

Dr hab. inż. Dariusz Żardecki, profesor WAT
Instytut Pojazdów i Transportu
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego
Ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa.

15.03.2023, Warszawa

R E C E N Z J A
rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Przemyka, pt.
„Metoda analizy dynamiki przyczep samochodów ciężarowych”

Podstawa sporządzenia Recenzji: Decyzja Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej i Umowa nr W-1/UDz/1/2023 z dnia 26.01.2023 r.

Ogólna charakterystyka Rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska (Rozprawa) jest pracą o objętości 159 stron (183 stron, wliczając w to załączniki) zredagowaną w 8 rozdziałach i licznych podrozdziałach. Poprzedza je Wykaz często używanych symboli, a kończy Wykaz literatury. Uzupełnieniem Rozprawy jest 5 niezatytułowanych (!) załączników.

Recenzowana Rozprawa dotyczy ważnej tematyki zarówno w sferze teorii, jak i praktyki w odniesieniu do środków transportu drogowego. Obiektami prezentowanych badań i analiz są przyczepy z tzw. osią centralną holowane przez samochody ciężarowe. Kierowanie takim zestawem może być w pewnych warunkach zagrożone utratą stabilności spowodowaną przez zjawisko wężykowania przyczepy. W dobie rozwijanej automatyzacji samochodu podjęcie analizy wężykowania i powiązania tego procesu z parametrami konstrukcyjnymi przyczepy oraz jej sprzęgu jawi się jako szczególnie zasadne. Drugim podobnie ważnym dla projektantów przyczep zagadnieniem jest analiza dynamiki struktury nośnej przyczepy. Od właściwie zaprojektowanej ramy i jej zawieszenia zależą przecież nie tylko własności eksploatacyjne, ale i trwałość przyczepy. Mimo, iż problematyka wężykowania przyczepy i trwałości jej ramy to dość odległe zagadnienia, to jedno i drugie dotyczą przecież dynamiki, tyle że w znacząco różnych zakresach częstotliwości drgań. Dlatego podjęcie przez Doktoranta tych zagadnień w jednej rozprawie naukowej stanowiło tu szczególne wyzwanie.

Analiza treści Rozprawy

Poniżej przedstawiona jest analiza treści Rozprawy w odniesieniu do jej kolejnych części. Kwestie błędów redakcyjnych i edycyjnych będą omówione zbiorczo w następnym punkcie Recenzji.

Rozdział 1: Wiadomości wstępne

W pierwszym podrozdziale tego rozdziału Autor wprowadza czytelnika w problematykę samochodów ciężarowych i ich przyczep, a zwłaszcza przyczep z tzw. osią centralną (lub zespołem osi centralnych). Doktorant zwraca uwagę na potrzebę analizowania konstrukcji przyczep funkcjonujących w warunkach dynamicznych.

Przedstawiając genezę pracy, jej Autor słusznie podkreślił znaczenie problematyki wężykowania oraz dynamiki struktury nośnej dla właściwego projektowania przyczep samochodowych. Autor Rozprawy zajmuje się zawodowo projektowaniem oraz badaniami przyczep i ma w tym zakresie także osiągnięcia publikacyjne. Szkoda, iż w genezie Rozprawy informacje z tym związane zostały przemilczane.

Rozdział 2: Przegląd literatury

Przegląd literatury podzielony został na dwa obszary – pierwszy dotyczący problematyki wężykowania przyczep, drugi – problematyki wytrzymałości ram i analiz MES.

Przegląd publikacji dotyczących wężykowania przyczep przedstawiono w układzie chronologicznym. Odnosząc się do kolejnych publikacji Autor starał się skrótowo je opisać, zwracając uwagę na sposób modelowania i analiz, a także formułowane wnioski. Szczególnie istotnymi w świetle zaleceń dotyczących konstrukcji i eksploatacji przyczep z osią centralną zdają się być wnioski wymienione w pracach Bevana i współpracowników w latach 80-tych XX wieku. Wynika z nich, że tendencje do wężykowania wzrastają ze wzrostem prędkości pojazdu holującego, ze wzrostem stosunku masy przyczepy do masy samochodu, ze skróceniem dyszla, ze zmniejszeniem sztywności poprzecznej opon itd. Te istotne wnioski były formułowane na bazie modeli stosunkowo prostych – o kilku stopniach swobody. W dalszym przeglądzie Autor odniósł się do prac bazujących na znacznie bardziej rozbudowanych modelach, np. uwzględniających aerodynamikę, złożoność struktury przestrzennej MBS (MultiBody Systems), złożoność opisu układu koło-jezdni, a nawet tarcie w przegubie dyszla. Szkoda, iż Autor nie podjął tu próby oszacowania wpływu rozbudowy modelu na precyzję wnioskowania o wężykowaniu i niestabilności. Pomocnym byłoby tu zbiorcza tabelaryczna forma porównania modeli i wynikających z nich wniosków, tak jak się to praktykuje w opracowaniach typu „state-of-the-art”. Czy istotnie duże znaczenie dla projektantów przyczep mają modele zawierające wiele zmiennych oraz wiele trudno mierzalnych, a więc niepewnych parametrów? To ważna kwestia szczególnie w kontekście przyjętej w pracy koncepcji analizy procesu wężykowania na bazie modeli MBS. W końcowej części przeglądu zacytowane zostały wybrane stosunkowo nowe publikacje odnoszące się do mechatronicznych układów wspomagających kierowcę zespołu samochód-przyczepa. Szkoda, iż Autor nie scharakteryzował złożoności modeli stosowanych w takich układach. Z doświadczeń recenzenta wynika, że pożądaną dokładność sterowania w czasie rzeczywistym uzyskać można, stosując w sterownikach z regulatorami proste referencyjne tzw. modele rowerowe 2D. Sprzężenia zwrotne w układach regulacji niwelują wówczas skutki niedokładności modeli.

Przegląd modeli dotyczących zastosowania MES w analizie wytrzymałości ram ograniczony został (i słusznie) do publikacji z ostatniego 20-lecia. Jak wiadomo obliczenia dotyczące ram to „klasyka” zastosowań MES, zwłaszcza w zakresie analiz statyki. Z uwagi na licznosc tego typu prac można byłoby jednak zrezygnować w przeglądzie z publikacji dotyczących wyłącznie obciążeń statycznych. Poprzestanie na monografii Rusińskiego i kilku innych pracach, w których dynamika oddziaływań uwzględniana jest w modelu statycznym poprzez tzw. współczynniki sił masowych byłoby tu całkowicie wystarczające. Warto by za to szerzej rozwinąć przegląd publikacji podejmujących analizę modalną i zastosowanie oprogramowania MES umożliwiającego analizę dynamiki konstrukcji, a także skupić uwagę na publikacjach dotyczących bezpośrednio analizy MES elementów zespołu samochód-przyczepa. W przeglądzie publikacji na szczególną uwagę zasługują prace, w których modelowanie konstrukcji dokonano metodą mieszaną z wykorzystaniem zarówno formalizmu MBS (dla sztywnych elementów wodzących) oraz formalizmu MES (dla elementów podatnych). Pojawił się tu wątek badań symulacyjnych dynamiki wykorzystujących tzw. interfejsy oprogramowań Adams i Nastran w odniesieniu do analiz konstrukcji samochodów. Niezrozumiałym wydaje się tu pominięcie publikacji z udziałem Promotora Rozprawy prezentującej koncepcję stosowania interfejsu oprogramowania Adams w analizach MES realizowanych przez oprogramowanie Nastran (T. Garnarczyk, A. Harlecki, „Wykorzystanie interfejsu programu MSC Adams i programów MES w obliczeniach inżynierskich”, *Przegląd Mechaniczny*, Tom 5, 2008). Podobnie niezrozumiałym jest pominięcie publikacji z udziałem Autora i Promotora Rozprawy, notabene także związanej bezpośrednio z zespołem samochód-

przyczepa (A. Harlecki, A. Przemyski, S. Tengler „Calculating Strength of Truck-Trailer Frames by Using Software MSC Adams and the Finite Element Method”, Current Methods of Construction Design, Proceedings of the ICMD 2018).

Na końcu przeglądu literatury Autor Rozprawy sformułował wniosek o celowości podjęcia „zaawansowanej” analizy dynamiki ruchu zespołu samochód - przyczepa z osią centralną z wykorzystaniem wieloczołowego modelu 3D typu MBS. Podkreślił, że dzięki uzupełnieniu analizy dynamiki o analizę wytrzymałości ramy przyczepy zrealizowaną w powiązaniu programów komercyjnych MSC Adams (MBS) oraz NX Nastran (MES) analiza dynamiki „zyskałaby cechy ujęcia całościowego”.

Rozdział 3: Cel i zakres rozprawy

Cel Rozprawy sformułowany został w pracy dwuczłonowo - jako cel naukowy i cel użyteczny. Cel naukowy to „opracowanie ogólnej metody analizy dynamiki przyczep samochodów ciężarowych z osią centralną”. Ten dość ogólnikowy zapis jest w Rozprawie wyjaśniany, ale nie do końca precyzyjnie. Istotą metody ma być opracowanie autorskiego modelu matematycznego dynamiki ruchu przyczepy traktowanej jako otwarty układ wieloczołowy, z uwzględnieniem podatności i tłumienia oraz „zaawansowanego” modelu opon. Zdaniem Autora Rozprawy zastosowanie współrzędnych złączowych w modelu matematycznym ma znacząco obniżyć liczbę stopni swobody. W dalszym wywodzie dotyczącego celu Rozprawy, jej Autor uzasadnia kolejny raz potrzebę rozwinięcia na potrzeby projektowania przyczep analiz wytrzymałościowych MES i zastosowanie w tym modeli dynamicznych (zwanymi „prototypami wirtualnymi”) opracowanych z wykorzystaniem interfejsów oprogramowania MSC Adams i NX Nastran/Femap. Opracowanie i zbadanie takiego prototypu oraz jego doświadczalne zweryfikowanie Autor Rozprawy przyjmuje jako jej cel praktyczny. W kolejnym wywodzie Autor przybliża sposób osiągnięcia tego celu. W jego końcowych fragmentach snuje wizję zastosowania prototypu wirtualnego w procesie projektowania przyczep.

Zakres Rozprawy sformułowany został poprzez skrótowe opisy zawartości jej poszczególnych rozdziałów. Dzięki tym opisom można lepiej zrozumieć koncepcję Rozprawy i jej cel.

Rozdział 4: Analiza dynamiki zespołu „samochód ciężarowy – przyczepa z osią centralną” z wykorzystaniem macierzy przekształceń jednorodnych i formalizmu równań Lagrange’a II rodzaju

W rozdziale tym przedstawiany jest model matematyczny dynamiki ruchu zespołu samochód - przyczepa z osią centralną oraz jego zastosowanie w badaniach symulacyjnych służących analizie występowania procesu wężycowania.

W części wstępnej (dość obszernej, ale nie ujętej w wydzielonym podrozdziale) Autor wprowadza czytelnika w zastosowany znany z robotyki formalizm matematyczny oparty na współrzędnych złączowych oraz na transformacjach jednorodnych. We wprowadzeniu tym przywołane zostały znane publikacje monograficzne, artykuły, a także kilka rozpraw doktorskich.

Pierwszy podrozdział poświęcony jest „Modelowi fizycznemu” zespołu samochód ciężarowy - przyczepa z osią centralną. W jego podpunkcie „Struktura zespołu” obiekt badań potraktowany został jako otwarty układ kinematyczny o strukturze drzewa. Zobrazowanie na rysunkach modelu fizycznego 3D z wykorzystaniem płaszczyzn i osi referencyjnych oraz wprowadzonych układów współrzędnych jest przejrzyste i dobrze odzwierciedlające ideę modelowania. Opis modelu fizycznego został uzupełniony zapisami w Załączniku 1. W drugim podpunkcie pierwszego podrozdziału opisywane jest „Modelowanie opon”. Na początku wyszczególnione są znane z literatury modele współpracy koła ogumionego z jezdnią. Szkoda, iż w tym wyszczególnieniu nie stosuje się podziału na modele

przyczynowe (bazujące na pewnych założeniach fizycznych, np. model Dugoffa) i funkcjonalne (typu czarna skrzynka, które jedynie wiążą zmienne wyjściowe – siły i momenty reakcyjne w punkcie styku opony i jezdni ze zmiennymi wejściowymi i parametrami, bez wnikania w fizykę zjawisk, np. model Magic Formula). W dalszej części podpunktu poświęconego modelowaniu opon opisany jest model Magic Formula. Występujący w tym modelu promień dynamiczny koła, jak i inne zmienne są konsekwentnie odnoszone do współrzędnych złączowych. Dobrze, iż wszystkie zmienne i parametry modelu Magic Formula zostały zbiorczo zestawione w jednej tablicy.

Drugi podrozdział „Model matematyczny układu” przedstawia równania ruchu, a więc równania Lagrange’a II rodzaju sformułowane w zwartej postaci wektorowo - macierzowej. W szczegółowej prezentacji równań i w ich kolejnych przekształceniach Autor przywołuje uznane publikacje poświęcone mechanice analitycznej układów wielocłonowych. Dzięki informacjom uzupełniającym w Załączniku II, w Załączniku III oraz w Załączniku IV czytelnik jest w stanie rozwikłać podane matematyczne sformułowania, a przede wszystkim odnieść je do konkretnego zespołu pojazd - przyczepa. Szkoda, iż końcowa szczegółowa postać modelu matematycznego wraz ze spisem zmiennych i parametrów nie znalazła się w samym drugim podrozdziale Rozprawy.

Trzeci podrozdział przedstawia „Wyniki przeprowadzonych symulacji”. Na początku stwierdza się, iż wymiary geometryczne określono na podstawie modeli cyfrowych CAD, a „parametry fizyczne tego modelu przyjęto na podstawie danych, charakteryzujących konstrukcję rozważanego zespołu”. To ostatnie zacytowane z Rozprawy zdanie jest niestety ogólnikowe, a przecież kwestia wiarygodności danych jest zawsze kluczowa dla oceny wyników symulacji. Parametry liczbowe modelu dotyczące mas i momentów bezwładności elementów sztywnych oraz sprężystości i tłumienia elementów podatnych przedstawione w tabelach w Załączniku V powinny być lepiej uzasadnione. Czy były przeprowadzone dla nich badania identyfikacyjne, a może posłużono się danymi zaczerpniętymi z innych prac i źródeł? A co z danymi dotyczącymi modelu opony Magic Formula? Wartości liczbowe parametry tego modelu nie są nigdzie zestawione. Czyżby wykorzystano dane z publikacji? Jak wiadomo, model Magic Formula wyraża w sposób analityczny postacie quasistatycznych charakterystyk sił i momentów jako funkcji tzw. poślizgów – charakterystyk wyznaczanych w badaniach eksperymentalnych konkretnej opony w konkretnych warunkach obciążeń eksploatacyjnych. Czy obciążenia kół przyjęte w zastosowanym modelu Magic Formula odpowiadają warunkom symulowanych procesów? W następnych trzech częściach tego podrozdziału przedstawione zostały przykładowe wyniki symulacji uzyskane dla trzech rodzajów testów różniących się przede wszystkim sposobem wymuszania napędu w niekierowanym ruchu samochodu, co skutkowało różnymi przebiegami prędkości wzdłużnej. Badania symulacyjne powtarzane były dla różnych wariantów parametrów modelu przyczepy (m.in. różne warianty położenia osi kół, różne warianty długości dyszla itd.), a także dla różnych wartości parametrów modelu samochodu holującego. Badania te miały więc charakter badań wrażliwości modelu. Niestety sposób zaprezentowania wyników symulacji budzi zastrzeżenia: W opisach wykresów nie zastosowano prostych oznaczeń i nazewnictwa, wybór zaprezentowanych przebiegów był dość chaotyczny, zabrakło pogłębionej analizy ilościowej. We wszystkich przedstawianych przebiegach symulacji można zaobserwować procesy wężykowania, przy czym ich wielkość zależy od doboru parametrów modelu. Warto zauważyć, że wnioski jakościowe z tej części analizy pokrywają się z wnioskami przedstawionymi przez Bevana uzyskanymi na bazie prostego modelu (wnioski Bevana opisane były w przeglądzie literaturowym). Szkoda, iż opisując badania symulacyjne, Autor nie podał informacji nt. zastosowanego w symulacjach oprogramowania. Czy był to Matlab-Simulink (posiadający w swej bibliotece procedur wspomnianą w Rozprawie procedurę Rungego-Kutty-Fahlerberga), czy inny program?

Rozdział 5: Analiza dynamiki zespołu „samochód ciężarowy – przyczepa z osią centralną” przy wykorzystaniu interfejsu programu MSC Adams i wybranego programu z zakresu metody elementów skończonych

Rozdział piąty opisuje metodę analizy dynamiki zespołu samochód-przyczepa z osią centralną przy wykorzystaniu interfejsu oprogramowania MBS (MSC Adams) oraz MES (NX Nastran/Femap). Rozdział ten został zredagowany w pięciu podrozdziałach i szeregu występujących w nich wydzielonych częściach.

Podrozdział pierwszy przedstawia koncepcję metody występującej w pracy w kilku wariantach, co syntetycznie jest zobrazowane na schemacie blokowym nazwanym „mapą rozważanych metod”, a w istocie obrazuje możliwe warianty przepływu informacji pomiędzy zastosowanymi programami obliczeniowymi. We wszystkich wariantach dane liczbowe opisujące geometrię analizowanego obiektu pochodzą z programu CAD, co przybliży analizę dynamiki do zastosowań inżynierskich. Niezrozumiałym jest używanie na jednym schemacie skrótów stosowanych w nomenklaturze polskiej (MES) i angielskiej (FEM). W kolejnych trzech częściach przedstawiono trzy warianty (a właściwie trzy metody) analizy - wariant wykorzystujący obliczenia w standardowym ujęciu MES odnoszący się do analizy wytrzymałościowej ramy przyczepy na bardzo rozbudowanym modelu MESowskim oraz dwa warianty zasadnicze dla Rozprawy – „wariant 1” oraz „wariant 2”, w których stosowanie MES do analizy wytrzymałościowej ramy przyczepy poprzedzone jest analizą MBS ruchu zestawu pojazd-przyczepa i przebiega następnie na odpowiednio zredukowanych modelach MESowskich. Wariant bazujący na modelu niezredukowanym pojawia się w Rozprawie w zasadzie jedynie jako wyjściowy do dyskusji o potrzebie i celowości stosowania modeli MESowskich zredukowanych w obliczeniach wytrzymałościowych przyczepy obciążanej dynamicznie i w analizach zamieszczonych w Rozprawie nie jest w ogóle stosowany. W „wariacie 1” model zredukowany dotyczy opisu całości przyczepy. W „wariacie 2” model tworzony jest poprzez agregację modeli zredukowanych poszczególnych elementów konstrukcyjnych przyczepy, co ma ułatwić prowadzenie analiz dla licznych zmienianych zestawów danych.

W drugim podrozdziale Autor wyjaśnia „istotę interfejsu”. To dość dziwny i chyba nazbyt skrótowy tytuł podrozdziału, zważywszy, iż podrozdział ten skupia się nie tylko na kwestiach komunikacji stosowanego oprogramowania, nie tylko na wyjaśnieniu koncepcji powiązania struktur dyskretnych typu MBS ze strukturami ciągłymi typu MES, ale przede wszystkim na sposobie dekompozycji i redukcji dynamicznego modelu MESowskiego. W wyjaśnianiu koncepcji dekompozycji i redukcji modeli MES Autor odwołuje się do kilku publikacji obcych. Przytacza anglojęzyczne nazewnictwo oraz szereg wzorów wyjaśniających istotę metody służącej zmniejszeniu liczby stopni swobody modelu MES poprzez jego dekompozycję i redukcję. Dotyczy to obiektów cechujących się występowaniem w ich modelach dynamicznych znacznych dysproporcji częstotliwości charakterystycznych. Takie sytuacje występują np. (tak jak w przypadku ruchu pojazd-przyczepa), gdy na ruch podstawowy (unoszenia) obiektu powodowany wymuszeniami zewnętrznymi o stosunkowo niskich częstotliwościach składają się drgania własne wysokoczęstotliwościowe wynikające ze sprężystości konstrukcji. Szkoda, iż w tych wyjaśnieniach Autor pominął uznane w środowisku polskich mechaników prace prof. Osieckiego oraz prof. Stańczyka dotyczące modelowania takich układów dynamicznych poprzez ich zdekomponowanie do postaci tzw. układów częściowych opisywanych przez modele zredukowane. W ostatnim fragmencie tego podrozdziału Autor opisuje i obrazuje graficznie transfer informacji pomiędzy programami stosowanymi w finalnych analizach MESowskich z wykorzystaniem oprogramowania CAD, MBS i MES. Dzięki tym informacjom poznajemy de facto szczegóły zastosowanej metody obliczeniowej w analizach wytrzymałościowych ram przyczep obciążanych dynamicznie.

Trzeci podrozdział poświęcony jest opracowanemu w programach CAD (SolidWorks oraz Onshape) modelowi zestawu trzyosiowy samochód ciężarowy - przyczepa z dwiema osiami centralnymi. Z założeń ogólnych wynika, iż w modelu geometrycznym zespołu zostały przyjęte pewne konstrukcyjne wymiary rzeczywiste – wymiary główne wynikające z przepisów oraz pozostałe wynikające z konieczności zapewnienia maksymalnie dostępnej przestrzeni ładunkowej. Model ten dopuszcza możliwość doboru pewnych parametrów, także geometrycznych, np. położenia osi przyczepy, co jak wiadomo, ma bezpośredni związek z wymuszeniami zewnętrznymi wynikającymi z ruchu po jezdni. W kolejnych częściach tego podrozdziału Autor obrazuje modele CADowskie wybranego samochodu ciężarowego (bez podawania marki i typu) oraz 2 rodzajów holowanych przyczep (przyczepa ze stałą zabudową oraz przyczepa do transportu nadwozi wymiennych), stosując do tego rysunki 2D i 3D, a także fotografie. Słowny opis modeli CAD sprowadzony został w Rozprawie do dość ogólnego opisu konstrukcji. Szkoda, iż w tej prezentacji Autor nie przyjął jednej konwencji opisu modeli CAD dla samochodu i obu przyczep, a ponadto uciekał się także do sformułowań mało precyzyjnych. Np. jak należy rozumieć zdanie: „Oprócz samej ramy nadwozia wymiennego wykonano również model CAD tej ramy obciążonej ładunkiem”.

Czwarty podrozdział poświęcony jest modelom MES. Modele te zostały utworzone na podstawie zaimportowanych do środowiska MES modeli CAD. W preprocesorze Femap wykorzystano w modelowaniu elementy powłokowe, uzupełnione elementami belkowymi oraz bryłowymi. W Rozprawie podane są pewne szczegółowe informacje odnośnie liczby i rodzaju stosowanych elementów z biblioteki Femap, które dla osób zajmujących się profesjonalnie analizami MES mogą stanowić cenne źródło informacji. Z uwagi na koncepcję zastosowania MES w analizie dynamiki konstrukcji przyczepy, istotnym elementem modelu MESowskiego jest rysunek ramy przyczepy z zaznaczonymi punktami „interfejsu”, gdzie występują elementy sztywne. Szkoda tylko, że rysunek dotyczył tu tylko jednego rodzaju przyczepy (przyczepy do transportu nadwozi wymiennych). Recenzent zdaje sobie sprawę, iż przejrzyste sformułowanie modelu MESowskiego jest trudne, niemniej nawet opisowa jego prezentacja w Rozprawie mogłaby być bardziej całościowa, usystematyzowana i precyzyjna. Cenną dla Rozprawy jest informacja, że „Poprawność dyskretyzacji modeli MES oceniono poprzez zweryfikowanie wartości współczynnika kształtu poszczególnych elementów skończonych oraz wartości ich kąta odchylenia od kształtu optymalnego” oraz, że „Dodatkowo poprawność tę oceniono, porównując wyniki obliczeń z wynikami uzyskanymi przy uwzględnieniu innych gęstości dyskretyzacji”. Oznacza to, że zasadnicze obliczenia MES poprzedzone były obliczeniami wstępnymi służącymi właściwemu doborowi modelu siatkowego.

Piąty podrozdział dotyczy modelowania dynamiki zestawu pojazd-przyczepa w konwencji MBS – z wykorzystaniem oprogramowania MSC Adams. Model ten bazuje na modelach samochodu i przyczep zaimportowanych z programów CAD (co dotyczy elementów sztywnych) oraz z danych dotyczących charakterystyk zastępczych elementów podatnych łączących elementy sztywne. Niezrozumiałym jest tu stwierdzenie Autora, że podstawą do utworzenia modelu elementów podatnych był zaimportowany model MES ramy z nadwoziem. Chodziło tu chyba tylko o zaznaczenie, że struktura węzłów z elementami sztywnymi była zgodna z tą występującą w modelu MES. Modele MBS są opisywane kolejno w wydzielonych częściach tego podrozdziału. Niestety znowu prezentacja modeli jest dość nieuporządkowana, choć okraszona ładnymi rysunkami przybliżającymi sposoby podziału obiektów na bryły sztywne i podatne. Dla części elementów podatnych występujących w układach zawieszenia wykorzystano zamieszczone w materiałach firmowych postacie ich nieliniowych charakterystyk. W wydzielonej części podrozdziału Autor przedstawił „Wyznaczenie charakterystyki dynamicznej miechów zawieszenia pneumatycznego” przyczepy. Przedstawiony schemat układu pneumatycznego został dość szczegółowo opisany.

Zwrócono uwagę, iż dane odnoszące do warunków początkowych i statyki układu pneumatycznego znacząco rzutują na model dynamiki ruchów pionowych zawieszenia. Podane zostały szczegółowe wzory oraz uzyskany na ich podstawie przestrzenny nieliniowy wykres „charakterystyki dynamicznej miecha” – charakterystyki wiążącej wartość siły oddziaływania miecha od zmiany wysokości miecha dla różnych wartości masy przyczepy przypadającej na rozpatrywaną oś. Końcowa postać charakterystyki sztywności zawieszenia przyczepy uwzględnia także sztywność odboju. W następnej wydzielonej części piątego podrozdziału opisany został w dwóch wariantach model MBS zespołu samochód - przyczepa utworzony w środowisku MSC Adams (wariant pierwszy – gdy pojazd holuje przyczepę z zabudową stałą, wariant drugi – gdy pojazd holuje przyczepę z nadwoziem wymiennym). W wariantcie pierwszym uwzględniono przypadki przyczepy pustej i w pełni załadowanej, w wariantcie drugim – przypadki z obciążeniem wynikającym z zabudowy furgonowej i kurtynowej. Z założeń przedstawionych w sposób dość wyrywkowy wynika m.in., że w opisie przegubowego sprzęgu pojazdu z przyczepą pominięto luzy i tarcie, że w modelu samochodu przyjęto uproszczony opis geometrii układu kierowniczego i zwrotniczego (ale z uwzględnieniem kąta pochylenia i wyprzedzenia zwrotnicy). W ostatnim fragmencie pada ważne stwierdzenie, że dzięki startowaniu symulacji ze stanu postoju można było sprawdzić poprawność modelu, w tym ocenić wartości sił statycznych oddziaływania elementów sprężystych zawieszenia poszczególnych osi przyczepy.

Rozdział 6. Ocena poprawności wyników obliczeniowych

W pierwszym podrozdziale Autor przedstawił tzw. walidację pośrednią modelu ruchu zestawu samochód - przyczepa opisanego w rozdziale 4 (model autorski MBS bazujący na równaniach Lagrange'a, współrzędnych złączowych i modelu opony Magic Formula). W tym celu porównywano wybrane przebiegi zmiennych (przebiegi kąta odchylenia samochodu / przyczepy oraz przebiegi kąta przechyłu samochodu / przyczepy) uzyskane w symulacji na bazie tego modelu z analogicznymi przebiegami obliczonymi przy wykorzystaniu modelu uproszczonego wyznaczonego w MSC Adams. W celu zobiektywizowania oceny zgodności wyników wyznaczano współczynnik korelacji liniowej Pearsona. Dla wszystkich par porównywanych przebiegów współczynnik ten okazał się być wysoki. Niestety nie podano jakie warunki ruchu były realizowane w testach symulacyjnych. Z postaci przebiegów zanikających w czasie można mniemać, iż symulowany był ruch zespołu przy wystąpieniu pojedynczego impulsu działającego na koło. Zamieszczone w Rozprawie komentarze do tych wyników są niezrozumiałe. Np., co oznacza słowo „adekwatne” w zdaniu: „Pewne różnice w przebiegach wykresów, widoczne na przedstawionych rysunkach, wynikają z nieco innego sposobu odwzorowania zawieszenia oraz – co się z tym wiąże – z różnic wartości niektórych adekwatnych parametrów fizycznych obu modeli”. Niezrozumiałą jest też ostatnia w tym podrozdziale uwaga Autora (zbyt długa, aby ją cytować).

W drugim podrozdziale przedstawiono eksperymentalną weryfikację modelu MSC Adams przeprowadzoną z wykorzystaniem zespołu składającego się z nieobciążonego samochodu ciężarowego holującego przyczepę z zabudową stałą. Badania eksperymentalne dotyczyły przejazdów zespołu przez próg podrzutowy z różną prędkością i przy różnym załadunku przyczepy. Mierzone w rzeczywistym obiekcie przebiegi kilku przyśpieszeń po przetworzeniu analogowo-cyfrowym rejestrowane były w pamięci komputera. Interesującym faktem było zastosowanie filtra Kalmana w celu eliminacji zakłóceń w zarejestrowanych cyfrowo sygnałach pomiarowych. Z przebiegami pomiarowymi porównywane były analogiczne przebiegi zarejestrowane podczas symulacji przejazdów. Analizy porównawcze dotyczyły nie tylko przebiegów w dziedzinie czasu. Dzięki zastosowaniu szybkiej transformacji Fouriera i obliczeniu widm amplitudowych analiza porównawcza przebiegów pomiarowych i zasymulowanych objęła także dziedzinę częstotliwościową. Gdyby

zastosowano w prezentacji widm skale logarytmiczne (tak jak się to zwykle praktykuje), a nie skale liniowe, ich porównanie byłoby łatwiejsze. Analizując przebiegi mierzone i symulowane Autor spróbował wyjaśnić występowanie w nich pewnych znaczących różnic, zrzucając winę przede wszystkim na niedokładność urządzeń pomiarowych. Szkoda, że przed przystąpieniem do zasadniczych eksperymentów nie sprawdzono dokładności działania aparatury pomiarowej wraz z przetwarzaniem analogowo-cyfrowym oraz poprawności zastosowanych algorytmów cyfrowych filtracji. Można byłoby tu wykorzystać dodatkowe eksperymenty zrealizowane na bardzo prostym obiekcie (choćby w układzie typu masa drgająca na sprężynce z tłumikiem) o znanych charakterystykach czasowych i częstotliwościowych. Dokumentacja działań weryfikacyjnych przedstawianych w Rozprawie ma charakter opisowy z wykorzystaniem kilku wykresów, momentami jest nawet dość szczegółowa, ale nie do końca czytelna. Szkoda, iż analizę ograniczono do przebiegów przyspieszeń pionowych. Oczywiście to są najważniejsze przebiegi dla symulacji obciążeń ramy. Ale czy nie warto było rozszerzyć analizę o przebiegi opisujące ruchy przyczepy w płaszczyźnie drogi, co byłoby ważne dla ewentualnego uchwycenia wężykowania?

Rozdział 7. Wyniki wybranych symulacji w przypadku wykorzystania interfejsu programu MSC Adams i wybranego programu z zakresu metody elementów skończonych

W rozdziale tym przedstawiono wyniki symulacji naprężeń w ramie przyczepy wywołanych obciążeniami spowodowanymi kierowanym ruchem zespołu samochód - przyczepa. Manewry te (zgodne z opisami normatywnymi) symulowane były w programie MSC Adams, zaś procesy naprężeń w konstrukcji ram odwzorowywano w oprogramowaniu MESowskim NX Nastran/Femap. Testy symulacyjne zostały opisane kolejno w trzech podrozdziałach.

Podrozdział pierwszy zawiera opis symulacji dotyczący manewru „U-turn” (manewr zawracania z prędkością ok. 30 km/h na łuku drogi o promieniu ok. 25 m). W symulacji ruchu zespołu samochód - przyczepa uzyskano efekt odrywania się kół przyczepy od jezdni, co skutkowało szczególnym wymuszeniem obciążeń konstrukcji ramy. W Rozprawie przedstawiono przebieg czasowy przyspieszenia dośrodkowego środka ciężkości ramy (uzyskany w MSC Adams) oraz obraz warstwiczny naprężeń zredukowanych (uzyskany w chwili oderwania kół w NX Nastran/Femap). Autor sformułował na tej podstawie pewne zalecenia konstrukcyjne i technologiczne ważne dla projektantów przyczep.

Podrozdział drugi dotyczy symulacji procesów naprężeń w serii zakrętów „S-turn” (przejazd ze skrzętem raz w jedną raz w drugą stronę przy prędkości ok. 30 km/h po łukach drogi o promieniach ok. 25 m). W badaniu symulacyjnym zaobserwowano „znaczące drgania przyczepy, przy czym wartość amplitudy tych drgań była większa w przypadku transportu nadwozia wymiennego kurtynowego niż w przypadku nadwozia wymiennego furgonowego”. Warstwice naprężeń zredukowanych w wybranej chwili zostały przedstawione na dwóch rysunkach – dla ramy przyczepy z nadwoziem kurtynowym i dla ramy przyczepy z nadwoziem furgonowym.

Podrozdział trzeci dotyczy symulacji procesów naprężeń przy przejeździe zespołu przez określony geometrycznie próg podrzutowy z prędkością z zakresu 8-20 km/h. Z treści Rozprawy dowiadujemy się, że obiektem badań była przyczepa z zabudową stałą, natomiast nie dowiadujemy się żadnych innych szczegółów odnośnie symulacji, np. jakiej prędkości przejazdu dotyczyły przedstawione wyniki. Na zamieszczonych rysunkach pokazano przebieg czasowy przemieszczenia wzdłużnego ramy w jej wybranym punkcie oraz wykresy warstwiczne naprężeń zredukowanych całej ramy i jej fragmentu w wybranej chwili czasu.

Na zakończenie tego podrozdziału Autor sformułował kilka uwag, które powinny być sugestiami dla projektantów przyczep.

Rozdział 8. Podsumowanie rozprawy i wnioski

W ostatnim stosunkowo obszernym rozdziale Autor dokonał podsumowania Rozprawy i sformułował szereg wniosków. Układ tego rozdziału wyraźnie dzieli go na część dotyczącą modelu autorskiego opracowanego z wykorzystaniem równań Lagrange'a, współrzędnych złączowych oraz modelu opony Magic Formula oraz na część związaną z modelami generowanymi w MSC Adams oraz NX Nastran/Femap.

W części pierwszej Autor skupił się na problematyce wężykowania przyczep. Na podstawie badań symulacyjnych sformułował zalecenia przydatne dla projektantów (właściwe rozmieszczenie osi kół, mocowanie dyszla, rozłożenie masy itd.), dla obsługi technicznej (masa pojazdu holującego dobrana do masy przyczepy, opony dość sztywne) oraz dla kierowców (zalecana jazda z prędkością nie przekraczającą 80-90 km/h i łagodne hamowanie w sytuacji pojawienia się wężykowania). Są to zalecenia ogólnie znane.

W części drugiej Autor podkreślił znaczenie metod opartych na oprogramowaniu MBS i MES umożliwiającym analizy wytrzymałości ram w warunkach obciążeń dynamicznych. Wykorzystanie interfejsu programów MSC Adams i NX Nastran/Femap ma być w tym zakresie efektywnym i niezbyt drogim narzędziem wspomagającym prace projektantów przyczep.

Odnosząc się do kwestii przyszłych badań, Autor zaproponował podjęcie analiz w oparciu o jeden duży komercyjny program MESowski, a także rozważenie zastosowania w analizach dynamiki tzw. „wolnego” (niekomercyjnego) oprogramowania dostępnego w internecie.

Szkoda, iż w podsumowaniu Autor nie odniósł się do kwestii integracji analiz związanych z problematyką wężykowania przyczep oraz z problematyką wytrzymałości ram przyczep. Można by tu wykorzystać metody polioptymalizacji, co oczywiście wymagałoby bardziej sformalizowanego sposobu modelowania i analiz.

Spis literatury

Spis literatury obejmuje 97 pozycji, w tym jedno odwołanie do stron internetowych. Kolejne pozycje podane są w porządku alfabetycznym i nie są ponumerowane, co oczywiście ułatwia tworzenie spisu i odwołania bibliograficzne, ale nie jest zalecane w opracowaniach naukowych. Nie stwierdzono, aby pozycja wymieniona w spisie literatury nie była przywoływana w tekście Rozprawy (choć formalnie, na skutek występujących błędów edycyjnych to pozytywne stwierdzenie jest w tym przypadku nieco nadmiarowe).

Załączniki (I, II, III, IV, V)

Jak już wspomniano na wstępie Recenzji, załączniki nie zostały zatytułowane. O ich przeznaczeniu można się dowiedzieć dopiero z treści Rozprawy. Załączniki byłyby też bardziej przyjazne dla czytelnika, gdyby zawierały wykazy oznaczeń i więcej opisów słownych. Dotyczy to zwłaszcza załączników I, III i IV, gdzie przedstawiono bez komentarza serie wzorów matematycznych. Treść załącznika II zawierającego schemat i fotografie, podobnie jak i treść załącznika V z tablicami danych mogłyby znaleźć się w głównym tekście Rozprawy.

Uwagi dotyczące edycji i redakcji Rozprawy

- 1) Zamieszczone w Rozprawie rysunki są w większości dobrej, a nawet doskonałej jakości.
- 2) W tekście Rozprawy dostrzec można pewne stylistyczne niezręczności, błędy interpunkcji, a także, co szczególnie istotne, pewne formalne błędy zapisu. Przykłady stylistycznych

niezręczności znalazły się w cytatach zawartych w poprzednim punkcie Recenzji przy analizowaniu treści Rozprawy. Poniżej przedstawiono jedynie przykłady formalnych błędów zapisu dotyczące pozycji literaturowych:

Coley J.W., Tukey J.W., An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, Math. Comput.. (Powinno być Couley)

Lei T., Wang J., Yao Z., Modelling and stability analysis of articulated vehicles, Appl. Sci.. (W przywołaniu jest Li et al., 2021, a powinno być Lei et al., 2021)

Zamiast normy ISO 3833-1978 (notabene nieobecnej w Spisie literatury) definiującej typy pojazdów powinna być przywołana na stronie 36 występująca w Spisie literatury norma ISO 4130-1978 dotycząca definicji układu współrzędnych.

3) Edycja Rozprawy jest generalnie dość staranna. Wspomniane braki tytułów i opisów słownych dotyczące załączników i brak numeracji pozycji literaturowych to w zasadzie jedyne formalne uchybienia poza tymi wymienionymi powyżej.

4) Redakcja Rozprawy budzi szereg zastrzeżeń, których większość już wymieniono przy omawianiu kolejnych jej rozdziałów. Zastrzeżenia te dotyczyły nieprecyzyjnych, a nawet chaotycznie formułowanych zapisów, nieprzedstawiania założeń i danych odnośnie symulowanych procesów, braku spójności i systematyczności w prezentacji wyników pomiarów i obliczeń. Po przeanalizowaniu całości Rozprawy, kontrowersyjną wydaje się być także struktura fragmentów pracy przejawiająca się zarówno w podziale na rozdziały i podrozdziały, jak i w ich tytułach. Byłoby chyba lepiej, aby weryfikacja eksperymentalna modelu MBS w MSC Adams poprzedzała walidację numeryczną modelu autorskiego, w której modelem referencyjnym jest właśnie model z MSC Adams. Chciałbym jednak podkreślić, że nie są to bardzo znaczące zastrzeżenia, gdyż dotyczą jedynie subiektywnie formułowanej redakcji, a nie błędów merytorycznych.

Ocena końcowa Rozprawy

Rozprawa wskazuje, iż jej Autor wykonał z powodzeniem bardzo obszerną pracę naukowo badawczą obejmującą modelowanie matematyczne, opracowanie algorytmów i programów numerycznych, prowadzenie badań weryfikujących modele i oprogramowanie, zarówno z wykorzystaniem eksperymentów, jak i przebiegów symulowanych. Przedstawione narzędzia badawcze i obliczeniowe oraz relacja z ich zastosowania pokazują, iż została opracowana i przetestowana metoda analizy dynamiki przyczep samochodów ciężarowych. Cel postawiony w Rozprawie jest więc osiągnięty.

Stawiam wniosek o dopuszczenie Rozprawy do publicznej obrony, a jej zawartość merytoryczną, mimo niedoskonałości edycyjnych i redakcyjnych oceniam dość wysoko.

