

## **Metodyka badań sygnałów wibroakustycznych do oceny stanu technicznego układu biegowego pojazdu szynowego**

*W artykule przedstawiono przebieg realizacji projektu badawczego dotyczącego wykorzystania generowanych w układzie biegowym pojazdu szynowego i przenoszonych przez styk koło-szyna sygnałów wibroakustycznych do oceny stanu technicznego tego układu. Przedstawiono wzajemne relacje między obszarami prac badawczych prowadzonych w ramach projektu. Opisane zostało specjalnie zbudowane stanowisko badawcze i zastosowana aparatura: laboratoryjna oraz specjalizowana, opracowana dla potrzeb projektu. Scharakteryzowany został model matematyczny układu wózek-tor, sposób symulowania uszkodzeń na obiekcie rzeczywistym oraz wstępne wyniki badań symulacyjnych i na stanowisku. Wymieniono metody przetwarzania sygnałów, przydatne do procesu uczenia się systemu rozpoznawania charakterystycznych cech sygnałów. Zapowiedziane zostały następne publikacje związane z opisanym projektem badawczym.*

### **1. Wprowadzenie**

Podstawowym podzespołem występującym w każdym pojeździe szynowym jest układ biegowy. We wszelkich typach pojazdów szynowych jego stan ma wyjątkowe znaczenie ze względu na bezpieczeństwo jazdy i trwałość torów, a w wagonach pasażerskich i pojazdach trakcyjnych także ze względu na komfort jazdy pasażerów i pracy maszynistów.

Aktualne tendencje technologiczne powodują, że nowoczesne pojazdy szynowe wyposażane są w układy biegowe z podzespołami na coraz wyższym poziomie technicznym, wymagającymi dla zapewnienia im wysokich współczynników gotowości technicznej, przeprowadzania obsługi opartej na obiektywnej diagnostyce. W wagonach problem ten jest szczególnie ważny ze względu na ich dużą liczbę, która wymaga aby procesy diagnostyczne były zautomatyzowane, a także by przeprowadzane były w ograniczonym czasie, np. podczas wolnego przejazdu przez stanowisko kontrolne [2]. Ideą przewodnią poszukiwania rozwiązań dla sformułowanej wyżej metody jest teza, że chwilowe naprężenia w szynach lub naciski kół na szynę (sygnały wibroakustyczne, powstające w wyniku wymuszenia dynamicznego na styku koła i szyny, generowane w układzie biegowym pojazdu szynowego w czasie ruchu nawet z niewielkimi prędkościami), niosą informacje o stanie technicznym tego układu biegowego [1].

Podstawowe obszary pracy przy realizacji takiego zadania badawczego są następujące:

- zbudowanie i zoptymalizowanie stanowiska pomiarowego w torze do badania obiektów rzeczywistych,
- zbudowanie i zoptymalizowanie stanowiska pomiarowego w torze do badania obiektów rzeczywistych,
- opracowanie matematycznego modelu układu wózek-tor, umożliwiającego uwzględnianie uszkodzeń w podzespołach i wykonanie serii badań symulacyjnych za pomocą tego modelu,
- wykonanie eksperymentów z wózkami z uszkodzonymi podzespołami i zarejestrowanie sygnałów aparaturą laboratoryjną,
- opracowanie i wykonanie dedykowanego układu pomiarowego rejestrującego i przetwarzającego sygnały generowane na styku koło-szyna,
- opracowanie metody analizy sygnałów i uczenia systemu rozpoznawania uszkodzeń w oparciu o charakterystyczne parametry sygnałów wibroakustycznych.

Wzajemne relacje funkcjonalne i czasowe między ww. zadaniami przedstawiają się następująco.

Konieczność przeprowadzania eksperymentów na specjalnie zaprojektowanym i przystosowanym stanowisku potwierdzona została wynikami badań poligonowych wykonywanych wstępnie na przypadkowym torze.

Stanowisko takie zostało zbudowane w kolejnym etapie projektu i wykonano już na nim szereg eksperymentów wstępnych. Ich wyniki pozwoliły zweryfikować model matematyczny i program do symulacji komputerowej.

Badania symulacyjne pozwoliły ocenić warunki brzegowe, w jakich mieszczą się sygnały uzyskiwane z podzespołów układu biegowego, pobudzonych sztucznym wymuszeniem, przekazywane przez styk koło-szyna do pomiarowych czujników przyspieszeń zamocowanych w szynie. Pozwoliło to na dobranie odpowiedniej aparatury laboratoryjnej do badań poligonowych i wyznaczenie kierunków poszukiwania rozwiązań tzw. dedykowanych narzędzi pomiarowych.

W najbliższej przyszłości, po zweryfikowaniu modelu, pozwolą one na generowanie matematycznych sygnałów odpowiadających szerokiej gamie uszkodzeń. Materiał ten będzie podstawą uczenia systemu diagnostycznego w oparciu o sztuczną sieć neuronową. Metoda ta pozwoli na zaoszczędzenie czasu i środków potrzebnych do zbierania odpowiednich danych i ich katalogowanie.

## 2. Cechy stanowiska badawczego

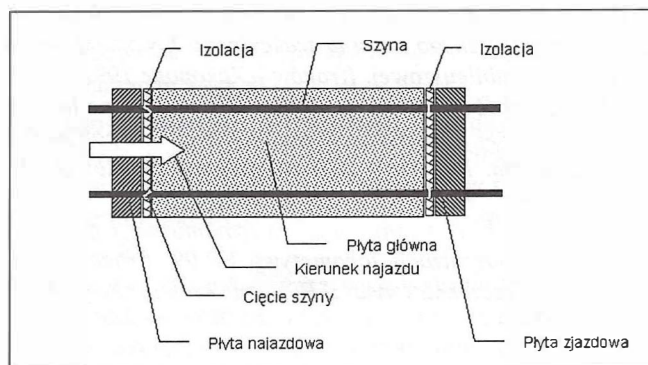
Dla uzyskania odpowiednich sygnałów z obiektów rzeczywistych konieczne było przygotowanie specjalnego stanowiska pomiarowego w torze i wykonanie na nim cyklu badań według wcześniej opracowanego programu prób.

Stanowisko badawcze posiada szereg cech umożliwiających uzyskanie użytecznych sygnałów z układu wózek-szyna. Dla niezależnienia się od sygnałów tła, generowanych przez pracujące w sąsiedztwie maszyny i urządzenia, konieczne było odpowiednie przygotowanie szyn. Generującą zakłócające sygnały maszyną jest lokomotywa ciągnąca wagony dla potrzeb eksperymentu, a urządzeniem nawet sąsiedni wózek. Odcinek toru (z możliwością najazdu z jednego kierunku) musiał zostać maksymalnie wyizolowany. Ze względu na przenoszenie drgań wymagana izolacyjność dotyczy obu odcinków szyn. Praktycznie można to zrealizować przez odpowiednie przecięcie toku szyn. Brak oddziaływania zestawów kołowych następnego wagonu na odcinek pomiarowy zapewnia szczelina między szyną najazdową i pomiarową, a brak oddziaływania zestawów kołowych, które już minęły odcinek pomiarowy, zapewnia szczelina między szyną pomiarową a zjazdową.

Ogólny plan takiego stanowiska przedstawiono na rys. 1.

Poziom szyn na odcinku najazdowym i pomiarowym musi być stała, niezależnie od nacisku wagonu. Wykluczona musi być możliwość uderzania koła w szynę pomiarową w wyniku chwilowego niższego położenia szyny najazdowej w wyniku ugięcia samej szyny lub zagłębienia podkładu w gruncie. Można to zrealizować przez ukośne cięcie szyny najazdowej i pomiarowej pod kątem 45° oraz posadawiając szyny na odpowiednio dobranych płytach betonowych.

Położenie szyny pomiarowej na podkładach musi być stałe, bez tendencji do wzdłużnego przesuwania. Praktycznie zrealizowano to stosując odpowiednie mocowania szyn do podkładów. Przesunięcia podkładów zostało uniemożliwione przez ich odpowiednie zagłębienie w płycie.



Rys. 1. Plan ogólny stanowiska pomiarowego

Wymuszenie drgań w układzie biegowym uzyskiwano w wyniku spadnięcia koła z odpowiednio dobranego klina. Alternatywnym rozwiązaniem było naklejanie blaszki o grubości 2 mm na obwodzie koła. Sposób okazał się niepraktyczny, jednak wyniki prób pozwoliły rozszerzyć materiał wyjściowy do wstępnych wniosków.

Układ pomiarowy musi zapewnić stałość warunków pomiarowych w trakcie całego cyklu badań (liczonych w setkach powtarzanych przejazdów). Dotyczy to niezmiennego kształtu szczelin między odcinkami szyny (minimalizujących oddziaływanie na układ biegowy) oraz klina pobudzającego układ do drgań.

W torze pomiarowym jako układ automatycznego wyzwalań rejestracji przejazdu został zabudowany czujnik położenia osi typu indukcyjnego z układem przetwarzającym, opracowany w OBRPS w Poznaniu.

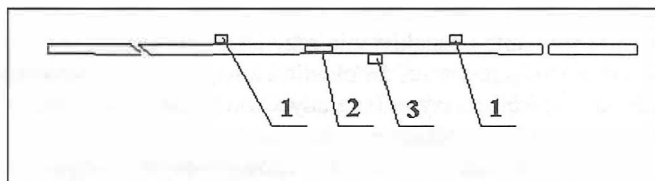
Konstrukcja klina zapewniła z jednej strony pewne i stałe jego położenie na szynie w czasie wielu cykli przejazdów, a z drugiej ze względu na zakładane jednokierunkowe najazdy dla rejestracji, zapewniała również możliwość usunięcia klina przy cofaniu składu badanego pociągu.

Długość odcinka pomiarowego dobrano tak, by zapewnić spełnienie kilku warunków równocześnie. Przyjęto następujące ograniczenia dla długości odcinka pomiarowego:

- minimum to  $500 + 300 + 500 = 1300$  mm, co zapewni zmieszczenie klina pobudzającego, czujników wykrywających osie i okna pomiarowego,
- maksimum to najmniejsza odległość między osiami zestawów kołowych jednego wózka badanego pojazdu (dla przewidywanych wagonów to 1700 mm), ponieważ rejestracją drgań należy zakończyć przed wjazdem następnej osi na odcinek pomiarowy.

Automatycznie uruchamiana rejestracja drgań, wymuszonych przez kolejny zestaw kołowy, odbywa się wtedy w powtarzalnych warunkach.

Rozmieszczenie elementów zabudowanych w szynie pomiarowej (na odcinku między cięciami pokazanymi na rys. 1) przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Rozmieszczenie elementów szyny pomiarowej  
1 - indukcyjne czujniki połączenia (w odległości  $\Delta l = 111$  cm), 2 - klin najazdowy, 3 - czujnik przyspieszeń drgań

### 3. Matematyczny model układu wózek – tor

Model fizyczny pojazdu został opracowany dla węglarki typu 415W z wózkami dwuosioowymi 25TNa. Jest to wagon do przewozu ciężkich ładunków z prędkością 100÷120 km/h. Dla opracowania kompletnego modelu matematycznego tego wagonu konieczne było przygotowanie szeregu dodatkowych modeli elementów łączących: zespołu usprężynowania I stopnia i prowadzenia zestawów kołowych w ramie wózka oraz układu oparcia nadwozia za pośrednictwem ślizgów bocznych. Całość modelu uzupełnia wielo-masowy model zestawu kołowego i toru [4].

Obliczenia zostały wykonane za pomocą programu komputerowego opartego o amerykański system symulacyjny ACSL (ver. 11.0). Umożliwia on całkowanie równań różniczkowych, parametrów drgań własnych i przenoszonych. Zawiera on także bloki programowe generujące układy równań ruchu, umożliwiające wykonanie analiz dynamicznych obiektu.

System umożliwia także dołączanie własnych bibliotek elementów konstrukcyjnych i struktur całych podzespołów przygotowanych w języku FORTRAN 77 lub C.

Program zawiera dodatkowe bloki programowe służące do przygotowania zbiorów wejściowych i przetwarzania wyników, programy do przygotowania zbiorów stochastycznych wymuszeń torowych oraz do opracowania funkcji profilowych kół i szyn oraz współczynników tarcia kół po szynach. Zawiera także podprogramy przetwarzające zbiory wyników w grafikę prezentacyjną, tj. rysujące krzywe pierwiastkowe na podstawie ciągów wartości własnych oraz programy rysujące wykresy wskazówkowe dla postaci drgań własnych na podstawie zbioru wektorów własnych.

Model został sprawdzony, najpierw formalnie a następnie przeprowadzono analizą liniową. Uzyskane wyniki potwierdziły prawidłowość zachowania modelu podczas takich zjawisk jak podskakiwanie i kołysanie nadwozia i wężykowanie wózków.

### 4. Przebieg prób i badań

W oparciu o zebrane doświadczenia został opracowany program wstępnych prób i badań [7]. W programie tym zawarte były zarówno opisy kolejnych eksperymentów, jak i wymagania dotyczące aparatury pomiarowej oraz sposób przygotowania obiektu do prób. Program był podstawą przeprowadzonej serii badań wstępnych.

Badania odbywały się w następującej kolejności:

- a) badania laboratoryjne; rejestracja drgań zastępczego elementu pobudzonego uderzeniem, częściowo z wykorzystaniem obu systemów pomiarowych, co pozwoliło na przetestowanie i rozpoznanie możliwości stosowanych systemów pomiarowych,
- b) badania poligonowe; po opracowaniu wyników testów potwierdzających prawidłowość doboru opcji stosowanego układu pomiarowego i podatność formy wyników na obróbkę wybranymi metodami matematycznymi.

Badania na odcinku toru pomiarowego w pierwszej kolejności dotyczyły:

- poziomu tła,
- poziomu drgań w szynie przy pustym odcinku pomiarowym (pochodzących od przygotowanych do jazdy pojazdów stojących oraz jadących przed tym odcinkiem),

- poziomu drgań w szynie pochodzących od pojazdów jadących za odcinkiem pomiarowym (przy pustym już odcinku pomiarowym),
- sygnału odniesienia dla prawidłowego stanu układu biegowego.

Konieczna była ocena wpływu następujących czynników na parametry sygnału:

- prędkości najazdu wagonu,
- stanu następnego wózka,
- symetrii układu (zgodne i przeciwległe położenie uszkodzenia w stosunku do szyny z zamocowanymi czujnikami pomiarowymi),
- odległości między elementami i wymiarami elementów układu pomiarowego (szczelina, klin, czujnik położenia, początek i koniec okna pomiarowego).

Przed każdymi badaniami ustalany był zakres badań i przygotowywana była możliwość ich technicznej realizacji (elementy do symulacji uszkodzeń, narzędzia).

Po opracowaniu wyników tych badań nastąpiło:

- porównanie z wynikami badań modelowych,
- ocena przydatności do obróbki metodami matematycznymi,
- wykonanie sprawozdania z badań wstępnych z sugestiami dotyczącymi realizacji następnego etapu, tzn. rejestracji sygnałów z obiektu rzeczywistego z symulowanymi uszkodzeniami.

W następnych etapach badań poligonowych przewiduje się przeprowadzić następujące eksperymenty:

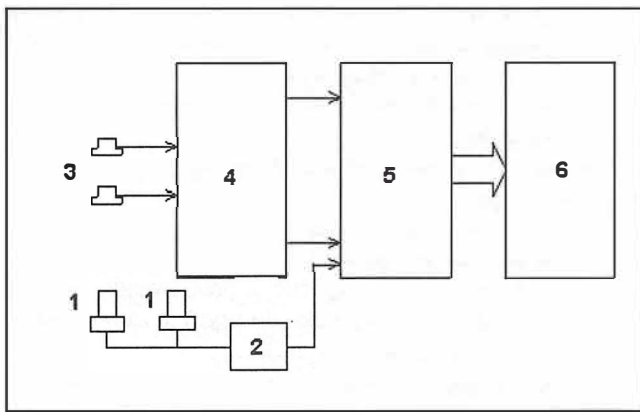
- poszerzony cykl badań symulacyjnych (za pomocą modelu matematycznego) z typowymi uszkodzeniami układu biegowego,
- cykl badań poligonowych z obiektem rzeczywistym, z takimi samymi uszkodzeniami układu biegowego jak w badaniach symulacyjnych,
- porównanie wyników i wykorzystanie ich w dalszych pracach przy sieciach neuronowych.

Podczas badań poligonowych na bieżąco będą wykonywane analizy wstępne i oceny uzyskiwanych wyników pod kątem ich przydatności do tworzenia sieci neuronowych w oparciu o zbiory tych sygnałów.

### 5. Charakterystyka narzędzi pomiarowych

#### 5.1. Aparatura laboratoryjna

Rejestracja sygnałów na styku koło-szyna, generowanych przez badany układ biegowy, odbywała się niezależnie dwoma układami pomiarowymi. W pierwszej kolejności stosowano specjalizowaną aparaturę laboratoryjną będącą na wyposażeniu OBRPS [6]. Na podstawie wyników analiz i testów zdecydowano się stosować do badań konfigurację układu przedstawioną na rys. 3.



Rys. 3. Zestaw aparatury laboratoryjnej  
 1 – indukcyjne czujniki położenia osi, 2 – układ dopasowujący,  
 3 – przetwornik przyspieszeń, 4 – wzmacniacz pomiarowy,  
 5 – rejestrator, 6 – notebook

Podstawowe dane zastosowanej aparatury pomiarowo-kontrolnej przedstawiono poniżej.

- 1) Indukcyjny czujnik położenia osi (typ fabryczny CPI-1); opracowany i produkowany w OBRPS, napięcie zasilania 24 V, temperatura pracy  $-35 \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$ , dokładność  $\pm 2 \text{ cm}$ . Zadaniem pierwszego czujnika jest generowanie precyzyjnego i powtarzalnego sygnału o zbliżeniu się osi wózka do czujnika przyspieszeń. Przy stałej znanej odległości między czujnikami możliwe jest precyzyjne określenie prędkości wózka podczas przejazdu przez okno pomiarowe.
- 2) Układ dopasowujący; został on opracowany i wykonany dla potrzeb realizowanego projektu badawczego. Zadaniem układu jest wytworzenie impulsu otwierającego okno pomiarowe w układzie rejestrującym. Czas otwarcia okna pomiarowego dobierany był pozycją przełączników rejestratora.
- 3) Piezoelektryczne przetworniki przyspieszeń typu 4391-Delta Tron f-my Bruel&Kjaer; zakresy częstotliwości  $0.3 \div 18 \text{ kHz}$ , przyspieszeń  $0.02 \div 7500 \text{ m/s}^2$ .
- 4) Wzmacniacz normalizacyjny NEXUS 2693 f-my Bruel&Kjaer; czułość pomiarowa  $100 \mu\text{V} \div 31.6 \text{ V}$  na  $1 \text{ m/s}^2$ , z filtrem środkowo-przepustowym z zakresem dolnych częstotliwości: 0.1, 1, 10 Hz oraz górnych: 0.1, 1, 3, 10, 22.4 i 30 kHz.
- 5) 16-kanałowy elektroniczny rejestrator typu TA 11 f-my Gould Instrument System; przeznaczony do akwizycji danych oraz wizualizacji wyników na taśmie papierowej bezpośrednio po rejestracji. Umożliwia w każdej sekundzie pomiar i rejestrację łącznie 125000 próbek (razem na wszystkie kanały pomiarowe), a także eksportowanie plików źródłowych do komputera osobistego za pomocą interfejsu GPIB (wg IEEE488).
- 6) Notebook typu Contura Aero 4/33C f-my Compaq; wyposażony w wymagane dla akwizycji plików źródłowych złącze przesyłowe GPIB, z programami f-my Gould Instrument System: jeden pod nazwą ACQUIRE-TA do zdalnej obsługi, zapisywania i przechowywania danych oraz drugi VIEW II do uproszczonej analizy i wizualizacji nagranych sygnałów.

## 5.2. Narzędzia dedykowane

Jednym z celów projektu badawczego jest opracowanie dedykowanych narzędzi pomiarowych, przy wstępnym założeniu, że specjalizowana aparatura będzie wykorzystana tylko w pierwszych etapach prac do ustalenia charakterystyki sygnałów oraz do zweryfikowania wyników uzyskiwanych za pomocą nowych narzędzi.

W pierwszym etapie badań wykorzystywano laboratoryjną aparaturę pomiarową z czujnikami piezoelektrycznymi. W wyniku poszukiwań niezawodnych konstrukcji o najwyższych parametrach użytkowych, najnowsza generacji czujników piezoelektrycznych cechuje się następującymi zaletami:

- duży zakres mierzonych przyspieszeń (do 6 rzędów),
- odporność na warunki zewnętrzne, szczególnie na ekstremalne temperatury,
- szerokie pasmo przenoszonych sygnałów (poniżej 1 Hz do 10 kHz),
- małe wymiary,

Wadami tych czujników są:

- wysoka cena samego czujnika jak i wymaganych dodatkowych wzmacniaczy ładunku,
- ograniczenie pasma od dołu ze względu na brak składowej stałej w sygnale.

Te wady uzasadniają poszukiwanie innych czujników, tańszych ze względu na przewidywanie wdrożenie metody diagnostycznej, która będzie opierała się na uzyskanych wynikach.

W ostatnim okresie atrakcyjne cenowo stały się najnowszej generacji czujniki pojemnościowe o bardzo dobrych parametrach, dzięki nowej technologii iMEMS® (*integrated micro-machined electromechanical system*) f-my Analog Devices. W ramach prezentowanego projektu opracowano i wykonano kompleksowy układ pomiarowy zawierający przetwornik z dwuosiowym czujnikiem pojemnościowym serii ADXL250 zintegrowanym z modulatorem, demodulatorem i wzmacniaczem wyjściowym, a także oprogramowanie i układ przetwarzania i archiwizowania danych oparty na mikroprocesorze sygnałowym, co zapewni spełnienie wymagań zarówno w odniesieniu do szybkości i dokładności przetwarzania oraz sprawnego archiwizowania wyników.

Czujniki pojemnościowe wykonane w tej technologii charakteryzują się szeregiem istotnych zalet:

- małymi wymiarami i masą,
- możliwością mierzenia przyspieszeń o stałych wartościach niezmiennych podczas pomiaru, co umożliwia kalibrację układu za pomocą znanej wartości grawitacji,
- odpornością na zmianę temperatur (przy  $-40 \div 85 \text{ }^\circ\text{C}$  tylko 1% zmiana czułości),
- zakresem pomiarowym do 50 g z 0.2% nieliniowością.

Istotne znaczenie dla charakterystyki przetwornika ma sposób mocowania czujnika na płytce drukowanej przetwornika. W miarę bardziej zaawansowanego sposobu mocowania (samo lutowanie, lutowanie z klejeniem, lutowanie z klejeniem i wypełnianie pastą parafinową) następuje poprawianie charakterystyki czułości w funkcji częstotliwości, w wyniku prawie dwukrotnego wydłużenia liniowej części tej charakterystyki.

Po wykonanych testach laboratoryjnych i próbach na stanowisku badawczym przystąpiono do realizacji drugiej, zoptymalizowanej wersji układu pomiarowego. Dotyczyć ona

będzie zarówno samego przetwornika akcelerometrycznego, jak i oprogramowania systemu.

## 6. Symulowanie uszkodzeń na obiekcie rzeczywistym

W ramach prac badawczych wykonano analizę konstrukcji wagonów, których wykorzystanie do badań poligonowych było najłatwiejsze ze względów organizacyjnych. Zaprezentowane poniżej zestawienie uszkodzeń zespołów i elementów układu biegowego wózka 25TNa ma posłużyć do opracowania katalogu typowych uszkodzeń i odpowiadającym im wartościom drgań lub przyspieszeń (pionowych i poprzecznych) uzyskanych podczas przejazdu pojazdy przez odcinek toru doświadczalnego.

Katalog ten, po weryfikacji i uszczegółowieniu matematycznego modelu pojazdu, będzie w końcowym etapie projektu podstawą do diagnozowania stanu układu biegowego pojazdu.

W praktyce objawy typowego uszkodzenia układu biegowego wagonu typu 415W można symulować w następujący sposób [5]:

- a) w sprężynach usprężynowania I stopnia przez:
  - zdemontowanie sprężyny lub sprężyn wewnętrznych lub zewnętrznych,
  - zablokowanie każdego kompletu sprężyn,
- b) w tłumikach tarciovych przez zdemontowanie:
  - grzybka tłumika (lub tłumików),
  - wkładek ślizgu dla zwiększenia luzu wzdłużnego,
  - ogniwka (lub ogniwek),
- c) w układzie oparcia nadwozia w efekcie:
  - zdemontowania sprężyny (lub sprężyn) ślizgu bocznego,
  - zablokowania sprężyny (lub sprężyn) ślizgu bocznego,
  - zdemontowania wkładki ślizgowej ślizgu bocznego.

Przeprowadzenie ww. prac wymaga zaplecza naprawczego, m. in. suwnicy w celu podniesienia pudła wagonu i wyotczenia wózka.

## 7. Wstępne wyniki badań

### 7.1. Badania symulacyjne

Wyniki symulacji komputerowej przejazdu wagonu przez klin zamocowany do szyny (nie symulowano przejazdu przez blaszkę), przeprowadzonej na modelu opisanym w rozdz. 3, przedstawiono na rys. 4 i 5.

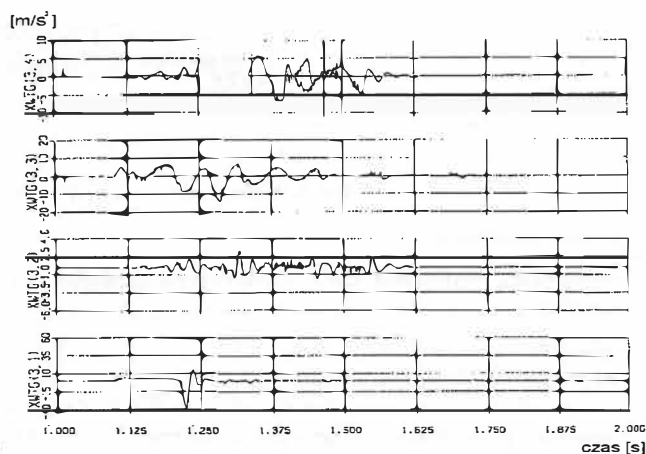
Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi przyspieszeń w osi „z” dla podłogi, kolejno od góry w środku nadwozia i nad przednim wózkiem oraz dla środka ramy wózka tylnego i przedniego.

Na rysunku 5 zamieszczono przebiegi sił pionowych w szynie pod kołami pierwszego wózka (indeksy nieparzyste odpowiadają kołom prawym).

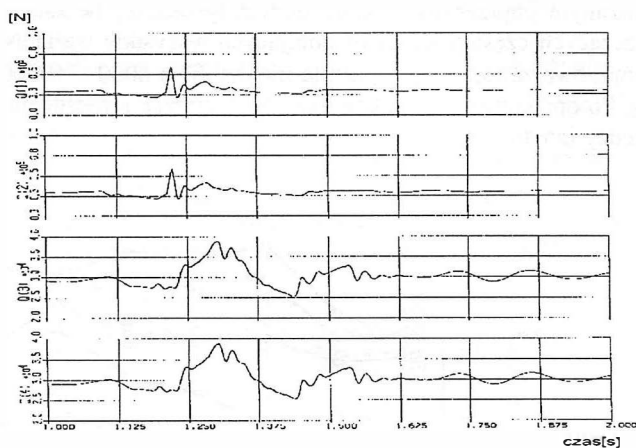
Zjazd wózka wagonu z klina wywołał drgania pionowe koła i szyny silnie tłumione (w modelu elementy te kontaktują się ze sobą na sztywno) o czasookresie ok. 0.028 s (częstotliwość 35.6 Hz) i drgania pionowe ramy wózka słabo tłumione o czasookresie ok. 0.055 s (częstotliwość 17.8 Hz). Drgania koła są formą wyraźnie jednoczęstotliwościową, a drgania ramy wózka formą wypadkową z kilku częstotliwości z dominującą jedną częstotliwością. Poziom przyspieszeń zarówno

na kole (ok. 35 m/s<sup>2</sup>) jak i ramie wózka (ok. 13 m/s<sup>2</sup>) jest dostatecznie wysoki by znać celowość dalszych analiz za pomocą właśnie takiego modelu.

Wyniki symulacji przejazdu przez klin wskazały, że zastosowane w badaniach doświadczalnych akcelerometry nie muszą posiadać maksymalnego zakresu pomiarowego na poziomie kilku tysięcy m/s<sup>2</sup> i pasma przenoszenia częstotliwości powyżej 1 kHz. Jeżeli jednak analiza wyników badań poligonowych wykaże, że wyniki w paśmie 100 Hz ÷ 1 kHz mają istotne znaczenia dla oceny stanu układu biegowego pojazdu, to nie będzie uzasadnione ograniczenie zakresu pomiarowego przyspieszeń. Wówczas będzie również konieczna rozbudowa modelu, szczególnie w zakresie podzespołu zestaw kołowy - tor z uwzględnieniem drgań o wysokich częstotliwościach, które pochodzą od zginania szyn, wyginania tarcz kół i osi zestawów kołowych, a także od deformacji kontaktowej koło - szyna.



Rys. 4. Przyspieszenia elementów wagonu (opis w tekście)

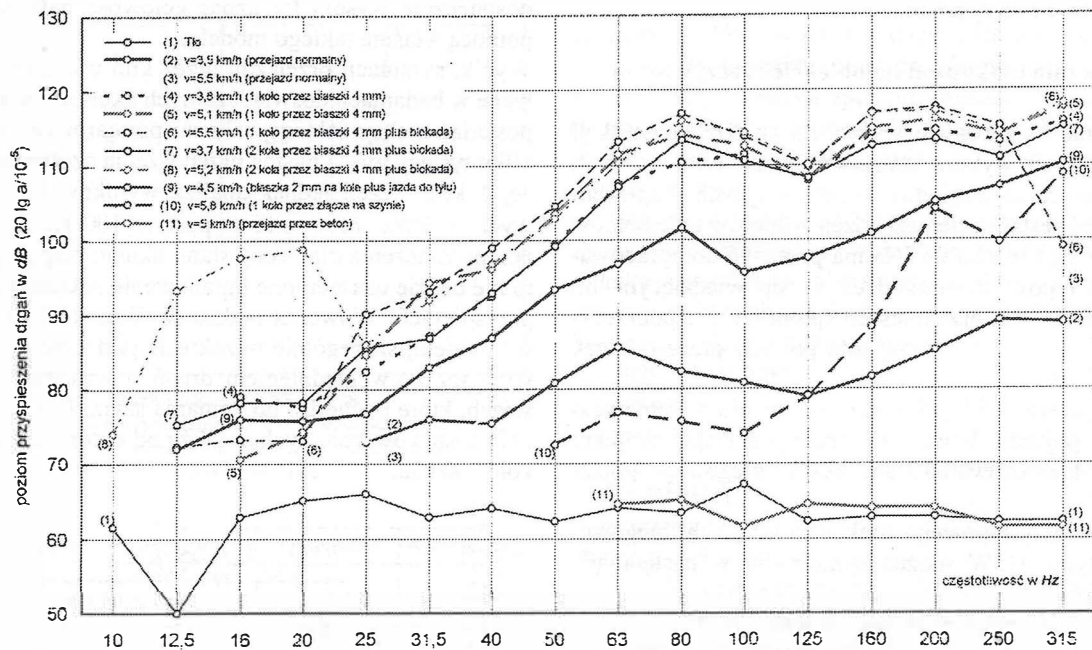


Rys. 5. Siły pionowe w szynie (opis w tekście)

### 7.2. Badania poligonowe

Podczas przejazdu wagonu zostały zmierzone i zarejestrowane największe wartości przyspieszenia drgań w pasmach tercjowych. Zarejestrowane w pamięci wewnętrznej analizatora wyniki posłużyły do odczytu z ekranu (przy użyciu kursora) wartości przyspieszeń dla kolejnych pasm tercjowych, które zamieszczono w tabelach roboczych.

Na rys. 6 (dla 10÷315 Hz) i 7 (dla 0.4÷10 kHz) przedstawiono opracowane ww. metodą przebiegi przyspieszeń w szynie dla drgań w kierunku pionowym.



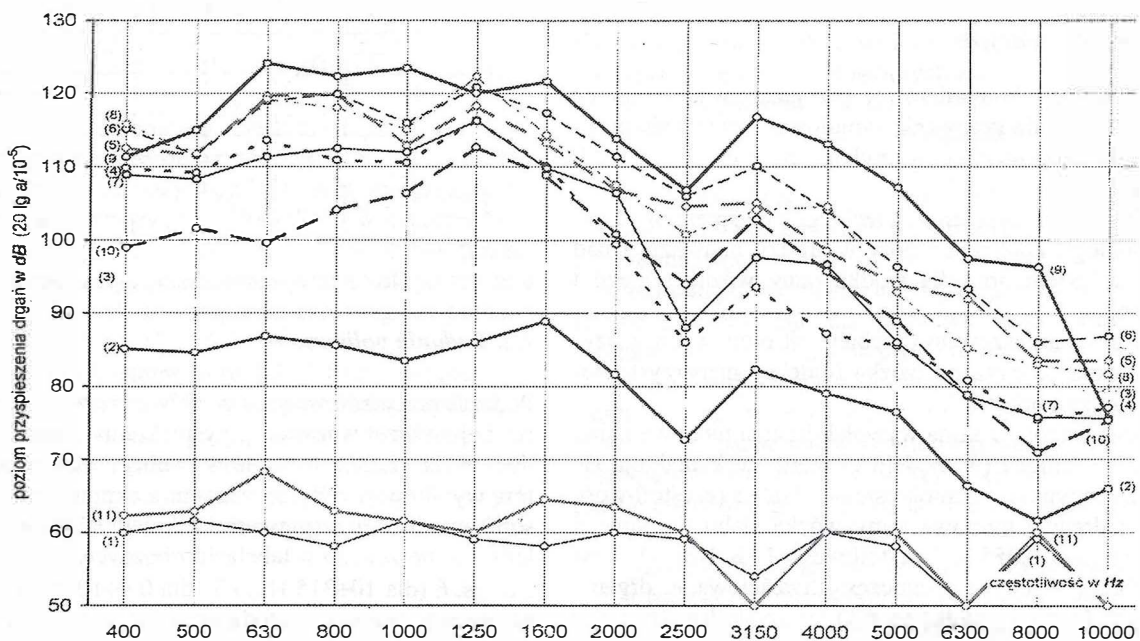
Rys. 6. Wartości skuteczne przyspieszeń pionowych w szynie (dolny zakres częstotliwości)

Dla tych drgań stwierdzono, że:

- największa zmierzona wartość skuteczna przyspieszenia wyniosła  $31 \text{ m/s}^2$  (charakterystyka liniowa), która wystąpiła podczas przejazdu z prędkością  $V = 4 \div 5 \text{ km/h}$  z naklejoną na kole blaszką o grubości 2 mm,
- zakres znaczących częstotliwości obejmujących wszystkie warianty pomiarowe zawiera się w paśmie między  $50 \div 63$  a  $5000 \div 8000 \text{ Hz}$ .

Ponadto opracowano charakterystyki dla drgań w kierunku poziomym poprzecznym, które pozwoliły ustalić, że zakres znaczących częstotliwości obejmujących wszystkie warianty pomiarowe zawiera się w paśmie między  $63$  a  $8000 \div 10000 \text{ Hz}$ . Po opracowaniu wyników badań wstępnych stwierdzono między innymi, że:

- pomiar bardzo niskich poziomów przyspieszenia jest skażony szumami tła i układu pomiarowego (wzmacniacza i kabli),
- przy takich wymuszeniach, jakie wystąpiły podczas wykonanych już badań wstępnych, w kolejnych badaniach aparatura pomiarowa powinna zapewnić pomiar amplitudy (wartość maksymalna)  $50 \div 100 \text{ m/s}^2$  w paśmie częstotliwości  $10 \text{ Hz}$  do  $12 \div 15 \text{ kHz}$ , co umożliwi rejestrowanie całego spektrum możliwych do uzyskania częstotliwości, a następnie za pomocą filtrów przeszukiwanie całego zakresu tych częstotliwości i ustalenie użytecznego dla celów diagnostycznych zakresu,



Rys. 7. Wartości skuteczne przyspieszeń pionowych w szynie (górny zakres częstotliwości) (legenda jak dla rys. 6)

- filtrowanie przebiegów powinno zapewnić przeszukanie całego zakresu rejestrowanych częstotliwości, choć z dużym prawdopodobieństwem można założyć, na podstawie analizy wyników wstępnych, że najbardziej „zasobne” w poszukiwane informacje diagnostyczne jest pasmo ok. 1 ÷ ok. 100 Hz.
- przetwarzanie obrazu sygnałów z badań stanowiskowych będzie realizowane takimi metodami, które pozwolą uzyskać końcową postać sygnałów łatwo porównywalną do obrazu uzyskanego na podstawie badań symulacyjnych.

## 8. Metoda uczenia się maszyn dla celów diagnostycznych

Przetwarzanie otrzymywanych sygnałów będzie dwuetapowe. W pierwszym etapie następowalaby ekstrakcja istotnych cech, a w drugim na podstawie rozpoznanych cech, podjęta zostałaby decyzja o zakwalifikowaniu otrzymanego obrazu do grupy odpowiadającej uszkodzeniom lub do grupy obrazów prawidłowych.

Dla pierwszego etapu właściwymi narzędziami są algorytmy transformacji sygnałów metodami cyfrowymi (np. FFT – *fast Fourier transform* lub podobne) oraz inne algorytmy powstałe podczas uczenia systemu pomiarowego.

W drugim etapie właściwymi algorytmami będą warstwowe sieci neuronowe lub procesy wnioskowania rozmytego powstałe podczas procesów uczenia. Przydatne w diagnozowaniu niektórych typów uszkodzeń w pojazdach szynowych mogłyby być także tzw. odwrotne modele diagnostyczne [3].

Algorytmy w pierwszym etapie przetwarzania realizowane są w dedykowanym układzie pomiarowym wykorzystującym procesory sygnałowe. Prace związane z drugim etapem przetwarzania wymagają bardzo szybkiego i pojemnego (min. 8.3 GB) komputera z zainstalowanym systemem operacyjnym LINUX.

Wstępna analiza przetworzonych sygnałów wskazuje, że tylko niektóre uszkodzenia układu biegowego dają wyraźny i łatwo rozróżnialny sygnał wibroakustyczny na styku szynakoło. Trudne do diagnozowania mogą być np. wstępne uszkodzenia struktury poprzedzające pęknięcia lub nawet same pęknięcia.

Istotnym elementem systemu uczącego się jest zweryfikowany, dokładny model matematyczny układu wózek-szyna. Sam model oraz wyniki symulacji uszkodzeń będą źródłem obrazów dla systemów uczących się, a także podstawą budowy algorytmów diagnostycznych.

## 9. Podsumowanie

Przedstawiony w artykule materiał opisuje zastosowane procedury badawcze, wstępne wyniki i wnioski związane z realizacją projektu badawczego nr 9 T12C 017 15 pt. *Wybór sygnałów wibroakustycznych oraz metod ich przetwarzania i analizowania dla oceny stanu technicznego układu biegowego pojazdów szynowych*, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych. Związany jest on z próbami wykorzystania sygnałów wibroakustycznych powstających na styku koło-szyna do oceny stanu technicznego układu biegowego pojazdu szynowego.

Aktualnie trwają prace realizowane w oparciu o programy i ustalone na podstawie etapów wstępnych procedury, do opracowania których wykorzystano przedstawione powyżej wyniki wstępne. Szczególny wysiłek zostanie podjęty dla wdrożenia procesów uczących z wykorzystaniem sieci neuronowych.

Wyniki następnych etapów badawczych wykonywanych w ramach ww. projektu będą publikowane w kolejnych numerach kwartalnika „Pojazdy Szynowe”, a także na Konferencji Naukowo-Technicznej „Pojazdy Szynowe – 2000”.

## Bibliografia

- [1] Durzyński Z.: *Koncepcja diagnozowania układów biegowych pojazdów szynowych za pomocą sygnałów wibroakustycznych*. *Pojazdy Szynowe* nr 2/98
- [2] Marciniak Z., Pawlak Z.: *Układ biegowy pojazdu szynowego jako obiekt diagnozowania dynamicznego*. *Pojazdy Szynowe* nr 4/99
- [3] OR-8107. *Metody pomiarów i przetwarzania sygnałów wibroakustycznych*. OBRPS. Poznań 1998
- [4] OR-8133. *Opracowanie modelu układu tor-wózek do symulacyjnych badań wibroakustycznych*. OBRPS. Poznań 1999
- [5] OR-8140. *Analiza możliwości technicznych symulowania uszkodzeń układu biegowego na obiekcie rzeczywistym*. OBRPS. Poznań 1999
- [6] OR-8150. *Układ pomiarowy do badań stanowiskowych*. OBRPS. Poznań 1999
- [7] OR-8154. *Program prób i badań układu biegowego za pomocą sygnałów wibroakustycznych*. Cz. I. OBRPS. Poznań 1999