

AUTOREFERAT

Przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych
wynikający z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r.
o stopniach naukowych i tytule naukowym

dr inż. Bartosz FIRLIK

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Transportu
Instytut Silników Spalinowych i Transportu

Poznań 2019

1. Imię i Nazwisko:

Bartosz Firlik

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:

2008 Stopień doktora nauk technicznych

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Praca doktorska pt.: „Wpływ stanu zużycia profili szyn oraz geometrii toru na bezpieczeństwo jazdy lekkiego pojazdu szynowego”, obroniona 17.07.2008 na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej (promotor: prof. Andrzej Chudzikiewicz, Politechnika Warszawska).

2003 Tytuł zawodowy magistra inżyniera

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, kierunek Mechanika, specjalność Pojazdy Transportu Masowego

Praca magisterska pt.: „Dynamika pojazdu szynowego w płaszczyźnie poziomej z wykorzystaniem programu MATLAB”, obroniona 1.09.2003 na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej z wynikiem **bardzo dobrym** (promotor: prof. Tadeusz Piechowiak, Politechnika Poznańska)

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych:

2009 – 2019 Adiunkt (Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Pojazdów Szynowych)

2008 – 2009 Asystent (Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Zakład Pojazdów Szynowych)

4. Wskazanie osiągnięcia¹ wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

**Analiza i ocena dynamiki układu lekki pojazd szynowy – tor
w warunkach rzeczywistej eksploatacji**

¹ W przypadku, gdy osiągnięciem tym jest praca/ prace wspólne, należy przedstawić oświadczenia wszystkich jej współautorów, określające indywidualny wkład każdego z nich w jej powstanie. W przypadku, gdy praca zbiorowa ma więcej niż pięciu współautorów, habilitant załącza oświadczenie określające jego indywidualny wkład w powstanie tej pracy oraz oświadczenia co najmniej czterech pozostałych współautorów.

4.2. Lista prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

- [1] Firlik B., Staśkiewicz T., Jaśkowski W., Wittenbeck L., 2019, **Optimization of a tram wheel profile using biologically inspired algorithm**, *Wear*, Volumes 430-431 (2019), s. 12-24 (35 pkt. MNiSW, lista A, IF: 2,96).
- [2] Staśkiewicz T., Firlik B., 2018, **Out-of-round tram wheels – current state and measurements**, *Archives of Transport*, volume 45, issue 1/2018, s. 93-103 (14 pkt. MNiSW, lista B).
- [3] Tabaszewski M., Firlik B., 2018, **Assessment of the track condition using the Gray Relational Analysis method**, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2018*, vol. 20, issue 1, s. 147-152 (25 pkt. MNiSW, lista A, IF: 1,383).
- [4] Staśkiewicz T., Firlik B., Jaśkowski W., Wittenbeck L., 2018, **On designing a durable and safe tram wheel profile**, *Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks: Proceedings of the 25th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (IAVSD 2017)*, s. 747-752 (publikacja w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej, uwzględniona w bazie Scopus).
- [5] Staśkiewicz T., Firlik B., 2017, **Verification of a tramway wheel new profile dynamic behavior**, *Journal of Mechanical and Transport Engineering*, vol. 69, no. 1, s. 49-60 (6 pkt. MNiSW, lista B).
- [6] Paczkowska M., Wojciechowski Ł., Firlik B., Kinal G., Rewolińska A., 2017, **Influence of operation on tram wheels and rails surface layer condition**, *Inżynieria Materiałowa*, vol. 4, issue 218/2017, s. 35-43 (13 pkt. MNiSW, lista B).
- [7] Paczkowska M., Wojciechowski Ł., Firlik B., 2016, **Analysis of plastic deformation processes in the surface layer of tram wheels**, *Proceedings of XXX International Conference on Surface Modification Technologies (publikacja w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej)*.
- [8] Firlik B., 2016, **Wheel-Rail Interaction Analysis for the Development of a New Tram Wheel Profile**, 2016, *Proceedings of The Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance RAILWAYS 2016 (publikacja w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej, uwzględniona w bazie Scopus)*.
- [9] Firlik B., Tabaszewski M., 2012, **Dynamical Problems in Condition Monitoring of a Light Rail Vehicle**, *Proceedings of 13th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies – VSDIA 2012*, s. 293-300 (publikacja w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej, uwzględniona w bazie Scopus).
- [10] Firlik B., Czechyra B., Chudzikiewicz A., 2012, **Condition Monitoring System for Light Rail Vehicle and Track**, *Key Engineering Materials Vol. 518 (2012)*, s. 66-75 (20 pkt. MNiSW, lista A, IF: 0,35 w dniu oddania artykułu do druku; 8 pkt. MNiSW, lista B w dniu opublikowania artykułu).
- [11] Firlik B., Tabaszewski M., Sowiński B., 2012, **Vibration-based symptoms in condition monitoring of a light rail vehicle**, *Key Engineering Materials Vol. 518 (2012)*, s. 409-417 (20 pkt. MNiSW, lista A, IF: 0,35 w dniu oddania artykułu do druku; 8 pkt. MNiSW, lista B w dniu opublikowania artykułu).
- [12] Firlik B., Sowiński B., 2012, **Condition Monitoring Algorithms for Light Rail Vehicle Suspension**, *Proceedings of the First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance RAILWAYS 2012 (publikacja w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej)*.
- [13] Firlik B., 2012, **Badania eksploatacyjne systemu dla przypadku lekkiego pojazdu szynowego**, W: *Monitorowanie stanu układu dynamicznego pojazd szynowy – tor*, Praca zbiorowa pod red. A. Chudzikiewicza, s. 191-212 (rozdział w monografii).
- [14] Firlik B., Czechyra B., 2010, **Założenia i podstawy symulacyjne systemu monitorowania stanu technicznego toru tramwajowego**, *Logistyka 4/2010 (6 pkt. MNiSW, lista B)*.
- [15] Chudzikiewicz A., Firlik B., 2009, **Light Rail Vehicle Dynamics from a Running Safety Perspective**, *The Archives of Transport*, vol. XXI, issue 3-4 (2009), s. 39-49 (6 pkt. MNiSW, lista B).

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich wykorzystania

4.3.1. Wprowadzenie

Renesans komunikacji tramwajowej w Europie i na świecie powoduje, że z roku na rok tramwaje przewożą coraz większą liczbę pasażerów. W tym kontekście bardzo ważne jest zagadnienie bezpieczeństwa, spokojności biegu oraz komfortu jazdy tych pojazdów w różnych warunkach eksploatacji. Niestety, w XXI wiek zarówno polskie tramwaje, jak i infrastruktura techniczna wymagana dla ich sprawnego funkcjonowania, weszły mocno wyeksploatowane. Co więcej, obowiązujące normy i rozporządzenia dotyczące tramwajów pochodzą z lat 80-tych ubiegłego wieku i nie nakładają na nowe tramwaje wytycznych odnośnie zachowania na torze (komfortu jazdy oraz spokojności biegu). W efekcie operatorzy, jak również producenci pojazdów, nie mają punktu odniesienia, jeśli chodzi o ocenę jakości współpracy pojazdu z torem.

Mimo tego, **w Polsce nadal nie prowadzi się wielu zaawansowanych, interdyscyplinarnych badań naukowych, które dotyczyłyby poznania najważniejszych zjawisk fizycznych zachodzących podczas współpracy pojazdu tramwajowego z torem.** Właściwe rozpoznanie tych zjawisk (możliwe tylko z wykorzystaniem interdyscyplinarnych badań naukowych) może doprowadzić do zapewnienia spokojnego biegu tramwaju na torze, zmniejszenia liczby wykolejeń oraz znacznej redukcji kosztów obsługi, poprzez zmniejszenie zużycia pojazdu i jego podzespołów w toku wieloletniej eksploatacji.

Podjęcie tej tematyki jest tym ważniejsze, że lekkie pojazdy szynowe charakteryzują się zupełnie innymi uwarunkowaniami i cechami konstrukcyjnymi niż klasyczne pojazdy kolejowe – stąd w ich przypadku nie można w prosty sposób wykorzystać norm czy też wyników badań prowadzonych dla lokomotyw lub zespołów trakcyjnych.

Dlatego też, od samego początku mojej pracy badawczej zająłem się **dynamiką pojazdów tramwajowych, celem poprawy ich oddziaływania dynamicznego z torem, a także zwiększenia bezpieczeństwa i komfortu jazdy.** Celem naukowym prowadzonych przeze mnie badań jest **identyfikacja, modelowanie, symulacja oraz pomiary eksperymentalne nieliniowych zjawisk wibroakustycznych zachodzących podczas jazdy tramwaju na torze zużytych.** Są to badania o szczególnym znaczeniu praktycznym, gdyż uzyskane wyniki wykorzystuję do rozwiązywania konkretnych problemów występujących w systemach transportowych polskich miast.

4.3.2. Analiza bezpieczeństwa jazdy tramwaju na torze zużytych

Realizację postawionego celu, choć wtedy jeszcze w dużo węższym ujęciu, rozpocząłem już na etapie pisania pracy doktorskiej pt. **„Wpływ stanu zużycia profili szyn oraz geometrii toru na bezpieczeństwo jazdy lekkiego pojazdu szynowego”**, obronionej 17.07.2008 na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem prof. Andrzeja Chudzikiewicza.

W pracy podjąłem próbę odpowiedzi na pytanie jak duży wpływ na bezpieczeństwo jazdy lekkiego pojazdu szynowego ma zużycie toru i zmiany jego geometrii. W oparciu o analizę literaturową i szereg badań własnych, zaproponowałem odpowiednie dla specyfiki tych pojazdów autorskie kryteria oceny ich bezpieczeństwa jazdy, w odniesieniu do zużycia toru i zmiany jego geometrii. Bazowały one przede wszystkim na pomiarze przyspieszeń drgań zestawu kołowego, ramy wózka i pudła pojazdu, a także (w metodzie symulacyjnej) na wyznaczeniu sił na styku koła i szyny. Zaproponowana przeze mnie metoda była zweryfikowana na etapie badań symulacyjnych, a także podczas obszernych badań eksperymentalnych (poligonowych).

Na tym etapie mojej pracy naukowej, po raz pierwszy zetknąłem się z zagadnieniem symulacji komputerowej dynamiki układu pojazd – tor z wykorzystaniem modelowania MBS (ang. Multi-Body Systems). W celu weryfikacji zaproponowanych kryteriów bezpieczeństwa jazdy, sformułowałem odpowiednie założenia, opracowałem model fizyczny i matematyczny tramwaju typu Konstal 105N (jako układ 38 równań różniczkowych zwyczajnych nieliniowych), fizyczny model toru, a następnie model symulacyjny układu pojazd – tor. W opisie matematycznym i fizycznym uwzględniłem nieliniowy kontakt koła z szyną, rzeczywiste profile kół i szyn oraz nierówności toru w ich rzeczywistej postaci, zmierzone na wybranych odcinkach infrastruktury. Następnie wykonałem szereg badań symulacyjnych dla różnych warunków jazdy (tor prosty, łuk, wjazd w łuk) z uwzględnieniem wybranych stanów zużycia toru (tor o niewielkim stanie zużycia, tor o dużym zużyciu), typów szyn

używanych w torach w warunkach poznańskich oraz obciążenia pojazdu. Otrzymane wyniki potwierdziły zasadność przyjętych kryteriów oraz założonych wartości krytycznych, opartych na pomiarze sił i przyspieszeń drgań.

W celu zweryfikowania wyników wykonanych analiz, zaprojektowałem i wykonałem wózek pomiarowy na bazie wózka tramwaju typu Konstal 105Na, za pomocą którego możliwy był eksperymentalny pomiar wpływu zużycia toru na dynamikę (a zatem i na bezpieczeństwo jazdy) tramwaju na danym odcinku toru, podczas przejazdu wybranymi trasami tramwajowymi miasta Poznania. Uzyskane wyniki prezentowałem na konferencjach tematycznych związanych z pojazdami szynowymi, oraz w wybranych czasopismach punktowanych. Przykładem takiej publikacji jest praca [15], w której, już po obronie pracy doktorskiej, zaprezentowałem etap modelowania układu pojazd – tor, jak również najciekawsze wyniki związane z analizą zachowania pojazdu na torze. Zaproponowałem też założenia przyszłej metody oceny stanu toru, w oparciu o analizę sygnału przyspieszeń drgań w dziedzinie częstotliwości.

Praca doktorska, zrealizowana przy ścisłej współpracy z Miejskim Przedsiębiorstwem Komunikacyjnym w Poznaniu, **została nagrodzona prestiżową Nagrodą Siemens** (przyznawaną co roku dwóm osobom za wybitne osiągnięcia w technice i badaniach naukowych prowadzonych przez pracowników instytucji akademickich i pozaakademickich w Polsce), **Nagrodą Naukową Prezesa Polskich Kolei Państwowych**, a także **Nagrodą Miasta Poznania** za wyróżniającą się pracę doktorską.

4.3.3. Wykorzystanie odpowiedzi dynamicznej pojazdu do monitorowania stanu technicznego układu pojazd – tor

Zdobyte doświadczenie, jak i dalej prowadzone przeze mnie prace nad oddziaływaniem dynamicznym lekkich pojazdów szynowych zaowocowały propozycją uczestnictwa w projekcie badawczym „**Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności (MONIT)**” (POIG.01.01.02-00-013/08), realizowanym ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, lata 2007-2013, Priorytet 1., Działanie 1.1., Poddziałanie 1.1.2. Celem projektu było opracowanie zaawansowanych systemów monitorowania dla wybranych obiektów technicznych, takich jak pojazdy, drogi, mosty, budynki itp. Kierownikiem projektu był prof. Andrzej Chudzikiewicz (Politechnika Warszawska), a partnerami konsorcjum wiodące polskie uczelnie techniczne i instytuty badawcze (AGH, Politechnika Warszawska, IPPT PAN w Warszawie, IMP PAN w Gdańsku)

W projekcie objąłem stanowisko **kierownika zespołu badawczego** odpowiedzialnego za **zaprojektowanie, wykonanie i wdrożenie systemu monitorowania stanu technicznego lekkiego pojazdu szynowego oraz toru**. Zespół, liczący około **20 osób**, dobieierałem samodzielnie, na podstawie już wtedy nawiązywanych kontaktów ze specjalistami z różnych dziedzin. Jako kierownik zespołu, opracowałem koncepcję, główne założenia i projekt struktury systemu, opisane m. in. w [E1, E3, E37, E38].

Efektom prowadzonych prac było **opracowanie i wdrożenie innowacyjnego systemu monitorowania stanu technicznego kluczowych elementów układu biegowego tramwaju oraz oceny stanu toru**. Jest to system oceny jakościowej, oparty na analizie odpowiedzi dynamicznej pojazdu tramwajowego na wymuszenia pochodzące od toru – zarówno od nierówności geometrycznych, jak i uszkodzeń infrastruktury torowej (wykruszenia czy pęknięcia powierzchni tocznej szyn, korugacje, uszkodzenia podtorza itp.). W oparciu o sygnały pobierane z czujników umieszczonych na pojeździe, system zawiadamia użytkownika o przekroczeniu wartości krytycznych wybranych parametrów związanych ze stanem pojazdu i infrastruktury.

W projekcie, oprócz funkcji kierownika zespołu badawczego, byłem również głównym wykonawcą w zakresie analizy oddziaływania dynamicznego układu lekki pojazd szynowy – tor. Ponieważ system monitorowania z założenia dedykowany jest dla dowolnego typu tramwaju, dlatego konieczne było objęcie analizą zarówno w pełni niskopodłogowych tramwajów wieloczlonowych, jak i wysokopodłogowych wagonów starszej konstrukcji. Analizy rozpocząłem od zdefiniowania charakteru współpracy każdego z tych pojazdów z torem, opisanego szczegółowo w raporcie [F50]. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów eksperymentalnych, wyznaczyłem charakterystykę odpowiedzi dynamicznej poszczególnych elementów pojazdu (zestawu kołowego, ramy wózka

i pudła pojazdu) dla wybranych warunków eksploatacji. Analizę przeprowadzono zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości, wyznaczając charakterystyczne składowe dla każdego z sygnałów. Przeprowadziłem również obszerną analizę możliwości wykorzystania sygnału drganiowego każdego z podzespołów do monitorowania stanu zarówno pojazdu, jak i toru.

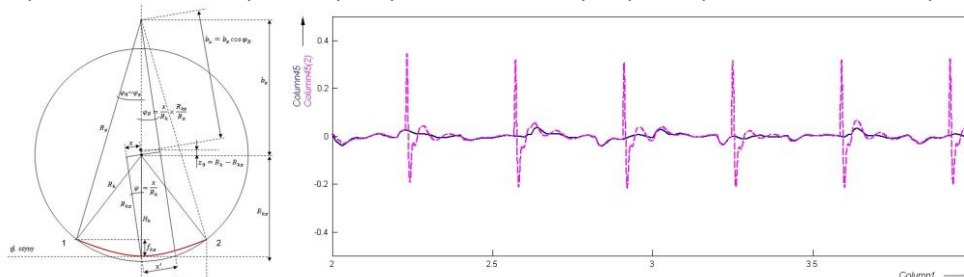
Następnie opracowałem modele symulacyjne dla dwóch typów tramwajów, klasycznego wagonu wysokopodłogowego (na podstawie rozszerzonego modelu wykorzystywanego w pracy doktorskiej), jak i nowoczesnego, niskopodłogowego pojazdu przegubowego (model opracowany na podstawie rzeczywistych danych konstrukcyjnych wybranego pojazdu liniowego). Schematy tych modeli można znaleźć w pracy [14]. Podczas każdej z przeprowadzonych symulacji na każdym z modeli aktywnych było 18 wirtualnych czujników, które rejestrowały dane (siły, przemieszczenia i przyspieszenia) ze 169 kanałów pomiarowych.

Symulacje przeprowadziłem najpierw dla modeli nominalnych, celem ich walidacji oraz określenia poziomów odniesienia. Przejazdy te traktowałem później jako wzorcowe. Następnie wariantowałem zarówno stan pojazdu, jak i toru – celem określenia wpływu poszczególnych parametrów na odpowiedź dynamiczną pojazdu. Wyniki symulacji dla pojazdu i toru o parametrach odstrojonych porównywane były z wynikami wzorcowymi.

W przypadku pojazdu, symulacje były wariantowane w zależności od następujących parametrów:

- uszkodzenie łożyska pierwszego zestawu kołowego
- owalizacja i poligonizacja koła prawego pierwszego zestawu kołowego
- luz w usprężynowaniu I lub II stopnia
- utrata sztywności na I lub II stopniu usprężynowania
- utrata własności tłumików na I lub II stopniu usprężynowania
- zatarcie tłumika na II stopniu usprężynowania.

Celem wprowadzenia odpowiednich uszkodzeń do modelu numerycznego, konieczne było opracowanie ich modeli matematycznych i fizycznych. Przykład takiego modelu, opracowanego przeze mnie dla odchyłek owalizacji na kole, jak również przykładową odpowiedź dynamiczną pojazdu, przedstawiono na poniższym rysunku. Całość tych prac opisana została w raporcie [F51].

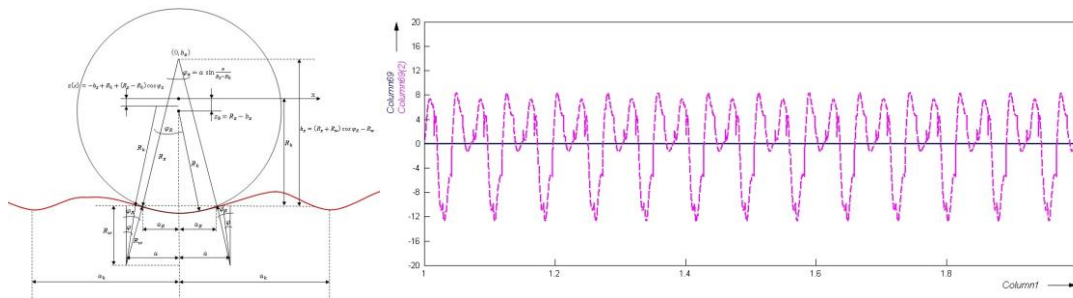


Rys. 1. Schemat zależności geometrycznych owalizacji koła oraz przebieg odpowiedzi drganiowej na ramie wózka i pudle tramwaju

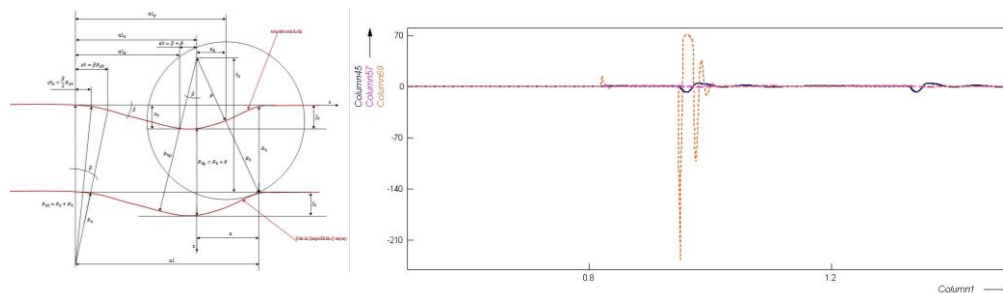
W przypadku toru, symulacje były wariantowane w zależności od następujących parametrów:

- zwiększone prędkości i wymuszenia w postaci geometrycznych nierówności
- wymuszenia w postaci korugacji (fale krótkie)
- ponadnormatywne zużycie szyny na łuku torowym
- przejazdy przez zwrotnice i krzyżownice.

Podobnie jak w przypadku uszkodzeń pojazdu, konieczne było opracowanie odpowiednich modeli matematycznych i fizycznych poszczególnych uszkodzeń toru. Przykład takich modeli, opracowanych dla korugacji i podmycia toru przedstawiono na rysunkach poniżej. Zostały one szerzej opisane w raporcie [F52], jak również pracach [10, 14].



Rys. 2. Schemat zależności geometrycznych podczas przejazdu koła po szynie o falistym zużyciu oraz przebieg odpowiedzi drganiowej na ramie wózka i pudle tramwaju

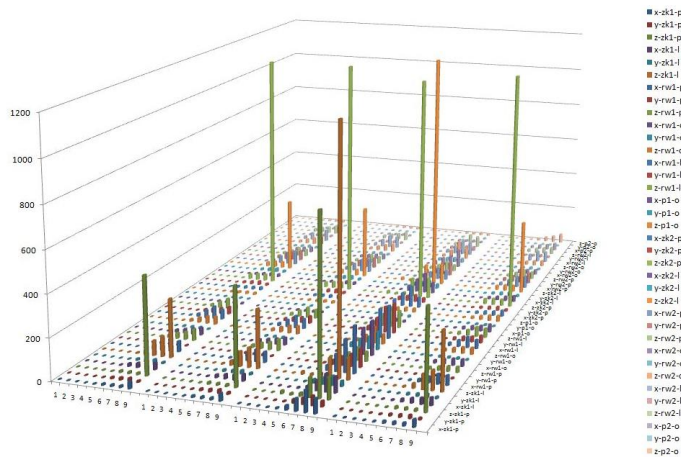


Rys. 3. Schemat zależności geometrycznych podczas przejazdu koła przez pionowy uskok toru oraz przebieg odpowiedzi drganiowej na ramie wózka i pudle tramwaju

W celu ilościowej oceny zgodności analizowanych sygnałów lub ich charakterystyk wprowadziłem odpowiednie miary zgodności sygnałów. Porównywanie obejmowało sygnały uzyskane na drodze symulacji (a w kolejnym etapie także z eksperymentu), dla parametrów nominalnych pojazdu i dla parametrów zmienionych na skutek np. zużycia lub uszkodzenia.

W dziedzinie czasu i amplitud wykonałem obliczenia estymatorów wartości średnich, RMS, odchyłeń standardowych, wartości szczytowych i międzyszczytowych, ocenę korelacyjną i badanie rozkładów amplitud. W dziedzinie częstotliwości – analizy widmowe oparte o FFT, periodogramy, widmowe gęstości mocy (PSD).

W ramach realizowanych prac wykonałem w sumie kilkaset symulacji dla kilkudziesięciu różnych scenariuszy badawczych, wyznaczając dla każdej symulacji odpowiedzi z wszystkich wirtualnych czujników pomiarowych. Wyznaczone parametry z arbitralnie wybranych punktów konstrukcji modelowanego pojazdu poddałem wstępnej ocenie odrzucając parametry o małej wrażliwości na zmianę stanu elementów pojazdu i/lub infrastruktury. Dla każdego z przypadków symulacyjnych (odpowiadającemu danemu uszkodzeniu), wykonałem zbiorcze wykresy przyrostu badanych parametrów diagnostycznych. Przykład takiego wykresu dla tramwaju o parametrach odstrojonych poruszającego się po torze o średnim stopniu zużycia, przedstawiono poniżej.

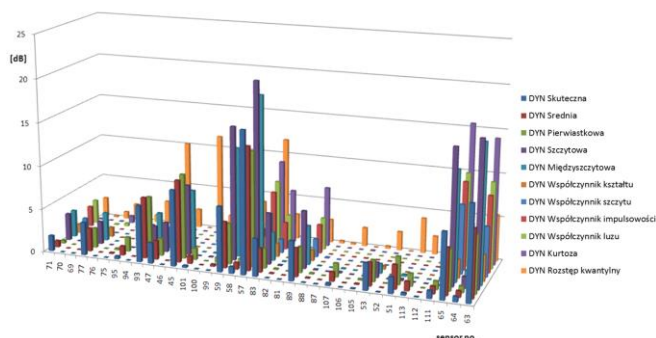


Rys. 4. Niewielki fragment zbiorczego wykresu przyrostu badanych parametrów diagnostycznych dla różnych prędkości jazdy

Na osi poziomej (x), cyframi od 1÷9 oznaczono przykładowe wykorzystane wymiarowe i bezwymiarowe miary punktowe dla wybranych 4 z 32 przypadków symulacyjnych: amplituda średnia (1), amplituda skuteczna (2), amplituda pierwiastkowa (3), amplituda szczytowa (4), współczynnik kształtu (5), współczynnik szczytu (6), współczynnik impulsowości (7), współczynnik luzu (8), kurtoza (9). Na osi poziomej (y) znajdują się wybrane współrzędne x, y i z przykładowych 12 wirtualnych przetworników pomiarowych, zainstalowanych podczas trwania symulacji na poszczególnych elementach składowych pojazdu (zestawy kołowe, ramy wózków, pudła wagonów). Każdy przypadek symulacyjny składa się więc z dziewięciu serii estymatorów, obliczonych oddzielnie dla każdej współrzędnej danego przetwornika. Na osi pionowej (z) znajdują się bezwzględne wartości poszczególnych miar punktowych, obliczonych dla wybranego przypadku symulacyjnego.

Z przeprowadzonych analiz jednoznacznie wynika, że wartości przyjętych miar punktowych mają różną skalę, a dodatkowo wiele z nich silnie zależy od prędkości jazdy. Aby zatem uprościć kolejne analizy, podzielono wyznaczone miary punktowe i przyporządkowano do odpowiednich zakresów prędkości jazdy tramwaju. Ponadto, aby dokładniej opisać potencjalną przydatność zarówno przetworników, jak i wyznaczonych dla ich odpowiedzi estymatorów, dla każdego przypadku zastosowałem metodę normowania, odnosząc kolejne postaci zużycia do wartości nominalnych. Pozwoliło to na przeprowadzenie szybkiej selekcji negatywnej, bazującej na przyrostach wartości parametrów, a nie na ich wartościach bezwzględnych.

Wyznaczona w ten sposób miara wrażliwości parametru na zmianę stanu badanego obiektu umożliwia wstępną symptomizację objawów konkretnej klasy uszkodzeń lub wręcz lokalizacji uszkodzenia na podstawie wartości symptomu. Na poniższym rysunku pokazano przykładowe wyniki analizy porównawczej sygnałów przyspieszeń drgań uzyskanych z kilkudziesięciu czujników pomiarowych dla przypadku zużycia tłumika pionowego II stopnia usprężynowania.



Rys. 5. Analiza skuteczności miar punktowych sygnału dla przypadku uszkodzenia tłumika pionowego II stopnia usprężynowania

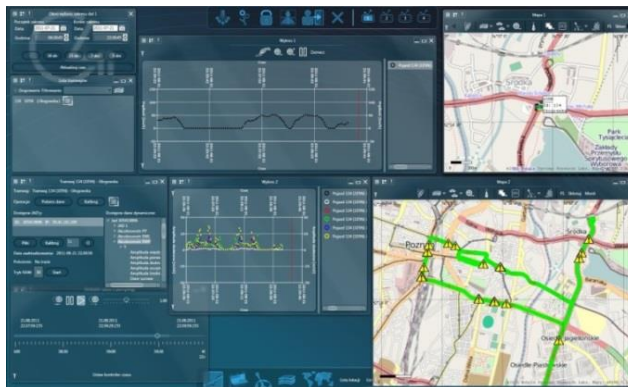
Na podstawie wykonanych obliczeń sformułowalem algorytmy obliczeniowe, które na podstawie analizy odpowiedzi dynamicznej pojazdu, wykonują ocenę stanu technicznego układu pojazd – tor. Monitorowanie stanu technicznego toru oparte jest o analizę przyspieszeń drgań rejestrowanych na korpusach łożysk przyosiowych zestawu kołowego pojazdu, jako odpowiedzi toczącego się zestawu kołowego na dynamiczne oddziaływanie z torem. Dzięki temu monitorować można główne postaci zużycia toru, takich jak zużycie faliste szyn o różnej długości fali, pęknięcia szyn, zmiany stanu sztywności toru, przechyłki toru itp. Przykład takich zaawansowanych algorytmów, opartych o metodę modelowania szarych systemów, przedstawiono w [3]. Sygnał drganiowy może być również wykorzystany do analizy stanu technicznego pojazdu, umożliwiając detekcję stanów awaryjnych układu biegowego lub elementów usprężynowania - co szerzej opisano w pracach [9], [11] i [12].

Na tej podstawie, pod moim kierownictwem, został opracowany, zbudowany i przetestowany system monitorowania stanu technicznego układu lekki pojazd szynowy – tor, jako nowoczesne, kompleksowe rozwiązanie w zakresie monitorowania stanu technicznego kluczowych układów i elementów układu biegowego tramwaju oraz jakościowej oceny infrastruktury torowej. System opiera się na rozproszonej sieci przetworników zainstalowanych na pojeździe wraz z jednostką akwizycji danych oraz serwera danych z aplikacją do analizy i zarządzania danymi diagnostycznymi.

Monitorowanie i ocena stanu infrastruktury torowej wykonywana jest podczas normalnej eksploatacji pojazdów i nie wymaga odrębnych przejazdów technicznych. Możliwa jest tym samym nie tylko pełna detekcja i lokalizacja uszkodzeń oraz nieprawidłowości geometrycznych toru, ale również uszeregowanie ich wg wielkości oddziaływania danego typu uszkodzenia na dany typ

pojazdu. Ponadto, w połączeniu z systemem monitorowania stanu pojazdu, możliwa jest weryfikacja dopuszczalnej na danym odcinku prędkości jazdy w aspekcie spokojności biegu i komfortu jazdy, jak również bezpieczeństwa przed wykolejeniem.

Całości systemu dopełnia aplikacja użytkownika, zapewniająca bezpieczne korzystanie z zasobów serwera danych oraz wizualizację danych napływających do systemu. Nowoczesne, intuicyjne i przyjazne użytkownikowi oprogramowanie pozwala na bieżące śledzenie stanu technicznego pojazdu oraz infrastruktury torowej, ułatwiając zarządzanie taborem i umożliwiając dynamiczne określanie zakresu napraw pojazdów, a także optymalne planowanie remontów infrastruktury (rys. 6). Struktura systemu, aplikacja użytkownika, jak również jego funkcjonalności zostały przeze mnie opisane szczegółowo w pracy [13], a także raportach [F53÷F56].



Rys. 6. Widok ogólny aplikacji użytkownika

System testowany był przez kilka miesięcy w MPK Poznań, sprawdzono także skuteczność jego działania na infrastrukturze Tramwajów Warszawskich. Szerszy opis tych badań przedstawiono w pracy [13] oraz raportach [F57÷F62]. Wyniki uzyskane podczas eksploatacji nadzorowanej pozwoliły na wykrycie różnych postaci uszkodzeń toru i scharakteryzowania ich w aspekcie oddziaływania na pojazd. Wiele decyzji dotyczących utrzymania toru podjętych przez MPK Poznań w latach 2010-2013 opartych było właśnie o wyniki otrzymane z opracowanego przeze mnie systemu monitorowania.

Udział w projekcie umożliwił mi zarówno zdobycie nowej wiedzy z zakresu oddziaływania dynamicznego lekkiego pojazdu szynowego z torem, jak również zaistnienie w środowisku naukowym specjalistów z tej dziedziny. Opracowany system monitorowania był przeze mnie przedstawiony na wielu prestiżowych konferencjach, m. in.:

- **International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance (RAILWAYS)** w Las Palmas de Gran Canaria [12], [E31]
- **European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM)** w Dreźnie [E29, E30]
- **International Congress on Sound and Vibration (ICSV)** w Wilnie [E28]
- **Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA)** w Budapeszcie [9].

Na powyższych konferencjach nawiązałem trwające do dzisiaj **kontakty z czołowymi ekspertami z zakresu dynamiki pojazdów szynowych**, takimi jak prof. Stefano Bruni (*Politecnico di Milano*), prof. Markus Hecht (*Technische Universität Berlin*), prof. Hugues Chollet (*Institut Français des Sciences et Technologies*), prof. Rolf Dollevoet (*Delft University of Technology*), prof. Simon Iwnicki (*Manchester Metropolitan University*), prof. Akira Matsumoto (*Nihon University, Japonia*) czy prof. Yoshihiro Suda (*University of Tokyo, Japonia*). Przeprowadzone rozmowy, zwłaszcza z profesorem Matsumoto i profesorem Suda, stały się inspiracją dla wielu podejmowanych przeze mnie w przyszłości działań.

Ponieważ opracowany system ma duży potencjał komercyjny, zdecydowałem się nie publikować szczegółowo wszystkich algorytmów oceny stanu pojazdu i toru na podstawie odpowiedzi dynamicznej pojazdu – gdyż równolegle kilka zespołów badawczych z różnych europejskich uczelni pracowało i wciąż pracuje nad podobną tematyką. Niemniej jednak wybrane wyniki projektu zostały opublikowane w kilku znaczących czasopismach naukowych z listy A, takich jak *Eksploatacja i Niezawodność* [3], czy *Key Engineering Materials* [10, 11], które w momencie wysyłania artykułu do druku figurowało jeszcze na tej liście (obecnie lista B). Ponadto wybrane wyniki opisano w innych pracach, takich jak [E26÷E32 oraz E34÷E38].

W celu wdrożenia wyników projektu do przemysłu, w roku 2013 założyłem spółkę TechSolutions Group, funkcjonującą początkowo jako spółka spin-off Politechniki Warszawskiej, a następnie inkubowaną przy Politechnice Poznańskiej. Od tamtej pory funkcjonuje ona coraz aktywniej w branży pojazdów szynowych, zdobywając zaufanie czołowych producentów i operatorów pojazdów tramwajowych.

4.3.4. Identyfikacja zjawisk nieliniowych w strefie kontaktu koła z szyną

Opracowany przeze mnie system monitorowania, bazując na sygnałach przyspieszeń drgań poszczególnych elementów pojazdu, analizuje dynamikę tramwaju w skali makro, nie wnikając w charakter zjawisk na styku koła i szyny. Tymczasem wejście na poziom szczegółowości tych zjawisk w skali mikro było od czasu doktoratu moim naukowym marzeniem, do którego konsekwentnie dążyłem. W 2011 roku złożyłem więc wniosek o dofinansowanie projektu „**Identyfikacja i modelowanie zjawisk nieliniowych w strefie kontaktu koła z szyną w aspekcie komfortu i bezpieczeństwa jazdy lekkiego pojazdu szynowego**” do otwartego wtedy konkursu w Narodowym Centrum Nauki. Niestety projekt nie uzyskał dofinansowania, jako zbyt aplikacyjny – recenzenci sugerowali złożenie go do Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

W 2012 został przez NCBiR ogłoszony nabór wniosków do **IV edycji programu LIDER** (wsparcie rozwoju kadry naukowej, a w szczególności podniesienie kompetencji w samodzielnym planowaniu, zarządzaniu oraz kierowaniu zespołem badawczym poprzez realizację projektów badawczych o charakterze aplikacyjnym). Po kilku tygodniach intensywnej pracy nad tematyką i zakresem projektu, złożyłem w tym konkursie wniosek o dofinansowanie projektu „**Identyfikacja i modelowanie zjawisk nieliniowych w strefie kontaktu koła z szyną, celem opracowania nowego profilu koła tramwajowego**”. Genezą podjęcia tego tematu był fakt, że nowoczesne, niskopodłogowe tramwaje w polskich miastach nadal toczą się na kołach o profilu PST, optymalizowanym wiele lat temu dla starszych pojazdów wysokopodłogowych, a w kwestii budowy i utrzymania toru wciąż obowiązują wytyczne z 1983 roku. Wobec różnorodności konstrukcji obecnie produkowanych tramwajów, zwiększającej się co roku ich średniej prędkości jazdy, a także postępującej degradacji torowisk w miastach, widziałem konieczność pilnego podjęcia prac w zakresie zwiększenia bezpieczeństwa i komfortu jazdy tych pojazdów. Nie da się tego dokonać wyłącznie na podstawie bieżącej praktyki eksploatacyjnej – konieczne staje się najpierw wykonanie szeregu złożonych, interdyscyplinarnych badań naukowych, wykorzystujących zaawansowane techniki modelowania matematycznego i fizycznego zjawisk zachodzących w strefie kontaktu koła z szyną, uzupełnionych o eksperyment z wykorzystaniem nowoczesnych technik pomiarowych i analitycznych.

Złożony przeze mnie projekt został zakwalifikowany do dofinansowania, uzyskując na liście rankingowej **6 miejsce spośród wszystkich 120 złożonych wniosków**. Projekt, którego realizacja była zaplanowana na 24 miesiące, rozpoczął się 1 stycznia 2014. Był to mój pierwszy własny projekt badawczy, w którym **byłem autorem kompletnej metodologii badań, a wszystkie prace odbywały się bezpośrednio pod moim nadzorem i z moim czynnym udziałem**. Prace badawcze zrealizowane w ramach tego projektu stanowią główny trzon opisywanego osiągnięcia naukowego, uzupełniając wcześniej opisywane prace, wykonane w ramach projektu MONIT.

W pierwszym etapie badań wykonana została **identyfikacja zjawisk nieliniowych zachodzących na styku koła i szyny w odniesieniu do rzeczywistych warunków eksploatacji pojazdu**. Prace rozpocząłem od opracowania podstaw teoretycznych oddziaływania układu lekki pojazd szynowy – tor. W tym celu wykonana została analiza współpracy koła tramwajowego z szyną rowkową i kolejową dla różnych warunków eksploatacyjnych, w tym podczas jazdy po torze prostym oraz w łuku. Przeprowadziłem analizy profili kół i szyn tramwajowych eksploatowanych w Polsce, Europie i na świecie, jak również obszerną analizę literaturową w tym obszarze, skupiając się przede wszystkim na określeniu wpływu profilu koła na własności biegu pojazdu, oddziaływaniu pojazdu na tor, jak również wynikającego z niego zużycia pary ciernej koło/szyna. Opisałem sposób prowadzenia zestawu kołowego dla każdego z analizowanych przypadków, uwzględniając dopuszczalne zużycie koła i szyny. Wykonałem analizę warunków, jakie muszą zajść, by prowadzenie zestawu kołowego w łuku było kinematyczne. Wyzaczyłem położenie obszarów styku między kołem a szyną, a także opisałem ich wpływ na zużycie obydwu par ciernych. Opisałem zjawisko wężycowania zestawu kołowego na podstawie rzeczywistych wartości różnic promieni tocznych. Wykonałem również analizy współpracy przykładowych, zużytych profili koła i szyny [F3].

Następnie przeprowadziłem obszernie **analizy zjawiska pischczenia tramwaju w łuku toru**, jako niepożądanego efektu dla środowiska silnie zurbanizowanego, w jakim porusza się tramwaj. Wybrane wnioski z tych analiz, opartych zarówno na obliczeniach, jak i wynikach przeprowadzonych przeze mnie badań eksperymentalnych są następujące:

- Kąt nabiegania jest kluczowym parametrem kinematycznym wpływającym na zjawisko pischczenia w łuku. Wartość graniczna wynosi około $7\div 9$ mrad. Powyżej tej wartości, bez żadnych dodatkowych środków prewencyjnych, rośnie prawdopodobieństwo wystąpienia ryzyka pischczenia w łuku. Wiąże się to ze stosunkiem promienia łuku R do bazy wózka W .
- Zmniejszenie kąta nabiegania jest możliwe przez zmianę szerokości toru na łuku, mniej sztywne zawieszenie pierwszego stopnia lub krótszą bazę wózka pojazdu. W przypadku usprężynowania pojazdu, trudne jest osiągnięcie dobrego kompromisu pomiędzy wymaganiami stabilności biegu przy wyższej prędkości jazdy, a zdolnością do łagodnego wpisywania się w łuki o małych promieniach. Pewnym rozwiązaniem są wózki z radialnym ustawianiem zestawów kołowych w łuku, jednak nie są one jeszcze popularne w eksploatacji.
- Położenie poprzeczne koła na szynie ma również istotny wpływ na powstawanie zjawiska pischczenia w łuku, szczególnie w przypadku dużych przemieszczeń, odpowiadających kontaktowi obrzeża koła zewnętrznego z główką szyny zewnętrznej. W większości przypadków kontakt obrzeża z główką szyny jest pozytywnym zjawiskiem jeśli chodzi o zmniejszenie pischczenia w łuku na kole zewnętrznym, gdyż na skutek wspinania się koła na szynę następuje odciążenie powierzchni tocznej. Pischczenie występuje wtedy na kole wewnętrznym w łuku i pogłębia się wraz ze wzrostem szerokości toru na danym łuku.
- W łukach o bardzo małym promieniu kontakt obrzeża koła zewnętrznego z główką szyny może być źródłem pischczenia, nazywanego w literaturze „flanging noise”. Jest to jednak dźwięk o nieco innym charakterze, niż ten na powierzchni tocznej koła wewnętrznego – nazywany „squealing noise” (niestety nadal brakuje polskich odpowiedników nazw obydwu zjawisk).
- Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że hałas na główce szyny wewnętrznej (*squealing noise*) posiada główne składowe w zakresie częstotliwości $1000\div 5000$ Hz, podczas gdy hałas na styku obrzeża z główką szyny zewnętrznej (*flanging noise*) posiada główne składowe w wyższym zakresie częstotliwości, najczęściej $5000\div 10000$ Hz.

W kolejnym etapie badań przeprowadziłem analizę stanu obecnego w zakresie **budowy i utrzymania torowisk tramwajowych w Polsce**, na podstawie obowiązujących rozporządzeń i norm powołanych jak również nieobowiązujących norm i wytycznych technicznych. Scharakteryzowane zostały stosowane w Polsce rodzaje szyn oraz torowisk tramwajowych, przeanalizowane zostały istniejące dokumenty w zakresie ich budowy i utrzymania, a następnie poddano je krytyce, w odniesieniu do obecnych warunków infrastruktury i taboru. Dokumenty, na których bazowałem podczas analizy cierpią na brak aktualizacji, w związku z czym, wobec rozwijającej się infrastruktury oraz taboru, zawierają niekiedy przestarzałe zapisy. Znalazłem w nich szereg zapisów błędnych oraz sprzeczności jak np. wyczerpanie się luzu między kołem a szyną dla pewnych wartości szerokości toru i długości prowadnej zawartych w ramach dopuszczalnych tolerancji.

Niestety nie istnieją w Polsce nowsze dokumenty regulujące tematykę budowy i utrzymania torowisk tramwajowych. Dlatego też w trakcie trwania projektu nawiązałem **ściłą współpracę z przedstawicielami poszczególnych operatorów komunikacji miejskiej z całej Polski**, a także z **Izbą Gospodarczą Komunikacji Miejskiej (IGKM)**, która objęła patronat nad projektem. Efektem tej współpracy było włączenie mnie przez IGKM do prac nad aktualizacją poszczególnych dokumentów technicznych, które mają służyć kompetentnej nowelizacji zapisów specjalistycznych norm i rozporządzeń tramwajowych. Znalazłem się tym samym w ścisłym gronie osób zmieniających obecne przepisy tramwajowe, a istotna część tych zmian przeprowadzana jest w oparciu o wyniki moich prac badawczych. Prowadzone przeze mnie prace badawcze od początku ich realizacji służą więc praktyce przemysłowej, ciesząc się dużym uznaniem w branży, która widzi w nich duży potencjał.

W kolejnym etapie prac, na podstawie dostępnej dokumentacji i norm, utworzyłem **trójwymiarowe modele zestawów kołowych oraz szyn i zestawiałem je ze sobą w kombinacjach zbliżonych do warunków rzeczywistej eksploatacji**. Profile kół zostały uzyskane na podstawie pomiarów rzeczywistych profili kół wybranych tramwajów eksploatowanych przez polskich przewoźników. Podobnie postąpiono w przypadku szyn. Poniżej zaprezentowane zostały najważniejsze wnioski z tych analiz:

- Dla powierzchni nieużytych obszar styku koła o profilu PST z szyną rowkową 180S nie leży na powierzchni tocznej, lecz na krzywej przejściowej główki szyny. Podczas nabiegania obrzeża na główkę szyny, koło wspina się powyżej jej poziomu, powodując obniżenie punktu styku, który pojawia się na boku obrzeża. Powoduje to przyspieszone zużywanie się współpracujących powierzchni, ze względu na małą powierzchnię styku oraz rosnącą prędkość poślizgu wiertnego (ang. *spin*), zwłaszcza w początkowym okresie eksploatacji.
- W przypadku współpracy koła PST z szyną kolejową 49E1, obszar styku znajduje się na powierzchni tocznej, a nabieganie koła na szynę nie powoduje jego uniesienia. Ze względu na konforemność profilu główki szyny i zarysu łuku przejściowego koła, obszar styku przemieszcza się płynnie nawet dla dużych przemieszczeń poprzecznych koła na szynie.
- Współdziałanie zestawu kołowego z torem podczas jazdy w łuku zależy między innymi od następujących czynników: ustawienia się wózka w łuku, kąta nabiegania koła na szynę, wartości sił kierujących, zużycia obrzeża koła, główki szyny i prowadnicy szyny rowkowej.
- W przypadku jazdy w łuku, po torach z szyn kolejowych 49E1 lub 60E1, prowadzenie przejmuje zawsze zewnętrzne koło zestawu kołowego, nabiegając obrzeżem na główkę szyny toku zewnętrznego. Zjawisko to jest niezależne od stopnia zużycia powierzchni tocznej koła, obrzeża czy główki szyny.
- Podczas jazdy w łuku po torach z szynami rowkowymi o profilu nominalnym, prowadzenie również przejmuje zewnętrzne koło zestawu kołowego. W miarę wzrostu zużycia główki szyny zewnętrznej, maleje luz między krawędzią prowadnicy szyny wewnętrznej a bokiem obrzeża koła wewnętrznego. W pewnym stanie zużycia obydwu trących powierzchni, występuje równoczesny styk obu obrzeży kół z szynami – główką szyny zewnętrznej i prowadnicą szyny wewnętrznej. Wyznaczona wartość zużycia główki szyny koła zewnętrznego wynosi dla tego przypadku $9 \div 11$ mm, w zależności od zużycia obrzeża. Przy dalszym wzroście zużycia, prowadzenie w łuku przejmuje koło wewnętrzne, powodując tarcie obrzeża koła o prowadnicę wewnętrznej szyny rowkowej.
- Z przeprowadzonych analiz wynika, że w kołach tramwajowych zużyciu ulegają obydwa boki obrzeży kół (na skutek tarcia o prowadnice szyn rowkowych), gdyż w łuku kołem prowadzącym może być zarówno koło zewnętrzne (w przypadku szyn nieużytych), jak i wewnętrzne (przy zużyciu przekraczającym pewną graniczną wartość).
- Najbardziej pożądanym, ze względu na zużycie, typem prowadzenia zestawu kołowego w łuku jest prowadzenie kinematyczne, a więc toczenie bez poślizgów. Jednakże w zakresie niewielkich promieni łuków występujących w sieciach tramwajowych, prowadzenie kinematyczne nie jest w stanie zapewnić odpowiednio wysokich sił centrujących zestaw kołowy aby zapobiec kontaktowi z szyny z obrzeżem koła i tym samym intensyfikacji zużycia oraz wystąpienia puszczania kół w łuku.
- W ramach przyjętych wartości tolerancji długości prowadnej i szerokości toru, przy wykorzystaniu profilu T istnieje możliwość wystąpienia zerowego luzu między kołem a szyną, co prowadzi do znacznego obniżenia bezpieczeństwa jazdy w kwestii wykołowania.

Istotnym wnioskiem z przeprowadzonych analiz współpracy koła z szyną jest konieczność właściwego doboru profilu koła do szyny. Poszczególne szyny są dostosowane do współdziałania z konkretnymi profilami kół. Zaniedbanie tej reguły prowadzi do niewłaściwej współpracy koła z szyną – pojawia się styk o małej powierzchni lub w niewłaściwym miejscu, który generuje wysokie naprężenia kontaktowe, a w rezultacie przyspieszone zużywanie się elementów pary kinematycznej. Była to niestety częsta praktyka w polskich miastach, choć obecnie liczne prezentacje wyników projektu na spotkaniach branżowych powodują zmianę myślenia osób odpowiedzialnych za utrzymanie taboru.

Na podstawie zebranych wyników i sformułowanych wniosków z poprzednio opisywanych prac, przygotowałem **autorską metodykę badań eksploatacyjnych**, w ramach której opracowałem **multisensorowy system pomiarowy**, umożliwiający badania metodami optycznymi, termograficznymi, tensometrycznymi oraz wibroakustycznymi. Wykorzystałem zarówno kamery umieszczone pod pojazdem, w pobliżu obszaru współpracy koła i szyny, jak również czujniki termiczne, tensometryczne, mikrofony oraz przetworniki drgań. W badaniach wykorzystana została również profesjonalna kamera szybkoklatkowa, która umożliwiła precyzyjne śledzenie ruchu koła nawet podczas krótkotrwałych wymuszeń, np. podczas wjazdu na iglicę zwrotnicy.

Istotną nowością w prowadzonych analizach było **przeprowadzenie badań termowizyjnych w obszarze styku koła tramwajowego z szyną**. Zarejestrowane obrazy termograficzne umożliwiły identyfikację styku jedno lub wielopunktowego badanego profilu koła tramwajowego w aspekcie bezpieczeństwa przed wykolejeniem oraz komfortu jazdy. W pomiarach termograficznych wykorzystana została kamera termowizyjna mikrobolometryczna, umożliwiająca pomiar w długiej podczerwieni o długości fali $8\div 14\ \mu\text{m}$ w zakresie temperatur $-20\div +650^\circ\text{C}$. Zarejestrowane obrazy poddane zostały analizie metodą jakościową, umożliwiając detekcję, lokalizację i identyfikację nieprawidłowości związanych ze współpracą koła tramwajowego z szyną, a następnie jej ocenę poprzez pomiar pozornej temperatury styku współpracujących elementów.

Po sformułowaniu metodyki, a także przygotowaniu i walidacji torów pomiarowych, opracowany **system został zainstalowany na wybranych pojazdach MPK Poznań**, celem wykonania pierwszej serii pomiarów. Badania eksperymentalne rzeczywistego zachowania się koła tramwajowego na szynie przeprowadziłem podczas różnych warunków jazdy zarówno po torze prostym, jak i w łuku.

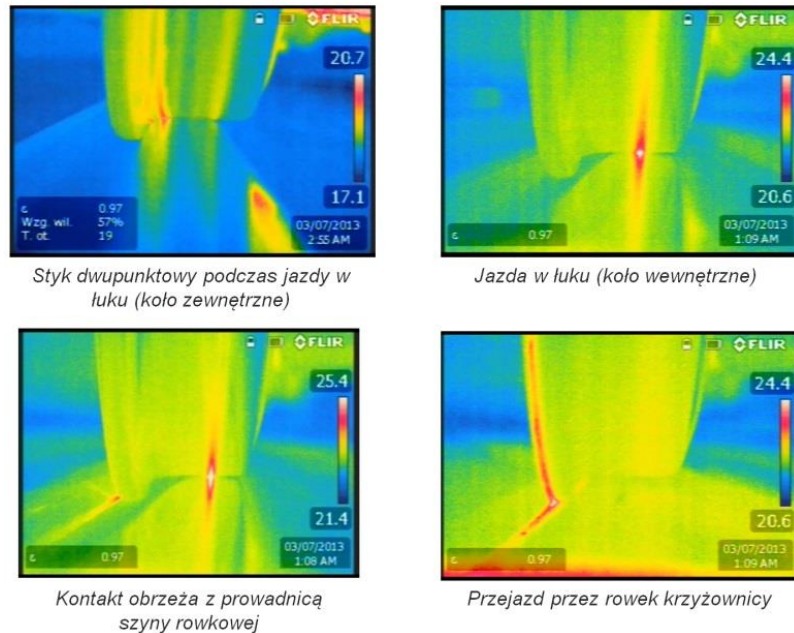
Przykładowo, **przeprowadzone analizy dźwięku generowanego przez tramwaj** w czasie testu w przejeździe, pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- zastosowanie nowoczesnego tramwaju niskopodłogowego pozwala na obniżenie generowanego przez pojazd poziomu hałasu w normalnej eksploatacji o ok. $2\div 5\ \text{dB}$,
- tramwaj z nowoczesnymi wózkami generuje niższy poziom hałasu o pochodzeniu gruntowym (ang. *groundborne noise*) w porównaniu do wózków klasycznych (to właśnie te składowe generowanego hałasu są bardzo uciążliwe w miastach i trudne do ograniczenia na drodze propagacji ze względu na długość fali),
- w zakresie akustycznych efektów oddziaływania koła z szyną (mikronierówności i mikropoślizgów w paśmie $200\div 2000\ \text{Hz}$) zestaw kołowy prowadzony w wózku niskopodłogowym wykazuje lepsze własności tłumienia tych efektów w czasie jazdy, co przekłada się na to, że w subiektywnym odsłuchu pojazd z wózkami nowoczesnymi jest łagodniejszy dla słuchacza niż tramwaj z wózkiem klasycznym.

Porównując **oddziaływanie tramwaju niskopodłogowego względem wagonów klasycznych w aspekcie oddziaływania na infrastrukturę**, należy wyróżnić następujące wnioski:

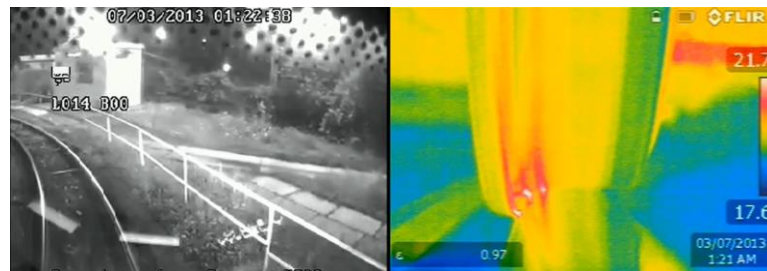
- drgania szyn generowane przez tramwaj wyposażony w wózki niskopodłogowe są pobudzane w węższym zakresie niż te wzbudzone przez pojazd z wózkami klasycznymi, zwłaszcza w kierunku poprzecznym (y), co wiąże się z generowaniem niższego poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie $3200\div 4500\ \text{Hz}$,
- w tym samym paśmie zauważalnie niższe jest również oddziaływanie koła z szyną jest również w kierunku pionowym, co może przekładać się na mniej intensywne zużywanie obu powierzchni tocnych dla pojazdu niskopodłogowego,
- globalne miary energii drgań oddziaływania koła z szyną są niższe o ok. 20% dla wózka nowoczesnego względem wózków klasycznych,

Najciekawsze wyniki uzyskano z obrazów kamery termowizyjnej, umieszczonej pod pojazdem i rejestrującej miejscowe zmiany temperatury koła i szyny na skutek wzajemnego kontaktu. Celem tych badań była analiza zachowania koła na szynie w aspekcie położenia obszaru styku obydwu współpracujących elementów. **Są to pionierskie badania, niespotykane do tej pory w pojazdach tramwajowych**. Dzięki nim możliwe było zaobserwowanie przesuwania się obszaru styku podczas jazdy, a tym samym weryfikacja wykonanych później analiz symulacyjnych. Zidentyfikowane zostały takie zjawiska jak kontakt koła z kierownicą szyny rowkowej (ang. *backflange contact*), a także zarejestrowano dokładne obszary styku podczas przejazdu przez krzyżownice pływakowe.



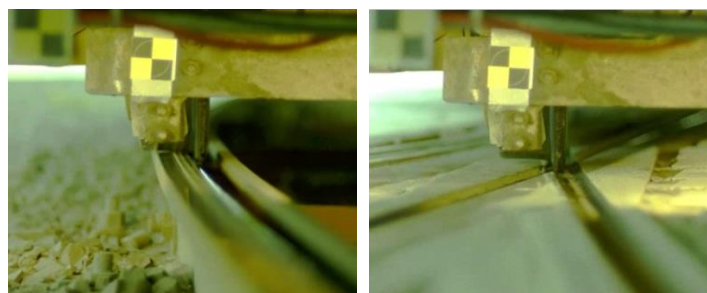
Rys. 7. Przykładowe, typowe obrazy współpracy koła tramwajowego z szyną (kamera termowizyjna)

Ponadto, możliwa była **analiza zjawiska piszczenia tramwaju na łuku**, zarówno dla koła wewnętrznego (*squealing noise*), jak i zewnętrznego (*flanging noise*). Przypadek tego ostatniego pokazano na kolejnym rysunku – widać intensywne nabieganie koła zewnętrznego na łuku, powodujące w tym przypadku trzypunktowy styk koła z szyną. Towarzyszy temu dźwięk o wysokiej częstotliwości, zidentyfikowany właśnie jako tzw. *flanging noise*.



Rys. 8. Piszczenie koła nabiegającego na łuku (*flanging noise*)

Dodatkowo, za pomocą obrazów z kamery szybkoobrotowej możliwe było dokładne określenie zachowania zestawu kołowego w torze podczas różnych warunków eksploatacji. Poniżej przedstawiono przykładowe obrazy dla jazdy w łuku (wyraźnie widoczny ślad styku koła i szyny na kręgu tocznym), a także jazdy przez krzyżownicę (widoczna jest jazda wierzchołkiem obrzeża koła po rowku krzyżownicy). Analiza tych obrazów pozwoliła na identyfikację wielu sytuacji niewłaściwej, a niekiedy wręcz niebezpiecznej współpracy koła z szyną, co przy jednoczesnej analizie sygnałów przyspieszeń drgań z tego samego przejazdu, pozwoliło na szczegółową weryfikację kryteriów bezpieczeństwa jazdy.



Rys. 9. Przykładowe, typowe obrazy współpracy koła tramwajowego z szyną (kamera szybkoobrotowa)

Kolejnym elementem w przyjętej przeze mnie metodologii badań był wybór odcinków toru, na których siły oddziaływania na pojazd są największe (na podstawie wyników pomiarów poligonowych), a następnie **wykonanie pomiarów rzeczywistej geometrii toru** na tych odcinkach, celem jej implementacji w analizach symulacyjnych. W sumie udało się zebrać pełne dane o geometrii toru kilkunastu wybranych odcinków sieci tramwajowej miasta Poznania, na każdym w obydwu kierunkach jazdy. Z wykorzystaniem wspomnianej wcześniej kamery szybkoklatkowej została również wykonana **eksperymentalna analiza rzeczywistej podatności toru tramwajowego**, który ma całkowicie inną budowę niż tor kolejowy, z uwagi na to, że w znacznej części odcinków zabudowany jest w ulicy.

Następnie, w celu identyfikacji problemów zużycia koła tramwajowego, zaplanowałem przeprowadzenie **ankiety w formie wywiadu środowiskowego** we wszystkich przedsiębiorstwach eksploatujących tramwaje w Polsce, w wyniku której zgromadzono wiele cennych uwag i spostrzeżeń. Uzyskano także informacje o podejmowanych działaniach w celu zmniejszania tempa zużywania kół. Synteza opinii problemowych przekazanych przez ankietowanych jest następująca:

- Koszt obręczy jest istotnym kosztem materiałowym, a tramwaje nowych generacji, wymagają obręczy kilkukrotnie droższych niż obręcze tramwajów z rodziny Konstal 105N. Dlatego każda metoda, która spowoduje zmniejszenie tempa zużycia obręczy, będzie przyjęta i z uwagą wdrożona.
- W większości aglomeracji narasta krytyka zjawisk związanych z hałasem generowanym przez tramwaj. Często po oddaniu do eksploatacji wyremontowanego lub nowego odcinka linii, odczuwalny poziom hałasu w danym otoczeniu jest wyższy niż poprzednio (wynika to z wzajemnego niedopasowania profili kół i szyn).
- Powszechnie jest wskazywanie na pogarszający się stan toru jako źródła zużycia koła. Trzeba jednak przyznać, że wzajemne wskazywanie winnych pomiędzy służbami pojazdów a torów jest cechą naturalną środowiska osób związanych z branżą tramwajową.
- Rozwalcowanie wierzchołka obrzeża jest największym rodzajowo czynnikiem zużycia, dlatego należy docelowo podjąć działania w kierunku zmiany asortymentu odkuwek obręczy, oraz korekty kształtu krzyżownic.
- Środkiem ważnym i oczywistym, lecz jeszcze ograniczonym w zastosowaniu jest używanie tokarki podkołowej do korekty profilu. Możliwość korygowania konturu bieżni koła jest najistotniejszym czynnikiem przedłużania żywotności obręczy (u niektórych użytkowników nawet o jedną trzecią).
- Operatorzy z reguły nie podejmują inicjatyw konstrukcyjnych, czy technologicznych dla modyfikacji układu biegowego pojazdu celem zmniejszenia kosztów obsługi lub eksploatacji.
- Powszechnie wskazuje się szlifowanie szyn jako istotny czynnik zmniejszający hałas. Tymczasem proces ten jest rzadko stosowany w eksploatacji z uwagi na koszty, a poza tym wciąż niezdefiniowany od strony kryteriów jakości.
- Uzyskano też potwierdzenie konieczności zastosowania nowego, systemowego podejścia dla doboru właściwego profilu koła i szyny. Operatorzy nie mają wystarczającej wiedzy na ten temat, stąd konieczność opracowania dodatkowych, jasnych wytycznych w tym zakresie.

Wyniki ankiety świadczą niestety o dość swobodnym podejściu ankietowanych osób do tematu właściwego utrzymania kół tramwajowych. Potwierdzają to zresztą rozmowy na różnych szczeblach danego przedsiębiorstwa. Tym bardziej wyraźna wydaje się potrzeba uporządkowania tych zagadnień, czemu służą prowadzone przeze mnie prace badawcze.

Ankiecie towarzyszyły **pomiary profili kół wybranych pojazdów u wszystkich przewoźników tramwajowych z całej Polski**. Zebrałem w ten sposób obszerny materiał badawczy, który stał się podstawą do dalszych analiz. Przykładowe zaobserwowane obrazy zużycia kół tramwajowych zebrane podczas wizji lokalnej przedstawiono szczegółowo w pracy [8], w której zawarto również wybrane wnioski z badań eksperymentalnych. Stanowi ona podsumowanie pewnego etapu projektu.

Na podstawie zgromadzonych danych, zarówno tych z wykonanych wcześniej pomiarów eksploatacyjnych, jak i z przeprowadzonej wizji lokalnej, przeprowadziłem **identyfikację zjawisk tribologicznych zachodzących na styku koła i szyny w procesie eksploatacji pojazdu** – takich jak np. płaskie miejsca, hamowanie z zablokowaniem koła, piasek między powierzchniami tocznymi, poślizg podczas ruszania, jazda w łuku, wjazd na iglicę zwrotnicy, przejazd przez krzyżownicę itp. W analizie wykorzystałem również uzyskane wcześniej obrazy zużycia kół i szyn, a także wykonane wstępne analizy symulacyjne oddziaływania koła z szyną dla różnych warunków eksploatacji. Na tej podstawie wybrałem najważniejsze, z punktu widzenia zużycia, zjawiska występujących w styku koła i szyny w trakcie eksploatacji pojazdu, które zostały uwzględnione w toku dalszych analiz.

Kolejnym krokiem prowadzącym do osiągnięcia założonego celu badawczego, była **analiza metalograficzna wybranych kół i szyn w aspekcie zjawisk zachodzących w warstwie powierzchniowej**. Procesy zużycia i ich przebieg w odniesieniu do skojarzenia tribologicznego, jakim jest współpracująca z szyną obręcz koła, istotnie wpływają na trwałość i niezawodność. Zużycie obręczy wpływa także na interwał związany z pracami obsługowo-naprawczymi, z którymi związana jest także reprofiliacja obręczy kół determinująca trwałość szyn tramwajowych. Zgodnie z przyjętą metodyką, analiza metalograficzna została wykonana dla kół i szyn nowych oraz reprezentujących różny stopień zużycia. Wyniki tych badań zostały szczegółowo przedstawione w pracach [6] i [7], a także w pracy [E14]. Synteza i ocena uzyskanych wyników badań została wykonana przeze mnie, przy współudziale całego zespołu badawczego.

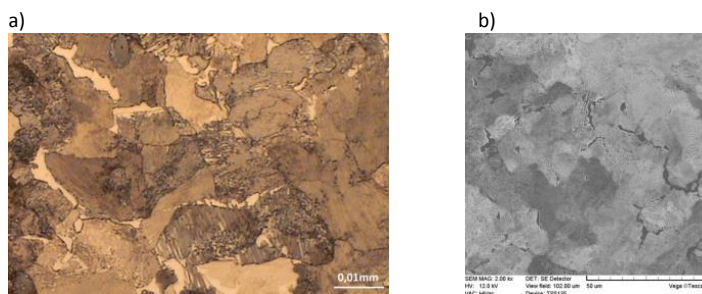
Wyniki przeprowadzonych **badania makrotwardości** pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków i spostrzeżeń:

- procesy zachodzące w czasie eksploatacji badanych szyn oraz obręczy powodują określone umocnienie warstwy powierzchniowej przejawiające się wzrostem twardości na jej powierzchni nawet do wartości powyżej 500 HV 10 (przy twardości materiału rdzenia około 320 HV 10),
- proces eksploatacji szyn tramwajowych również powoduje utwardzenie warstwy powierzchniowej, gdzie twardość mierzona na powierzchni może wynosić średnio 608 ± 27 HV 10 (dla obszarów napawanych) oraz 355 ± 7 HV 10 (dla obszarów niepoddanych napawaniu),
- występują znaczące różnice w twardości materiału stosowanego na obręcze dla danego typu pojazdu, co nie powinno mieć miejsca przy założeniu, że mamy do czynienia za każdym razem z tym samym materiałem o tych samych własnościach (największa różnica w twardości materiału rdzenia badanych obręczy wyniosła 23%),
- średnia twardość materiału zastosowanego na wszystkie obręcze tramwajowe biorące udział w badaniach jest ok. 20% większa od średniej twardości materiału zastosowanego na badane szyny tramwajowe (sugerowany w literaturze stosunek twardości powierzchni tocznej koła do powierzchni tocznej szyny, który powinien wynosić $1,00 \div 1,15$),
- główną przyczyną plastycznego płynięcia materiału w obszarze wierzchołka obrzeża jest wzrost nacisków powierzchniowych w obrębie obrzeża w momencie wielokrotnego przejazdu pojazdu przez krzyżownicę płytkorowkową - w tym obszarze widoczne jest też największe utwardzenie materiału,
- w obszarach wytypowanych do badań twardości na powierzchni obręczy oraz szyn obserwuje się liczne ubytki materiału mogące świadczyć o zachodzących procesach zużycia typu *spalling*,
- utwardzenie szyny przez napawanie powoduje wzrost twardości nawet o 55% w stosunku do materiału rodzimego powodując tym samym zmniejszenie liczby obserwowanych porowatości powstających w wyniku procesu zużywania na powierzchni,
- oprócz korzyści wynikających z utwardzenia przez napawanie (zmniejszenie porów, większa gładkość powierzchni), należy zauważyć również wady, takie jak większa kruchość warstwy napawanej,
- nowa technologia wytwarzania warstwy powierzchniowej w miejscu wierzchołka obrzeża obręczy mogłaby rozwiązać problem plastycznego odkształcenia w tym miejscu, lub też znacznie je zmniejszyć.

Podobne wnioski i spostrzeżenia sformułowano na podstawie **badania mikrotwardości**:

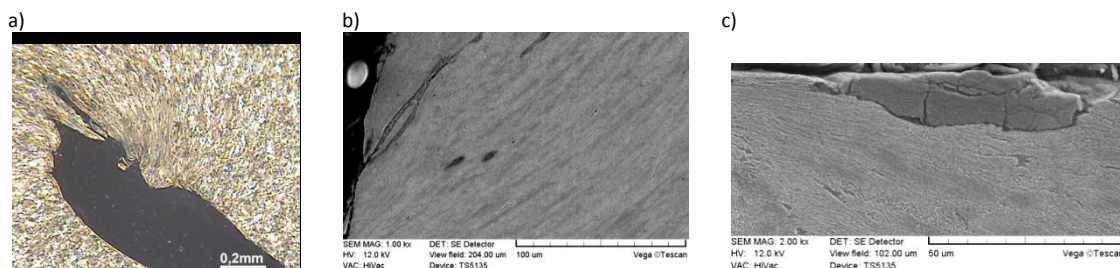
- średnia mikrotwardość materiału rdzenia dla badanych obręczy kół wyniosła 325 ± 5 HV 0,1, a dla badanych szyn: 311 ± 29 HV0,1,
- występujące różnice w średniej mikrotwardości materiału rdzenia pomiędzy obręczami różnych rodzajów pojazdów ale i w ramach próbek danego rodzaju pojazdu mogą świadczyć o braku umiejętności utrzymania przez wytwórcę obręczy rygoru dotyczącego określonych własności; podobne różnice w średniej mikrotwardości materiału rdzenia wystąpiły dla badanych próbek szyny tramwajowej (355 ± 12 HV0,1 oraz 267 ± 13 HV0,1),
- obszary o wyższych mikrotwardościach (w stosunku do rdzenia) zaobserwowane na głębokości 0,03 mm pod powierzchnią toczną badanych obręczy kół oraz szyn wskazują na miejsca w których występuje wzrost nacisków powierzchniowych,
- rosnąca lub malejąca mikrotwardość w miejscu wewnętrznego oraz zewnętrznego boku obrzeża obręczy obserwowana na głębokości 0,03 mm pod powierzchnią, wskazuje na różnice w stopniu umocnienia materiału na skutek zgniotu, co może być spowodowane zmiennym charakterem obciążania tych miejsc w czasie procesu tarcia,
- obszarem obręczy, w którym warstwa wierzchnia najczęściej ulega umocnieniu w wyniku eksploatacji jest wierzchołek obrzeża, gdzie wartość mikrotwardości średnio wyniosła 404 ± 21 HV0,1,
- obręcze lekkich pojazdów wysokopodłogowych z wózkami obrotowymi, charakteryzują się dużo mniejszą średnią mikrotwardością płaszczyzny czołowej obręczy w odniesieniu do wartości średniej ustalonej dla wszystkich badanych obręczy,
- brak ukonstytuowania warstwy wierzchniej obręczy oraz szyn poprzez zastosowanie technologicznych procesów obróbki powierzchniowej, wydaje się otwierać możliwości zwiększenia trwałości na drodze obróbki cieplnej lub ciepłno-chemicznej.

W kolejnym etapie badań wykonane zostały **analizy tribologiczne zużycia profilu koła w trakcie eksploatacji**. Obserwacja mikroskopowa materiału rodzimego obręczy (w rdzeniu) wskazała na występowanie struktury perlitycznej z niewielką ilością ferrytu (rys. 10).



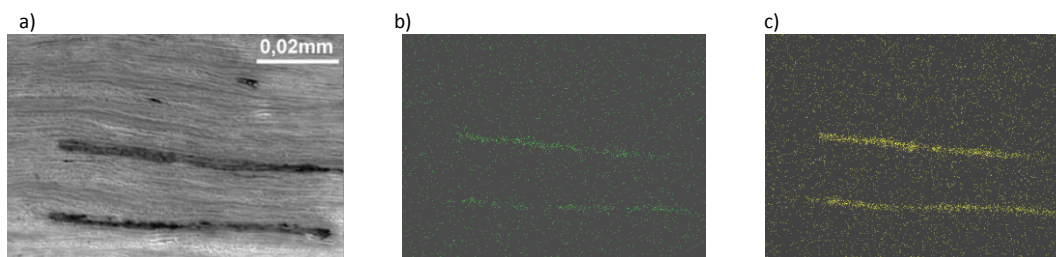
Rys. 10. Przykładowa mikrostruktura materiału rodzimego obręczy: a) widok mikroskoptyczny, b) widok ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM)

Obserwacje mikroskopowe na przekroju poprzecznym wszystkich badanych obręczy kół wykazały silne odkształcenie plastyczne w ich warstwie wierzchniej, w szczególności przy skosie zewnętrznym profilu tocznego, na wierzchołkach obrzeża i na powierzchni tocznej. Obserwowany wyraźny zgniot w warstwie wierzchniej spowodował zwiększenie twardości (rys. 11).



Rys. 11. Przykładowy widok mikrostruktury warstwy wierzchniej obręczy kół tramwajowych: a) przy skosie zewnętrznym profilu tocznego; b) w wierzchołku obrzeża; c) na powierzchni tocznej (widoczny fragment produktu korozji)

W warstwie wierzchniej zaobserwowano osadzone w materiale wtrącenia, które zidentyfikowano jako produkty korozji. Na wierzchołkach obrzeża obręczy zaobserwowano delaminację materiału w warstwie wierzchniej, której sprzyja występowanie siarczku manganu, mogącemu również inicjować pęknięcia w warstwie wierzchniej (rys. 12).



Rys. 12. Fragment mikrostruktury warstwy wierzchniej w wierzchołku obrzeża gdzie obserwowano występowanie siarczku manganu: a) obraz ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM); mapa EDS rozmieszczenia pierwiastków b) Mn i c) S

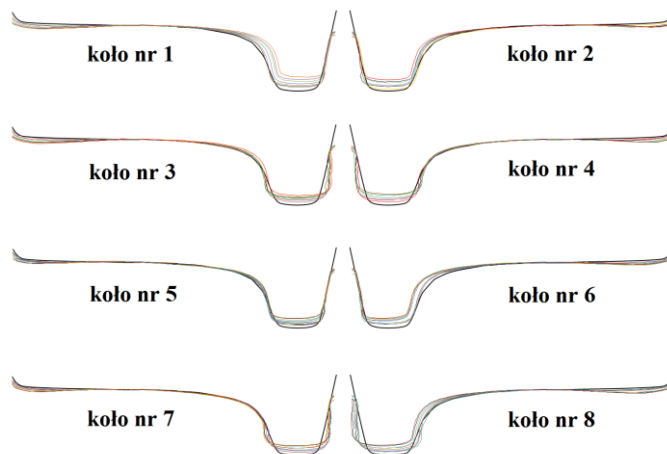
W warstwie wierzchniej pod powierzchnią toczną obręczy zaobserwowano występowanie słabo trawiącego się (pod wpływem nitalu) bardzo drobnoziarnistego obszaru. Stanowi on część materiału rodzimego, co potwierdziła analiza składu chemicznego metodą EDS. Mikrotwardość tego obszaru wynosiła ponad 800 HV_{0,1}. Spękanie obszaru świadczy o dużej jego kruchości. Wysoka mikrotwardość, kruchość i odporność na działanie czynników chemicznych to cechy, które zostały zdefiniowane, jako najważniejsze, charakteryzujące tzw. białe warstwy (rys. 13). Biorąc pod uwagę parę obręcz koła/szyna powstawanie białej warstwy odnotowywane było do tej pory raczej w szynach i to kolejowych. Występowanie białej warstwy sprzyja występowaniu zjawiska tzw. *spallingu* (ubytek fragmentu powierzchni tocznej koła spowodowany powstaniem martenzytu podczas chwilowego nagrzania koła, np. na skutek mikropoślizgów).



Rys. 13. Fragment warstwy wierzchniej pod powierzchnią toczną z widoczną warstwą białą: a) obraz z mikroskopu optycznego, b) obraz skaningowy z mikroskopu elektronowego (SEM)

Ponadto, w przypadku obręczy pochodzących z tramwajów wysokopodłogowych starszej generacji zaobserwowano odwęglenie w warstwie wierzchniej od strony płaszczyzny czołowej. Warstwa charakteryzowała się mikrostrukturą ferrytyczną. Zjawiska tego nie zaobserwowano w przypadku innych obręczy. Obserwacja mikrostruktury warstwy wierzchniej obręczy pojazdu Konstal 105N przed pierwszym toczeniem również wykazała występowanie strefy odwęglonej. Po badaniach mikrostrukturalnych nowej obręczy stwierdzono, że odwęglenie również i tam występuje. Oznacza to, że jest to wada w produkcji niektórych obręczy. Może to wpływać na deformację obręczy podczas eksploatacji i zmniejszać jej trwałość.

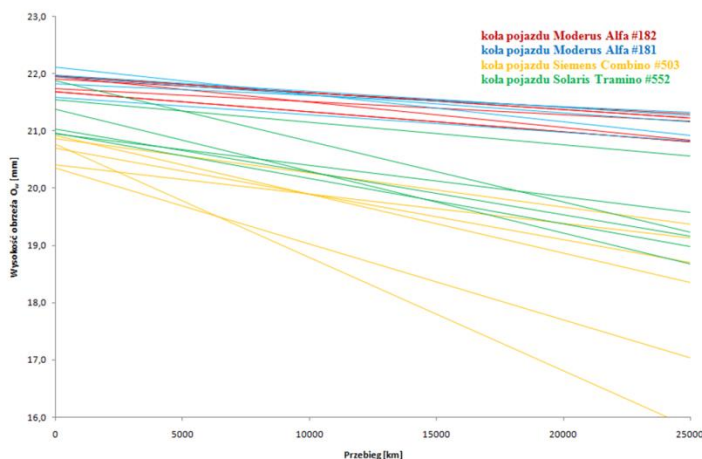
Aby lepiej poznać i zrozumieć mechanizm zużywania się kół tramwajowych, a także wyznaczyć pewne trendy tego procesu, wykonałem również **analizę form i wartości rzeczywistego zużycia profili kół dla różnych typów tramwajów**. W tym celu przez okres kilku miesięcy zbierałem dane dotyczące rzeczywistego profilu poprzecznego wszystkich kół wybranych pojazdów, reprezentujących najważniejsze typy tramwajów we flocie danego operatora. Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że poszczególne koła pojazdów tramwajowych eksploatowanych w polskich miastach zużywają się w sposób specyficzny dla danego typu pojazdu. W zależności od konstrukcji układu biegowego pojazdu, inny jest rozkład sił działających na koła tramwajowe, który warunkuje ich przyszłe zużycie. W cięższych pojazdach niskopodłogowych obserwuje się powszechnie wspomniane już wcześniej przy okazji badań metalograficznych zjawisko zawałowania wierzchołka obrzeża na skutek przejazdu przez krzyżownice płytkorowkowe, podczas którego obszar styku między kołem a szyną znajduje się na wierzchołku obrzeża. Rozwalcowanie nie jest widoczne na pierwszej osi danego wózka pojazdu, na skutek jego ścierania podczas nabiegania koła na szynę (rys. 14).



Rys. 14. Obrazy zużycia kół ciężkiego tramwaju niskopodłogowego (wózki nieobrotowe)

Analizując przedstawione profile zaobserwować można również, że koła pierwszej osi (nr 1 i nr 3) jako koła atakujące zużywają się przede wszystkim na szerokości obrzeża, co jest efektem stosowania w tym pojeździe wózków nieobrotowych, które znacznie gorzej współpracują z szyną na łuku. Ponadto na wszystkich kołach widać zmiany wysokości obrzeża, spowodowane masą pojazdu.

Na poniższym rysunku przedstawiono linie trendu obrazujące zmianę parametru wysokości obrzeża w funkcji przebiegu, dla wszystkich kół danego typu pojazdu. Zaobserwowano wyraźne różnice w tempie zużywania się kół pojazdów wysokopodłogowych i niskopodłogowych, gdzie rolę niewątpliwie odgrywa ciężar wagonów. Najszybciej zużywają się koła ciężkich pojazdów niskopodłogowych o sztywnych wózkach. Dla kół pojazdów wysokopodłogowych można odnotować jedynie niewielką zmianę wysokości obrzeża w toku eksploatacji.



Rys. 15. Tendencje zużywania się kół poszczególnych typów pojazdów (na przykładzie zmiany wysokości obrzeża)

Oczywiście wpływ na zużycie ma również stan infrastruktury, czy jakość obsługi pojazdów, jak również specyfika konkretnej sieci, po której się poruszają (ilość krzyżownic, promienie łuków itp.).

Po zakończeniu pierwszego etapu badań, stanowiącego złożoną analizę stanu obecnego w zakresie współpracy koła i szyny, rozpocząłem etap drugi – **analizy numeryczne oddziaływania pojazdu tramwajowego z torem dla różnych wariantów geometrii profilu koła i szyny**. W tym celu **opracowałem modele numeryczne nowych tramwajów**: pięcioczłonowego, 100% niskopodłogowego z kołami indywidualnymi oraz trójczłonowego, częściowo niskopodłogowego z klasycznymi zestawami kołowymi. Tym samym rozszerzyłem swój warsztat badawczy, mogąc obecnie wykonywać analizy dla większości pojazdów tramwajowych stosowanych w Polsce. W modelach zostały uwzględnione elastyczne koła tramwajowe (z obwodowym pierścieniem gumowym lub gumowymi krążkami), jak również kilka rodzajów rzeczywistej podatności toru tramwajowego – wyznaczone wcześniej na podstawie pomiarów bezkontaktowych z wykorzystaniem szybkiej kamery. Rozrzut tych pomiarów był znaczny, co oznacza że poziom utrzymania i budowa torowiska ma duże znaczenie w tym aspekcie – uzyskane wyniki mieściły się w zakresie 10÷80 MN/m. Najwyższą sztywnością cechowały się odcinki, do budowy których wykorzystano podkłady

strunobetonowe na tłuczniu, a najmniejszą – z podkładami drewnianymi i tłuczniem. Zebrane wyniki posłużyły do uzupełnienia opracowanych modeli symulacyjnych o podatność toru. Odwzorowanie w symulacji odpowiedniej sztywności i tłumienia torowiska jest istotne z punktu widzenia oddziaływań dynamicznych zachodzących w obszarze kontaktu koła i szyny. Ponadnormatywna zmiana podatności torowiska powoduje nie tylko przyspieszone zużycie kół oraz szyn, ale przekłada się również na pogorszenie poziomu bezpieczeństwa biegowego i komfortu jazdy. Dodatkowo do modeli wprowadzony został nieeliptyczny model kontaktu koło-szyna oparty na kompletnej teorii Kalkera (CONTACT).

Na potrzeby dalszych badań, **przystosowałem model kontaktu wykorzystując teorię zużywania ciernego Archarda i algorytm FASTSIM Kalkera**. Dane profili kół i szyn w postaci współrzędnych punktów pomiarowych zostały wprowadzone do modelu kontaktu w postaci tablic, a następnie zostały aproksymowane odpowiednimi funkcjami ciągłymi sklejanymi typu b-spline. Funkcje te stanowiły kolejno dane wejściowe dla procedury obliczającej wartości geometrycznych funkcji kontaktu, w zależności od wychylenia poprzecznego zestawu kołowego i jego kąta nabiegania.

Następnie przeprowadziłem **analizę wpływu geometrii wybranych, kilkunastu profili kół tramwajowych pochodzących z Europy** (w tym dwóch z Polski) na własności dynamiczne tramwaju, celem wyznaczenia poziomu odniesienia. Na podstawie tych badań nie znalazłem profilu idealnego, jednoznacznie najlepszego dla warunków spotykanych w polskich miastach. Badane zarysy kół posiadają pewne cechy, które wpływają na ich własności dynamiczne w sposób pozytywny albo negatywny. Wszystkie te cechy zostały zidentyfikowane i opisane w raportach [F1], [F2] i [F3], a także w pracy [8]. Poddałem również analizie wpływ topografii i nierówności tras pomiarowych na parametry dynamiczne pojazdu. Wybrane wnioski z tych analiz, stanowiące podstawę do sformułowania funkcji celu dla analiz optymalizacyjnych, są następujące:

- Geometria profilu koła ma niewielki wpływ na przebieg siły pionowej Q w styku z szyną. Podczas przejazdów symulacyjnych po wybranych odcinkach toru uzyskano podobne wyniki dla wszystkich badanych profili, mimo znacznych różnic w ich zarysach.
- Występują istotne różnice między badanymi profilami w przebiegach siły poprzecznej Y oraz współczynnika bezpieczeństwa przed wykołnieniem Y/Q . Zarys profili warunkuje wartość luzu między kołem a szyną, który ma istotny wpływ na wartość siły Y .
- Intensywność zużywania się kół podczas jazdy w łukach może być nawet ponad 60-ciokrotnie wyższa niż podczas jazdy po prostej - dlatego właśnie na tych przypadkach współpracy koła z szyną należy się skupić chcąc zredukować tempo ich zużywania.
- Zachowanie koła na nierównościach poziomych szyn zależy w dużym stopniu od luzu między kołem a szyną. Im wyższa jest jego wartość, tym mniej prawdopodobny styk obrzeża z główką szyny, którego wystąpienie pogarsza własności dynamiczne i parametry zużycia. Profile o mniejszych wartościach luzu osiągają wyższe wartości siły poprzecznej Y i w konsekwencji współczynnika Y/Q .
- Kształt zarysu koła ma niewielki wpływ na spokojność biegu pojazdu. Wpływ ten był dostrzegalny niemal jedynie w kierunku poprzecznym. Maksymalne różnice wyników między profilami były niewielkie i wynosiły ok. $0,2 \text{ m/s}^2$. Również niewielki jest wpływ geometrii profili kół na wskaźniki komfortu jazdy. Zdecydowanie większy wpływ na komfort miał układ toru oraz jego nierówności. Z tego powodu parametr komfortu nie musi być brany pod uwagę jako funkcja celu przy ocenie profili kół.
- Po ujednoczeniu luzu na poziomie 5 mm dla polskich profili T, PST i referencyjnego profilu V15 (opracowanego kilka lat temu dla Blackpool) zauważono, że przebiegi współczynnika Y/Q stały się bardzo podobne na fragmentach odcinków, gdzie wcześniej obserwowano duże ich rozbieżności. Największą poprawę własności dynamicznych uzyskano dla luzu z zakresu $5 \div 7 \text{ mm}$ w zależności od zarysów poszczególnych profili i odcinków pomiarowych. Analiza ta pokazała jasno, że luz na poziomie 2,5 mm (stosowany obecnie w profilu T) jest zdecydowanie za mały i powoduje pogorszenie własności dynamicznych pojazdu. Dopiero od wartości luzu równej 6 mm przestały występować przekroczenia wartości dopuszczalnej Y/Q – stąd wynika, że kwestia luzu powinna zostać uwzględniona w pierwszej kolejności, ze względu na największy wpływ na bezpieczeństwo jazdy.

- Dla toru prostego w złym stanie technicznym najistotniejszym czynnikiem wpływającym na wysokość unoszenia się koła był luz między kołem a szyną. Natomiast w łukach dominującą rolę przejmuje kształt bieżni koła i promień łuku przejściowego.
- Najbardziej pożądanym rodzajem kontaktu koła z szyną jest styk konforemny. Konforemność zapewnia redukcję naprężeń kontaktowych przez rozkład siły na większej powierzchni. W styku wielopunktowym, ze względu na stożkowatość profili kół, występują różnice prędkości toczenia się koła w poszczególnych punktach. To powoduje występowanie poślizgów, które znacznie przyspieszają zużywanie się kół, co ma swoje odbicie w wynikach przeprowadzonych symulacji.

Przeprowadziłem również **analizę wysokoczęstotliwościowych drgań wybranych wariantów konstrukcyjnych koła tramwajowego**. W tym celu opracowałem model fizyczny do analizy współpracy koła z szyną w aspekcie naprężeń kontaktowych oraz postaci drgań własnych. Badania te miały również na celu pogłębienie istniejącego stanu wiedzy na temat zjawisk zachodzących podczas współpracy koła tramwajowego z szyną w aspekcie generowanego hałasu. Obliczenia przeprowadzone zostały za pomocą metody elementów skończonych. Ponieważ bez uwzględnienia nieliniowości materiałowej istniało prawdopodobieństwo uzyskania nieprawidłowych wyników, dlatego do modelu wprowadziłem rzeczywiste własności materiału koła i szyny, wyznaczone laboratoryjnie. Przeprowadzone zostały badania wytrzymałości materiałów koła i szyny (statyczna próba rozciągania) w celu wyznaczenia umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$, wytrzymałości na rozciąganie R_m , wydłużenia procentowego po rozerwaniu A_5 oraz modułu sprężystości podłużnej (modułu Young'a) E . Wyznaczono także krzywe zależności naprężenia od odkształcenia.

Analiza numeryczna została podzielona na następujące części:

a) Analiza wysokoczęstotliwościowych drgań monoblokowego koła tramwaju

W tej części opracowania skoncentrowałem się na badaniu stanów ustalonych monoblokowego koła tramwaju. Zakres analizy w dziedzinie częstotliwości ustalony został arbitralnie i obejmował on drgania do 5 kHz. Zakres ten pokrywa emisję hałasu generowaną przez drgania związane z toczeniem oraz piskiem kół. Zbadano postaci drgań własnych i transmitancję punktu koła leżącego na jego obrzeżu. Sklasyfikowano hałas generowany w układzie wyróżniając: hałas toczenia (ang. *rolling noise*), hałas uderzenia (ang. *impact noise*), pisk kół (ang. *wheel squeal*) i tzw. wycie kół (ang. *wheel howl*).

b) Analiza wysokoczęstotliwościowych drgań zestawu kołowego tramwaju wyposażonego w monobloki koła

Analiza dotyczyła badania stanów ustalonych zestawu kołowego tramwaju wyposażonego w koła monobloki. Ze względu na brak jednoznacznego wskazania w literaturze na modelowanie zestawu kołowego jako bryły sztywnej lub układu sprężystego do analizy wysokoczęstotliwościowej, zbadano model zestawu wariantując warunki brzegowe, które w uproszczony sposób modelują kontakt między kołem a szyną. Określono również wpływ sprzęgnięcia kół w zestaw kołowy na formy wysokoczęstotliwościowych drgań koła.

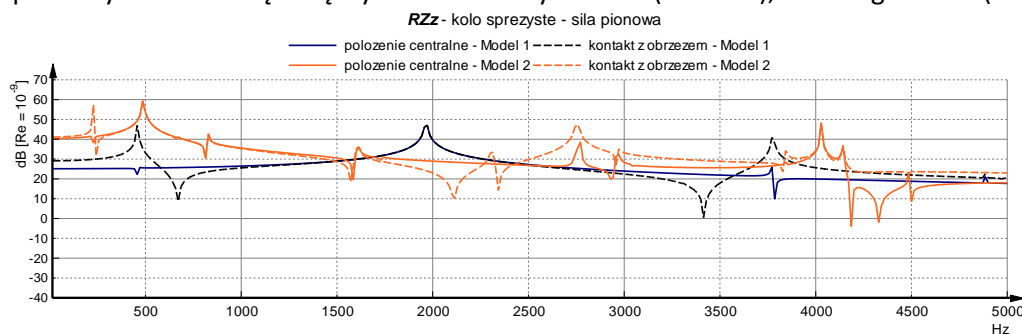
Przyjmując długość fali nierówności 5 mm i maksymalną prędkość pojazdu 70 km/h otrzymano maksymalną częstotliwość wymuszenia około 4 kHz. Należy stąd wywnioskować, że efekty akustyczne generowane przez drgania koła w zakresie wyższych częstotliwości nie są wywołane nierównościami powierzchni toczonego koła lub szyny. Można postawić hipotezę, że powodują je poślizgi kół i występujące łącznie z nim zjawisko mikrodrgań podczas utraty przyczepności (ang. *stick-slip*). Wartość pików transmitancji dla modów odpowiadających częstotliwości drgań 4400 Hz przy przyłożeniu siły o kierunku wzdłużnym skłania do przypuszczeń, że częstotliwość i związane z nią mody odpowiadają głównie za pisk lub wycie kół. Zdefiniowany wskaźnik szacujący energię kinetyczną obręczy i tarczy koła jest dla tych modów na ogół większy od 1. Uznałem więc za celowe działanie mające na celu wytłumienie drgań w pobliżu tej częstotliwości.

c) Analiza wysokoczęstotliwościowych drgań tłumionego koła tramwaju

Analiza dotyczyła liniowych modeli dwóch typów kół wyposażonych we wkładkę sprężystą. Szczególna uwaga poświęcona została porównaniu postaci drgań koła z wkładką i koła monoblokowego, transmitancji oraz warunkom brzegowym między wkładką sprężystą, tarczą

i obręczą koła. Analiza drgań koła miała na celu określenie odpowiedzi jego liniowego modelu przy wymuszeniu oddziaływaniem harmonicznym.

Badano dwa rodzaje kół wariantując kształt przekroju wkładki. W obu modelach ma ona kształt V, ale w pierwszym modelu kąt między ramionami wynosi 60° (model 1), a w drugim 120° (model 2).



Rys. 16. Porównanie wartości głównych kierunków transmitancji RXx, RYy, i RZz dla modelu 1 i modelu 2 punktu na obrzeżu koła

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzić można, że model o kącie rozwarcia wkładki wynoszącym 120° spełnia rolę zmniejszającą oddziaływanie nieusprężynowanej masy na szyny, natomiast kwestia tłumienia, przez wkładkę sprężystą i jej kształt, generowanego hałasu w układzie koło szyna jest dyskusyjna. Dobór zarówno materiału wkładki jak i jej kształtu wymaga zatem dokładnego zbadania energii kinetycznej koła związanej z postaciami drgań własnych. Takie badania powinny objąć szerszy zakres częstotliwości, a transmitancja powinna zostać obliczona również dla innych punktów koła niż tylko punkt na obrzeżu wybrany do tych obliczeń arbitralnie.

W kolejnym etapie badań, we współpracy z Polskimi Liniami Kolejowymi S.A. wykonałem **pomiary zużycia falistego szyn** (pomiar obu toków szynowych) na wybranych ze względu na największą intensywność zużycia odcinkach infrastruktury tramwajowej w Poznaniu. Pomiar te zostały wykorzystane do przygotowania modelu toru, który posłużył do **symulacyjnego sprawdzenia wpływu korugacji na współpracę koła tramwajowego z szyną**. W tych symulacjach także wykorzystany został nieeliptyczny model kontaktu CONTACT. Szczegółowe wyniki tych badań przedstawiono w raporcie [F6], a także w pracach [E6] i [E7]. Najważniejsze wnioski z tych badań są następujące:

- Obecność korugacji powoduje oscylacje siły pionowej Q, ale także poprzecznej Y (z mniejszą intensywnością). Oba te kierunki są skojarzone ze sobą poprzez geometrię styku koło szyna, w ten sposób, że w zależności od miejsca wystąpienia obszaru kontaktu na kole wahanie siły Q może powodować różną odpowiedź wartości siły poprzecznej Y. W związku z czym zmianom może ulegać także współczynnik Y/Q. Badania symulacyjne wykazały, że wartość graniczna wynikająca z kryterium Nadala nie została przekroczona z powodu korugacji. Takie przekroczenie odnotowano w związku z przejazdem przez spoinę szyny. Nie każda spoina powoduje jednak ten sam efekt.
- Zużycie faliste może znacznie zwiększyć ciśnienie maksymalne w punkcie styku. Jednym z mechanizmów tych zmian jest oscylacja siły pionowej Q, która impulsowo zwiększa wartość ciśnienia. Drugim mechanizmem jest pośredni: krótkookresowe nierówności toru, jakimi jest zużycie faliste powodują poprzeczne przemieszczanie się koła po szynie. Gdy obszar kontaktu zbliża się do obrzeża koła, rośnie ciśnienie maksymalne.
- Największe siły styczne koncentrowały się zawsze w przypadku wystąpienia nierównomiernego rozkładu ciśnienia w styku (wartości maksymalne skoncentrowane na małym obszarze). W przeciwnym wypadku obserwowano największe wartości gęstości sił styčných wzdłuż granicy obszarów adhezji i poślizgu.
- Podczas przejazdu przez spoinę obszary styku koła i szyny przyjęły kształt bliski eliptycznemu na odcinku, gdzie nierówności pionowe miały łagodny przebieg. Dla pozostałych przypadków kontakt był zdecydowanie nieeliptyczny. Stąd można postawić wniosek, że model nieeliptyczny wierniej odda rzeczywiste warunki podczas symulacji przejazdu po nierównościach o małych długościach fal.

W kolejnym etapie badań wykonałem **pomiary odchyłek promienia tocznego wybranych kół nowych i zużytych**. Wyniki zostały wykorzystane do przygotowania modeli kół o rzeczywistych wartościach odchyłek promieni tocznych, w celu sprawdzenia jaki wpływ mają te wartości na współpracę koła z szyną. Ze względu na specyfikę symulacji (wysokoczęstotliwościowe wymuszenia) wykorzystałem model toru podatnego. Wykonane badania opisane zostały szerzej w pracy [2], a także w raporcie [F7]. Najważniejsze wnioski z tych badań są następujące:

- Mimo braku śladów zużycia koła nowe wykazują bardzo niewielkie, lecz mierzalne odchyłki od kształtu okręgu (poligonizacja, chropowatość powierzchni). Odchyłki te są wynikiem przyjętej technologii obróbki skrawaniem obręczy koła. Zjawisko takie obserwuje się na koła toczonych zarówno na tokarkach karuzelowych jak i podtorowych.
- Przebiegi promieni tocznych nowych kół przyjmują nierówności OOR (ang. *Out-Of-Roundness*) o niższych składowych harmonicznym (poligonizacja), które najczęściej owalizują się lub zbliżają kształtem do trójkąta.
- Postępujące zużywanie się powierzchni tocznej koła w miarę przebiegającej eksploatacji powoduje w pierwszej kolejności znaczny wzrost chropowatości (nierówności o krótkich długościach fal), a w dłuższej perspektywie odchyłki związane np. z owalizacją koła.
- Nierówności OOR na jednym kole zestawu kołowego powodują bardzo podobne fluktuacje siły pionowej Q na drugim kole, które jest pozbawione takich wad. Wskutek występowania nierówności OOR chwilowa wartość siły Q może wzrosnąć nawet o 40%. Natomiast podczas występowania płaskich miejsc, chwilowa wartość siły Q może wzrosnąć ponad 10 razy (płaskie miejsce o głębokości 2 mm i promieniu zaokrągleń 200 mm).
- Płaskie miejsca, w zależności od swojego kształtu (głębokość, zaokrąglenia) wywierają bardzo różnorodny wpływ na przebieg siły pionowej między kołem a szyną. Dla małych wartości głębokości zależność siły można określić funkcją logarymiczną, a dla większych – funkcją liniową. Krawędzie płaskich miejsc zaokrąglają się w miarę przebiegającej eksploatacji. Początkowe zaokrąglenia małymi promieniami powodują znaczne obniżenie siły uderzenia koła w szynę, natomiast dalsze zwiększanie promienia zaokrąglenia powoduje wzrost tej siły. Dlatego istotne jest jak najszybsze wykrycie płaskiego miejsca i usunięcie go w początkowej fazie jego kształtowania.

Wspomniane wcześniej rozszerzenie opracowanych przeze mnie modeli o inne algorytmy kontaktu, uwzględniające nieeliptyczny kontakt między kołem a szyną, pozwoliło przy okazji na **porównanie wyników uzyskanych podczas symulacji przejazdu tramwaju dla wybranych algorytmów kontaktu** (FASTSIM i CONTACT), przedstawione szerzej w [F5]. Najważniejsze wnioski z tych badań są następujące:

- Symulacje wykonywane przy użyciu modelu FASTSIM wymagają trzykrotnie krótszego czasu obliczeń w porównaniu do modelu CONTACT.
- Podczas jazdy w łuku o promieniu 25 m różnice wartości siły wzdłużnej w styku były nieznacznie (około 15%) niedoszacowane przez algorytm FASTSIM. Podczas jazdy po prostym odcinku toru z nierównościami zauważono, że rozbieżności w wartościach siły wzdłużnej uzyskanych dla obydwu metod kontaktu występowały podczas zbliżania się obszaru styku do obrzeża koła.
- Algorytm FASTSIM powodował stosunkowo duże przeszacowanie poślizgu wiertnego w obszarze styku podczas przejazdu przez łuk o promieniu 25 m.
- Oba modele kontaktu wykazały nieprzydatność w obecności dużych wartości przemieszczenia poprzecznego koła na szynie, które jednocześnie odpowiadają wysokim wartościom kąta styku. Wykonywanie symulacji dla takich warunków może skutkować wynikami obciążonymi znacznym błędem.
- Podczas jazdy po odcinku w dobrym stanie technicznym z prędkością 70 km/h zaobserwowano niższe wartości maksymalnego ciśnienia w styku dla wyników obliczonych za pomocą algorytmu FASTSIM (średnio o ok. 11%).

4.3.5. Optymalizacja współpracy pojazdu z torem poprzez opracowanie nowego profilu koła tramwajowego

Po przeprowadzeniu wszystkich zaplanowanych analiz numerycznych współpracy koła tramwajowego z torem w różnych warunkach eksploatacji, przystąpiłem do etapu optymalizacji tej współpracy, poprzez **opracowanie nowego profilu koła tramwajowego**.

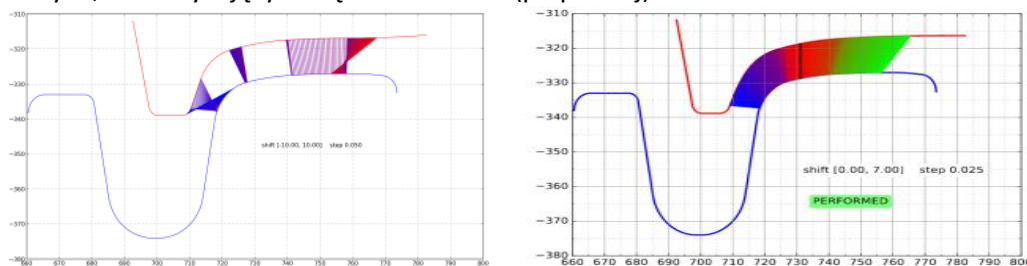
Problem ten zdefiniowałem w kategoriach problemu **optymalizacji wielokryterialnej** (dziedzina problemu oraz zbiór funkcji celu). Matematyczny opis profilu koła PST oraz profilu szyny 60R2 wykonany został przy użyciu kubicznych funkcji sklepanych (ang. *cubic spline*), odchodząc tym samym od tradycyjnego kształtu profilu koła, opartego o następujące po sobie łuki. Posiadając dane wstępne w postaci geometrii koła i szyny przystąpiłem do opracowania modelu kontaktu koła z szyną. W modelu tym poczyniono kilka założeń m.in. wystąpienie idealnego, jednopunktowego kontaktu pomiędzy szyną a kołem oraz możliwość translacji i obrotu zestawu kołowego względem osi OX. Aby mógł wystąpić idealny kontakt w punkcie kontaktu koła z szyną wartość stycznej na kole musi być równa wartości stycznej na szynie. Oczywisty jest również fakt zgodności wartości funkcji opisujących profil koła i szyny w punkcie kontaktu koła z szyną. Powyższe założenia pozwoliły wyprowadzić cztery równania opisujące tzw. idealny kontakt koła z szyną. W celu ich rozwiązania posłużono się metodą bisekcji przyjmując za obszar dopuszczalnych rozwiązań odpowiednio dziedzinę funkcji opisującej profil koła i szyny. W algorytmie zakładano jedynie translację wzdłuż osi OY, a wynikiem był kąt obrotu zestawu kołowego względem osi OX, translacja zestawu kołowego wzdłuż osi OZ, współrzędne punktów kontaktu na lewym i prawym kole oraz lewej i prawej szynie.

Zaproponowana metoda zasadniczej optymalizacji miała charakter wielokryterialny i uwzględniała następujące kryteria:

- współczynnik bezpieczeństwa przed wykolejeniem Y/Q (ang. *derailment coefficient*) – minimalizacja,
- współczynnik intensywności zużycia I_w (ang. *wear index*) – minimalizacja
- powierzchnia styku koła i szyny dla przesunięć poprzecznych koła ± 5 mm (ang. *contact area*) – maksymalizacja.

Kryteria te w sposób ilościowy opisywały typowe wymagania wobec wózków tramwajowych takie jak bezpieczeństwo jazdy, zużycie, itp., które są zależne od kształtu profilu koła, co potwierdzono na etapie analiz symulacyjnych.

Wstępna optymalizacja polegała na znalezieniu profilu, który posiada równomierny rozkład punktów kontaktu z szyną bez krzyżowania się linii kontaktu w zakresie translacji bocznej od $0 \div 7$ mm z krokiem $0,025$ mm. Udało się taki profil znaleźć (profil PP1) stosując w optymalizacji wariant algorytmu CMA-ES z funkcją celu związaną z redukcją tzw. „przerw” na wykresie kontaktu (minimalizacja) i krzyżującymi się liniami kontaktu (minimalizacja). Poniżej pokazano obecnie stosowany w Polsce profil koła PST (po lewej), a także profil PP1 posiadający równomierny rozkład punktów styku, bez krzyżujących się linii kontaktu (po prawej).



Rys. 17. Wykres zoptymalizowanego kontaktu z szyną profilu PP1 (po prawej)

W celu weryfikacji własności otrzymanych profili została napisana w języku Python procedura umożliwiająca zapisywanie geometrii profilu w formacie importowanym przez oprogramowanie do symulacji dynamiki (Simpack). Ponadto zautomatyzowano, poprzez skrypt, proces tworzenia modelu koła i szyny w programie ABAQUS z wykorzystaniem wspomnianego algorytmu obliczania kontaktu koła z szyną. Opracowano również filtr profili dopuszczalnych oraz rozbudowano narzędzie do wizualizacji własności profilu koła. W filtrze założono, że każdy profil w części toczonej i wewnętrznej obrzeża ma mieć stałą monotoniczność oraz wklęsłość. Wprowadzono również ograniczenia związane

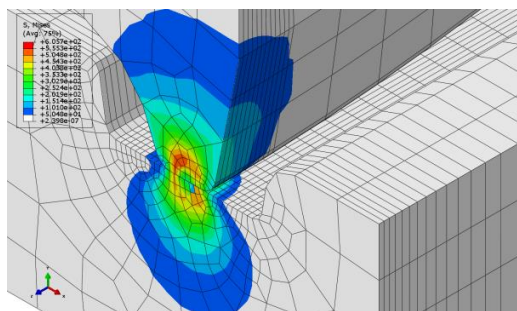
z luzem poprzecznym między kołem a szyną, a także kątem pochylenia i szerokością obrzeża. Algorytm kontaktu koła z szyną zawierający filtr profili oraz symulacje współpracy koła z szyną w programie Simpack stanowią podstawę w zasadniczej optymalizacji profilu koła tramwajowego.

W dalszej analizie sprawdziłem, na drodze symulacji komputerowej, **własności biegunowe profilu PP1** ze względu na rozkład punktów styku, na odcinkach toru o idealnej oraz rzeczywistej geometrii. Do symulacji wykorzystałem wykonany wcześniej model trójczłonowego tramwaju opartego na czterech wózkach. Najważniejsze wnioski z tych analiz są następujące:

- Profil PP1 zachowywał się jednoznacznie lepiej od profilu PST w aspekcie chwilowej liczby punktów styku. Było to jedno z kryteriów wstępnych optymalizacji.
- Profil PP1 zachowywał się również jednoznacznie lepiej od profilu PST w aspekcie współczynnika intensywności zużycia I_w . Różnice współczynnika I_w między badanymi profilami wynosiły nawet 45 % (na korzyść tego ostatniego).
- Współczynnik bezpieczeństwa przed wykołaceniem Y/Q podczas jazdy po prostej był mniejszy dla profilu PP1, natomiast w łukach tendencja ta nie była jednoznaczna. Profil PP1 posiada łagodniejsze przejście z łuku przejściowego na bok obrzeża, co przyczyniło się do redukcji skoków wartości Y/Q podczas wjeżdżania w łuk. Powoduje to jednak niską wartość dopuszczalną współczynnika Y/Q, co może mieć znaczenie w łukach o małych promieniach – dlatego profil ten musi być poddany dalszej optymalizacji.

Ponadto, wykonałem **numeryczną predykcję zużycia kół** o profilu PP1, w porównaniu do profilu PST. Wartość całkowitego zużycia profilu eksperymentalnego PP1 była nieco mniejsza niż profilu referencyjnego. Widoczne były także różnice jakościowe, zużycie profilu PP1 miało bardziej równomierny przebieg.

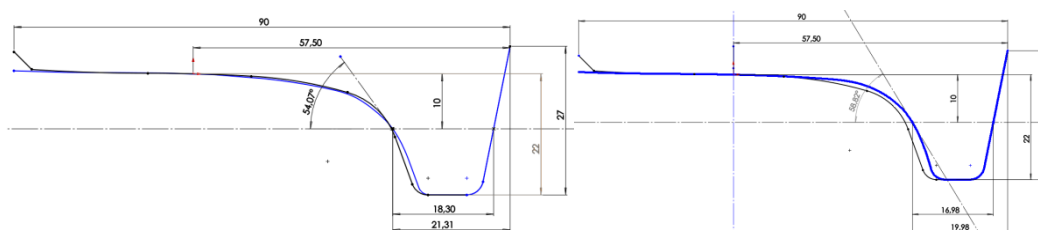
Wykonałem także **analizę parametryczną wartości promienia wierzchołka obrzeża koła tramwajowego w aspekcie naprężeń kontaktowych** dla przypadku przejazdu przez krzyżownicę. Profile obecnie eksploatowane w Polsce mają płaskie wierzchołki obrzeża. Obserwacja zmian ich kształtu na skutek zużycia podsunęła hipotezę o obniżeniu naprężeń kontaktowych dla styku zaokrąglonego wierzchołka obrzeża z rowkiem krzyżownicy. Do analizy przyjąłem pięć promieni krzywizny zarysów: 25, 40, 80, 120 i 160 mm. Podjąłem również próbę analizy połączenia koła PST i PP1 we współpracy z zużytymi profilami krzyżownic. Obliczenia przeprowadziłem korzystając z metody elementów skończonych. Na poniższym rysunku przedstawiony został jeden z wariantów o najkorzystniejszym rozkładzie naprężeń w obszarze styku koła i szyny.



Rys. 18. Naprężenia zredukowane w przekroju

Uzyskane wyniki wskazują na niewielki wpływ zmian promienia wierzchołka obrzeża w przypadku zarysu PP1, ponieważ profil ten ma już założony promień wierzchołkowy około 232 mm. W przypadku profilu PST po wprowadzeniu promienia wierzchołka widać wyraźny spadek naprężeń zredukowanych podczas jazdy po krzyżownicy. Naprężenia nie kumulują się jedynie na krawędziach obrzeża, ale ich rozkład jest bardziej równomierny na całej powierzchni styku. Naprężenia maksymalne zlokalizowane są w głąb powierzchni obrzeża obręczy koła. Analizując wyniki można stwierdzić celowość wprowadzenia promienia zaokrąglenia zarówno w nowym, jak i w już eksploatowanych profilach – najbardziej korzystne wyniki uzyskane zostały dla promienia 240 mm. Jego wprowadzenie zmniejsza wartości naprężeń zredukowanych i poprawia równomierność ich rozkładu. Mimo, że szerokość obrzeża jest mniejsza w profilu PP1, uzyskano niższe wartości naprężeń zredukowanych w kole.

Następnie, z wykorzystaniem algorytmów inspirowanych biologicznie, przeprowadziłem szereg właściwych eksperymentów optymalizacyjnych z różnymi parametrami, rozpoczynając od zbioru rozwiązań początkowych. Na drodze eksperymentów wstępnych przebadane zostały parametry optymalizacji (rozmiar populacji, liczbę równoległych wątków, współczynnik mutacji). W sumie wyznaczono wartości kryteriów optymalizacji dla 50 000 profili spełniających ograniczenia. W wyniku optymalizacji wyznaczone zostały 492 profile niezdominowane ze względu na trzy wcześniej wymienione kryteria. Poprzez odrzucenie profili zbyt podobnych do siebie, uzyskałem 16 niezdominowanych profili będących finalnym efektem zastosowanych metod. Kryteria optymalizacji obliczone zostały także dla 8 profili obecnie stosowanych w europejskich miastach (V15, Zurych, TW, VM, PST, T, Bostrab_A, FIAT). Wykonałem w sumie dwa przebiegi optymalizacyjne, dzięki którym uzyskano dwa zbiory niezdominowanych rozwiązań dla dwóch różnych modeli tramwajów. Na ich podstawie dokonałem wyboru ostatecznych profili dla każdego z pojazdów – biorąc po uwagę kryteria optymalizacyjne oraz grubość obrzeża, która powinna być wynikowo możliwie jak największa, przy zachowaniu założonego luzu między kołem a szyną. Zoptymalizowane profile przedstawione zostały na poniższym rysunku. Główną zmianą w odniesieniu do profilu PST jest ciągłe rozmieszczenie punktów, większy luz między kołem a szyną (6 mm zamiast 5 mm) oraz łagodniejsze przejście między powierzchnią toczną a bokiem obrzeża. Uzyskane rozwiązania zdominowały niemalże wszystkie istniejące europejskie profile kół w zakresie przyjętych kryteriów funkcji celu.



Rys. 19. Optymalizowane profile (kolor niebieski): 000805 (lewa strona) i 002969 (prawa strona) na tle profilu PST (kolor czarny)

W dalszej analizie sprawdzone zostały, na drodze symulacji komputerowej, **własności biegowe profili zoptymalizowanych** na odcinkach toru o idealnej oraz rzeczywistej geometrii. Profile sprawdzane były pod kątem prawidłowej współpracy z torem, celem uzyskania opinii technicznej niezależnej jednostki badawczej przed rozpoczęciem eksploatacji nadzorowanej. Otrzymane wyniki zestawilem z analogicznymi rezultatami dla wybranych profili kół tramwajowych eksploatowanych w Europie. Szerzej badania te zostały opisane w pracach [1], [4], [5] i [E8], a także w raportach [F4] i [F10].

Opracowane przeze mnie w projekcie nowe profile kół tramwajowych zostały następnie poddane **weryfikacji eksploatacyjnej na wybranych pojazdach** w Poznaniu i Łodzi. Na podstawie zebranych w projekcie wniosków dotyczących m. in odchyłek promienia tocznego, zdecydowałem się na toczenie na tokarkach podtorowych, jako zapewniające najwyższą dokładność toczenia przy dużym stopniu eliminacji poligonizacji. W związku z tym, odpowiednie tokarki w Poznaniu i w Łodzi zostały wyposażone w dedykowane programy toczenia. Przyjęta przeze mnie metodyka zakładała pogłębioną weryfikację współpracy koła z szyną podczas jazd próbnych na zajezdniach oraz na torach szlakowych bez pasażerów. Zaplanowano wykorzystanie kamery termowizyjnej i szybkoklatkowej do rejestracji obrazów styku oraz przetworników przyspieszeń i przemieszczeń umieszczonych w określonych punktach tramwaju. Po weryfikacji **zakończoną pozytywną oceną, potwierdzoną opinią przez niezależną jednostkę badawczą** (Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor”) tramwaje wyposażone w nowe koła zostały skierowane do regularnych przewozów pasażerskich.

Proces **eksploatacji nadzorowanej** rozpoczął się w połowie roku 2018 i jest obecnie w trakcie realizacji. Nowe profile kół zachowują się poprawnie i w aspekcie współpracy z torem nie odbiegają na niekorzyść od obecnie stosowanych – zapewniając spokojniejszy bieg pojazdu i mniejsze oddziaływania dynamiczne. O zaletach będzie można jednoznacznie napisać po dłuższym okresie eksploatacji i tak naprawdę po wyposażeniu w nowy profil większej populacji tramwajów. Należy pamiętać, że szyny tramwajowe w badanych miastach są już dopasowane do zużytego profilu PST (w Poznaniu) i T (w Łodzi), więc występuje tendencja dopasowania się nowego profilu do tych szyn.

Wszystkie powyższe prowadzone przeze mnie prace, prezentowane były na wielu prestiżowych międzynarodowych konferencjach branżowych, m. in:

- **International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (IAVSD)** w Queensland [4]
- **International Conference on Surface Modification Technologies (SMT)** w Mediolanie [7]
- **International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance (RAILWAYS)** w Ajaccio (2014) [E23], Cagliari (2016) [8] i Sitges (2018) [E6]
- **EUROMECH Colloquium in Rolling Contact Mechanics for Multibody System Dynamics** w Funchal [E8]
- **International Conference on Railway Bogies and Running Gears (BOGIES)** w Budapeszcie [E15]
- **Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA)** w Budapeszcie [E21].

Prezentowałem je również, choć w nieco bardziej aplikacyjnym ujęciu, przy okazji większości krajowych spotkań specjalistów z branży tramwajowej. Należy podkreślić, że wystąpienia te stały się **ogromnym impulsem w środowisku do innego spojrzenia na kwestię współpracy koła z szyną**. Przykładowo, w MPK Łódź został powołany specjalny zespół pracowników do bieżącej kontroli zużycia kół, celem wprowadzenia nowych standardów utrzymania, w MPK Wrocław rozważana jest systemowa zmiana profilu koła, a w Tramwajach Warszawskich podjęto walkę z hałasem na łukach.

Na podstawie dotychczas zgromadzonych informacji o współpracy koła tramwajowego z szyną i problemach eksploatacyjnych z tego zakresu przygotowałem również propozycję pełnego tekstu jednego z Zeszytów Technicznych Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej, które są w tej chwili wydawane jako substytut nieaktualnych już norm tramwajowych. Przygotowany przeze mnie Zeszyt 4.2 pt. „**Położenie zestawu kołowego na torze. Wymiarowe kryteria prowadzenia**” przeszedł pozytywnie opiniowanie przez większość polskich operatorów taboru tramwajowego (w postaci pisemnych opinii) i z końcem roku 2018 został skierowany do ostatecznej akceptacji przez Prezesa Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej. Zeszyt o tej tematyce jest od dawna oczekiwany przez specjalistów z branży tramwajowej. Zebrane w nim informacje mają stanowić narzędzie dla operatorów i zarządców infrastruktury do skuteczniejszego rozwiązywania problemów związanych ze współpracą koła tramwajowego z szyną oraz pomóc ograniczyć koszty utrzymania taboru.

Tym samym prowadzone przeze mnie badania tworzą podstawy do wprowadzenia w Polsce uregulowań i norm prawnych w zakresie bezpieczeństwa i komfortu jazdy, dostosowanych do specyfiki nowoczesnych tramwajów. W konsekwencji polskie tramwaje staną się bardziej bezpieczne, ciche i komfortowe, co zwiększy konkurencyjność transportu miejskiego względem samochodów osobowych – tak ważną w XXI wieku.

Obecnie, na podstawie obszernych raportów wykonanych w ramach projektu, przygotowujemy jest **cykl publikacji podsumowujących**, z których pierwsza została już przyjęta do druku w prestiżowym czasopiśmie Wear [1], a kolejne są w trakcie oceny przez recenzentów.

4.3.6. Systemowe podejście do problematyki oddziaływania pojazdu z torem

Prace badawcze, realizowane przeze mnie w projektach MONIT („**Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności**”) oraz LIDER („**Identyfikacja i modelowanie zjawisk nieliniowych w strefie kontaktu koła z szyną, celem opracowania nowego profilu koła tramwajowego**”) skłoniły mnie do szerszego spojrzenia na zagadnienie współpracy lekkiego pojazdu szynowego z torem, zarówno w skali makro (analiza zachowania dynamicznego pojazdu na torze), jak i w skali mikro (identyfikacja zjawisk na styku koła i szyny).

W polskich miastach obserwuje się od pewnego czasu **przyspieszoną degradację infrastruktury**, mającą nie tylko podłoże finansowe, ale również będącą konsekwencją wykorzystywania pojazdów o dużych naciskach. Tymczasem wciąż **brakuje pojazdu pomiarowego dedykowanego dla infrastruktury miejskiej**, jak również systemu umożliwiającego integrację danych z wielu źródeł, raportującego i wyznaczającego trendy zużycia infrastruktury. Taki system umożliwiłby optymalizację planowania prac utrzymaniowych, a w konsekwencji zapewnił oszczędność czasu i środków

finansowych. Z wykonanej analizy wynika również, że w Polsce wciąż brakuje kryteriów oceny stanu toru tramwajowego i bezpieczeństwa jazdy tramwaju na danym odcinku toru, możliwych do wykorzystania przez przedsiębiorstwa komunikacyjne w praktyce eksploatacyjnej.

Wszystko to skłoniło mnie do **opracowania koncepcji tramwaju pomiarowego**, służącego nie tylko do oceny stanu infrastruktury torowej, ale również do oceny zachowania dynamicznego pojazdu na zmierzonej infrastrukturze. Jako **pomysłodawca projektu** zwróciłem się z propozycją współpracy do spółki MLabs, z którą prowadziłem już wcześniej wspólne prace badawcze w zakresie mobilnych systemów monitorowania.

Opracowany przeze mnie pomysł, przy współpracy całego zespołu, zaowocował wnioskiem o dofinansowanie projektu badawczego „**Tramwaj pomiarowy do pomiarów parametrów i oceny stanu infrastruktury**”, który w 2016 roku złożyłem do startującego właśnie programu sektorowego INNOTABOR (finansowanie prac B+R na rzecz przedsiębiorców w sektorze innowacyjnego taboru szynowego do przewozów pasażerskich, towarowych i specjalnego przeznaczenia). W 2017 roku uzyskał on dofinansowanie (POIR.01.02.00-00-0190/16), a ja zostałem jego kierownikiem po stronie spółki TechSolutions Group, która jako partner projektu wykonuje wszystkie prace badawcze związane z analizą odpowiedzi dynamicznej tramwaju na wymuszenia pochodzące od toru, wraz z opracowaniem systemu identyfikacji tych wymuszeń w oparciu o analizę dynamiki pojazdu.

Pojazd pomiarowy, którego realizacja jest już obecnie mocno zaawansowana, będzie pełnił rolę **mobilnego laboratorium badawczego**. Użytkowany jako pojazd techniczny, będzie umożliwiał następujące badania:

- Analiza i ocena stanu technicznego każdego odcinka infrastruktury (pomiar nierówności, pomiar profilu główki szyny, wyznaczenie wskaźnika jakości toru itp.) przy rzeczywistym obciążeniu dynamicznym.
- Natychmiastowa detekcja uszkodzeń (pęknięcia, wykruszenia, wypłaszczenia itp.), zarówno metodami optycznymi, jak i wibroakustycznymi.
- Ocena stanu technicznego sieci trakcyjnej.
- Weryfikacja skrajni budowli i skrajni kinematycznej dla każdego odcinka infrastruktury.
- Monitorowanie bezpieczeństwa oraz spokojności jazdy.
- Predykcja zużycia oraz zmian elementów infrastruktury podczas eksploatacji.

Dodatkowym elementem systemu będzie **rozproszona sieć przetworników zainstalowana na pojazdach przewoźnika** będących w normalnej eksploatacji. Pozwoli to na odniesienie wyników uzyskanych z pojazdu pomiarowego do sygnałów z innych pojazdów, głównie w aspekcie ich oddziaływania z torem.

Projekt ma charakter komercyjny i zakłada pełne wdrożenie finalnego produktu do eksploatacji w polskich przedsiębiorstwach eksploatujących tabor. Dlatego też do czasu jego zakończenia jestem bardzo ostrożny w publikowaniu wyników. Zastosowane algorytmy obliczeniowe są dużo bardziej zaawansowane, niż to miało miejsce w poprzednich projektach – czego przykładem może być niedawna publikacja, bazująca jeszcze na wynikach uzyskanych z wciąż jeszcze jeżdżącego na jednym z tramwajów systemu MONIT [3].

4.3.7. Podsumowanie

Wszystkie opisywane wyżej prace badawcze dotyczą zagadnienia analizy i oceny współpracy tramwaju z torem w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Podjęcie tej tematyki, mając na uwadze stworzenie i przetestowanie metody badawczej, można uznać za celowe i dysertabilne. Zaproponowana metodologia badawcza zawiera wszystkie elementy procesu badawczego. Jest proces identyfikacji zjawisk, a następnie modelowania, weryfikacji modelu matematycznego, proces badań symulacyjnych i badań poligonowych oraz porównanie otrzymanych wyników. Jest także element twórczy, związany z zaproponowaniem własnych, autorskich kryteriów oceny bezpieczeństwa jazdy, opracowania nowego profilu koła tramwajowego celem poprawy współpracy koła i szyny, a także opracowanie systemu pomiarowego do monitorowania zachowania pojazdu na torze podczas jazdy. Zaproponowane przeze mnie podejście do zagadnienia analizy i oceny zachowania lekkiego pojazdu szynowego w warunkach eksploatacyjnych aglomeracji miejskiej, może mieć zastosowanie dla również dla innych typów pojazdów szynowych.

Podczas realizacji wszystkich prowadzonych prac badawczych **ściśle współpracowałem z producentami taboru oraz przedsiębiorstwami komunikacji miejskiej**, gdzie weryfikowane były zarówno założenia, jak i proponowane przeze mnie rozwiązania. Dzięki tej współpracy **stałem się osobą rozpoznawalną w branży transportu szynowego, a w dziedzinie dynamiki pojazdów jednym z nielicznych ekspertów w Polsce**. Udało mi się również utworzyć prężnie działający zespół badawczy, który potrafi rozwiązywać bieżące problemy w konstrukcji i eksploatacji pojazdów. Sprawdziłem się również w roli kierownika tego zespołu.

Prowadzenie tak wielu dużych projektów badawczych, przy jednoczesnym aktywnym udziale w pracach badawczych prowadzonych w ramach każdego z nich, jest niestety mocno obciążające czasowo. Dlatego też przedstawiony dorobek naukowy nie znajduje pełnego odbicia w samodzielnych publikacjach w renomowanych czasopismach – taka publikacja wymaga wielu tygodni pracy nad jej tekstem. Ponadto, z uwagi na komercyjny charakter wielu projektów, znaczna część wyników nie mogła zostać opublikowanych. Niemniej jednak w moim dorobku naukowym systematycznie przybywa nowych pozycji - obecnie po recenzjach są już trzy nowe publikacje w czasopismach z listy A (*Wear* oraz *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*). Ponadto dużą wagę przywiązywałem zawsze do wystąpień i publikacji na renomowanych międzynarodowych konferencjach branżowych. Było dla mnie ważne jako osoby jeszcze nie tak dawno nowej w środowisku, aby dać się osobiście poznać czołówce światowych naukowców z tej dziedziny. Sukces ten został w pełni osiągnięty. Podczas każdej z konferencji jestem rozpoznawalny i zapraszany do dyskusji. Efektem tego jest aktywna współpraca z wieloma ośrodkami badawczymi w Europie (Technische Universität Berlin, Delft University of Technology, Université Polytechnique Hauts-de-France i wiele innych), która już zaowocowała uczestnictwem w moim pierwszym europejskim projekcie badawczym.

Kilka lat temu jeden z profesorów powiedział: **„Nie można uczyć tworzenia, samemu nie tworząc niczego”**. Ta maksyma tkwi w mojej głowie, jako wyznacznik i motywacja do dalszej pracy. We wszystkie moje projekty włączam również studentów, starając się zarazić ich pasją tworzenia oraz pokazać, że nauka powinna służyć rzeczywistym potrzebom przemysłu.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych)

5.1. Projekt wózka tramwajowego z dwustopniowym usprężynowaniem, dla toru 1000 mm, z silnikami prądu przemiennego lub stałego

Jednym z pierwszych realizowanych przeze mnie projektów badawczych był „Projekt wózka tramwajowego z dwustopniowym usprężynowaniem, dla toru 1000 mm, z silnikami prądu przemiennego lub stałego” (KBN nr N R10 0037 06), w którym byłem głównym wykonawcą obliczeń dynamicznych i wytrzymałościowych nowego wózka, będącego alternatywą dla wysłużonych już wózków starszej generacji tramwajów 805N/805Na i pochodnych. Projekt zakończył się wyprodukowaniem przez partnera, spółkę Modertrans, dwóch wózków prototypowych, które cały czas są w ofercie przedsiębiorstwa i są obecnie eksploatowane np. w Elblągu. Rozwiązania zastosowane w konstrukcji nowych wózków zapewniają znacznie lepszy komfort jazdy, przy jednoczesnej ich pełnej kompatybilności ze starym taborom. Wózki są chwalone zarówno przez operatorów, jak i motorniczych, którzy również odczuwają znaczną poprawę zachowania tramwaju, zwłaszcza na torze zużytych.

Przykładowe publikacje opracowane w ramach tego osiągnięcia: [E33].

5.2. Innowacyjny pakiet podsystemów poprawiających właściwości funkcjonalne i eksploatacyjne lekkich pojazdów szynowych

Ponadto, jako jeden z głównych wykonawców, brałem udział w projekcie „Innowacyjny pakiet podsystemów poprawiających właściwości funkcjonalne i eksploatacyjne lekkich pojazdów szynowych” (POIG.01.04.00-30-336/13), realizowanym ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. Wnioskodawcą i liderem projektu była firma Solaris Bus & Coach, z którą już wtedy aktywnie współpracowałem przy

mniejszych pracach badawczych, dotyczących między innymi analizy skrajni kinematycznej. W projekcie byłem bezpośrednio zaangażowany w prace badawcze poświęcone opracowaniu systemu stabilizacji toru jazdy tramwaju, poprawiającego jego przejazd przez łuki o małych promieniach. Poprzez układ specjalnie zaprojektowanych siłowników, system steruje obrotem pudła nad wózkiem podczas przejazdu przez łuk toru. Byłem głównym wykonawcą w zakresie analiz skrajni kinematycznej, jak również analiz symulacyjnych dynamiki pojazdu celem sformułowania założeń i doboru głównych parametrów systemu. Brałem również udział w pracach nad pasywnymi i aktywnymi systemami tłumienia hałasu tocznego.

Przykładowe publikacje opracowane w ramach tego osiągnięcia: [E4], [E24].

5.3. Innowacyjny tramwaj miejski

MFB - rodzina średniopodłogowych wózków tramwajowych

W 2013 roku rozpocząłem współpracę z firmą Modertrans w ramach możliwości dofinansowania projektu nowego, w pełni niskopodłogowego tramwaju oraz rodziny wózków do tramwajów częściowo niskopodłogowych. W efekcie, wspólnymi siłami, w tym samym roku powstały koncepcje dwóch projektów badawczych:

- „**Innowacyjny tramwaj miejski**” w ramach programu DEMONSTRATOR+ (wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej)
- „**MFB - rodzina średniopodłogowych wózków tramwajowych**” w ramach programu INNOTECH (wsparcie nauki i przedsiębiorstw w zakresie realizacji innowacyjnych przedsięwzięć z różnych dziedzin nauki i branż przemysłu).

Obydwa projekty uzyskały wysokie oceny ekspertów i zostały zakwalifikowane do dofinansowania. Politechnika Poznańska była partnerem w każdym z nich, a ja miałem zaszczyt pełnić funkcję kierownika po stronie uczelni.

Kierowany przeze mnie zespół badawczy liczył w sumie kilkadziesiąt osób, które wykonywały obliczenia, analizy symulacyjne oraz badania eksperymentalne. Bezpośrednio, jako główny wykonawca, brałem udział w następujących pracach badawczych:

a) Opracowanie metody wyznaczenia i weryfikacji założeń nowego tramwaju w oparciu o analizę istniejących konstrukcji tramwajów oraz wymagań przetargowych

W pierwszym etapie prac wykonałem analizę konstrukcji tramwajów niskopodłogowych produkowanych w Polsce i w Europie, a także przez wybranych producentów z innych kontynentów. Na tej podstawie zidentyfikowałem i zestawiałem najważniejsze parametry konstrukcyjne wybranych pojazdów, jak również ich wpływ na funkcjonalność, cenę oraz właściwości dynamiczne pojazdu.

W drugim etapie wykonałem analizę wymagań przetargowych w polskich miastach w aspekcie oczekiwań operatorów co do konstrukcji tramwaju. Dzięki temu opracowany został pewien zbiór minimalnych wartości brzegowych dla nowo projektowanego tramwaju, a także zidentyfikowane zostały parametry, które podlegają ewentualnej negocjacji w procesie przetargowym. Na tej podstawie opracowałem metodykę wyznaczania i weryfikacji założeń dla nowego tramwaju w oparciu o najnowsze trendy w konstrukcji pojazdów.

b) Opracowanie długości członów tramwaju w oparciu o kryteria komfortu pasażerów

Na tym etapie prac przeprowadziłem dobór długości poszczególnych członów nowego tramwaju, co stanowi kluczowy element w procesie konstrukcyjnym pojazdu, rzutujący przede wszystkim na komfort jazdy pasażerów. Wybrane analizy prowadziłem były w oparciu o obowiązujące normy komfortu i ergonomii, jak również skrajni kinematycznej wagonów tramwajowych. Na podstawie przeprowadzonych analiz udało się opracować wariant ukierunkowany na wygodę i samopoczucie pasażerów, gwarantując komfortową podróż nawet wysokim osobom, co jest nie bez znaczenia biorąc pod uwagę zmienność cech populacji osób w Europie. Wybrany wariant charakteryzuje się ponadto możliwością wydzielenia w tramwaju różnych stref, w zależności od nierzadko rozbieżnych oczekiwań pasażerów, z których część oczekuje spokoju i odpoczynku, a część przeciwnie – dyskusji w gronie podróżujących wspólnie osób.

c) Opracowanie metodyki badań oraz utworzenie modeli geometrycznych pojazdu i toru do analiz skrajni kinematycznej

W dalszej części prowadzonych prac opracowałem metodykę badań skrajni kinematycznej w oparciu o przestrzenne modele geometryczne pojazdu i toru. W modelowaniu uwzględniłem pełną dynamikę pojazdu, wynikającą z jego ruchu po torze zużyty w różnych warunkach eksploatacji. Przeprowadzenie analiz wymagało określenia najważniejszych parametrów tramwaju oraz zdefiniowania zachowania się pojazdu podczas jazdy na prostej oraz jazdy na łukach o promieniach od 18 do 500 metrów.

W ramach prowadzonych badań szczególny nacisk położyłem również na opracowanie maksymalnych gabarytów kabiny motorniczego, z wykorzystaniem numerycznych modeli antropometrycznych wybranych przedstawicieli populacji różnych krajów europejskich.

W kolejnym etapie badań wyznaczyłem maksymalne kąty skrętu przegubów tramwaju Moderus Gamma, zgodnie z wstępnymi założeniami konstrukcji. Analizowane scenariusze dotyczyły skrajnych przypadków wykolejenia pojazdu na łukach pionowych toru. Dodatkowo, dla wybranych scenariuszy, wyznaczyłem również kąt skrętu ramy wózka względem danego członu pojazdu.

d) Opracowanie algorytmów do wyznaczania nacisków koła tramwajowego na szynę w warunkach statycznych

Na podstawie wyznaczonych rozkładów ilości pasażerów w poszczególnych strefach pojazdu, wyznaczyłem rozkład obciążenia poszczególnych członów tramwaju. Oszacowanie nacisków koła na szynę jest istotnym zagadnieniem podczas projektowania pojazdu. Dotychczas w praktyce inżynierskiej zakładano a priori, że rozkład masy pojazdu jest równomierny, a środek masy znajduje się w geometrycznym środku pojazdu. Ponieważ obciążenie pojazdów transportu publicznego zmienia się dynamicznie, opracowana została aplikacja, za pomocą której projektant na podstawie danych bazowych o pojeździe będzie mógł oszacować nacisk kół na podłoże w zależności od rzeczywistego lub losowego rozkładu masy pasażerów w pojeździe.

e) Wykonanie analiz numerycznych celem opracowania maksymalnych wymiarów przekrojów poprzecznych pudeł tramwaju

W dalszej części prowadzonych prac wykonałem analizy numeryczne celem opracowania maksymalnych wymiarów przekrojów poprzecznych pudeł nowego tramwaju ze względu na wymagania skrajni kinematycznej. Przeprowadzenie analiz wymagało określenia najważniejszych parametrów tramwaju oraz zdefiniowania jego zachowania się podczas jazdy na prostej oraz w łuku. Na podstawie tych badań utworzone zostały bryłowe modele geometryczne poszczególnych członów pojazdu, które następnie zostały przekazane do zespołu zajmującego się opracowaniem designu.

f) Opracowanie wariantów układu biegowego wózka w aspekcie rozmieszczenia siedzeń w pierwszym członie pojazdu

Dodatkowo wykonałem szereg analiz rozmieszczenia elementów układu biegowego na wózku pojazdu oraz ich wpływu na rozmieszczenie siedzeń w pierwszym członie pojazdu. Celem tej wariantowej analizy było rozeznanie potencjalnych możliwości zabudowy wózka, jak również określenie ich wpływu na układ przestrzeni pasażerskiej w badanym członie pojazdu. W analizach wykorzystałem opracowane w tym celu modele przestrzenne konstrukcji pojazdu.

g) Wykonanie badań symulacyjnych nowego pojazdu oraz rodziny wózków

Na tym etapie prac opracowałem metodykę badań symulacyjnych nowego tramwaju oraz rodziny wózków średniopodłogowych. Zakładała ona budowę zaawansowanych, nieliniowych modeli matematycznych i fizycznych zarówno pojazdu, jak i toru, które pozwoliły na symulacyjną ocenę wzajemnego oddziaływania układu pojazd – tor. Następnie przeprowadzony został szereg symulacji dla różnych warunków jazdy, wariantów stanu zużycia toru i zmian jego geometrii. Pozwoliło to (poprzez symulację komputerową) na wierne odwzorowanie ruchu rzeczywistego obiektu na torze zużyty, dla zadanych parametrów zużycia toru i zmiany jego geometrii (odchyłki pionowe i poprzeczne, przechyłka toru, zmiana rozstawu szyn, czy też pochylenia toków szynowych). W celu odwzorowania rzeczywistych wymuszeń działających na pojazd, przeprowadzony został również pomiar nierówności wybranych odcinków infrastruktury.

h) Dobór parametrów układu biegowego tramwaju w oparciu o obliczenia numeryczne

Na podstawie opracowanych modeli symulacyjnych tramwaju niskopodłogowego, wykonałem obliczenia układu prowadzenia i zawieszenia tramwaju. W oparciu o otrzymane wyniki wyznaczyłem charakterystyki elementów podatnych: sprężyn I stopnia, miechów pneumatycznych II stopnia, tłumików pionowych i poprzecznych, prowadników sił wzdłużnych oraz odbijaków skrętu wózka. Wyznaczone charakterystyki elementów podatnych, jak również ich rozmieszczenie na pojeździe, zostały poddane weryfikacji za pomocą niezależnej serii obliczeń sprawdzających, wykonywanych wg odrębnej metodyki.

Wyznaczone zostały również własności biegowe pojazdu (komfort jazdy, spokojność biegu, bezpieczeństwo przed wykolejeniem itp.) dla różnych warunków jazdy.

i) Wyznaczenie punktowych i przestrzennych charakterystyk akustycznych tramwaju

Ze względu na fakt, że pojazd jak i rodzina wózków dedykowane są przede wszystkim dla infrastruktury tramwajowej miasta Poznania podjąłem decyzję o zebraniu materiału badawczego, który posłuży do weryfikacji założeń konstrukcyjnych, uwzględniając specyfikę badań in-situ. W tym celu opracowana została autorską metodykę eksperymentalnych badań wibroakustycznych tramwajów w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Oprócz typowego, normatywnego podejścia do pomiaru hałasu zgodnie z ISO 3095:2011 wykorzystane zostały następujące sygnały wibroakustyczne:

- drgania szyny w trzech kierunkach
- drgania parasejsmiczne gruntu
- hałas toczenia
- dźwięk z matrycy mikrofonów, obejmującej geometrycznie pole zjawiskowe od główki szyny aż powyżej górnej krawędzi zarysu wnęki wózka.

Zgromadzony materiał badawczy pozwolił na określenie wrażliwości poszczególnych parametrów i charakterystyk na zmienne warunki eksploatacyjne. Najważniejszym wynikiem przeprowadzonych prac jest uzyskanie charakterystyk wibroakustycznych poszczególnych typów tramwajów w odniesieniu do różnych prędkości jazdy. Uzyskany materiał badawczy pozwolił również na stworzenie bazy danych o eksploatowanych w Poznaniu tramwajach, co stanowiło podstawę do rankingowania pojazdów względem budowanego prototypu oraz jednoznacznej oceny poprawności przyjętych założeń konstrukcyjnych w odniesieniu do już istniejących pojazdów.

j) Wykonanie eksperymentalnej weryfikacji stanów rezonansowych koła tramwajowego

Dalsze prace dotyczyły eksperymentalnej weryfikacji własności komponentów przewidzianych do instalacji na pojeździe w tak wrażliwym obszarze jak oddziaływanie wibroakustyczne na ludzi i środowisko. W tym celu przeprowadzone zostały dwuetapowe badania mające na celu opracowanie metody szybkiej estymacji parametrów modalnych koła wraz z określeniem wpływu struktury drgań własnych tego elementu na charakterystyki tonalne dźwięku generowanego przez tramwaj przy jeździe w łuku. W pierwszym etapie badań przeprowadzono test impulsowy kół tramwajowych zainstalowanych pod pojazdem w wózkach jezdnych. Mając na uwadze warunki podparcia kół i przeniesienia sił z pojazdu na szyny opracowano uśrednione charakterystyki inertancji i mobilności dynamicznej obręczy koła tramwajowego zainstalowanego na kole. W drugim etapie badań zainstalowano liniowe mikrofony pomiarowe pod badanym pojazdem i wykonano jazdy testowe z rejestracją sygnałów akustycznych generowanych przez każde koło oddzielnie.

W ramach projektu powstał **nowoczesny niskopodłogowy tramwaj o nazwie Moderus Gamma**, wyposażony w nowoczesny układ biegowy, niespotykany do tej pory w polskich tramwajach. Pojazd cechuje się nie tylko niższymi naciskami kół na szyny, ale również wysokim komfortem jazdy i niską emisją akustyczną. Obecnie prototyp pojazdu znajduje się w eksploatacji nadzorowanej w MPK Poznań.

Przykładowe publikacje opracowane w ramach tego osiągnięcia: [A1], [A4], [E9], [E11], [E12], [E13], [E17], [E18], [E25].

Przykładowe raporty opracowane w ramach tego osiągnięcia: [F22 – F49].

5.4. Opracowanie koncepcji koła tramwajowego uniwersalnego

W roku 2016 rozpocząłem również współpracę z firmą Carbonex, w ramach projektu badawczego „**Opracowanie technologii obniżenia kosztu eksploatacji koła tramwajowego drogą stopniowego wprowadzania do eksploatacji koła innowacyjnego uniwersalnego**”, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Poddziałania 1.1.1 „Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa”. W projekcie tym Politechnika Poznańska, pod moim kierownictwem, była podwykonawcą większości prac badawczych. Jako główny wykonawca uczestniczyłem w następujących pracach:

a) Eksperymentalne badania wibroakustyczne kół tramwajowych

W ramach tej pracy przeprowadziłem eksperymentalne badania porównawcze dwóch konstrukcji kół biegowych tramwaju w czasie jazdy. Genezą podjęcia badań eksperymentalnych były bieżące wyniki prac badawczych w realizowanym projekcie B+R, jak również analizy rynku, które wskazują na możliwość wdrożenia do eksploatacji kół bez elementów tłumiących. Głównym celem przeprowadzonych badań była analiza aktywności wibroakustycznej tramwaju wskutek zmiany kół z typu 102N (katalogowe) na koła sztywne (obrzęczowe, bez elementów tłumiących), których koncepcji jestem współautorem. Wnioskowanie przeprowadzono w oparciu o miary punktowe (ilościowe) drgań i hałasu, jak również w oparciu wybrane analizy jakościowe.

b) Opracowanie programu badań zmęczenia koła tramwajowego uniwersalnego

W ramach tego zadania, jako współautor i koordynator prac opracowałem pełny program weryfikacji wysokocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej koła tramwajowego pod działaniem ściśle określonych wartości sił dynamicznych. Z uwagi na brak odpowiednich norm odnoszących się do badań kół tramwajowych w Polsce, przygotowany został autorski program badań, który uwzględnia również przeprowadzenie próby quasi-statycznej oraz badań nieniszczących.

c) Analizy symulacyjne MBS z wykorzystaniem modelu uzgodnionego typu pojazdu

W tym zadaniu przeprowadziłem analizy symulacyjne wpływu koła o różnej konstrukcji na oddziaływanie pojazdu tramwajowego z torem, poprzez ocenę jego własności dynamicznych oraz wybranych parametrów w obszarze styku koło-szyna. Analizy zostały wykonane z uwzględnieniem stosowanych rozwiązań w obszarze konstrukcji kół tramwajowych oraz zjawisk zachodzących na styku koła z szyną.

Podczas symulacji wykorzystałem sześć różnych profili toru, umożliwiającą uzyskanie niezależnych od siebie wyników oraz odzwierciedlenie niejednorodnych warunków panujących na całej sieci tramwajowej. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na wytypowanie kierunków dalszych prac nad kołem tramwajowym uniwersalnym, szczególnie w odniesieniu do pętli zwrotnej analiz dla celów optymalizacji poszczególnych rozwiązań.

d) Eksperymentalna analiza porównawcza dynamiki strukturalnej kół tramwajowych typu V60 i SAB

Przeprowadziłem również badania dotyczące analizy własności dynamicznych kół tramwajowych typu V60 oraz kół tramwajowych 102N. Analiza została przeprowadzona w oparciu o narzędzie analizy modalnej – test impulsowy, bazując na możliwych odpowiedziach kół na zadane wymuszenia zewnętrzne. Analiza sygnałów odbywała się systemowo, uwzględniając sygnał sił wymuszających jako sygnał referencyjny oraz sygnał przyspieszeń drgań jako odpowiedź. Zadaniem była identyfikacja właściwości systemu. Testy impulsowe zostały przeprowadzone na kołach nieobciążonych, zamontowanych na uniesionych wózkach jezdnych.

Zgromadzony materiał badawczy posłużył do określenia podatności dynamicznej badanych typów kół tramwajowych poprzez wyznaczenie charakterystyk inertancji. Uzyskane wyniki pozwoliły na zidentyfikowanie oddziaływań dynamicznych konstrukcji kół obecnie powszechnie stosowanych w eksploatacji.

e) Referencyjne charakterystyki wibroakustyczne koła klasycznego w zakresie środowiskowym

Na podstawie wykonanych analiz, wyznaczyłem referencyjne charakterystyki wibroakustyczne koła klasycznego w zakresie środowiskowym. W tym celu przeprowadziłem badania ruchowe wybranego tramwaju na zajezdni w ruchu po łuku oraz badania własności dynamicznych kół. Podczas badań porównawczych uzyskano miary punktowe drgań i hałasu pozwalające na opisanie różnic pomiędzy poszczególnymi rodzajami kół w warunkach ruchowych. Wnioski z przeprowadzonych badań ruchowych pozwoliły na przyjęcie przybliżonego poziomu odniesienia wtórnych efektów wibroakustycznych oddziaływania w układzie pojazd szynowy – tor dla wszystkich dalszych konstrukcji koła tramwajowego uniwersalnego.

f) Eksperymentalna identyfikacja parametrów próbnego koła uniwersalnego w stanie nowym

W ramach tego etapu prac, opracowałem metodykę do eksperymentalnej identyfikacji parametrów modalnych próbnych kół uniwersalnych w stanie nowym w odniesieniu do koła referencyjnego V60. Genezą podjęcia prac była postać jakościowa wyników analiz harmonicznych kół, która wymaga do interpretacji wiedzy bazowej związanej z dynamiką strukturalną obiektów technicznych. Takie podejście może utrudniać interpretację złożonych postaci wyników przez podmioty zainteresowane produktami powstałymi jako efekt prac projektowych. Konieczne stało się utworzenie mierzalnych ocen ilościowych wyników badań. Usystematyzowano wyniki analiz dynamiki strukturalnej kół przypisując im ocenę punktową w skali umożliwiającej ich bezpośrednio porównanie. Zaproponowano dwie metody obliczeń uwzględniająca liczbę i szerokość pików w transmitancji oraz uwzględniająca energię kinetyczną i moduł transmitancji.

g) Kryteria oceny konstrukcji koła tramwajowego uniwersalnego

W toku przeprowadzonych analiz sformułowalem kryteria oceny konstrukcji koła tramwajowego uniwersalnego. Dotyczyły one dwóch docelowych grup odbiorców: konstruktorów i użytkowników. Kryteria oceny konstrukcji przeznaczone dla konstruktorów zostały sformułowane na potrzeby ogółu procesu konstruowania dla sprawdzenia poszczególnych rozwiązań alternatywnych koła i ukierunkowania dalszych obszarów prac konstrukcyjnych. Spośród wyodrębniono kryteria oceny konstrukcji istotne dla docelowej grupy odbiorców konstrukcji – użytkowników. Opracowane kryteria oceny konstrukcji uniwersalnych kół tramwajowych zostały opracowane na podstawie norm i wytycznych, jak również na podstawie badań eksperymentalnych i symulacyjnych.

Przykładowe raporty opracowane w ramach tego osiągnięcia: Uzyskane w projekcie wyniki nie mogą zostać opublikowane do czasu wprowadzenia nowego koła do oferty firmy. Stanowią na razie know-how i tajemnicę twórców, pilnie strzeżoną przed czujną konkurencją.

Przykładowe raporty opracowane w ramach tego osiągnięcia: [F14 – F21].

5.5. Opracowanie nowych narzędzi i metodologii symulacji hałasu kolejowego oraz analizy kosztów i korzyści działań łagodzących hałas zewnętrzny i wewnętrzny pojazdów szynowych

Wieloletnia współpraca z Technische Universität Berlin zaowocowała w roku 2016 wspólnym wnioskiem o dofinansowanie międzynarodowego projektu badawczego „**Decision supporting tools for implementation of cost-efficient railway noise abatement measures**” (Grant agreement ID: 730829), finansowanego przez Komisję Europejską w ramach programu Horyzont 2020 (H2020-EU.3.4.8.6. - Cross-cutting themes and activities, Topic S2R-OC-CCA-03-2015 - Noise reduction methodologies).

Celem projektu było opracowanie nowych narzędzi i metodologii symulacji hałasu kolejowego oraz analizy kosztów i korzyści działań łagodzących hałas zewnętrzny i wewnętrzny pojazdów szynowych. Jako kierownik projektu, brałem bezpośredni udział w każdym z czterech zadań realizowanych przez Politechnikę Poznańską, na które składały się następujące analizy:

a) Analiza i ocena metod i efektów redukcji hałasu i drgań w warunkach rzeczywistych

W ramach realizacji powyższego punktu, opracowany został zbiór metod oraz różnych podejść obecnie wykorzystywanych do oceny jakości struktury dźwięku odbieranego przez odbiorcę w

różnych dziedzinach transportu. Skupiono się na opisie wskaźników psychoakustycznych, które są również nazywane obiektywnymi wskaźnikami oceny jakości dźwięku. Ponadto, przedstawiono szereg podejść subiektywnych metod służących do oceny dźwięku, w oparciu o obecne trendy w podejściu psychoakustycznym. Prace zostały zrealizowane wspólnie z holenderskim Narodowym Centrum Lotniczym (NLR).

b) Analiza istniejących metod wykorzystywanych do akustycznego charakteryzowania źródeł i podzespołów

Istotą prowadzonych prac na tym etapie projektu był przegląd istniejących technik oraz metod wykorzystywanych do charakteryzowania hałasu powstałego na skutek transmisji drgań poprzez różnego rodzaju struktury (ang. *structure-borne noise*) oraz hałasu emitowanego bezpośrednio źródło dźwięku, którego w pierwszej kolejności ośrodkiem propagacji jest powietrze (ang. *air-borne noise*). Prócz przedstawienia obecnie stosowanych metod naukowych, opisano również powszechnie stosowane w transporcie szynowym standardy i normy europejskie wraz z ich wadami i zaletami, odnoszącymi się do akustycznego charakteryzowania źródeł i podzespołów pojazdu szynowego.

c) Weryfikacja wybranych metodologii służących do akustycznego charakteryzowania źródeł i podzespołów

W ramach realizacji tych prac wykonano szereg pomiarów akustycznych oraz chropowatości akustycznej powierzchni tocznych szyn i kół wybranego pojazdu. Pomiarów akustycznych realizowano zarówno wewnątrz wybranego typu miejskiego pojazdu szynowego, jak i na zewnątrz w określonych punktach poznańskiej infrastruktury tramwajowej (w ramach pomiarów w tzw. testach *pass-by*). W przypadku pomiarów chropowatości akustycznej kół, wybrano tramwaje, które cechowało różne zużycie powierzchni tocznej kół. Natomiast w przypadku pomiarów chropowatości akustycznej powierzchni szyn, wybrano dwa odcinki torów, charakteryzujące się innym zużyciem oraz korugacją. Celem przeprowadzonych analiz zmierzonych sygnałów było zbadanie wpływu chropowatości akustycznej (również korugacji) na generowanie hałasu niskoczęstotliwościowego (tj. w przedziale pasm 50÷250 Hz). Tym samym możliwe było scharakteryzowanie najwyższej składowej hałasu szynowego tj. hałasu toczenia, który powstaje poprzez dynamiczną interakcję na styku powierzchni tocznych kół i szyn. Stwierdzono i opisano korelację pomiędzy skumulowaną chropowatością akustyczną powierzchni tocznych kół i szyn i poziomem ciśnienia akustycznego

d) Walidacja i aplikacja wybranych metod charakterystyki akustycznej źródeł

Głównym celem była walidacja wybranych metod i standardów charakteryzujących źródła dźwięku wewnątrz pojazdu. Na podstawie pomiarów kamerą akustyczną i sondą natężenia dźwięku obliczono równoważne poziomy mocy akustycznej oraz widma poziomów mocy różnych źródeł dźwięku wewnątrz pojazdu. Tym samym scharakteryzowano pod względem akustycznym system wentylacji i klimatyzacji powietrza wybranego miejskiego pojazdu szynowego.

Ważnym aspektem badań w ramach powyższego zadania była identyfikacja wybranych źródeł dźwięku oraz hałasu transmitowanego przez podzespoły wyposażenia wnętrza pojazdu. Dzięki wykorzystaniu w tych badaniach kamery akustycznej, możliwa była lokalizacja obszarów/elementów wewnątrz poruszającego się pojazdu, z których transmitowane jest najwyższe widmo poziomów dźwięku lub mocy akustycznej. Wiedza na temat poszczególnych sygnatur akustycznych (moc akustyczna wraz z widmami mocy i poziomami ciśnienia akustycznego) emitowanych przez różne źródła lub transmitowane przez różne elementy wyposażenia wnętrza pozwala podjąć odpowiednie kroki w celu ich skutecznego wytłumienia. Ostatnim rezultatem osiągniętym przy użyciu pomiarów kamery akustycznej była analiza sygnatury akustycznej podczas przejazdu po różnych typach infrastruktury torowej (np. przejazd przez most, tunel, wiadukt oraz jazda w łuku). Umożliwiło to ocenę ich wpływu na klimat akustyczny generowany wewnątrz danego typu pojazdu szynowego.

Przeprowadzone w opisywanym projekcie prace mają bezpośredni wpływ na poprawę jakości dźwięku i komfortu akustycznego oraz skuteczności potencjalnych technologii na etapie produkcji pojazdu. Dążenie do dalszego rozwoju i prognozowania efektywności kosztowej tworzą podwaliny pod nowe narzędzia wspierające podejmowanie decyzji w aspekcie hałasu i drgań.

Przykładowe publikacje opracowane w ramach tego osiągnięcia: [E7].

Bibliografia:

Wszystkie odnośniki literaturowe zawarte w niniejszym autoreferacie (umieszczone w nawiasach kwadratowych) odwołują się do odpowiednich pozycji w Załączniku nr 4: Wykaz dorobku habilitacyjnego.