

Dr hab. inż. Michał Opala
Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej
Zakład Podstaw Budowy Urządzeń Transportowych
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
email: michal.opala@pw.edu.pl

Warszawa, 16.03.2021 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Staśkiewicza zatytułowanej “*Kształtowanie profilu koła tramwajowego w aspekcie oddziaływania dynamicznego z szyną*”

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowi Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej z dnia 22.12.2020 r. oraz pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport prof. dr hab. inż. Jacka Pielechy z dnia 12.01.2020 r.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasza Staśkiewicza została przygotowana w Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Bartosza Firlika, prof. Politechniki Poznańskiej, promotorem pomocniczym jest dr inż. Paweł Komorski. Praca powstawała w czasie realizacji projektu badawczego „Identyfikacja i modelowanie zjawisk nieliniowych w strefie kontaktu koła z szyną, celem opracowania nowego profilu koła tramwajowego” (LIDER/20/521/L-4/12/NCBR/2013), finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach 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), projektem kierował dr hab. inż. Bartosz Firlik, prof. PP.

Praca jest wykonana w formie książki liczącej 131 stron, składa się z 8 głównych rozdziałów, zawiera także streszczenie w językach polskim i angielskim, słownik pojęć stosowanych w rozprawie, a także bibliografię zawierającą 149 pozycji, wśród tych pozycji znajdują się prace,

których autorem lub współautorem jest mgr inż. Tomasz Staśkiewicz. Prace te opublikowane są głównie w postaci wysoko punktowanych artykułów naukowych. Rozprawa zawiera znaczną ilość ilustracji, które pokazują wyniki przeprowadzonych badań, a także rysunki poglądowe poprawiające czytelność pracy.

Wstęp zawiera jednostronicowe wprowadzenie do tematyki i sygnalizuje praktyczny wymiar badań, mogących znaleźć zastosowanie w sektorze transportu tramwajowego w Polsce w odniesieniu do problematyki doboru odpowiedniego profilu poprzecznego koła tramwajowego. Kontynuacją tego wątku jest rozdział drugi, w którym przedstawiono genezę tematu oraz analizę aktualnego stanu wiedzy dotyczącej rozważanej tematyki. Omówiono zagadnienia modelowania kontaktu koła z szyną z uwzględnieniem zjawisk tarcia wpływających na zużywanie powierzchni styku, a także wpływu geometrii profilu poprzecznego koła tramwajowego na oddziaływania dynamiczne z torem uwzględniając kryteria bezpieczeństwa przed wykolejeniem. W sposób rzeczowy przedstawione zostały zaobserwowane w czasie pomiarów aktualne tendencje zużywania się obręczy kół tramwajowych w pojazdach poruszających się na terenie Poznania, stanowi to dobrą podstawę do dalszych analiz. Autor słusznie zwraca uwagę na różnice pomiędzy warunkami eksploatacji pojazdów kolejowych i tramwajów na obszarze miejskim, co stanowi argument na pewną odmiennność tych dwóch systemów.

Teza oraz cel i zakres pracy przedstawione są w rozdziale 3. Teza pracy w swojej części początkowej wydaje się dość oczywista, kształt profilu poprzecznego koła pojazdu szynowego z pewnością ma istotny wpływ na dynamiczne oddziaływanie z szyną, w tym również wpływ na kształt i lokalizację obszarów kontaktu oraz na pozostałe wymienione elementy takie jak bezpieczeństwo przed wykolejeniem. Dalszy opis wzbogaca i precyzuje tezę, wskazując na możliwy związek geometrii profilu koła z reżimem zużywania oraz z możliwością dywersyfikacji dominującego mechanizmu zużywania zmęczeniowego.

Za ogólny cel naukowy rozprawy Autor postawił sobie określenie wpływu wybranych parametrów geometrycznych profilu koła tramwajowego na oddziaływanie dynamiczne z szyną. Podany został również cel użyteczny polegający na opracowaniu założeń oraz metodyki doboru profilu koła tramwajowego, który mógłby być dostosowany do określonych warunków eksploatacji w wybranej sieci tramwajowej. Tym samym Autor przyjmuje strategię polegającą na opracowaniu profilu koła dostosowanego do wybranych lokalnych warunków panujących w jednym z systemów tramwajowych w odróżnieniu od strategii poszukiwania profilu uniwersalnego dostosowanego do szerszego zakresu warunków eksploatacyjnych. Strategia ta wydaje się rozsądna, rozwiązanie specjalizowane do danego zastosowania często daje lepsze rezultaty niż rozwiązanie uniwersalne. Cele pracy wpisują się w potrzeby rynkowe w okresie, gdy powstaje wiele nowych modeli tramwajów, w tym tramwajów niskopodłogowych z niezależnie obracającymi się kołami. Nowe modele zwykle są wyposażone w standardowe profile uniwersalne, a próby projektowania i wprowadzania nowych profili kół podejmowane są rzadko. Uważam, że wybór problematyki badawczej jest trafny, a postawiony cel użyteczny jest ambitny, jego realizacja wymaga badań zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych.

Dobór profilu koła pojazdu szynowego wymaga podejścia wielokryterialnego i uzyskania odpowiedniej kombinacji własności dynamicznych wpływających na bezpieczeństwo jazdy oraz cech związanych z szybkością zużywania się materiału w obszarach styku kół z szynami. Ze względu na mniejsze promienie łuków w torach tramwajowych w porównaniu do sieci kolejowej, spełnienie tych wymagań staje się jeszcze trudniejsze, biorąc pod uwagę oddziaływania w strefie obrzeża koła. Obrzeże jest z konieczności traktowane jako normalna część robocza wraz z powierzchnią toczną koła, natomiast pierwotną ideą obrzeża było zabezpieczenie przed wykolejeniem w sytuacji skrajnej.

Pierwszą częścią realizacji zakresu pracy jest opis założeń modelowania obiektu badań oraz opis narzędzi numerycznych, m.in. w postaci komercyjnego programu komputerowego do symulacji układów wieloczołonowych oraz programu służącego do optymalizacji i generowania profili kół pojazdu szynowego na podstawie określonych założeń i funkcji celu. Według Autora ostatni z programów komputerowych nie jest przedmiotem rozprawy. Przedstawiono opis modeli nominalnych dwóch typów tramwajów, które oparto na układach brył sztywnych połączony elementami sprężysto-tłumiącymi o charakterystykach liniowych i nieliniowych. Pierwszy typ pojazdu to pięcioczołonowy tramwaj niskopodłogowy oparty na trzech wózkach nieobrotowych wyposażonych w koła mogące obracać się niezależnie, zawierające element podatny między osią i obręczą koła. Natomiast drugi typ to tramwaj trójczłonowy oparty na czterech wózkach skrętnych wyposażonych w zestawy kołowe, w których koła monoblokowe połączone są sztywną osią. Wykorzystano trzy grupy profili kół: profile nominalne różnych typów tramwajów europejskich, profile zużyte i profile wygenerowane przez algorytm optymalizacyjny. Modele toru obejmują model toru sztywnego oraz model toru podatnego o strukturze dyskretnej poruszającej się wraz z pojazdem, złożonej z mas i sztywności zastępczych. Wartości parametrów modeli przyjęto częściowo na podstawie badań prowadzonych w projekcie MODTRAM przy udziale Autora rozprawy, częściowo wykorzystano także pomiary.

W następnym zasadniczym rozdziale przedstawione są obszerne wyniki analiz wpływu wybranych parametrów profili poprzecznych kół pierwszego wózka obydwu typów tramwajów na ich dynamiczne oddziaływanie z torem. Wpływ ten przedstawiony jest w formie dwuwymiarowych wykresów punktowych, wartości wskaźników określających bezpieczeństwo przed wykolejeniem oraz średni współczynnik intensywności zużywania jako funkcje zmiennych niezależnych takich jak średnia liczba punktów styku pary koło-szyna, średnia powierzchnia styku, luz między kołem i szyną, kąt pochylenia obrzeża, ekwiwalentna stożkowatość. Rozkład punktów na wykresach obrazuje obszar poszukiwań frontu Pareto. Wyniki tych analiz są jednocześnie wynikami cząstkowymi wykorzystanymi następnie do rozwiązania zadania optymalizacyjnego, którego funkcja celu podana jest w dalszej części pracy. Do funkcji celu przyjęto trzy składniki ważne tj. wskaźnik bezpieczeństwa przed wykolejeniem, wskaźnik intensywności zużywania oraz wartość pola powierzchni styku. Uzupełnieniem analiz jest prezentacja przebiegów wartości wybranych wskaźników w dziedzinie drogi, na podstawie symulacji ruchu pojazdów tramwajowych obydwu typów oraz

graficzna reprezentacja potencjalnych obszarów styku pomiędzy kołami i szynami różnych typów.

O ile ogólny sposób wnioskowania jest jasny, o tyle niektóre wnioski szczegółowe analiz wydają się nieco zbyt daleko idące. Przykładem jest zdanie na str. 60 „...dla obydwu pojazdów, utrzymywanie kontaktu koła z szyną w formie styku jednopunktowego (styk konforemny jest tu traktowany także jako jednopunktowy) sprzyjało zwiększeniu współczynnika Y/Q nawet do wartości przekraczającej 5”. W tym kontekście liczba punktów styku jest mniej istotna niż ich położenie, kontakt jednopunktowy lub konforemny na obrzeżu koła ze względu na większy kąt kontaktu oznacza z reguły dużo większą wartość współczynnika Y/Q niż kontakt jednopunktowy na powierzchni tocznej. Trudno więc wnioskować o wpływie liczby punktów styku na wartość Y/Q bez odniesienia do innych warunków. Jest to widoczne na wykresach, np. na rys. 51, gdzie dla liczby punktów styku równej 1 mamy zarówno niskie jak i wysokie wartości wskaźnika Y/Q .

Kolejny etap analiz w tym rozdziale obejmuje ocenę potencjalnego wpływu odchyłek kształtu okręgu tocznego od idealnego koła na wartości maksymalne siły pionowej oddziaływania kół z szynami. Odchyłki te oceniano według trzech kategorii tj. płaskie miejsca, poligonizacja oraz odchyłki o kształcie nieregularnym. Przedstawiono wyniki analiz symulacyjnych oddziaływań oraz porównano je z wynikami innych badaczy, które są dostępne w literaturze.

Następny etap związany jest z analizą wpływu zmiany profilu koła PST i szyny 60R2 wskutek zużycia eksploatacyjnego na ich wzajemną współpracę, zbadano różne konfiguracje par tj. profile zużyte/nominalne, zużyte/zużyte oraz nominalne/nominalne, współrzędne zarysów uzyskano z pomiarów. Oprócz wcześniej wykorzystywanych wskaźników, dodatkowo wykorzystany został wskaźnik zużycia zmęczeniowego powierzchni materiału, formułę obliczeniową wskaźnika zaczerpnięto z literatury. Wyniki analiz symulacyjnych przejazdu w łuku o małym promieniu pokazano w dziedzinie czasu oraz w postaci histogramów wartości wskaźnika zużycia zmęczeniowego z podziałem na dwa obszary styku.

W kolejnym przedostatnim rozdziale siódmym zaprezentowano autorską metodę numerycznej weryfikacji profilu koła tramwajowego, na przykładzie nowego profilu koła PP7, zaprojektowanego i wdrożonego do eksploatacji przez MPK Poznań. Metoda składa się z trzech części. Pierwsza z nich polega na ocenie geometrycznych funkcji kontaktu kół z szynami podczas przejazdu po torze, funkcje kontaktu obejmują: kształt i liczbę punktów styku, pole powierzchni obszarów styku, wartości promieni tocznych, wartość luzu między kołami i szynami. Druga część metody to ocena na podstawie wartości wskaźników bezpieczeństwa przed wykolejeniem, intensywności zużycia tribologicznego oraz zużycia zmęczeniowego powierzchni materiału dla obszarów styku na powierzchni tocznej i obrzeżu koła. Wartości wskaźnika zmęczeniowego przedstawione są w formie histogramów z podziałem na obszary styku. Ostatnia część to ocena obciążeń o charakterze cyklicznie zmiennym ze względu na możliwość powstawania skumulowanych odkształceń plastycznych materiału kół i szyn. Obciążenia te oceniane są na podstawie diagramów przedstawiających znormalizowane obciążenie pionowe w funkcji współczynnika adhezji, przy czym diagramy te

mają zaznaczone obszary przystosowania (*shakedown maps*), przyjęte na podstawie literatury. Kryterium oceny polega na porównaniu wartości wskaźników uzyskanych przy użyciu weryfikowanego profilu koła z wartościami tych wskaźników uzyskanymi dla profilu referencyjnego. Weryfikacja odbywa się na podstawie symulacji ruchu pojazdu po torze zawierającym odcinki proste oraz łuki o małych promieniach z nierównościami, które zgodnie z informacjami od operatora sieci odpowiadają dobremu oraz złemu stanowi utrzymania toru.

Biorąc pod uwagę, że stan toru jest istotnym czynnikiem wpływającym na dynamikę oddziaływań pojazdu szynowego z torem w strefie kontaktu kół z szynami, wydaje się, że dokładniejsza ocena stanu toru przy pomocy odpowiednich miar syntetycznych pozwoliłaby na uściślenie warunków analizy.

Ostatnia część rozdziału siódmego przedstawia wyniki cyklicznych pomiarów prowadzonych w czasie eksploatacji nadzorowanej w rzeczywistym ruchu miejskim pojazdu wyposażonego w koła o profilu poprzecznym zgodnym z opracowanym nowym profilem PP7 oraz pojazdu, który posiada profile kół PST. Wyniki przedstawiono w postaci zmierzonych współrzędnych zarysów obręczy kół PP7 i PST w stanie nominalnym i zużytych, przedstawiono także wykresy grubości i wysokości obrzeża w funkcji przebytej drogi. Przeprowadzono także dyskusję wyników. Jedną z konkluzji dotyczy braku poprawy ze względu na intensywność zużywania się nowego profilu koła PP7 w porównaniu do dotychczas stosowanego PST. Wyjaśnienie Autora, z którym się zgadzam jest takie, że nowy profil był przeznaczony do współpracy z nominalnym profilem szyny, natomiast testy prowadzono na szynach o profilach częściowo zużytych, dopasowanych pod względem charakteru zużycia do profilu koła PST. Trochę szkoda, że nie wykorzystano pełnego potencjału metody dla zaprojektowania profilu koła, który byłby dostosowany szczególnie do tych istniejących warunków wynikających ze zużycia profili szyn.

Wyniki badań przedstawione przez Doktoranta oceniam jako bardzo wartościowe i zaprezentowane w sposób przejrzysty. Natomiast niezupełnie jasny jest dla mnie sposób opisywania ekwiwalentnej stożkowatości. Autor wielokrotnie przywołuje w pracy to pojęcie, posługując się nim w różnych analizach, między innymi na rys. 97 przedstawiając ekwiwalentną stożkowatość jako funkcję przemieszczenia poprzecznego. Powoduje to niejasność interpretacji. Dla nieliniowych profili kół, metody obliczania ekwiwalentnej stożkowatości podaje norma PN-EN 15302 i karta UIC 519, jedna z metod polega na linearyzacji wykresu promienia tocznego koła w funkcji przemieszczenia przy pomocy regresji liniowej i metody najmniejszych kwadratów. Wartość ekwiwalentnej stożkowatości charakteryzuje więc geometrię fragmentu profilu dla pewnego zakresu przemieszczeń poprzecznych koła względem szyny, nie tylko dla jednej wartości przemieszczenia poprzecznego, przy czym zmiany promienia tocznego wynikające z kontaktu z obrzeżem koła nie są brane pod uwagę. Innym przykładem użycia jest zdanie na str. 57 „Przebieg stożkowatości ekwiwalentnej i RRD ulegają gwałtownej zmianie podczas pojawienia się kontaktu na obrzeżu koła”. Być może lepszym określeniem byłoby tutaj „lokalna stożkowatość”.

Rozdział ósmy jest podsumowaniem wyników badań przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej, a także zawiera propozycję kierunków dalszych prac, które związane są z opisywaną tematyką. Wnioski są spójne z wynikami badań, opisane są obszernie oraz niosą dużą wartość poznawczą i aplikacyjną. Za szczególnie wartościowe należy uznać te wnioski, które zostały zweryfikowane eksperymentalnie.

Po przeczytaniu całości pracy stwierdzam, że wszystkie cele naukowe i użyteczne pracy zdefiniowane w rozdziale 3 zostały zrealizowane. Przedstawiona mi do recenzji rozprawa reprezentuje wysoki poziom naukowy i edytorski oraz zawiera kompetentny i obszerny opis prowadzonych badań. Język pracy jest poprawny i komunikatywny. Zakres opisanych zagadnień oraz przytoczone pozycje literaturowe, w tym również pozycje, których mgr inż. Tomasz Staśkiewicz jest autorem lub współautorem, potwierdzają że Doktorant wykazuje się dobrym ogólnym poziomem wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport oraz szczegółową wiedzą z obszaru wybranej tematyki, wykazuje także umiejętność prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Mgr inż. Tomasz Staśkiewicz zgromadził wartościowy dorobek naukowy, który oprócz niniejszej rozprawy doktorskiej, obejmuje również szereg artykułów w renomowanych, wysoko punktowanych czasopismach naukowych, brał także udział w realizacji projektów badawczych co dodatkowo potwierdza jego kompetencje.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasza Staśkiewicza pt. "Kształtowanie profilu koła tramwajowego w aspekcie oddziaływania dynamicznego z szyną" spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z dnia 14 marca 2003 roku wraz z późniejszymi zmianami - Dz.U. poz. 859 z dnia 21 kwietnia 2017 r., oraz Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy po pozytywnym przebiegu obrony doktorskiej.



Warszawa, dnia 16 marca 2021 r.