

ZATWIERDZAM

.....
Kierownik Projektu

SPRAWOZDANIE Z REALIZACJI ZADANIA NR 1

**pt.: Prowadzenie działalności centrum
wiedzy o dostępności
za okres od V.2023. do VIII.2023.**

Tytuł opracowania:

**Budowa i działanie systemów ostrzegania kierującego
pojazdem przed uderzeniem przodem pojazdu
w przeszkodę (Forward Collision Warning FCW)**

Autor opracowania: dr inż. Adam Wilczek

CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)

Spis treści:

1. Wprowadzenie.....	str. 1
2. Wybrane czynne systemy bezpieczeństwa drogowego pojazdów i ich oceny..	str. 3
3. Wskaźniki marginesu bezpieczeństwa w systemach ochrony przed kolizją z przodu.....	str. 8
4. Wybrane algorytmy ostrzegania o kolizji w systemach FCW.....	str. 10
5. Podsumowanie.....	str. 20
Literatura.....	str. 21

1. Wprowadzenie

Wzrost liczby pojazdów, niedostateczne wyposażenie ich w skuteczne systemy bezpieczeństwa słaba infrastruktura drogowa, oraz ograniczenia użytkowników w percepcji zagrożeń to elementy przyczyniające się do ciągle dużej liczby kolizji i wypadków. Według oszacowań WHO (World Health Organization) z 2015 roku obrażenia i ofiary śmiertelne w wyniku wypadków drogowych kosztują kraje w przybliżeniu 3% ich produktu narodowego brutto. W krajach o niskich i średnich dochodach, na które przypada około 93% śmiertelnych ofiar wypadku, koszt ten sięga nawet 5% [1]. Pomimo wzrostu liczby pojazdów silnikowych liczba ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych na świecie w latach 2000 - 2016, przypadająca na 100 tys. pojazdów zmalała o ponad 47% [2] (WHO 2018). Większe zmniejszenie liczby wypadków odnotowują regiony i kraje o wyższych dochodach. Ilość poważnych uszkodzeń ciała będących skutkiem wypadków drogowych nie zmniejsza się jednak w podobnym tempie, a nawet niektórych okresach i regionach obserwuje się ich wzrost. W Unii Europejskiej (EU), w latach 2010 - 2013 liczba ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych zmalała o około 18% (6%/rok) podczas, gdy w tym samym czasie liczba wypadków z udziałem ciężko rannych zmalała o około 3% (1%/rok) [3]. Szacuje się, że na każdą ofiarę śmiertelną na drodze przypada około cztery ofiary z obrażeniami ciała, często powodującymi trwałą niepełnosprawność. W Wielkiej Brytanii, w latach 2007-2017, liczba ofiar śmiertelnych wypadków spadła o 39%, a całkowita liczba ofiar zmniejszyła się o 31% [4]. Pomiedzy rokiem 2010 - 2021 Ilość wypadków śmiertelnych w UE zmalała o około 11% podczas gdy do 2019 roku ilość wypadków drogowych z poszkodowanymi w postaci obrażeń ciała pozostała na prawie na niezmiennym poziomie. Tylko pomiędzy rokiem 2019 -2021 nieznacznie spadła [5].

Działania związane z bezpieczeństwem w ruchu drogowym wymagają znajomości nie tylko rzetelnych danych statystycznych dotyczących rejestru wypadków i ich kwalifikacji, ale także okoliczności i czynników, które je powodują. Badania analizujące przyczyny wypadków drogowych wymieniają trzy główne czynniki: zachowanie ludzi, środowisko drogowe oraz pojazd i jego stan. Wyniki tych badań pokazują, że człowiek odpowiada za 41% wypadków, czynnik środowiskowy za w 26%, a czynnik pojazdu ma udział w 33% [6]. Analiza przeprowadzona przez National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) pokazuje, że

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

przyczyna krytyczna w łańcuchu przyczynowo-skutkowym, została przypisana kierowcom w około 94% wypadków [7]. Błędy rozpoznania stanowiły około 41%, błędy decyzyjne około 33%, a błędy wykonania około 11%. Po 2% przypisano awarii w pojeździe i niekorzystnym warunkom środowiskowym (śliskie drogi, pogoda, itp). Podobne dane przedstawiono w [8].

Rozróżnienie charakteru, przyczyny i skutku ma istotny wpływ na zapobieganie wypadkom. Największy problem w łańcuchu przyczynowo-skutkowym wypadku związanym z błędami kierowcy stanowi nierozpoznanie przez kierowcę zagrożenia spowodowane takimi czynnikami jak: brak doświadczenia, starzenie się, zmęczenie, rozproszenie uwagi oraz używanie alkoholu i narkotyków [9, 10]. W pracy [11], na podstawie danych z symulatora jazdy i ankiet, oszacowano wpływ kilku czynników ryzyka, takich jak rozproszenie uwagi, charakterystyka kierowcy oraz środowisko drogowe na błędy kierowcy. Choć rozproszenie uwagi może wpływać na jego percepcję, świadomość sytuacyjną, podejmowanie decyzji i kontrolę nad pojazdem to według wyników tej pracy środowisko jazdy i cechy (charakterystyka) kierowcy mają znacznie większy wpływ na błędy w prowadzeniu pojazdu. Wskazano również, że najbardziej zauważalny wpływ na błędy w prowadzeniu pojazdów ma płeć, wiek, doświadczenie oraz wykształcenie. Na terenach wiejskich kierowcy częściej angażują się w ryzykowne sytuacje na drodze. Kobiety jako kierowcy i starsi kierowcy są bardziej skłonni do popełniania błędów podczas jazdy. Prawdopodobieństwo błędów popełnianych przez młodszych kierowców jest mniejsze nawet jak są rozproszeni. Mniej błędów popełniają również doświadczeni i wykształceni kierowcy. Ogólnie, bardziej skłonne do popełniania błędów są kobiety w starszym wieku, o niskim poziomie wykształcenia i małym doświadczeniu w prowadzeniu pojazdu na terenach wiejskich, które są miejscem o skłonności do bardziej ryzykownych zachowań.

W pracy [12], badano czynniki związane z ciężkością wypadków drogowych bez ofiar śmiertelnych. Badania wykonano w oparciu o dane dotyczące wypadków zebrane od policji drogowej w mieście o dużym ruchu ulicznym, Palermo we Włoszech. W badaniu uwzględniono charakterystykę wypadku (typ pojazdu oraz przyczyny wypadku), rodzaj pojazdów, wiek i płeć kierowców, charakterystykę drogi oraz warunki drogowe i pogodowe. Wymuszanie pierwszeństwa przejazdu i nadmierna prędkość były najczęstszymi przyczynami wypadków. Nadmierna prędkość istotnie zwiększała ciężkość wypadku. Kierowcy w wieku 25-34 i 34-44 byli mniej narażeni na udział w wypadku z lekkimi lub poważnymi obrażeniami w porównaniu z kierowcami w wieku 25 lat lub młodszymi. Nie stwierdzono jednak istotnych różnic w ciężkości wypadków w zależności od płci i grupy wiekowej kierowców. Ciężkość wypadku była istotnie większa na drodze o ruchu dwukierunkowym. Przy mniejszym natężeniu ruchu drogowego prawdopodobieństwo zwiększonej ciężkości wypadku było większe niż przy dużym natężeniu. Wypadek latem był bardziej prawdopodobny i miał większe prawdopodobieństwo spowodowania lekkich lub poważniejszych obrażeń niż wypadek zimą. Przy okazji przeglądu literatury zwrócono uwagę na niejednolite sposoby rejestracji wypadków niekończących się śmiercią uczestników, brak reprezentatywności niektórych z nich i niespójności w definicjach czynników i stopniach ciężkości tych wypadków. Elementy te utrudniają dostarczanie informacji zwrotnych do rekonstrukcji wypadków drogowych na potrzeby rozwoju i doskonalenie systemów bezpieczeństwa [13]. Jest to szczególnie ważne w dobie pojazdów wyposażanych w różne technologie unikania

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

kolizji, a w szczególności w przypadku technologii autonomicznych i pojazdów wyposażonych w system rekonstrukcji kolizji drogowej [14,15,16].

Mimo postępów w zakresie redukcji ofiar, rannych i szkód społecznych będących wynikiem wypadków i kolizji drogowych, zarówno na świecie jak i w samej Unii Europejskiej (EU), to są one jeszcze dalekie od zakładanych celów. UE wyznaczyła ambitny cel jakim jest zmniejszenie liczby wypadków śmiertelnych i z poważnymi obrażeniami o 50% pomiędzy latami 2020 a 2030 i „wizję zero” – zero takich ofiar wypadków na europejskich drogach do 2050 roku [17]. Jednym z elementów realizacji tego celu jest rozwijanie nowych, doskonalenie i upowszechnienie istniejących technicznych systemów bezpieczeństwa związanych z pojazdami i infrastrukturą drogową (UE 2019/2144, EU Report - A8-0330/2017).

2. Wybrane czynne systemy bezpieczeństwa drogowego pojazdów i ich oceny

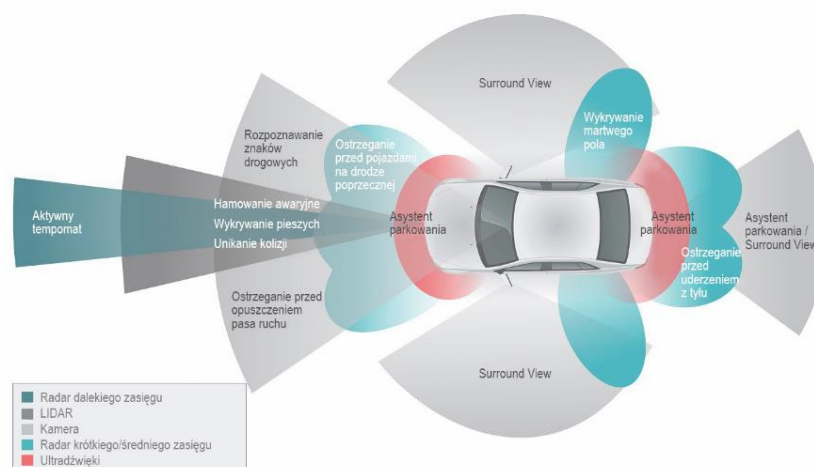
Od dłuższego czasu w samochodach stosowane są technologie zawierające bierne (pasywne - poduszki powietrzne, pasy bezpieczeństwa itp.) oraz czynne (aktywne) systemy bezpieczeństwa. Te pierwsze uaktywniają się dopiero podczas wypadku, którego nie można było uniknąć i ograniczają jego skutki, a te drugie (CA/CW - Collision Avoidance/Collision Warning) mają zdolność zapobiegania lub zmniejszania ryzyka ich wystąpienia. Czynne systemy bezpieczeństwa wspomagają kierowcę w bezpiecznym prowadzeniu samochodu. W przypadku zagrożenia kolizją do kierowcy wysyłane są odpowiednie ostrzeżenia (wizualne dźwiękowe i/lub dotykowe), a w wielu obecnych rozwiązaniach podejmowane są działania interwencyjne w samochodzie (hamowanie, przyspieszanie, kierowanie), gdy kierowca na czas nie zareaguje na nieuniknione zderzenie. Czynne systemy CA/CW współpracujące z układem hamulcowym zwane są też aktywnymi. Pierwsze czynne systemy bezpieczeństwa, znane jako DAS (Driver Assistance Systems), obejmowały układ przeciwblokujący ABS (Anti-Lock Braking System), elektroniczną stabilizację toru jazdy ESC (Electronic stability control) i system kontroli trakcji TCS (Traction Control System). Układy te bazowały na czujnikach mierzących tylko wewnętrzne wartości pojazdu takie jak prędkość i przyspieszenie pojazdu czy prędkość obrotową koła. Zastosowanie czujników do monitorowania środowiska zewnętrznego (przeszkody stałe i ruchome, ruch pojazdów, warunki drogowe) umożliwiło wprowadzenie zaawansowanych aktywnych systemów bezpieczeństwa i systemów wspomagania kierowcy. Dodane do DAS otrzymały wspólną nazwę ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) [18,19]. Przykładami są: adaptacyjny tempomat ACC (Adaptive Cruise Control), ostrzeżenie o kolizji z przodu FCW(A) (Forward Collision Warning (Alert)), autonomiczne (automatyczne) hamowanie awaryjne AEB (Autonomous Emergency Braking), system monitorowania martwej strefy BMS (Blind Spot Monitoring System), asystent utrzymania pasa ruchu LKA (Lane Keeping Assist), udoskonalony ESC i inne. Mogą też występować pod różnymi terminami marketingowymi [20]. Uwzględniają one stan pojazdu, reakcje kierowcy, wiele czynników środowiskowych mających wpływ na bezpieczeństwo, a w niektórych przypadkach przejmują kontrolę nad pojazdem. Systemy ADAS są ciągle doskonalone i uzupełniane o nowe funkcje [21, 22]. Ogólnie można je podzielić na te, które wspomagają kierowcę i funkcje zautomatyzowane.

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

Podstawowym elementem każdego systemu bezpieczeństwa ADAS jest wykrycie zagrożenia w różnych okolicznościach ruchu drogowego, w różnych stanach pojazdu i przy różnych zachowaniach kierowcy [23]. Do monitorowania środowiska ruchu wykorzystywane są głównie czujniki takie jak [24]:

- **kamery** (czujniki optyczne) 2D lub stereoskopowe 3D (dwie kamery do uchwycenia tej samej sceny) działające w zakresie widzialnym lub podczerwieni, z obrazem kolorowym lub monochromatycznym o różnej rozdzielczości i różnym kącie widzenia obejmującym nawet kąt 360° (zespół kamer lub specjalna kamera). Służą do wizyjnego obrazowania otoczenia pojazdu i rozpoznawania obiektów. Występują jako kamery krótkiego (do 30 (60) m), średniego (do 80 m) i dalekiego (mono do 250 m, w podczerwieni do 300 m).
- **radary** działające w zakresie częstotliwości radiowych o różnych parametrach (częstotliwość, zakres, kąt widzenia) i zasięgu zwykle do około 250 m, służą do wykrywania i pomiaru prędkości oraz odległości i kąta do obiektów,
- **lidary** (czujniki optyczne) działające w zakresie podczerwieni (905 nm lub 1550 nm) jako urządzenia laserowe do mapowania otoczenia (chmura punktów) w obszarze jedno - 1D, dwu - 2D, lub trójwymiarowym 3D o zasięgu do około 150 m (najnowsze nawet do 300 m),
- **czujniki ultradźwiękowe** do mierzenia odległości do obiektu o zasięgu zwykle od 0.15 do 3 m.

Na Rys. 1 przedstawiono przybliżone lokalizacje i obszary objęte monitorowaniem poszczególnych czujników.



Rys. 1 Przybliżone lokalizacje i obszary objęte monitorowaniem poszczególnych czujników [25]

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

Do tego dochodzą różnego rodzaju czujniki i urządzenia do monitorowania stanu pojazdu (prędkość, przyspieszenie, temperatura, kąt skrętu kierownicy, użycie hamulca), pozycji i położenia samochodu (urządzenia do pozycjonowania GPS - Global Positioning System lub globalny system nawigacji satelitarnej GNSS - Global Navigation Satellite System). Niektóre z czujników służą również do monitorowania przestrzeni kabiny, w tym zachowania kierowcy. Każdy z czujników ma określoną przestrzeń monitorowania (pokrycia) z określoną dokładnością i inne ograniczenia co powoduje, że nie każda przeszkoda stała czy ruchoma zostanie na czas wykryta, dlatego sygnały z czujników łączone są w tak zwaną fuzję co polepsza dokładność monitoringu [26, 27, 28]. Niektóre z nich podlegają integracji np. w celu uwzględnienia dryftów środowiskowych w innych.

W ramach technologii Internet Rzeczy IoT (Internet of Things) [29] w oparciu o sieć krótkiego zasięgu DSRC (Dedicated Short-Range Communication), komórkową lub internetową WLAN (Wireless Local Area Network) rozwijane są też technologie do wielokierunkowej komunikacji bezprzewodowej samochodów [30,31,32,33]. Należą do nich, między innymi, takie technologie jak: pojazd-pojazd V2V (Vehicle-to-Vehicle), pojazd infrastruktura drogowa V2I (Vehicle-to-Infrastructure), pojazd-wszystko V2X (vehicle-to-everything) [31], pojazd-pieszy V2P (vehicle-to-pedestrian), czy pojazd-sieć V2N (Vehicle-to-Network). We wszystkich tych przypadkach każdy pojazd musi być wyposażony w odpowiednie urządzenie pokładowe (z możliwością komunikacji z urządzeniami monitorującymi stan i otoczenie pojazdu), a pieszy w telefon komórkowy lub inne urządzenie do komunikacji bezprzewodowej. Technologia V2V oparta jest na dedykowanej komunikacji bezprzewodowej krótkiego zasięgu DSRC (Dedicated Short-Range Communication), a jej zasięg wynosi około 300 m. W przypadku komunikacji V2I potrzebne są odpowiednie urządzenia i czujniki przydrożne (wbudowane w drogę, przy sygnalizacji świetlnej, przystankach autobusowych). Technologia V2X i jej najnowsza implementacja C2VX (cellular vehicle to everything) umożliwia pojazdom komunikację między sobą i dowolnym urządzeniem w otoczeniu na większym obszarze niż V2V i szerszym rozpoznaniem zagrożeń obejmuje wymienione wcześniej systemy komunikacji [34].

Wyposażenie pojazdu w szybkie łącze internetowe (np. 5G) i system V2N umożliwi dostarczenie dodatkowych informacji, przechowywanych w aplikacjach w chmurze, związanych z bezpieczeństwem (warunki drogowe, pogoda, stan nawierzchni), elementy informacji i rozrywki (telematyka [35] - połączenie pojazdu z telefonem komórkowym), a co najważniejsze umożliwi aktualizację oprogramowania systemów dbając o bezpieczeństwo wymienianych danych. Przewiduje się, że elementy te przyczynią się do zwiększenia bezpieczeństwa na drogach zwiększając jednocześnie stopień autonomiczności pojazdu określony w skali 1 do 5 przez SAE (Society of Automotive Engineers) [36, 37]. W sytuacji zagrożenia wypadkiem, na podstawie przetworzonych informacji z dostępnych źródeł wypracowane zostanie odpowiednie działanie pozwalające uniknąć wypadku (kolizji) lub istotnie obniżyć jego dotkliwość, a w konsekwencji koszty materialne i społeczne. Koszty społeczne obejmują takie składniki jak: koszty pogotowia ratunkowego, opieki medycznej,

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

rehabilitacji, postępowania sądowego i prawnego oraz koszty związane z utratą jakości życia i produktywności w miejscu pracy.

NHTSA oszacowała potencjalny wpływ pięciu grup technologii ADAS w pojazdach pasażerskich na uniknięcie, złagodzenie oraz koszty przypisanych do nich wypadków w USA latach 2011 do 2015 [38] zgłoszonych przez policję. Skala autonomii wg. SAE pojazdów z tymi technologiami wynosi 0-1. W badaniach założono, że wszystkie samochody są wyposażone w te technologie. Wyniki zestawiono w Tab.1.

Tab.1 Udział roczny wybranych grup technologii ADAS w wypadkach i kolizjach w USA w latach 2011 - 2015 zgłaszanych przez policję oraz potencjalny ich wpływ na ciężkość i koszty

	Grupa technologii (systemy bezpieczeństwa)	Kolizje i wypadki (% ogółu)			Koszty (% ogółu)	
		łącznie	Śmiertelne	Z urazami	Materialne	Społeczne
1	Zapobieganie kolizjom z przodu (FCW, CIB, DBS)	29.4	3.8	31.5	36.3	17.4
2	Utrzymanie pasa ruchu (LDW, LKA, LCA)	19.4	44.3	17.1	11.9	30.4
3	Wykrywanie martwej strefy (BSD, BSI, LCM)	8.7	1.6	6.7	11.8	4.2
4	Przednie zderzenie z pieszym (PAEB)	1.9	12.3	3.7	0.1	8
5	Cofanie (RAB, RvAB, RCTA)	2.6	0.2	1.3	3.2	0.7
	Połączone technologie	62	62.2	60.3	63.3	60.7

Skróty nazw systemów bezpieczeństwa w Tab.1, niewymienione wyżej, oznaczają odpowiednio: CIB (Crash Imminent Braking) - nagłe hamowanie awaryjne, DBS (Dynamic Brake Support) - dynamiczne wspomaganie hamowania (CIB i DBS łącznie tworzą system AEB), LDW (Lane Departure Warning) -ostrzeżenie o zjechaniu z pasa ruchu, LCA (Lane Centering Assist) - asystenta centrowania pasa ruchu, BSD (Blind Spot Detection) - wykrywanie martwej strefy, BSI (Blind Spot Intervention) - interwencję martwego pola, LCM (Lane Change/Merge Warning) - ostrzeżenie o zmianie pasa/włączaniu się do ruchu, PAEB (Pedestrian Automatic Emergency Braking) - automatyczne hamowanie awaryjne w przypadku pieszych, RAB (Rear Automatic Braking) - automatyczne hamowanie tylne, RvAB (reverse automatic braking) - automatyczne hamowanie wsteczne, RCTA (Rear Cross Traffic Alert) - ostrzeżenie o ruchu poprzecznym z tyłu. W przypadku grupy 1 wypadki stanowiły 29,4% wszystkich zgłoszonych przez policję wypadków. Systemy bezpieczeństwa miałyby wpływ na 3,8% wszystkich ofiar śmiertelnych, 31,5% urazów, 36,3% strat materialnych związanych z uszkodzeniami samochodu i 17,4% wszystkich kosztów społecznych związanych ze zderzeniami z przodu. Podobna interpretacja obowiązuje w przypadku pozostałych grup. W przypadku technologii 1 zwraca uwagę duży jej wpływ na ilość i koszty wypadków i kolizji, a w przypadku technologii 2 duży wpływ technologii na ofiary śmiertelne. Obie te grupy technologiczne mogą się przyczynić znacząco do unikania wypadków i ograniczenia ich skutków. Jak wynika z danych w Tab. 1 te pięć grup technologii łącznie wziętych może

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

potencjalnie ocalić rocznie 62% ofiar śmiertelnych wypadków, zapobiec ponad 60, 3% urazom, oszczędzić 63.3% kosztów materialnych oraz 60.7% kosztów społecznych.

Obecnie coraz więcej nowych samochodów wyposażonych jest w udoskonalone systemy bezpieczeństwa ADAS polegające na fuzji czujników i połączonych funkcjach różnych systemów. W wielu modelach samochodów koncernu GM (General Motors) oprócz kluczowego systemu AEB do standardowego wyposażenia od 2023 należą takie systemy bezpieczeństwa jak: FCA+AEB, PAEB, LKA, LDW oraz IntelliBeam czyli automatyczne sterowanie światłami drogowymi. Ostatnio ukazał się raport z badań tych pięciu i innych czynnych systemów bezpieczeństwa, które przeprowadził UMTRI (University of Transportation Michigan Research Institute) [39]. Badania wykonano na podstawie danych z raportów policji o wypadkach dopasowanych do modeli samochodów producenta z roku 2017 do 2021. Polegały one na porównaniu liczby określonych wypadków przypisanych do pojazdów wyposażonych i niewyposażonych w funkcje ADAS. Główne wyniki zestawiono w Tab.2.

Tab.2. Efektywność systemów ADAS w samochodach GM z lat 20017 - 2021 w zmniejszeniu wypadków (f - fuzja czujników, k (r) - samochody tylko z kamerą (radarem) w - wszystkie funkcje; * przy zjeżdżaniu z jezdni, **zderzeń w tym samym kierunku, ***zderzeń w przeciwnym kierunku, ^ według wcześniejszych badań tego Instytutu)

System	Potencjalne zmniejszenie (% ogółu)	
	Wszystkich wypadków (opcja) [%]	Tylko z urazami (opcja) [%]
FPB (PAEB)	23	-
FCA (FCW)	14 (k)	25 (k)
AEB+FCA	40 (k), 42 (w), 49 (f/r)	53 (k), 54(w), 57(f/r)
LCA +SBZA (BSW)	15	-
LKA+LDW	15 (17*, 8**, 7***)	22*
RAB, RCTA, RPA, RVC	85, 62, 49,34	-
IntelliBeam [^]	22	-

Nienazwane wcześniej oznaczenia systemów to: alert o kolizji z przodu FCA (Forward collision Alert) odpowiednik FCW, hamowanie przed pieszym z przodu FPB (Front Pedestrian Braking), odpowiednik PAEB, LCA (Lane Change Alert) odpowiednik LCM, SBZA (Side Blind Zone Alert) odpowiednik BSW (BSD), asystent parkowania tyłem RPA (Rear Park Assist), kamera cofania RVC (Rear Vision Camera). Wyniki wykazały skuteczność tych systemów w ograniczaniu wypadków i ich skutków, a w szczególności połączonych ich funkcji, rodzaju czujników i ich fuzji. System AEB został uznany za wiodący.

Ocenę potencjalnych korzyści z AEB, zarówno przy dużych, jak i niskich prędkościach, w połączeniu z systemami ostrzegania przed kolizją z przodu FCW przeprowadzono również w pracach [30, 41]. Potwierdzając korzyści społeczne systemu podkreślono, że powinien być standardowym wyposażeniem wszystkich samochodów poruszających się zarówno przy małych jak i dużych prędkościach. Analiza skuteczności FCW, AEB i połączonych systemów FCW/AEB przeprowadzona w [42] wykazała zmniejszenie zderzeń z tyłu odpowiednio o 27%,

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

43% i 50%.

Całościową ocenę systemu ADAS, wybranych i połączonych jego funkcji oraz wpływ zachowania kierowcy i samego systemu na bezpieczeństwo przeprowadzono w pracy [43]. Na skuteczność systemów ADAS jak również ich ograniczenia takie jak brak reakcji w niektórych przypadkach i fałszywe i generowane w niewłaściwym czasie alarmy wskazuje wiele innych publikacji. Aczkolwiek systemy ADAS istotnie ułatwiają bezpieczne prowadzenie samochodu to nie zwalniają kierowcy za prowadzenie pojazdu w bezpieczny sposób. Podkreślają to producenci w instrukcjach obsługi pojazdu.

Funkcjonowanie każdego systemu unikania kolizji również systemu ostrzegania o kolizji z przodu FCW opiera się na algorytmach.

3. Wskaźniki marginesu bezpieczeństwa w systemach ochrony przed kolizją z przodu

Systemy ochrony przed kolizją CA/CW jako czynne systemy przed-zderzeniowe, dzielą się na kierunkowe i wielokierunkowe [44]. Systemy kierunkowe obejmują kolizje przednie, tylne i poręczne. Przednie i tylne określane są łącznie jako wzdłużne. Wśród nich rozróżnia się te, które po wykryciu zagrożenia działają autonomicznie aby uniknąć kolizji (jak AEB czy ACC) i te, które tylko ostrzegają kierowcę w postaci alertu (alertów) o zagrożeniu i konieczności interwencji (jak FCW, RCW czy LCW). Te ostatnie mogą współpracować z systemem AEB, który jest uruchamiany w przypadku braku reakcji kierowcy na alerty ostrzegawcze. Systemy te działają głównie w oparciu o wskaźnik marginesu bezpieczeństwa jakim jest czas i/lub odległość do zderzenia. Krytyczne wartości tych wielkości wyznaczają progi bezpieczeństwa uruchamiające sterowniki systemów autonomicznych i alertów ostrzegawczych. Duża ilość wypadków drogowych ma miejsce z udziałem dwóch pojazdów, a najczęstszym typem wypadku jest zderzenie czołowe, a następnie zderzenia tylne.

W przypadku kolizji wzdłużnych ze stałą lub ruchomą przeszkodą najczęściej stosowanym wskaźnikiem marginesu czasowego jest czas do kolizji TTC (Time To Collision) i odstęp czasowy TH (Time Headway) oznaczany też jako THW. TTC jest definiowany jako odległość pomiędzy zderzakami, odpowiednio przednim i tylnym podążających za sobą pojazdów, podzieloną przez ich prędkość względną. TTC jest wskaźnikiem konfliktu drogowego i jest odwrotnie proporcjonalny do ryzyka wypadku. THW natomiast definiuje się jako czas, który upływa po przejechaniu pojazdów przez to samo miejsce. Rozróżnia się przy tym odstęp czasowy hamowanie THW_B i odstęp czasowy podążanie THW_F [45]. Odstęp THW_B definiuje się jako czas THW w momencie, w którym znak TTC zmienił się na ujemny w wyniku intensywnego hamowania przy zbliżaniu się pojazdów. Odstęp THW_F to czas THW w momencie, w którym czas TTC zmieni się ponownie na dodatni z zachowaniem bezpiecznej odległości pojazdów. Nastąpi to po wyrównaniu się prędkości i oddaleniu się pojazdów. Gdy prędkości tych pojazdów są zbliżone (samochody podążają za sobą) to THW_F można w przybliżeniu obliczyć dzieląc odległość pomiędzy zderzakami pojazdów przez prędkość pojazdu jadącego z tyłu. Wskaźnik THW_F stosowany jest często do kontroli płynności ruchu. Do czasowej separacji bocznej, w przypadku kolizji poprzecznych, stosuje się dwa wskaźniki czasowe tj. dostępny czas do przekroczenia pasa ruchu TLC (Time to Lane Crossing) i czas do kontaktu bocznego TTLC (Time To Lateral Contact) definiowane podobnie jak TTC ale

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

uwzględniające poprzeczne boczne odległości i poprzeczne prędkości (względem pasa ruchu lub pomiędzy pojazdami) [46, 47].

W przypadku, gdy pojazd śledzący (podążający) FV (Following Vehicle) nazywany również poprzedzającym SV (Subject Vehicle) zbliża się do stojącego lub poruszającego się ze stałą prędkością pojazdu prowadzącego LV (Lead Vehicle) czas TTC określany jest wg. zależności [48]

$$TTC = \frac{D}{V_{rel}} = \frac{D}{V_F - V_L} \quad (3.1)$$

dla $V_F > V_L$, gdzie D oznacza odległość pomiędzy przodem pojazdu FV a tyłem pojazdu LV, V_{rel} oznacza prędkość względną pomiędzy samochodami (obiektami), a V_F i V_L oznaczają odpowiednie ich prędkości wzdłużne, przy czym

$$V_{rel} = V_F - V_L \quad (3.2)$$

Gdy przyspieszenie FV wynosi zero, a LV przyspiesza (lub zwalnia), to ten czas oznaczony w tym przypadku jako TTC_a oblicza się następująco:

$$TTC_a = \frac{V_{rel} \sqrt{V_{rel}^2 - 2V_L D}}{a_L} \quad (3.3)$$

gdzie a_L oznacza opóźnienie pojazdu LV.

W obliczeniach komputerowych stosuje się wskaźnik będący odwrotnością TTC to jest $invTTC = 1/TTC$. Gdy zbliża się zderzenie, TTC maleje, a $invTTC$ rośnie. Wzrost $invTTC$ jest szybszy bliżej zderzenia, szczególnie w przypadku większych opóźnień pojazdu LV. Wzmacnia tym samym zagrożenie i skutki zderzenia. Wskaźnik $invTTC$ stanowi więc kinematyczną miarę ryzyka i dotkliwości wypadku. Ocenia się, że jest bliski percepcji kierowcy oceniającego zagrożenie na podstawie bodźca wzrokowego polegającego na zjawisku powiększania się obrazu na siatkówce oka przy zbliżaniu się do przeszkody [49]. Wizualną reakcją kierowcy na ten bodziec wzrokowy jest przymykanie powiek. Optyczny kąt widzenia θ pojazdu LV o szerokości W znajdującego się w odległości D od FV w dowolnym momencie i jego zmiany w czasie $d\theta/dt$, znane jako rozszerzenie optyczne, opisują następujące równania [48]:

$$\theta = \frac{W}{D} \quad (3.4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} = \frac{V_{rel} W}{D^2} \quad (3.5)$$

Dzieląc wyrażenie (3.4) przez (3.5) otrzymuje się

$$\frac{\theta}{\dot{\theta}} = \frac{D}{V_{rel}} = TTC \quad (3.6)$$

Wyrażenie (3.6) dowodzi użyteczności kąta θ i jego zmiany w czasie $d\theta/dt$ do wizualnej oceny TTC i zarazem $invTTC$ [50]. Uważa się, że szybkość zmiany kąta widzenia $d\theta/dt$ podczas zamykania oka dostarcza formacji odległości do pojazdu LV. Ogólnie są to zależności nieliniowe i ograniczone do małych θ . Wartość TTC zależy nie tylko od odległości D i prędkości v_r , ale również od postrzegania zagrożenia przez kierowcę. W scenariuszach unikania kolizji TTC to zapotrzebowanie na czas potrzebny kierowcy. Stanowi on sumę czasu potrzebnego na identyfikację zagrożenia, podjęcie decyzji i działanie. Czas ten nie może być większy od dostępnego użytecznego czasu zapewniającego bezpieczną jazdę w danych warunkach drogowych. Za krytyczną (progową) wartość TTC przyjmuje się czas wynoszący około 1,5s. Odpowiada to minimalnemu czasowi percepcji i reakcji kierowcy. Poniżej tej

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

wartości zakłada się nieuniknioną kolizję z samochodem z przodu.

W przypadku zbliżonych prędkości pojazdów, odstęp czasowy THW_F podążanie, zgonie z podaną definicją, można obliczyć wg. zależności

$$THW_F = \frac{D}{V_F} \quad (3.7)$$

Progową wartość THW_F podążanie przyjmuje 1.5s, równą progowej wartości przyjmowanej dla TTC. W przepisach ruchu drogowego w większości krajów europejskich przyjmuje się $THW_F = 2s$, chociaż kierowcy często przekraczają tę wartość osiągając THW_F w okolicy 0,5s [47]. Progową wartość THW_B hamowanie ocenia się na około 1s [51, 45]. W praktyce, oprócz czasowego THW_F , funkcjonuje odstęp w odległości D pomiędzy pojazdami THW_D , który zależy od prędkości pojazdu V_F [51,47]. Wskaźnik ten służy głównie do egzekwowania prawa drogowego. W Polsce obowiązuje przepis, że minimalna odległość pomiędzy samochodami w ruchu ulicznym wynosi w metrach połowę aktualnej prędkości w km/h. Przy prędkości pojazdu V_F wynoszącej 80 km/h (22.2 m/s) odstęp ten powinien wynosić THW_D 40 m. Według równania 3.6 odpowiada to czasowi $THW_F = 1.8s$. Wymienione wskaźniki $invTTC$, THW_F i THW_D służą zarówno do oceny poziomu ryzyka jak i ilościowego wyznaczenia postrzeganego ryzyka w scenariuszach podążania samochodem [52].

W pracach [45, 53] dokonano porównania i oceny TTC i THW. Wykazano niezależność tych ważnych wskaźników bezpieczeństwa w przypadku pojazdów podążających jeden za drugim i możliwość jednoczesnego wykorzystania w systemach unikania kolizji. Oprócz wymienionych wskaźników marginesu bezpieczeństwa stosowane są też inne, których definicje i oceny można znaleźć w pracy [54]. Porównując czasy THW_F i TTC wykazano, że w prawie wszystkich ryzykownych zdarzeniach związanych z TTC próg czasu THW_F jest mniejszy.

4. Wybrane algorytmy ostrzegania o kolizji w systemach FCW

Najbardziej wpływową aplikacją czynnych systemów unikania kolizji jest FCW. Podstawowym elementem systemów FCW jest algorytm ostrzegania o kolizji. Korzysta się w nich zarówno ze wskaźników czasu bezpieczeństwa jak i wskaźników bezpiecznej odległości do przeszkody. Służą one do aktywacji alertów ostrzegawczych i dotyczą pojazdów kontynuujących jazdę z obecną prędkością i po tej samej ścieżce. W systemach FCW można wyróżnić następujące algorytmy:

- deterministyczne,
 - percepcyjne,
 - kinematyczne
- adaptacyjne,
- oparte na sztucznych sieciach neuronowych
- oparte na inteligentnych systemach transportowych

Algorytmy percepcyjne i kinematyczne określane są mianem deterministycznych, gdyż bazują na ustalonych wcześniej progowych wartościach wskaźników ryzyka wykorzystywanych do generowania alertów ostrzegawczych dla kierowcy o zbliżającej się kolizji. Kolejność i moment wysyłania alertów w systemach CA/CW muszą być tak dobrane,

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

aby nie zakłócały manewrów unikania kolizji przez kierowanie i hamowanie jak również nie wywoływały zbędnych lub fałszywych alertów. Poniżej przedstawiono przykłady algorytmów percepcyjnych, kinematycznych jak również adaptacyjnych często wymienianych w literaturze i dobrze ilustrujące problematykę co pozwoli lepiej zrozumieć nowo tworzone algorytmy szeroko wykorzystujące najnowsze trendy technologiczne związane z Internetem rzeczy i sztuczną inteligencją.

4.1 Algorytmy percepcyjne

Algorytmy percepcyjne (czasu bezpieczeństwa) wyzwalają alert ostrzegawczy na podstawie progów percepcji człowieka, którymi są progowe wartości wskaźników czasowych ustalanych doświadczalnie. Jak wynika z wcześniej przedstawionych formuł zależą one od zasięgu, prędkości jak również opóźnienia przy hamowaniu. Najczęściej wykorzystywanym wskaźnikiem jest TTC. Oblicza się tylko wtedy, gdy $V_F > V_L$. Jego wartość progowa TTC_{tr} ustalana jest zwykle w zakresie 2 do 5 s. Gdy TTC spadnie poniżej progu percepcji człowieka to aktywowane jest ostrzeżenie o zagrożeniu skierowane do kierowcy. Poniżej przedstawiono kilka percepcyjnych algorytmów wyznaczających odległość D_{var} pomiędzy samochodami służącą do aktywacji alertu ostrzegawczego.

4.1.1 Algorytm Hondy

Algorytm znany jako algorytm Hondy został opracowanym przez Fujitę i innych w pracy [55]. Jest również prezentowany w wielu publikacjach [56, 57, 58, 59]. Składa się z algorytmu ostrzegania CW i algorytmu unikania kolizji CA. Algorytm ostrzegania o kolizji CW wyznaczający odległość ostrzegawczą D_{war} ma następującą postać:

$$D_{war} = f(V_{rel}) = 2.2V_{rel} + 6.2 \quad (4.1)$$

gdzie D_{war} [m], V_{rel} [m/s], a wyraz wolny oznacza margines bezpieczeństwa wynoszący 6.2 m. Ostrzeżenie pojawi się przy określonej prędkości względnej V_{rel} [m/s], gdy TTC osiągnie wartość mniejszą niż przyjęta progowa $TTC_{tr} = 2.2$ s.

Scenariusz CA zakłada, że pojazd prowadzący LV rozpoczyna hamowanie trwające τ_2 , a pojazd podążający FV rozpoczyna hamowanie awaryjne po czasie τ_1 . Zakres bezpieczeństwa szacowany jest do τ_2 . Algorytm składa się z dwóch równań wyznaczających odległość hamowania d_{br} . Wybór jednego z nich zależy od tego, czy szacowany czas zatrzymania (τ_2) pojazdu prowadzącego LV jest krótszy niż czas reakcji kierowcy pojazdu VF. Równania te mają następującą matematyczną postać:

$$\begin{cases} d_{br} = \tau_2 V_{rel} + \tau_1 \tau_2 a_F - 0.5 a_F \tau_1^2; & \text{dla } \frac{V_L}{a_L} \geq \tau_2 \\ d_{br} = \tau_2 V_F - 0.5 a_F (\tau_2 - \tau_1)^2 - \frac{V_L^2}{2a_L}; & \text{dla } \frac{V_L}{a_L} < \tau_2 \end{cases} \quad (4.2)$$

gdzie d_{br} [m] to krytyczna droga hamowania, V_{LF} , V_L [m/s] to odpowiednie prędkości pojazdów, V_{rel} [m/s] to prędkość względna między pojazdami, a_F i a_L [m/s²] to maksymalne opóźnienia podczas hamowania pojazdów, τ_1 [s] to czas zwłoki systemu, a τ_2 [s] to czas potrzebny do wyhamowania pojazdów. Jeżeli pojazd wiodący LV nie zatrzyma się w ciągu τ_2 , wybierane jest pierwsze równanie, w przeciwnym razie drugie.

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

Na podstawie danych z testu kierowców wyznaczono krytyczną odległość ostrzegawczą D_{war} tak, aby była mniejsza od odległości unikania kolizji D_{ca} . Początek odległości D_{ca} wyznaczono na podstawie awaryjnego manewru kierownicą przez kierowców. Czas hamowania τ_2 dobrano tak, aby droga krytyczna hamowania d_{br} była mniejsza od odległości D_{ca} . Zabieg ten zapewnia, że hamulce nie zostaną automatycznie uruchomione, gdy kierowca podejmie próbę wykonania manewru kierownicą.

Dzięki tym rozwiązaniom ostrzeżenia nie powinny zakłócać manewrów kierowcy i nie powinny go rozpraszać. Niestety system wymaga dużej ilości danych i jest wrażliwy na ich konkretny zestaw. Jeśli próbka nie jest reprezentatywna wyniki mogą poważnie odbiegać od rzeczywistej sytuacji na drodze. Zaproponowano następujące wartości parametrów: $a_F = a_L = 7,8 \text{ m/s}^2$, $\tau_1 = 0,5 \text{ s}$, $\tau_2 = 1,5 \text{ s}$.

W podobnym algorytmie ostrzegawczym Hondy CMBS (Collision Mitigation Braking System) przyjęto wskaźnik $\text{TTC}_{\text{tr}} = 3 \text{ s}$ do uruchomienia pierwszego alarmu ostrzegawczego i dwa następne $\text{TTC}_{\text{tr}} = 2 \text{ s}$ i $\text{TTC}_{\text{tr}} = 1 \text{ s}$ do uruchomienia kolejnych alertów gdy nie ma skutecznej reakcji kierowcy i TTC nadal maleje. Te dodatkowe alerty mają tylko na celu ograniczenie skutków nieuniknionej kolizji.

4.1.2 Algorytm Hirsta i Grahama

Podobną wartość $\text{TTC}_{\text{tr}} = 3 \text{ s}$ przyjęto w algorytmie Hirsta i Grahama [60]. Wyrażenie na odległość alarmową ma następującą postać:

$$D_{\text{war}} = f(V_{\text{rel}}, V_F) = 3 V_{\text{rel}} + 0.4905 V_F \quad (4.3)$$

w którym V_{rel} i V_F występują w m/s.

Uwzględniono w nim również wpływ prędkości pojazdu V_F na odległość D_{war} uruchamiającą alarm ostrzegawczy. Dodatkowa regulacja prędkości $0,4905 \text{ s}$, na każdy m/s prędkości pojazdu V_F , jako kara za prędkość, miała na celu zminimalizowanie liczby uciążliwych ostrzeżeń. W wyniku późniejszych badań wykonanych w ramach pracy [61] zmieniono wartość kary w tym równaniu na $0,9811 \text{ s}$, aby uwzględnić typowy czas reakcji kierowcy wynoszący $1,5 \text{ sekundy}$.

4.1.3 Algorytm Bella i Russo

Bella i Russo opracowali algorytm percepcyjny, odzwierciedlający zachowanie kierowcy, oparty na śledzeniu zachowań kierowców jadących za samochodem z przodu w manewrach wyprzedzania i zwalniania w celu podążania, korzystając z danych pozyskanych z symulatora jazdy. Ich algorytm prezentuje następujące równanie [62]:

$$D_{\text{war}} = f(V_{\text{rel}}, V_F) = 1.25 V_{\text{rel}} + 1.55 V_F \quad (4.4)$$

Różni się od algorytmu Hirsta i Grahama krótszą wartością progową $\text{TTC}_{\text{tr}} = 1,25 \text{ s}$ i większą wartością kary za prędkość wynoszącą $1,55 \text{ s}$. Zapewnia to lepsze odzwierciedlenie zachowania kierowców. Wyznaczona odległość alarmową zgodna jest z wynikiem badań realizowanych w ramach projektu badawczego CAMP (Crash Avoidance Metrics Partnership) [63,64]. Zgodnie z tymi badaniami system ostrzegania powinien dostarczać alert z wyprzedzeniem Δt w porównaniu do czasu, gdy kierowca jest w minimalnej odległości od pojazdu prowadzącego, tuż przed podjęciem manewru wymijającego. Strefę czasową Δt , w

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

której powinien pojawić się alert wyznaczają dwie wartości progowe tj. $TTC_{tr} = 1.52$ s jako alarm zbyt wczesny i $TTC_{tr} = 1.18$ s jako alarm zbyt późny. Środek tej strefy, w który celuje algorytm Bella i Russo wynosi $TTC_{tr} = (1.52+1.18)/2 = 1.35$ s.

4.1.4 Algorytm inv TTC

W algorytmie percepcyjnym Kiefera i innych [65] realizowanym w ramach projektu CAMP zastosowano wspomniany już model $invTTC = 1/TTC$. Przeanalizowano manewry hamowania i wymijania (kierowania) w ostatniej sekundzie opisane w [63, 64] zaistniałe w trzech różnych scenariuszach ruchu pojazdów. Hamowanie, które pozwoliło na bezpieczne uniknięcie kolizji nazwano normalnym, a hamowanie, które pozwalało ledwo tylko uniknąć zderzenia nazwano hamowaniem twardym. Wskaźnikiem do tej oceny był czas $invTTC$. W zastosowanym podejściu opartym na regresji logistycznej próby twardego hamowania w ostatniej sekundzie traktowane są jako sukces (lub 1), a normalne próby hamowania w ostatniej sekundzie są traktowane jako porażka (lub 0). Niezbędnemu hamowaniu x jako bezwymiarowej zmiennej losowej, przypisano najlepiej dopasowaną skumulowaną funkcję rozkładu prawdopodobieństwa

$$p = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (4.5)$$

o zakresie zmienności od 0 do 1, gdzie e ($e = 2.7182818...$) jest podstawą logarytmu naturalnego. Na podstawie tej funkcji określano odpowiednie prawdopodobieństwo $p = p^*$, że istniejące warunki są scenariuszem początku gwałtownego hamowania. Punkt gdzie $p > p^*$ oznacza moment wyzwolenia ostrzeżenia. Dla trzech różnych scenariuszy względnych ruchów FV i LV ustalono trzy oddzielne równania regresji dla x :

- gdy pojazd VF zbliża się do hamującego ze stałym opóźnieniem pojazdu LV,

$$x = -6,092 + 18,816 \left(\frac{1}{TTC} \right) + 0,0534V_{Fm} \quad (4.6)$$

- gdy pojazdy FV i VL poruszają się ze stałą prędkością względną V_{rel} ,

$$x = -6,092 + 12,584 \left(\frac{1}{TTC} \right) + 0,0534V_{Fm} \quad (4.7)$$

- gdy pojazd FV zbliża się do nieruchomego LV:

$$x = -9,073 + 24,225 \left(\frac{1}{TTC} \right) + 0,0534V_{Fm} \quad (4.8)$$

W równaniach tych V_{Fm} oznacza prędkość pojazdu VF w [mph] (milach na godzinę). Algorytm prezentowany jest również w [66]. Równanie predykcyjne wynikające z tego podejścia jest wykorzystywane do obliczania zakresu początku hamowania, który wraz z zakresem czasu opóźnienia jest używany do obliczenia (całkowitego) zakresu ostrzegawczego.

Zaletą algorytmów percepcyjnych jest mała ilość potrzebnych parametrów łatwych do pozyskania. Wadą jest natomiast to, że wymagają empirycznej wiedzy na temat ludzkiej percepcji w celu wyznaczenia TTC, a ustalony empiryczny próg percepcyjny jest wrażliwy na różnice indywidualne percepcji i zachowań kierowców w różnych scenariuszach ruchu i warunkach drogowych. Preferencje percepcyjne mogą się bowiem zmieniać od ostrożnych do agresywnych co ma wpływ na czas hamowania. Stąd duża ilość, zbyt wczesnych, zbyt późnych lub fałszywych alarmów. Szansą na zmniejszenie tych problemów są algorytmy

kinematyczne.

4.2 Algorytmy kinematyczne

Algorytmy kinematyczne (bezpiecznej odległości) wyznaczają minimalną odległość do bezpiecznego zatrzymania z połączenia równania kinematyki i dynamiki pojazdu oraz czasu reakcji kierowcy. Wymagają oprócz znajomości czasu reakcji kierowcy również prędkości pojazdów opóźnień przy hamowaniu, zależnych od przyczepności kół do drogi (interakcji droga opona) [67]. Prędkości i opóźnienia pojazdów przyjmowane są jako wartości stałe. Algorytmy te są jednak w stanie zapewnić dokładniejsze ostrzeżenia niż algorytmy percepcyjne. W analizie ruchu pojazdu LV rozważa się trzy przypadki: LV nieruchomy, LV ruchomy i LV hamuje. Alert ostrzegawczy wyzwalany jest na podstawie porównania rzeczywistej odległości pojazdów z wyznaczoną minimalną oznaczaną dalej jako R_{war} . Gdy $R < R_{war}$ generowany jest alert.

4.2.1 Algorytm SDA

Algorytmy SDA (Stop Distance Algorithms) jest przykładem podstawowego kinematycznego algorytmu odległości zatrzymania [68, 69, 58]. Alert jest uruchamiany, gdy aktualny odstęp pomiędzy pojazdami R jest mniejszy niż obliczona odległość ostrzegawcza R_{war} . Opiera się na założeniu, że droga hamowania pojazdu LV jest większa niż pojazdu FV. Odległość R_{war} obliczana jest za pomocą poniższego równania

$$R_{war} = f(t_r, V_F, V_L) = V_F t_r + \frac{1}{2} \left(\frac{V_F^2}{a_F} - \frac{V_L^2}{a_L} \right) \quad (4.9)$$

gdzie R_{war} [m] to odległość aktywacji systemu ostrzegania, V_F i V_L oraz a_F i a_L w to odpowiednie prędkości [m/s] i opóźnienia [m/s²], t_r [s] to czas reakcji kierowcy. Występujące w równaniu wielkości $t_r = 1$ s oraz $a_F = a_L = 5.88$ m/s² przyjęto jako stałe.

4.2.2 Algorytm Mazdy

Scenariusz algorytmu Mazdy opracowany w pracy [70] i prezentowany w innych np. w [58] zakłada, że pojazdy poruszają się ze stałymi prędkościami V_F i V_L . Następnie, w czasie licznym od $\tau = 0$, pojazd prowadzący LV rozpoczyna hamowanie po czasie τ_2 (z opóźnieniem a_L), natomiast pojazd podążający FV rozpoczyna hamowanie awaryjne po dodatkowym czasie ($\tau_1 + \tau_2$) (z opóźnieniem a_F), który trwa aż do całkowitego zatrzymania obu pojazdów. Bezpieczna odległość bez kolizji, czyli odległość ostrzegawcza R_{war} obliczana jest według następującego równania

$$R_{war} = f(V_F, V_L, V_{rel}) = \frac{1}{2} \left(\frac{V_F^2}{a_F} - \frac{V_L^2}{a_L} \right) + V_F \tau_1 + V_{rel} \tau_2 + R_{min} \quad (4.10)$$

gdzie τ_1 [s] jest czasem zwłoki systemu, τ_2 [s] jest czasem rozpoczęcia hamowania przez pojazd LV, R_{min} [m] jest minimalnym marginesem bezpiecznej odległości. Przyjęto następujące stałe wartości wielkości występujących w równaniu: $a_F = 6$ m/s², $a_L = 8$ m/s², $\tau_1 = 0.1$ sec, $\tau_2 = 0.6$ sec i $R_{min} = 5$ m. Ocenia się, że dla kierowcy jest to jeden z najbardziej wymagających scenariuszy, na podstawie którego wyznaczana jest odległość R_{war} . Uważany jest też za konserwatywny, ponieważ stara się unikać niemal każdej kolizji co wiąże się z

CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)

nadmiarem ostrzeżeń.

4.2.3 Algorytm PATH

Algorytm zapobiegania kolizjom tylnym PATH jako zmodyfikowana wersja algorytmu mazdy opracowano ramach kalifornijskiego programu PATH (Partners for Advanced Transportation Technology) [71, 66]. Wykorzystano w nim bezwymiarowy parametr w do określenia momentu uruchomienia ostrzegania o zbliżającej się kolizji i automatycznego hamowania. Jego postać matematyczną wyrażają poniższe równania:

$$w = \frac{(R - d_{br})}{(R_{war} - d_{br})} \quad (4.11)$$

$$R_{war} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{FV}^2}{a} - \frac{V_{LV}^2}{a} \right) + V_{FV} \tau + R_{min} \quad (4.12)$$

$$d_{br} = V_{rel}(\tau_1 + \tau_2) + 0.5 a_{LV}(\tau_1 + \tau_2)^2 \quad (4.13)$$

gdzie R [m] oznacza aktualną odległość pojazdów, d_{br} [m] jest krytyczną odległością hamowania, R_{war} [m] jest krytyczną odległością ostrzegania, V_F , V_L , to odpowiednie prędkości w m, a [m/s^2] to opóźnienie przy hamowaniu (równe dla obu pojazdów), τ_1 [s] jest zwłoką systemu, τ_2 [s] jest czasem reakcji kierowcy. Gdy $0 < w < 1$ wówczas $d_{br} < R < 0$. W tych warunkach, w zależności od wartości R , generowane są różne alerty ostrzegawcze (dźwiękowe lub wizualne). Gdy $w < 0$ to $R < d_{br}$ i wówczas system automatycznie uruchamia hamowanie.

Algorytmy SDA, Mazdy i PATH zakładają, że opóźnienia obu pojazdów przy hamowaniu są przyjmowane jako wartości stałe. Takie założenie może prowadzić do wczesnych lub późnych ostrzeżeń w różnych warunkach drogowych.

W porównaniu do percepcyjnych, algorytmy kinematyczne oparte na większej liczbie danych umożliwiają dostarczenie alertów ostrzegawczych lepiej dopasowanych do aktualnych sytuacji na drodze i w czasie lepiej akceptowanym przez kierowców. Tak jak w przypadku algorytmów percepcyjnych bazujących na ustalonym czasie do zderzenia problem stanowią różne zdolności percepcji, style jazdy i motywacje kierowców, to w przypadku algorytmów kinematycznych podobnym problemem jest przyjmowany stały czas reakcji kierowcy i stałe wartości opóźnień przy hamowaniu pojazdów. Elementy te są powodem alertów wyzwalanych w niewłaściwym czasie lub fałszywych [72]. Ma to szczególnie znaczenie w algorytmach FCW w połączeniu z AEB [73], gdzie wyzwaniem jest uniknięcie hamowania gdy kierowca chce uniknąć kolizji poprzez kierowanie. Proponowane obecnie algorytmy unikania kolizji kontrolują hamowanie i kierowanie poprzez modele interakcji człowiek maszyna i planowanie ruchu w celu wyznaczenia ścieżki uniknięcia kolizji zarówno wzdłużnych jak i poprzecznych [74, 75].

Badania skuteczności systemów CW/CA w różnych scenariuszach drogowych, w aspekcie percepcji i zachowań kierowców, podejmowano w wielu pracach [76]. Problem lepszego dopasowania algorytmów percepcyjnych i kinematycznych do indywidualnych cech psychofizycznych kierowców i warunków drogowych jest przedmiotem algorytmów adaptacyjnych.

4.3. Algorytmy adaptacyjne

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

Skuteczność każdego deterministycznego algorytmu CW zależy od tego w jaki sposób i w jakim czasie lub odległości do kolizji zostanie wygenerowany do kierowcy alert ostrzegawczy. Każdy kierowca ma specyficzne cechy psychofizyczne, różne umiejętności, nawyki i doświadczenia, które warunkują jego postrzeganie ryzyka, zachowania, reakcje i decyzje w zależności od sytuacji na drodze i warunki pogodowe [9, 10, 77]. Kondycja psychofizyczna, motywacje, rozproszenie uwagi jak również wiek i płeć kierowcy mogą też mieć istotne znaczenie. Ponadto obliczana w algorytmie droga hamowania zależy od stanu nawierzchni i warunków atmosferycznych [67]. Czynniki te mogą być przyczyną irytujących, spóźnionych, przedwczesnych lub fałszywych alarmów ostrzegawczych, co może powodować dezaktywację systemu przez kierowcę. Elementy te powodują, że algorytmy deterministyczne nie zapewniają dostatecznego bezpieczeństwa na drodze. Model, który uwzględnia wyżej wymienione elementy i daje się wbudować w strukturę algorytmu deterministycznego jest przedmiotem adaptacyjnego algorytmu unikania kolizji. Adaptacyjny algorytm FCW jest więc udoskonaloną wersją algorytmu deterministycznego w zakresie strategii generowania ostrzeżeń.

W algorytmie kinematycznym opracowanym na podstawie badań terenowych w ramach programu CAMP [63, 64], zaproponowano liniową funkcję predykcyjną ERD (expected response decelerations) wyznaczającą zależność na wymagane opóźnienie przy hamowaniu awaryjnym w ostatniej chwili dla pojazdu VF w zależności od prędkości względnej V_{rel} i charakteru zmiany opóźnienia pojazdu LV. Celem było ograniczenie alertów pojawiających się w nieodpowiednim czasie. Dla przypadku poruszającego się pojazdu LV, gdy dojdzie do kontaktu z FV, równanie to ma następującą postać

$$ERD = a_{FR} = -0.164 + 0.668a_L - 0.00368V_{relm} + 0.078 \quad (4.14)$$

gdzie a_{FR} to oczekiwane spowalnianie pojazdu FV (opóźnienie) w $g[m/s^2]$, a_L to opóźnienie przy hamowaniu Pojazdu LV w $g[m/s^2]$, V_{relm} prędkość względna zbliżania w $[mp/h]$. Powyższa zależność na wymagane opóźnienie pojazdu VF obowiązuje dla $a_L < 0.39g$ ($a_L < 3.82 m/s^2$) i V_L od 30 do 60 mph (48.3 do 96.6 km/h). Ta funkcja dobrze działa, gdy ryzyko postrzegane przez kierowców jest niskie. Gdy przy większych prędkościach LV hamuje mocniej, zmniejsza się obliczany zasięg ostrzeżenia pozostawiając kierowcy SV niewiele czasu na reakcję i ewentualne rozpoczęcie manewru omijającego. Zgodnie z wizualnym postrzeganiem ryzyka jest odwrotnie. Kierowca w takiej sytuacji potrzebuje więcej czasu na reakcję. Wskaźnik ERD powinien być zgodny z naturalnym zachowaniem kierowcy podczas hamowania. Jeśli ERD jest znacznie mniejszy niż oczekiwał kierowca, system FCW wygeneruje przedwczesne ostrzeżenie i odwrotnie - jeśli ERD jest znacznie większy niż oczekiwał kierowca to ostrzeżenie będzie spóźnione.

W pracy [66], z wykorzystaniem symulatora jazdy, opracowano nową, nieliniową (odcinkową) funkcję ERD (wzór 4.18) ze składnikiem interakcji, która umożliwia przewidywanie ERD kierowców w scenariuszach wysokiego ryzyka. Dołączono do niej również liniową funkcję ERD (wzór 4.17) wyznaczoną podobnie jak w modelu CAMP. Ostateczna funkcja predykcyjna ERD łączy więc komponenty liniowe i nieliniowe. Rozwiązanie to zapewniło większą spójność generowanych ostrzeżeń z naturalnym zachowaniem kierowcy podczas hamowania zarówno w scenariuszach niskiego, jak i

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

wysokiego ryzyka. Badania zrealizowano dla opóźnień LV w zakresie od 0,25g do 0,75g i V_F i V_{rel} od 0 do 120 km/h. Skoncentrowano się na wymaganym tempie zwalniania niezbędnym do uniknięcia kolizji oraz na tempie rzeczywistym opartym na zachowaniach kierowców FV, aby przewidzieć ERD. W realizowanych badaniach wymagane stałe opóźnienie obliczano od momentu zainicjowania hamowania według następującej zależności:

$$a_r = \begin{cases} a_L + \frac{V_{rel}^2}{2R}; & \text{gdy } R \leq \frac{V_{rel} \cdot V_L}{2a_L} \\ \frac{V_F^2}{2\left(R + \frac{V_L^2}{2a_L}\right)}; & \text{gdy } R > \frac{V_{rel} \cdot V_L}{2a_L} \end{cases} \quad (4.15)$$

gdzie a_r to wymagane tempo zwalniania FV, V_{rel} to prędkość względna między pojazdami, V_F i V_L to prędkości odpowiednich pojazdów, a_L to tempo zwalniania LV (opóźnienie), a R to odstęp między LV a SV na początku hamowania pojazdu FV.

Aktualne (rzeczywiste), stałe tempo zwalniania kierowcy potrzebne do uzyskania rzeczywistej drogi hamowania obliczano według następującego wzoru:

$$a_{act} = \frac{V_F'^2 - V_F^2}{2\Delta S} \quad (4.16)$$

gdzie $V_F'^2$ to prędkość FV przy końcu przebiegu zdarzenia, a ΔS to odległość przebyta między początkiem hamowania FV a końcem zdarzenia. Zachowanie kierowców podczas jazdy określano na podstawie oprownia przepustnicą i pedałem hamulca. Zaobserwowano, że różnica między a_r a a_{act} zwiększa się, gdy wartość opóźnienia niezbędna do uniknięcia zderzenia jest powyżej 0,5g. Zatem im większe ryzyko kolizji tym gorsze jej postrzeganie przez kierowców.

Opracowany końcowy model przewidywania ERD kierowców przedstawiono w następującej postaci:

$$a_{FR1} = 0.557 + 0.75824a_L + 0.0135V_{rel} \quad (4.17)$$

$$a_{FR2} = -0.10996 + 1.174a_L + 0.033V_{rel} - 0.0472a_L \cdot V_{rel} \quad (4.18)$$

$$a_{FR} = \begin{cases} a_{FR1}; & \text{gdy } a_{FR2} < 0.3g \\ a_{FR2}; & \text{gdy } a_{FR2} \geq 0.3g \end{cases} \quad (4.19)$$

gdzie tempa zwalniania występują w $g[m/s^2]$, a prędkości w $[m/s]$. Odległość (zakres) początku ostrzeżenia WOR (Warning Onset Range) ustalono w czterech wypunktowanych poniżej krokach zgodnie z logiką stosowaną w [63].

1. Obliczanie przewidywanych prędkości dla FV i LV na początku zwalniania:

$$V_{FP} = V_{F0} - a_{F0} \cdot \tau \quad [m/s] \quad (4.20)$$

$$V_{LP} = V_{L0} - a_L \cdot \tau \quad [m/s] \quad (4.21)$$

$$\tau = t_r + \tau_s \quad [s] \quad (4.22)$$

gdzie V_{FP} i V_{LP} to przewidywane prędkości SV i LV na początku zwalniania FV, V_{F0} i V_{L0} , a_{F0} , a_L to warunki kinematyczne na początku zwalniania LV, a τ [s] to całkowity czas opóźnienia, t_r [s] to czas reakcji kierowcy ($t_r = 1,3$ s dla przypadku podążania), τ_s to opóźnienie systemu pojazdu ($\tau_s = 0,02$ s).

2. Obliczanie ERD = a_{FR} według równania (4.19).

3. Obliczanie żądanej odległości BOR i DTR na początku zwalniania FV:

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

$$BOR = \begin{cases} \frac{V_{FP}^2}{2a_{FR}} - \frac{V_{LP}^2}{2a_L}; & \text{gdy przypadek 1} \\ \frac{(V_{FP} - V_{LP})^2}{2(a_{FR} - a_L)}; & \text{gdy przypadek 2} \end{cases} \quad [m] \quad (4.23)$$

$$DTR = (V_{F0} - V_{L0}) \cdot \tau - 0.5(a_{F0} - a_L) \cdot \tau^2 \quad [m] \quad (4.24)$$

gdzie BOR (Brake Onset Range) oznacza odległość rozpoczęcia hamowania FV, DTR (Delay Time Range) oznacza odległość przebytą podczas czasu opóźnienia τ , przypadek 1: LV nieruchomy, gdy dochodzi do kontaktu FV i LV, przypadek 2: LV porusza się, gdy dochodzi do kontaktu FV i LV. Jeżeli $(V_{L0}/a_L) \leq (V_{FP}/a_{FR}) + \tau$, gdzie $a_{FR} > 0$, $a_L > 0$, wówczas LV jest nieruchomy podczas kontaktu (przypadek 1), w przeciwnym razie LV porusza się podczas kontaktu (przypadek 2).

4. Obliczanie odległości początku ostrzeżenia WOR

Odległość WOR (Warning Onset Range) obliczana jest jako suma BOR i DTR czyli:

$$WOR = R_{war} = BOR + DTR \quad [m] \quad (4.25)$$

Z przyjętych danych wynika, że odległość ostrzegawcza WOR, zależna od scenariusza BOR, waha się od 20 m do 140 m podobnie jak w przypadku CAMP. Wraz ze wzrostem opóźnienia LV i prędkości względnych WOR systematycznie wzrasta, co jest zgodne z oczekiwaniem kierowców. Opracowany model rozwiązuje więc problem modelu CAMP.

Adaptacyjne FCW zawierają również wplecione modele behawioralne kierowców ujmujące rozproszeniu uwagi kierowcy podczas jazdy i/lub motywacje [78, 79]. Rozproszenie uwagi kierowcy może nastąpić z różnych powodów takich jak: natłok informacji, rozmowy z pasażerami, zamyślenie, spożycie alkoholu czy środków odurzających. W przypadku rozproszenia uwagi obserwuje się dwie strategie działania: strategię zapobiegania rozproszeniu i strategię łagodzenia niekorzystnego wpływu rozproszenia na bezpieczeństwo jazdy. W pierwszym przypadku do kierowcy wysyłane są w odpowiednim czasie odpowiednio prezentowane (intensywność, modulacja) powiadomienia o rozproszeniu. W drugim w sposób ciągły monitorowane jest środowisko jazdy oraz kierowca i odpowiednio dostosowuje się system adaptacyjny w celu wsparcia kierowcy i akceptacji przez niego systemu w celu zwiększenia bezpieczeństwa jazdy. W tym celu wykorzystywane są dostępne środki jak czujniki monitorujące operowaniem pedałem przyspieszenia i hamulca czy kamery monitorujące zachowanie kierowcy (np. śledzeniu ruchów głowy i/lub wzroku kierowcy). W ten sposób łagodzone są negatywne skutki stanu rozproszenia uwagi. Przykładem tego drugiego podejścia jest algorytm adaptacyjny zaproponowany w pracy [80]. W czasie rzeczywistym monitorowana jest reakcja kierowcy na wygenerowane wcześniej ostrzeżenia i na tej podstawie aktualizowane są progi wyzwalania alertów ostrzegawczych zgodnie ze stanem poznawczym kierowcy. Reakcje kierowcy wyznaczano na podstawie danych magistrali CAN (Controller Area Network) dotyczących historii operowania pedałem przyspieszania, hamowania i kierunkowskazami (bez użycia kamer w pojeździe). Do klasyfikacji ujawniającej stopień rozproszenia uwagi wykorzystano wielowarstwową sieć neuronową jako jeden z elementów sztucznej inteligencji szeroko stosowanej w monitorowaniu rozproszenia. Generowanie ostrzeżenia w przedstawionym algorytmie odbywa się przez porównanie chwilowej wartości wskaźnika tolerancji ryzyka THW (THW_F) z

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

wyznaczonym elastycznym (stale aktualizowanym) progiem Th_{wt} . Gdy $THW(t) < Th_{wt}(t)$ generowane jest ostrzeżenie (gdzie t to czas). Wartość Th_{wt} zależy od stanu emocjonalnego kierowcy i może się zmieniać w różnych środowiskach i sytuacjach drogowych. Th_{wt} jest więc dostosowany do warunków drogowych i stylu jazdy kierowcy. W publikacji znajduje się szczegółowy algorytm wyznaczania $Th_{wt}(t)$ jego realizacja w różnych uwarunkowaniach środowiskowych i stanach kierowcy. W przypadku nagłego hamowania, gdzie Th_b to wstępnie przyjęty próg, alert generowany jest niezależnie. Przypadek hamowania ostrożnego (Th_{cd}) jest pomijany. W algorytmie Th_{cd} ustalany jest na 4s.

Badania sprawdzające działanie algorytmu zrealizowane z wykorzystaniem symulatora jazdy pokazały znaczną (80%) redukcję fałszywych ostrzeżeń w bezpiecznych scenariuszach jazdy. W sytuacjach niebezpiecznych algorytm wygenerował wszystkie konieczne ostrzeżenia. W tym przypadku wynik pokrył się z uzyskanym w algorytmie CAMP. W dalszych badaniach proponuje się rozszerzyć wskaźnik tolerancji ryzyka THW o TTC.

Przykładem adaptacyjnego FCW ujmującego psychologiczne motywacje kierowcy jest praca [77]. Model bazuje na czasie do zderzenia ujmującym kierunek poprzeczny i wzdłużny oraz uwzględnia kinematykę i dynamikę pojazdu. Łączny czas TTC wyznaczany jest na podstawie dwuwymiarowej macierzy określającej dwuwymiarowe pole (2D), w której każdy element odpowiada odpowiedniemu dyskretnemu kątowi skręcenia kół samochodu i prędkości. Dyskretny algorytm przydziela potencjalne punkty kolizji i jest powtarzany dla wszystkich zdyskretyzowanych odległości, prędkości i kątów skrętu kół pojazdu. Motywacje psychologiczne kierowcy są wykorzystane do oceny ryzyka w niebezpiecznych sytuacjach. Obejmują żądanie zadania, możliwości kierowcy, margines bezpieczeństwa, nieprzystępność cenową (funkcją kosztu problemu optymalizacyjnego) i strach przed poślizgiem pojazdu. Oceniane są na podstawie uogólnionego czasu do kolizji, czasu opóźnienia kierowcy i osiągnięć pojazdu. Algorytm składa się z modelu kierowcy i funkcji aktywacji. Jeżeli funkcja aktywacji wykryje, że kierowca nie podoła zadaniu to pojazdem kieruje model kierowcy. Opracowany adaptacyjny algorytm motywacyjny ma duży potencjał rozwojowy i aplikacyjny. Obejmuje nie tylko kolizje wzdłużne ale i poprzeczne, a jego zdyskretyzowana postać matematyczna pozwala na skrócenie czasu obliczeń szczególnie w takich przypadkach jak śledzenie obiektów i wyznaczanie trajektorii ruchu pojazdu. Badania jego skuteczności przeprowadzono jednak tylko z wykorzystaniem symulatora, ponadto obejmowały tylko 10 kierowców. Matematyczna postać algorytmu jest przedstawiona w podanej publikacji. Ze względu na jej złożoną postać pominięto jej prezentację w niniejszym opracowaniu.

5. Podsumowanie

Dokonano przeglądu i przeprowadzono analizę stanu bezpieczeństwa na drogach w ostatnich 20 latach w Europie i innych regionach świata na podstawie danych literaturowych. Przedstawiono funkcje i ocenę skuteczności wybranych czynnych systemów wspomagania kierowcy ADAS (Advanced Driver Assistance Systems). Na koniec omówiono wybrane algorytmy podsystemu ostrzegania przed kolizją z przodu FCW (Forward Collision Warning).

Według danych WHO (World Health Organization) liczba ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych na świecie w latach 2000 - 2016, przypadająca na 100 tys. pojazdów,

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

zmałała o ponad 47%, pomimo wzrostu liczby pojazdów silnikowych i niedostatkach w infrastrukturze drogowej. Zmniejszenie liczby osób z obrażeniami jest jednak znacznie mniejsze, a w niektórych przypadkach (lata i kraj) obserwuje się nawet wzrosty. Kolizje drogowe pociągają za sobą duże koszty społeczne i materialne. W krajach o niskich i średnich dochodach koszt ten sięga nawet 5% ich produktu narodowego brutto.

Badania literaturowe analizujące przyczyny wypadków drogowych wymieniają trzy główne czynniki: zachowanie ludzi, środowisko drogowe oraz pojazd i jego stan. Wyniki tych badań pokazują, że człowiek odpowiada za 41% wypadków, czynnik środowiskowy za 26%, a czynnik pojazdu ma udział w 33%. W około 94% wypadków przyczyna krytyczna w łańcuchu przyczynowo-skutkowym, została przypisana kierowcom pojazdów. Środowisko jazdy i cechy psychofizyczne kierowcy mają duży wpływ na popełnianie przez nich błędy.

Duży udział w zmniejszeniu liczby wypadków i kolizji drogowych mają systemy ADAS montowane w samochodach. Wchodzące w ich skład podsystemy (funkcje) można podzielić na te, które wspomagają kierowcę w bezpiecznym prowadzeniu pojazdu i funkcje zautomatyzowane. Do pierwszej grupy należy system ostrzegania przed kolizją z przodu FCW, a do drugiej system autonomicznego hamowania awaryjnego AEB (Autonomous Emergency Braking). AEB włącza się do akcji, gdy ostrzeżenia o zagrożeniu kolizją wysyłane do systemów ostrzegających, takich jak FCW, nie spowodują odpowiedniej reakcji kierowcy. Przeprowadzone badania i oceny różnych podsystemów i ich grup w ADAS pokazują znaczący ich udział w zmniejszeniu liczby kolizji i ich ofiar. Analiza skuteczności FCW, AEB i połączonych systemów FCW/AEB przeprowadzona w jednej z prac wykazała zmniejszenie zderzeń z tyłu odpowiednio o 27%, 43% i 50%. Połączone systemy a w szczególności AEB pełni kluczową rolę w systemie.

Podstawą każdego podsystemu ADAS jest algorytm jego działania, a w przypadku systemów ostrzegających generowania ostrzeżeń o zagrożeniu kolizją. W przypadku FCW można wyróżnić algorytmy percepcyjne i kinematyczne zwane deterministycznymi oraz adaptacyjne, które są ulepszoną postacią poprzednich. Algorytmy adaptacyjne łagodzą wady algorytmów deterministycznych wprowadzając w ich ramy modele psychologiczne kierowcy oraz modele uwzględniające zmienność parametrów kinematycznych i dynamicznych samochodu w różnych warunkach środowiskowych. Ich zaletą w porównaniu do deterministycznych jest ograniczenie generowania alertów ostrzegawczych w niewłaściwym czasie. W opracowaniu przedstawiono podstawowe cechy tych algorytmów, ich krótką ocenę, a w większości również postać matematyczną modelu.

Literatura

- [1] WHO (World Health Organization): GLOBAL STATUS REPORT ON ROAD SAFETY 2015
<https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>
- [2] WHO (World Health Organization): GLOBAL STATUS REPORT ON ROAD SAFETY 2018
- [3] European Commission: Road safety study for the interim evaluation of Policy Orientations on Road Safety 2011-2020. Jeanne Breen Consulting, February 2015
- [4] Aniket Bhawkar: Severe Traffic Accidents in United Kingdom. ResearGate, Technical Report, November 2018

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

- [5] European Commission: European Road Safety Observatory, Annual statistical report on road safety in the EU 2022. Version 3.0, February 2023
- [6] Yaacob N.F.F., Rusli N., Bohari S. N.: A Review Analysis of Accident Factor on Road Accident Cases Using Haddon Matrix Approach. Proceedings of the Second International Conference on the Future of ASEAN (ICoFA), Volume 2, Singapore 2017 pp. 55-65
- [7] NHTSA DOT HS 812 115: Traffic Safety Facts, Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey. A Brief Statistical Summary, February 2015
- [8] NHTSA DOT HS 812 506: Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey. A Brief Statistical Summary, March 2018
- [9] Shi Cao, Siby Samuel, Jianwei Niu: Hazard Perception in Driving: A Systematic Literature Review. Journal of the Transportation Research Board, Volume 2676, Issue 12, June 15, 2022. <https://doi.org/10.1177/03611981221096666>
- [10] Yasaman Habibzadeh, Mohammad Hossein Yarmohammadian, Homayoun Sadeghi-Bazargani: Driving Hazard Perception Components: A Systematic Review and Meta-Analysis. National Library of Medicine, Bull Emerg Trauma. 2023; 11(1): 1–12. doi: 10.30476/BEAT.2023.95410.1356
- [11] Panagiotis Papantoniou, George Yannis, Eleni Christofa: Which factors lead to driving errors? A structural equation model analysis through a driving simulator experiment. ScienceDirect, IATSS Research, Volume 43, Issue 1, April 2019, pp. 44-50
- [12] Dimitris Potoglou, Fabio Carlucci, Andrea Cirà, Marialuisa Restaino: Factors associated with urban non-fatal road-accident severity. International Journal of Injury Control and Safety Promotion, Volume 25 (3), 2018, pp. 303-310
- [13] Elizabeth D. Swanson, Frank Foderaro, Mikio Yanagisawa, Wassim G. Najm, and Philip Azeredo: Statistics of Light-Vehicle Pre-Crash Scenarios Based on 2011-2015 National Crash Data. NHTSA DOT HS 812 745, August 2019
- [14] Wiesław Szada-Borzyszkowski, Monika Szada-Borzyszkowska: Wpływ prędkości pojazdów na wielkość uszkodzeń podczas zderzenia. Autobusy 6/2015
- [15] Mirosław Gidlewski, Leon Prochowski, Wojciech Wach: Determining the Position and State of Post-Impact Motion of a Motor Vehicle Struck on its Side at a Road Intersection, Based on Experimental Tests. Transport, 2019, 34(3): 330–338. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.9684>
- [16] Masoumeh Parseh, Fredrik Asplund: New needs to consider during accident analysis: Implications of autonomous vehicles with collision reconfiguration systems. Elsevier, Tom 173, sierpień 2022, 106704
- [17] European Commission: EU ROAD SAFETY POLICY FRAMEWORK 2021-2030, Next steps towards Vision Zero. Mobility and Transport, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2020
- [18] Chiradeep BasuMallick: What Is ADAS (Advanced Driver Assistance Systems)? Meaning, Working, Types, Importance, and Applications, CR Consumer Reports, July 15, 2022
- [19] European Commission: Advanced driver assistance systems 2016 ([**WAT** Wojskowa
Akademia
Techniczna](https://road-</div><div data-bbox=)

CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)

- safety.transport.ec.europa.eu/system/files/2021-07/ersosynthesis2016-das15_en.pdf
- [20] Keith Barry: Clearing the Confusion About Advanced Car-Safety Feature Names. CR Consumer Reports, July 26, 2022
- [21] Adam Ziebinski, Rafal Cupek, Damian Grzechca, Lukas Chruszczyk. Review of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). Proceedings Of The International Conference Of Computational Methods In Sciences And Engineering 2017 (Iccmse-2017). DOI: 10.1063/1.5012394
- [22] Prasad R., et al.: Vehicles, Advanced Features, Driver Behavior, and Safety: A Systematic [22] Review of the Literature. Journal of Transportation Technologies, 2022, 12, pp. 420-438. DOI: 10.4236/jtts.2022.123026
- [23] Surya Kollazhi Manghat: Multi Sensor Multi Object Tracking In Autonomous Vehicles. PHD Thesis, Purdue University Indianapolis, Indiana December 2019
- [24] Lesemann Micha: Testing and Evaluation Methods for ICT-based Safety Systems. eVALUE Consortium 2008, ICT-2007-215607
- [25] ADAS Advanced Driver Assistance Systems.
(<https://www.markoweszyby.pl/aktualnoci-i-produkty/159-adas-zaawansowane-systemy-wspomagania-kierowcy.html>)
- [26] Harsha Archak: Sensor fusion for ADAS / AD vehicles road safety. Domain SME, 01 Mar 2023; <https://www.cyient.com/blog/sensor-fusion-driving-enhanced-safety-of-adas-ad-vehicles>
- [27] Alsuwian T., Saeed R., B. and Amin A., A.: Autonomous Vehicle with Emergency Braking Algorithm Based on Multi-Sensor Fusion and Super Twisting Speed Controller. Appl. Sci. 2022, 12(17), 8458; <https://doi.org/10.3390/app12178458>
- [28] Andrzej Stateczny, Marta Włodarczyk-Sielicka, Paweł Burdziakowski: Sensors and Sensor's Fusion in Autonomous Vehicles. Sensors 2021, 21, 6586. <https://doi.org/10.3390/s21196586>
- [29] S. Dhiviya, S. Malathy, D. Rajesh Kumar: Internet of Things (IoT) Elements, Trends and Applications. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience Vol. 15, 2018, 1–5
- [30] Neelu Sinha: Emerging Technology Trends in Vehicle-to-Everything Connectivity. IEEE, 27 October 2019. DOI: 10.1109/WTS.2019.8715535
- [31] K. Suganthi, M. Arun Kumar, N. Harish, S. HariKrishnan, G. Rajesh, S. Sofana Reka: Advanced Driver Assistance System Based on IoT V2V and V2I for Vision Enabled Lane Changing with Futuristic Drivability, Sensors 2023, 23, 3423. (<https://doi.org/10.3390/s23073423>)
- [32] Felipe Jiménez, José Eugenio Naranjo, José Javier Anaya, Fernando García, Aurelio Ponz, José María Armingo: Advanced Driver Assistance System for Road Environments to Improve Safety and Efficiency. Elsevier, Transportation Research Procedia 14, December 2016, pp.2245 – 2254. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.240
- [33] Samir A. Elsagheer Mohamed, Khaled A. Alshalfan, Mohammed A. Al-Hagery and Mohamed Tahar Ben Othman: Safe Driving Distance and Speed for Collision Avoidance in Connected Vehicles. Sensors 2022, 22(18), 7051.

CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)

- <https://doi.org/10.3390/s22187051>
- [34] M. Jalal Khan, Manzoor Ahmed Khan, Azam Beg, Sumbal Malik, Hesham El-Sayed: An overview of the 3GPP identified Use Cases for V2X Services. Elsevier, Procedia Computer Science, Volume 198, 2022, pp. 750-756
- [35] Chiradeep BasuMallick: What Is Telematics? Meaning, Working, Types, Benefits, and Applications in 2022. Spiceworks, August 12, 2022
- [36] SAE Standards: J3016 Levels of Driving Automation.
<https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>
- [37] Diane Cleij: European Road Safety Observatory Road Safety Thematic Report Advanced driver assistance systems. European Commission, Version 1.1, December 2021
- [38] Jing-Shiarn Wang: Target Crash Population for Crash Avoidance Technologies in Passenger Vehicles. National Center for Statistics and Analysis. NHTSA DOT HS 812 653, March 2019
- [39] Andrew J. Leslie, Raymond J. Kiefer, Carol A. Flannagan, Susan H. Owen, Brandon A. Schoettle: Analysis of the Field Effectiveness of General Motors Model Year 2017-2021. Advanced Driver Assistance System Features. University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), General Motors LLC, March 3, 2023
- [40] Norma Hubelea and Kathryn Kennedy: Forward collision warning system impact. Traffic Injury Prevention 2018, Vol. 19, No. S2, pp. S78–S83.
doi.org/10.1080/15389588.2018.1490020
- [41] Seyed M., R. Koloushani M., R., Jung S., Vanli a.: Safety Assessment and a Parametric Study of Forward Collision-Avoidance Assist Based on Real-World Crash Simulations. Journal of Advanced Transportation Volume 2021, pp. 1-24. ID 4430730
<https://doi.org/10.1155/2021/4430730>
- [42] Jessica B. Cicchino: Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates. Elsevier, Accident Analysis & Prevention, Accident Analysis & Prevention, Volume 99, Part A, February 2017, pp. 142-152
- [43] Bärgrman J., Victor T.: Holistic assessment of driver assistance systems: how can systems be assessed with respect to how they impact glance behaviour and collision avoidance? IET Intelligent Transport Systems, Vol. 14 Iss. 9, 2020, pp. 1058-1067
- [44] Wenjing Zhao, Siyuan Gong, Dezong Zhao, Helai Huang: Developing a new omnidirectional collision warning system for intelligent vehicles. SSRN Electronic Journal, January 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4291478
- [45] Ramezani-Khansari E., et al.: Comparing time to collision and time headway as safety criteria. Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 27(6), 2021, pp. 669-675
- [46] Mammar et al.: Time to Line Crossing for Lane Departure Avoidance: A Theoretical Study and an Experimental Setting. IEEE, Transactions On Intelligent Transportation Systems, Vol. 7, No. 2, June 2006
- [47] Yu Zhang, David B. Kaber: An empirical assessment of driver motivation and emotional states in perceived safety margins under varied driving conditions. Ergonomics, Volume 56, 2013 -Issue 2

CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)

- [48] S. B. McLaughlin, J. M. Hankey, T. A. Dingus and S. G. Klauer: Development of an FCW Algorithm Evaluation Methodology With Evaluation of Three Alert Algorithms. Report No. DOT HS 811 145, NHTSA, Jane 2009
- [49] D. N Lee. A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception* 5 (4) (February 1976), pp. 437–459. DOI: 10.1068/p050437
- [50] Haleh Fotowat and Fabrizio Gabbiani: Collision Detection as a Model for Sensory-Motor Integration. *Annual Review of Neuroscience* 34 (2011), pp. 1–19. doi: 10.1146/annurev-neuro-061010-113632
- [51] Taieb-Maimon, M. and Shinar, D., 2001. Minimum and comfortable driving headways: reality versus perception. *The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 43 (1), 2001, pp159–172
- [52] Lu G., et al.: Quantitative indicator of homeostatic risk perception in car following. *Safety Science* Vol. 50, No. 9, November 2012, pp. 1898–1905
- [53] Katja Vogel: A comparison of headway and time to collision as safety indicators. Elsevier, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 35, Issue 3, May 2003, pp. 427-433
TTCx] też na FCW2
- [54] Mamdoohi A., R. et al: Comparative Analysis of Safety Performance Indicators Based on Inductive Loop Detector Data. *Promet – Traffic&Transportation*, Vol. 26, 2014, No. 2, 139-149
- [55] Y. Fujita, K. Akuzawa, and M. Sato, Radar brake system, Elsevier, *JSAE Rev.*, Vol. 16, Issue 2, April 1995, Page 219
- [56] Seiler, P., Song, B., Hedrick, J. K.: Development of a Collision Avoidance System. Society of Automotive Engineers, 1998
- [57] Yizhen Zhang, Erik K. Antonsson and Karl Grote: A New Threat Assessment Measure for Collision Avoidance Systems. *Proceedings of the IEEE ITSC 2006, IEEE Intelligent Transportation Systems Conference* Toronto, Canada, September 17-20, 2006
- [58] Lee K., Peng H.: Evaluation of automotive forward collision warning and collision avoidance algorithms. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 43, No. 10, October 2005, pp.735-751
- [59] Zhang Y. J., et al.: A Safety Collision Avoidance Algorithm Based on Comprehensive Characteristics. *Hindawi*, Volume 2020
ID 1616420, <https://doi.org/10.1155/2020/1616420>
- [60] Hirst S. and Graham R.: The format and perception of collision warnings. *Ergonomics and Safety of Intelligent Driver Interfaces*. Mahwah, NJ, USA: Lawrence Erlbaum Associates, 1997, pp. 203–219.
- [61] Brown et al.: Human performance models and rear-end collision avoidance algorithms. *Human Factors and Ergonomics Society*, 2001, Vol. 43, No. 3, pp. 462–482
- [62] Bella F., Russo R.: A Collision Warning System for rear-end collision: a driving simulator study. Elsevier, *Procedia Social and Behavioral Sciences* 20, 2011, pp.676-686
- [63] Kiefer R., J et al.: Development And Validation Of Functional Definitions And Evaluation Procedures For Collision Warning/Avoidance Systems. *NHTSA Report No.*

CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)

- DOT HS 808 964, August 1999
- [64] Kiefer R., J. et. al.: Forward collision warning requirements project : refining the CAMP crash alert timing approach by examining "last second" braking and lane change maneuvers under various kinematic conditions. HHTSA Report No. DOT HS 809 574, January 2003
- [65] Kiefer R., J. et al.: Developing an inverse time-to-collision crash alert timing approach based on drivers' last-second braking and steering judgments. Elsevier, Accident Analysis & Prevention, Volume 37, Issue 2, March 2005, pp. 295-303
- [66] Wang, X., Chen, M., Zhu, M. and Tremont, P.: Development of a kinematic-based forward collision warning algorithm using an advanced driving simulator. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.17, No.9(2016), pp.2583-2591
- [67] Khaleghian M., Emami A., and Taheri S.: A technical survey on tire-road friction estimation. Friction, Vol. 5, No. 2, 2017, pp. 123–146
- [68] Wilson T., W. Butler W., Maghee D., and Dingus T.: Forward-looking collision warning system performance guideline. Proceedings of Int. Congress Exposition, Detroit, MI, USA, 1997, SAE Technical Paper 970456
- [69] Wilson, T. et al: Light vehicle forward-looking, rear-end collision warning system performance guidelines. Sensor Technologies & Systems, Inc, May 7, 1998
- [70] Doi, A., Butsuen, T., Niibe, T., Takagi, T., Yamamoto, Y., Seni, H.: Development of a rear end collision avoidance system with automatic brake control. Elsevier, Jsaer Review. Volume 15(4), October, pp. 1994, 335-340
- [71] Seiler, P., Song, B., Hedrick, J. K., 1998. Development of a collision avoidance system. SAE Transactions. 1334-1340
- [72] Sean Seaman, Pnina Gershon, Linda Angell, Bruce Mehler, Bryan Reimer: Evaluating the Associations between Forward Collision Warning Severity and Driving Context. Safety 2022, 8(1), 5. doi.org/10.3390/safety8010005
- [73] Alsuwian T., Saeed R., B. and Amin A., A.: Autonomous Vehicle with Emergency Braking Algorithm Based on Multi-Sensor Fusion and Super Twisting Speed Controller. Appl. Sci. 2022, 12(17), 8458; <https://doi.org/10.3390/app12178458>
- [74] Wang G., et al: Integrated Path tracking control of steering and braking based on holistic MPC. IFAC-PapersOnLine, Volume 54, Issue 2, 2021, pp. 45-50
- [75] Sarkar A., et al: Steering Or Braking Avoidance Response In Sharp Rear-End Crashes And Near-Crashes: A Decision Tree Approach. Elsevier, Accid Anal Prev., 2021 May; 154:106055. Doi: 10.1016/j.aap.2021.106055
- [76] Lishengsa Yue, Mohamed Abdel-Aty, Yina Wu, Jorge Ugan, Cheng Yuan: Effects of forward collision warning technology in different pre-crash scenarios. Elsevier, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Volume 76, January 2021, pp. 336-352
- [77] Hamed Mozaffari and Ali Nahvi: A motivational driver model for the design of a rear-end crash avoidance system. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Volume 234, Issue 1, January 2020, pp. 10-26

**CENTRUM WIEDZY O DOSTĘPNOŚCI DO TRANSPORTU I MOBILNOŚCI OSÓB O SZCZEGÓLNYCH POTRZEBACH
(POWR.03.05.00-00-CW07/20)**

-
- [78] Katharina Nora Charlotte Reinmüller: Towards the Adaptation of Warning Driver Assistance: Behavioral Effects and Implications. PHD, Würzburg Mai 2019 [F290]
- [79] Wang J., at al: A Forward Collision Warning Algorithm with Adaptation to Driver Behaviors. Ieee Transactions On Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, No. 4, April 2016
- [80] Mehdi S., at al.: An Adaptive Forward Collision Warning Framework Design Based on Driver Distraction. Journal of Latex Class Files, Vol. 14, No. 8, August 2015

.....
Data

.....
Podpis Lidera Zespołu