



NORBERT TUŚNIO

Main School of Fire Service, Warsaw,
Poland

ORCID iD: 0000-0003-0878-8499

PAWEŁ HUBICZ

Automotive and Secondary School
Complex No. 3 named Ignacy Jan
Paderewski in Warsaw, Poland

WYBRANE PROBLEMY TRANSPORTU ŁADUNKÓW NIEBEZPIECZNYCH

SELECTED PROBLEMS OF TRANSPORTING DANGEROUS GOODS

ABSTRACT

Objective: The aim of the work is to answer the research question regarding the identification of technical, environmental and behavioral factors that affect the lateral stability of vehicles, and to assess the effectiveness of selected lateral stability support systems in reducing the risk of road accidents.

Methods: Based on the analysis of scientific literature, experimental results and computer simulations, a detailed assessment of the impact of vehicle technical parameters, chassis geometry, operation of support systems and road conditions on vehicle behavior during driving was carried out.

Results: The state of research in the field of lateral stability of vehicles covers a wide range of analyses and experiments, however, there are still areas that require further research, especially in relation to the integration of stability control systems with drivers' reactions in dynamic road situations. The results to date indicate the importance of parameters such as vehicle mass distribution and center of gravity height, the importance of weather conditions, and the impact of road surface diversity.

Discussion: Technological development opens up new possibilities for designing systems that improve safety, which require a thorough assessment of their effectiveness in real road conditions.

KEYWORDS: *safety engineering, ADR transport, vehicle stability, road accidents, hazardous materials*

ABSTRAKT

Cel: Celem pracy jest odpowiedź na pytanie badawcze dotyczące identyfikacji czynników technicznych, środowiskowych i behawioralnych, które wpływają na stateczność poprzeczną samochodów, oraz ocena efektywności wybranych systemów wspomagających stabilność poprzeczną w redukcji ryzyka wypadków drogowych.

Metody: Na podstawie analizy literatury naukowej, wyników eksperymentalnych oraz symulacji komputerowych przeprowadzono szczegółową ocenę wpływu parametrów technicznych pojazdu, geometrii układu jezdnego, działania systemów wspomagania oraz warunków drogowych na zachowanie pojazdów podczas jazdy.

Wyniki: Stan badań w zakresie stateczności poprzecznej pojazdów obejmuje szeroki wachlarz analiz i eksperymentów, jednakże wciąż istnieją obszary wymagające dalszych badań, szczególnie w odniesieniu do integracji systemów kontroli stabilności z reakcjami kierowców w dynamicznych sytuacjach drogowych. Dotychczasowe wyniki wskazują na istotność parametrów takich jak rozkład masy pojazdu i wysokość środka ciężkości, znaczenie warunków atmosferycznych, a także wpływ różnorodności nawierzchni.

Omówienie: Rozwój technologiczny otwiera nowe możliwości projektowania systemów poprawiających bezpieczeństwo, które wymagają dokładnej oceny skuteczności w rzeczywistych warunkach drogowych.

SŁOWA KLUCZOWE: *inżynieria bezpieczeństwa, transport ADR, stateczność pojazdów, wypadki drogowe, materiały niebezpieczne*

WPROWADZENIE

Bezpieczeństwo transportu materiałów niebezpiecznych należy do głównych zagadnień współczesnych nauk społecznych i humanistycznych, ściśle związanych z polityką transportową, bezpieczeństwem publicznym oraz zarządzaniem ryzykiem. Problematyka ta wykracza poza wymiar techniczny i inżynieriyny – ma bezpośrednie konsekwencje dla zdrowia i życia ludzi, ochrony środowiska, funkcjonowania społeczności lokalnych oraz zaufania do instytucji odpowiedzialnych za nadzór nad transportem. Zdarzenia drogowe z udziałem pojazdów przewożących materiały niebezpieczne często stają się przedmiotem szerokiej debaty publicznej, a ich skutki mają charakter nie tylko ekonomiczny, lecz także społeczny i polityczny (Horberry i in., 2006, s. 185).

Rozwój gospodarczy i wzrastające natężenie transportu drogowego sprawiają, że regulacje prawne dotyczące przewozu ładunków niebezpiecznych (ADR, fr. *L' Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route* – międzynarodowa konwencja dotycząca drogowego przewozu towarów i ładunków niebezpiecznych) stają się istotnym narzędziem polityki państwa i Unii Europejskiej w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa publicznego. Ich znaczenie wykracza poza ramy techniczne – są instrumentem kształtowania odpowiedzialności przewoźników, kierowców i instytucji nadzorczych, a także elementem budowania kultury bezpieczeństwa w społeczeństwie (Wojewódzka-Król, Załoga, 2019).

Transport drogowy, ze względu na swoją dominującą rolę w przewozie towarów niebezpiecznych, wiąże się z licznymi zagrożeniami: od bezpośredniego ryzyka wypadków, przez możliwość skażeń środowiska, po szerokie konsekwencje społeczne, takie jak ewakuacje ludności, utrata zaufania społecznego czy długofalowe koszty odbudowy infrastruktury. Analiza bezpieczeństwa transportu ADR w tym ujęciu stanowi ważne zadanie badawcze w ramach nauk o bezpieczeństwie, logistyce i polityce publicznej.

W literaturze podkreśla się, że bezpieczeństwo transportu materiałów niebezpiecznych jest problemem wielowymiarowym, łączącym aspekty techniczne z regulacyjnymi i społecznymi (Raczyński, 2002). Z jednej strony istnieje konieczność rozwoju systemów technicznych zapewniających skuteczność pojazdów i ograniczających ryzyko wypadków, z drugiej – kluczową

rolę odgrywają ramy prawne, instytucjonalne i edukacyjne. Przepisy ADR oraz towarzyszące im krajowe i europejskie regulacje stanowią podstawę kształtowania bezpiecznych praktyk przewozowych, a ich przestrzeganie ma bezpośrednie przełożenie na redukcję zagrożeń w skali społecznej.

Społeczne konsekwencje zdarzeń drogowych z udziałem materiałów niebezpiecznych są znaczące – obejmują m.in. koszty medyczne, zakłócenia w funkcjonowaniu miast, zagrożenia dla środowiska oraz długofalowe skutki psychologiczne dla społeczności lokalnych. Z tego powodu interdyscyplinarna analiza problemu – łącząca perspektywę inżynierską z podejściem społecznym i humanistycznym – wydaje się niezbędną.

Stateczność poprzeczna samochodów jest jednym z kluczowych aspektów bezpieczeństwa ruchu drogowego, który zyskał na znaczeniu w kontekście rosnącej liczby pojazdów na drogach oraz wzrastających oczekiwań wobec systemów zapobiegających wypadkom. W sytuacjach dynamicznych, takich jak nagle manewry omijania, zakręty czy działanie bocznego wiatru, stabilność pojazdu odgrywa decydującą rolę w zapobieganiu utracie kontroli i potencjalnym wypadkom. Wzrastająca złożoność konstrukcji pojazdów, rozwój systemów wspomagania kierowców oraz różnorodność czynników zewnętrznych powodują konieczność dogłębnej analizy tego zagadnienia, zarówno od strony teoretycznej, jak i praktycznej. W niniejszej pracy skoncentrowano się na analizie stateczności poprzecznej samochodów w odniesieniu do bezpieczeństwa czynnego w ruchu drogowym. Uwzględniono podstawy teoretyczne, badania empiryczne oraz zastosowanie symulacji komputerowych.

Przedmiotem niniejszej pracy jest stateczność poprzeczna samochodów, rozumiana jako zdolność pojazdu do utrzymania stabilności w kierunku bocznym w różnych warunkach ruchu. Zagadnienie to odgrywa istotną rolę w bezpieczeństwie czynnego uczestnictwa w ruchu drogowym, które ma na celu przeciwdziałanie wypadkom poprzez poprawę dynamiki i właściwości jezdnych pojazdu. Analiza stateczności poprzecznej uwzględnia kluczowe czynniki wpływające na stabilność pojazdu, począwszy od parametrów technicznych i konstrukcyjnych, przez wpływ czynników zewnętrznych, takich jak warunki atmosferyczne i stan nawierzchni, aż po interakcję kierowcy z pojazdem. W pracy podjęto również analizę skuteczności systemów kontroli

stabilności, takich jak ESP i Torque Vectoring, oraz ich znaczenia w zapewnieniu stabilności pojazdu w dynamicznych i trudnych warunkach drogowych.

Kompozycja niniejszej pracy została skonstruowana w sposób umożliwiający systematyczne przedstawienie problematyki stateczności poprzecznej. W początkowych rozdziałach przybliżono teoretyczne podstawy zagadnienia, kluczowe definicje oraz ich znaczenie dla bezpieczeństwa czynnego. Następnie szczegółowo omówiono czynniki wpływające na stateczność, w tym parametry techniczne, zewnętrzne oraz behawioralne. Kolejne rozdziały obejmują analizę zachowania pojazdów w różnych warunkach ruchu, z uwzględnieniem ruchu prostoliniowego, krzywoliniowego oraz zjawisk takich jak wywrócenie pojazdu. Przedstawiono również ocenę skuteczności systemów kontroli stabilności, wynikającą z analizy eksperymentów i symulacji. Pracę kończy syntetyczne podsumowanie wyników oraz wskazanie obszarów wymagających dalszych badań.

DEFINICJA, PODSTAWY TEORETYCZNE I ZNACZENIE DLA BEZPIECZEŃSTWA STATECZNOŚCI POPRZECZNEJ

Równowaga boczna pojazdów stanowi kluczowy element bezpieczeństwa na drogach, determinujący ich zdolność do stabilnego poruszania się w trudnych warunkach. W kolejnych rozdziałach omówione zostaną teoretyczne aspekty stateczności poprzecznej, w tym znaczenie konstrukcji pojazdu oraz wpływ czynników zewnętrznych, takich jak warunki atmosferyczne czy dynamika ruchu. Przedstawione analizy pozwolą lepiej zrozumieć mechanizmy, które kształtują bezpieczeństwo transportu, a także zidentyfikować obszary wymagające dalszego doskonalenia technologii.

Stateczność poprzeczna pojazdu jest fundamentalnym aspektem bezpieczeństwa drogowego, odgrywającym kluczową rolę w utrzymaniu równowagi pojazdu w kierunku bocznym, szczególnie podczas gwałtownych manewrów. Zdolność ta pozwala zminimalizować ryzyko wypadków, zwłaszcza w nagłych sytuacjach, takich jak omijanie przeszkód. Intensywność sił odśrodkowych, które oddziałują na pojazd, wzrasta proporcjonalnie do kwadratu prędkości, co czyni stateczność poprzeczną jeszcze bardziej

istotnym zagadnieniem w kontekście współczesnych pojazdów osiągających coraz wyższe prędkości. Przekroczenie granic stabilności podczas takich manewrów może skutkować niekontrolowanym poślizgiem bądź przewróceniem pojazdu. Tym samym zrozumienie dynamiki bocznej pojazdów w takich warunkach jest nieodzowne dla poprawy bezpieczeństwa i ograniczenia liczby wypadków. W badaniach (Wichowski, 2011, s. 5) podkreślono szczególne ryzyko utraty równowagi dla pojazdów o wysokim środku ciężkości oraz wskazano na konieczność precyzyjnego projektowania systemów bezpieczeństwa.

W kontekście dynamiki poprzecznej pojazdów istotną rolę odgrywa równowaga momentów sił, które działają na pojazd w czasie zakrętów. Przy ostrych zakrętach siła odśrodkowa może prowadzić do niestateczności, jeśli reakcje boczne kół i sztywność poprzeczna zawieszenia nie są odpowiednio zbilansowane (Bogacz, Seńko, 2018, s. 5). Symulacyjne badania autorów wykazały, że parametry te mogą być zoptymalizowane w projektowaniu pojazdów, minimalizując ryzyko utraty stateczności. Zrozumienie tego mechanizmu pozwala na modelowanie oraz prognozowanie potencjalnych zagrożeń, co w praktyce umożliwia tworzenie bardziej efektywnych systemów stabilizujących. Opracowanie takich systemów, uwzględniających parametry dynamiki poprzecznej, może znacznie poprawić bezpieczeństwo w sytuacjach kryzysowych, a zarazem zmniejszać liczbę wypadków związanych z utratą równowagi bocznej.

Konstrukcja pojazdu i rozkład masy wpływają bezpośrednio na zdolność do zachowania stateczności poprzecznej, co szczególnie uwidacznia się w przypadku pojazdów ciężarowych z wyżej położonym środkiem ciężkości. Pojazdy o szerokim rozstawie kół oferują większy margines bezpieczeństwa przy pokonywaniu ostrych zakrętów, ale wyższy środek ciężkości zwiększa ryzyko przechyłów bocznych i przewrócenia (Wichowski, 2011, s. 5). Pojazdy takie jak cysterny (rys. 1) wymagają szczególnej uwagi w projektowaniu systemów bezpieczeństwa, co potwierdzają badania (Parczewski i in., 2015, s. 250). Przelewanie paliwa wewnątrz cysterny powoduje dynamiczne przesunięcia środka ciężkości pojazdu, co istotnie wpływa na jego stateczność i zwiększa ryzyko utraty sterowności w sytuacjach manewrowych. Wprowadzenie zaawansowanych technologii, takich jak systemy ESP, umożliwia automatyczne dostosowanie momentów sił działających na poszczególne koła, co ogranicza ryzyko przewrócenia przy ostrych manewrach bądź trudnych warunkach

drogowych. Testy i symulacje stanowią tu podstawę do oceny efektywności takich technologii w rzeczywistych warunkach.

Rysunek 1. Układ współrzędnych pojazdu oraz schemat wężykowania jako niestateczności ruchu zestawu kołowego w sztywnym torze



Źródło: Wicher J., *Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego*. WKŁ, Warszawa 2004; Bogacz R., Seńko J., *Dynamika poprzeczna i stateczność układu modelującego oddziaływanie długiego pojazdu szynowego z torem. Symulacja w Badaniach i Rozwoju*, vol. 9, no. 1–2/2018.

Wpływ kierowcy na stateczność poprzeczną pojazdu jest również nie do przecenienia. Styl jazdy znacząco wpływa na utrzymanie stabilności, szczególnie w sytuacjach, gdy pojazd wykazuje niesprawności techniczne (Parczewski, Wnęk, 2006, s. 81). Na przykład nieprawidłowe ciśnienie w oponach lub zużyte amortyzatory mogą znacząco zwiększyć wysiłek konieczny do utrzymania kontroli nad pojazdem, co dodatkowo potęguje ryzyko wypadków. Jednocześnie badania te pokazują, że momenty sił działające na kierownicę mogą być znacznie większe w pojazdach z niesprawnym zawieszeniem. Utrudnia to reakcje kierowcy w sytuacjach kryzysowych. Zapewnienie odpowiedniego stanu technicznego pojazdu jest zatem kluczowe dla redukcji ryzyka utraty stabilności i poprawy bezpieczeństwa drogowego.

Eksperymentalna i symulacyjna analiza przechyłów poprzecznych dostarcza szczegółowych informacji o reakcjach pojazdów na przyspieszenia boczne, co ma kluczowe znaczenie przy projektowaniu systemów stabilizujących. Przeprowadzono badania (Janczur, Świder, 2004, s. 1) przy użyciu żyroskopów, rejestrując kąty przechyłów w zależności od poziomu przyspieszenia poprzecznego. Wyniki wykazały znaczne różnice w zachowaniu

samochodów osobowych i ciężarowych, co sugeruje konieczność adaptacji konstrukcyjnej tych pojazdów do ich specyficznych warunków pracy. Autorzy wskazują również na ograniczenia symulacji komputerowych, które mogą nie uwzględniać w pełni rzeczywistych parametrów technicznych, takich jak działanie drążków stabilizatora. Dalsze badania nad dynamiką poprzeczną pojazdów mogą dostarczyć nowych danych, które pozwolą na precyzyjniejsze modelowanie i tworzenie bardziej zaawansowanych systemów bezpieczeństwa.

Ostatnim, lecz równie ważnym aspektem jest rozwój zaawansowanych systemów bezpieczeństwa, takich jak ESP, które zrewolucjonizowały podejście do stabilizacji pojazdów w warunkach kryzysowych. Wykorzystanie matematycznych modeli dynamiki poprzecznej w połączeniu z technikami symulacyjnymi umożliwia projektowanie systemów, które automatycznie kompensują nagłe zmiany momentów sił i przyspieszeń poprzecznych (Parczewski i in., 2015, s. 250). Technologia ta szczególnie dobrze sprawdza się w przypadku pojazdów ciężarowych, które są bardziej podatne na przechyły ze względu na swoją budowę. Rozwój takich rozwiązań znacząco przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa czynnego, jednocześnie pozwalając na minimalizowanie ryzyka wypadków związanych z niestatecznością poprzeczną.

Podsumowując, stateczność poprzeczna odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa na drogach, a jej analiza, zarówno teoretyczna, jak i praktyczna, dostarcza cennych informacji do dalszego rozwoju inżynierii bezpieczeństwa.

WPŁYW CZYNNIKÓW ZEWNĘTRZNYCH NA STATECZNOŚĆ POPRZECZNĄ POJAZDÓW

Działanie bocznego wiatru stanowi istotny czynnik wpływający na stateczność poprzeczną pojazdów, zwłaszcza w przypadku nagłych podmuchów, które mogą destabilizować tor jazdy. Czynniki takie jak sztywność opony, chwilowa masa pojazdu czy położenie środka ciężkości determinują reakcję pojazdu na tego typu zjawiska. Badania (Skrúcaný, Gnap, 2014, s. 296) wykazały, że nagłe podmychy boczne wiatru skutkują powstaniem sił aerodynamicznych, które mogą prowadzić do odchylenia toru jazdy, szczególnie w pojazdach o dużej

powierzchni bocznej, takich jak ciężarówki lub autobusy. Szczególne ryzyko destabilizacji dotyczy pustych pojazdów z plandeką, w których brak ładunku przesuwu środek ciężkości ku górze, co znacznie zmniejsza ich odporność na siły boczne. Wskazano również na kluczową rolę sztywności opon, która determinuje zdolność przeciwdziałania bocznym odchyleniom. Twardsze opony zapewniają lepszą reakcję na boczne siły aerodynamiczne, co umożliwia kierowcom bardziej precyzyjną kontrolę nad pojazdem. Jednym z najistotniejszych wniosków ich pracy jest wpływ chwilowej masy pojazdu – większa masa, choć zwiększa bezwładność układu, jednocześnie obniża ryzyko przewrócenia pod działaniem wiatru. Szczególnie niebezpieczne są takie zjawiska na mostach, otwartych przestrzeniach lub podczas wyjazdu z tuneli, gdzie zmiany kierunku i intensywności wiatru bywają nagłe i zaskakujące dla kierowców.

Warunki atmosferyczne, takie jak deszcz, śnieg czy lód, mają niebagatelny wpływ na stateczność poprzeczną pojazdów, głównie poprzez zmniejszenie przyczepności opon do nawierzchni. Wyniki badań (Parczewski, Wnęk, 2010, s. 37) wykazały, że opady deszczu powodują powstawanie cienkiej warstwy wody na jezdni, która znacząco redukuje współczynnik tarcia, prowadząc do zjawisk takich jak *aquaplaning*. Jeszcze bardziej wymagające są warunki zimowe, gdzie śnieg i lód dodatkowo obniżają przyczepność, co stawia przed systemami stabilizacji – jak ESP – wyzwania w szybkim i skutecznym reagowaniu w celu zapobiegania utracie kontroli nad pojazdem. Szczególnie interesujące są obserwacje dotyczące przesunięcia środka ciężkości pojazdu, które może skutkować nierównomiernym rozkładem obciążeń na osiach. Zjawisko to jest bardziej wyraźne w pojazdach o nietypowej geometrii. W badaniach zauważono, że pojazdy mające szeroki rozstaw kół oraz nisko położony środek ciężkości znacząco lepiej radzą sobie z utrzymaniem stabilności w trudnych warunkach atmosferycznych. Modele symulacyjne potwierdzają te zależności, umożliwiając projektowanie bardziej zaawansowanych systemów bezpieczeństwa zapewniających ochronę na śliskich nawierzchniach.

Stan nawierzchni drogi odgrywa równie istotną rolę w dynamice pojazdu i stateczności poprzecznej. Nierówności nawierzchni, luźny żwir czy koleiny w znacznym stopniu wpływają na pracę zawieszenia oraz przyczepność opon. Dowiedziono (Parczewski, Wnęk, 2010, s. 37), że nierówności drogi powodują dodatkowe dynamiczne obciążenia, co może prowadzić

do poślizgów lub nawet chwilowej utraty kontaktu kół z nawierzchnią. Koleiny są szczególnie niebezpieczne, gdyż powodują niekontrolowane zmiany kierunku ruchu pojazdu i zwiększają ryzyko odchyień bocznych. Autorzy podkreślili również, że luźny żwir ogranicza stabilność pojazdu, zmuszając kierowców do większej precyzji w prowadzeniu. Ciekawym aspektem ich badań jest udowodniona skuteczność modeli testowych, które pozwalają na przewidywanie zachowań rzeczywistych pojazdów w niekorzystnych warunkach drogowych. Szczególnie istotne jest dostosowanie ciśnienia w oponach oraz regularna konserwacja układu zawieszenia, co może znacząco zmniejszyć wpływ nierówności drogi na dynamikę pojazdu.

Prędkość pojazdu okazuje się jednym z najbardziej krytycznych czynników wpływających na intensywność sił odśrodkowych i momentów sił działających na nadwozie, co zwiększa ryzyko destabilizacji. Przeprowadzono badania (Grzeżożek, Weigel-Milleret, 2023, s. 166) nad drganiami typu *wobble* i *weave*, które wykazały szczególne niebezpieczeństwo w kontekście stabilności pojazdów. Przy wyższych prędkościach siły odśrodkowe rosną wykładniczo, co stawia dodatkowe wymagania przed konstrukcją pojazdów. Drgania *wobble*, obserwowane głównie w pojazdach jednośladowych, mogą prowadzić do utraty kontroli przez kierowcę, natomiast drgania *weave* są charakterystyczne dla pojazdów czterokołowych i objawiają się bocznymi oscylacjami, które w skrajnych sytuacjach prowadzą do wywrócenia. Wyniki badań podkreślają skuteczność systemów takich jak ESP i ABS w przeciwdziałaniu tym zjawiskom, jednocześnie wskazując na potencjalne możliwości poprawy modeli symulacyjnych, które pomagają projektować skuteczniejsze rozwiązania redukujące ryzyko destabilizacji przy wyższych prędkościach.

Boczne siły aerodynamiczne również stanowią wyzwanie dla stabilności pojazdu, zwłaszcza w sytuacjach, gdy pojazd porusza się w sąsiedztwie innych obiektów, takich jak mijające ciężarówki lub przeszkody drogowe. Badania (Wang i in., 2021, s. 4003) wskazują, że precyzyjne predykcje ryzyka przewrócenia, dokonywane na podstawie wskaźnika transferu obciążenia bocznego (LTR), mogą znacząco poprawić kontrolę nad pojazdem. Siły aerodynamiczne powstające w takich sytuacjach, szczególnie w pojazdach o dużej powierzchni bocznej, mogą prowadzić do nieoczekiwanych odchyień toru jazdy. Innowacyjne metody, takie jak wykorzystanie adaptacyjnych

filtrów Kalmana, umożliwiają monitorowanie parametrów aerodynamicznych oraz szybkie przeciwdziałanie niestabilności. Badania podkreślają, że pojazdy o zoptymalizowanej aerodynamice oraz nisko położonym środkiem ciężkości wykazują większą odporność na destabilizujące siły aerodynamiczne, co ma szczególne znaczenie dla konstrukcji dużych pojazdów użytkowych.

Eksperymenty przeprowadzone przez różnych badaczy wykazały, że rozstaw osi, rozłożenie masy oraz wysokość środka ciężkości należą do kluczowych parametrów determinujących zdolność pojazdu do przeciwdziałania siłom destabilizującym. Zauważono (Dzida, 2010, s. 151), że pojazdy klasy premium, wyposażone w zaawansowane systemy kontroli stabilności, znacząco przewyższają standardowe konstrukcje w zakresie odporności na trudne warunki drogowe. W szczególności systemy Torque Vectoring, które automatycznie dostosowują momenty napędowe na kołach, okazują się skutecznym rozwiązaniem w poprawie zarówno dynamiki poprzecznej, jak i podłużnej. Analiza parametrów takich jak rozkład masy i geometria pojazdu potwierdza, że pojazdy o odpowiednio dopracowanych właściwościach konstrukcyjnych są lepiej przygotowane do radzenia sobie z ekstremalnymi warunkami drogowymi, co znacząco zwiększa ich stabilność i bezpieczeństwo. Reasumując, wpływ czynników zewnętrznych na stateczność poprzeczną pojazdu jest złożonym zagadnieniem, które wymaga uwzględnienia wielu aspektów, zarówno w badaniach teoretycznych, jak i w projektowaniu innowacyjnych systemów kontroli stabilności.

PODSUMOWANIE

W pracy skupiono się na dogłębnej analizie stateczności poprzecznej pojazdów, której zrozumienie ma kluczowe znaczenie dla poprawy bezpieczeństwa czynnego w ruchu drogowym. Celem było zidentyfikowanie czynników technicznych, konstrukcyjnych i środowiskowych wpływających na zdolność pojazdów do zachowania stabilności w warunkach dynamicznych, jak również ocena skuteczności zaawansowanych systemów kontroli stabilności w zwiększaniu bezpieczeństwa drogowego. Realizując te założenia, badania przeprowadzono na podstawie szerokiej analizy literatury, wyników symulacji

oraz danych eksperymentalnych, co pozwoliło stworzyć kompleksowy obraz mechanizmów determinujących stateczność poprzeczną pojazdów.

Wykazano, że stateczność poprzeczna odgrywa fundamentalną rolę w ograniczaniu ryzyka wypadków, szczególnie w sytuacjach dynamicznych, takich jak nagłe manewry, zmiany pasa ruchu czy zakręty pokonywane z dużą prędkością. Kluczowym wnioskiem była identyfikacja podstawowych parametrów technicznych, takich jak rozkład masy, geometria zawieszenia oraz wysokość środka ciężkości, które mają bezpośredni wpływ na charakterystykę stabilności pojazdów. Odpowiedni projekt konstrukcji, szczególnie w pojazdach o wyższej masie i środku ciężkości, takich jak SUV-y czy pojazdy ciężarowe, znacząco poprawia zdolność do przeciwdziałania przechyłom i utracie równowagi. Wyniki jednoznacznie potwierdziły, że szeroki rozstaw osi oraz nisko położony środek ciężkości są kluczowe dla minimalizowania ryzyka przechyłów, co zostało uzupełnione o analizę pozytywnego wpływu równomiernego rozmieszczenia masy w pojazdach. Dodatkowo stan techniczny, w tym ciśnienie i jakość opon, okazał się istotnym czynnikiem wpływającym na zdolność pojazdów do utrzymania przyczepności w trudnych warunkach drogowych.

Analiza czynników zewnętrznych wykazała, że warunki atmosferyczne, takie jak deszcz, śnieg, lód czy boczny wiatr, w znacznym stopniu determinują stabilność poprzeczną pojazdów. Badania uwypukliły znaczenie aerodynamicznej konstrukcji nadwozia, która pozwala zmniejszyć wpływ destabilizujących sił bocznych powstałych w wyniku bocznych podmuchów wiatru. Z kolei stan nawierzchni drogi, w tym nierówności, luźny żwir czy śliska powierzchnia, również został zidentyfikowany jako istotny determinant zdolności pojazdu do zachowania stabilności. W takich warunkach kluczową rolę odgrywają systemy kontroli stabilności, które pozwalają na szybkie reagowanie i minimalizowanie skutków destabilizacji.

Zaawansowane systemy kontroli stabilności, takie jak ESP i Torque Vectoring, zostały potwierdzone jako niezwykle skuteczne narzędzia w poprawie bezpieczeństwa. Wyniki badań pokazały, że system ESP, dzięki niezależnemu hamowaniu poszczególnych kół, redukuje momenty przechyłu i przeciwdziała nadsterowności oraz podsterowności, szczególnie w krytycznych sytuacjach drogowych. System Torque Vectoring, który dynamicznie zarządza momentem napędowym na kołach, znacząco poprawia zdolność pojazdu

do przeciwdziałania oscylacjom bocznym i przechyłom. Jednocześnie integracja technologii takich jak ABS czy kontrola trakcji pozwala na jeszcze większą precyzję w utrzymywaniu toru jazdy. Symulacje przeprowadzone w ramach pracy dostarczyły precyzyjnych danych potwierdzających skuteczność tych systemów w różnorodnych scenariuszach drogowych, choć podkreślono potrzebę dalszych badań nad ich adaptacją do bardziej zróżnicowanych warunków rzeczywistych.

Osiągnięte wyniki wpisują się w szerszy kontekst badań nad dynamiką pojazdów, potwierdzając wcześniejsze ustalenia dotyczące znaczenia parametrów konstrukcyjnych i geometrii. Jednocześnie praca rozszerza istniejącą literaturę o nowe spostrzeżenia, dotyczące interakcji między systemami stabilizacji a zachowaniami kierowców, co podkreśla ich kluczową rolę w utrzymaniu bezpieczeństwa. Wykazano potrzebę dalszego rozwoju tych technologii, uwzględniającego adaptacyjne rozwiązania dostosowujące parametry stabilizacyjne do zmiennych warunków środowiskowych i zachowań użytkowników pojazdów.

Ograniczenia pracy, w tym głównie opieranie się na symulacjach oraz brak pełnej analizy zachowań kierowców w sytuacjach kryzysowych, wskazują obszary do dalszych badań. Konieczne jest również uwzględnienie bardziej złożonych scenariuszy drogowych, takich jak nagłe zmiany nawierzchni czy warunki ekstremalne, które mogą wpłynąć na efektywność systemów stabilizacyjnych. Kolejnym krokiem powinno być przeprowadzenie badań terenowych w celu lepszego zrozumienia interakcji między parametrami technicznymi pojazdu a rzeczywistymi warunkami drogowymi.

Perspektywy przyszłych badań obejmują rozwój nowych technologii, takich jak systemy autonomiczne, które mogą dodatkowo zwiększyć bezpieczeństwo poprzez precyzyjne zarządzanie dynamiką pojazdu w czasie rzeczywistym. Istotne będzie również zbadanie możliwości integracji zaawansowanych algorytmów predykcyjnych z istniejącymi systemami stabilizacyjnymi, aby jeszcze bardziej zwiększyć ich skuteczność. Szczególną uwagę należy zwrócić na edukację kierowców, którzy muszą nauczyć się odpowiedniej interakcji z nowoczesnymi technologiami, aby maksymalnie wykorzystać ich potencjał w poprawie bezpieczeństwa.

Przewóz ładunków samochodami ciężarowymi powoduje zwiększenie ryzyka powstawania zdarzeń drogowych, a tym samym zmniejszenie

bezpieczeństwa w ruchu drogowym. Do głównych czynników powodujących wzrost ryzyka należą:

- zdominowanie przewozów towarowych poprzez transport drogowy;
- słabo rozwinięta sieć dróg dwujezdniowych;
- przewóz ładunków w ruchu tranzytowym poprzez centrum miast;
- zły stan techniczny dróg (koleiny);
- niedostosowanie prędkości jazdy do warunków drogowych;
- brawura;
- nietrzeźwi uczestnicy ruchu;
- nieprawidłowe położenie i mocowanie ładunków.

Problem ten dotyczy także, a może przede wszystkim, transportu materiałów ciekłych i sypkich za pomocą wszelkiego rodzaju cystern (zarówno autocystern, jak i naczep oraz przyczep). Związane to jest z ruchliwością przewożonego materiału podczas jazdy (ruchliwość ładunku rośnie wraz z obniżeniem gęstości przewożonego materiału), utrudniając prawidłowe prowadzenie pojazdu. Trudności te związane są głównie z jazdą po łuku drogi czy po wzniesieniu, ale dotyczą także procesu hamowania. Trudności te objawiają się poprzez utratę stateczności pojazdu, co może powodować jego zarzucenie, wywrócenie lub wywrócenie poprzedzone zarzuceniem. Aby zmniejszyć ryzyko występowania tych trudności, producenci starają się odpowiednio konstruować pojazdy poprzez zwiększanie rozstawu kół lub zmniejszanie położenia środka ciężkości pojazdu (stosowanie owalnych cystern zamiast prostokątnych). Jednak największy wpływ na uniknięcie wywrócenia pojazdu ma kierujący nim. Powinien być świadomy, że zwiększając prędkość jazdy na łuku drogi o małym promieniu może doprowadzić do jego wywrócenia. Również jazda po zbyt nachylonej jezdni może do tego doprowadzić. Istotnym czynnikiem wpływającym na stateczność pojazdu jest także stopień napełnienia cysterny, który wpływa na położenie środka ciężkości całego pojazdu.

WNIOSKI

Celem niniejszej pracy było przedstawienie i analiza wybranych zagadnień dotyczących transportu materiałów niebezpiecznych. W logistyce przewozu materiałów niebezpiecznych wykorzystywane są wszystkie środki transportu drogowego, kolejowego, lotniczego, morskiego i żeglugi śródlądowej. Najczęściej jednak stosowany jest transport lądowy, a głównie drogowy. Z analizy literatury wynika, że w przypadku większości towarów niebezpiecznych nie ma konieczności wykorzystywania specjalnych pojazdów o dodatkowych wymaganiach konstrukcyjnych. Nie ma także obowiązku przeprowadzania dodatkowych badań oraz posiadania specjalnych świadectw czy dopuszczeń technicznych.

Przewóz materiałów niebezpiecznych w małych opakowaniach na potrzeby własne jest całkowicie wyłączony spod przepisów ADR. Natomiast komercyjny transport drobnicowy w ilościach nieprzekraczających 1000 kg (lub litrów) nie wymaga żadnego dodatkowego oznakowania pojazdów i nie stosuje się wtedy większości przepisów ADR dotyczących przewozu. Jest to najczęściej stosowana forma transportu. Dla niektórych najbardziej niebezpiecznych materiałów dopuszczalna (do stosowania wyłączeń) masa materiału może być mniejsza lub ich przewóz z częściowym wyłączeniem spod przepisów ADR może być w ogóle niedopuszczalny. Transport dużych ilości towarów niebezpiecznych w przesyłkach powoduje obowiązek odpowiedniego oznakowania przodu i tyłu pojazdu pomarańczowymi tablicami ostrzegawczymi. Jest to informacja dla innych uczestników ruchu. O tym, jaki konkretnie materiał jest przewożony, można dowiedzieć się z nalepek na opakowaniach przesyłek znajdujących się na skrzyni ładunkowej oraz z dokumentacji przewozowej.

Pojazdy do przewozu takich materiałów poza oznakowaniem muszą dysponować także na czas przewozu specjalnym wyposażeniem. Chodzi tu przede wszystkim o dodatkowe gaśnice, których liczba i wielkość jest uzależniona od masy pojazdu oraz dodatkowe wyposażenie ogólnego stosowania, takie jak klin do podkładania pod koła, dwa znaki ostrzegawcze, kamizelka ostrzegawcza i latarki oraz wyposażenie specjalistyczne wyszczególnione w pisemnej instrukcji bezpieczeństwa dla kierowcy, czyli np. sprzęt do ochrony dróg oddechowych i środki ochrony indywidualnej.

Przepisy ustanawiają szczególne wymagania dla pojazdów przewożących towary wybuchowe klasy 1 (według klasyfikacji ADR) oraz dla wszelkiego rodzaju cystern (tj. stałych, odejmowalnych, przenośnych, MEGC etc.) przeznaczonych do przewozu materiałów ciekłych, gazów palnych itp. Muszą one spełniać rygorystyczne wymogi dotyczące konstrukcji, wyposażenia elektrycznego, układu hamulcowego oraz zabezpieczeń przeciwpożarowych, czego potwierdzeniem jest świadectwo dopuszczenia pojazdu do przewozu niektórych towarów niebezpiecznych. Pojazdy takie podlegają także corocznym badaniom technicznym w celu potwierdzenia zgodności z odpowiednimi przepisami ADR.

Ze względu na różnorodność możliwych zagrożeń występujących podczas transportu materiałów niebezpiecznych materiały te podlegają odpowiedniej klasyfikacji i oznaczeniu. Wykaz numeryczny zawiera potrzebne informacje o materiale niebezpiecznym, które nadawca, przewoźnik i odbiorca muszą uwzględnić w celu ich bezpiecznego transportu, m.in.: numer rozpoznawczy, numer zagrożenia, prawidłową nazwę przewozową, klasę materiału, kod klasyfikacyjny, grupy pakowania, nalepki, opakowanie, kod pojazdu. Przewóz materiałów niebezpiecznych jest skomplikowanym procesem wymagającym specjalistycznej wiedzy. Organizacja transportu zgodnie z obowiązującymi przepisami i normami w zakresie bezpieczeństwa gwarantuje nie tylko zminimalizowanie zagrożeń wynikających z przewozu materiałów niebezpiecznych, ale i pełną jego efektywność. Możliwość doboru rodzaju opakowania lub środka transportu w zależności od zagrożeń jest podstawowym warunkiem do bezpiecznego ich przewozu. Istnieją substancje szczególnie niebezpieczne, stwarzające zagrożenie większe od pozostałych. Należą do nich przede wszystkim towary promieniotwórcze, których transport podlega przepisom nadzorowanym przez Państwową Agencję Atomistyki, oraz materiały wybuchowe. Ich przewóz wymaga stosowania specjalnych pojazdów o odpowiedniej konstrukcji. Pojazdy takie muszą mieć świadectwo dopuszczenia do przewozu niektórych towarów niebezpiecznych oraz dodatkowe badania techniczne.

Od 2005 r. w transporcie towarów niebezpiecznych wyróżnia się specjalną grupę towarów tzw. dużego ryzyka – *są to towary, które mogą być użyte w celach terrorystycznych lub niezgodnie z ich przeznaczeniem, wykazujące się dużym ryzykiem zagrożenia dla ludzi, mienia lub środowiska. Można do nich zaliczyć materiały i przedmioty wybuchowe, trujące, palne lub zakaźne.*

Przy ich przewozie muszą być stosowane specjalne procedury. Przewoźnik jest zobowiązany do opracowania i wdrożenia planu ochrony towarów niebezpiecznych dużego ryzyka, zgodnego z przepisami ADR.

Regulacje prawne dotyczące przewozu materiałów niebezpiecznych bardzo szczegółowo określają wymagania, jakie powinny być spełnione dla zachowania bezpieczeństwa, a są to:

- warunki przewozu poszczególnych materiałów niebezpiecznych;
- warunki techniczne pojazdów samochodowych;
- warunki techniczne przyczep (naczep), cystern i kontenerów-cystern;
- warunki oznakowania pojazdów i dodatkowego ich wyposażenia;
- warunki załadunku i wyładunku poszczególnych materiałów;
- zakazy ładowania ładunku razem w jednym pojeździe;
- wymagania dotyczące osób uczestniczących w przewozie;
- niezbędna dokumentacja przy tych przewozach.

W wyniku analizy zebranej literatury oraz dostępnych innych materiałów (źródła internetowe) można wysunąć wniosek, że transport materiałów niebezpiecznych, aby mógł być bezpieczny, zależy od wielu uwarunkowań. Bardzo ważnym czynnikiem dla bezpiecznego transportu materiałów niebezpiecznych jest ustanowienie odpowiednich uwarunkowań prawnych w przepisach umowy ADR, które – aby nadążyć za postępującymi zmianami w technice i technologii – podlegają okresowej aktualizacji. Niniejsze opracowanie nie jest poradnikiem do stosowania w transporcie materiałów niebezpiecznych, sygnalizuje jedynie wybrane zagadnienia oraz wynikające z nich niektóre problemy szczegółowe.

Publikacja jest ważnym krokiem w rozwoju wiedzy na temat stateczności poprzecznej pojazdów, łącząc teoretyczne analizy z praktycznymi rozwiązaniami w zakresie systemów bezpieczeństwa. Podjęte badania nie tylko przyczyniły się do lepszego zrozumienia mechanizmów destabilizacji, ale również wskazały kierunki przyszłych działań na rzecz redukcji liczby wypadków drogowych. Ostatecznie efektywne połączenie technologii, projektowania pojazdów i edukacji kierowców stanowi klucz do dalszej poprawy bezpieczeństwa na drogach.

REFERENCES

- Bogacz, R., Seńko, J. (2018). Dynamika poprzeczna i stateczność układu modelującego oddziaływanie długiego pojazdu szynowego z torem. *Symulacja w Badaniach i Rozwoju*, 9(1–2), 5–15.
- Dzida, J. (2010). Możliwości i ograniczenia systemów oddziaływania siłami napędowymi na kierunek ruchu samochodu (Torque Vectoring). *Zeszyty Naukowe OBRSM BOSMAL*, 45(1), 151–164.
- Grzegożek, W., Weigel-Milleret, K. (2023). Analiza możliwości wykorzystania badań stanowiskowych do oceny stabilności pojazdu jednośladowego. *Archiwum Motoryzacji*, 67, 165–173.
- Horberry, T., Anderson, J., Regan, M.A., Triggs, T.J., Brown, J. (2006). Driver distraction: The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 38(1), 185–191.
- Janczur, R., Świder, P. (2004). Wpływ położenia środka masy na sterowność samochodu – wyniki badań. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Mechanika*, 79, 227–235.
- Parczewski, K., Wnęk, H. (2006). Wpływ niesprawności zawieszén na stateczność ruchu pojazdu – porównanie badań symulacyjnych i pomiarów. *Archiwum Motoryzacji*, 2, 81–91.
- Parczewski, K., Wnęk, H. (2010). Utilization of the car model to the analysis of the vehicle movement after the curvilinear track. *Maintenance and Reliability*, 4, 37–46.
- Parczewski, K., Wnęk, H., Dzida, J. (2015). Systemy ograniczające zagrożenie przewrócenia pojazdu ciężarowego. *Combustion Engines*, 54(3), 250–256.
- Raczyński, J. (2002). Polityka transportowa Unii Europejskiej – aktualny stan regulacji prawnych. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 9(11–12), 51–57.
- Skrúcaný, T., Gnap, J. (2014). The effect of the crosswinds on the stability of the moving vehicles. *Applied Mechanics and Materials*, 617, 296–301.
- Wang, C., Wang, Z., Zhang, L., Cao, D., Dorrell, D.G. (2021). A Vehicle Rollover Evaluation System Based on Enabling State and Parameter Estimation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4003–4013.
- Wicher, J. (2004). *Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego*. Warszawa: WKŁ.
- Wichowski, J. (2011). Przewrócić cysternę? To dla mnie fraszka. *Gazeta Transportowa*, 10(928), 5–6.
- Wojewódzka-Król, K., Załoga, E. (2019). *Transport. Nowe wyzwania*. Warszawa: PWN.