Ocena ryzyka i bezpieczeństwa systemów truck platooning w transporcie drogowym

Agata Dąbrowska

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: 88325@student.pb.edu.pl

Jan Andrychowski

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: 89959@student.pb.edu.pl

Natalia Zazulka

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: natalia.zazulka@pb.edu.pl

DOI: 10.65731/az-2026-0041

Streszczenie

W artykule opisano koncepcję truck platooningu, korzyści i bariery we wdrażaniu tego typu systemów, a także obowiązujące aspekty prawne i regulacyjne w zakresie funkcjonowania inteligentnych konwojów ciężarówek. Przedstawiono także wyniki badań, których celem była analiza ryzyka towarzyszącego stosowaniu systemów platooningu ciężarówek w transporcie oraz wskazanie działań korygujących i doskonalących. W ramach badania zidentyfikowano konkretne zagrożenia w poszczególnych etapach organizacji i realizacji transportu konwojowego, oceniono prawdopodobieństwo ich wystąpienia, potencjalne skutki i częstość ekspozycji na dane zagrożenie. Określenie trzech ostatnich elementów pozwoliło na dokonanie oceny ryzyka, w ramach której oszacowano wskaźniki i kategorie ryzyka. W efekcie przygotowano zestawienie środków ograniczających lub eliminujących wystąpienie poszczególnych zagrożeń. Na podstawie wyników przeprowadzonego badania można wnioskować, że decydujący wpływ na ogólny poziom bezpieczeństwa systemów truck platooning mają czynniki technologiczne, środowiskowe i ludzkie. Aby ograniczyć

ryzyko do akceptowalnego poziomu, niezbędne jest z kolei zastosowanie działań ograniczających, które uwzględniają głównie rozwiązania technologiczne i organizacyjne.

Słowa kluczowe

truck platooning, ocena ryzyka, bezpieczeństwo transportu drogowego

Wstęp

Transportem możemy nazwać taką działalność człowieka, której celem jest przemieszczanie się z punktu A do punktu B przy użyciu odpowiednio dobranego środka transportu oraz infrastruktury [Kacperczyk, 2009, s. 5]. Transport definiowany jest także jako proces produkcyjny, którego zadaniem jest transformacja przestrzeni przewozu w sposób, który odpowiada zidentyfikowanym potrzebom. Stanowi on również kontynuację produkcji w obszarze obrotu jako końcowy etap szeroko pojętego cyklu produkcyjnego [Mazurkiewicz, 2022, s. 31].

Trudno w dzisiejszych czasach wyobrazić sobie transport osób czy też produktów bez wykorzystania transportu drogowego - aut, autobusów czy ciężarówek [Głodek i Malinowski, 2019, s. 79]. To właśnie te ostatnie, czyli ciężkie pojazdy oraz usługi realizowane z ich wykorzystaniem, stanowią fundament funkcjonowania gospodarki.

Jednocześnie, pomimo istotnego wpływu na gospodarkę krajową, transport charakteryzuje się wysokimi kosztami eksploatacji i utrzymania infrastruktury. Innymi słabymi stronami transportu są również wysoka emisja spalin, generowany hałas, problem z kongestią i opóźnieniami w dojazdach, czy ryzyko wypadków [Nowacki i in., 2017, s. 116]. Należy także podkreślić, że rozwój transportu wiąże się z koniecznością rozbudowy sieci transportowych. Takie przedsięwzięcie jest nie tylko kosztowne, ale również niebezpieczne dla środowiska naturalnego. Tworzenie nowych autostrad i obwodnic prowadzi do przekształceń w otoczeniu oraz ingerencji w naturalne siedliska fauny i flory. W wyniku takich działań możliwa jest chociażby erozja gleby, zanieczyszczenie źródeł wody, a nawet całych ekosystemów. Dlatego, szczególnie w dzisiejszych czasach, kluczowy jest rozwój transportu drogowego z większą dbałością o środowisko i szanujący zasady zrównoważonego rozwoju [https://odnfest.pl/transport-ladowy-i-jego-oddzialywanie-na-ekosystem/, 16.01.2026].

W odpowiedzi na wyzwania związane z funkcjonowaniem transportu coraz większą uwagę zwraca się na rozwój autonomicznych technologii. Jednym z przykładów takiego wdrożenia jest wyposażanie pojazdów ciężarowych w systemy

wspomagające ich częściową autonomiczność, na przykład automatyczne hamowanie, monitoring martwego pola czy systemy wykrywające zmęczenie kierowcy [Modrzik i Niedośpiał, 2020, s. 151]. Dzięki wdrażaniu autonomicznych rozwiązań w transporcie możliwe jest zwiększenie bezpieczeństwa, redukcja kosztów, czy poprawa płynności oraz efektywności przewozu osób i towarów [Zazulka, 2025, s. 665-667].

1. Charakterystyka systemów typu truck platooning

Biorąc pod uwagę wady i zalety funkcjonowania tradycyjnego transportu drogowego, we współczesnej logistyce transportowej coraz częściej szuka się rozwiązań bardziej efektywnych i odpowiadających na aktualne potrzeby. Dynamiczny rozwój branży transportowej obserwowany w XXI wieku dyktuje potrzebę podążania za trendami związanymi głównie z najnowszymi technologiami i ochroną środowiska [Ejdys, 2024, s. 546-557].

Rozwiązaniem wpisującym się w te założenia są pojazdy autonomiczne, które funkcjonują w ramach różnych gałęzi transportu, w tym w transporcie pasażerskim, ale też transporcie ciężarowym wszelakich dóbr [Szwedun & Urban, 2018, s. 181].

W ramach autonomicznego transportu ciężarowego popularny stał się system konwojowania ciężarówek (ang. *truck platooning*). Termin „platooning" lub „platony" wywodzi się ze służby wojskowej i oznacza formację złożoną z 2 lub więcej ciężarówek, które poruszają się w zmniejszonej odległości między sobą, połączone za pomocą bezprzewodowej komunikacji (V2V) [Tiganasu i in., 2021, s. 82-92]. W ramach funkcjonowania tego systemu ruch pojazdów odbywa się poprzez automatyczne podążanie za jednym lub kilkoma konwencjonalnymi pojazdami w zmniejszonej odległości w formie konwoju. Kierowca pierwszego (prowadzącego) pojazdu kontroluje kierunek i prędkość pojazdów jadących za nim (pojazdów podążających) [Pająk i Cyplik, 2020, s. 312].

Pierwsze próby jazdy w kolumnie opierały się na systemach adaptacyjnego tempomatu (ACC). Pojazd prowadzący miał utrzymywać stałą prędkość, a pojazdy jadące za nim miały utrzymywać stałą odległość od pojazdu przed nimi. Bardzo szybko okazało się, że nie jest to skuteczny sposób na osiągnięcie oszczędności paliwa ze względu na zmienną rzeźbę terenu. Aby uniknąć nadmiernego przyspieszania podczas wjeżdżania pod górę oraz gwałtownego hamowania na zjazdach, obecnie stosuje się bardziej zaawansowane systemy, które umożliwiają pojazdom jadącym z tyłu zmienianie prędkości i jednoczesne utrzymywanie wymaganego odstępu.

Systemy te są rozwiązaniami opartymi na wymianie danych, które umożliwiają komunikację między pojazdami, a także między kolumną a centrum koordynacyjnym, które kieruje ruchami kolumny [Pająk i Cyplik, 2020, s. 312].

Truck platooning bazuje na technologii elektronicznego dyszla, który umożliwia stałą komunikację między pojazdami. W tym układzie ciężarówka prowadząca wyznacza trasę i prędkość, a pozostałe pojazdy precyzyjnie naśladują jej manewry. Wraz z rozwojem zautomatyzowanej jazdy możliwe staje się bezpieczne zmniejszenie odległości pomiędzy ciężarówkami, co dodatkowo wpływa na poprawę efektywności paliwowej. W konsekwencji prowadzi to również do przewidywanego ograniczenia emisji CO2 oraz obniżenia kosztów operacyjnych nawet o około 20% w porównaniu z tradycyjnymi metodami transportu [https://tslbiznes.pl/platooning/, 13.01.2026].

Zastosowanie nowoczesnych technologii, takich jak autonomiczne systemy jazdy, zaawansowane czujniki oraz skuteczna komunikacja radiowa między pojazdami, istotnie zwiększa poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego. Rozwiązania te pozwalają ograniczyć liczbę błędów, skrócić czas reakcji oraz zmniejszyć wpływ rozproszenia uwagi kierowców. Jednocześnie mogą one częściowo odpowiadać na problem niedoboru zawodowych kierowców ciężarówek [Botelho i in., 2025, s. 2].

Jednak warunkiem prawidłowego funkcjonowania platooningu i osiągnięcia wspomnianych korzyści jest integracja trzech kluczowych systemów:

- *System komunikacyjny* - oparty na radiu lub sieci 5G, umożliwiający nieprzerwany kontakt V2V (vehicle-to-vehicle);
- *System automatycznego sterowania* - wykorzystujący kamery, radary oraz skanery laserowe (LiDAR) do precyzyjnego śledzenia trasy;
- *System monitorowania poziomu autonomii* - określający stopień zaangażowania kierowcy w danym momencie jazdy [https://www.goodloading.com/pl/blog/nowe-technologie/platooning-czy-jest-przyszlosc-ia-transportu-drogowego/, 30.12.2025].

Autonomiczność w transporcie opisuje się w sześciostopniowej skali SAE (Stowarzyszenia Inżynierów Motoryzacji). Wyróżnia ona sześć poziomów automatyzacji jazdy - od poziomu 0 do poziomu 5. Klasyfikacja ta określa zakres przejmowania kontroli nad pojazdem przez systemy autonomiczne i przedstawia się następująco:

- *Poziom 0* - pełna kontrola nad pojazdem należy do kierowcy, który odpowiada za wszystkie czynności, takie jak sterowanie, hamowanie oraz obserwacja otoczenia.
- *Poziom 1* - pojazd wyposażony jest w pojedyncze systemy wspomagające jazdę, które mogą działać automatycznie (np. ABS, ESP), jednak kierowca nadal sprawuje zasadniczą kontrolę nad pojazdem.

- *Poziom 2* - systemy mogą jednocześnie wspierać kierowcę w prowadzeniu pojazdu, np. poprzez adaptacyjny tempomat i utrzymanie pasa ruchu, jednak wymagany jest stały nadzór ze strony kierującego.
- *Poziom 3* - pojazd jest w stanie przejąć kontrolę nad prowadzeniem w określonych warunkach, jednak kierowca musi być gotowy do interwencji i nadzorować działanie systemu.
- *Poziom 4* - system autonomiczny sprawuje pełną kontrolę nad pojazdem w wybranych warunkach drogowych (np. na autostradzie), bez konieczności ingerencji kierowcy, choć taka możliwość pozostaje.
- *Poziom 5* - pojazd jest całkowicie autonomiczny i nie wymaga udziału kierowcy w żadnych warunkach ruchu drogowego [Szwedun i Urban, 2018, s. 188].

Obowiązek obecności kierowcy w pojeździe sprawia, że system platooningu zaliczany jest do trzeciego poziomu automatyzacji według klasyfikacji SAE. Oznacza to, że mimo wsparcia autonomicznych technologii, kierowca musi pozostać w gotowości do przejęcia kontroli w sytuacjach wymagających interwencji [Brząkała, 2024, s. 40]

Kluczowymi elementami wspierającymi prawidłową nawigację autonomicznego pojazdy są kamery i radary wraz z technologią Lidar [Modrzik i Niedośpiał, 2020, s. 150]. Zestaw kamer zapewnia pełną widoczność w promieniu 360°, umożliwiając identyfikację znaków i sygnalizacji świetlnej, choć ich efektywność drastycznie spada przy złej pogodzie. Radary, wykorzystujące fale radiowe, odpowiadają za detekcję obiektów i pomiar dystansu, wspierając takie funkcje jak utrzymanie pasa ruchu czy automatyczne hamowanie. Obecnie wyzwaniem pozostają ograniczenia czujników 2D w zakresie rozpoznawania wysokości oraz niespełna stuprocentowa (95%) skuteczność algorytmów wykrywania pieszych [Modrzik i Niedośpiał, 2020, s. 150].

Dzięki zintegrowaniu systemów ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) z bezprzewodową komunikacją, pojazdy w konwoju błyskawicznie reagują na manewry lidera, takie jak zmiana pasa czy hamowanie awaryjne. W odróżnieniu od pojazdów w pełni autonomicznych, które polegają na zaawansowanej sztucznej inteligencji i systemach V2X, platooning skupia się na synchronizacji grupy pojazdów na przewidywalnych trasach długodystansowych [https://www.timocom.pl/blog/truck-platooning-co-trzeba-wiedziec-o-platooningu-791586, 13.01.2026].

Pierwszy eksperymentalny przejazd połączonych ciężarówek miał miejsce w 2016 roku. Wzięły w nim udział takie firmy jak: Man, Daimler, Scania, Volvo, Iveco oraz Daf. Pojazdy przejechały po drogach publicznych z kilku europejskich

państw (Szwecja, Dania, Niemcy, Belgia) do Holandii. Najdłuższa trasa, pokonana przez Scanię, liczyła ponad 2000 km. Celem tego eksperymentu było praktyczne spojrzenie na to rozwiązanie oraz wyciągnięcie odpowiednich wniosków i opracowanie listy zagrożeń. Przeprowadzone testy skupiały się głównie na bezpieczeństwie pojazdów, efektywności spalania oraz otoczeniu i środowisku. Testy prowadzone przez amerykańską firmę Peleton Technology pokazują, że dzięki zmniejszeniu odległości między autami poprawić można aerodynamikę kolumny pojazdów i zredukować spalanie paliwa o 4,5% w przypadku auta głównego i aż o 7-10% w przypadku pozostałych. Można więc śmiało mówić o znaczącej oszczędności i redukcji emisji dwutlenku węgla. Ciężarówki jadące bliżej siebie zajmują także mniej miejsca na drodze. Pozwala to zmniejszyć zakorkowanie dróg i poprawić płynność ruchu. [https://polska.raben-group.com/newsy/szczegoly/truck-platooning-kiedy-na-naszych-drogach-pojawia-sie-autonomiczne-ciezarowki, 14.01.2026].

Truck platooning z powodzeniem funkcjonuje już w ruchu ulicznym. Wprowadzenie na początku 2019 roku zintegrowanych konwojów przez singapurski port idealnie wpisuje się w strategię inteligentnego miasta. Autonomiczne ciężarówki dołączyły tam na drogach do autonomicznych taksówek (wprowadzonych w sierpniu 2016 roku) i autobusów (jeżdżących od października 2016 roku) [Sosnowski i Nowakowski, 2020, s.160-162].

2. Korzyści i bariery we wdrażaniu systemów typu truck platooning

Dzięki wsparciu wspomnianych technologii, truck platooning może pomóc ograniczyć problem pustych przebiegów ciężarówek. Zamiast konkurować o niewielką liczbę ładunków w drodze powrotnej, możliwe jest organizowanie przejazdów pustych pojazdów w kolumnach zaraz po dostawie. Takie rozwiązanie zmniejsza zmęczenie kierowców (częstsze powroty do domu), ułatwia planowanie (brak presji czasu dostawy) oraz zwiększa dostępność pojazdów ciężarowych, przez co w efekcie rośnie efektywność floty [Hirata i Fukaya, 2020, s. 375].

Do najważniejszych zalet tego rozwiązania należy przede wszystkim zwiększenie efektywności paliwowej wynikające z możliwości zmniejszenia odległości pomiędzy pojazdami, co ogranicza opór powietrza. W konsekwencji prowadzi to do redukcji zużycia paliwa, obniżenia emisji CO2 oraz zmniejszenia kosztów operacyjnych transportu. Badania wskazują także na możliwość redukcji emisji CO_2 dzięki konwojom. Mimo rozwoju pojazdów elektrycznych i wodorowych, konwoje mogą w najbliższych latach ograniczać emisje w transporcie opartym na paliwach kopalnych oraz wspierać efektywność nowych technologii [Rebelo i Bandeira, 2024, s. 591-607].

Rozwiązanie jest równie istotne w obliczu rosnącego niedoboru zawodowych kierowców. Dzięki platooningowi istnieje możliwość częściowego zastępstwa kierowcy poprzez automatyzacje wybranych procesów prowadzenia pojazdu. Ponad to, jeden kierowca mógłby w tej sytuacji zarządzać całym konwojem, a nie tylko jednym pojazdem, co znacząco wpływa na poprawę efektywności transportu [Alahmadi i Alzahrani, 2025, s. 2-4].

Dodatkowo, synchronizacja ruchu pojazdów oraz wykorzystanie zaawansowanych systemów komunikacji i czujników przyczyniają się do poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego poprzez ograniczenie błędów ludzkich i skrócenie czasu reakcji. Podczas gdy wypoczęty kierowca potrzebuje około 1,5 sekundy na reakcję, system V2V przesyła sygnał o hamowaniu w zaledwie 0,03 sekundy. Pozwala to na drastyczne skrócenie drogi hamowania całego konwoju [https://www.shell.pl/biznesowi/karta-paliwowa/blog/platooning-jak-to-dziala.html, 30.12.2025].

Truck platooning może również zwiększyć przepustowość dróg oraz ograniczyć zjawisko kongestii, co przekłada się na większą płynność ruchu i niezawodność systemu transportowego [Alahmadi i Alzahrani, 2025, s. 2-4].

Wdrażanie nowoczesnych systemów konwojowania ciężarówek stwarza dla branży logistycznej zupełnie nowe możliwości w zakresie rozwoju łańcuchów dostaw oraz zarządzania fizyczną infrastrukturą, które wykraczają poza tradycyjne wskaźniki efektywności. Zintegrowane floty mogą działać w trybie całodobowym, co pozwala na niezależność kluczowych procesów transportowych od fizycznych ograniczeń związanych z ludzkim zmęczeniem, znacznie skracając czas dostaw i umożliwiając sprawne działanie magazynów w systemie just-in-time [Janczewska, 2018, s. 213-214].

Dodatkowo zaawansowane algorytmy zarządzające dokładnie monitorują, aby pojazdy nie przekraczały swoich fizycznych limitów. Skutkuje to optymalnymi i płynnymi profilami przyspieszania oraz hamowania, co w dłuższej perspektywie pozwala to na zmniejszenie zużycia hamulców i opon, a także ogranicza negatywny wpływ ciężkiego transportu na asfalt. Dodatkowo, połączone w sieć ciężarówki, pełnić rolę mobilnych punktów danych w ekosystemie inteligentnych miast, nieodpłatnie monitorując otoczenie i dostarczając władzom drogowych dokładne informacje o stanie infrastruktury w czasie rzeczywistym [Pritom i Dey, 2025, s. 200-207].

Wprowadzenie technologii konwojów ciężarowych w nowoczesnej logistyce stwarza wyjątkową okazję do rozwiązania problemów takich jak nierównomierny popyt na przewozy ładunków w różnych lokalizacjach. W pewnych obszarach, takich jak Japonia, prawie 30% ciężarówek porusza się bez ładunku, co prowadzi do znacznych strat finansowych. Zastosowanie zautomatyzowanych konwojów umoż-

liwia efektywne przemieszczanie tych pustych pojazdów między oddalonymi węzłami logistycznymi. Na poziomie makroekonomicznym to zoptymalizowane podejście może zmniejszyć całkowity popyt na fizyczną flotę pojazdów o około 16%. Dodatkowo, ten model przynosi istotne korzyści społeczne i zawodowe, wprowadzając innowacyjną ideę tzw. quasi-odpoczynku. Zakłada ona, że kierowca w pojeździe podążającym (który jest całkowicie sterowany przez pojazd wiodący) nie musi aktywnie prowadzić samochodu, co umożliwia mu odzyskiwanie sił podczas jazdy [Hirata i Fukaya, 2020, s. 376-381].

Pomimo licznych korzyści, wdrożenie truck platooningu wiąże się również z szeregiem ograniczeń i wyzwań. Przede wszystkim wymaga ono zaawansowanej infrastruktury technologicznej oraz wysokich nakładów inwestycyjnych związanych z wyposażeniem pojazdów w odpowiednie systemy komunikacji i automatyzacji [Brząkała, 2024, s. 37-40].

Pełna i bezpieczna realizacja możliwości konwojowania wymaga pójścia dalej niż technologie zainstalowane w pojazdach oraz radykalnej przebudowy infrastuktury cyfrowej i drogowej w kierunku systemów połączonych (Vehicle-to-Infrastructure). Nowoczesne autonomiczne pojazdy zbierają z lidarów, kamer oraz czujników ogromne ilości danych, które mogą wynosić nawet 4 terabajty dziennie dla jednej ciężarówki. Przesyłanie tak olbrzymiej ilości danych do odległych serwerów w chmurze prowadziłoby do opóźnień, które uniemożliwiłyby bezpieczną jazdę. Dlatego konieczne jest wprowadzenie brzegowych jednostek drogowych (RSU) oraz nowoczesnej technologii Mobile Edge Computing, umożliwiającej szybką obróbkę danych bezpośrednio przy trasie. Ponad to, infrastruktura ta musi być wspierana przez tworzenie i nieustanne aktualizowanie trójwymiarowych map o wysokiej rozdzielczości (HD), które powinny charakteryzować się precyzją na poziomie centymetrów, co jest kluczowe dla mikronawigacji. Jednocześnie taka transformacja wymusza także zmiany w tradycyjnym budownictwie drogowym - pasy ruchu oraz znaki muszą być wykonane z inteligentnych materiałów, aby pozostały czytelne dla systemów wizyjnych pojazdów, nawet w trudnych warunkach pogodowych, jak deszczyk lub śnieżna zamieć [Pritom i Dey, 2025, s. 211, 220].

Niezwykle ważnym obszarem wyzwań są także ograniczenia dotyczące mechaniki pojazdów. W rozmowach o pojazdach autonomicznych zbyt często koncentrujemy się jedynie na oprogramowaniu i sztucznej inteligencji, zapominając o fizycznych ograniczeniach tradycyjnych układów jezdnych. Aby algorytmy platooningu mogły działać bezpiecznie i płynnie, potrzebne są rewolucyjnie zmiany w zakresie kontaktu opon z nawierzchnią oraz w mechanizmach kierowniczych. Przykładem takich wymagań jest powolne przechodzenie od konwencjonalnych kolumn kierowniczych do technologii steer-by-wire, gdzie brakuje jakiegokolwiek mechanicznego

połączenia między kierownicą a osią, a skręt jest realizowany jedynie za pomocą impulsów elektrycznych. Dodatkowo prowadzone są prace nad koncepcyjnymi oponami sferycznymi, które mogłyby umożliwić nieznaną dotąd manewrowość zintegrowanych ciężarówek [Gądek-Hawlena i Krawiec, 2019, s. 5-12].

Jako barierę technologiczną można wskazać także złożoność zarządzania stanem poszczególnych pojazdów (np. utrzymanie bezpiecznych odległości oraz precyzyjne synchronizowanie prędkości) w zmiennych warunkach na drodze. Klasyczne algorytmy sterujące, które bazują na zasadzie stałego odstępu czasowego, okazują się niewystarczające. W trakcie dynamicznych manewrów w ruchu drogowym – takich jak nagłe hamowanie czy przyspieszanie pojazdu wiodącego - algorytmy te prowadzą do znacznego spadku efektywności, a czasami nawet do całkowitego zagrożenia stabilności całego konwoju, co może skutkować wypadkami [Wang i in., 2024, s. 211-212].

Trudnością może być także funkcjonowanie platoonów w warunkach ruchu miejskiego lub przy niskim poziomie standaryzacji technologicznej pomiędzy różnymi producentami pojazdów. Badania wskazują, że platooning jest najbardziej efektywny na autostradach. Na drogach lokalnych, wąskich i krętych, jazda w kolumnie traci swoje walory bezpieczeństwa i efektywności, co wymusza zachowawcze podejście do jej wdrażania poza głównymi korytarzami transportowymi [https://www.shell.pl/biznesowi/karta-paliwowa/blog/platooning-jak-to-dziala.html, 30.12.2025].

Kolejną barierą jest konieczność zapewnienia niezawodności systemów oraz odporności na awarie i cyberzagrożenia, które mogą stanowić poważne ryzyko dla bezpieczeństwa. Istnieje bowiem wysokie ryzyko wystąpienia nie tylko błędów w oprogramowaniu, ale także inne zagrożenia cybernetyczne, w tym możliwość zhakowania systemu i zdalnego przejęcia kontroli nad pojazdem, co może zostać wykorzystane zarówno do celów przestępczych, jak i działań o charakterze terrorystycznym [Gądek-Hawlena i Krawiec, 2019, s. 9].

Poza technicznymi barierami, wątpliwości budzą także kwestie społeczne takie jak społeczna akceptacja tego typu rozwiązań. Analiza literatury sugeruje, że pomimo znacznego potencjału technologii, relacje pomiędzy ludźmi a systemem autonomicznych pojazdów nie zostały jeszcze całkowicie zgłębione. Zrozumienie aspektu ludzkiego jest kluczowe, ponieważ to właśnie on może być źródłem błędów oraz niebezpiecznych sytuacji. Istotnym obszarem ryzyka jest zaufanie i akceptacja ze strony użytkowników, które odgrywają dużą rolę w rozwoju jazdy autonomicznej. Podczas platooningu istnieje zagrożenie związane z nadmiernym zaufaniem, co może prowadzić do obniżenia czujności kierowcy i wydłużenia reakcji w nagłych wypadkach [Bednarska i in., 2025].

Innym ważnym aspektem jest odczuwany dyskomfort i lęk kierowców podróżujących w kolumnie, co jest efektem małych odległości między pojazdami. Ryzyko nie ogranicza się jedynie do wnętrza grupy - badania pokazują, że obecność konwojów na drogach wpływa na zachowanie innych uczestników ruchu, którzy mogą mieć trudności w orientacji lub podejmować niebezpieczne decyzje przy próbie przejazdu przez uformowaną kolumnę. [Atmaca i in., 2021, s. 33-38].

Problematyczne pozostają także kwestie regulacyjne i prawne. Dopóki twórcy prawa nie zaktualizują przepisów, aby uznać jazdę w trybie autonomicznym za czas odpoczynku kierowcy, a także nie zajmą się skomplikowanymi kwestiami odpowiedzialności cywilnej za ewentualne wypadki spowodowane błędami algorytmu w konwoju, opłacalność szerokiego wdrażania technologii truck platooningu pozostanie niepewna [Choromański i in., 2021, s. 63-65].

3. Aspekty prawne i regulacyjne truck platooningu

Dynamiczny postęp technologiczny sprawił, że pojazdy autonomiczne przestały być tylko marzeniem na przyszłość, stając się realnymi obiektami badań i testów w ruchu drogowym. Mimo to, nowe technologie, w tym truck platooning, wciąż stawiają przed nami nieznane dotąd wyzwania prawne, a aktualne regulacje okazują się być niewystarczające [Urbanik, 2019, s. 83; Widło, 2025, s. 3-4; Chłopecka, 2018, s. 29-33].

Podstawowym elementem analizy prawnej jest ustalenie stopnia autonomiczności pojazdu za pomocą klasyfikacji SAE. W polskim prawodawstwie, autonomiczny pojazd definiowany jest jako samochód wyposażony w systemy kontrolujące jego ruch, co umożliwia mu poruszanie się bez działania kierującego, który jednak zawsze ma możliwość przejęcia kontroli. Ta definicja dotyczy głównie pojazdów o poziomie autonomii 3. i 4., co sugeruje, że jej charakter może być tymczasowy w kontekście dążeń do pełnej automatyzacji [Urbanik, 2019, s. 86-87; Widło, 2025, s. 6-7; Chłopecka, 2018, s. 31].

W polskim prawie cywilnym, podstawę odpowiedzialności za szkody spowodowane ruchem pojazdów stanowi artykuł 436 § 1 k. c., który ustanawia zasadę ryzyka. Ta odpowiedzialność jest surowa i spada na osobę, która jest posiadaczem pojazdu, niezależnie od tego, czy aktualnie prowadził on pojazd. W przypadku pojazdów autonomicznych oznacza to, że posiadacz nie może zwolnić się z odpowiedzialności z powodu awarii systemu, błędu w oprogramowaniu czy utraty sygnału GPS, ponieważ takie techniczne usterki wchodzą w zakres ryzyka posiadacza. Sytuacja staje się bardziej złożona w przypadku kolizji dwóch pojazdów, gdy zasada ryzyka ustępuje miejsca zasadzie winy (art. 436 § 2 k. c. w powiązaniu z art. 415 k. c.). W przypadku

pojazdów całkowicie autonomicznych, brak możliwości interwencji kierowcy sprawia, że tradycyjne przypisanie winy staje się prawie niemożliwe, co prowadzi do postulatów dotyczących zmiany na odpowiedzialność obiektywną w takich sytuacjach [Urbanik, 2019, s. 89-91; Widło, 2025, s. 12-14].

Równolegle do odpowiedzialności posiadacza, odpowiedzialność producenta za towary niebezpieczne zyskuje na znaczeniu. Zgodnie z nowymi przepisami unijnymi, systemy sztucznej inteligencji w pojazdach traktowane są jako produkty wysokiego ryzyka. Producent może ponosić odpowiedzialność za wady konstrukcyjne, błędy w kodzie lub brak wymaganych aktualizacji oprogramowania. Taki podział odpowiedzialności - pomiędzy posiadaczem a producentem - wzmacnia pozycję osoby poszkodowanej, dając jej szersze możliwości dochodzenia roszczeń [Urbanik, 2019, s. 90-92; Widło, 2025, s. 10-14].

Aspekt prawny ściśle łączy się z dylematami etycznymi, reprezentowanymi przez tak zwany paradoks drezyny. Tworzenie algorytmów dla pojazdów autonomicznych wymaga od prawodawców oraz inżynierów podjęcia decyzji aksjologicznych: czy w sytuacji nieuniknionego wypadku pojazd powinien ochraniać pasażerów czy pieszych? Sugeruje się, aby algorytmy były zaprogramowane w taki sposób, by zawsze dążyć do minimalizacji liczby ofiar i traktować życie ludzkie jako wartość nadrzędną w stosunku do strat materialnych, bez względu na wiek, płeć czy rasę osób [Urbanik, 2019, s. 92; Chłopecka, 2018, s. 33-34].

Równocześnie istnieje potrzeba zmiany w systemach ubezpieczeń oraz funduszach gwarancyjnych. Wskazuje się na konieczność wprowadzenia obowiązkowego ubezpieczenia OC dla twórców i dostawców oprogramowania oraz ustanowienia specjalnego funduszu do wypłacania odszkodowań za szkody wyrządzone przez systemy sztucznej inteligencji. Tylko pełne uregulowanie tych spraw na arenie międzynarodowej umożliwi bezpieczne i sprawiedliwe wprowadzenie autonomicznych pojazdów do użycia powszechnego [Urbanik, 2019, s. 91-93; Widło, 2025, s. 15-17; Chłopecka, 2018, s. 41].

W dobie pojazdów autonomicznych bezpieczeństwo pasażerów zależy w równym stopniu od sprawnych hamulców, co od szczelności kodu źródłowego. Jak zauważają eksperci, w tym Aleksander Kostuch, kluczem do bezpiecznej przyszłości są trzy fundamenty projektowe, które muszą stać się standardem rynkowym. Pierwszym i najważniejszym z nich jest ścisła separacja systemów, oparta na mechanizmie tzw. sandboxingu. Chodzi o stworzenie cyfrowych murów między systemami krytycznymi dla jazdy a pokładową rozrywką (IVI). Doświadczenia z 2022 roku, gdy japoński programista złamał zabezpieczenia Hyundaia Ioniq przy użyciu publicznie dostępnych kluczy, pokazują, że systemy multimedialne są najsłabszym ogniwem. Bez izolacji, złośliwe oprogramowanie z zewnętrznego nośnika lub zainfekowanego

streamingu mogłoby teoretycznie przeniknąć do układów sterowania pojazdem. Równie istotna jest reforma procedur aktualizacji oprogramowania. Nowoczesne auta, wzorem smartfonów, aktualizują się zdalnie, co stwarza ryzyko przejęcia kontroli nad procesem przesyłu danych. Przykład Tesli, w której wykryto lukę związaną z uniwersalnymi kluczami OpenVPN, stanowi poważne ostrzeżenie. To dowodzi, że każdy pojazd musi posiadać unikalne, niepodrabialne zabezpieczenia, a producenci muszą być gotowi na błyskawiczne łatanie wykrytych podatności. Trzecim filarem jest aktywne monitorowanie i wykrywanie zagrożeń. Samochód nie może być jedynie pasywnym odbiorcą poleceń; musi posiadać inteligentne systemy potrafiące w czasie rzeczywistym zidentyfikować nietypową aktywność lub próby kompromitacji systemu. Taka "cyfrowa odporność" pozwala na reakcję jeszcze zanim atakujący wyrządzi realne szkody [https://www.motofaktor.pl/autonomiczne-auta-to-potencjalny-cel-przestepstw/, 29.04.2026].

Wszystkie te techniczne aspekty muszą zostać wsparte przez odpowiednie regulacje prawne i audyty. Choć funkcjonujący standard jakości IATF 16949 zawiera już pewne wymogi dotyczące cyberbezpieczeństwa, branża potrzebuje bardziej szczegółowych procedur testowych na każdym etapie - od projektu po eksploatację. Tylko poprzez traktowanie cyberbezpieczeństwa jako integralnej części jakości produkcji, będziemy w stanie bezpiecznie wkroczyć w erę transportu autonomicznego [https://www.virtual-it.pl/21-latest/13263-era-pojazdow-autonomicznych-a-bezpieczenstwo-cybernetyczne.html, 17.01.2026].

W związku z tym, mimo dużego potencjału, truck platooning wymaga dalszych badań, rozwoju technologicznego oraz dostosowania otoczenia prawno-organizacyjnego, aby mógł zostać w pełni wdrożony w praktyce transportowej [Widerski, 2017, s. 124-128].

4. Metodyka badań

Do przeprowadzenia badania wykorzystano metodę Risk Score. Jest to jakościowa metoda oceny ryzyka, która umożliwia identyfikację zagrożeń występujących w danym procesie. Polega ona na analizie prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia, ekspozycji na zagrożenie oraz potencjalnych konsekwencji wynikających z jego występowania [Chrzan i Chrzan, 2017, str. 49].

Celem przeprowadzenia badania jest ocena poziomu ryzyka związanego z wykorzystaniem systemów truck platooningu w procesie transportowym z wykorzystaniem metody Risk Score oraz wskazanie działań korygujących i doskonalących.

5. Wyniki badań

Pierwszym etapem przeprowadzonych badań była identyfikacja potencjalnych zagrożeń mogących wystąpić na poszczególnych etapach realizacji procesu autonomicznego truck platooningu (Tab. 1). Analizie poddano wszystkie kluczowe czynności - od przygotowania pojazdów i planowania konwoju, przez ich łączenie i jazdę w kolumnie, aż po funkcjonowanie systemu w ruchu drogowym oraz nadzór kierowcy i uwarunkowania rynkowe.

Dla każdej z wyróżnionych czynności określono możliwe źródła ryzyka, uwzględniając zarówno czynniki techniczne, organizacyjne, ludzkie, jak i środowiskowe.

W ramach identyfikacji zagrożeń uwzględniono m.in. problemy technologiczne, takie jak błędy oprogramowania, ograniczenia czujników czy awarie systemów lokalizacji (GPS), które mogą wpływać na poprawność działania systemów autonomicznych. Istotną grupę stanowią również zagrożenia związane z komunikacją między pojazdami (V2V), obejmujące zakłócenia transmisji danych oraz opóźnienia, mogące prowadzić do utraty stabilności konwoju.

Ponadto, zidentyfikowano ryzyka o charakterze cybernetycznym, takie jak możliwość przejęcia kontroli nad pojazdem w wyniku ataku hakerskiego, co stanowi jedno z kluczowych zagrożeń dla bezpieczeństwa całego systemu. Uwzględniono także czynniki zewnętrzne, w tym trudne warunki atmosferyczne oraz ograniczoną skuteczność systemu poza infrastrukturą autostradową. W analizie nie pominięto również aspektów organizacyjnych i społecznych, takich jak brak regulacji prawnych, problemy z odpowiedzialnością cywilną, wysokie koszty wdrożenia czy wpływ technologii na rynek pracy kierowców. Dodatkowo zwrócono uwagę na czynnik ludzki, w tym spadek koncentracji kierowców, utratę świadomości sytuacyjnej oraz dyskomfort psychiczny związany z nadzorowaniem systemów autonomicznych.

Ujęcie tych zagrożeń w podziale na konkretne etapy procesu pozwala na bardziej precyzyjne określenie punktów krytycznych oraz stanowi podstawę do dalszej oceny ryzyka, jego kwantyfikacji oraz opracowania skutecznych działań zapobiegawczych i minimalizujących potencjalne negatywne skutki wdrożenia technologii truck platooningu.

Tab. 1. Zagrożenia podczas realizacji procesu truck platooningu

Proces	Zagrożenia
Przygotowanie pojazdu do platooningu	- Błędy oprogramowania; - Ograniczenia czujników; - Awaria GPS lub zakłócenia sygnału.

Proces	Zagrożenia
Funkcjonowanie systemu w ruchu	- Cyberataki i przejęcie kontroli nad pojazdem; - Ograniczenie miejsc pracy kierowców.
Łączenie pojazdów w konwój	- Zakłócenia komunikacji V2V; - Opóźnienia w przesyłaniu danych.
Sterowanie autonomiczne pojazdu	- Dylematy etyczne algorytmów.
Nadzór kierowcy nad pojazdem	- Utrata świadomości sytuacyjnej; - Spadek koncentracji kierowców; - Dyskomfort i lęk kierowców; - Trudne warunki atmosferyczne.
Jazda w konwoju	- Ograniczona skuteczność poza autostradami; - Pogorszenie lokalnej jakości powietrza; - Frustracja innych uczestników ruchu; - Utrata stabilności konwoju.
Planowanie konwoju	- Wymóg rozbudowanej infrastruktury cyfrowej. - Brak interoperacyjności pojazdów; - Wysokie koszty wdrożenia; - Problemy z odpowiedzialnością cywilną; - Brak regulacji prawnych;

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Gądek-Hawlena i Krawiec, 2019, s. 9; Shell, 2025; Ge i in., 2023, s. 363; Wang i in., 2023, s. 211-212; Urbanik, 2019, s. 89-92; Widerski, 2017, s. 124-128; Sosnowski i Nowakowski, 2020, s. 160-162); Modrzik i Niedośpiał, 2020, s. 150; Atmaca i in., 2024, s. 33-38; Rebelo i in., 2024, s. 591-607; Widło, 2025, s. 12-14; Chłopecka, 2018, s. 33-34; Botelho i in., 2025, s. 2; Pritom i Dey, 2025, s. 211, 220].

W kolejnym etapie analizy ryzyka dokonano oceny prawdopodobieństwa wystąpienia zidentyfikowanych zagrożeń z wykorzystaniem metody Risk Score. Każdemu zagrożeniu przypisano opis słowny oraz wartość liczbową w skali od 0,1 (bardzo niskie) do 10 (bardzo wysokie), co przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożeń metodą Risk Score

Lp.	Zagrożenie	Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożeń	
		Opis	Wartość
1.	Błędy oprogramowania	Mało prawdopodobne, ale możliwe	3
2.	Brak interoperacyjności pojazdów	Całkiem możliwe	6
3.	Trudne warunki atmosferyczne	Całkiem możliwe	6
4.	Ograniczenia czujników	Całkiem możliwe	6
5.	Cyberataki i przejęcie kontroli nad pojazdem	Całkiem możliwe	6
6.	Zakłócenia komunikacji V2V	Całkiem możliwe	3

Lp.	Zagrożenie	Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożeń	
		Opis	Wartość
7.	Opóźnienia w przesyłaniu danych	Mało prawdopodobne, ale możliwe	3
8.	Utrata stabilności konwoju	Mało prawdopodobne, ale możliwe	3
9.	Awaria GPS lub zakłócenia sygnału	Całkiem możliwe	6
10.	Dylematy etyczne algorytmów	Tylko sporadycznie możliwe	1
11.	Brak regulacji prawnych	Całkiem możliwe	6
12.	Ograniczenie miejsc pracy kierowców	Całkiem możliwe	6
13.	Frustracja innych uczestników ruchu	Całkiem możliwe	6
14.	Utrata świadomości sytuacyjnej	Całkiem możliwe	6
15.	Wysokie koszty wdrożenia	Bardzo prawdopodobne	10
16.	Problemy z odpowiedzialnością cywilną	Całkiem możliwe	6
17	Spadek koncentracji kierowców	Całkiem możliwe	6
18	Dyskomfort i lęk kierowców	Całkiem możliwe	6
19	Ograniczona skuteczność poza autostradami	Bardzo prawdopodobne	10
20.	Pogorszenie lokalnej jakości powietrza	Tylko sporadycznie możliwe	1
21	Wymóg rozbudowanej infrastruktury cyfrowej	Bardzo prawdopodobne	10

Źródło: opracowanie własne.

Najwyższe wartości prawdopodobieństwa odnotowano w przypadku takich czynników jak wysokie koszty wdrożenia, ograniczona skuteczność systemu poza autostradami oraz konieczność zapewnienia rozbudowanej infrastruktury (wartość 10). Oznacza to, że są to elementy występujące bardzo często i w praktyce nieuniknione na etapie implementacji oraz eksploatacji systemów platooningu. Ich charakter wynika głównie z uwarunkowań technologicznych i organizacyjnych, które towarzyszą wdrażaniu nowoczesnych rozwiązań transportowych. Dodatkowo, wysoki poziom prawdopodobieństwa wskazuje, że czynniki te mogą istotnie wpływać na efektywność oraz tempo rozwoju tego typu systemów.

W dalszym etapie przeprowadzono ocenę skutków zidentyfikowanych zagrożeń (Tab. 3). Każdemu z nich przypisano wartość w skali od 3 (oznaczającej skutek średni) do 100 (oznaczającej poważną katastrofę), co pozwoliło na określenie potencjalnego wpływu poszczególnych zagrożeń na funkcjonowanie analizowanego systemu.

Tab. 3. Ocena skutków zagrożeń metodą Risk Score

Lp.	Zagrożenie	Skutki zagrożeń	
		Strata	**Wartość**
1.	Błędy oprogramowania	Katastrofa	40
2.	Brak interoperacyjności pojazdów	Duża	7
3.	Trudne warunki atmosferyczne	Katastrofa	40
4.	Ograniczenia czujników	Bardzo duża	15
5.	Cyberataki i przejęcie kontroli nad pojazdem	Poważna katastrofa	100
6.	Zakłócenia komunikacji V2V	Katastrofa	40
7.	Opóźnienia w przesyłaniu danych	Bardzo duża	15
8.	Utrata stabilności konwoju	Katastrofa	40
9.	Awaria GPS lub zakłócenia sygnału	Duża	7
10.	Dylematy etyczne algorytmów	Bardzo duża	15
11.	Brak regulacji prawnych	Średnia	3
12.	Ograniczenie miejsc pracy kierowców	Średnia	3
13.	Frustracja innych uczestników ruchu	Mała	1
14.	Utrata świadomości sytuacyjnej	Bardzo duża	15
15.	Wysokie koszty wdrożenia	Katastrofa	40
16.	Problemy z odpowiedzialnością cywilną	Bardzo duża	15
17.	Spadek koncentracji kierowców	Bardzo duża	15
18.	Dyskomfort i lęk kierowców	Mała	1
19.	Ograniczona skuteczność poza autostradami	Średnia	3
20.	Pogorszenie lokalnej jakości powietrza	Mała	1
21.	Wymóg rozbudowanej infrastruktury cyfrowej	Poważna katastrofa	100

Źródło: opracowanie własne.

Analiza wykazała, iż poważną katastrofę mogą stanowić takie zagrożenia jak konieczność zapewnienia rozbudowanej infrastruktury cyfrowej oraz cyberataki prowadzące do przejęcia kontroli nad pojazdem (wartość 100). Wysokie wartości skutków (40) przypisano również błędom oprogramowania, trudnym warunkom atmosferycznym, zakłóceniom komunikacji V2V, utracie stabilności konwoju oraz wysokim kosztom wdrożenia, które mogą znacząco zakłócić funkcjonowanie systemu.

Najniższe wartości skutków (1) przypisano natomiast zagrożeniom o charakterze społecznym i środowiskowym, takim jak dyskomfort i lęk kierowców, pogorszenie lokalnej jakości powietrza oraz frustracja innych uczestników ruchu. Choć czynniki te mogą wpływać na odbiór i akceptację technologii platooningu, ich

konsekwencje mają ograniczony zasięg i nie prowadzą do bezpośrednich, poważnych zakłóceń w funkcjonowaniu systemu.

W kolejnym kroku przeprowadzono ocenę ekspozycji na zidentyfikowane zagrożenia. Ekspozycja definiowana jest jako częstotliwość, z jaką dana sytuacja niebezpieczna może wystąpić w rzeczywistych warunkach funkcjonowania systemu. Zgodnie z metodą Risk Score, każdemu zagrożeniu przypisano odpowiedni poziom ekspozycji - od znikomej (0,5) do stałej (10), co przedstawiono w tabeli 4.

Tab. 4. Ocena ekspozycji na zagrożenie metodą Risk Score

Lp.	Zagrożenie	Eskpozycja na zagrożenie	
		Opis	Wartość
1.	Błędy oprogramowania	Sporadyczna	3
2.	Brak interoperacyjności pojazdów	Sporadyczna	3
3.	Trudne warunki atmosferyczne	Częsta	6
4.	Ograniczenia czujników	Częsta	6
5.	Cyberataki i przejęcie kontroli nad pojazdem	Minimalna	1
6.	Zakłócenia komunikacji V2V	Częsta	6
7.	Opóźnienia w przesyłaniu danych	Częsta	6
8.	Utrata stabilności konwoju	Sporadyczna	3
9.	Awaria GPS lub zakłócenia sygnału	Sporadyczna	3
10.	Dylematy etyczne algorytmów	Minimalna	1
11.	Brak regulacji prawnych	Sporadyczna	3
12.	Ograniczenie miejsc pracy kierowców	Sporadyczna	3
13.	Frustracja innych uczestników ruchu	Częsta	6
14.	Utrata świadomości sytuacyjnej	Częsta	6
15.	Wysokie koszty wdrożenia	Stała	10
16.	Problemy z odpowiedzialnością cywilną	Sporadyczna	3
17.	Spadek koncentracji kierowców	Częsta	6
18.	Dyskomfort i lęk kierowców	Częsta	6
19.	Ograniczona skuteczność poza autostradami	Stała	10
20.	Pogorszenie lokalnej jakości powietrza	Sporadyczna	3
21.	Wymóg rozbudowanej infrastruktury cyfrowej	Stała	10

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki analizy wskazują, że najwyższa ekspozycja dotyczy czynników o charakterze systemowym i infrastrukturalnym, takich jak wysokie koszty wdrożenia,

wymóg rozbudowanej infrastruktury cyfrowej oraz ograniczona skuteczność technologii poza autostradami, które uznano za zagrożenia stałe (wartość 10). Wynika to z faktu, że czynniki te towarzyszą funkcjonowaniu systemu truck platooningu na każdym etapie jego wdrażania i eksploatacji.

Wysoką ekspozycję odnotowano również w przypadku zagrożeń operacyjnych, takich jak trudne warunki atmosferyczne, ograniczenia czujników, zakłócenia komunikacji V2V, opóźnienia w przesyłaniu danych, a także czynniki ludzkie, takie jak spadek koncentracji kierowców, utrata świadomości sytuacyjnej czy dyskomfort psychiczny. Zostały one zaklasyfikowane jako zagrożenia częste (wartość 6), ponieważ mogą pojawiać się regularnie w codziennej eksploatacji systemu. Natomiast zagrożenia o charakterze technicznym i organizacyjnym, takie jak błędy oprogramowania, brak interoperacyjności pojazdów, awarie GPS, utrata stabilności konwoju czy problemy z odpowiedzialnością cywilną, uzyskały umiarkowany poziom ekspozycji (wartość 3), co oznacza ich sporadyczne występowanie. Najniższą ekspozycję przypisano zagrożeniom rzadkim, takim jak cyberataki, dylematy etyczne algorytmów czy pogorszenie lokalnej jakości powietrza, które oceniono jako minimalne (wartość 1). Ich występowanie ma charakter incydentalny i nie stanowi dominującego zagrożenia w analizowanym systemie.

W ostatnim etapie przeprowadzono ocenę ryzyka metodą Risk Score (Tab. 5). Wykorzystując daną metodę, uwzględnia ona trzy składowe: prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji niebezpiecznej, potencjalne skutki oraz częstość ekspozycji. Dla każdego zagrożenia obliczono wskaźnik ryzyka, czyli iloczyn trzech wartości. Następnie przypisano uzyskany wynik do jednej z czterech kategorii ryzyka: akceptowalne, tolerowane, wysokie, nieakceptowalne.

Tab. 5. Ocena ryzyka zagrożeń metodą Risk Score

Lp.	Zagrożenie	Ryzyko	
		Kategoria	Wskaźnik
1.	Błędy oprogramowania	Wysokie	360
2.	Brak interoperacyjności pojazdów	Tolerowane	126
3.	Trudne warunki atmosferyczne	Nieakceptowalne	1440
4.	Ograniczenia czujników	Nieakceptowalne	540
5.	Cyberataki i przejęcie kontroli nad pojazdem	Nieakceptowalne	600
6.	Zakłócenia komunikacji V2V	Nieakceptowalne	720
7.	Opóźnienia w przesyłaniu danych	Wysokie / Tolerowana	270
8.	Utrata stabilności konwoju	Wysokie	360
9.	Awaria GPS lub zakłócenia sygnału	Tolerowane	126
10.	Dylematy etyczne algorytmów	Akceptowalne	15

Lp.	Zagrożenie	Ryzyko	
		Kategoria	Wskaźnik
11.	Brak regulacji prawnych	Tolerowane	54
12.	Ograniczenie miejsc pracy kierowców	Tolerowane	54
13.	Frustracja innych uczestników ruchu	Akceptowalne	36
14.	Utrata świadomości sytuacyjnej	Nieakceptowalne	540
15.	Wysokie koszty wdrożenia	Nieakceptowalne	4000
16.	Problemy z odpowiedzialnością cywilną	Wysokie / Tolerowana	270
17.	Spadek koncentracji kierowców	Nieakceptowalne	540
18.	Dyskomfort i lęk kierowców	Akceptowalne	36
19.	Ograniczona skuteczność poza autostradami	Wysokie	300
20.	Pogorszenie lokalnej jakości powietrza	Akceptowalne	3
21.	Wymóg rozbudowanej infrastruktury cyfrowej	Nieakceptowalne	10000

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie przeprowadzonej oceny ryzyka metodą Risk Score stwierdzono, że najwyższe wartości wskaźnika ryzyka, a tym samym ryzyko nieakceptowalne, występują przede wszystkim w przypadku wysokich kosztów wdrożenia (4000) oraz wymogu rozbudowanej infrastruktury cyfrowej (10000). Istotne zagrożenia o charakterze nieakceptowalnym obejmują również trudne warunki atmosferyczne (1440), zakłócenia komunikacji V2V (720), cyberataki i przejęcie kontroli nad pojazdem (600), ograniczenia czujników (540), utratę świadomości sytuacyjnej (540) oraz spadek koncentracji kierowców (540). Wskazuje to, że czynniki technologiczne, środowiskowe oraz ludzkie mają kluczowy wpływ na poziom bezpieczeństwa systemów platooningu i wymagają wdrożenia działań ograniczających ryzyko.

Do grupy zagrożeń o wysokim poziomie ryzyka zaliczono m.in. błędy oprogramowania (360), utratę stabilności konwoju (360) oraz ograniczoną skuteczność systemu poza autostradami (300). Występują także zagrożenia sklasyfikowane jako wysokie/tolerowane, takie jak opóźnienia w przesyłaniu danych (270) czy problemy z odpowiedzialnością cywilną (270), które wymagają monitorowania oraz podejmowania działań prewencyjnych.

Pozostałe zagrożenia zakwalifikowano jako tolerowane lub akceptowalne. Do najważniejszych z nich należą brak interoperacyjności pojazdów (126), awarie GPS lub zakłócenia sygnału (126), brak regulacji prawnych (54) oraz ograniczenie miejsc pracy kierowców (54). Najniższe wartości wskaźnika ryzyka uzyskały zagrożenia o charakterze społecznym i środowiskowym, takie jak dylematy etyczne

algorytmów (15), frustracja innych uczestników ruchu (36), dyskomfort i lęk kierowców (36) oraz pogorszenie lokalnej jakości powietrza (3). Oznacza to, że przy obecnym poziomie zabezpieczeń mogą być one uznane za dopuszczalne, jednak powinny być systematycznie monitorowane i uwzględniane w działaniach doskonalących.

Na podstawie przeprowadzonej identyfikacji zagrożeń oraz oceny poziomu ryzyka, w ostatnim etapie zaproponowano środki ograniczające lub eliminujące wystąpienie poszczególnych zagrożeń związanych z funkcjonowaniem konwojów pojazdów (Tab. 6). Celem tych działań jest zminimalizowanie ryzyka do poziomu akceptowalnego oraz zwiększenie bezpieczeństwa i niezawodności realizacji procesu transportowego.

Tab. 6. Środki ograniczające lub eliminujące wystąpienie zagrożeń

Lp.	Zagrożenie	Środki ograniczające lub eliminujące wystąpienie zagrożeń
1.	Błędy oprogramowania	- Regularne testy i aktualizacje systemów; - Wdrożenie systemów wykrywania błędów i automatycznych poprawek.
2.	Brak interoperacyjności pojazdów	- Standaryzacja systemów komunikacji V2V; - Wspólne protokoły wymiany danych między producentami.
3.	Trudne warunki atmosferyczne	- Integracja danych pogodowych w czasie rzeczywistym; - Systemy wspomagania decyzji dla kierowców i pojazdów autonomicznych
4.	Ograniczenia czujników	- Zastosowanie redundancji sensorów; - Regularna kalibracja i rozwój technologii detekcji.
5.	Cyberataki i przejęcie kontroli nad pojazdem	- Zaawansowane systemy zabezpieczeń i szyfrowania; - Regularne audyty bezpieczeństwa IT.
6.	Zakłócenia komunikacji V2V	- Wdrożenie systemów zapasowej komunikacji; - Monitorowanie jakości sygnału i automatyczne przełączanie kanałów.
7.	Opóźnienia w przesyłaniu danych	- Optymalizacja sieci i infrastruktury komunikacyjnej; - Wykorzystanie technologii 5G.
8.	Utrata stabilności konwoju	- Systemy automatycznej kontroli odległości i prędkości; - Algorytmy stabilizacji konwoju.
9.	Awaria GPS lub zakłócenia sygnału	- Wykorzystanie alternatywnych systemów lokalizacji; - Integracja z mapami i systemami inercyjnymi.
10.	Dylematy etyczne algorytmów	- Tworzenie standardów etycznych dla AI; - Transparentność działania algorytmów.
11.	Brak regulacji prawnych	- Wprowadzenie jednolitych przepisów; - Testy i pilotażowe wdrożenia regulacyjne.
12.	Ograniczenie miejsc pracy kierowców	- Programy przekwalifikowania; - Tworzenie nowych ról w sektorze transportu.

Lp.	Zagrożenie	Środki ograniczające lub eliminujące wystąpienie zagrożeń
13.	Frustracja innych uczestników ruchu	- Kampanie informacyjne; - Oznakowanie konwojów.
14.	Utrata świadomości sytuacyjnej	- Systemy wspomagania kierowcy; - Szkolenia i monitoring uwagi.
15.	Wysokie koszty wdrożenia	- Dotacje i wsparcie państwa; - Stopniowe wdrażanie technologii.
16.	Problemy z odpowiedzialnością cywilną	- Jasne regulacje prawne; - Nowe modele ubezpieczeń.
17.	Spadek koncentracji kierowców	- Systemy monitorowania uwagi; - Regularne przerwy i szkolenia.
18.	Dyskomfort i lęk kierowców	- Szkolenia adaptacyjne; - Wsparcie psychologiczne i informacyjne.
19.	Ograniczona skuteczność poza autostradami	- Rozwój technologii dla ruchu miejskiego; - Testy w różnych warunkach drogowych.
20.	Pogorszenie lokalnej jakości powietrza	- Optymalizacja tras i jazdy; - Wykorzystanie pojazdów niskoemisyjnych.
21.	Wymóg rozbudowanej infrastruktury cyfrowej	- Inwestycje w infrastrukturę ITS i 5G; - Współpraca publiczno-prywatna.

Źródło: opracowanie własne.

W zależności od rodzaju zidentyfikowanych zagrożeń zaproponowane środki obejmują zarówno rozwiązania technologiczne, jak i organizacyjne. Do najważniejszych działań technologicznych zaliczono m.in. systemy wspomagania decyzji, zaawansowane algorytmy sterowania, redundancję czujników oraz rozwój i zabezpieczenie komunikacji V2V, które zwiększają niezawodność i bezpieczeństwo funkcjonowania konwoju pojazdów. Istotne znaczenie ma również integracja systemów z danymi zewnętrznymi, takimi jak warunki pogodowe czy systemy nawigacyjne.

W obszarze organizacyjnym wskazano konieczność prowadzenia szkoleń kierowców, opracowania i wdrażania procedur awaryjnych, a także standaryzacji stosowanych rozwiązań technologicznych. Ważnym elementem jest również rozwój odpowiednich regulacji prawnych, które zapewnią spójne zasady funkcjonowania systemów platooningu.

Szczególną uwagę zwrócono na potrzebę ciągłego doskonalenia oprogramowania, regularnego testowania systemów oraz bieżącego monitorowania jakości komunikacji między pojazdami. Działania te mają na celu nie tylko ograniczenie ryzyka wystąpienia awarii, ale również zwiększenie ogólnego poziomu bezpieczeństwa i efektywności całego systemu.

6. Dyskusja wyników

Wyniki analizy Risk Score potwierdzają podstawowe przeszkody we wdrażaniu systemów truck platooning, które zostały omówione w literaturze przedmiotu. Najwyższe ryzyko, które jest nieakceptowalne, przypisano potrzebie rozwiniętej infrastruktury cyfrowej oraz dużym kosztom implementacji. Zbieżne są z tym opinie badaczy, którzy podkreślają istotność tworzenia jednostek drogowych o brzegowym działaniu (RSU) oraz map HD, które są niezbędne do bezpiecznej mikronawigacji i obróbki dużych ilości danych. Metoda Risk Score zidentyfikowała jako nieakceptowalne ryzyko cyberataków, ograniczenia czujników oraz złe warunki pogodowe. Obawy te są zgodne z wynikami dostępnymi w literaturze, które wskazują na znaczący spadek efektywności kamer w niekorzystnych warunkach atmosferycznych oraz traktują podatność systemów komputerowych jako jedno z kluczowych zagrożeń w dobie transportu autonomicznego, co sugeruje konieczność izolacji systemów. Badania własne potwierdzają także obawy teoretyków dotyczące czynnika ludzkiego. Dzięki analizie ryzyka zweryfikowano, że spadek koncentracji oraz brak świadomości sytuacyjnej są ryzykami nieakceptowalnymi.

Zaskakujące jest, że dylematy etyczne oraz luki regulacyjne zostały ocenione w badaniu jako relatywnie niskie - jako ryzyko akceptowalne i tolerowane. Choć w literaturze poświęca się im sporo uwagi ze względu na niejasności z odpowiedzialnością cywilną, to w kontekście inżynieryjnym luki prawne nie stanowią bezpośredniego zagrożenia katastrofą drogową w takim samym stopniu jak awarie sprzętu.

Podsumowując, zidentyfikowane zagrożenia są zgodne ze spostrzeżeniami przedstawianymi w literaturze przedmiotu. W poszczególnych sytuacjach różnice dotyczą jedynie oceny poziomu ich istotności oraz stopnia ryzyka przypisywanego poszczególnym czynnikom. Istotne jest także to, że pomimo korzyści - na przykład ekologicznych i operacyjnych - wprowadzenie platooningu na rynek w dużej mierze zależy od rozwiązania problemów związanych z infrastrukturą i cyberbezpieczeństwem. Zminimalizowanie ryzyka do poziomu akceptowalnego oraz zwiększenie bezpieczeństwa i niezawodności realizacji procesu transportowego możliwe jest jednak przy zastosowaniu odpowiednich środków zaradczych zaproponowanych w badaniu - na przykład redundancji czujników, audytom bezpieczeństwa IT oraz systemom zapasowej komunikacji.

Podsumowanie

Systemy typu truck platooning oferują branży logistycznej szereg korzyści. Jest to chociażby znaczna redukcja zużycia paliwa, obniżenie emisji CO2, oszczędność miejsca na drodze oraz potencjalna optymalizacja czasu pracy kierowców. Jednakże, jak wykazano w szczegółowej analizie opartej na metodzie Risk Score, technologia ta wiąże się z istotnymi zagrożeniami, które stanowią poważną barierę dla jej powszechnego wdrożenia.

Kluczowe wyniki badania jednoznacznie wskazują, że największe, a zarazem nieakceptowalne ryzyko, dotyczy czynników systemowych i infrastrukturalnymi. Dotyczą one wymogów stworzenia rozbudowanej infrastruktury cyfrowej, co wiąże się z wysokim kosztom wdrożenia technologii. Pełna i bezpieczna realizacja konwojowania wymaga bowiem radykalnej przebudowy infrastruktury drogowej w kierunku systemów połączonych (Vehicle-to-Infrastructure), wspieranych przez brzegowe jednostki drogowe i technologię 5G, co umożliwiłoby mikronawigację i natychmiastową obróbkę olbrzymich zbiorów danych.

Ze względu na ogromne ryzyko cyberataków hakerskich, grożących nawet zdalnym przejęciem kontroli nad konwojem, priorytetem muszą być także inwestycje w zaawansowane systemy szyfrowania danych, tworzenie „cyfrowych murów" (sandboxingu) oraz regularne audyty bezpieczeństwa.

Badanie podkreśla także znaczenie czynników środowiskowych takich jak ryzyko związane z trudnymi warunkami atmosferycznym, które uznano za wysoce nieakceptowalne. Sugerowana jest tu integracja pojazdów z zaawansowanymi danymi pogodowymi dostarczanymi w czasie rzeczywistym.

Podczas nadzoru konwoju wysoce zawodna jest również koncentracja kierowców oraz utrata przez nich świadomości sytuacyjnej. Ze względu na częściowo zautomatyzowaną jazdę, wciąż istnieje potrzeba monitorowania uwagi kierowcy poprzez na przykład wdrożenie aktywnych systemów monitorujących.

Oprócz tego, zaleca się, aby rynkowe wdrożenie platooningu zostało poprzedzone standaryzacją systemów komunikacji, co rozwiązałoby problem braku interoperacyjności między pojazdami różnych producentów. Niezbędne jest także stworzenie jednolitych regulacji prawnych, obejmujących nowe modele ubezpieczeń oraz jasne zasady odpowiedzialności cywilnej za potencjalne błędy algorytmów na drodze. Tylko tak kompleksowe podejście pozwoli na skuteczną i bezpieczną eksploatację tych innowacyjnych systemów w transporcie drogowym.

ORCID iD

Natalia Zazulka: 0009-0004-0532-0879

Literatura

1. Alahmadi M. D., Alzahrani A. S. (2025), *Improving Freight Traffic Efficiency at Urban Intersections Using Heavy Vehicle Platooning*, Appl. Sci. 15, pp. 2-4.
2. Atmaca U. I., Maple C., Epiphaniou G., Sheik A. T. (2024), *Human Factors for Vehicle Platooning: A Review*, IET Conference Proceedings 2021 (4), pp. 33-38.
3. AutoMarket (2023), *Czy samochody autonomiczne zdominują przyszłość motoryzacji?* https://automarket.pl/blog/wyposazenie-i-budowa-samochodu/czy-samochody-autonomiczne-zdominuja-przyszlosc-motoryzacji [31.12.2025].
4. Bednarska J., Rukszan S., Jarocka M. (2025), *Perspektywy rozwoju autonomicznych pojazdów ciężarowych*, Akademia Zarządzania 9 (2).
5. Botelho T. C., Duarte S. P., Ferreira M. C. (2025), *Testowanie symulacyjne i drogowe konwoju ciężarówek: przegląd systematyczny*, European Transport Research Review 17 (4).
6. Brząkała M. (2024), *Zrównoważony rozwój - trendy, wyzwania, kontrowersje*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław.
7. Chłopiecka A. (2018), *Problematyka odpowiedzialności za ruch autonomicznych samochodów w kontekście ochrony praw człowieka*, Człowiek w cyberprzestrzeni, s. 29-43.
8. Choromański W., Grabarek I., Kozłowski M., Czerepicki A., Marczuk K. A. (2021), *Pojazdy autonomiczne. Wstęp,* Napędy i Sterowanie, 23 (1), s. 63-65.
9. Chrzan T., Chrzan B. R. (2017), *Metoda Risc - Score w ocenie ryzyka zawodowego operatora przenośnika taśmowego w Kopalniach Odkrywkowych węgla brunatnego*, Górnictwo Odkrywkowe 5, s. 49-54.
10. Ejdys J. (2024), *Smart and Sustainable Mobility Technologies: Technology Acceptance Models Constructs Review*. In: Arai K. (eds.), Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2024, Volume 1. FTC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1154. Springer, Cham.
11. Gądek-Hawlena T., Krawiec K. (2019), *Perspektywy rozwoju autonomicznego transportu drogowego towarów*, Ekonomika i Organizacja Logistyki 4 (1), s. 5-12.
12. Ge X., Han Q-L., Zhang X-M., Ding D. (2023), *Communication Resource-Efficient Vehicle Platooning Control With Various Spacing Policies*, Journal of Automatica Sinica 11 (2).

13. Głodek M., Malinowski J. (2019), *Zarządzanie współczesnymi łańcuchami dostaw. Wybrane aspekty jakościowe i organizacyjne*, Instytut Naukowo-Wydawniczy „Spatium", Rzeszów.
14. GoodLoadin (2023), *Platooning - czy jest przyszłością transportu drogowego?* https://www.goodloading.com/pl/blog/nowe-technologie/platooning-czy-jest-przyszloscia-transportu-drogowego/ [30.12.2025].
15. Hirata T., Fukaya T. (2020), *Potential of truck platooning for transporting empty trucks considering intercity freight demand imbalances*, LogForum 16 (3), pp. 373-383.
16. Janczewska D. (2018), *Sprawozdanie z XIX Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Nowe problemy e-gospodarki i e-społeczeństwa"*, Zarządzanie Innowacyjne w Gospodarce i Biznesie 1/26, s. 213-214.
17. Kacperczyk R. (2009), *Transport i spedycja. Część 1. Transport*, Difin, Warszawa.
18. Mazurkiewicz G. (2022), *Transport i spedycja w handlu międzynarodowym*, Wydawnictwo Społecznej Akademii Nauk, Łódź.
19. Modrzik O., Niedośpiał S. (2020), *Analiza transportu drogowego pod względem autonomiczności*, Journal of Translogistics 6 (16), s. 147-159.
20. Motofaktor (2023), *Autonomiczne auta to potencjalny cel przestępstw*, https://www.motofaktor.pl/autonomiczne-auta-to-potencjalny-cel-przestepstw/ [29.04.2026].
21. Nowacki G., Olejnik K., Walendzik M. (2017), *Ocena stanu bezpieczeństwa transportu drogowego w UE*, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 18, s. 161.
22. Odnfest (2025), *Transport lądowy i jego oddziaływanie na ekosystem*, *https://odnfest.pl/transport-ladowy-i-jego-oddzialywanie-na-ekosystem/* [16.01.2026].
23. Pająk M., Cyplik P. (2020), *Truck platooning in the context of sustainable development's targets defined in European Union's strategies*, LogForum 16 (2), pp. 311-321.
24. Pritom N. D., Dey N. L. (2025), *Urban transformation through connected and automated vehicles: infrastructure, transportation, and societal impacts*, Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska, s. 200-220.
25. Raben (2017), *Truck platooning – kiedy na naszych drogach pojawią się autonomiczne ciężarówki?* https://polska.raben-group.com/newsy/szczegoly/truck-platooning-kiedy-na-naszych-drogach-pojawia-sie-autonomiczne-ciezarowki [14.01.2026].
26. Rebelo M., Rafael S., Bandeira J. M. (2024), *Vehicle Platooning: A Detailed Literature Review on Environmental Impacts and Future Research Directions*, Future Transp. 4, s. 591-607.
27. Scherr Y. O., Hewitt M., Mattfeld D. C. (2022), *Stochastic service network design for a platooning service provider* Transportation Research 144(C).
28. Shell (2018), *Platooning - jak to działa?* https://www.shell.pl/biznesowi/karta-paliwowa/blog/platooning-jak-to-dziala.html [30.12.2025].

29. Sosnowski J., Nowakowski Ł. (2020), *Innowacje kreujące nowe wartości w transporcie samochodowym*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
30. Szwedun N., Urban K. (2018), *Założenia i obecne etapy wdrażania rozwiązań autonomicznych w logistyce - przykłady oraz zalety i wady wprowadzania innowacji*, Journal of TransLogistics, 4 (1), s. 181
31. Tiganasu A., Lazar C., Caruntu C. F., Dosoftei C. (2021), *Comparative analysis of advanced cooperative adaptive cruise control algorithms for vehicular cyber physical systems*, Journal of Control Engineering and Applied Informatics 23 (1), pp. 82-92
32. TimoCom (2025), *Truck platooning - co trzeba wiedzieć o platooningu?* https://www.timocom.pl/blog/truck-platooning-co-trzeba-wiedziec-o-platooningu-791586 [13.01.2026].
33. TSLBiznes (2018), *Platooning*, https://tslbiznes.pl/platooning/ [13.01.2026].
34. Urbanik G. (2019), *Odpowiedzialność za szkody wyrządzone przez pojazd autonomiczny w kontekście art. 446 kc*, Studia Prawnicze: rozprawy i materiały 25 (2), s. 83-95.
35. Virtual IT (2023), *Era pojazdów autonomicznych a bezpieczeństwo cybernetyczne*, https://www.virtual-it.pl/21-latest/13263-era-pojazdow-autonomicznych-a-bezpieczenstwo-cybernetyczne.html [17.01.2026].
36. Wang P., Gao M., Li J., Zhang A. (2024), *Dynamic adjustment neural network-based cooperative control for vehicle platoons with state constraints*, Internal Journal of Applied Mathematics and Computer Science, pp. 211-212.
37. Widerski T. (2017), *Czy samochód „autonomiczny" to samochód „bezpieczny"?*, Politechnika Łódzka.
38. Widło J. (2025), *Odpowiedzialność za szkodę wyrządzoną przez pojazdy autonomiczne w świetle zmian prawa UE*, Forum Prawnicze, 86 (2).
39. Zazulka N. (2025), From vision to reality: what shapes the future of autonomous public transport in Białystok, Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization & Management/Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie (222), s. 665-667.

Risk and Safety Assessment of Truck Platooning Systems in Road Transport

Abstract

The article describes the concept of truck platooning, the benefits and barriers to implementing this type of system, as well as the legal and regulatory aspects governing the operation of intelligent truck convoys. It also presents the results of research whose aim was to analyse the risk assessment of truck platooning systems in transport and to identify corrective and improvement actions. The study identified specific risks at various steps in the organisation and operation of convoy transport, assessed the probability of their occurrence, potential consequences and frequency of exposure to a risk. Defining these three last elements, it was possible to conduct a risk assessment, estimating risk indicators and categories. As a result, a list of measures to reduce or eliminate the risks was prepared. Based on the results, it can be concluded that technological, environmental and human factors have a decisive influence on the overall safety level of truck platooning systems. To reduce the risk to an acceptable level, it is necessary to implement mitigation measures that focus mainly on technological and organisational solutions.

Key words

truck platooning, risk score, road transport safety