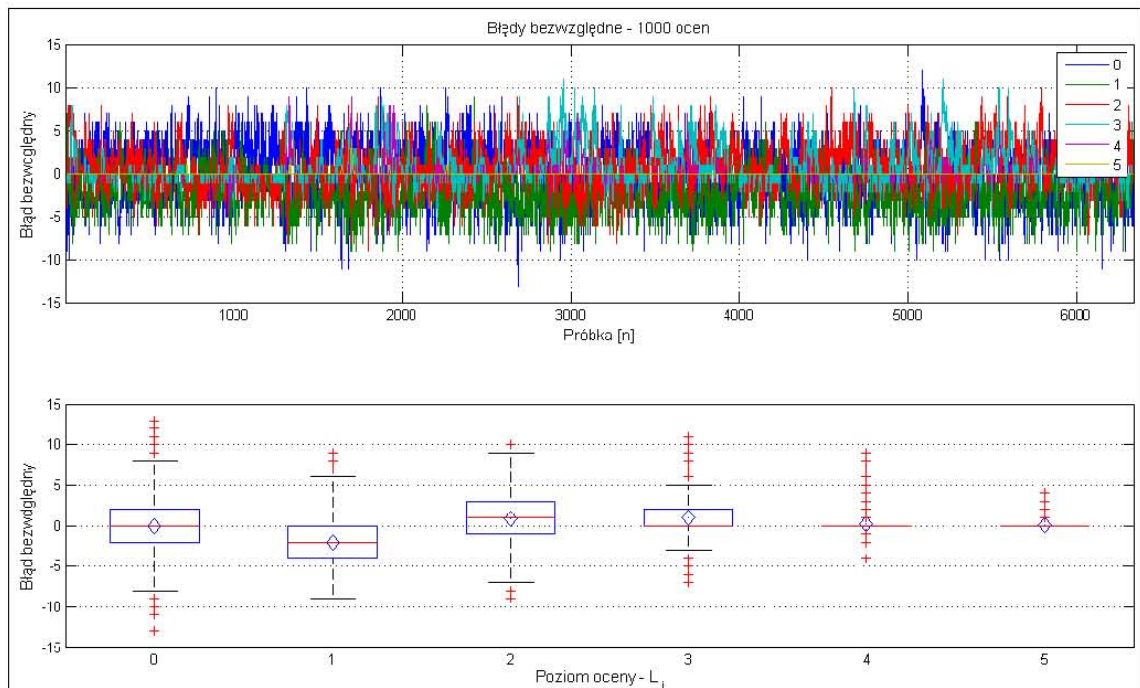
Za wyjątkiem poziomu L1 mediana i średnia arytmetyczna dla pozostałych poziomów oceny utrzymują się w okolicy zera co świadczy o symetrii rozkładu błędów predykcji dla oceny położenia. Dla poziomu L2 średnia arytmetyczna jak i mediana błędu predykcji jest powyżej 2 zawyżając liczbę potencjalnie głosujących pasażerów na ten poziom. Dla oceny dyspersji dla dwóch środkowych ćwiartek rozkładu tylko dla poziomu L3 jest ona duża na korzyść zwiększenia liczby głosujących na ten poziom. Dla zakresy wąsów dyspersja utrzymuje się na stałym proporcjonalnym do wielkości pudełka poziomie. Biorąc pod uwagę asymetrię rozkładu jest ona zauważalna tylko dla środkowych ćwiartek poziomu L3.

Pięćdziesiąt procent błędów (IQR) nie przekracza ± 2 dla poziomów od L1 do L3, co jest dobrym wynikiem przy tak małej liczności próbki (14 osób). Dla poziomu L4 i L5 99,3% wartości błędu są praktycznie równe zero.



Rys. 8.8 Porównanie oryginalnych ocen zarejestrowanych w czasie badań (górny wykres) z ocenami prognozowanymi przez model regresji logistycznej (dolny wykres).

Dla każdego poziomu pojawiają się wartości nietypowych (outliers). Dla poziomu L1 są one rozłożone symetrycznie natomiast dla pozostałych poziomów zdecydowanie więcej pojawia się ich po stronie zmniejszającej liczbę głosujących na dany poziom, co będzie powodować zaniżenie ocen przez model dla poziomu od L1 do L5.



Rys. 8.9 Błędy bezwzględne predykcji; a) błędy bezwzględne w funkcji kolejnych próbek, b) parametry statystyczne dla poszczególnych poziomów oceny. Wyjaśnienie wykresu pudełkowego opisano w załączniku F.

Tab. 8.4 Wartości parametrów statystycznych dla poszczególnych poziomów oceny wyrażone przez liczbę głosów za wyjątkiem średniej arytmetycznej gdzie liczba głosów występuje w postaci ułamkowej. Za pomocą wykresu pudełkowego przedstawiono wartości na rysunku 8.9.

| Parametry statystyczne | Poziom oceny | | | | | |
|-----------------------------|--------------|------|-----|-----|-----|----|
| | L0 | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 |
| Q3+1.5IQR | 8 | 6 | 9 | 5 | 0 | 0 |
| Q3 | 2 | 0 | 3 | 2 | 0 | 0 |
| <i>Mediana</i> | 0 | -2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Q1 | -2 | -4 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| Q1-1.5IQR | -8 | -10 | -3 | -3 | 0 | 0 |
| <i>Średnia arytmetyczna</i> | 0,1 | -2,0 | 0,9 | 0,9 | 0,2 | 0 |

Na podstawie analizy błędów predykcji dla poszczególnych poziomów komfortu można wysnuć kilka wniosków. Prognozowane oceny dla poziomu drugiego L2 są zawyżone średnio o 2 głosy, co jest widoczne dość wyraźnie na rysunku porównawczym nr 8.8. Dla poziomów ocen od L3 do L5 model regresji zaniża oceny średnio o 1 głos.

Na podstawie powyższej analizy można wnioskować o przydatności modelu regresji logistycznej dla zastosowań oceny obiektywnej komfortu jazdy.

Model statystyczny pozwala na prognozowanie komfortu jazdy za pomocą histogramu odpowiedzi. Na podstawie histogramu można obliczyć procent pasażerów głosujących na trzeci poziom dyskomfortu lub wyższy. Będzie to odsetek pasażerów, którzy nie chcieliby podróżować na tych poziomach.

Zmienną opisującą były oceny pasażerów, które zostały przedstawione w postaci histogramów w funkcji czasu. Zmiennymi opisującymi były wskaźniki obliczone na podstawie m. in. wyników transformacji falkowej sygnałów przyspieszeń rejestrowanych równoległe z oceną subiektywną pasażerów. Do znalezienia wzajemnych relacji pomiędzy zmiennymi zastosowano regresję logistyczną porządkową. Zastosowanie regresji logistycznej jest dobrym narzędziem do zbudowania modelu statycznego wiążącego subiektywnych odpowiedzi pasażerów i obiektywnych wartości wskaźników sygnałów przyspieszeń.

9. WNIOSKI

A podstawie przeprowadzonych badań i analiz można wysnuć następujące wnioski:

1. Autor przeprowadził badania, w czasie których czternastoosobowa grupa pasażerów w sposób ciągły oceniała poziom dyskomfortu. Na podstawie zarejestrowanych ocen subiektywnych oraz wynikach analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów przyspieszeń zaobserwowano reakcje pasażerów na każde odpowiednio silne chwilowe zaburzenie komfortu jazdy. Wykorzystując transformację falkową uzyskano parametry drgań opisujące chwilowe zaburzenia komfortu jazdy. Stosując regresję logistyczną zbudowano model komfortu jazdy opisujący w sposób ciągły poziom komfortu jazdy. Wyniki predykcji modelu potwierdzają **tezę pracy** o możliwości wykorzystania parametrów chwilowych zaburzeń komfortu jazdy do oceny ogólnego komfortu jazdy dla krótkich odcinków przejazdu w tramwajowej sieci komunikacyjnej. Obecnie stosowane wskaźniki będące wartością średnią ze względu na konstrukcję metod obliczeniowych mogą zaniedbywać kluczowe chwilowe zaburzenia komfortu jazdy rzutujące na ocenę krótkiego odcinka jazdy. Zrealizowana metoda ciągłej oceny komfortu jazdy wypełnia **cel główny** niniejszej rozprawy.
2. Autor przed przystąpieniem do badań właściwych przeprowadził eksperyment gdzie grupa 14 pasażerów miała za zadanie oceniać komfort jazdy osobno dla każdego kierunku drgań w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. Okazało się, że proces oceny, decyzji i reakcji dla każdej osi drgań oddzielnie był zbyt czasochłonny w stosunku do prędkości pojawiania się nowych bodźców drganiowych. Proces oceny komfortu jazdy był możliwy w warunkach badania tylko dla drgań ogólnych, jako suma drgań kierunkowych. Na tej podstawie autor wnioskuje o odbiorze komfortu jazdy przez pasażerów, jako całości, bez podziału na rodzaj i kierunek drgań, które ten (dys-)komfort powodują. Według autora jest to potwierdzeniem modelu jakości jazdy opisanego w rozdziale 2.1 gdzie na jakość jazdy ma wpływ bardzo wiele czynników działających jednocześnie.

Analiza ankiet wykazała obniżenie poziomu samopoczucia średnio o jeden poziom na skali pięciopozomowej. Według pasażerów najbardziej uciążliwymi odcinkami przejazdu były odcinki gdzie pojawiały się drania poprzeczne oraz hamowanie lub przyspieszanie. Według odpowiedzi zawartych w ankiecie pasażerowie w przyszłości nie chcieliby doświadczać drgań na poziomach 4 i 5 a ⅓ z nich również na poziomie 3. Na podstawie zarejestrowanych ocen i odpowiedzi pasażerów można w dość łatwy sposób zlokalizować fragmenty torowiska gdzie występowały wyjątkowo dyskomfortowe drgania, co przedstawiono w załączniku G.

3. Zastosowanie ciągłej transformacji falkowej CWT do analizy sygnałów przyspieszeń pozwala na jednoczesne pozyskiwanie wartości amplitudy i częstotliwości oraz położenia ww. parametrów na osi czasu w stosunkowo krótkim czasie obliczeniowym. Przeprowadzone analizy sygnałów syntetycznych wskazują na kilkuprocentowe błędy rozpoznania wartości amplitudy i częstotliwości w zakresie częstotliwości wymaganej (0,5 - 80 Hz) do oceny komfortu jazdy przez standardy ISO 2631-1, BS 6841 i PN-EN 12299. Transformata Fouriera dla sygnałów niestacjonarnych pozwala jedynie na oszacowanie wartości

częstotliwości, z tym, że może ona nie zostać wykryta w widmie ze względu na zdecydowanie zaniżoną wartość amplitudy, która to sytuacja jest normą dla sygnałów niestacjonarnych.

4. Na podstawie uzyskanych z CWT wartości amplitud, częstotliwości i położenia na osi czasu chwilowych zaburzeń komfortu jazdy oraz subiektywnych ocen pasażerów został zbudowany model prognostyczny komfortu jazdy w tramwajach, przez co osiągnięto **cel użytkowy rozprawy**. Model pozwala na obiektywną ocenę komfortu jazdy na podstawie sygnałów przyspieszeń z opóźnieniem wynikającym tylko z czasu obliczeń, co daje możliwość oceny komfortu jazdy niemalże w czasie rzeczywistym. Wynikiem obliczeń poziomu komfortu jazdy jest histogram ocen dla 6 poziomów o odpowiednich liczebnościach poszczególnych poziomów. Na podstawie histogramu można uzyskać informacje o procentowym udziale pasażerów, którzy zakwalifikowali chwilowe zaburzenia komfortu do poziomu 3, 4 i 5 tzn. poziomów, dla których nie chcieliby doświadczać drgań podczas jazdy tramwajem. Procentowy udział niezadowolonych pasażerów pozwala również na diagnozowanie stanu torowiska czy też prędkości poruszania się tramwaju. Dzięki opracowanemu modelowi komfortu jazdy można uwolnić się od ważenia przyspieszeń drgań wg. wybranej pojedynczej krzywej ważenia, co jak zostało wspomniane w rozdziale 2.4.1 jest rozwiązaniem dyskusyjnym. Dynamiczne zachowanie tramwaju, środowisko pracy oraz charakterystyczny hałas ograniczają zastosowanie modelu w innych środkach transportu.

Do budowy modelu komfortu jazdy zastosowano jeden z uogólnionych modeli liniowych GLM tj. regresję logistyczną porządkową. Model ten pozwolił na powiązanie subiektywnych ocen pasażerów umieszczonych na skali porządkowej z wartościami dziesięciu zmiennych ilościowych pozyskanymi z analizy falkowej i czasowej. W skład równań pierwszego stopnia wchodziły również interakcje dwuczynnikowe. W sumie zestaw danych obejmował 66 zmiennych. Spośród tych zmiennych tylko 31 zmiennych okazało się istotnych statystycznie dla wszystkich 6 poziomów komfortu jazdy. Zmienne te w różnej liczebności pojawiały się na różnych poziomach oceny. Najwięcej zmiennych było aktywnych na poziomie 1 i 2 bo po 21, natomiast dla poziomów 3, 4 i 5 odpowiednio 15, 11 i 7. Wnioskować można, że na różnych poziomach drgań różne wielkości fizyczne miały wpływ na ocenę komfortu jazdy. Największą aktywność dla wszystkich poziomów ocen wykazują amplitudy przyspieszeń drgań a_x i a_y oraz ich częstotliwości szczególnie częstotliwość drgań pionowych f_z . Dodatkowo dla poziomów 1 i 2 w dużej mierze uaktywniają się zmienne związane z przyspieszeniem podłużnym i jego pochodnymi w interakcjach dwuczynnikowych.

Model wykazują poprawną dynamikę sygnału. Położenia w czasie maksimum ocen oryginalnych odpowiadają maksimum ocen prognozowanych. Błędy predykcji *ex post* modelu regresji dla pojedynczych próbek czasu sięgają 60-ciu % dla wybranych poziomów oceny. Tak wysokie błędy nie pozwalają na rzetelną obiektywną ocenę chwilowych zaburzeń komfortu jazdy. Liczebność ocen poszczególnych poziomów jest zaniżona lub zawyżona średnio o 1 lub 2 głosy. Powyższe wyniki analiz wypełniają w dużej mierze **cel naukowy** rozprawy.

5. Na podstawie analizy czynnikowej PCA zaobserwowano dość silne korelacje pomiędzy amplitudą drgań poprzecznych a_x i pionowych a_y oraz pomiędzy częstotliwościami tychże kierunków drgań. Zdaniem autora korelacja wynika z konstrukcji zawieszenia pierwszego wózka badanego tramwaju. Bardzo silne

korelacje pojawiają się pomiędzy amplitudą drgań podłużnych a_z a wskaźnikami obliczonymi na podstawie tegoż sygnału. Dzięki analizie można wyodrębnić cztery grupy zmiennych, gdzie pierwsza to amplituda przyspieszenia podłużnego i jej pochodne, następna to zryw drgań podłużnych, następna częstotliwość drgań pionowych i poprzecznych oraz amplitudy tychże kierunków drgań. Analiza PCA opiera się na współczynniku korelacji Pearsona, przez co wyniki analiz zależności nieliniowych mogą być obarczone błędami. W przypadku niniejszych badań można spodziewać się nieliniowych zależności chociażby ze względu na nieliniową charakterystykę wrażliwości człowieka na częstotliwość drgań.

6. Sygnały drgań poprzecznych a_y i pionowych a_z są sygnałami niestacjonarnymi ze względu na brak stałej w czasie wariancji i struktury widmowej. Na podstawie analizy wizualnej zauważalna jest korelacja tychże sygnałów przyspieszeń, co do amplitudy i częstotliwości. W widmie częstotliwości sygnałów przyspieszeń a_y i a_z pojawiają się częstotliwości od ok. 0.5 Hz do 4 Hz oraz od 12 Hz wzwyż o amplitudach do 2 m/s^2 dla standardowego przejazdu tramwaju. Pasma częstotliwości od 4 do 12 Hz zdaniem autora zostało wyeliminowane dzięki odpowiednim parametrom i konstrukcji zawieszenia badanego tramwaju. Producent zabezpieczył pasażerów przed najbardziej niekomfortowymi częstotliwościami drgań. Według odpowiedzi pasażerów zawartych w ankiecie drgania poprzeczne są najbardziej dyskomfortowe.
7. Analiza sygnału przyspieszenia podłużnego a_z ujawniła obecność częstotliwości o dominujących amplitudach poniżej 0,5 Hz, co wynika z charakteru ruchu postępowego tramwaju. Zastosowanie transformacji falkowej dla tak niskich częstotliwości zwiększa czasochłonność obliczeń, ale przede wszystkim jest poniżej przedziału objętego oceną komfortu wg standardów. Sygnał przyspieszenia podłużnego a_z jest sygnałem niestacjonarnym ze względu na zmienną w czasie średnią wartość. Według pasażerów drgania podłużne czy to podczas hamowania czy też przyspieszenia są drugim z dwóch najbardziej dyskomfortowych czynników.
8. Pomiedzy wystąpieniem bodźca fizycznego (CZKJ) a naciśnięciem przycisku na osobistym urządzeniu oceny występuje zwłoka czasowa wynikająca z charakterystyki procesu decyzyjnego człowieka. Zwłoka ta związana jest z energią przekazywaną na ciało człowieka w czasie ekspozycji na drgania ogólne. Dla przeciętnych wartości r.m.s. sumy drgań a_y i a_z zarejestrowanych podczas badań rzędu $0,8 \text{ m/s}^2$ zwłoka czasowa wynosi ok. 0,6 s. Dla coraz wyższych wartości r.m.s. wartość zwłoki czasowej rośnie silnie regresywnie. Według autora istnieje granica wartości r.m.s. drgań, powyżej której czas zwłoki będzie utrzymywał się na stałym poziomie bez względu na zwiększającą się energię drgań.
9. W przypadku przejazdu tramwaju przez niewydzielone torowiska w sygnale pojawiają się drgania o wyższych częstotliwościach a w przypadku złego stanu torowiska nieczęsto o wyższej amplitudzie. Spowodowane jest to wzrostem sztywności torowiska w obszarze wspólnej komunikacji tramwajowej i samochodowej. Pasażerowie oceniali odcinki o wysokich amplitudach (2 m/s^2) w zakresie wyższych częstotliwości (40 – 70 Hz) łagodniej niż w zakresie niższych częstotliwości, co potwierdza zmniejszoną wrażliwość człowieka drgania wysokich częstotliwości.
10. W czasie eksperymentu pasażerowie nie mogli prowadzić rozmów między sobą. Mieli za zadanie zachować względne skupienie na ocenie komfortu jazdy. Na ostatnim odcinku pomiarowym zasada ta nie obowiązywała. Pasażerowie mogli

między sobą rozmawiać z tym, że zadanie oceny komfortu pozostało. W sytuacji takiej pasażerowie wykazywali dużą obojętność dla drgań o małych amplitudach oraz dokonywali oceny dużo rzadziej a jeśli już jej dokonywali to na wyższych poziomach dyskomfortu. Zdaniem autora może to wynikać z pojawienia się rozluźnienia po godzinnej podróży tramwajem w stosunkowo dużym skupieniu lub zaistnieniu sytuacji gdzie część uwagi pasażerów została zaangażowana w komunikację międzypersonalną. Pasażerowie przestali skupiać się na ocenie drgań a zaczęli angażować swoją uwagę w rozmowę z sąsiadami. Wg autora ww. przyczyny nałożyły się na siebie, choć autor skłania się bardziej ku drugiemu wyjaśnieniu. Znane jest to zjawisko chyba każdemu, gdzie czas podróży wydaje nam się mijać zdecydowanie szybciej wśród dobrych znajomych niż w podróży samodzielnej. Wg autora istnieje pewna granica percepcji człowieka podczas zaangażowania umysłu w jakąś czynność czy to fizyczną czy umysłową, którą aby pokonać należy wystosować odpowiednio wysoki poziom bodźca. W przypadku badań komfortu było to odpowiednio silne drgania fotela pasażera.

10. PLAN DALSZYCH PRAC

Na bazie rozważań teoretycznych i otrzymanych wyników analizy sygnałów oraz regresji logistycznej, można wyróżnić potencjalne kierunki dalszych badań:

1. Badania zostały przeprowadzone na grupie osób, dla której mediana wieku wyniosła 29,5 roku. Należałoby przeprowadzić badania dla grupy wiekowej o zdecydowanie wyższej średniej wieku. Badania [4] [79] wskazują wpływ wieku pasażera na wrażliwość wibracyjną. Dla starszej grupy wiekowej należy spodziewać się zmniejszenia wrażliwości na drgania wyższych częstotliwości.
2. W czasie badań nie rejestrowano poziomu hałasu. Jak wykazują badania [4] [7] oraz zwracają uwagę standardy [10] [12] ma on znaczny wpływ na ocenę komfortu jazdy. Dla zweryfikowania poziomu wpływu hałasu na poziom ocen należy przeprowadzić kolejne badania gdzie oprócz ocen subiektywnych oraz przyspieszeń drgań będzie rejestrowany poziom hałasu. Można spodziewać się znacznego udziału hałasu w ocenie komfortu jazdy ze względu na miejski charakter środowiska zewnętrznego. Na podstawie przeprowadzonych badań [80] wiadomo, że w obszarach miejskich szczególnie wzdłuż sieci dróg i w odległości kilkudziesięciu metrów od nich panuje zdecydowanie wyższy poziom hałasu.
3. Autor zastosował stałe wartości okien czasowych (1 s wstecz dla sygnałów przyspieszeń i 2 s do przodu dla ocen subiektywnych) dla gromadzenia danych podlegających następnie analizie regresji logistycznej. Istnieje możliwość podjęcia poszukiwania optymalnych, zmiennych w czasie długości okien dających optymalny zbiór danych do dalszej analizy. Między innymi wynikiem takiej analizy mogłoby być określenie bardziej precyzyjne zależności czasu zwłoki oceny od charakteru drgań.
4. Przyspieszenia podłużne były drugim, co do uciążliwości czynnikiem według głosowania pasażerów. Niestety w modelu logistycznym zmienna przyspieszenia podłużnego jak i zryw tegoż przyspieszenia nie znalazły się wśród zmiennych głównych. W przyszłości należałoby podjąć badania w czasie, których oceniane by były tylko przyspieszenia podłużne na odcinkach toru pozbawionych nieregularności w kierunku poprzecznym i pionowym. Model komfortu tylko dla przyspieszeń podłużnych mógłby funkcjonować samodzielnie dla weryfikacji i poprawy charakterystyki hamowania motorniczych.
5. Do analizy czasowo częstotliwościowej autor zastosował falkę Morleta, jako najbardziej popularną. Należałoby przeprowadzić poszukiwania optymalnej falki dla analizy sygnałów charakterystycznych dla tramwajowej komunikacji miejskiej. Można też podjąć próbę zbudowania własnej falki np. dla identyfikacji często pojawiających się artefaktów (CZKJ) w sygnałach.
6. Analizę sygnałów można przeprowadzić wykorzystując inne narzędzia analizy sygnału np. transformacje *chirplet*. Funkcje falek tej transformaty mają większe możliwości dopasowywania się do badanych sygnałów.
7. Model logistyczny opracowany przez autora wykazuje nieścisłości w zakresie właściwej liczebności ocen poszczególnych poziomów odpowiedzi. Model ten jest

modelem parametrycznym klasyfikacyjnym. Istnieje możliwość zastosowania modeli nieparametrycznych klasyfikacyjnych takich jak sieci neuronowe czy algorytmy genetyczne lub modele addytywne (GAM). Główną zaletą tych metod to mniejsza wrażliwość na obserwacje odstające, co w przypadku subiektywnych ocen pasażerów może być cenną własnością.

8. W momencie opracowania modelu o wystarczająco dobrych parametrach predykcji istnieje możliwość zbudowania urządzenia elektronicznego z zaimplementowanym modelem. Urządzenie to z odpowiednią instalacją pomiarową (1 trójosiowy czujnik przyspieszenia) mogłoby być przenośnym narzędziem oceny poziomu komfortu dla dowolnych fragmentów torowiska, narzędziem oceny stanu technicznego tramwaju oraz narzędziem oceny charakteru jazdy motorniczego. Szybkość obliczeń pozwala na natychmiastowe oceny dla ww. przedmiotów analizy. Na podstawie wyników obliczeń urządzenia oraz pozycji położenia tramwaju pozyskiwanej z sygnału GPS można zbudować profil prędkości jazdy komfortowej dla całej sieci tramwajowej dla wybranego procentowego poziomu osób niezadowolonych. Profil prędkości jazdy komfortowej można wykorzystać do zautomatyzowanego poruszania się tramwaju bez aranżowania osobymotorniczego w proces ustalania prędkości jazdy.

LITERATURA

- [1] Z. Engel, *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Warszawa: PWN, 1993.
- [2] W. Kopaliński, *Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych*. Warszawa: Muza, 2000.
- [3] *Słownik Języka Polskiego*. Warszawa: PWN, 2007.
- [4] M. J. Griffin, *Handbook of human vibration*. Londyn: Elsevier Academic Press, 2004.
- [5] M. A. Książek, *Modelowanie i optymalizacja układu człowiek - wibroizolator - maszyna*. Kraków: Politechnika Krakowska, 1999.
- [6] J. Forstberg, *Ride comfort and motion sickness in tilting trains. Human responses to motion environments in train experiment and simulator experiments*. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2000.
- [7] N. J. Mansfield, *Literature review on low frequency vibration comfort*. U.K.: Loughborough University, 2006.
- [8] M. Ofierzyński, "Czynniki wpływające na komfort wibracyjny w pojazdach szynowych - co i w jakim stopniu wpływa na jego jakość?," in *XVIII Konferencja Naukowa POJAZDY SZYNOWE*, Katowice-Ustroń, 2008, pp. 369-387.
- [9] P. Sipic, "Komfort jazdy w pasażerskim transporcie szynowym," *Technika Transportu Szynowego*, no. 7-8, 2007.
- [10] PN-EN 12299:2009, *Kolejnictwo - Komfort jazdy pasażerów - Pomiar i ocena*.: Polski Komitet Normalizacyjny.
- [11] UIC 513R, *Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in Relation to Vibration in Railway Vehicles*.: International Union of Railways, 1994.
- [12] ISO 2631-1:1997, *Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 1: General requirements*.: International Organization for Standardization.
- [13] BS 6841:1987, *Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock*.: British Standards Institution.
- [14] S. Król and J. Szczygieł, "Sposoby podejścia do problematyki pasażerskiego komfortu jazdy w pojazdach szynowych," *Transport Miejski i Regionalny*, no. 9, pp. 6-10, Wrzesień 2008.
- [15] J. H. Czajka, *Pomiary drgań i hałasu na stanowisku pracy w transporcie*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000.
- [16] J. H. Czajka, *Ergonomia Materiały do ćwiczeń*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
- [17] M. Nader, "Badanie oddziaływań dynamicznych w systemie człowiek - techniczne środki transportu," in *Biomechanika i Inżynieria Rehabilitacyjna*. Warszawa: EXIT, 2003, vol. 5, ch. 16.
- [18] (2012, listopad) Wikipedia. [Online].
http://en.wikipedia.org/wiki/Stevens%27_power_law

- [19] M. J. Griffin and K. D. Ahn, "Effect of frequency, magnitude, damping, and direction on the discomfort of vertical whole-body mechanical shock," *Journal Sound and Vibration*, 2007.
- [20] M. A. Bellmann, *Perception of whole-body vibration: From basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibration on the passenger's comfort inside vehicle*. Oldenburg: Universitat Oldenburg, 2002, Rozprawa doktorska.
- [21] M. J. Griffin, "Discomfort from feeling vehicle vibration," *Vehicle System Dynamics*, vol. 45, no. 7-8, 2007.
- [22] *ISO 2631-4 Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotational motion on passenger and crew comfort in fixed-guideway transport systems*.
- [23] M. J. Griffin, E. M. Whitman, and K. C. Parsons, "Vibration and comfort. I. Translational seat vibration.," *Ergonomics*, no. 25(7), 1982.
- [24] C. Corbridge and M. J. Griffin, "Vibration and comfort: vertical and lateral motion in the range 0.5 to 5.0 Hz.," *Ergonomics*, no. 29(2), 1986.
- [25] S. Schwanitz, M. Wittkowski, V. Rolny, and M. Basner, "Pressure variations on a train – Where is the threshold to railway passenger discomfort?," *Applied Ergonomics*, no. 44, pp. 200-209, 2013.
- [26] M. Morioka and M. J. Griffin, "Frequency weightings for fore-and-aft vibration at the back: effect of contact location, contact area, and body posture," *Industrial Health*, no. 48, pp. 538-549, 2010.
- [27] M. Kolich, "A conceptual framework proposed to formalize the scientific investigation of automobile seat comfort," *Applied Ergonomics*, no. 39, pp. 15-27, 2008.
- [28] C. A. Lewis and P. W. Johnson, "Whole-body vibration exposure in metropolitan bus drivers," *Occupational Medicine*, no. 62, pp. 519-524, July 2012.
- [29] W. El Falou et al., "Evaluation on driver discomfort during longduration driving," *Applied Ergonomics*, no. 34, pp. 249-255, 2003.
- [30] N. Gkikas, *Automotive Ergonomics Driver-Vehicle Interaction*.: CRC Press, 2012.
- [31] K. Ebea and M. J. Griffin, "Quantitative prediction of overall seat discomfort," *Ergonomics*, no. 43, pp. 791-806, 2000.
- [32] K. Ebe and M.J. Griffin, "Qualitative models of seat discomfort including static and dynamic factors," *Ergonomics*, no. 43, pp. 771-790, 2000.
- [33] K. Ebe and M.J. Griffin, "Factors affecting static seat cushion comfort," *Ergonomics*, no. 44, pp. 901-921, 2001.
- [34] N. J. Mansfield, S. J. MacMull, G. Singla, and A. N. Rimell, "Relative influence of sitting duration and vibration magnitude on sitting discomfort in car seat," in *42nd United Kingdom Conference on Human Response to Vibration*, Southampton, England, 2007.
- [35] H. Suzuki, "Momentary discomfort caused by vibration of railway vehicle," *Industrial Health*, no. 36, pp. 98-106, 1998.
- [36] H. Suzuki, H. Shiroto, A. Tanaka, K. Tezuka, and Takai, "Psychophysical evaluation of railway vibration discomfort," *Railway Technical Research Institute*, Vol. 41, No.3, 2000.

- [37] W. Groll, "Metodyka badań komfortu jazdy w łukach i krzywych przejściowych," in *Wybrane Problemy Transportu Szynowego w 150-lecie Kolei Polskich*, Kraków, Zakopane, 1997.
- [38] G. Lauriks, J. Evans, J. Fortsberg, M. Balli, and I. Barron de Angoiti, "UIC comfort test. Investigation of ride comfort and comfort disturbance on transition and circular curves," Swedish National Road and Transport Research Institute, VTI, VTI notat 56A-2003 2003.
- [39] J. Wicher and D. Więckowski, "Bezpieczeństwo i komfort dzieci przewożonych w fotelikach samochodowych," *Zeszyty Naukowe Instytutu Ppyjazdów*, no. 1, pp. 77-93, 2010.
- [40] C. Kaneko, T. Hagiwara, and S. Maeda, "Evaluation of whole-body vibration by the category judgment method," *Industrial Health*, no. 43, pp. 221-232, 2005.
- [41] S. Maeda, "Necessary research for standardization of subjective scaling of whole-body vibration," *Industrial Health*, no. 43, pp. 390-401, 2005.
- [42] S. Maeda and N. Shibata, "Subjective Scaling of Hand-Arm Vibration," *Industrial Health*, no. 46, pp. 118-124, 2008.
- [43] N. J. Mansfield, P. Holmlund, and R. Lundstrog, "Comparison of subjective responses to vibration and shock with standard analysis methods and absorbed power," *Journal of Sound and Vibration*, no. 230, pp. 477-491, 2000.
- [44] Y. Marjaneen, *Validation and improvement of the ISO 2631-1 (1997) standard method for evaluating discomfort from whole-body vibration in a multi-axis environment.*: Loughborough University, 2010.
- [45] Y. Marjaneen and N.J. Mansfield, "Relative Contribution of Translational and Rotational Vibration to Discomfort," *Industrial Health*, no. 48, pp. 519-529, 2010.
- [46] T. P. Zieliński, *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań.* Warszawa: WKŁ, 2007.
- [47] J. T. Białasiewicz, *Falki i aproksymacje.* Warszawa: WNT, 2004.
- [48] W. Grzegózek, J. Szczygieł, and S. Król, "An attempt of an employment of a continuous wavelet transformation for evaluation of temporary comfort disturbances," *Journal of KONES Powertrain and transport*, vol. 16, no. 2, pp. 157-165, 2009.
- [49] W. Grzegózek and J. Szczygieł, "An attempt of the application of matching pursuit MP with gabor dictionary for evaluation of ride comfort disturbance level," *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 16, no. 2, pp. 149-158, 2009.
- [50] P. Wojtaszczyk, *Teoria falek.* Warszawa: PWN, 2000.
- [51] J. W. Henel and Z. Olejniczak, *Jak zrozumieć falki. Podstawy falkowej analizy sygnałów.* Kraków: Zakom, 2010.
- [52] M. Zając, *Metody falkowe w monitoringu i diagnostyce układów elektromechanicznych.* Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2009.
- [53] P. Augustyniak, *Transformacja falkowa w zastosowaniach elektrodiagnostycznych.* Kraków: Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2003.
- [54] W. Batko and A. Mikulski, "Zastosowanie metod falkowych w systemach monitoringu wibroakustycznego łożyskowania urządzenia wyciągowego,"

- Diagnostyka*, vol. 26, 2002.
- [55] H. Zheng, Z. Li, and X. Chen, "Gear fault diagnosis based on continuous wavelet transform," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 16, pp. 447–457, 2002.
- [56] A. Wilk, H. Madej, and Łazarz B., "Metody wczesnego wykrywania uszkodzeń w przekładniach zębatych," *Przegląd Mechaniczny*, no. 3, 2002.
- [57] Z. K. Zhu, R. Yan, L. Luo, Z. H. Feng, and F. R. Kong, "Detection of signal transients based on wavelet and statistics for machine fault diagnosis," *Mechanical System and Signal Processing*, vol. 23, pp. 1076–1097, 2009.
- [58] L. Majkut, "Vibration based damage detection using laplace wavelet," *Diagnostyka*, vol. 1, 2009.
- [59] R. Zimroz, "Zastosowanie analizy falkowej w dignostyce uszkodzeń lokalnych układów napędowych maszyn górniczych," *Diagnostyka*, vol. 1, 2009.
- [60] M. Flekiewicz, P. Fabiś, and H. Madej, "The identification of piston-cylinder clearance using time-frequency method," in *Journal of KONES Powertrain and Transort*, vol. 16, 2009.
- [61] S. K. Lee and P. R. White, "Application of wavelet analysis to the impact harshness of a vehicle," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2000, pp. 1331-1338.
- [62] K. Wawrzyniak, *Analiza akustycznych obrazów falowych w aspekcie zwiększenia informacji o parametrach srężystych i zbiornikowych skał*. Kraków: AGH, 2007, Rozprawa doktorska.
- [63] P. Ruchała, *Identyfikacja parametrów zredukowanego modelu fundamentu pod turbozespół przy zastosowaniu funkcji falkowych*. Kraków: Politechnika Krakowska, 2007, Rozprawa doktorska.
- [64] R. Barański, *Falkowa funkcja przejścia w analizie drgań układu „narzędzie ręczne – ręka operatora*, Rozprawa doktorska ed. Kraków: AGH, 2007.
- [65] A. Rzeszółtko, *Analiza czasowo-częstotliwościowa nieregularnych zmian parametrów orjętacji przestrzennej Ziemi*. Warszawa: Politechnika Warszawska, 2009, Rozprawa doktorska.
- [66] S. Król and J. Szczygieł, "Badania poziomu komfortu wibracyjnego w wybranych tramwajach," *Problemy Eksploatacji*, no. 2, pp. 99-108, 2009.
- [67] (2009, Styczeń) YAWTb. [Online].
<http://sites.uclouvain.be/ispgroup/yawtb/pmwiki.php/Main/Presentation>
- [68] (2009, Styczeń) Mathworks. [Online].
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14498-local-maxima-minima>
- [69] P. V. Krishna Kant, *Evaluation of ride and activity comfort for the passengers while travelling by rail vehicles*. Roorkee: Indian Institute of Technology, 2007.
- [70] (2012, listopad) MPK SAw Krakowie. [Online].
<http://www.mpk.krakow.pl/pl/tramwaje/tabor/wagon-ngt-6/>
- [71] J. Quehl, *Comfort studies on aircraft interior sound and vibration*. Oldenburg: Carl von Ossietzky Universitat, 2001, Rozprawa doktorska.
- [72] (2012, Luty) Wikipewdia. [Online].
http://pl.wikipedia.org/wiki/Regresja_logistyczna

- [73] D. W. Hosmer and S. Lemeshow, *Applied logistic regression*, 2nd ed.: John Wiley&Sns, Inc, 2000.
- [74] Statsoft. (2013, sierpień) www.statsoft.pl. [Online].
http://www.statsoft.pl/textbook/glosfra_stat.html?http%3A%2F%2Fwww.statsoft.pl%2Ftextbook%2Fglosu.html
- [75] A Stanis, *Przystępny kurs statystyki*. Kraków: StatSoft, 2007, vol. 2.
- [76] A. Agresti, *Categorical data analysis*, 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.
- [77] J. M. Hilbe, *Logistic regression models.*: CRC Press, 2009.
- [78] J. Pietraszek, W. Grzegózek, and J. Szczygieł, "Forecasting of subjective comfort in tram using ordinal logistic regression and manifold learning," *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 2, no. 19, 2012.
- [79] R. T. Verrillo, "Age Related Changes in the Sensitivity to Vibration," *Journal of Gerontology*, vol. 35, no. 2, pp. 185-193, Marzec 1980.
- [80] Urząd Marszałkowski Województwa Małopolskiego. (2013, Październik) Małopolska Infrastruktura Informacji Przestrzennej. [Online].
<http://miip.geomalopolska.pl/imap/?locale=pl&gui=new&sessionID=21102>
- [81] (2013, Październik) Wikipedia. [Online].
http://pl.wikipedia.org/wiki/Wykres_pude%C5%82kowy
- [82] Y Marjanen, "Using ISO 2631-5 as an additional whole body vibration evaluation method with ISO 2631-1 to include also transient shocks to the analysis," in *Twelfth International Congress on Sound and Vibration*, Lizbona, 2005.
- [83] N Alem, "Application of the new ISO 2631-5 to health hazard assesment of repeated shock in U.S. Army vehicle," *Industrial Health*, no. 43, pp. 403-412, 2005.
- [84] "Badania poziomu komfortu wibracyjnego w wybranych tramwajach," *Problemy Eksploatacji*, no. 2, pp. 99-108, 2009.
- [85] J Giacomini and T M Hacaambwa. (2012, listopad) Perception Enhancement Reaserch. [Online]. <http://www.perceptionenhancement.com/index.html>
- [86] A Chudzikiewicz and W Groll, "Metody oceny komfortu jazdy w lukach i krzywych przejściowych," in *Nowe wyzwania i technologie dla logistyki: XV Konferencja Naukowo-Techniczna*, Szklarska Poręba, 2002.
- [87] Z. Hasiewicz and P. Śliwiński, *Falki ortogonalne o zwartym nośniku. Zastosowanie do nieparametrycznej identyfikacji systemów*. Warszawa: ELIT, 2005.
- [88] S. Król and J. Szczygieł, "Dyskomfort wibracyjny w tramwajach - analiza możliwości zastosowania formuł PCT i PDE," *Technika Transportu Szybowego*, no. 11, pp. 39-43, 2008.
- [89] T. Lack, J. Gerlici, and V. Hlavna, "The vehicle comfort case study," *Eksploatacja i N niezawodność*, no. 4, pp. 89-91, 2006.
- [90] S. Maeda, N. J. Mansfield, and N. Shibata, "Evaluation of subjective responses to whole-body vibration exposure: Effect of frequency content," *International Journal of Industrial Ergonomics*, no. 38, pp. 509-515, 2008.
- [91] Y. Marjanen, N. Mansfield, and S. Maeda, "Requiremens for validating the standardized whole body vibration comfort evaluation method," in *Japan Conference on Human Responses to Vibration*, Japan, 2006.

SPIS RYSUNKÓW

| | |
|---|----|
| Rys. 2.1 Czynniki środowiska zewnętrznego i indywidualne cechy człowieka mające wpływ na ocenę jakości jazdy [4]. | 8 |
| Rys. 2.2 Interakcje subiektywnej oceny jakości jazdy oraz obiektywnej oceny komfortu jazdy. Ocena pasażera (jakość jazdy) jest wynikiem indywidualnych cech człowieka, czynników zewnętrznych jak i dynamiki ruchu pojazdu, i innych zmiennych fizycznych, natomiast (dys-)komfort jazdy zależy tylko od wielkości dynamicznych ruchu pojazdu. | 9 |
| Rys. 2.3 Obliczona wartość wykładnika β wg prawa Stevensa na podstawie eksperymentu dla drgań ogólnych w przedziale wartości r.m.s. 0,04 – 0,4 m/s ² [4]. | 13 |
| Rys. 2.4 Porównanie krzywej ważenia W_b [13] z krzywymi uzyskanymi w badaniach dla drgań pionowych o charakterze impulsowym dla różnych wartości amplitudy i współczynników tłumienia ($VDV = 2,89; 1,0; 0,35 \text{ ms}^{-1,75}$) [19]. | 15 |
| Rys. 2.5 Krzywe równego komfortu. Linia ciągła to odwrotna krzywa ważenia częstotliwościowego W_b dla drgań pionowych i pozycji siedzącej wg norm ISO 2631:97 [12] i BS 6841:87 [13]. Linia ciągła kropkowana pochodzi z badań subiektywnych dla drgań pionowych i pozycji siedzącej w zakresie od 0,5 do 100 Hz [21]. | 16 |
| Rys. 2.6 Krzywe równego komfortu w funkcji czasu ekspozycji na drgania [21]. Aby uzyskać ten sam poziom komfortu wraz ze wzrostem amplitudy drgań należy szesnastokrotnie zmniejszyć czas ekspozycji. | 17 |
| Rys. 2.7 Porównanie zależności czasowej a^4t (r.m.s.) oraz a^4t (r.m.q., VDV) [21] na tle poziomów dyskomfortu proponowanych przez normy ISO 2631-1 [12] i BS 6841 [13]. Widoczne jest lepsze dopasowanie krzywej w czwartej potęgzie dla subiektywnej oceny drgań człowieka. | 18 |
| Rys. 2.8 Model koncepcyjny ogólnego komfortu zaproponowany przez Ebe. Względny udział w ocenie drgań czynników statycznych i dynamicznych zmienia się w zależności od amplitudy drgań [32]. | 20 |
| Rys. 2.9 Modele koncepcyjne Ebe zmodyfikowane przez dodanie osi czasu z powodu czynników chwilowych mających wpływ na ogólną ocenę komfortu w pozycji siedzącej [30]. | 21 |
| Rys. 2.10 Struktura sygnału przyspieszenia wykorzystana w eksperymencie Suzuki. Odcinek 5s sygnału z trzema fragmentami odzwierciedlającymi wibracje w tle oraz pik przyspieszenia. Częstotliwość sygnału - 2 Hz. | 22 |
| Rys. 2.11 Wyniki badań Suzuki dla komunikacji kolejowej [36]. Widoczny nagły wzrost odsetek osób niezadowolonych z komfortu dla pozycji stojącej dla przyspieszenia poprzecznego o wartości powyżej 1 m/s ² . | 23 |
| Rys. 2.12 Zależność wartości przyspieszenia poprzecznego (na huku torowiska) i przyspieszenia pik do pik (przed krzywą przejściową torowiska) dla 5% osób oceniających komfort, jako niezadowolający. Dla utrzymania odpowiedniego poziomu komfortu należy zadbać o odpowiednie proporcje ww. przyspieszeń. Widoczna jest większa wrażliwość pozycji stojącej na przyspieszenie poprzeczne niż pik do pik [36]. | 24 |
| Rys. 3.1 Orientacja i położenie globalnego i lokalnych układów współrzędnych dla pozycji siedzącej. | 27 |
| Rys. 3.2 Krzywe ważenia częstotliwościowego zdefiniowane przez standardy ISO 2631-1:97 [12] i BS 6481:87 [13]. | 28 |
| Rys. 3.3 Skala dyskomfortu proponowana przez normę ISO 2631-1:97 [12] i BS 6841:87 [13]. | 31 |

| | |
|---|----|
| Rys. 3.4 Wartości przedziałów skal komfortu. Wyniki eksperymentu subiektywnej oceny sygnałów losowych o zadanej charakterystyce PSD [40]. Sygnał F o płaskiej charakterystyce widna, sygnał H o większych amplitudach dla częstotliwości bliskich 100 Hz i sygnał L o większych amplitudach dla częstotliwości bliskich 1 Hz..... | 35 |
| Rys. 3.5 Przebiegi wartości wskaźników $r.m.s.$, $eVDV$, VDV i $MTVV$ dla trzech rodzajów drgań: losowych, okresowych i mieszanego będącego połączeniem dwóch pierwszych [43]..... | 37 |
| Rys. 4.1 Ilustracja skalowania i przesunięcia falki matki..... | 40 |
| Rys. 4.2 Podstawowe szachownice dekompozycji czasowo-częstotliwościowej sygnałów. Krótkoczasowej Transformacji Fouriera STFT (a) oraz transformacji falkowa (b)..... | 41 |
| Rys. 4.3 Przebieg funkcji falkowej: a) Morlet, b) Db10..... | 42 |
| Rys. 6.1 Stanowisko pomiarowe. Czujnik przyspieszeń Crossbow® (1), przetwornik A/C AD8 (2) oraz komputer (3) z oprogramowaniem i zasobami pamięci..... | 45 |
| Rys. 6.2 Sygnały przyspieszenia rejestrowane na podłodze oraz ich wartości skuteczne $r.m.s.$ [66]..... | 46 |
| Rys. 6.3 Zależność między skalą a i częstotliwością środkową skalowanej falki Morleta f_* obliczoną dla sygnału próbkowanego z częstotliwością 150 Hz. Wraz ze zwiększaniem się nr skali (zmniejszaniem częstotliwości) wzrasta rozdzielczość częstotliwościowa w opozycji do rozdzielczości czasowej..... | 48 |
| Rys. 6.4 Wyniki transformaty falkowej: a) sygnał syntetyczny, b) skalogram współczynników ciągłej transformacji falkowej, reprezentacja czas-skala..... | 49 |
| Rys. 6.5 Skalogram 3D sygnału syntetycznego z wartościami amplitud dla znalezionych częstotliwości..... | 49 |
| Rys. 6.6 Znormalizowane wartości $r.m.s.$ w funkcji numeru skali..... | 51 |
| Rys. 6.7 Błędy względne identyfikacji wartości amplitudy w funkcji częstotliwości..... | 52 |
| Rys. 6.8 Błędy względne identyfikacji wartości amplitudy w funkcji amplitudy..... | 53 |
| Rys. 6.9 Transformata Fouriera FFT sygnału syntetycznego. Są widoczne wszystkie częstotliwości, które zostały zadane. Wartości przy strzałkach w Hz..... | 53 |
| Rys. 6.10 Sygnał przyspieszenia bocznego a_y (niebieski) zarejestrowany na wydzielonym odcinku torowiska pomiędzy przystankiem Dworcowa i Kabel (ul. Wielicka). Sygnał a_y filtrowany filtrem dolnoprzepustowym 2 Hz (czerwony). Odcinek B – przejazd przez podwójny łuk..... | 54 |
| Rys. 7.1 Lokalizacja cztemastu pasażerów wewnątrz tramwaju Bombardier NGT6 [70]..... | 61 |
| Rys. 7.2 Aparatura pomiarowa. 1 - Osobiste urządzenia oceny OUC, 2 - Czujniki przyspieszenia, 3 - Przetworniki A/C, 4 - Komputer z zasobami pamięci..... | 61 |
| Rys. 7.3 Osobiste urządzenie oceny OUC. Napięcie zasilania 5V..... | 62 |
| Rys. 7.4 Częstotliwość korzystania pasażerów z TKM; 1 - codziennie, 2 - kilka razy w tygodniu, 3 - okazjonalnie, 4 - nie korzystam z TKM, (Załącznik A, A1 - pyt.5)..... | 63 |
| Rys. 7.5 Samopoczucia pasażerów w skali pięciopoziomowej (-2 - bardzo złe; -1 - złe; 0 - ani złe, ani dobre; 1 - dobre; 2 - bardzo dobre) przed badaniem i po badaniu. Widoczna zmiana samopoczucia, (Załącznik A, A1 - pyt.6 i Załącznik B, A2 - pyt.4)..... | 64 |
| Rys. 7.6 Odpowiedzi pasażerów dotyczące najbardziej uciążliwych CZKJ. 1 - kiedy tramwaj poruszał się po łuku; 2 - kiedy tramwaj przyspieszał/hamował; 3 - kiedy odczuwał m/am drgania pionowe; 4 - kiedy odczuwał m/am drgania poprzeczne (boczne); 5 - kiedy odczuwał m kołysanie tramwaju; 6 - inne, (Załącznik B, A2 - pyt.1)..... | 65 |

| | |
|---|----|
| Rys. 7.7 Procentowa liczebność pasażerów w funkcji poziomu dyskomfortu, na którym pasażerowie nie chcieliby podróżować w TKM, (Załącznik B, A2 - pyt.3)..... | 65 |
| Rys. 7.8 Wyniki subiektywnych ocen pasażerów na tle trzech sygnałów przyspieszenia a_x , a_y i a_z , (sygnał: <i>11RondMogil_Wieczysta_WMPK_Odc3</i>). Kolor niebieski (0) odpowiada pełnemu komfortowi, kolor brązowy (5) maksymalnemu dyskomfortowi. | 66 |
| Rys. 7.9 Wynik transformacji falkowej CWT sygnału a_x , przedstawionego na rys. 7.8. Górny skalogram przedstawia wynik dla zakresu od 0,44 Hz (325 skala) do 71,25 Hz (2 skala). Dla poprawy analizy wizualnej wyższych częstotliwości (rzadka gradacja częstotliwości - patrz rys. 6.3) na dolnym wykresie przedstawiono skalogram dla przedziału od 5.7 Hz do 71,25 Hz. Widoczne maksima w przedziale od 25 do 30 s tak dla wysokich jak i niskich częstotliwości. | 67 |
| Rys. 7.10 Wynik transformacji falkowej CWT sygnału a_x , przedstawionego na rys. 7.8. Konfiguracja i opis okien taka sama jak na rysunku 7.9. Widoczne maksima dla niskich częstotliwości w przedziale od 25 do 45 s oraz dla wysokich pomiędzy 25 i 30 s. | 67 |
| Rys. 7.11 Wyniki ocen subiektywnych na tle sygnałów a_x i a_z oraz sumy wartości r.m.s. sygnałów a_x i a_z . Żółtymi strzałkami zaznaczono zdaniem autora skorelowane pary maksimów wykorzystane do zbudowania zależności przedstawionej na rysunku 7.12. Kolorem zielonym zaznaczono przebieg wskaźnika ciągłego komfortu $C_{c,r}(t)$ zaproponowanego w normie PN-EN 12299 [10]. | 68 |
| Rys. 7.12 Prosta regresji dla zależności średniej zwłoki czasowej oceny komfortu jazdy (25 perc.: 0,48 s, mediana: 0.63 s, 75 perc.: 0,83 s) w funkcji maksymalnej wartości sumy r.m.s. sygnałów a_x i a_z (25 perc.: 0,55 m/s ² , mediana: 0.78 m/s ² , 75 perc.: 1,06 m/s ²)..... | 69 |
| Rys. 7.13 Wyniki ocen subiektywnych na tle sygnałów a_x i a_z oraz dwóch przebiegów wartości r.m.s. dla ostatniego odcinka pomiarowego, na którym nie obowiązywała zasada zachowania względnego skupienia na procesie oceny komfortu jazdy. | 70 |
| Rys. 7.14 Wyniki ocen subiektywnych na tle sygnałów a_x i a_z oraz dwóch przebiegów wartości r.m.s. dla sytuacji przejazdu przez skrzyżowanie z ul. Stradom w ul. Krakowską. Zauważalne są niższe oceny pomimo wyższych wartości r.m.s. sumy sygnałów..... | 71 |
| Rys. 7.15 Transformata CWT dla sygnałów a_x i a_z . Brak wyraźnych pików dla wysokich częstotliwości. | 72 |
| Rys. 8.1 Funkcja logistyczna z wartościami zmiennej opisującej x i wartościami prawdopodobieństwa $p(x)$ na osi y | 74 |
| Rys. 8.2 Skumulowany model logitowy dla czterech kategorii [76]. | 76 |
| Rys. 8.3 Algorytm identyfikacji modelu oraz prognozowania histogramu częstości odpowiedzi dla obiektywnej oceny komfortu drgań. Dla identyfikacji modelu wykorzystano porządkową regresję logistyczną z danymi wejściowymi w postaci histogramu częstości ocen komfortu drgań oraz obiektywnych wskaźników obliczonych dla sygnałów przyspieszeń. Proces prognozowania oparty został o schemat Bernoulliego z prawdopodobieństwem sukcesu prognozowanym dla poszczególnych poziomów oceny przez model porządkowej regresji logistycznej. | 78 |
| Rys. 8.4 Przedział czasu, dla których pozyskano parametry sygnałów do obliczeń wartości zmiennych objaśniających. Dla tej samej próbki czasu t_1 zbierano informacje o histogramie maksymalnych ocen subiektywnych dla okresu $t_1 + 2$ s oraz wartości parametrów sygnałów dla odcinka $t_1 - 1$ s. | 79 |
| Rys. 8.5 Wykres osypiska. Sześciowymiarowy model wydaje się być optymalnym rozwiązaniem. | 81 |
| Rys. 8.6 Zmiana współczynników zmiennych głównych f_1, f_2, a_x, a_z w funkcji poziomu oceny L_1 | 83 |

| | |
|--|----|
| Rys. 8.7 Wartość współczynników zmiennej ‘rodzaj przyspieszenia’ w funkcji poziomu odpowiedzi | 84 |
| Rys. 8.8 Porównanie oryginalnych ocen zarejestrowanych w czasie badań (górnym wykres) z ocenami prognozowanymi przez model regresji logistycznej (dolny wykres). | 85 |
| Rys. 8.9 Błędy bezwzględne predykcji; a) błędy bezwzględne w funkcji kolejnych próbek, b) parametry statystyczne dla poszczególnych poziomów oceny. Wyjaśnienie wykresu pudełkowego opisano w załączniku F | 85 |

SPIS TABEL

| | |
|--|----|
| Tab. 2.1 Orientacyjne częstotliwości rezonansowe części ciała człowieka dla drgań pionowych [5]. | 11 |
| Tab. 2.2 Wyprowadzona doświadczalnie przez Stevensa wartość wykładnika β dla różnych bodźców i warunków oddziaływania, Stevens (1975) [18]. | 14 |
| Tab. 3.1 Zastosowanie krzywych ważenia częstotliwościowego W_f dla różnych interfejsów i kierunków drgań dla oceny wpływu drgań na zdrowie, komfort i percepcje dla pozycji siedzącej wg ISO 2631-1 [12] oraz BS 6841 [13]. | 27 |
| Tab. 3.2 Skala komfortu dla wskaźnika M_{gw} [10]. | 33 |
| Tab. 3.3 Skala komfortu dla wskaźnika $C_{cr}(t)$, $C_{cr}(f)$ [10]. | 33 |
| Tab. 3.4 Stałe dla wskaźnika P_{DEF} [10]. | 33 |
| Tab. 3.5 Stałe dla wskaźnika P_{CT} [10]. | 34 |
| Tab. 3.6 Współczynniki korelacji Spermiana dla trzech różnych charakterystyk sygnałów, przyspieszeń ważonych wg dwóch krzywych i nieważonych oraz ocenianych wg trzech wskaźników [43]. | 36 |
| Tab. 6.1 Zestawienie wartości r.m.s. sygnałów przyspieszeń zarejestrowanych w tramwaju 105Na i NGT6. | 47 |
| Tab. 6.2 Wyniki rozpoznania częstotliwości, amplitudy i położenia na osi czasu. Opis w tekście. | 52 |
| Tab. 6.3 Skale i częstotliwości centralne dla sygnału przedstawionego na rys. 6.11. | 55 |
| Tab. 7.1 Wielkości statystyczne grupy 14 pasażerów biorących udział w badaniach. | 63 |
| Tab. 8.1 Przykładowe dane [75]. | 75 |
| Tab. 8.2 Wynik statystycznej analizy czynnikowej. Wybrano tylko 6 czynników ze względu na ich znaczący udział na wykresie ospiska. | 80 |
| Tab. 8.3 Warunki klasyfikacji dodatkowych zmiennych opisujących kierunek lub kierunku i zwrot przyspieszenia mogący mieć wpływ na poszczególne poziomy komfortu. | 81 |
| Tab. 8.4 Wartości parametrów statystycznych dla poszczególnych poziomów oceny wyrażone przez liczbę głosów za wyjątkiem średniej arytmetycznej gdzie liczba głosów występuje w postaci ułamkowej. Za pomocą wykresu pudełkowego przedstawiono wartości na rysunku 8.9. | 86 |

DODATKI

Załącznik A

A1 Nr miejsca

Na poniższe pytania należy odpowiedzieć przed rozpoczęciem badania.

1. Twój zawód: _____
2. Płeć: M K
3. Wiek: _____ lat
4. Wzrost: _____ cm; Waga: _____ kg

5. Jak często podróżujesz tramwajem i ile czasu Ci to zajmuje? Postaw krzyżyk.

 codziennie, czas: około min

 kilka razy w tygodniu, czas: około min

 okazjonalnie, czas: około min

 nie korzystam z tramwajowej komunikacji miejskiej

6. Jakie jest Twoje samopoczucie w obecnej chwili?
(postaw krzyżyk w polu nad Twoją odpowiedzią).

| | | | | |
|------------|-----|--------------------|-------|--------------|
| | | | | |
| Bardzo złe | Złe | Ani dobre, ani złe | Dobre | Bardzo dobre |

Załącznik B

A2 Nr miejsca

Na poniższe pytania należy odpowiedzieć po zakończeniu badania.

1. Jakiego rodzaju chwilowe zaburzenia komfortu wibracyjnego były dla Ciebie najbardziej uciążliwe? (można zaznaczyć maksymalnie 3 pola, wpisz: 1 - najbardziej uciążliwe, 2 - mniej uciążliwe, 3 - jeszcze mniej uciążliwe)

- Kiedy tramwaj poruszał się po łuku
 Kiedy tramwaj przyspieszał/hamował
 Kiedy odczuwałem/am drgania pionowe
 Kiedy odczuwałem/am drgania poprzeczne (boczne)
 Kiedy odczuwałem/am kołysanie tramwaju
 inne, jakie?

2. Czy pamiętasz chwilowe zaburzenia komfortu wibracyjnego, które miały miejsce w czasie tego badania?

tak nie

Jeśli tak, to ile ich pamiętasz i gdzie one wystąpiły?

- pamiętam 1, gdzie? _____
 pamiętam 2, gdzie? _____
 pamiętam 3, gdzie? _____
 pamiętam 4, gdzie? _____

3. W czasie jazdy oceniałeś/aś chwilowe zaburzenia komfortu wibracyjnego wg pięcio poziomowej skali.

Na których poziomach chwilowych zaburzeń komfortu nie chciałbyś/nie chciałabyś jeździć tramwajem? Postaw krzyżyk.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

4. Jakie jest Twoje samopoczucie w obecnej chwili? Postaw krzyżyk.

| | | | | |
|------------|-----|--------------------|-------|--------------|
| | | | | |
| Bardzo złe | Złe | Ani dobre, ani złe | Dobre | Bardzo dobre |

Załącznik C

Tab. C.1/2 Fragment wejściowego zbioru danych. Kol. 2 – odpowiedź binarna (0,1), Kol. 3 – liczebność ocen (np. 1 i 2 wiersz, 10 os, głosowało na poziom 0, 4 os. głosowały na poziom 1 i każdy wyższy, itd. aż do poziomu 6).

| | 1 Response | 2 L1 count | 3 L2 count | 4 L3 count | 5 L4 count | 6 L5 count | 7 A | 8 B |
|----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|--------|
| 1 | 0 | 10 | 12 | 14 | 14 | 14 | 4 | 3 |
| 2 | 1 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 |
| 3 | 0 | 10 | 12 | 14 | 14 | 14 | 4 | 3 |
| 4 | 1 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 |
| 5 | 0 | 9 | 12 | 14 | 14 | 14 | 5 | 2 |
| 6 | 1 | 5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 5 | 2 |
| 7 | 0 | 10 | 12 | 14 | 14 | 14 | 5 | 2 |
| 8 | 1 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | 5 | 2 |
| 9 | 0 | 11 | 13 | 14 | 14 | 14 | 5 | 1 |
| 10 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 |
| 11 | 0 | 11 | 13 | 14 | 14 | 14 | 5 | 1 |
| 12 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 |
| 13 | 0 | 6 | 13 | 14 | 14 | 14 | 5 | 1 |
| 14 | 1 | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 6 | 1 |
| 15 | 0 | 5 | 12 | 14 | 14 | 14 | 5 | 1 |
| 16 | 1 | 9 | 2 | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 |
| 17 | 0 | 5 | 12 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 18 | 1 | 9 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 19 | 0 | 5 | 12 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 20 | 1 | 9 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 21 | 0 | 5 | 12 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 22 | 1 | 9 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 23 | 0 | 7 | 12 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 24 | 1 | 7 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 25 | 0 | 8 | 12 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 26 | 1 | 6 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 27 | 0 | 9 | 13 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 28 | 1 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 29 | 0 | 7 | 13 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 30 | 1 | 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 31 | 0 | 7 | 13 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 32 | 1 | 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 33 | 0 | 5 | 11 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 34 | 1 | 9 | 3 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 35 | 0 | 3 | 9 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 36 | 1 | 11 | 5 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 37 | 0 | 3 | 7 | 14 | 14 | 14 | 4 | 1 |
| 38 | 1 | 11 | 7 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| 39 | 0 | 3 | 5 | 14 | 14 | 14 | 3 | 1 |
| 40 | 1 | 11 | 9 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| 41 | 0 | 3 | 5 | 14 | 14 | 14 | 3 | 1 |
| 42 | 1 | 11 | 9 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| 43 | 0 | 3 | 5 | 14 | 14 | 14 | 3 | 1 |
| 44 | 1 | 11 | 9 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| 45 | 0 | 4 | 6 | 14 | 14 | 14 | 3 | 1 |
| 46 | 1 | 10 | 8 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| 47 | 0 | 2 | 4 | 14 | 14 | 14 | 3 | 1 |
| 48 | 1 | 12 | 10 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| 49 | 0 | 2 | 4 | 14 | 14 | 14 | 3 | 1 |
| 50 | 1 | 12 | 10 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| 51 | 0 | 2 | 4 | 14 | 14 | 14 | 3 | 1 |

Tab. C.2/2 Fragment wejściowego zbioru danych. Kolumny od 7 do 16 reprezentują zmienne główne opisane w tab. E.7. Ze względu na dyskretyzację wartości zmiennych do pięciu grup widoczne są wartości od 1 do 5. Ciąg dalszy tabeli obejmuje 55 zmiennych dwuczynnikowych.

| | 9 C | 10 D | 11 E | 12 F | 13 G | 14 H | 15 I | 16 J |
|----|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 4 | 4 | 3 | 3 | 5 | 1 | 2 | 1 |
| 2 | 4 | 4 | 3 | 3 | 5 | 1 | 2 | 1 |
| 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 1 | 2 | 1 |
| 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 1 | 2 | 1 |
| 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 6 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 8 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 9 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 10 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 11 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 12 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 13 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 14 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 15 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 16 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 17 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 18 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 19 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 20 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 21 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| 22 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 3 | 1 |
| 23 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| 24 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| 25 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| 26 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| 27 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 28 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 29 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 30 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 31 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 32 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 33 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| 34 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 |
| 35 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 36 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 37 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 5 | 1 |
| 38 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 5 | 1 |
| 39 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 40 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 41 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 42 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 43 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 44 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 45 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| 46 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| 47 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 4 | 1 |
| 48 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| 49 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| 50 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| 51 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 2 | 4 | 1 |

Załącznik D

Tab. D.1 Wyniki analizy dyskretyzacji.

| Liczba klas | L. komórek nie pustych | Liczność w komórkach nie pustych | | | |
|-------------|------------------------|----------------------------------|---------|---------|-----|
| | | min | średnia | mediana | max |
| 1 | 5 | 158 | 2 | 536 | 566 |
| 2 | 130 | 2 | 98 | 10 | 3 |
| 3 | 472 | 2 | 27 | 4 | 2 |
| 4 | 953 | 2 | 13 | 4 | 1 |
| 5 | 1 | 403 | 2 | 9 | 2 |
| 6 | 1 | 770 | 2 | 7 | 2 |
| 7 | 2 | 198 | 2 | 6 | 2 |
| 8 | 2 | 495 | 2 | 5 | 2 |
| 9 | 2 | 797 | 2 | 5 | 2 |
| 10 | 3 | 21 | 2 | 4 | 2 |
| 11 | 3 | 248 | 2 | 4 | 2 |
| 12 | 3 | 434 | 2 | 4 | 2 |
| 13 | 3 | 611 | 2 | 4 | 2 |
| 14 | 3 | 675 | 2 | 3 | 2 |
| 15 | 3 | 808 | 2 | 3 | 2 |
| 16 | 3 | 994 | 2 | 3 | 2 |
| 17 | 4 | 139 | 2 | 3 | 2 |
| 18 | 4 | 275 | 2 | 3 | 2 |
| 19 | 4 | 412 | 2 | 3 | 2 |
| 20 | 4 | 423 | 2 | 3 | 2 |
| 21 | 4 | 511 | 2 | 3 | 2 |
| 22 | 4 | 574 | 2 | 3 | 2 |
| 23 | 4 | 695 | 2 | 3 | 2 |
| 24 | 4 | 818 | 2 | 3 | 2 |
| 25 | 4 | 845 | 2 | 3 | 2 |

Załącznik E

W poniższych pięciu tabelach zawarto obliczone wartości współczynników regresji logistycznej odpowiednio dla każdego z pięciu poziomów oceny. Dla każdego współczynnika przedstawiono błąd standardowy, statystykę Walda, poziom istotności oraz przedziały ufności. Wszystkie niżej przedstawione współczynniki są statystycznie istotne na poziomie co najmniej 0,37%.

Tab. E.1 Wartości współczynników dla pierwszego poziomu oceny.

| Response: Oceny parametrów (LDR Coded: 5class w Analiza logitowa: 5 klas) Rozkład: DWUMIANOWY, F. wiążąca: LOCIT Modelowano: prawdopodobieństwo Response = 0 | | | | | | | | |
|--|-----------------|---------|----------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|----------|
| Llekl | Poziom Efekt | Kolumna | Ocena | Standard Błąd | Walda Stat | GU górna 95, % | GU dolna 95, % | p |
| Wyraz wolny | | 1 | 1,02210 | 0,091053 | 400,4633 | 1,64364 | 2,000269 | 0,000000 |
| G | | 2 | 0,16670 | 0,037663 | 20,0626 | 0,09488 | 0,242637 | 0,000007 |
| I | | 3 | -1,11379 | 0,110498 | 161,6044 | -1,33036 | -0,897225 | 0,000000 |
| J | | 4 | -0,10468 | 0,033378 | 9,8330 | -0,17008 | -0,033246 | 0,001714 |
| K | | 5 | 0,64131 | 0,074312 | 74,4750 | 0,78696 | 0,495657 | 0,000000 |
| L | | 6 | 0,07486 | 0,005157 | 8,4250 | 0,02597 | 0,004856 | 0,003711 |
| BB | | 7 | -0,04700 | 0,003647 | 16,0450 | -0,06079 | -0,022971 | 0,000014 |
| BC | | 8 | 0,18247 | 0,042452 | 18,1749 | 0,26567 | 0,098265 | 0,000017 |
| BD | | 9 | 0,20069 | 0,045175 | 20,3301 | 0,11515 | 0,292228 | 0,000007 |
| BE | | 10 | 0,02010 | 0,006650 | 9,1904 | 0,00713 | 0,033239 | 0,000433 |
| BH | | 11 | 0,17301 | 0,036710 | 22,4426 | 0,10196 | 0,243601 | 0,000002 |
| BI | | 12 | -0,15222 | 0,034532 | 19,3650 | -0,22003 | -0,084424 | 0,000011 |
| CC | | 13 | 0,18517 | 0,051605 | 12,6362 | 0,08387 | 0,286474 | 0,000340 |
| CD | | 14 | 0,17348 | 0,052264 | 11,6091 | 0,27595 | 0,071004 | 0,000907 |
| CE | | 15 | 0,03820 | 0,005738 | 44,3250 | 0,04945 | 0,026955 | 0,000000 |
| CI | | 16 | 0,07448 | 0,024364 | 9,3364 | 0,02889 | 0,122276 | 0,000254 |
| CI | | 17 | 0,03012 | 0,004552 | 49,5802 | 0,02119 | 0,038061 | 0,000000 |
| CJ | | 18 | 0,05766 | 0,017237 | 11,2656 | 0,09161 | 0,024073 | 0,000769 |
| HJ | | 19 | 0,15209 | 0,016230 | 67,6664 | 0,12065 | 0,104633 | 0,000000 |
| II | | 20 | -0,02200 | 0,006230 | 19,3321 | -0,03397 | -0,012309 | 0,000019 |
| LI | | 21 | 0,03639 | 0,012451 | 59,9311 | 0,07199 | 0,120707 | 0,000000 |
| rodzOdc | 2 | 22 | -0,13262 | 0,030583 | 16,1661 | -0,19726 | -0,067970 | 0,000050 |
| rodzOdc | 3 | 23 | -0,26300 | 0,063191 | 24,6293 | -0,36823 | -0,159723 | 0,000001 |
| rodzOdc | 4 | 24 | 0,54036 | 0,018860 | 847,6035 | 0,57961 | 0,506482 | 0,000000 |
| rodzOdc | 11 | 25 | 0,28726 | 0,033862 | 71,9658 | 0,22089 | 0,353627 | 0,000000 |
| Skala | | | 1,00000 | 0,000000 | | 1,00000 | 1,000000 | |

Tab. E.2 Wartości współczynników dla drugiego poziomu oceny.

| Response - Oceny parametrów (LBR_Coded_5class w Analiza logitowa - 5 klas) | | | | | | | | |
|--|-----------------|---------|----------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|----------|
| Rozkład: DWUMIANOWY, F. wiążąca: LOGIT | | | | | | | | |
| Modelowane prawdopodobieństwo Response = 0 | | | | | | | | |
| Efekt | Poziom Efekt | Kolumna | Ocena | Standard Błąd | Wald Stat. | CU górna 95. % | CU dolna 95. % | p |
| Wyraz wolny | | 1 | 2,17670 | 0,078636 | 768,214 | 2,02257 | 2,33382 | 0,000009 |
| D | | 2 | 0,28849 | 0,032850 | 77,087 | 0,22404 | 0,35281 | 0,000009 |
| C | | 3 | 0,37073 | 0,030935 | 143,827 | 0,31010 | 0,43136 | 0,000009 |
| II | | 4 | 1,38178 | 0,081187 | 287,198 | 1,51701 | 1,21593 | 0,000009 |
| J | | 5 | -0,62490 | 0,076972 | 65,230 | -0,77427 | -0,47372 | 0,000009 |
| AB | | 6 | 0,10755 | 0,021857 | 24,568 | 0,08511 | 0,15000 | 0,000001 |
| AJ | | 7 | -0,16475 | 0,036969 | 17,520 | -0,22719 | -0,00230 | 0,000020 |
| BB | | 8 | -0,02894 | 0,009735 | 8,633 | -0,04475 | -0,00094 | 0,003307 |
| BC | | 9 | -0,10325 | 0,023334 | 19,579 | -0,14090 | -0,06732 | 0,000019 |
| BH | | 10 | 0,14135 | 0,034610 | 18,880 | 0,07352 | 0,20916 | 0,000044 |
| BJ | | 11 | -0,13209 | 0,033152 | 16,057 | -0,19780 | -0,06704 | 0,000062 |
| CD | | 12 | 0,02389 | 0,006071 | 13,826 | 0,00818 | 0,01120 | 0,000201 |
| CJ | | 13 | 0,13382 | 0,036330 | 13,568 | 0,08282 | 0,20503 | 0,000239 |
| EG | | 14 | 0,02589 | 0,004375 | 35,967 | 0,03435 | 0,01743 | 0,000009 |
| CG | | 15 | 0,05809 | 0,005309 | 119,744 | 0,08850 | 0,04789 | 0,000009 |
| CI | | 16 | 0,05775 | 0,004142 | 189,120 | 0,04908 | 0,08847 | 0,000009 |
| HH | | 17 | -0,16794 | 0,030364 | 26,740 | -0,21055 | -0,09732 | 0,000009 |
| HI | | 18 | 0,14234 | 0,012091 | 130,024 | 0,11065 | 0,16502 | 0,000009 |
| H.I | | 19 | 0,46746 | 0,043653 | 109,010 | 0,37190 | 0,54301 | 0,000009 |
| II | | 20 | -0,06041 | 0,003547 | 290,113 | -0,06736 | -0,05346 | 0,000009 |
| JJ | | 21 | 0,13788 | 0,025991 | 28,055 | 0,18880 | 0,08973 | 0,000009 |
| rodzOdc: | 2 | 22 | -0,41012 | 0,038940 | 123,288 | -0,48252 | -0,33773 | 0,000009 |
| rodzOdc: | 3 | 23 | -0,41584 | 0,055733 | 55,871 | -0,52508 | -0,30881 | 0,000009 |
| rodzOdc: | 7 | 24 | 0,70758 | 0,022091 | 1004,290 | 0,75088 | 0,86441 | 0,000009 |
| rodzOdc: | 11 | 25 | 0,46090 | 0,014373 | 107,755 | 0,37039 | 0,54721 | 0,000009 |
| Skala | | | 1,00000 | 0,000000 | | 1,00000 | 1,00000 | |

Tab. E.3 Wartości współczynników dla trzeciego poziomu oceny.

| Response - Oceny parametrów (I RR_Coded_5class w Analiza logitowa - 5 klas) | | | | | | | | |
|---|-----------------|---------|----------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|----------|
| Rozkład: DWUMIANOWY, F. wiążąca: LOGIT | | | | | | | | |
| Modelowane prawdopodobieństwo Response = 0 | | | | | | | | |
| Efekt | Poziom Efekt | Kolumna | Ocena | Standard Błąd | Wald Stat. | CU górna 95. % | CU dolna 95. % | p |
| Wyraz wolny | | 1 | 3,42599 | 0,091062 | 1400,021 | 3,24697 | 3,60642 | 0,000009 |
| G | | 2 | 0,56754 | 0,049224 | 129,420 | 0,46736 | 0,66432 | 0,000009 |
| H | | 3 | -1,52988 | 0,083580 | 336,182 | -1,69347 | -1,36801 | 0,000009 |
| I | | 4 | 0,35047 | 0,045068 | 60,995 | 0,26857 | 0,44043 | 0,000009 |
| J | | 5 | 0,19918 | 0,079196 | 39,739 | 0,65458 | 0,34098 | 0,000009 |
| AA | | 6 | 0,02542 | 0,002458 | 207,520 | 0,00060 | 0,04021 | 0,000009 |
| BB | | 7 | -0,04896 | 0,007368 | 44,155 | -0,06346 | -0,03452 | 0,000009 |
| BG | | 8 | 0,03150 | 0,010170 | 9,756 | 0,01176 | 0,05140 | 0,001707 |
| BH | | 9 | 0,11099 | 0,039070 | 7,740 | 0,03204 | 0,10913 | 0,006376 |
| BJ | | 10 | -0,12183 | 0,035266 | 11,934 | -0,19095 | -0,05271 | 0,000551 |
| GG | | 11 | -0,10585 | 0,008588 | 151,887 | -0,12268 | -0,08907 | 0,000009 |
| CI | | 12 | 0,09558 | 0,005611 | 286,877 | 0,08450 | 0,10861 | 0,000009 |
| IJJ | | 13 | 0,43016 | 0,027574 | 243,378 | 0,37612 | 0,48421 | 0,000009 |
| II | | 14 | -0,10680 | 0,007085 | 103,732 | -0,12233 | -0,08143 | 0,000009 |
| JJ | | 15 | -0,16195 | 0,022290 | 52,833 | -0,20562 | -0,11820 | 0,000009 |
| rodzOdc: | 2 | 16 | -0,97301 | 0,066000 | 175,243 | -1,00310 | -0,74444 | 0,000009 |
| rodzOdc: | 3 | 17 | 1,08352 | 0,077521 | 195,358 | 1,20546 | 0,87158 | 0,000009 |
| rodzOdc: | 4 | 18 | -0,88948 | 0,049291 | 125,819 | -0,98609 | -0,79288 | 0,000009 |
| rodzOdc: | 11 | 19 | 1,09068 | 0,124546 | 77,119 | 0,84958 | 1,33777 | 0,000009 |
| Skala | | | 1,00000 | 0,000000 | | 1,00000 | 1,00000 | |

Tab. E.4 Wartości współczynników dla czwartego poziomu oceny.

| Response - Oceny parametrów (LBR_Coded_5class w Analiza logitowa - 5 klas) | | | | | | | | |
|--|-----------------|---------|----------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|----------|
| Rozkład: DWUMI ANOWY, Γ wiązaca: LOGIT | | | | | | | | |
| Modelowane prawdopodobieństwa Response = 0 | | | | | | | | |
| Efekt | Poziom Efekt | Kolumna | Ocena | Standard Błąd | Wald Stat. | GU górna 95. % | GU dolna 95. % | p |
| Wyraz wolny | | 1 | 4.46839 | 0.252143 | 318.6092 | 4.60926 | 4.09058 | 0.000000 |
| I | | 2 | 1.05908 | 0.113439 | 33.9724 | 0.67575 | 1.32142 | 0.000000 |
| II | | 3 | -1.66297 | 0.149591 | 126.7092 | -1.67706 | -1.29067 | 0.000000 |
| J | | 4 | 1.06579 | 0.112130 | 92.6249 | 0.67407 | 1.31752 | 0.000000 |
| J | | 5 | -0.96097 | 0.129742 | 48.6355 | -1.10096 | -0.65238 | 0.000000 |
| DE | | 6 | 0.01432 | 0.008308 | 18.9972 | 0.02186 | 0.05672 | 0.000000 |
| GG | | 7 | -0.17739 | 0.020903 | 71.6798 | -0.21937 | -0.13641 | 0.000000 |
| GI | | 8 | 0.05934 | 0.011663 | 72.6653 | 0.07506 | 0.12218 | 0.000000 |
| HJ | | 9 | 0.51470 | 0.033858 | 31.3273 | 0.40914 | 0.62026 | 0.000000 |
| II | | 10 | -0.23357 | 0.019155 | 148.2030 | -0.27129 | -0.19665 | 0.000000 |
| JJ | | 11 | -0.14050 | 0.037220 | 14.2492 | -0.21345 | -0.05755 | 0.000160 |
| rodzOdc | 2 | 12 | 1.15298 | 0.202053 | 31.1123 | 1.32878 | 0.73692 | 0.000000 |
| rodzOdc | 3 | 13 | 1.68353 | 0.209332 | 79.8155 | 2.07917 | 1.29319 | 0.000000 |
| rodzOdc | 4 | 14 | -0.81322 | 0.178558 | 20.7492 | -1.16313 | -0.48331 | 0.000005 |
| rodzOdc | 11 | 15 | 1.15835 | 0.428902 | 7.3625 | 0.32164 | 1.09366 | 0.009660 |
| Skala | | | 1.00000 | 0.00000 | | 1.00000 | 1.00000 | |

Tab. E.5 Wartości współczynników dla piątego poziomu oceny.

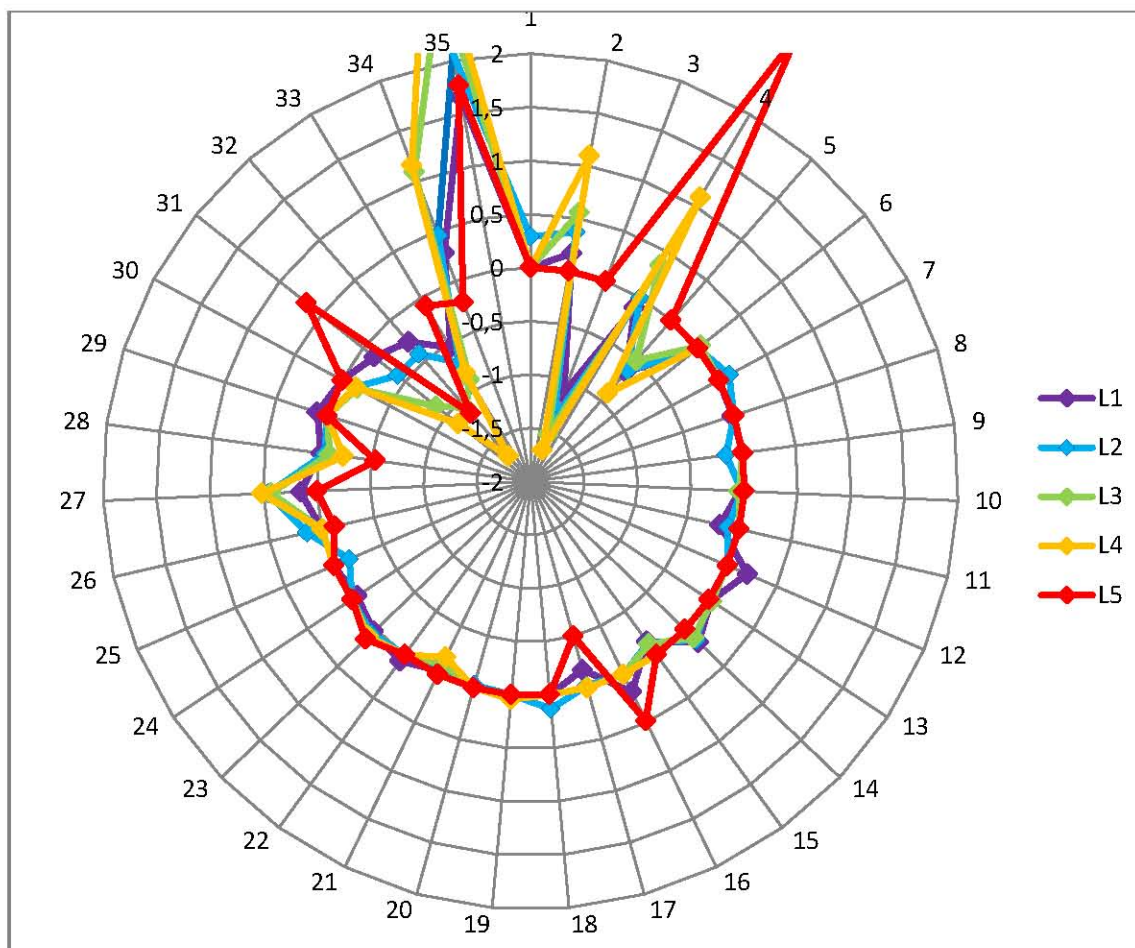
| Response - Oceny parametrów (LBR_Coded_5class w Analiza logitowa - 5 klas) | | | | | | | | |
|--|-----------------|---------|----------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|----------|
| Rozkład: DWUMI ANOWY, Γ wiązaca: LOGIT | | | | | | | | |
| Modelowane prawdopodobieństwa Response = 0 | | | | | | | | |
| Efekt | Poziom Efekt | Kolumna | Ocena | Standard Błąd | Wald Stat. | GU górna 95. % | GU dolna 95. % | p |
| Wyraz wolny | | 1 | 3.87302 | 0.527940 | 53.81637 | 2.83822 | 4.907764 | 0.000000 |
| I | | 2 | 2.84877 | 0.472269 | 50.38607 | 1.92314 | 3.774396 | 0.000000 |
| CC | | 3 | 0.48112 | 0.169379 | 8.36212 | 0.15503 | 0.807220 | 0.093831 |
| CD | | 4 | 0.56228 | 0.161120 | 9.33159 | 0.22452 | 0.180219 | 0.022332 |
| GI | | 5 | 0.13153 | 0.021367 | 37.89686 | 0.08968 | 0.173411 | 0.000000 |
| HI | | 6 | -0.11892 | 0.034603 | 11.74632 | -0.15602 | -0.000922 | 0.000609 |
| II | | 7 | 0.03828 | 0.078360 | 17.18789 | 0.29168 | 0.321895 | 0.000000 |
| rodzOdc | 2 | 8 | 0.88044 | 0.307483 | 1.25463 | -0.51020 | 1.871087 | 0.282871 |
| rodzOdc | 3 | 9 | -1.15715 | 0.433307 | 7.07039 | -2.00141 | -0.309601 | 0.007637 |
| rodzOdc | 4 | 10 | -0.08717 | 0.256776 | 0.11348 | -0.59437 | 0.420323 | 0.736219 |
| rodzOdc | 11 | 11 | -0.20639 | 0.469577 | 0.19411 | -1.12724 | 0.713468 | 0.659513 |
| Skala | | | 1.00000 | 0.00000 | | 1.00000 | 1.00000 | |

Tab. E.6 Wynik obliczeń współczynników modelu komfortu jazdy dla 5 poziomów dyskomfortu. Brak kolumny dla poziomu L0 wynika z obecności prawdopodobieństw skumulowanego. Tylko współczynniki statystycznie istotne. Graficznie zmianę wartości współczynników przedstawiono na rysunku E.1.

| Lp. | Zmienna | Poziom dyskomfortu | | | | |
|-----|------------|--------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 |
| 0 | Wyr. wolny | 1,82210 | 2,17670 | 3,42596 | 4,49639 | 3,87302 |
| 1 | D | 0 | 0,28842 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | G | 0,1687 | 0,37073 | 0,55784 | 1,09908 | 0 |
| 3 | H | -1,11379 | -1,38148 | -1,52966 | -1,68387 | 0 |
| 4 | I | -0,10466 | 0 | 0,35847 | 1,09579 | 2,84877 |
| 5 | J | -0,64131 | -0,624 | -0,49918 | -0,90667 | 0 |
| 6 | AA | 0 | 0 | 0,03542 | 0 | 0 |
| 7 | AB | 0 | 0,10756 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | AF | -0,01496 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | AJ | 0 | -0,15475 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | BB | -0,04188 | -0,02684 | -0,04896 | 0 | 0 |
| 11 | BC | -0,18247 | -0,10325 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | BD | 0,20369 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | BG | 0,02018 | 0 | 0,03158 | 0 | 0 |
| 14 | BH | 0,17391 | 0,14135 | 0,11098 | 0 | 0 |
| 15 | BJ | -0,15222 | -0,13282 | -0,12183 | 0 | 0 |
| 16 | CC | 0,18517 | 0 | 0 | 0 | 0,48112 |
| 17 | CD | -0,17348 | -0,02369 | 0 | 0 | -0,50228 |
| 18 | CJ | 0 | 0,13382 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | DE | 0 | 0 | 0 | 0,04432 | 0 |
| 20 | EG | 0 | -0,02589 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | GG | -0,0382 | -0,05809 | -0,10585 | -0,17739 | 0 |
| 22 | GH | 0,07448 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | GI | 0,03012 | 0,05776 | 0,09556 | 0,09934 | 0,13153 |
| 24 | GJ | -0,05786 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | HH | 0 | -0,15704 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | HI | 0 | 0,14234 | 0 | 0 | -0,11892 |
| 27 | HJ | 0,15259 | 0,45746 | 0,43016 | 0,5147 | 0 |
| 28 | II | -0,02268 | -0,06041 | -0,10688 | -0,23367 | -0,53828 |
| 29 | IJ | 0,09639 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | JJ | 0 | -0,13768 | -0,16195 | -0,1405 | 0 |
| 31 | 2 | -0,13262 | -0,41012 | -0,87381 | -1,13268 | 0,68044 |
| | 3 | -0,26398 | -0,41584 | -1,08352 | -1,68583 | -1,15215 |
| | 4 | -0,54306 | -0,70756 | -0,88948 | -0,81322 | -0,08717 |
| | 11 | 0,28726 | 0,4603 | 1,09368 | 1,15835 | -0,20689 |
| | 12 | 1,6524 | 2,07322 | 2,75313 | 3,47338 | 1,76577 |

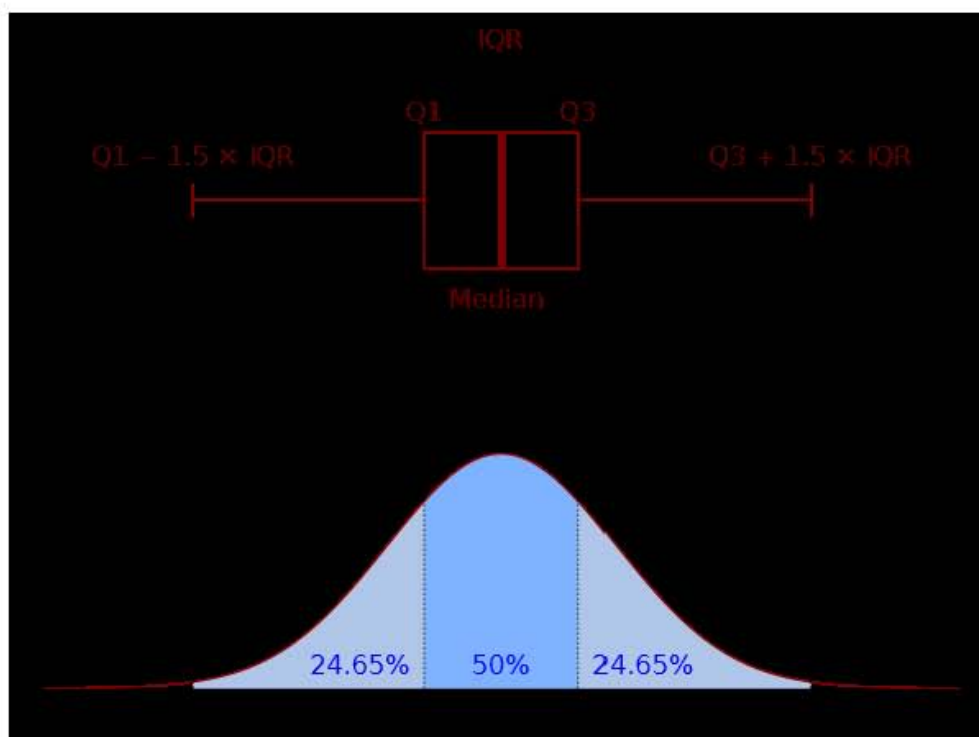
Tab. E.7 Oznaczenia pomocnicze wielkości mierzonych.

| | | |
|------------------|------------------|-----------------------|
| A - a_v | F - $VDV a_v$ | 2 - Przys. poprzeczne |
| B - $a_{v, prz}$ | G - σ_v^2 | 3 - Przys. pionowe |
| C - $MTVV a_v$ | H - a_v | 4 - Przys. mieszane |
| D - $r.m.q. a_v$ | I - σ_v^2 | 11 - Przys. podłużne |
| E - $r.m.s. a_v$ | J - a_v | 12 - Opózn. podłużne |



Rys. E.1 Wykres radarowy zmian wartości współczynników regresji dla poszczególnych poziomów odpowiedzi L_i . Numer zmiennej wyjaśniono w tabeli E.1 załącznika E oraz na początku rozdziału 8.3.

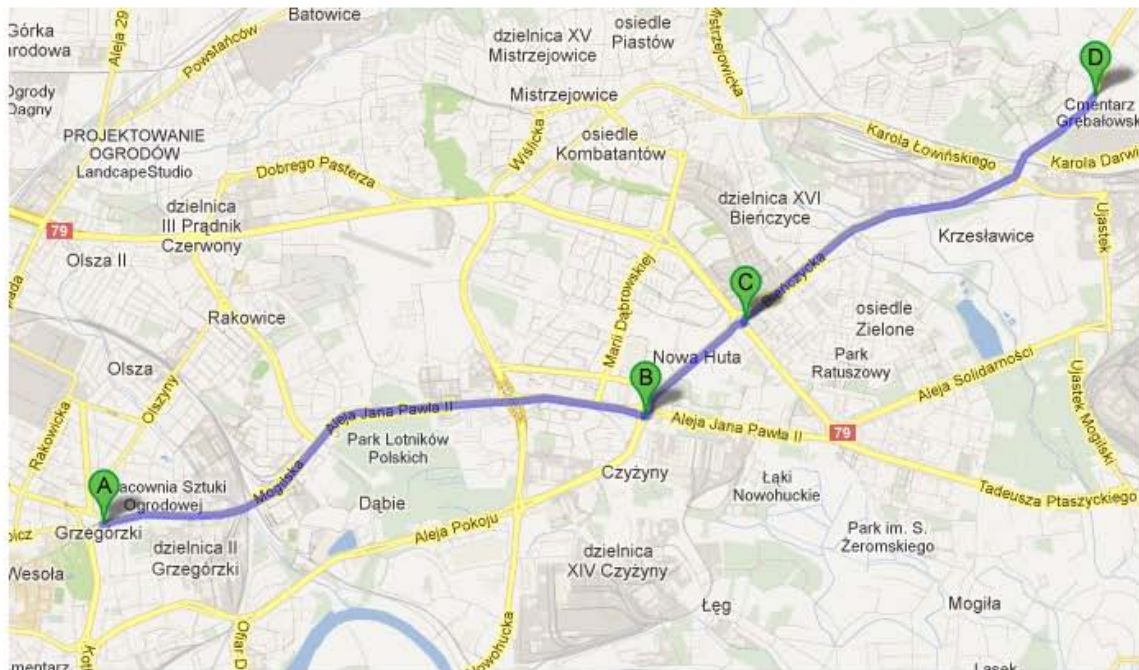
Załącznik F



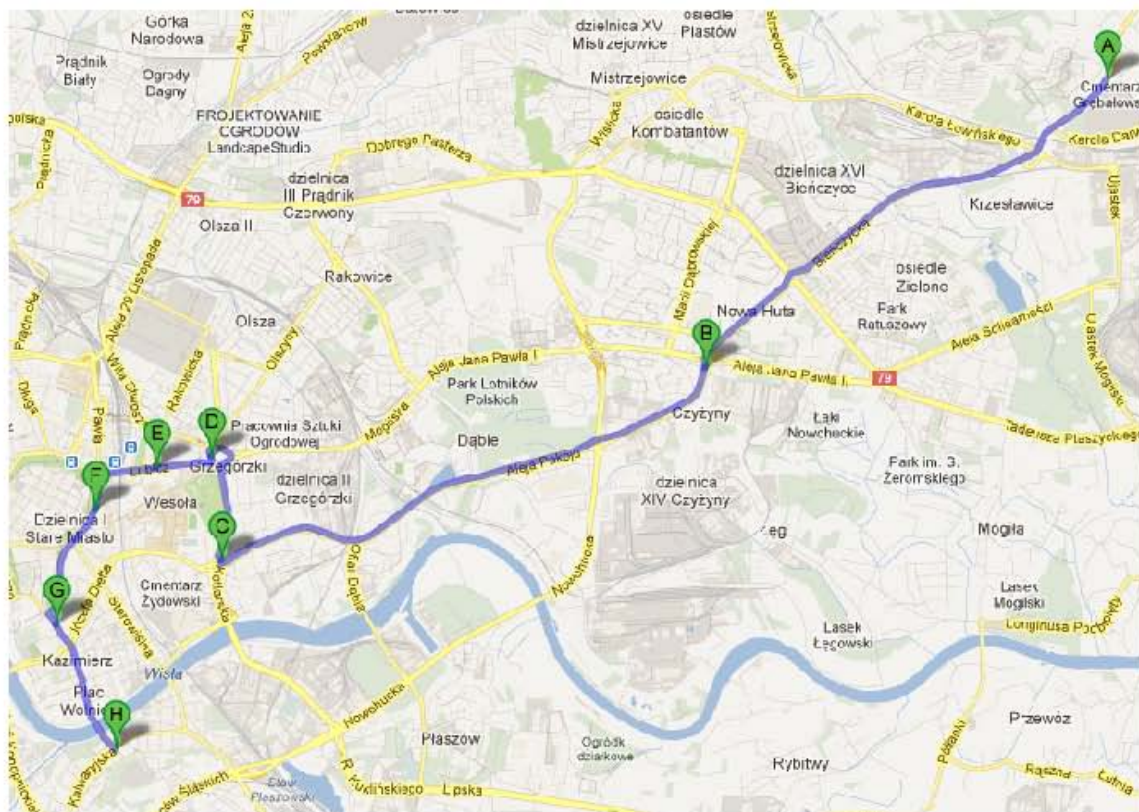
Rys. G.1 Wykres pudełko wąsy (boxplot) [81].

- pionowa linia w środku skrzynki - **Mediana**
- góra i dół skrzynki (zawiasy) – **pierwszy Q1 i trzeci kwartył Q3** (w skrzynce zawiera się 50% obserwacji)
- granice "wąsów" to zakres obserwacji mieszczących się w odległości **1,5 rozstępu ćwiartkowego** (różnica Q1 i Q3) od górnej lub dolnej granicy skrzynki, długość skrzynki to rozstęp ćwiartkowy
- krzyżyki symbolizują obserwacje mieszczące się w granicach od 1,5 do 3 rozstępów ćwiartkowych (**outliers**, obserwacje odstające)

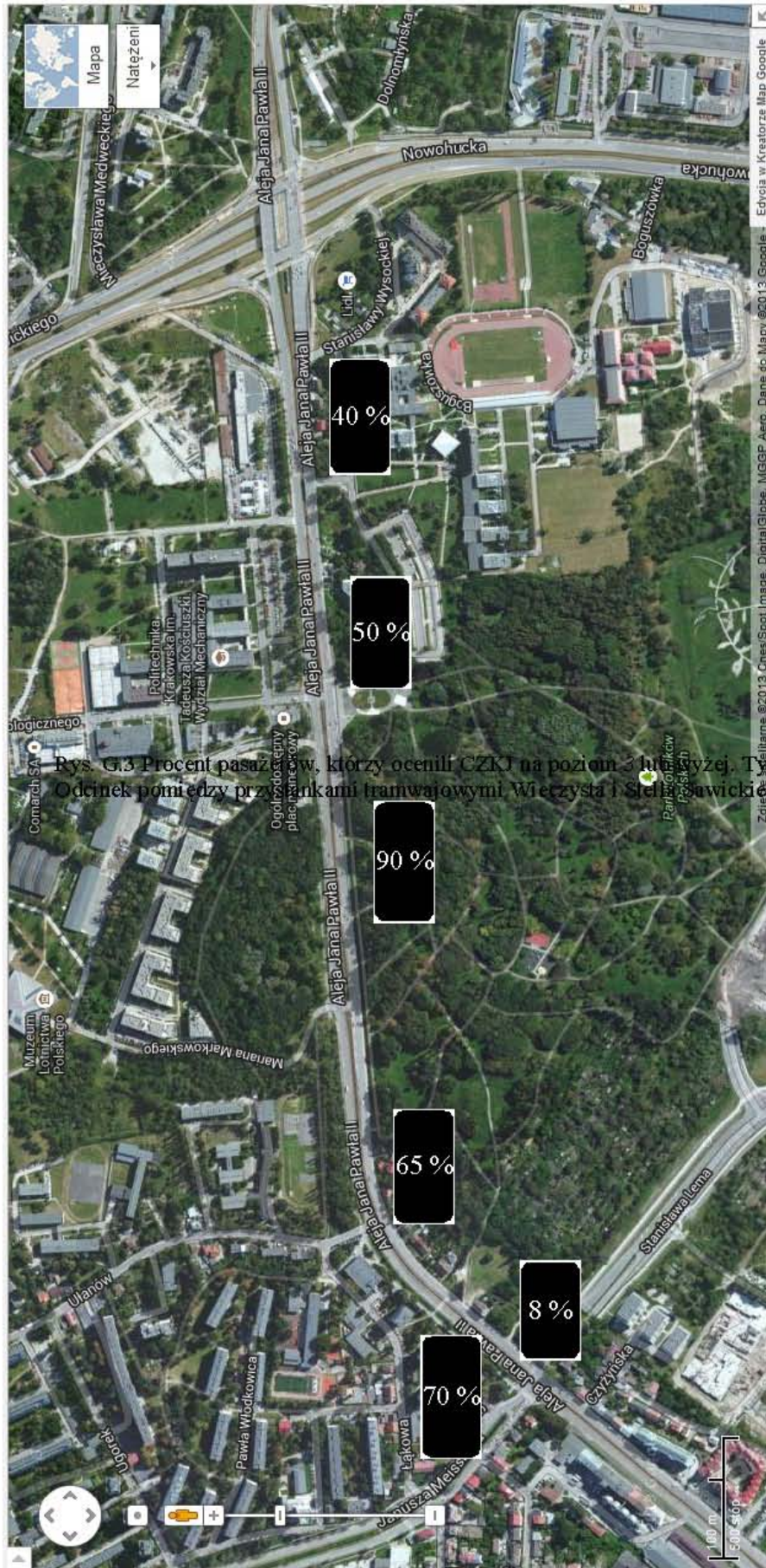
Załącznik G



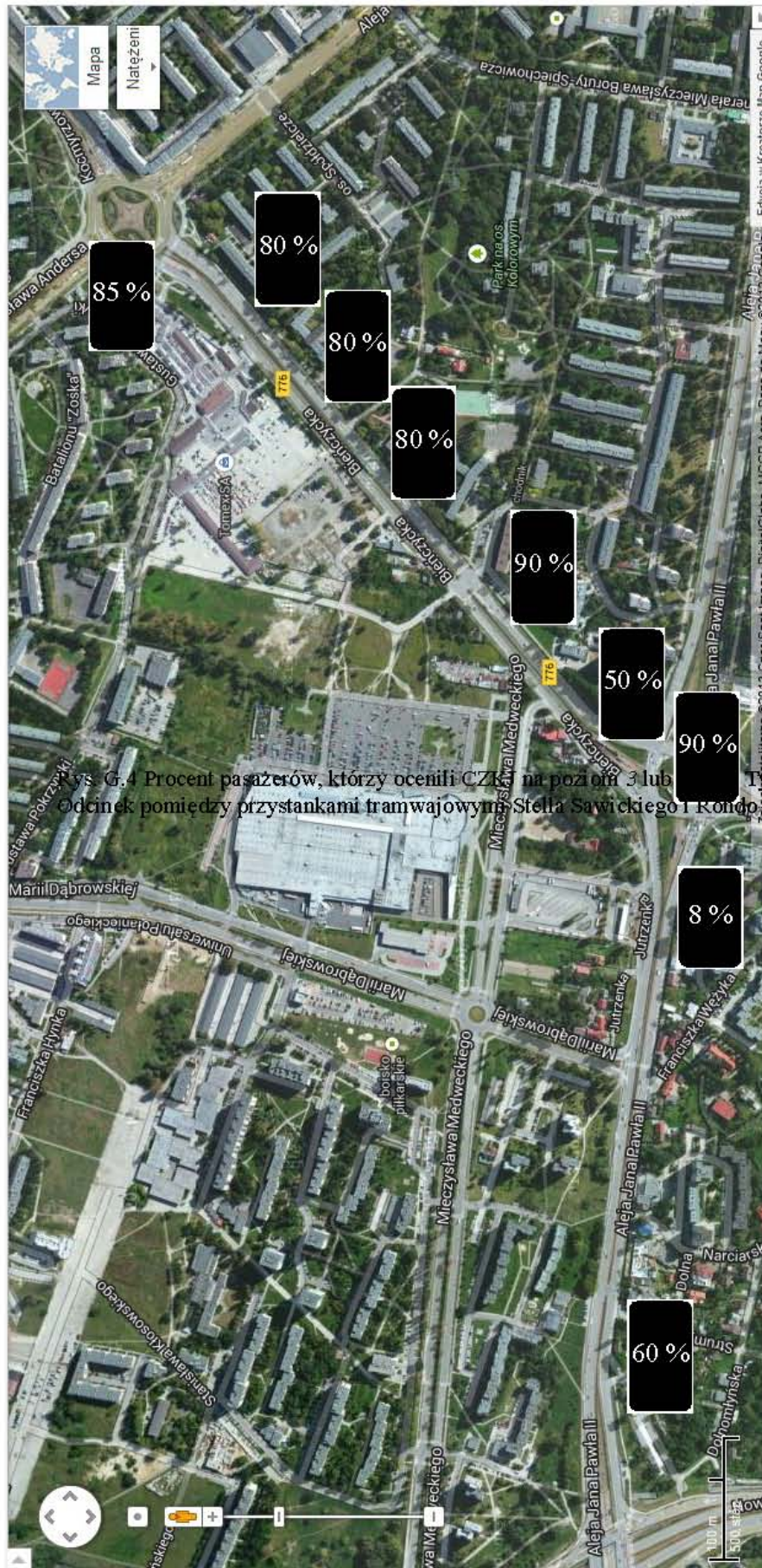
Rys. G.1 Przejazd tramwaju podczas pierwszego odcinka badawczego. Rondo Mogiłskie (A) – Rondo Czyżyńskie – zajezdnia Wzgórze Krzesławice (D).



Rys. G.2 Przejazd tramwaju podczas drugiego odcinka badawczego. Zajezdnia Wzgórze Krzesławice – Rondo Czyżyńskie – Rondo Grzegórzeckie – Rondo Mogiłskie – Lubicz – Westerplatte – Stradomska – Krakowska – Legionów Józefa Piłsudskiego.



Rys. G.3 Procent pasażerów, którzy ocenili CZKJ na poziom 3 lub wyżej. Tym samym jest to procenta pasażerów, którzy ocenili CZKJ na poziom 3 lub wyżej. Odcinek pomiędzy przystankami tramwajowymi Wierzyńska i Stenokowicka. Badania przeprowadzono



rys. G.4 Procent pasażerów, którzy ocenili CZK na poziomie 3 lub 4. Tym samym jest to procenta pasażerów
 Odcinek pomiędzy przystankami tramwajowymi Stella Sawickiego i Rondo Kocmyrzowskie. Badania przeprowa