

Recenzja
rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Dariusza Kalinowskiego
pt. „Badanie warunków bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu
nowoczesnych pojazdów tramwajowych metodą symulacji
komputerowej”

1. Podstawa prawna

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Dariusza Kalinowskiego pt. „Badanie warunków bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu nowoczesnych pojazdów tramwajowych metodą symulacji komputerowej” została wykonana na podstawie pisma Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki w Warszawie, Pana prof. dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego oraz właściwej przedmiotowej umowy.

2. Charakterystyka pracy

Recenzowana praca została przedłożona w dwóch częściach (odrębnie wydrukowanych tomach). Pierwsza z nich to zasadnicza część pracy, która zawiera 174 numerowane strony. W zakresie merytorycznym praca obejmuje wstęp, osiem rozdziałów, wykaz załączników oraz spis literatury zawierający 76 pozycji. Druga część pracy doktorskiej to obszerny załącznik (tom) obejmujący dokumentację analiz przeprowadzonych symulacji i badań doświadczalnych w formie wykresów, zestawień i tabel, bez numeracji stron.

W **rozdziale pierwszym** zatytułowanym „Wstęp” zawarte jest krótkie uzasadnienie wyboru tematyki pracy, podany jest cel naukowy i cel użytkowy pracy, przedstawiona jest lista zrealizowanych w czasie realizacji pracy zadań oraz sformułowana jest teza pracy. W **rozdziale drugim** zatytułowanym „Podstawy teoretyczne kontaktu koło-szyna” omówiono teorie jakie służą do opisu wyznaczania sił generowanych na styku koła i szyny, mając na uwadze kształt powierzchni będących w kontakcie oraz ich odkształcenie w trakcie kontaktu. Przedstawione zostały teorie Hertza, Cartera i Kalkera. Zasygnalizowano ponadto zagadnienie modelowania ruchu pojazdu tramwajowego jako układu wielomasowego (multibody system), modelowania sił w jednopunktowym kontakcie koło-szyna według Nadala oraz pojęcia stożkowatości ekwiwalentnej dotyczącego profilu kół jezdnych. W **rozdziale trzecim** zatytułowanym „Badania warunków bezpieczeństwa przeciwko wykolejeniu” omówiono metody badań jakie są przeprowadzane dla pojazdów kolejowych, które dotyczą spełnienia warunków bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu. Związane jest to z brakiem powszechnych uregulowań dla pojazdów tramwajowych. Normy i wymogi odnoszą się zasadniczo do

przejazdów pojazdów przez odpowiednio modelowane/definiowane łuki. Omówiono metody obowiązujące we Wspólnocie Europejskiej (w odniesieniu do stosownych norm EN), Wielkiej Brytanii, Japonii, USA oraz normę rosyjską GOST (dla toru o rozstawie szerokim). W **rozdziale czwartym** zatytułowanym „Rozwiązania techniczne układów jezdnych tramwajów” omówiono wózki pojazdów tramwajowych (obrotowe i nieobrotowe) oraz układy jezdne pojazdów tramwajowych jakie w szczególności są stosowane do budowy pojazdów o obniżonej podłodze na przykładach rozwiązań tramwajów Cobra (ABB/SIG), Skoda, Combino (Siemens), Avenio (Siemens), ULF (Siemens), Rotem (Hyundai), Alstom. W **rozdziale piątym** „Pojazdy tramwajowe z niezależnie obracającymi się kołami” przedstawiono krótko rozwiązanie techniczne które umożliwia konstrukcję pojazdów tramwajowych z płaską i niską podłogą na całej długości części pasażerskiej. Kolejne trzy rozdziały związane są bezpośrednio z realizacją tematu pracy doktorskiej. W **rozdziale szóstym** zatytułowanym „Badania warunków bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu tramwajów” sformułowano nową metodę wykorzystania symulacji komputerowej do określania poziomu bezpieczeństwa mając na uwadze zjawisko wykolejenia pojazdów tramwajowych oraz przedstawiono symulację jazdy tramwajów o różnych konfiguracjach wagonów. W **rozdziale siódmym** zatytułowanym „Weryfikacja doświadczalna rezultatów teoretycznych” omówiono sposób realizacji oraz wyniki badań doświadczalnych jakie zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu tramwaju PESA 128NG, a dotyczących przejazdów pojazdu tramwajowego na łukach pętli Jelitkowo, Kliniczna i Strzyża w Gdańsku. Ostatni **ósmym rozdziałem** zatytułowany „Podsumowanie” poświęcony jest omówieniu w zwartej formule rezultatów uzyskane w trakcie realizacji pracy doktorskiej.

Praca doktorska została zrealizowana w ramach II edycji programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Doktorat Wdrożeniowy”.

3. Ocena pracy

3.1 Ocena ogólna

Praca doktorska dotyczy określenia warunków bezpieczeństwa dotyczących zjawiska wykolejenia współczesnych pojazdów tramwajowych. Jest to zagadnienie istotne zarówno na etapie projektowania, badania jak i eksploatacji taboru tramwajowego. Istotnym jest tu rozróżnienie pomiędzy taborem kolejowym, a taboru tramwajowym. Projektowanie, badanie oraz dopuszczenie do eksploatacji taboru kolejowego uwarunkowane jest spełnieniem określonych wymogów zawartych w standardach i normach obowiązujących na terenie wielu krajów, bądź w danym kraju (np. USA, Japonia, Rosja). Natomiast w przypadku pojazdów tramwajowych brak jest dedykowanych norm lub standardów międzynarodowych bądź obowiązujących w określonym kraju, a dotyczących warunków bezpieczeństwa, w szczególności sposobu określania poziomu bezpieczeństwa mając na uwadze wykolejenie pojazdu. Najczęściej stosowane kryteria adaptowane są na podstawie istniejących norm/warunków odnoszących się do pojazdów kolejowych. W chwili obecnej jest to zbyt uproszczone podejście, mając na uwadze w szczególności odrębność infrastruktury torowej. Różne są tolerancje wykonania i użytkowania torów. Różne są też wymagania dotyczące skrajni pojazdów w poszczególnych miastach. Inne są zarysy zewnętrzne kół i szyn. Spotyka się również różne rozstawy szyn sieci tramwajowych.

Doktorant mając na uwadze te uwarunkowania podjął się zbudowania nowej, uniwersalnej metody badań pojazdów tramwajowych. Metoda pozwala na badania różnej konfiguracji pojazdów oraz uwzględnia specyfikę eksploatacji i infrastruktury torowej. Koncepcja metody oparta jest na budowie modelu numerycznego i przeprowadzeniu symulacji komputerowych pojazdów tramwajowych mając na uwadze wykluczenie wystąpienia w trakcie eksploatacji zjawiska wykolejenia pojazdu. W modelowaniu wykorzystano metodę układów wielomasowych (multibody system). W celu realizacji pracy konieczne było rozważenie konstrukcji współczesnych pojazdów tramwajowych, mając na uwadze w szczególności rodzaj wózków układów jezdnych oraz zestawienie pojazdów (różna ich długość). Istotne jest również modelowanie kontaktu koła z podłożem (szyną). W modelowaniu wykorzystano teorię Kalkera opisu kontaktu koło-szyna. Modele fizyczne i matematyczne pojazdów zostały zbudowane przy wykorzystaniu oprogramowania SIMPACK. Praktyczną realizację algorytmów sterowania oraz symulacje wykonano przy zastosowaniu oprogramowania MATLAB z modułem SIMAT.

W celu walidacji zbudowanego modelu symulacyjnego wykonane zostało szereg badań doświadczalnych przeprowadzonych na łukach toru pętli Jelitkowo, Kliniczna i Strzyża w Gdańsku przy wykorzystaniu tramwaju PESA 128NG. Wyniki badań doświadczalnych potwierdziły wyniki symulacji numerycznych z wystarczającą jak na postawiony problem dokładnością, co potwierdza poprawność modelowania.

Finalnie wykonano szereg czternastu serii symulacji numerycznych dla różnych konfiguracji pojazdów tramwajowych zarówno z klasycznymi zestawami kołowymi jak i z niezależnie obracającymi się kołami. W ramach każdej z serii rozważono zmienność promienia łuku toru w zakresie R18-R150 ($R=18$ m, $R=25$ m, $R=50$ m, $R=150$ m). Uwzględniono po cztery przypadki (nominalną, maksymalną dopuszczalną oraz dwie pośrednie) dla rozstawu normalnego ($l=1435$ mm, $l=1440$ mm, $l=1445$ mm, $l=1450$ mm) i dla rozstawu wąskiego ($l=1000$ mm, $l=1005$ mm, $l=1010$ mm, $l=1015$ mm). W wyniku symulacji wyznaczano wartość uniesienia oraz wskaźnika bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu Y/Q dla różnych kół. Należy podkreślić szeroki zakres symulacji (dużą liczbę przypadków symulacji), mający odniesienie do sytuacji spotykanych w praktyce eksploatacji pojazdów tramwajowych. Wyniki symulacji zostały zebrane w postaci tabel i wykresów w obszernym i odrębnym załączniku do pracy doktorskiej (tomie pracy doktorskiej).

Praca napisana jest czytelnie i zrozumiale. Podział na rozdziały jest naturalny, chociaż wydają się że rozdziały czwarty i piąty mogły tworzyć jedną całość. Dobór wykresów i ich jakość jest bardzo dobra. Umiejętnie wykorzystane są kolory do prezentacji danych na wykresach. Przyjęta koncepcja odrębnego załącznika zawierającego obszerną dokumentację z przeprowadzonych symulacji i badań w postaci tabel i wykresów, w szczególności mając na uwadze dużą ich liczbę jest uzasadniona.

3.2 Uwagi o charakterze merytorycznym

Zasadnicza uwaga dotyczy modelu matematycznego stosowanego w opisie przyjętych konfiguracji tramwajów. Doktorant ogranicza się w pracy doktorskiej jedynie do przedstawienia na Rys.6.5 schematu modelu fizycznego pojedynczego wagonu tramwajowego z wózkiem. Autor komentuje poszczególne parametry modelu.

W zamieszczonym opisie brakuje jednak w szczególności informacji/danych, które rodzą następujące, podane poniżej pytania.

- Czy każdy z wagonów budujący konfigurację rozważanego tramwaju jest taki sam (w szczególności wagony: początkowy, końcowy i środkowy)?
- Czy wagony połączone są ze sobą w sposób niepodatny? Jaki jest warunek kinematyczny połączenia sąsiednich wagonów?
- Skąd Doktorant wziął wartości poszczególnych parametrów, szczególnie że „współczynniki macierzy tłumienia C i sztywności K wyrażają uwzględnione nieliniowe charakterystyki sprężysto-tłumiące usprężynowania I i II stopnia zawieszenie pojazdu tramwajowego” (str. 52)? Dlaczego wartości te nie zostały zamieszczone w pracy doktorskiej?
- W jaki sposób było zadane wymuszenie zewnętrzne i skąd pochodziły przyjmowane wartości stosownych funkcji wymuszenia zewnętrznego (w szczególności „siły wymuszenia kinematycznego powodowane nierównościami toru” (str.52))?
- Skąd wzięte zostały wartości parametrów do modelowania kontaktu koło-szyna według teorii Kalkera?

Ponadto na stronie strona 138 zamieszczono komentarz: „warunek graniczny stopnia bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu określony w niniejszej pracy jako $Dz,lim < 8,50 \text{ mm}$... został zachowany jedynie w przypadku dwóch konfiguracji wagonów”. Jakie jest uzasadnienie przyjęcia takiej granicznej wartości?

Ostania uwaga odnosi się do sformułowania użytego na stronie 158: „...wyniki obliczeń przeprowadzonych za pomocą modelu teoretycznego i układu jezdni tramwaju wykazują stosunkowo duży stopień korelacji z analogicznymi rezultatami pomiarów dokonywanych na obiekcie rzeczywistym”. Co oznacza sformułowanie „duży stopień korelacji”? Dlaczego nie został użyty do porównania parametr ilościowy?

3.3 Uwagi redakcyjne

Uwagi o charakterze redakcyjnym odnoszą się zasadniczo do użytych sformułowań. W tekście pracy o charakterze naukowym należy unikać zbyt uproszczonych, potocznych sformułowań np. „szyty na miarę”, „oklejone są tensometrami”, „model komputerowy...może zostać odpowiedzialnie wykorzystany” (strony: 11, 31, 159). Ponadto na stronie 12 użyte zostało niejasne sformułowanie „dzięki elementowi –stykowi koła pojazdu z jezdnią”.

4. Podsumowanie, wniosek końcowy

Recenzowana praca:

- Dotyczy oryginalnego i ważnego problemu badawczego, jakim jest zaproponowanie metody analizy i zapobiegania, na etapie projektowania bądź eksploatacji, wykolejeniu pojazdu tramwajowego, który jest istotnym kryterium określającym bezpieczeństwo jazdy pojazdów szynowych. Oryginalność zagadnienia związana jest z brakiem istniejących uwarunkowań formalnych w postaci ogólnie przyjętych norm dla pojazdów szynowych w odróżnieniu od przyjętych wymogów jakie muszą spełniać pojazdy kolejowe.

- Zawiera propozycję zamodelowania dynamiki ruchu nowoczesnego pojazdu tramwajowego, mając na uwadze różne konfiguracje pojazdów (długości pojazdów) oraz rodzaje zestawów kołowych, przy wykorzystaniu modelowania wieloczołowego, a następnie wykorzystania tego modelu do przeprowadzenia odpowiednio zdefiniowanych symulacji, które prowadzą do określenia wartości uniesienia krytycznego koła oraz wskaźnika bezpieczeństwa przeciwko wykolejeniu Y/Q.
- Zawiera wyniki badań doświadczalnych, które zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu tramwaju PESA 128NG. Badania dotyczyły przejazdów pojazdu na łukach i zostały przeprowadzone na pętlach Jelitkowo, Kliniczna i Strzyża w Gdańsku. Uzyskane wyniki badań stanowią walidację modelu teoretycznego i numerycznego.
- Zawiera szerokie spektrum symulacji przeprowadzonych dla ruchu czternastu typów zestawów pojazdów tramwajowych charakteryzujących się różną długością i różnymi rozwiązaniami układów jezdnych. Symulacje dotyczą przejazdu każdego z pojazdów po łukach o czterech promieniach w zakresie R18-R150 przy ruchu po szynach o ośmiu szerokościach toru w zakresie 1000-1450 mm.
- Zawiera systematycznie przeprowadzoną analizę oraz dyskusję uzyskanych wyników, w szczególności w odniesieniu do założonych celów pracy, zakończoną sformułowaniem wniosków końcowych w formie opisowej.
- Zawiera uchybienia, omówione w szczególności w punkcie 3.2, zasadniczo odnoszące się do użytych sformułowań oraz opisu modelu, które w żadnym stopniu nie wpływają na poprawność samej analizy oraz przedstawione wnioski.

Zdaniem recenzenta przedstawiona praca jest oryginalnym rozwiązaniem postawionego przez Autora oryginalnego problemu naukowego, o wymiarze praktycznym, jakim było zaproponowanie nowej, oryginalnej metody określenia poziomu bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu pojazdów tramwajowych w oparciu o odpowiednio przeprowadzone symulacje komputerowe oparte na modelowaniu dynamiki układów wieloczołowych.

Sama realizacja tematu pokazała umiejętność Doktoranta do modelowania analitycznego zagadnień dynamiki pojazdów tramwajowych. Doktorant wykazał się umiejętnością przeprowadzenia symulacji komputerowej w zakresie wymaganym tematem i zakresem pracy doktorskiej. Doktorant wykazał się również umiejętnością zaplanowania i przeprowadzenia badań doświadczalnych na rzeczywistym obiekcie (tramwaju) w trakcie jego przejazdów po torze w warunkach związanych z realizowanym celem pracy (jazda po łuku). Doktorant wykazał się umiejętnością korzystania ze specjalistycznego oprogramowania komputerowego MATLAB i SIMPACK. Z realizacją pracy związane jest bezpośrednio opublikowanie artykułu w czasopiśmie naukowym *Eksploatacja i Niezawodność* (2021) oraz prezentacje w postaci referatów na konferencjach naukowych (*Transbaltica*, Wilno, 2019; *Transport of the 21st century*, Ryn, 2019; *Rail Vehicles*, Arłamów-Ustrzyki Dolne, 2020; *Rail Vehicles*, Polanica Zdrój, 2023). Wszystkie te działania pokazują umiejętność prowadzenia przez Doktoranta samodzielnej pracy naukowej. Spełnione są przy tym wymagania art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r., poz. 574

ze zm.). Dlatego też wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. inż. Dariusza Kalinowskiego do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Mabk' with a horizontal stroke at the end.