



**Politechnika  
Śląska**

**DYSCYPLINA NAUKOWA  
INŻYNIERIA LĄDOWA I TRANSPORT**

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr inż. Bogusław Nowak

**Wykrywanie przejazdu pojazdu szynowego na podstawie  
zarejestrowanych sygnałów drganiowych**

Detection of the passage of a rail vehicle based on recorded vibration signals

Promotor  
dr hab. inż. Rafał Burdzik, prof. PŚ

Promotor pomocniczy  
dr inż. Szymon Surma

Gliwice 2022

## Streszczenie

Bezpieczeństwo w transporcie jest podstawowym i najważniejszym kryterium podczas planowania, projektowania, wytwarzania, użytkowania a nawet wycofywania z eksploatacji elementów suprastruktury i infrastruktury transportu. Na każdym etapie cyklu życia obiektu technicznego pojęcie bezpieczeństwa można definiować inaczej, więc różne czynniki rozpatrywane są jako jego determinanty. Dostyc wyraźne rozróżnienie występuje w ujęciu definiowania bezpieczeństwa elementów infrastruktury i środków transportu. Kolejny podział wynika z klasyfikacji gałęziowej transportu.

W dysertacji zdecydowano się podjąć problematykę bezpieczeństwa intergałęziowego uwzględniając ponadto aspekty infrastruktury i suprastruktury transportu. Wynika to z przyjętego podmiotu badań, jakim jest przejazd kolejowo-drogowy. Intergałęziowość tego węzła transportowego powoduje krzyżowanie się strumieni ruchu kolejowego i drogowego. Połączenie aspektów bezpieczeństwa infrastruktury i suprastruktury wynika natomiast z przyjętego przedmiotu badań, jakim było wykrywanie zbliżającego się pojazdu szynowego na podstawie drgań rejestrowanych na szynie. Jako determinantę bezpieczeństwa w tym przypadku określono wykrycie zbliżającego się pojazdu szynowego w celu uniknięcia ryzyka kolizji.

W badaniach wykorzystano metody wibroakustyczne, które umożliwią obserwowanie drgań mechanicznych i propagacji dźwięku oraz przetwarzanie rejestrowanych sygnałów reprezentujących te procesy w celu pozyskiwania użytecznych informacji. Metody te najczęściej stosowane są w diagnostyce technicznej w celu poszukiwania relacji stan $\leftrightarrow$ symptom. W dysertacji postanowiono przyjąć analogiczne założenia poszukując w sygnałach drgań mechanicznych szyny kolejowej symptomów stanu wykrycia poruszającego się pojazdu szynowego.

Najważniejszymi osiągnięciami rozprawy doktorskiej są:

- potwierdzenie możliwości separacji składowych sygnałów skorelowanych z pracą różnych urządzeń infrastruktury kolejowej oraz przejazdem samochodu przez przejazd;
- weryfikacja na drodze eksperymentalnej, analitycznej i podczas badań *in situ* możliwości wykrycia przejazdu pojazdu szynowego na podstawie zarejestrowanych sygnałów drganiowych;
- opracowanie metody wykrywania zbliżającego się pojazdu szynowego wykorzystując jako źródło informacji sygnały drganiowe rejestrowane na szynie kolejowej;
- potwierdzenie, że dedykowana analiza sygnałów drganiowych umożliwia uzyskanie informacji o zbliżającym się pojeździe szynowym ze znacznym wyprzedzeniem czasowym;
- opracowanie algorytmu normalizacji wartości estymatorów drganiowych w kontekście przydatności w logicznych systemach automatycznego sterowania;
- opracowanie koncepcji systemu predykcji drganiowej zbliżającego się pojazdu szynowego.

Z uwagi na przyjęte założenia i cele utylitarne uzyskano ochronę patentową na czujnik rozpoznania przejazdu pojazdów szynowych (numer patentu 237 398), którego zasada działania częściowo bazuje na opracowanej koncepcji. Ponadto wdrożono uzyskane wyniki badań naukowych przygotowując prototyp innowacyjnego systemu w pełni funkcjonalnego, który zabudowany jest jako demonstrator na jednym z przejazdów kategorii D w województwie śląskim.

## Abstract

Transport safety is the basic and most important criterion when planning, designing, manufacturing, maintaining, and even decommissioning elements of superstructure and transport infrastructure. At each stage of the life cycle of a technical object, safety can be defined differently, so various factors are considered its determinants. There is quite a clear distinction in terms of defining the safety of infrastructure elements and means of transport. Another division results from the classification of transport branches.

In the dissertation, it was decided to take the issues of intermodal safety into account, and also aspects of infrastructure and superstructure of transport were taken into account. It results from the assumed research object, which is a rail-road level crossing. The intermodal nature of this transport node causes the intersection of rail and road traffic flows. On the other hand, the combination of the safety aspects of infrastructure and superstructure follows from the assumed research subject, which was the detection of an approaching rail vehicle based on vibrations recorded on the rail. In this case, the detection of an approaching rail vehicle was defined as a safety determinant in order to avoid the risk of collision.

In the research, vibroacoustic methods were used, which will make it possible to observe mechanical vibrations and sound propagation, and to analyze the recorded signals representing these processes in order to obtain useful information. These methods are most often used in technical diagnostics in order to search for the state ↔ symptom relationship. In the dissertation, it was decided to adopt similar assumptions while searching in the signals of mechanical vibrations of a rail, the symptoms of the state of detection of an approaching rail vehicle.

The most important achievements of the doctoral dissertation are as follows.

- confirmation of the possibility of separation of signal components correlated with the operation of various railway infrastructure devices and the vehicle's passage through the crossing;
- verification by experimental, analytical, and *in situ* tests of the possibility of detecting the passage of a rail vehicle on the basis of registered vibration signals;
- development of a method of detecting an approaching rail vehicle using vibration signals recorded on a railroad as a source of information;
- confirmation that a dedicated analysis of vibration signals enables obtaining information about an approaching rail vehicle well in advance;
- development of an algorithm for normalization of the values of vibration estimators in the context of their usefulness in logical automatic control systems;
- development of the concept of a vibration prediction system for an approaching rail vehicle.

Due to the assumptions and utilitarian goals adopted, a patent protection was obtained for a rail vehicle crossing detection sensor (patent number 237 398), the operating principle of which is partly based on the concept developed. In addition, the obtained results of scientific research were implemented by preparing a prototype of an innovative fully functional system, which is built as a demonstrator at one of the D category level crossings in the Silesian Voivodeship.

## Spis treści

WSTĘP.....	5
ROZDZIAŁ 1 - BEZPIECZEŃSTWO W TRANSPORCIE KOLEJOWYM.....	1
1.1 Zasady zapewnienia bezpieczeństwa w transporcie kolejowym.....	5
1.2 Analiza liczby wypadków na przejazdach kolejowych.....	10
1.3 Działania w celu poprawy bezpieczeństwa przejazdów kolejowych.....	12
ROZDZIAŁ 2 - TEZA, CEL I ZAKRES PRACY.....	19
ROZDZIAŁ 3 - SYSTEMY BEZPIECZEŃSTWA W TRANSPORCIE KOLEJOWYM.....	21
3.1. Wykrywanie przejazdu pojazdu szynowego.....	22
3.2. Przegląd czujników detekcji pojazdów szynowych.....	23
3.3. Rola czujników detekcji w systemach sterowania ruchem kolejowym.....	27
ROZDZIAŁ 4 - BADANIA DRGAŃ W TRANSPORCIE KOLEJOWYM.....	38
4.1. Emisja i oddziaływanie drgań w transporcie szynowym.....	39
4.2. Badania drgań elementów pojazdów szynowych.....	44
4.3. Drgania a zjawisko kontaktu koło-szyba.....	46
ROZDZIAŁ 5 - PODSTAWY ANALIZY SYGNAŁÓW.....	49
5.1. Ogólne miary sygnałów drganiowych.....	50
5.2. Analiza sygnałów w dziedzinie częstotliwości.....	52
5.3. Wielowymiarowe analizy sygnałów.....	54
ROZDZIAŁ 6 – METODY BADAŃ.....	55
6.1. Badania wstępne.....	55
6.2. Pilotażowe badania terenowe.....	63
6.3. Badania w warunkach rzeczywistych.....	68
ROZDZIAŁ 7 - METODA DETEKЦИИ ZBLIŻANIA SIĘ POJAZDU SZYNOWEGO.....	72
7.1. Metoda analizy sygnałów drganiowych.....	72
7.2. Metoda wykrywania przejazdu pojazdu szynowego wraz z predykcją.....	74
ROZDZIAŁ 8 - DOBÓR CZASU ANALIZOWANEGO OKNA.....	83
8.1. Porównanie i dobór długości kolejnych okien analizowanego sygnału.....	85
8.1.1. Podział na 1-sekundowe okno czasowe.....	86
8.1.2. Podział na 3-sekundowe okno czasowe.....	93
8.1.3. Podział na 5-sekundowe okno czasowe.....	98
8.2. Porównanie czasów detekcji zbliżającego się pojazdu szynowego.....	103
ROZDZIAŁ 9 - PRZYKŁADOWE WYNIKI WYKRYWANIA ZBLIŻAJĄCEGO SIĘ POJAZDU SZYNOWEGO.....	106
9.1. Wyniki działania metody detekcji dla pociągu towarowego z 18 wagonami.....	107
9.2. Wyniki działania metody dla pociągu towarowego z 28 wagonami.....	113
9.3. Wyniki działania metody dla pociągu osobowego ELF-2.....	118

9.4.	Zestawienie wartości estymatorów drgań .....	122
9.5.	Wyznaczanie czasów i odległości detekcji pojazdu szynowego.....	127
9.6.	Analiza statystyczna uzyskanych miar detekcji .....	131
ROZDZIAŁ 10 - KONCEPCJA SYSTEMU PREDYKCJI DRGANIOWEJ ZBLIŻAJĄCEGO SIĘ POJAZDU SZYNOWEGO.....		137
ROZDZIAŁ 11 – PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....		143
LITERATURA.....		146
SPIS RYSUNKÓW: .....		159
SPIS TABEL:.....		164

## WSTĘP

Jednym z kluczowych obszarów łączących inżynierię lądową i transport jest infrastruktura transportowa. Z jednej strony wpływa ona bardzo istotnie na planowanie przestrzenne, zaś z drugiej w znacznym stopniu determinuje bezpieczeństwo systemów transportowych. W tym ujęciu szczególnie ważne są przejazdy kolejowo-drogowe [86]. Spośród wielu funkcji tych obiektów punktowych infrastruktury transportowej należy wymienić umożliwienie jednopoziomowego krzyżowania się sieci transportu kolejowego i drogowego, co zwiększa efektywność i przepustowość przestrzenną sieci oraz w niektórych przypadkach bezkolizyjność strumieni ruchu. Niezależnie od tych i wielu innych funkcji przejazdów kolejowo-drogowych najistotniejszym ich parametrem jest bezpieczeństwo, które jest silnie zdeterminowane kategorią przejazdu.

W pracy podjęto właśnie ten problem badawczy ogniskując go wokół przejazdów kolejowych kategorii D i F, dla których aktualne wytyczne projektowe silnie ograniczają wymagania w zakresie obligatoryjnych elementów bezpieczeństwa. Dodatkowo motywację podjęcia tej tematyki wzmocniły także następujące fakty:

- duża liczba wypadków dla przejazdów kolejowych kategorii D i F,
- wysokie koszty dostosowania przejazdów na wyższe kategorie (A, B, C),
- ograniczenia proceduralne, lokalizacyjne i techniczne podwyższenia kategorii przejazdów,
- ciągły wzrost natężenia ruchu na drogach ze skrzyżowaniami kolejowo-drogowymi.

Dodatkowo biorąc pod uwagę znaczne ograniczenia techniczne budowy bezpiecznych przejazdów kolejowych kategorii A lub B podjęto próbę weryfikacji możliwości wykorzystania autonomicznych systemów wykrywania przejeżdżającego pojazdu szynowego, który nie będzie uzależniony od aktualnych systemów bezpieczeństwa i monitorowania ruchu pojazdów w układach torowych. Dlatego przeprowadzono rozległe badania dotyczące możliwości zastosowania sygnałów drganiowych do celu detekcji (wykrywania) zbliżającego się pojazdu szynowego. W treści pracy zamiennie pojawiać się będą słowa wykrycie i detekcja, co wynika z powszechnego stosowania w branży transportowej słowa pochodzenia anglojęzycznego detekcja lub detektor. Jednak Autor chciał zwrócić uwagę iż językowo poprawnie należałoby stosować każdorazowo polskie słowo wykrycie (wykrywanie).

Z uwagi na doświadczenie zawodowe autora rozprawy doktorskiej oraz działalność projektowo-wdrożeniową promotora określono silnie użyteczny charakter pracy. Jako dodatkowy cel postawiono także wdrożenie uzyskanych wyników badań naukowych w formie urządzenia lub systemu detekcji. Wszystko to sprawia, że już na etapie planowania badań, ich realizacji oraz analizy wyników uwzględniane były aspekty i potencjał aplikacyjny.

## ROZDZIAŁ 1 - BEZPIECZEŃSTWO W TRANSPORCIE KOLEJOWYM

Bezpieczeństwo w transporcie stanowi istotny obszar badań naukowych w tej dziedzinie w Polsce i na świecie. Znaczna większość prac dotyczy bezpieczeństwa w transporcie drogowym, z uwagi na dominujący udział tej gałęzi transportu. Główne kierunki badań skierowane są na poprawę bezpieczeństwa w transporcie pasażerskim. Producenci samochodów pasażerskich oraz środków transportu komunikacji zbiorowej prześcigają się we wprowadzaniu nowych technologii poprawiających bezpieczeństwo podróżnych i pieszych. Prace skupiają się głównie nad automatyzacjami procesów kierowania i prowadzenia pojazdów eliminujących niedoskonałości ludzkich zmysłów. Nowo wdrażane systemy sterują niemal autonomicznie pojazdami ograniczając do minimum ingerencje człowieka [40]. Drugi kierunek prac to bezpieczeństwo bierne, w ujęciu minimalizacji skutków wypadków w kontekście ludzi tj. kierowców, pasażerów jak i pieszych [78]. Stałe zwiększanie stref zgniotu, dodatkowe zabezpieczenia amortyzujące uderzenia oraz sztywna „klatka bezpieczeństwa” znacznie podnoszą szanse zachowania zdrowia i życia podczas samego wypadku [90]. W przypadku bezpieczeństwa czynnego główne prace skupiają się na maksymalnym ograniczeniu możliwości wystąpienia zdarzeń wypadkowych przez takie sterowanie pojazdem oraz potokami ruchu aby w maksymalny sposób ograniczyć prawdopodobieństwo możliwych do wystąpienia sytuacji kolizyjnych [35]. Do prac tych angażowane są całe jednostki badawcze [40]. Opracowywane są nowoczesne systemy oparte o techniki dotychczas wykorzystywane w przemyśle wojskowym takie jak mikrofalowe radary lidar [61]. Technika ta znajduje zastosowanie również w pozostałych gałęziach transportu. Przykładem zastosowania w/w techniki są aktualnie prowadzone prace nad zastosowaniem technik radarowych łączących bezpieczeństwo pieszych i kierowców wykorzystane podczas wyjeżdżania czy wychodzenia rowerzystów i pieszych zza wielkogabarytowych pojazdów takich jak ciężarówki, autobusy itp. Kolizje w takim przypadku najczęściej mają miejsce w wyniku wtargnięcia w/w rowerzystów lub pieszych np. przy opuszczaniu autobusu i przechodzeniu w ich pobliżu na drugą stronę ulicy tak w terenie zabudowanym jak i poza nim. Należy zwrócić uwagę, że znaczna część tych systemów bezpieczeństwa bazuje lub silnie zależy od skutecznego wykrycia (detekcji) pojazdu lub człowieka w określonej strefie obserwacji [32, 34]. Stąd należy wnioskować, że kluczowym etapem dla projektowanych systemów bezpieczeństwa jest wykrywanie.



Na podstawie badań przedstawionych w [40,61,90] określono następujące wskaźniki zagrożeń śmiertelnych na skutek wypadków, jako liczbę zabitych w wypadkach na 1 mln pojazdokilometrów dla różnych gałęzi transportu:

- w transporcie drogowym 0,95,
- w transporcie wodnym 0,25,
- w transporcie powietrznym 0,035,
- w transporcie kolejowym 0,035.

Wg raportów KG Policji na temat wypadków drogowych z lat 2013 do 2017 tylko w 2013 roku odnotowano 9 489 wypadków z udziałem osób pieszych (26,5% ogółu), w których zginęło 1 147 osób (34,2% ogółu), a 9 004 odniosły obrażenia ciała (20,4% ogółu) [137].

Ogólnie wypadki w transporcie dzielimy na :

- lotnicze
- kolejowe
- drogowe
- morskie

W niniejszej pracy skupiono się głównie na wypadkach w ruchu kolejowo-drogowym czyli wszelkich zdarzeniach z udziałem zarówno pojazdów kolejowych jak i uczestników ruchu drogowego.

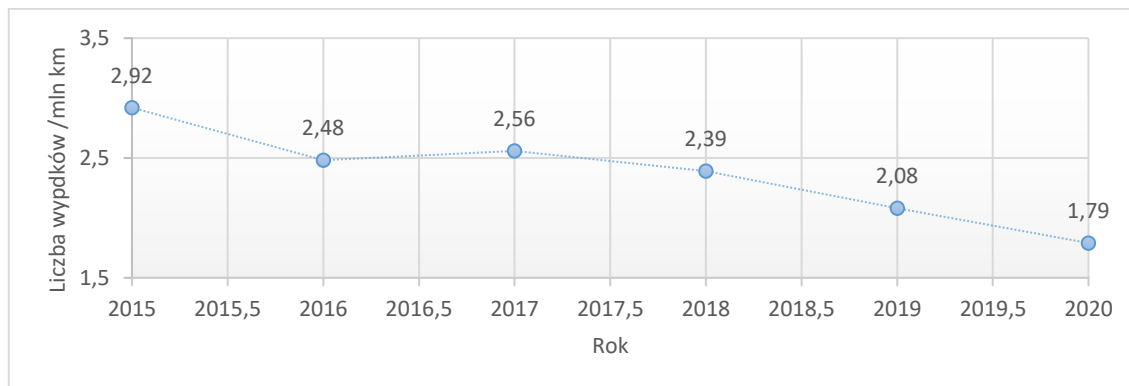
Ogólnie w roku 2020 odnotowano 23540 wypadków drogowych, z czego rannych zostało 26463 osoby a zabitych 2491. Największą liczbę stanowiły wzajemne najechania pojazdów – łącznie 12414 zdarzeń, co daje łącznie ponad 50% wszystkich zdarzeń. Rannych w wyniku ww. kolizji odnotowano 15072 osób, co stanowiło blisko 57% wszystkich rannych w roku 2020. Zginęło ponad 1000 osób, tj. ponad 43% z wszystkich ofiar śmiertelnych w roku 2020. Kolejnym najczęściej występującym zdarzeniem, z 624 ofiarami śmiertelnymi (25,1% z wszystkich ofiar) oraz 4651 osobami rannymi (17,6%), stanowiły najechania na pieszego. Zdarzeń takich odnotowano ponad 5000, co stanowiło ponad 21% wszystkich odnotowanych wypadków. Niestety głównym czynnikiem decydującym o bezpieczeństwie w ruchu drogowym jest człowiek. Blisko 90% wszystkich wypadków spowodowanych zostało z winy kierujących. Piesi byli przyczyną 1385 wypadków, co stanowi 5,9% ogółu. Niestety o ile wypadków z winy kierujących było najwięcej, to największą liczbę zabitych stanowili piesi – ponad 22%, przy 10% z grupy kierujących.

Do głównych przyczyn ww. wypadków zaliczyć należy:

1. Nieustąpienie pierwszeństwa – 24% z ogółu.
2. Niedostosowanie prędkości do warunków drogowych – 23%.
3. Nieustąpienie pierwszeństwa pieszemu na przejściu – 10%.

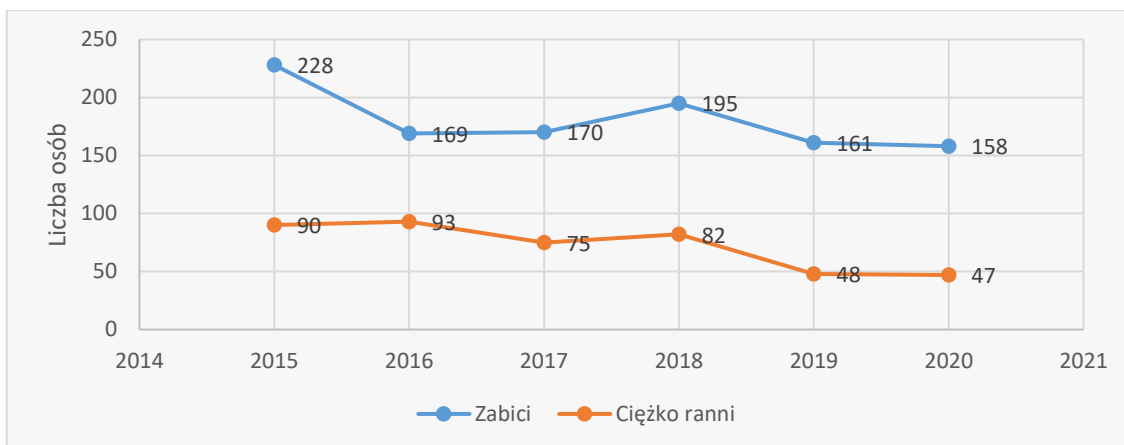
Wiodącymi sprawcami wypadków byli mężczyźni – blisko 75% i to głównie osoby w przedziale pomiędzy 18 a 24 lata (18% sprawców na 10000 populacji). Główną przyczyną wypadków było niedostosowanie prędkości do warunków panujących na drodze. Najwyższe liczby zdarzeń miały miejsce w okresach letnich, gdzie sprawcy poruszali się ze znacznie większą średnią prędkością. Do największej liczby zdarzeń dochodziło w godzinach pomiędzy 14 a 19, czyli w okresie popołudniowego szczytu komunikacyjnego.

Dokonując analizy kolejnej grupy wypadków, tj. kolejowych, zdecydowanie uległy one zmniejszeniu w stosunku do lat ubiegłych. W 2020 roku odnotowano 425 wypadków, w tym 6 poważnych, co stanowi o blisko 19% mniej w stosunku do roku 2019. Przyczynę ww. spadków wg Urzędu Transportu Kolejowego upatruje się w znacznym spadku przewozów kolejowych wynikających z okresu pandemii. Dlatego też w roku 2020 wskaźnik wypadków był najniższy w historii analiz przeprowadzanych przez Urząd Transportu Kolejowego.



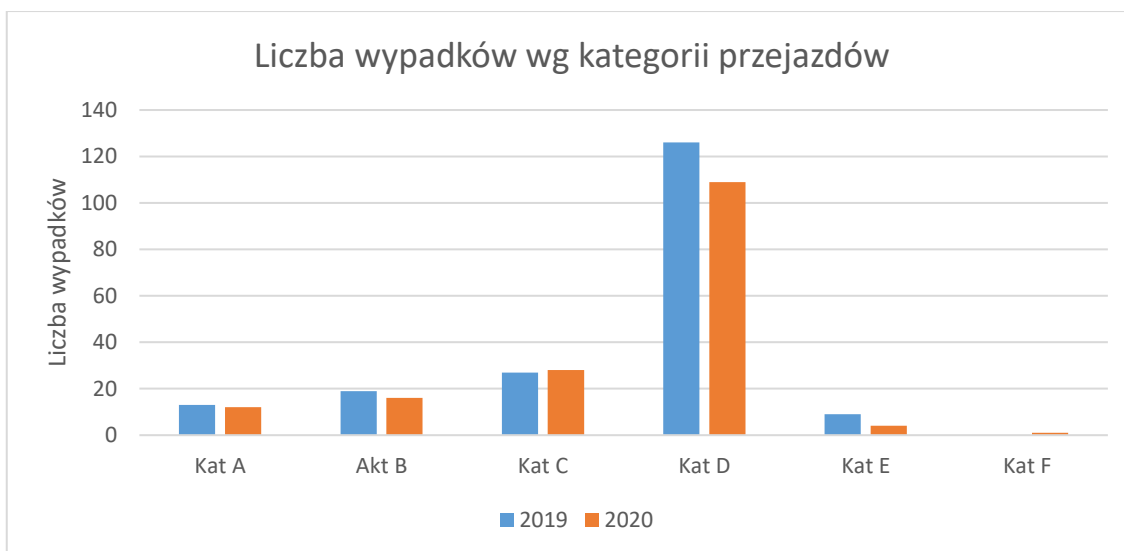
Rys. 1 Liczba wypadków w okresie pomiędzy 2015 a 2020 rokiem w przeliczeniu na mln km [137].

Najwięcej wypadków, podobnie jak w ostatnich latach, odnotowano na przejazdach kolejowo-drogowych. W 2020 r. zarejestrowano 170 takich zdarzeń na liniach kolejowych w porównaniu do 199 w roku 2019 r. Generalnie na styku kolej – otoczenie odnotowano 332 wypadki, tj. ponad 78% wszystkich zarejestrowanych zdarzeń do 93 wypadków w ramach grupy kolejowej. Podobnie jak w transporcie drogowym zarejestrowany został spadek zarówno liczby rannych jak i zabitych w porównaniu z latami ubiegłymi.



Rys. 2 Liczba ofiar na przejściach kolejowych w okresie pomiędzy 2015 a rokiem 2020 [137].

Spadek liczby zdarzeń zarejestrowano również na przejściach kolejowych i to niemal większości kategorii. Wyjątkiem były kategoria C oraz F. Stanowią one jednak zaledwie 16% wszystkich zdarzeń, gdzie na pierwsze miejsce z największym spadkiem wysunęły się zdarzenia wypadkowe na przejazdach kategorii D, czyli bez zabudowanej automatyki kolejowej. Na przejazdach tych odnotowano spadek przekraczający 13%, co jest dobrą wiadomością uwzględniając liczę tych przejazdów stanowiącą ponad 58% wszystkich przejazdów kolejowych w Polsce.



Rys. 3 Liczba wypadków na poszczególnych kategoriach przejazdów kolejowych w latach 2019-2020 [137].

W wypadkach kolejowych w ubiegłym roku zginęło łącznie 161 osób (158 na styku kolejotoczenie oraz 3 osoby w ramach grupy kolejowego). Na przejazdach kolejowodrogowych i przejściach przez tory w 2020 r. zginęło 47 osób, czyli o ponad 21% mniej

niż w roku 2019 (60 osób zabitych). Analizując te dane należy jednak uwzględnić spadki w ruchu kolejowym na skutek panującej w 2020 roku pandemii.

### **1.1 Zasady zapewnienia bezpieczeństwa w transporcie kolejowym**

Stale zmieniające się otoczenie społeczne i prawne bezpośrednio oddziałują na całą branżę kolejową, która to z kolei próbuje pomimo trudności finansowych oraz organizacyjnych związanych ze stałym, postępującym podziałem struktury kolejowej oraz stałą postępującą degradacją infrastruktury nadążać za niejednokrotnie narzuconym tempem zmian.

Bezpieczeństwo w branży kolejowej to nie tylko bezpieczeństwo wynikające z prawa czy z przepisów. Bezpieczeństwo to również urządzenia bezpośrednio odpowiedzialne za zabezpieczenie np. przejazdów kolejowych, ale także i bezpieczeństwo w projektowaniu i ich zabudowie. Niebagatelne znaczenie ma również fakt określonych nawyków u samych pracowników kolei oraz uczestnikach ruchu (pasażerów i maszynistów) i pieszych. Bezpieczeństwo rozumiane pod kątem kolei to wiele zagadnień, z których tylko kilka zostało w niniejszej pracy poruszonych.

Każde państwo posiada własne struktury zarządcze kolei odpowiedzialne, między innymi za procesy bezpieczeństwa związane z ruchem pociągów i oddziałującym otoczeniem. W Polsce za bezpieczeństwo kolei odpowiadają poszczególne branże od energetycznej przez drogową i automatykę aż po samych przewoźników. Istotną funkcję w tym łańcuchu pełnią również sami producenci urządzeń i pojazdów kolejowych, w coraz większym stopniu ponoszący odpowiedzialność za bezpieczne działanie ich wyrobów w całym cyklu życia. Nadzór na wyrobami pełni w Polsce np. Urząd Transportu Kolejowego, zajmujący się m.in. bezpieczeństwem i regulacją ruchu kolejowego. Weryfikuje on zarządców infrastruktury w zakresie utrzymania i modernizacji linii kolejowych zgodnie z europejskimi i krajowymi normami, a ponadto nadzoruje aby przewozy na kolei wykonywane były przez przewoźników gwarantujących odpowiednie poziomy bezpieczeństwa [136].

Każdy polski zarządca infrastruktury oraz każdy przewoźnik dysponuje własnym wachlarzem instrukcji, zaleceń i innych dokumentów obligujących go do zachowania bezpieczeństwa w obszarze za jaki odpowiada (np. w automatyce kolejowej).

Z uwagi przynależności Polski do UE obowiązują również wspólnotowe rozwiązania w zakresie bezpieczeństwa w ruchu kolejowym. W ramach wspólnego rynku w UE

zdecydowano o utworzeniu spójnego systemu europejskiego transportu kolejowego. Głównym założeniem ww. systemu było usunięcie barier ograniczających możliwość bezgranicznego ruchu jak i zwiększenie bezpieczeństwa transportu. W tym celu, na podstawie rozporządzenia nr 881/2004 Parlamentu Europejskiego i Rady z 29 kwietnia 2004 r., została utworzona Europejska Agencja Kolejowa ERA, będąca jednym z wielu organów Unii Europejskiej oraz posiadająca osobowość prawną. Agencja ta ma możliwość działań prawnych w każdym państwie członkowskim UE w granicy prawa danego kraju [127].

Rozporządzenie 881/2004 to jeden z czterech dokumentów UE wchodzących w skład tzw. II pakietu kolejowego. Do pozostałych 3 należą:

1. dyrektywa 2004/49/WE w sprawie bezpieczeństwa kolei, w sprawie przyznawania licencji przedsiębiorstwom kolejowym oraz w sprawie alokacji zdolności przepustowej infrastruktury kolejowej i pobierania opłat za użytkowanie infrastruktury kolejowej oraz przyznawania świadectw bezpieczeństwa;
2. dyrektywa 2004/50 WE w sprawie interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości i w sprawie interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnej [18]
3. dyrektywa 2004/51/WE w sprawie rozwoju kolei Wspólnoty.

W wyniku wewnętrznych krajowych bądź wewnątrzzakładowych przepisów podczas wdrażania ww. dyrektyw powstały w Polsce, na skutek restrukturyzacji PKP, podmioty kolejowe odpowiedzialne za budowę, serwis oraz utrzymanie infrastruktury kolejowej zobowiązane do opracowywania i wdrażania systemów zarządzania gwarantujących im stały i ciągły przegląd stanu bezpieczeństwa.

Dalsza praca nad bezpieczeństwem branży wymaga nowych rozwiązań i ogromnej pracy i wyzwania stojących przed zarządcami kolejowymi w Polsce. Nowa Ustawa o Transporcie Kolejowym, wynikająca z Dyrektywy 2004/49 o bezpieczeństwie kolejowym przekształcona w drodze przyjęcia Dyrektywy PE i Rady (UE) 798/2016 w sprawie bezpieczeństwa kolei (DZ.U. UE L138/102 z 26.5.2016), określa przykładowo w art. 16, ust. 1. konieczność ustanowienia przez każde państwo członkowskie władzy bezpieczeństwa, którą może być np. ministerstwo transportu. Władza ta musi być niezależna pod względem organizacyjnym, prawnym i decyzyjnym od jakiegokolwiek firmy kolejowej działającej na terytorium danego państwa. Podobnie i organ dochodzeniowy wg, art. 21, ust. 1 musi być niezależny pod względem organizacyjnym,

prawnym i decyzyjnym oraz musi być funkcjonalnie niezależny od władzy bezpieczeństwa i regulatorów kolejowych. Art.8, ust.1. te same dyrektywy zobowiązują Państwa członkowskie do ustanowienia krajowych przepisów bezpieczeństwa i zapewnienia ich publikacji oraz dostępności dla wszystkich zarządców infrastruktury, przedsiębiorstw kolejowych, podmiotów ubiegających się o uzyskanie świadectwa certyfikacji w zakresie bezpieczeństwa i autoryzacji w zakresie bezpieczeństwa w języku zrozumiałym dla wszystkich, których dotyczą te przepisy. Wg Art. 9, ust. 1. zarządcy infrastruktury oraz firmy kolejowe zobowiązane są do ustanowienia własnych systemów zarządzania bezpieczeństwem w celu zapewnienia, że ich system kolejowy jest zgodny z wymaganiami krajowych przepisów bezpieczeństwa i wymaganiami dotyczącymi bezpieczeństwa. Wg Art. 10, ust. 1. określono, że aby uzyskać dostęp do infrastruktury wszyscy użytkownicy muszą posiadać świadectwo certyfikacji w zakresie bezpieczeństwa. Z kolei w art. 11, ust. 1. wskazano, że w celu dopuszczenia do zarządzania i eksploatacji infrastruktury kolejowej, zarządca infrastruktury musi uzyskać autoryzację w zakresie bezpieczeństwa od władzy bezpieczeństwa w kraju członkowskim, w którym jest zarejestrowany [126].

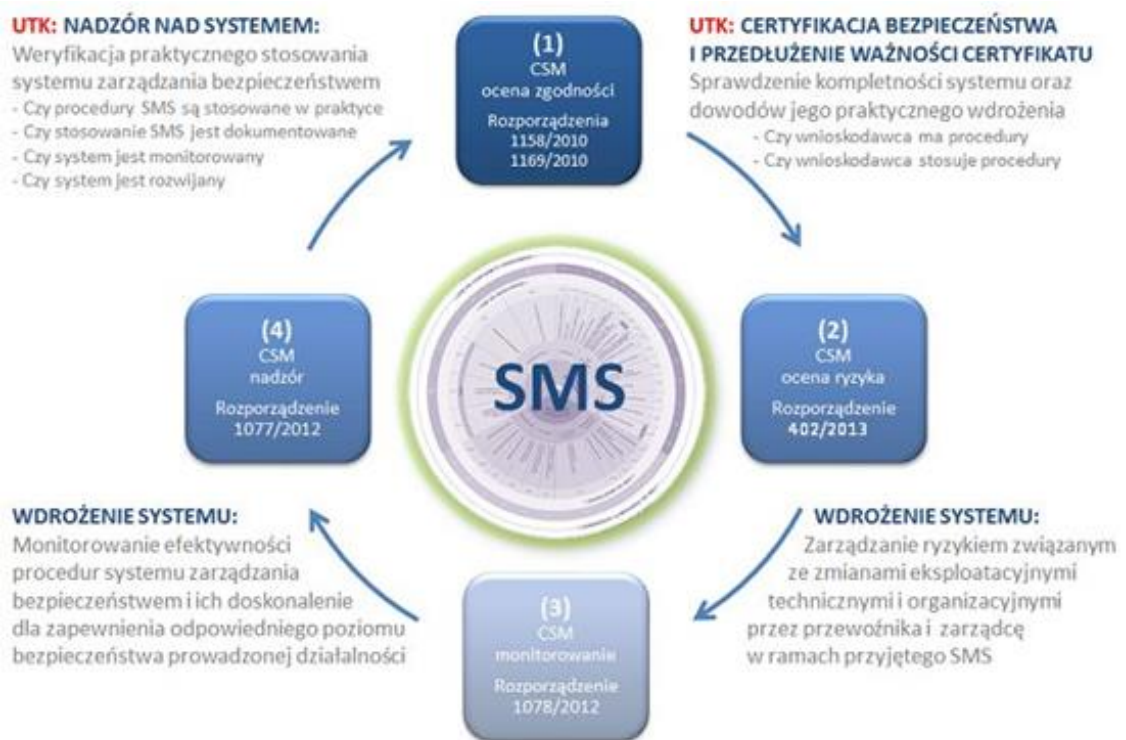
Bezpieczeństwo w ujęciu produktowym podzielić można na następujące zagadnienia:

1. Bezpieczeństwo w projektowaniu i produkcji,
2. Bezpieczeństwo w zabudowie,
3. Bezpieczeństwo w eksploatacji,
4. Bezpieczeństwo w produkcji.

Projektowanie wyrobów przeznaczonych na rynek kolejowy, w aspekcie bezpieczeństwa, wymaga od biur projektowych czy samych producentów przyjęcia odpowiednich procedur bezpośrednio wynikających z wymagań zarządców infrastruktury. W październiku 2015 r. zarząd PKP wdrożył do stosowania bardzo istotną procedurę Systemu Zarządzania Bezpieczeństwem SMS-PW-17 „Dopuszczanie elementów podsystemów i technologii przeznaczonych do stosowania na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP PLK S.A.”. W wyniku tej procedury utworzona została lista produktów, na zastosowanie których wymagane jest dopuszczenie do stosowania na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP PLK S.A.. Wszystkie wyroby, podlegające pod ww. procedurę eksploatowane na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP PLK S.A., muszą posiadać ważne dopuszczenie do stosowania wydane przez właściwego przedstawiciela zarządu PKP PLK S.A. Produkty

niepodlegające procedurze SMS-PW-17, dopuszczane są do eksploatacji zgodnie z zasadami zawartymi w „Instrukcji oceny, kwalifikacji wykonawców oraz dopuszczenia materiałów w PKP PLK S.A.”, stanowiącej załącznik do Polityki Korporacyjnej Zakupów PKP PLK S.A. [127].

Generalnie system certyfikacji bezpieczeństwa zarówno przewoźników kolejowych jak i zarządców infrastruktury kolejowej zakłada, że pomiędzy procesem certyfikacji a procesem nadzoru występuje stała wymiana informacji i uwag o zidentyfikowanych nieprawidłowościach związanych z jego funkcjonowaniem. Informacje te, zebrane podczas procesu certyfikacji, stanowią podstawowy zakres działań związanych z nadzorem, natomiast uwagi zebrane w ramach procesu kontroli mają bezpośredni wpływ na proces odnawiania ważności certyfikatów i autoryzacji bezpieczeństwa [136]. Na rysunku 4 przedstawiono schemat tego procesu.



Rys. 4 Schemat przebiegu procesów certyfikacji i nadzoru [136].

Proces projektowania regulują odpowiednie ustawy, jak np.:

- Ustawa Prawo Budowlane (tekst jednolity Dz. U. z 2010r. nr 243 poz. 1623 z późn. zm.)
- Ustawa o Transporcie Kolejowym (tekst jednolity Dz. U. z 2007r. nr 16 poz. 94 z późn. zm.)

,oraz odpowiednie rozporządzenia jak np.:

- z dnia 26.02.1996r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać skrzyżowania linii kolejowych z drogami publicznymi i ich usytuowanie (Dz. U. z 1996 nr 33 poz. 144 z późn. zm.),
- z dnia 3.07.2003r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunkach ich umieszczania na drogach (Dz. U. z 2003 nr 220 poz. 2181), odpowiednie wymagania zarządców infrastruktury i innych jak np.:
- Instrukcja WTB-E10 – Wytyczne techniczne budowy urządzeń sterowania ruchem kolejowym w przedsiębiorstwie PKP stanowiące załącznik do zarządzenia nr 43 Zarządu PKP z dnia 09.09.1996r z późniejszymi zmianami,
- Wymagania bezpieczeństwa dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym – DG PKP KA nr KA2b-5400-01/98 z dnia 06.02.1998r.,
- Praca Instytutu Kolejnictwa nr 4430/10 z 2011r. - Określenie dopuszczalnych poziomów i parametrów zakłóceń dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym.

Dodatkowo wymienić można pozostałe przepisy kolejowe jak np. instrukcja sygnalizacji Ie-1 (E-1) czy procedury SMS-PW-17 - dopuszczanie elementów podsystemów i technologii przeznaczonych do stosowania na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP PLK S.A. [98, 121, 122, 126].

Kolejny poziom bezpieczeństwa dotyczy zabudowania i uruchamiania urządzeń infrastruktury kolejowej. Podobnie jak w projektowaniu wszystkie działania na obszarach kolejowych muszą być realizowane wg odpowiednich ustaw, norm, przepisów czy instrukcji kolejowych. Do najważniejszych należą np. Ustawa Prawo Budowlane (tekst jednolity Dz. U. z 2010r. nr 243 poz. 1623 z późn. zm.). W przypadku instrukcji najważniejsze to Ie-6 (WOT-E12) - wytyczne odbioru technicznego oraz przekazywania do eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym oraz instrukcja Ie-100a - warunki bezpiecznej instalacji i eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP PLK S.A.

Kolejny aspekt bezpieczeństwa w transporcie kolejowym związany jest z eksploatacją i utrzymaniem, czyli całego cyklu praktycznego życia produktu (tj. od chwili jego zabudowy i uruchomienia). W tym aspekcie również uwarunkowane jest przestrzeganiem odpowiednich zasad i reguł. Do najistotniejszych należą instrukcja Ie-12 (E-24) - instrukcja konserwacji, przeglądów oraz napraw bieżących urządzeń sterowania ruchem kolejowym, Ir-7 - instrukcja obsługi przejazdów kolejowo-

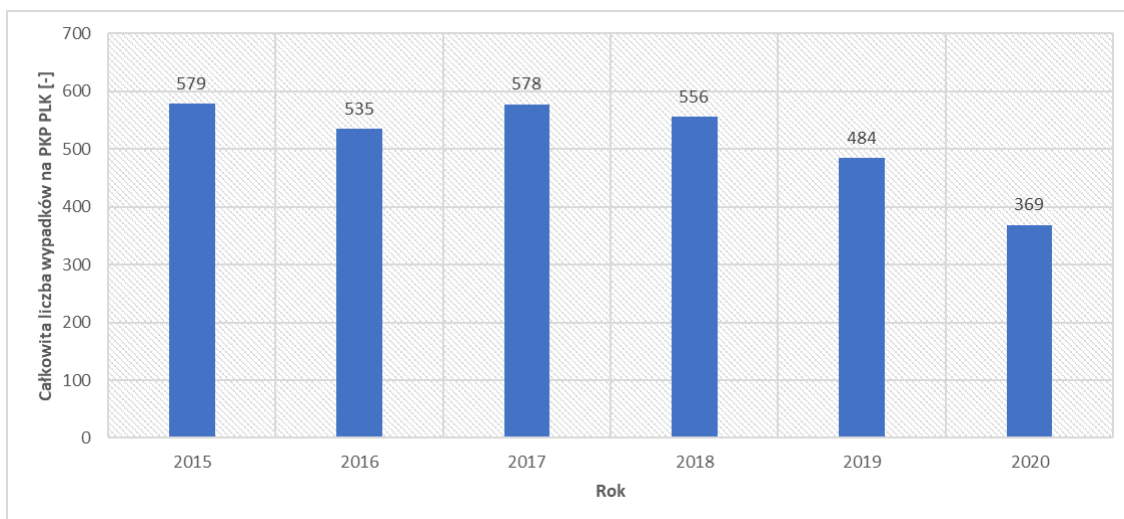


drogowych i przejść z dnia 14 czerwca 2016 roku oraz Ie-100a - warunki bezpiecznej instalacji i eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP PLK S.A.

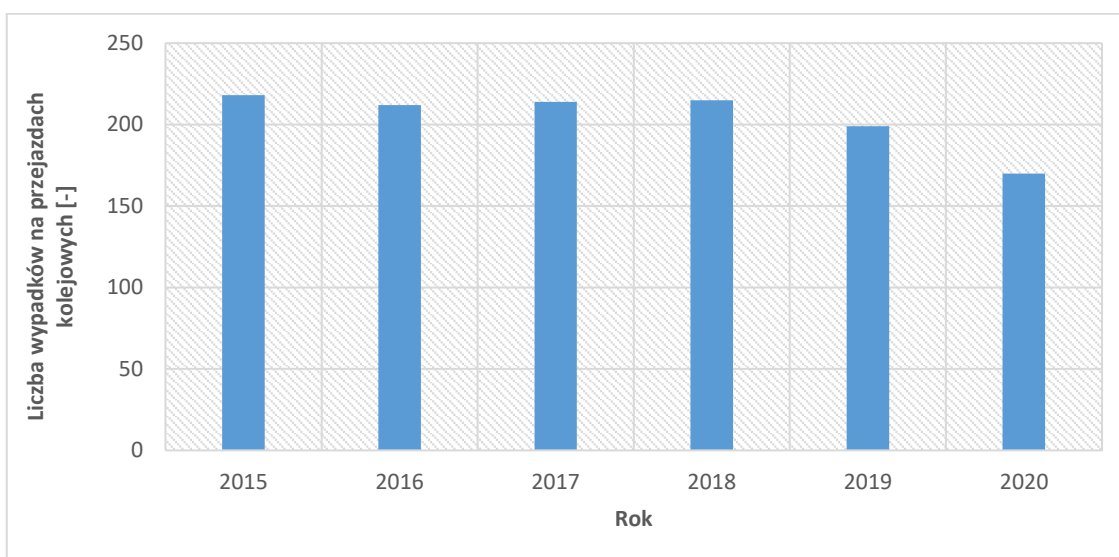
W transporcie kolejowym wyróżnia się także pojęcie bezpieczeństwa wyrobu (wytworu) lub produktu. Każdy wyrób dopuszczony do eksploatacji na terenie sieci PKP PLK winien przejść cykl badań i testów realizowanych jeszcze w fazie produkcji a związanych z jego bezpiecznym zachowaniem w całym cyklu jego życia. Część wyrobów uznanych za istotne wymaga następnie przeprowadzenia skomplikowanego procesu certyfikacji, jak na przykład dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym z grupy sygnalizacji przejazdowej kategorii A, B oraz C. Pomimo stosowania zaawansowanych rozwiązań technicznych, przyjętych podczas ich projektowaniu, produkcji a następnie zabudowie i eksploatacji oraz najwyższych standardów bezpieczeństwa systemy te nie zawsze są w stanie zapobiec wypadkom. W przypadku przejazdów z aktywną sygnalizacją zbliżającego się pociągu wiele wypadków związanych jest z niezastosowaniem się uczestników ruchu do ostrzeżeń sygnalizowanych przez wymienione urządzenia.

## **1.2 Analiza liczby wypadków na przejazdach kolejowych**

Niewątpliwie najbardziej newralgicznym punktem infrastruktury kolejowej w ujęciu bezpieczeństwa ruchu są węzły kolejowo-drogowe. Specyfika przejazdów kolejowo-drogowych, które krzyżują strumienie potoków ruchu drogowego i szynowego wpływa na duże ryzyko wypadku. Statystyki wypadków w transporcie kolejowym wskazują znaczny coroczny spadek liczby wszystkich zdarzeń na polskich liniach kolejowych (rysunek nr 5). Podobnie na przejazdach kolejowo-drogowych (rysunek nr 6) w każdym kolejnym roku odnotowuje się spadek liczby zdarzeń co niewątpliwie wynika z realizowanych przez PKP inwestycji poprawiających bezpieczeństwo oraz szeroko zakrojonych kampanii uświadamiających społeczeństwo o konieczności zachowania szczególnej ostrożności podczas pokonywania skrzyżowań kolejowo-drogowych.

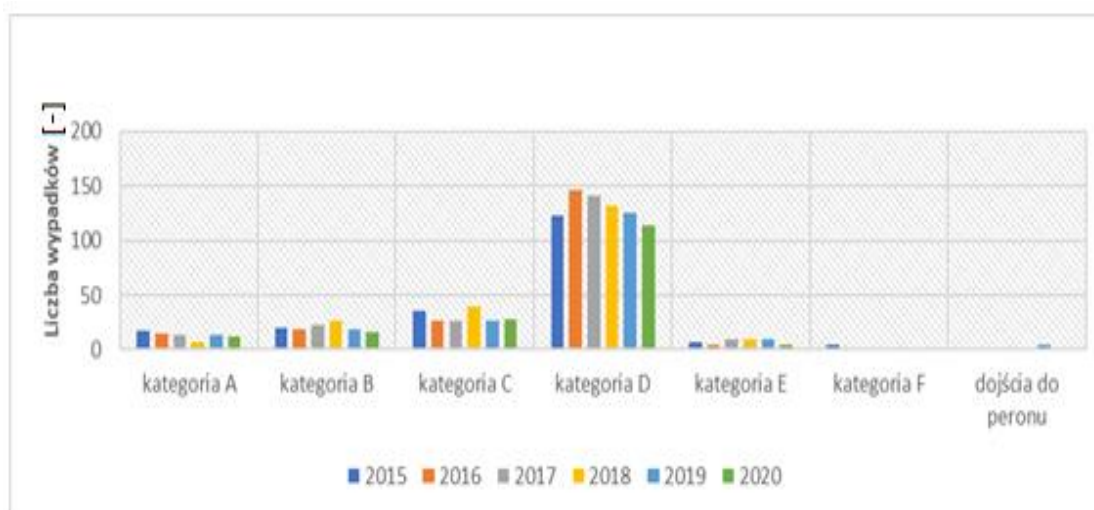


Rys. 5 Całkowita liczba wypadków na PKP PLK w latach 2015-2020 [137].



Rys. 6 Liczba wypadków na przejazdach kolejowo-drogowych w latach 2015-2020 [137].

Z uwagi na zdefiniowany problem badawczy istotne są także statystyki wypadków w podziale na kategorie przejazdów. Jak widać na rysunku nr 7 zdecydowanie najwięcej wypadków odnotowuje się na przejazdach kategorii D, choć pocieszający jest fakt, że liczebność tych zdarzeń ma tendencję spadkową w latach 2017-2020.



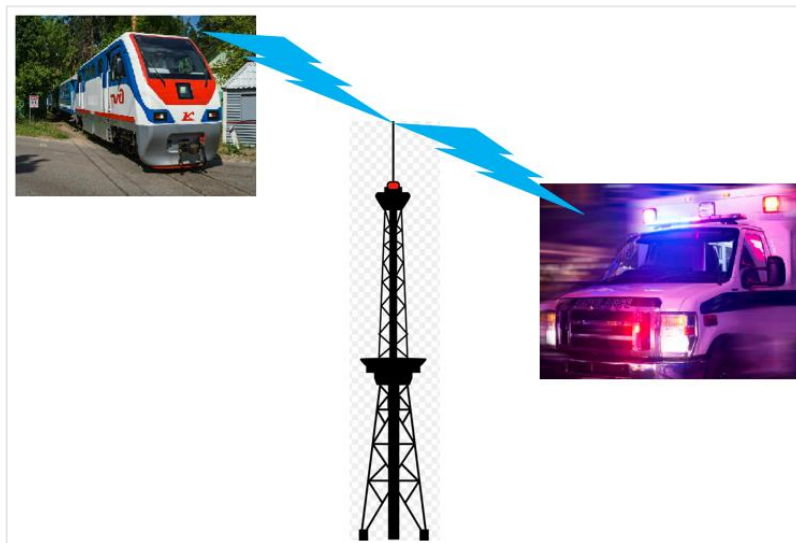
Rys. 7 Całkowita liczba wypadków na przejazdach kolejowo-drogowych w latach 2015-2020 w podziale na kategorie przejazdu [137].

### 1.3 Działania w celu poprawy bezpieczeństwa przejazdów kolejowych

Według Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 26 lutego 1996 r. każdy przejazd kolejowy to skrzyżowanie linii kolejowej z drogą publiczną tak na jednym jak i różnych jej poziomach. Działania mogące poprawić bezpieczeństwo na przejazdach kolejowych a dokładniej przyczynić się do spadku liczby ofiar to:

- odseparowanie potoków ruchu przez przebudowanie przejazdów na skrzyżowanie wielopoziomowe;
- przekwalifikowanie przejazdu na inną kategorię (np. taką, której wskaźnik bezpieczeństwa jest wyższy od istniejącego) [71];
- zastosowanie na przejazdach wyposażonych w samoczynną sygnalizację przejazdową tarcz ostrzegawczych przejazdowych;
- ciągle zwiększanie świadomości kierowców na temat przejazdów (np. akcja typu „Bezpieczny przejazd”, promująca przestrzeganie przepisów i odpowiednie zachowanie na skrzyżowaniach);
- budowa nowych przejazdów kolejowych;
- opracowanie i wdrożenie nowych bardziej niezawodnych systemów detekcji pojazdów oraz systemów informacji o zbliżającym się pociągu względnie o zalegającym na przejeździe kolejowym np. uszkodzonym samochodzie [16, 45].

W odniesieniu do ostatniego zagadnienia istotna, poza wykryciem nadjeżdżającego pojazdu szynowego i uruchomienia sygnalizacji, jest detekcja poruszających się lub nieporuszających się obiektów na samym przejeździe i odpowiednio wczesne ostrzeżenie maszynisty. Bardzo ważne wydaje się przy tym możliwość identyfikacji pieszego jak również śledzenie jego przemieszczania się w obszarze przejazdu kolejowego. Na chwilę obecną wydaje się, że najodpowiedniejszą techniką dla tego rodzaju zabezpieczeń jest rejestracja i interpretacja obrazu wideo lub informacji radarowej, a całokształt badań i wdrożeń realizujących wzrost bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych z wykorzystaniem tych systemów określono mianem HRI (ang. Highway-Railroad Intersection) [15, 16, 79]. Za przykład posłużyć może system VPAS (ang. Vehicle Proximity Alert System), którego działaniem polega głównie na przekazaniu do uczestnika ruchu kołowego informacji o zbliżającym się pociągu [37]. Przykład systemu dynamicznego ostrzegania pojazdów uprzywilejowanych o zbliżającym się do przejazdu kolejowo-drogowego pojeździe szynowym przedstawia rysunek [138].



Rys. 8 Systemów przekazywania kierowcy informacji o zbliżającym się do skrzyżowania pojeździe szynowym [138].

W zakresie działań wspomagających bezpieczeństwo przejazdów kolejowych niewątpliwie istotne znaczenie ma procedura kategoryzacji przejazdu, z której bezpośrednio wynika wymagany poziom i zakres systemów bezpieczeństwa. W aktualnie obowiązującym rozporządzeniu z dnia 20 października 2015 r. przedstawione zostały ogólne warunki techniczne dla przejazdów ruchu kolejowo-drogowego i przejść, jakim odpowiadać powinny skrzyżowania linii kolejowych oraz bocznic kolejowe z

drogami. Tabela 1 przedstawia kategorie przejazdów kolejowych występujących w Polsce.

Tabela 1. Kategorie przejazdów kolejowych wg rozporządzenia z dnia 20 października 2015 r.

Lp.	Kat	Opis (przeznaczenie)
1.	A	przejazdy kolejowo-drogowe, na których ruch drogowy jest kierowany: a) przez uprawnionych pracowników zarządcy kolei lub przewoźnika kolejowego, posiadających wymagane kwalifikacje, b) przy pomocy sygnałów ręcznych albo systemów lub urządzeń przejazdowych wyposażonych w roгатki zamykające całą szerokość jezdni
2.	B	przejazdy kolejowo-drogowe, na których ruch drogowy jest kierowany przy pomocy samoczynnych systemów przejazdowych, wyposażonych w sygnalizację świetlną i roгатki zamykające ruch drogowy w kierunku: a) wjazdu na przejazd albo b) wjazdu na przejazd i zjazdu z przejazdu;
3.	C	przejazdy kolejowo-drogowe, na których ruch drogowy jest kierowany przy pomocy samoczynnych systemów przejazdowych wyposażonych tylko w sygnalizację świetlną;
4.	D	przejazdy kolejowo-drogowe, które nie są wyposażone w systemy i urządzenia zabezpieczenia ruchu;
5.	E	przejścia wyposażone w: a) półsamoczynne systemy przejazdowe lub samoczynne systemy przejazdowe albo b) kołowrotki, barierki lub labirynty;
6.	F	przejazdy kolejowo-drogowe lub przejścia zlokalizowane na drogach wewnętrznych, wyposażone zgodnie z § 12 ust. 2.

Do kategorii A zalicza się przejazdy kolejowo-drogowe, na których:

- a. droga publiczna na jednym przejeździe przecina się więcej niż z 3 torami
- b. droga publiczna przecina się z torami, po których przejeżdżają staczane lub odrzucane podczas rozrządu wagony
- c. nie są spełnione warunki techniczne określone dla kategorii B, C lub D.

Do kategorii B zalicza się przejazdy kolejowo-drogowe obejmujące skrzyżowania linii kolejowych lub bocznic kolejowych z drogami publicznymi, na których:

- a. iloczyn ruchu na przejeździe kolejowym jest równy lub większy od liczby 150 000,
- b. linia kolejowa lub bocznic kolejowa krzyżuje się z drogą krajową.

Do kategorii C zalicza się przejazdy kolejowo-drogowe obejmujące skrzyżowania linii kolejowych z drogami publicznymi na których ruch kolejowy jest prowadzony z maksymalną prędkością poniżej 140 km/h oraz dodatkowo:

- a. iloczyn ruchu na przejeździe kolejowym jest równy lub większy od 60 000 i mniejszy od 150 000,
- b. iloczyn ruchu jest mniejszy od 60 000, a widoczność przejazdu nie odpowiada warunkom technicznym określonym dla przejazdu kolejowo-drogowego kategorii D.

Do kategorii D zalicza się przejazdy obejmujące skrzyżowania linii kolejowych z drogami, na których droga przecina nie więcej niż dwa tory główne, a w przypadku bocznic kolejowych i kolei wąskotorowych nie więcej niż trzy tory oraz:

- a. iloczyn ruchu jest mniejszy od 60 000, a ruch kolejowy jest prowadzony z prędkością mniejszą niż 120 km/h oraz są spełnione warunki widoczności,
- b. bez względu na warunki widoczności dopuszczalna prędkość pociągu na przejeździe nie przekracza 20 km/h.

Wprowadzone w rozporządzeniu pojęcie iloczyn ruchu stanowi istotny parametr w klasyfikacji i kategoryzacji przejazdów kolejowo-drogowych. Iloczyn ruchu definiowany jest jako iloczyn liczby pojazdów drogowych i szynowych przejeżdżających w ciągu doby przez określony przejazd. Iloczyn ruchu jest miarą średniodobowego natężenia ruchu drogowego i średniodobowego natężenia ruchu kolejowego. Przy obliczaniu natężenia ruchu drogowego należy uwzględniać wszystkie pojazdy przekraczające przejazd, łącznie z rowerami i motorowerami. Przy obliczaniu natężenia ruchu kolejowego należy uwzględniać wszystkie pojazdy szynowe zwyczajne i nadzwyczajne przejeżdżające przez określony przejazd.

W przypadku transportu kolejowego, jako obiektywny poziom bezpieczeństwa ruchu kolejowego, przyjęto miernik wypadków, czyli liczba wypadków przypadająca na 1 mln pociągokilometrów [40]. Dodatkowo w pracy [40] zastosowano dodatkowe wskaźniki bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych. Zaproponowano miary

indywidualnych zagrożeń bezpieczeństwa (IZBP) na reprezentatywnym przejeździe kolejowym i na przejazdach kolejowych poszczególnych kategorii, przy założeniu że w pociągu przeciętnie podróżuje 100 osób, a w pojeździe drogowym 2 osoby oraz, że na linii kolejowej średnio kursuje 20 pociągów. Z uwagi na fakt, że na przejazdach kolejowych ofiarami są w zdecydowanej większości pasażerowie samochodu, a nie pociągu, bardziej adekwatnym miernikiem indywidualnego zagrożenia jest miernik wyrażony w ofiarach śmiertelnych na osobę przejeżdżającą przez przejazd kolejowy pojazdem samochodowym w ciągu roku. W pracy [40] wyznaczono te wskaźniki na podstawie danych z 2007 roku i tak:

- dla przejść kategorii A wynosi on  $3 \cdot 10^{-10}$ ,
- dla przejść kategorii B wynosi on  $10,68 \cdot 10^{-10}$ ,
- dla przejść kategorii C wynosi on  $78,8 \cdot 10^{-10}$ ,
- dla przejść kategorii D wynosi on  $44,38 \cdot 10^{-10}$ .

Wynika z tego, że najbardziej niebezpieczne są przejazdy kolejowe kategorii C i D.

Podstawą systemów bezpieczeństwa przejazdów kolejowo-drogowych są systemy sygnalizacji przejazdowej, służące do zabezpieczenia ruchu na skrzyżowaniach znajdujących się na tym samym poziomie dróg kołowych z liniami kolejowymi. Są one uruchamiane, w większości przypadków, przez pojazdy szynowe wykrywane za pomocą czujników zlokalizowanych w strefach oddziaływania. Współczesne urządzenia detekcji sygnalizacji przejazdowych, ze względu na ich unifikację, znajdują zastosowanie nie tylko w systemach sygnalizacji przejazdowej ale również w wielu innych obszarach sterowania ruchem kolejowym, jak np. blokady samoczynne czy systemy stacyjne. Współczesne czujniki umożliwiają rozpoznanie kierunku jazdy pojazdów szynowych, wykazują ponadto znacznie wyższą odporność, w stosunku do poprzednich wersji, na wyładowania atmosferyczne i przepięcia oraz są odporne na zimowe zasolenie dróg, a także wykazują znacznie niższe koszty utrzymania w całym cyklu ich życia. Najczęściej spotykanym systemem jest zespół urządzeń zwany systemem sygnalizacji przejazdowej. W rozporządzeniu z dnia 20 października 2015r przyjęto następujące definicje i kategorie systemów sygnalizacji przejazdowych:

- system przejazdowy jako system zainstalowany na przejeździe kolejowo-drogowym, zapewniający sterowanie i kontrolę sprawności dla urządzeń zabezpieczenia ruchu wchodzących w jego skład;

- półsamoczynny system przejazdowy jako system przejazdowy, w którym urządzenia zabezpieczenia ruchu na przejeździe kolejowo-drogowym sterowane są ręcznie przez pracownika obsługi;
- samoczynny system przejazdowy jako system przejazdowy, w którym urządzenia zabezpieczenia ruchu na przejeździe kolejowo-drogowym są sterowane samoczynnie przez jadący pociąg lub inny system sterowania ruchem kolejowym.

Sygnalizacja przejazdowa stanowi zatem zespół urządzeń tzw. system Samoczynnej Sygnalizacji Przejazdowej (SSP) służących do zabezpieczenia ruchu na przejazdach kolejowych kategorii B lub C. Służy ona przede wszystkim do zabezpieczenia ruchu na jednopoziomowych skrzyżowaniach dróg kołowych z liniami kolejowymi. Systemy SSP uruchamiane są zazwyczaj za pomocą urządzeń wykrywających pociągi zbliżające się do przejazdu, które znalazły się w strefie oddziaływania czujników koła rozpoznających ruch w ich obrębie oraz kierunek poruszania się pojazdu szynowego. Do uruchomienia SSP w starszych typach sygnalizacji przejazdowych wykorzystuje się do tej pory np. obwody torowe, ale nadal istnieje również możliwość ręcznego sterowania przejazdem np. przez dyżurnego ruchu. Dodatkowo na przejeździe zainstalowane są urządzenia ostrzegawcze, w skład których wchodzi: świetlne sygnalizatory drogowe najczęściej uzupełnione sygnałem dźwiękowym tzw. dzwonem oraz jedna lub dwie pary półrogatek. Uruchomienie sygnalizacji następuje na kilkadziesiąt sekund przed wjechaniem czoła pociągu na przejazd, a wyłączenie za ledwie po kilku sekundach od momentu zjechania ostatniej osi z przejazdu. Wszystkie wymienione działania inicjuje zastosowany system detekcji pojazdu szynowego stanowiący główny przedmiot niniejszego rozprawy doktorskiej.

Do najczęściej spotykanych w Polsce sygnalizacji przejazdowych należą:

- SSP typu COB-58
- typu COB-63
- typu SPA-1
- typu SPA-2
- typu SPA-2A
- typu SPA-2B
- typu SPA-4
- typu SPA-5
- typu NE BUE 90E PL



- typu BUES 2000
- typu RASP-4.

Każda w wyżej wymienionych sygnalizacji posiada odmienny system detekcji pojazdów szynowych. Niektóre z nich posiadają świadectwa dopuszczenia do stosowania z 2 lub więcej systemami detekcji koła jak np.: SSP typu SPA-4. Sygnalizacja ta może współpracować zarówno z systemem obwodu torowego typu EOC-1 jak również z licznikiem osi typu ELS-95 [132, 134]. Zasada działania wymienionych czujników przedstawiona została w rozdziale 3.

## **ROZDZIAŁ 2 - TEZA, CEL I ZAKRES PRACY**

Na podstawie identyfikacji problemu badawczego, analizy stanu wiedzy i wstępnych badań sformułowano następującą tezę dysertacji doktorskiej:

**Istnieje możliwość wykrycia przejazdu pojazdu szynowego na podstawie zarejestrowanych sygnałów drganiowych.**

Z uwagi na praktyczny charakter rozprawy doktorskiej weryfikacja tezy wymagała sformułowania następujących celów pracy:

### **1. Cel metodyczny:**

Opracowanie metody wykrywania zbliżającego się pojazdu szynowego przez analizę sygnałów drganiowych.

### **2. Cel użytkowy:**

Weryfikacja i ocena skuteczności oraz efektywności zaproponowanej metody w zastosowaniu praktycznym.

Jako dodatkowy cel postawiono także wdrożenie uzyskanych wyników badań naukowych w formie urządzenia lub systemu detekcji. Wszystko to sprawia, że już na etapie planowania badań, ich realizacji oraz analizy wyników uwzględniane były aspekty i potencjał aplikacyjny. Wymusiło to wielopłaszczyznowe określenie zakresu badań i pracy:

### **1. Podmiotowy:**

Badaniami objęte zostały wybrane nawierzchnie kolejowe.

### **2. Przedmiotowy:**

Badania obejmują swoim zakresem wykrycie zbliżających się pojazdów szynowych.

Przedmiotem rozważań są zagadnienia związane z zastosowaniem metod analizy drgań szyn kolejowych wymuszonych jazdą pociągu.

### **3. Przestrzenny:**

Badaniami objęte zostały Zakłady Linii Kolejowych oraz Prywatne bocznice należące do pobliskich zakładów przemysłowych.

### **4. Czasowy:**

Analizie poddano wyniki badań uzyskane w okresie 3 lat (zakładano minimum 1 rok).

W celu realizacji tak określonego zakresu badań przyjęto następujące założenia badawcze:

1. badania środowiska drganiowego wybranych elementów infrastruktury kolejowej na torze testowym przeprowadzono z zastosowaniem następujących metod:
  - metoda spadku masy uderowej (badano odpowiedzi drganiowe w określonych punktach pomiarowych szyny kolejowej);
  - metoda pomiaru odpowiedzi drganiowej na wymuszenia generowane pracą napędów zwrotnicowych, przejazdem samochodu oraz pojazdu szynowego;
2. wykonano badania identyfikacyjne właściwości propagacji fali w torze kolejowym w warunkach rzeczywistych.

### **ROZDZIAŁ 3 - SYSTEMY BEZPIECZEŃSTWA W TRANSPORCIE KOLEJOWYM**

Rozważając zagadnienie bezpieczeństwa w branży kolejowej nie można skupiać się wyłącznie na bezpieczeństwie zaimplementowanym np. w urządzeniach wykonawczych sterujących czy przytorowych. Zagadnienie bezpieczeństwa to obszar wiążący niemal wszystkich udziałowców branży a jednocześnie uczestników ruchu oddziałujących na infrastrukturę kolejową. Wśród problemów jakie występują w obszarze bezpieczeństwa kolejowego są takie, które wynikają z techniki i technologii transportu szynowego, ze stosowanych procedur i regulacji ale także z niewłaściwego podejścia pracowników do tego zagadnienia, wynikającego z braku potrzebnej wiedzy, mentalności, przyzwyczajzeń itp. Ponadto konieczność wyrobienia właściwych i zarazem bezpiecznych nawyków u uczestników ruchu drogowego może znacząco przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa w ruchu kolejowym. Czynniki decydujące o bezpieczeństwie w obszarze przejazdu kolejowego to:

- sposób informowania uczestników ruchu drogowego, o zbliżaniu się do przejazdu,
- sposób informowania uczestników ruchu drogowego, o fakcie wstrzymania ruchu kołowego na przejeździe,
- sposób informowania maszynistów o stanie zabezpieczenia przejazdu — przejazd zamknięty/otwarty dla ruchu drogowego,
- niezawodne działanie systemów detekcji pociągu,
- organizacja ruchu drogowego w obszarze przejazdu kolejowego,
- widoczność w obszarze przejazdu kolejowego,
- nawierzchnia drogi kołowej na przejeździe,
- zachowanie się uczestników ruchu drogowego przejeżdżających przez przejazdy kolejowe [82],
- na przejazdach zabezpieczonych urządzeniami obsługiwanymi przez człowieka — sposób jego informowania o konieczności zamknięcia przejazdu dla ruchu drogowego.

Z uwagi na temat rozprawy doktorskiej w dalszej części pracy szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom związanym z wykrywaniem zbliżającego się pojazdu szynowego.

### 3.1. Wykrywanie przejazdu pojazdu szynowego

Zadaniem urządzeń detekcji wykorzystywanych w systemach sygnalizacji przejazdowych jest dostarczanie sygnałów informujących o obecności pojazdu szynowego w danym miejscu oraz kierunku w jakim pojazd ten się porusza. Sygnały te są przesyłane do szafy sterującej za pomocą przewodów miedzianych a dalej przetwarzane przez sterowniki lub przekaźniki w celu uruchomienia określonych procesów SSP. Wraz z rozwojem samoczynnych sygnalizacji przejazdowych i kolei dużych prędkości postępował równolegle rozwój systemów detekcji pojazdów szynowych poczynając od czujników magnetycznych przez obwody torowe do współcześnie stosowanych liczników osi [84]. Te ostatnie są aktualnie najczęściej stosowane. Ich odporność na zakłócenia, odporność na często złą jakość szyn i podtorza, odporność na warunki atmosferyczne i ich skutki np. zasolenie przejazdu przez odśnieżarki powoduje wypieranie stosowanych dotychczas obwodów torowych [52]. Producenci w dalszym ciągu opracowują coraz nowsze sposoby wykrywania pociągów wykorzystując innowacyjną technologię jak np. radary, fotokomórki czy kamery umożliwiające detekcję pociągu po pojawieniu się go w wizjerze obiektywu [77,91, 99, 107].

Od początku istnienia kolei do najważniejszych elementów prowadzenia ruchu było zapewnienie jak największego bezpieczeństwa pasażerów lub towarów. Pomimo, że przez szereg dziesięcioleci urządzenia sterowania ruchem kolejowym podlegały stałemu rozwojowi to w ostatnich kilkunastu latach na całym świecie zaobserwowano znaczny technologiczny rozwój techniki kolejowej w tym zakresie. Modernizacje rodzimych linii kolejowych, a co za tym idzie i rozwój technologii, przyspieszył fakt przystąpienia Polski do UE. Obecny stan techniki umożliwia tworzenie nowoczesnych rozwiązań zaawansowanych technologicznie, które wpływają na podniesienie bezpieczeństwa i płynności prowadzenia ruchu na kolei i w jej otoczeniu, jak np. na przejazdach kolejowych, stacjach rozładunkowych czy zakładach przemysłowych korzystających z usług kolei z uwzględnieniem stanu technicznego eksploatowanych pojazdów [85].

Rodzimy stan techniki w zakresie systemów detekcji to rozwiązania techniczne sięgające w większości lat 50-tych. Do najczęściej spotykanych na krajowym rynku urządzeń służących detekcji pojazdów szynowych należą:

- czujnik podwójny typu EON – 6 [123],

- czujnik ELS - 3 (magnetyczny),
- czujnik magnetyczny CTI
- czujnik mechaniczny ELS-6,
- czujnik pojedynczy EOC-1,
- bez-kablowy czujnik pociągu EOC-4.

Do najnowszych na światowym poziomie technologicznym, jednak jeszcze w niewielkim procencie stosowane na polskim rynku kolejowym, należą czujniki koła tzw. liczniki osi firm:

- ELS – 95 firmy Bombardier,
- "FSSB" firmy SCHEIDT&BACHMANN,
- RSR110 firmy Frauscher [116, 117],
- Pintsch-Tiefenbach [125, 130].

### **3.2. Przegląd czujników detekcji pojazdów szynowych**

W celu analizy sposobów wykrywania przejazdu pojazdu szynowego w środowisku infrastruktury kolejowej przedstawiono syntetyczny przegląd aktualnego stanu techniki w tym zagadnieniu.

#### *Czujnik torowy EON-6*

Czujnik ten służy do kontroli niezajętości (zajętości) odcinków torowych oraz współpracy z innymi urządzeniami np. zależnościami lub informacyjnymi. Działa na zasadzie wykrycia zwarcia toków szynowych, gdy pojazd szynowy znajduje się na torze. Idea jego działania opiera się na zasadzie pracy bezzłączowych obwodów torowych wysokiej częstotliwości w zakresie 18 do 40 kHz. W jednej obudowie znajdują się dwa niezależne zespoły elektroniczne. Zespoły te zawierają zarówno nadajnik jak i odbiornik lub dwa odbiorniki działające podobnie, niezależnie od częstotliwości znamionowej.

Stosuje się dwa rodzaje zespołów elektronicznych:

- zawierający nadajnik i dwa odbiorniki,
- zawierający nadajnik i jeden odbiornik.

Nadajnik wytwarza sygnał sinusoidalny i zasila nim odcinek toru kolejowego. W określonej odległości od miejsca podłączenia nadajnika do toru przyłączone zostają odbiorniki. Część sygnału jaka wytwarzana jest przez nadajnik odbierają w/w odbiorniki. Jeżeli oś pociągu lub innego pojazdu szynowego znajdzie się w pobliżu miejsca

podłączenia nadajnika lub podłączenia odbiornika lub między miejscami ich podłączenia do toru to spowoduje to zmniejszenie sygnału odbieranego przez odbiornik. W stanie normalnym (bez pojazdu szynowego) sam odbiornik, po otrzymaniu właściwego sygnału jest w stanie wzbudzonym, zaś przy obniżonym sygnale wejściowym tzn. kiedy zakłóci go oś pojazdu szynowego następuje jego uruchomienie. W wypadku zastosowania dwóch odbiorników, tzw. czujnik podwójny, uzyskuje się dwa obwody torowe, jeden o strefie działania np. L1, a drugi o strefie działania L2. Rozwiązanie takie wykorzystuje się do stwierdzenia obecności pojazdu szynowego w obrębie działania czujnika i do określenia kierunku jego jazdy. Inne rozwiązanie to pojedynczy czujnik torowy służący np. jako czujnik wyłączający sygnalizację przejazdową, ale wówczas stosowany jest tylko jeden odbiornik.

#### *Czujnik CTI*

Zespół urządzeń oddziaływania w tym czujniku składa się z :

- Magnetoindukcyjnych głowic,
- Podwójnych podstaw mocujących i odbijaczy,
- Paneli elektroniki, oraz
- Płyty mocującej [120].

Głowica czujnika zawiera dwa niezależne układy czujnikowe. Umożliwiają one pracę czujnika jako pojedynczego lub podwójnego. Każda głowica składa się z zespołu czterech magnesów stałych umieszczonych na stalowej płycie podstawy. Korpus głowicy to aluminiowy odlew a całość zhermetyzowana jest żywiczną zalewą i silikonowym uszczelnieniem. Zadaniem układów elektronicznych umieszczonych na panelach jest, w głównej mierze przetwarzanie analogowych sygnałów elektrycznych z głowic w sygnały dwustanowe, możliwe do akceptacji przez układy wejściowe zespołów sygnalizacji przejazdowej. Z każdą głowicą czujnika połączony jest moduł rozpoznania kierunku.

Obrzeże koła w chwili przejazdu nad czujnikiem generuje impuls napięciowy o kształcie zbliżonym do sinusoidy. Każdej przejeżdżającej nad czujnikiem osi odpowiadają krótkie impulsy pochodzące z obydwu cewek głowicy czujnika, które doprowadzone są na wejścia modułów rozpoznania kierunku. Czujnik CTI zastosowany jako czujnik wyłączający nie współpracuje z układem rozpoznawania kierunku [120].

### *Czujnik mechaniczny ELS-6*

Czujnik ten składa się następujących elementów:

- głowica,
- dwa wsporniki,
- przyłącze oraz
- dwa odbijacze.

Głowica jako główna część czujnika, przyjmuje oddziaływanie obrzeża koła pociągu. Wsporniki mocowane są do stopy szyny i stanowią element nośny dla głowicy. Przyłącze to elektryczne połączenie głowicy ze skrzynką kablową natomiast odbijacze służą do ochrony głowicy przed uszkodzeniami mechanicznymi. Detekcja pociągu polega na rejestrowaniu nacisku koła na dźwignię głowicy, a ta przez mechaniczny układ przeniesienia powoduje przełączanie zestyków elektrycznych. Dzięki hydraulicznemu tłumieniu powrotnemu ruchu dźwigni, zestyki po zjechaniu koła pozostają stale zwarte przez około 2,5 s. Czujniki występują z jedną dźwignią jako pojedyncze lub z dwiema jako podwójne. Pojedynczy czujnik identyfikuje jedynie obecność koła nad jego dźwignią, natomiast czujnik podwójny umożliwia dodatkowo rozróżnianie kierunku ruchu koła. Czujnik ELS-6 występuje w 64 odmianach w zależności od typu szyny, do jakiej czujnik może być mocowany, liczby dźwigni, rodzaju oraz długości przyłącza lub zestyków itp. [133].

### *Czujnik magnetyczny ELS-3*

Czujnik ELS-3 to stykowe oraz bierne urządzenie punktowego oddziaływania niewymagające dodatkowego zasilania. W stanie czuwania zestyk w czujniku jest rozarty natomiast gdy nad czujnikiem pojawi się pojazd szynowy zestyk przechodzi w stan zwarty. Głowica czujnika przykręcona do podstawy mocującej zabudowana zostaje na stopce szyny. W głowicy znajdują się cztery magnesy ferrytowe rozmieszczone symetrycznie pomiędzy, którymi znajduje się poziomy otwór z gwintem celem wkręcenia wkładu z kontaktronem. Każdy z czterech magnesów wytwarza pole magnetyczne, a ich symetryczne rozmieszczenie powoduje, że pola magnetyczne wzajemnie znoszą się w miejscu kontaktrona. Z chwilą, kiedy pomiędzy głowicą czujnika, a szyną znajduje się obręcz pojazdu szynowego równowaga pola zostaje zachwiana i w miejscu wkładu kontaktrona wystąpi pole magnetyczne powodujące zwarcie styków. Pojedynczy czujnik nie wykorzystuje się do rozpoznawania kierunku a mogą to zrealizować jedynie podwójne czujniki we współpracy z odpowiednim układem rozpoznania kierunku.



### *Czujnik EOC-1*

Czujnik EOC-1 to pojedynczy bezpieczny czujnik wspólny dla kanału „A” i „B” (kanały bezpieczeństwa wymagane przepisami prowadzenia ruchu kolejowego, dla których wymaga się uzyskania identycznej wartości sygnału odpowiadającej detekcji pojazdu szynowego). Działa on na zasadzie bezzłączowego obwodu torowego. Czujnik składa się z nadajnika umieszczonego w środku obwodu nadającego sygnał o określonej częstotliwości oraz dwóch odbiorników umieszczonych po obu stronach obwodu i odbierających sygnał z nadajnika. W stanie zasadniczym napięcie na wyjściu odbiornika powinno przekraczać 6V (wyższe napięcie świadczy o braku połączenia z obciążeniem) co traktowane jest jako poziom logiczny „1”. Brak napięcia tj. poziom logiczny „0” spowodowany jest:

- zwarcie lub przerwą toku szyn przez pojazd szynowy,
- uszkodzeniem linki odbiornika lub samego odbiornika,
- uszkodzeniem nadajnika,
- zwarcie kabla odprowadzającym sygnał do szafy lub uszkodzeniem zespołu ochrony przepięciowej.

Pociąg wjeżdżając w strefę kontrolowaną przez dany odbiornik zwiiera toki szyn odcinając tym samym dopływ sygnału do odbiornika. Napięcie wyjścia wówczas nie przekracza 0,5V. Strefa wspólna, w której zbocznikowanie toku szyn powoduje wzbudzenie się obu odbiorników wynosi od 3 - 10 m. Sygnał testujący czujnika wysyłany jest średnio co 3 s i trwa nie więcej jak 20 ms. Powoduje on zwieranie kanałów tak jakby jechał pociąg a widoczne jest to przez krótkotrwałe okresowe gaśnięcie diod LED modułów wejściowych, odpowiadających poszczególnym czujnikom.

### *Czujnik EOC-4*

Bezkałowy czujnik pociągu EOC-4 powstał głównie z przeznaczeniem dla miejsc, w których specyficzne warunki wykluczają stosowanie standardowych czujników np. w górzystym terenie oraz przy prędkościach pociągu nie przekraczających 120 km/h. Przy zachowaniu dostatecznego stopnia pewności działania czujnika EOC-4 producent założył, że długość odpowiadających mu odcinków torowych nie powinna przekroczyć 1000 m. Czujnik EOC-4 wymaga zachowania ciągłości toków szynowych oraz braku zwarcie pomiędzy tokami w całości odcinków toru, których niezajętość jest wykrywana.

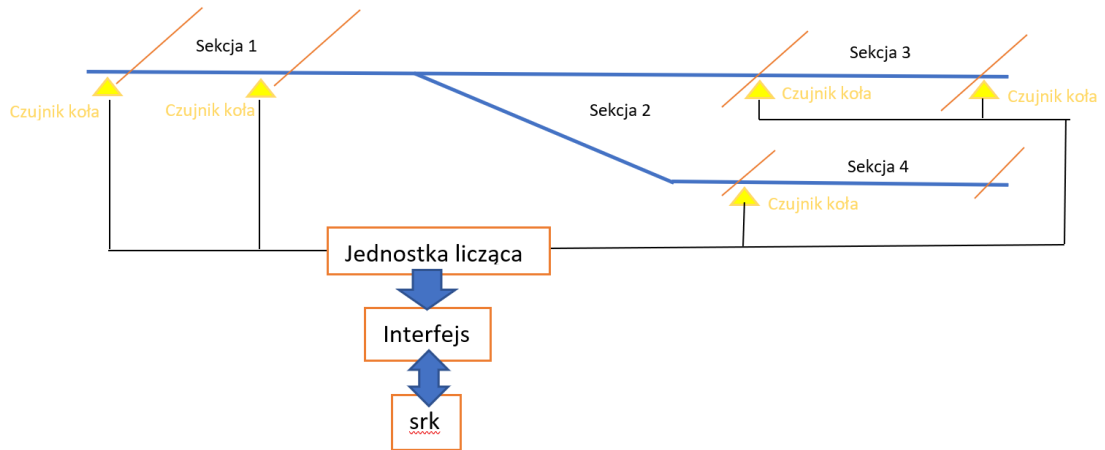
W chwili obecnej na rynku występuje kilka rodzajów czujnika koła różnych producentów. Pomijając wewnętrzne układy cewek zasadnicza różnica polega na czujnikach bez elektroniki oraz czujnikach z elektroniką przytorową.

Zasada działania czujnika koła polega na odchyłaniu linii sił pola magnetycznego zabudowanych w nim elementów. Przeważnie zbudowane są one z jednej lub kilku cewek nadawczych oraz kilku cewek odbiorczych zalanych specjalną wodoszczelną masą w jednej obudowie. Linie sił pola cewki nadawczej przecinają cewki odbiorcze. Na skutek pojawienia się obręczy koła pod lub nad cewką odbiorczą następuje odchylenie linii sił pola magnetycznego a zarazem zmiana indukcyjności cewki mająca wpływ na zmianę przepływającego przez cewkę prądu. Czujnik mocowany jest za pomocą specjalnej łapy lub bezpośrednio do szyjki szyny. Czujniki te należą obecnie do najszybciej rozwijanych urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Takie zalety jak duża niezawodność, przejrzysty interfejs użytkownika oraz prosta diagnostyka, ale również ich niezależenie od stanu torów, podtorza czy warunków atmosferycznych powodują, że urządzenia te coraz częściej zastępują starszego typu obwody torowe.

### **3.3. Rola czujników detekcji w systemach sterowania ruchem kolejowym**

Czujniki detekcji pojazdu szynowego, znane jako liczniki osi stanowią najważniejszy z elementów systemu sterowania ruchem kolejowym. Zadaniem tych urządzeń jest stała kontrola nie zajętości kontrolowanych odcinków torowych niezbędna do bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego zarówno na linii kolejowej jak i stacji. Informacja o tym, które z nadzorowanych odcinków są wolne lub zajęte jest konieczna celem wyznaczenia bezpiecznej drogi przebiegu, a zatem zgody na wjazd składu pociągu do kontrolowanej strefy. Pewność uzyskanej w ten sposób informacji bezpośrednio rzutuje na bezpieczeństwo oraz płynność całego ruchu kolejowego objętego tą kontrolą. Zastosowanie zatem liczników osi obniża bezpośrednio koszt każdej generalnej modernizacji linii kolejowej i to zarówno w fazie jej budowy jak również w okresie jej eksploatacji. Liczniki osi znajdują ponadto zastosowania w miejscach gdzie koniecznym jest stwierdzenie końca pociągu. Ponadto znalazły one zastosowanie w przypadku zbliżania się pojazdów szynowych do strefy działania samoczynnych sygnalizacji przejazdowych tzw. SSP. Urządzenia sygnalizacji przejazdowej wykorzystują w tym przypadku zasadę zliczania osi uzyskując tym samym informacje o zajętości stref włączających i wyłączających sygnalizacji przejazdowej.

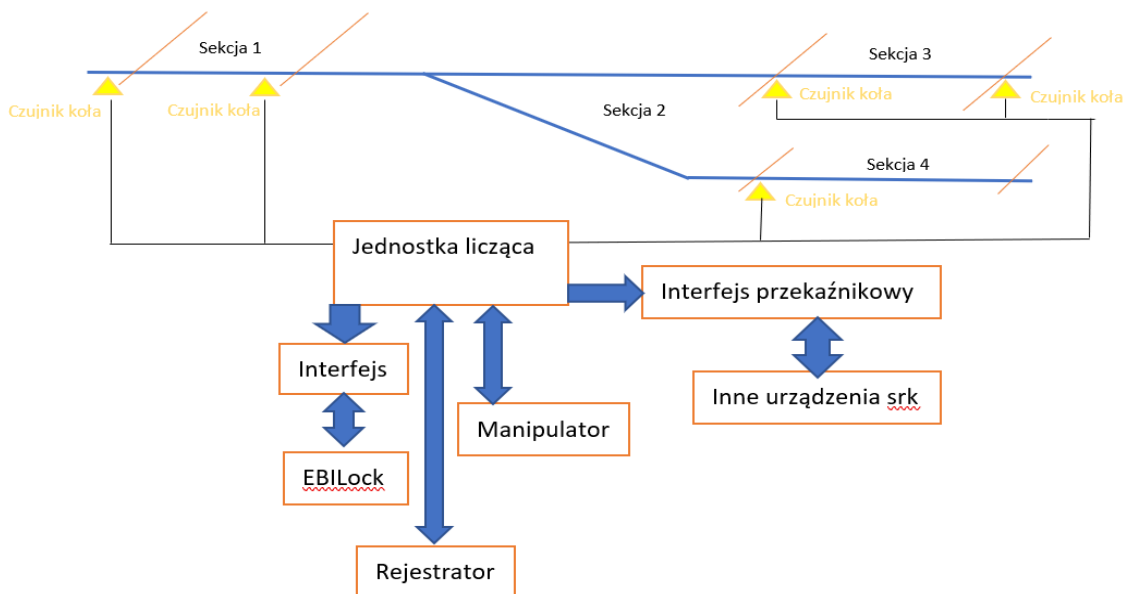
Działanie zatem liczników osi polega głównie na stwierdzaniu stanu sekcji ograniczonych zabudowanymi czujnikami koła różnych rozwiązań. Na rysunku nr 9 pokazany został schemat blokowy licznikowego systemu stwierdzania niezajętości kontrolowanych torów [112,124,125,129,131].



Rys. 9 Schemat blokowy licznikowego systemu stwierdzania niezajętości [124].

W skład urządzeń licznikowych wchodzi: liczydło czyli tzw. jednostka licząca oraz określona liczba czujników koła, montowanych są na szynie, mających za zadanie wyznaczenie wymaganych układem np. stacji sekcji torowych. Zadaniem czujników jest zliczanie przejeżdżających nad nimi kół każdego składu pociągu, jak również stwierdzenie ich kierunku przemieszczania się. Jednostka licząca najczęściej połączona okablowaniem z czujnikami dokonuje analizy danych i zlicza liczbę osi w poszczególnych nadzorowanych przez nią sekcjach. Bilans ten, przy wykorzystaniu danych aplikacyjnych opisujących układ stacji i rozmieszczenie przedmiotowych czujników, określa stan tych sekcji tzn. określa ich niezajętość. Sprawdzenie sygnału każdego z czujników koła odbywa się w określonym, powtarzalnym okresie czasowym. Po zakończeniu procesu dokonywany jest tzw. bilans odpytanych osi, tj. obliczanie różnicy pomiędzy zarejestrowaną liczbą osi, które wjechały do sekcji a liczbą osi które z sekcji wyjechały. W przypadku gdy bilans wynosi 0 wówczas dana sekcja może zostać zwolniona. W przypadku gdy ten bilans jest większy od zera oznacza to, że w kontrolowanej sekcji znajduje się np. wagon wówczas sekcja traktowana jest jako zajęta. Bilans poniżej zera oznacza sytuację anormalną to znaczy stan tzw. poza kontrolą. Stan taki utrzymywany jest tak długo aż nastąpi ręczna ingerencja pracownika kolei odpowiedzialnego za dany system.

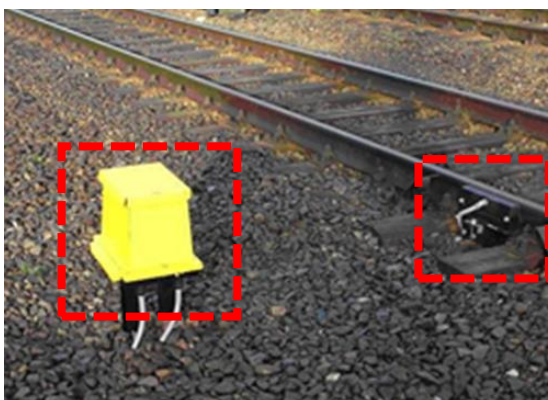
Do jednego z popularniejszych, szczególnie w Polsce liczników osi należą urządzenia produkcji Bombardier tj. Licznik osi SOL. SOL to licznikowy system stwierdzania niezajętości. Jest on w pełni elektronicznym systemem, którego przeznaczenie polega na stwierdzaniu niezajętości nadzorowanych odcinków torowych, rozjazdów czy torów odstawczych przy wykorzystaniu czujnika koła ELS-93 lub 95 [131,119]. System ten spełnia wymagania bezpieczeństwa SIL-4 i przeznaczony jest w szczególności do współpracy z elektronicznym systemem sterowania ruchem kolejowym systemem EbiLock. Może on zostać zaaplikowany do wielu rodzajów szyn i zastosowany bez względu na rodzaj istniejącej trakcji. System SOL jako zespół urządzeń działa na zasadzie struktury rozproszonej. W skład urządzeń systemu wchodzi: jednostka licząca i czujniki koła połączone ze sobą za pomocą linii transmisyjnych. Posiada on budowę modułową, zależną od aplikacji i konfigurowalną zgodnie z projektem zabudowy urządzeń. Na rysunku nr 10 pokazano poglądowy schemat blokowy licznikowego systemu stwierdzania niezajętości typu SOL dla aplikacji stacyjnej [118].



Rys. 10 Schemat blokowy licznikowego systemu stwierdzania niezajętości SOL [131].

System SOL składa się z urządzeń wewnętrznych i zewnętrznych. W skład urządzeń zewnętrznych wchodzi czujniki koła typu ELS rozmieszczone w terenie w taki sposób, aby ograniczały kontrolowane sekcje torowe. Głównym ich zadaniem jest wykrycie osi pojazdów oraz wykrycie kierunku ich poruszania się a następnie przekazywanie tych informacji do jednostki liczącej. W skład urządzeń wewnętrznych wchodzi manipulator, rejestrator zdarzeń oraz szafa z zabudowaną jednostką liczącą EDH, której zadaniem jest

komunikacja z czujnikami koła ELS, analiza otrzymanych danych oraz dokonywanie bilansu liczby osi na podstawie danych w poszczególnych nadzorowanych sekcjach. Informacja o liczbie osi, które wjechały a następnie wyjechały z nadzorowanych sekcji pozwalają jednostce liczącej określić stan tej sekcji. Jednostka po odpytaniu poszczególnych czujników i przeprowadzeniu bilansu przekazuje informacje o ich stanie do nadrzędnego systemu zależnościowego. Głównym elementem systemu SOL jest jednostka licząca, która jest zdublowana za pomocą kolejnej jednostki liczącej pełniącej funkcję tzw. gorącej rezerwy. Uszkodzenie jednostki głównej powoduje natychmiastowe przejście pracy przez jednostkę rezerwową. Takie rozwiązanie w sposób zasadniczy zwiększa dostępność systemu oraz eliminuje sytuacje opóźnień w prowadzeniu ruchu. Podstawowym medium transmisyjnym systemu przeznaczonym do wymiany informacji pomiędzy jednostką liczącą a czujnikami koła jest magistrala CAN, która przy wykorzystaniu dodatkowo konwerterów oraz wysokiej jakości kabla transmisyjnego umożliwia przesłanie danych na odległość do 3 km. W skład urządzeń zewnętrznych systemu wchodzi głównie czujniki koła typu ELS. Czujniki te to zespół urządzeń służących do wykrywania i zliczania liczby kół przejeżdżających przez punkt zamocowania głowicy czujnika koła. Instalując zatem czujnik ELS w miejscach izolacji sekcji mamy informacje o liczbie przejeżdżających w tych punktach kół oraz o kierunku ich przejazdu. Głowica czujnik ELS połączona jest z elektroniką przytorową odpowiedniej długości kablami przenoszącymi sygnały w systemie analogowym. Na zdjęciu nr 11 przedstawiono przykładowe rozmieszczenie elementów czujnika głowicy oraz elektroniki przytorowej w terenie natomiast na rysunku nr 12 przykładowy schemat połączenia.



Rys. 11 Rozmieszczenie elementów czujnika koła ELS (głowica czujnika koła zabudowana na szynie kolejowej oraz elektronika przytorowa odpowiedzialna za przetwarzanie sygnałów z głowicy zabudowana w żółtej obudowie) [128].

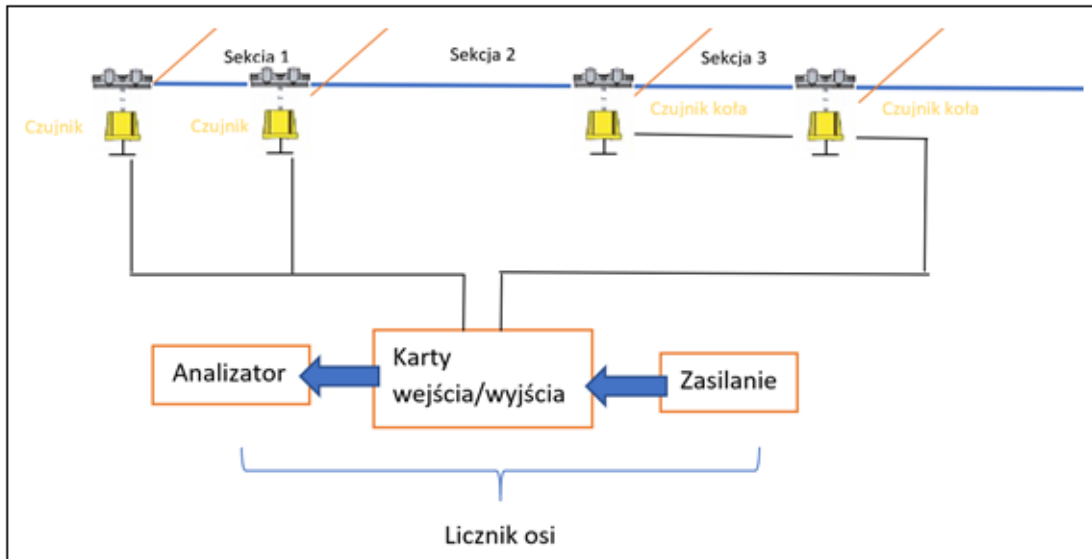


Rys. 12 Głowica czujnika koła ELS

*Źródło: opracowanie własne*

Montaż głowicy czujnika koła do szyny odbywa się przy pomocy specjalnego uchwytu głowicy. Zastosowane rozwiązanie nie wymaga wiercenia otworów w szycie szyny i umożliwia montaż na wielu profilach szyn. Szczególną cechą czujników koła jest to, że pracują one poprawnie wszędzie tam, gdzie zawodzą klasyczne obwody torowe, tj. w przypadkach, kiedy toki szynowe muszą być zwarte np. mosty i tunele, kiedy podtorze jest narażone na silne zanieczyszczenie materiałami przewodzącymi i elektrolitami, kiedy szlak jest rzadko wykorzystywany i narażony na rdzewienie oraz kiedy długość odcinka znacznie przekracza zasięg klasycznych obwodów torowych.

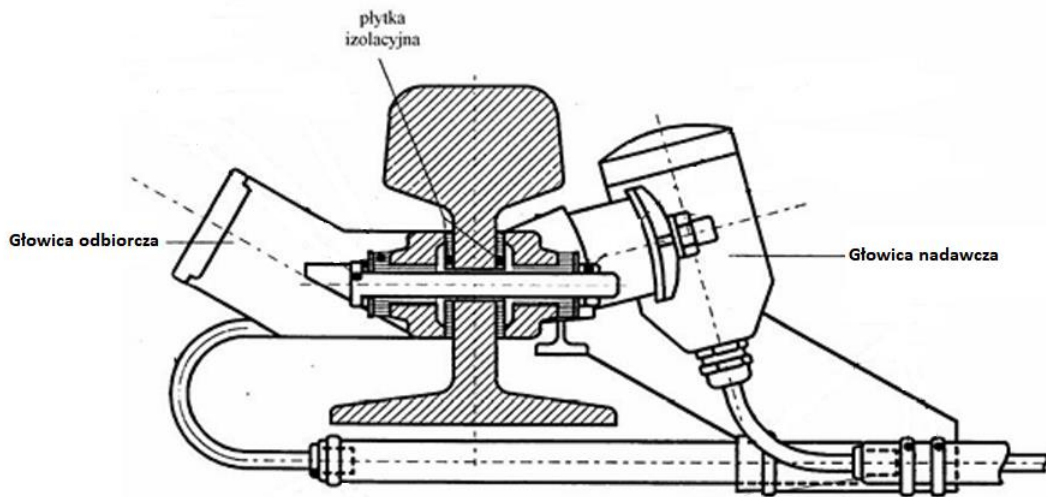
Innym przykładem powszechnie stosowanego czujnika koła jest rozwiązanie zaproponowane przez firmę Thales Rail Signalling Solutions. Ten system licznika osi służy do kontroli niezajętości dowolnych odcinków torowych. Może być instalowany zarówno w skomplikowanych rozwiązaniach stacyjnych o bardzo wielu rozjazdach, krzyżownicach jak również na dowolnie długich odcinkach torów. Prawidłowe działanie systemu nie zależy od jakości podtorza oraz warunków pogodowych. Licznik może współpracować z większością urządzeń dotychczas wykorzystujących tradycyjne obwody torowe jak urządzenia stacyjne, blokady liniowe itp. Niezależność pracy liczników od warunków zewnętrznych sprawia, że w porównaniu do obwodów klasycznych, liczniki cechują się znacznie wyższą niezawodnością. Przedmiotowy licznik osi jest to mikroprocesorowy i multisekcyjny system przeznaczony do kontroli niezajętości torów. System posiada budowę modułową a liczba i rodzaj zastosowanych modułów zależy głównie od aplikacji i jest konfigurowany wg zaleceń projektowych. Na rysunku nr 13 przedstawiony został schemat licznikowego systemu stwierdzania niezajętości firmy Thales.



Rys. 13 Schemat licznikowego systemu stwierdzenia niezajętości firmy Thales [141].

W skład tego systemu wchodzi: jednostka licząca oraz czujniki koła połączone z nią za pomocą linii transmisyjnych standardu ISDN. Niezależna analiza liczby osi odbywa się w dwóch procesorach. W wyniku porównania odpowiedzi z obu procesorów następuje wygenerowanie informacji o aktualnym stanie sekcji. Wyłącznie w przypadku kiedy obydwa procesory wypracują informacje o niezajętości sekcji. Informacja o stanie przekazywana jest do urządzeń systemu sterowania ruchem kolejowym. System informuje o stwierdzonej niezajętości odcinka przez podanie napięcia na odpowiednim zestyku wyjściowym sterując odpowiadający mu przekaźnik torowy. W skład urządzeń zewnętrznych systemu licznika osi firmy Thales przedstawionego na rysunku nr 13 wchodzi głównie poszczególne punkty liczące. Stanowią one zespół urządzeń służących do wykrywania i zliczania liczby kół przejeżdżających przez punkt zabudowy głowic czujnika. Czujnik ten obejmuje zatem dwa niezależne zestawy głowic zainstalowane na jednej szynie. Po zewnętrznej stronie instalowane są dwie cewki nadawcze generujące wokół szyny pole magnetyczne o dwóch różnych składowych częstotliwości. Po stronie wewnętrznej instalowane są dwie cewki odbiorcze. Przez takie rozwiązanie czujnik za pomocą modułu elektronicznego ma możliwość wykrycia zarówno obecności jak i kierunku przemieszczania się kół pojazdów szynowych. Ze względów niezawodnościowych w głowicach poza cewkami nie ma elementów elektronicznych. Dla zapewnienia szczególnie wysokiej niezawodności wykrywania kół analizie poddawane są zarówno napięcie jak i faza sygnału z cewek odbiorczych. Częstotliwości oraz kształt i materiał obudowy odbiornika oraz odpowiednie ustawienie

cewki w głowicy odbiorczej zostało tak dobrane aby zagwarantować odporność procesu wykrywania kół na zakłócenia od harmonicznego prądu trakcyjnego oraz od działania hamulców torowych. Dalsze zwiększenie odporności na wpływy innych źródeł zakłóceń elektromagnetycznych osiągnięto przez zastosowanie prostowania fazowego, kluczenia sygnałów, przesunięcia częstotliwości czy przez zastosowanie bez-ferrytowych cewek w głowicach. Na rysunkach 14 i 15 zostały pokazane cewki nadawcza oraz odbiorcza przymocowane do szynki szyny.



Rys. 14 Widok cewek głowicy nadawczej oraz odbiorczej firmy Thales [141].

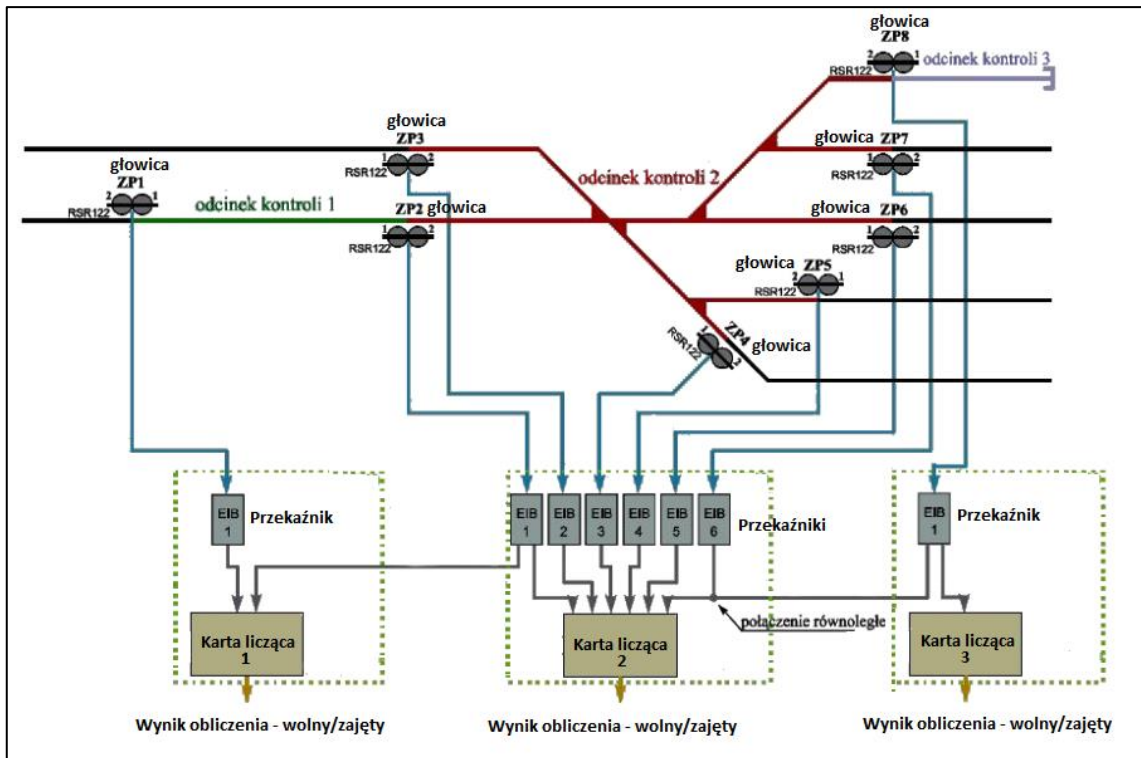


Rys. 15 Głowice punktu liczącego firmy Thales [141].

System liczenia osi firmy Thales zaprojektowany został tak, aby do transmisji pomiędzy urządzeniami przytorowymi a liczydłem można było użyć standardowego dwu- lub czterożyłowego kabla komunikacyjnego. Bezpieczeństwo transmisji danych gwarantowane jest przez bezpieczne kodowanie telegramów wg protokołu zgodny z normą EN50159-1 [141].



Kolejnym rozwiązaniem licznika osi jest system firmy Frauscher, który bazuje na czujnikach indukcyjnych. W roku 1986 powstał pierwszy czujnik indukcyjny służący do wykrywania kół pojazdów szynowych, który pod nazwą RSR180 jest oferowany do dnia dzisiejszego. Główna zasada działania tego typu czujnik polega na odchyleniu linii pola magnetycznego uzwojenia nadawczego pod wpływem koła pojazdu szynowego. Zmiany pola magnetycznego powodują zmiany prądów płynących w uzwojeniach odbiorczych wykorzystywanych do liczenia osi. Najpopularniejszy system liczenia osi AMC służy do kontroli niezajętości odcinków torowych, rozjazdów oraz grup rozjazdów gdzie informacje o stanie kontrolowanych obwodów przekazywane są z licznika osi w postaci zestyków przekaźnika. Architektura systemu i możliwość wykorzystania jednego punktu liczącego na potrzeby kilku obwodów kontroli niezajętości to główne zalety systemu znajdującego zastosowanie na stacjach rozrządowych, w systemach sygnalizacji przejazdowych oraz na kolejach przemysłowych. Głównym przeznaczeniem licznika osi firmy Frauscher to bezpieczna kontrola niezajętości obwodów torowych tj. rozjazdów, grupy rozjazdów, odcinków torowych w obrębie stacji, na szlaku oraz bocznic kolejowej. Informacje o zajętości obwodów przekazywane są z licznika przez zestyki przekaźnika [105]. Rozwiązanie to stanowi zasadniczą różnicę w stosunku systemów firmy Bombardier oraz Thales, w których głowica połączona jest bezpośrednio z elektroniką przytorową i sygnał do jednostki liczącej przekazywany jest kompletnym przekształceniu w urządzeniu [117,124,135]. Przykładowy schemat systemu liczącego osie firmy Frauscher przedstawiono na rysunku 16. Z kolei na rysunku 17 przedstawiono jeden z najbardziej popularnych na sieci PKP PLK czujników koła firmy Frauscher. Czujnik ten składa się z dwóch niezależnych systemów rozmieszczonych symetrycznie i oddzielonych galwanicznie. Czujnik połączony jest na stałe kablem czterożyłowym o długości 5m do tzw. puszkii kablowej. Czujnik koła przymocowany do szynki szyny lub do stopy szyny przy pomocy jarzma łącznie z kartą wartościującą tworzą jeden punkt liczący.



Rys. 16 Przykładowy schemat systemu liczącego firmy Frauscher w trybie wyspowym - samodzielnym (bez powiązania z urządzeniami np. stacyjnymi) [135].

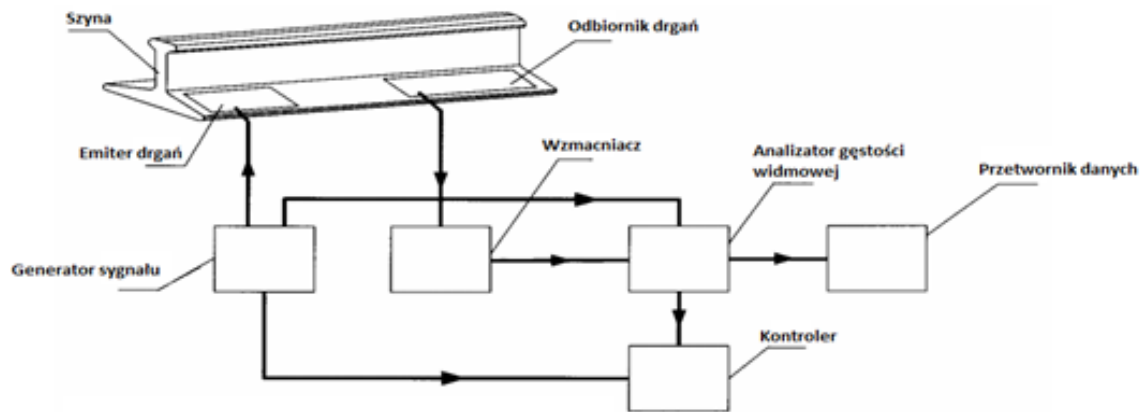


Rys. 17 Czujnik koła firmy Frauscher [117].

Obecnie na świecie trwają intensywne badania rozwojowe nad opracowaniem kolejnych wariantów czujników koła, alternatywnych wobec aktualnych rozwiązań systemów służących detekcji pojazdów szynowych. Do takich prac należy rozwiązanie zaproponowane przez firmę Frauscher polegające na detekcji pojazdu szynowego przy wykorzystaniu drgań włókna światłowodu rozmieszczonego wzdłuż toku szynowego. Rozwiązanie to zostało opatentowane w Polsce pod numerem: PL/E3069952. Patent ten dotyczy metody liczenia osi pojazdów szynowych, polegającego na wprowadzaniu światła do co najmniej jednego włókna czujnikowego, gdzie włókno to zawiera co najmniej jedną zamontowaną na szynie światłowodową siatkę Bragga. Dodatkowym

założeniem jest fakt, iż każda siatka Bragga ma jedno widmo odbicia z pikim odbicia przy długości fali z szerokością połówkową i detekcję światła odbijanego przez dwie rozmieszczone z odstępem od siebie światłowodowe siatki Bragga, dzięki czemu każdorazowo otrzymywany jest sygnał naprężenia ścinającego szyny [125].

Innym przykładowym rozwiązaniem jest system detekcji pojazdów szynowych opatentowane pod numerem PL 210037. Konstrukcyjnie system zbudowany został przy wykorzystaniu 3 czujników. W miejsce światłowodowego czujnika użyty został czujnik drgań mechanicznych toku szynowego. Gęstość widmowa drgań sygnalizuje przejazd pojazdu szynowego. Wadami tego rozwiązania jest konieczność stałej kalibracji układu, znaczna i skomplikowana złożoność układu oraz koszt budowy i eksploatacji gotowego już systemu, a przede wszystkim konieczność stałego zewnętrznego zasilania - schemat układu przedstawia rysunek nr 18.

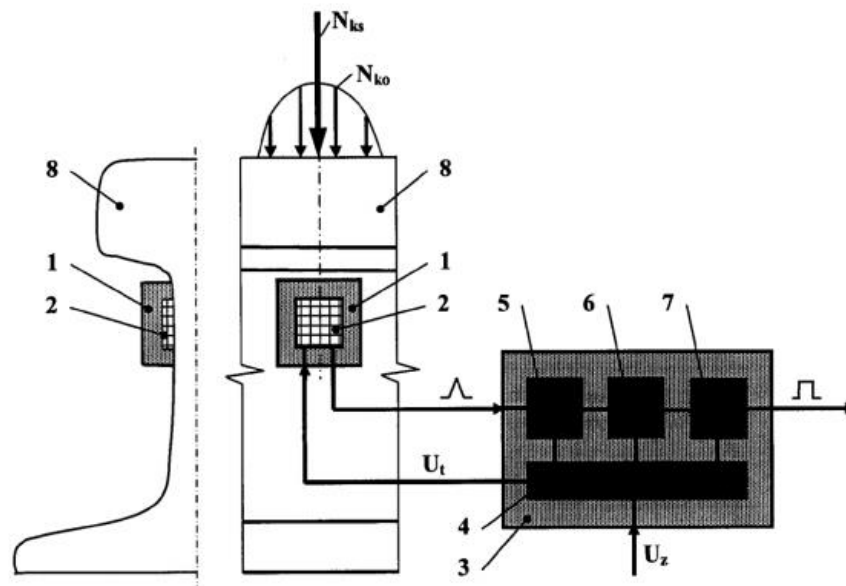


Rys. 18 Schemat układu detekcji pojazdów szynowych [142].

Układ detekcji pociągów w tej koncepcji działa przy wykorzystaniu odbiornika drgań przymocowanego do szyny kolejowej. Połączony został on ze wzmacniaczem liniowym sygnałów elektrycznych odpowiednio wzmacnionych do wielkości umożliwiającej pracę analizatora gęstości widmowej drgań. Analizator gęstości połączony został z kontrolerem pracy układu odbiorczego odpowiedzialnego za pracę liniowego wzmacniacza. Emiter drgań, wzbudzany przez połączony z nim generator sygnału wzbudza również kontroler pracy układu, który odpowiedzialny jest również za przekazywanie informacji o zbliżającym się pojeździe szynowym.

Innym przykładem jest polski patent PL 230 291 B1. Autorzy opisują koncepcję bazującą na stałym pomiarze sygnału elektrycznego z rozety tensometrycznej naklejonej np. pod główką szyny. Dodatkowo za pomocą zespołu zasilająco-pomiarowego rejestrowany jest poziom wolno zachodzących w miejscu naklejonej rozety zmian stanu naprężeń i

odkształceń szyny wywołanych np. jej rozszerzalnością cieplną oraz innymi wpływami niż naciski kół przejeżdżających pojazdów szynowych. Na rysunku 19 przedstawiono schemat układu detekcji w proponowanym rozwiązaniu, składający się z czujnika tensometrycznego (1) w układzie rozety (2), zamontowanego na szynie kolejowej (8). Zespół zasilająco-pomiarowy (3) składa się z czujników tensometrycznych (5,6,7) ułożonych w kształcie rozety oraz stabilizatora napięciowego (4).



Rys. 19 Schemat układu detekcji pojazdów szynowych [143].

Przedstawione przykłady poszukiwania innowacyjnych rozwiązań w zakresie detekcji pojazdu szynowego, jako opracowania patentowe, wskazują potrzebę prowadzenia badań w tym obszarze. Nowatorskim rozwiązaniem może być ponadto zastosowanie sygnałów drganiowych generowanych przez pojazd szynowy do identyfikacji jego przejazdu. Na podstawie zebranych doświadczeń stwierdzono, że pojazd szynowy wywołujący drgania szyny kolejowej przy wykorzystaniu odpowiednich systemów może zostać zidentyfikowany podczas zbliżania się do miejsca pomiarowego [1]. Wynika stąd potrzeba pracy nad weryfikacją możliwości identyfikacji pojazdu celem uruchomienia odpowiednich systemów bezpieczeństwa wszystkich uczestników ruchu drogowego. Niezależnie od tego które z urządzeń odpowiadać będzie za wykrycie nadjeżdżającego pojazdu szynowego każde niezależnie od jego rodzaju, typu czy wielkości musi spełnić najwyższe standardy bezpieczeństwa chroniąc tym samym wszystkich uczestników ruchu drogowo-szynowego [13,24 do 26,30,72].

## ROZDZIAŁ 4 - BADANIA DRGAŃ W TRANSPORCIE KOLEJOWYM

Do głównych obszarów badań drgań w transporcie szynowym należą:

- badania drgań pojazdów szynowych [4, 7, 27, 28, 102]
- badania oddziaływania drgań na infrastrukturę i otoczenie [5, 6, 12, 13].

Prowadzone badania mogą mieć charakter badań podstawowych, których głównym celem będzie identyfikacja zjawisk drganiowych generowanych ruchem pojazdów szynowych [2,76,82]. W zdecydowanej większości badania drgań w transporcie szynowym mają jednak charakter użytkowy i aplikacyjny. Każdorazowo zorientowane są na inny obszar.

Z uwagi na cel i tezę rozprawy doktorskiej zdefiniowano zakres badań własnych w efekcie, którego wskazano następujące obszary analiz i potencjalnych zastosowań:

- badania drgań w transporcie [8, 9];
- systemy wspomagające zarządzanie ruchem, w tym:
  - organizacja pracy, procedury, instrukcje [121, 122],
  - systemy sterowania ruchem kolejowym;
- identyfikacja przejazdu pojazdu szynowego ujęta w aspekcie bezpieczeństwa [137].

Temat rozprawy doktorskiej jest efektem poszukiwań innowacyjnych metod detekcji pojazdu wynikających z założenia, że informacje zawarte w obserwowanym sygnale drganiowym mogą stanowić cenne uzupełnienie wiedzy o zbliżającym się pojeździe szynowym, zwiększające niezawodność systemów sterowania i bezpieczeństwa w transporcie kolejowym.

Zakres badań drgań w transporcie szynowym jest bardzo obszerny, w wyniku czego stan wiedzy i liczba publikacji także jest znaczna. W związku z tym oraz zgodnie z tematem rozprawy zdecydowano się wyróżnić dwie zasadnicze grupy badań drganiowych w transporcie szynowym:

- drgania powstające w wyniku oddziaływania na otoczenie poruszającego się pojazdu szynowego;
- drgania wzbudzone w strefie kontaktu koło szyna propagujące do szyny i elementów konstrukcyjnych pojazdu szynowego.

W zakresie badań drgań wynikających z przemieszczania się pojazdów szynowych literatura skupia się głównie na identyfikacji wpływu drgań na otaczającą linię kolejową infrastrukturę jak mosty, wiadukty ale również budynki i inne obiekty

użyteczności publicznej, zarówno w zakresie wpływu oddziaływania pojazdów szynowych kolejowych jak i transportu miejskiego tj. sieci tramwajowych [63, 110]. Pozostałą część literatury poświęca oddziaływaniu pojazdów szynowych na trakcję kolejową, jej zużycie się ale również maksymalnie długie zachowanie jej parametrów funkcjonalnych. Ostatnim zagadaniem rozpatrywanym przez środowiska branżowe oraz naukowe jest oddziaływanie drgań zarówno na ludzi jak i zwierzęta wywołane w wyniku poruszania się pojazdów szynowych [41,42].

#### **4.1. Emisja i oddziaływanie drgań w transporcie szynowym**

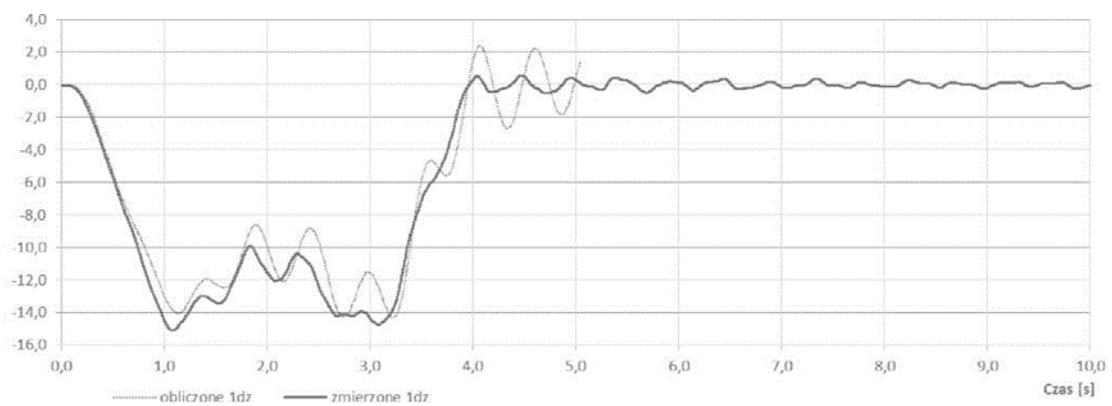
Zakres badań, których przedmiotem jest oddziaływanie transportu na otoczenie jest bardzo szeroki. W zdecydowanej większości dotyczy on zagadnień związanych z zanieczyszczeniem powietrza na skutek procesów spalania w silnikach środków transportu. Wiele badań poświęconych jest także uciążliwości hałasem komunikacyjnym. Zagadnienia dotyczące drgań generowanych przez środki transportu są reprezentowane zdecydowanie w mniejszej liczbie publikacji naukowych. W tym rozdziale w całości poświęcono uwagę temu zagadnieniu, zawężając przegląd stanu wiedzy do reprezentatywnych badań w obszarze transportu szynowego.

Pewną grupę publikacji stanowią opracowania dotyczące oddziaływania drgań na infrastrukturę transportową [58, 62]. Przykładowo w pracy [68] przedstawiono analizy dynamicznej belkowych mostów zespolonych na Centralnej Magistrali Kolejowej (CMK) pracującej w warunkach zwiększonych prędkości pociągów. Problematyka ta wynika z rozwoju infrastruktury PKP polegającej na wprowadzeniu do eksploatacji na Centralnej Magistrali Kolejowej (CMK) pociągów pasażerskich poruszających się z prędkościami do 250 km/h, a nawet tę prędkość przekraczającymi. Problem podjęty w tej pracy jest jednym z głównych problemów naukowo-technicznych, z tego wynikających, czyli kontrola dynamicznego wyężenia obiektów takich jak np. mosty w całkiem nowych warunkach eksploatacji. W publikacji tej jako model mostu przyjęta została tzw. belka Timoshenki o stałym przekroju poprzecznym, zaś jako szyny przyjęto belkę Eulera. Jako model podtorza przyjęto zbiór liniowych oscylatorów, model podsypki to pionowe elementy sprężysto/tłumiące natomiast model podkładów to masy skupione umożliwiające drgania głównie w kierunku pionowym. W badaniach uwzględniono różne sztywności na ściskanie i rozciąganie oraz uznano, że właściwości tłumiące wynikają głównie z obecności podkładek wibroizolacyjnych [36, 49, 94]. Założono ponadto, że

pojazd szynowy wyposażony został w 2 dwuosiowe wózki. Taki model składa się zatem z 4 mas zastępujących zestawy kołowe zawierający 4 zawieszenia pierwszego oraz 2 drugiego stopnia o masach resorowanych w kierunku osi toru. Przeprowadzone badania wykazały wystarczająco duże tłumienie materiałowe drgań w układzie most/tor/pojazd wystarczająco niwelujące możliwe stany powstawania rezonansów w analizowanych mostach [29, 31, 93, 106]. Kolejny przykład badania mostów kolejowych przedstawiono w pracy [95]. Szczegółowej analizie poddano procesy zachodzące w mostach kolejowych poddanych próbnym obciążeniom podczas wstępnego procesu odbiorczego danej infrastruktury kolejowej. Autorzy oparli swoje rozważania na podstawie obowiązujących w Polsce 4 dokumentów: PN-89/S-10050 dotyczącej mostów stalowych, PN-99/S-10040 dotyczącej mostów betonowych oraz Instrukcji Id-16 oraz standardach PKP generalnie obowiązujących dla mostów kolejowych. W rozważaniach porównano poszczególne wymagania, zwracając również uwagę na sprzeczności czy niedokładności w/w normach w zakresie badań w stosunku do późniejszej eksploatacji. Opisano proces badawczy prowadzony przez uprawnione do tego jednostki w zakresie badań dynamicznych mostów, pomiaru pionowych składowych przemieszczeń oraz przyspieszeń konstrukcji. W kolejnej publikacji dotyczącej oddziaływań dynamicznych pociągów na mosty autorzy odnieśli się do opisu zjawiska w postaci drgań powstających w szczególności w zabytkowych mostach na skutek przejeżdżających pociągów z bardzo dużą prędkością [46]. Wg autorów amplitudy drgań przęseł rosną znacznie podczas gdy częstotliwości drgań własnych są zbliżone do częstości wywołanych poruszającym się pojazdem szynowym, co jest zjawiskiem niezwykle niebezpiecznym mogącym prowadzić do rezonansu. Wywołane w części nośnej ugięcia oraz naprężenia i w wyniku tego przyspieszenia ulegają zmianie, w wyniku szybkich przyrostów obciążeń oraz reakcji bezwładnościowych występujących po sobie obciążeniach równych rozstawowi wózków pojazdów szynowych. W wyniku tego na skutek zmienności nacisków kół danej osi będących efektem niedoskonałości toru lub pojazdu szynowego obciążenia przez pobudzenie całej konstrukcji mogą doprowadzić do powstania niebezpiecznego w skutkach rezonansu [69, 74]. Przenoszenie obciążeń przy uwzględnieniu statyki następuje w wyniku zmniejszania naprężeń „warstwa po warstwie” natomiast do największych dochodzi pomiędzy kołem a szyną [20]. Pomędzy kolejnymi elementami naprężenia te zmniejszają się wg wzrostu pola powierzchni kolejnych warstw. Do najmniejszych naprężeń dochodzi więc pomiędzy gruntem a podsypką kolejową [43]. Przejeżdżający z dużą prędkością przez most pociąg powoduje bardzo szybki przyrost sił, naprężeń,

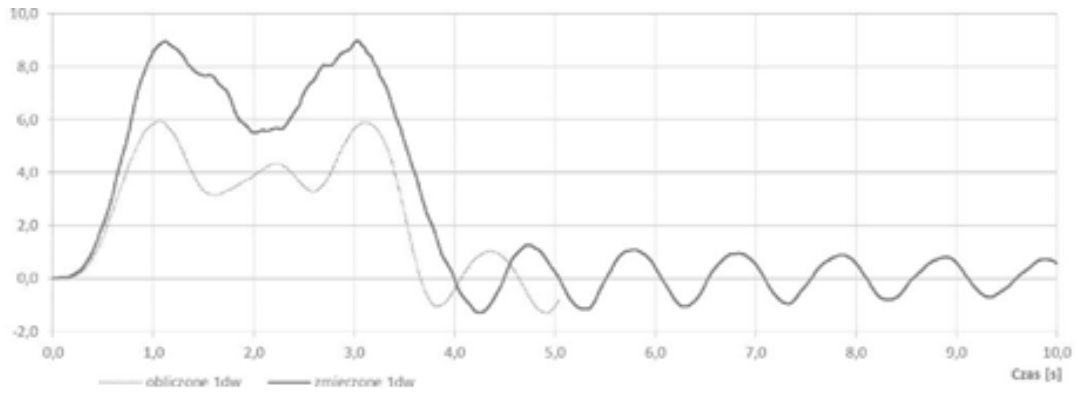
przyspieszeń oraz drgań, dlatego analizowany współczynnik dynamiczny może nie objąć całego przyrostu [19]. Aby dokładnie odzwierciedlić właściwą odpowiedź badanej konstrukcji na szybko zmieniające się obciążenie, należy analizować w głównej mierze dynamikę samego toru. Dlatego też model wyjściowy układu można otrzymać przez przemnożenie widma na wejściu z funkcją odpowiedzi układu. System zawieszenia pomiędzy kołem a wózkiem jest to połączenie pozwalające ograniczyć drgania pochodzące z ich wzajemnego oddziaływania [38]. Kolejny stopień tłumienia występuje pomiędzy wózkiem resorowanym a masą pojazdu szynowego. W takim układzie tor uznawany jest jako konstrukcja sztywna i dlatego łącznie z pojazdem szynowym jest traktowany jako jednorodny system [39, 54, 57, 59, 60, 64, 65, 70].

Kolejnym istotnym zagadnieniem dotyczącym dynamiki jazdy są przechyły składu, które wpływają bezpośrednio na bezpieczeństwo, szczególnie podczas jazdy na łuku [33, 50, 55, 73, 87, 92, 97]. Przykładowo w pracy [87] przedstawiono ocenę skutków oddziaływań bocznych występujących na wiaduktach kolejowych leżących na łukach przy przejeździe pociągów dużej prędkości posiadającymi wychylne pudła. Badania prowadzone były zarówno na obiekcie rzeczywistym jak i modelu teoretycznym. W czasie badania analizowano przemieszczenia poziome oraz pionowe. Otrzymane przez autorów wyniki przedstawiono na rysunkach 20 i 21. Na wykresach wyraźnie widoczne są ekstrema wartości przechyłów w chwili poruszania się składu po łuku (czas od 0,2 do 4 sekundy).



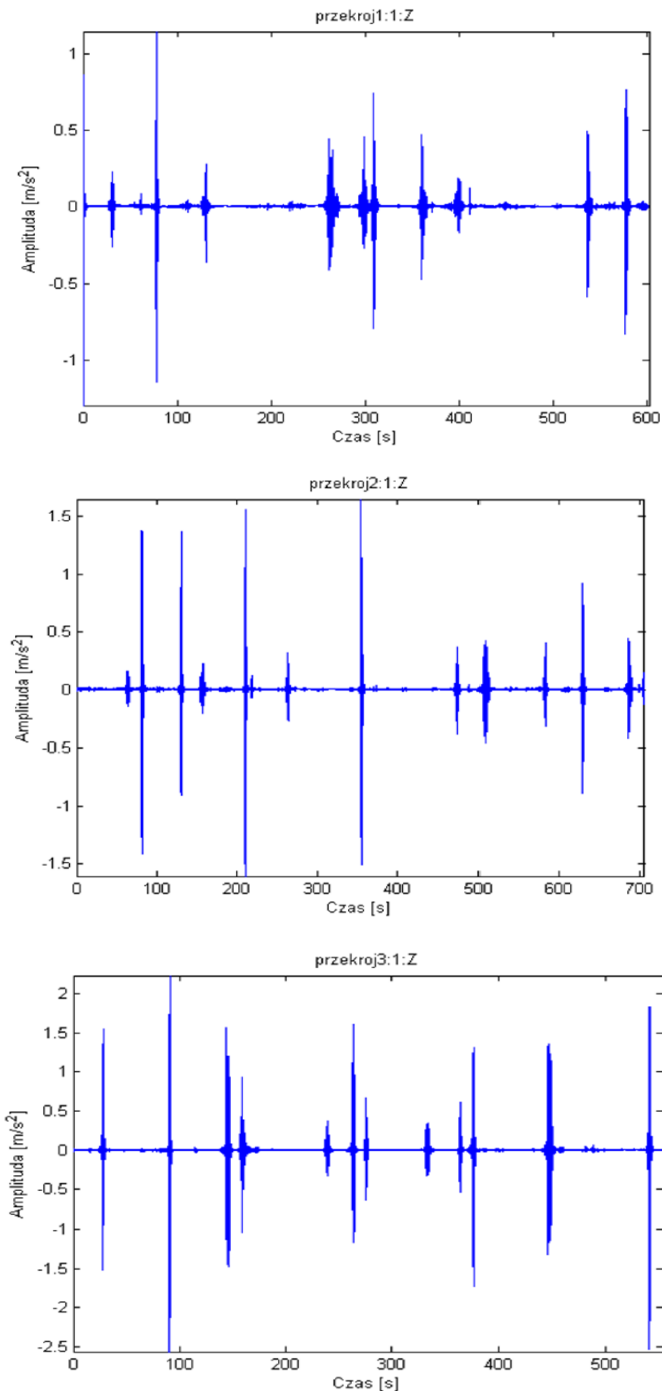
Rys. 20 Przebieg przemieszczeń pionowych zarejestrowany podczas przejazdu pociągu z prędkością około 200km/h [87].





Rys. 21 Przebieg przemieszczeń poziomych zarejestrowany podczas przejazdu pociągu z prędkością około 200km/h [87].

Wiele publikacji w analizowanym obszarze dotyczy badań oddziaływania transportu kolejowego na skutek generowanych drgań gruntu. Autorzy w pracy [12] podjęli się rozważania wpływu drgań generowanych przez transport szynowy na jakość życia społeczeństwa oraz kondycję techniczną infrastruktury w otoczeniu torowiska. Przeprowadzono badania propagacji fali drganiowej w gruncie wynikającej z poruszania się pojazdów szynowych w otoczeniu infrastruktury miejskiej tj. tramwajów przy zastosowaniu eksploatacyjnej analizy modalnej. Podczas badań rejestrowano przebiegi czasowe drgań w trzech osiach, sygnałem referencyjnym był sygnał pionowej osi Z, zastosowana została filtracja dolnoprzepustowa o częstotliwości progowej 80 Hz [63]. Zastosowano łącznie 15 punktów pomiarowych po 5 w każdym z 3 testów w odległości 2, 4, 8, 16 i 20 lub 32 metry. Do pomiarów zastosowano czujniki sejsmiczne oraz trójosiowych akcelerometrów piezoelektrycznych. Uzyskane przykładowe przebiegi przyspieszeń drgań przedstawiono rysunku 22. Występujące lokalne wartości maksymalne w przebiegach skorelowane są z czasem przejazdu pojazdu szynowego. Porównując wartości dla kolejnych odległości istnieje możliwość estymacji propagacji fali drganiowej w gruncie, co może być istotną wskazówką podczas projektowania zabudowy wokół linii torowych.



Rys. 22 Przebiegi przyspieszeń drgań rejestrowane w wyznaczonym punkcie [12].

Kolejnym istotnym obszarem badań jest oddziaływanie bezpośrednio transportu kolejowego na otaczające budynki. Przykładowo w publikacji [89] podjęto próbę identyfikacji drgań pochodzących od przejeżdżającego z prędkością bliską 200km/h pojazdu szynowego na murowany budynek mieszkalny. Oddziaływanie drgań na ludzi znajdujących się w budynkach mieszkalnych zlokalizowanych w pobliżu linii kolejowej może powodować znaczny dyskomfort lub nawet skutki zdrowotne. Dlatego celem

autorów pracy [89] było opracowanie wskazówek dotyczących zagospodarowywania terenów znajdujących się w niedalekiej odległości od linii kolejowych. W artykule tym przedstawiono wyniki przyspieszeń drgań rejestrowanych na dachu i nad piwnicą generowanych przejazdem pociągu Pendolino z prędkością 193 km/h. W ramach analizy wyników wskazano bezpieczne odległości oddziaływania drgań na infrastrukturę otaczającą linie kolejowe.

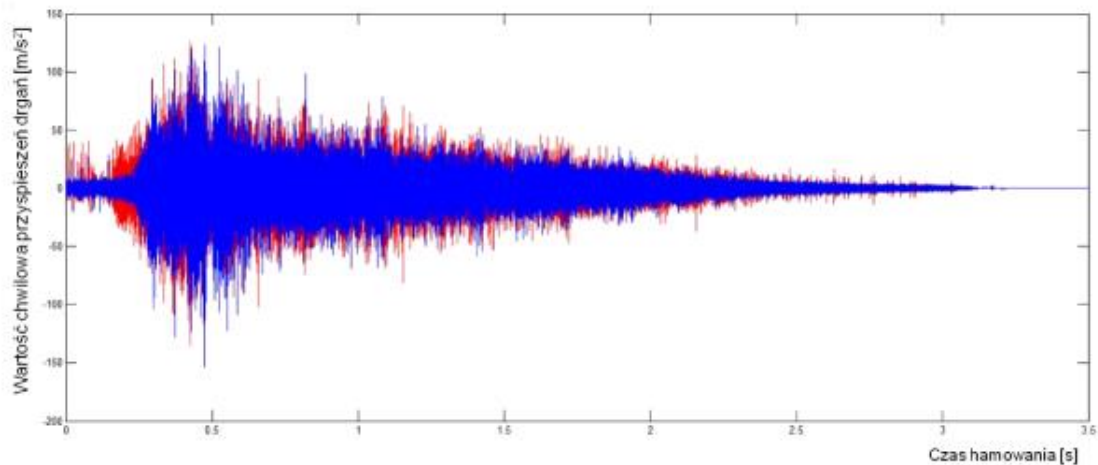
Z punktu widzenia poprawności działania systemów zasilania zelektryfikowanej sieci kolejowej istotne są także zagadnienia związane z oddziaływaniem drgań na sieci trakcyjne i przewody jezdne. Przykładowo w pracy [108] przedstawiono wpływ siły naciągu i kąta zawieszenia oraz stopnia zużycia przewodu trakcyjnego na amplitudy drgań i dominujące częstotliwości. W pracy [75] natomiast przedstawiono wyniki badań oddziaływania odbieraka bezpośrednio na sieć trakcyjną modelując dynamikę wynikającą z ruchu pociągów dużych prędkości.

Istotny wpływ ruchu pojazdów szynowych na generowane drgania, których przykłady przedstawiono w tym rozdziale, potwierdza także zasadność prowadzenia badań w zakresie tłumienia lub izolowania tych drgań [44, 66, 67, 83, 96]. W literaturze można znaleźć publikacje poświęcone właśnie tej tematyce. Przykładem jest publikacja [3] dotycząca badań symulacyjnych wibroizolowanych torowisk tramwajowych na przykładzie aglomeracji śląskiej. Przedmiotem pracy było opracowanie numerycznego modelu podłoża i przeprowadzenie symulacji drgań dla torowiska wibroizolowanego oraz torowiska posadowionego na podłożu betonowym. Przeprowadzono symulację i porównanie wyników w zależności od konstrukcji budynku znajdującego się w pobliżu miejsca pomiarowego. Otrzymane wnioski wskazują, że zastosowanie mat wibroizolacyjnych pozwala obniżyć propagację drgań przenoszonych na konstrukcje budowlane sąsiadujące z torowiskiem.

#### **4.2. Badania drgań elementów pojazdów szynowych**

Kolejnym obszarem zainteresowań naukowych są badania drgań pojazdów szynowych. Zdecydowanie najwięcej publikacji można znaleźć na temat kontaktu koło-szyna, jednak badane są także drgania innych zespołów pojazdu. Przykładowo autorzy w pracy [105] podjęli się przeprowadzenia analizy działania układów hamulcowych pojazdów szynowych uzależnionych, w głównej mierze od współpracy tychże elementów tj. tarcza hamulcowa/okładzina cierna co przedstawione zostało na rysunku 23. Poruszone zostały

miedzy innymi zagadnienia wynikające z występowania drgań na styku tych elementów, mające znaczny wpływ na efektywność hamowania pojazdu. W rzeczywistości oznacza to, że zmienne tarcie stanowiąc będzie problem nierównomiernego przebiegu całego procesu hamowania, co w efekcie objawi się jako drgania samowzbudne przenoszone w ostateczności na cały pojazd szynowy, ale również drogę po jakiej ten pojazd się porusza. Podczas badań rejestrowano drgania zewnętrznej części okładzin ciernych podczas hamowania pojazdu szynowego, aż do chwili jego całkowitego zatrzymania się.



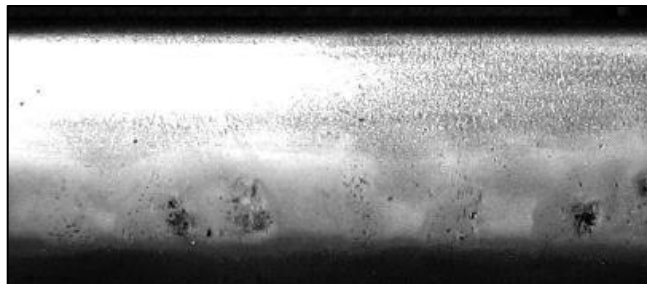
Rys. 23 Wartości chwilowe przyspieszeń drgań dla hamowania z prędkości 60 km/h do zatrzymania, kolor czerwony-pierwsza oś hamowana, kolor niebieski-druga oś hamowana [105].

Podczas hamowania pojazdu szynowego występuje charakterystycznych hałas. W pracach [51, 105] przedstawiono wyniki badań wpływu rodzaju materiału wstawek hamulcowych pojazdów szynowych na poziom emisji hałasu w trakcie hamowania.

Innym przykładem badań drgań elementów pojazdu szynowego są publikacje [14] oraz [100], gdzie w pierwszej podjęto tematykę drgań zestawu kołowego w czasie jazdy dwóch typów pociągów Alstom Metropolis oraz rosyjskiego Mietrowagonmasz w tunelu Warszawskiego Metra. Pomiaru drgań dokonywano na maźnicach zestawów kołowych badanych pociągów. Autor analizował wpływ na drgania stanu obręczy kół, prędkości poruszania się pojazdów oraz dynamikę zmiany prędkości.

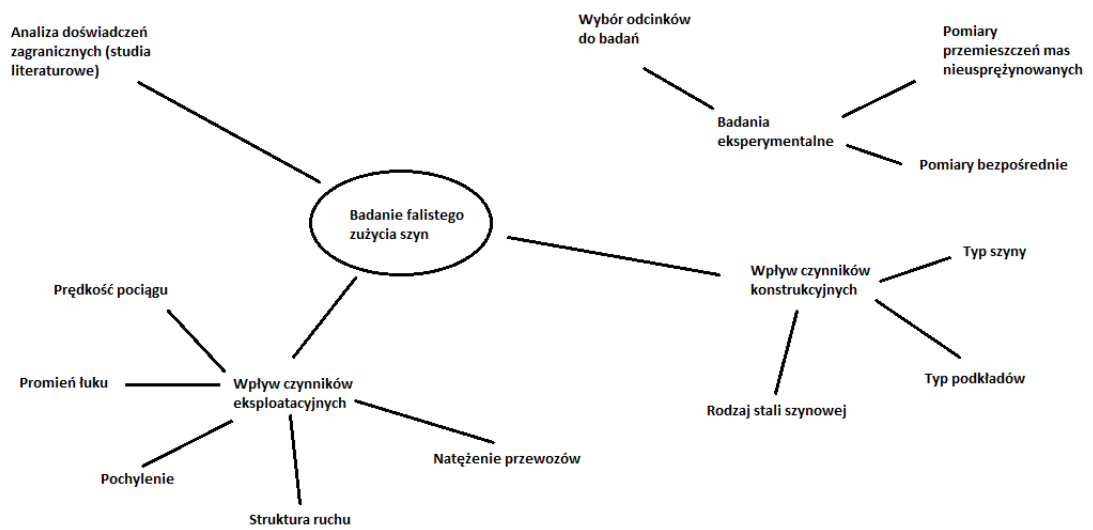
### 4.3. Drgania a zjawisko kontaktu koło-szyna

Najbardziej obszernie studiowanym problemem naukowym w aspekcie źródeł drgań w transporcie kolejowym jest zjawisko kontaktu koło-szyna [11, 17]. Zdecydowana większość badań tego zagadnienia dotyczy zjawisko związanych z procesami zużycia i tarcia [56,88]. Występują jednak publikacje dotyczące przykładowo wpływu drgań na zachowanie właściwości szyn kolejowych. W publikacji [10] jako efekt zużycia szyn kolejowych wskazano wzrost drgań w czasie przejazdu pociągu. Amplituda przemieszczeń szyny powyżej 0,05 mm powoduje już znaczny wzrost hałasu, ale przede wszystkim oddziałuje na podtorze, na podsypkę powodując jej rozluźnienie i w efekcie niekorzystny spadek zarówno jakości jak i wymaganej trwałości. Według autora tej publikacji główne zużycie faliste szyn (przedstawione na rysunku 24) to zużycie na skutek oddziaływania długości fal pomiędzy 25 a 80 mm, na które to zasadniczy wpływ ma powstający w wyniku przejazdu pojazdu szynowego rezonans nieusprężynowanej masy oraz sztywności nawierzchni kolejowej.



Rys. 24 Szyna ze zużyciem falistym [10].

Najczęstszy podział zużycia falistego szyny wyróżnia długości fal: „krótkie”, „średnie” oraz „długie”. Faliste zużycie szyn ściśle powiązane jest zarówno z czynnikami eksploatacyjnymi szyny jak i jej właściwościami konstrukcyjnymi przedstawionymi na rysunku 25.

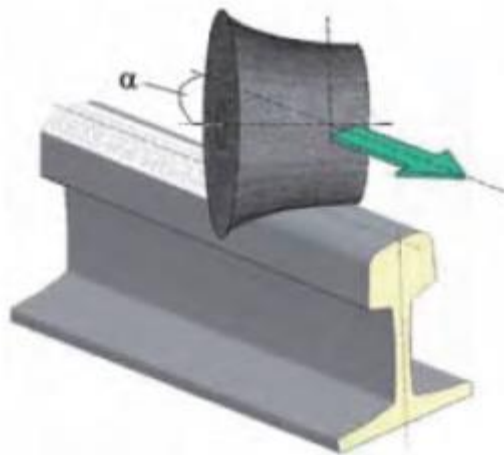


Rys. 25 Czynniki mające wpływ na zużycie szyn kolejowych [10].

Zużycie faliste szyny jest przyczyną przyśpieszonej degradacji podtorza oraz całej nawierzchni kolejowej. Powoduje również szybsze zużycie wybranych elementów pojazdów szynowych. Dodatkowo powoduje wzrost hałasu i pogarsza komfort jazdy odczuwalny zarówno przez pasażerów jak i mieszkańców okolicznych domostw w szczególności w przypadku generowania krótkiej fali w zakresie pasma odbieranego przez ucho ludzkie. Sposoby zapobiegania to głównie szlifowanie nierówności (Rys. 26), czyli tzw. reprofilacja początkowa, prewencyjna, naprawcza czy regeneracyjna. Zatem w przypadku wysokich obciążeń toru utrzymanie gładkiej powierzchni główki szyny jest jedynym sposobem zapobiegania zużyciu falistemu.



Rys. 26 Szlifowanie szyn [139].



Rys. 27 Szlifowanie obwodowe szyn [140]

Główną przyczyną powstawania zużycia falistego jest rezonans nieusprężynowanej masy silnie obciążonego pojazdu szynowego oraz sztywność nawierzchni kolejowej [23]. Powstające w wyniku eksploatacji nierówności na powierzchni szyny są przyczyną powstania tzw. fal o małej wartości  $\lambda$  jednak o wysokiej amplitudzie.

Modelowanie dynamiki z uwzględnieniem zjawiska kontaktu koło-szyna zostało przedstawione w publikacjach [101-103]. W jednej z prac przedstawiono opracowany model numeryczny wagonu kolejowego. Autorzy dokonali weryfikacji modelu o 6 stopniach swobody. Przedstawiono także analizy wpływu parametrów usprężynowania na siły występujące w kontakcie pomiędzy kołem a szyną. Zastosowany przez autorów tok obliczeń przyczynił się do minimalizacji błędów obliczeń numerycznych ale przede wszystkim wpłynął na wyjaśnienie wpływu sztywności usprężynowania zawieszenia wagonów na siły oddziaływujące na koła.

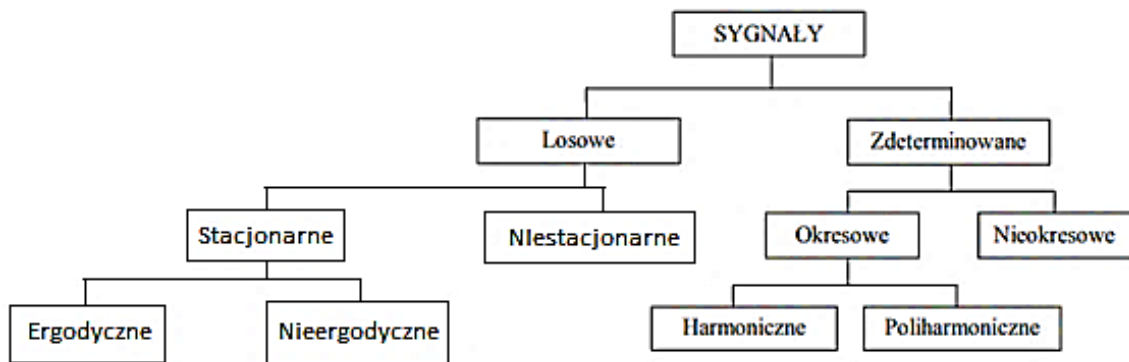
Innym zagadnieniem opisanym w pracy [21] jest analiza zagadnień dynamicznych związanych z kinematycznym wymuszeniem pochodzącym od uszkodzeń torów kolejowych, wpływających na ponadnormatywne zużycie pojazdów szynowych i dalszy postęp degradacji torów. Przedstawione zostały przyczyny obciążeń szyn kołami pojazdów szynowych znacznie większych od powszechnie przyjętych za rzeczywistość występujące.

## ROZDZIAŁ 5 - PODSTAWY ANALIZY SYGNAŁÓW

Z uwagi na to, że celem badań było analiza możliwości zastosowania sygnałów drganiowych zarejestrowanych na szynie kolejowej do wykrycia zbliżającego się pojazdu szynowego, podstawowa wiedza w zakresie analizy i przetwarzania sygnałów jest fundamentalna.

Sygnał jest nośnikiem informacji o zmianie lub zaistnieniu pewnych zjawisk fizycznych [81,114]. Postać sygnału reprezentującego dane zjawisko zależy od możliwości pomiarowych wielkości fizycznych opisujących to zjawisko. W zakresie podstaw metrologii wyróżnia się pomiary bezpośrednie i pośrednie, w zależności od dostępnych metod i narzędzi wykonywania pomiaru. Sygnał wg definicji encyklopedycznej to nośnik wiadomości (informacji) umożliwiający jej przesyłanie na odległość lub w czasie (rejestrację). Może mieć postać umownego znaku (np. rysunku, liter) lub przebiegu wielkości fizycznej, którego co najmniej jeden parametr (np. kształt, częstotliwość, amplituda) zależy od przesyłanej w nim wiadomości. Rozróżnia się sygnały elektryczne (np. zmieniające się napięcie lub natężenie prądu), akustyczne (zmieniająca się częstotliwość i poziom dźwięku), optyczne (zmieniające się natężenie lub barwa światła), itd. W związku z powyższym sygnałem jest każdy obserwowany proces fizyczny będący nośnikiem informacji [47,48].

Z uwagi na podstawowe właściwości sygnały możemy podzielić w sposób przedstawiony na rysunku 28.



Rys. 28 Klasyfikacja sygnałów.

Sygnały zdeterminowane to takie, których przebiegi są w sposób jednoznaczny opisane za pomocą znanych funkcji. Natomiast sygnały losowe, to te których nie można jednoznacznie opisać za pomocą funkcji matematycznych, a do ich opisu należy użyć metod statystycznych [104,113].



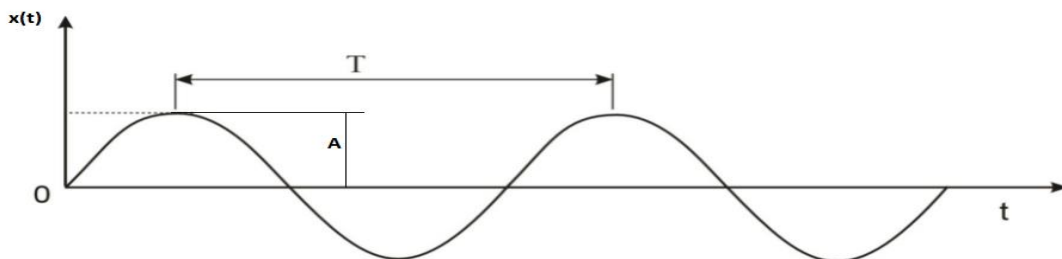
Sygnaly funkcji okresowych – to takie,  $\forall t \in \mathbb{D} f(x) = f(t + T)$ . Sygnaly harmoniczne to sygnaly okresowe opisane funkcją harmoniczną. Sygnaly poliharmoniczne to sygnaly okresowe złożone z co najmniej dwóch różnych sygnalów harmoniczných, zwanych sygnalami składowymi.

Analiz sygnalów wykonuje się w różnych przestrzeniach. Dziedzina czasu, stanowi obszar opisu oraz obserwacji sygnalu dostarczającą informacji o czasowej realizacji (czasowym przebiegu) sygnalu. Czas – w ujęciu diagnostycznym – dzielimy na czas mikro i czas makro. Czas mikro jest to czas, w którym dokonuje się obserwacji realizacji sygnalu, natomiast czas makro jest czasem życia obiektu (np. maszyny) [53,115].

W analizie sygnalów rozróżnia się zapis ciągły i dyskretny. Sygnal ciągły – jest sygnalem analogowym  $x(t)$ , którego wartości należą do ciągłego zbioru i mogą się zmieniać w dowolnej chwili oraz są określone w każdym momencie (zaletą jest zawartość wszelkich informacji o zmianie wielkości mierzonej w czasie). Sygnal dyskretny  $x_i(t)$ , to sygnal, którego wartości należą do zbioru przeliczalnego ( $i$ -ta dyskretna wartość pobrana z realizacji ciągłej). Jest to sygnal, który uzyskuje się w wyniku ciągłego prowadzenia pomiaru i zapisu wartości sygnalu w ściśle określonych odstępach czasowych [81,113].

### 5.1. Ogólne miary sygnalów drganiowych

Analiza sygnalów drganiowych w ujęciu ogólnym realizowana jest w przestrzeni miar amplitudowych, czasowych lub częstotliwościowych. Do określenia tych miar stosuje się analizy statystyczne jednowymiarowe lub bezwymiarowe. Na rysunku 29 przedstawiony został przebieg sinusoidalnego sygnalu harmonicznego.



Rys. 29 Przykładowy przebieg sygnalu sinusoidalnego.

Do miar amplitudowych jednowymiarowych tego typu sygnałów należą:

- a) wartość szczytowa (ang. peak) dostarczająca informację o maksymalnej dodatniej lub ujemnej amplitudzie w czasie obserwacji:

$$X_{max} = \max|x_t| \quad (5.1)$$

- b) wartość międzyszczytowa (ang. peak to peak) sygnału sinusoidalnego jest równa podwojonej amplitudzie:

$$X_{pp} = \max|x_t > 0| + \max|x_t < 0| \quad (5.2)$$

- c) wartość średnia (ang. average):

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt \quad \text{lub} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.3)$$

- d) wartość średnia absolutna (ang. absolute average):

$$\overline{x_{abs}} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |x(t)| dt \quad \text{lub} \quad \overline{x_{abs}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i| \quad (5.4)$$

- e) wartość średniokwadratowa:

$$\Psi^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt \quad (5.5)$$

- f) wartość skuteczna sygnału (ang. RMS – root mean square):

$$X_{RMS} = \sqrt{\Psi^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt} \quad (5.6)$$

Wymienione miary amplitudowe są miarami liczbowymi, którym przyporządkowano wartości wielkości mierzonej. Poza wyżej wymienionymi estymatorami w analizach wibroakustycznych stosuje się estymatory bezwymiarowe zdefiniowane następująco:

- g) współczynnik kształtu (ang. waveform factor):

$$k = \frac{X_{RMS}}{\bar{x}} \quad (5.7)$$

- h) współczynnik szczytu (ang. crest factor):

$$c = \frac{X_{max}}{X_{RMS}} \quad (5.8)$$

i) współczynnik impulsowości (ang. impulse factor):

$$I = \frac{x_{\max}}{\bar{x}} \quad (5.9)$$

j) odchylenie standardowe (and. standard deviation):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.10)$$

gdzie:

$n$  - liczba obserwacji

$x_i$  - wynik kolejnej obserwacji

$\bar{x}$  - wartość średnia

k) wariancja (and. variance):

$$\delta^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.11)$$

l) skośność (moment centralny trzeciego rzędu, ang. skewness):

$$S = \frac{\mu^3}{\delta^3} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (5.12)$$

m) kurtoza (moment centralny czwartego rzędu, ang. kurtosis):

$$K = \frac{\mu^4}{\delta^4} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^2} \quad (5.13)$$

## 5.2. Analiza sygnałów w dziedzinie częstotliwości

Reprezentację sygnału ciągłego  $x(t)$  w dziedzinie częstotliwości  $X(j\omega)$  określa transformata Fouriera:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (5.14)$$

W ogólnym przypadku funkcja widmowa jest zespoloną funkcją, która jest określona dla częstotliwości w przedziale  $-\infty < \omega < +\infty$ . Jednak wartości ujemne składowych częstotliwości mają znaczenie tylko rachunkowe.

Przejście z dziedziny częstotliwości do dziedziny czasu umożliwia odwrotna transformata Fouriera:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (5.15)$$

Dla sygnałów dyskretnych przekształcenia dokonuje się za pomocą Dyskretnej Transformaty Fouriera (DFT), która definiuje ciąg dyskretny  $X(m)$  w dziedzinie częstotliwości zgodnie z następującym równaniem:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi mn/N} \quad (5.16)$$

oraz odwrotną dyskretną transformatę Fouriera (IDFT):

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{j2\pi mn/N} \quad (5.17)$$

gdzie:

$X(m)$  – to  $m$ -ta składowa wyjściowa DFT

$m$  – to indeks próbek wyjściowych w dziedzinie częstotliwości ( $m=1,2,3,\dots,N-1$ )

$x(n)$  – to ciąg próbek wejściowych

$n$  – to indeks próbek wejściowych ( $n=1,2,3,\dots,N-1$ )

$N$  – to liczba próbek ciągu wejściowego oraz liczba punktów częstotliwości w ciągu wejściowym DFT.

Wartość bezwzględna amplitudy  $X(m)$  wyznacza się z zależności:

$$|X(m)| = \sqrt{\operatorname{Re}^2[X(m)] + \operatorname{Im}^2[X(m)]} \quad (5.18)$$

, gdzie:

$\operatorname{Re}$  – to część rzeczywista widma

$\operatorname{Im}$  – część urojona widma.

Wyznaczenie DFT wymaga wykonania  $N^2$  operacji mnożeń oraz  $N$  operacji dodawań. Stosując algorytm szybkiej transformacji Fouriera FFT liczbę obliczeń można zmniejszyć do ok.  $2/N \log_2 N$ . Do obliczeń numerycznych stosuje się specjalny algorytm

transformaty Fouriera zwany szybką transformatą Fouriera (FFT) pozwalającą skrócić czas przetwarzania i ograniczyć liczbę operacji.

Najpopularniejszą wersją FFT jest FFT o podstawie 2. Algorytm FFT o podstawie 2 jest bardzo efektywną procedurą wyznaczania DFT pod warunkiem, że rozmiar DFT będzie całkowitą potęgą liczby 2. Jeśli liczebność próbek jest inna to rozwiązaniem jest dodanie wymaganej liczby próbek o wartościach zerowych do części końcowej ciągu danych czasowych, aby dopasować liczbę jego punktów do kolejnego rozmiaru FFT o podstawie 2. Operację tą w teorii przetwarzania sygnałów nazywamy „dodawaniem zer”.

### 5.3. Wielowymiarowe analizy sygnałów

Oddzielną kategorię sygnałów losowych stanowią sygnały niestacjonarne, które charakteryzują się zmianami własności statystycznych w czasie. Występują one np. w niestabilnych warunkach pracy [48]. Do opisu statystycznego pojedynczego procesu niestacjonarnego służą niestacjonarne funkcje autokorelacji, gęstości prawdopodobieństwa i gęstości widmowej. Probabilistyczna struktura zmiennej losowej  $x(t_1)$  jest funkcją chwili  $t_1$ . Ocenia się ją za pomocą wartości oczekiwanej analizowanego estymatora. W analizach sygnałów niestacjonarnych, o zmiennych cechach czasowych, konieczne jest zastosowanie metod zachowujących te cechy. Zadanie te można realizować przez podzielenie sygnałów na pewne odcinki i następnie przeanalizowanie własności częstotliwościowych dla każdego odcinka osobno. Do tego celu wykorzystuje się wielowymiarowe metody analizy jednocześnie w dziedzinie czasu i częstotliwości, wśród których wyróżnić należy:

- krótkoczasową transformatę Fouriera,
- transformatę falkową,
- transformatę Wignera-Ville’a,
- i inne.

## **ROZDZIAŁ 6 – METODY BADAŃ**

Sformułowana w rozprawie teza oraz cele metodyczny i użyteczny umożliwiły opracowanie planu badań oraz metod badawczych.

Opracowany plan badań obejmował:

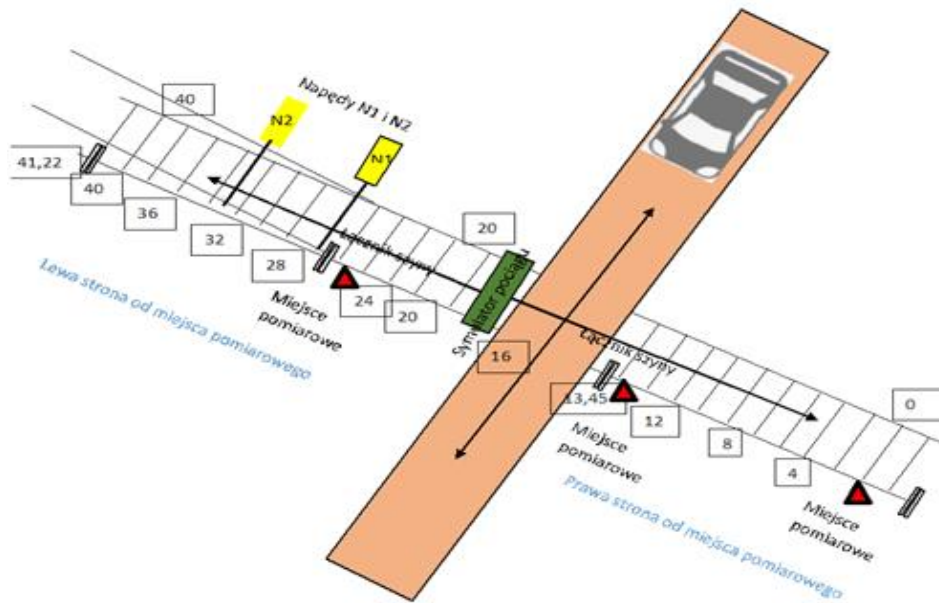
- badania wstępne w zidentyfikowanym środowisku infrastruktury kolejowej na torze testowym,
- badania pilotażowe w warunkach terenowych (Jawor, Opole)
- badania w warunkach rzeczywistych przy przejazdach kolejowo-drogowych.

Całość badań prowadzona była w okresie czasowym 7 lat.

### **6.1. Badania wstępne**

Pierwsze wstępne badania odpowiedzi na wymuszenia drganiowe miały miejsce na terenie Politechniki Śląskiej w listopadzie 2016 roku. Schemat badań przedstawiono na rysunku nr 30 natomiast dokumentację fotograficzną na rysunku nr 31 oraz 32. Były to badania w rozpoznanym środowisku infrastruktury kolejowej na torze testowym, których celem była analiza pojemności informacyjnej sygnałów drganiowych szyny kolejowej generowanych pracą urządzeń SRK oraz przejazdem samochodu i symulatora pojazdu szynowego. Dodatkowo prowadzono eksperymenty dotyczące symulacji wymuszeń impulsowych, charakterystycznych do prac remontowych i inspekcyjnych na torowiskach.

Dodatkowym celem badań było dobranie elementów i parametrów systemu pomiarowego oraz sposobu mocowania czujników do szyny odpowiednich do badań terenowych.



Rys. 30 Schemat badań na torze testowym.

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 31 Dokumentacja zdjęciowa systemu pomiarowego na terenie Politechniki Śląskiej gdzie: A – System pomiarowy, B- mocowanie z czujnikami drgań, C- symulator pociągu, D- napęd zwrotnicowy, E – Schemat toru testowego na terenie Politechniki Śląskiej w Katowicach. Źródło: opracowanie własne.

Badania prowadzone były przy wykorzystaniu trzech 1-osiowych piezoelektrycznych czujników przyspieszenia VIS311A firmy Electronics o czułości 100mV/g, 10.2mV/(m/s<sup>2</sup>), zakresie pomiarów +/-50g (+/-490m/s<sup>2</sup>), pasmo przenoszenia częstotliwości 0,5-10000 Hz oraz częstotliwości rezonansowej 25kHz. Dodatkowo w celu zamocowania ww. piezoelektrycznych czujników przyspieszenia zastosowano dopuszczone do użytkowania na terenie sieci PKP mocowanie czujnika koła firmy Bombardier przedstawione na zdjęciu 36.



Rys. 32 Uchwyt firmy Bombardier wraz z piezoelektrycznymi czujnikami przyspieszenia.

*Źródło: opracowanie własne.*

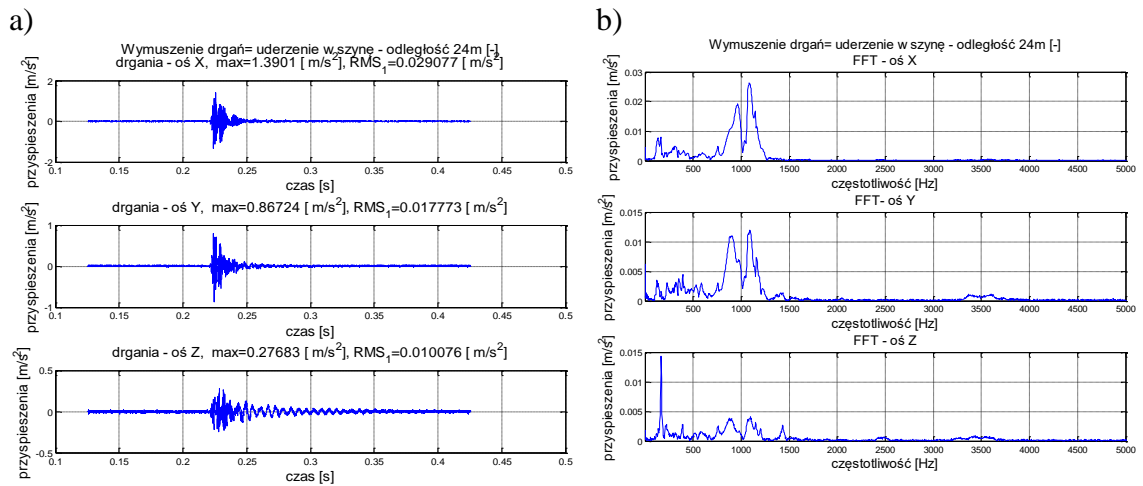
Tak skonstruowany system pomiarowy wykorzystywany był w kolejnym etapie pilotażowych badań terenowych przez okres około roku. Zastosowano go do realizacji badań terenowych w Opolu oraz na stacji kolejowej Jawor, łącznie we współpracy z kartą sieciową NI9233 o 4 analogowych kanałach wejściowych, o rozdzielczości przetwornika analogowo cyfrowego 24 bitów typu Delta- Sigma.

Wstępne badania sprawdzające właściwości rejestracji odpowiedzi drganiowych na określone wymuszenia przeprowadzono z wykorzystaniem przejazdu pojazdu samochodowego przez przejazd kolejowy, pracy urządzeń sterowania ruchem kolejowym tj. pracy napędów zwrotnicowych, przejazdu symulatora pociągu oraz swobodnego spadku z określonych wysokości masy na szynę kolejową.

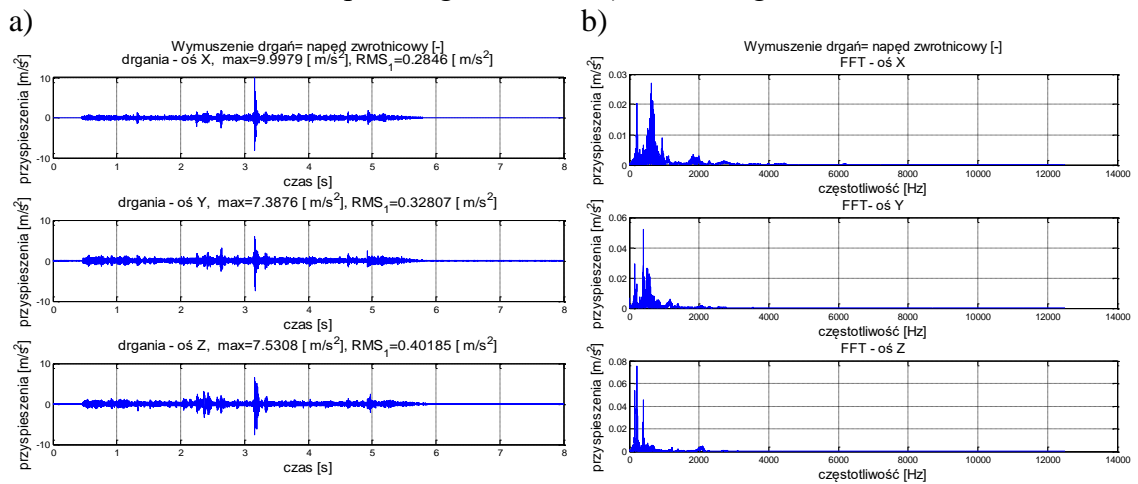
Wszystkie zarejestrowane sygnały przyczyniły się do opracowania planu badań w środowisku rzeczywistym w kolejnych etapach realizacji badań.

Wyniki badań „środowiska drganiowego” infrastruktury kolejowej w okolicy przejazdu kolejowo-drogowego, jako przebiegi i widma drgań w trzech prostopadłych osiach przedstawiono na rysunkach nr 33-36.

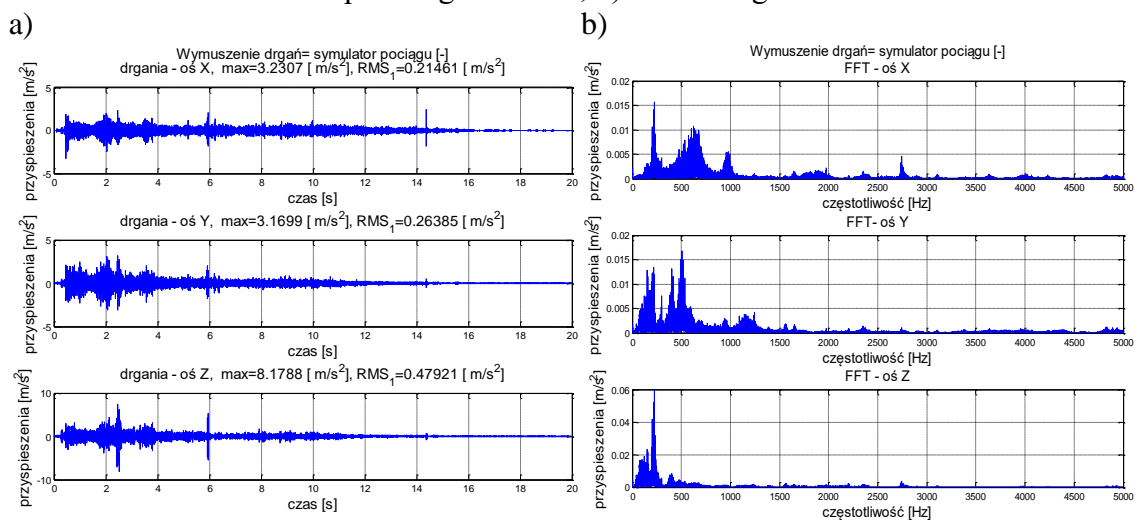




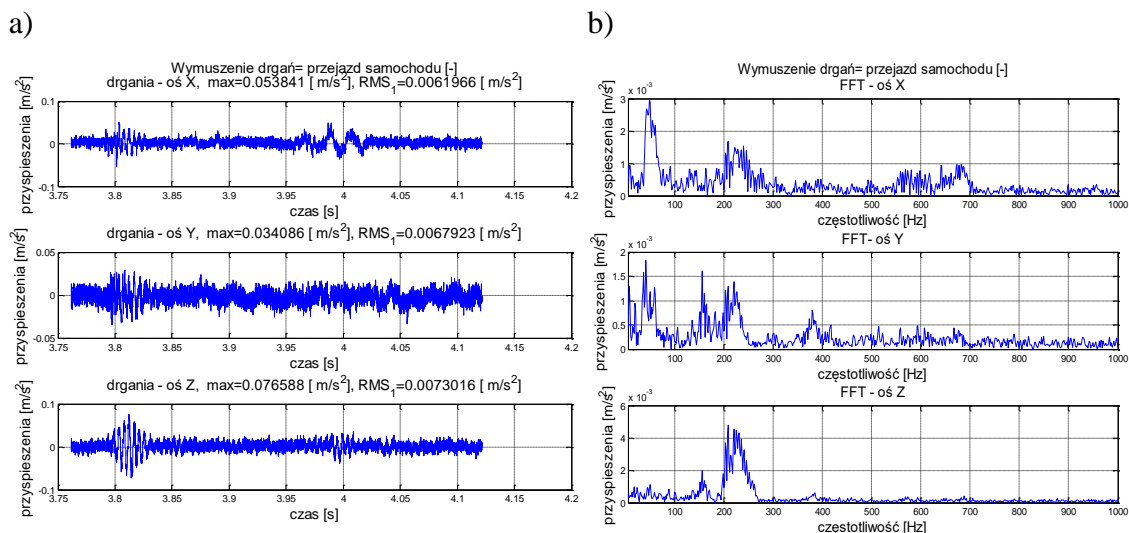
Rys. 33 Sygnały drgań zarejestrowane podczas impulsu uderzenia w szynę: a) przebiegi czasowe, b) widma drgań.



Rys. 34 Sygnały drgań zarejestrowane podczas pracy napędu zwrotnicowego: a) przebiegi czasowe, b) widma drgań.



Rys. 35 Sygnały drgań zarejestrowane podczas przejazdu symulatora pociągu: a) przebiegi czasowe, b) widma drgań.



Rys. 36 Sygnały drgań zarejestrowane podczas przejazdu samochodu osobowego przez przejazd kolejowy: a) przebiegi czasowe, b) widma drgań.

Wyniki przedstawione powyżej ukazują jawną różnicę w strukturze sygnałów drganiowych generowanych w środowisku przejazdu kolejowo-drogowego. Różnice te widoczne są już na podstawie wartości skutecznych przebiegów sygnałów oraz dominujących składowych częstotliwościowych widocznych w widmach drgań.

W tabeli 2 zestawiono główne składowe częstotliwościowe badanych widma drgań.

Tabela 2 Główne składowe częstotliwościowe.

źródło / oś	Impuls [Hz]	Napęd zwrotnicowy [Hz]	Symulator pociągu [Hz]	Przejazd samochodu [Hz]
<b>X</b>	ok. 960, ok. 1080	ok. 220, ok. 630, ok. 940	ok. 220, ok. 630, ok. 960, ok. 2740	ok. 50, ok. 210, ok. 680
<b>Y</b>	ok. 900, ok. 1090	ok. 155, ok. 390, ok. 530, ok. 570	ok. 220, ok. 405, ok. 510, ok. 1160	ok. 40, ok. 150, ok. 220, ok. 380
<b>Z</b>	ok. 170, ok. 880, ok. 1100	ok. 155, ok. 220, ok. 390	ok. 95, ok. 155, ok. 220, ok. 400	ok. 50, ok. 155, ok. 210

Wnioski z badań wstępnych wskazują na potencjał zaproponowanej metody badań z uwagi na dużą pojemność informacyjną sygnałów drganiowych rejestrowanych na szynie kolejowej. Każde z eksperymentalnie badanych wymuszeń, które mogą występować w naturalnych warunkach pracy urządzeń infrastruktury kolejowej oraz poruszających się pojazdów (szynowych i drogowych) znalazły swoje odwzorowanie w

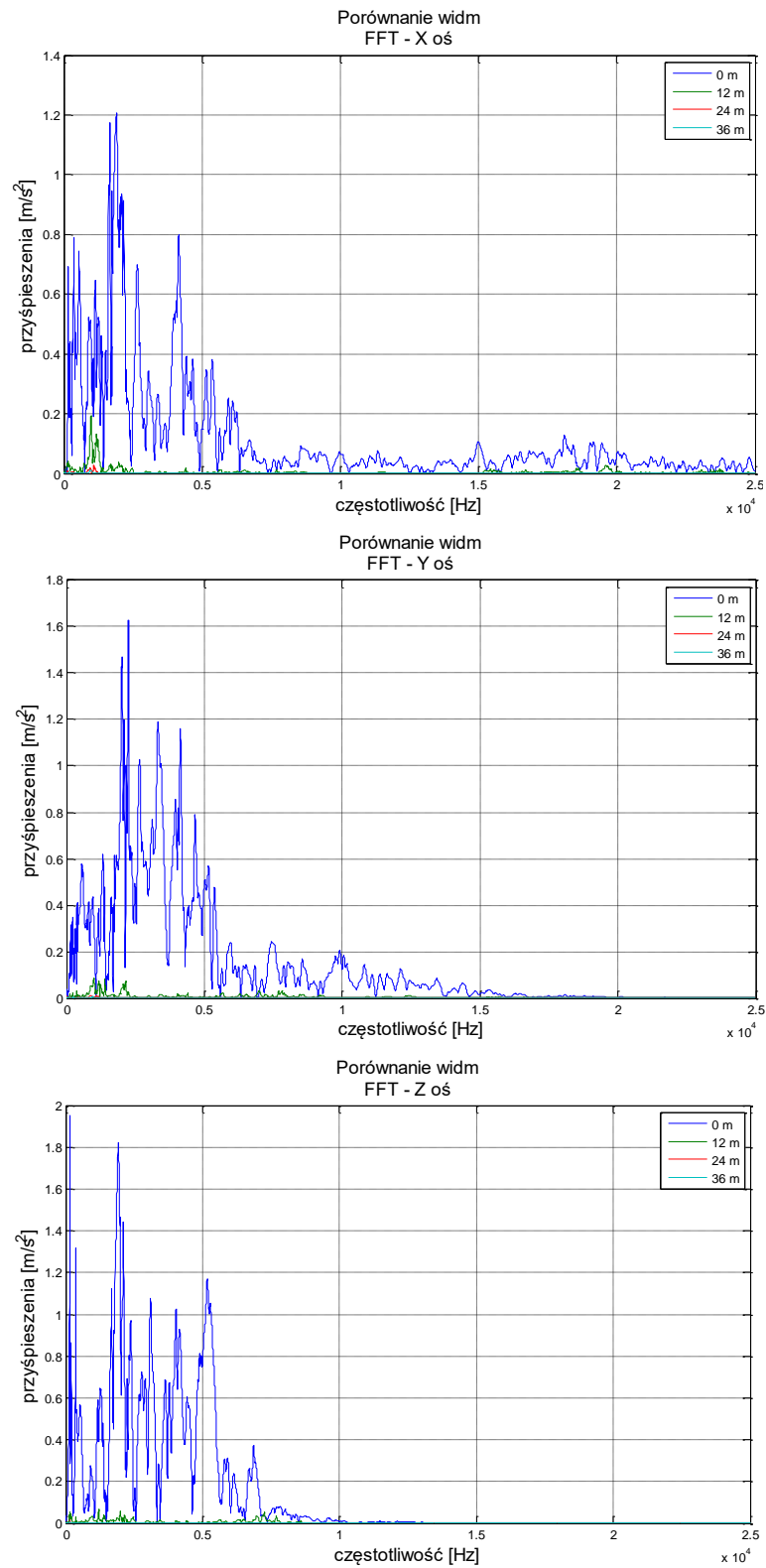
rejestrowanych sygnałach drganiowych. Dodatkowym atutem wynikającym z badań wstępnych jest możliwość separacji składowych sygnału dla różnych wymuszeń, z uwagi na wyraźne różnice w widmach odpowiedzi drganiowej, co umożliwia opracowanie algorytmu filtracji, który odseparuje składowe sygnału będące przedmiotem analizy. Wnioski te potwierdzają także osiągalność celu utylitarnego rozprawy doktorskiej, jaki jest weryfikacja i ocena skuteczności oraz efektywności zaproponowanej metody w zastosowaniu praktycznym.

W związku z powyższym przeprowadzono kolejny eksperyment, którego celem było porównanie zasięgu informacyjnego. W tym celu przeprowadzono badania z wykorzystaniem spadku swobodnego bijaka o określonym ciężarze z założonej wysokości. W ramach eksperymentów zrzucano bijak oddalony o następujące odległości od miejsca rejestracji drgań:

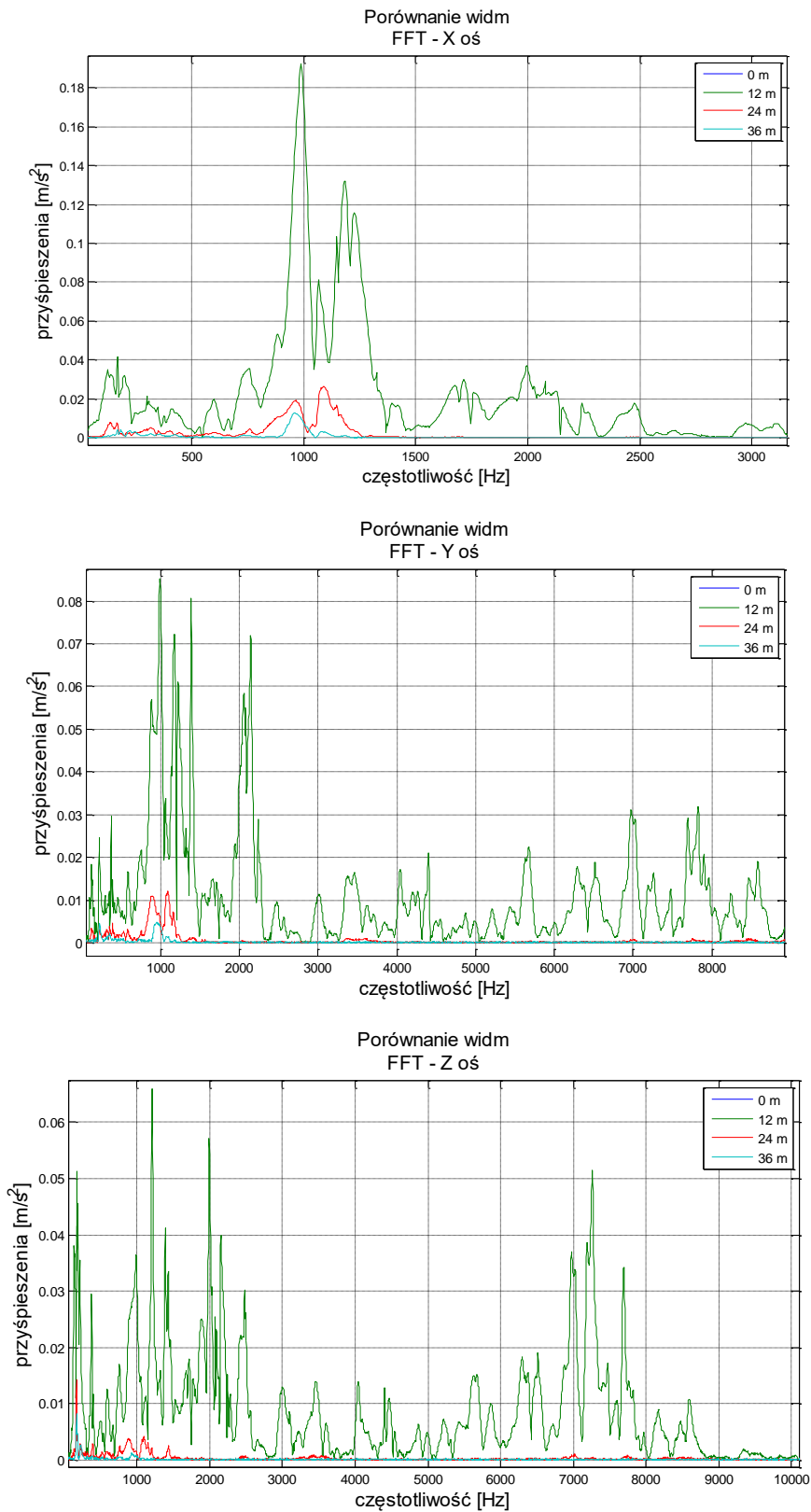
- 0 m – nad czujnikiem,
- 12 m od czujnika,
- 24 m od czujnika,
- 36 m od czujnika.

W ramach analizy porównano struktury widmowe odpowiedzi impulsowej, które zestawiono na rysunku nr 37.

Z uwagi na dominację sygnału zarejestrowanego bezpośrednio nad czujnikiem (0 m) porównano także widma bez tego sygnału, w celu poprawy widoczności różnic zawężono także pasma obserwacji. Wyniki przedstawiono na rysunku nr 38.



Rys. 37 Porównanie widm drgań zarejestrowanych dla wymuszenia impulsowego w różnej odległości.



Rys. 38 Porównanie widm drgań zarejestrowanych dla wymuszenia impulsowego w odległościach 12 m, 24 m i 36 m – dominujące pasma obserwacji.

Zgodnie z opracowaną koncepcją identyfikacji pojemności informacyjnej sygnałów drganiowych infrastruktury kolejowej wykonano badania wstępne w warunkach modelowego systemu przejazdowego w skali rzeczywistej. Wstępna analiza wyników przebiegów drganiowych oraz widm częstotliwościowych wykazuje dobre rokowania. Wyniki badań zasięgu informacyjnego sygnału drganiowego wykazały konieczność przeprowadzenia eksperymentów dodatkowych dla większych odległości. Wyniki tych badań przedstawiono w kolejnym rozdziale.

## 6.2. Pilotażowe badania terenowe

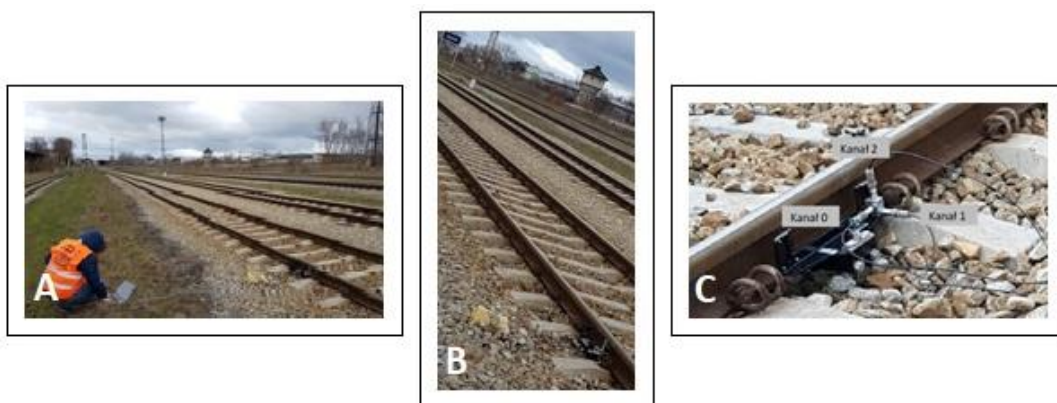
Pierwszym obiektem rzeczywistym na jakim wykorzystano przygotowany system pomiarowy była stacja Jawor. Celem tych badań była identyfikacja zasięgu informacyjnego opracowanej metody pomiarowej. Konieczność ta wynikała z krótkiej długości toru testowego. W tym celu przeprowadzono badania swobodnego spadku masy na szynę kolejową w środowisku rzeczywistym tj. rzeczywistej linii kolejowej. Dokonano ponadto analizy przejazdu pojazdu szynowego tj. lokomotywy spalinowej przez analizowany odcinek linii kolejowej.

Do celów badań pilotażowych zastosowano inne czujniki 1-osiowe rejestrujące synchronicznie przyspieszenia drgań w 3 ortogonalnych osiach (X,Y,Z). W eksperymentach zastosowano akcelerometry marki Endevco o następujących parametrach:

- czułości: 100mV/g | 10.2 mV / (m/s<sup>2</sup>),
- maksymalny zakres pomiarowy: 50 g pk | 491m/ s<sup>2</sup> pk,
- pasmo przenoszenia: 10000Hz.

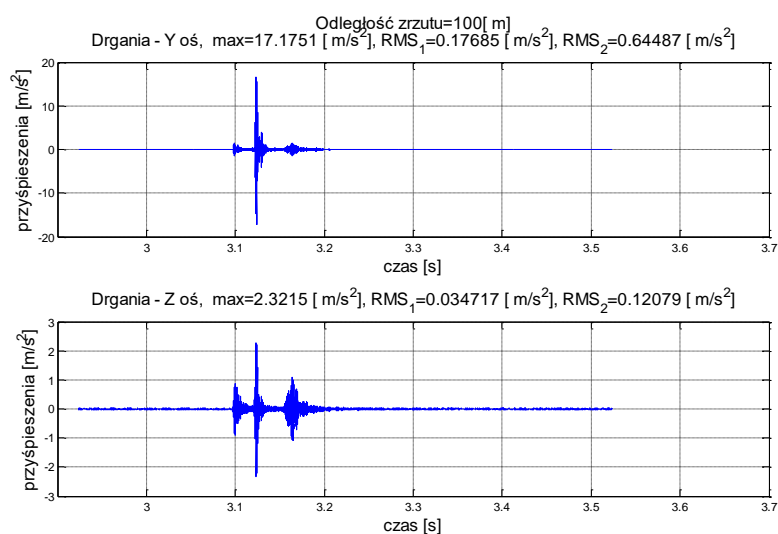
Jako urządzenie archiwizacji danych zastosowano 4-kanałowy analogowy moduł akwizycji danych o rozdzielczości przetwornika analogowo cyfrowego 24 bitów typu Delta- Sigma, próbkowaniu synchronicznemu o złączach BNC, częstotliwości próbkowania 50 kHz na kanał, zakresie sygnału wejściowego +/- 5V oraz sygnałowi wejściowemu IEPE.

Czujniki przytwierdzone zostały połączeniem śrubowym do specjalnie przygotowanego stalowego sześcianu a ten z kolei przy użyciu uchwytu do szyny kolejowej. Otrzymane wyniki wskazały na wystarczającą dokładność pomiarową do identyfikacji zbliżania się pojazdu szynowego.

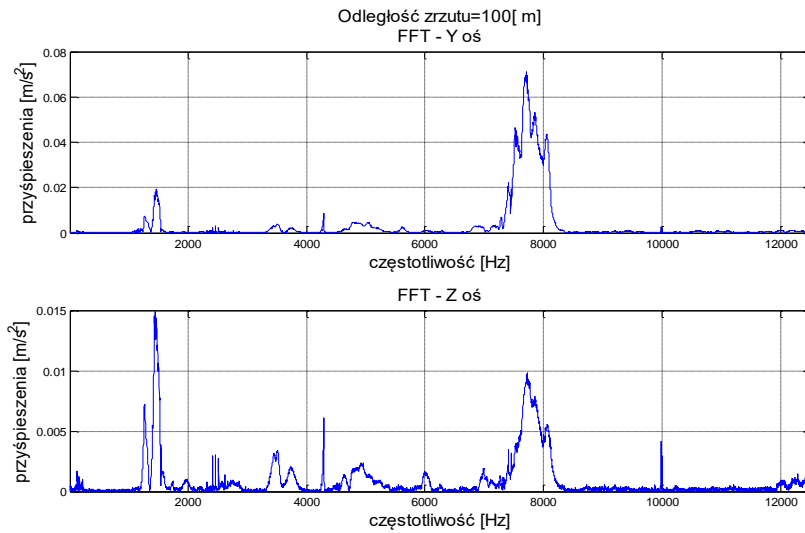


Rys. 39 Badania na stacji Jawor.  
*Źródło: opracowanie własne.*

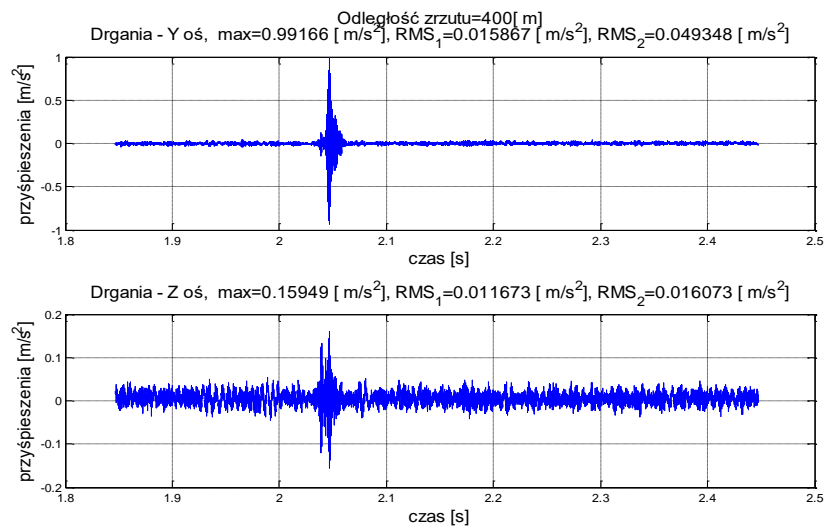
Zakres badań obejmował rejestrację odpowiedzi impulsowej szyny kolejowej na spadek swobodny bijaka. Pomiaru dokonywano co 20 m, licząc od miejsca lokalizacji czujników pomiarowych, aż do odległości 400 m, która była określona jako docelowa odległość detekcji dla przejazdów kategorii D. Przykładowe wyniki pomiarów dla odległości 100 m i 400 m przedstawiono na rysunkach nr 40÷43.



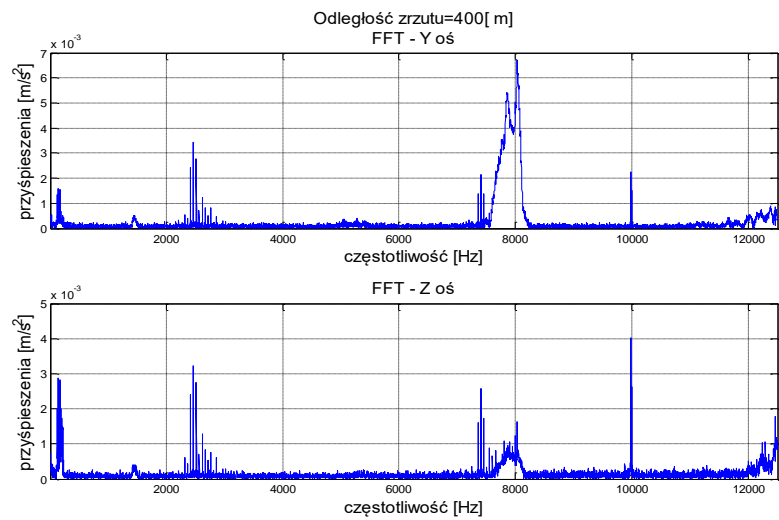
Rys. 40 Odpowiedź impulsowa szyny w odległości 100 m od wymuszenia.



Rys. 41 Widmo odpowiedzi impulsowej szyny w odległości 100 m od wymuszenia.



Rys. 42 Odpowiedź impulsowa szyny w odległości 400 m od wymuszenia.



Rys. 43 Widmo odpowiedzi impulsowej szyny w odległości 400 m od wymuszenia.



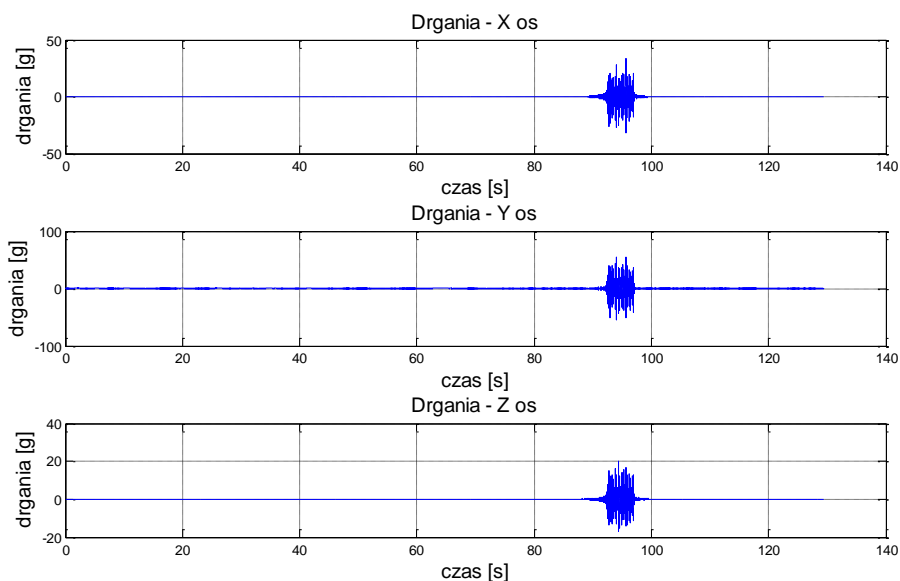
Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że zasięg detekcji w aspekcie propagacji fali drganiowej jest zadowalający. Co prawda widoczne są wyraźne spadki amplitud sygnału oraz komponentów częstotliwościowych dla rosnących odległości, jednak cały czas symptomy są wyraźnie widoczne na tle szumu pomiarowego i naturalnego tła drganiowego.

Kolejnym etapem badań pilotażowych były eksperymenty prowadzone na stacji Opole Zachodnie na zmodernizowanej linii kolejowej E30. W tym przypadku rejestrowano sygnały drganiowe wywołane przejazdem pociągów, zaś system pomiarowy znajdował się w bezpośrednim sąsiedztwie przejazdu kolejowego. W ramach badań zarejestrowano drgania podczas 14 przejazdów pojazdów szynowych, o różnych parametrach technicznych i z różnymi prędkościami (od 20km/h do 160km/h). Miejsce badań przedstawione zostało na fotografii nr 44.

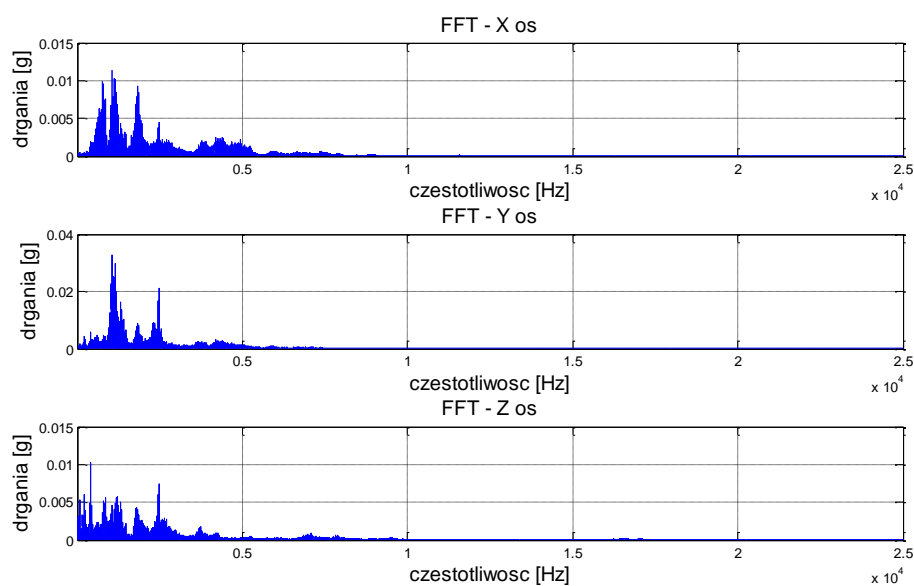


Rys. 44 Badania na stacji Opole.  
*Źródło: opracowanie własne.*

Na tym etapie celem badań była wstępna ocena możliwości wykrycia zbliżającego się pojazdu szynowego (predykcji). Dlatego przyjęto założenia, że rejestrowane będą różne pojazdy szynowe (zestawy towarowe, osobowe, pendolino, dreznina) poruszające się z różnymi prędkościami. dodatkowo rejestrowano pełne przebiegi drgań w celu identyfikacji pierwszych symptomów zbliżającego się pojazdu. Na rysunku nr 45 przedstawiono długie okno obserwacji oraz widma zarejestrowanych sygnałów w 3 ortogonalnych osiach.

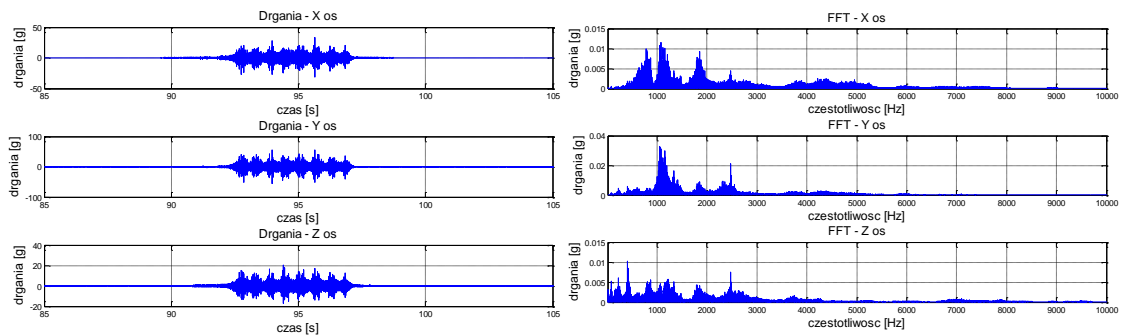


Rys. 45 Długie okna obserwacji sygnałów drganiowych podczas zbliżania się i przejazdu pociągu pendolino (prędkość 160 km/h).



Rys. 46 Widma sygnałów drganiowych podczas zbliżania się i przejazdu pociągu pendolino (prędkość 160 km/h).

Dla porównania przedstawiono także zawężone okna obserwacji w chwili przejazdu pociągu, na których widać kształt przebiegów czasowych skorelowany z kolejnymi segmentami (wózkami jezdny) pojazdu szynowego. Wyniki przedstawiono na rysunku nr 47.



Rys. 47 Zawężone okna obserwacji w chwili przejazdu pociągu pendolino oraz struktura częstotliwościowa drgań w trzech ortogonalnych osiach.

Na podstawie analizy badań wstępnych na torze testowym oraz pilotażowych w warunkach rzeczywistych określono, że pojemność informacyjna oraz zasięg propagacji sygnałów drganiowych generowanych poruszającym się pojazdem szynowym umożliwiają dalsze prace nad algorytmem detekcji zbliżania się pojazdu szynowego. Natomiast różnice sygnałów innych elementów infrastruktury kolejowej oraz naturalnego tła drganiowego, w tym poruszających się pojazdów samochodowych dają szansę na aplikację w warunkach rzeczywistych. Dlatego podjęto dalsze kroki i zaplanowano oraz przeprowadzono badania zasadnicze.

### 6.3. Badania w warunkach rzeczywistych

Badania zasadnicze prowadzono w warunkach rzeczywistych w otoczeniu przejazdów kolejowo-drogowych. Badania przeprowadzone zostały w miejscowości Chełm Śląski oraz Imielin w kilku cyklach od kwietnia w 2018 roku.

W badaniach wykorzystywano kilka wariantów systemów pomiarowych. Których specyfikację przedstawiono w tabeli 3. Dodatkowo podczas wybranych eksperymentów rejestrowano obraz oraz prędkość pojazdów szynowych.

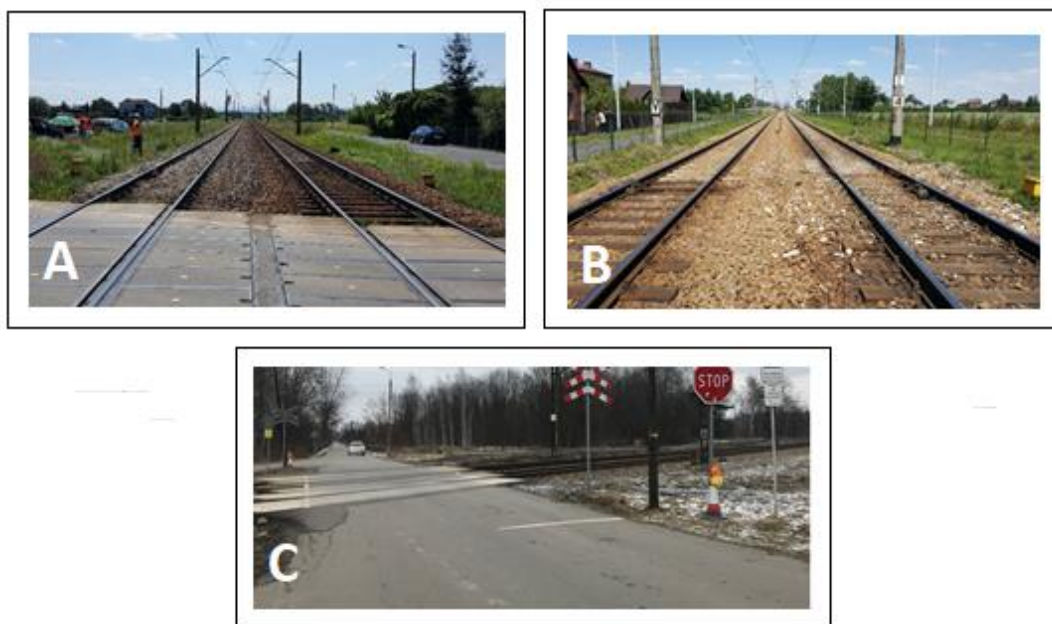
Na rysunkach od 48 do 50 przedstawiono lokalizację i dokumentację fotograficzną miejsc wykonywania badań oraz wykorzystane czujniki pomiarowe mocowane na szynie.

Tabela 3 Specyfikacja systemów pomiarowych.

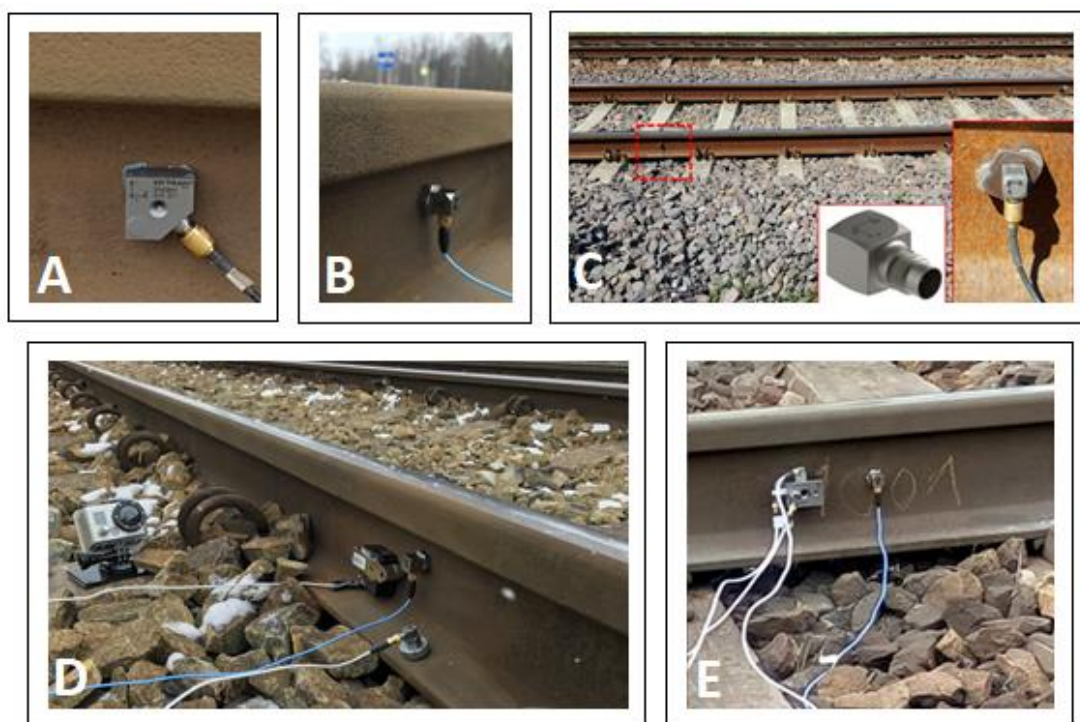
Wariant I			
	<i>Producent</i>	<i>Typ</i>	<i>Czułość</i>
<i>Czujnik</i>	Endevco 42A16	1-osiowy	100 mV/g
	<i>Producent</i>	<i>Rozdzielczość</i>	<i>Próbkowanie</i>
<i>Akwizycja danych</i>	NI 9233	24 bity	50 kHz na kanał
Wariant II			
	<i>Producent</i>	<i>Typ</i>	<i>Czułość</i>
<i>Czujnik</i>	PCB 356A02	3-osiowy	10 mV/g
	PCB 3073	3-osiowy	100 mV/g
	Dytran 3143M1	3-osiowy	10 mV/g
	<i>Producent</i>	<i>Rozdzielczość</i>	<i>Próbkowanie</i>
<i>Akwizycja danych</i>	Sony SIR 1000i	16 bitów	48 kHz na kanał
Wariant III			
	<i>Producent</i>	<i>Typ</i>	<i>Czułość</i>
<i>Czujnik</i>	B&K 4506	3-osiowy	100 mV/g
	B&K 4224B	3-osiowy	100 mV/g
	<i>Producent</i>	<i>Rozdzielczość</i>	<i>Próbkowanie</i>
<i>Akwizycja danych</i>	LAN-XI	32 bity	131072 Hz na kanał



Rys. 48 Lokalizacja badań zasadniczych: przejazd kolejowy kat. D w Imielinie i kat. B w Chełmie Śląskim.



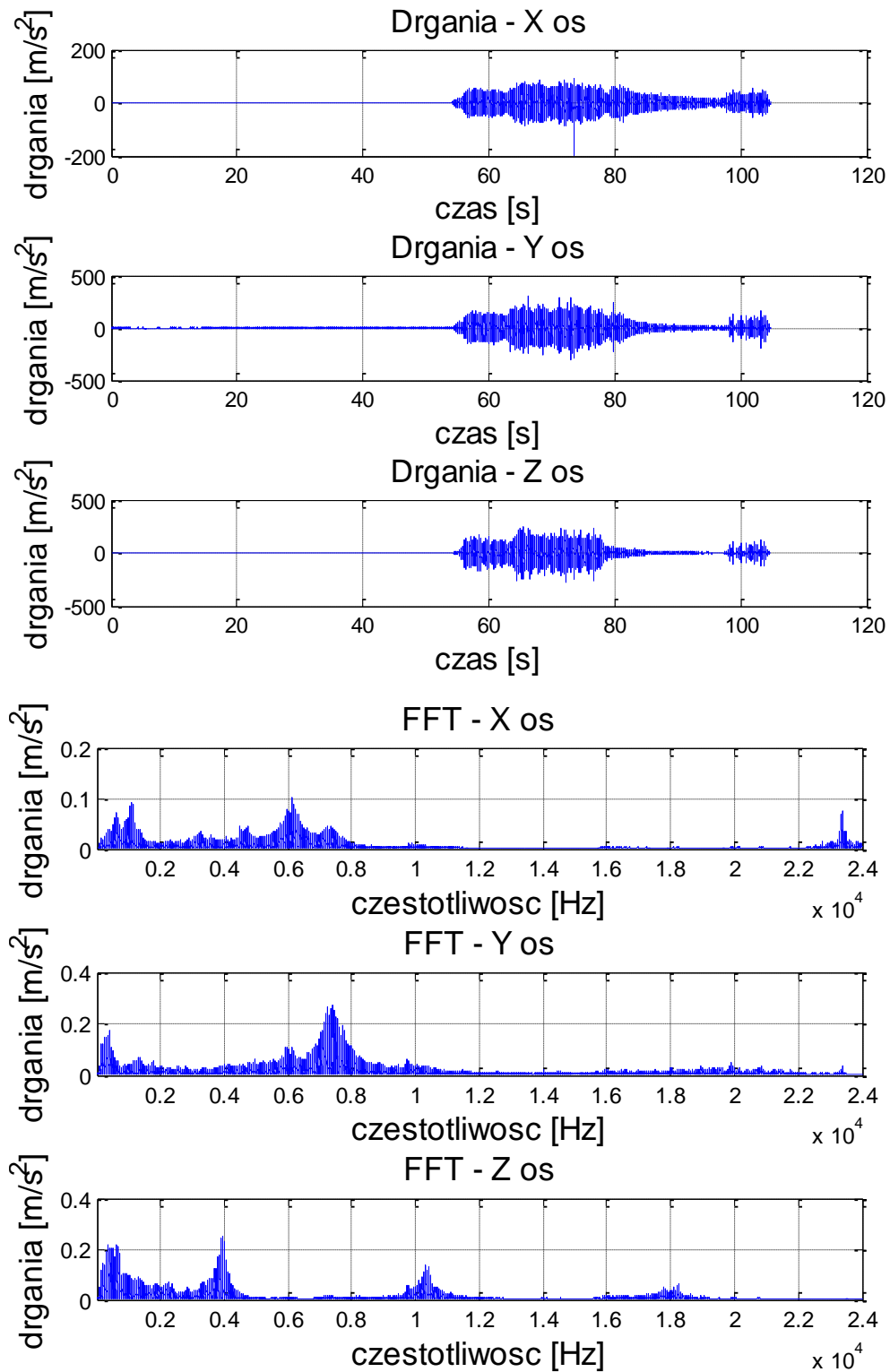
Rys. 49 Miejsca badań zasadniczych.



Rys. 50 Czujniki pomiarowe wykorzystywane podczas badań zasadniczych.

W wyniku przeprowadzonych badań zarejestrowano kilkadziesiąt przejazdów pojazdów szynowych. Każdorazowo rejestrowano przyspieszenia drgań szyny kolejowej w trzech ortogonalnych osiach z wyprzedzeniem przed przejazdem pojazdu szynowego nad czujnikami pomiarowymi. Miało to na celu rejestrowanie sygnałów, które posłużą do

opracowania algorytmu predykcji zbliżającego się pojazdu szynowego. Jako przykład na rysunku 51 przedstawiono wyniki uzyskane podczas przejazdu pociągu towarowego.



Rys. 51 Zarejestrowane sygnały przyspieszeń drgań oraz wyznaczone widma drgań (badania na stacji Chełm Śląski).

## ROZDZIAŁ 7 - METODA DETEKCJI ZBLIŻANIA SIĘ POJAZDU SZYNOWEGO

W celu opracowania metody detekcji (predykcji) zbliżania się pojazdu szynowego przeprowadzono kompleksowe analizy sygnałów drganiowych w konsekwencji otrzymując dedykowany algorytm przetwarzania sygnałów.

### 7.1. Metoda analizy sygnałów drganiowych

Zarejestrowane dane przeanalizowane zostały przy użyciu programu Matlab [22, 111]. W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano rozkłady wartości estymatorów sygnałów w 3 założonych na wstępie oknach czasowych 1, 3 oraz 5 sekundowych.

Jak sygnały wejściowe do analizy wykorzystano dwa zbiory danych:

1. Sygnały drgań zarejestrowane dla pełnego przejazdu pojazdu szynowego w 3 ortogonalnych osiach X, Y oraz Z w funkcji czasu,
2. Sygnał syntetyczny wyliczony jako iloczyn kolejnych wartości sygnałów drgań dla 3 osi mający na celu zwiększenie „czułości” analizowanych metod.

W przypadku tym zastosowano miary iloczynowe dla estymatorów 3 osi rejestrowanych sygnałów, jako zbiory danych  $E_{1abc}(n) = \{E_{1x}(1) \cdot E_{1y}(1) \cdot E_{1z}(1), E_{1x}(2) \cdot E_{1y}(2) \cdot E_{1z}(2), \dots, E_{1x}(n) \cdot E_{1y}(n) \cdot E_{1z}(n)\}$ , gdzie:

x, y, z – 3 osie pomiarowe

n - liczba okien analizy

E1 – estymator numer 1

Kolejne etapy analizy sygnałów przedstawiono w kolejnych punktach poniżej.

1. Podział zarejestrowanych sygnałów na kolejne okna czasowe (segmentacja czasowa)
2. Wyznaczenie estymatorów punktowych jako miar w kolejnych oknach czasowych sygnałów. Jako estymatory wykorzystano następujące miary:
  - Wartość skuteczna
  - Skośność
  - Wariancja
  - Stosunek wartości szczytowych do wartości skutecznej
  - Kurtoza
  - Mediana

- Wartość międzyszczytowa
  - Odchylenie standardowe
  - Połówkowa wartość międzyszczytowa
  - Przyrost kolejnych wartości skutecznych
  - Przyrost kolejnych wartości szczytowych
  - Przyrost kolejnych wartości międzyszczytowych
  - Miara dynamiczna sygnału liczona jako suma iloczynów wartości i częstotliwości zarejestrowanego widma sygnału (zdefiniowana w kolejnej części rozdziału).
3. Analiza wartości ww. estymatorów w kolejnych oknach czasowych sygnałów wejściowych, oddzielnie dla osi X, Y, Z oraz dla sygnału iloczynowego.
  4. Wyznaczenie widm drgań w kolejnych oknach czasowych sygnałów
  5. Wyznaczenie estymatorów miary dynamicznej (iloczyn rzędnej i odciętej widma sygnału) jako sumy dla kolejnych okien czasowych.

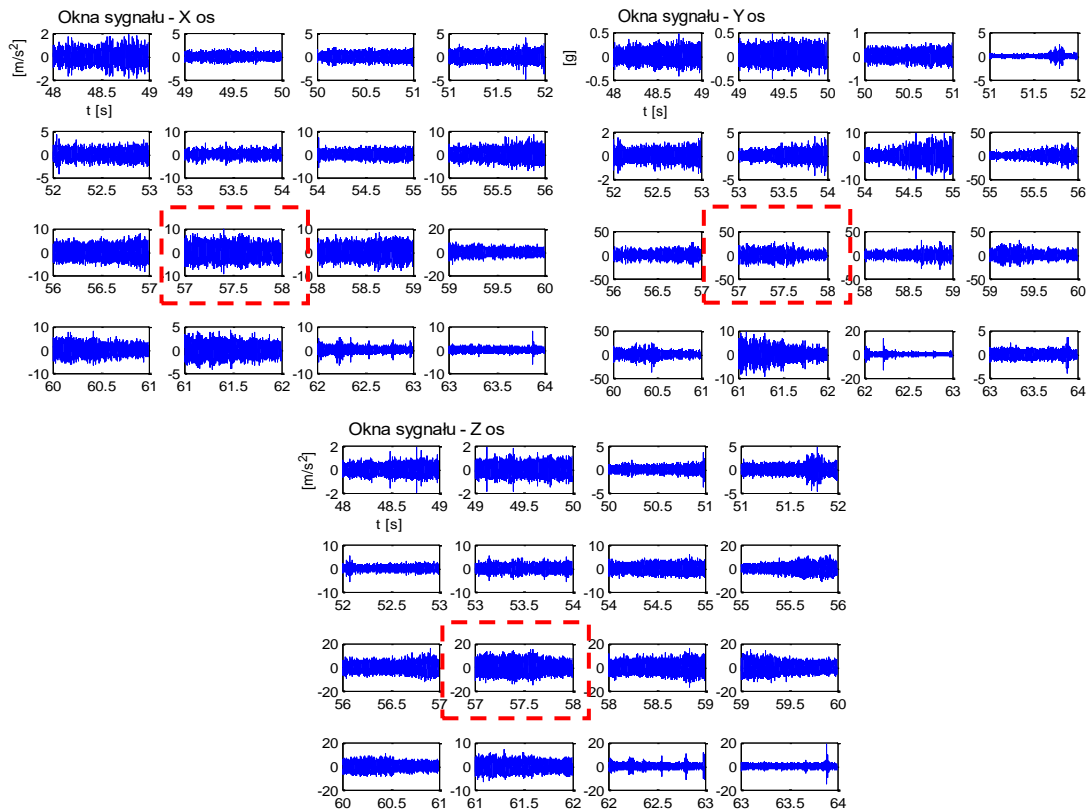
Analiza zarejestrowanych przejazdów posłużyła do wyboru, celem dalszych badań, grupy najlepszych estymatorów sygnałów tj. miar o najdłuższym czasie przekazywania informacji o zbliżającym się pojeździe szynowym. Informacja ta, z założenia oceniana jest za akceptowalną w przypadku wykrycia zbliżania się pojazdu szynowego do miejsca pomiarowego czyli przejazdu kolejowego w czasie nie krótszym niż 15 sekund. W wyniku takiego założenia odrzucona została część estymatorów jako niewiarygodnych pod względem braku odporności na zakłócenia wywołane innymi czynnikami oddziałującymi na szynę kolejową jak np. przejeżdżające przez przejazd kolejowy samochody, praca urządzeń automatyki kolejowej np. napędów zwrotnicowych itp. oraz niewiarygodnych z punktu widzenia zbyt niskiej czułości wynikającej ze zbliżania się pojazdu szynowego. Dodatkowo w celu analizy trendu sygnału przeprowadzono jego okienkowanie (segmentację czasową), które umożliwiło symulację działania systemu detekcji w warunkach czasu rzeczywistego. Takie rozbicie sygnału na poszczególne okna umożliwiło dokładną identyfikację chwili rejestracji wykrycia zbliżającego się pojazdu szynowego. W celu zilustrowania kolejnych etapów analizy sygnałów na rysunkach od 56 do 67 przedstawione zostały przykładowe analizy zarejestrowanych sygnałów dla wybranych przejazdów 2 reprezentatywnych pojazdów szynowych tj. elektrycznego zespołu trakcyjnego typu EZ oraz pociągu towarowego złożonego z lokomotywy oraz 12 wagonów towarowych.



## 7.2. Metoda wykrywania przejazdu pojazdu szynowego wraz z predykcją

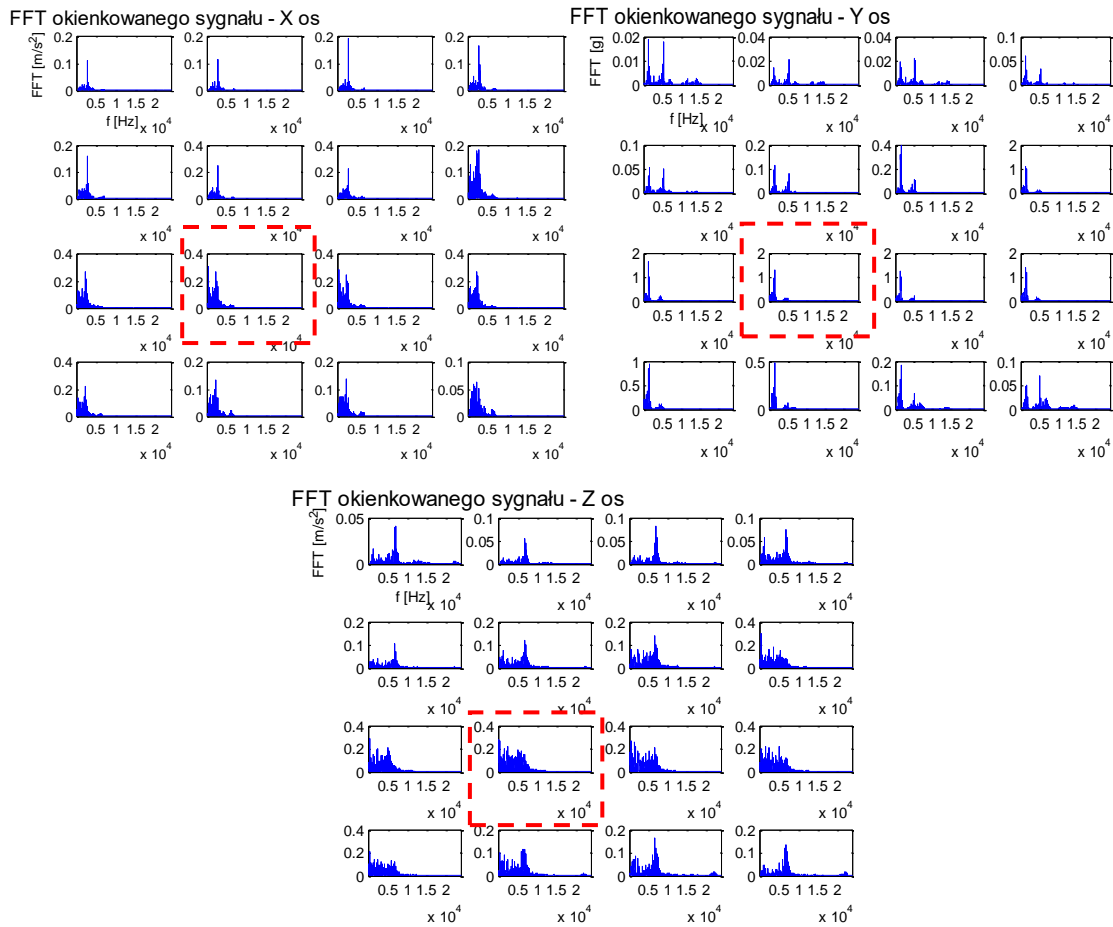
W celu weryfikacji przyjętej tezy rozprawy doktorskiej opracowano metodę predykcji oraz wykrycia przejazdu pojazdu szynowego na podstawie zarejestrowanych sygnałów drganiowych. Biorąc pod uwagę praktyczny cel pracy założono analizę kolejnych okien czasowych sygnału, a nie jego zarejestrowanej całości, co umożliwiło przeprowadzenie symulacji ciągłego pomiaru w warunkach rzeczywistych. Założeniem zatem opracowanej metody jest analiza sygnałów w kolejnych oknach czasowych jako kolejnych zbiorów zmiennych losowych oraz szeregów Fouriera z informacjami o składowych częstotliwościowych w kolejnych oknach. Podejście takie umożliwia wykorzystanie rozkładów sygnałów drganiowych, miar statystycznych oraz miar łączonych powiązanych z dynamiką zachodzącego zjawiska reprezentowanych przez składowe częstotliwościowe. W pierwszym etapie analizy przeprowadzono podział sygnału na kolejne okna czasowe. Następnie wyznaczane są miary (estymatory) w kolejnych oknach sygnału. Procedura przetwarzania sygnałów została przedstawiona poniżej na rysunkach nr 52 oraz 53. Na rysunkach przerywaną linią zaznaczono okna rejestracji w trakcie przejazdu pojazdu szynowego nad czujnikiem drgań.

### 1. Podział zarejestrowanych sygnałów drgań szyny w trzech osiach (X,Y,Z)



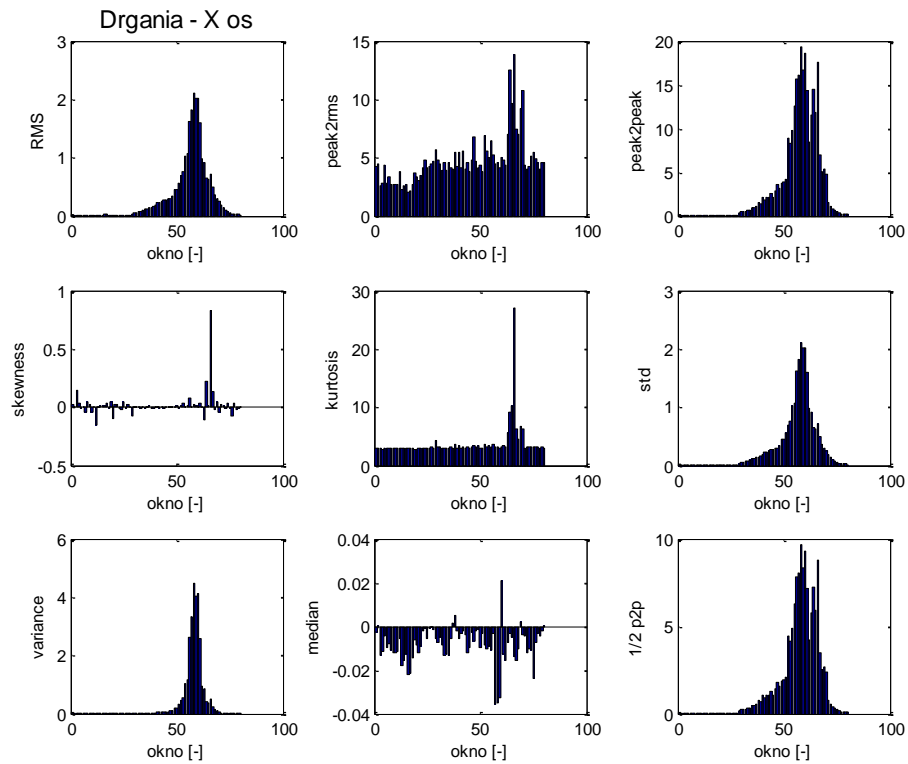
Rys. 52 Podział sygnału na 1-sekundowe okna czasowe ( 48-64 s).

2. Wyznaczenie widm sygnałów w kolejnych oknach:

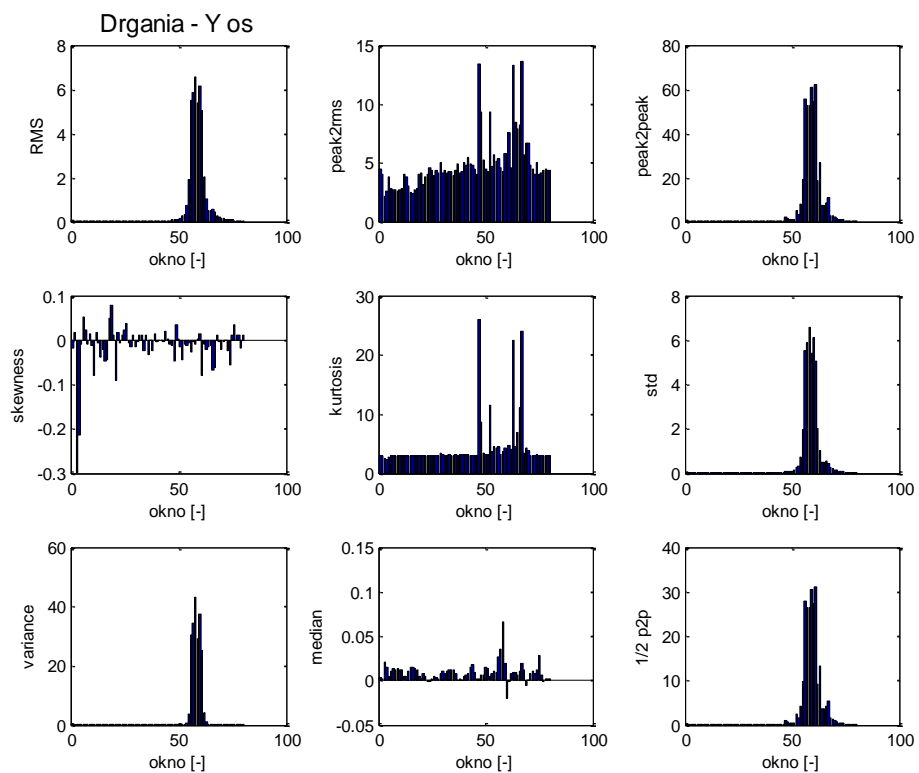


Rys. 53 Widma FFT sygnałów w 1-sekundowych oknach (49-64 s).

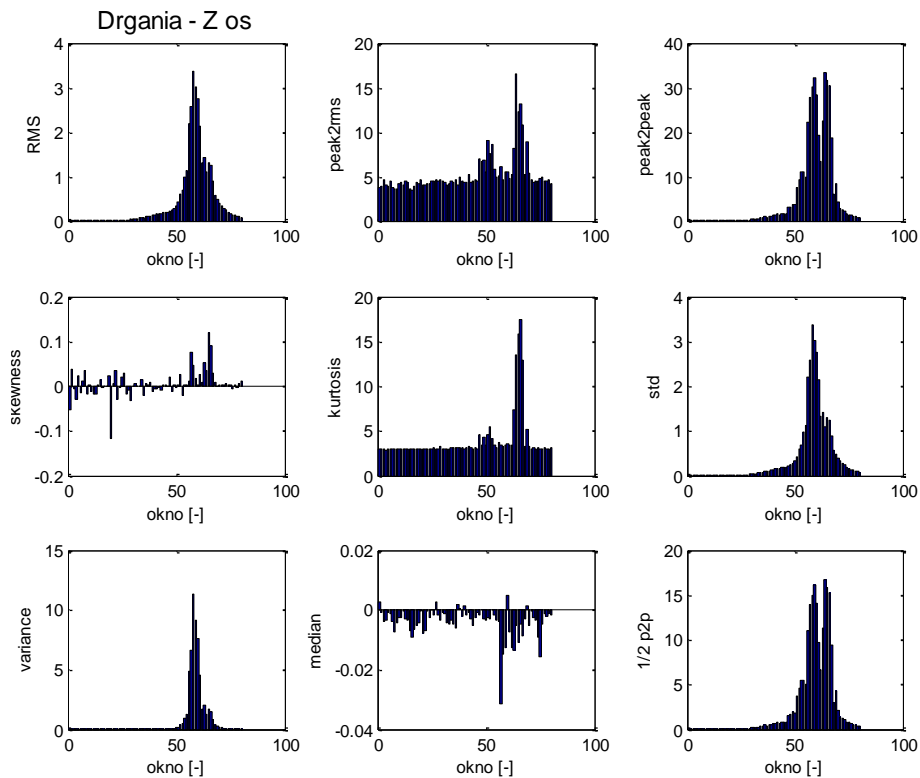
3. Wyznaczenie estymatorów sygnałów drganiowych i miar statystycznych kolejnych okien analizowanego przebiegu. Rozkłady wartości tych estymatorów przedstawiono jako wykresy słupkowe na rysunkach nr 54-56 poniżej.



Rys. 54 Rozkłady wartości estymatorów sygnałów drganiowych i miar statystycznych kolejnych okien analizowanego przebiegu, oś X.



Rys. 55 Rozkłady wartości estymatorów sygnałów drganiowych i miar statystycznych kolejnych okien analizowanego przebiegu, oś Y.



Rys. 56 Rozkłady wartości estymatorów sygnałów drganiowych i miar statystycznych kolejnych okien analizowanego przebiegu, oś Z.

Analizując obserwowane zjawiska i rozkłady wartości uzyskane w wyniku przetwarzania sygnałów zdecydowano się także zweryfikować przydatność miary dynamiki ( $mdyn$ ) zaproponowanej w pracach promotora prof. Rafała Burdzika. Cechą tej miary jest wrażliwość na nieliniowość sygnałów jako wzrost amplitud sygnałów dla rosnących częstotliwości.

$$mdyn_x = \sum_{n=1}^{NFFT/2} |f_n \cdot FFT(n)| \quad (7.1)$$

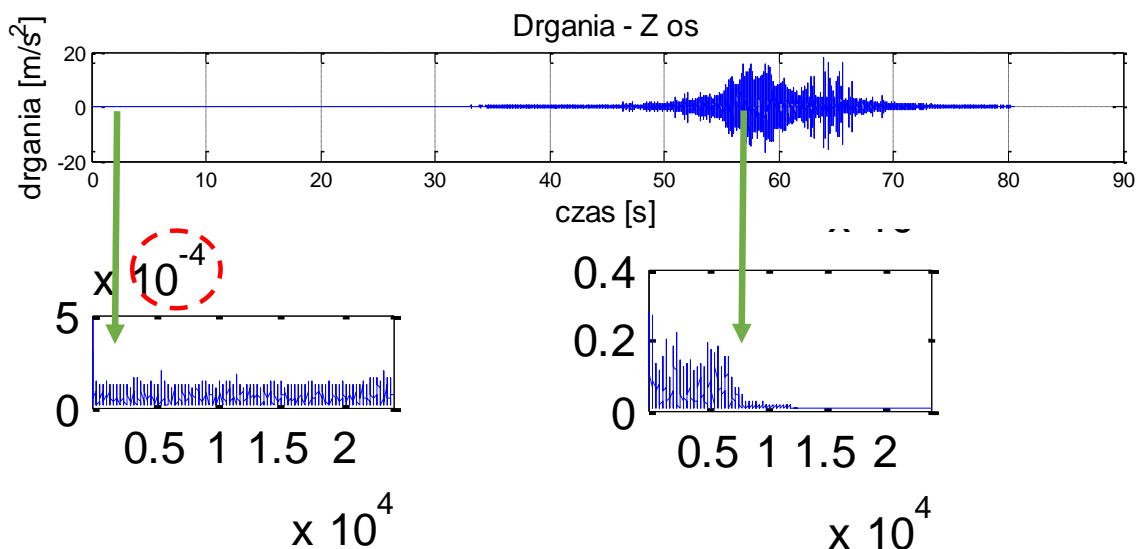
, gdzie:

- $NFFT$  - liczba próbek z  $n$ -elementowego ciągu dyskretnej transformaty Fouriera (liczba wartości po przekształceniu DFT),
- $f_n$  – składowa częstotliwościowa dla kolejnych  $n$ -próbek,
- $FFT$  – amplituda transformaty Fouriera (DFT) dla kolejnych  $n$ -próbek.

Miary dynamiczne obliczane były jako estymatory punktowe dla kolejnych okien sygnałów przyśpieszenia drgań rejestrowanych dla osi x, y i z.

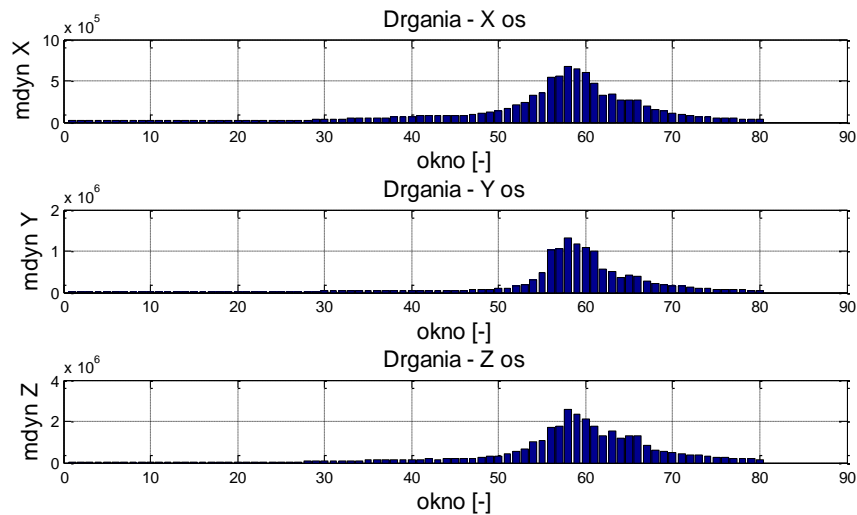
Obserwacja widm sygnałów w oknach, w których rejestrowano przejazd pociągu wykazała znaczny wzrost udziału składowych o większych częstotliwościach, co uzasadnia wybór tej miary sygnału.

Zjawisko to zaprezentowano obrazowo na rysunku nr 57, na którym pod wykresem przebiegu drgań pokazano widma FFT dwóch wybranych okien sygnału, pierwsze dla fazy początkowej długo przed przejazdem pociągu, drugie widmo dla okna czasowego w chwili przejazdu nad czujnikiem. Warto zwrócić uwagę na skalę osi Y na widmach FFT okien sygnałów. Widać bardzo znaczącą różnicę w analizie dla tych okien wartości sygnałów czasowych (skala od 0,2 do 18 – przyrost około 100 razy) oraz widm częstotliwościowych (skala od 0,0001 do 0,02 przyrost około 2000 razy). Stosując dodatkowo mnożnik w postaci kolejnych składowych częstotliwościowych i odpowiadających im amplitud FFT, czułość miary dynamiki jest znacznie większa niż proste miary amplitudowe.



Rys. 57 Porównanie widm FFT okien czasowych znacznie przed przejazdem pociągu i w chwili przejazdu na czujnikiem.

Rozkłady wartości miar dynamiki w kolejnych oknach sygnału przedstawiono na rysunku 58.



Rys. 58 Rozkłady wartości miar dynamiki we wszystkich oknach sygnału osi X,Y,Z.

W celu opracowania miar uniwersalnych, niezależnych od „środowiska drganiowego” lokalizacji punktu pomiaru zdecydowano się analizować miary przyrostowe, które mają być informacją o rosnącej aktywności drganiowej wywołanej zbliżającym się pojazdem szynowym, co przedstawiono na rysunku 59. Jednak uzyskane wyniki miar przyrostowych nie były wystarczająco satysfakcjonujące, dlatego w kolejnym etapie rozbudowano metodę analizy.

Przeprowadzono także próby zwiększenia czułości analizowanych metod wyznaczając miary iloczynowe, zgodnie ze wzorem:

$$E_{1abc}(n) = \{E_{1x}(1) \cdot E_{1y}(1) \cdot E_{1z}(1), E_{1x}(2) \cdot E_{1y}(2) \cdot E_{1z}(2), \dots, E_{1x}(n) \cdot E_{1y}(n) \cdot E_{1z}(n)\} \quad (7.2)$$

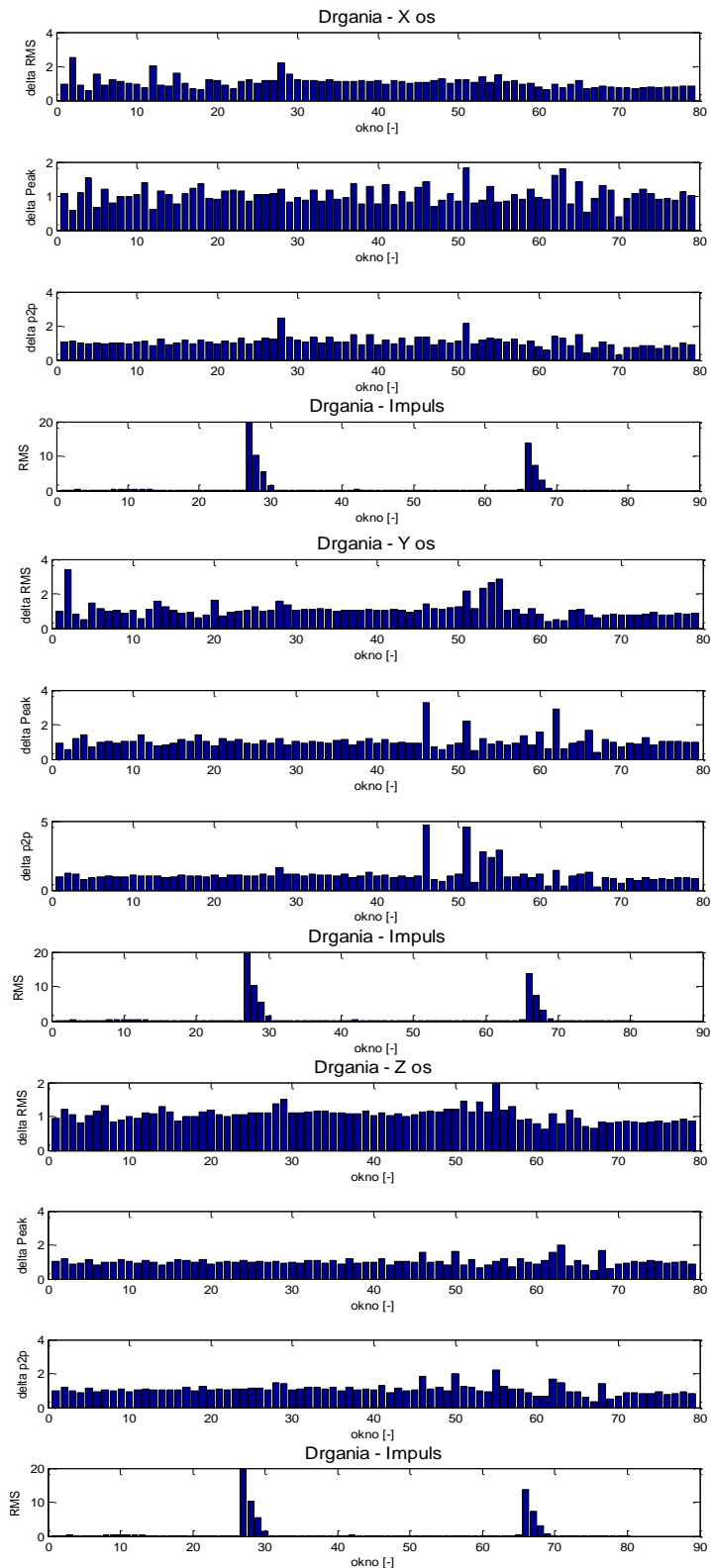
, gdzie:

x, y, z – 3 osie pomiarowe

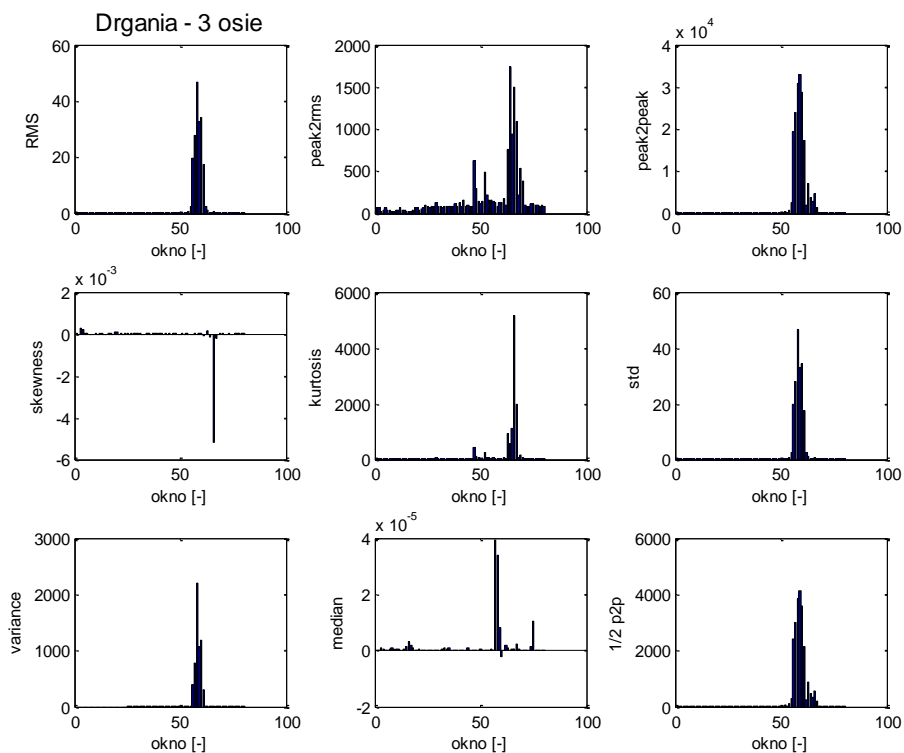
n - liczba okien analizy

E1 – estymator numer 1

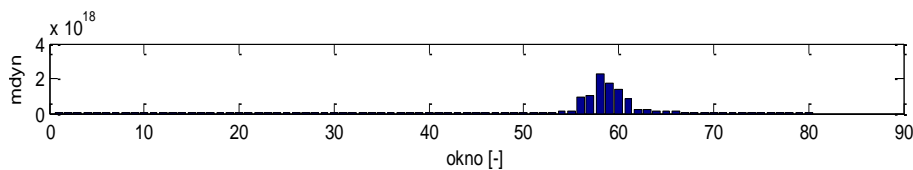
W przypadku tym zastosowano miary iloczynowe dla estymatorów 3 osi rejestrowanych sygnałów, jako zbiory danych rysunek od 60 do 63:



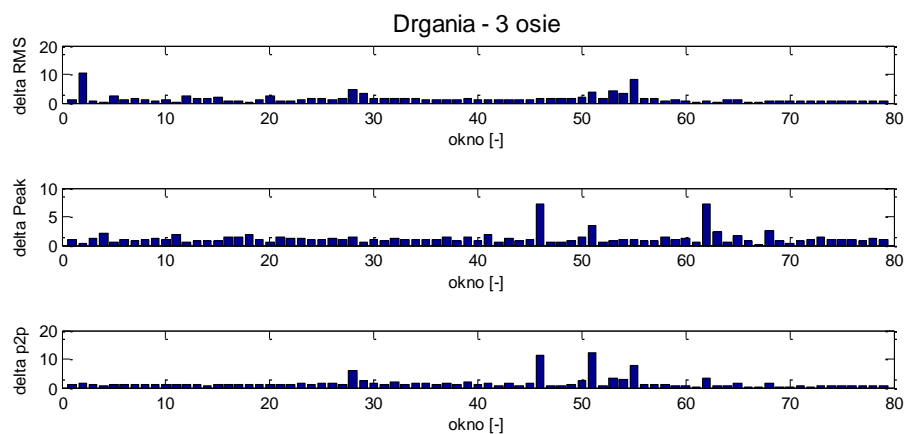
Rys. 59 Rozkład wartości estymatorów drganiowych w kolejnych oknach sygnału:  $\Delta$ RMS,  $\Delta$ Peak,  $\Delta$ p2p (czwarty wykres przedstawia pozycję pociągu zaznaczoną synchronicznym impulsem drganiowym).



Rys. 60 Rozkłady wartości iloczynowych estymatorów sygnałów drganiowych i miar statystycznych kolejnych okien analizowanego przebiegu, osie XYZ.



Rys. 61 Rozkład wartości iloczynowej modyn (osie XYZ).



Rys. 62 Rozkład iloczynowych miar przyrostowych (osie XYZ).

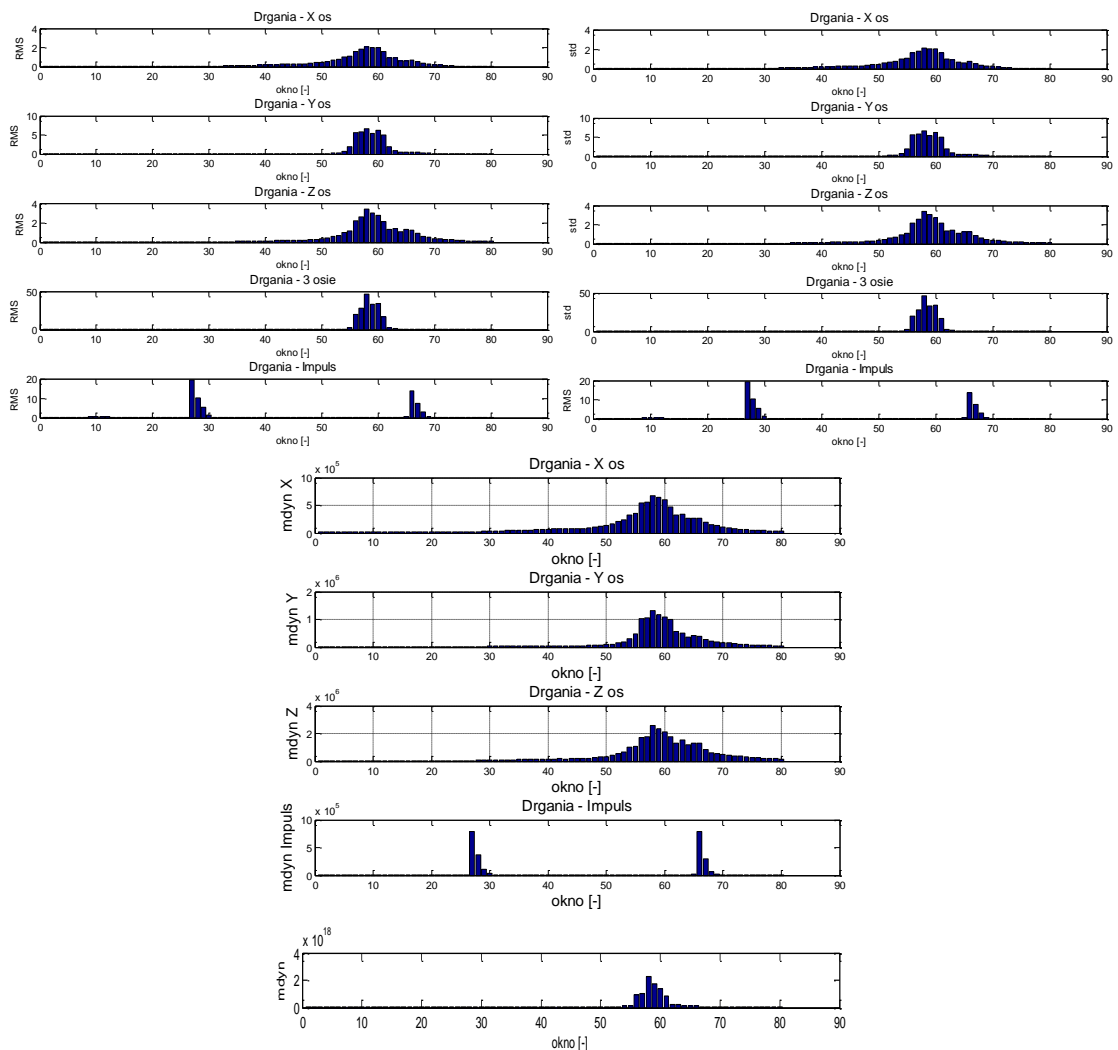
Na podstawie szczegółowej analizy oraz porównania skuteczności i czasu predykcji zbliżającego się pociągu do dalszej weryfikacji wybrano następujące estymatory:

1. wartość skuteczna przyspieszeń drgań - oś x



2. wartość skuteczna przyspieszeń drgań - oś y
3. wartość skuteczna przyspieszeń drgań - oś z
4. wartość skuteczna przyspieszeń drgań - 3 osie
5. odchylenie standardowe przyspieszeń drgań - oś x
6. odchylenie standardowe przyspieszeń drgań - oś y
7. odchylenie standardowe przyspieszeń drgań - oś z
8. odchylenie standardowe przyspieszeń drgań - 3osie
9. miara dynamiczna przyspieszeń drgań – oś x
10. miara dynamiczna przyspieszeń drgań – oś y
11. miara dynamiczna przyspieszeń drgań – oś z
12. miara dynamiczna przyspieszeń drgań – 3 osie

Rozkłady wartości wybranych estymatorów dla kolejnych okien sygnału zaprezentowano na rysunku 63.



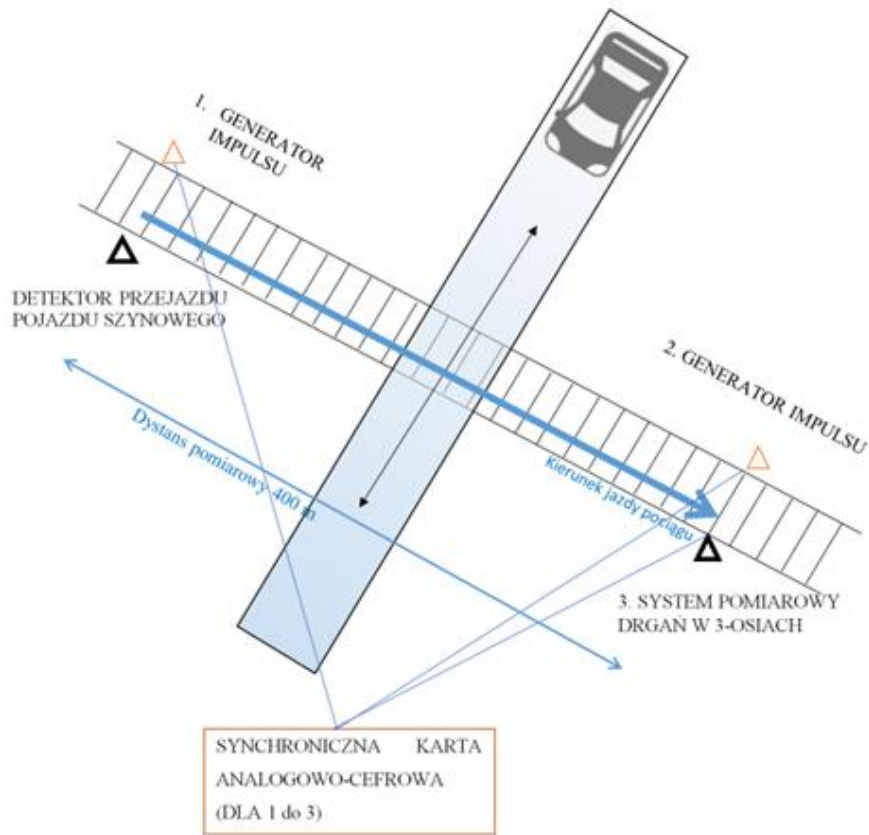
Rys. 63 Rozkłady wartości wybranych estymatorów dla kolejnych okien.

## ROZDZIAŁ 8 - DOBÓR CZASU ANALIZOWANEGO OKNA

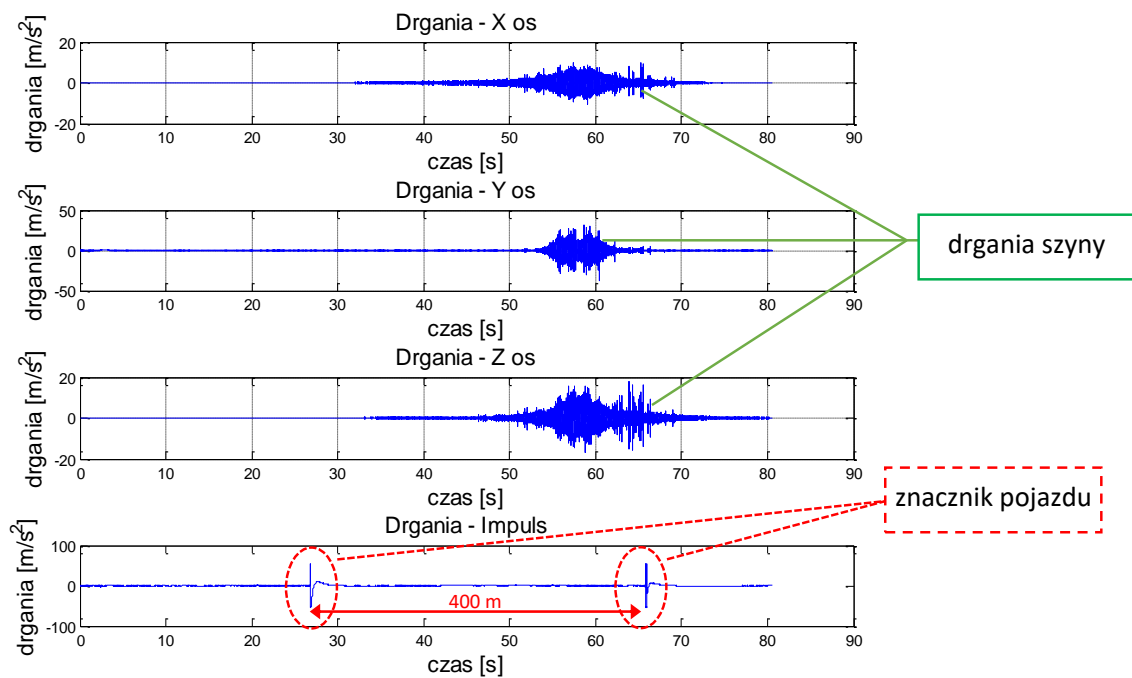
W ramach dodatkowych badań przeprowadzono analizę skuteczności metody wykrywania zbliżającego się pojazdu szynowego w zależności od długości analizowanego postępującego okna obserwacji. W tym celu wstępnie wybrano okna o długości 1s, 3s, 5s. Na tym etapie badań zastosowano dodatkowy kanał informujący o pozycji (odległości) badanego pojazdu szynowego od miejsca pomiarowego, stanowiący swego rodzaju „znacznik wibroakustyczny pojazdu”. W tym celu wykorzystano sygnał impulsowy rejestrowany na kanale zsynchronizowanym z pozostałymi sygnałami drgań szyny. Pierwszy impuls podawano kiedy pojazd znajdował się w odległości 400 m, zaś drugi kiedy pierwsza oś pojazdu była w osi czujnika drgań. W celu weryfikacji założeń teoretycznych opracowanej metody predykcji zbliżania się pojazdu szynowego oraz doboru długości postępującego okna czasowego przeprowadzono eksperymenty badawcze w warunkach rzeczywistych. Badanie przeprowadzone zostało na linii kolejowej nr 138 w km 12,879 tj. w obrębie przejazdu kolejowego kategorii D w miejscowości Imielin na szlaku kolejowym Katowice – Oświęcim w roku 2019.

Cel badań zakładał przeprowadzenie analizy identyfikacji pojazdów szynowych przy uwzględnieniu znacznika w odległości 400 m od umieszczonego czujnika pomiarowego. Schemat badań przedstawiono na rysunku 68. W badaniach zastosowano koncepcję drganiowego znacznika pozycji pojazdu szynowego, jako synchroniczny impuls drganiowy generowany w chwili kiedy pojazd znajdował się w odległości 400m od zasadniczego systemu pomiarowego. Odległość 400m określono jako docelową odległość i pośrednio wynikający z niej czas detekcji dla przejazdów kategorii D. W badaniach tych wykorzystany został 3-osiowy akcelerometr Dytran 3023A wraz z kartą sieciową NI9233. Jako czujnik identyfikujący pojawienie się osi pojazdu szynowego w jednym z 3 wcześniej zidentyfikowanych celowo wybranych miejsc tj. w odległości 400 m od miejsca zamocowania czujnika drgań, w miejscu pojawienia się pierwszej osi pojazdu bezpośrednio nad czujnikiem drgań oraz w tym samym miejscu jednak w chwili pojawienia się nad czujnikiem drgań ostatniej osi pojazdu szynowego. Miejsca, o których mowa identyfikowane były przez drugiego członka zespołu dającego sygnał w chwili najechania pojazdu szynowego na pierwszy znacznik. Drugi oraz trzeci znacznik był identyfikowany przez wykonującego pomiar drgań (Schemat badań przedstawiono na rysunku 64). W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano pewność identyfikacji pojazdów szynowych z odległości większej niż 400 metrów. Idee wibroakustycznego

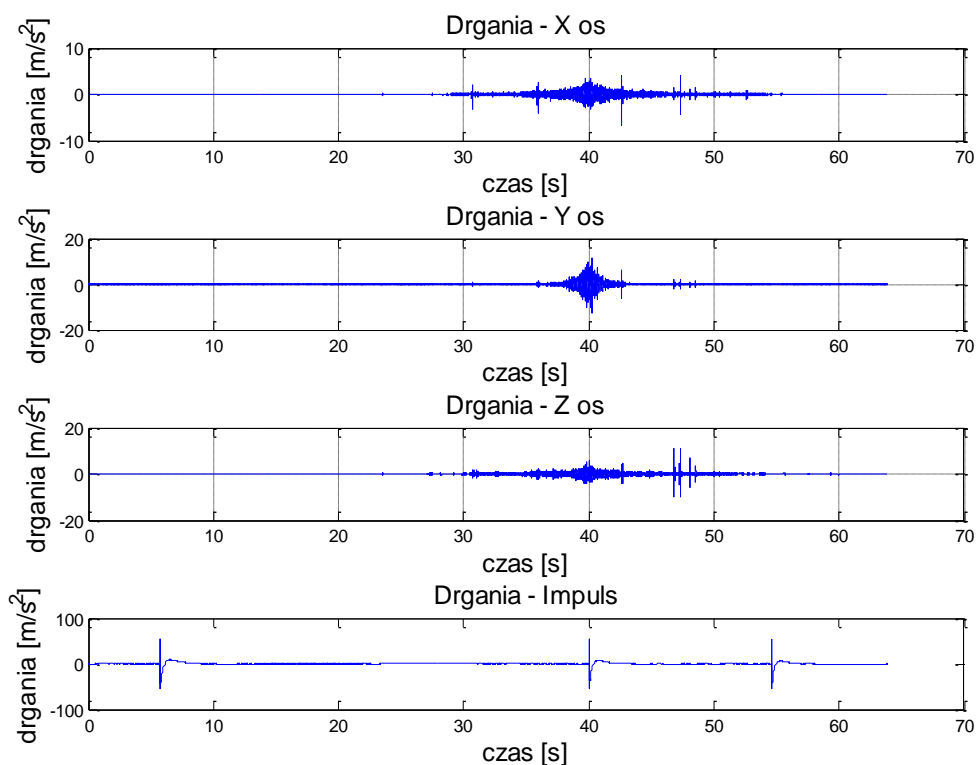
znacznika pojazdu szynowego oraz synchronicznie rejestrowanych drgań szyny przedstawiono na rysunku 65, zaś przykładowe wyniki na rysunku 66.



Rys. 64 Schemat badań z impulsem w odległości 400 m od stanowiska pomiarowego.  
*Zródło: opracowanie własne.*



Rys. 65 Przykład rejestracji przejazdu pojazdu szynowego z uwzględnieniem znaczników lokalizacji pojazdu pierwszej i ostatniej osi.



Rys. 66 Zarejestrowany przejazd pociągu ze znacznikami 400m, nad 1 osią i nad ostatnią osią.

Znacznik 400 m od miejsca pomiarowego stanowił punkt minimalny identyfikacji pojazdu. Przy założeniu średniej prędkości na przedmiotowym szlaku kolejowym tj. 80km/h dystans 400 m pojazd szynowy pokonuje w niespełna 18 sekund. Wystarczy to do opuszczenia przejazdu kolejowego nawet przez najwolniejszy pojazd kołowy, a na pewno w przypadku złych, niewystarczających do zauważenia pojazdu szynowego warunków atmosferycznych ostrzeżony o nadjeżdżających pociągu pojazd kołowy zatrzyma się przed przejazdem kolejowym.

Celem poznawczym badania był wybór długości postępującego okna analizy i najbardziej efektywnych estymatorów drganiowych zbliżającego się pojazdu szynowego.

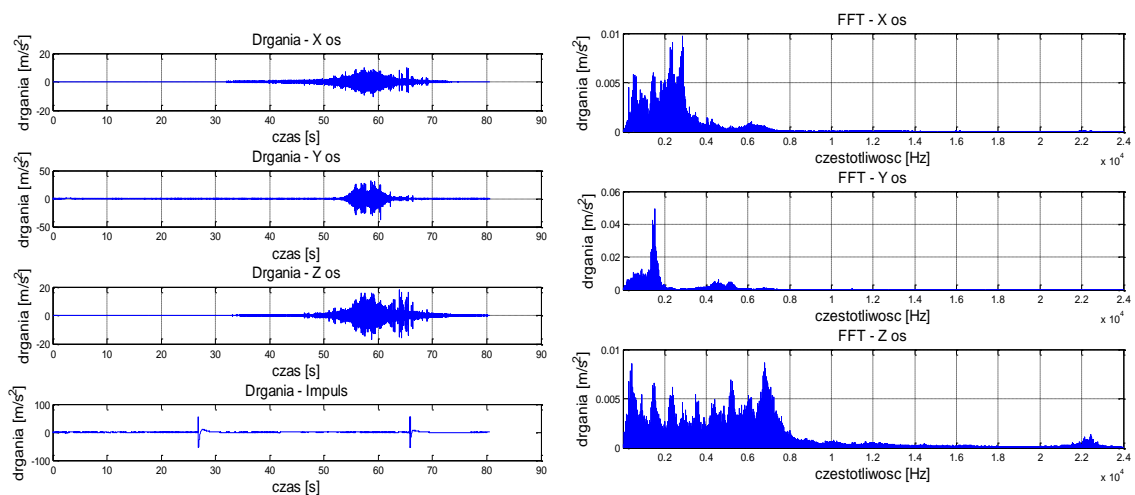
### 8.1. Porównanie i dobór długości kolejnych okien analizowanego sygnału

W celu analizy skuteczności metody wykrywania zbliżającego się pojazdu szynowego, w zależności od długości analizowanego postępującego okna obserwacji przedstawiono przykładowe wyniki dla kolejnych długości okien sygnałów. W celu

prezentacji metody doboru okna przedstawiono przykładowe wyniki drgań zarejestrowane podczas przejazdu pociągu towarowego z 12 wagonami.

### 8.1.1. Podział na 1-sekundowe okna czasowe

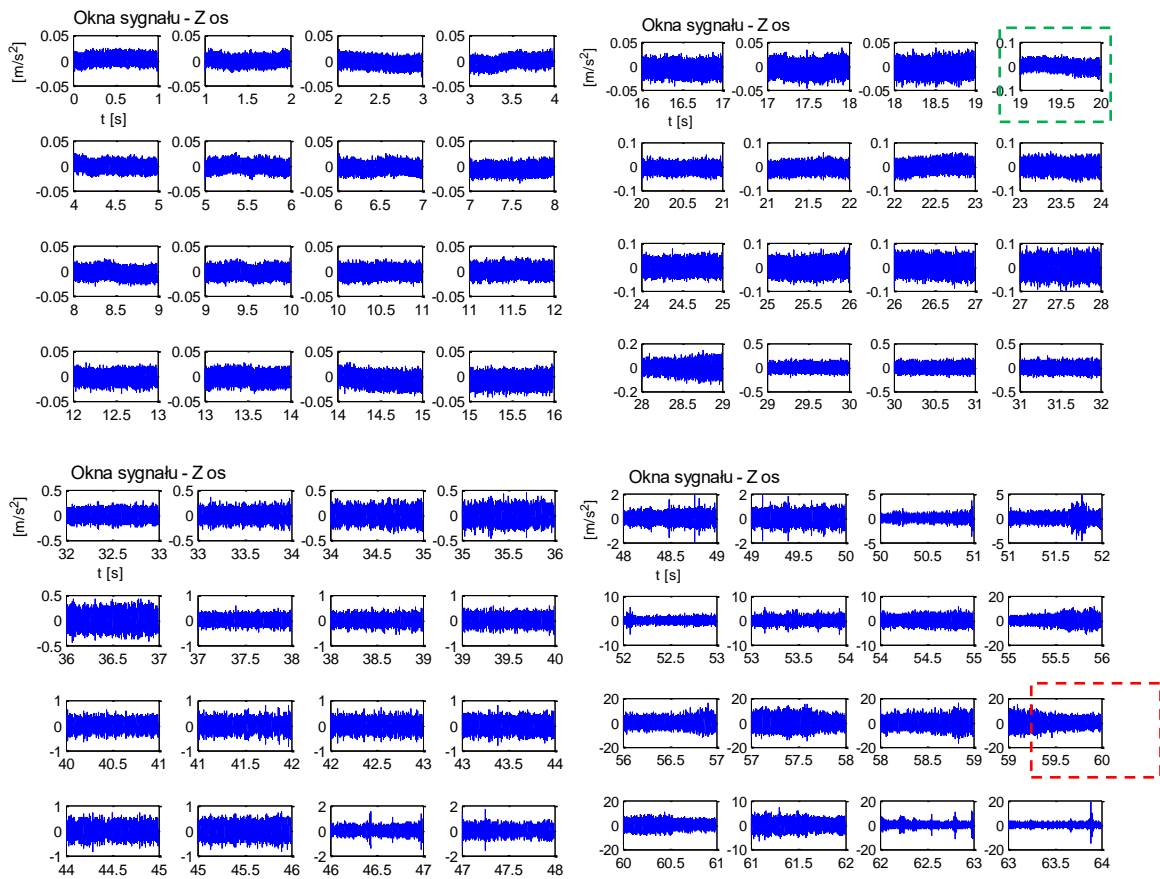
Wykresy zarejestrowanych przyspieszeń drgań w 3 ortogonalnych osiach oraz znacznik impulsowy a także widma częstotliwościowe drgań w osiach x, y i z przedstawiono na rysunku nr 67.



Rys. 67 Zarejestrowane przebiegi drgań szyny w 3 ortogonalnych osiach, widma drgań szyny.

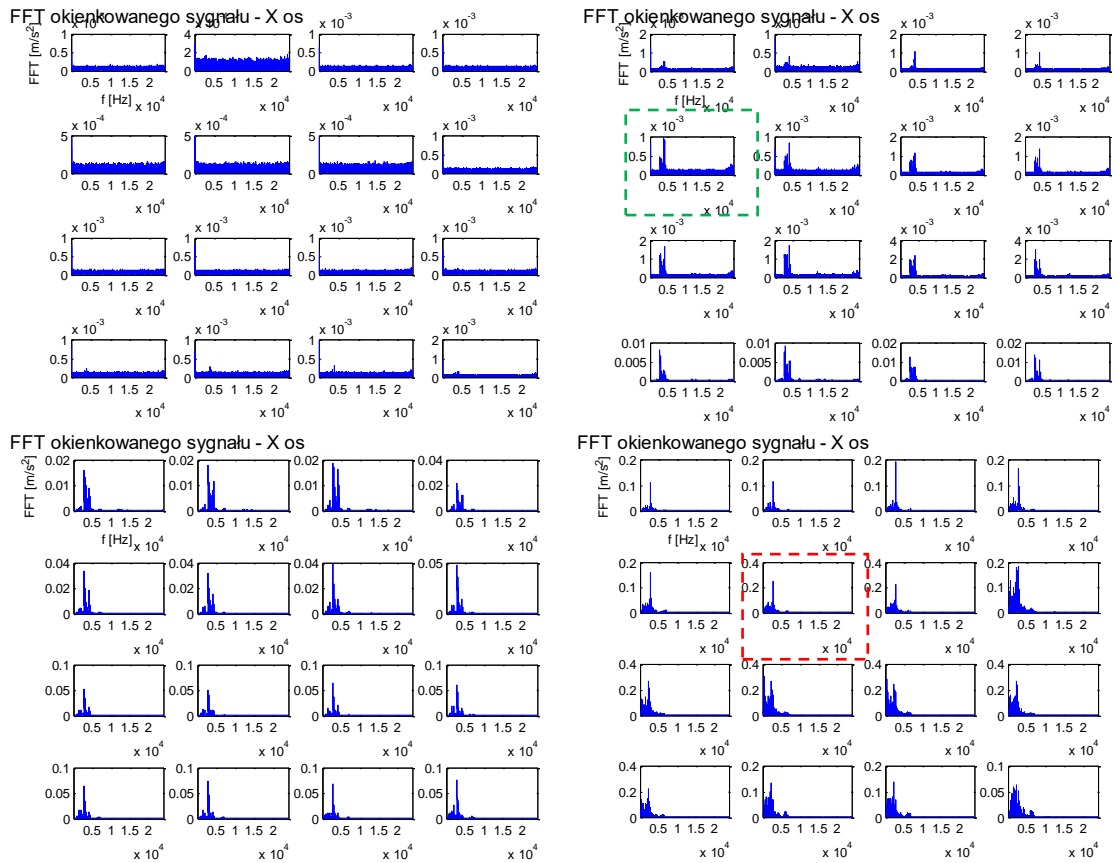
Podział zarejestrowanego sygnału na kolejne 1-sekundowe okna czasowe przedstawiono na rysunkach nr 68-70. Obejmują one okna czasowe od 0 do 64. Kolejne okna przedstawiały by nieistotny ze względu na analizę czas po przejechaniu pojazdu szynowego. Na wykresach przerywanymi liniami zaznaczono okna czasowe, w których można doszukiwać się symptomów zbliżającego się pojazdu szynowego – okno detekcji. Dodatkowo zaznaczano okno czasowe, w którym następuje gwałtowny przyrost amplitud, na tyle znaczący że powinien świadczyć o chwili najazdu pierwszej osi jezdnej pojazdu na punkt lokalizacji czujnika drgań.



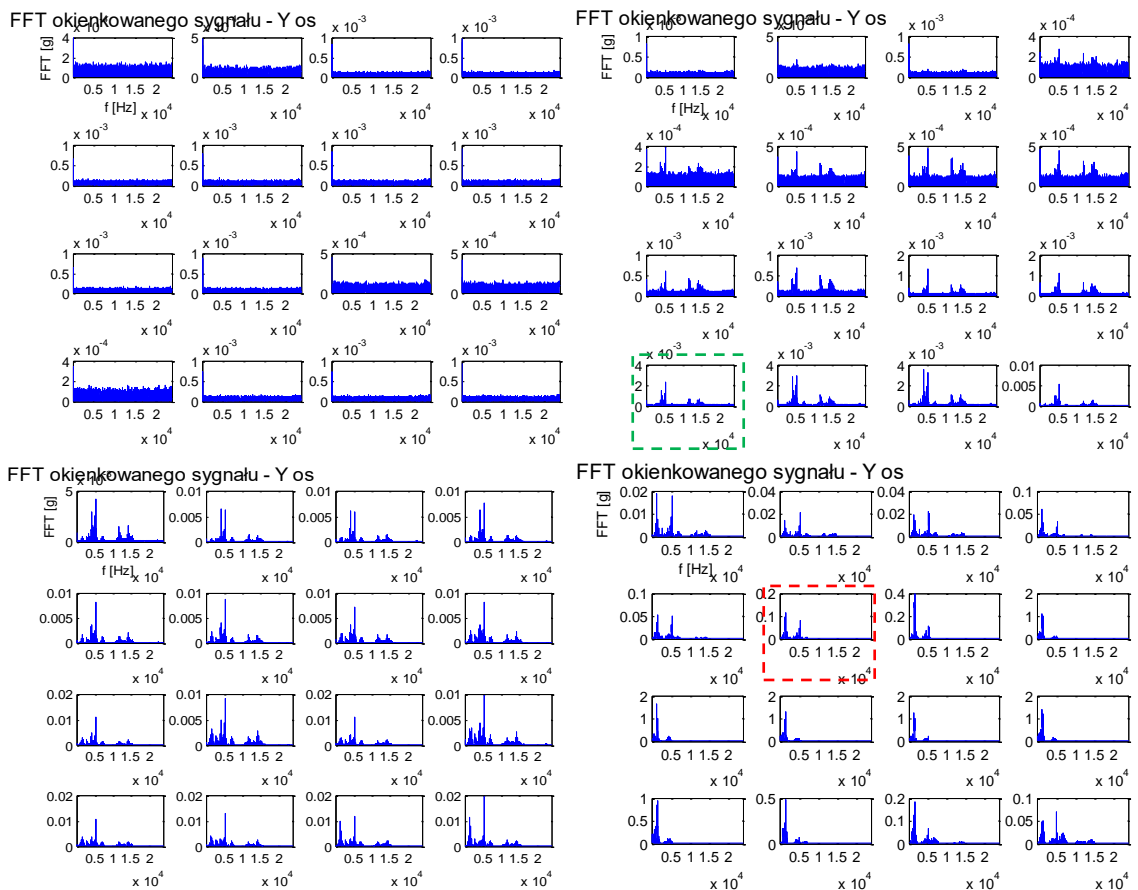


Rys. 70 1-sekundowe okna sygnału dla osi Z.

Dodatkowo dla każdego postępującego okna czasowego wyznaczano widmo częstotliwościowe sygnału za pomocą algorytmu FFT. Wyniki przedstawiono na rysunkach nr 71-73.

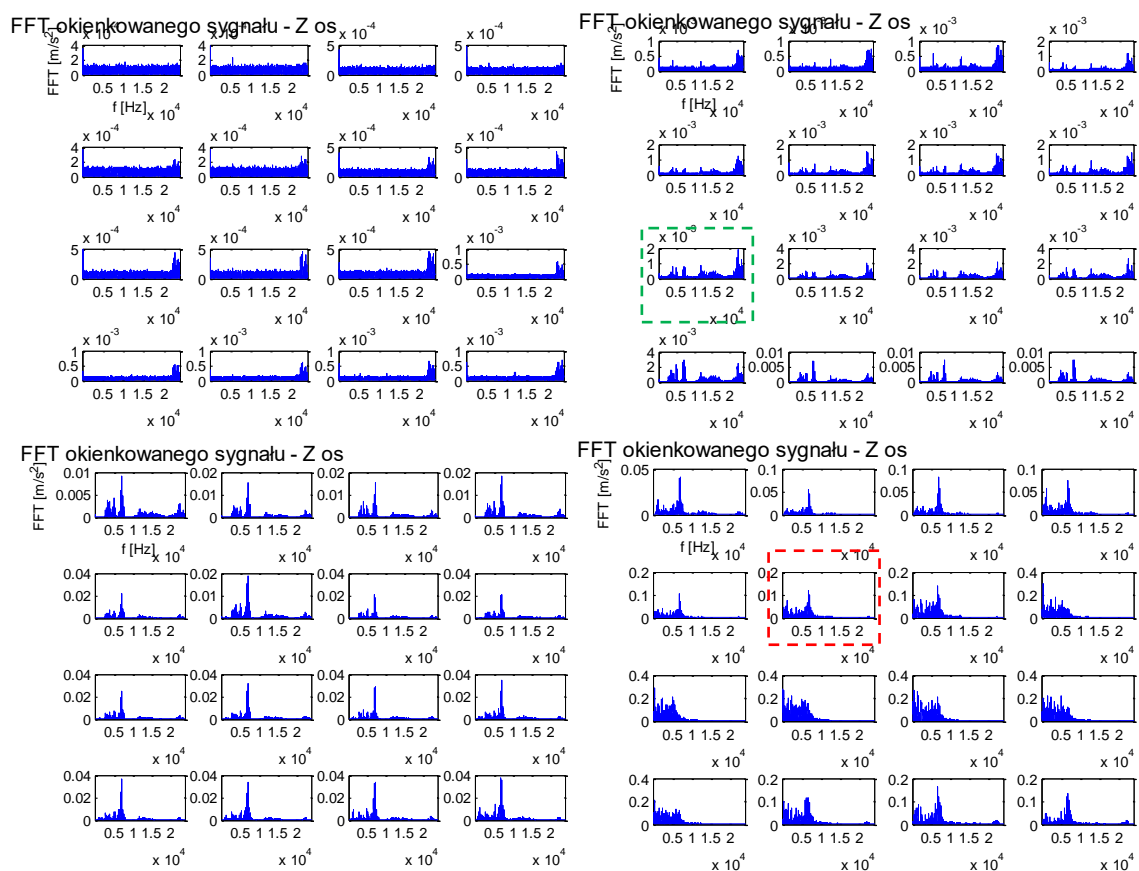


Rys. 71 Widma 1-sekundowe okien sygnału dla osi X.



Rys. 72 Widma 1-sekundowe okien sygnału dla osi Y.



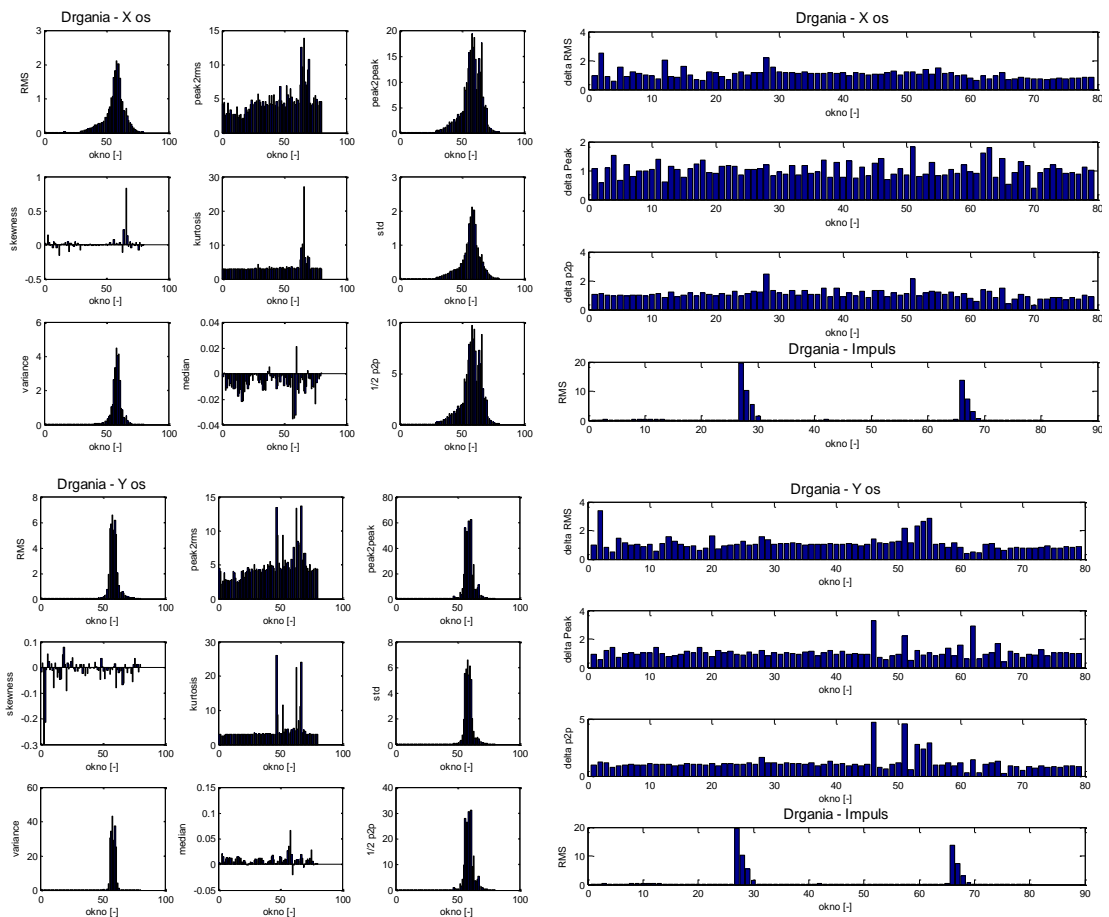


Rys. 73 Widma 1-sekundowe okien sygnału dla osi Z.

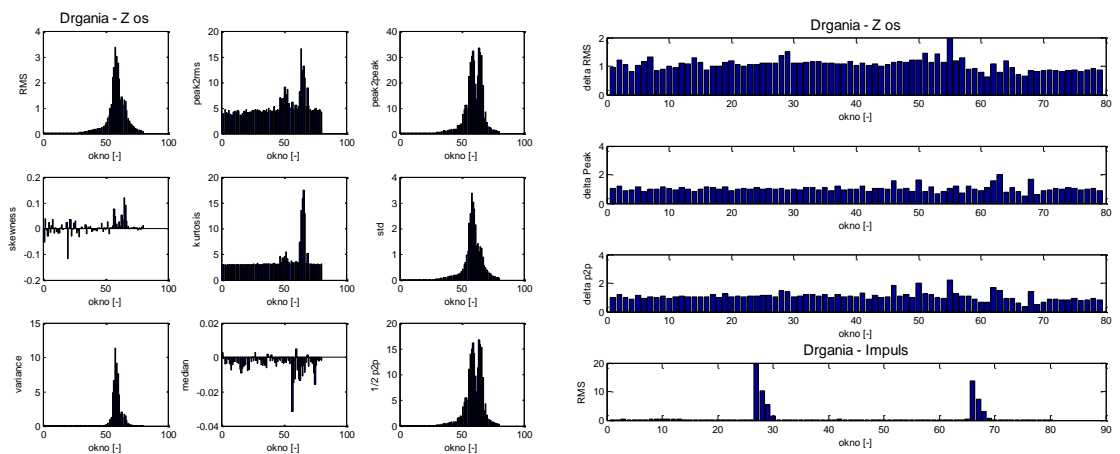
Następnie dla tak zdefiniowanych okien analizy wyznaczono przyjęte estymatory sygnałów i miar dynamiki. Rozkład wartości tych estymatorów dla kolejnych okien analizy przedstawiono na wykresach 74-76.

W kolejnym kroku wyznaczono rozkłady estymatorów dla wyznaczonych przebiegów iloczynowych drgań, jako wartości kolejnych wymnożonych wartości przyspieszeń drgań synchronicznie rejestrowanych dla osi x, y i z. Rozkłady wartości w kolejnych oknach przedstawiono na rysunku 77.

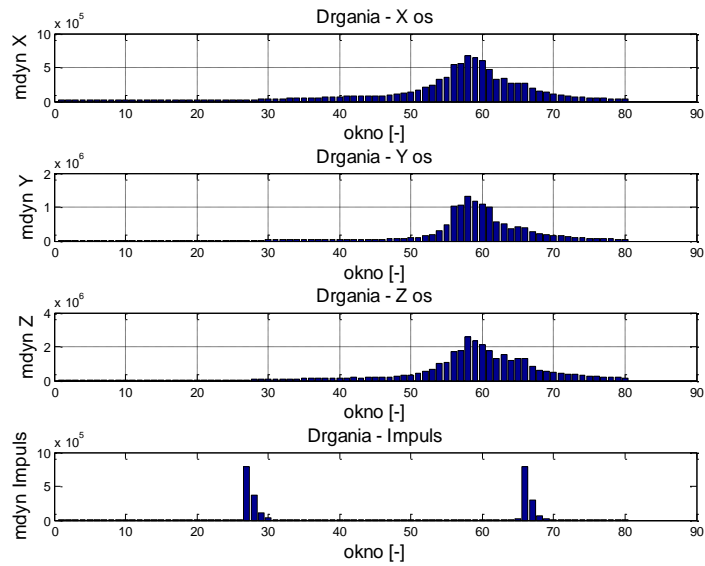
Ostatecznie zestawiono wyniki wstępnie preferowanych miar jako rozkłady wartości w kolejnych oknach 1-sekundowych co przedstawiono na rysunku 78.



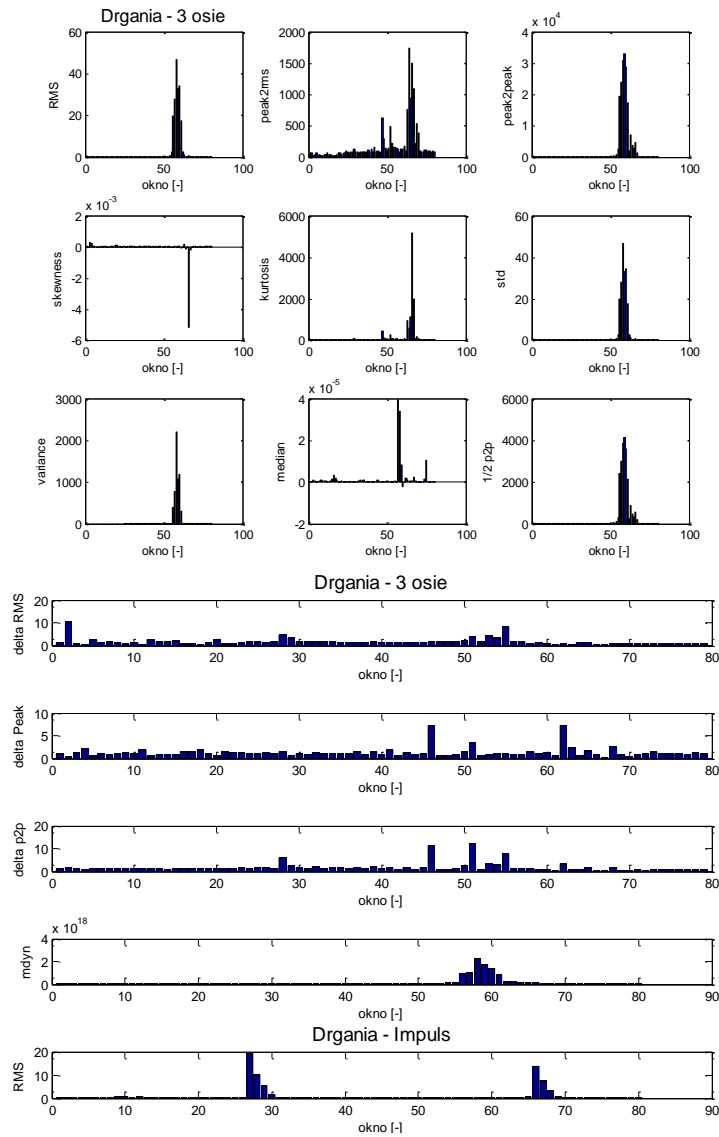
Rys. 74 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla kolejnych 1 sekundowych okien sygnału (pierwszy wiersz oś X, drugi wiersz oś Y).



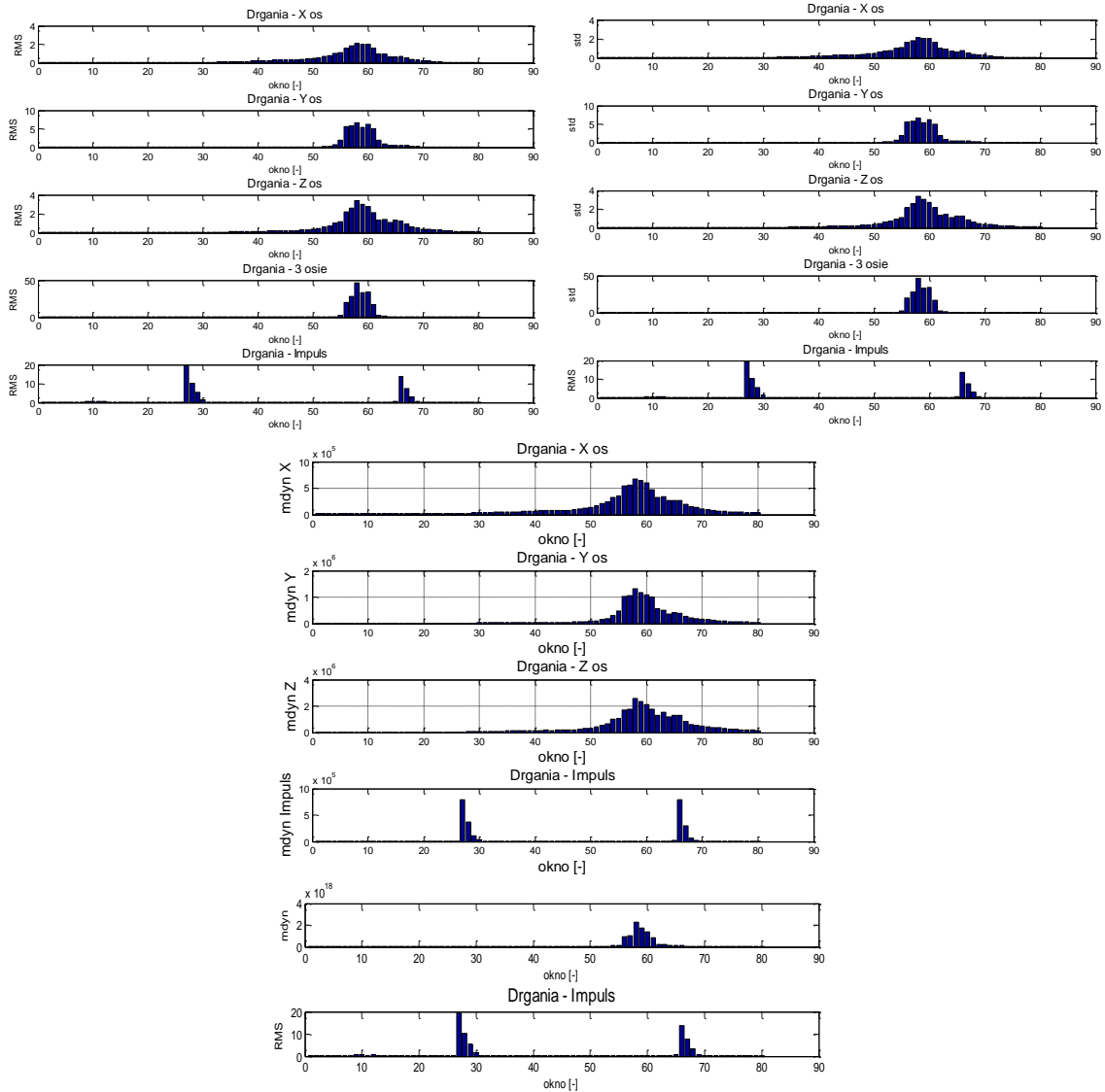
Rys. 75 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla kolejnych 1 sekundowych okien sygnału osi Z.



Rys. 76 Rozkład wartości miary dynamiki dla 1-sekundowych okien sygnału.



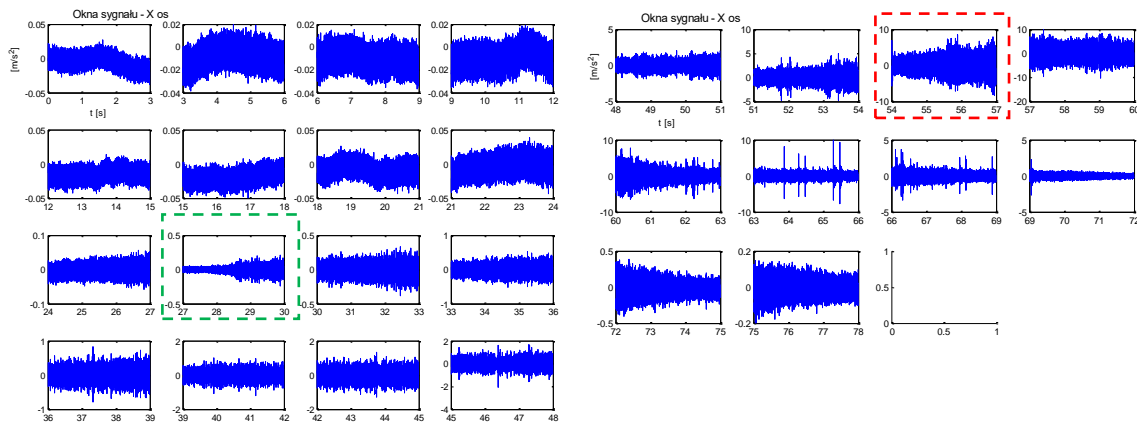
Rys. 77 Rozkłady miar iloczynowych, górny – miary statystyczne, dolny – miary dynamiczne dla 1-sekundowych okien sygnału.



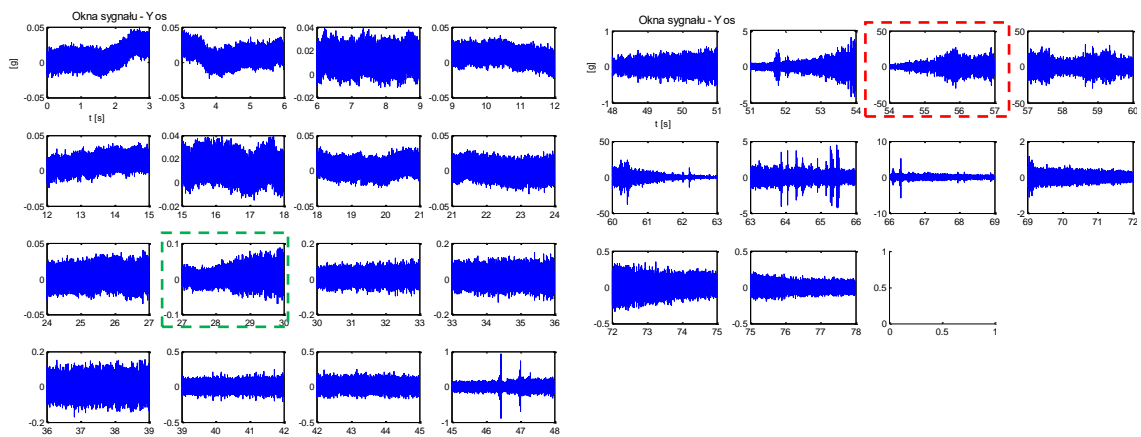
Rys. 78 Zestawienie rozkładów wybranych miar dla 1-sekundowych okien.

### 8.1.2. Podział na 3-sekundowe okno czasowe

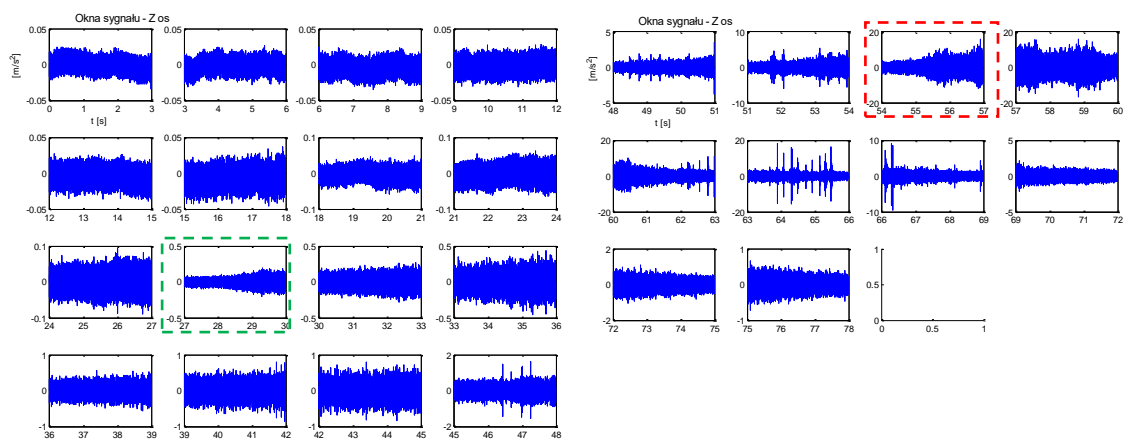
W drugiej iteracji przeprowadzono podział zarejestrowanego sygnału na kolejne 3-sekundowe okna czasowe, które przedstawiono na rysunkach od 83 do 85. Analogicznie na wykresach przerywanymi liniami zaznaczono okna czasowe, w których można znaleźć symptomy zbliżającego się pojazdu szynowego.



Rys. 79 3-sekundowe okna sygnału dla osi X

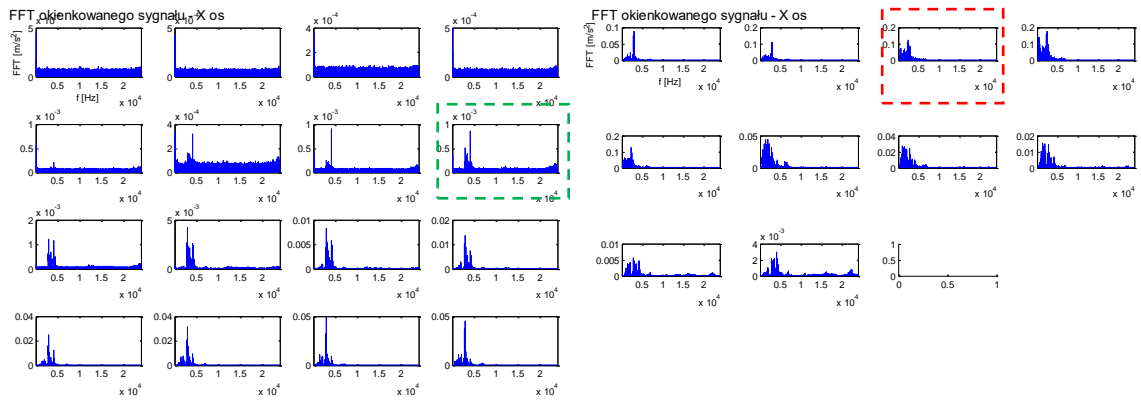


Rys. 80 3-sekundowe okna sygnału dla osi Y

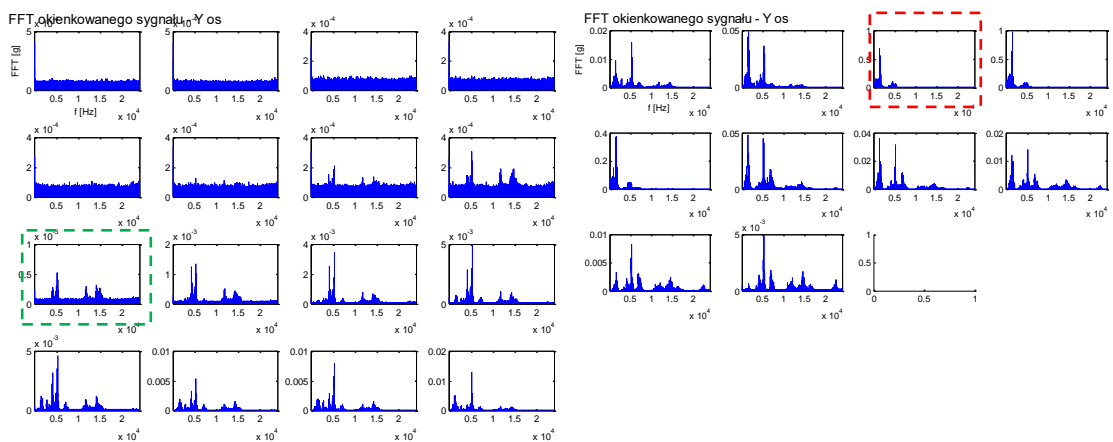


Rys. 81 3-sekundowe okna sygnału dla osi Z.

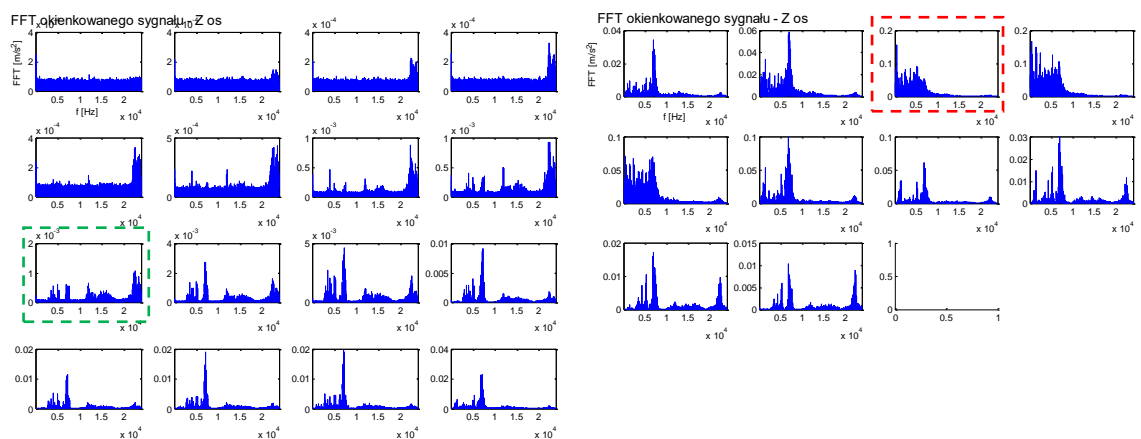
Dodatkowo dla każdego postępującego okna czasowego wyznaczano widmo częstotliwościowe sygnału. Wyniki przedstawiono na rysunkach od 82 do 84.



Rys. 82 Widma 3-sekundowych okien sygnału dla osi X.

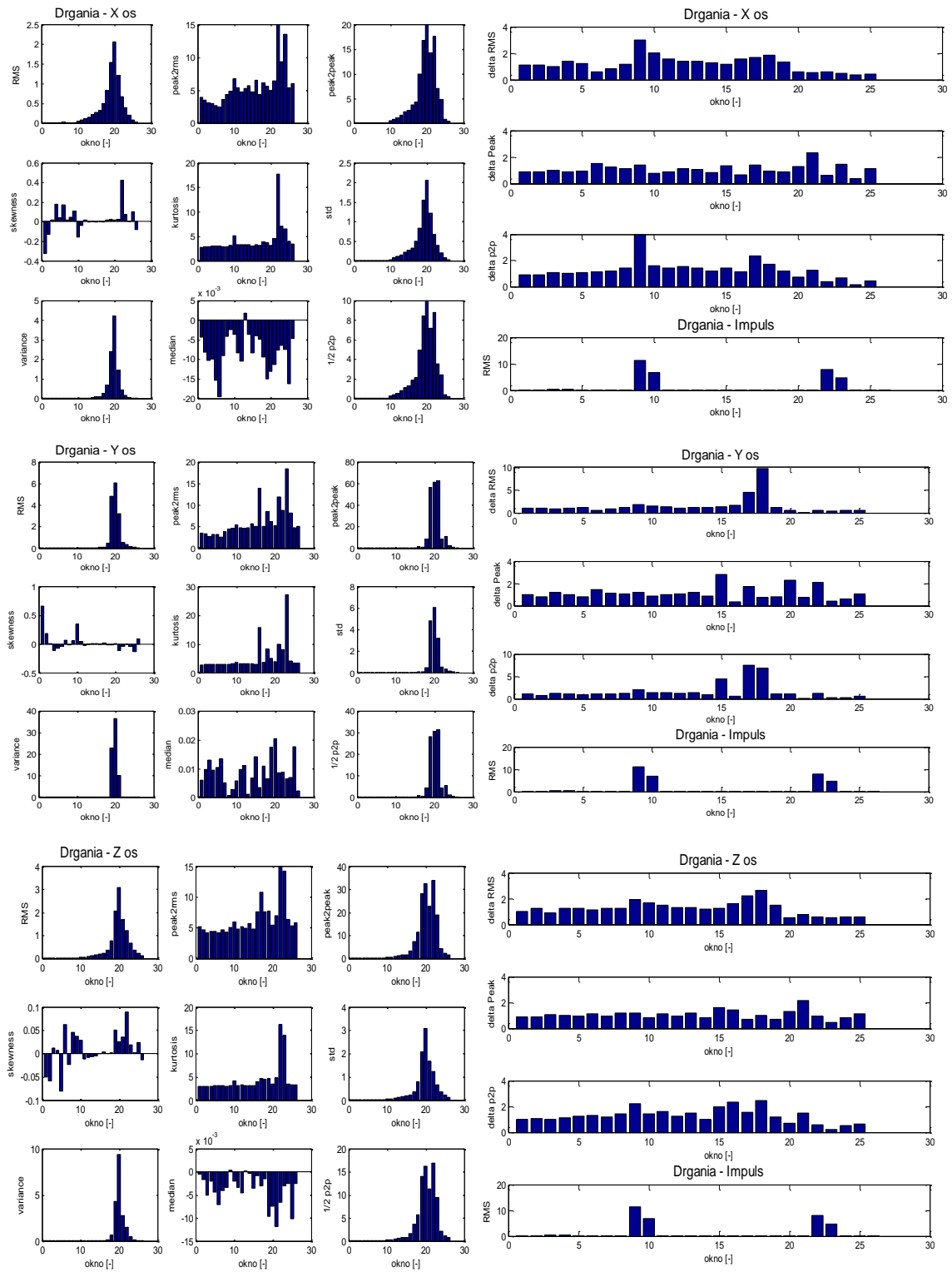


Rys. 83 Widma 3-sekundowych okien sygnału dla osi Y.

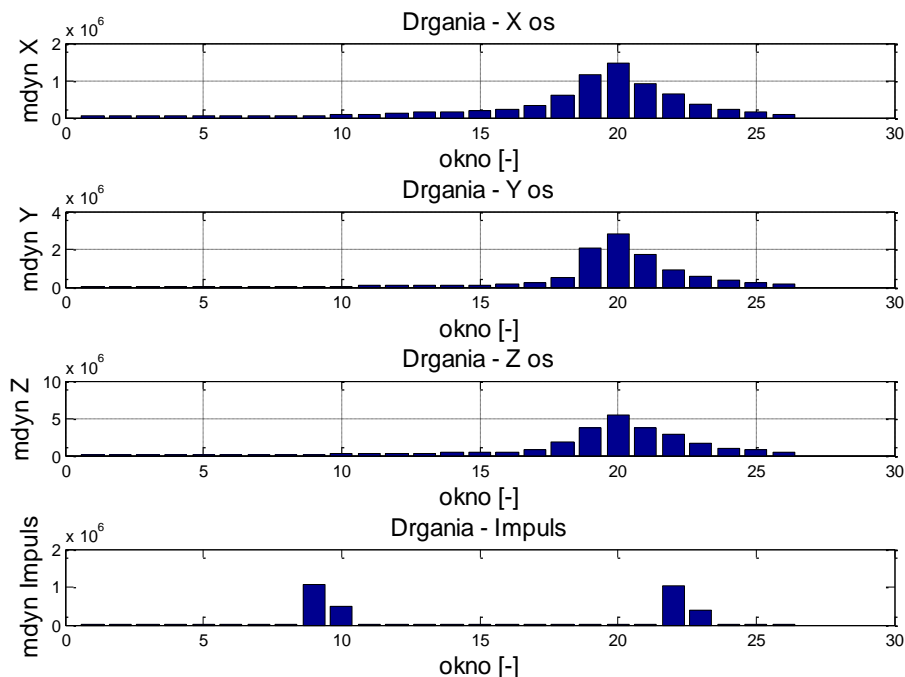


Rys. 84 Widma 3-sekundowych okien sygnału dla osi Z.

Następnie dla tak zdefiniowanych okien analizy wyznaczono przyjęte estymatory sygnałów. Rozkład wartości tych estymatorów dla kolejnych okien analizy przedstawiono na wykresach 85 oraz 86.

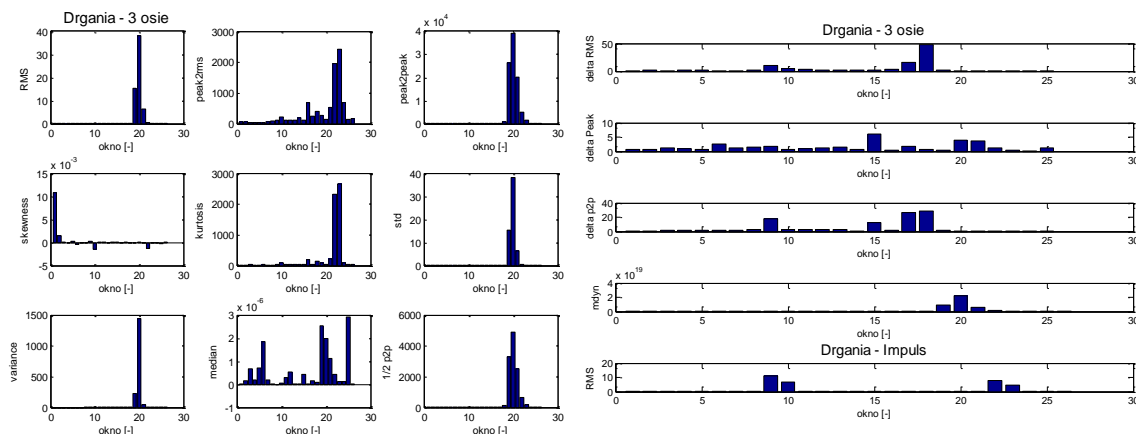


Rys. 85 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla kolejnych 3-sekundowych okien sygnału (pierwszy wiersz os X, drugi wiersz os Y, trzeci wiersz os Z).



Rys. 86 Rozkład wartości miar dynamicznych dla 3-sekundowych okien sygnału.

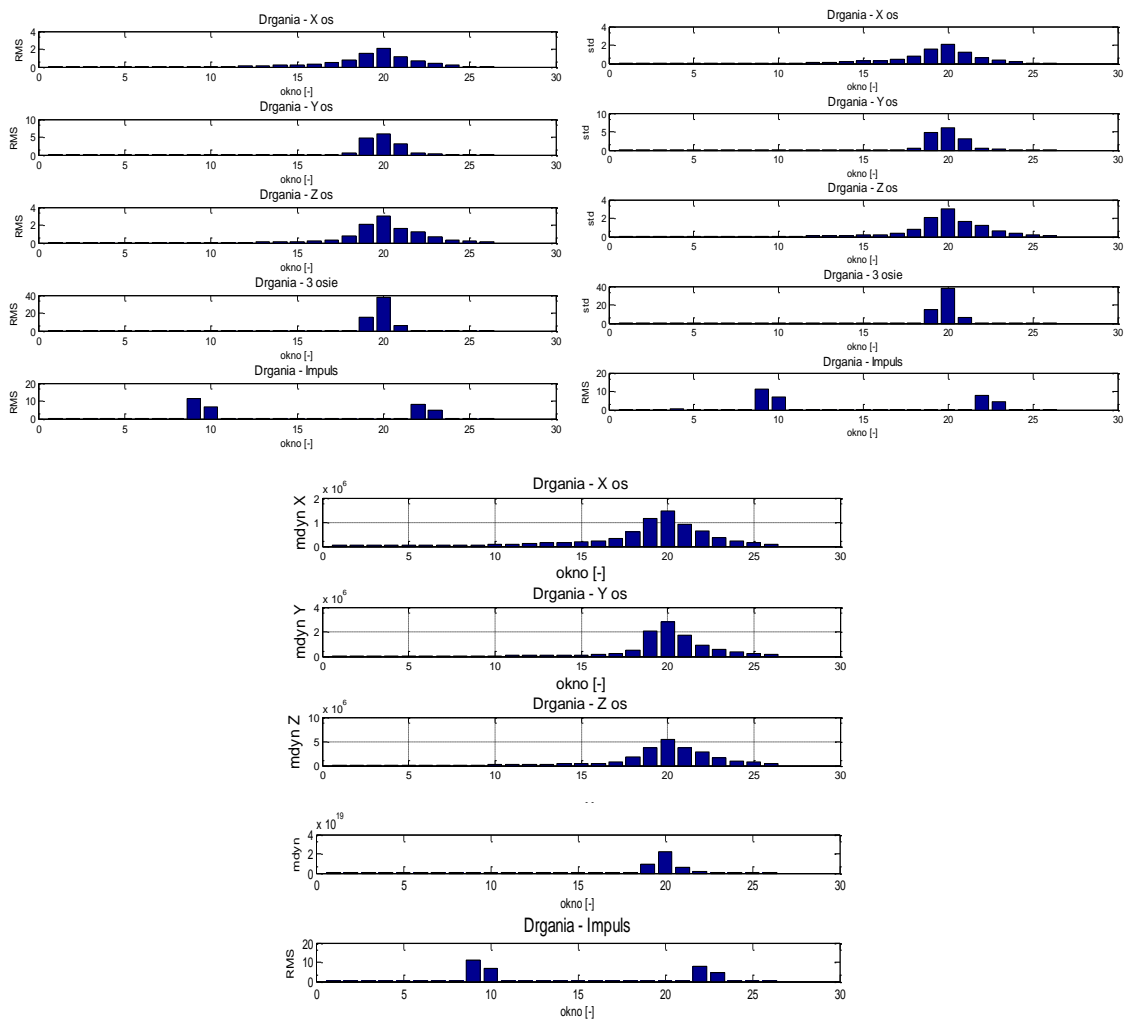
Następnie wyznaczono rozkłady estymatorów dla wyznaczonych przebiegów iloczynowych drgań. Rozkłady wartości w kolejnych oknach przedstawiono na rysunku 87.



Rys. 87 Rozkłady miar iloczynowych dla 3-sekundowych okien sygnału: lewy – miary statystyczne, prawy – miary dynamiczne.

Następnie zestawiono wyniki wstępnie preferowanych miar jako rozkłady wartości w kolejnych oknach 3-sekundowych co przedstawiono na rysunku 88.

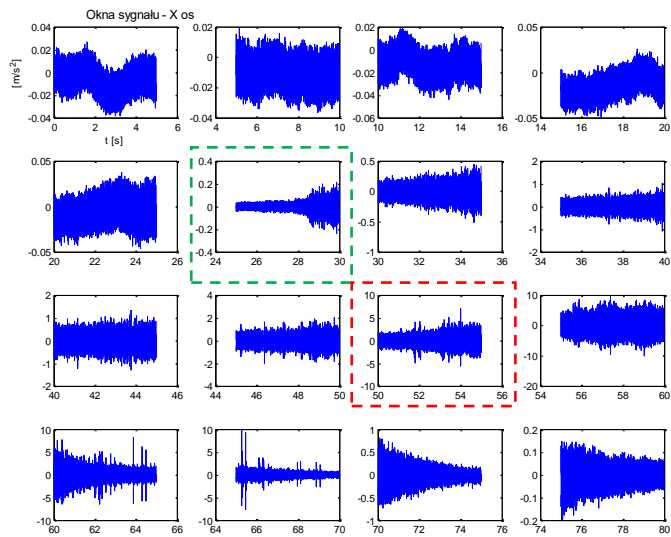




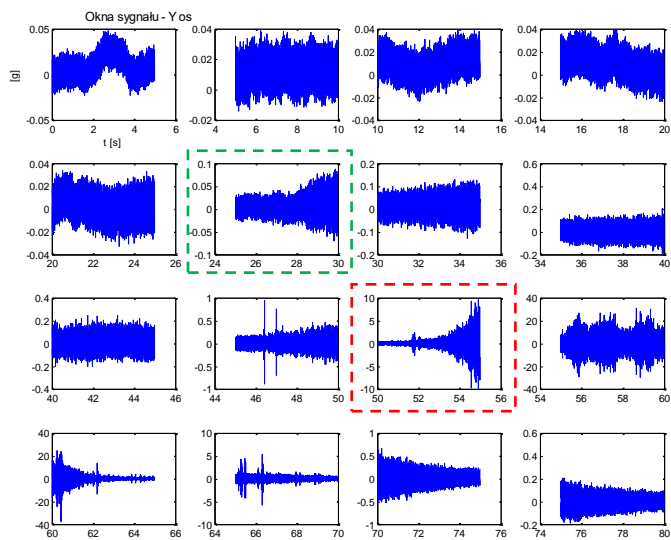
Rys. 88 Zestawienie rozkładów wybranych miar dla 3-sekundowych okien.

### 8.1.3. Podział na 5-sekundowe okno czasowe

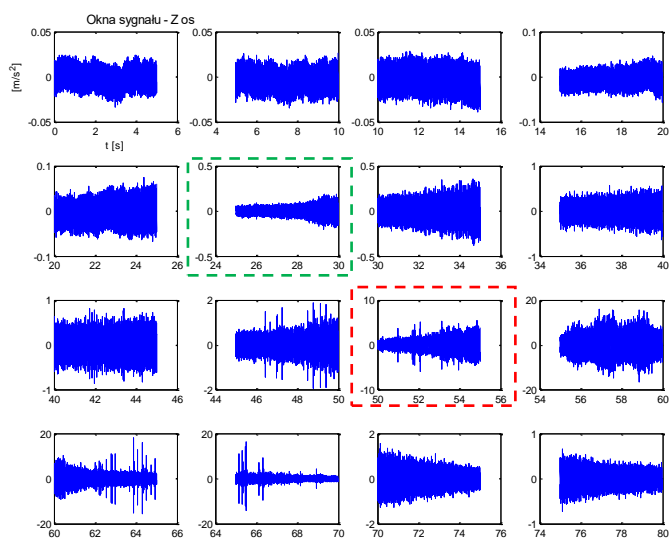
W ostatnim eksperymencie analitycznym przeprowadzono podział zarejestrowanego sygnału na kolejne 5-sekundowe okna czasowe przedstawiono na rysunkach od 89 do 91. Ponownie na wykresach przerywanymi liniami zaznaczono okna czasowe, w których można znaleźć symptomy zbliżającego się pojazdu szynowego.



Rys. 89 5-sekundowe okna sygnału dla osi X.

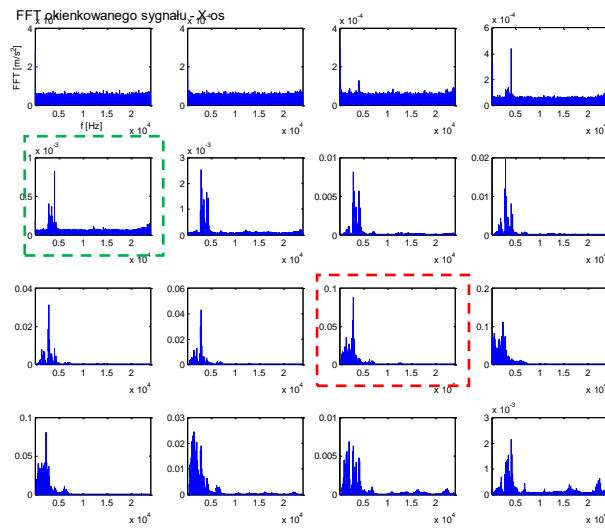


Rys. 90 5-sekundowe okna sygnału dla osi Y.

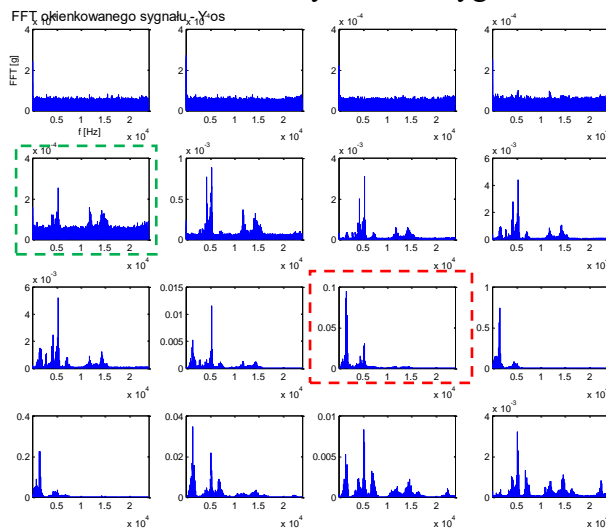


Rys. 91 5-sekundowe okna sygnału dla osi Z.

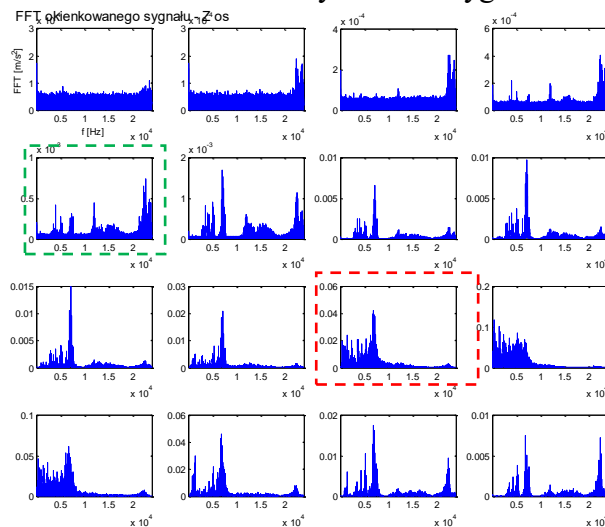
Dodatkowo dla każdego postępującego okna czasowego wyznaczano widmo częstotliwościowe sygnału za pomocą algorytmu FFT. Wyniki przedstawiono na rysunkach od 92 do 94.



Rys. 92 Widma 5-sekundowych okien sygnału dla osi X.

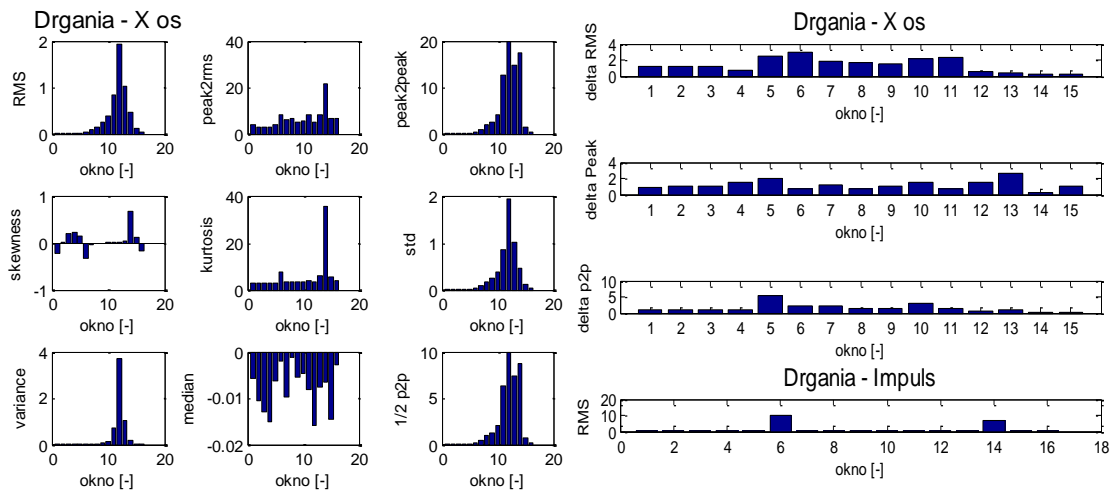


Rys. 93 Widma 5-sekundowych okien sygnału dla osi Y.

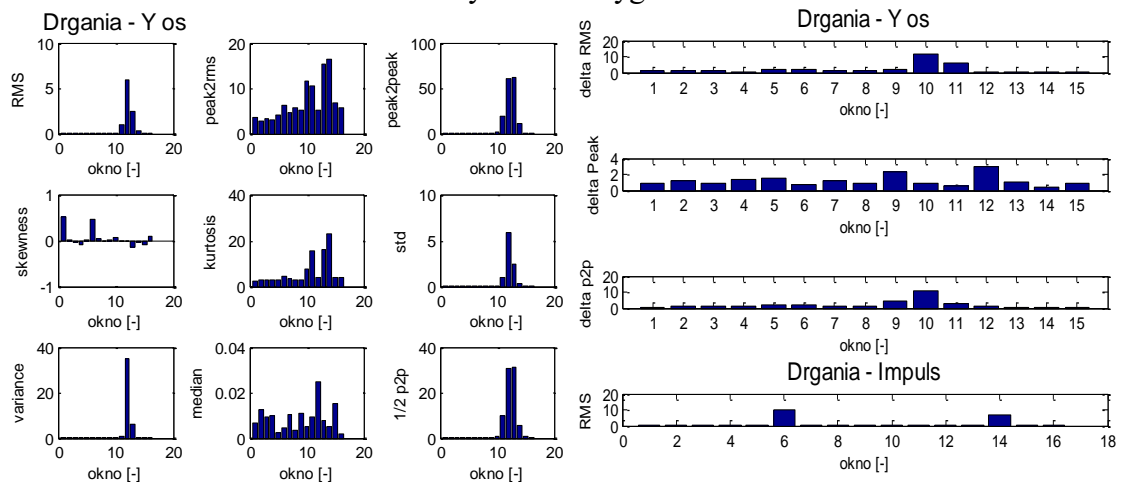


Rys. 94 5-sekundowych okien sygnału dla osi Z.

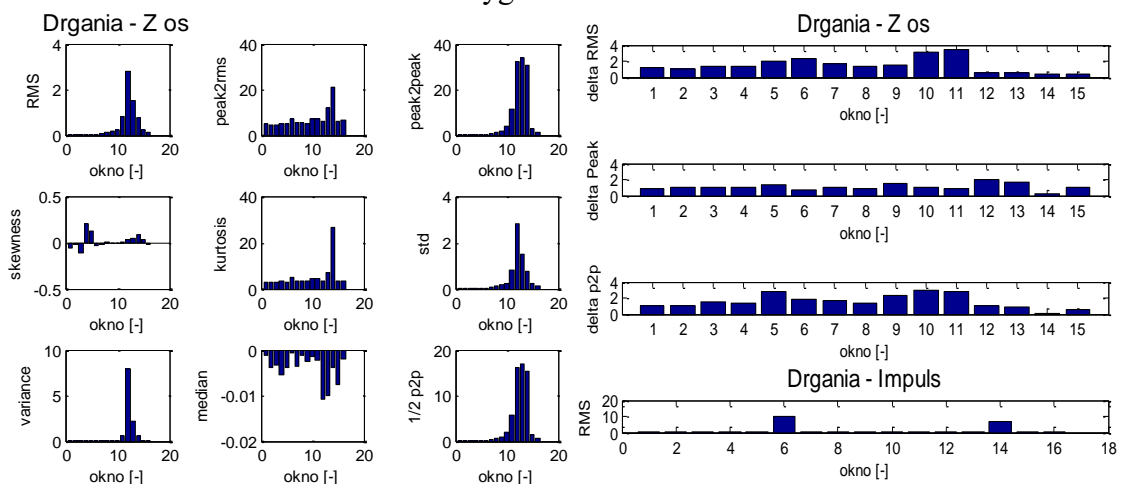
Następnie dla tak zdefiniowanych okien analizy wyznaczono przyjęte estymatory sygnałów. Rozkład wartości tych estymatorów dla kolejnych okien analizy przedstawiono na wykresach od 95 do 98.



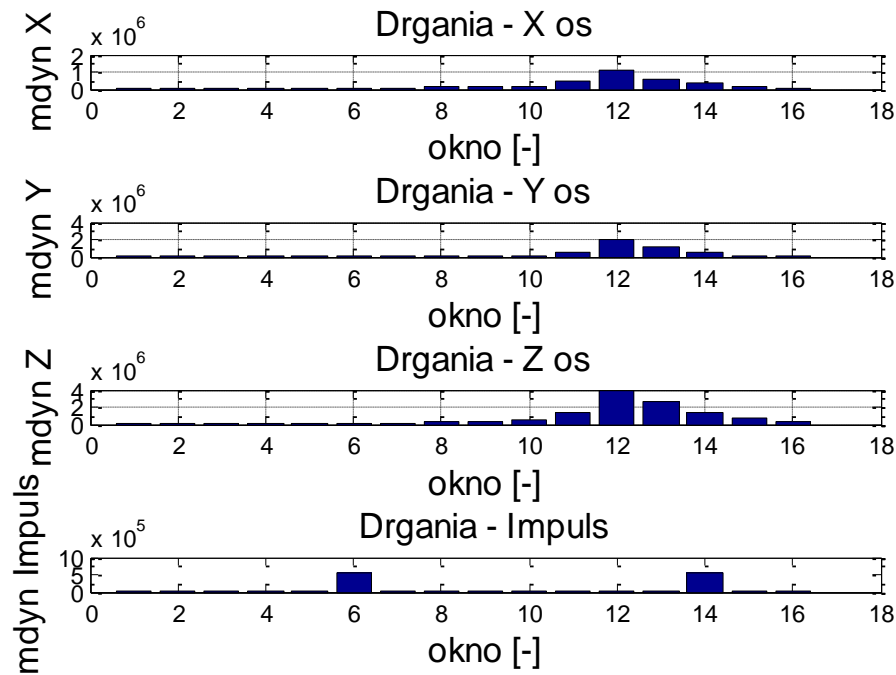
Rys. 95 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla kolejnych 5-sekundowych okien sygnału osi X.



Rys. 96 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla 5-sekundowych okien sygnału osi Y.

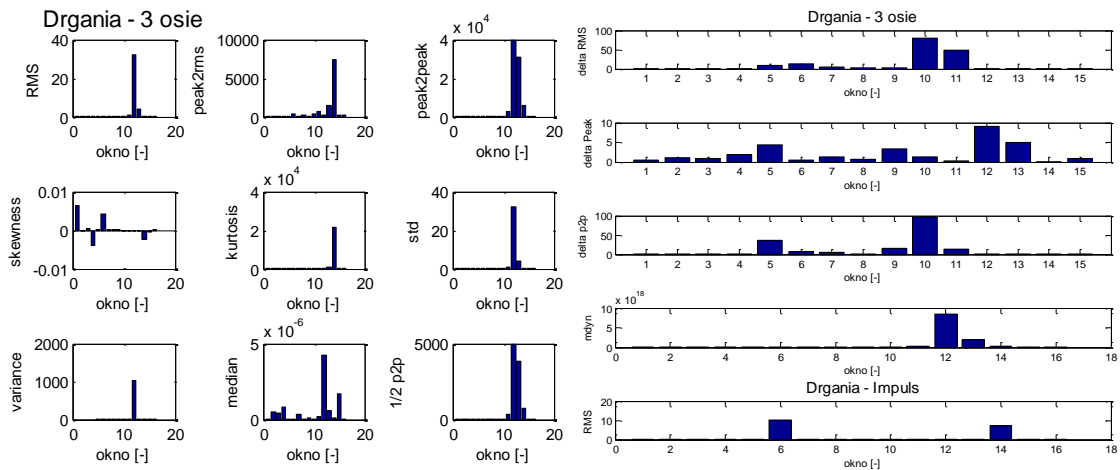


Rys. 97 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla 5-sekundowych okien sygnału osi Z.



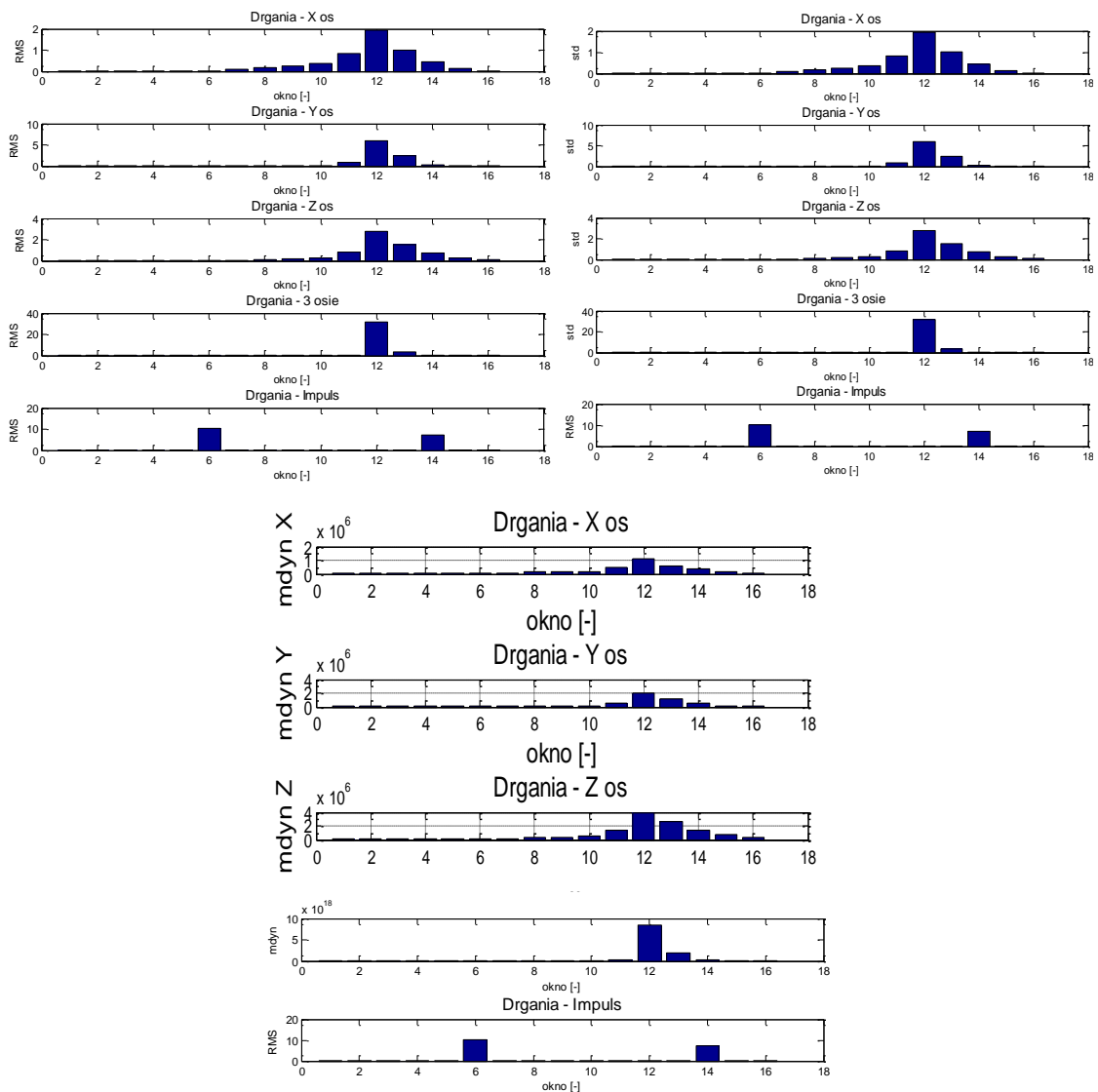
Rys. 98 Wartości miar dynamicznych dla 5-sekundowych okien sygnału.

Następnie wyznaczono rozkłady estymatorów dla wyznaczonych przebiegów iloczynowych drgań, jako wartości kolejnych wymnożonych wartości przyspieszeń drgań synchronicznie rejestrowanych dla osi x, y i z. Rozkłady wartości w kolejnych oknach przedstawiono na rysunkach 99.



Rys. 99 Rozkłady miar iloczynowych dla 5-sekundowych okien sygnału: lewy – miary statystyczne, prawy – miary dynamiczne.

Następnie zestawiono wyniki wstępnie preferowanych miar jako rozkłady wartości w kolejnych oknach 5-sekundowych co przedstawiono na rysunku nr 100.



Rys. 100 Zestawienie rozkładów wybranych miar dla 5-sekundowych okien.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że z uwagi na zamierzony praktyczny cel badań i czas predykcji w systemie zabudowanym w infrastrukturze kolejowej badanie postępujących okien o dłuższym czasie niż 5 sekund nie jest zasadne.

## 8.2. Porównanie czasów detekcji zbliżającego się pojazdu szynowego

Na etapie tym zadaniem był dobór najlepszego okna analizowanego sygnału spośród 1s, 3s lub 5s umożliwiające określenie najdłuższego czasu detekcji pojazdu szynowego na podstawie monitorowania przyrostu wartości wybranych estymatorów. Uzyskane dane w formacie liczbowym utworzyły nowy bank wiedzy, który po wprowadzeniu do arkusza kalkulacyjnego i prezentacji tabelarycznej tworzy zestaw wartości zbiorczych. Dla tak przygotowanych zbiorów danych możliwe jest zastosowanie

logicznych algorytmów optymalizacyjnych. W tym przypadku jako funkcję celu i parametr przyjęto iloczyn numeru okna i wartości czasu postępującego okna jednostkowego, zgodnie z zależnością:

$$t_d = \max(O_n \cdot t_j) \quad (8.1)$$

, gdzie:

$t_d$  – czas detekcji,

$t_j$  – czas okna jednostkowego (postępującego),

$O_n$  – numer okna detekcji.

Dzięki temu uzyskano zestawienie najlepszego czasu tj. najdłuższego czasu wykrycia pojazdu szynowego dla wstępnie wybranych estymatorów drgań. Dodatkowo, znając prędkość przejeżdżającego pociągu wyznaczano odległość detekcji.

W tabeli 4 przedstawiono przykładowe dane zarejestrowanego czasu i odległości detekcji 4 losowo wybranych pojazdów szynowych w zależności od wybranego estymatora w jednym z trzech wybranych okien pomiarowych: 1-, 3- oraz 5-sekundowego. Przedstawione w tabeli wartości spełniają już warunek, czyli odpowiadają wartości maksymalnej z szeregu iloczynu okna detekcji i czasu jednostkowego.

Tabela 4 Przykładowe zestawienie zarejestrowanych czasów i odległości detekcji 4 pojazdów szynowych (kolorem szarym zaznaczono pola z najlepszymi uzyskanymi wynikami)

	Drezyna - 38s, $V_{\dot{s}.r.}=11m/s$			EZ - 60s $V_{\dot{s}.r.}=10m/s$			Towarowy na 2 torze $V_{\dot{s}.r.}=9m/s$			Towarowy 12 $V_{\dot{s}.r.}=7m/s$		
	1s	3s	5s	1s	3s	5s	1s	3s	5s	1s	3s	5s
w/ skuteczna os x	21	<b>27</b>	35	42	<b>36</b>	50	44	<b>44</b>	63	38	<b>39</b>	80
w/ skuteczna os y	21	<b>27</b>	20	38	<b>36</b>	25	47	<b>65</b>	63	47	<b>81</b>	30
w/ skuteczna os z	36	<b>36</b>	35	53	<b>60</b>	50	67	<b>65</b>	63	48	<b>39</b>	80
w/ skuteczna 3osie	21	<b>27</b>	35	42	<b>36</b>	50	47	<b>44</b>	63	48	<b>36</b>	80
Odch. Std. os x	38	<b>18</b>	35	50	<b>45</b>	25	51	<b>53</b>	63	51	<b>81</b>	30
Odch. Std. Os y	29	<b>30</b>	35	41	<b>42</b>	25	50	<b>47</b>	63	54	<b>81</b>	60
Odch. Std. Os z	19	<b>36</b>	35	67	<b>54</b>	50	47	<b>65</b>	63	79	<b>36</b>	80
Odch. Std. 3osie	34	<b>36</b>	35	50	<b>51</b>	40	56	<b>65</b>	63	57	<b>81</b>	80
miara dynamiczna x	38	<b>36</b>	35	61	<b>60</b>	50	48	<b>50</b>	63	22	<b>81</b>	80
miara dynamiczna y	38	<b>36</b>	35	53	<b>60</b>	40	48	<b>65</b>	63	22	<b>81</b>	80
miara dynamiczna z	38	<b>36</b>	35	67	<b>60</b>	50	47	<b>65</b>	63	78	<b>81</b>	80
miara dynamiczna 3osie	38	<b>36</b>	35	67	<b>60</b>	50	48	<b>53</b>	63	22	<b>81</b>	80
$t_{max.}$ [s]	<b>38</b>	<b>36</b>	<b>35</b>	<b>67</b>	<b>60</b>	<b>50</b>	<b>67</b>	<b>65</b>	<b>63</b>	<b>79</b>	<b>81</b>	<b>80</b>
$d_{max.}$ [m]	<b>418</b>	<b>396</b>	<b>385</b>	<b>670</b>	<b>600</b>	<b>500</b>	<b>603</b>	<b>585</b>	<b>567</b>	<b>553</b>	<b>567</b>	<b>560</b>

Na podstawie tabeli 4 wybrano okno 3-sekundowe jako najbardziej wiarygodne ze względu na najdłuższy czas detekcji pojazdu szynowego oraz najbardziej powtarzalną wartość uzyskanego czasu detekcji pojazdu szynowego.

W ramach analizy uzyskanych wyników przeprowadzono weryfikację skuteczności obliczonych estymatorów drganiowych w ujęciu jednoznaczności wykrycia poruszającego się pojazdu szynowego oraz czasu predykcji, a co za tym idzie odległości od jakiej analizowane miary drganiowe pozwalają na określenie, że zbliża się pojazd szynowy. Analiza otrzymanych wartości potwierdziła największą użyteczność detekcyjną estymatora miary dynamicznej (mdyn), która niemal dla wszystkich okien i osi rejestracji umożliwiała wykrycie pojazdu z najdłuższym czasem wyprzedzenia. Pozostałe estymatory także wykazały dużą użyteczność aplikacyjną. Dodatkowo porównano wartości miar wyznaczane dla drgań oddzielnie każdej z osi X,Y,Z oraz wartości funkcji iloczynowej tych sygnałów, której celem było wzmocnienie amplitudowe funkcji dla wartości maksymalnych lub rosnących wraz ze zbliżającym się pojazdem szynowym. Propozycja wzmocnienia sygnału (iloczynu) nie przyniosła jednak spodziewanych efektów wydłużenia czasu detekcji.

W przypadku tych badań rejestrowano także prędkość pociągu, co w odniesieniu do czasu detekcji umożliwiło wyznaczenie odległości wykrycia zbliżającego się pojazdu szynowego. Wyniki zestawiono w ostatnim wierszu tabeli 4. W przypadku przedstawionych w tabeli przykładowych wyników maksymalny czas detekcji wyniósł 81 sekund, zaś odległość 670 metrów.

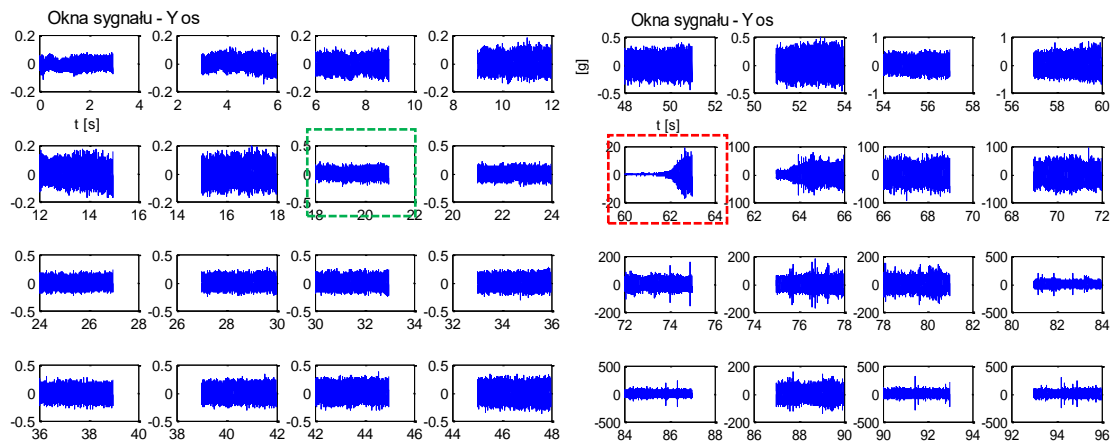
Z analizy tej wynika ponadto, że okno 3 sekundowe w przypadku wykorzystania go w pracy systemu jest najkorzystniejszym ze względu na czas transferu informacji. Jest to istotne podczas aplikacji, ponieważ nie powoduje nadmiernego obciążenia procesora wynikającego z liczby analizowanych danych, jak również jego długość nie wpływa znacząco na bezpieczeństwo uczestników ruchu drogowego, tj. czas 3 sekund w najgorszym przypadku opóźni uruchomienie powiadomienia o 3 sekundy. Pojazd szynowy może przejechać w tym czasie, w zależności od prędkości od około 50 do 400 metrów wymaganych dla bezpiecznego przejazdu przez krzyżowanie z drogą kolejową. Dodatkowo wybór 3-sekundowego okna wynika z faktu, że umożliwia to uśrednianie wartości chwilowych nie związanych z przejazdem pojazdu szynowego, np. uderzenie kamieniem w szynę. Przy oknie 1 sekundowym takie zdarzenie może znacząco wpłynąć na wartość estymatora w pojedynczym oknie, co z kolei może zakłócić algorytm wykrywania pojazdu szynowego



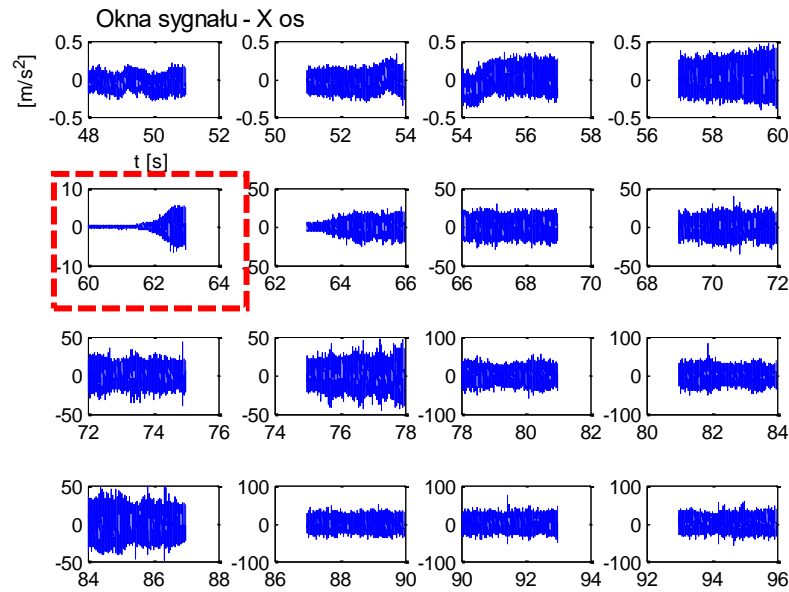
## ROZDZIAŁ 9 - PRZYKŁADOWE WYNIKI WYKRYWANIA ZBLIŻAJĄCEGO SIĘ POJAZDU SZYNOWEGO

W ramach kolejnego etapu badań przeprowadzono weryfikację opracowanej metody analizy na podstawie zarejestrowanych sygnałów drganiowych przejeżdżających pojazdów szynowych w rzeczywistych warunkach. Pomiarów dokonywano na użytkowanej, w pełni sprawnej sieci kolejowej w określonej lokalizacji. Przyjęto założenia doboru punktów (lokalizacji) pomiarowych, jako miejsca gdzie potencjalnie system opracowany na podstawie zaproponowanej metody może mieć największą użyteczność. Tymi lokalizacjami były przejazdy kolejowo-drogowe, które stanowią newralgiczne węzły transportowe w zakresie bezpieczeństwa i płynności ruchu pojazdów. Dodatkowo lokalizacje takie charakteryzują się dużą liczbą czynników, które mogą wpływać na jakość wyników i poziom zakłóceń sygnałów drganiowych, takich jak ruch pojazdów samochodowych przez torowisko, praca dodatkowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym itp.

Podczas analizy kolejnych okien podzielonego sygnału identyfikowano okno predykcji, w którym występował potwierdzony (przyjęty jako trzeci kolejny przyrost) symptom drganiowy zbliżającego się pojazdu szynowego oraz okno z maksymalnymi amplitudami. Przykładowe okna predykcji i wartości maksymalnych przedstawiono na rysunku nr 101.



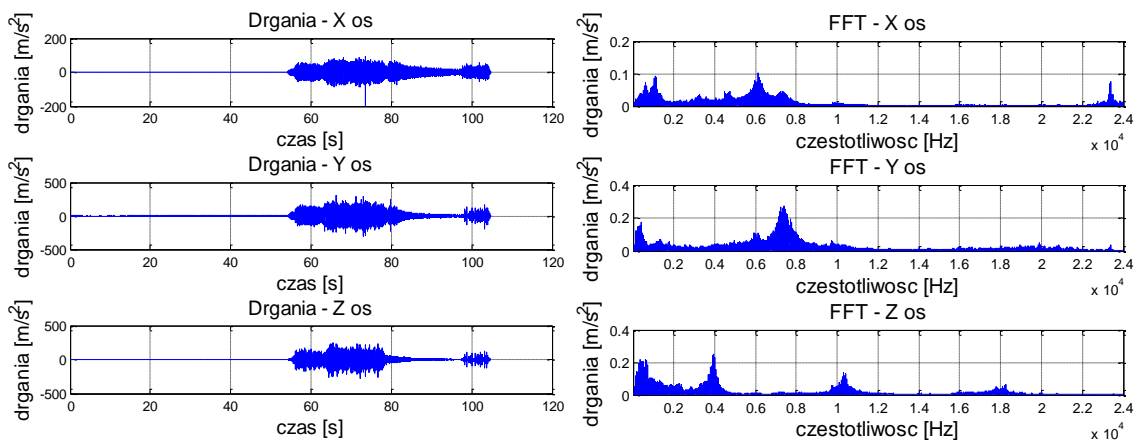
Rys. 101 Przykładowe okna predykcji (zielone) i amplitud maksymalnych (czerwone). Z uwagi na brak znacznika przejazdu osi w badaniach zasadniczych przyjęto identyfikację chwili najazdu pierwszej osi jezdnej pojazdu na punkt mocowania czujnika, jako pierwsze okno z wyraźnymi i znacznymi przyrostami amplitud. Okna te występują wcześniej niż okna z amplitudami maksymalnymi. Przykładowe okno zidentyfikowanego najazdu przedstawiono na rysunku nr 102.



Rys. 102 Przykładowe okna zidentyfikowanego najazdu pierwszej osi nad czujnik drgań (czerwona przerywana linia).  
 W ramach tego etapu badań zarejestrowano sygnały drgań dla kilkudziesięciu pojazdów szynowych w różnych lokalizacjach. Przykładowe wyniki analizy dla ostatecznie wybranych estymatorów drgań (rozdział poprzedni) przedstawiono na rysunkach od 103 do 112.

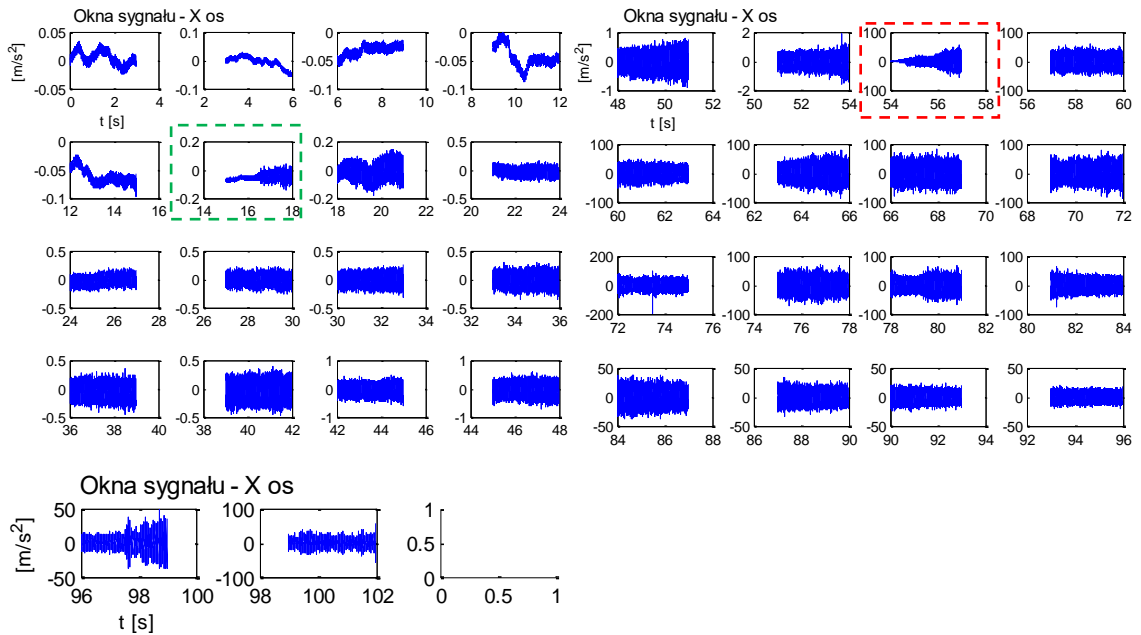
### 9.1. Wyniki działania metody detekcji dla pociągu towarowego z 18 wagonami

Na wykresach przedstawiono rezultaty działania opracowanego algorytmu detekcji, w ujęciu „krok po kroku”, zaczynając od „okienkowania sygnału” i kończąc na rozkładach wartości estymatorów drgań w kolejnych oknach analizy.

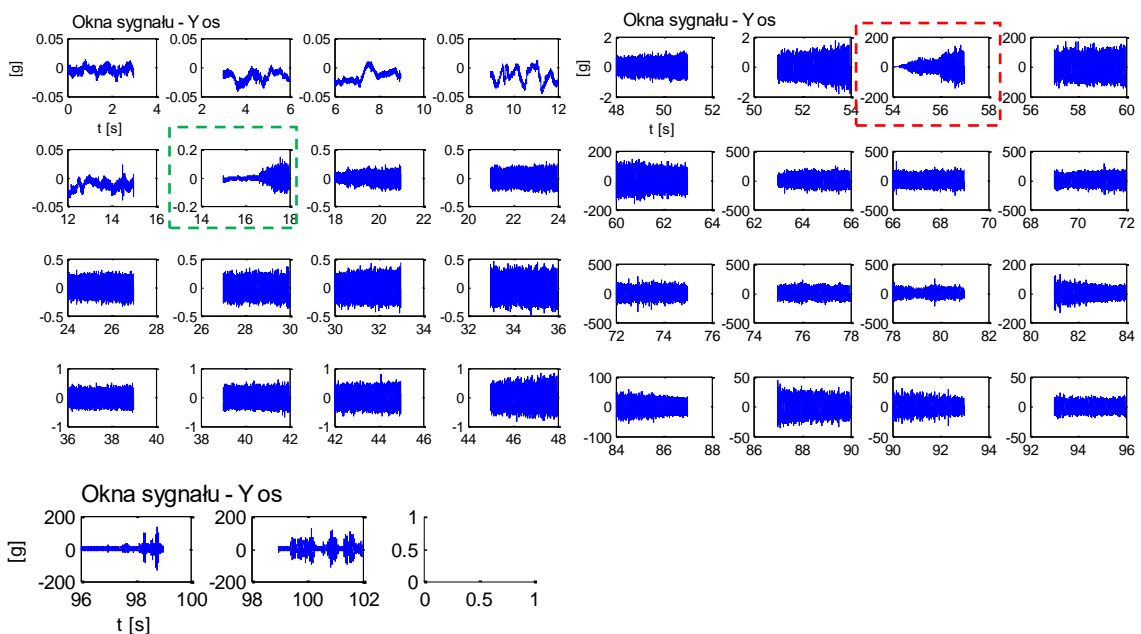


Rys. 103 Przebieg sygnałów oraz widma drgań zarejestrowane w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.

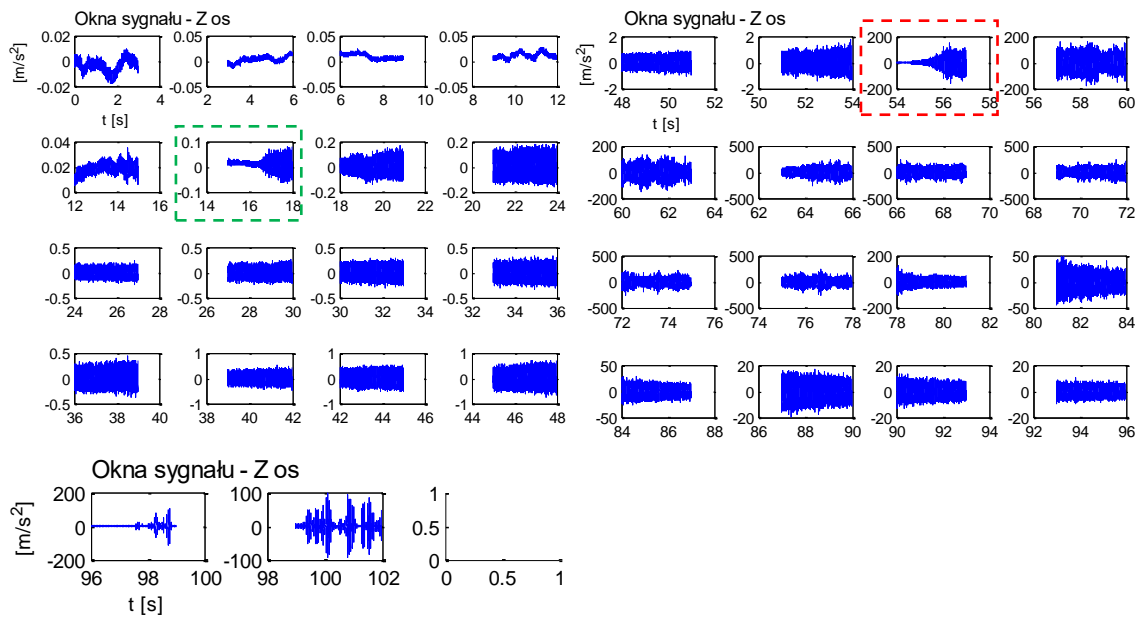
W kolejnym kroku dokonywano podziału sygnału. Kolejne okna sygnału z zaznaczonymi oknami predykcji i najazdu przedstawiono na rysunkach nr 104 do 109.



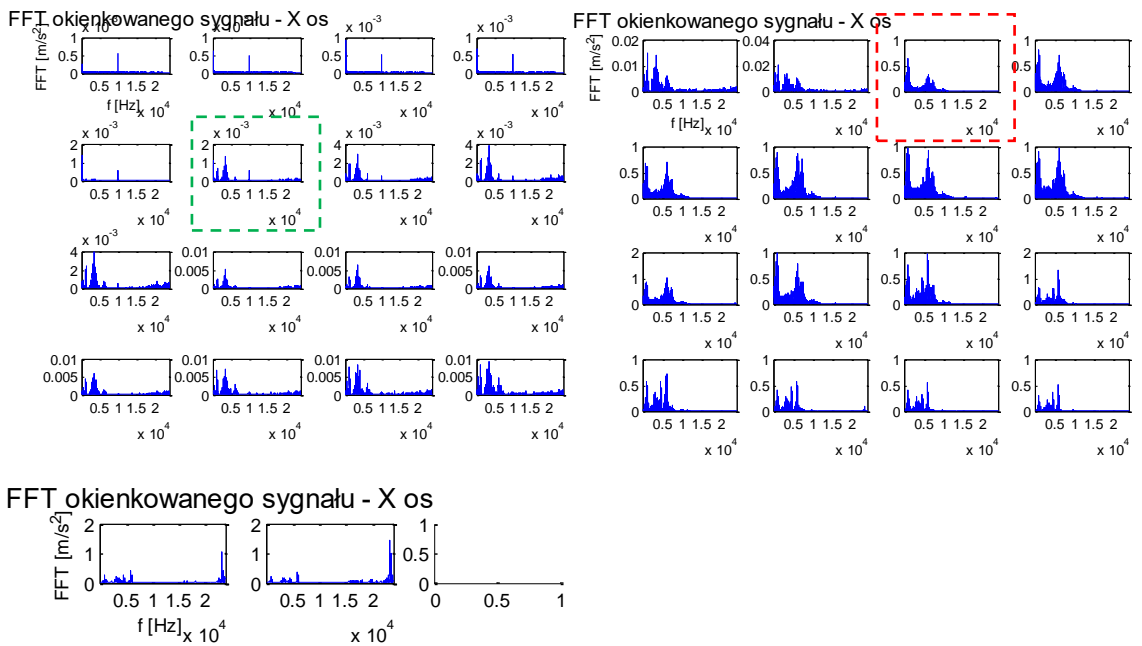
Rys. 104 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś X), dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.



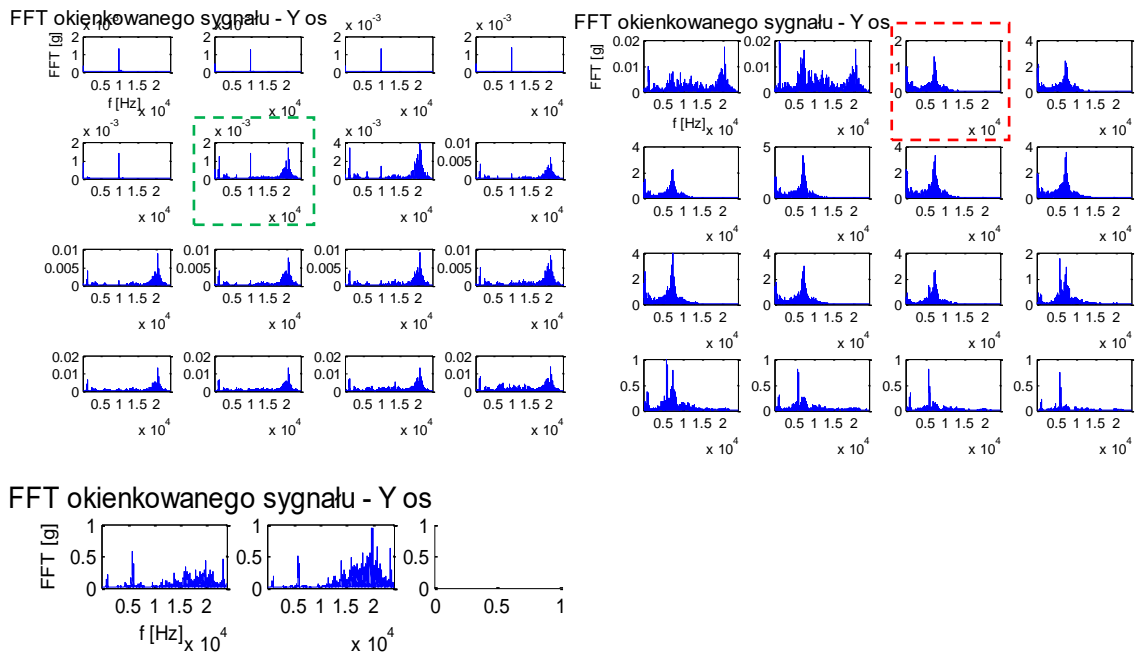
Rys. 105 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś Y), dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.



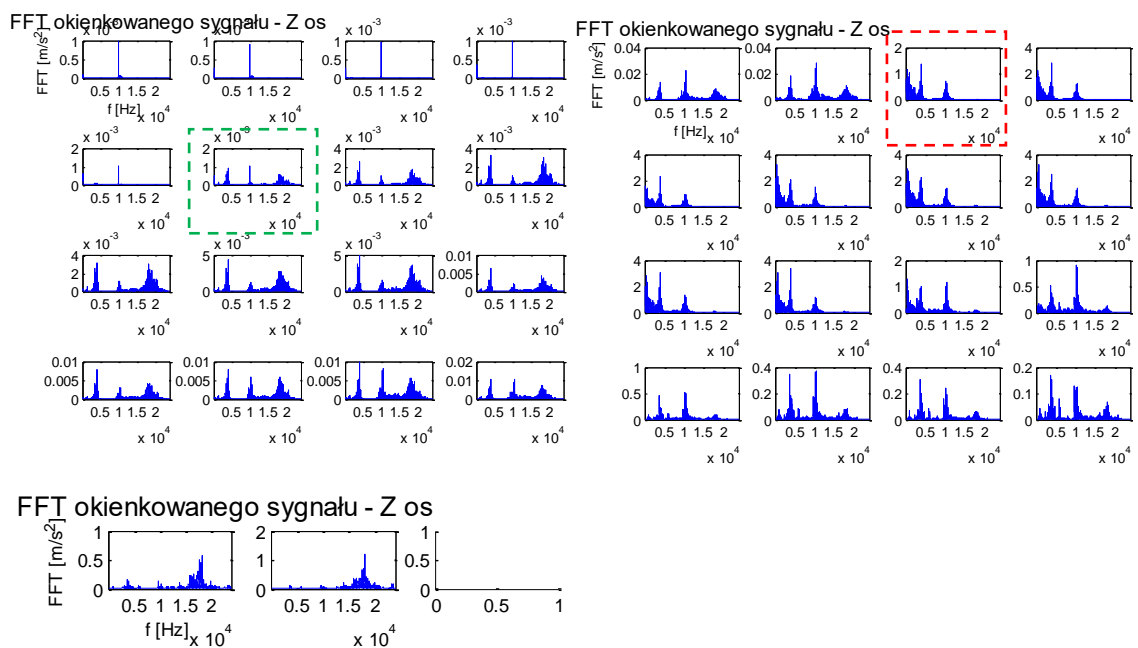
Rys. 106 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś Z), dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.



Rys. 107 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś X), dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.

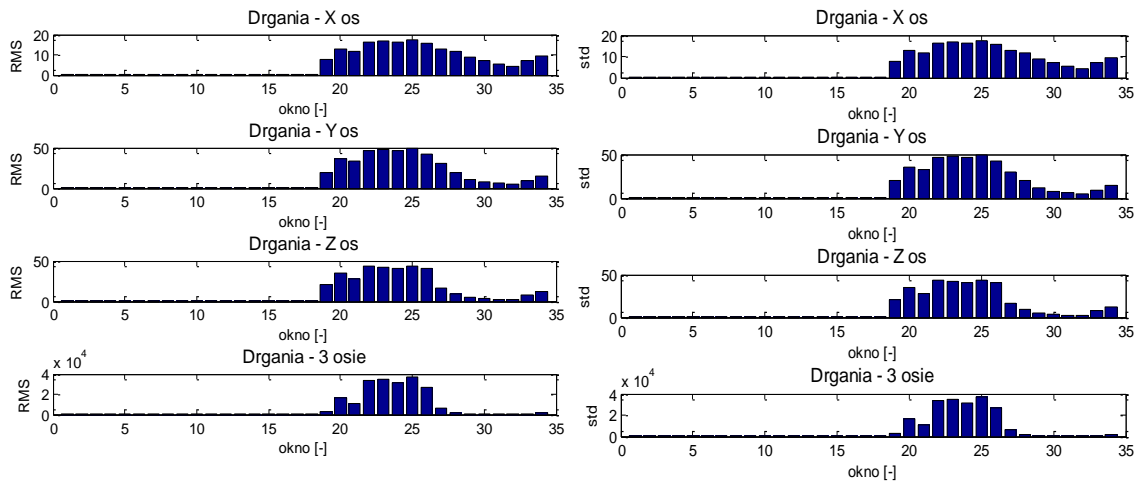


Rys. 108 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś Y), dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.

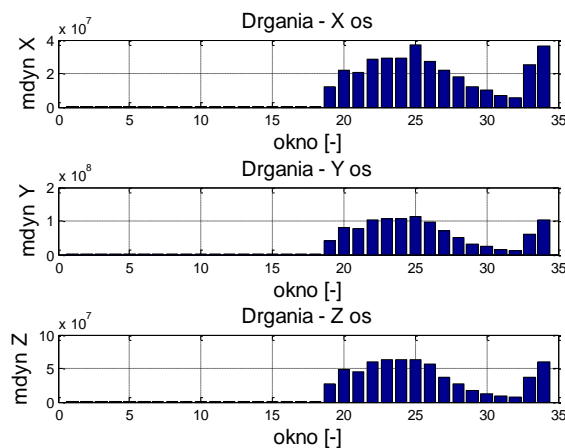


Rys. 109 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś Z), dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.

Rozkłady wartości estymatorów detekcji w kolejnych oknach analizy przedstawiono w formie wykresów słupkowych poniżej.

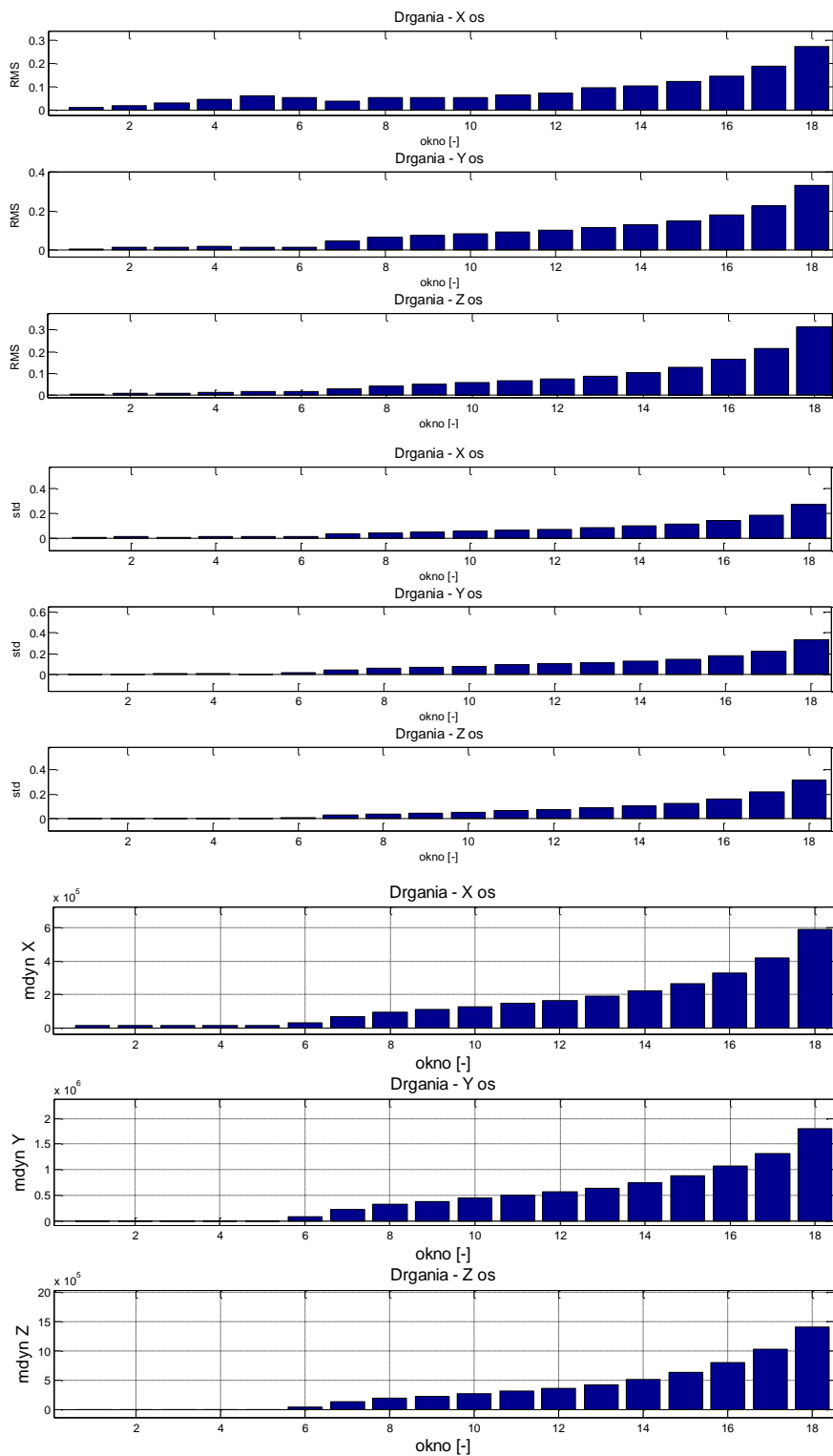


Rys. 110 Rozkład wartości skutecznej oraz rozkład wartości odchylenia standardowego drgań zarejestrowanych w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.



Rys. 111 Wartości miary dynamicznej (mdyn) dla kolejnych okien sygnału dla składu: pociąg towarowy z 18 wagonami typu węglarka, prędkość przejazdu 40 km/h.

W celu uwypuklenia skali przyrostów wybranych estymatorów powiększono wykresy dla okien analizy zarejestrowanych przed najazdem pociągu na punkt lokalizacji czujnika pomiarowego. W przedstawionym przypadku najazd (oś pierwszego wózka jezdnego w koincydencji z punktem mocowania czujnika drgań) nastąpił w 57 sekundzie, czyli 19 oknie analizy (3-sekundowym). Wykresy te przedstawiono na rysunku 112.

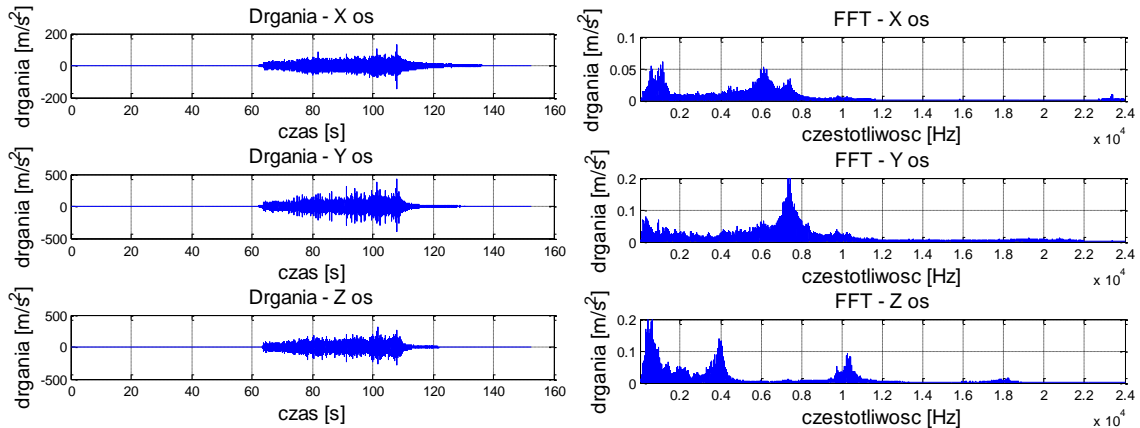


Rys. 112 Wartości estymatorów drgań w osiach X, Y i Z (okna 1-18) zarejestrowane przed najazdem pociągu (okno 19).

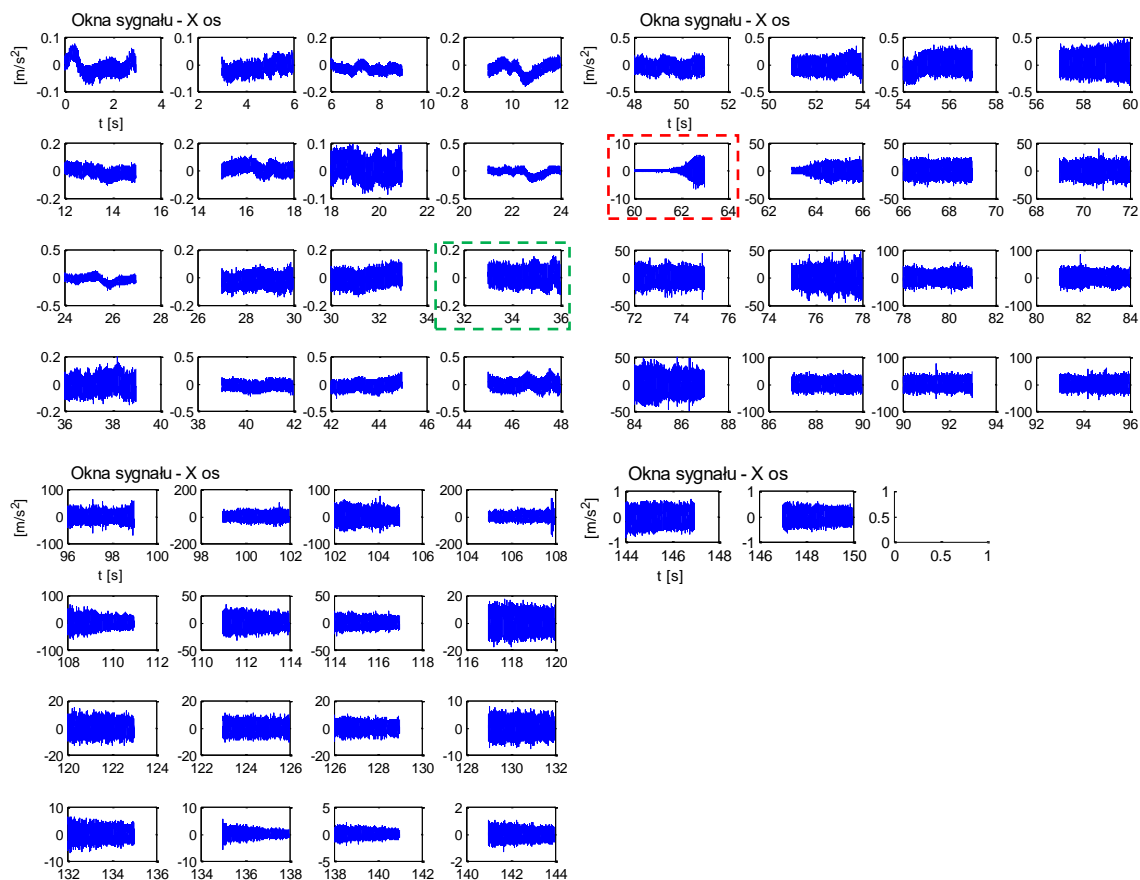
Na podstawie analizy przyrostów wartości estymatorów w kolejnych oknach sygnału zarejestrowanego przed najechnaniem pociągu na punkt, w którym rejestrowano przyspieszenia drgań potwierdzono skuteczność detekcji zbliżającego się pociągu towarowego z 18 wagonami.

## 9.2. Wyniki działania metody dla pociągu towarowego z 28 wagonami

Analogicznie jak w poprzednim przypadku na wykresach od 113 do 121 przedstawiono rezultaty działania opracowanego algorytmu detekcji, w ujęciu „krok po kroku”, zaczynając od „okienkowania sygnału” i kończąc na rozkładach wartości estymatorów drgań w kolejnych oknach analizy.

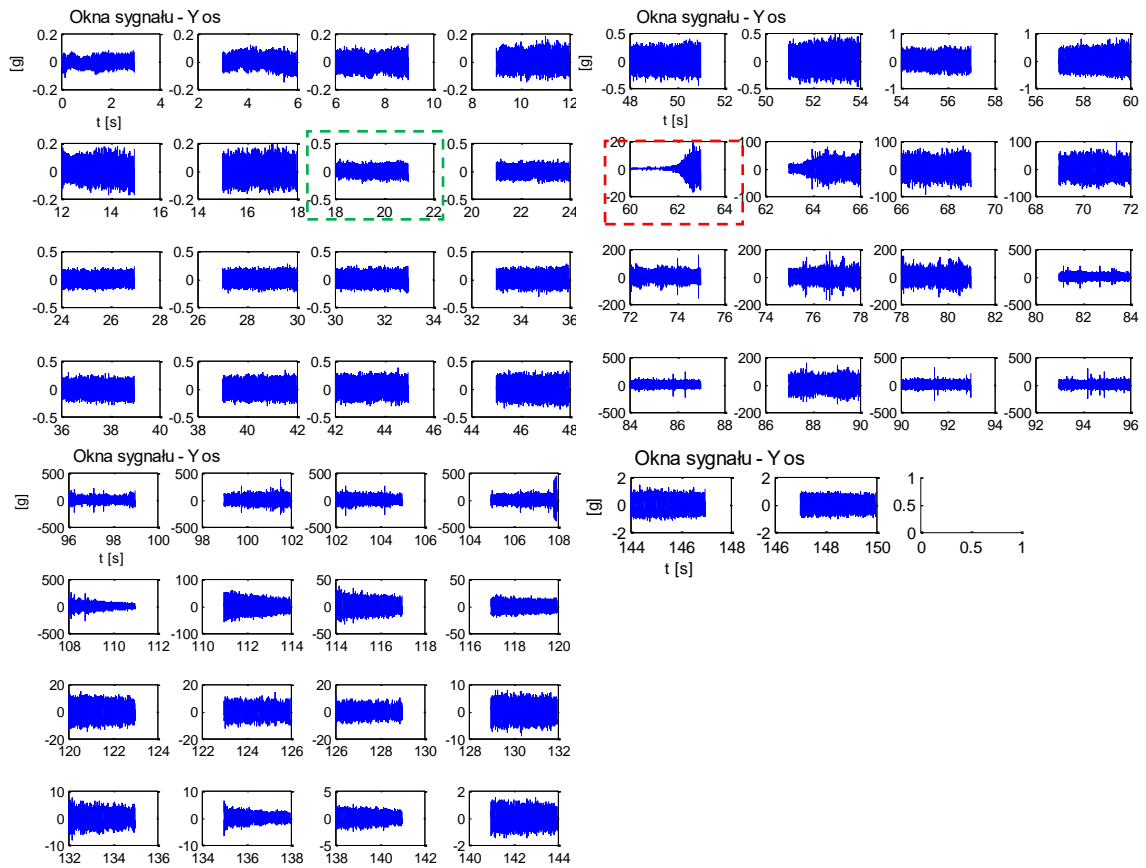


Rys. 113 Przebieg drgań oraz widmo zarejestrowane w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg towarowy – 28 wagonów, prędkość 37-40 km/h.

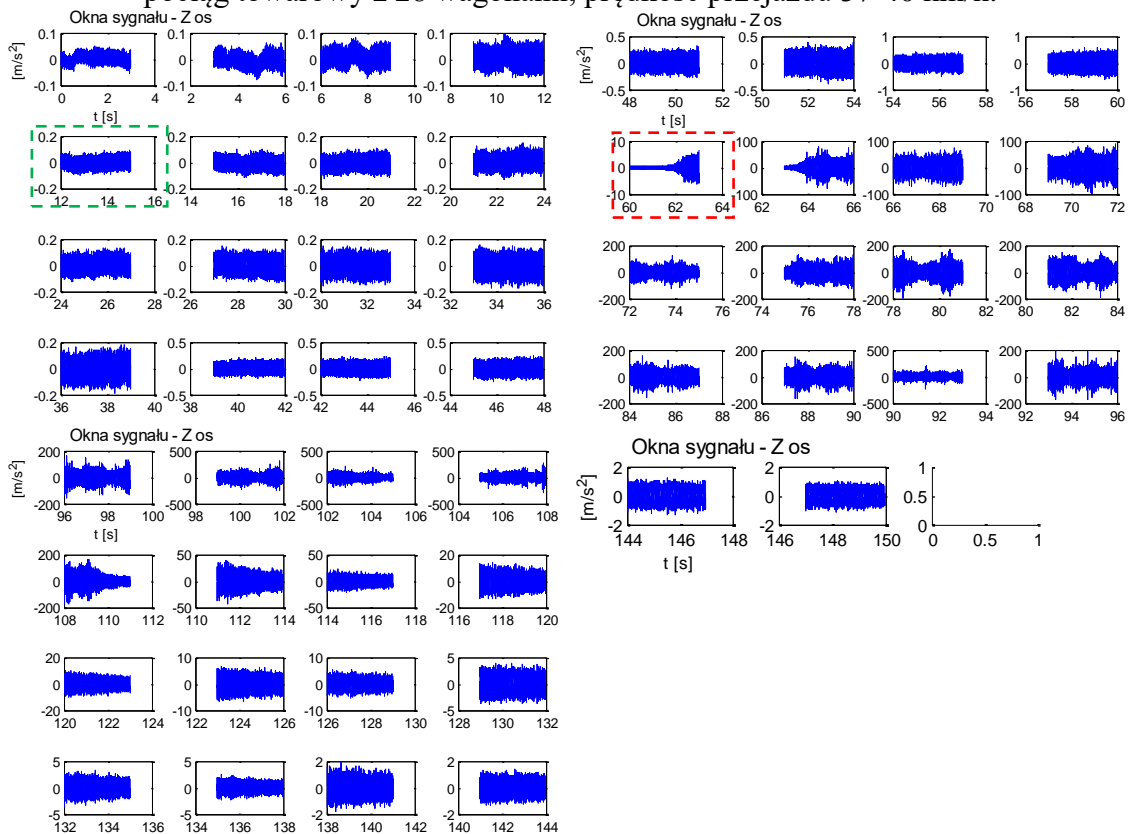


Rys. 114 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś X), dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.

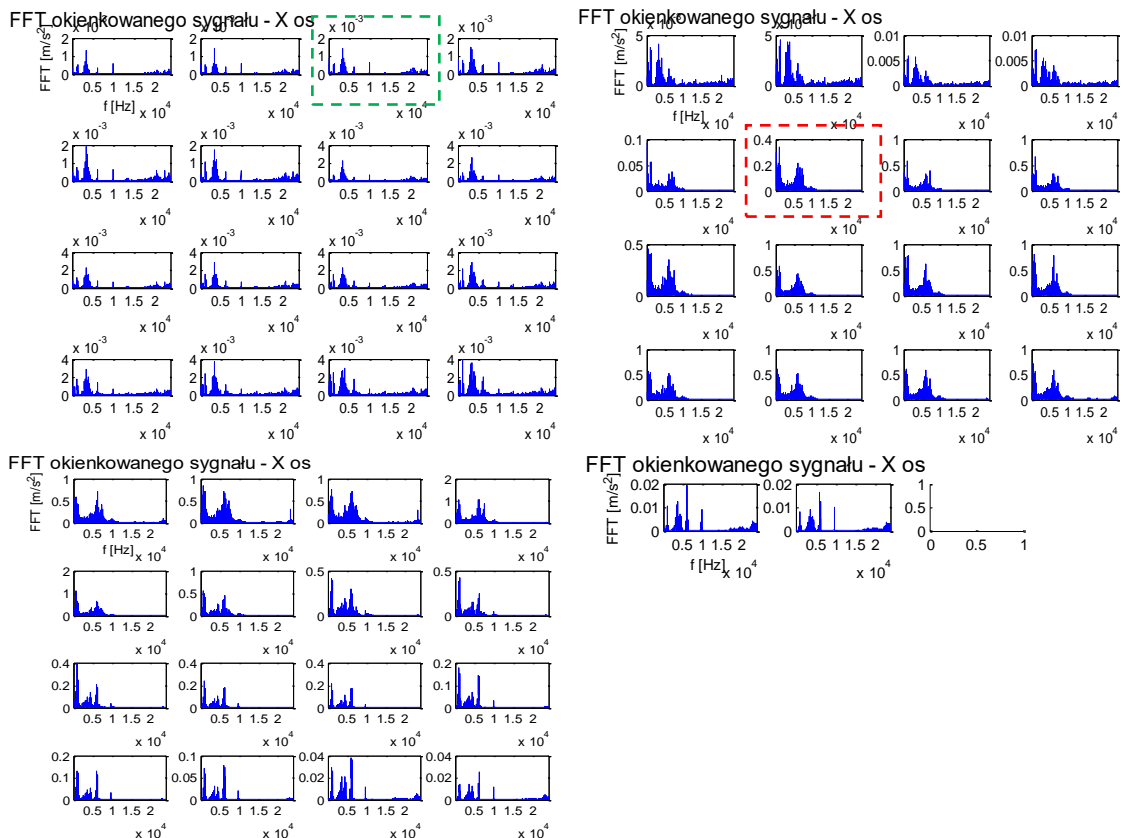




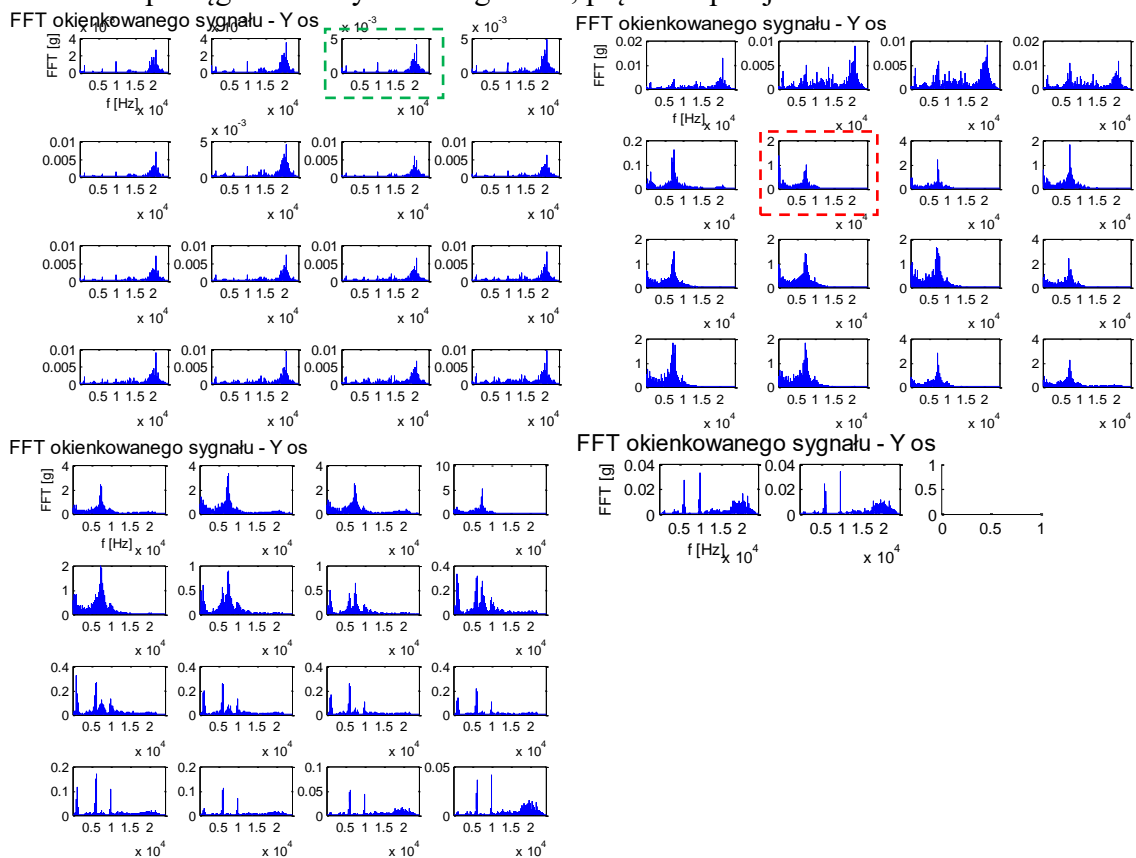
Rys. 115 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś Y), dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.



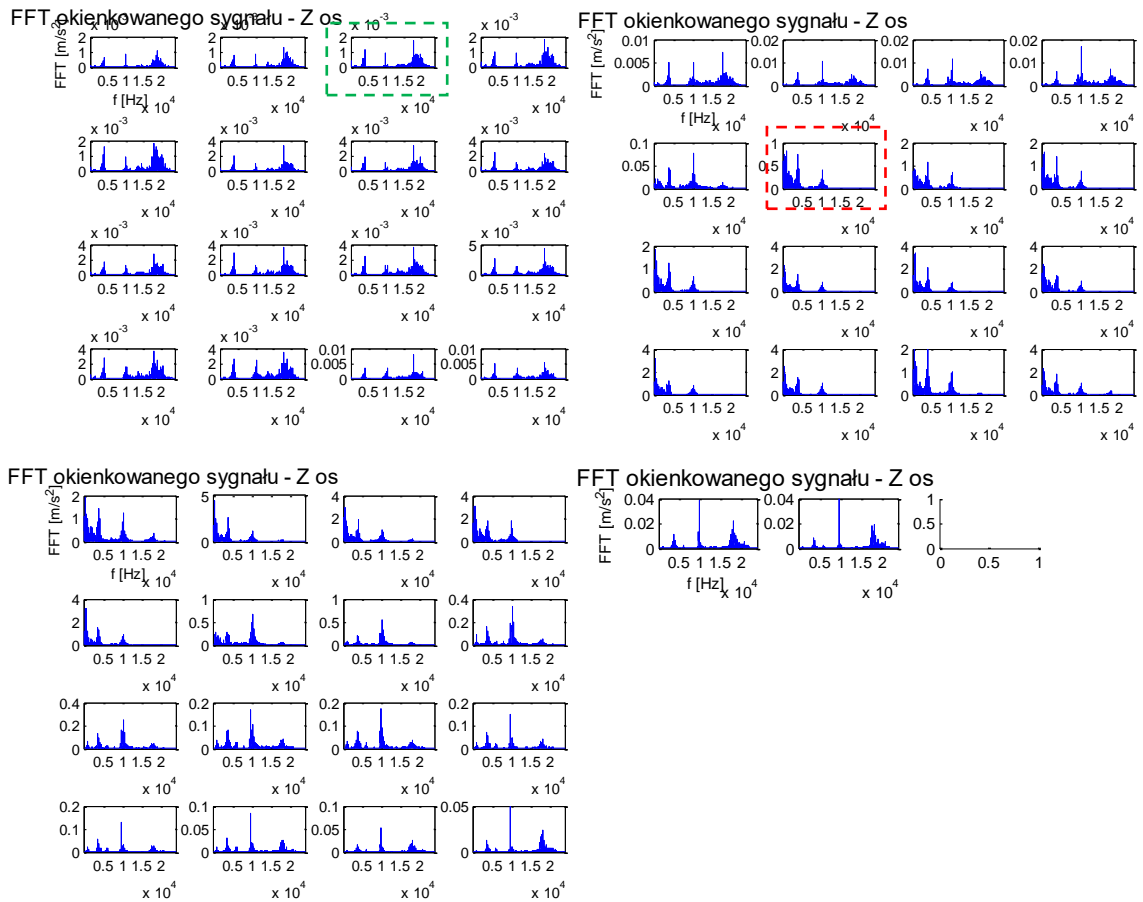
Rys. 116 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś Z), dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.



Rys. 117 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś X), dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.

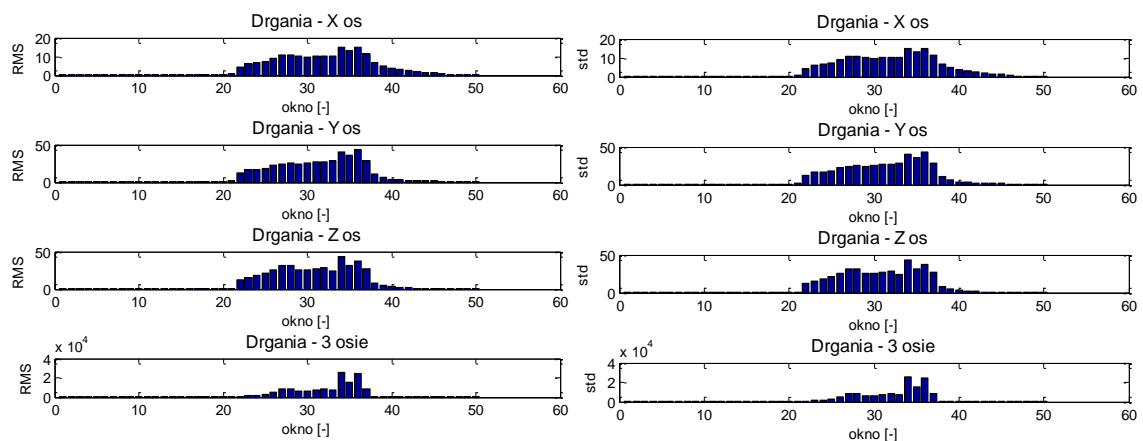


Rys. 118 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś Y), dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.

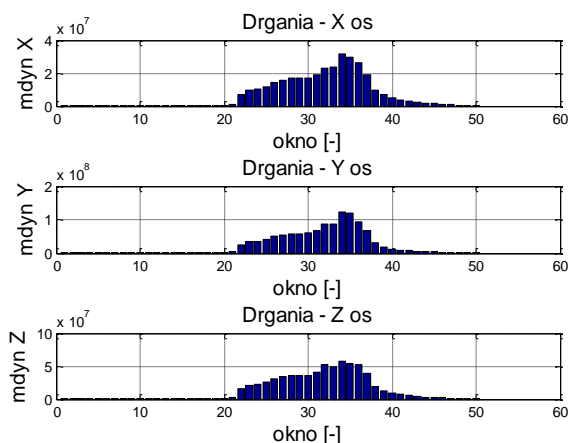


Rys. 119 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś Z), dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.

Rozkłady wartości estymatorów detekcji w kolejnych oknach analizy przedstawiono w formie wykresów słupkowych poniżej.

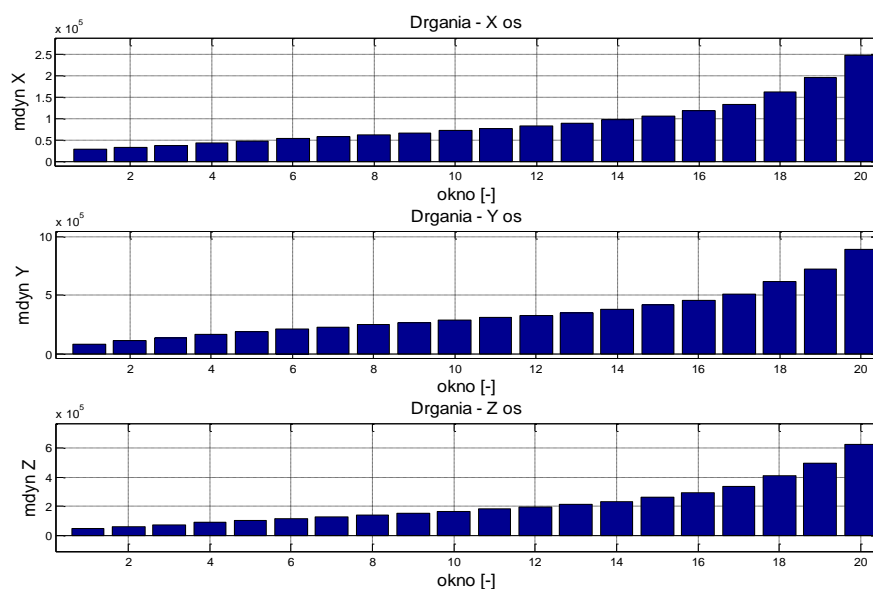


Rys. 120 Rozkład wartości skutecznej oraz rozkład wartości odchylenia standardowego drgań zarejestrowanych w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.



Rys. 121 Rozkład wartości miar dynamicznych (mdyn) dla kolejnych okien sygnału dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.

W celu uwypuklenia skali przyrostów wybranych estymatorów powiększono wykresy dla okien analizy zarejestrowanych przed najazdem pociągu na punkt lokalizacji czujnika pomiarowego. W przedstawionym przypadku najazd (oś pierwszego wózka jezdnego w koincydencji z punktem mocowania czujnika drgań) nastąpił w 63 sekundzie, czyli 21 oknie analizy (3-sekundowym). Przykładowe wykresy dla miary dynamiki (mdyn) przedstawiono na rysunku 122.

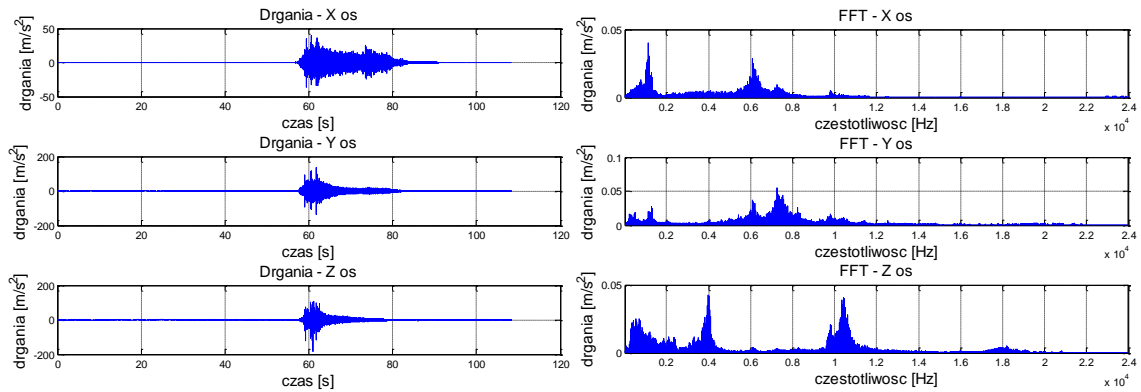


Rys. 122 Powiększone okna analizy estymatorów miar dynamicznych (mdyn) drgań w osiach X, Y i Z (okna 1-20) zarejestrowane przed najazdem pociągu (okno 21).

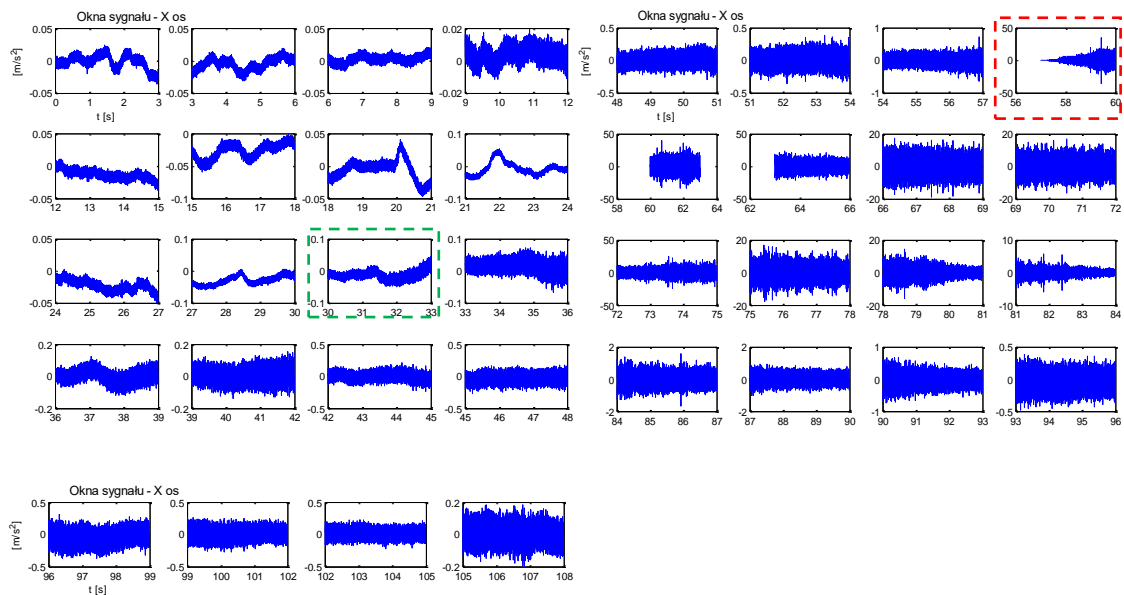
Ponownie na podstawie analizy przyrostów wartości estymatorów w kolejnych oknach sygnału zarejestrowanego przed najejchaniem pociągu na punkt, w którym rejestrowano przyśpieszenia drgań potwierdzono skuteczność detekcji zbliżającego się pociągu towarowego z 28 wagonami.

### 9.3. Wyniki działania metody dla pociągu osobowego ELF-2

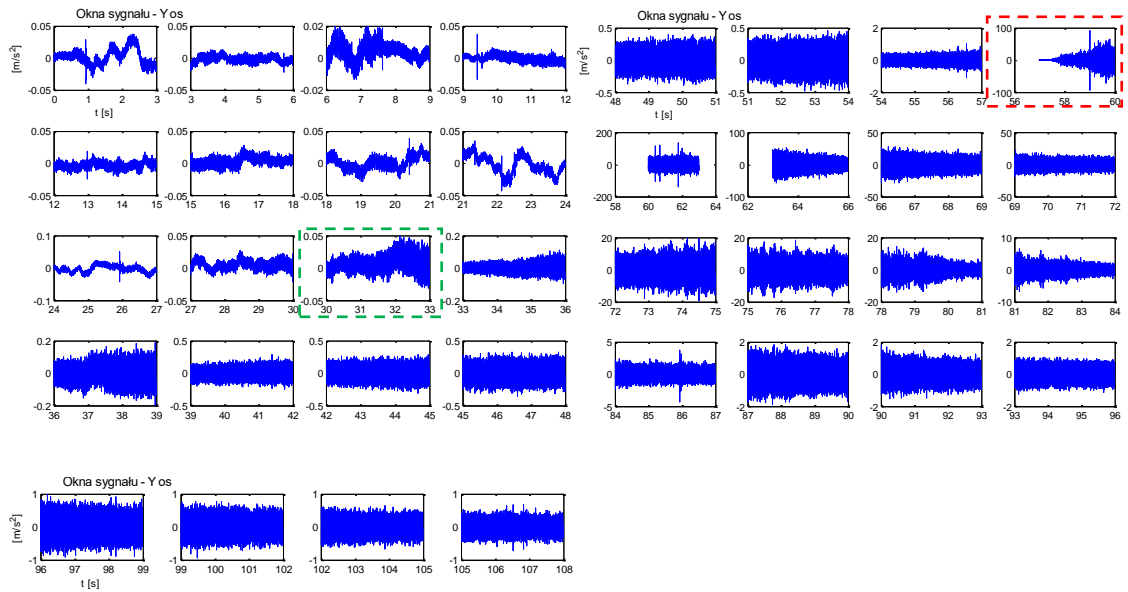
Analogicznie jak w poprzednim przypadku na wykresach (rys. 123-132) przedstawiono w formie wykresów rezultaty działania opracowanego algorytmu detekcji.



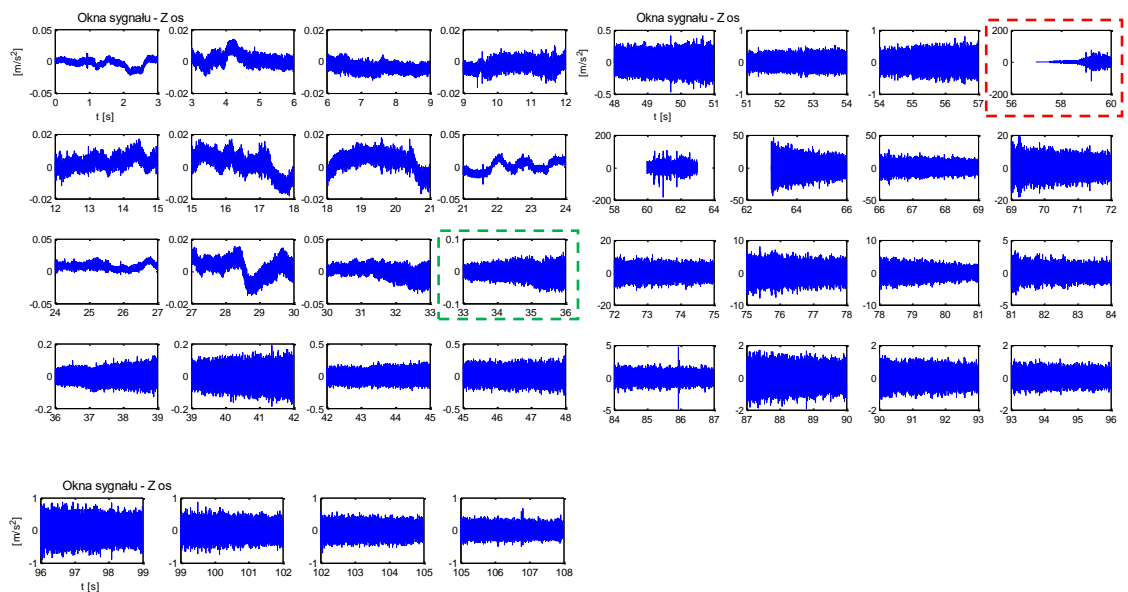
Rys. 123 Przebieg drgań oraz widmo zarejestrowane w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.



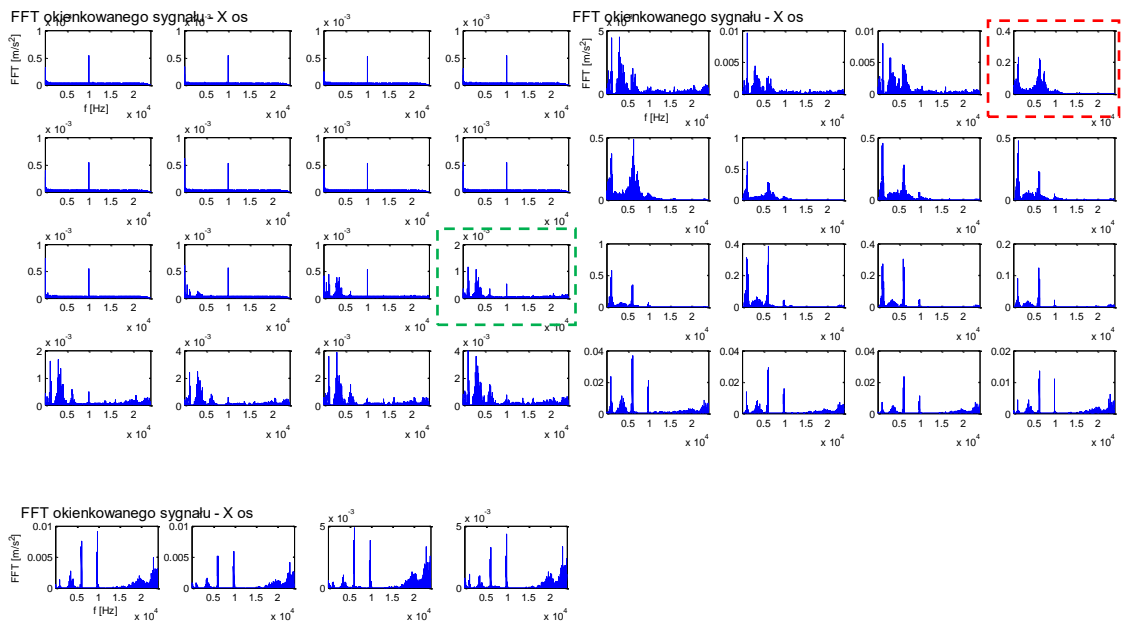
Rys. 124 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś X), dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.



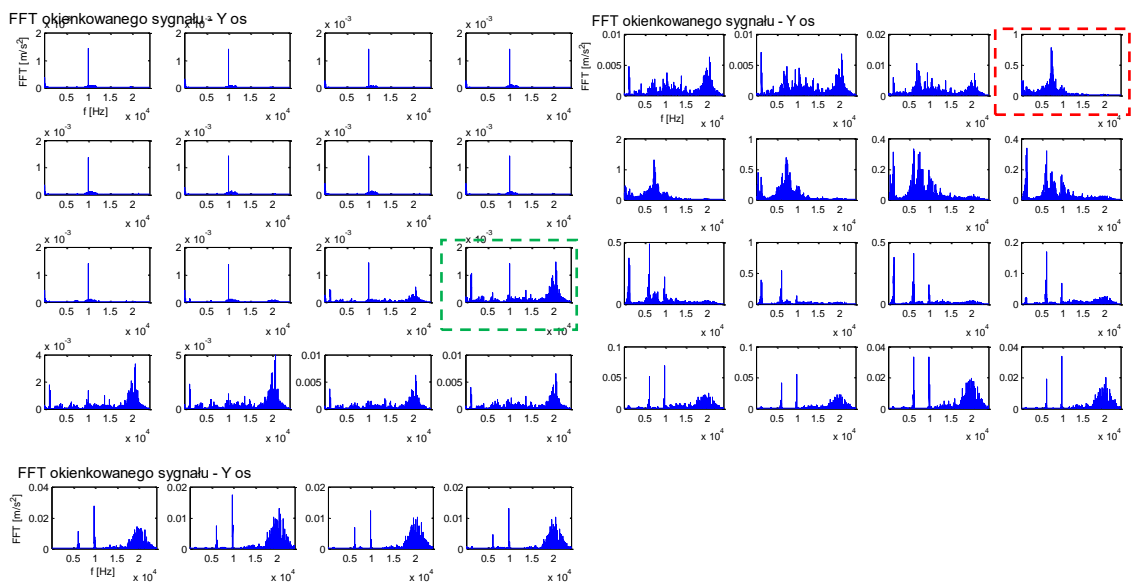
Rys. 125 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś Y), dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.



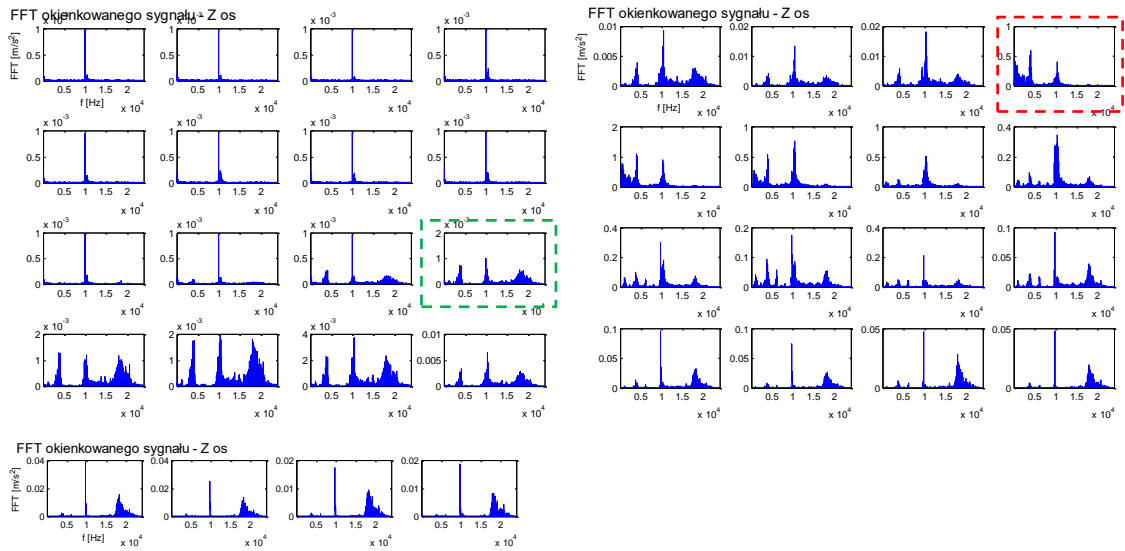
Rys. 126 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś Z), dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.



Rys. 127 Widma w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś X), dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.

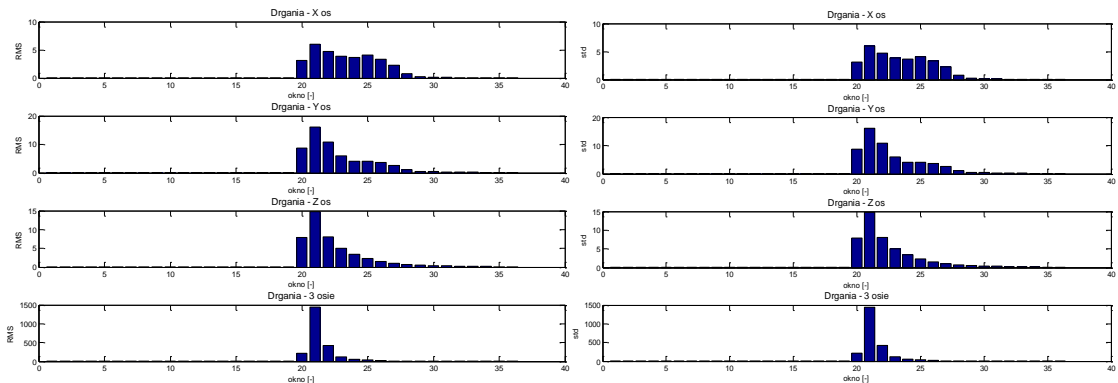


Rys. 128 Widma w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś Y), dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.

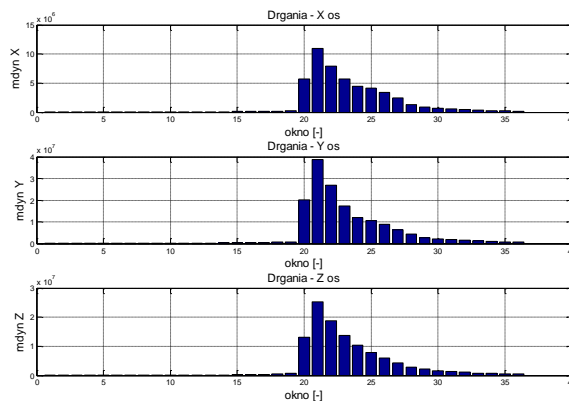


Rys. 129 Widma w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś Z), dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.

Rozkłady wartości estymatorów detekcji w kolejnych oknach analizy przedstawiono w formie wykresów słupkowych na rys 130 oraz 131.



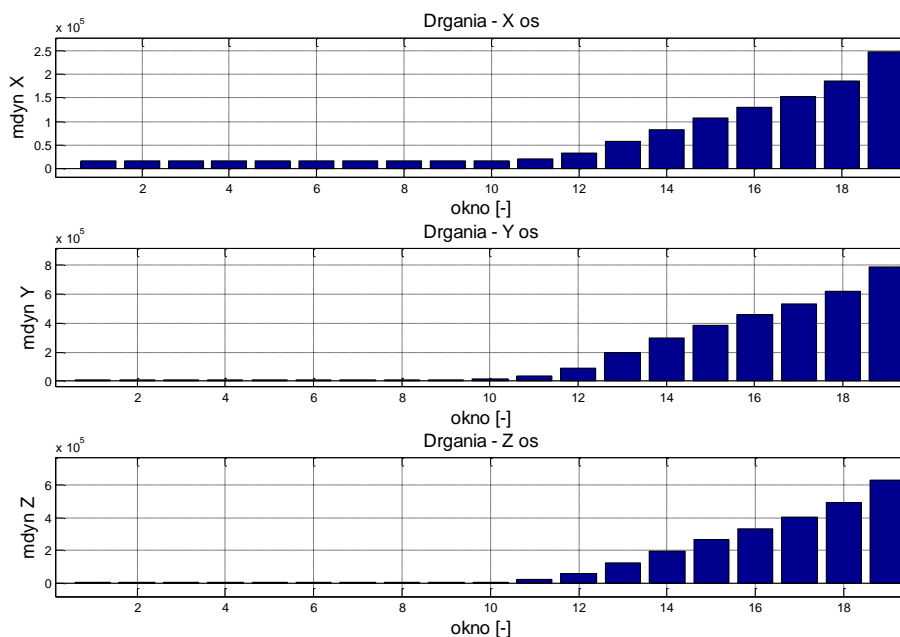
Rys. 130 Rozkład wartości skutecznej oraz rozkład wartości odchylenia standardowego drgań zarejestrowanych w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.



Rys. 131 Rozkład wartości miar dynamicznych (mdyn) dla kolejnych okien sygnału dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.



W celu uwypuklenia skali przyrostów wybranych estymatorów powiększono wykresy dla okien analizy zarejestrowanych przed najazdem pociągu na punkt lokalizacji czujnika pomiarowego. W przedstawionym przypadku najazd (oś pierwszego wózka jezdnego w koincydencji z punktem mocowania czujnika drgań) nastąpił w 60 sekundzie, czyli 20 oknie analizy (3-sekundowym). Przykładowe wykresy dla miary dynamiki (mdyn) przedstawiono na rysunku 132.



Rys. 132 Wartości estymatorów miar dynamiki (mdyn) drgań w osiach X, Y i Z (okna 1-19) zarejestrowane przed najazdem pociągu (okno 20).

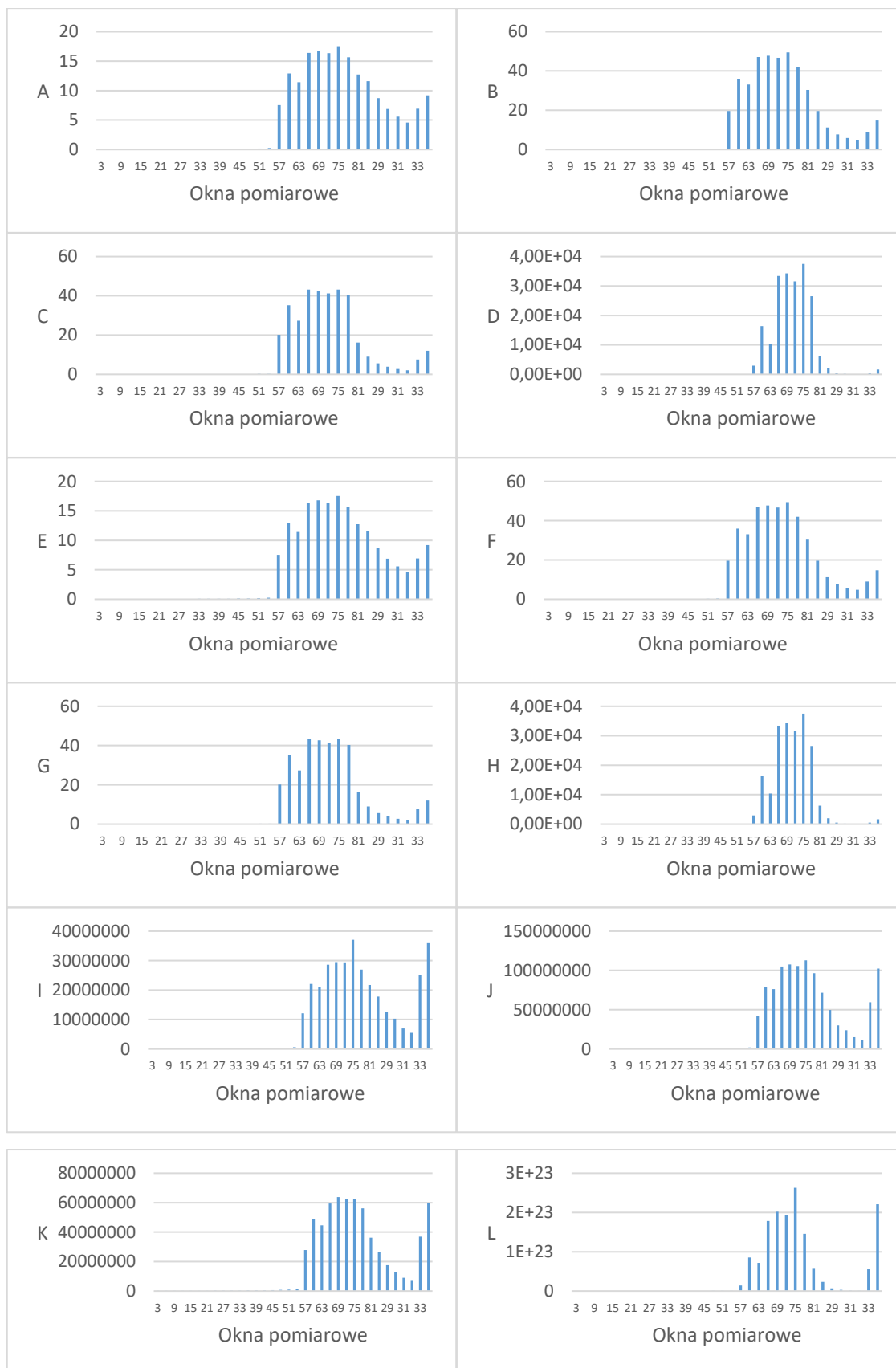
Ponownie na podstawie analizy przyrostów wartości estymatorów w kolejnych oknach sygnału zarejestrowanego przed najechaniem pociągu na punkt, w którym rejestrowano przyśpieszenia drgań potwierdzono skuteczność detekcji zbliżającego się pociągu osobowego ELF-2.

#### 9.4. Zestawienie wartości estymatorów drgań

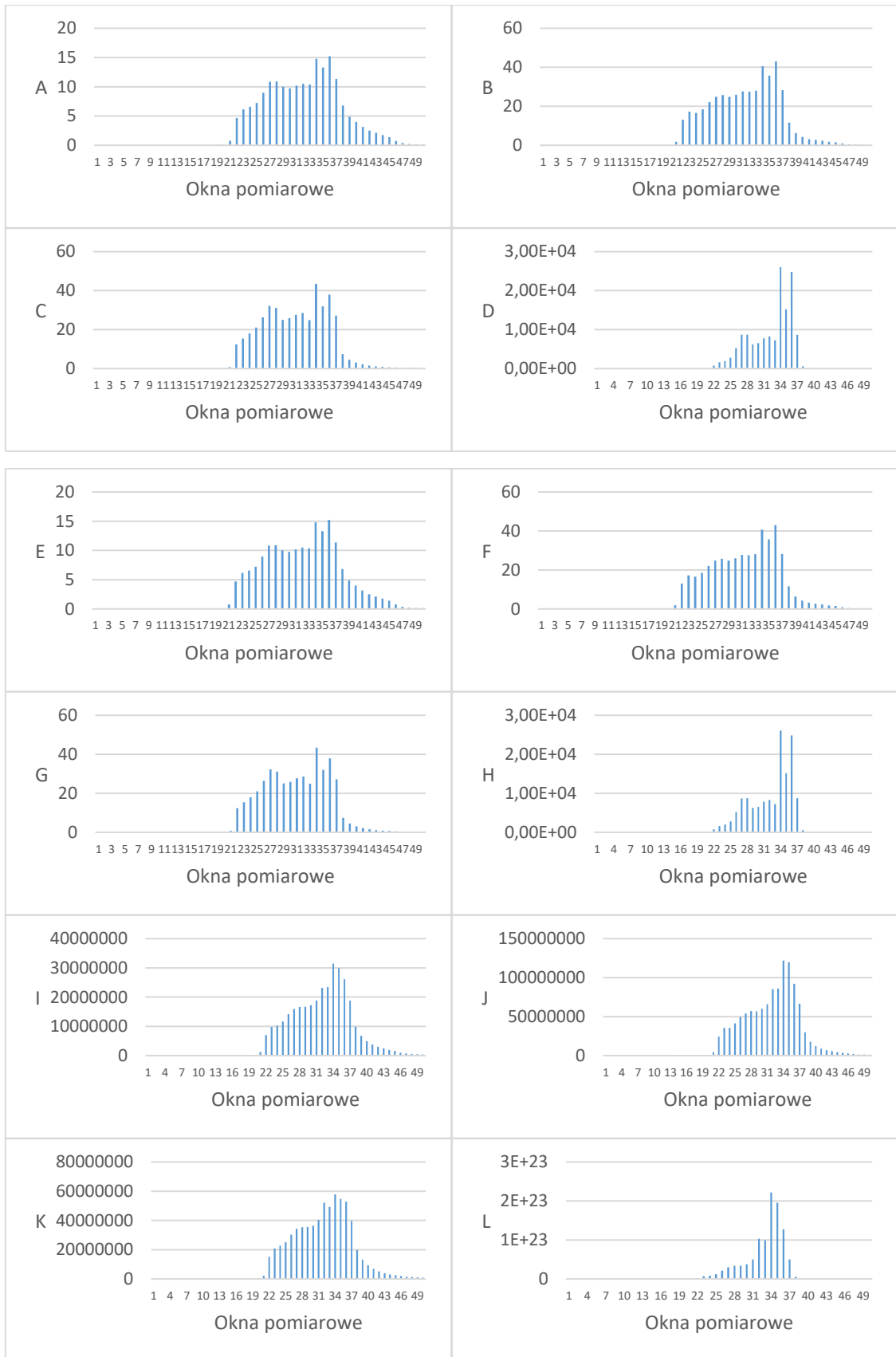
W celu weryfikacji opracowanej metody detekcji przeprowadzono badania w warunkach rzeczywistych, w efekcie których skompletowano obszerny zbiór sygnałów zarejestrowanych podczas przejazdów kilkudziesięciu różnych pojazdów szynowych. W procesie optymalizacji algorytmów obliczeniowych oraz analizy możliwości adaptacji metody do układu sterowania informacją o zbliżającym się pociągu w dalszej części pracowano na zbiorach estymatorów punktowych sygnałów. Uzyskane w wyniku opracowanego algorytmu przetwarzania sygnałów rezultaty jako zbiory wartości

wybranych estymatorów utworzyły obszerną bazę danych. Otrzymane zbiory danych posłużyły dalszym analizą w środowisku Excel. W ten sposób uzyskano bazę danych, która przyspieszyła proces analizy wyników. Przekształcenie, w wyniku opracowanego algorytmu przetwarzania sygnałów drganiowych do zbiorów reprezentacji punktowych estymatorów dla kolejnych okien pomiarowych sygnałów pozwoliło na skrócenie czasu realizacji procesu analizy, oraz ułatwiło oceny przydatności i doboru najlepszych estymatorów detekcji pojazdu szynowego. Pozwoliło to także znacząco skrócić liczbę niezbędnych stron przedstawiających wyniki badań zbiorczych. Przykładowe zestawy estymatorów punktowych przedstawiono na rys. 133-135. Dla poprawy czytelności wykresów zastosowano następujące oznaczenia:

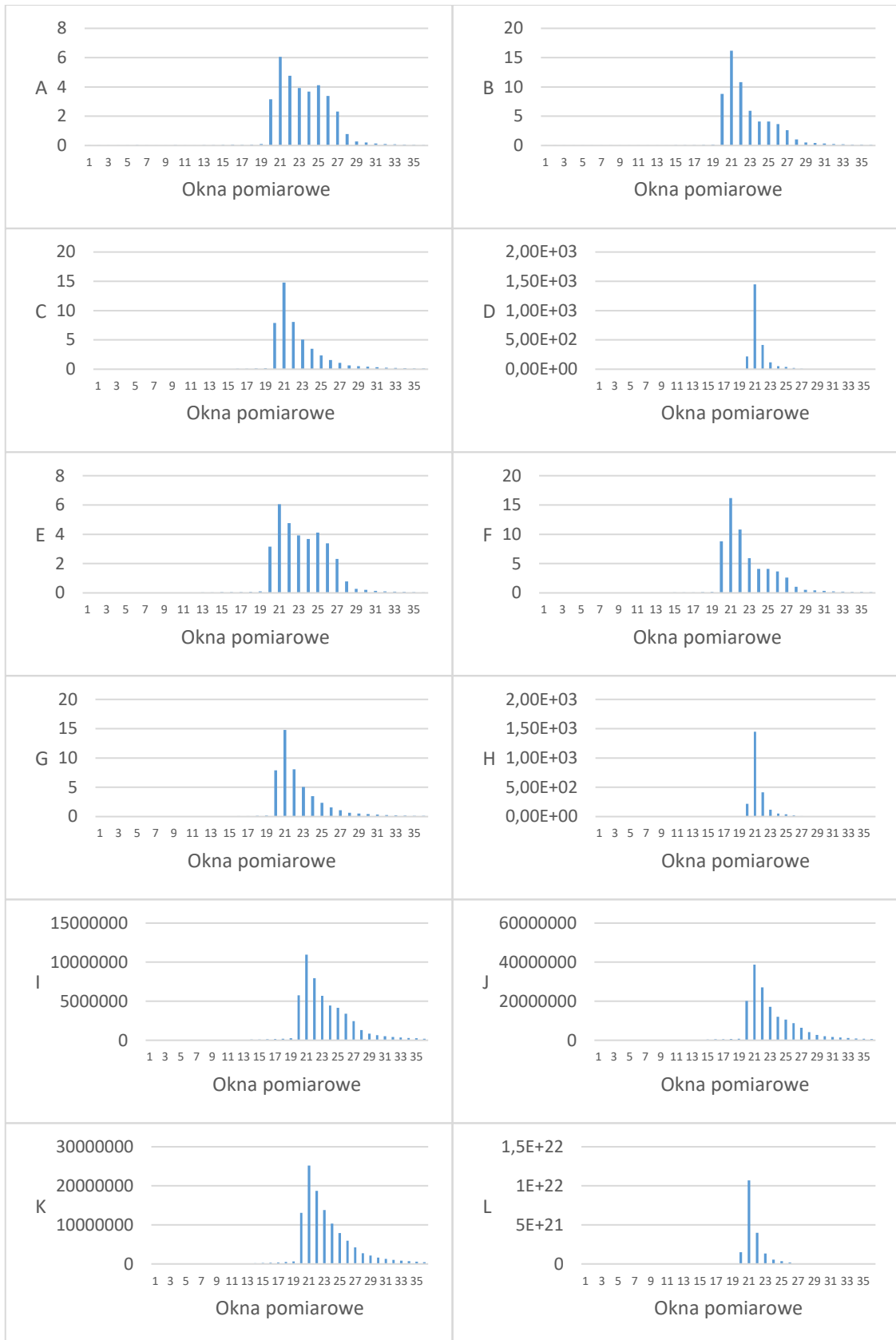
- A – wartość skuteczna drgań w osi x
- B – wartość skuteczna drgań w osi y
- C – wartość skuteczna drgań w osi z
- D – iloczyn wartości skutecznych dla 3 osi
- E – odchylenie standardowe wartości drgań w osi x
- F – odchylenie standardowe wartości drgań w osi y
- G – odchylenie standardowe wartości drgań w osi z
- H – iloczyn wartości odchylenia standardowego dla 3 osi
- I – miara dynamiczna drgań w osi x
- J – miara dynamiczna drgań w osi y
- K – miara dynamiczna drgań w osi z
- L – iloczyn wartości miar dynamicznych drgań dla 3 osi



Rys. 133 Estymatory punktowe drgań zarejestrowanych podczas przejazdu składu: pociąg towarowy z 18 wagonami typu węglarka, prędkość przejazdu - 40 km.



Rys. 134 Estymatory punktowe drgań zarejestrowanych podczas przejazdu składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu – 44km.



Rys. 135 Estymatory punktowe drgań zarejestrowanych podczas przejazdu składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu – 40km.

Pozyskane w ten sposób bazy danych, jako wyniki opracowanego algorytmu przetwarzania sygnałów drganiowych i rozkładów wartości estymatorów punktowych w kolejnych oknach obserwacji, dla wszystkich wyników badań i kilkudziesięciu zarejestrowanych przejazdów pociągów umożliwiły prowadzenie dalszych analiz w celu oceny potencjału aplikacyjnego uzyskanych miar jako systemu predykcji zbliżającego się pojazdu szynowego.

### 9.5. Wyznaczanie czasów i odległości detekcji pojazdu szynowego

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczano czas predykcji, jako iloczyn liczby okien detekcji wyznaczonych na podstawie opracowanego algorytmu oraz czas trwania pojedynczego okna (3 sekundy). Liczba okien detekcji wyznaczana było jako różnica pomiędzy numerem okna detekcji a oknem, w którym pojazd szynowy znajdował się nad czujnikiem drgań. Czas predykcji wyliczano na podstawie zależności:

$$t_p = l_{od} \cdot t_j \quad (9.1)$$

, gdzie:

$t_p$  – czas predykcji,

$t_j$  – czas okna jednostkowego (postępującego),

$l_{od}$  – liczba okien detekcji wyznaczana z zależności:

$$l_{od} = O_{max} - O_p \quad (9.2)$$

, gdzie:

$O_{max}$  – numer okna najazdu pierwszej osi na punkt lokalizacji czujnika,

$O_p$  – numer okna pierwszej detekcji zbliżającego się pociągu, zgodnie z przyjętym algorytmem.

W ujęciu aplikacyjnym wyznaczanie czasu predykcji zbliżającego się pojazdu szynowego polegało na obliczeniu różnicy pomiędzy czasem, w którym pociąg znajdował się nad czujnikiem (maksymalne wartości drgań) a czasem, w którym znormalizowana miara drgań zgodnie z przyjętym algorytmem wskazała informację o zbliżającym się pojeździe szynowym (w algorytmie do celów bezpieczeństwa przyjęto trzecie kolejne okno wzrostu wartości określonego estymatora).

Wstępne badania z wykorzystaniem impulsowego znacznika położenia pociągu wykazały, że największe wartości przyśpieszeń drgań rejestrowane są na szynie jeszcze

przed przejazdem nad czujnikiem, jednak z uwagi na brak takiego znacznika podczas badań losowych przejazdów spowodował, że przyjęto jako znacznik okno z wartościami maksymalnymi, co jest uzasadnione ze względów bezpieczeństwa potencjalnego systemu detekcji, ponieważ wydłuża rzeczywisty czas predykcji. Przyjmując takie założenie należy domniemywać, że rzeczywisty czas predykcji (a co za tym idzie odległość detekcji) jest jeszcze większy.

Charakter tego zjawiska może wynikać z faktu iż czujnik drgań zamontowany na szynie rejestruje większe drgania jeszcze przed bezpośrednim przejazdem pojazdu z uwagi na brak dociążenia masą składu kolejowego. W tych warunkach przyspieszenia drgań szyny mogą być większe ponieważ w chwili przejazdu bezpośrednio nad czujnikiem masa pojazdu szynowego powoduje chwilowe dociążenie układu drgającego i chwilowo zwiększa wartość tłumienia drgań.

Tabele zawierające wartości estymatorów w kolejnych oknach dla badanych przejazdów pojazdów szynowych posłużyły do śledzenia przyrostów wartości w kolejnych oknach. W wyniku tego identyfikowano okna predykcji oraz najazdu pojazdu szynowego na miejsce lokalizacji czujnika oraz wyznaczano liczbę okien detekcji i czas predykcji. W efekcie uzyskano informację o najlepszym czasie predykcji i odległości detekcji. W przyjętym algorytmie identyfikacyjnym przyjęto monitorowanie także chwilowych spadków wartości estymatora oraz oznaczono maksymalne okno detekcji pojazdu  $O_{max}$  oraz okno predykcji  $O_p$  liczone jako:

- pierwsze okno po wykryciu pojazdu oraz dodatkowo,
- 3 okno z wartościami narastającymi.

W ten sposób porównywano wartości dla kolejnych estymatorów detekcji. Podejście takie umożliwia poszerzoną analizę przydatności danego estymatora, w ujęciu bezpieczeństwa i niezawodności działania w prototypie systemu detekcji pojazdu szynowego, uwzględniając praktyczne zastosowanie systemu.

Dodatkowo w tabeli 5 zawarte zostały informacje o czasie detekcji pociągów, odległości do miejsca detekcji, liczbie okien predykcji oraz liczbie okien do przejazdu nad czujnikiem pomiarowym.

Tabela 5 Wyniki analizy dla przykładowo wybranych 5 pociągów.

Pociąg/(nr pociągu)	towarowy – 18 węglarek, 40 km/h (nr 15)					towarowy – 28 wagonów, 37:40 km/h (nr 4)					towarowy – 42 wagony typu EOS, 2 lokomotywy EV07 (nr 6)					towarowy – cysterny, 44 km/h (nr 14)					towarowy – 40 wagonów, 36:37 km/h (nr 3)				
Maksymalny czas detekcji w "s"	Czas [s]	Odległość [m]	Suma okien ze spadkami wartości detekcji pociągu [-]	Op [-]	Omax [-]	Czas [s]	Odległość [m]	Suma okien ze spadkami wartości detekcji pociągu [-]	Op [-]	Omax [-]	Czas [s]	Odległość [m]	Suma okien ze spadkami wartości detekcji pociągu [-]	Op [-]	Omax [-]	Czas [s]	Odległość [m]	Suma okien ze spadkami wartości detekcji pociągu [-]	Op [-]	Omax [-]	Czas [s]	Odległość [m]	Suma okien ze spadkami wartości detekcji pociągu [-]	Op [-]	Omax [-]
w/ skuteczna osx	45	500	2	10	25	24	257	1	14	22	27	300	0	15	24	36	440	1	10	22	24	243	2	18	26
w/ skuteczna osy	51	567	2	8	25	57	610	0	3	22	63	700	2	3	24	33	403	0	11	22	6	61	0	24	26
w/ skuteczna osz	66	733	4	3	25	57	610	0	3	22	36	400	0	12	24	33	403	0	11	22	0	0	0	26	26
w/ skuteczna 3osie	66	733	3	3	25	24	257	0	14	22	63	700	2	3	24	39	477	0	9	22	39	395	3	13	26
odch std osx	51	567	2	8	25	21	225	0	15	22	63	700	4	3	24	36	440	0	10	22	30	304	0	16	26
odch std osy	66	733	3	3	25	57	610	0	3	22	45	500	0	9	24	36	440	0	10	22	12	122	1	22	26
odch std osz	51	567	3	8	25	57	610	0	3	22	42	467	0	10	24	36	440	0	10	22	12	122	1	22	26
odch std 3osie	51	567	2	8	25	27	289	0	13	22	42	467	0	10	24	36	440	0	10	22	15	152	1	21	26
miara dynamiczna x	54	600	2	7	25	57	610	0	3	22	48	533	0	8	24	39	477	0	9	22	60	608	0	6	26
miara dynamiczna y	54	600	2	7	25	57	610	0	3	22	48	533	0	8	24	33	403	0	11	22	57	578	1	7	26
miara dynamiczna z	57	633	2	6	25	57	610	0	3	22	48	533	0	8	24	39	477	0	9	22	57	578	1	7	26
miara dynamiczna 3osie	54	600	2	7	25	57	610	0	3	22	48	533	0	8	24	39	477	0	9	22	57	578	1	7	26
	<b>55,5</b>	<b>617</b>				<b>46</b>	<b>492</b>				<b>47,8</b>	<b>531</b>				<b>36,3</b>	<b>443</b>				<b>30,75</b>	<b>312</b>			



Na podstawie wcześniejszych wniosków do analizy wybrano 3 estymatory drgań:

1. Wartości skuteczne
2. Odchylenie standardowe
3. Miary dynamiczne

W kolejnym kroku wyznaczono wartości zbiorcze w celu analizy porównawczej pomiędzy analizowanymi estymatorami. Wyniki przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6 Zbiorcze wartości analizy porównawczej wybranych estymatorów.

<b>Estymator / analizowany parametr</b>	<b>Średni czas detekcji [s]</b>	<b>Maksymalny czas detekcji [s]</b>	<b>Średnia odległość detekcji [m]</b>	<b>Maksymalna odległość detekcji [m]</b>
<b>wartość skuteczna oś x</b>	<b>31</b>	45	<b>348</b>	500
<b>wartość skuteczna oś y</b>	<b>42</b>	63	<b>468</b>	700
<b>wartość skuteczna oś z</b>	<b>38</b>	66	<b>429</b>	733
<b>wartość skuteczna 3 osie</b>	<b>46</b>	66	<b>512</b>	733
<b>odchylenie std oś x</b>	<b>40</b>	63	<b>447</b>	700
<b>odchylenie std oś y</b>	<b>43</b>	66	<b>481</b>	733
<b>odchylenie std oś z</b>	<b>40</b>	57	<b>441</b>	610
<b>odchylenie std 3 osie</b>	<b>34</b>	51	<b>383</b>	567
<b>miara dynamiczna x</b>	<b>52</b>	60	<b>566</b>	610
<b>miara dynamiczna y</b>	<b>50</b>	57	<b>545</b>	610
<b>miara dynamiczna z</b>	<b>52</b>	57	<b>566</b>	633
<b>miara dynamiczna 3 osie</b>	<b>51</b>	57	<b>560</b>	610

Parametr wskazujący na największą odległość detekcji pojazdu szynowego to wartość skuteczna oraz odchylenie standardowe. Poddając analizie dane z kilkudziesięciu zarejestrowanych przejazdów pojazdów szynowych największą odległość detekcji wykazują obliczenia oparte o wartość skuteczną. Obliczenia należy jednak przyjmować nie tyle dla zarejestrowanej pojedynczej maksymalnej odległości detekcji a do wartości średnich detekcji. W takim przypadku znacznie korzystniejsze wyniki uzyskano z wykorzystaniem miar dynamicznych. Ma szczególne znaczenie w przypadku zastosowania metody w systemach identyfikacji zbliżającego się pociągu. Czas ten bezpośrednio wpływa na długość ostrzegania o zbliżającym się pociągu, co stanowi istotny element ostrzegania osób i pojazdów przejeżdżających przez przejazd kolejowy. Przyjąć należy zatem, ze względów bezpieczeństwa, parametr miary dynamicznej jako główny, informujący o zbliżaniu się pojazdu szynowego do skrzyżowania z droga publiczną.

## 9.6. Analiza statystyczna uzyskanych miar detekcji

Zarejestrowane podczas badań w środowisku rzeczywistym sygnały drgań poddano kompleksowej analizie zgodnie z opracowaną metodą. W celu oceny uzyskanych wyników przeprowadzono analizy statystyczne. Wyniki ogólne, bez podziału na determinanty, przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7 Zestawienie wyników analizy statystycznej miar detekcji pojazdów szynowych w warunkach rzeczywistych w miejscowościach Opole, Chełm Śląski oraz Imielin.

	Średni czas detekcji	Maksymalny czas detekcji	Minimalny czas detekcji	Odchylenie standardowe	Średnia odległość detekcji	Maksymalna odległość detekcji	Minimalna odległość detekcji	Odchylenie standardowe	Mediana
w/ skuteczna os x	40	90	6	20,56	483	1627	78	299,54	39,00
w/ skuteczna os y	42	93	9	22,13	509	1517	107	307,27	36,00
w/ skuteczna os z	42	93	9	22,38	503	1421	107	287,02	42,00
w/ skuteczna 3osie	44	99	6	23,65	539	1705	75	329,07	36,00
Odch. Std. os x	36	87	9	19,21	426	963	78	206,54	33,00
Odch. Std. Os y	42	105	9	24,67	504	1808	78	329,59	36,00
Odch. Std. Os z	44	99	9	20,18	533	1377	107	284,73	42,00
Odch. Std. 3osie	43	99	9	20,35	560	2450	107	418,85	39,00
miara dynamiczna x	45	84	9	21,24	528	1188	133	258,59	48,00
miara dynamiczna y	46	108	9	23,74	551	1650	107	304,08	45,00
miara dynamiczna z	48	108	6	26,03	608	1867	78	432,58	48,00
miara dynamiczna 3osie	49	108	6	24,97	619	1650	52	392,33	54,00

W celu bardziej dogłębnej analizy wyników przeprowadzono grupowanie w zależności od przyjętych determinantów emisji drgań, analizując wpływ na wartości wyznaczanych estymatorów. Jako determinanty określono prędkość poruszania się pojazdów szynowych, ich ciężar oraz warunków atmosferycznych pomiaru. Zdecydowano się rejestrować temperaturę podczas badań z uwagi na potencjalny wpływ temperatury na właściwości propagacji fali drganiowej w strukturze szyny.

Do celów analizy przyjęto podział na następujące przedziały prędkości:

- 5÷20 km/h,
- 21÷ 40 km/h
- 41÷60 km/h,
- 61÷100 km/h,
- powyżej 101 km/h.

Podział na powyższe przedziały wynika z dopuszczalnych i najczęściej występujących prędkości poruszania się pojazdu szynowego na przejazdach kategorii D.

W trakcie badań prędkości rejestrowano za pomocą radaru mikrofalowego MFDR-8. Wszystkie badane pojazdy szynowe pogrupowano według przyjętych przedziałów prędkości. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabelach 8 do 12.

Tabela 8 Zestawienie zarejestrowanych danych pojazdów szynowych poruszających się w przedziale prędkości od 5 do 20 km/h.

	5-20 km/h								
	Średni czas detekcji	Maksymalny czas detekcji	Minimalny czas detekcji	Odchylenie standardowe	Średnia odległość detekcji	Maksymalna odległość detekcji	Minimalna odległość detekcji	Odchylenie standardowe	Mediana
w/ skuteczna os x	48	54	39	7,94	267	300	217	44,10	51,00
w/ skuteczna os y	53	87	36	29,44	294	483	200	163,58	36,00
w/ skuteczna os z	57	63	54	5,20	317	350	300	28,87	54,00
w/ skuteczna 3osie	63	87	51	20,78	350	483	283	115,47	51,00
Odch. Std. os x	45	87	24	36,37	250	483	133	202,07	24,00
Odch. Std. Os y	48	72	36	20,78	267	400	200	115,47	36,00
Odch. Std. Os z	57	69	51	10,39	317	383	283	57,74	51,00
Odch. Std. 3osie	47	69	36	19,05	261	383	200	105,85	36,00
miara dynamiczna x	67	75	63	6,93	372	417	350	38,49	63,00
miara dynamiczna y	67	75	63	6,93	372	417	350	38,49	63,00
miara dynamiczna z	67	75	63	6,93	372	417	350	38,49	63,00
miara dynamiczna 3osie	67	75	63	6,93	372	417	350	38,49	63,00

Tabela 9 Zestawienie zarejestrowanych danych pojazdów szynowych poruszających się w przedziale prędkości od 21 do 40 km/h.

	21-40 km/h								
	Średni czas detekcji	Maksymalny czas detekcji	Minimalny czas detekcji	Odchylenie standardowe	Średnia odległość detekcji	Maksymalna odległość detekcji	Minimalna odległość detekcji	Odchylenie standardowe	Mediana czasu
w/ skuteczna os x	47	90	9	22,15	453	833	78	210,77	51,00
w/ skuteczna os y	50	81	12	20,89	479	802	107	205,17	54,00
w/ skuteczna os z	46	81	12	23,24	444	833	107	226,90	48,00
w/ skuteczna 3osie	48	81	9	22,76	464	833	78	219,62	54,00
Odch. Std. os x	45	69	9	16,87	436	667	78	178,60	48,00
Odch. Std. Os y	49	99	9	23,92	474	833	78	229,67	48,00
Odch. Std. Os z	49	99	12	21,22	474	825	107	204,70	54,00
Odch. Std. 3osie	49	99	12	21,08	471	825	107	198,16	51,00
miara dynamiczna x	51	84	15	19,04	496	802	133	199,69	57,00
miara dynamiczna y	52	105	12	23,14	496	875	107	217,81	54,00
miara dynamiczna z	51	105	9	25,08	488	875	78	235,06	54,00
miara dynamiczna 3osie	52	105	6	25,18	503	875	52	239,93	54,00

Tabela 10 Zestawienie zarejestrowanych danych pojazdów szynowych poruszających się w przedziale prędkości od 41 do 60 km/h.

	41-60 km/h								
	Średni czas detekcji	Maksymalny czas detekcji	Minimalny czas detekcji	Odchylenie standardowe	Średnia odległość detekcji	Maksymalna odległość detekcji	Minimalna odległość detekcji	Odchylenie standardowe	Mediana
w/ skuteczna os x	30	63	9	15,11	412	963	105	216,58	30,00
w/ skuteczna os y	32	93	9	20,34	435	1421	113	310,80	25,50
w/ skuteczna os z	40	93	9	23,16	538	1421	113	326,43	34,50
w/ skuteczna 3osie	35	90	6	21,00	479	1375	75	306,72	31,50
Odch. Std. os x	30	63	9	14,65	402	963	138	205,60	25,50
Odch. Std. Os y	33	84	9	17,84	454	1283	138	271,54	31,50
Odch. Std. Os z	38	84	9	18,52	506	1283	138	269,83	36,00
Odch. Std. 3osie	35	84	15	16,96	474	1283	246	264,52	31,50
miara dynamiczna x	38	72	12	19,60	508	1100	150	258,50	37,50
miara dynamiczna y	42	108	9	24,67	573	1650	113	362,42	39,00
miara dynamiczna z	42	108	6	26,96	570	1650	92	399,80	40,50
miara dynamiczna 3osie	42	108	9	26,24	568	1650	113	377,11	39,00

Tabela 11 Zestawienie zarejestrowanych danych pojazdów szynowych poruszających się w przedziale prędkości od 61 do 100 km/h.

	61 -100 km/h								
	Średni czas detekcji	Maksymalny czas detekcji	Minimalny czas detekcji	Odchylenie standardowe	Średnia odległość detekcji	Maksymalna odległość detekcji	Minimalna odległość detekcji	Odchylenie standardowe	Mediana
w/ skuteczna os x	51	66	42	13,08	909	1192	723	248,68	45,00
w/ skuteczna os y	50	60	42	9,17	886	1033	758	138,53	48,00
w/ skuteczna os z	45	48	42	3,00	800	867	758	58,33	45,00
w/ skuteczna 3osie	63	99	42	31,32	1110	1705	758	518,12	48,00
Odch. Std. os x	31	45	15	15,10	551	813	271	271,27	33,00
Odch. Std. Os y	71	105	45	30,79	1253	1808	813	507,83	63,00
Odch. Std. Os z	49	63	39	12,49	874	1138	672	238,91	45,00
Odch. Std. 3osie	56	63	45	9,64	994	1138	813	165,95	60,00
miara dynamiczna x	53	69	42	14,18	938	1188	758	223,65	48,00
miara dynamiczna y	49	57	45	6,93	872	1029	775	137,21	45,00
miara dynamiczna z	68	102	45	30,05	1199	1757	813	494,58	57,00
miara dynamiczna 3osie	65	93	45	24,98	1148	1602	813	407,73	57,00

Tabela 12 Zestawienie zarejestrowanych danych pojazdów szynowych poruszających się z prędkością powyżej 101 km/h.

	Powyżej 101 km/h								
	Średni czas detekcji	Maksymalny czas detekcji	Minimalny czas detekcji	Odchylenie standardowe	Średnia odległość detekcji	Maksymalna odległość detekcji	Minimalna odległość detekcji	Odchylenie standardowe	Mediana
w/ skuteczna os x	20	48	6	19,19	715	1627	197	643,57	13,50
w/ skuteczna os y	22	39	9	13,94	789	1517	305	544,03	19,50
w/ skuteczna os z	16	33	9	11,59	580	1283	305	470,44	10,50
w/ skuteczna 3osie	23	30	9	9,60	822	1050	338	330,95	27,00
Odch. Std. os x	14	24	9	7,14	496	933	295	300,14	10,50
Odch. Std. Os y	12	21	9	6,00	439	817	295	252,74	9,00
Odch. Std. Os z	23	42	9	14,57	818	1377	338	480,52	21,00
Odch. Std. 3osie	32	63	9	26,20	1180	2450	295	1007,98	28,50
miara dynamiczna x	15	30	9	10,10	554	1167	295	414,43	10,50
miara dynamiczna y	17	36	9	12,58	634	1400	338	511,30	12,00
miara dynamiczna z	29	48	6	21,96	1053	1867	225	814,83	31,50
miara dynamiczna 3osie	32	48	12	15,00	1136	1627	393	536,07	33,00

W tabeli 13 przedstawiono zestawienie porównawcze w zależności od prędkości pojazdu szynowego.

Tabela 13 Podsumowanie wyznaczonych czasów i odległości detekcji w 5 przedziałach prędkości.

	Podsumowanie									
	Średni czas detekcji					Średnia odległość detekcji				
	5-20km/h	21-40km/h	41-60km/h	61 -100 km/h	Powyżej 101 km/h	5-20km/h	21-40km/h	41-60km/h	61 -100 km/h	Powyżej 101 km/h
w/ skuteczna os x	48	47	30	51	20	267	453	412	909	715
w/ skuteczna os y	53	50	32	50	22	294	479	435	886	789
w/ skuteczna os z	57	46	40	45	16	317	444	538	800	580
w/ skuteczna 3osie	63	48	35	63	23	350	464	479	1110	822
Odch. Std. os x	45	45	30	31	14	250	436	402	551	496
Odch. Std. Os y	48	49	33	71	12	267	474	454	1253	439
Odch. Std. Os z	57	49	38	49	23	317	474	506	874	818
Odch. Std. 3osie	47	49	35	56	32	261	471	474	994	1180
miara dynamiczna x	67	51	38	53	15	372	496	508	938	554
miara dynamiczna y	67	52	42	49	17	372	496	573	872	634
miara dynamiczna z	67	51	42	68	29	372	488	570	1199	1053
miara dynamiczna 3osie	67	52	42	65	32	372	503	568	1148	1136

W celu analizy wpływu ciężaru poruszającego się składu na uzyskiwane wartości czasu i odległości detekcji pogrupowano badane pojazdy na cztery kategorie wagowe:

- lekkie do 500 t,
- przedział 501÷1000 t,
- przedział 1001÷2000 t,
- bardzo ciężkie powyżej 2000 t.

Uzyskane wyniki przedstawiono w tabelach 14 i 15.

Tabela 14 Zestawienie zarejestrowanych czasów oraz odległości detekcji pojazdów szynowych w podziale na cztery kategorie wagowe.

	Lekkie składy pociągów o masie do 500 t.		Składy pociągów o masie od 501 do 1000 t.		Ciężkie składy pociągów o masie od 1001 do 2000 t.		Bardzo ciężkie składy pociągów o masie ponad 2000 t.	
	Średni czas detekcji	Średnia odległość detekcji	Średni czas detekcji	Średnia odległość detekcji	Średni czas detekcji	Średnia odległość detekcji	Średni czas detekcji	Średnia odległość detekcji
w/ skuteczna os x	33	484	30	364	55	497	51	590
w/ skuteczna os y	35	506	42	503	55	488	65	810
w/ skuteczna os z	34	482	60	718	57	501	74	860
w/ skuteczna 3osie	36	530	53	628	55	489	71	829
Odch. Std. os x	31	415	38	452	44	407	44	548
Odch. Std. Os y	35	489	44	522	58	533	60	742
Odch. Std. Os z	36	525	51	609	59	532	68	783
Odch. Std. 3osie	37	577	44	522	58	523	60	742
miara dynamiczna x	36	507	59	698	57	506	68	725
miara dynamiczna y	36	518	56	661	61	530	86	1000
miara dynamiczna z	39	605	59	698	60	525	86	1000
miara dynamiczna 3osie	41	624	59	698	59	518	86	1000

Tabela 15 Zestawienie obliczonego odchylenia oraz mediany dla zarejestrowanych czasów detekcji pojazdów szynowych w podziale na cztery kategorie wagowe.

	Lekkie składy pociągów o masie do 500 t.		Składy pociągów o masie od 501 do 1000 t.		Ciężkie składy pociągów o masie od 1001 do 2000 t.		Bardzo ciężkie składy pociągów o masie ponad 2000 t.	
	Odchylenie	Mediana	Odchylenie	Mediana	Odchylenie	Mediana	Odchylenie	Mediana
w/ skuteczna os x	16	33	21	30	23	60	12	51
w/ skuteczna os y	16	33	6	42	23	60	29	65
w/ skuteczna os z	15	33	6	60	26	72	20	74
w/ skuteczna 3osie	18	32	2	53	27	72	20	71
Odch. Std. os x	16	27	14	38	18	48	20	44
Odch. Std. Os y	21	30	8	44	26	66	24	60
Odch. Std. Os z	16	38	0	51	20	54	17	68
Odch. Std. 3osie	17	36	8	44	21	54	24	60
miara dynamiczna x	17	38	5	59	21	63	5	68
miara dynamiczna y	16	39	8	56	27	63	23	86
miara dynamiczna z	21	42	5	59	30	66	23	86
miara dynamiczna 3osie	19	41	5	59	30	63	23	86

Dodatkowo przeprowadzono analizę wpływu temperatury atmosferycznej na wartości czasów i odległości detekcji. Pomiary prowadzono dla trzech rodzajów warunków atmosferycznych: temperatury letnie, temperatury zimowe i temperatury wiosenno-jesienne. Wyniki przedstawiono w tabelach 16 i 17.

Tabela 16 Zestawienie zarejestrowanych czasów oraz odległości detekcji pojazdów szynowych poruszających w warunkach rzeczywistych dla trzech rodzajów warunków atmosferycznych.

	Warunki letnie - temp. 24-28°C		Warunki zimowe - temp. -5°C		Warunki wiosenno/jesienne - temp. 10-20°C	
	Średni czas detekcji	Średnia odległość detekcji	Średni czas detekcji	Średnia odległość detekcji	Średni czas detekcji	Średnia odległość detekcji
w/ skuteczna oś x	46	460	44	572	26	368
w/ skuteczna oś y	48	481	45	583	29	542
w/ skuteczna oś z	50	503	45	583	27	477
w/ skuteczna 3osie	51	506	45	574	32	552
Odch. Std. oś x	45	448	35	447	24	388
Odch. Std. oś y	48	483	52	663	27	451
Odch. Std. oś z	50	503	52	663	28	510
Odch. Std. 3osie	47	475	52	663	32	573
miara dynamiczna x	55	557	43	553	29	500
miara dynamiczna y	55	553	51	655	29	509
miara dynamiczna z	56	572	51	655	33	584
miara dynamiczna 3osie	57	571	51	655	35	627

Tabela 17 Zestawienie obliczonego odchylenia oraz mediany dla zarejestrowanych czasów detekcji pojazdów szynowych poruszających w warunkach rzeczywistych dla trzech rodzajów warunków atmosferycznych.

	Warunki letnie - temp. 24-28°C		Warunki zimowe - temp. -5°C		Warunki wiosenno/jesienne - temp. 10-20°C	
	Odchylenie	Mediana	Odchylenie	Mediana	Odchylenie	Mediana
w/ skuteczna oś x	16	51	26	45	14	24
w/ skuteczna oś y	18	42	29	42	16	24
w/ skuteczna oś z	17	54	29	42	16	24
w/ skuteczna 3osie	17	51	29	42	24	27
Odch. Std. oś x	17	45	18	30	14	24
Odch. Std. oś y	16	42	28	45	26	21
Odch. Std. oś z	13	51	28	45	13	30
Odch. Std. 3osie	14	42	28	45	18	27
miara dynamiczna x	13	57	24	42	19	24
miara dynamiczna y	13	54	35	45	16	24
miara dynamiczna z	13	57	35	45	27	24
miara dynamiczna 3osie	13	60	35	45	24	30

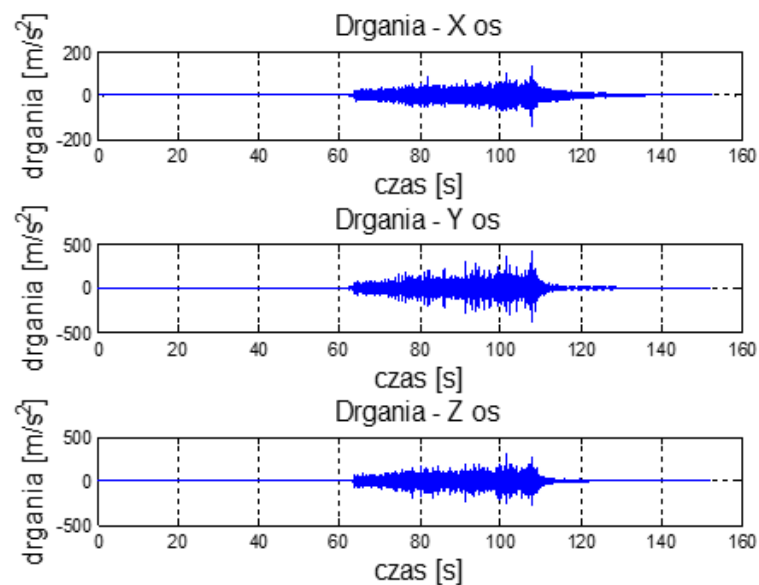
Na podstawie wyników analizy statystycznej należy stwierdzić, że rozkłady średnich wartości czasów i odległości detekcji są skupione, co potwierdza porównanie wartości średniej i mediany. Jednak wartości odchylenia standardowego wskazują na dosyć duży rozrzut wartości, co potwierdza także rozstęp pomiędzy wartościami maksymalnymi i minimalnymi. Jednak analizując wartość mediany pomimo tego faktu wyniki należy uznać za zadowalające.

Dodatkowe analizy wpływu prędkości i ciężaru składu kolejowego oraz temperatury atmosferycznej wykazały zależności wzajemne. Co potwierdza zasadność określenia ich jako determinant w opracowanym systemie detekcji. Szczególnie wyraźnie wpływ ten jest widoczny dla czasów detekcji. W przypadku analizy porównawczej odległości detekcji stwierdzono mniejszy wpływ analizowanych czynników na wyniki końcowe.

## ROZDZIAŁ 10 - KONCEPCJA SYSTEMU PREDYKCJI DRGANIOWEJ ZBLIŻAJĄCEGO SIĘ POJAZDU SZYNOWEGO

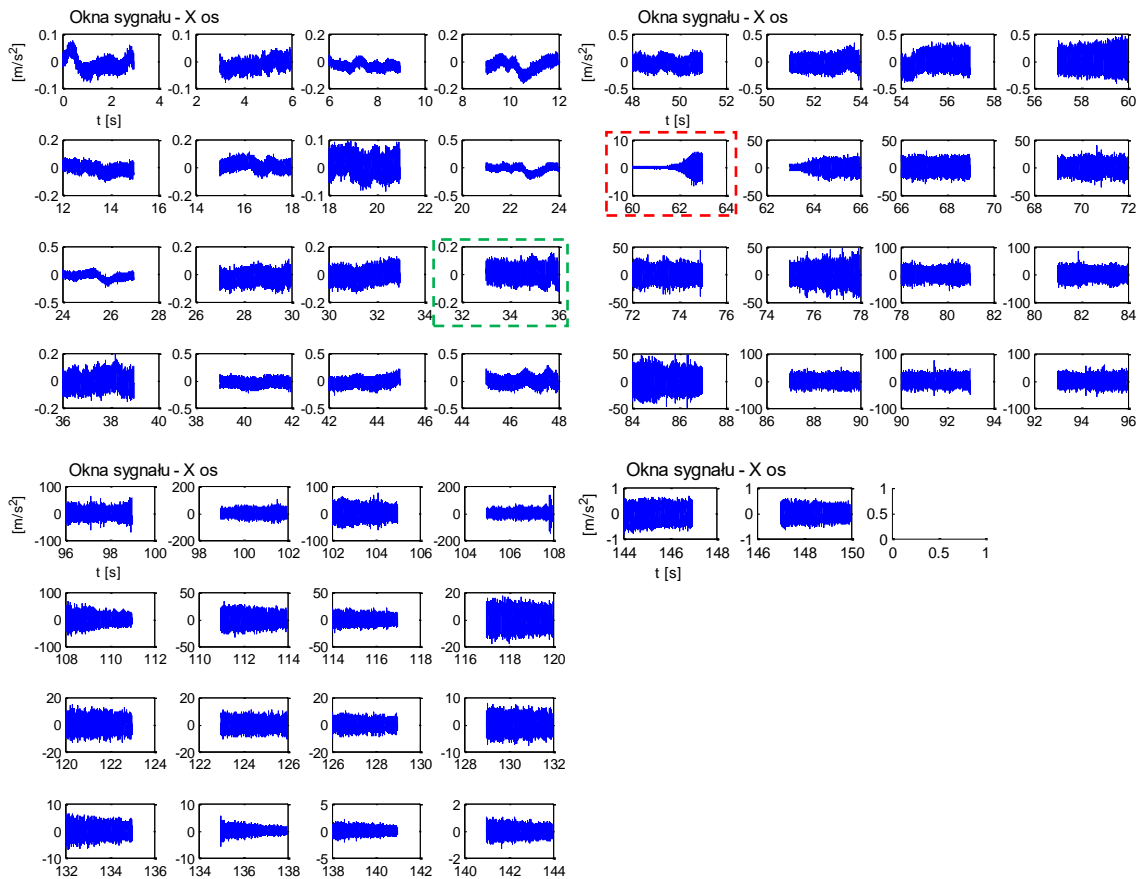
Zgodnie z założeniami badań, po pozytywnej weryfikacji metody detekcji (predykcji), przeprowadzono normalizację miar drganiowych. Wynika to z założenia funkcjonalności tej metody w systemie sterowania informacją o detekcji zbliżającego się pojazdu szynowego. W tym celu przeprowadzono normalizację do zbioru wartości  $\{0,1\}$ . Założenie to wynika z dostosowania symulacji do działania systemów prostej logiki decyzyjnej pracujących jako układy automatycznego sterowania.

Normalizacja polegała na przypisaniu wartości  $\{0\}$  wszystkim wartościom miar drganiowych w oknach analizy, które nie wykazały wzrostu w stosunku do poprzedniego okna oraz wartości  $\{1\}$  wszystkim wartościom miar drganiowych w oknach analizy, które wykazały wzrost zarejestrowanych wartości w stosunku do poprzedniego okna analizy. Ponownie symulację działania prowadzono na przebiegach przyśpieszeń drgań w trzech ortogonalnych osiach (rysunek 136), które w pierwszym kroku dzielono na kolejne okna o długości 3 sekund (rysunek 137).



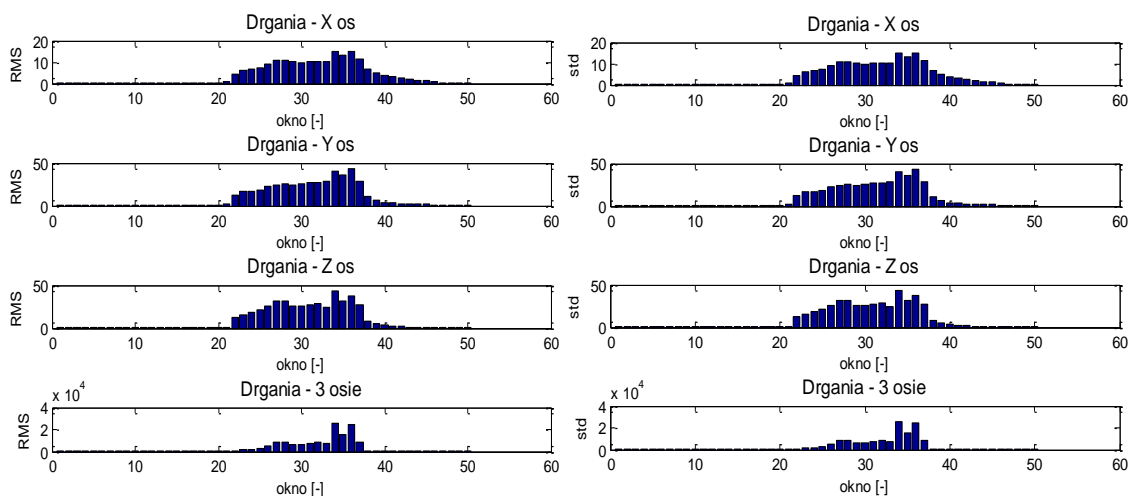
Rys. 136 Przebieg drgań zarejestrowanych w 3 prostopadłych osiach przed, w trakcie i po przejeździe składu kolejowego.



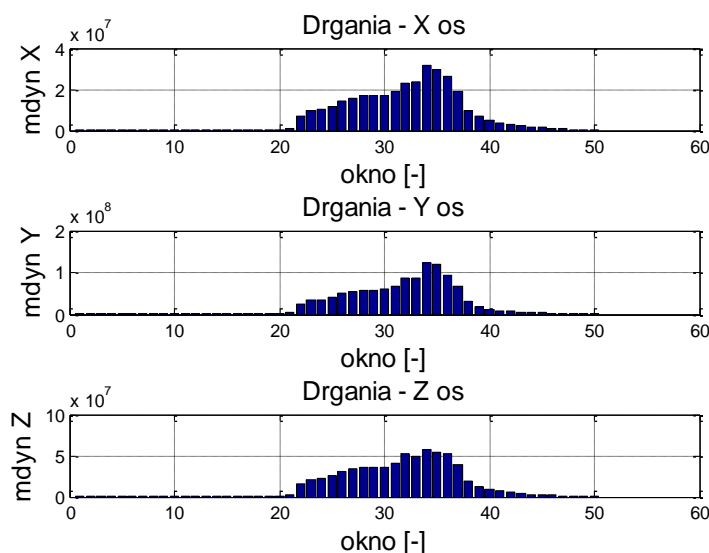


Rys. 137 Przebieg drgań w kolejnych 3-sekundowych oknach analizy (przykładowe drgania dla osi X)

Następnie zaimplementowano opracowany algorytm detekcji pojazdu szynowego, w wyniku którego otrzymano szeregi wartości wybranych estymatorów sygnału w kolejnych oknach analizy (rysunki 138a i 138b).



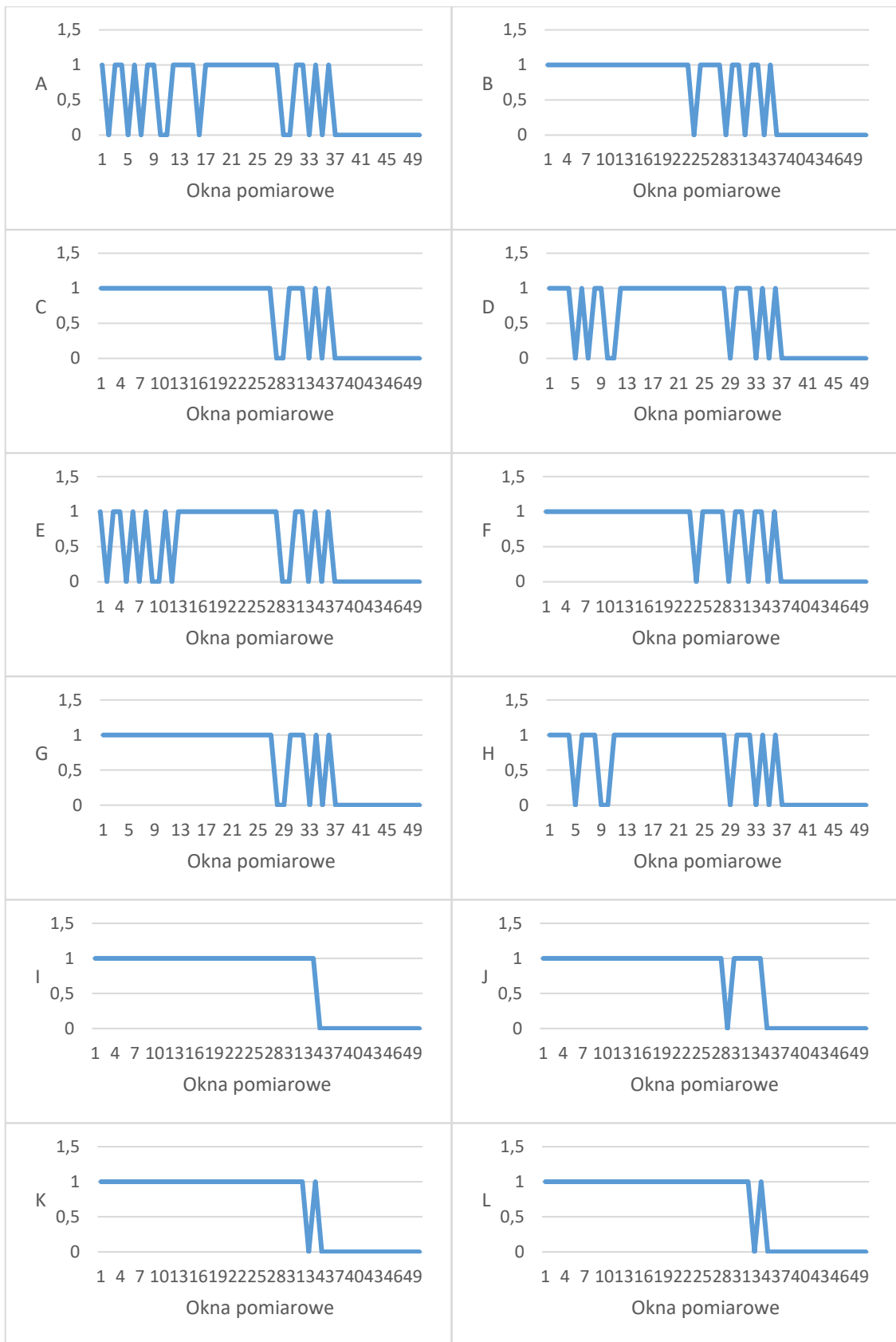
Rys. 138a Rozkład wartości estymatorów drganiowych (miar detekcji) w kolejnych oknach analizy.



Rys. 138b Rozkład wartości estymatorów drganiowych (miary dynamiki) w kolejnych oknach analizy.

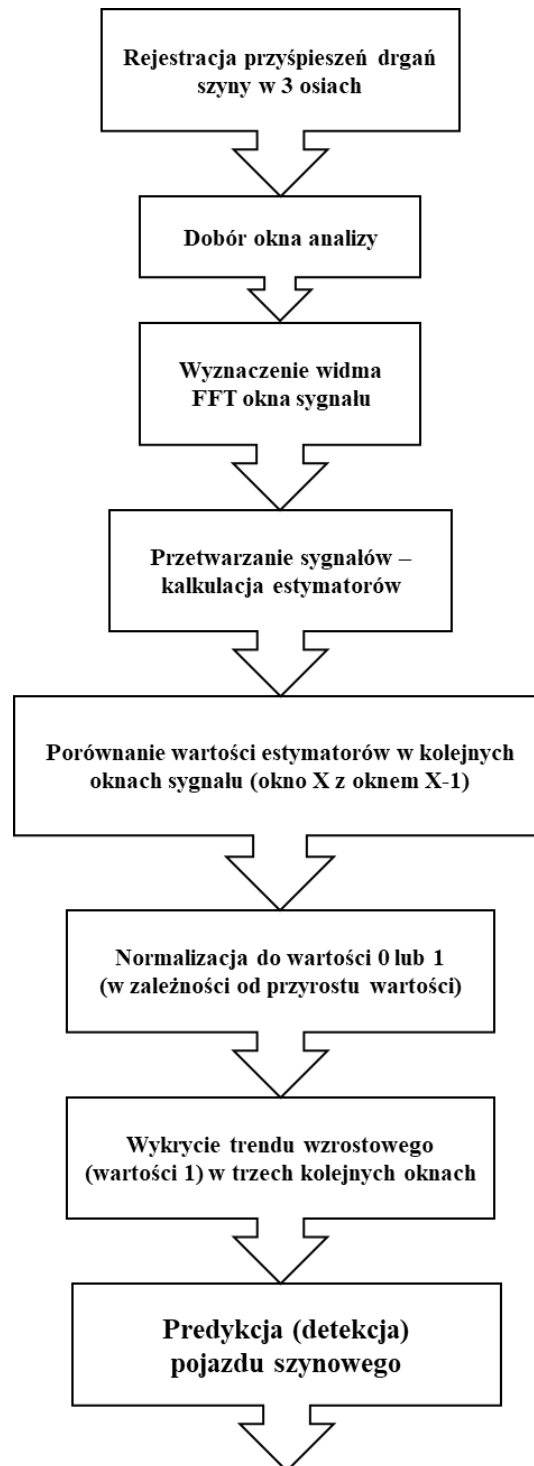
Otrzymane rozkłady wartości miar detekcji w kolejnych oknach obserwacji sygnału stanowią zbiory reprezentacji sygnałów drganiowych rejestrowanych w trzech ortogonalnych osiach. Na podstawie analizy można stwierdzić trend rosnący zbieżny z obserwacją zbliżania się pojazdu szynowego. Zakresy wartości dla każdego z estymatorów są wyraźnie różne i silnie zależne od rodzaju pociągu i stanu infrastruktury kolejowej. Dlatego zdecydowano się przeprowadzić normalizację tych miar, uwzględniając tylko przyrosty wartości dla kolejnych analizowanych okien obserwacji. Dzięki temu można przeprowadzić symulację działania systemu predykcji zbliżającego się pojazdu szynowego. Dla poprawy czytelności wykresów zastosowano oznaczenia analogiczne jak w rozdziale 9.4, tylko znormalizowane w zależności od kolejnych przyrostów wartości estymatorów drgań.

Wyniki jako znormalizowane wartości przyrostów estymatorów detekcji przedstawiono na rysunku 139.



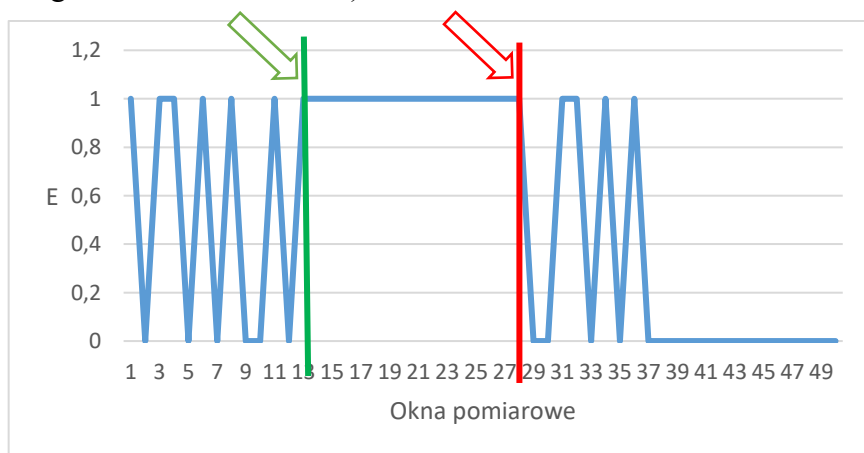
Rys. 139 Przebieg znormalizowanych wartości wybranych estymatorów sygnału – symulacja działania systemu detekcji

Zaproponowany algorytm stanowi kluczowy element koncepcji systemu predykcji zbliżającego się pojazdu szynowego dedykowanego do przejazdów kolejowo-drogowych kategorii D, jako wsparcia bezpieczeństwa przez informowanie uczestników ruchu o nadjeżdżającym pociągu. Koncepcja takiego systemu na podstawie miar drganiowych została przedstawiona w formie algorytmu (rys. 140).

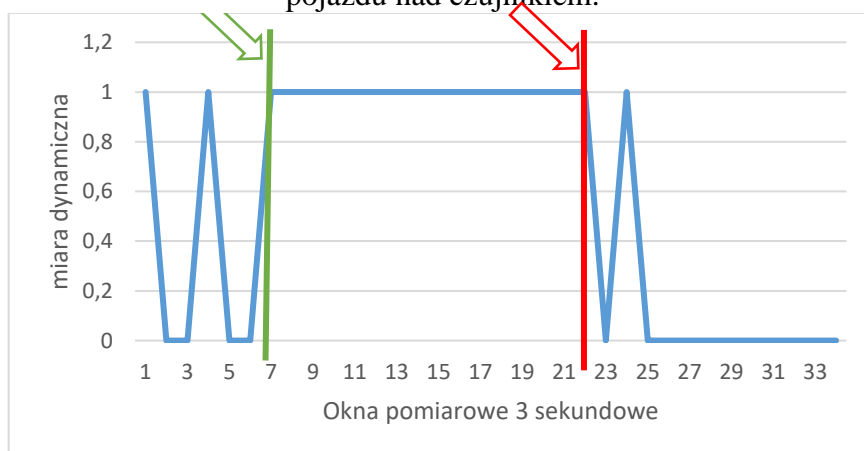


Rys. 140 Koncepcja systemu predykcji drganiowej zbliżającego się pojazdu szynowego

W celu wizualizacji zasady działania systemu przedstawiono przykłady przebiegów znormalizowanych wartości systemu sterowania uruchamiającego informację o zbliżającym się pojeździe szynowym. Przedstawione wartości są rezultatem opracowanego algorytmu predykcji na podstawie zarejestrowanych sygnałów przyspieszeń drgań. Podczas testów analitycznych symulowano działanie algorytmu w kontekście chwili wykrycia zbliżającego się pojazdu szynowego. Na rysunkach 141 i 142 kolorem zielonym zaznaczono moment detekcji zbliżającego się pojazdu szynowego oraz kolorem czerwonym moment (okno czasowe), w którym pojazd znajduje się nad czujnikiem drgań. Różnica, liczona jako liczba okien pomiędzy linią zieloną a czerwoną, pozwala wyznaczyć czas predykcji, czyli wyprzedzenia czasowego informującego o nadjeżdżającym pociągu. Zatem zielona strzałka wskazuje numer okna predykcji  $O_p$  zbliżającego się pojazdu szynowego, zaś czerwona numer okna najazdu nas czujnik  $O_{max}$  (oznaczenia zgodne z równaniem 9.2).



Rys. 141 Przyrosty miary detekcji (E, czyli odchylenie standardowe drgań w osi y) – strzałką zieloną zaznaczono początek detekcji pojazdu szynowego, czerwoną – najazd pojazdu nad czujnikiem.



Rys. 142 Przyrosty miary detekcji (miara dynamiczna drgań w osi z) – strzałką zieloną zaznaczono początek detekcji pojazdu szynowego, czerwoną – najazd pojazdu nad czujnikiem

## ROZDZIAŁ 11 – PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Opracowana metoda może zostać wykorzystana do budowy innowacyjnego systemu detekcji pojazdów szynowych, i to zarówno w transporcie kolejowym jak i tramwajowym. Dedykowana analiza sygnałów drganiowych umożliwia uzyskanie informacji o zbliżającym się pojeździe szynowym ze znacznym wyprzedzeniem czasowym, wystarczającym do opuszczenia skrzyżowania przez każdego z uczestników ruchu drogowego. Opracowany algorytm umożliwia oprócz samej detekcji pojazdu szynowego identyfikację czasu dotarcia do przejazdu pojazdu szynowego. Umożliwia to w przyszłości na zbudowanie systemu informacyjnego dla pieszych i pojazdów samochodowych o czasie bezpiecznego opuszczenia przejazdu. Informacja ta również umożliwi przekazanie komunikatu np. robotnikom pracującym przy torach o konieczności ich opuszczenia, w związku ze zbliżającym się pojazdem szynowym. Stanowić to może bardzo istotny element bezpieczeństwa w prowadzeniu i zarządzaniu ruchem kolejowym. Zastosowanie w praktyce ww. metody umożliwi poprawę bezpieczeństwa na przejazdach kolejowo – drogowych, zmniejszając tym samym liczbę wypadków z udziałem pieszych i samochodów.

W pracy osiągnięto założony cel. Opracowano i zweryfikowano metodę wykrywania zbliżającego się pojazdu szynowego wykorzystując jako źródło informacji sygnały drganiowe rejestrowane na szynie kolejowej. W tym celu zaproponowano koncepcję systemu predykcji drganiowej zbliżającego się pojazdu szynowego. Ponadto przeprowadzono weryfikację i ocenę skuteczności detekcji pojazdu szynowego na podstawie zarejestrowanych sygnałów drganiowych podczas przejazdów różnych grup pojazdów szynowych, w warunkach rzeczywistych w pełni funkcjonalnej infrastrukturze kolejowej.

Otrzymane wyniki potwierdziły zasadność przyjętej tezy. Potwierdzono na drodze eksperymentalnej, analitycznej i podczas badań *in situ*, że istnieje możliwość wykrycia przejazdu pojazdu szynowego na podstawie zarejestrowanych sygnałów drganiowych.

Na podstawie analizy wyników sformułowano następujące wnioski główne:

1. Wstępne badania testowe potwierdziły dużą pojemność informacyjną sygnałów drganiowych szyny oraz możliwość separacji składowych sygnałów skorelowanych z pracą różnych urządzeń infrastruktury kolejowej, a także innymi zjawiskami generującymi drgania (w tym przejazd pojazdu samochodowego przez przejazd).

2. Badania pilotażowe potwierdziły satysfakcjonujący zasięg wykrycia impulsu drganiowego w warunkach rzeczywistej infrastruktury kolejowej. Potwierdzono możliwość identyfikacji impulsu z odległości 400 m, co jest odległością wystarczającą w kontekście prędkości jazdy na przejeździe kategorii D.
3. Eksperymenty, których celem było dobranie długości postępującego okna analizy sygnału wskazały jako właściwy wybór długości okna 3-sekundowego.
4. Zastosowanie jako podejścia analizy kolejnych okien sygnałów, z uwzględnieniem struktury widmowej sygnałów umożliwiło wyznaczenie skutecznych miar detekcji, jako estymatorów punktowych sygnałów drganiowych.
5. Przykładowe wyniki działania algorytmu detekcji drganiowej wykazały bardzo satysfakcjonujące wyniki. Maksymalny czas detekcji wyniósł 108 sekund, zaś odległość 2450 metrów.
6. Na podstawie analizy wyznaczonych czasów i odległości detekcji stwierdzono, że najlepszą miarą wykrycia zbliżającego się pojazdu szynowego jest zdefiniowana miara dynamiczna.
7. Zaproponowano algorytm normalizacji wartości estymatorów drganiowych w kontekście przydatności w logicznych systemach automatycznego sterowania
8. Opracowano koncepcję systemu predykcji drganiowej zbliżającego się pojazdu szynowego
9. Przygotowano kompleksową dokumentację wdrożenia opracowanej koncepcji do systemu informacji uczestników ruchu na przejazdach kategorii D i F.

Ponadto doświadczenie zawodowe autora rozprawy doktorskiej oraz działalność projektowo-wdrożeniową promotora umożliwiły wdrożenie uzyskanych wyników badań naukowych w formie urządzenia i systemu detekcji zbliżania się pojazdu szynowego. Weryfikacji potencjału aplikacyjnego opracowanej metody dokonano przygotowując algorytmy normalizacyjne i prowadząc badania symulacji wykrycia zbliżającego się pojazdu szynowego stosując sygnały rzeczywistych przyspieszeń drgań rejestrowanych w pełni funkcjonalnej infrastrukturze kolejowej. Potwierdzeniem potencjału aplikacyjnego opracowanej metody predykcji drganiowej pojazdu szynowego jest przyznana ochrona patentowa opracowanego czujnika rozpoznania przejazdu pojazdów szynowych (numer patentu 237 398), którego zasada działania częściowo bazuje na opracowanej koncepcji. Aktualnie prototyp innowacyjnego systemu w pełni funkcjonalnego zabudowany jest jako demonstrator na jednym z przejazdów kategorii D

w województwie śląskim i cieszy się dużym zainteresowaniem zarządców infrastruktury drogowej.

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki wskazują także kierunki dalszych badań i duży potencjał aplikacyjny w sektorze transportu kolejowego. Autor z promotorem kontynuują działalność badawczą w zakresie bezpieczeństwa w transporcie, czego potwierdzeniem są kolejne wspólne publikacje i realizowane badania o charakterze wdrożeniowym.



## LITERATURA

- [1] Adamczyk J., Krzyworzeka P., Łopacz H.: Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych. Kraków, Collegium Columbianum, 1999.
- [2] Adamczyk, Jan, Maciej Hebda, and Jan Targosz. "Badania symulacyjne wibroizolowanych torowisk tramwajowych." *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 18 (2017).
- [3] Auersch, L., Said, S., Müller, R.: Measurements on the Vehicle-Track Interaction and the Excitation of Railway-Induced Ground Vibration (Open Access) (2017) *Procedia Engineering*, 199, pp. 2615-2620. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.390
- [4] Auersch, L.: Excitation of ground vibration due to the passage of trains over a track with trackbed irregularities and a varying support stiffness (2015) *Vehicle System Dynamics*, 53 (1), pp. 1-29. doi: 10.1080/00423114.2014.968173
- [5] Auersch, L.: Theoretical and experimental excitation force spectra for railway induced ground vibration: vehicle-track-soil interaction, irregularities and soil measurements. *Veh. Syst. Dyn.* 48, 235–261 (2010)
- [6] Auersch, L.: The excitation of ground vibration by rail traffic: Theory of vehicle-track-soil interaction and measurements on high-speed lines (2005) *Journal of Sound and Vibration*, 284 (1-2), pp. 103-132. Cited 205 times. doi: 10.1016/j.jsv.2004.06.017
- [7] Baek K. S., Kyogoku K., Nakahara T. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling-sliding wheel/rail contacts under dry wet conditions. *Wear*, Vol. 263, Issue 1, 2007, p. 169-179.
- [8] Batko W., Dąbrowski Z., Engel Z., Kiciński J., Weyna S.: *Nowoczesne metody badania procesów wibroakustycznych*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji” Radom 2005
- [9] Batko W., Ziółko M.: *Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej*. Problemy Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. AGH, Kraków 2002
- [10] Bąkowski, H., Posmyk, A., Krawczyk, J.: Tribological properties of rail steel in straight moderately loaded sections of railway tracks. *Arch. Metall. Mater.* 56(3), 813–822 (2011)

- [11] Bednarek W.A, Zużycie faliste szyn toru kolejowego (przyczyny i środki zaradcze), Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, Nr 20, 2015 s. 7-23
- [12] Bednarz, J., & Targosz, J. (2011). Eksperymentalna analiza rozchodzenia się drgań w gruncie wywołanych przejazdem pojazdów szynowych. *Logistyka*, (6).
- [13] Bednarz, J.: Experimental verification of the developed soil model describing the propagation of vibration wave in the ground. *J. KONES* 19, 31–39 (2012)
- [14] Bednarz, Jarosław. "Badania drgań zestawu kołowego na maźnicach w czasie jazdy pociągów." *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 18 (2017).
- [15] Benedetto A., et al. An innovative algorithm for train detection. 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings. IEEE, 2015
- [16] Beugin J., Marais J. Simulation-based evaluation of dependability and safety properties of satellite technologies for railway localization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 22 (2012): 42-57.
- [17] Bezin Y., Iwnicki S. D., Cavallett M. The effect of dynamic rail roll on the wheel-rail contact conditions. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 46, Issue 1, 2008, p. 107-117.
- [18] Bloomfield, R. E., Bendele, M., Bishop, P. G., Stroud, R. & Tonks, S. (2016). The risk assessment of ERTMS-based railway systems from a cyber security perspective: Methodology and lessons learned. Paper presented at the First International Conference, RSSRail 2016, 28-30 Jun 2016, Paris, France.
- [19] Borkowski W., Konopka S., Prochowski L.: *Dynamika maszyn roboczych*. WN-T Warszawa 1996
- [20] Bracciali, A., Cascini, G.: Detection of corrugation and wheel flats of railway wheels using energy and cepstrum analysis of rail acceleration (1997) Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 211 (2), pp. 109-116. doi: 10.1243/0954409971530950
- [21] Bogacz, Roman, and Robert Konowrocki. "O wpływie usterek toru na uszkodzenia pojazdów szynowych." *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie*. Seria: Materiały Konferencyjne (2017).
- [22] Brzózka, J. (1997). *Ćwiczenia z automatyki w Matlabie i Simulinku*.

- [23] Burdzik R., Konieczny Ł., Warczek J., Cioch W.: Adapted linear decimation procedures for TFR analysis of non-stationary vibration signals of vehicle suspensions
- [24] Burdzik R., Nowak B., Konieczny Ł., Mańka A.: Analiza propagacji fal drganiowych w szynach kolejowych wywołanych przejazdem pojazdu. WibroTech 2019. XX Konferencja Naukowa Wibroakustyki i Wibrotechniki. XV Ogólnopolskie Seminarium Wibroakustyka w Systemach Technicznych, Kraków - Zawiercie, 14-15 listopada 2019 r. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Politechnika Warszawska. Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych. Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej
- [25] Burdzik R., Nowak B.: Analiza drgań szyny kolejowej w odniesieniu do źródła wymuszenia. Diagnostyka maszyn. XLVI Ogólnopolskie sympozjum, Wisła, 3.03. - 7.03.2019 r.. Red. Łukasz Konieczny, Grzegorz Peruń. Politechnika Śląska. Wydział Transportu Katowice : Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych. Wydział Transportu. Politechnika Śląska, 2019
- [26] Burdzik R., Słowiński P., Celiński I., Nowak B., Konieczny Ł.: Analysis of transverse vibrations and acoustic signal generated by the train passage XXIII Konferencja Naukowa "Pojazdy Szynowe 2018", 22-25 maja 2018 roku, Katowice-Chorzów-Szczyrk. 23th Scientific Conference "Rail Vehicles 2018". Red. Krzysztof Krawiec. Politechnika Śląska. Wydział Transportu. Katedra Transportu Kolejowego, Alstom
- [27] Burdzik R.: Identification of sources, propagation and structure of vibrations affecting men in means of transport based on the example of automotive vehicles. Kaunas: JVE International, 2014, 237 s., JVE Book Series on Vibroengineering, vol. 1. 2351-5260
- [28] Burdzik R.: Implementation of multidimensional identification of signal characteristics in the analysis of vibration properties of an automotive Vvehicle's floor panel. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, Volume 16, no. 3, 2014, p. 439–445.
- [29] Burdzik R.: Material vibration propagation in floor pan. Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 59, Issue 1, 2013, p. 22-27.

- [30] Burdzik R.: Monitoring system of vibration propagation in vehicles and method of analysing vibration modes. J. Mikulski (ed.): TST 2012, CCIS 329, Springer, Heidelberg, 2012, p. 406-413.
- [31] Burdzik, R., Konieczny, Ł., Warczek, J., & Cioch, W. (2017). Adapted linear decimation procedures for TFR analysis of non-stationary vibration signals of vehicle suspensions. *Mechanics Research Communications*, 82, 29-35.
- [32] Burdzik, R., Nowak, B., Młyńczak, J., & Deuskiewicz, P. (2016). Analysis of the detection and crossing signaling system in safety terms. *Diagnostyka*, 17.
- [33] Cejmer J.: Badania oddziaływań dynamicznych w rozjazdach przeznaczonych do dużych prędkości pociągów. „Problemy Kolejnictwa”, 2005, zeszyt 140.
- [34] Celiński I., Burdzik R., Rozmus J., Nowak B., Konieczny Ł.: Measurements of velocity profiles of trains on railway crossing level. XXIII Konferencja Naukowa "Pojazdy Szynowe 2018", 22-25 maja 2018 roku, Katowice-Chorzów-Szczyrk. 23th Scientific Conference "Rail Vehicles 2018". Red. Krzysztof Krawiec. Politechnika Śląska. Wydział Transportu. Katedra Transportu Kolejowego, Alstom
- [35] Celiński I., Burdzik R., Rozmus J., Nowak B., Warczek J.: Analysis of driver behavior during railway crossing level passing. XXIII Konferencja Naukowa "Pojazdy Szynowe 2018", 22-25 maja 2018 roku, Katowice-Chorzów-Szczyrk. 23th Scientific Conference "Rail Vehicles 2018". Red. Krzysztof Krawiec. Politechnika Śląska. Wydział Transportu. Katedra Transportu Kolejowego, Alstom
- [36] Cempel, C. (1989). *Wibroakustyka stosowana*. Państw. Wydaw. Naukowe. Oddział.
- [37] Chadwick, S., Glover, M., Priest, I., Chapman, M., & Mcquillan, J. (2015). U.S. Patent No. 8,985,523. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [38] Chodkowski A. W.: *Badania modelowe pojazdów gąsienicowych i kołowych*. WKiŁ Warszawa 1982
- [39] Chudzikiewicz A., Drozdziel J., Sowiński B., Practical solution of rail vehicle and track dynamics monitoring system. 2012 Konferencja Key Engineering Materials Tom 518 Str.271-280
- [40] Cieślakowski, Stanisław Janusz, et al. Wybrane zagadnienia z zakresu bezpieczeństwa transportu. *LogForum*, 2009, 5.3: 1-7.

- [41] Connolly, D. P., Kouroussis, G., Laghrouche, O., Ho, C. L., & Forde, M. C. (2015). Benchmarking railway vibrations—Track, vehicle, ground and building effects. *Construction and Building Materials*, 92, 64-81.
- [42] Connolly, D. P., Marecki, G. P., Kouroussis, G., Thalassinakis, I., & Woodward, P. K. (2016). The growth of railway ground vibration problems—a review. *Science of the Total Environment*, 568, 1276-1282.
- [43] Connolly, D. P., Marecki, G. P., Kouroussis, G., Thalassinakis, I., & Woodward, P. K. (2016). The growth of railway ground vibration problems—a review. *Science of the Total Environment*, 568, 1276-1282.
- [44] Czechyra B. , Kwaśnikowski J., Tomaszewski F., *Możliwości wykorzystania metod wibroakustycznych w procesie oceny własności eksploatacyjnych tramwaju*, *Logistyka* 4/2011, 172-180
- [45] Ćirović G., Pamučar D. Decision support model for prioritizing railway level crossings for safety improvements: Application of the adaptive neuro-fuzzy system. *Expert Systems with Applications* 40.6 (2013): 2208-2223.
- [46] Dąbrowski D., Batko W., Cioch W.: Model of the gears based on multibody system and its validation by application of non-contact methods, *Acta Physica Polonica A*, Volume: 123 Issue: 6, 2013, pp. 1016-1019.
- [47] Dąbrowski Z., Deuszkiewicz P.: Nonlinear Dynamic Model of a Carbon-Epoxy Composite Structure, 20th International Congress On Sound & Vibration Icsv 20, Bangkok 7÷11.07 2013.
- [48] Dąbrowski, Z. (2008). O potrzebie wykorzystania modeli nieliniowych w diagnostyce wibroakustycznej. *Diagnostyka* , 153-156.
- [49] Duda M. , Łazarz B., Czech P., Mańka A., Matyja T., *Wibroizolacyjne działanie foteli w samochodzie osobowym*, *Tech. Transp. Szyn.* 2015 R. 22 nr 12, dysk optyczny (CD-ROM) s. 453-458,
- [50] Engel Z.: *Ochrona środowiska przed hałasem i wibracjami*, PWN Warszawa 2001.
- [51] Firlik B., Czechyra B. , Chudzikiewicz A. *Condition Monitoring System for Light Rail Vehicle and Track*, 1662-9795, Vol. 518, pp 66-75, 2012 Trans Tech Publications, Switzerland
- [52] Gajek A., Juda Z.: *Czujniki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa 2008.

- [53] Giergiel J., Uhl T.: Identyfikacja układów mechanicznych. Warszawa PWN 1990
- [54] Grajtner J.: Izolacja drgań w maszynach i pojazdach. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław 1997
- [55] Grębowski K., Zielińska M., Modelowanie oddziaływań dynamicznych pociągu typu Pendolino na konstrukcje zabytkowych mostów kolejowych w Polsce, Konstrukcje-elementy-materiały. KONSTRUKCJE – ELEMENTY – MATERIAŁY ARTYKUŁY PROBLEMOWE NR 1/2015 STR.27 -32
- [56] Gutierrez-Carvajal R. E., Betancur German R., Barbosa J., et al. Full-scale fatigue test performed to the bolster beam of a railway vehicle. *International Journal of Interactive Design and Manufacturing – IJIDEM*, Vol. 12, Issue 1, 2018, p. 253-261.
- [57] Gutierrez-Carvajal R. E., Betancur German R., Castaneda Leonel F., et al. A fractional Fourier transform-based method to detect impacts between the bogie and the car body of a railway vehicle: a data-driven approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F – Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 232, Issue 1, 2018, p. 288-296
- [58] Hunt, H. E. M. (2008). Types of rail roughness and the selection of vibration isolation measures. In *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems* (pp. 341-347). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [59] Hunt, H.E.M.: Types of rail roughness and the selection of vibration isolation measures
- [60] Iwnicki S. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Taylor and Francis, Boca Raton, 2006.
- [61] Jamrozik K., 2008, Inteligentne systemy transportowe dla bezpieczeństwa ruchu drogowego. *ITS Przegląd Inteligentne Systemy Transportowe*. 2/2008, s.6-8.
- [62] Johansson A., Andersson C. Out-of-round railway wheels-a study of wheel polygonalization through simulation of three-dimensional wheel-rail interaction and wear. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 43, Issue 8, 2005, p. 539-559.
- [63] Jurga S., Zajac G., Badania hałasu i przyspieszeń drgań w wybranych tramwajach eksploatowanych przez MPK S.A. w Krakowie, W: Jakość, bezpieczeństwo i ekologia w pojazdach : V Międzynarodowa Konferencja "QSEV'07", Kraków, 18-19 czerwca 2007 r. : materiały konferencyjne. - Kraków : Sek. Poligraf. PKrak., 2007. - s. 55-61,

- [64] Kardas-Cinal, E. Metody oceny komfortu wibracyjnego, prace naukowe politechniki warszawskiej z. 112 Transport 2016 str.165-174
- [65] Kardas-Cinal, E. Spectral analysis of vibrations experienced by passenger of railway vehicle in selected frequency bands, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport Rocznik 2015 Tom z. 108 Str. 41-48
- [66] Kardas-Cinal, E., Analiza statystyczna wpływu lokalnego stanu toru na bezpieczeństwo jazdy pojazdu szynowego, Logistyka 4/2011, 377-386
- [67] Kardas-Cinal, E., Badania komfortu jazdy pojazdu szynowego w obecności losowych parametrów toru, Transport, 2006, Vol. 18, iss. 1 str. 5-16
- [68] Klasztorny M. Analiza dynamiczna belkowych mostów zespolonych na cmk w warunkach zwiększonych prędkości pociągów (160 -250) km/h, Drogi i Mosty 2003, Tom nr 3 Str. 73-94
- [69] Klasztorny M., Maślecki K., Machelski Cz., Podwórna M., Analiza dynamiczna typoszeregu mostów stalowych obciążonych pociągami poruszającymi się z dużymi prędkościami. Czasopismo Przegląd Budowlany 2015 Tom R. 86, nr 1 Str 27--32
- [70] Konieczny Ł., Burdzik R.: Comparison of characteristics of the components used in mechanical and non-conventional automotive suspensions. Eds: J. Garus, P. Szymak. Stafa-Zurich, Trans Tech Publications, 2014, s. 26-31 (Solid State Phenomena ; vol. 210 1012-0394).
- [71] Kot S.: Analiza bezpieczeństwa przejazdu kolejowego (Analysis of rail-road level crossing safety), graduate thesis, Silesian University of Technology, Katowice, 2016
- [72] Kowal J.: Sterowanie drganiami. Wydawnictwo Gutenberg, Kraków, 1996
- [73] Krylov, V.: Spectra of low frequency ground vibrations generated by high speed trains on layered ground. J. Low Freq. Noise Vib. Active Control 16(4), 257–270 (1997)
- [74] Kucharski T.: System pomiaru drgań mechanicznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2002.
- [75] Kumaniecka A., Prącik M., Drgania struktur dyskretno-ciągłych poddanych ruchomym układom obciążeń o dwupunktowym kontakcie, Symulacja w Badaniach i Rozwoju, Vol. 3, No. 1/2012

- [76] Lei, X., Noda, N.A.: Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile. *J. Sound Vib.* 258(1), 147–165 (2002)
- [77] Lewiński A., Łukasik Z., Toruń A. The application of public radio transmission standards in innovative railway automation systems. *Journal of KONBiN* 26.1 (2013): 123-136.
- [78] Lewiński, A., & Bester, L. (2008). Zintegrowany system bezpieczeństwa w transporcie lądowym. Logistyka, (2), CD-CD.
- [79] Licow R., Tomaszewski F., Identyfikacja wad powierzchni tocznej szyn za pomocą sygnału wibroakustycznego, *PROBLEMY KOLEJNICTWA*, str.71-76, 2019
- [80] Ling, L., et al.: A 3D model for coupling dynamics analysis of high-speed train/track system. *J. Zhejiang Univ. Sci. A* 15(12), 964–983 (2014)
- [81] Lyons R.G.: Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów. WKiŁ, Warszawa 2010.
- [82] Malte H., Vanderhaegen F. Human factors in the railway system safety analysis process. *Rail Human Factors Around the World: Impacts on and of People for Successful Rail Operations*, Taylor & Francis (2012): 73-84.
- [83] Mańka A., Burdzik R., Nowak B., Rozmus J., Konieczny Ł. Analysis of distribution of orthogonal vibration on rail during the train vehicle passage. XXIII Konferencja Naukowa "Pojazdy Szynowe 2018", 22-25 maja 2018 roku, Katowice-Chorzów-Szczyrk. 23th Scientific Conference "Rail Vehicles 2018". Red. Krzysztof Krawiec. Politechnika Śląska. Wydział Transportu. Katedra Transportu Kolejowego, Alstom
- [84] Mańka A., Burdzik R., Nowak B., Rozmus J., Słowiński P. Possibilities of determining the speed of a railway vehicle on a basis of rail vibration analysis as an element of IoT XXIII Konferencja Naukowa "Pojazdy Szynowe 2018", 22-25 maja 2018 roku, Katowice-Chorzów-Szczyrk. 23th Scientific Conference "Rail Vehicles 2018". Red. Krzysztof Krawiec. Politechnika Śląska. Wydział Transportu. Katedra Transportu Kolejowego, Alstom
- [85] Michalski R, Wierzbicki S.: An analysis of degradation of vehicles in operation, *Maintenance and Reliability* 1(37), 2008, pp. 30-32.



- [86] Modrzejewski M. Urządzenia samoczynnej sygnalizacji przejazdowej, graduate thesis, Silesian University of Technology, Katowice, 2016
- [87] Olaszek P., Cieśla J., Szaniec W., Badanie skutków oddziaływań bocznych na wiadukcie kolejowym leżącym na łuku, *Budownictwo i Architektura* 12(2) (2013) 47-54
- [88] Ortiz J. O., Betancur German R., Gomez J., et al. Detection of structural damage and estimation of reliability using a multidimensional monitoring approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F – Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 232, Issue 4, 2018, p. 1021-1032.
- [89] Pachla, Filip i Alicja Kowalska-Koczwara. „Wpływ różnych typów pociągów na człowieka w budynkach”. Seria konferencji IOP: Inżynieria materiałowa i inżynieria . Tom. 603. Nr 4. Wydawnictwo IOP, 2019.
- [90] Peden, Margie, et al. World report on road traffic injury prevention. World Health Organization, 2004.
- [91] Pellegrini P., Rodriguez J. Single European sky and single European railway area: A system level analysis of air and rail transportation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 57 (2013): 64-86.
- [92] Picoux, B., Le Houedec, D.: Diagnosis and prediction of vibration from railway trains. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 25, 905–921 (2005)
- [93] Pyra J., Kłaczyński M., Burdzik Rafał. Analysis on the possibility of eliminating interference from paraseismic vibration signals induced by the detonation of explosive materials. *Sensors* 2020 vol. 20 iss. 21 s. 1-21 (art. no 6401)
- [94] Radkowski St.: Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Warszawa-Radom 2002.
- [95] Salamak M., Łaziński P., Pradelok S., Bętkowski P. Badania odbiorcze mostów kolejowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym – wymagania i praktyka, VII Konferencja Naukowo-Techniczna "Projektowanie, budowa i utrzymanie Infrastruktury w transporcie szynowym" - INFRASZYN 2014, Zakopane 09-11.04.2014 At: 218-227
- [96] Sheng, X., Jones, C.J.C., Petyt, M.: Ground vibration generated by a harmonic load acting on a railway track (1999) *Journal of Sound and Vibration*, 225 (1), pp. 3-28. doi: 10.1006/jsvi.1999.2232

- [97] Sheng, X., Jones, C.J.C., Thompson, D.J.: A theoretical model for ground vibration from trains generated by vertical track irregularities (2004) *Journal of Sound and Vibration*, 272 (3-5), pp. 937-965. doi: 10.1016/S0022-460X(03)00782-X
- [98] Siergiejczyk, M., Paś, J., Rosiński, A.: Issue of reliability–exploitation evaluation of electronic transport systems used in the railway environment with consideration of electromagnetic interference. *IET Intel. Transport Syst.* 10(1), 587–593 (2016)
- [99] Siergiejczyk, M., Rosiński, A.: The concept of monitoring a teletransmission track of the highway emergency response system. *Diagnostyka* 16(4), 49–54 (2015)
- [100] Sitarz, M., Żurek, Z., Wojdyła, T., Badanie drgań pojazdu maszynowego w metrze warszawskim, *Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej/Politechnika Śląska*, 2001, zeszt 17, 189-194
- [101] Śładkowski A., Gąska D., Haniszewski T. , Margielewicz J. , Aktywna wibroizolacja drgań mechanicznych pasażerskiego wagonu kolejowego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Transport z. 87*, 2015
- [102] Śładkowski, A., Bizoń, K.: The use of semi-automatic technique of finite elements mesh generation for solutions of some railway transport problems. *Mechanics* 23(2), 190–196 (2017)
- [103] Śładkowski, A., and T. Wojdyła. "Wpływ parametrów usprężynowania wagonu na siły występujące w kontakcie pomiędzy kołem a szyną." *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska* 57 (2005): 379-388.
- [104] Smith S.W.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Praktyczny poradnik dla inżynierów i naukowców.* Wydawnictwo BTC Warszawa 2003
- [105] Tomaszewski F., Sawczuk W., Wesołek M. Analiza przebiegów czasowych i amplitudowych sygnałów drganiowych tarczowego układu hamulcowego pojazdu szynowego. *Czasopismo Logistyka* 6/2014, s. 10651-10658
- [106] Warczek J., Burdzik R., Peruń G.: The method for identification of damping coefficient of the trucks suspension , *Key Engineering Materials Vol. 588* (2014) p 281-289.
- [107] Wielądek, A. (2005). Europejska Agencja Kolejowa. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 11(1-2), 59-61.

- [108] Wilk A., Mizan M., Karwowski K., Kaczmarek P. Analiza drgań przewodów jezdnych sieci trakcyjnej w aspekcie oceny jej stanu technicznego, XXVI Seminarium, ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICE 2016 Biuletyn Informacyjny nr 30/2016 –PTETiS
- [109] Zając, G., & Jurga, S. (2009). Badania trwałości obręczy kół tramwajowych eksploatowanych w MPK SA w Krakowie. Problemy eksploatacji, 139-148.
- [110] Zając, G. (2011). Badania hałasu i drgań w tramwajach. TTS Technika Transportu Szybowego, 18, 53-58.
- [111] Zalewski A., Cegiela R.: Matlab - obliczenia numeryczne i ich zastosowanie. Naukom Poznań 1996
- [112] Zhang S., Lee W.-K., Wing-Tat Pong P. Train Detection by Magnetic Field Sensing. Sensors and Materials 25.6 (2013): 423-436
- [113] Zieliński T.P.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. WKiŁ Warszawa 2009
- [114] Żółtowski B., Cempel C. (praca zbiorowa): Inżynieria Diagnostyki Maszyn. Biblioteka Problemów Eksploatacyjnych. Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej. Instytut Technologii Eksploatacji PIB Radom. Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2008
- [115] Żółtowski B.: Badania dynamiki maszyn. Wydawnictwo Markar Bydgoszcz 2002
- [116] Axle Counter System ACS2000 – Efficient and Universal Clear Track Signalling System: SIGNAL + DRAHT (95) 4/2003.
- [117] Czujnik koła RSR180: materiały reklamowe FRAUSCHER Sensortechnik.
- [118] Dokumentacja Techniczno Ruchowa DTR-2004/SOL-21: Licznikowy system stwierdzania niezajętości torów i rozjazdów SOL-21, BT ZWUS, Katowice 1996
- [119] Dokumentacja Techniczno Ruchowa DTR-2004/ELS-95: Czujnik koła ELS-95, BT ZWUS, Katowice 1996.
- [120] DTR, Electronics Panel ECT5of CTI track sensor for ACS of the COB-63A type, 03.09.1993
- [121] Instrukcja WTB-E10: Wytyczne techniczne budowy urządzeń sterowania ruchem kolejowym w przedsiębiorstwie Polskie Koleje Państwowe, PKP Dyrekcja Generalna, Warszawa 2014.
- [122] Instrukcja o prowadzeniu ruchu pociągów na PKP - R1, Polskie Koleje Państwowe, Warszawa 1998.

- [123] Operating and Technical Characteristics of the track sensor device EON-6 produced by AdtranzZwus Sp. z o. o.
- [124] System liczenia osi ACS2000 dla kolei publicznych materiały reklamowe FRAUSCHER
- [125] Transport Automation Solutions for MAIN LINE RAIL: Axle Counter (Az LM), materiały reklamowe Alcatel.
- [126] <https://www.plk-sa.pl/klienci-i-kontrahenci/dopuszczanie-nowych-produktow-i-uslug/zasady-dopuszczania-produktow-do-stosowania-w-plk/procedura-sms-pw-17>
- [127] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX%3A32004L0049> - dyrektywa 2004/49/WE w sprawie bezpieczeństwa kolei wspólnotowych
- [128] The regulation of the Minister of Infrastructure and Development dated on 20.10.2015 concerning the technical conditions that railway intersections and railway sidings with roads should meet and their location.
- [129] <https://w3.usa.siemens.com/mobility/us/Documents/en/rail-solutions/rail-automation/signaling-components/wsr-wss-wheel-detectors-en.pdf>
- [130] [http://pintsch Tiefenbach.de/wp-content/uploads/2011/11/02-wheel-sensors\\_en\\_1209.pdf](http://pintsch Tiefenbach.de/wp-content/uploads/2011/11/02-wheel-sensors_en_1209.pdf)
- [131] <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-control-solutions/products/wayside-equipment.html>
- [132] <http://automatyka.ndl.pl/srk/samoczynne/spa2/cti.htm>
- [133] <http://usrk.republika.pl/samoczynne/els/els6.ht>
- [134] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Samoczynna\\_sygnalizacja\\_przejazdowa](https://pl.wikipedia.org/wiki/Samoczynna_sygnalizacja_przejazdowa)
- [135] [http://www.frauscher.com/en/overview\\_wheel\\_detection\\_systems/](http://www.frauscher.com/en/overview_wheel_detection_systems/)
- [136] <https://www.utk.gov.pl/pl/bezpieczenstwo-systemy/zarzadzanie-bezpieczen/system-zarzadzania-bezp/11014,System-zarzadzania-bezpieczenstwem.html>
- [137] <https://dane.utk.gov.pl/sts/zdarzenia-i-wypadki/zdarzenia-i-wypadki-kol/16897,Zdarzenia-i-wypadki-kolejowe.html>
- [138] [http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/JPODOCS/REPTS\\_TE/13485.pdf](http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/JPODOCS/REPTS_TE/13485.pdf), - Carroll A., Passera A., Tingos I.: “Vehicle Proximity Alert System for Highway-Railroad Grade Crossings Prototype Research”, U.S. Department of Transportation Research and Special Programs Administration, April 2001,

- [139] <https://tvnwarszawa.tvn24.pl>
- [140] <https://vossloh-rail-services.com> - Materiały informacyjne firmy Vossloh Rail Services GmbH
- [141] <https://www.thalesgroup.com/en/countries/europe/germany/transportation/rail-field-equipment>
- [142] patent PL 210037
- [143] patent PL 230291B1

## SPIS RYSUNKÓW:

Rys. 1 Liczba wypadków w okresie pomiędzy 2015 a 2020 rokiem w przeliczeniu na mln km [137].	3
Rys. 2 Liczba ofiar na przejściach kolejowych w okresie pomiędzy 2015 a rokiem 2020 [137].	4
Rys. 3 Liczba wypadków na poszczególnych kategoriach przejazdów kolejowych w latach 2019-2020 [137].	4
Rys. 4 Schemat przebiegu procesów certyfikacji i nadzoru [136].	8
Rys. 5 Całkowita liczba wypadków na PKP PLK w latach 2015-2020 [137].	11
Rys. 6 Liczba wypadków na przejazdach kolejowo-drogowych w latach 2015-2020 [137].	11
Rys. 7 Całkowita liczba wypadków na przejazdach kolejowo-drogowych w latach 2015-2020 w podziale na kategorie przejazdu [137].	12
Rys. 8 Systemów przekazywania kierowcy informacji o zbliżającym się do skrzyżowania pojeździe szynowym [138].	13
Rys. 9 Schemat blokowy licznikowego systemu stwierdzania niezajętości [124].	28
Rys. 10 Schemat blokowy licznikowego systemu stwierdzania niezajętości SOL [131].	29
Rys. 11 Rozmieszczenie elementów czujnika koła ELS (głowica czujnika koła zabudowana na szynie kolejowej oraz elektronika przytorowa odpowiedzialna za przetwarzanie sygnałów z głowicy zabudowana w żółtej obudowie) [128].	30
Rys. 12 Głowica czujnika koła ELS	31
Rys. 13 Schemat licznikowego systemu stwierdzania niezajętości firmy Thales [141].	32
Rys. 14 Widok cewek głowicy nadawczej oraz odbiorczej firmy Thales [141].	33
Rys. 15 Głowice punktu liczącego firmy Thales [141].	33
Rys. 16 Przykładowy schemat systemu liczącego firmy Frauscher w trybie wyspowym - samodzielnym (bez powiązania z urządzeniami np. stacyjnymi) [135].	35
Rys. 17 Czujnik koła firmy Frauscher [117].	35
Rys. 18 Schemat układu detekcji pojazdów szynowych [142].	36
Rys. 19 Schemat układu detekcji pojazdów szynowych [143].	37
Rys. 20 Przebieg przemieszczeń pionowych zarejestrowany podczas przejazdu pociągu z prędkością około 200km/h [87].	41
Rys. 21 Przebieg przemieszczeń poziomych zarejestrowany podczas przejazdu pociągu z prędkością około 200km/h [87].	42
Rys. 22 Przebiegi przyspieszeń drgań rejestrowane w wyznaczonym punkcie [12].	43
Rys. 23 Wartości chwilowe przyspieszeń drgań dla hamowania z prędkości 60 km/h do zatrzymania, kolor czerwony-pierwsza oś hamowana, kolor niebieski-druga oś hamowana [105].	45
Rys. 24 Szyna ze zużyciem falistym [10].	46
Rys. 25 Czynniki mające wpływ na zużycie szyn kolejowych [10].	47
Rys. 26 Szlifowanie szyn [139].	47
Rys. 27 Szlifowanie obwodowe szyn [140].	48
Rys. 28 Klasyfikacja sygnałów.	49
Rys. 29 Przykładowy przebieg sygnału sinusoidalnego.	50
Rys. 30 Schemat badań na torze testowym.	56
Rys. 31 Dokumentacja zdjęciowa systemu pomiarowego na terenie Politechniki Śląskiej gdzie: A – System pomiarowy, B- mocowanie z czujnikami drgań, C- symulator pociągu, D- napęd zwrotnicowy, E – Schemat toru testowego na terenie Politechniki Śląskiej w Katowicach. Źródło: opracowanie własne.	56
Rys. 32 Uchwyt firmy Bombardier wraz z piezoelektrycznymi czujnikami przyspieszenia.	57
Rys. 33 Sygnały drgań zarejestrowane podczas impulsu uderzenia w szynę: a) przebiegi czasowe, b) widma drgań.	58
Rys. 34 Sygnały drgań zarejestrowane podczas pracy napędu zwrotnicowego: a) przebiegi czasowe, b) widma drgań.	58
Rys. 35 Sygnały drgań zarejestrowane podczas przejazdu symulatora pociągu: a) przebiegi czasowe, b) widma drgań.	58
Rys. 36 Sygnały drgań zarejestrowane podczas przejazdu samochodu osobowego przez przejazd kolejowy: a) przebiegi czasowe, b) widma drgań.	59
Rys. 37 Porównanie widm drgań zarejestrowanych dla wymuszenia impulsowego w różnej odległości. 61	

Rys. 38 Porównanie widm drgań zarejestrowanych dla wymuszenia impulsowego w odległościach 12 m, 24 m i 36 m – dominujące pasma obserwacji.....	62
Rys. 39 Badania na stacji Jawor. ....	64
Rys. 40 Odpowiedź impulsowa szyny w odległości 100 m od wymuszenia. ....	64
Rys. 41 Widmo odpowiedzi impulsowej szyny w odległości 100 m od wymuszenia. ....	65
Rys. 42 Odpowiedź impulsowa szyny w odległości 400 m od wymuszenia. ....	65
Rys. 43 Widmo odpowiedzi impulsowej szyny w odległości 400 m od wymuszenia. ....	65
Rys. 44 Badania na stacji Opole. ....	66
Rys. 45 Długie okna obserwacji sygnałów drganiowych podczas zbliżania się i przejazdu pociągu pendolino (prędkość 160 km/h).....	67
Rys. 46 Widma sygnałów drganiowych podczas zbliżania się i przejazdu pociągu pendolino (prędkość 160 km/h). ....	67
Rys. 47 Zawężone okna obserwacji w chwili przejazdu pociągu pendolino oraz struktura częstotliwościowa drgań w trzech ortogonalnych osiach. ....	68
Rys. 48 Lokalizacja badań zasadniczych: przejazd kolejowy kat. D w Imielinie i kat. B w Chełmie Śląskim. ....	69
Rys. 49 Miejsca badań zasadniczych. ....	70
Rys. 50 Czujniki pomiarowe wykorzystywane podczas badań zasadniczych. ....	70
Rys. 51 Zarejestrowane sygnały przyspieszeń drgań oraz wyznaczone widma drgań (badania na stacji Chełm Śląski). ....	71
Rys. 52 Podział sygnału na 1-sekundowe okna czasowe ( 48-64 s). ....	74
Rys. 53 Widma FFT sygnałów w 1-sekundowych oknach (49-64 s). ....	75
Rys. 54 Rozkłady wartości estymatorów sygnałów drganiowych i miar statystycznych kolejnych okien analizowanego przebiegu, oś X. ....	76
Rys. 55 Rozkłady wartości estymatorów sygnałów drganiowych i miar statystycznych kolejnych okien analizowanego przebiegu, oś Y. ....	76
Rys. 56 Rozkłady wartości estymatorów sygnałów drganiowych i miar statystycznych kolejnych okien analizowanego przebiegu, oś Z. ....	77
Rys. 57 Porównanie widm FFT okien czasowych znacznie przed przejazdem pociągu i w chwili przejazdu na czujnikiem. ....	78
Rys. 58 Rozkłady wartości miar dynamiki we wszystkich oknach sygnału osi X,Y,Z. ....	79
Rys. 59 Rozkład wartości estymatorów drganiowych w kolejnych oknach sygnału: $\Delta RMS$ , $\Delta Peak$ , $\Delta p_{2p}$ (czwarty wykres przedstawia pozycję pociągu zaznaczoną synchronicznym impulsem drganiowym). ....	80
Rys. 60 Rozkłady wartości iloczynowych estymatorów sygnałów drganiowych i miar statystycznych kolejnych okien analizowanego przebiegu, osie XYZ. ....	81
Rys. 61 Rozkład wartości iloczynowej m <sub>dyn</sub> (osie XYZ). ....	81
Rys. 62 Rozkład iloczynowych miar przyrostowych (osie XYZ). ....	81
Rys. 63 Rozkłady wartości wybranych estymatorów dla kolejnych okien. ....	82
Rys. 64 Schemat badań z impulsem w odległości 400 m od stanowiska pomiarowego. ....	84
Rys. 65 Przykład rejestracji przejazdu pojazdu szynowego z uwzględnieniem znaczników lokalizacji pojazdu pierwszej i ostatniej osi.....	84
Rys. 66 Zarejestrowany przejazd pociągu ze znacznikami 400m, nad 1 osią i nad ostatnią osią. ....	85
Rys. 67 Zarejestrowane przebiegi drgań szyny w 3 ortogonalnych osiach, widma drgań szyny. ....	86
Rys. 68 1-sekundowe okna sygnału dla osi X. ....	87
Rys. 69 1-sekundowe okna sygnału dla osi Y. ....	87
Rys. 70 1-sekundowe okna sygnału dla osi Z. ....	88
Rys. 71 Widma 1-sekundowe okien sygnału dla osi X. ....	89
Rys. 72 Widma 1-sekundowe okien sygnału dla osi Y. ....	89
Rys. 73 Widma 1-sekundowe okien sygnału dla osi Z. ....	90
Rys. 74 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla kolejnych 1 sekundowych okien sygnału (pierwszy wiersz oś X, drugi wiersz oś Y). ....	91
Rys. 75 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla kolejnych 1 sekundowych okien sygnału osi Z. ....	91
Rys. 76 Rozkład wartości miary dynamiki dla 1-sekundowych okien sygnału. ....	92

Rys. 77 Rozkłady miar iloczynowych, górny – miary statystyczne, dolny – miary dynamiczne dla 1-sekundowych okien sygnału.....	92
Rys. 78 Zestawienie rozkładów wybranych miar dla 1-sekundowych okien. ....	93
Rys. 79 3-sekundowe okna sygnału dla osi X .....	94
Rys. 80 3-sekundowe okna sygnału dla osi Y .....	94
Rys. 81 3-sekundowe okna sygnału dla osi Z.....	94
Rys. 82 Widma 3-sekundowych okien sygnału dla osi X.....	95
Rys. 83 Widma 3-sekundowych okien sygnału dla osi Y.....	95
Rys. 84 Widma 3-sekundowych okien sygnału dla osi Z.....	95
Rys. 85 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla kolejnych 3-sekundowych okien sygnału (pierwszy wiersz oś X, drugi wiersz oś Y, trzeci wiersz oś Z).....	96
Rys. 86 Rozkład wartości miar dynamicznych dla 3-sekundowych okien sygnału.....	97
Rys. 87 Rozkłady miar iloczynowych dla 3-sekundowych okien sygnału: lewy – miary statystyczne, prawy – miary dynamiczne. ....	97
Rys. 88 Zestawienie rozkładów wybranych miar dla 3-sekundowych okien. ....	98
Rys. 89 5-sekundowe okna sygnału dla osi X. ....	99
Rys. 90 5-sekundowe okna sygnału dla osi Y. ....	99
Rys. 91 5-sekundowe okna sygnału dla osi Z.....	99
Rys. 92 Widma 5-sekundowych okien sygnału dla osi X.....	100
Rys. 93 Widma 5-sekundowych okien sygnału dla osi Y.....	100
Rys. 94 5-sekundowych okien sygnału dla osi Z.....	100
Rys. 95 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla kolejnych 5-sekundowych okien sygnału osi X.....	101
Rys. 96 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla 5-sekundowych okien sygnału osi Y. ....	101
Rys. 97 Rozkłady wartości analizowanych miar drganiowych dla 5-sekundowych okien sygnału osi Z. ....	101
Rys. 98 Wartości miar dynamicznych dla 5-sekundowych okien sygnału. ....	102
Rys. 99 Rozkłady miar iloczynowych dla 5-sekundowych okien sygnału: lewy – miary statystyczne, prawy – miary dynamiczne. ....	102
Rys. 100 Zestawienie rozkładów wybranych miar dla 5-sekundowych okien. ....	103
Rys. 101 Przykładowe okna predykcji (zielone) i amplitud maksymalnych (czerwone).....	106
Rys. 102 Przykładowe okna zidentyfikowanego najazdu pierwszej osi nad czujnik drgań (czerwona przerywana linia).....	107
Rys. 103 Przebieg sygnałów oraz widma drgań zarejestrowane w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h. ....	107
Rys. 104 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś X) , dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.....	108
Rys. 105 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś Y) , dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.....	108
Rys. 106 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś Z) , dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.....	109
Rys. 107 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś X) , dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.....	109
Rys. 108 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś Y) , dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.....	110
Rys. 109 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-35 (oś Z) , dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h.....	110
Rys. 110 Rozkład wartości skutecznej oraz rozkład wartości odchylenia standardowego drgań zarejestrowanych w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg towarowy – 18 węglarek, prędkość 40 km/h. ....	111
Rys. 111 Wartości miary dynamicznej (mdyn) dla kolejnych okien sygnału dla składu: pociąg towarowy z 18 wagonami typu węglarka, prędkość przejazdu 40 km/h. ....	111
Rys. 112 Wartości estymatorów drgań w osiach X, Y i Z (okna 1-18) zarejestrowane przed najazdem pociągu (okno 19). ....	112



Rys. 113 Przebieg drgań oraz widmo zarejestrowane w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg towarowy – 28 wagonów, prędkość 37-40 km/h.....	113
Rys. 114 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś X) , dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.....	113
Rys. 115 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś Y) , dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.....	114
Rys. 116 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś Z) , dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.....	114
Rys. 117 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś X) , dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.....	115
Rys. 118 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś Y) , dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.....	115
Rys. 119 Widma drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-51 (oś Z) , dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.....	116
Rys. 120 Rozkład wartości skutecznej oraz rozkład wartości odchylenia standardowego drgań zarejestrowanych w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.....	116
Rys. 121 Rozkład wartości miar dynamicznych (mdyn) dla kolejnych okien sygnału dla składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu 37-40 km/h.....	117
Rys. 122 Powiększone okna analizy estymatorów miar dynamicznych (mdyn) drgań w osiach X, Y i Z (okna 1-20) zarejestrowane przed najazdem pociągu (okno 21).....	117
Rys. 123 Przebieg drgań oraz widmo zarejestrowane w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.....	118
Rys. 124 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś X) , dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.....	118
Rys. 125 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś Y) , dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.....	119
Rys. 126 Przebieg drgań w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś Z) , dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.....	119
Rys. 127 Widma w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś X) , dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.....	120
Rys. 128 Widma w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś Y) , dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.....	120
Rys. 129 Widma w kolejnych oknach sygnału, okna 1-36 (oś Z) , dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.....	121
Rys. 130 Rozkład wartości skutecznej oraz rozkład wartości odchylenia standardowego drgań zarejestrowanych w 3 prostopadłych osiach, dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.....	121
Rys. 131 Rozkład wartości miar dynamicznych (mdyn) dla kolejnych okien sygnału dla składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu 38 km/h.....	121
Rys. 132 Wartości estymatorów miar dynamiki (mdyn) drgań w osiach X, Y i Z (okna 1-19) zarejestrowane przed najazdem pociągu (okno 20).....	122
Rys. 133 Estymatory punktowe drgań zarejestrowanych podczas przejazdu składu: pociąg towarowy z 18 wagonami typu węglarka, prędkość przejazdu - 40 km.....	124
Rys. 134 Estymatory punktowe drgań zarejestrowanych podczas przejazdu składu: pociąg towarowy z 28 wagonami, prędkość przejazdu – 44km.....	125
Rys. 135 Estymatory punktowe drgań zarejestrowanych podczas przejazdu składu: pociąg osobowy ELF-2, prędkość przejazdu – 40km.....	126
Rys. 136 Przebieg drgań zarejestrowanych w 3 prostopadłych osiach przed, w trakcie i po przejeździe składu kolejowego.....	137
Rys. 137 Przebieg drgań w kolejnych 3-sekundowych oknach analizy (przykładowe drgania dla osi X).....	138
Rys. 138a Rozkład wartości estymatorów drganiowych (miar detekcji) w kolejnych oknach analizy...	138
Rys. 139 Przebieg znormalizowanych wartości wybranych estymatorów sygnału – symulacja działania systemu detekcji.....	140
Rys. 140 Koncepcja systemu predykcji drganiowej zbliżającego się pojazdu szynowego.....	141

- Rys. 141 Przyrosty miary detekcji (E, czyli odchylenie standardowe drgań w osi y) – strzałką zieloną zaznaczono początek detekcji pojazdu szynowego, czerwoną – najazd pojazdu nad czujnikiem..... 142
- Rys. 142 Przyrosty miary detekcji (miara dynamiczna drgań w osi z) – strzałką zieloną zaznaczono początek detekcji pojazdu szynowego, czerwoną – najazd pojazdu nad czujnikiem ..... 142

## SPIS TABEL:

Tabela 1. Kategorie przejazdów kolejowych wg rozporządzenia z dnia 20 października 2015 r. ....	14
Tabela 2 Główne składowe częstotliwościowe. ....	59
Tabela 3 Specyfikacja systemów pomiarowych. ....	69
Tabela 4 Przykładowe zestawienie zarejestrowanych czasów i odległości detekcji 4 pojazdów szynowych (kolorem szarym zaznaczono pola z najlepszymi uzyskanymi wynikami) .....	104
Tabela 5 Wyniki analizy dla przykładowo wybranych 5 pociągów. ....	129
Tabela 6 Zbiorcze wartości analizy porównawczej wybranych estymatorów. ....	130
Tabela 7 Zestawienie wyników analizy statystycznej miar detekcji pojazdów szynowych w warunkach rzeczywistych w miejscowościach Opole, Chełm Śląski oraz Imielin. ....	131
Tabela 8 Zestawienie zarejestrowanych danych pojazdów szynowych poruszających się w przedziale prędkości od 5 do 20 km/h. ....	132
Tabela 9 Zestawienie zarejestrowanych danych pojazdów szynowych poruszających się w przedziale prędkości od 21 do 40 km/h. ....	132
Tabela 10 Zestawienie zarejestrowanych danych pojazdów szynowych poruszających się w przedziale prędkości od 41 do 60 km/h. ....	132
Tabela 11 Zestawienie zarejestrowanych danych pojazdów szynowych poruszających się w przedziale prędkości od 61 do 100 km/h.....	133
Tabela 12 Zestawienie zarejestrowanych danych pojazdów szynowych poruszających się z prędkością powyżej 101 km/h. ....	133
Tabela 13 Podsumowanie wyznaczonych czasów i odległości detekcji w 5 przedziałach prędkości. ....	133
Tabela 14 Zestawienie zarejestrowanych czasów oraz odległości detekcji pojazdów szynowych w podziale na cztery kategorie wagowe.....	134
Tabela 15 Zestawienie obliczonego odchylenia oraz mediany dla zarejestrowanych czasów detekcji pojazdów szynowych w podziale na cztery kategorie wagowe. ....	134
Tabela 16 Zestawienie zarejestrowanych czasów oraz odległości detekcji pojazdów szynowych poruszających w warunkach rzeczywistych dla trzech rodzajów warunków atmosferycznych. ..	135
Tabela 17 Zestawienie obliczonego odchylenia oraz mediany dla zarejestrowanych czasów detekcji pojazdów szynowych poruszających w warunkach rzeczywistych dla trzech rodzajów warunków atmosferycznych. ....	135