

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA INŻYNIERIA LĄDOWA I TRANSPORT
DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Paula Razin

**Metoda oceny przejęcia kontroli sterowania przez kierowcę
w pojazdach z warunkową autonomizacją**

Promotor
prof. dr hab. inż. Iwona Grabarek

WARSZAWA 2022

*Podziękowania kieruję do Pani Profesor Iwony Grabarek,
która wspierała mnie merytorycznie na każdym etapie powstawania pracy.
Dziękuję za pomoc, cenne uwagi, podzielenie się swoją wiedzą i doświadczeniem,
a także za okazaną życzliwość, wyrozumiałość i ogromną empatię.*

*Dziękuję również Kolegom i Koleżankom z Centrum Telematyki Transportu
Instytutu Transportu Samochodowego za merytoryczną pomoc i wsparcie w przygotowaniu
dysertacji. Podziękowania składam również Dyrekcji za możliwość realizacji badań w ITS.*

*Pracę dedykuję mojej Rodzinie, w szczególności Mężowi, Rodzicom, Babci oraz Dzieciom.
Dziękuję za wsparcie i nieocenioną pomoc. To dzięki Najbliższym nie poddałam się
w chwilach zwątpienia. Są moją inspiracją i motywacją do dalszego rozwoju.*

STRESZCZENIE

Metoda oceny przejścia kontroli sterowania przez kierowcę w pojazdach z warunkową autonomizacją

Poziom autonomizacji jest silnie związany z problemem delegowania kontroli nad pojazdem i jej zakresu w trakcie jazdy. Zasadnicza rola kierowcy zmienia się wraz ze wzrostem stopnia autonomizacji i przekazywania kontroli systemowi. Kierowca z pozycji decydenta przechodzi na pozycję pasażera, jednak z możliwością przejęcia funkcji sterowniczych, co wymaga z jego strony wysokiej świadomości sytuacyjnej. Kluczowe jest zwiększenie efektywności współpracy między kierowcą a systemem poprzez zaprojektowanie interfejsów w taki sposób, aby kierowca rozumiał bieżące i planowane działania pojazdu oraz znał jego ograniczenia.

Analiza literatury w zakresie systemów autonomizujących kierowanie pojazdem pozwoliła na opracowanie procedury badań własnych przeprowadzonych w ramach rozprawy oraz zbioru parametrów poddanych analizie na potrzeby opracowania modelu. Metoda oceny przejścia kontroli sterowania przez kierowcę w pojazdach z warunkową autonomizacją wymagała zatem przeprowadzenia badań symulatorowych, podczas których poprawność przejęcia kontroli oceniana była na podstawie czasu reakcji kierowcy na sygnały wysyłane przez samochód informujące o konieczności przejęcia kontroli. Uzupełnieniem metody były badania ankietowe określające stopień komfortu w trakcie przejmowania kontroli nad pojazdem, które przeprowadzono bezpośrednio po zakończeniu jazdy symulatorem.

Informowanie kierujących o konieczności transferu kontroli odbywało się poprzez dedykowane interfejsy HMI wykorzystujące sygnały odbierane kanałem słuchowym, wzrokowym lub dotykowym w postaci wibracji. Sygnały i komunikaty przekazywane były za pomocą wyświetlaczy zamieszczonych w panelu sterowania oraz na tablicy rozdzielczej w pojeździe. Założono, że interpretacja sygnałów powinna odbywać się szybko i wywoływać właściwą reakcję kierowcy na zaistniałą sytuację. Celem przeprowadzonego eksperymentu badawczego było określenie czynników wpływających na poprawność przejęcia kontroli. W badaniach wykorzystano scenariusze, obejmujące konieczność przejęcia przez kierujących kontroli w wybranych sytuacjach drogowych (prace drogowe obejmujące przebudowę drogi i jej objazd wyznaczoną trasą alternatywną, a także dwa wypadki drogowe). Podstawową badaną zmienną zależną był czas od momentu pojawienia się komunikatu w jednej z trzech form (wizualnie; wizualnie i dźwiękowo; wizualnie, dźwiękowo i haptycznie) do momentu wykonania przez kierowcę znaczącej interwencji w postaci wciśnięcia pedału przyspieszenia, hamulca lub skrętu kierownicą.

Do oceny poprawności przejmowania kontroli wykorzystano model rozmyty, do opracowania którego posłużyły wyniki badań eksperymentalnych. Za najważniejszy parametr rejestrowany przez symulator przyjęto czas przejścia kontroli nad pojazdem. Do budowy modelu wykorzystano także ocenę poczucia komfortu kierujących podczas przejmowania kontroli. Zastosowanie metody heurystycznej w postaci logiki rozmytej pozwoliło na kompleksowe podejście do poruszanego tematu i optymalne wykorzystanie ograniczonej wielkości zbioru danych. W dysertacji wskazano najefektywniejszy sposób informowania kierowców o konieczności przejęcia kontroli za pomocą dedykowanych interfejsów wykorzystujących konkretne modalności, a także różnice pomiędzy odbiorem informacji z interfejsów o różnej modalności w poszczególnych grupach wiekowych oraz wśród kobiet i mężczyzn. Badania eksperymentalne oraz utworzony model pozwoliły na określenie wpływu czasu transferu oraz oceny jego komfortu na poprawność przejęcia kontroli nad pojazdem w sytuacji tego wymagającej. Wiedza ta może posłużyć do wdrożenia odpowiednich systemów w nowopowstających zautonomizowanych pojazdach.

Słowa kluczowe: warunkowa autonomizacja, przejmowanie kontroli sterowania, pojazdy zautonomizowane, symulatory jazdy.

ABSTRACT

Assessment method of taking over steering control by the driver in vehicles with conditional autonomy

The level of automation is strongly related to the problem of delegating control of the vehicle and its extent while driving. The essential role of the driver changes as the level of automation and delegation of control to the system increases. The driver moves from the position of decision-maker to that of a passenger, but with the possibility of taking over control functions, which requires a high degree of situational awareness on his part. The key is to increase the effectiveness of driver-system interaction by designing the interfaces so that the driver understands the current and planned actions of the vehicle and knows its limitations.

The analysis of the literature in the field of autonomizing driving systems allowed to develop the procedure of own research conducted within the framework of the dissertation and the set of parameters analyzed for the purpose of model development. The method for evaluating the assumption of control by the driver in vehicles with conditional automation thus required simulator tests, during which the correctness of assumption of control was evaluated on the basis of the driver's reaction time to signals sent by the car informing of the need to take control. The method was complemented by surveys determining the degree of comfort during the takeover of control of the vehicle, which were conducted immediately after the simulator ride.

Informing drivers to transfer control was done through dedicated HMIs using signals received through auditory, visual, or tactile vibration channels. Signals and messages were communicated via displays located in the control panel and on the dashboard in the vehicle. It was assumed that the interpretation of the signals should take place quickly and evoke an appropriate reaction of the driver to the situation. The aim of the conducted research experiment was to determine the factors influencing the correctness of taking control. We used scenarios involving the need for drivers to take control in selected traffic situations (road works including road reconstruction and its detour along an alternative route, as well as two traffic accidents). The primary dependent variable studied was the time from the moment the message appeared in one of three forms (visual; visual and auditory; visual, auditory, and haptic) until the driver made a meaningful intervention in the form of pressing the accelerator, brake, or turning the steering wheel.

A fuzzy model was used to evaluate the correctness of taking control, which was developed using the results of experimental studies. The most important parameter registered by the simulator was the time of taking control over the vehicle. To build the model, the evaluation of the drivers' feeling of comfort during taking control was also used. Application of the heuristic method in the form of fuzzy logic allowed for optimal use of a limited size of the data set and for taking into account variables of different nature (measurable and non-measurable). The dissertation indicates the most effective way of informing drivers about the need to take control by means of dedicated interfaces using specific modalities, as well as differences between the reception of information from interfaces of different modalities in different age groups and among females and males. Experimental studies and the model created allowed to determine the impact of transfer time and the assessment of its comfort on the correctness of taking control of the vehicle in a situation requiring it. This knowledge can be used to implement appropriate systems in newly created autonomized vehicles.

Keywords: conditional automation, control takeover, autonomous vehicles, driving simulators.

SPIS TREŚCI

Streszczenie	5
Abstract	6
Spis treści	7
1. Wstęp.....	9
1.1. Przesłanki podjęcia tematu	11
1.2. Cel i teza rozprawy	12
2. Zagadnienie autonomizacji pojazdów – przegląd badań	13
2.1. Systemy autonomizujące kierowanie pojazdem	16
2.1.1. Poziomy autonomizacji pojazdów	16
2.1.2. Klasyfikacja systemów autonomizujących jazdę.....	20
2.2. Rola czynnika ludzkiego w autonomizacji pojazdów	21
2.3. Rola i rodzaje bodźców w procesie przejmowania kontroli.....	27
2.4. Wpływ zastosowania poszczególnych modalności na kierowców.....	29
2.5. Transfer kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją	60
2.6. Wykorzystanie symulatorów jazdy w badaniach kierowców.....	66
3. Metoda oceny przejścia przez kierowcę kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją	68
3.1. Założenia metody i cel badań	68
3.2. Charakterystyka grupy badawczej.....	69
3.3. Metoda monitorowania choroby symulatorowej	70
3.4. Procedura realizacji eksperymentu	73
3.5. Stanowisko badawcze do oceny przejścia kontroli sterowania przez kierowcę.....	75
3.5.1. Symulator samochodu osobowego	75
3.5.2. Stanowisko multisensoryczne do oceny poprawności działania czynnika ludzkiego.....	77
3.6. Scenariusz badawczy na symulatorze jazdy	83
3.7. Procedura badań ankietowych	88
3.8. Model rozmyty do oceny poprawności przejścia przez kierowcę kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją	89
4. Analiza wyników	96
4.1. Wyniki badań symulatorowych	96
4.2. Subiektywna ocena procesu przejścia kontroli - wyniki badań ankietowych	102

4.2.1. Subiektywna ocena procesu przejścia kontroli z trybu autonomicznego do manualnego.....	102
4.2.2. Subiektywna ocena procesu przejścia kontroli z trybu manualnego do autonomicznego.....	104
4.2.3. Subiektywna ocena poziomu bezpieczeństwa podczas jazdy autonomicznej.....	105
4.3. Ocena poprawności przejścia kontroli na podstawie modelu rozmytego	106
5. Podsumowanie i wnioski.....	113
Bibliografia.....	116
Wykaz skrótów.....	126
Spis rysunków	128
Spis tabel	132
Załączniki	133
Załącznik nr 1 – Checklist.....	133
Załącznik nr 2 – Zgoda na udział w badaniu	134
Załącznik nr 3 – Oświadczenie osoby przystępującej do jazdy na symulatorze.....	135
Załącznik nr 4 – Ankieta uczestnika (metryczka).....	136
Załącznik nr 5 – SSQ1	138
Załącznik nr 6 – SSQ2	139
Załącznik nr 7 – Kwestionariusz dotyczący autonomizacji.....	140
Załącznik nr 8 – Lista parametrów rejestrowanych przez symulator	141

1. WSTĘP

Rozwój techniki pozwalającej na autonomiczną jazdę samochodów jest obecnie jedną z najbardziej dynamicznych gałęzi przemysłu technologicznego. Naukowcy nadal pracują nad poprawą bezpieczeństwa, którą muszą gwarantować takie pojazdy. Samochody wyposażane są w zestawy sensorów, czujników i modułów łączności, które mają na celu zapewnienie kierowcom bezpieczeństwa w niestandardowych sytuacjach w trakcie jazdy. Szereg dodatkowych rozwiązań ułatwia komunikację i kontrolę sytuacji na drodze, poprawia jakość panowania nad pojazdem oraz zwiększa komfort i ochronę pasażerów [36]. Mimo coraz bardziej zaawansowanych rozwiązań technologicznych systemów wspomagających, kierowca wciąż musi zachować czujność w przypadku błędu systemu i wynikającej z tego konieczności przejęcia kontroli nad pojazdem.

Dynamiczny rozwój transportu wysoce zautomatyzowanego wpływa nie tylko na powstawanie nowoczesnych rozwiązań technologicznych, ale także ma bezpośredni wpływ na kierowcę korzystającego z proponowanych rozwiązań. Systemy HMI (ang. Human Machine Interface) dedykowane pojazdom z warunkową autonomizacją mają za zadanie szybko i właściwie przekazywać informację kierującemu, który w newralgicznych sytuacjach drogowych może być zmuszony do przejęcia sterowania nad pojazdem [20]. W trakcie jazdy pojazdem z warunkową autonomizacją kierujący może w każdej chwili odzyskać kontrolę nad pojazdem lub system pojazdu może wygenerować takie żądanie. Transfer kontroli to faza aktywności kierowcy, w której musi on sprostać wymaganiom przejęcia manualnej kontroli nad pojazdem przez wykonanie czynności właściwej dla prowadzenia pojazdu. Podstawowa różnica dla transferu kontroli występuje pomiędzy systemami poziomów 2, 3 i 4. Na poziomie 2 zakłada się, że kierowca musi od razu przejąć kontrolę nad pojazdem po dezaktywacji systemu. Z kolei na poziomach 3 i 4 zakłada się, że kierowca powinien posiadać zapas czasu na przejęcie kontroli. Prawidłowy przebieg tego procesu jest wspomagany przez systemy HMI dedykowane pojazdom z warunkową autonomizacją, których zadaniem jest sprawne przekazywanie informacji kierującemu, aby ułatwić mu w newralgicznych sytuacjach drogowych przejęcie sterowania nad pojazdem [20].

Analiza tych zagadnień jest tematem badań prowadzonych w najważniejszych ośrodkach naukowych na świecie [11][23][33][44][86][110], w tym również w Polsce m.in. w Instytucie Transportu Samochodowego.

Poziom automatyzacji jest nierozdzielnie związany z problemem delegowania kontroli nad pojazdem i jej zakresu w trakcie jazdy [20]. Różny stopień zaangażowania

kierowcy w sterowanie pojazdem wymaga zachowania odpowiedniej równowagi między kierowcą i samochodem oraz dynamicznymi zmianami wynikającymi z poziomu przekazanej systemowi kontroli. Wraz ze wzrostem stopnia automatyzacji i przekazywania kontroli systemowi istotnie zmienia się rola kierowcy. Oddając funkcje sterownicze, staje się on ogniwem nadzorującym poprzez monitorowanie inteligentnego systemu. Kierowca z pozycji decydenta, poprzez współudział w kierowaniu, przechodzi na pozycję pasażera, jednak z możliwością przejęcia funkcji sterowniczych w każdej chwili. W celu zwiększenia efektywności współpracy między kierowcą a systemem bardzo ważne jest takie zaprojektowanie systemu, aby kierowca rozumiał bieżące i planowane jego działanie i wiedział czego system nie może wykonać [92]. Takie podejście buduje zaufanie między obydwoma elementami układu kierowca-pojazd i ułatwia adaptację użytkownika do nowych rozwiązań [88]. Zgodnie z klasyfikacją NHTSA (*National Highway Traffic Safety Administration*) oraz SAE (*Society of Automotive Engineers*) w pojazdach wyszczególniono 5 poziomów automatyzacji [1], przy czym poziom 3 (tzw. warunkowej autonomizacji) charakteryzuje się możliwością czasowego przejęcia sterowania przez samochód, nie mniej w każdej chwili z odpowiednim wyprzedzeniem czasowym, może dojść do ponownego przejęcia przez kierowcę czynności sterowniczych, co wymaga z jego strony wysokiej świadomości sytuacyjnej (ang. *situation awareness*) w każdym momencie jazdy. Można ją uzyskać między innymi poprzez prawidłowo zaprojektowany interfejs kierowcy, dzięki któremu zapewniony jest dopływ niezbędnej informacji, jak również możliwość efektywnego wykonania czynności sterowniczych [33][95]. Zagadnienia związane z odpowiednim doбором interfejsów zapewniających szybki i efektywny odbiór sygnałów informujących o konieczności przejęcia kontroli przez kierowcę są tematem badań prowadzonych w Instytucie Transportu Samochodowego.

Automatyzacja (ang. *automation*) transportu samochodowego ma na celu eliminację czynnika ludzkiego jako elementu kierującego w procesie przemieszczania się. Automatyzację należy więc definiować, jako zastępowanie czynności użytkowych w pojeździe na rzecz czynności obsługowych [2]. Z kolei autonomizację (ang. *autonomation*) definiuje się jako automatyzację z dodanym czynnikiem ludzkim [79]. Pojazd zautonomizowany w niektórych warunkach drogowych może poruszać się bez ingerencji kierowcy, jednak w newralgicznych sytuacjach wymaga od kierującego odpowiedniej reakcji np. na zaistniałe niebezpieczeństwo podczas jazdy. Słów „autonomizacja” i „automatyzacja” w literaturze niestety używa się zamiennie. Spowodowane jest to niedokładnym tłumaczeniem źródeł (najczęściej z języka angielskiego) lub nieświadomością istniejących

istotnych różnic pomiędzy tymi słowami. Niniejsza praca i przedstawione w niej badania dotyczą pojazdów zautonomizowanych, czyli pojazdów na poziomie 3 według klasyfikacji SAE i NHTSA.

W dysertacji przedstawiono różne modalności sensoryczne, jakie wykorzystywane są w interfejsach komunikacji człowiek – maszyna i za pomocą których kierowcy są informowani o wszelkich zmianach, jakie zachodzą podczas transferu kontroli nad pojazdem bądź równoczesnego wykonywania kilku czynności sterowniczych. W analizie literatury przedstawiono wybrane badania naukowe ukazujące wpływ stosowanych modalności na funkcjonowanie i zachowanie człowieka, a także obrazujące badania nad transferem kontroli w pojazdach zautonomizowanych. Pomimo wielu prowadzonych badań, naukowcy niejednokrotnie dochodzą do sprzecznych wniosków w powyższych zagadnieniach. Dodatkowo, mając na uwadze intensywny rozwój technologiczny, kontynuacja badań w tym zakresie jest konieczna.

1.1. Przesłanki podjęcia tematu

Intensywny rozwój sektora motoryzacyjnego wiąże się z wprowadzaniem na rynek pojazdów posiadających wiele nowych rozwiązań technologicznych, a co za tym idzie w coraz większym stopniu zautomatyzowanych. Nowa technologia jest postrzegana jako czynnik kształtujący przyszłą mobilność i jakość życia. Jej sukcesywne wdrażanie przyczyni się m.in. do zwiększenia bezpieczeństwa na drogach (zmniejszenie liczby wypadków spowodowanych przez ludzkie błędy), do zwiększenia wydajności systemu transportowego, do zmniejszenia emisji zanieczyszczeń oraz do zwiększenia integracji społecznej poprzez zapewnienie mobilności osobom o zróżnicowanej sprawności. Istnieje wiele klasyfikacji poziomów automatyzacji w pojazdach. Według klasyfikacji SAE i NHTSA wyróżnić można poziomy od 0 do 5, przy czym ostatni oznacza pełną autonomizację, tzn. kierowca odpowiada jedynie za wprowadzenie adresu miejsca docelowego, po czym nie musi w trakcie podróży ani przez chwilę nadzorować działania systemu. Obecny poziom technologii pozwala na sukcesywne wprowadzanie pojazdów z warunkową autonomizacją, czyli na poziomie L3 oraz pojazdów na poziomie L4 dedykowanym, które są wykorzystywane w miejskim transporcie publicznym. Samochody z warunkową autonomizacją są w stanie przejąć od kierowcy pełną kontrolę nad kierowaniem w określonych warunkach. Jak już wcześniej wspomniano, kierowca nadal jednak musi być przygotowany na przejęcie czynności sterowniczych w przypadku zgłoszenia tego postulatów przez system komputerowy samochodu. Analiza tych

zagadnień jest tematem badań prowadzonych w najważniejszych ośrodkach naukowych na świecie. Wynikami badań zainteresowane są przede wszystkim koncerny motoryzacyjne oraz instytucje działające na rzecz bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Przegląd dostępnej literatury, który szczegółowo został przedstawiony w rozdziale 2, wykazał, że do tej pory nie przeprowadzono badań poprawności przebiegu procesu przejęcia kontroli przez kierowcę z wykorzystaniem heurystycznych struktur rozmytych i uwzględniających czas przejęcia kontroli nad pojazdem z warunkową autonomizacją oraz stopień komfortu odczuwanego przez kierowców w czasie tego procesu. Brakuje także prac, w których opisano i zdefiniowano pojęcie poprawności przebiegu procesu przejęcia kontroli nad pojazdem z warunkową autonomizacją. Badania zrealizowane w ramach pracy doktorskiej niewątpliwie przyczynią się do poszerzenia i wzbogacenia dotychczasowego stanu wiedzy w tym zakresie.

1.2. Cel i teza rozprawy

Proponowana praca ma na celu zbadanie procesu przejęcia kontroli przez kierowcę w pojazdach z warunkową autonomizacją (na poziomie L3). Zagadnienie to stanowi jeden z podstawowych problemów dla skutecznego wdrażania tego rodzaju pojazdów.

Celem naukowym jest **zbadanie wpływu czynników zewnętrznych na zadanie przejęcia kontroli przez kierowcę w przypadku konieczności wyłączenia systemu autonomizującego proces jazdy oraz opracowanie metody oceny poprawności wykonania czynności z tym związanych.**

Otrzymane wyniki badań oraz wnioski pozwolą zrealizować cel użyteczny, jakim są wskazówki dla sektora przemysłu motoryzacyjnego w aspekcie bezpiecznego sposobu realizacji przejęcia kontroli przez kierowcę w pojazdach z warunkową autonomizacją.

Przyjęto następującą tezę pracy:

Badania na symulatorze jazdy oraz metody statystyczne i heurystyczne wykorzystujące dane eksperymentalne mogą być narzędziem do badania i oceny poprawności przejęcia kontroli przez kierowcę w pojazdach z warunkową autonomizacją (na poziomie L3).

Realizacja celu badawczego wymagała przeprowadzenia badań eksperymentalnych obejmujących badania symulatorowe oraz ankietowe.

2. ZAGADNIENIE AUTONOMIZACJI POJAZDÓW – PRZEGLĄD BADAŃ

Zarówno przegląd prac badawczych prowadzonych w ostatnich latach przez czołowe koncerny samochodowe, jak i zwiększająca się liczba reklam pojazdów z systemami częściowo autonomizującymi poruszanie się samochodami, wyraźnie wskazuje na dynamiczną zmianę rynku samochodowego, możliwości pojazdów i poziomu ich bezpieczeństwa [29]. Przyczynił się do tego rozwój technologiczny powiązany ze znaczącym spadkiem kosztów produkcji wszelkiego rodzaju układów sensorycznych i techniki mikroprocesorowej. Powstające układy pozwalają na pobieranie, analizę i przetwarzanie ogromniej ilości danych w czasie rzeczywistym. Na rynku już dziś są dostępne pojazdy:

- pozwalające na automatyczne parkowanie w wybranych warunkach,
- utrzymujące odpowiednią prędkość i dystans w stosunku do pojazdów poprzedzających,
- utrzymujące położenie w środku pasa ruchu i ostrzegające bądź samoczynnie korygujące tor jazdy tak, aby pozostać na swoim pasie w przypadku zjechania na bok,
- samoczynnie wyhamowujące w sytuacjach niebezpiecznych,
- ostrzegające przed pojazdami poruszającymi się obok na równoległych pasach w tzw. „martwej strefie”.

Oczekiwania potencjalnych użytkowników nowoczesnych i zaawansowanych technologicznie samochodów są bardzo wysokie. Dlatego też czołowi producenci konwencjonalnych pojazdów prowadzą intensywne prace badawcze i testowe nad nowoczesnymi systemami, które:

- w razie potrzeby lub zagrożenia zmieniają tor jazdy tak, aby nie doszło do kolizji lub – jeśli nie da się jej uniknąć – żeby zminimalizować jej skutki,
- przejmą pełną kontrolę nad pojazdem i samoczynnie poprowadzą go bezpiecznie do celu po wyznaczonej trasie, pozostawiając (lub nie) możliwość prowadzenia pojazdu przez kierowcę (pełna lub warunkowa autonomizacja),
- przejmą kontrolę nad pojazdem jedynie częściowo i w ściśle określonych warunkach, pozostawiając kierowcę w stanie mniejszego lub większego zaangażowania w prowadzenie pojazdu.

Przewiduje się, że w przeciągu następnych kilkunastu lat nastąpi skokowa zmiana jakości wyposażenia pojazdów w kierunku ich pełnej lub częściowej autonomizacji, w tym

również komunikacji między pojazdami V2V (ang. *Vehicle-to-Vehicle*). Tak dynamicznej zmianie będą niewątpliwie towarzyszyły procesy przejściowe. Zmianie ulegnie wygląd i działanie infrastruktury drogowej, która po odpowiedniej adaptacji będzie umożliwiała lepszą komunikację między pojazdami a otoczeniem V2I (ang. *Vehicle-to-Infrastructure*), a wyposażenie w urządzenia zapewniające bezpieczeństwo bierne w pojazdach zostanie dostosowane do innych warunków ewentualnej kolizji.

W tym kontekście niezwykle istotnym aspektem jest również adaptacja człowieka w układzie sterowania zaawansowanych pojazdów z warunkową autonomizacją. Kluczowe będzie nie tylko wypracowanie efektywnych metod identyfikacji nowych schematów zachowań kierowcy i pasażera w określonych warunkach, ale także samego opracowania i przetestowania metod badawczych, co również w pewnym zakresie obejmuje niniejsza rozprawa doktorska.

Na tle przeprowadzonego przeglądu dostępnej literatury i obecnego stanu wiedzy dotyczących zagadnień rozwoju układów autonomizujących jazdę, można przedstawić szereg istotnych aspektów, które w całości dopełniają ogólny obraz aktualnego zaawansowania i problemów, z którymi mierzą się inżynierowie projektujący i testujący pojazdy wyposażone w systemy wspomaganie i autonomizacji jazdy:

- Wiele wypadków to efekt ludzkiego błędu. Systemy autonomizujące eliminują znaczną część błędów, nie męczą się i podejmują decyzje szybciej niż człowiek. Dodatkowym atutem jest podniesienie komfortu jazdy [122].
- Wraz z rozwojem pojazdów autonomicznych powstała potrzeba uregulowania i sprawdzania systemów wykorzystywanych w transporcie. Aby ujednoczyć wymagania powstała norma ISO 26262 dotycząca funkcjonalnego bezpieczeństwa systemów elektronicznych w motoryzacji [51].
- Przygotowano również laboratoria i towarzyszące im protokoły testowe (np. Euro NCAP) mające na celu weryfikację systemów aktywnego bezpieczeństwa w kontrolowanych warunkach i z wykorzystaniem docelowego pojazdu. Podczas testów symulowane są warunki drogowe przy użyciu robotów oraz specjalnego środowiska dla samochodu testowanego [22].
- Jednym z pierwszych kroków do autonomizacji pojazdów było opracowanie aktywnego tempomatu, który dostosowuje prędkość do rzeczywistego ruchu drogowego i otaczających pojazdów, tak aby uniknąć kolizji. System ten steruje

prędkością pojazdu i w razie potrzeby hamuje lub przyspiesza, jednak kierowca nadal jest odpowiedzialny za sterowanie pojazdem [33].

- Kolejnym kluczowym krokiem na drodze autonomizacji jest wymuszenie na pojeździe podążania zadaną ścieżką [42].
- Rozwój pojazdów prowadzi do opracowania w pełni autonomicznego pojazdu, który bez udziału człowieka jest w stanie poruszać się w ruchu drogowym i bezkolizyjnie dojechać do wskazanego celu [120].
- Dodatkowymi możliwościami jest łączenie pojazdów w grupy, które na podstawie informacji (komunikacji V2V) będą jechać razem [65].
- Ze względu na specyfikę ruchu miejskiego, autostradowe systemy ACC nie sprawdziłyby się, stąd powstały systemy Stop and Go, które ze względu na inne założenia, są dostosowane do potrzeb zwiększonego przepływu pojazdów [90].
- Systemy takie jak AEB wykazały swoją znaczącą skuteczność w ruchu miejskim np. w Wielkiej Brytanii [116].
- W przyszłości coraz większy nacisk będzie kładziony na systemy aktywnego bezpieczeństwa chroniące także innych uczestników ruchu, takich jak piesi czy rowerzyści. Przykładem może być fakt, że od roku 2016 do testów Euro NCAP został włączony protokół testowy na AEB chroniący pieszych [30].
- Systemy aktywnego bezpieczeństwa wprowadzone do pojazdów w przyszłości powinny również zmniejszyć liczbę szkód komunikacyjnych. Dzięki temu możliwe będzie ograniczenie kosztów napraw po kolizjach z małymi prędkościami, kiedy to pasażerowie nie ponoszą uszczerbku na zdrowiu [38].
- Systemy aktywnego bezpieczeństwa w sposób znaczący zmniejszają liczbę kolizji na drodze, przy czym już systemy ograniczone do 30 km/h oraz do 50 km/h wykazały podobną skuteczność [39].
- Pojawia się również więcej systemów chroniących przed niezamierzonym opuszczeniem drogi przez pojazd. Systemy takie wykorzystują np. kamerę stereo, EPS i radar lub mono kamerę oraz ESC. Chronią one pojazd przed zjechaniem z drogi nawet na zakrętach o dużej krzywiznie [48].
- Systemy ostrzegające przed przekroczeniem pasa ruchu lub pomagające w prowadzeniu pojazdów mogą zmniejszyć znacząco liczbę wypadków związanych z opuszczeniem pasa ruchu. Na podstawie badań przeprowadzonych w USA stwierdzono, że systemy ostrzegające mogą zmniejszyć liczbę wypadków o 26,1%

i liczbę poważnie rannych kierowców o 20,7%. Systemy ostrzegające o niezamierzonej zmianie pasa ruchu zmniejszają liczbę wypadków od 32,7% do 37,3% i liczbę poważnie rannych kierowców o 26,1%-31,2%. Natomiast systemy autonomizujące kierowanie pojazdem zmniejszyły liczbę wypadków o 51,0%, a liczbę poważnie rannych o 45,9% [62].

Z punktu widzenia niniejszej rozprawy kluczowe okazały się następujące przesłanki:

- Do tej pory nie została wystarczająco przebadana interakcja pomiędzy systemami wspomagania jazdy lub autonomizującymi prowadzenie pojazdu a kierowcą.
- Jednym z czołowych problemów autonomizacji poziomów 2, 3 oraz 4 jest transfer kontroli w pojeździe w sytuacji tego wymagającej. Związany z tym efekt skuteczności systemów automatyzujących prowadzenie pojazdu w zakresie komunikacji człowiek-maszyna wymaga szczegółowych badań.

2.1. Systemy autonomizujące kierowanie pojazdem

2.1.1. Poziomy autonomizacji pojazdów

Śledząc wyniki badań koncernów samochodowych i pojawiające się nowe pojazdy wyposażone w układy umożliwiające samodzielną (lub prawie samodzielną) jazdę wyróżnić można dwie koncepcje prac nad pojazdami autonomicznymi. Z jednej strony proponuje się stopniowe wyposażanie konwencjonalnych pojazdów w coraz doskonalsze układy czujników i algorytmów sterujących, które autonomizują (w zależności od potrzeb) różne etapy kierowania pojazdem. Tu wyróżnia się układy parkujące, układy utrzymujące odpowiednią prędkość, tor, odległość od poprzedzającego pojazdu, informujące kierowcę o potencjalnych zagrożeniach i przejmujące kontrolę np. nad hamowaniem w sytuacjach niebezpiecznych. W różnych rozwiązaniach i w zależności od tzw. stopnia automatyzacji odpowiednie systemy są aktywne pojedynczo lub grupami.

Drugim podejściem jest koncepcja zastosowana przez samochód Google (dziś spółki zależnej Waymo) – gdzie rola człowieka-kierowcy została od samego początku koncepcji pominięta lub zmarginalizowana. Podejście zakłada wyposażenie pojazdu w taki zestaw systemów autonomizujących, żeby pojazd samodzielnie był w stanie bezpiecznie (bez kolizji i zgodnie z przepisami) przewieźć pasażera z punktu A do punktu B – uwzględniając topografię terenu, przeszkody na drodze i innych uczestników ruchu. W tym podejściu nie ma mowy o tzw. transferze kontroli pomiędzy maszyną (pojazdem) a człowiekiem (potencjalnym

kierowcą). W chwili obecnej obie koncepcje są dynamicznie rozwijane przez firmy motoryzacyjne.

Na tle tych dwóch koncepcji została zdefiniowana tzw. skala automatyzacji pojazdów. Jeszcze do niedawna organizacja National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) sugerowała podział pojazdów na poziom bez automatyzacji i 4 poziomy automatyzacji. Aktualnie NHTSA przyjęła podział zaprezentowany przez SAE pięciu poziomów automatyzacji w rekomendowanych praktykach J3016 „*Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicles Automated Driving Systems*”. Jednym z głównych celów powstania dokumentu było doprecyzowanie roli człowieka/kierowcy w sytuacji aktywacji systemu autonomizującego prowadzenie pojazdów (tabela 2.1).

Tabela 2.1 Poziomy automatyzacji pojazdów

Organizacja	Poziom 0	Poziom 1	Poziom 2	Poziom 3	Poziom 4	Poziom 5
BAST ¹ SAE ² OICA ³ NHTSA ⁴	Tylko kierowca	Wsparcie/ Pomoc	Częściowa automatyzacja	Warunkowa automatyzacja	Wysoka automatyzacja	Pełna automatyzacja

Zródło: opracowanie własne

Podział, który został zaakceptowany przez NHTSA, SAE i inne stowarzyszenia branżowe wygląda więc następująco:

- poziom 0 (brak automatyzacji jazdy) – pojazdy manualne,
- poziom 1 (pomoc kierowcy) – pojedynczy zautomatyzowany system wspomagający kierowcę,
- poziom 2 (częściowa automatyzacja jazdy) – zaawansowany/złożony system wspomagania kierowcy lub ADAS,
- poziom 3 (warunkowa automatyzacja jazdy) – zdolność analizowania otoczenia i możliwość samodzielnego podejmowania decyzji przez pojazd,
- poziom 4 (wysoki poziom autonomizacji jazdy) – zdolność pojazdu do samodzielnej interwencji przy geograficznym ograniczeniu miejsc podróży,

¹ niem. Bundesanstalt für Straßenwesen

² ang. Society of Automotive Engineers

³ fr. Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles

⁴ ang. National Highway Traffic Safety Administration

- poziom 5 (samochód w pełni autonomiczny) – w pełni samodzielna jazda przy jednoczesnym braku ograniczeń geograficznych miejsc podróżowania.

Na potrzeby normy wprowadzono następujące kluczowe definicje pozwalające zrozumieć poszczególne poziomy automatyzacji pojazdu [101]:

- zautomatyzowany system jazdy (ang. ADS – Automated Driving System) – sprzęt i oprogramowanie, które wspólnie są zdolne do wykonywania dynamicznego zadania prowadzenia pojazdu (DDT) w sposób ciągły, niezależnie od tego, czy jest ono ograniczone zdefiniowanymi warunkami użytkowania (ODD);
- dynamiczne zadanie prowadzenia pojazdu (ang. DDT - Dynamic Driving Task) – wykonywane w czasie rzeczywistym taktyczne i operacyjne funkcje związane z kontrolowaniem pojazdu w ruchu drogowym, wykluczając przy tym funkcje strategiczne takie jak planowanie trasy/wybór miejsca docelowego podróży;
- detekcja obiektów i zdarzeń oraz reagowanie (ang. OEDR - Object and Event Detection and Response) – podzadanie dynamicznego prowadzenia pojazdu (DDT), które związane jest z monitorowaniem otoczenia pojazdu (detekcja, rozpoznanie, klasyfikacja obiektów i zdarzeń, i przygotowanie do reakcji) oraz odpowiednim reagowaniem na te obiekty i zdarzenia;
- zdefiniowane warunki użytkowania (ang. ODD - Operational Design Domain) – zdefiniowane warunki, dla których został zaprojektowany system autonomizujący prowadzenie pojazdu. Te warunki mogą odnosić się do np. specyficznych klas dróg, prędkości projektowej, warunków atmosferycznych czy zabudowy terenu. Przykładowo system może być przystosowany do funkcjonowania tylko w świetle dziennym, przy dobrym nasłonecznieniu i poniżej prędkości 40 km/h;
- transfer DDT (ang. DDT Fallback) – reakcja użytkownika lub systemu autonomizującego w celu przejęcia zadania dynamicznego prowadzenia pojazdu DDT lub wykonania manewru o minimalnym poziomie ryzyka (np. zjazdu na pobocze) w sytuacji błędu systemu autonomizującego lub wyjścia z warunków ODD. Jest to sytuacja transferu kontroli nad pojazdem.

W tabeli 2.2 przedstawiono podsumowanie informacji o poszczególnych poziomach automatyzacji jazdy według rekomendacji SAE.

Tabela 2.2 Podsumowanie poziomów automatyzacji jazdy według rekomendowanych praktyk SAE

Poziom	Nazwa	Definicja	DDT		Przerwanie DDT	ODD
			Długotrwała kontrola ruchu pojazdu w osi wzdłużnej i poprzecznej	OEDR		
0	Brak automatyzacji	Za DDT, czyli zadanie dynamicznego kierowania pojazdem odpowiada kierowca, nawet w sytuacji występowania Aktywnych systemów bezpieczeństwa.	Kierowca	Kierowca	Kierowca	Nie dotyczy
1	Wspomagany tryb jazdy	Określone zadania realizowane są przez jeden z systemów wspomagania kierowcy związanych z kierowaniem pojazdem lub przyspieszaniem/ hamowaniem. Kierowca realizuje wszystkie pozostałe aspekty związane z DDT.	Kierowca i system	Kierowca	Kierowca	Ograniczone
2	Częściowa automatyzacja	Określone zadania realizowane są przez jeden lub kilka systemów wspomagania kierowcy związanych zarówno z kierowaniem pojazdem jak i przyspieszaniem/ hamowaniem, przy założeniu, że kierowca realizuje wszystkie pozostałe aspekty związane z DDT i nadzoruje system autonomizacji jazdy.	System	Kierowca	Kierowca	Ograniczone
3	Warunkowa automatyzacja	Działania wykonywane przez ADS we wszystkich aspektach DDT przy założeniu, że kierowca będzie reagował we właściwy sposób na konieczność przejęcia kontroli.	System	System	Kierowca i system	Ograniczone
4	Wysoka automatyzacja	Działania wykonywane są przez ADS we wszystkich aspektach DDT nawet w sytuacji, gdy kierowca nie będzie reagował we właściwy sposób na żądania interwencji.	System	System	System	Ograniczone
5	Pełna automatyzacja	ADS realizuje wszystkie aspekty DDT w każdych warunkach drogowo-ruchowych.	System	System	System	Nieograniczone

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [101]

2.1.2. Klasyfikacja systemów autonomizujących jazdę

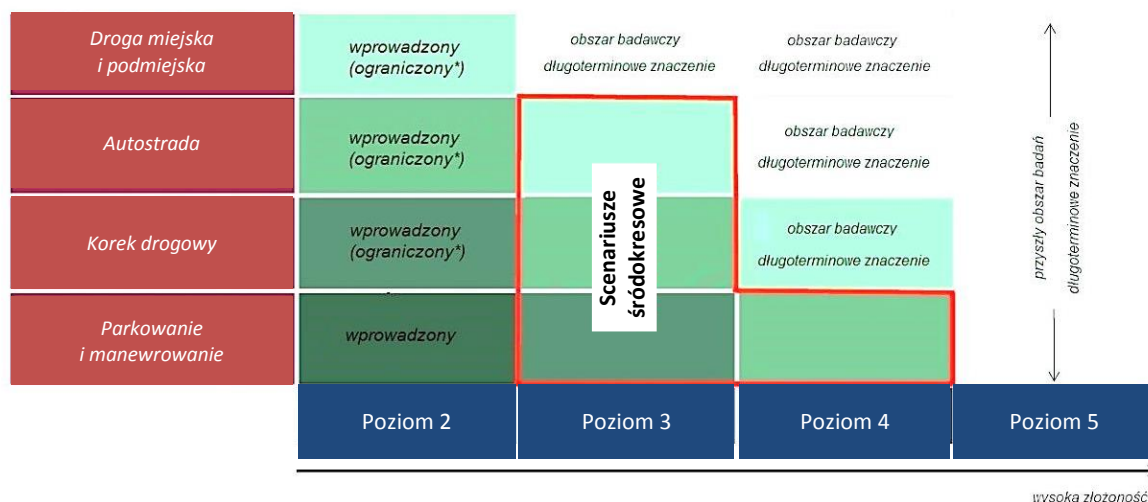
Interesującą klasyfikację systemów wspomagających i autonomizujących prowadzenie pojazdów ze względu na ich funkcję zaproponowano w instytucie BASt [33]. Wprowadzono w niej trzy kategorie oznaczone literami A, B i C:

- kategoria A dotyczy systemów informacyjno-ostrzegawczych i ma funkcję automatycznego „asystenta” kierowcy. Systemy tej kategorii nie wpływają bezpośrednio na zachowanie pojazdu. Wśród najczęściej spotykanych można wyróżnić: ostrzeganie zmiany pasa ruchu/wykrywanie „martwego punktu”, ostrzeganie o opuszczaniu pasa ruchu, wykrywanie przeszkód podczas cofania, ostrzeżenie o możliwości kolizji z przodu pojazdu);
- kategoria B dotyczy systemów „interweniujących w sytuacjach krytycznych”, czyli przedkolizyjnych (przedwypadkowych). Systemy tej kategorii przejmują kontrolę nad pojazdem i kierowca nie może swoim działaniem ich wyłączyć. Działanie systemów tej kategorii najczęściej polega na awaryjnym i kontrolowanym wyhamowaniu lub unieruchomieniu pojazdu. Wśród systemów tej kategorii możemy wyróżnić np. zaawansowane systemy hamowania awaryjnego;
- kategoria C dotyczy systemów autonomizujących jazdę. Od poziomu drugiego do pełnej automatyzacji według SAE J3016.

Inny sposób klasyfikacji systemów autonomizujących można oprzeć o realizowane zdefiniowane warunki użytkowania ODD [74]. Obecnie najpowszechniej stosowane przez producentów pojazdów kategorie ODD to:

- automatyczne parkowanie i manewrowanie pojazdu,
- asystent jazdy w korku,
- asystent jazdy na autostradzie,
- asystent jazdy na drogach miejskich i podmiejskich.

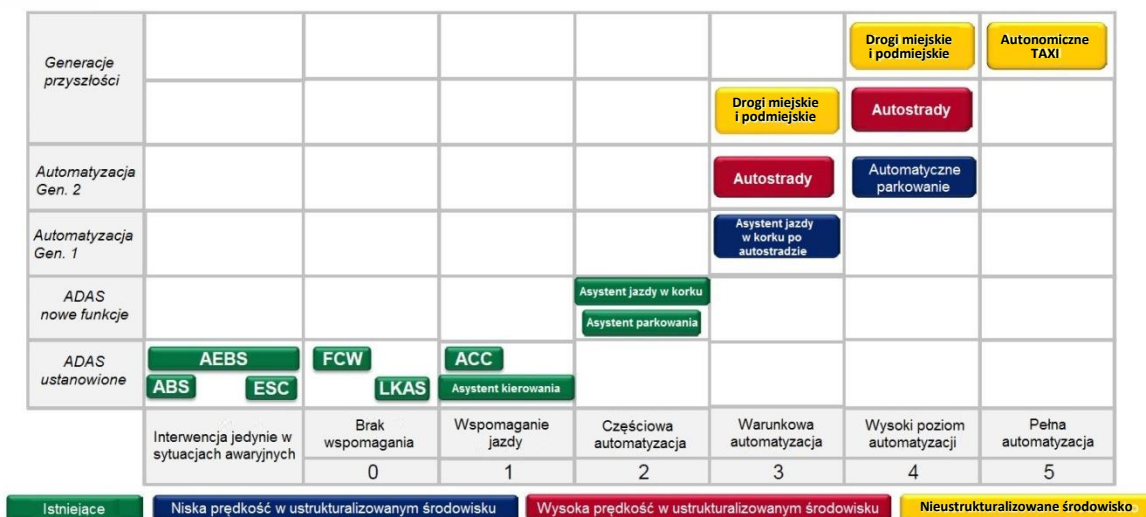
Schemat przedstawiony na rys. 2.1, opracowany na podstawie badań OICA, wskazuje zaawansowanie prac badawczych i testowych nad systemami powyższych kategorii w zależności od poziomu automatyzacji. Warto zwrócić uwagę, że prace nad efektywnymi systemami autonomicznej jazdy w obszarach miejskich są przewidziane przede wszystkim w kontekście trzeciego poziomu automatyzacji.



Rys. 2.1 Kategoryzacja systemów autonomizujących jazdę (grupa C) wraz z „mapą czasową” badań w poszczególnych kategoriach

Źródło: opracowanie własne na podstawie [29]

Schemat na rys. 2.2 pokazuje prognozę ewolucji systemów autonomizujących jazdę w zależności od poziomu automatyzacji.



Rys. 2.2 Prognoza ewolucji systemów ADAS i ADS.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [29]

2.2. Rola czynnika ludzkiego w autonomizacji pojazdów

W badaniach przeprowadzonych na przełomie XX i XXI wieku dotyczących czynnika ludzkiego w procesie autonomizacji i koncentrujących się głównie na interakcji kierowcy i tempomatu adaptacyjnego (ACC) wykazano, że wzrost autonomizacji może prowadzić do

zmniejszenia świadomości sytuacji drogowej u kierowców i upośledzić ich działanie w przypadku, gdy dojdzie do awarii bądź podczas ograniczeń systemu [26]. Do podobnych wniosków doszli także badacze Stanton i Marsden [109], Parasuraman, Molloy i Singh [87] czy Merat i Jamson [76]. Parasuraman i Riley wskazali też na możliwość dojścia do niepożądanych i nieoczekiwanych zmian obciążenia kierowcy (zarówno niskiego obciążenia, jak i przeciążeń) [88].

Merat i Jamson porównali dwa warunki – jazdę bez wspomagania, gdzie wszystkie manewry i decyzje podejmowali kierowcy oraz jazdę wysoko zautonomizowaną. W eksperymencie sprawdzono reakcje kierowców na serię niespodziewanych zdarzeń krytycznych na drodze. Jak pokazały wyniki, czas reakcji na te wydarzenia był zdecydowanie dłuższy w sytuacji jazdy wysoko zautonomizowanym pojazdem. Sugeruje to zmniejszoną świadomość sytuacji u kierowców i nadmierne zaufanie do systemu.

Toffetti i in. wyróżniają 4 rodzaje problemów związanych z czynnikiem ludzkim, które odgrywają ważną rolę w sukcesie autonomizacji pojazdów i sprawnego transferu kontroli [112]:

a) Poziom automatyzacji

Zdaniem naukowców automatyzacja zadań wykonywanych pierwotnie przez kierowcę może mieć negatywne skutki dla jego wydajności i bezpieczeństwa, ponieważ zadaniem kierowcy jest w tym przypadku jedynie pasywne monitorowanie systemu. W sytuacji jego awarii wymaga on od człowieka szybkiej reakcji w celu uniknięcia zagrożenia.

b) Przeniesienie kontroli

Drugim ważnym elementem jest przekazywanie kontroli jazdy, nie tylko pomiędzy sterowaniem ręcznym a automatycznym, ale także pomiędzy poszczególnymi stopniami automatyki. Przejścia mogą różnić się pod względem tego, kto przekazuje kontrolę, czy kierowca inicjuje przejście do autonomizacji czy odbywa się to na odwrót i w jakim zakresie.

c) Utrata umiejętności prowadzenia pojazdu

Zagrożeniem wynikającym z automatyzacji jest też utrata umiejętności prowadzenia pojazdu. Człowiek pomimo, iż wykonuje dane zadanie prawidłowo, nie mając styczności z nim przez określony czas, może wykonać je słabiej. Dlatego też ważne jest, aby użytkownicy pojazdów zautonomizowanych byli odpowiednio przeszkoleni i posiadali wiedzę na temat działania systemu. W sytuacji awarii powinni jak najszybciej właściwie przejąć kontrolę nad pojazdem i uniknąć zagrożenia.

d) Reakcje na błędy systemu

Jazda autonomicznym pojazdem z założenia ma zmniejszyć obciążenie kierowcy i spowodować, żeby czuł się bardziej komfortowo. Jednak jazda w trybie warunkowej autonomizacji może spowodować odmienny skutek – wywołać znużenie i odwrócić uwagę kierowcy od głównego zadania (prowadzenia pojazdu) i sytuacji na drodze. W przypadku błędu systemu nagły wzrost obciążenia może spowodować wolniejsze i mniej sprawne przejęcie kontroli.

Wydajność kierowcy znacznie się pogarsza, gdy musi wznowić kontrolę jazdy, np. zmienić pas ruchu w sytuacji wypadku drogowego (sytuacja obciążenia wtórnego). Ponadto, jak wykazują badania, cechy i przekonania kierowców na temat tego, kto posiada największą kontrolę nad pojazdem mają wpływ na ich zachowanie i interakcję z systemem [111].

Jak udowodnili badacze Merat i wsp. [77] na komfortowe odzyskanie kontroli przez kierowcę prowadzącego zautonomizowany pojazd na poziomie 3 wymagane jest 40 sekund. To czas, który potrzebuje kierowca do uzyskania stabilnej i właściwej kontroli nad pojazdem. Wniosek ten to wynik badania nad zdolnością człowieka do odzyskania kontroli nad pojazdem w sytuacji zmiany (zmniejszenia) poziomu automatyzacji. Naukowcy sprawdzili, czy tempo i sposób, w jaki zautonomizowany pojazd (poziom 3 automatyzacji według NHTSA) przekazuje kontrolę do kierowcy ma wpływ na zdolność uczestników badania do jej przejęcia oraz jak różne metody transferu kontroli wpływają na wydajność kierowcy i jego zdolność koncentracji na zadaniu. Wyniki pokazały większą wydolność kierowcy w sytuacji, gdy czas przeniesienia był z góry ustalony (wynosił 6 minut), niż kiedy system wyłączał się ze względu na brak uwagi kierowcy na drodze. Powrót do ręcznego sterowania był dużo trudniejszy w przypadku braku uwagi kierowcy na drodze. Jak udowodniono w badaniu poziom koncentracji kierowcy nie był ustabilizowany do 40 sekund po przejęciu kontroli.

Uwaga kierowcy na centralnej części drogi podczas prowadzenia pojazdu zmniejsza się wraz ze wzrostem poziomu automatyzacji oraz w sytuacji, kiedy kierowca jest wspomagany w kontroli bocznej pojazdu (system utrzymania pasa ruchu) i musi utrzymywać kontrolę wzdłużną. Jak wykazano w badaniu Carsten i wsp. zarówno wtedy, gdy dostarczone jest wsparcie przy kontroli bocznej, jak i wzdłużnej uwaga wzrokowa kierowcy nie koncentrowała się na drodze tak, jak w sytuacji prowadzenia manualnego. Niezależnie od poziomu automatyzacji wspomaganie kierowcy wpływa negatywnie na jego wydajność i zaangażowanie [18].

Podobne wyniki uzyskał Rudin-Brown. Udowodnił, że w prostych warunkach jazdy autonomizacja zmniejsza obciążenie kierowcy. Jednak w sytuacji, gdy należy wznowić

kontrolę, a kierowca jest zaangażowany w inne wtórne zadanie niezwiązane z prowadzeniem pojazdu (np. oglądanie DVD), występuje efekt nagłej zmiany obciążenia, niebezpiecznego dla środowiska jazdy [99].

Podczas jazdy w trybie warunkowej autonomizacji dochodzi do pogorszenia wydajności w porównaniu do prowadzenia manualnego bądź całkowicie autonomicznego. Do takich wniosków doszli naukowcy Endsley i Kaber na podstawie badania możliwości człowieka do odzyskania kontroli podczas awarii systemu wspomagania. Większą świadomość sytuacyjną i niższe obciążenie kierowcy zauważono w trakcie autonomicznej jazdy [26].

Podobne wyniki otrzymano w badaniach Selcona [104] oraz Kibbe i Mcdowell [58]. Najwięcej błędów podczas jazdy popełnia człowiek w sytuacji, gdy działa ze wsparciem technologii.

Choć istnieje niewiele badań na ten temat, naukowcy wykazali również korzystny wpływ pośredniego systemu wspomagania kierowcy. Endsley i Kiris sprawdzili, jakie skutki na działania człowieka i porządzenie sobie z awarią systemu ma zastosowanie pośrednich poziomów automatyzacji. Naukowcy wzięli pod uwagę 10-stopniową taksonomię. Wyniki pokazały, że na pośrednich poziomach automatyzacji odczucie „bycia poza systemem” kierowcy zmalało (wzrosło jego poczucie kontroli) i jednocześnie wzrosła świadomość sytuacji [27]. Założenia i różnice zagadnienia sprawowania kontroli nad pojazdem zostały przedstawione na poniższych rysunkach (2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8).

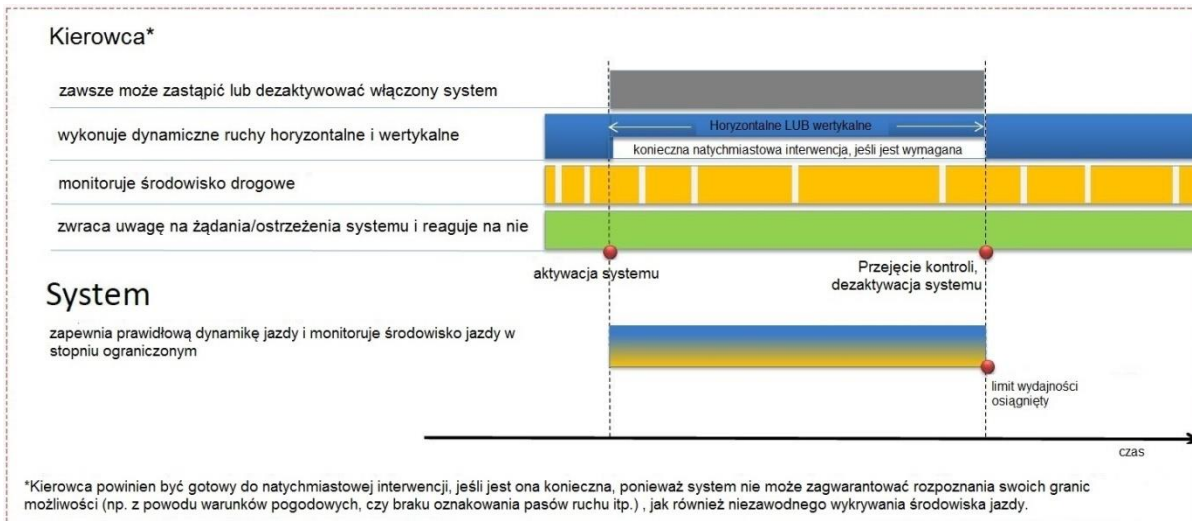


Wniosek: Kierowca jest w pętli i wykonuje wszystkie zadania:

- zadanie dynamicznego kierowania pojazdem (wykonuje dynamiczne ruchy horyzontalne i wertykalne)
- monitoruje środowisko drogowe
- zwraca uwagę na żądania/ostrzeżenia systemu i reaguje na nie

Rys. 2.3 Poziom automatyzacji 0 (brak automatyzacji)

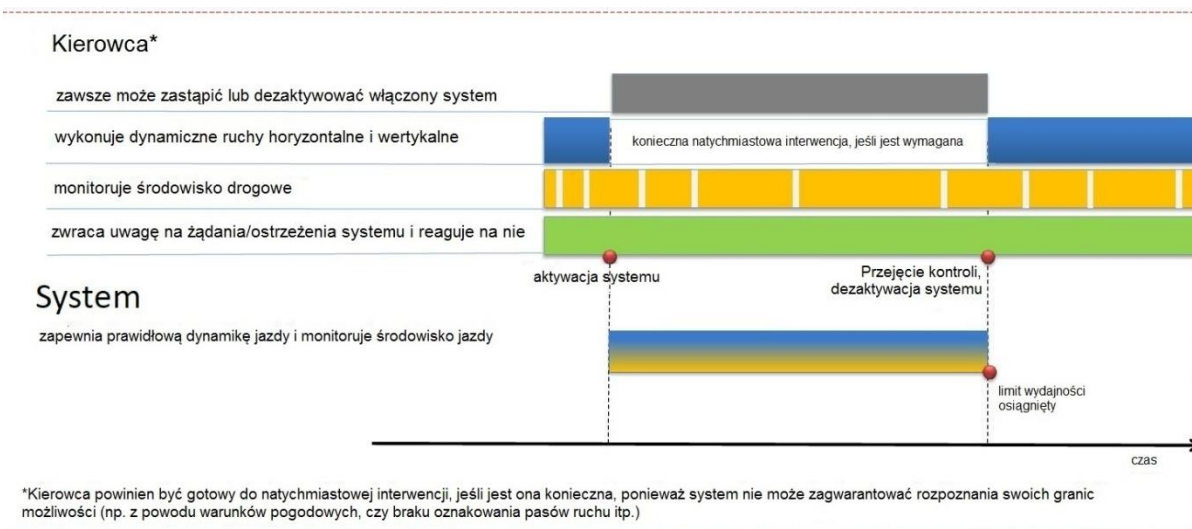
Źródło: opracowanie własne na podstawie [29]



Wniosek: Kierowca jest w pętli, ponieważ jest odpowiedzialny za zadanie dynamicznego prowadzenia pojazdu i musi pozostawać w gotowości do natychmiastowego interweniowania w innych zadaniach, związanych z prowadzeniem pojazdu.

Rys. 2.4 Zadania kierowcy i systemu na poziomie automatyzacji 1

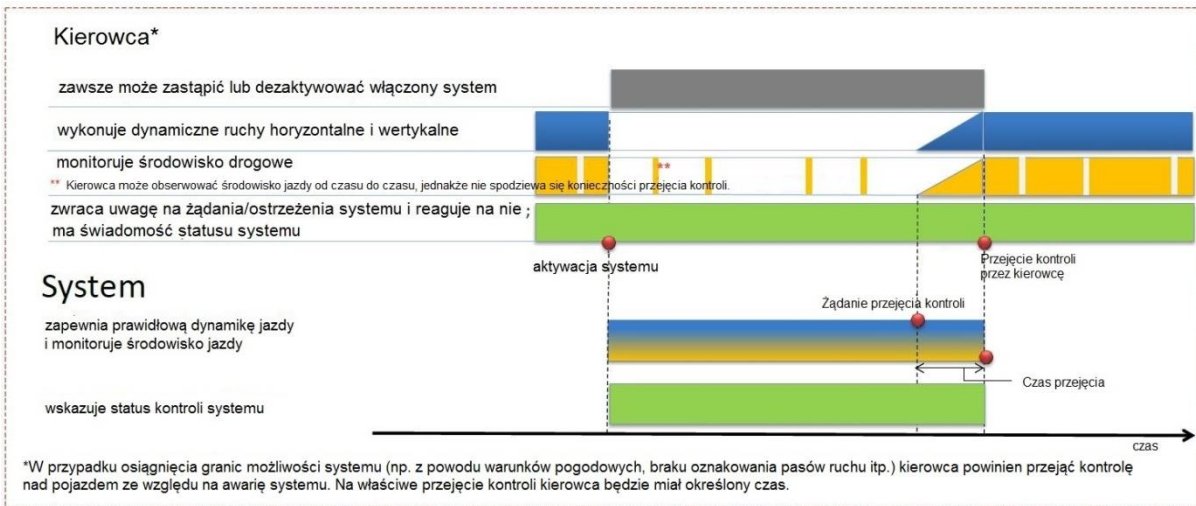
Źródło: opracowanie własne na podstawie [29]



Wniosek: Kierowca jest w pętli, ponieważ musi być przygotowany na możliwość interwencji, w każdym momencie podczas dynamicznego prowadzenia pojazdu.

Rys. 2.5 Zadania kierowcy i systemu na poziomie automatyzacji 2

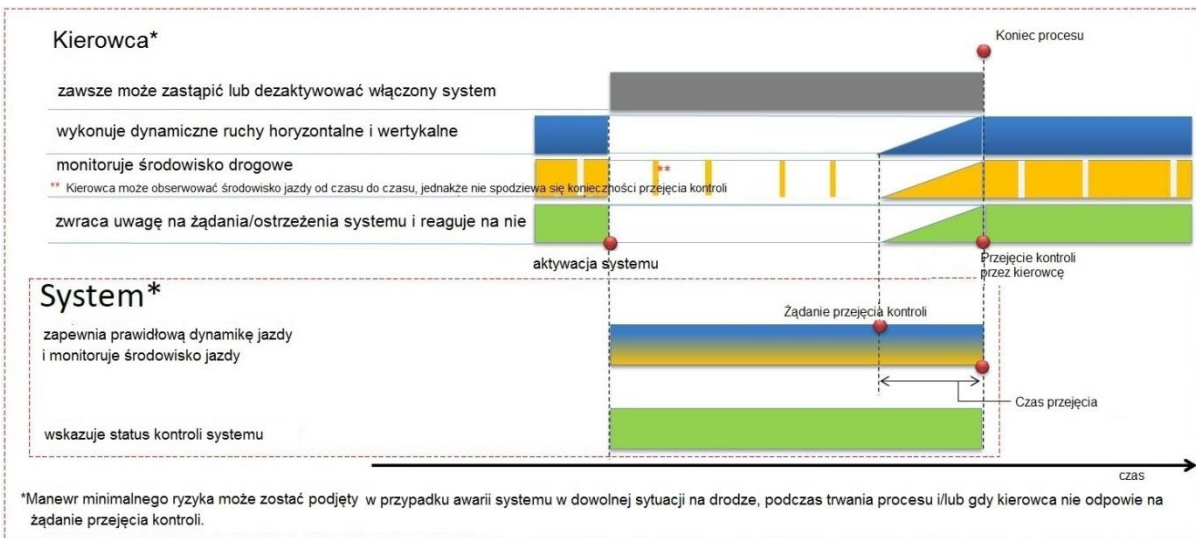
Źródło: opracowanie własne na podstawie [29]



Kierowca jest uważany za część petli, ponieważ musi być wystarczająco uważny, aby móc interweniować na żądanie systemu w określonym czasie przejęcia kontroli.

Rys. 2.6 Zadania kierowcy i systemu na poziomie automatyzacji 3

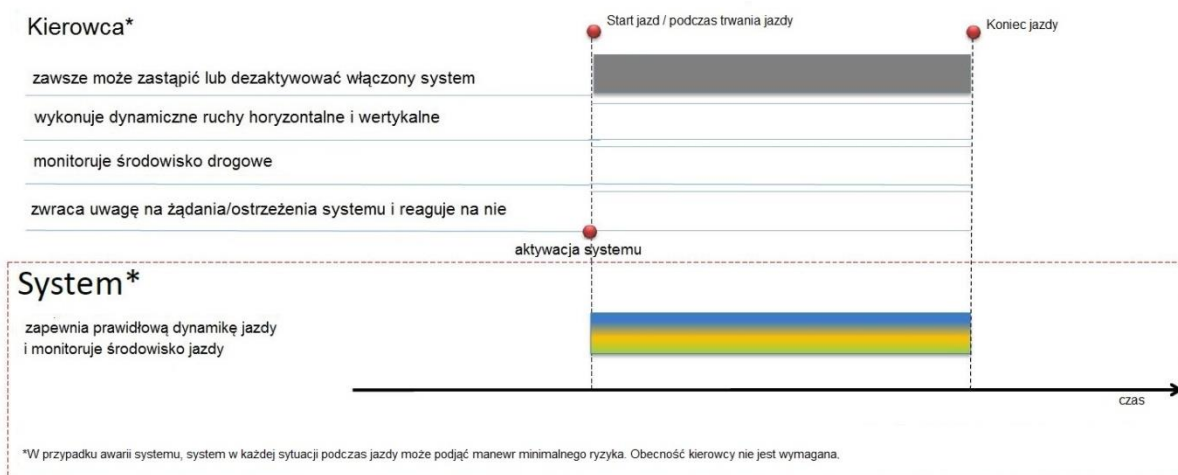
Źródło: opracowanie własne na podstawie [29]



Kierowca nie znajduje się w petli w tym przypadku, ale spodziewa się, że przejęcie nastąpi na końcu procesu w określonym czasie przejęcia.

Rys. 2.7 Zadania kierowcy i systemu na poziomie automatyzacji 4

Źródło: opracowanie własne na podstawie [29]



Wniosek: Aktywowany system wykonuje wszystkie zadania związane z prowadzeniem pojazdu przez cały okres trwania podróży. Obecność kierowcy nie jest niezbędna, co oznacza, że nie jest on w pętli.

Rys. 2.8 Zadania kierowcy i systemu na poziomie automatyzacji 5

Źródło: opracowanie własne na podstawie [29]

2.3. Rola i rodzaje bodźców w procesie przejmowania kontroli

W trakcie jazdy w trybie warunkowej autonomizacji kierowca może w każdej chwili odzyskać ręczne sterowanie. O aktualnej sytuacji na drodze, ewentualnych zagrożeniach i konieczności transferu kontroli może zostać poinformowany przez ekran dotykowy, wibracje kierownicy bądź jej lekką korektę ustawienia. Jednakże do wymiany informacji między kierowcą a pojazdem wykorzystuje się też inne ludzkie zmysły. Emitowanie sygnałów ostrzegawczych może odbywać się również poprzez kanał słuchowy czy wzrok. Komunikaty mogą być pokazywane na wyświetlaczach zamieszczonych w panelu sterowania bądź działać w systemie head-up, tj. być wyemitowane jako obraz na przedniej szybie.

Za najlepszy sposób informacji uznaje się ten, który powoduje szybką, właściwą reakcję kierowcy na sytuację w sposób intuicyjny, bez konieczności włączania w to skomplikowanego procesu myślowego.

Zgodnie z dynamiczną teorią zasobów (ang. *Multiple Resource Model*) korzystniej jest, jeśli dwa zadania wykonywane jednocześnie angażują różne zasoby poznawcze, niż kiedy przetwarzane są przez te same modalności sensoryczne. Wydajność kierowcy jest większa, kiedy obciążenie spowodowane wykonywaniem kilku równorzędnych czynności rozłożone jest na kilka kanałów sensorycznych. Podczas prowadzenia pojazdu i jednoczesnego wykonywania zadania polegającego na przetwarzaniu informacji, zgodnie z teorią, korzystniejszym sposobem przedstawiania wiadomości (niż wizualny) jest forma

dźwiękowa bądź dotykowa. Istnieje jednak wiele badań naukowych, zaprzeczających dynamicznej teorii zasobów. Badania te pokazują, że wzrok jest równie dobrą modalnością do informowania kierujących o zagrożeniach, jak słuch czy dotyk [119].

Pierwszym rodzajem bodźców jakie wykorzystywane są w systemach ostrzegania kierowcy przed zagrożeniami występującymi na drodze oraz jakie mogą być wykorzystywane w kontekście efektywnych sposobów optymalizacji transferu kontroli w pojazdach są bodźce wizualne. Są one przedstawiane głównie poprzez ekrany dotykowe znajdujące się w pojazdach bądź w postaci prostych symboli wyświetlanych na ekranie nawigacji. Korzystanie z tego rodzaju interfejsów niesie za sobą wysokie zagrożenie związane z odwróceniem uwagi kierowcy poprzez zaangażowanie się w ich obsługę. Z poziomu ekranu kierowca może sprawować kontrolę nad klimatyzacją, nawigacją, a także może odebrać komunikat o konieczności zmniejszenia poziomu automatyzacji. Zmiana ustawień bądź odebranie powiadomienia wymaga zatem skupienia wzroku na interfejsie i powoduje odciążenie uwagi kierowcy od drogi oraz jego rozproszenie.

Drugim rodzajem bodźców, jakie mogą być wykorzystywane w systemach ostrzegania kierowcy w kontekście efektywnych sposobów optymalizacji transferu kontroli są bodźce słuchowe. Sygnały pochodzące z kanału słuchowego są uważane przez naukowców za lepsze i bardziej efektywne w informowaniu kierowcy o niebezpieczeństwie niż bodźce wzrokowe, ponieważ informacje te nie rywalizują z informacjami wizualnymi o zasoby poznawcze. Tym samym sygnały w tej modalności nie zaburzają efektywności funkcjonowania kierowcy i nie powodują odwrócenia ich uwagi od tego, co dzieje się w środowisku drogowym [70]. Kierowca jest w stanie jednocześnie prowadzić pojazd i słuchać komunikatów. Istnieją jednak badania wskazujące na to, że modalność słuchowa (zwłaszcza mowa) może mieć efekt pierwszeństwa nad jazdą i może na chwilę rozproszyć koncentrację, co wiąże się z zakłócaniem wykonywania pierwszorzędneho zadania, jakim jest prowadzenie pojazdu.

Kolejnym rodzajem bodźców oddziałujących na kierowców w pojazdach mogą być bodźce haptyczne. Charakteryzują się wykorzystaniem zmysłu dotyku oraz reakcji na wibracje. Sygnały haptyczne mogą przyjmować postać wibracji ciągłych i pulsacyjnych, miejscowych i działających na kilka partii ciała, statycznych i ruchomych. Najczęściej naukowcy w eksperymentach posługiwali się silnikami wibracyjnymi umieszczonymi w fotelu kierowcy lub przymocowanymi bezpośrednio do ciała badanych za pomocą pasów. Istnieją także badania, w których wykorzystano wibracje koła kierownicy. Wykorzystanie zmysłu dotyku do odbierania bodźców haptycznych, tak jak w przypadku dźwięku, nie powinno odwracać uwagi kierowcy od jego głównego zadania, jakim jest kierowanie

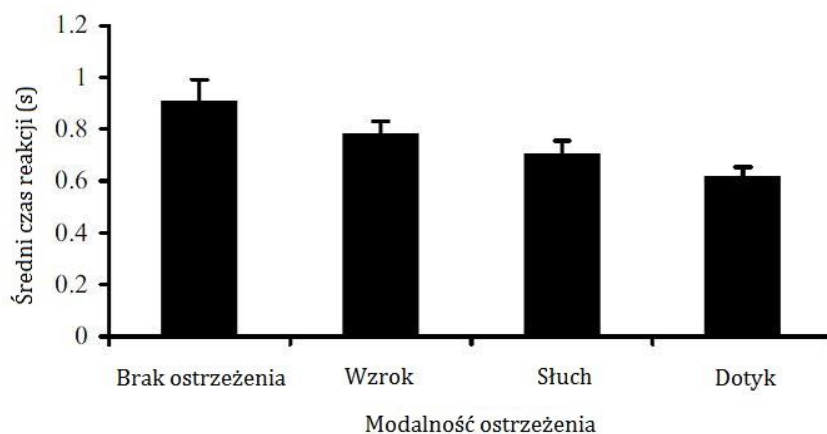
pojazdem. Jednak niektóre badania wskazują, że bodźce haptyczne mogą dezorientować kierowców i powodować wolniejszą lub nieprawidłową reakcję na określoną sytuację.

2.4. Wpływ zastosowania poszczególnych modalności na kierowców

Z powyższej analizy wynika, że istnieją różne modalności sensoryczne, jakie wykorzystuje się w interfejsach komunikacji człowiek-maszyna i za pomocą których kierowcy są informowani o zmianach zachodzących podczas transferu kontroli nad pojazdem lub równoczesnego wykonywania kilku czynności w pojeździe. Wpływ zastosowania poszczególnych modalności na funkcjonowanie i zachowanie człowieka przedstawiono w niniejszym podrozdziale, odwołując się do przeprowadzonych na świecie badań naukowych.

Wpływ informacji o zagrożeniu kolizją przekazywaną za pomocą różnych modalności sensorycznych na zachowanie kierowcy sprawdzili Scott i wsp. [103]. Badanie to zgodne jest z dynamiczną teorią zasobów. Naukowcy zauważyli, że bodźce wzrokowe są słabszymi ostrzeżeniami przed kolizjami tylnymi niż bodźce dotykowe czy słuchowe. Dowiedziono, że czas reakcji na zdarzenia drogowe różni się w zależności od tego, w jaki sposób system ostrzegający przed kolizjami przekazuje kierowcy informację o zagrożeniu. Badaniu poddano 16 kierowców w wieku od 19 do 42 lat, z doświadczeniem w prowadzeniu pojazdu od minimalnie 2 do 24 lat. Kierowcy zostali poproszeni o utrzymanie odpowiedniej odległości od pojazdu znajdującego się przed nimi. System ostrzegania przed kolizją aktywował się w sytuacji, gdy czas do kolizji wynosił 3 lub 5 sekund. Kierowcy zostali losowo dobrani do jednego z tych dwóch warunków eksperymentalnych. Samochód wiodący został zaprogramowany tak, aby nieprzewidywalnie dla badanych zmieniał prędkość w zmiennych odstępach czasowych. Badanym trudno było przewidzieć, czy samochód poprzedzający przyspieszy, zahamuje czy się zatrzyma, co zwiększało prawdopodobieństwo spowodowania kolizji tylnej. Zdolność prawidłowej percepcji bodźców i koncentracji na drodze zbadano poprzez pomiar czasu reakcji. Wyróżniono 4 warunki eksperymentalne związane z modalnością przekazywanych ostrzeżeń: ostrzeżenie dotykowe, dźwiękowe, wizualne i warunek kontrolny – bez ostrzeżenia. Ostrzeżenie wizualne było trójkątną tablicą składającą się z dziewięciu optoelektronicznych czerwonych diod LED, umieszczonych na desce rozdzielczej poniżej wzroku kierowcy po jego prawej stronie. Ostrzeżenie dźwiękowe wydawane było z trzech głośników o średnicy 6,5 cm ulokowanych na desce rozdzielczej, na tej samej wysokości co ostrzeżenie wizualne. Poziom dźwięku wynosił 75 dB i 2000 Hz.

Ostrzeżenie dotykowe składało się z trzech przekaźników o wielkości $2,54 \times 1,85 \times 1,07$ cm, o częstotliwości 290 Hz, za pomocą których badani otrzymywali wyraźnie wyczuwalne sygnały haptyczne. Wyniki wykazały istotny statystycznie wpływ modalności przekazywanej informacji o kolizji, $F(3, 42) = 17,16$, $p \leq 0,001$. Test Turkey'a wykazał, że wszystkie 3 zbadane modalności były znacząco różne od warunku, w którym badanych nie ostrzegano przed istniejącym niebezpieczeństwem uderzenia w poprzedzający pojazd (bodźce wizualne: $q = 4,344$; słuchowe: $q = 6,977$; dotykowe: $q = 9,808$). Jak pokazały wyniki, bodźce wizualne okazały się mniej skuteczną modalnością niż słuch czy dotyk. Czas reakcji na nieprzewidziane zdarzenia drogowe przy ich wykorzystaniu był dłuższy niż w przypadku dwóch pozostałych modalności. Niemniej jednak czas ten był krótszy niż czas zaobserwowany podczas warunku kontrolnego (bez ostrzeżenia o zagrożeniu). Wynik ilustruje rys. 2.9.

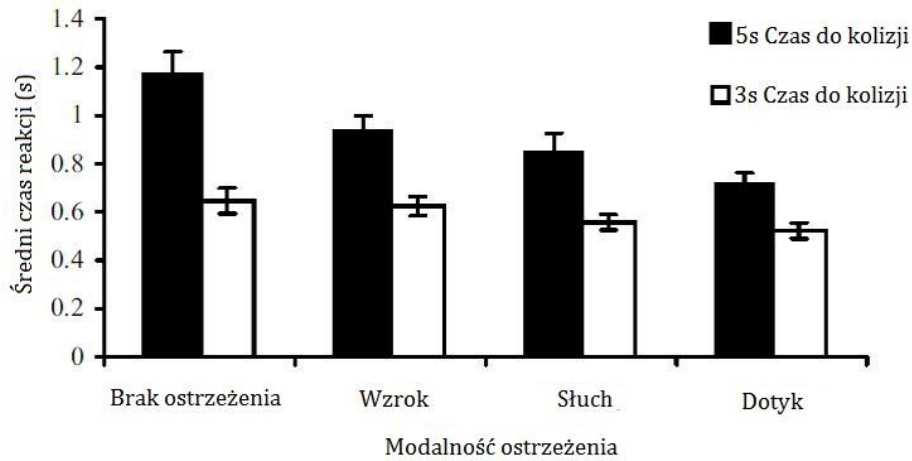


Rys. 2.9 Czas reakcji na nieprzewidziane wydarzenia drogowe a modalność informacji

Źródło: opracowanie własne na podstawie [103]

Wykazano również istotny efekt interakcyjny pomiędzy modalnością bodźca a czasem ostrzeżeń, $F(3, 42) = 5,498$, $p = 0,003$. W sytuacji, gdy system ostrzegania włączał się wcześniej, tj. gdy czas do kolizji wynosił 5 sekund, porównanie poszczególnych średnich za pomocą testu Turkey'a wykazało istotne różnice pomiędzy warunkiem bez ostrzeżeń a powiadomieniami w formie komunikatów wizualnych, $q = 4,935$. Czas reakcji na zdarzenia był krótszy, gdy badanym pokazywano bodziec wizualny niż w sytuacji, gdy nie informowano badanego o niebezpieczeństwie. Jednak był on dłuższy niż ten zaobserwowany podczas prezentacji bodźców słuchowych i dotykowych. Nie znaleziono istotnych statystycznie różnic pomiędzy modalnościami komunikatów w warunku, gdzie system

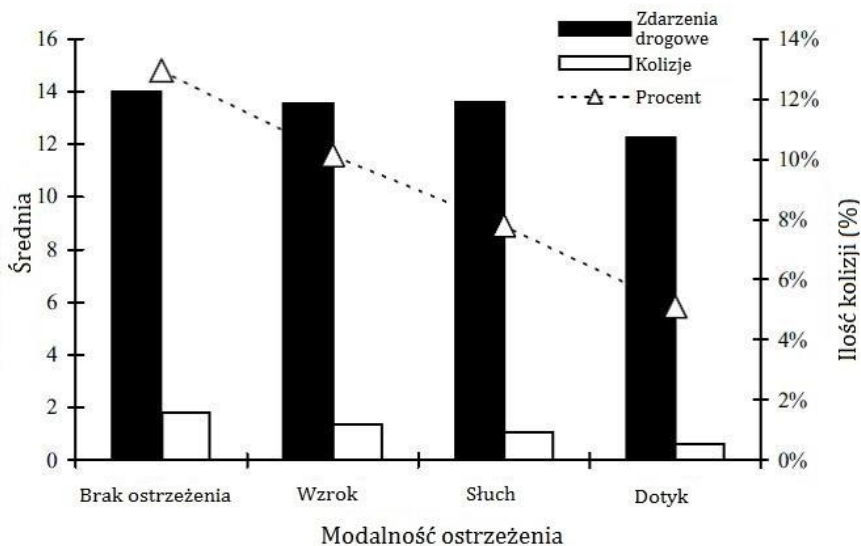
informował badanych o zagrożeniu na 3 sekundy przed zdarzeniem. Wyniki przedstawiono na rys. 2.10.



Rys. 2.10 Czas reakcji na nieprzewidziane wydarzenia drogowe a modalność bodźca i czas ostrzeżeń

Źródło: opracowanie własne na podstawie [103]

Scott i wsp. opisali również wpływ modalności informacji na liczbę kolizji. Wykazali, że rodzaj bodźca informującego o zagrożeniu nie miał istotnego statystycznie wpływu na liczbę wypadków. U kierowców, którzy nie otrzymali ostrzeżenia, odnotowano najwyższą liczbę zderzeń (12,95%), zaś w przypadku ostrzeżenia wizualnego odsetek wynosił 10,14%. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 2.11.



Rys. 2.11 Liczba kolizji a modalność bodźca

Źródło: opracowanie własne na podstawie [103]

Skuteczność różnych rodzajów sygnałów ostrzegawczych w kierowaniu uwagi kierowcy na potencjalnie niebezpieczne zdarzenia na drodze zbadali także Ho i wsp. [43]. Naukowcy podobnie jak Scott i wsp. wykazali, że interfejsy niewykorzystujące bodźców wzrokowych są bardziej efektywne jako systemy ostrzegające kierowcę przed zagrożeniem, ponieważ nie zakłócają wykonywania pierwszorzędowego, najważniejszego zadania – prowadzenia pojazdu. Badacze oprócz komunikatów wizualnych sprawdzili wpływ sygnałów dźwiękowych i czuciowych. W badaniu udział wzięło 12 osób (8 mężczyzn i 4 kobiety) w wieku 22 - 29 lat. Eksperyment trwał 30 minut. Bodziec słuchowy był wydawany przez jeden z dwóch głośników zamieszczonych wewnątrz pojazdu i przypominał dźwięk klaksonu samochodu. Bodźców wibro-dotykowych dostarczano badanym za pomocą czujników umieszczonych na brzuchu i plecach. Do bodźców wzrokowych wykorzystano natomiast czerwoną i zieloną diodę LED. Badanym zmierzono czas reakcji na poszczególne modalności bodźców.

Tabela 2.3 Czas reakcji kierowcy i liczba poprawnych reakcji a modalność informacji

Modalność bodźca	Umiejscowienie bodźca (informacji)					
	Z przodu		Z tyłu		Średnia = (Przód + Tył) / 2	
	Czas reakcji [ms]	% poprawnych	Czas reakcji [ms]	% poprawnych	Czas reakcji [ms]	% poprawnych
Słuch	872 (27)	92,9 (1,8)	790 (34)	92,9 (2,6)	831 (28)	93,0 (1,9)
Dotyk	780 (36)	93,8 (3,1)	745 (31)	95,8 (1,5)	762 (32)	95,1 (1,8)
Wzrok	842 (33)	92,5 (1,6)	740 (36)	90,4 (3,2)	791 (33)	91,8 (1,5)
Średnia	831 (28)	93,0 (1,6)	758 (30)	93,0 (1,4)		

Źródło: opracowanie własne na podstawie [43]

Naukowcy wykazali istotny statystycznie efekt główny modalności sygnału ostrzegawczego, $F(2,22) = 4,6$; $MSE = 6272$; $p = 0,02$. Jak pokazały wyniki, bodźce wzrokowe były mniej skutecznymi sygnałami ostrzegawczymi niż bodźce wibro-dotykowe ($M = 791$ ms vs. $M = 762$ ms), jednak czas reakcji na nie był krótszy niż na bodźce słuchowe ($M = 831$ ms). Niemniej jednak okazało się, że procent poprawnych odpowiedzi na bodźce był najmniejszy właśnie w przypadku ostrzeżeń wizualnych (91,8%). W eksperymencie wykazano też istotne zależności pomiędzy modalnością ostrzeżenia a miejscem

zamieszczonego bodźca/sygnalizatora (przód vs. tył), $F(1,11) = 30,3$; $MSE = 3142$; $p < 0,001$. Kierowcy reagowali szybciej na bodźce znajdujące się z tyłu. Co ciekawe najkrótszy czas reakcji odnośnie bodźców z tyłu odnotowano, gdy zaprezentowano je jako bodźce wizualne. Rezultaty eksperymentu ukazuje tabela 2.3.

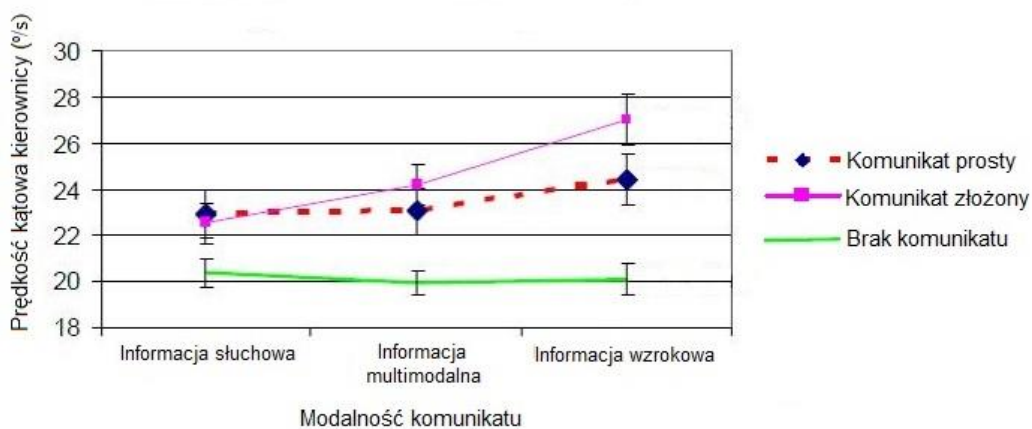
Podobne wnioski przedstawia nieco wcześniejsze badanie Spence i wsp., przeprowadzone w roku 2001. Naukowcy wykazali, że czas reakcji na bodźce wizualne był krótszy niż na bodźce dotykowe (513 vs. 520 ms), jednakże dłuższy w porównaniu z sygnałami dźwiękowymi (504 ms). W eksperymencie komunikaty dźwiękowe były przekazywane za pomocą dwóch głośników, bodźce wizualne przy pomocy oświetlenia LED, natomiast czuciowe poprzez panel dotykowy. Wszystkie bodźce wydawane były z jednej z dwóch tych samych pozycji. Naukowcy sprawdzili ponadto, co dzieje się w sytuacji, gdy badani spodziewają się otrzymania bodźca z poszczególnej modalności. Sprawdzono wpływ dwóch zmiennych: modalności (słuch vs. dotyk vs. wzrok) i przewidywania (oczekiwanie bodźca wizualnego vs. dotykowego vs. słuchowego). Uczestnikom przedstawiono 16 serii, każdy po 48 bodźców [107].

Jak się okazało modalność bodźców miała istotny statystycznie wpływ na czas reakcji, $F(2,38) = 4,3$; $p = 0,02$. Tak jak wcześniej wspomniano, komunikaty wizualne nie okazały się jednak najbardziej skutecznym rodzajem bodźców. Wykazano również istotny związek modalności i oczekiwania konkretnego rodzaju bodźca, $F(6,114) = 45,7$; $p < 0,0001$. Dla przykładu, kiedy uczestnicy spodziewali się, że najprawdopodobniej otrzymają bodziec wzrokowy, czas odpowiedzi na nie był dużo krótszy (467 ms).

Sodnik i wsp. w roku 2008 sprawdzili skuteczność i efektywność interfejsów różnych modalności porównując interfejs graficzny (wizualny) z dwoma interfejsami słuchowymi. Interfejs wizualny stanowił mały ekran LCD zamieszczony w samochodzie na desce rozdzielczej [106]. Dwa interfejsy oparte o bodźce słuchowe różniły się tym, że emitowały jedną lub wiele wskazówek przestrzennych. Naukowcy dokonali pomiaru wydajności kierowcy, czasu potrzebnego do ukończenia wykonywanego zadania, poczucie obciążenia oraz ogólną satysfakcję z użytkowania danych interfejsów. Wyniki wskazały, że klasyczny interfejs oparty o bodźce wizualne był tak samo efektywny jak pozostałe dwa oparte na komunikatach dźwiękowych. Czas realizacji zadania w przypadku zadań krótszych był porównywalny dla wszystkich trzech interfejsów. Jednakże wydajność i osiągi w trakcie jazdy były znacznie lepsze w przypadku zastosowania interfejsów słuchowych, a nie wizualnych. Obciążenie zadaniem było wyższe podczas używania interfejsu wizualnego. Jak wskazują naukowcy, interfejsy graficzne oparte o bodźce wzrokowe są trudniejsze w użyciu

i zapewniają mniejszy komfort kierowcy. Dzieje się tak, ponieważ uwaga wzrokowa kierowcy jest dzielona między ekranem a tym, co się dzieje w danej sytuacji na drodze. Choć oba interfejsy okazały się równie skuteczne, Sodnik i wsp. uważają, że interfejs graficzny jest mniej wydajny, ze względu na rozproszenie uwagi kierowcy.

Im większa odległość między wyświetlaczem a przednią szybą pojazdu tym większe poznawcze koszty ponosi kierowca ze względu na podział uwagi pomiędzy te dwa obszary. Dlatego też informacje przekazywane za pomocą modalności wizualnej lepiej przekazywać wykorzystując ekrany znajdujące się na linii wzroku. Do takich wniosków doszli również Seppelt i wsp. [105]. Zbadano 36 młodych kierowców. Sprawdzono wpływ następujących zmiennych: modalności: wzrok, słuch, informacja multimodalna (kombinacja informacji wzrokowej i dźwiękowej); stopień złożoności informacji (prosta vs. złożona) i rodzaju wiadomości (istotna, spersonalizowana vs. nieistotna). Zadaniem drugorzędym kierowców było naciśnięcie przycisku w odpowiedzi na komunikat interfejsu. Sprawdzono utrzymywanie pasa ruchu, prędkość kątową koła kierownicy oraz czas reakcji na zagrażające, nieprzewidywalne zagrożenia na drodze [105].



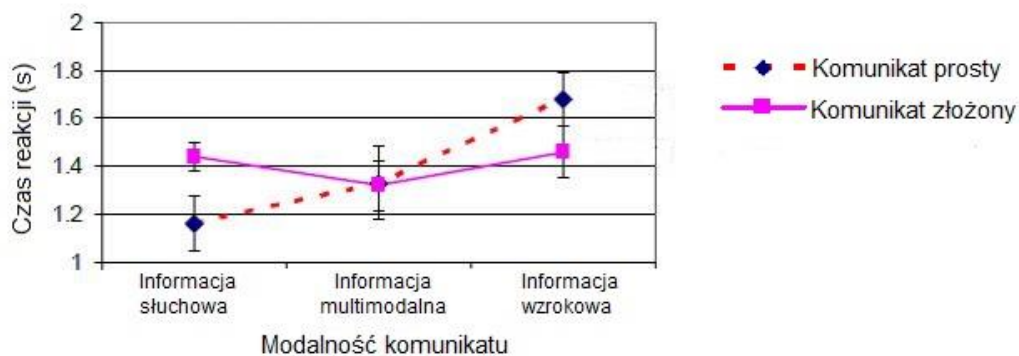
Rys. 2.12 Prędkość kątową kierownicy a modalność i złożoność komunikatu podczas odpowiedzi na komunikaty nie informujące o zdarzeniach niebezpiecznych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [105]

Analiza danych pokazała, że modalność komunikatu nie miała znaczącego wpływu na utrzymywanie pasa ruchu, $F(2,68) = 0,43$; $p = 0,65$. Wykazano za to istotny statystycznie efekt główny modalności w odniesieniu do prędkości kątowej podczas reakcji na bodźce, które nie informowały o sytuacjach niebezpiecznych, $F(2,68) = 4,54$; $p = 0,01$. Wskaźnik był najwyższy w przypadku interfejsów wizualnych, co oznacza, że kierowcy byli bardziej rozproszeni przy komunikatach o tej modalności i ciężiej im było utrzymać kontrolę nad

kierownicą. Interakcja modalności i złożoności zadania również była istotna, $F(2,68) = 2,84$; $p = 0,06$. W przypadku reagowania na bodźce podczas wydarzeń krytycznych na drodze nie zauważono znaczącego wpływu modalności komunikatów. Zależność ukazuje rys. 2.12.

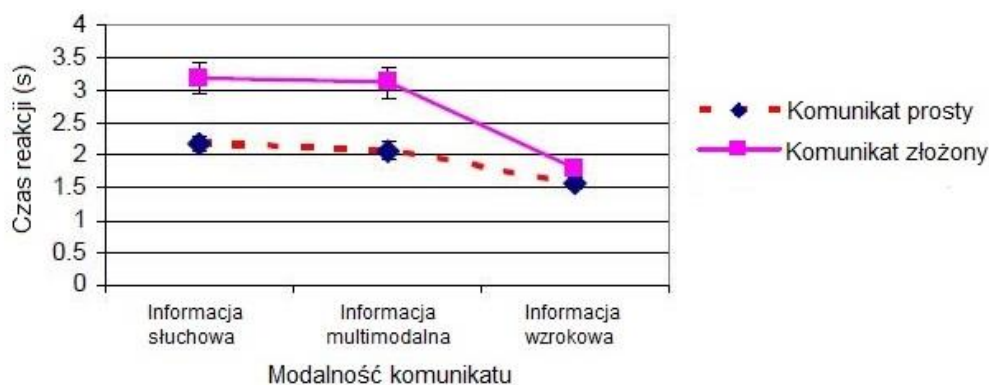
Każdy z badanych kierowców w eksperymencie Seppelta i wsp. napotkał w trakcie całego badania 6 różnych zdarzeń krytycznych. Zaobserwowano istotny wpływ modalności na czas reakcji, $F(2,96) = 3,48$; $p = 0,035$, wskazujący na zmniejszenie wydajności kierowcy w sytuacji ekspozycji komunikatu wizualnego. Istotna statystycznie okazała się również interakcja modalności i komunikatów istotnych (właściwych), $F(2,96) = 2,62$; $p = 0,08$. Informacje istotne przekazywane drogą wzrokową podczas zagrażających incydentów powodowały najdłuższe czasy reakcji, zaś najkrótsze – informacje istotne przekazywane kanałem słuchowym. Kiedy komunikat nie był związany z zagrożeniem (był nieistotny) nie odnaleziono istotnego wpływu modalności, $F(2,30) = 0,538$; $p = 0,59$. Czas reakcji podczas komunikatu dźwiękowego i wizualnego był zbliżony. Wyniki przedstawiono na rys. 2.13.



Rys. 2.13 Czas reakcji na wydarzenia krytyczne na drodze a modalność i istotność komunikatu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [105]

Seppelt i wsp. zauważyli również zależność między modalnością komunikatu a czasem reakcji odpowiedzi na zadanie dodatkowe (inicjacja zadania dodatkowego poprzez naciśnięcie przycisku). Efekt główny modalności, $F(2,68) = 34,27$; $p = 0,01$ wskazuje na wolniejsze reakcje na komunikaty dźwiękowe i multimodalne, niż na wyłącznie wizualne bodźce. Wynik przedstawiono na rys. 2.14.



Rys. 2.14 Czas reakcji na zadanie dodatkowe a złożoność i modalność informacji

Źródło: opracowanie własne na podstawie [105]

Zbliżone wyniki uzyskał Liu [66]. W badaniu uczestniczyło 16 młodszych kierowców (średnia wieku 22 lat) i 16 starszych (średnia wieku 68 lat). Zmierzono obciążenie zadaniem i reakcje na nieprzewidziane, niebezpieczne zdarzenia drogowe (identyfikacja poprzez naciśnięcie przycisku). Informacje proste bądź złożone przekazano w postaci trzech modalności sensorycznych: tylko wizualnie, tylko głosowo bądź za pomocą multimodalnego wyświetlacza (wizualnie i dźwiękowo jednocześnie).

U wszystkich uczestników badania zauważono, że komunikaty głosowe oraz wyświetlacze multimodalne powodują krótsze czasy reakcji, większą liczbę prawidłowych odpowiedzi na zdarzenia drogowe i mniejsze obciążenie poznawcze niż komunikaty oparte jedynie na bodźcach wzrokowych. Zdaniem naukowców jest to spowodowane tym, iż wyświetlacze wizualne wymagały większej uwagi kierowców.

Znaleziono istotny statystycznie wpływ wieku i modalności przekazywanej informacji na czas reakcji, $F(2,60) = 9,87$; $p = 0,0002$ i liczbę pominiętych naciśnień przycisków, $F(2,60) = 14,6$; $p = 0,0001$. Przy wykorzystaniu komunikatów wizualnych u kierowców starszych odnotowano dużo dłuższe czasy reakcji niż u kierowców młodszych i tych, którzy wykorzystywali dwa pozostałe interfejsy. W obu grupach wiekowych czas odpowiedzi na bodźce wzrokowe był najdłuższy spośród wszystkich modalności. Najkrótsze czasy zarówno u starszych, jak i u młodszych zauważono podczas kontaktu z interfejsem multimodalnym (słuchowo-wzrokowym). Zaobserwowano również ciekawą zależność w liczbie pominiętych naciśnień przycisku – u osób młodszych odnotowano mniej pominięć w odpowiedzi na bodźce wzrokowe niż na bodźce słuchowe (36 vs. 42). Wyniki przedstawiono w tabeli 2.4.

Tabela 2.4 Wpływ wieku i modalności komunikatu na czas reakcji kierowcy, ilość pominiętych naciśnięć przycisku i odchylenie położenia koła kierownicy

Zmienne	Młodzi kierowcy			Starsi kierowcy		
	Komunikat dźwiękowy	Komunikat wzrokowy	Komunikat multimodalny	Komunikat dźwiękowy	Komunikat wzrokowy	Komunikat multimodalny
Czas reakcji (s)	2,795	2,988	2,455	3,139	5,318	2,944
Liczba pominiętych naciśnięć	42	36	20	33	74	9
Odchylenie położenia koła kierownicy	0,0098	0,0096	0,0084	0,02	0,295	0,017

Źródło: opracowanie własne na podstawie [66]

Tabela 2.5 Wpływ złożoności (trudności) i modalności komunikatu na wydajność kierowcy

Zmienne		Informacja prosta			Informacja złożona		
		Komunikat dźwiękowy	Komunikat wzrokowy	Komunikat multimodalny	Komunikat dźwiękowy	Komunikat wzrokowy	Komunikat multimodalny
Czas reakcji (s)		2,687	3,255	2,607	3,247	5,081	2,792
Liczba pominiętych naciśnięć		24	30	8	51	80	21
Błędy związane z nawigacją	Bliskie pominięcia	0	5	4	2	0	0
	Pominięcia	4	7	4	5	6	1
	Błędy	0	1	1	14	0	3
Wysokie obciążenie jazdą	Przyspieszenie poprzeczne (m/s)	0,042	0,043	0,037	0,045	0,058	0,041
	Pozycja w przekroju poprzecznym pasa ruchu (m)	0,421	0,442	0,386	0,3048	0,923	0,366
	Odchylenie położenia koła kierownicy	0,018	0,0122	0,0114	0,012	0,0272	0,0139
	Częstotliwość dużych odchyień od pasa ruchu	6	5	8	6	27	6
	Przyspieszenie poprzeczne (m/s)	0,07	0,077	0,08	0,1133	0,1136	0,09
Niskie obciążenie jazdą	Odchylenie położenia koła kierownicy	0,07	0,077	0,08	0,1133	0,1136	0,09
	Średnie odchylenie bezwzględne prędkości (m/s)	3,14	3,47	3,23	3,64	4,30	3,02

Źródło: opracowanie własne na podstawie [66]

Istotna statystycznie okazała się również zależność między modalnością sensoryczną a złożonością komunikatu, $F(2,60) = 14,61$; $p = 0,0001$. Najdłuższy czas reakcji zauważono w przypadku złożonego (trudnego) komunikatu w postaci bodźców wizualnych. Najniższe czasy zauważano w trakcie kontaktu z panelem multimodalnym. Podobną zależność odnaleziono w przypadku liczby pominięć naciśnięć przycisku – przy wykorzystaniu

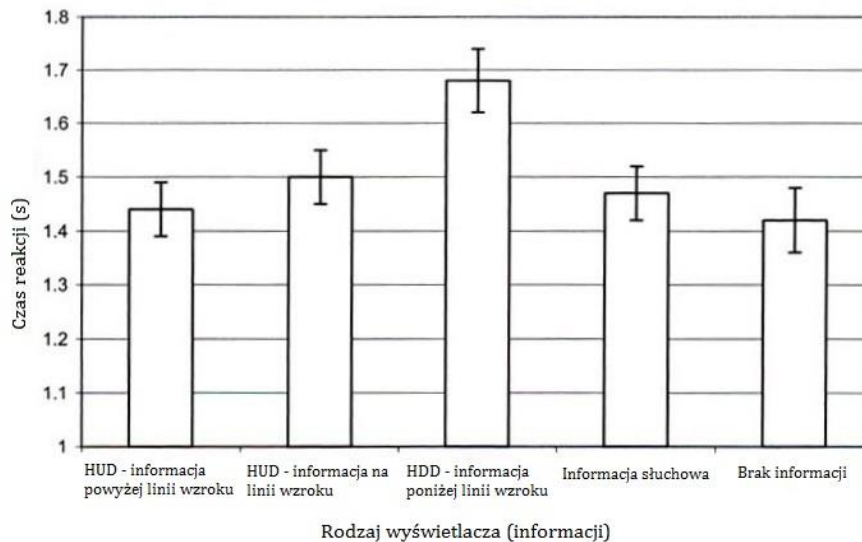
interfejsu wizualnego liczba ta wynosiła aż 80. Kiedy prezentowano prostą informację, liczba pominięć w trakcie prezentacji komunikatów wzrokowych była o 50 mniejsza. Informacje przekazywane za pomocą słuchu bądź multimodalnie wciąż miały lepszy wpływ na wydajność kierowców. Rezultaty przedstawiono w tabeli 2.5.

Inne stanowisko zajmuje Rodway. Eksperyment przeprowadzony w roku 2005 sugeruje, że dźwiękowe sygnały ostrzegawcze nie są bardziej skuteczne niż komunikaty wizualne. Badacz uważa, że w badaniach rezultat ten był spowodowany przez wykorzystanie różnych lokalizacji wizualnego sygnału ostrzegawczego [97].

Badanie Horrey i wsp. również wskazuje na to, że lokalizacja bodźców wzrokowych ma duże znaczenie [45]. Do eksperymentu przystąpiło 22 kierowców w wieku 19 – 29 lat. Ich zadaniem było pokonanie różnych tras w symulatorze jazdy i reagowanie na rzadkie, nieprzewidziane zagrożenia na drodze, podczas wykonywania zadania poznawczego prezentowanego przez wyświetlacze o różnych modalnościach. Wyświetlacze wizualne znajdowały się w trzech lokalizacjach, na horyzoncie (0°), tuż nad maską pojazdu (7°) bądź 38° poniżej linii wzroku (kierowcy musieli spojrzeć w dół). Alternatywne zadanie (cyfry numeru telefonu) zostało przedstawione w postaci bodźców słuchowych. Badani mieli do pokonania drogę miejską prostą, drogę polną prostą i krętą. W zadaniu prezentowano również różną liczbę cyfr: 4, 7 lub 10.

Wyniki nie pokazały znaczących różnic w odbiorze pomiędzy wyświetlaczami zamieszczonymi na horyzoncie i tuż nad maską pojazdu. Jednakże zauważono wpływ wyświetlacza znajdującego się poniżej linii wzroku na wydajność kierowcy. Jak się okazało czas reakcji na niespodziewane zdarzenia drogowe był dużo dłuższy w sytuacji, gdy badani używali tego rodzaju panelu. Nie zaobserwowano także istotnych statystycznie różnic pomiędzy prezentacją głosową cyfr a prezentacją numerów na wyświetlaczach znajdujących się na linii wzroku. Wyniki przedstawiono na rys. 2.15.

W tym samym badaniu wykazano, że interfejsy głosowe powodowały podobny czas reakcji na niespodziewane zdarzenia drogowe jak wyświetlacze wizualne zamontowane powyżej i na linii wzroku. Interfejs głosowy spowodował jednak krótszy czas reakcji ($M = 1,47$ s) niż interfejs zamieszczony wewnątrz pojazdu poniżej linii wzroku ($M = 1,68$ s). Interfejs głosowy powodował również dużo krótsze czasy odpowiedzi podczas wykonywania zadania drugorzędne niż interfejs wizualny umieszczony na linii wzroku ($M = 0,39$ s vs. $M = 1,08$ s; $F(1,20) = 57,25$; $p < 0,001$). Zależność ta miała miejsce bez względu na rodzaj drogi [45].



Rys. 2.15 Czas reakcji na niespodziewane zdarzenia drogowe a rodzaj wyświetlacza

Źródło: opracowanie własne na podstawie [45]

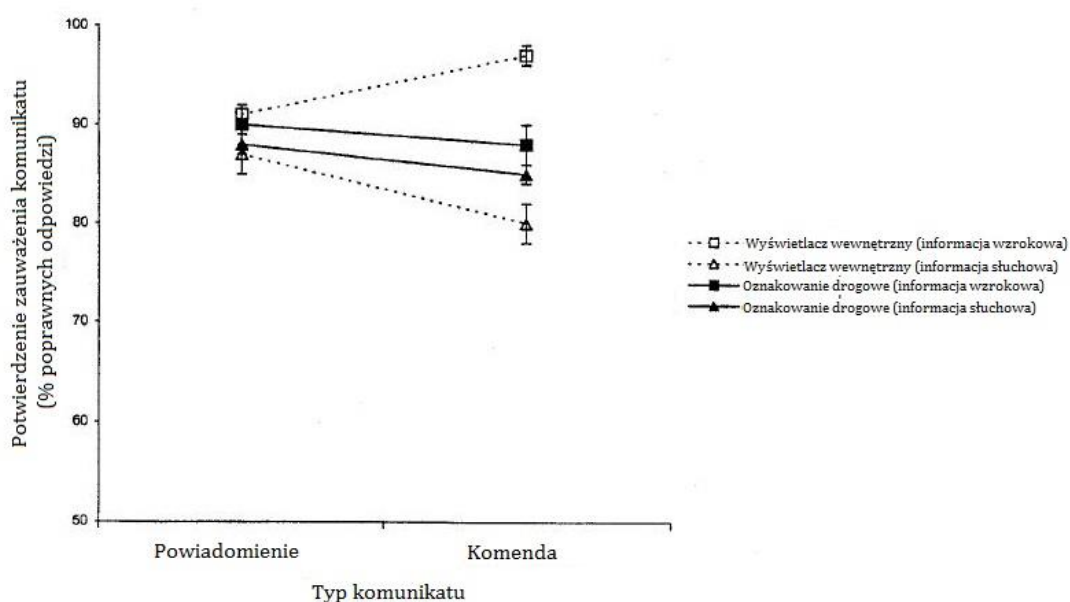
Interesujące rezultaty na temat wpływu różnych modalności bodźców na kierowcę zbadał Mollenhauer i wsp. [81]. Podczas badania uczestnicy byli proszeni o wysłuchanie bądź patrzenie na informację dotyczącą znaków drogowych wyświetlaną na ekranie LCD, zamieszczonym na desce rozdzielczej. Zmierzono wydajność kierowców, zdolność przypomnienia sobie otrzymanej informacji i ich preferencje, który kanał sensoryczny im bardziej odpowiada. Jak się okazało przedstawienie informacji w formie komunikatu głosowego spowodowało, że badani przypominali sobie więcej informacji na temat znaków, ale jednocześnie zmniejszyła się ich wydajność w porównaniu z komunikatem wizualnym. Uczestnicy ocenili również informację dźwiękową za bardziej rozprasającą niż komunikat wizualny.

Efektywność poszczególnych modalności interfejsów wewnątrz pojazdów sprawdzili Matthews i wsp. [73]. W trakcie jazdy (symulacja na komputerze) badani (80 młodych kierowców) rozwiązywało proste zadanie angażujące procesy myślowe, polegające na ocenie słuszności pewnych sentencji. Informacje były prezentowane dźwiękowo bądź wizualnie. Komunikaty głosowe były emitowane na pomocą komputera, natomiast wizualne zostały zamieszczone w scenariuszu drogi (między innymi na znakach drogowych). Manipulacji poddano też priorytet zadania (koncentracja na prowadzeniu pojazdu vs. zadaniu).

Wyniki pokazały znaczący negatywny wpływ komunikatów głosowych na wykonywanie zarówno głównego, jak i dodatkowego zadania w przypadku wysokiego obciążenia jazdą. Dokładność wykonywania drugorzędneho zadania obniżała się, im bardziej

wzrastała koncentracja na prowadzeniu pojazdu. Nie zauważono obciążenia zadaniem dodatkowym przy wykorzystaniu interfejsu wizualnego, co oznacza, że nie zakłócało ono skupienia na tym, co działo się na drodze. Eksperyment jest kolejnym badaniem zaprzeczającym dynamicznej teorii zasobów (str. 27).

Innym badaniem sprzecznym z dynamiczną teorią zasobów jest eksperyment Lee i wsp. [63]. 16 młodych (w wieku 18 – 29 lat) i 16 starszych (w wieku 66 – 83) kierowców przystąpiło do zadania, w którym należało jak najszybciej zareagować na informację dotyczącą zagrożenia na drodze poprzez naciśnięcie jednego z dwóch przycisków znajdujących się na kierownicy. Komunikaty zaprezentowano wizualnie i dźwiękowo. Ekran wizualny znajdował się na desce rozdzielczej bezpośrednio przed kierowcą, około 21 stopni poniżej linii wzroku. Oprócz modalności komunikatu sprawdzono też wpływ jego typu, tj. przedstawiono je jako polecenie lub informację. Kierowcom zmierzono czasy reakcji i sprawdzono liczbę popełnionych błędów.



Rys. 2.16 Modalność i typ komunikatu a reakcja kierowcy na zauważenie wiadomości

Źródło: opracowanie własne na podstawie [63]

Dowiedziano, że komunikaty przedstawione jako polecenia mogą być skuteczniejsze, ale mogą też zmniejszyć bezpieczeństwo. Wykazano także, że interfejsy głosowe wiążą się z większymi kosztami poznawczymi dla kierowcy. Komunikaty wizualne były skuteczniejszą modalnością niż komunikaty dźwiękowe, ponieważ w przypadku ich użycia kierowcy częściej reagowali na zagrożenie poprzez naciśnięcie przycisku. Kierowcy odpowiadali

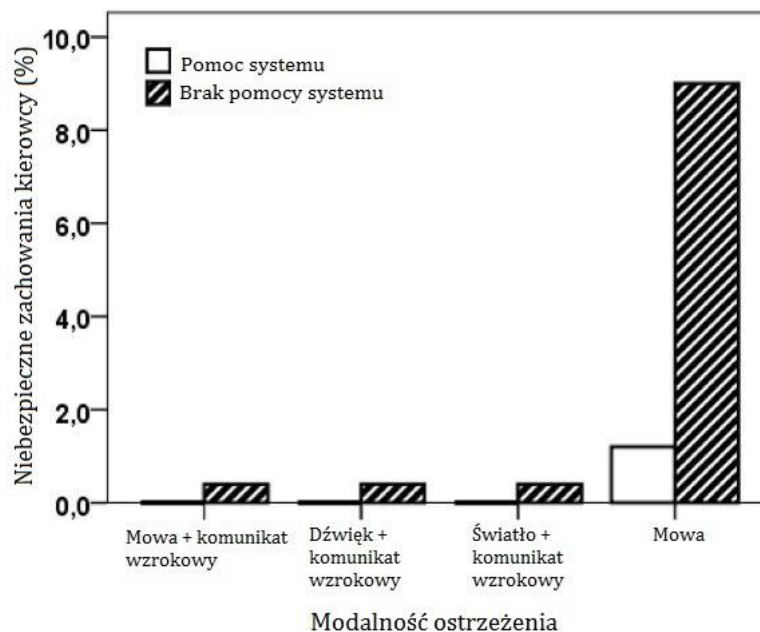
częściej na komunikaty w formie obrazów niż dźwięku (92% vs. 85,4 %), $F(1,16) = 24,46$; $p < 0,05$. Nastąpiła również interakcja między modalnością a typem informacji. Większy ubytek potwierżeń (naciśnięć przycisków) następował podczas komunikatu w formie polecenia (komendy), $F(1,16) = 4,77$; $p < 0,05$. Wynik przedstawiono na rys. 2.16.

Wpływ modalności komunikatów ostrzegawczych na wydajność kierowcy w rzeczywistych warunkach drogowych zbadani również Dingus i wsp. [24]. Eksperyment ten podobnie jak badanie Lee i wsp. nie potwierdza dynamicznej teorii zasobów. Sprawdzono wpływ komunikatu wizualnego, wizualnego w połączeniu z dźwiękowym, dyskretnej informacji wzrokowej i dyskretnej informacji dźwiękowej. Ekran wizualny został umieszczony w desce rozdzielczej obok prędkościomierza i znajdował się około 23 stopni poniżej linii wzroku. Informacja wzrokowa prezentowana była w formie dziewięciu kolorowych pasków umieszczonych w perspektywie. Kolory zmieniały się wraz z odstępem dzielącym pojazd z pojazdem poprzedzającym.

Jak pokazują wyniki, kiedy kierowcy otrzymywali informacje wizualne o zagrożeniu wynikającym ze złego odstępu, stosowali się do niej i jeśli istniała taka potrzeba zwiększali odstępy. Komunikaty dźwiękowe okazały się mniej skuteczne w informowaniu o odległości, ale zdaniem naukowców mogą być przydatne w skracaniu czasu reakcji na wydarzenia, które wymagają hamowania.

Badania przeprowadzone przez Cao i wsp. wskazują na to, że najlepszą i najbardziej efektywną formą ostrzeżeń kierowcy jest połączenie mowy z bodźcami wizualnymi [17]. Czysto dźwiękowe i czysto wizualne sposoby ostrzeżeń o pilnych i istotnych zmianach na drodze są niewystarczające. Naukowcy sprawdzili wpływ dwóch zmiennych: modalności i poziomu automatyzacji (pomocy). Modalność została sprawdzona w czterech wariantach: ostrzeżenie głosowe, wizualno-głosowe, ostrzeżenie wizualne z migającym wskaźnikiem oraz ostrzeżenie wizualne ze wskaźnikiem dźwiękowym. Poziom pomocy mierzono w dwóch sytuacjach: bez i z sugestią działania (AS). W badaniu uczestniczyło 32 kierowców w wieku 20 – 62 lat. Uczestnicy mieli za zadanie prowadzić pojazd i reagować na nieoczekiwane zdarzenia drogowe (przeszkody). Pomiędzy przeszkodami kierowcy byli proszeni o udzielenie odpowiedzi na pytania na temat ostatniej pokonywanej przeszkody (np. jej koloru bądź odległości). Pytania były zadawane w formie werbalnej, natomiast reakcje na te pytania wymagały naciśnięcia jednej z czterech opcji wyświetlanych na ekranie dotykowym. Dokonano pomiaru liczby niebezpiecznych zachowań na drodze, poprawnych odpowiedzi w zadaniu dodatkowym, czasu reakcji, reakcji na nieistotne komunikaty i subiektywnego poczucia obciążenia.

Efekt główny modalności okazał się istotny statystycznie, $F(3, 29) = 5,1$; $p < 0,01$. Podczas jazdy w warunku kontrolnym (bez jakichkolwiek komunikatów) u prawie wszystkich uczestników badania zaobserwowano niebezpieczne zachowania. Kierowcy zareagowali zbyt wolno bądź nieprawidłowo na 19,1% przeszkód. 18 z 32 kierowców (53,6%) udało się uniknąć wszystkich przeszkód w każdym warunku badania w przypadku zaprezentowania ostrzeżenia. Kiedy kierowcy otrzymali wskazówki działania (warunek AS) do niebezpiecznych zachowań doszło jedynie w trakcie ostrzeżeń głosowych (1,2%). Kierowcy ci po usłyszeniu komunikatu nie byli w stanie zareagować tak szybko, jak wymagała tego sytuacja. Kiedy badani nie otrzymywali pomocy, liczba niebezpiecznych zachowań wzrosła we wszystkich modalnościach, szczególnie w sytuacjach, gdy bodźce głosowe były prezentowane osobno (9%). W tym warunku eksperymentalnym wykazano znaczny spadek bezpieczeństwa jazdy, w porównaniu do pozostałych trzech wariantów, $F(1, 31) = 16,2$; $p < 0,001$. Najlepsze rezultaty zauważono podczas jazdy z wykorzystaniem ostrzeżeń wizualnych, co przedstawiono na rys. 2.17.



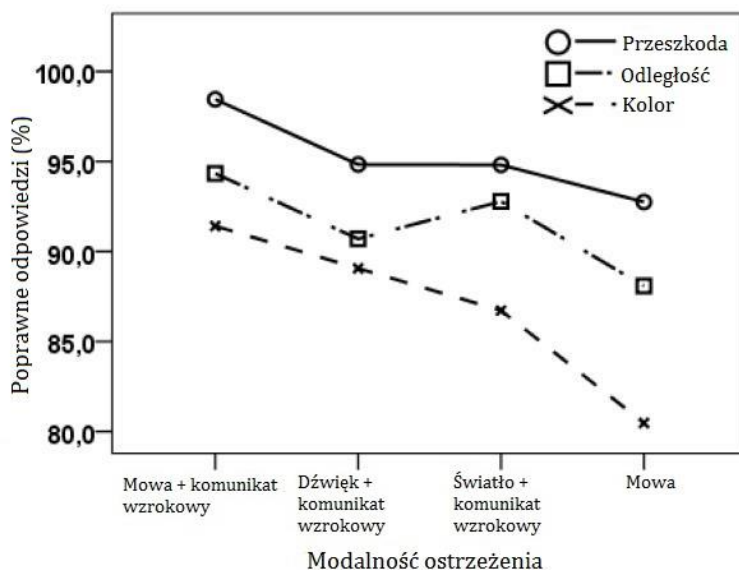
Rys. 2.17 Niebezpieczne zachowania kierowcy a modalność ostrzeżenia i pomoc systemu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [17]

Istotna statystycznie okazała się również interakcja modalności i pomocy systemu, $F(3, 29) = 5,5$; $p < 0,01$. Zależność widoczna była szczególnie w trakcie jazdy, kiedy

prezentowano ostrzeżenia za pomocą jedynie bodźców słuchowych (mowy) i kiedy badani jednocześnie nie otrzymywali sugestii działania.

W zadaniu dodatkowym, polegającym na odpowiadaniu na pytania o przeszkody, najwięcej poprawnych odpowiedzi odnotowano, kiedy zaprezentowano jednocześnie bodźce wzrokowe, słuchowe i udzielono sugestii działania (96,1% poprawnych), $F(1,31) = 10,2$; $p < 0,01$. Wykazano znaczący wpływ modalności komunikatu na poprawność, $F(3, 29) = 3,5$; $p < 0,05$. Naukowcy wskazują na to, że najlepszy wpływ na kierowcę ma prezentacja bodźców pochodzących równocześnie z kilku kanałów sensorycznych. Najgorsze wyniki w zadaniu dodatkowym odnotowano, kiedy w komunikacie wykorzystywano jedynie bodźce słuchowe, $F(1, 31) = 6,6$; $p < 0,05$. Nie znaleziono znaczących różnic w liczbie poprawnych odpowiedzi pomiędzy poszczególnymi warunkami eksperymentalnymi, w których wykorzystano bodźce wizualne. Pomoc systemu i sugestie działania nie miały istotnego statystycznie wpływu na wynik zadania dodatkowego (rys. 2.18).



Rys. 2.18 Odsetek poprawnych odpowiedzi w zadaniu dodatkowym a modalność ostrzeżenia

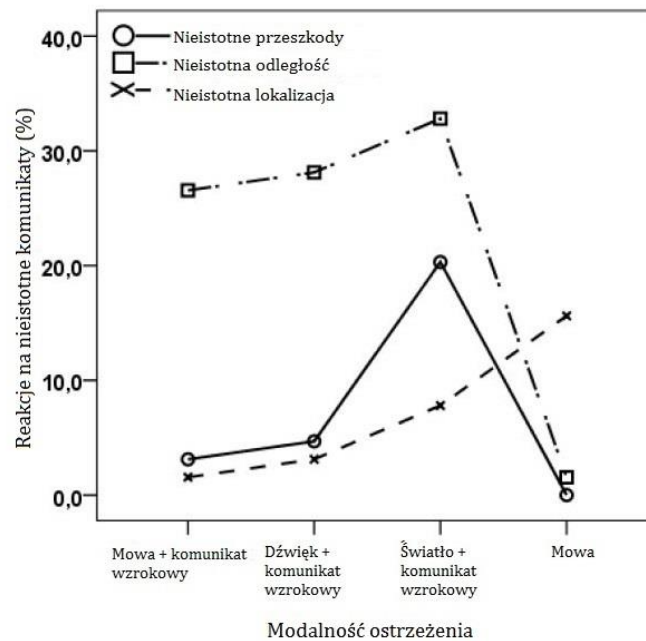
Źródło: opracowanie własne na podstawie [17]

Cao i wsp. odkryli także istotny wpływ modalności na reakcje w przypadku nieistotnych komunikatów, $F(3,29) = 5,2$; $p < 0,01$. Najwięcej zbędnych reakcji nastąpiło, gdy prezentowano bodźce wizualne z migającą wskazówką, $F(1, 31) = 9,8$; $p < 0,01$. Warto zauważyć, że ten warunek eksperymentalny był jedynym, w którym nie zastosowano bodźców słuchowych. Wynik może wskazywać więc na to, iż użycie tych bodźców, może

powodować mniejszą czujność u kierowców. Rezultat z uwzględnieniem informacji o przeszkodzie, dystansie i lokalizacji przedstawiono na rys. 2.19.

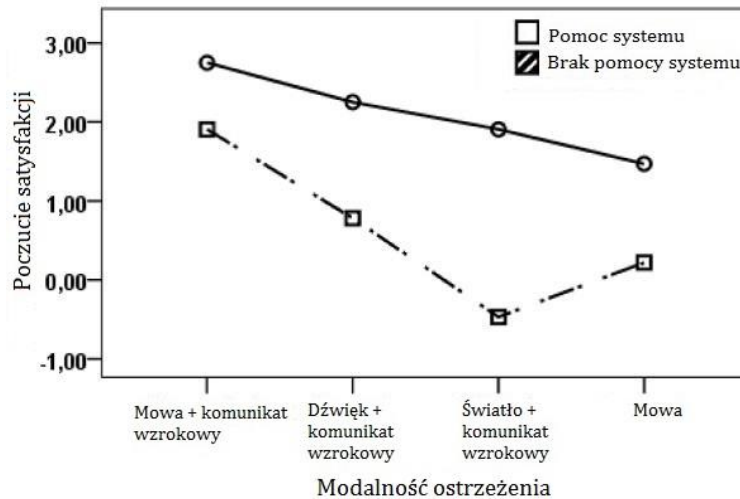
Naukowcy wykazali również istotną zależność modalności komunikatu i czasu reakcji (hamowanie: $F(2,62) = 25,0$; $p < 0,001$; zmiana pasa ruchu: $F(2,30) = 22,0$; $p < 0,001$). Najkrótsze czasy reakcji następowały pod wpływem komunikatów wizualnych z migającą wskazówką, najdłuższe pod wpływem informacji mówionej, kiedy badani nie otrzymywali sugestii działania.

Badani ocenili na 9-stopniowej skali satysfakcję z poszczególnych modalności interfejsów. Jak się okazało, kiedy kierowcy nie otrzymywali sugestii, jakie działanie należy podjąć, najmniej satysfakcjonującą modalnością było połączenie sygnałów wzrokowych z migającą wskazówką. Natomiast kiedy system pomagał uczestnikom podjąć działanie, najmniej zadawalający był komunikat oparty o bodźce słuchowe (mowa). W obu warunkach (bez względu na otrzymywaną pomoc systemu) badani byli najbardziej zadowoleni z połączenia informacji dźwiękowej i wizualnej. Wynik przedstawiono na rys. 2.20.



Rys. 2.19 Reakcje na nieistotne komunikaty (w procentach) a modalność ostrzeżenia

Źródło: opracowanie własne na podstawie [17]



Rys. 2.20 Subiektywne poczucie satysfakcji z poszczególnych modalności ostrzeżeń

Źródło: opracowanie własne na podstawie [17]

W badaniu przeprowadzonym przez Labiale zbadano wpływ różnych modalności (wzrokowej, słuchowej i powtarzającej się słuchowej) i poziomu złożoności komunikatu ostrzegającego przed zagrożeniem na drodze na funkcjonowanie poznawcze kierowców i na subiektywne preferencje [61]. Podczas jazdy w rzeczywistych warunkach drogowych każdy kierowca otrzymał ostrzeżenie w formie dźwięku dzwonka, obrazu mapy bądź komunikatu naprowadzającego. Po upływie 30 s prowadzący badanie prosił uczestników o przypomnienie komunikatu bądź trasy jazdy. Eksperyment dowiódł, że krótkie informacje głosowe oraz informacja wizualna w formie mapy są najefektywniejszymi formami informowania kierowcy. Udowodniono, że komunikaty wizualne w formie tekstu na wyświetlaczu nie są bezpiecznymi ostrzeżeniami podczas prowadzenia pojazdu.

Z kolei eksperyment opisany przez Srinivasana dowiódł, że kierowcy korzystający z systemu audio (system ostrzeżeń dźwiękowych) mają dużo krótsze czasy reakcji niż korzystający ze wskazówek wizualnych [108]. W badaniu porównano czasy reakcji podczas wykonywania zadania dodatkowego jakim było korzystanie z mapy papierowej, wyświetlacza poniżej linii wzroku, elektronicznej mapy znajdującej się na wyświetlaczu poniżej linii wzroku, wyświetlacza znajdującego się powyżej linii wzroku, a także systemu audio. Najkrótszy czas reakcji odnotowano w trakcie wykorzystania systemu audio. Czas reakcji przy wykorzystaniu elektronicznej mapy był krótszy niż podczas używania wyświetlacza poniżej linii wzroku oraz znajdującego się powyżej linii wzroku. Najwolniejsze reakcje odnotowano podczas korzystania z mapy papierowej.

Jak pokazują badania, komunikaty dźwiękowe są uważane za bardziej efektywne niż informacje przekazywane za pomocą modalności wzrokowej, jednak mniej skuteczne niż komunikaty dotykowe i wibro-dotykowe. Przykładem jest eksperyment wykonany przez Huang i wsp., w którym naukowcy przebadali 3 mężczyzn i 3 kobiety w wieku 25 – 31 lat [46]. Porównano trzy rodzaje bodźców sensorycznych: wizualne, słuchowe i dotykowe. Ostrzeżenie wizualne stanowił czerwony trójkąt, dźwiękowe ton 80 dB mający częstotliwość 1000 Hz, natomiast komunikat dotykowy został przekazany przez czujniki umieszczone na kierownicy. Oprócz modalności sprawdzono także częstotliwość sygnału. Zmienną zależną był czas reakcji kierowców na sygnał alarmu.

Istotny statystycznie okazał się wpływ modalności na czas reakcji. Zgodnie z przewidywaniami kierowcy odpowiadali szybciej na ostrzeżenia dźwiękowe i dotykowe niż na komunikaty wzrokowe. Podczas prezentacji komunikatów dźwiękowych czas reakcji wyniósł 540,34 ms. Czas ten był dłuższy od czasu reakcji na bodźce dotykowe o 111,8 ms. Reakcje na komunikaty wizualne były znacząco dłuższe – 848,79 ms. Eksperyment jest zgodny z dynamiczną teorią zasobów (str. 27). Ze względu na to, że uwaga wzrokowa poświęcona jest temu, co dzieje się w danym momencie na drodze, do informowania kierowcy o zagrożeniu powinny być wykorzystywane inne modalności sensoryczne niż wzrok.

Podobne wnioski przedstawiono w badaniu przeprowadzonym na szerszą skalę przez Ng i Chana [82]. Eksperymentowi poddano 94 uczestników w wieku 11-60 lat. Zadaniem badanych była jak najszybsza odpowiedź na bodźce o różnych modalnościach poprzez naciśnięcie klawisza na klawiaturze. Czas reakcji na bodźce słuchowe, choć był dłuższy niż na bodźce wibro-dotykowe, okazał się o 5% krótszy niż czas reakcji na bodźce wzrokowe. Ponadto, badacze wykazali, że zmienne takie jak wiek, płeć, wykształcenie, czas spędzony przy komputerze, reakcja za pomocą lewego lub prawego palca, a także trudność zadania mają wpływ na czas odpowiedzi. Czas reakcji zmniejszał się wraz z wiekiem (najkrótszy w grupie 21-30 lat), po czym wydłużał się w kolejnych grupach wiekowych. Kobiety odpowiadały na bodźce szybciej niż mężczyźni. Szybkość reakcji wzrastała ponadto wraz ze wzrostem wykształcenia. Częstsze korzystanie z komputera w codziennym życiu wpływało na skrócenie czasu reakcji. Czas ten wydłużał się wraz ze wzrostem trudności zadania. Wykazano także, że jest on krótszy w przypadku odpowiedzi przy pomocy palca prawego niż lewego.

Mohebbi i wsp. porównali wpływ dwóch modalności na czas reakcji odpowiedzi na komunikaty ostrzegające przed kolizjami tylnymi [80]. Badaniu poddano 16 kierowców,

których zadaniem było kierowanie pojazdem i jednocześnie prowadzenie rozmowy telefonicznej. Pod uwagę wzięto zmienne niezależne: rodzaj ostrzeżenia (brak, ostrzeżenie głosowe, ostrzeżenie dotykowe) oraz rozmowę telefoniczną (brak, prosta rozmowa – zestaw głośnomówiący, trudna rozmowa bez konieczności używania rąk – zestaw głośnomówiący). Wyniki pokazały istotny statystycznie wpływ modalności komunikatu, $F(2, 30) = 46,1$; $p < 0,001$. Komunikat dźwiękowy skrócił czas reakcji na ostrzeżenie i przyspieszył hamowanie, jednak nie był on tak skuteczny jak ostrzeżenie dotykowe. Istotny okazał się również efekt interakcji modalności ostrzeżenia i złożoności rozmowy, $F(4, 60) = 2,85$; $p < 0,05$. Podczas prostej rozmowy telefonicznej ostrzeżenie dźwiękowe wywołało wydłużenie się czasu reakcji kierowcy, $t(30) = -7,8$; $p < 0,001$. Czas reakcji na komunikat dotykowy w tym przypadku nie różnił się od tego, jaki uzyskali kierowcy, którzy prowadzili pojazd bez rozmowy telefonicznej, $t(30) = -1,8$; $p > 0,05$. W sytuacji, gdy kierowcy prowadzili trudniejszą (bardziej złożoną) rozmowę telefoniczną, zaobserwowano wydłużenie się czasu reakcji przy wszystkich 3 modalnościach: bez ostrzeżenia – $t(30) = -6,1$; $p < 0,001$; ostrzeżenie dotykowe – $t(30) = -5,7$; $p < 0,001$; ostrzeżenie dźwiękowe – $t(30) = -7,8$; $p < 0,001$.

Mohebbi i wsp. sprawdzili również średni odsetek wystąpienia kolizji podczas każdego warunku badania. Analizy nie wykazały istotnych statystycznie zależności, jednak widoczny jest wzrost liczby kolizji wraz ze wzrostem złożoności rozmowy, szczególnie w warunku, kiedy badani otrzymywali ostrzeżenie dźwiękowe [80].

W innym badaniu Lee i McGehee porównali wpływ czterech rodzajów modalności: dźwięku, wibracji fotela, pulsacji hamulca i kombinacji wszystkich trzech modalności na hamowanie kierowcy podczas eksperymentu w symulatorze jazdy [64]. Wszystkim warunkom towarzyszyło pokazanie się dodatkowego alarmu w postaci wizualnej ikony. Każdy z 60 uczestników w wieku 30-50 lat spędził w symulatorze 35 minut. Kierowcy doświadczyli dwóch trudnych, czterech umiarkowanych i ośmiu łagodnych sytuacji hamowania. Dokonano oszacowania czasów reakcji i TTC (czasu do kolizji). Jak pokazały wyniki bodźce słuchowe nie miały znaczącego wpływu na wskaźnik TTC. Nie miały również istotnego statystycznie wpływu na średni czas reakcji na ostrzeżenia. Maksymalny czas hamowania podczas każdej modalności był podobny, $F(4,50) = 0,45$; $p > 0,05$. Podczas prezentacji bodźców słuchowych czas ten był co prawda niższy od pozostałych, jednak nie była to znacząca zależność. Najdłuższy czas hamowania odnotowano w przypadku połączenia modalności wzrokowej, słuchowej i dotykowej.

Skuteczność różnych modalności w ostrzeganiu rozkojarzonego kierowcy przed niebezpieczeństwem w trudnej sytuacji drogowej zbadali też Gielen i Schmidt [32]. W badaniu uczestniczyło 8 osób. Dokonano oszacowania czasu reakcji badanych pod wpływem bodźców wizualnych, słuchowych i kombinacji obu modalności. Wykazano, że modalność wzrokowa spowodowała dłuższy czas odpowiedzi na bodziec (220,2 ms) niż modalność słuchowa (186,6 ms). Połączenie obu modalności spowodowało pośredni czas reakcji (204 ms). Zależność między modalnością a czasem odpowiedzi była istotna statystycznie, $F(2,10) = 71,6$; $p < 0,05$. Wpływ zauważono dla każdej z badanych osób.

W badaniu Maltz i wsp. wykazano wpływ różnych ostrzeżeń na zachowanie kierowcy [72]. 135 kierowców w wieku 21-31 lat wzięło udział w eksperymencie w symulatorze jazdy. Spośród nich 120 osób otrzymało ostrzeżenie, natomiast 15 stanowiło grupę kontrolną. Kierowcy podobnie jak w badaniu Gielena otrzymali alerty w modalności słuchowej, wzrokowej bądź komunikat multimodalny. Alarmy mogły ostrzegać badanych przed prawdziwymi zagrożeniami lub stanowić alarmy fałszywe. Zmierzono czas reakcji na poszczególne sygnały.

W badaniu tym udowodniono, że modalność interfejsu ma istotny statystycznie wpływ na czas reakcji kierowców. W analizach wyników porównano interfejs oparty o wskazówki wizualne, dźwiękowe (mowę bądź sygnał) oraz połączenie ich: wskazówki wizualne i mowa lub wskazówki wizualne i sygnał. Kiedy badani byli w rzeczywistej sytuacji zagrożenia, czas reakcji na bodźce wizualne różnił się znacząco od czasu na bodźce słuchowe, $F(1,18) = 27,48$; $p < 0,0001$. Reakcja na bodźce wzrokowe była dużo dłuższa niż na bodźce słuchowe (0,66 s vs. 0,52 s). Czas odpowiedzi na bodźce słuchowe i połączenie obu rodzajów modalności był taki sam – 0,52 s. Podczas eksperymentu nie odnaleziono jednak różnic w czasie reakcji na alarmy fałszywe, $F(1,9) = 1,54$; $p = 0,25$. Najdłuższe czasy reakcji następowały na bodźce wizualne, najkrótsze zaś na połączenie obu modalności.

W eksperymencie Cao i wsp. porównali efektywność pięciu rodzajów modalności komunikatu informującego o lokalnym zagrożeniu na drodze (mowy, komunikatu w formie tekstu, ikony oraz dwóch kombinacji tekstu i ikon) [16]. Zbadano 10 osób (2 kobiety i 8 mężczyzn) w wieku 25-45 lat. Sprawdzono czas, jaki potrzebują badani do całkowitego zrozumienia ostrzeżenia.

Zgodnie z przewidywaniami modalność miała istotny wpływ na czas potrzebny do dostrzeżenia i zrozumienia komunikatu, $F(3, 27) = 11,46$; $p < 0,001$. Wyniki okazały się jednak sprzeczne z wcześniej omówionymi badaniami – komunikat w formie ikony okazał się najlepszym i najefektywniejszym w tym eksperymencie rodzajem modalności (1,8 s).

Najdłuższy czas odnotowano na komunikat w formie głosowej (5 s), a następnie w formie tekstu (3,6 s) Naukowcy nie zaprzeczają jednak skuteczności ostrzeżeń dźwiękowych. Ich zadaniem komunikaty te są efektywne w sytuacjach, kiedy informacja prezentowana jest wystarczająco długo przed zdarzeniem drogowym.

Grey w swoim eksperymencie porównał różne rodzaje komunikatów dźwiękowych, aby sprawdzić, który z nich jest najbardziej skuteczny [37]. Porównano ostrzeżenia o różnej – stałej bądź narastającej – intensywności. Pod uwagę wzięto komunikat o stałej intensywności, pulsujący, dźwięk klaksonu oraz trzy rodzaje komunikatów pojawiające się w różnych momentach przez zdarzeniem. Zmienną zależną był średni czas reakcji na sygnały, średni odsetek kolizji oraz średnia liczba hamowań na niepewne ostrzeżenia.

Naukowcy odnotowali istotny statystycznie efekt główny w zależności od rodzaju ostrzeżenia, $F(7,133) = 17,3$; $p < 0,001$. Ostrzeżenia pojawiające się na długo przed zdarzeniem drogowym powodowały najszybsze reakcje. Zauważono również znaczący wpływ rodzaju komunikatu na liczbę kolizji, $F(7,133) = 2,2$; $p < 0,05$. Istotny był także trzeci efekt – wpływ rodzaju ostrzeżenia na liczbę hamowań, $F(6,19) = 6,8$; $p < 0,01$. Najwięcej hamowań zanotowano pod wpływem dźwięku klaksonu.

Walker i wsp. potwierdzili wyższość wskaźników dźwiękowych nad wizualnymi w interfejsach informujących kierowców o zagrożeniach [117]. Zbadano osoby młode, w średnim wieku i starsze, w każdej grupie po 42 osoby. Każdy z uczestników miał do przejechania 42-kilometrową trasę w symulatorze jazdy. Stworzono 7 warunków eksperymentalnych. W grupie kontrolnej badani informowani byli jedynie za pomocą mapy. W pozostałych 6 warunkach wykorzystano wskazówki dźwiękowe i wizualne, będące na niskim, średnim i wysokim poziomie złożoności. Prowadzenie pojazdu utrudniono poprzez zwiększenie obciążenia tj. dodanie wiatrów bocznych, innego pojazdu w środowisku drogowym, zadania arytmetycznego oraz zwężenia pasa ruchu. Dokonano pomiaru czasu reakcji, tętna, prędkości, położenia w pasie ruchu. Wykazano, że interfejsy oparte o modalność słuchową są bezpieczniejsze niż wizualne. Ponadto badani efektywniej reagowali na komunikaty o niższym i średnim poziomie złożoności. Podczas używania wskazówek wizualnych u badanych zauważono dłuższe czasy reakcji oraz niższą prędkość niż w przypadku komunikatów dźwiękowych w trakcie wykonywania zadania nawigacyjnego.

Liu potwierdził wpływ wskaźników dźwiękowych i interfejsów multimodalnych na bezpieczeństwo i wygodę kierowcy [67]. W eksperymencie komunikaty przedstawiono w modalności słuchowej, wizualnej i kombinacji obu modalności. Badanie przeprowadzono

w symulatorze jazdy i sprawdzono wpływ takich zmiennych jak: modalność wiadomości, wiek kierowcy, stopień obciążenia poznawczego oraz złożoności komunikatu na czas reakcji na niebezpieczne, nagłe sytuacje na drodze, wydajność, prowadzenie pojazdu. Wskaźniki dźwiękowe oraz interfejsy multimodalne spowodowały krótsze czasy reakcji na informacje o zagrożeniu niż wskaźniki wizualne. Z kolei pod względem popełniania błędów przez kierowców lepsze efekty zauważono przy interfejsach multimodalnych niż przy dźwiękowych.

Podobne zależności zaobserwowano także w badaniu Gish i wsp. [34]. Naukowcy porównali korzyści i możliwości zakłóceń jazdy różnych interfejsów – wyświetlacza zamieszczonego powyżej linii wzroku, poniżej (konieczność skierowania wzroku w dół) oraz wskazówek dźwiękowych. Sprawdzono wpływ na prowadzenie pojazdu (zadanie główne) oraz na reakcje na krytyczne zdarzenia drogowe przy różnym natężeniu światła. Porównano osoby starsze z młodymi kierowcami. Wykazano, że wyniki dla obu wyświetlaczy wizualnych były zbliżone, natomiast czynności wykonywane przy użyciu interfejsu dźwiękowego okazały się dużo dokładniejsze i szybsze. Nie miały także negatywnego wpływu na jakość prowadzenia pojazdu i były bardziej efektywne pod względem reakcji na nieprzewidziane, niebezpieczne sytuacje.

Korzyści płynące z zastosowania interfejsów głosowych dostrzegli także Ranney i wsp. [91]. Badacze chcieli określić, czy interfejs głosowy powoduje zmniejszenie rozproszenia drugorzędnymi zadaniami o różnej złożoności, wykonywanymi podczas jazdy. Porównali interfejsy oparte o bodźce słuchowe i bodźce wizualne. Zadaniem badanych był przejazd dwóch serii ośmiu okrążeń po wyznaczonej trasie podczas dwóch czterogodzinnych sesji. Oprócz zadania głównego, jakim było prowadzenie pojazdu, badani mieli do rozwiązania zadanie drugorzędne na jednym z trzech poziomów trudności: zadanie podstawowe – strojenie radia, wybieranie numeru telefonu; zadanie proste – odnalezienie informacji i utworzenie notatki głosowej; zadanie złożone – zadanie proste wzbogacone o konieczność wybierania numeru telefonu oraz pozyskanie informacji z systemu. W eksperymencie wzięło udział 21 osób, 11 mężczyzn i 10 kobiet. Dokonano pomiaru m.in. położenia względem poprzedzającego pojazdu, położenia w pasie ruchu, wpływu na spostrzeganie peryferyjne.

Zgodnie z przewidywaniami badaczy zadanie dodatkowe spowodowało znaczne zmniejszenie kontroli nad pojazdem i spadek wydajności kierowcy. Wykazano, że interfejs oparty o wskazówki głosowe zredukował negatywne efekty związane z drugorzędną aktywnością. Istotny statystycznie okazał się efekt interakcyjny modalności informacji

i złożoności dodatkowego zadania, $F(3,57) = 8,65$; $p = 0,0017$. Wraz ze wzrostem złożoności (trudności) zadania zauważalny był wzrost dystansu do poprzedzającego samochodu. Podczas wykonywania zadania prostego i złożonego badani zachowywali dużo dłuższy dystans przy wykorzystaniu interfejsu wizualnego niż przy komunikatach głosowych [91].

Ranney i wsp. udowodnili, że zadania dodatkowe wykonywane z interfejsem głosowym były związane z mniejszą zmiennością położenia w pasie ruchu ($M = 20,9$ cm, $SD = 7,5$) niż te, które wykonywano wykorzystując interfejs wizualny ($M = 22,8$ cm, $SD = 7,9$), $F(1,18) = 15,15$; $p = 0,001$.

Analiza wyników testu PDT (testu detekcji peryferyjnej) wykazała, że istnieje zależność między złożonością zadania, modalnością interfejsu a postrzeganiem peryferyjnym. Wykazano istotny statystycznie efekt interakcyjny tych zmiennych, $F(3,57) = 3,59$; $p < 0,02$. We wszystkich warunkach badania osoby korzystające z interfejsu głosowego miały lepsze widzenie peryferyjne (sposzregano więcej obiektów w danym polu) niż badani kierujący pojazdem wyposażonym w interfejs wizualny. Różnice pomiędzy warunkami eksperymentalnymi zauważono szczególnie podczas wykonywania zadania prostego i złożonego.

Badacze dodatkowo dokonali analizy czasu reakcji na obiekty znajdujące się w polu peryferyjnym. Wykazano, że podczas wykonywania zadania dodatkowego kierowcy reagowali szybciej przy interfejsie głosowym ($M = 0,80$ s, $SD = 0,32$) niż przy interfejsie wizualnym ($M = 0,87$ s, $SD = 0,24$), $F(1,19) = 7,05$; $p < 0,02$ [91].

Przytoczone wyniki licznych badań wskazują nie tylko na zainteresowanie tematyką modalności i jej wpływu na działanie kierowców, ale także na istotną rolę sposobu informowania kierowców o sytuacjach niebezpiecznych. Czas reakcji i podjęcie odpowiednich działań są kluczowe również w procesie przejmowania kontroli nad pojazdem. Podsumowanie przeprowadzonej w podrozdziale 2.4. analizy badań przedstawiono w formie tabelarycznej (tabela 2.6).

Tabela 2.6 Podsumowanie analizy badań

Autorzy publikacji	Wnioski
Scott J. J., Gray R.	- ostrzeżenie przed kolizją (najechaniem na pojazd poprzedzający) poprzez bodziec wzrokowy jest mniej skuteczną modalnością niż bodziec słuchowy czy dotykowy

Autorzy publikacji	Wnioski
	<ul style="list-style-type: none"> - najdłuższy czas reakcji uzyskano w przypadku warunku kontrolnego (bez ostrzeżenia)
<p style="text-align: center;">Ho C., Spence C., Tan H. Z.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - interfejsy niewykorzystujące bodźców wzrokowych są bardziej efektywne jako systemy ostrzegające kierowcę przed zagrożeniem, ponieważ nie zakłócają wykonywania pierwszorzędneho zadania jakim jest kierowanie pojazdem - odsetek poprawnych odpowiedzi na bodźce był najmniejszy w przypadku ostrzeżeń wizualnych
<p style="text-align: center;">Spence C., Nicholls M., Driver J.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - czas reakcji na bodźce wizualne był krótszy niż na bodźce dotykowe, jednak dłuższy w porównaniu z sygnałami dźwiękowymi - uczestnicy spodziewający się otrzymania bodźca wzrokowego osiągnęli dużo krótszy czas odpowiedzi
<p style="text-align: center;">Sodnik J., Dicke C., Tomažič S., Billinghurst M.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - klasyczny interfejs oparty o bodźce wizualne był tak samo efektywny jak pozostałe dwa oparte na komunikatach dźwiękowych - wydajność i osiągi kierowców w trakcie jazdy były znacznie lepsze w przypadku zastosowania interfejsów dźwiękowych, a nie wizualnych - obciążenie zadaniem było wyższe podczas używania interfejsu wizualnego - interfejsy graficzne oparte o bodźce wzrokowe są trudniejsze w użyciu i zapewniają mniejszy komfort kierowcy
<p style="text-align: center;">Seppelt B., Wickens C. D.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - im większa odległość między wyświetlaczem a przednią szybą pojazdu tym większe poznawcze koszty ponosi kierowca ze względu na podział uwagi pomiędzy te dwa obszary - informacje przekazywane za pomocą modalności wizualnej lepiej przekazywać wykorzystując ekrany znajdujące się na linii wzroku - informacje istotne przekazywane drogą wzrokową podczas zagrażających incydentów powodowały najdłuższe czasy reakcji, zaś najkrótsze – informacje istotne przekazywane kanałem słuchowym
<p style="text-align: center;">Liu Y. C.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - komunikaty głosowe oraz wyświetlacze multimodalne powodują krótsze czasy reakcji, większą liczbę prawidłowych odpowiedzi na zdarzenia drogowe i mniejsze obciążenie poznawcze niż komunikaty

Autorzy publikacji	Wnioski
	<p>oparte jedynie na bodźcach wzrokowych</p> <ul style="list-style-type: none"> - czas odpowiedzi na bodźce wzrokowe był najdłuższy spośród wszystkich modalności - najkrótsze czasy zauważono podczas kontaktu z interfejsem multimodalnym (dźwiękowo-wzrokowym) - informacje przekazywane za pomocą słuchu bądź multimodalnie miały lepszy wpływ na wydajność kierowców
Rodway P.	<ul style="list-style-type: none"> - dźwiękowe sygnały ostrzegawcze nie są bardziej skuteczne niż komunikaty wizualne, a znaczenie ma położenie wyświetlacza przedstawiającego wizualne sygnały ostrzegawcze - czas reakcji na niespodziewane zdarzenia drogowe był dużo dłuższy w sytuacji, gdy badani używali wyświetlacza znajdującego się poniżej linii wzroku - interfejs głosowy spowodował krótszy czas reakcji niż interfejs zamieszczony wewnątrz pojazdu poniżej linii wzroku - interfejs głosowy powodował dużo krótsze czasy odpowiedzi podczas wykonywania zadania drugorzędowego niż interfejs wizualny umieszczony na linii wzroku
Mollenhauer M., Lee J., Cho K., Hulse M., Dingus T.	<ul style="list-style-type: none"> - przedstawienie informacji w formie komunikatu głosowego spowodowało, że badani przypominali sobie więcej informacji na temat znaków, ale jednocześnie zmniejszyła się ich wydajność w porównaniu z komunikatem wizualnym - uczestnicy ocenili informację dźwiękową za bardziej rozpraszającą niż komunikat wizualny
Matthews G., Sparkes T., Bygrave H.	<ul style="list-style-type: none"> - wyniki pokazały znaczący negatywny wpływ komunikatów głosowych na wykonywanie zarówno głównego, jak i dodatkowego zadania w warunkach wysokiego obciążenia jazdy - dokładność wykonywania drugorzędowego zadania obniżała się, im bardziej wzrastała koncentracja na prowadzeniu pojazdu - nie zauważono obciążenia zadaniem dodatkowym przy wykorzystaniu interfejsu wizualnego - nie zakłócało ono skupienia na

Autorzy publikacji	Wnioski
	tym, co działo się na drodze
Lee J. D., Gore B. F., Campbell J. L.	<ul style="list-style-type: none"> - komunikaty przedstawione jako polecenia mogą być skuteczniejsze, ale mogą też zmniejszyć bezpieczeństwo - interfejsy głosowe wiążą się z większymi kosztami poznawczymi dla kierowcy - komunikaty wizualne były skuteczniejszą modalnością niż komunikaty dźwiękowe - kierowcy odpowiadali częściej na komunikaty w formie obrazów niż dźwięku - największy ubytek potwierdzeń (naciśnięć przycisków) następował podczas komunikatu w formie polecenia (komendy)
Dingus T. A., McGehee D. V., Manakkal N., Jahns S. K., Carney C., Hankey J. M.	<ul style="list-style-type: none"> - kierowcy stosowali się do informacji wizualnej o zagrożeniu wynikającym ze złego odstępu i jeśli istniała taka potrzeba zwiększali odstępy - komunikaty dźwiękowe okazały się mniej skuteczne w informowaniu o odległości, ale mogą być przydatne w skracaniu czasu reakcji na wydarzenia, które wymagają hamowania
Cao Y., Mahr A., Castronovo S., Theune M., Stahl C., Müller C.	<ul style="list-style-type: none"> - najlepszą i najbardziej efektywną formą ostrzeżeń kierowcy jest połączenie mowy z bodźcami wizualnymi - czysto dźwiękowe i czysto wizualne sposoby ostrzeżeń o pilnych i istotnych zmianach na drodze są niewystarczające - najlepszy wpływ na kierowcę ma prezentacja bodźców pochodzących równocześnie z kilku kanałów sensorycznych - najgorsze wyniki w zadaniu dodatkowym odnotowano, kiedy w komunikacji wykorzystywano jedynie bodźce słuchowe - użycie bodźców wizualnych z migającą wskazówką powodowało mniejszą czujność u kierowców - badani byli najbardziej zadowoleni z połączenia informacji dźwiękowej i wizualnej
Labiale G.	- krótkie informacje głosowe oraz informacja wizualna w formie mapy są najefektywniejszymi formami informowania kierowcy

Autorzy publikacji	Wnioski
	<ul style="list-style-type: none"> - komunikaty wizualne w formie tekstu na wyświetlaczu nie są bezpiecznymi ostrzeżeniami podczas prowadzenia pojazdu
<p>Srinivasan R., Jovanis P.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - kierowcy korzystający z systemu audio (system ostrzeżeń dźwiękowych) mają dużo krótsze czasy reakcji niż korzystający ze wskazówek wizualnych - najkrótszy czas reakcji odnotowano w trakcie wykorzystania systemu audio - czas reakcji przy wykorzystaniu elektronicznej mapy był krótszy niż podczas używania wyświetlacza poniżej linii wzroku oraz znajdującego się powyżej linii wzroku - najwolniejsze reakcje odnotowano podczas korzystania z mapy papierowej
<p>Huang Y. C., Tsai C. J., Kuo J. Y., Wu F. G.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - komunikaty dźwiękowe są uważane za bardziej efektywne niż informacje przekazywane za pomocą modalności wzrokowej, jednak mniej skuteczne niż komunikaty dotykowe i wibro-dotykowe - kierowcy odpowiadali szybciej na ostrzeżenia dźwiękowe i dotykowe niż na komunikaty wzrokowe - do informowania kierowcy o zagrożeniu powinny być wykorzystywane inne modalności sensoryczne niż wzrok ze względu na to, że uwaga wzrokowa poświęcona jest temu, co dzieje się w danym momencie na drodze
<p>Ng Annie W. Y., Chan Alan H. S.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - czas reakcji na bodźce słuchowe, choć był dłuższy niż na bodźce wibro-dotykowe, okazał się o 5% krótszy niż czas reakcji na bodźce wzrokowe - na czas odpowiedzi miały wpływ zmienne takie jak wiek, płeć, wykształcenie, czas spędzany przy komputerze, reakcja za pomocą lewego lub prawego palca, a także trudność zadania - czas reakcji zmniejszał się wraz z wiekiem (najkrótszy w grupie 21-30 lat), po czym wydłużał się w kolejnych grupach wiekowych - kobiety odpowiadały na bodźce szybciej niż mężczyźni - szybkość reakcji wzrastała wraz ze wzrostem wykształcenia

Autorzy publikacji	Wnioski
	<ul style="list-style-type: none"> - częstsze korzystanie z komputera w codziennym życiu wpływało na skrócenie czasu reakcji - czas reakcji wydłużał się wraz ze wzrostem trudności zadania - czas reakcji był krótszy w przypadku odpowiedzi przy pomocy palca prawego niż lewego
<p>Mohebbi R., Gray R., Tan H. Z.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - komunikat dźwiękowy skrócił czas reakcji na ostrzeżenie i przyspieszył hamowanie, jednak nie był tak skuteczny jak ostrzeżenie dotykowe - prosta rozmowa telefoniczna i ostrzeżenie dźwiękowe wywołało wydłużenie się czasu reakcji kierowcy - czas reakcji na komunikat dotykowy podczas prostej rozmowy telefonicznej nie różnił się od tego, jaki uzyskali kierowcy, którzy prowadzili pojazd bez rozmowy telefonicznej - zaobserwowano wydłużenie się czasu reakcji w sytuacji, gdy kierowcy prowadzili trudniejszą (bardziej złożoną) rozmowę telefoniczną przy wszystkich 3 modalnościach: bez ostrzeżenia, z ostrzeżeniem dotykowym i z ostrzeżeniem dźwiękowym - wykazano wzrost liczby kolizji wraz ze wzrostem złożoności rozmowy, szczególnie w warunku, kiedy badani otrzymywali ostrzeżenie dźwiękowe
<p>Lee J. D., McGehee D. V., Brown T. L., Marshall D.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - bodźce słuchowe nie miały znaczącego wpływu na wskaźnik TTC (czas do kolizji) - bodźce słuchowe nie miały istotnego statystycznie wpływu na średni czas reakcji na ostrzeżenia - maksymalny czas hamowania podczas każdej modalności był podobny (dźwięk, wibracja fotela, pulsowanie hamulca, połączenie 3 modalności) - podczas prezentacji bodźców słuchowych czas hamowania był niższy od pozostałych - najdłuższy czas hamowania odnotowano w przypadku połączenia modalności wzrokowej, słuchowej i dotykowej

Autorzy publikacji	Wnioski
Gielen S. C., Schmidt R. A., Van den Heuvel P. J.	<ul style="list-style-type: none"> - modalność wzrokowa wydłuża czas odpowiedzi na bodziec w porównaniu do modalności słuchowej - połączenie obu modalności spowodowało pośredni czas reakcji - najkrótszy czas reakcji uzyskano przy modalności słuchowej
Maltz M., Shinar D.	<ul style="list-style-type: none"> - modalność interfejsu ma istotny statystycznie wpływ na czas reakcji kierowców - reakcja na bodźce wzrokowe była dużo dłuższa niż na bodźce słuchowe - czas odpowiedzi na bodźce słuchowe i połączenie obu rodzajów modalności był taki sam - najdłuższe czasy reakcji następowały na bodźce wizualne, najkrótsze zaś na połączenie bodźców wizualnych i dźwiękowych
Cao Y., Mahr A., Castronovo S., Muller C.	<ul style="list-style-type: none"> - modalność miała istotny wpływ na czas potrzebny do dostrzeżenia i zrozumienia komunikatu - komunikat w formie ikony okazał się najlepszym i najefektywniejszym w tym eksperymencie rodzajem modalności - najdłuższy czas odnotowano na komunikat w formie głosowej, a następnie w formie tekstu - nie zaprzecza się skuteczności ostrzeżeń dźwiękowych - komunikaty dźwiękowe są efektywne w sytuacjach, kiedy informacja prezentowana jest wystarczająco długo przed zdarzeniem drogowym
Grey R.	<ul style="list-style-type: none"> - ostrzeżenia pojawiające się na długo przed zdarzeniem drogowym powodowały najszybsze reakcje - istnieje znaczący wpływ rodzaju komunikatu dźwiękowego na liczbę kolizji - istotny jest także wpływ rodzaju ostrzeżenia na liczbę hamowań - najwięcej hamowań zanotowano pod wpływem dźwięku klaksonu
Walker J., Alicandri E., Sednew C., Roberts K.	<ul style="list-style-type: none"> - interfejsy oparte o modalność słuchową są bezpieczniejsze niż wizualne - badani efektywniej reagowali na komunikaty o niższym i średnim poziomie złożoności

Autorzy publikacji	Wnioski
	<ul style="list-style-type: none"> - w trakcie wykonywania zadania nawigacyjnego wskazówki wizualne wydłużały czas reakcji oraz obniżały prędkość jazdy w stosunku do komunikatów dźwiękowych
Liu Y. C.	<ul style="list-style-type: none"> - istnieje wyraźny wpływ wskaźników dźwiękowych i interfejsów multimodalnych na bezpieczeństwo i wygodę kierowcy - wskaźniki dźwiękowe oraz interfejsy multimodalne powodują krótsze czasy reakcji na informacje o zagrożeniu niż wskaźniki wizualne - lepsze efekty pod względem popełniania błędów przez kierowców zauważono przy interfejsach multimodalnych niż przy dźwiękowych
Gish K., Staplin L., Stewart J., Perel M.	<ul style="list-style-type: none"> - wyświetlacze zamieszczone powyżej i poniżej linii wzroku powodują podobne rozproszenie uwagi kierowcy i reakcje na krytyczne zdarzenia drogowe przy różnym natężeniu światła - czynności wykonywane przy użyciu interfejsu dźwiękowego były dużo dokładniejsze i szybsze - interfejs dźwiękowy w odróżnieniu od wyświetlaczy nie miał negatywnego wpływu na jakość prowadzenia pojazdu i był bardziej efektywny pod względem reakcji na nieprzewidziane, niebezpieczne sytuacje
Ranney T., Harbluk J., Noy Y.	<ul style="list-style-type: none"> - zadania dodatkowe powodowały znaczne zmniejszenie kontroli nad pojazdem i spadek wydajności kierowcy - interfejs oparty o wskazówki głosowe redukował negatywne efekty związane z drugorzędną aktywnością - wraz ze wzrostem trudności zadania zauważalny był wzrost dystansu do poprzedzającego samochodu - podczas wykonywania zadania prostego i złożonego badani zachowywali dużo dłuższy dystans przy wykorzystaniu interfejsu wizualnego niż przy komunikatach głosowych - zadania dodatkowe wykonywane z interfejsem głosowym były związane z mniejszą zmiennością położenia w pasie ruchu niż te, które wykonywano wykorzystując interfejs wizualny - istnieje zależność między złożonością zadania, modalnością interfejsu

Autorzy publikacji	Wnioski
	a spostrzeganiem peryferyjnym - osoby korzystające z interfejsu głosowego miały lepsze widzenie peryferyjne (spostregano więcej obiektów w danym polu) niż badani kierujący pojazdem wyposażonym w interfejs wizualny - podczas wykonywania zadania dodatkowego kierowcy reagowali szybciej przy interfejsie głosowym niż przy interfejsie wizualnym

Źródło: opracowanie własne na podstawie literatury przytoczonej w podrozdziale 2.4.

W przedstawionej literaturze opisano liczne eksperymenty badające wykorzystanie różnych modalności i ich wpływ na kierowanie pojazdem. Nie można jednoznacznie ocenić, jaki rodzaj interfejsu jest najbardziej odpowiedni i bezpieczny. Różne warunki przeprowadzonych eksperymentów tj. liczebność grupy badawczej, typ i długość trasy, wygląd, położenie i sposób działania interfejsów, rodzaj zagrożenia czy niebezpiecznych sytuacji, a także obciążenie poznawcze w formie zadania dodatkowego mogły wpłynąć na otrzymane wyniki, które nie zawsze pokrywają się z wynikami wcześniejszych badań prowadzonych przez inne grupy naukowców. Nie oznacza to jednak błędnej metodologii czy nieprawidłowości jakie przyjęto w poszczególnych eksperymentach. Człowiek jako uczestnik badania wykazuje wiele indywidualnych zachowań i reakcji. Pomimo zapewnienia jednakowych i powtarzalnych warunków eksperymentu (np. w badaniach symulatorowych) nie zawsze możliwe jest otrzymanie jednoznacznych wyników. Wprowadzenie pozornie nieznaczących zmian w eksperymencie może spowodować zupełnie odmienne reakcje uczestników badania.

Interfejsy bazujące na bodźcach wzrokowych najczęściej powodowały wolniejszą reakcję niż bodźce słuchowe. Kierowcy do ich odbioru wykorzystywali mniejsze zasoby poznawcze, czyli powodowały one mniejsze obciążenie. Najgorszą formą wyświetlanej informacji były napisy, najlepszą zaś ikona o intuicyjnie odbieranym znaczeniu. Wadą interfejsów wizualnych była konieczność oderwania wzroku od drogi, jednak przy odpowiednim położeniu wyświetlacza możliwe było dostrzeżenie bodźca dzięki widzeniu peryferyjnemu. Badania wskazują również na to, że kierowcy chętniej stosowali się do komunikatów w formie wizualnej niż dźwiękowej, np. o zachowaniu odpowiedniej odległości od pojazdu poprzedzającego.

Bodźce słuchowe powodowały szybszą reakcję niż bodźce wizualne, co w sytuacjach krytycznych na drodze może mieć kluczowe znaczenie. Interfejsy wykorzystujące dźwięki angażują znacznie więcej zasobów poznawczych do przetworzenia otrzymanego komunikatu, przez co koszty poznawcze są znacznie większe niż w przypadku bodźców wizualnych. Przez zwiększone obciążenie kierowcy bodźce słuchowe mogą zmniejszać bezpieczeństwo i mieć negatywny wpływ na poprawność reakcji. W większości opisanych badań bodźce słuchowe uznawano jednak za bardziej skuteczne niż bodźce wizualne.

W eksperymentach, w których wzięto pod uwagę połączenie bodźców słuchowych i wzrokowych wykazywano, że to właśnie ten typ interfejsu multimodalnego jest najbardziej skuteczny. Interfejsy multimodalne nie tylko powodowały najszybsze reakcje, ale też zwiększały ich poprawność. Udowodniano, że bodźce czysto słuchowe i czysto wizualne są niewystarczające do ostrzegania kierowców o istotnych i pilnych zdarzeniach. Szeroka analiza eksperymentów prowadzonych w różnych ośrodkach wykazała złożoność badanego problemu, a także brak jednoznacznych i spójnych wniosków. Opracowanie najlepszego sposobu przekazu informacji kierowcy o zagrożeniach i konieczności przejęcia kontroli ma ogromne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa w ruchu drogowym i dlatego wymaga kontynuowania badań w tym zakresie.

2.5. Transfer kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją

W trakcie jazdy pojazdem z warunkową autonomizacją kierowca jadący w trybie autonomicznym może dezaktywować system zarówno na własne żądanie, jak i poprzez zainicjowanie procesu przez system pokładowy. Może zatem w każdej chwili odzyskać kontrolę nad pojazdem. Kierowca jadący w trybie manualnym w dowolnym momencie może również aktywować tryb autonomiczny pojazdu wybierając odpowiedni przycisk na konsoli ADS. Po aktywacji systemu kierowca może zdjąć ręce z kierownicy oraz nogi z pedałów.

Transfer kontroli to faza aktywności kierowcy, w której musi on sprostać wymaganiom przejęcia manualnej kontroli nad pojazdem przez wykonanie czynności właściwej dla prowadzenia pojazdu. Podstawowa różnica dla transferu kontroli występuje pomiędzy systemami poziomów 2 i 3:

- Na poziomie 2 zakłada się, że kierowca musi od razu przejąć kontrolę nad pojazdem po dezaktywacji systemu.
- Na poziomach 3 i wyższych zakłada się, że kierowca powinien posiadać zapas czasu na przejęcie kontroli nad pojazdem.

Dedykowane interfejsy człowiek-maszyna służą do informowania kierujących pojazdem z warunkową autonomizacją, m.in. o konieczności transferu kontroli, o aktualnej sytuacji na drodze czy o ewentualnych zagrożeniach. Emitowanie sygnałów ostrzegawczych następuje zazwyczaj poprzez kanał wzrokowy, kanał słuchowy lub wibracje. Informacje mogą być przedstawiane na ekranach umieszczonych w panelu sterowania lub być wyemitowane jako informacja na desce rozdzielczej czy przy podstawowych wskaźnikach pojazdu tuż nad kierownicą. Najefektywniejszy sposób informowania kierowcy jest taki, który powoduje szybką, właściwą reakcję na zaistniałą sytuację w sposób intuicyjny, niewymagający angażowania zbyt wielu zasobów poznawczych.

Aby transfer kontroli pomiędzy człowiekiem a systemem przebiegał pomyślnie, a kierowca mógł sprawnie i bez nadmiernego obciążenia poznawczego przejąć kontrolę nad pojazdem wyzwaniem jest opracowanie intuicyjnego i efektywnego interfejsu HMI [71]. Kierowca powinien być bardzo dobrze poinformowany o tym, jak działa interfejs i posiadać na bieżąco informacje na temat jego pracy [84].

Wadą systemu autonomizacji jest to, iż działa on najlepiej w normalnych warunkach jazdy, kiedy kierowca nie jest obciążony psychicznie i fizycznie, a sytuacja przebiega rutynowo. Gdy dochodzi do zdarzenia krytycznego, obciążenie kierowcy jest największe i potrzebuje on wsparcia z zewnątrz – wtedy system jest najmniej pomocny. Poprawa wydajności systemu autonomizacji powinna prowadzić do ograniczenia podatności kierowcy na utratę czujności, samozadowolenie, świadomość sytuacji drogowej i umiejętność prowadzenia pojazdu. Są to czynniki, które aktualnie zawodzą najczęściej i wciąż wymagają szczegółowych badań.

Obecnie błędy pojawiające się w trakcie procesu autonomizacji głównie są wynikiem braku ciągłego sprzężenia zwrotnego i wzajemnego oddziaływania na siebie systemu człowiek-maszyna. Podczas transferu kontroli kompletna i czytelna informacja zwrotna jest niezbędna do właściwego monitorowania systemu oraz rozumienia i sprawnego reagowania na błędy. Bez niej kierowca jest poza systemem sterowania pojazdem i nie wie, czy prawidłowo odczytuje informacje płynące z interfejsu.

Poniżej na podstawie dokumentu SAE J3016 opracowano sytuacje transferu kontroli nad pojazdem dla różnych poziomów i w zależności od czynnika inicjującego [101]. Ilustracje przedstawiają sytuacje przerwania zadania DDT (dynamicznego prowadzenia pojazdu) na różnych poziomach autonomizacji jazdy.

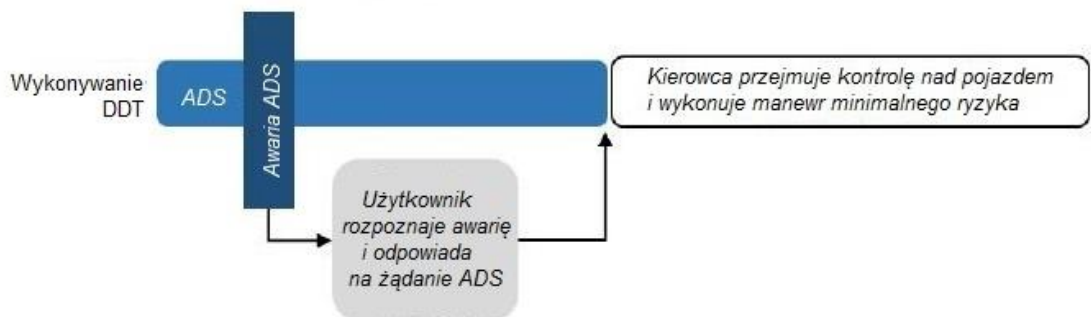
Na Rys. 2.21 przedstawiono sytuację, w której w czasie wykonywania DDT w pojeździe z warunkową autonomizacją (na poziomie 3 według SAE) następuje jego awaria

i działanie ADS (zautonomizowanego systemu prowadzenia pojazdu) zostaje zakłócone. Zadaniem kierowcy jest jak najszybsze rozpoznanie awarii pojazdu i właściwe przejęcie kontroli nad nim z zachowaniem zasad bezpieczeństwa, a w razie konieczności wykonanie manewru minimalnego ryzyka. Podobny schemat przedstawiono na rys. 2.22, przy czym awaria dotyczy systemu ADS. W tym przypadku również konieczna jest właściwa reakcja kierowcy, który jak najszybciej musi przejąć sterowanie nad pojazdem.



Rys. 2.21 Sekwencja ukazująca działanie ADS, awarię pojazdu i przejęcie kontroli nad pojazdem przez kierowcę

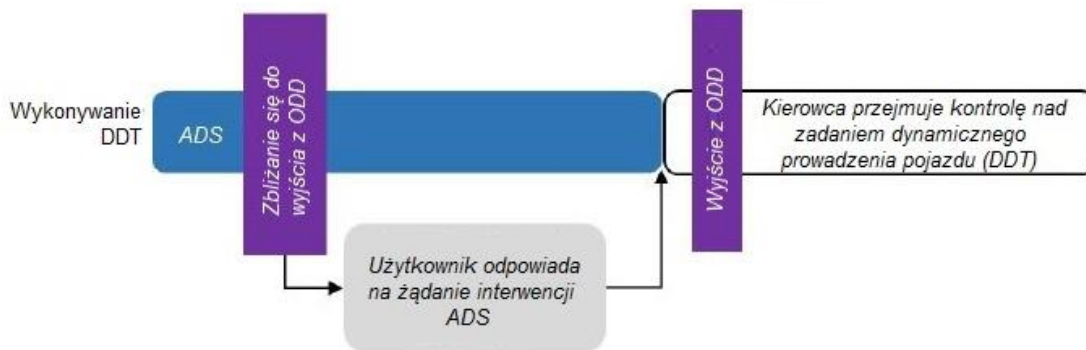
Źródło: opracowanie własne na podstawie [101]



Rys. 2.22 Sekwencja ukazująca działanie ADS, awarię ADS i przejęcie kontroli nad pojazdem przez kierowcę

Źródło: opracowanie własne na podstawie [101]

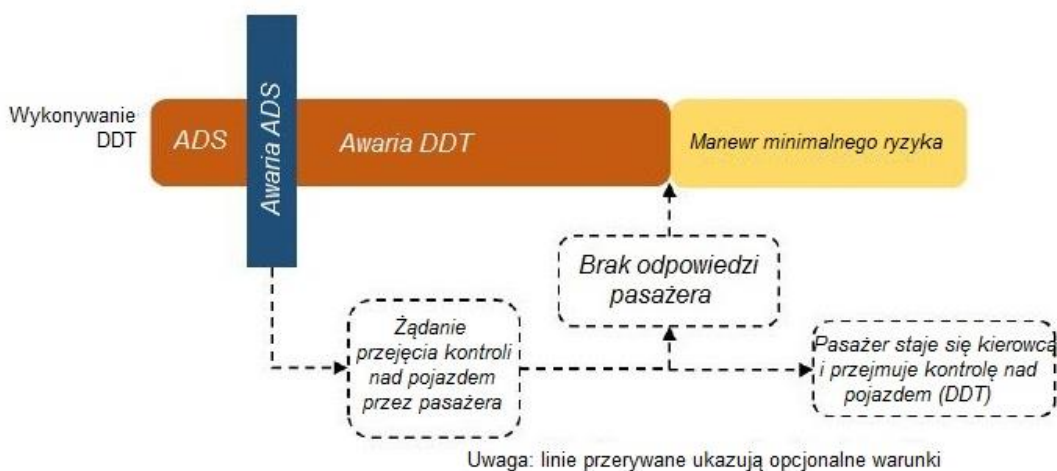
Schemat przedstawiony na rys. 2.23 obrazuje sytuację (3 poziom autonomizacji według SAE), w której następuje zbliżenie się do wyjścia z ODD, czyli zdefiniowanych warunków użytkowania, a następnie wyjście z ODD. W takim przypadku kierujący również odpowiada na żądanie interwencji ADS, co wiąże się z przejęciem kontroli nad DDT.



Rys. 2.23 Sekwencja ukazująca działanie ADS, opuszczenie ODD i przejęcie kontroli nad pojazdem przez kierowcę

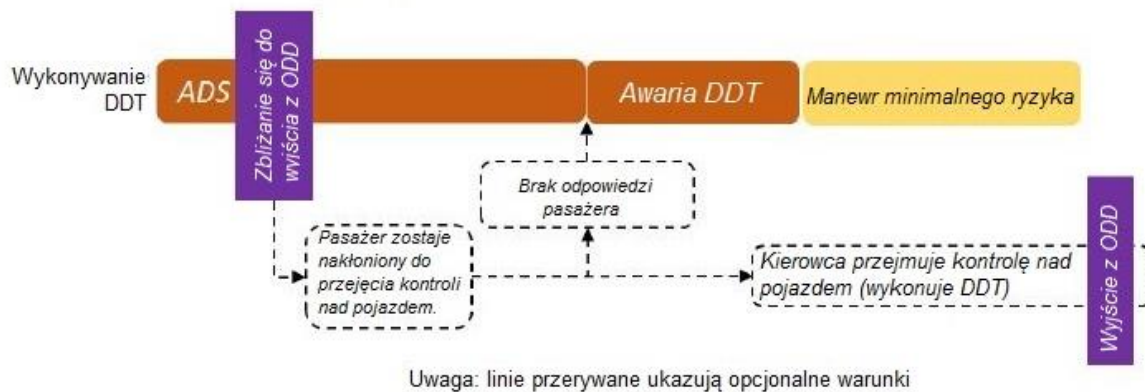
Źródło: opracowanie własne na podstawie [101]

W przypadku pojazdów na 4 poziomie autonomizacji według SAE zadanie DDT wykonuje system ADS. W momencie jego awarii oraz awarii DDT pojazd wykona manewr minimalnego ryzyka. W sytuacji awarii ADS pojazd może także wysłać żądanie przejęcia kontroli nad pojazdem do pasażera, który podejmując właściwe czynności, staje się kierowcą i w pełni kontroluje pojazd, co przedstawiono na rys. 2.24. Jeżeli pasażer nie odpowie na żądanie systemu, pojazd wykona manewr minimalnego ryzyka.



Rys. 2.24 Sekwencja ukazująca działanie ADS, awarię ADS i wykonanie manewru minimalnego ryzyka przez system

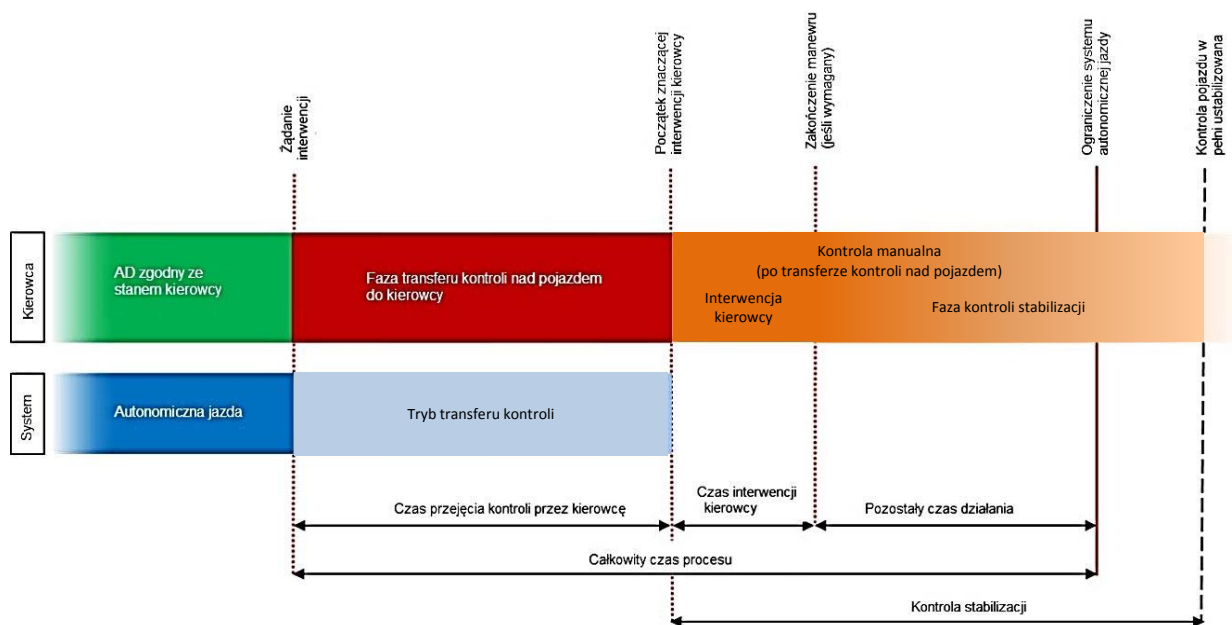
Źródło: opracowanie własne na podstawie [101]



Rys. 2.25 Sekwencja ukazująca działanie ADS, zbliżanie się do opuszczenia obszaru ODD i wykonanie manewru minimalnego ryzyka przez system

Źródło: opracowanie własne na podstawie [101]

Na rys. 2.25 przedstawiono sekwencję działania ADS (dla poziomu 4 wg SAE) w sytuacji zbliżania się do wyjścia z ODD. Pasażer jadący pojazdem zostaje poinformowany o konieczności przejęcia kontroli i jeżeli podejmie odpowiednie działanie, staje się kierowcą i przejmuje zadanie DDT. W sytuacji braku odpowiedzi pasażera i awarii DDT, nastąpi wykonanie przez pojazd manewru minimalnego ryzyka.



Rys. 2.26 Transfer kontroli zainicjowany przez system z trybu automatycznego do manualnego

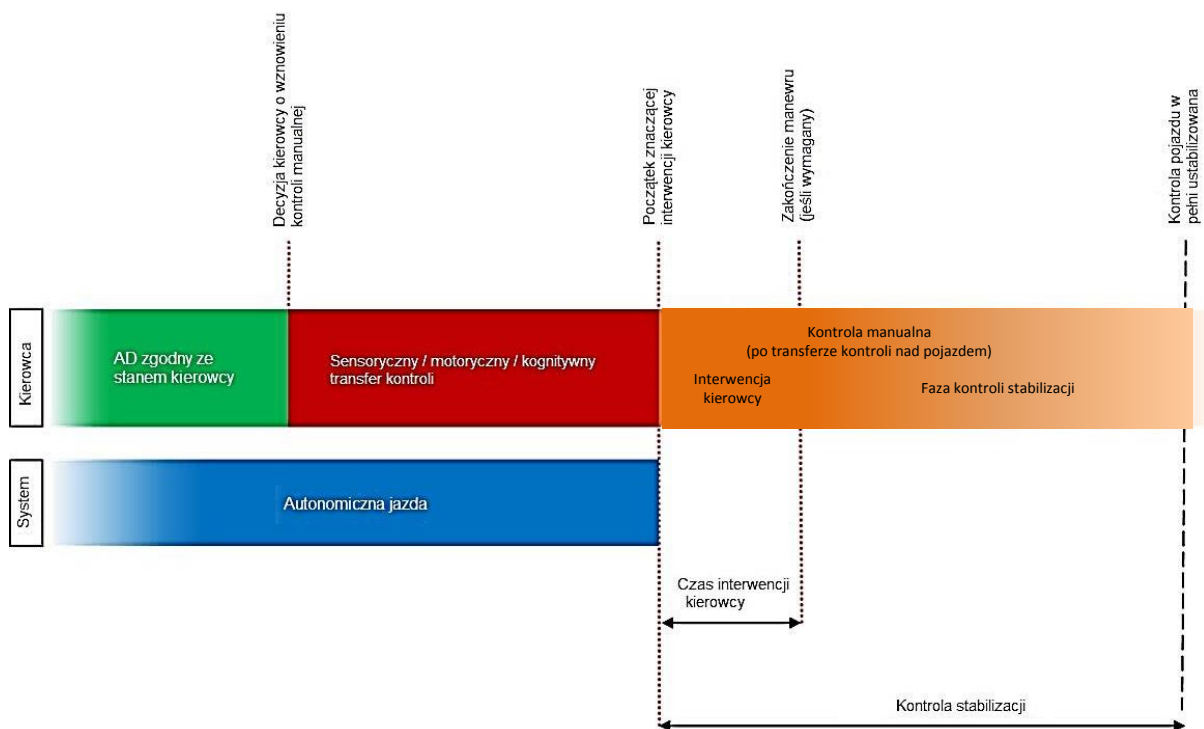
Źródło: opracowanie własne na podstawie [50]

Inne spojrzenie na transfer kontroli sterowania nad pojazdem przedstawiono w dokumencie ISO/TR 21959-1:2018 (E) [50]. Na osi czasu wyróżniono zarówno działanie systemu jak i kierowcy. Na rys. 2.26 przedstawiono model przejścia kontroli zainicjowany przez system pojazdu.

Inną sytuacją jest przejście kontroli na żądanie kierowcy, czyli przejście z trybu autonomicznego do trybu manualnego. Wyróżnia się następujące sposoby interwencji kierowcy w celu odzyskania manualnej kontroli nad pojazdem:

- dezaktywacja systemu ADS przez wciśnięcie pedału hamulca,
- dezaktywacja systemu ADS przez wciśnięcie pedału przyspieszenia,
- dezaktywacja systemu ADS przez znaczące poruszenie kierownicą,
- dezaktywacja systemu ADS przez odpowiednią kontrolkę.

Z tej perspektywy dezaktywacji systemu przez użytkownika model transferu kontroli ma nieco inną charakterystykę zaprezentowaną na rys. 2.27.



Rys. 2.27 Transfer kontroli zainicjowany przez kierowcę z trybu automatycznego do manualnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [50]

2.6. Wykorzystanie symulatorów jazdy w badaniach kierowców

Symulatory jazdy stanowią narzędzie, dzięki któremu możliwe jest przeprowadzenie badań kierowców przy użyciu różnych scenariuszy z powtarzalnymi warunkami. Ośrodki naukowe coraz częściej sięgają po takie rozwiązanie, gdy badania w ruchu rzeczywistym są utrudnione lub niemożliwe do przeprowadzenia (np. scenariusz obejmuje sytuacje niebezpieczne, badania w warunkach skrajnego zmęczenia itp.) [98]. Przykłady badań symulatorowych kierowców szerzej opisano w podrozdziale 2.4.

Wykorzystanie symulatorów jazdy w stosunku do badań w ruchu rzeczywistym wymaga mniejszych nakładów finansowych i jest mniej skomplikowane ze względu na brak konieczności kontrolowania otoczenia i innych uczestników ruchu. Koordynowanie badania może odbywać się bez bezpośredniego ingerowania personelu prowadzącego badanie [4]. Niewątpliwą zaletą symulatorów jazdy jest zapewnienie bezpieczeństwa uczestników badania niezależnie od przebiegu scenariusza badawczego. Symulatory jazdy umożliwiają zatem przeprowadzanie badań, które w warunkach rzeczywistych stwarzałyby poważne zagrożenie kierującego oraz osób z jego otoczenia. Wykorzystuje się je do badania m. in. sytuacji przedwypadkowych, reakcji po zażyciu środków psychoaktywnych, w tym leków, narkotyków, alkoholu, rozproszenia uwagi w związku z używaniem radia, telefonu komórkowego, nawigacji satelitarnej w czasie jazdy samochodem [68]. Liczne badania wskazują także na możliwość wykorzystania symulatorów przy badaniach prędkości jazdy i innych parametrów ruchu pojazdu [7][8][9][53][113][115], reakcji na nietypowe warunki jazdy spowodowane: zmienną pogodą [14], zmęczeniem [89], używkami [78], rozproszeniem uwagi [25][35][53][54][69], a także przy projektowaniu infrastruktury drogowej [85][75][56][121].

Liczne modele symulatorów jazdy i ich różnorodne oprogramowania stwarzają jednak problem braku uniwersalności zaprojektowanych scenariuszy [15]. Kontrowersje wzbudza też adekwatność wyników badań symulatorowych do sposobu zachowania kierowców w ruchu rzeczywistym, co w niektórych przypadkach utrudnia lub nawet uniemożliwia przedstawienie praktycznych rekomendacji na podstawie tychże badań [31]. Wybrane badania wskazują, że kierowcy w warunkach symulacyjnych trudniej szacują prędkość pojazdu i przez to jeżdżą szybciej niż w warunkach rzeczywistych [3][7][19]. Istnieją także badania symulatorowe, w których osiągnięte różnice prędkości nie były statystycznie istotne [5][10]. W zaawansowanych symulatorach jazdy, w których szerokie pole widzenia sprzyja

prawidłowej percepcji prędkości jazdy, otrzymywano wyższe amplitudy prędkości niż rejestrowane w warunkach rzeczywistych [72].

W literaturze wyróżnia się dwa poziomy walidacji wyników badań symulatorowych w stosunku do badań w ruchu rzeczywistym – absolutny i relatywny. Absolutna zbieżność wyników wymaga zgodności liczbowej rejestrowanych parametrów w przypadku obu środowisk. Z kolei relatywna zbieżność wyników charakteryzuje się otrzymaniem podobnych trendów, efektów i zależności [4]. Liczne badania porównujące wyniki otrzymane w warunkach symulacyjnych i rzeczywistych wykazały, że w przypadku wybranych zadań parametry jazdy osiągają zgodność absolutną, a w innych okolicznościach zgodność relatywną [6][40][121]. W literaturze określono relatywną zgodność wyników jako wystarczającą w przypadku symulatora jazdy, co sprawia, że jest on przydatnym narzędziem do badań kierowców w warunkach symulacyjnych [113].

3. METODA OCENY PRZEJĘCIA PRZEZ KIEROWCĘ KONTROLI W POJAZDACH Z WARUNKOWĄ AUTONOMIZACJĄ

3.1. Założenia metody i cel badań

Poprawność przebiegu procesu przejścia czynności sterowniczych w dużej mierze zależy od poziomu obciążenia poznawczego operatora. Poziom ten uzależniony jest od wielu czynników, takich jak sposób przekazywania informacji przez system komputerowy samochodu czy też dodatkowe czynności wykonywane przez operatora w tym samym czasie.

Opracowana koncepcja metody oceny przejścia kontroli sterowania przez kierowcę w pojazdach z warunkową autonomizacją wymagała przeprowadzenia badań symulatorowych, podczas których poprawność przejścia kontroli oceniana była na podstawie czasu reakcji kierowcy na sygnały wysyłane przez samochód informujące o konieczności przejścia kontroli oraz stopnia odczuwanego komfortu w trakcie przejmowania kontroli nad pojazdem. Celem przeprowadzonego eksperymentu badawczego było określenie czynników wpływających na poprawność przejścia kontroli. W badaniach wykorzystano scenariusze, obejmujące konieczność przejścia przez kierujących kontroli w wybranych sytuacjach drogowych. O aktualnej sytuacji na drodze, ewentualnych zagrożeniach i konieczności przejścia kontroli kierowca był informowany przy pomocy sygnałów ostrzegawczych, odbieranych kanałem słuchowym, wzrokowym lub dotykowym w postaci wibracji [92]. W tym celu wykorzystano stanowisko multisensoryczne, umożliwiające przeprowadzenie badania transferu kontroli w pojeździe wyposażonym w system autonomizujący jazdę po autostradzie. Takie badanie z jednej strony pozwoliło zweryfikować efektywność działania stanowiska i jego poszczególnych modułów oraz z drugiej, odpowiedzieć na ważne pytanie badawcze o efektywny sposób komunikacji z kierowcą przez interfejsy HMI w celu minimalizacji czasu przejścia kontroli nad pojazdem. Podstawową badaną zmienną zależną był czas od momentu pojawienia się komunikatu w jednej z trzech form (wizualnie; wizualnie i dźwiękowo; wizualnie, dźwiękowo i haptycznie) do momentu wykonania przez kierowcę znaczącej interwencji w postaci wciśnięcia pedału przyspieszenia, hamulca lub skrętu kierownicą [92].

Do oceny stopnia komfortu przejmowania kontroli wykorzystano natomiast badania ankietowe, które przeprowadzono bezpośrednio po zakończeniu jazdy symulatorem. Na

potrzeby badania zmodyfikowano arkusz NASA-TLX z 20-stopniową skalą odpowiedzi. Metoda ta umożliwiła ujednoczenie udzielanych odpowiedzi, co wpłynęło na jakość przeprowadzonej analizy wyników.

Do oceny poprawności przejmowania kontroli wykorzystano model rozmyty zbudowany w środowisku MATLAB, do opracowania którego posłużyły wyniki badań eksperymentalnych. Za najważniejszy parametr rejestrowany przez symulator przyjęto czas przejścia kontroli nad pojazdem. Do budowy modelu wykorzystano także ocenę poczucia komfortu kierujących podczas transferu kontroli. Wyjście z modelu, które określono jako „poprawność” zaprojektowano w taki sposób, aby umożliwić ocenę poprawności procesu przejścia kontroli przez kierowcę na podstawie parametrów wejściowych. Opisanie elementy posłużyły do opracowania metody oceny poprawności przejścia przez kierowcę kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją.

3.2. Charakterystyka grupy badawczej

Grupę badawczą stanowiły dorosłe osoby posiadające prawo jazdy kategorii B. Warunkiem przystąpienia do badania było posiadanie prawa jazdy od co najmniej dwóch lat i aktywne poruszanie się samochodem osobowym na co dzień. Kryterium aktywnej jazdy samochodem osobowym określono jako kierowanie pojazdem co najmniej kilka razy w miesiącu oraz przejechanie co najmniej 1 000 km w ciągu ostatniego roku. Informacje te uczestnicy deklarowali podczas procesu rekrutacyjnego, a ich weryfikacja odbywała się po wypełnieniu ankiety uczestnika badań.

Osoby badane reprezentowały trzy równoliczne grupy, które zostały sklasyfikowane według kryterium wieku. Pierwszą grupę stanowili młodzi kierowcy (przedział wieku 20-25 lat), drugą grupą byli kierowcy w wieku 30-40, a trzecią kierowcy w wieku 55+. Średnia wieku osób badanych wyniosła 38 lat, zaś najmłodszy i najstarszy kierowca mieli odpowiednio 20 i 64 lata. Na potrzeby późniejszej analizy grupę badawczą dodatkowo podzielono ze względu na doświadczenie w kierowaniu pojazdem (niedoświadczeni – kierowcy aktywnie do 3 lat; doświadczeni – kierowcy aktywnie powyżej 3 lat) [93].

Uczestników badania weryfikowano także na podstawie deklaracji ogólnego stanu oraz ewentualnych chorób, ponieważ niektóre schorzenia uniemożliwiały korzystanie z symulatora. Według „Regulaminu korzystania z symulatora” Instytutu Transportu Samochodowego [47] zabrania się przystępowania do jazdy na symulatorach:

- osobom nietrzeźwym lub znajdującym się w stanie odurzenia po użyciu alkoholu, narkotyku lub innego podobnie działającego środka,
- osobom cierpiącym na jakiegokolwiek schorzenie, które stanowiłoby przeszkodę do przeprowadzenia z ich udziałem jazdy na symulatorach, a w szczególności osobom cierpiącym na:
 - chorobę lokomocyjną,
 - choroby związane z błędnikiem,
 - zaburzenia/choroby psychiczne,
 - choroby układu nerwowego, np. padaczka,
 - cukrzycę,
 - zaburzenia równowagi i słuchu,
 - choroby układu sercowo-naczyniowego,
 - choroby narządu ruchu,
 - niewydolność nerek,
 - uzależnienie od alkoholu lub jego nadużywanie,
 - uzależnienie od środków o działaniu podobnym do alkoholu lub ich nadużywanie,
 - inne poważne zaburzenia stanu zdrowia istotne dla oceny zdolności do prowadzenia pojazdu,
 - kobietom w ciąży.

Do badań zrekrutowano 30 osób, które spełniały powyższe kryteria i które zadeklarowały chęć wzięcia udziału w badaniu.

3.3. Metoda monitorowania choroby symulatorowej

Badania symulatorowe obarczone są ryzykiem wystąpienia choroby symulatorowej u osób badanych. Jej symptomy przypominają nieco chorobę lokomocyjną lub morską [96]. Choroba symulatorowa (ang. Simulator Sickness) to zespół nieprzyjemnych w odczuciu symptomów, które pojawiają się w czasie korzystania ze środowiska symulacyjnego. Powodem takiego stanu jest niezgodność odbierania sygnału przez kanał wzrokowy w stosunku do organu równowagi, czyli części ucha wewnętrznego, w której znajduje się aparat przedsionkowy [13]. Nasilone objawy choroby symulatorowej mogą zaburzać uzyskane wyniki pomiarów, a w skrajnych przypadkach uniemożliwić ukończenie badania przez osobę dotkniętą objawami [21].

Do rejestrowania symptomów choroby symulatorowej wykorzystuje się zazwyczaj jedną z dwóch metod – kwestionariuszową lub mierzącą reakcje fizjologiczne. W eksperymencie zastosowano wersję ankiety RSSQ (ang. Revised Simulator Sickness Questionnaire) opartą na pracy Kennedy’ego [57], a opracowaną w Instytucie Transportu Samochodowego. Pomyślnie wykorzystano ją między innymi w projektach: RID 3D, RID 4F, EYEVID [59], GEMS [83], w których ważną rolę odgrywały badania w środowisku symulacyjnym.

Wybrana metoda do kontrolowania choroby symulatorowej obejmuje ankietę złożoną z 28 symptomów ocenianych w 4-stopniowej skali, które na potrzeby analizy podzielono na trzy kategorie: „nudności”, „okulomotoryczne” i „dezorientację”. Przyporządkowanie poszczególnych symptomów do kategorii zestawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Przyporządkowanie do kategorii symptomów w kwestionariuszu SSQ

L.p.	Symptom	Kategoria		
		Nudności	Okulomotoryczne	Dezorientacja
1	Ogólny dyskomfort	X	X	
2	Zmęczenie		X	
3	Znudzenie			
4	Senność			
5	Ból głowy		X	
6	Zmęczenie oczu		X	
7	Trudności ze skupieniem się		X	X
8a	Zwiększenie wydzielania śliny	X		
8b	Suchość w ustach			
9	Pocenie się	X		
10	Mdłości	X		X
11	Trudności z koncentracją	X	X	
12	Depresja			
13	Dezorientacja			X
14	Niewyraźne widzenie			X
15a	Oszłomienie (przy oczach otwartych)			X
15b	Oszłomienie (przy oczach zamkniętych)			X

L.p.	Symptom	Kategoria		
		Nudności	Okulomotoryczne	Dezorientacja
16	Zawroty głowy			X
17	Przebłyski pamięci			
18	Ogólne osłabienie			
19	Potrzeba zaczerpnięcia oddechu			
20	Dolegliwości żołądkowe	X		
21	Utrata apetytu			
22	Wzmożony apetyt			
23	Potrzeba wypróżnienia			
24	Poczucie zagubienia			
25	Uczucie odbijania się	X		
26	Wymioty			

Źródło: opracowanie własne na podstawie [59]

Analiza wyników ankiety SSQ wymaga przypisania do każdego symptomu z tabeli wartości liczbowej odzwierciedlającej stopień odczuwania symptomu przez osobę badaną. „Brak” symptomu przyjmuje wartość 0, „nieznaczny” stopień odczuwania – 1, „umiarkowany” stopień – 2 i „dotkliwy” – 3. Wyniki otrzymane w poszczególnych kategoriach są sumowane, a następnie mnożone przez określone wagi:

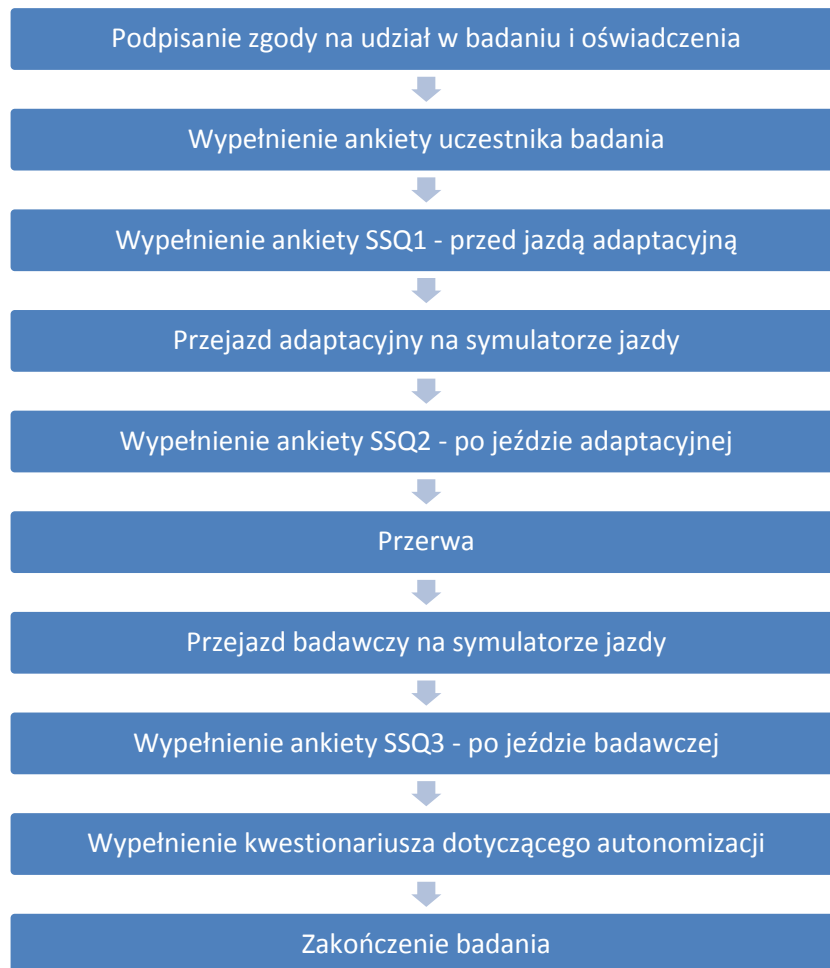
- 13,92 w kategorii „dezorientacja”
- 9,54 w kategorii „nudności”
- 7,58 w kategorii „okulomotoryczne”
- 3,74 wynik łączny.

Symptomy, które nie zostały przyporządkowane do żadnej kategorii, nie są sumowane i nie poddaje się ich analizie liczbowej [59].

Ankiety, która stanowi punkt odniesienia, wypełniano na samym początku eksperymentu. Kolejne kwestionariusze SSQ uzupełniano bezpośrednio po każdej jeździe symulatorem. W eksperymencie przewidziano wykonanie trzech ankiet SSQ przez każdego uczestnika, co szerzej opisano w podrozdziale 3.4. Taka konfiguracja pozwoliła na rejestrowanie samopoczucia uczestników na każdym etapie badań i pozwoliła na odpowiednią reakcję w przypadku zaistnienia objawów choroby symulatorowej.

3.4. Procedura realizacji eksperymentu

Ekspertyment badawczy przeprowadzono według schematu przedstawionego na rys. 3.1. Poszczególne etapy badania realizowano w ściśle określonej kolejności. Dzięki wykorzystaniu listy kontrolnej, która stanowi załącznik nr 1, nie pominięto żadnej fazy zaprojektowanego badania.



Rys. 3.1 Schemat przebiegu procedury badawczej podczas badań eksperymentalnych

Źródło: opracowanie własne

Każdy uczestnik badania bezpośrednio po przyjeździe do laboratorium informowany był o celu badania (bez podawania szczegółów mogących zaburzyć efekt zaskoczenia scenariuszem badawczym), a także o ewentualnych niepożądanych skutkach korzystania z symulatora jazdy oraz o możliwości rezygnacji z udziału w badaniu w dowolnym momencie. Osoby badane zapoznawały się z regulaminem korzystania z symulatora oraz

podpisywały zgodę na udział w badaniu i stosowne oświadczenie (załącznik nr 2, załącznik nr 3).

Uczestnicy badania wypełniali ankietę – metryczkę (załącznik nr 4), w której zawarte były pytania dotyczące między innymi danych demograficznych, posiadanych uprawnień do kierowania pojazdami, zachowania w pojeździe np. rozmowy przez telefon komórkowy w trakcie jazdy, wysyłania wiadomości, korzystania z nawigacji, czy też zachowań wobec innych uczestników ruchu np. nadużywania sygnału dźwiękowego, nagłych zmian pasów ruchu. Kolejną ankietą był kwestionariusz SSQ1 (załącznik nr 5), który zawierał listę symptomów związanych z samopoczuciem i był punktem odniesienia do kolejnych kwestionariuszy – SSQ2 i SSQ3.

Właściwe badanie na symulatorze jazdy poprzedzone było scenariuszem adaptacyjnym. Przed jego rozpoczęciem osoby badane miały możliwość wygodnego zajęcia miejsca w symulatorze, dostosowania położenia fotela i kierownicy. Na tym etapie przypomniano także o możliwości wystąpienia objawów choroby symulatorowej oraz o ewentualnym sposobie kontaktu z prowadzącym badanie (mikrofon-głośnik). Podczas adaptacji uczestnik badania zapoznawał się z mechanizmem sterowania i nabierał biegłości w obsłudze symulatora tak, by podczas właściwego badania mógł zachowywać się w sposób najbardziej zbliżony do rzeczywistego prowadzenia pojazdu. Dodatkowo w ramach scenariusza osoba zapoznawała się z systemem obsługi transferu kontroli nad pojazdem zainicjowanym zarówno przez system autonomizujący, jak i przez użytkownika [92].

Scenariusz adaptacyjny trwał nieprzerwanie około kilkunastu minut. Obejmował przejazd około 7-kilometrowym odcinkiem drogi w tym autostradą, drogą ekspresową jednojezdniową oraz drogami lokalnymi na terenie zabudowanym. Eksperyment był przerywany, jeżeli osoba badana zgłosiła w trakcie badania pojawienie się uciążliwych symptomów choroby symulatorowej. Po przejechaniu scenariusza adaptacyjnego kierowcy wypełniali kwestionariusz Symptomów Choroby Symulatorowej – SSQ2 [59] (załącznik nr 6). Osoby, u których wystąpiły uciążliwe objawy choroby symulatorowej były wykluczane z dalszego badania, a ich wyniki nie były analizowane. Wyniki tylko jednej osoby z grupy nie zostały z takiego powodu przeanalizowane. Po wypełnieniu ankiety następowała kilkunastominutowa przerwa, której długość zależała od samopoczucia osoby badanej.

Kolejnym etapem eksperymentu był przejazd badawczy w symulatorze jazdy, który opisano w podrozdziale 3.6. Po jego ukończeniu wypełniano kwestionariusz SSQ3 oraz ankietę dotyczącą autonomizacji (załącznik nr 7), którą szerzej opisano w podrozdziale 3.7. Każdy badany zrealizował przejazd zgodny z opracowanym scenariuszem, w którym

informowany był o konieczności przejęcia kontroli za pomocą sygnału o jednym z trzech rodzajów modalności (sygnał wizualny; sygnał wizualny i dźwiękowy; sygnał wizualny, dźwiękowy i haptyczny). Osoby badane miały losowo przypisywany rodzaj modalności do swojego scenariusza badawczego i przejeżdżały go tylko jeden raz, aby nie uzyskać niepożądanego efektu „uczenia się”, który mógłby zaburzyć ostatecznie otrzymane wyniki.

3.5. Stanowisko badawcze do oceny przejęcia kontroli sterowania przez kierowcę

Stanowisko badawcze, na którym przeprowadzono eksperyment, złożone było z symulatora samochodu osobowego oraz kompatybilnego z nim stanowiska multisensorycznego. Wykorzystanie złożonego i wysoce zaawansowanego stanowiska badawczego umożliwiło przeprowadzenie powtarzalnych i precyzyjnych pomiarów.

3.5.1. Symulator samochodu osobowego

Symulator samochodu osobowego AS1200-6 wyposażony w pełnometrażową i w pełni funkcjonalną kabinę samochodu Opel Astra IV znajduje się w Instytucie Transportu Samochodowego w Warszawie (rys. 3.2). Symulator posiada 6 stopni swobody ruchu, zapewnionych dzięki usytuowaniu kabiny pojazdu na platformie ruchu Moog 6DOF2000E, zbudowanej w konfiguracji tzw. platformy Stewarta. Platforma pozwala na wykonywanie ruchów kabiny imitujących ruch odczuwalny w trakcie rzeczywistej jazdy. Platforma pozwala na wykonywanie ruchów o następującej charakterystyce:

- dla przemieszczeń liniowych:
 - maksymalne przesunięcie $\pm 0,25$ m,
 - maksymalna prędkość $\pm 0,5$ m/s,
 - maksymalne przyspieszenie $\pm 0,6G$,
- dla przemieszczeń kątowych:
 - maksymalna zmiana kąta $\pm 22^\circ$,
 - maksymalna prędkość kątowa $\pm 30^\circ/s$,
 - maksymalne przyspieszenie kątowe $\pm 500^\circ/s^2$.

System wizualizacji symulatora składa się z ekranu cylindrycznego pokrywającego ok. 200° pola widzenia kierowcy w osi horyzontalnej oraz około 30° pola widzenia w osi wertykalnej. Obraz jest wyświetlany przy użyciu czterech projektorów o rozdzielczości spełniającej standard WXGA (1280×800 pikseli) i częstotliwości 60 Hz. Ekran jest

usytuowany centralnie względem punktu ocznego kierowcy, na planie okręgu o średnicy 5 metrów. Zwierciadła pojazdu są symulowane przy użyciu ekranów LCD, o wielkości zbliżonej do prawdziwych zwierciadeł pojazdu i wyświetlające odpowiednio przekształcony obraz „do tyłu” w rozdzielczości WVGA (800 × 480 pikseli) z częstotliwością 60 Hz. W kabinie umieszczone są dodatkowo mikrofon i kamera umożliwiające monitorowanie zachowania kierowcy i komunikację głosową pomiędzy prowadzącym badanie a osobą badaną wewnątrz pojazdu.



Rys. 3.2 Symulator samochodu osobowego AS1200-6

Źródło: materiał Instytutu Transportu Samochodowego

Symulator obsługiwany jest przy użyciu dedykowanego programu symulacji AutoSim Sim World. Oprogramowanie to pozwala na budowanie scenariuszy badawczych z gotowych komponentów z wykorzystaniem języka programowania LISP, a także umożliwia kontrolę warunków pogodowych i oświetleniowych w programie symulacji.

Wykorzystanie symulatora jazdy wysokiej klasy w badaniach kierowców pozwala na osiągnięcie cech eksperymentu trudno dostępnych, lub wręcz niemożliwych do osiągnięcia w rzeczywistych warunkach drogowych, nawet z wykorzystaniem zamkniętych torów jazdy. Główną zaletą wykorzystania symulatorów jest możliwość osiągnięcia pełnej powtarzalności warunków eksperymentu. Odpowiednio opracowany program scenariusza pozwala na symulację dokładnie dostosowaną do jazdy osoby badanej, a jednocześnie zachowanie powtarzalności sytuacji drogowej, w jakiej znajduje się kierowca. Do tej pory cechy te można było osiągnąć jedynie na zamkniętych torach badawczych, gdzie niemożliwe było odpowiednie symulowanie otoczenia drogi. Kontrolowane warunki eksperymentu pozwalają na zachowanie pełnej zgodności warunków oświetleniowych i drogowych, a co za tym idzie

istotnie wpływają na wiarygodność porównania otrzymanych wyników badań pomiędzy osobami badanymi.

Oprogramowanie symulatora umożliwia rejestrowanie parametrów jazdy symulowanego pojazdu dla każdego z badanych kierowców. Dane wysyłane są ze środowiska symulacyjnego za pomocą protokołu UDP do aplikacji rejestrującej. Aplikacja rejestrująca może być uruchomiona na tym samym komputerze co środowisko symulacyjne, bądź na dowolnym komputerze podłączonym do lokalnej sieci symulatora. W konfiguracji oprogramowania symulacyjnego należy podać adres IP i port na który dane mają być nadawane, co daje możliwość dokładnej analizy każdego z przejazdów. Listę rejestrowanych parametrów przedstawiono w załączniku. Na potrzeby niniejszej dysertacji najważniejszymi parametrami określono timeTOR i timeADS, które dostarczają informacji krytycznych z perspektywy transferu kontroli nad pojazdem (tabela 3.2). Pozostałe parametry rejestrowane przez symulator zestawiono w załączniku nr 8.

Tabela 3.2 Lista parametrów rejestrowanych w symulatorze jazdy

Typ danej	Nazwa	Opis
unsigned int	timeTOR	Czas liczony od początku wysłania informacji o konieczności przejęcia kontroli przez system HMI do momentu znaczącej interwencji kierowcy (wciśnięcia jednego z pedałów lub obrotu kierownicą) [ms]
unsigned int	timeADS	Czas liczony od początku wysłania informacji o możliwości włączenia trybu autonomicznej jazdy przez system HMI do momentu włączenia systemu przez kierowcę [ms]

Zródło: opracowanie własne

3.5.2. Stanowisko multisensoryczne do oceny poprawności działania czynnika ludzkiego

Stanowisko multisensoryczne stanowiło integralny element symulatora jazdy i zaprojektowane zostało w taki sposób, aby umożliwić przeprowadzenie badań związanych z transferem kontroli sterowania w pojazdach z warunkową autonomizacją. Do istniejącego nadwozia symulatora jazdy dodano szereg interfejsów, m.in. ekranów dotykowych, generatorów drgań w siedzisku kierowcy, dedykowanego systemu nagłośnienia w celu umożliwienia generowania informacji zwrotnych dla kierowcy z wykorzystaniem różnych modalności sensorycznych. Opracowane stanowisko badawcze umożliwiała zatem analizę

zachowania kierowców i wyznaczenie kluczowych parametrów, a także zarządzanie stanem systemu ADS pojazdu.

Z perspektywy analizy transferu kontroli w sytuacjach krytycznych elementem kluczowym jest znacznik czasowy RtI (ang. *Request to Intervene*) wygenerowany w momencie pojawienia się informacji o konieczności przejęcia kontroli. Jest on uznawany za początek procesu przejęcia kontroli nad pojazdem i od momentu wygenerowania tej informacji w badaniu liczono czas konieczny na przejęcie kontroli.

W pojazdach zautonomizowanych kierowca jest informowany o sytuacji na drodze oraz o konieczności przejęcia kontroli poprzez dedykowane interfejsy człowiek-maszyna (HMI). Emitowanie sygnałów ostrzegawczych może odbywać się poprzez kanał słuchowy, wzrok lub wibracje. Komunikaty mogą być pokazywane na wyświetlaczach zamieszczonych w panelu sterowania bądź wyemitowane jako informacja przy podstawowych wskaźnikach takich jak prędkościomierz czy obrotomierz. Za najlepszy sposób informacji uznaje się ten, który powoduje odpowiednią reakcję kierowcy na sytuację w sposób szybki i intuicyjny, bez konieczności włączania w to złożonego procesu przetwarzania informacji.

Zgodnie z założeniami eksperymentu stanowisko multisensoryczne do oceny interfejsów HMI zostało wyposażone w szereg interfejsów, tzn. ekranów dotykowych, generatorów drgań w siedzisku kierowcy oraz dedykowanego systemu nagłośnienia. Celem badań była ocena efektywności oddziaływania generowanych przez samochód sygnałów o różnej modalności sensorycznej na kierowcę. Kryterium efektywności był czas odbioru informacji skutkujący podjęciem działań sterowniczych.

Stanowisko multisensoryczne składało się z modułów takich jak:

- moduł wizualny – generujący informację wizualną dla kierowcy, w celu analizy interakcji kierowcy z interfejsem HMI. Moduł ten to przede wszystkim zintegrowana z symulatorem jazdy AS1200-6 nowa tablica rozdzielcza (rys. 3.3), która oprócz standardowych danych o stanie pojazdu pozwala na pokazywanie komunikatów o stanie systemu autonomii pojazdu;
- moduł audio – pozwalający generować informację dźwiękową dla uczestników eksperymentu w sposób zsynchronizowany ze zdarzeniami w scenariuszu;
- moduł haptyczny – pozwalający generować bodźce wibracyjne w fotelu kierowcy w sposób zsynchronizowany ze zdarzeniami w scenariuszu;

- konsola ADS – zarządzająca systemem autonomizacji pojazdu, pozwalająca na włączenie i wyłączenie systemu, dostosowanie ustawień (np. prędkości) i wyświetlanie stanu systemu;
- integracyjny – obejmujący oprogramowanie do transmisji danych synchronicznych stanu pojazdu oraz oprogramowanie integrujące elementy systemu, a także do wymiany danych asynchronicznych – zdarzeń i sposobów ich prezentacji.

Na dedykowanym wyświetlaczu w miejscu tablicy rozdzielczej w symulatorze jazdy (rys. 3.4) prezentowane były m. in. kontrolki stanu pojazdu, elementy prędkościomierza i obrotomierza, zegar, temperatura. Nowa cyfrowa tablica została zainstalowana przed istniejącą tablicą rozdzielczą na mocowaniu magnetycznym i uzupełniona o elementy maskujące dopasowane do kształtu dotychczasowej tablicy. Wykonany został interaktywny projekt graficzny – wygląd kontrolki stanu pojazdu, animowanych elementów prędkościomierza i obrotomierza, możliwość pokazania opcjonalnych elementów takich jak zegar czy temperatura zewnętrzna. Zaprojektowano także elementy pokazywane asynchronicznie – nakładki zwracające uwagę na konieczność przejęcia lub oddania kontroli (rys. 3.5 i rys. 3.6), wskazania stanu systemu autonomii i ustawień tempomatu. Istotne jest to, że w ramach wizyjnego modułu stanowiska możliwe jest odwzorowanie wyglądu dowolnych zegarów cyfrowych stosowanych przez producentów pojazdów.



Rys. 3.3 Moduł wizualny stanowiska HMI

Źródło: opracowanie własne na podstawie [94]



Rys. 3.4 Moduł wizualny stanowiska HMI – widok działania w symulatorze

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3.5 Moduł wizualny stanowiska HMI przedstawiający konieczność przejścia kontroli

Źródło: opracowanie własne

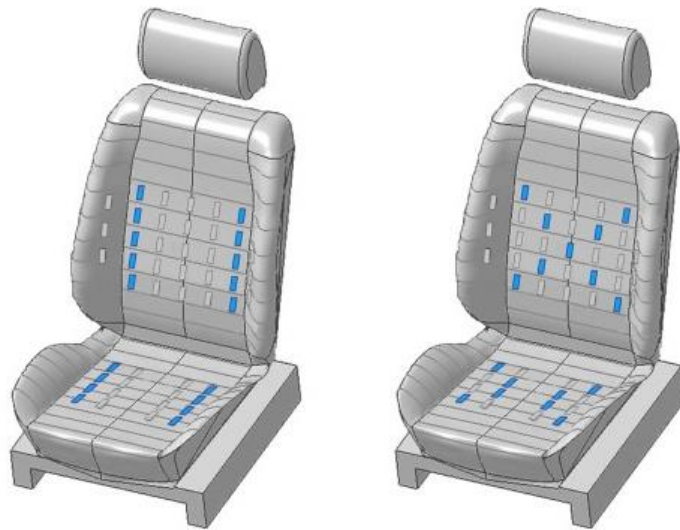


Rys. 3.6 Moduł wizualny stanowiska HMI przedstawiający konieczność przejścia kontroli – widok działania w symulatorze

Źródło: opracowanie własne

Do realizacji sygnalizacji dźwiękowej wykorzystano wbudowany system, umożliwiający bezpośrednie wydawanie poleceń zgodne ze scenariuszem. Do badań wybrano zestaw dźwięków informacyjnych dotyczących przejęcia kontroli, a ich słyszalność zweryfikowano w różnych warunkach drogowych, przy zmiennym natężeniu ruchu, prędkości pojazdu i prędkości obrotowej silnika.

Fotel wibracyjny został zaprojektowany tak, aby umożliwić realizację sygnalizacji wibracyjnej, przekazującej drgania do ciała kierowcy. Za wzór posłużyło rozwiązanie zastosowane przez naukowców z Uniwersytetu w Stuttgarcie [102]. Do celów eksperymentu na siedzisku i oparciu fotela zainstalowano 47 silników wibracyjnych o średnicy 10 mm i grubości 3,4 mm pracujących z nominalnym napięciem 3 V i prądem 60 mA zgodnie z ustalonym wzorem: 16 silników pod siedzeniem (w układzie 4 wiersze, 4 kolumny), 31 silników w oparciu (w układzie 5 wierszy, 7 kolumn, bez elementów narożnych), co przedstawiono na rys. 3.7 i rys. 3.8.



Rys. 3.7 Projekt fotela wykorzystany w badaniach

Źródło: opracowanie własne na podstawie [102]

Stanowisko haptyczne umożliwia następujący sposób generowania bodźców dotykowych:

- symultaniczne zadanego schematu – statyczne (np. 1 x 2000 ms),
- symultaniczne zadanego schematu – pulsacyjne (np. 4 x 500 ms),
- sekwencyjne (np. kolejnymi grupami generatorów 10 kroków x 200 ms każdy),

- kumulatywne (nachodzące na siebie grupy generatorów np. kolumny 10 po 200 ms każda grupa),
- falowe (oddziaływanie grupami generatorów przypominające efekt fali, który łącznie trwa np. 2000 ms).



Rys. 3.8 Rozmieszczenie silników wibracyjnych w fotelu kierowcy – elemencie stanowiska haptycznego

Źródło: opracowanie własne

W celu umożliwienia kierowcy kontroli nad systemem autonomizacji pojazdu zbudowano konsolę użytkownika. Składała się ona z płytki z mikrokontrolerem, interfejsem USB oraz przyciskami i diodami sygnalizacyjnymi, a także z obudowy wydrukowanej na drukarce 3D. Konsolę użytkownika umieszczono w miejscu kontrolki radio samochodowego (rys. 3.9).



Rys. 3.9 Konsola użytkownika do zarządzania systemami ADS w symulatorze jazdy

Źródło: opracowanie własne

3.6. Scenariusz badawczy na symulatorze jazdy

Scenariusz badawczy obejmował kilkunastominutowy przejazd autostradą. Zaplanowano trzy sytuacje niebezpieczne wymagające przekazania kierowcy kontroli przez system zautonomizowany, tzw. TOR (ang. *Take Over Request*):

- prace drogowe, które obejmowały przebudowę drogi oraz objazd wyznaczoną trasą alternatywną,
- dwa wypadki drogowe.

Uczestnicy przed przystąpieniem do badań nie byli informowani o przebiegu scenariusza badawczego. Pozwoliło to zapewnić efekt zaskoczenia. Każda z wymienionych sytuacji była poprzedzona wystąpieniem komunikatu w postaci jednego z trzech zaprojektowanych interfejsów HMI:

- komunikatu wizualnego (informacja wyświetlana jako piktogram na ekranie zegarów),
- komunikatu wizualnego i dźwiękowego (ta sama informacja wizualna wraz z komunikatem dźwiękowym),
- komunikatu wizualnego, dźwiękowego i haptycznego (informacja wzbogacona dodatkowo o pełne, pulsacyjne wibracje fotela).

Informowanie kierujących o zagrożeniach, sytuacji na drodze czy konieczności transferu kontroli odbywało się poprzez dedykowane interfejsy HMI. Sygnały i komunikaty przekazywane były za pomocą wyświetlaczy zamieszczonych w panelu sterowania oraz na tablicy rozdzielczej w pojeździe. Założono, że interpretacja sygnałów powinna odbywać się szybko i wywoływać właściwą reakcję kierowcy na zaistniałą sytuację [94].

Przejście z trybu autonomicznego do trybu manualnego możliwe było na trzy sposoby [92]:

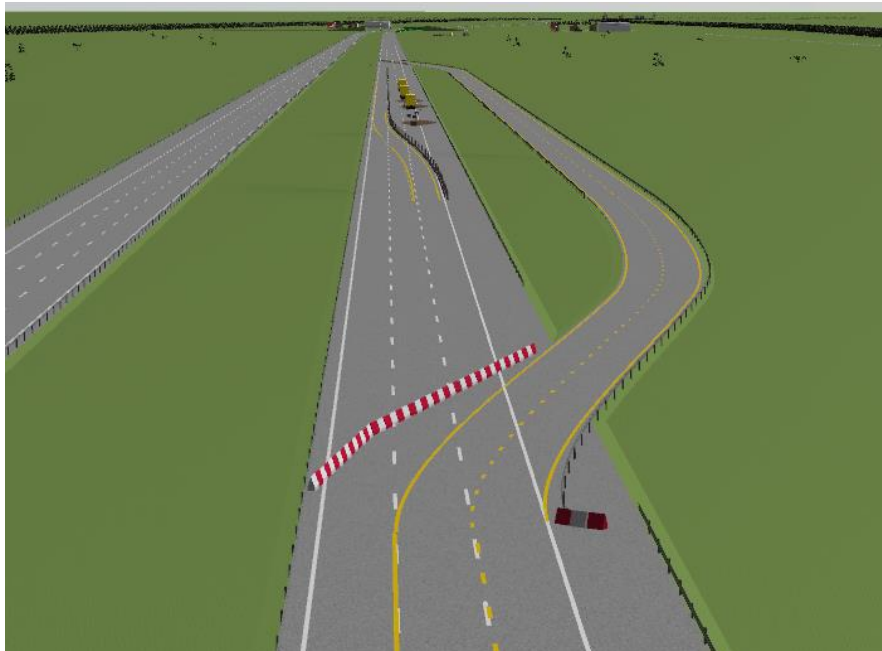
- przez wciśnięcie pedału hamulca,
- przez wciśnięcie pedału przyspieszenia,
- przez znaczące poruszenie kierownicą.

Rysunki 3.10, 3.11, 3.12 i 3.13 przedstawiają podgląd trasy w edytorze PreScan wykonany w miejscu wystąpienia prac drogowych i objazdu trasą alternatywną.



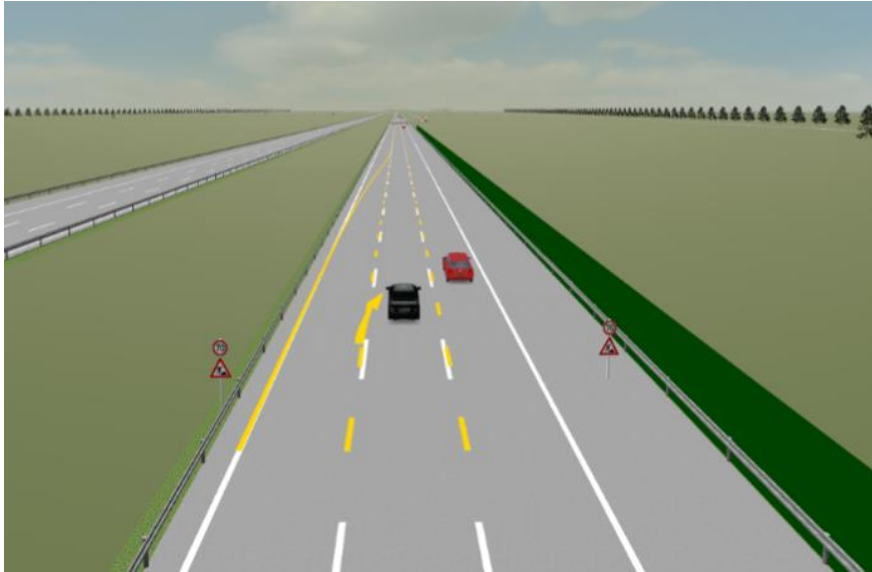
Rys. 3.10 Pierwsza sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR1) – widok początku odcinka w edytorze środowiska symulacyjnego

Źródło: opracowanie własne



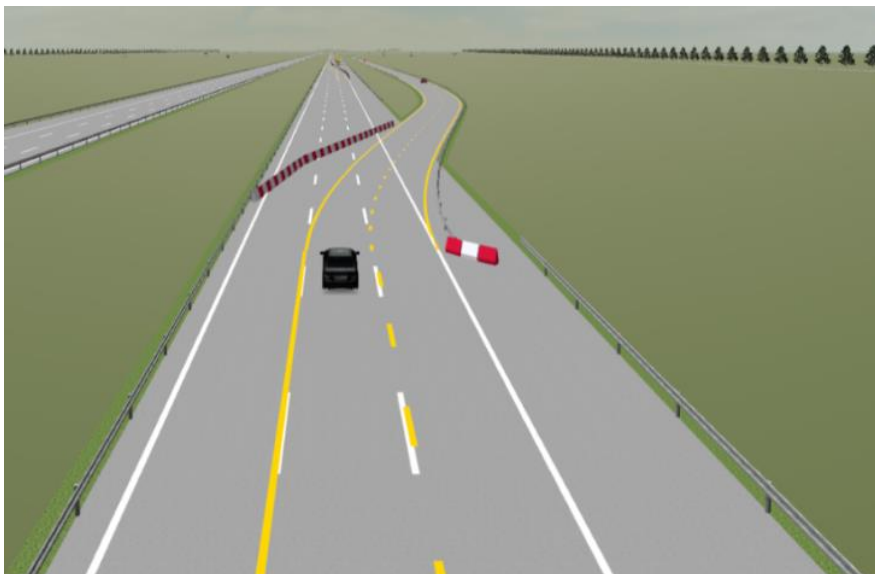
Rys. 3.11 Pierwsza sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR1) – widok dalszej części odcinka w edytorze środowiska symulacyjnego

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3.12 Pierwsza sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR1) – widok podczas dojeżdżania do miejsca wystąpienia zdarzenia

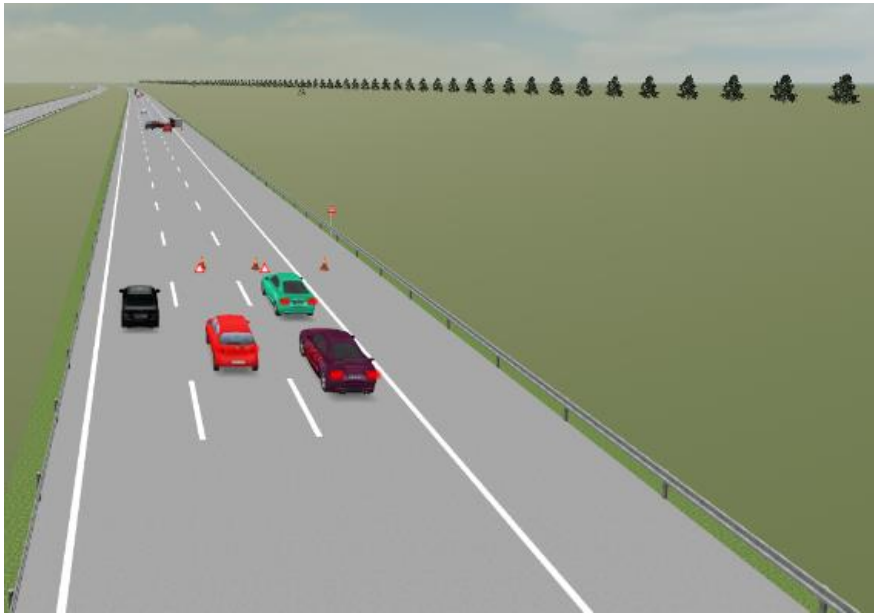
Źródło: opracowanie własne



Rys. 3.13 Pierwsza sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR1) – widok w miejscu wystąpienia zdarzenia edytorze środowiska symulacyjnego

Źródło: opracowanie własne

Rysunki 3.14 i 3.15 również zostały wykonane z poziomu pulpitu operatora. Przedstawiają widok drugiej sytuacji niebezpiecznej (TOR2) – wypadku drogowego. Rys. 3.14 przedstawia zbliżanie się pojazdu do miejsca zdarzenia, a rys. 3.15 ukazuje widok wystąpienia zdarzenia wymagającego przejęcia kontroli sterowania pojazdem przez kierującego.



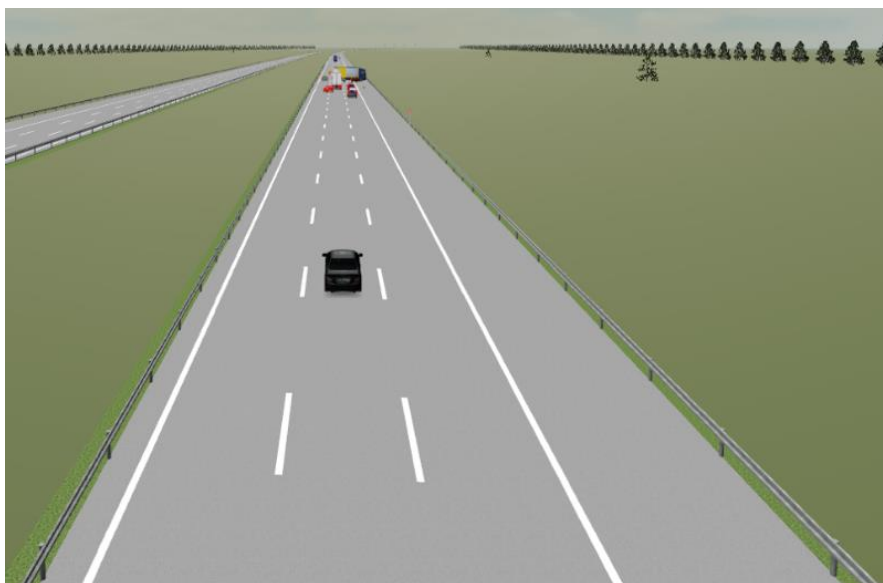
Rys. 3.14 Druga sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR2) – widok podczas dojeżdżania do miejsca wystąpienia zdarzenia w edytorze środowiska symulacyjnego

Źródło: opracowanie własne



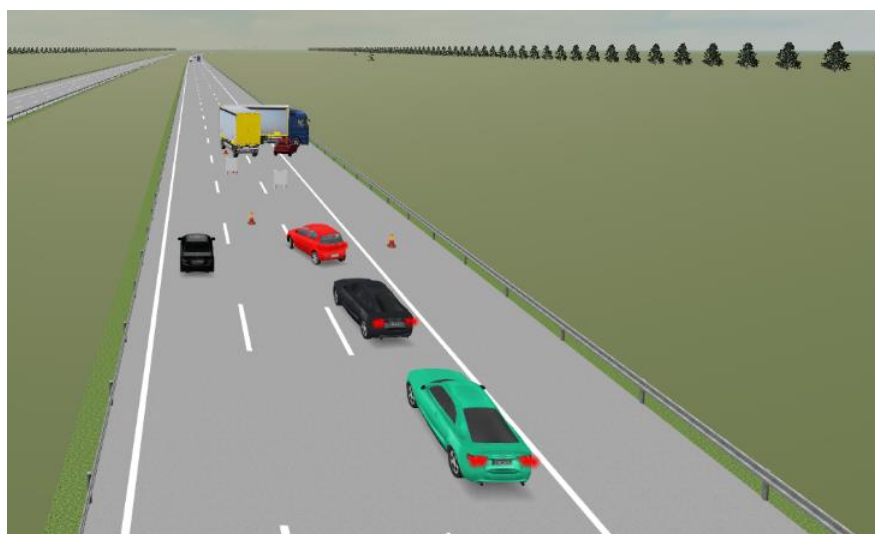
Rys. 3.15 Druga sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR2) – widok w miejscu wystąpienia zdarzenia w edytorze środowiska symulacyjnego

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3.16 Trzecia sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR3) - widok podczas dojeżdżania do miejsca wystąpienia zdarzenia w edytorze środowiska symulacyjnego

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3.17 Trzecia sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR3) - widok w miejscu wystąpienia zdarzenia w edytorze środowiska symulacyjnego

Źródło: opracowanie własne

Rysunki 3.16 i 3.17 dotyczą trzeciej sytuacji niebezpiecznej – również wypadku drogowego. Wykonane zostały podczas symulacji z poziomu pulpitu operatora. Pierwszy przedstawia widok podczas zbliżania się pojazdu do miejsca zdarzenia, drugi – tuż przed nim.

3.7. Procedura badań ankietowych

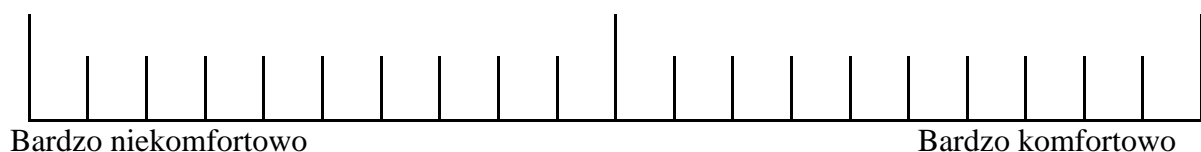
W subiektywnej ocenie transferu kontroli sterowania w pojeździe z warunkową autonomizacją wykorzystano odczucia badanych podczas eksperymentu na symulatorze. Procedura badań obejmowała przejazdy zgodne z założonym scenariuszem odwzorowującym warunki drogowe, które obejmowały konieczność przejęcia przez kierujących kontroli w wybranych sytuacjach drogowych.

Oceny zarówno stopnia komfortu transferu kontroli, jak i poczucia bezpieczeństwa podczas jazdy w trybie autonomicznym dokonano na podstawie badań ankietowych. Kwestionariusze uzupełniane były przez kierujących bezpośrednio po zakończeniu jazdy symulatorem samochodu osobowego wyposażonym w stanowisko multisensoryczne. Wykorzystanie metody ankietowej pozwoliło na ujednoczenie odpowiedzi respondentów, co umożliwiło późniejszą analizę otrzymanych wyników.

Do badania wykorzystano ankietę z 20-stopniową skalą, którą utworzono na podstawie zmodyfikowanego arkusza NASA-TLX [28][41][101]. Ankieta obejmowała 3 pytania:

- Jak oceniasz sytuację przejęcia kontroli (z trybu manualnego jazdy do trybu autonomicznego)?
- Jak oceniasz sytuację przejęcia kontroli (z trybu autonomicznego jazdy do trybu manualnego)?
- Jak się czułeś podczas jazdy autonomicznej?

Osoby badane udzielały odpowiedzi zaznaczając w odpowiednim miejscu znak „X”. Pierwsza kratka od lewej strony na skali oznaczała ocenę negatywną, czyli „Bardzo niekomfortowo” (1. i 2. pytanie) lub „Bardzo niebezpiecznie” (3. pytanie). Z kolei ostatnia kratka po prawej stronie oznaczała ocenę pozytywną, czyli „Bardzo komfortowo” (1. i 2. pytanie) lub „Bardzo bezpiecznie” (3. pytanie). Na rys. 3.18 przedstawiono przykładową skalę ocen.



Rys. 3.18 Skala ocen w badaniach ankietowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [101]

3.8. Model rozmyty do oceny poprawności przejęcia przez kierowcę kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją

Do budowy modelu rozmytego posłużono się narzędziem Fuzzy Logic Designer działającym w środowisku MATLAB. Spośród parametrów rejestrowanych przez symulator kluczowy był czas przejęcia kontroli nad pojazdem.

W modelu rozmytym do oceny poprawności przejęcia przez kierowcę kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją oprócz czasu transferu wykorzystano także ocenę poczucia komfortu kierujących podczas tego procesu. Jednym z założeń modelu było przyjęcie, że badane procesy charakteryzują się rozkładem teoretycznym normalnym. Związane było to z ograniczoną próbą badawczą oraz z występującymi odstającymi danymi. Na podstawie normy ISO 5725-5 [49] określono parametry rozkładów w zbiorach rozmytych, co umożliwiło wykorzystanie metody odpornej Hubera [118], która jest mało wrażliwa na odstające próbki, a środkowa część rozkładu gęstości prawdopodobieństwa pokrywa się z przyjętym w założeniu rozkładem normalnym. Uwzględnienie w modelu zasadniczym parametrów obiektywnych i subiektywnych dało podstawy metodologiczne heurystycznego modelu lingwistycznego. Do wybranych wejść modelu przypisano określone poziomy tj. czas (krótki, średni, długi); ocena (niska, średnia, dobra, bardzo dobra). Określono tendencję kształtowania się poprawności, którą uzależniono od czasu i oceny oraz przyjęto następujące słowa kluczowe, którym przypisano ideogramy zestawione w tabeli 3.3.

Tabela 3.3 Ideogramy w modelu lingwistycznym

Słowo kluczowe	Ideogram
niedopuszczalna	↓↓
dopuszczalna	↓
dobra	↑
bardzo dobra	↑↑

Źródło: opracowanie własne

W modelu symulacyjnym oceny poprawności procesu przejmowania kontroli nad pojazdem za podstawę przyjęto model heurystyczny, czyli model lingwistyczny wyrażony w postaci implikacji w obszarze logiki rozmytej, zgodnie z wcześniej przyjętymi i opisanymi

założeniami. Wpływ poszczególnych poziomów wejść na poprawność procesu przejmowania kontroli przedstawiono w tabeli 3.4.

Tabela 3.4 Wpływ czasu reakcji oraz oceny na poprawność przejęcia kontroli

Czas	Ocena	Poprawność
krótki	niska	↓
krótki	średnia	↑
krótki	dobra	↑
krótki	bardzo dobra	↑↑
średni	niska	↓
średni	średnia	↓
średni	dobra	↑
średni	bardzo dobra	↑
długi	niska	↓↓
długi	średnia	↓↓
długi	dobra	↓
długi	bardzo dobra	↓

Źródło: opracowanie własne

Dane zestawione w tabeli 3.4 stanowiły podstawę do budowy heurystycznego modelu lingwistycznego, który sformułowano w formie implikacji i przedstawiono poniżej.

Jeżeli czas jest krótki i ocena jest niska to poprawność jest dopuszczalna.

Jeżeli czas jest krótki i ocena jest średnia to poprawność jest dobra.

Jeżeli czas jest krótki i ocena jest dobra to poprawność jest dobra.

Jeżeli czas jest krótki i ocena jest bardzo dobra to poprawność jest bardzo dobra.

Jeżeli czas jest średni i ocena jest niska to poprawność jest dopuszczalna.

Jeżeli czas jest średni i ocena jest średnia to poprawność jest dopuszczalna.

Jeżeli czas jest średni i ocena jest dobra to poprawność jest dobra.

Jeżeli czas jest średni i ocena jest bardzo dobra to poprawność jest dobra.

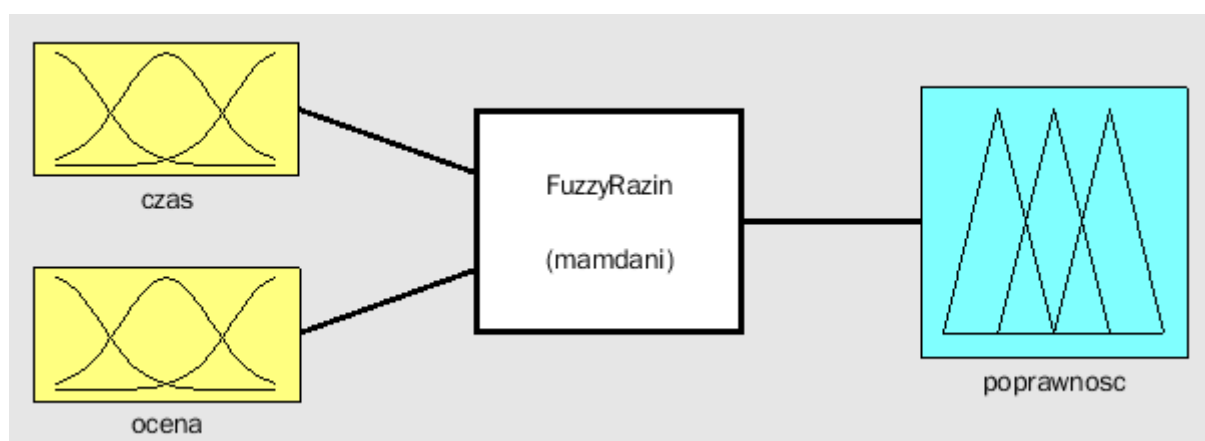
Jeżeli czas jest długi i ocena jest niska to poprawność jest niedopuszczalna.

Jeżeli czas jest długi i ocena jest średnia to poprawność jest niedopuszczalna.

Jeżeli czas jest długi i ocena jest dobra to poprawność jest dopuszczalna.

Jeżeli czas jest długi i ocena jest bardzo dobra to poprawność jest dopuszczalna.

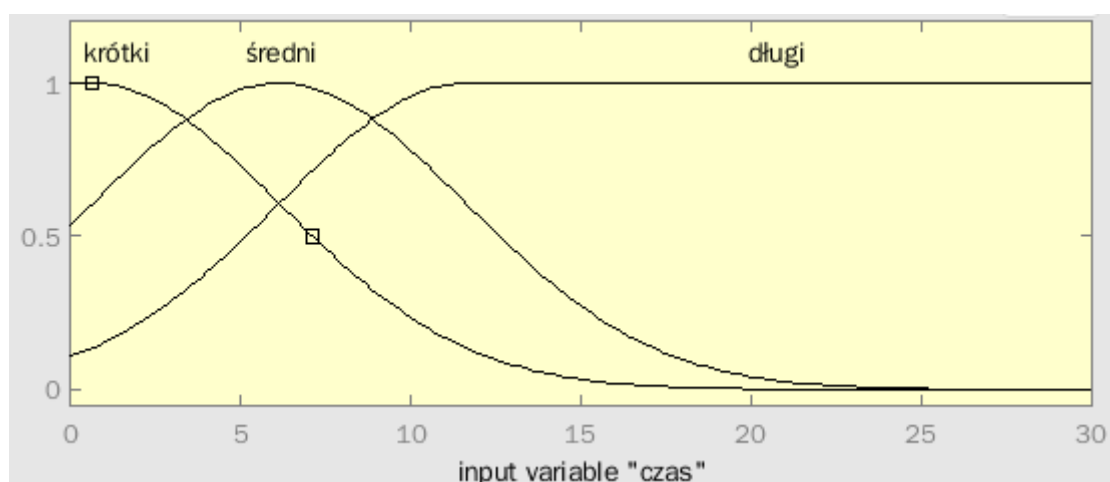
Lingwistyczna postać modelu została zaimplementowana w numerycznym środowisku MATLAB z wykorzystaniem narzędzia Fuzzy Logic Designer. Model rozmyty (rys. 3.19) posiada dwa wejścia oraz jedno wyjście. Na wejściu umieszczono parametr opisany jako „czas” i jest to czas przejścia kontroli przez kierowcę nad pojazdem od momentu otrzymania powiadomienia poprzez dedykowane interfejsy do momentu zareagowania na ten komunikat. Drugim wejściem jest „ocena”, czyli subiektywna ocena poczucia komfortu podczas transferu kontroli od pojazdu do kierującego. Wyjście, które określono jako „poprawność” zostało zaprojektowane tak, aby na podstawie parametrów wejściowych umożliwić ocenę poprawności procesu przejścia kontroli przez kierowcę.



Rys. 3.19 Model kontrolera rozmytego - widok ze środowiska MATLAB

Źródło: opracowanie własne (MATLAB Fuzzy Logic Designer)

Zarówno dla wejść, jak i dla wyjścia określono funkcje przynależności, które na podstawie danych eksperymentalnych umożliwiły wyznaczenie parametrów krzywej normalnej. Charakterystyki tych krzywych zostały zaimplementowane w modelu rozmytym, dla którego przyjęto zastosowanie mechanizmu interferencyjnego typu Mamdaniego. Defuzyfikację (wyostrzenie) przeprowadzono metodą środka ciężkości. Każdą z wyznaczonych funkcji przynależności kolejno dla dwóch wejść i jednego wyjścia przedstawiono poniżej.

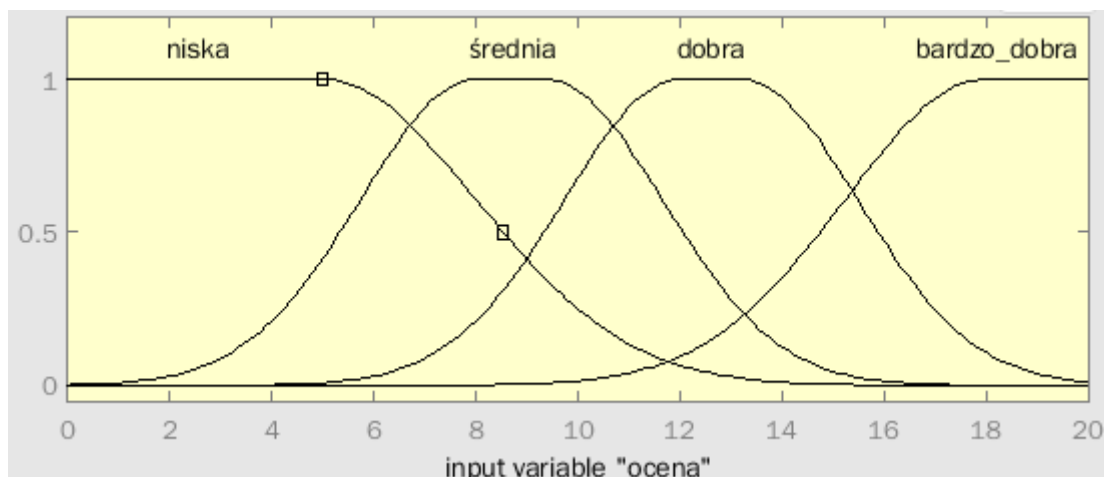


Rys. 3.20 Funkcje przynależności wejścia „czas”

Źródło: opracowanie własne (MATLAB Fuzzy Logic Designer)

Dla wejścia „czas” (rys. 3.20) określono trzy funkcje przynależności: krótki, średni, długi. Każda z tych funkcji odwzorowywała czas reakcji na sygnał otrzymany od pojazdu w sytuacji tego wymagającej.

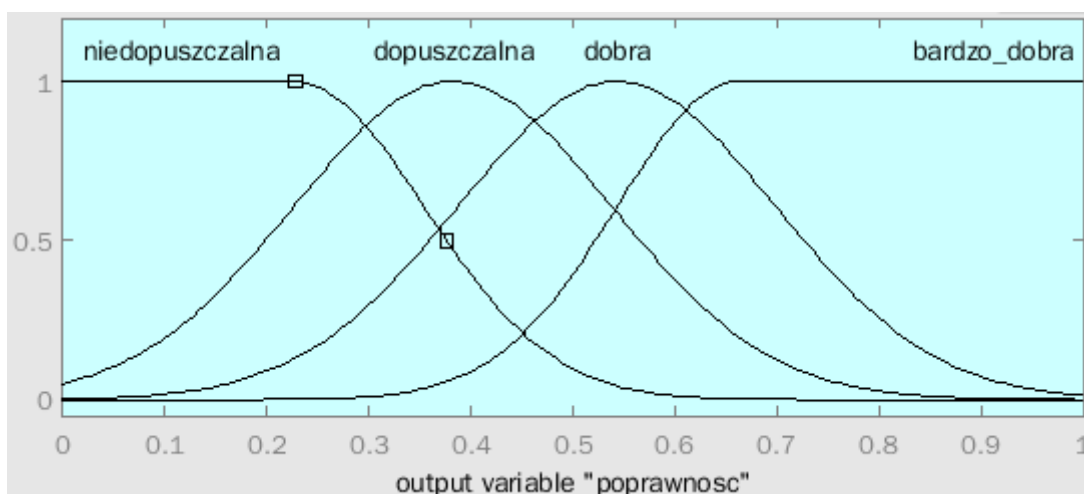
Szybka reakcja odznaczała się wysoką skutecznością procesu przejęcia kontroli i jednocześnie pozwalała utrzymać panowanie nad pojazdem w nagłej sytuacji w scenariuszu jazdy. Kierujący mieli wystarczająco dużo czasu, aby zorientować się, co dzieje się w najbliższym otoczeniu samochodu i co spowodowało utratę zdolności pojazdu do samodzielnego kierowania. Mogli ustabilizować tor jazdy, zmniejszyć prędkość, czyli bezpiecznie przejąć kontrolę nad pojazdem. W przypadku średniego czasu kierujący z racji na wolniejszą reakcję mieli mniejszy odstęp od niebezpiecznego odcinka drogi oraz mniej czasu na ustabilizowanie parametrów jazdy. Z kolei przebieg funkcji przynależności określony jako „wolno” oznacza czas nie w pełni wystarczający lub niewystarczający do bezpiecznego przejęcia kontroli nad pojazdem. Kierujący, którzy zareagowali zbyt wolno byli zmuszeni do nagłej, intuicyjnej (często ryzykownej) reakcji z racji na małą odległość od niebezpiecznego odcinka trasy. Popelniali więcej błędów, co negatywnie wpływało na poprawność przejmowania kontroli nad pojazdem.



Rys. 3.21 Funkcje przynależności wejścia „ocena”

Źródło: opracowanie własne (MATLAB Fuzzy Logic Designer)

W przypadku wejścia „ocena” (rys. 3.21) wyznaczono cztery funkcje przynależności: niska, średnia, dobra, bardzo dobra. Niska ocena oznaczała niskie poczucie komfortu podczas procesu przejmowania kontroli. Średnia ocena określała średni i jednocześnie akceptowalny poziom poczucia komfortu w czasie tego procesu. Dobra ocena odwzorowywała akceptowalny i wyższy niż średnia poziom poczucia komfortu. Z kolei wysoka ocena oznaczała wysoki poziom poczucia komfortu i intuicyjny przebieg procesu przejmowania kontroli nad pojazdem, co wiązało się z wysokim poziomem poczucia bezpieczeństwa. Kierujący byli przekonani o panowaniu nad sytuacją, co miało pozytywny wpływ na poprawność przejmowania kontroli nad pojazdem.

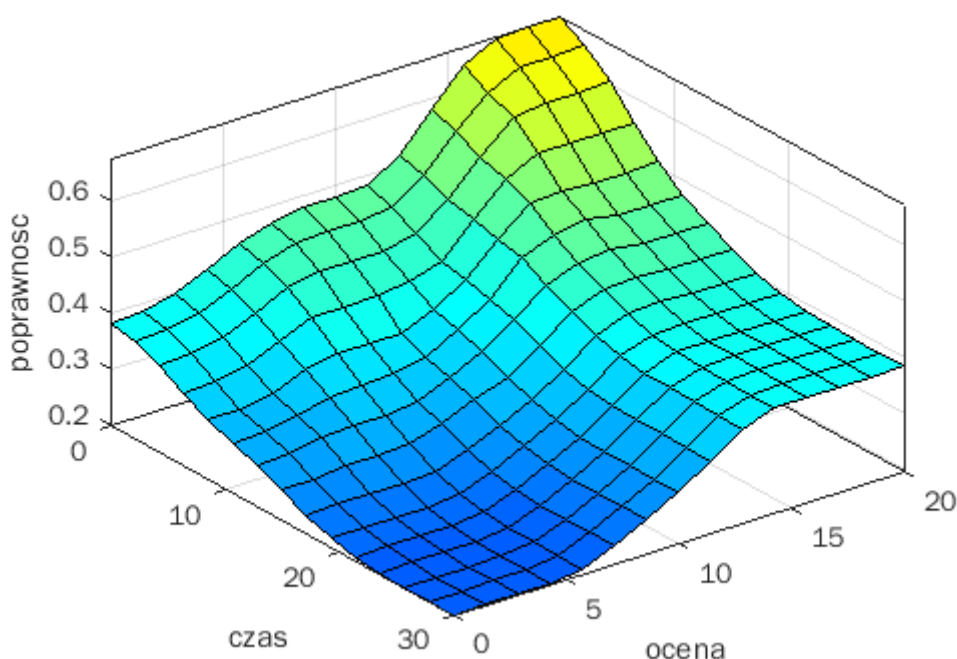


Rys. 3.22 Funkcje przynależności wyjścia „poprawność”

Źródło: opracowanie własne (MATLAB Fuzzy Logic Designer)

Wyjście określone jako „poprawność” (rys. 3.22) zostało scharakteryzowane przez cztery funkcje przynależności: niedopuszczalna, dopuszczalna, dobra, bardzo dobra. Funkcja „niedopuszczalna” oznacza bardzo niską (nieakceptowalną) poprawność procesu przejęcia kontroli. Funkcja „dopuszczalna” określa poziom niskiej, ale dopuszczalnej poprawności przebiegu całego procesu. Funkcja „dobra” charakteryzuje dobrą poprawność tego procesu, natomiast funkcja „bardzo dobra” oznacza bardzo wysoką poprawność przebiegu procesu przejmowania kontroli nad pojazdem.

Powstały model charakteryzują funkcje zależności wartości wyjścia „poprawność” od wejść „czas” i „ocena”, co przedstawiono na wykresie na rys. 3.23.



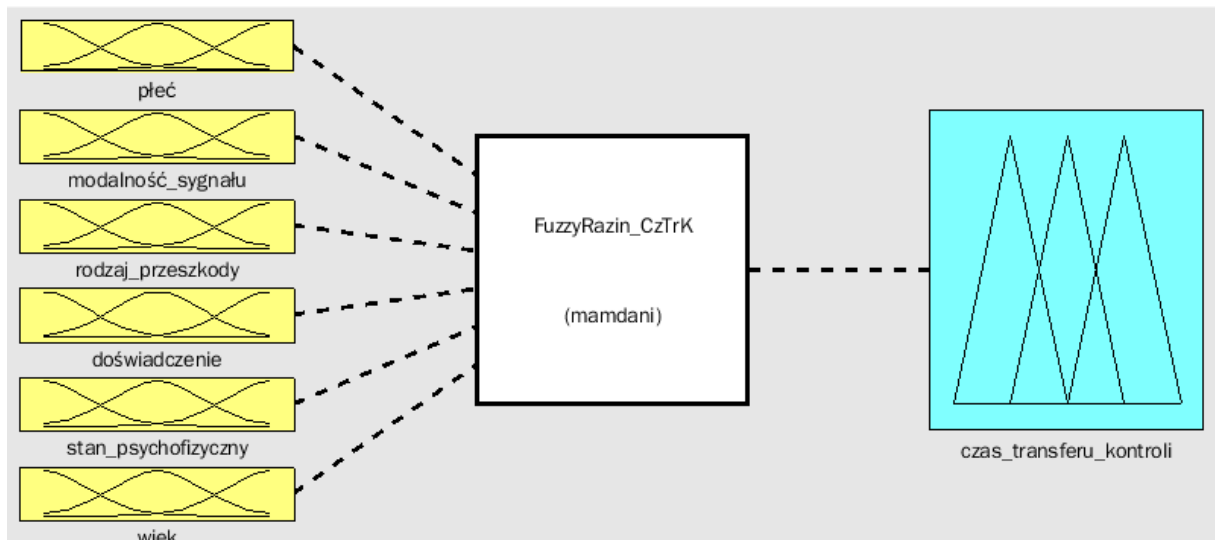
Rys. 3.23 Funkcja zależności wyjścia „poprawność” od wartości wejść „czas” i „ocena”

Źródło: opracowanie własne (MATLAB Fuzzy Logic Designer)

Utworzony model teoretycznie przyjmuje wartości z zakresu od 0 do 1, ponieważ dla takich wartości krańcowych wyznaczono funkcje przynależności. Jednak ze względu na określoną charakterystykę funkcji przynależności, wyjście „poprawność” może przyjmować wartości pomiędzy 0,199 a 0,672.

Z badań eksperymentalnych wynika, że wartość czasu transferu kontroli uzależniona jest od wielu czynników, tzn. wieku, płci, modalności (rodzaju sygnału) oraz rodzaju przeszkody (manewru). Niewątpliwie analizie powinno się poddać jeszcze inne czynniki takie jak np.: stan psychofizyczny kierowcy, poczucie bezpieczeństwa podczas jazdy w trybie

autonomicznym, doświadczenie. Część z tych parametrów ma wartość zero-jedynkową, np. płeć. Inne dadzą się opisać funkcjami przynależności (wiek, doświadczenie czy stan psychofizyczny). Uwzględnienie tych czynników w modelu czasu transferu kontroli pozwoliłoby pozyskać większą wiedzę odnośnie kształtowania tego procesu. Optymalizacja czasu transferu kontroli będzie miała istotny wpływ na poziom poprawności przejścia kontroli.



Rys. 3.24 Model czasu transferu kontroli - widok ze środowiska MATLAB

Źródło: opracowanie własne (MATLAB Fuzzy Logic Designer)

Przykładowy model na rys. 3.24 ma więc formę otwartą i nie ogranicza możliwości rozszerzenia go o kolejne wejścia. Wymaga to jednak pozyskania gruntownej wiedzy niezbędnej w budowie modelu lingwistycznego w oparciu o badania eksperymentalne odnośnie wpływu poszczególnych czynników na kształtowanie się czasu transferu. Ten kierunek badań według doktorantki należy kontynuować.

4. ANALIZA WYNIKÓW

4.1. Wyniki badań symulatorowych

Weryfikacji działania stanowiska multisensorycznego dokonano w oparciu o przeprowadzone badania w zakresie przekazania i przejęcia kontroli w pojeździe wyposażonym w system autonomizujący jazdę po autostradzie. Podstawową badaną zmienną zależną był czas liczony od momentu pojawienia się komunikatu w jednej z trzech form (wizualnie, wizualnie i dźwiękowo lub wizualnie, dźwiękowo i haptycznie) do momentu wykonania przez kierowcę znaczącej interwencji w postaci wciśnięcia pedału przyspieszenia, hamulca lub wykonania skrętu kierownicą. Z punktu widzenia analizy sytuacji transferu kontroli krytycznym elementem określono znacznik czasowy RtI wygenerowany w momencie pojawienia się informacji o konieczności przejęcia kontroli. Znacznik ten jest przyjmowany jako początek procesu przejmowania kontroli nad pojazdem, od którego producenci pojazdów określają czas konieczny na wykonanie tego zadania.

W tabeli 4.1 przedstawiono wyniki z przeprowadzonych badań. Z całej grupy badawczej analizie poddano wyniki 26 osób.

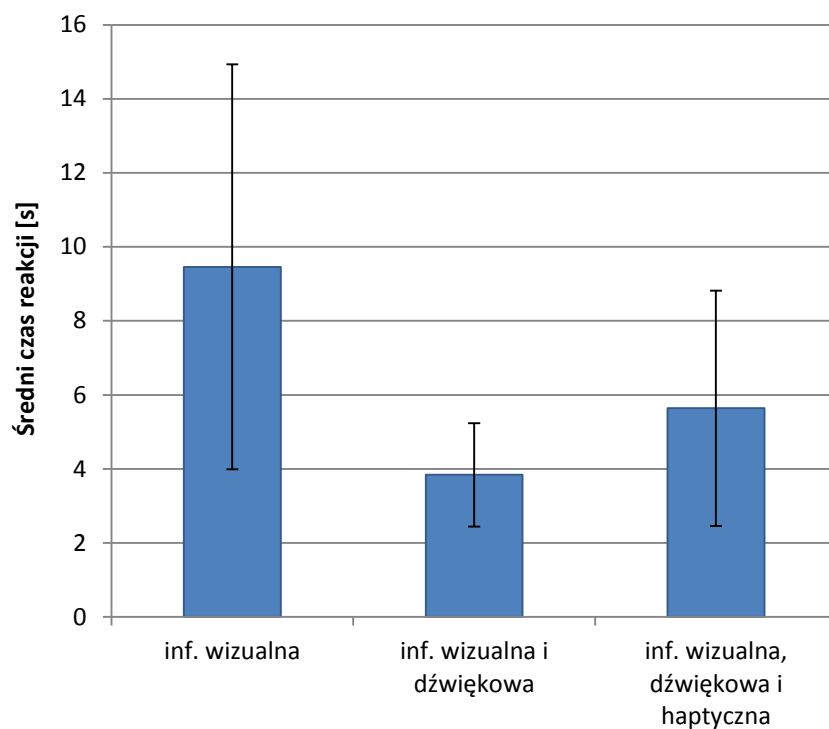
Tabela 4.1 Statystyki opisowe dla czasów przejęcia kontroli w trzech sytuacjach TOR1, TOR2 i TOR3

Sytuacja drogowa	Grupy	N	Minimum [s]	Maksimum [s]	Średnia [s]	Odchylenie standardowe
Sytuacja TOR1	Cała próba badawcza		1,90	28,91	8,06	6,52
	Grupa bodźce wizualne	8	4,26	28,91	13,08	8,39
	Grupa bodźce dźwiękowe i wizualne	10	1,90	16,19	5,16	4,37
	Grupa bodźce dźwiękowe, wizualne i haptyczne	8	2,26	13,76	6,98	4,48
Sytuacja TOR2	Cała próba badawcza		1,70	26,60	5,64	5,46987
	Grupa bodźce wizualne	8	2,33	26,60	9,08	8,11
	Grupa bodźce dźwiękowe i wizualne	10	1,70	4,91	2,81	1,07
	Grupa bodźce dźwiękowe, wizualne i haptyczne	8	1,70	13,32	5,70	4,62

Sytuacja drogowa	Grupy	N	Minimum [s]	Maksimum [s]	Średnia [s]	Odchylenie standardowe
Sytuacja TOR3	Cała próba badawcza		1,96	14,10	4,87	3,38111
	Grupa bodźce wizualne	10	1,96	14,10	6,22	4,20
	Grupa bodźce dźwiękowe i wizualne	8	2,13	12,19	3,54	3,05
	Grupa bodźce dźwiękowe, wizualne i haptyczne	8	2,26	9,29	4,27	2,61
Wszystkie sytuacje TOR	Cała próba badawcza		2,07	19,51	6,54	4,70751
	Grupa bodźce wizualne	8	3,24	19,04	9,46	5,47
	Grupa bodźce dźwiękowe i wizualne	10	2,24	6,74	3,84	1,40
	Grupa bodźce dźwiękowe, wizualne i haptyczne	8	2,07	9,87	5,64	3,18

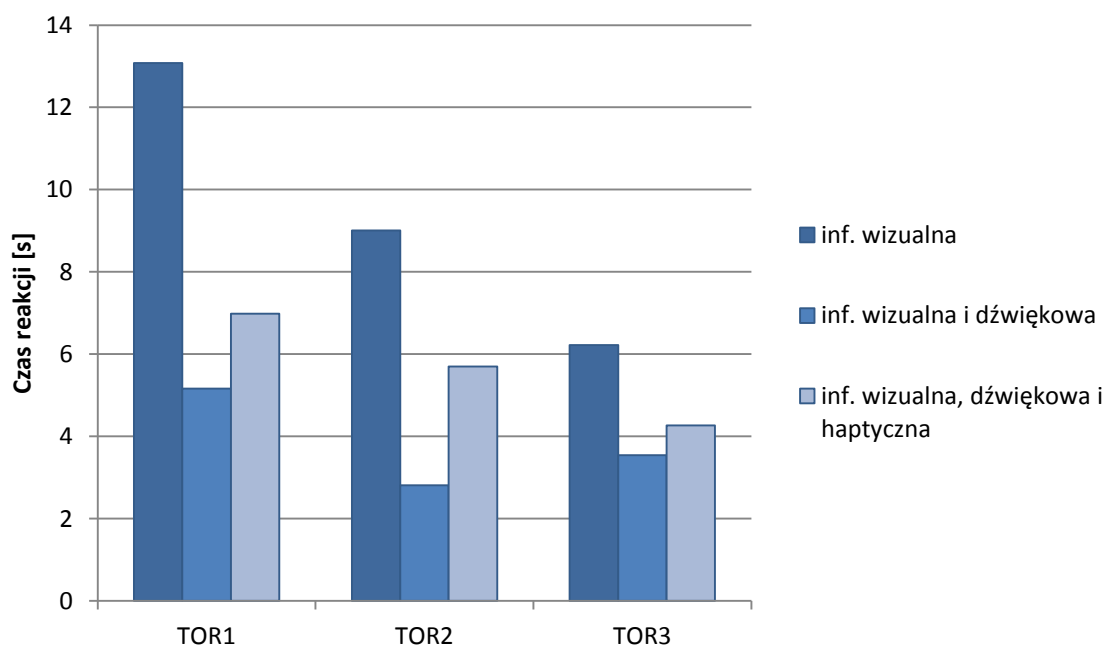
Źródło: opracowanie własne

W pierwszej części analizie poddano czas w sekundach do przejścia kontroli [92]. Średni czas reakcji obliczony dla wszystkich trzech sytuacji drogowych (rys. 4.1) wyniósł odpowiednio: 9,46 s (SD = 5,47) dla bodźców wizualnych, 5,64 s (SD = 3,18) dla kombinacji bodźców wizualnych, dźwiękowych i haptycznych oraz 3,84 s (SD = 1,40) dla bodźców wizualnych i dźwiękowych. Na rys. 4.2 przedstawiono z kolei czas reakcji na żądanie przejścia kontroli z podziałem na trzy sytuacje TOR. Otrzymane wyniki z eksperymentu wykazały zróżnicowanie efektywności przekazywania informacji za pomocą bodźców o różnej modalności. Najkrótszy średni czas reakcji kierowcy uzyskano dla bodźców wizualnych połączonych z dźwiękowymi. Dodanie bodźca haptycznego w postaci wibracji fotela kierowcy wydłużyło czas reakcji średnio o 1,8 sekundy w stosunku do komunikatu wizualno-dźwiękowego. Najdłuższy średni czas reakcji zaobserwowano dla bodźców wizualnych.



Rys. 4.1 Wykres średniego czasu reakcji (w sekundach) na żądanie przejęcia kontroli dla wszystkich trzech sytuacji TOR pomiędzy grupami z różnymi interfejsami HMI

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.2 Wykres czasu reakcji (w sekundach) na żądanie przejęcia kontroli z podziałem na trzy sytuacje TOR pomiędzy grupami z różnymi interfejsami HMI

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji dla prób niezależnych, w ramach której sprawdzono czy zmienna niezależna o trzech poziomach (rodzaj interfejsu HMI zastosowany w komunikowaniu konieczności transferu kontroli) wpłynęła na zmienną zależną w postaci czasu przejścia kontroli w pojeździe. Wynik testu statystycznego ANOVA okazał się istotny $F(2, 26) = 7,04$; $p = 0,04$. Miara siły efektu (wpływu zmiennej niezależnej na zależną) wyniosła $\eta^2 = 0,35$, co oznacza efekt o dużej sile. Wykazano, że rodzaj interfejsu wpłynął na osiągnięte wyniki w postaci czasu przejścia kontroli. Statystykę ANOVA przeprowadzoną w programie SPSS podsumowano w tabeli 4.2.

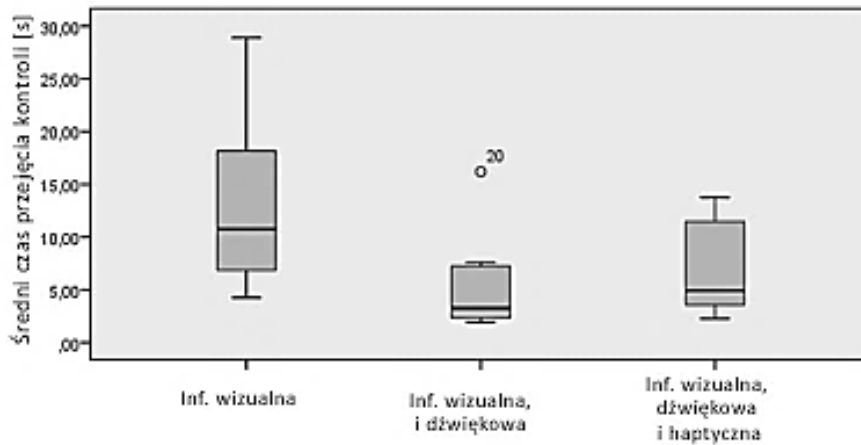
Tabela 4.2 Jednoczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) dla trzech różnych interfejsów HMI zastosowanych w badaniu (trzy scenariusze TOR)

	Suma kwadratów	df	Średni kwadrat	F	Istotność
Między grupami	217,98	2	108,989	7,04	,004
Wewnątrz grup	402,52	26	15,482		
Ogółem	620,50	28			

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników otrzymanych w programie SPSS

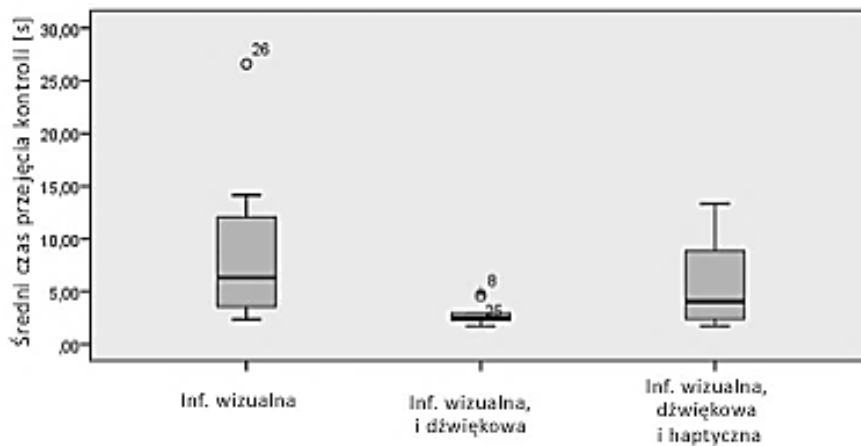
Dla pierwszej sytuacji TOR1, w której przed osobą badaną była ustanowiona strefa robót budowlanych średni czas przejścia kontroli w grupie informacji wizualnej wyniósł aż 13,08 s (SD = 8,39). Z kolei w grupach kombinacji bodźców uzyskane czasy reakcji wynosiły odpowiednio 5,16 s (SD = 4,37) dla grupy informacji wizualnej i dźwiękowej oraz 6,98 s (SD = 4,48) dla interfejsów opartych o informację wizualną, dźwiękowa i haptyczną. Należy zwrócić uwagę także na zdecydowanie większą zmienność wyników w grupie informacji wizualnej, co przedstawiono na rys. 4.3.

Kolejna sytuacja konieczności przejścia kontroli TOR2 wynikała z wypadku drogowego, który przewidziano w scenariuszu. W grupie, która otrzymała informację wizualną średni czas reakcji wyniósł 9,08 s (SD = 8,11), a w grupie informacji wizualnej i dźwiękowej średnia wyniosła 2,81 s (SD = 1,07) (najlepszy wynik). W grupie, gdzie zastosowano kombinację wszystkich trzech modalności sensorycznych średnia wyniosła 5,70 s (SD = 4,62). Zdecydowanie najmniejszą zmienność wyników zauważono w grupie informacji wizualnej i dźwiękowej, co przedstawiono na rys. 4.4. W scenariuszu TOR2 dwie osoby (z których jedna uzyskała informację we wszystkich trzech modalnościach, a druga w modalności wizualnej) w ogóle nie przejęły kontroli nad pojazdem w wymaganym czasie.



Rys. 4.3 Wykres średniego czasu reakcji [s] na żądanie przejęcia kontroli dla sytuacji drogowej TOR1 pomiędzy grupami z różnymi interfejsami HMI

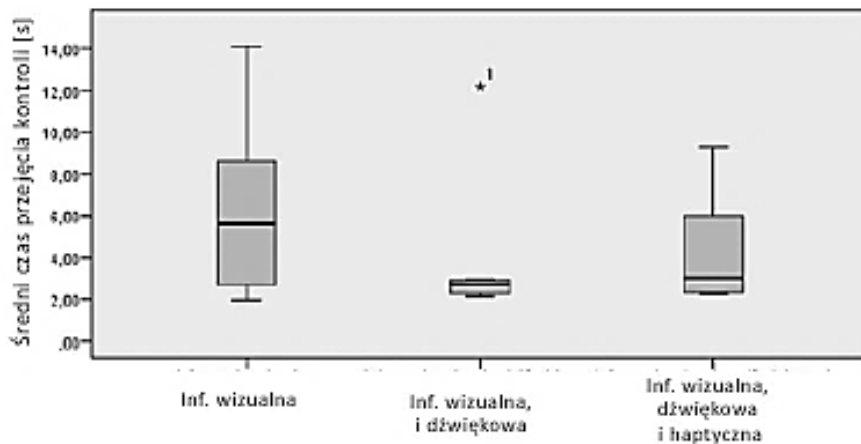
Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.4 Wykres średniego czasu reakcji [s] na żądanie przejęcia kontroli dla sytuacji drogowej TOR2 pomiędzy grupami z różnymi interfejsami HMI

Źródło: opracowanie własne

Ostatnią sytuacją wymagającą przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR3) był wypadek. W tym przypadku grupa osób badanych, która otrzymała tylko informację wizualną osiągnęła średni czas przejęcia kontroli na poziomie 6,22 s (SD = 4,2). Osoby otrzymujące informację wizualną i dźwiękową osiągnęły wynik 3,54 s (SD = 3,05), a grupa osób dodatkowo uzyskujących informację z fotela kierowcy uzyskała wynik 4,27 s (SD = 2,62). Ponownie najmniejszą zmienność wyników uzyskano w grupie informacji wizualnej i dźwiękowej (tylko jedna osoba miała czas na poziomie ponad 10 sekund), co przedstawiono na rys. 4.5.



Rys. 4.5 Wykres średniego czasu reakcji [s] na żądanie przejęcia kontroli dla sytuacji drogowej TOR3 pomiędzy grupami z różnymi interfejsami HMI

Źródło: opracowanie własne

W przypadku testowania trzech typów interfejsów HMI to ten oparty o komunikat wizualny i dźwiękowy okazał się najbardziej efektywny pod względem czasu reakcji na bodźce. Osoby badane najszybciej reagowały i przejmowały kontrolę uzyskując informacje z tych dwóch modalności. Najwolniejsze reakcje kierujących zaobserwowano w przypadku wykorzystaniu komunikatów wizualnych.

W ramach prowadzonych analiz zbadano również sytuację, w której osoba badana po przejechaniu sytuacji TOR1, TOR2 i TOR3 była proszona o ponowne włączenie trybu jazdy autonomicznej po autostradzie. Tego typu prośba była podana tylko jako komunikat dźwiękowy dla wszystkich uczestników badania po tym jak pojazd znalazł się ponownie poza strefą TOR. Średni czas od momentu pojawienia się komunikatu do włączenia trybu jazdy autonomicznej wyniósł 4,97 s (SD = 1,52 s), co przedstawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Statystyka opisowa dla sytuacji ponownego włączenia trybu jazdy asystenta (włączenia systemu ADS) dla wszystkich trzech sytuacji TOR

Sytuacja drogowa	Grupy	Minimum	Maksimum	Średnia	Odchylenie standardowe
Sytuacja ADS	Wszystkie grupy	1,91	13,2	4,97	1,52

Źródło: opracowanie własne

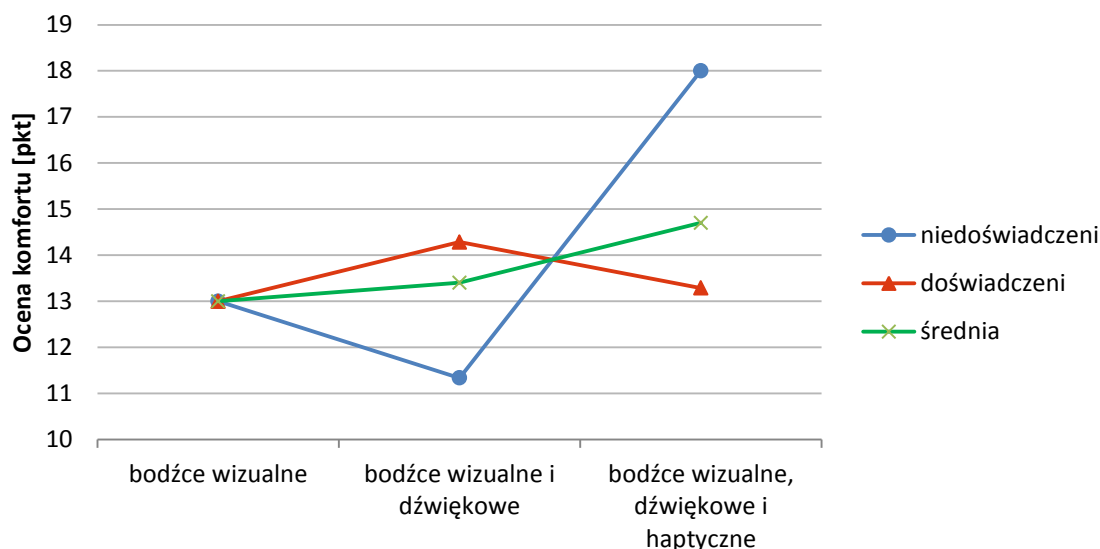
4.2. Subiektywna ocena procesu przejęcia kontroli - wyniki badań ankietowych

W eksperymencie kierujący oceniali proces oddania kontroli pojazdowi (np. po bezpiecznym ominięciu wypadku drogowego) oraz proces przejęcia kontroli nad pojazdem wywołany zaistniałą sytuacją na drodze. O konieczności przejęcia kontroli sterowania byli informowani poprzez interfejsy HMI umieszczone wewnątrz symulatora jazdy ze stanowiskiem multisensorycznym. Osoby badane otrzymywały sygnały wizualne, dźwiękowe i haptyczne [92].

Grupę badawczą na potrzeby zarówno eksperymentu w symulatorze jazdy, jak i przeprowadzenia ankiety podzielono na 3 podgrupy, z których pierwsza informowana była jedynie za pomocą bodźców wizualnych, druga – za pomocą bodźców wizualnych i dźwiękowych, a trzecia – za pomocą bodźców wizualnych, dźwiękowych i haptycznych w postaci wibracji fotela. Osoby badane miały możliwość przejęcia kontroli z trybu autonomicznego do manualnego poprzez wciśnięcie pedału przyspieszenia, hamulca lub znaczące poruszenie kołem kierownicy. Procedurę badawczą i warunki eksperymentu szerzej opisano w podrozdziale 3.4. Po zakończeniu scenariusza badawczego kierujący wypełniali ankietę, której wyniki przedstawiono na Rys. 4.6. Na potrzeby analizy grupę badawczą dodatkowo podzielono za względu na wiek (<25 lat, 30-40 lat, >55 lat) oraz ze względu na doświadczenie w prowadzeniu pojazdu (niedoświadczeni – kierujący aktywnie do 3 lat; doświadczeni – kierujący aktywnie powyżej 3 lat) [93].

4.2.1. Subiektywna ocena procesu przejęcia kontroli z trybu autonomicznego do manualnego

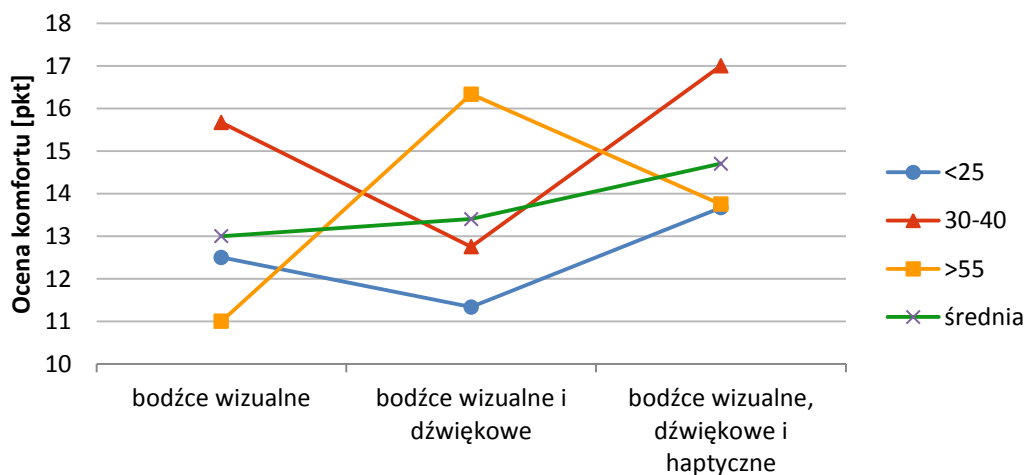
Na rys. 4.6 przedstawiono wyniki subiektywnej oceny przejęcia kontroli z trybu autonomicznego do manualnego z podziałem na grupy kierowców niedoświadczonych i doświadczonych [93]. Osoby aktywnie kierujące pojazdami od ponad 3 lat za najbardziej komfortową sytuację przejęcia kontroli uznały taką, która była poprzedzona sygnałem wizualnym i dźwiękowym (średnio 14,29 pkt., SD = 4,09), co pokrywa się z wynikami otrzymanymi w badaniach symulatorowych – reakcja na połączenie bodźców wizualnych i dźwiękowych powodowała najszybsze reakcje. Z kolei u kierowców niedoświadczonych, którzy kierowali pojazdami poniżej 3 lat za najlepszy sposób informowania o konieczności przejęcia kontroli uznano połączenie trzech modalności (średnio 18 pkt., SD = 0,82), czyli bodźców wizualnych, dźwiękowych i haptycznych (w postaci wibracji fotela).



Rys. 4.6 Ocena komfortu przejścia kontroli z trybu autonomicznego do manualnego (podział kierowców ze względu na doświadczenie)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [93]

Podział osób badanych na grupy wiekowe wykazał inne różnice w odbiorze sygnałów o różnych modalnościach. Zarówno grupa do 25 roku życia, jak i osoby w wieku 30-40 lat wskazały połączenie trzech rodzajów bodźców jako najbardziej komfortowe w odbiorze (średnio 13,67 pkt., SD = 6,18; 17 pkt., SD = 0,82). Natomiast grupa powyżej 55 roku życia najniżej oceniła sam bodziec wizualny (średnio 11 pkt., SD = 3,27), zaś najwyżej – połączenie sygnałów wizualnych i dźwiękowych (średnio 16,33 pkt., SD = 3,86) [93], co przedstawiono na rys. 4.7.

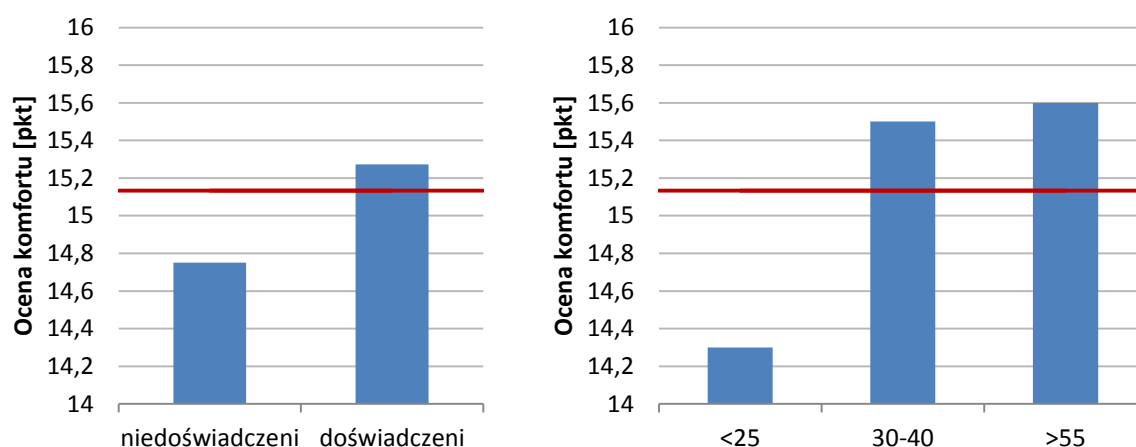


Rys. 4.7 Ocena komfortu przejścia kontroli z trybu autonomicznego do manualnego (podział kierowców ze względu na wiek)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [93]

4.2.2. Subiektywna ocena procesu przejścia kontroli z trybu manualnego do autonomicznego

Pod pojęciem komfortu przejścia z jazdy w trybie manualnym do trybu autonomicznego kierowcy rozumieli, m.in. wygodę i intuicyjność użycia konsoli ADS. Uwagę zwracano na cechy budowy samej konsoli m.in. umiejscowienie konsoli, kolor, fakturę, wielkość przycisków, intensywność świecenia diod oraz ich rozmieszczenie, a także na łatwość obsługi czy intuicyjne używanie przycisków. Przekazanie kontroli sterowania i przełączenie do trybu autonomicznego kierowcy wykonywali po ominięciu niebezpiecznego odcinka drogi (np. wypadku drogowego). Uruchomienie trybu następowało po przyciśnięciu odpowiedniej kontrolki na konsoli ADS [92]. W ankiecie kierowcy ocenili komfort przejścia z trybu jazdy manualnej na jazdę autonomiczną, a otrzymane średnie wyniki przedstawiono na wykresach na rys. 4.8.



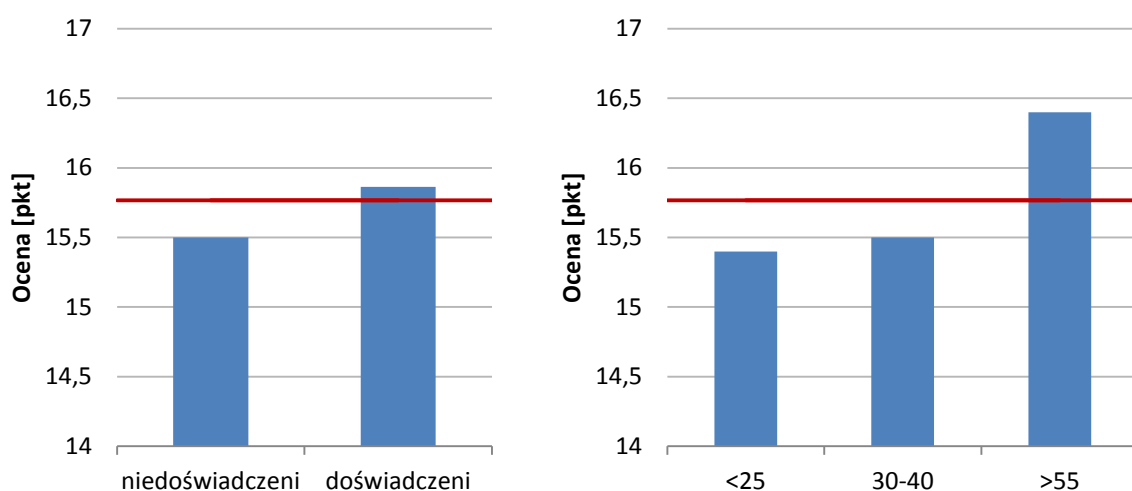
Rys. 4.8 Ocena komfortu przejścia kontroli z trybu manualnego do autonomicznego (podział kierowców ze względu na doświadczenie – po lewej; podział kierowców ze względu na wiek – po prawej)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [93]

Spośród wszystkich uczestników badania komfort przekazania kontroli pojazdowi najniżej został oceniony przez kierowców niedoświadczonych i przez osoby młode (kolejno 14,75 pkt., SD = 5,45; 14,3 pkt., SD = 5,8). Najbardziej komfortowo podczas tego procesu czuły się osoby aktywnie kierujące pojazdem od ponad 3 lat oraz osoby powyżej 55 roku życia (kolejno 15,27 pkt., SD = 5,2; 15,6 pkt., SD = 6). Niewiele niższy wynik uzyskały osoby w wieku pomiędzy 30 a 40 rokiem życia (15,5 pkt., SD = 3,58). Średnia spośród wszystkich osób badanych wyniosła 15,13 pkt. przy odchyleniu standardowym równym 5,32.

4.2.3. Subiektywna ocena poziomu bezpieczeństwa podczas jazdy autonomicznej

Podczas badań ankietowych uzyskano również wyniki dotyczące subiektywnej oceny poziomu bezpieczeństwa podczas jazdy w trybie autonomicznym [93]. Zgodnie z założeniami eksperyment odbywał się w symulowanych warunkach ruchu i obejmował jazdę autostradą. Osoby badane oceniały poziom bezpieczeństwa w 20-stopniowej skali. Średnie wyniki przedstawiono na rys. 4.9.



Rys. 4.9 Subiektywna ocena poziomu bezpieczeństwa podczas jazdy autonomicznej (podział kierowców ze względu na doświadczenie – po lewej; podział kierowców ze względu na wiek – po prawej)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [93]

Otrzymane wyniki wskazują na wyższy poziom poczucia bezpieczeństwa podczas jazdy autonomicznej w przypadku kierowców doświadczonych i osób powyżej 55 roku życia (kolejno 15,86 pkt., SD = 5,01; 16,4 pkt., SD = 4,45). Wyniki poniżej średniej, która wyniosła 15,77 pkt. (SD = 5,53) uzyskali kierowcy niedoświadczeni (15,5 pkt., SD = 6,48), kierowcy poniżej 25 roku życia (15,4 pkt., SD = 6,92) oraz osoby w wieku 30-40 lat (15,5 pkt., SD = 4,54).

4.3. Ocena poprawności przejęcia kontroli na podstawie modelu rozmytego

W celu weryfikacji modelu analizie poddano wyniki całej próby badawczej [55]. Wymiernym efektem działania modelu jest stopień „poprawności” przejmowania kontroli nad pojazdem. Z racji wykorzystania w modelowaniu logiki rozmytej, do jednoznacznego przyporządkowania wyników do grupy poprawnych lub nie, należy zastosować integrację z innymi metodami, które będą uzupełnieniem istniejącej metody [12][52][60][100][114].

Wyniki działania modelu dla całej grupy badawczej z wyszczególnieniem kolejnych sytuacji TOR (wymagających przejęcia kontroli nad pojazdem) przedstawiono w tabeli 4.4.

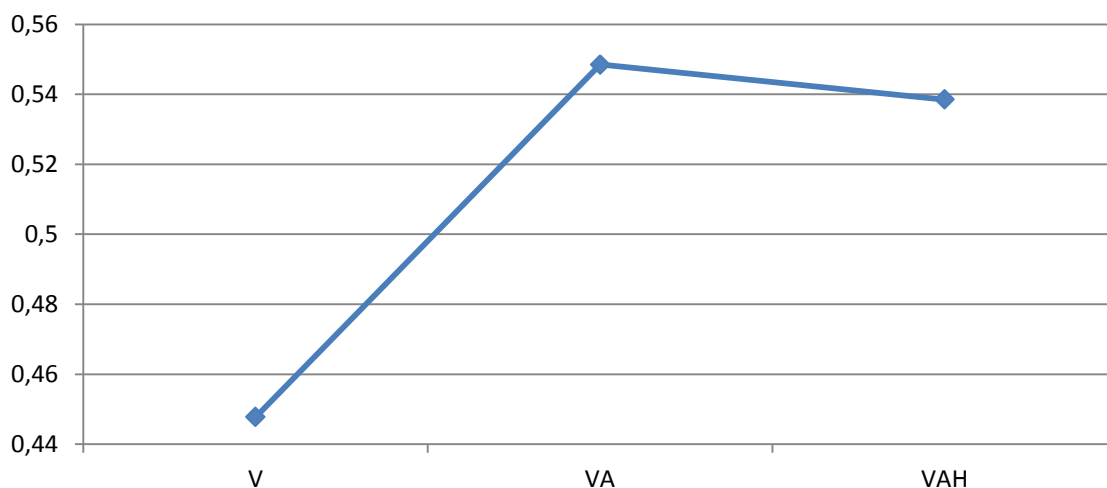
Tabela 4.4 Wyniki działania modelu dla grupy badawczej w kolejnych sytuacjach TOR (V – interfejs wizualny, VA – interfejs wizualny i dźwiękowy, VAH – interfejs wizualny, dźwiękowy i haptyczny)

Numer osoby badanej	Rodzaj interfejsu	TOR1	TOR2	TOR3	Średnia (wyjście z modelu)
1	VA	0,661	0,663	0,504	0,611
2	VA	0,489	0,475	0,478	0,481
3	VA	0,555	0,558	0,557	0,557
5	VAH	0,609	0,555	0,556	0,569
6	V	0,443	0,498	0,453	0,473
8	VA	0,465	0,534	0,475	0,499
9	VAH	0,511	0,615	0,617	0,571
10	VAH	0,422	0,452	0,54	0,468
11	VAH	0,625	0,629	0,635	0,627
12	VAH	0,610	0,620	0,634	0,619
14	V	0,382	0,461	0,419	0,398
16	V	0,443	0,435	0,440	0,439
17	V	0,452	0,462	0,514	0,476
18	VAH	0,605	0,455	0,518	0,521
19	VAH	0,502	0,487	0,541	0,502
20	VA	0,439	0,483	0,480	0,463
21	VA	0,656	0,655	0,656	0,656
22	V	0,205	0,296	0,460	0,275
23	VA	0,659	0,657	0,655	0,657

Numer osoby badanej	Rodzaj interfejsu	TOR1	TOR2	TOR3	Średnia (wyjście z modelu)
24	V	0,396	0,478	0,479	0,448
25	VA	0,441	0,445	0,470	0,453
26	V	0,468	0,466	0,525	0,471
27	VA	0,645	0,654	0,648	0,649
28	V	0,597	0,601	0,608	0,602
29	VA	0,472	0,443	0,442	0,459
30	VAH	0,419	0,438	0,435	0,431

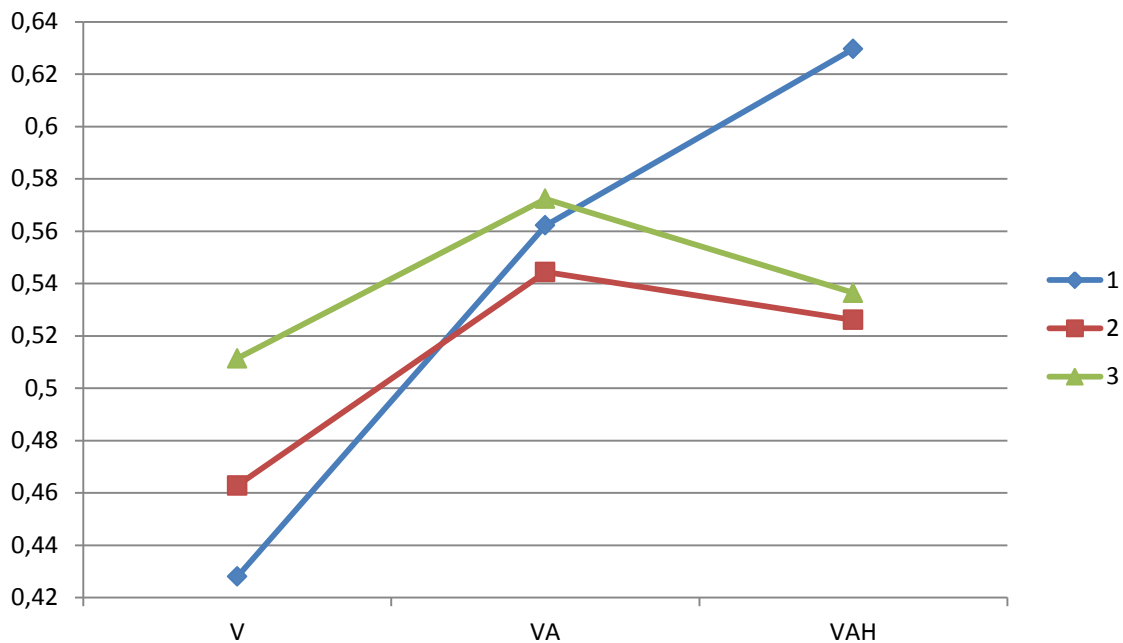
Źródło: opracowanie własne

Średnie wyniki działania modelu dla całej próby badawczej z podziałem na trzy rodzaje modalności (V – interfejs wizualny; VA – interfejs wizualny i dźwiękowy; VAH – interfejs wizualny, dźwiękowy i haptyczny) przedstawiono na rys. 4.10. Wykres na rys. 4.11 obrazuje zmianę średniego wyniku działania modelu dla trzech rodzajów modalności przy uwzględnieniu podziału na trzy grupy wiekowe: 1 – poniżej 25 roku życia; 2 – 30-40 lat; 3 – powyżej 55 roku życia, zaś na wykresie na rys. 4.12 przedstawiono zmianę średniego wyniku przy uwzględnieniu podziału grupy badanych na kobiety i mężczyzn.



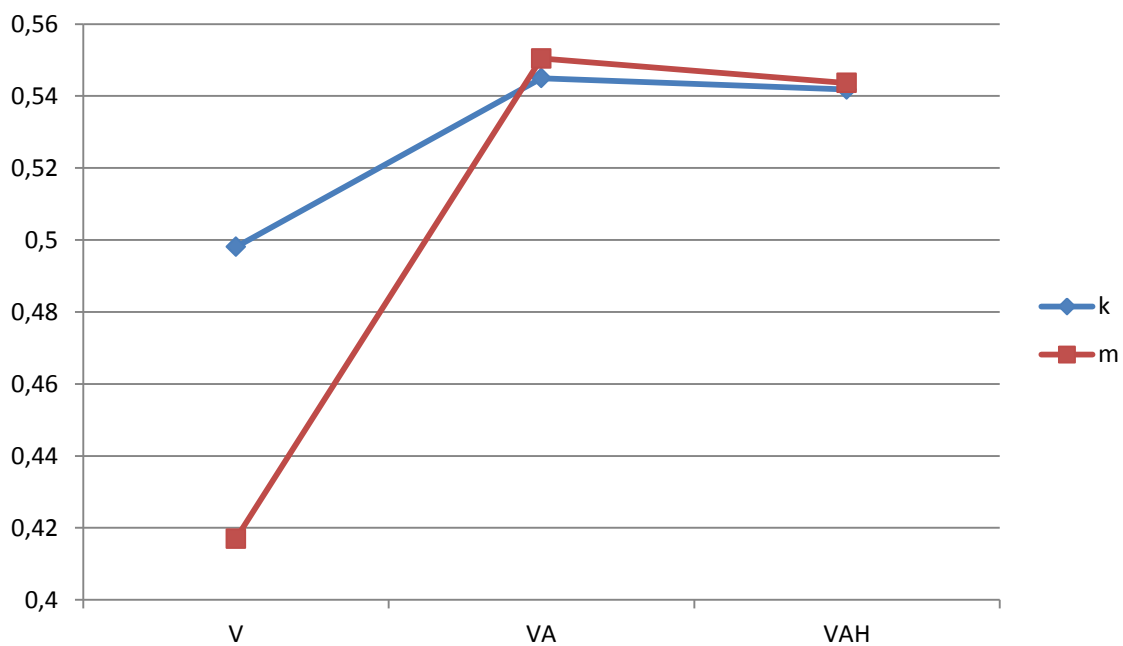
Rys. 4.10 Średnie wyniki działania modelu

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.11 Średnie wyniki działania modelu z podziałem na grupy wiekowe (1 – poniżej 25 r.ż.; 2 – 30-40 lat; 3 – powyżej 55 r.ż.)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.12 Średnie wyniki działania modelu z podziałem na płeć (k – kobiety; m – mężczyźni)

Źródło: opracowanie własne

We wszystkich grupach wiekowych najniższą poprawność uzyskano w przypadku modalności wizualnej. Zarówno w drugiej grupie wiekowej (30-40 lat), jak i w trzeciej

(>55 lat) najwyższą poprawność osiągnięto, wykorzystując połączenie modalności wizualnej i dźwiękowej. Z kolei w najmłodszej grupie wiekowej (<25 lat) najwyższy poziom poprawności uzyskano przy połączeniu sygnałów wizualnych, dźwiękowych i haptycznych. Zarówno wśród kobiet, jak i wśród mężczyzn najwyższą poprawność uzyskano w przypadku połączenia modalności wizualnej i dźwiękowej. Dodanie wibracji fotela nieznacznie obniżyło poziom poprawności w obu tych grupach. Jednak największą różnicę osiągnięto w przypadku interfejsu wizualnego – średni wynik wśród kobiet to 0,498, zaś wśród mężczyzn to 0,417. Wskazuje to na wyższy poziom uważności kobiet podczas jazdy symulatorem oraz obserwowanie nie tylko drogi i otoczenia w środowisku symulacyjnym, ale także komunikatów na desce rozdzielczej wewnątrz pojazdu. Jednak ze względu na niewielką próbę badawczą wniosek ten może odnieść się jedynie do otrzymanych wyników w przedstawionym eksperymencie, a do jego potwierdzenia konieczne jest rozszerzenie badań na większą skalę.

W celu weryfikacji modelu wyznaczono wartość graniczną 0,469 pomiędzy poprawnym a niepoprawnym przebiegiem procesu przejmowania kontroli nad pojazdem z warunkową autonomizacją. Jej przekroczenie kwalifikowało daną próbkę do pozytywnej oceny poprawności. Wyniki poniżej określonego poziomu oznaczają niewystarczającą poprawność do prawidłowego przebiegu tego procesu. Przykładowe wartości parametrów wejściowych dające poprawność na poziomie wartości granicznej zestawiono w tabeli 4.5.

Tabela 4.5 Przykładowe wartości parametrów wejściowych dla wyjściowej wartości granicznej

Czas [s]	Ocena [pkt]	Poprawność
1,6	5	0,469 (wartość graniczna)
2,9	10	
3,65	12	
15,8	14	
19	15	
20	16-20	

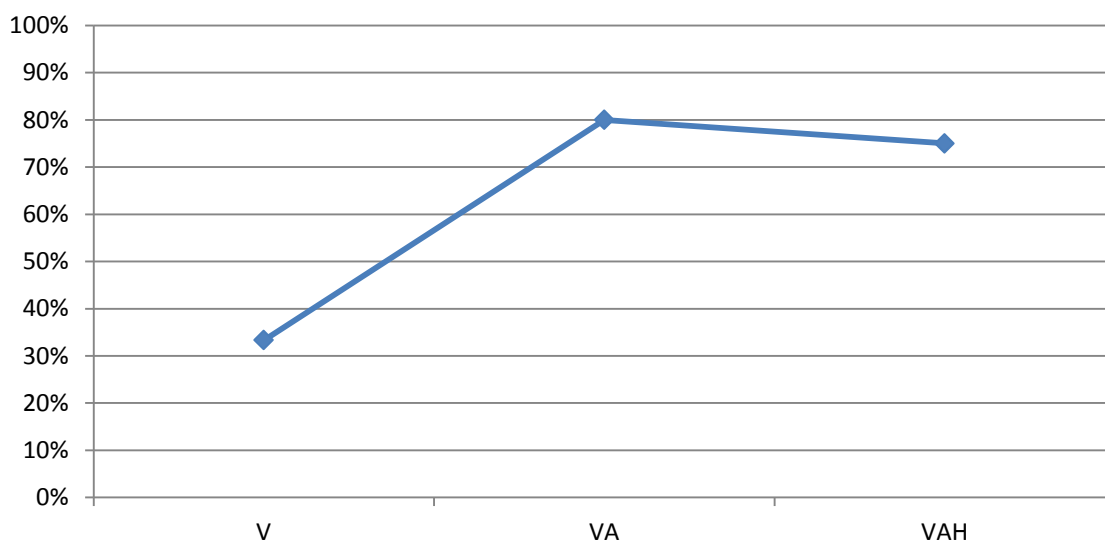
Źródło: opracowanie własne

Wyniki analizy działania modelu dla całej próby badawczej przedstawiono w tabeli 4.6 oraz na rys. 4.13. Najwyższą poprawność uzyskano dla interfejsu wizualno-dźwiękowego (80%), z kolei najniższą poprawnością charakteryzowało się wykorzystanie interfejsu wyłącznie wizualnego (33,3%). Średnie wyniki przedstawione na rys. 4.10 mają więc swoje odzwierciedlenie w wynikach z zastosowaniem granicznej wartości poprawności (rys. 4.13).

Tabela 4.6 Wyniki analizy działania modelu dla całej próby

	V	VA	VAH
Poprawnie	33,3%	80%	75%
Niepoprawnie	66,7%	20%	25%

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.13 Procentowy udział kierowców poprawnie wykonujących przejmowanie kontroli

Źródło: opracowanie własne

W tabelach 4.7, 4.8 oraz 4.9 przedstawiono procentowe wyniki analizy działania modelu z podziałem na kolejne grupy wiekowe. W tabelach określono odsetek próbek spełniających kryteria poprawnego i niepoprawnego procesu przejmowania kontroli wraz z wyszczególnieniem rodzajów interfejsów. Wyniki zobrazowano także na rys. 4.14.

Tabela 4.7 Wyniki analizy działania modelu dla grupy wiekowej do 25 roku życia

	V	VA	VAH
Poprawnie	33,3%	66,7%	100%
Niepoprawnie	66,7%	33,3%	0%

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.8 Wyniki analizy działania modelu dla grupy wiekowej 30 – 40 lat

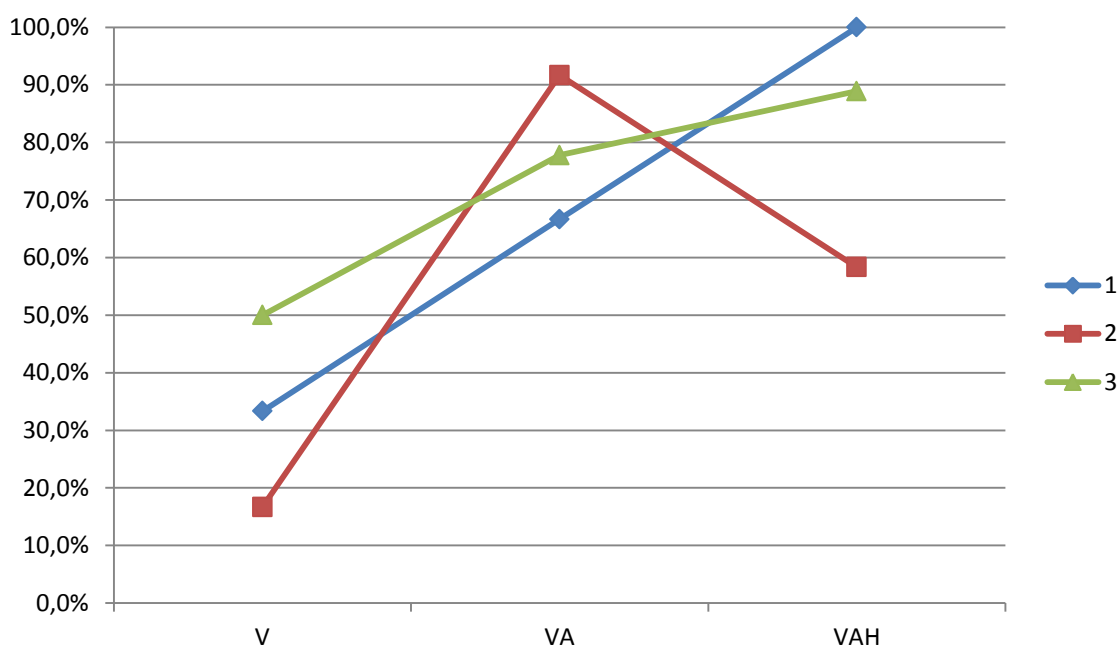
	V	VA	VAH
Poprawnie	16,7%	91,7%	58,3%
Niepoprawnie	88,3%	8,3%	41,7%

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.9 Wyniki analizy działania modelu dla grupy wiekowej powyżej 55 roku życia

	V	VA	VAH
Poprawnie	50%	77,8%	88,9%
Niepoprawnie	50%	22,2%	11,1%

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.14 Procentowy udział kierowców poprawnie wykonujących przejmowanie kontroli z podziałem na grupy wiekowe

Źródło: opracowanie własne

W najmłodszej grupie wiekowej najskuteczniejszym rodzajem interfejsu informującego o konieczności przejścia kontroli okazał się interfejs wykorzystujący 3 modalności: wizualną, dźwiękową i haptyczną. W tym warunku badawczym kierujący osiągnęli stuprocentową poprawność. Najniższą poprawność osiągnęła grupa kierowców w wieku 30-40 lat w przypadku wykorzystania interfejsu wizualnego (16,7%).

Tabela 4.10 Wyniki analizy działania modelu dla grupy kobiet

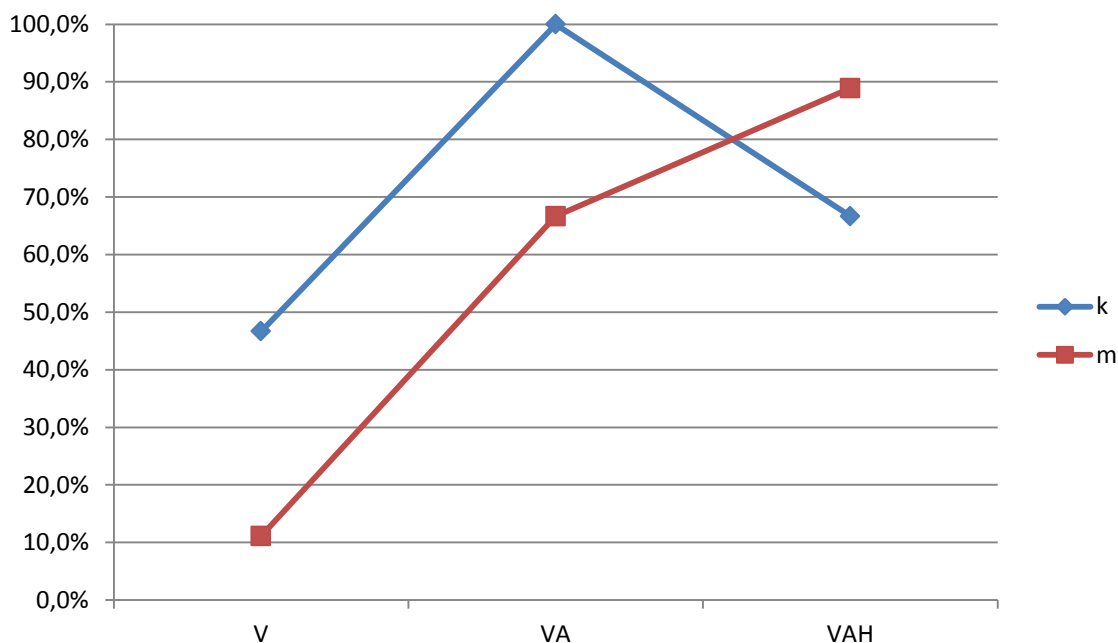
	V	VA	VAH
Poprawnie	46,7%	100%	66,7%
Niepoprawnie	53,3%	0%	33,3%

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.11 Wyniki analizy działania modelu dla grupy mężczyzn

	V	VA	VAH
Poprawnie	11,1%	66,7%	88,9%
Niepoprawnie	88,9%	33,3%	11,1%

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.15 Procentowy udział kierowców poprawnie wykonujących przejmowanie kontroli z podziałem na płeć

Źródło: opracowanie własne

Wyniki przeanalizowano także w grupie kobiet i mężczyzn, co przedstawiono w tabeli 4.10 i 4.11 oraz na rys. 4.15. Wśród kobiet najwyższą poprawność (100%) osiągnięto dla interfejsu wizualno-dźwiękowego, zaś w grupie mężczyzn dla interfejsu wizualno-dźwiękowo-haptycznego (88,9%). Najniższą poprawność wśród kobiet i mężczyzn osiągnięto dla interfejsu wizualnego (kolejno 46,7% i 11,1%).

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej dysertacji zbadano proces przejęcia kontroli przez kierowcę w pojazdach z warunkową autonomizacją (na poziomie L3). Na podstawie przeglądu literatury zagadnienie to uznano za jeden z podstawowych problemów skutecznego i bezpiecznego wdrażania tego rodzaju pojazdów.

Celem naukowym dysertacji było zbadanie wpływu czynników zewnętrznych na zadanie przejęcia kontroli przez kierowcę w przypadku konieczności wyłączenia systemu autonomizującego proces jazdy oraz opracowanie metody oceny poprawności wykonania czynności z tym związanych.

Obszerna i krytyczna analiza literatury w zakresie systemów autonomizujących kierowanie pojazdem pozwoliła zobrazować problem, który dotyczy samego procesu transferu kontroli w pojazdach tego typu. W ramach prac nad rozprawą przeanalizowano także literaturę w zakresie roli czynnika ludzkiego oraz roli i rodzajów bodźców w procesie przejmowania kontroli. Szczególną uwagę poświęcono pozycjom literatury dotyczącym różnic pomiędzy wpływem zastosowania poszczególnych modalności sygnałów na czas reakcji kierowców. Analiza literatury pozwoliła na opracowanie procedury badań własnych przeprowadzonych w ramach rozprawy oraz pozyskanych parametrów poddanych analizie na potrzeby opracowania modelu.

W utylitarnej części dysertacji przeprowadzono analizę otrzymanych wyników badań, a także zaprezentowano autorski model wykorzystujący teorię logiki rozmytej do określenia poprawności procesu przejmowania kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją. W modelu zaimplementowano metodę oceny poprawności tego procesu, wykorzystując ocenę poczucia komfortu oraz czas trwania transferu kontroli. Zastosowanie metody heurystycznej w postaci logiki rozmytej pozwoliło na kompleksowe podejście do poruszanego tematu i optymalne wykorzystanie ograniczonej wielkości zbioru danych. Logika rozmyta okazała się być właściwą i skuteczną teorią do analizy problemu i do opracowania metody, w której brano pod uwagę nie tylko parametry obiektywne tj. czas przejęcia kontroli, ale także poczucie komfortu podczas tego procesu.

Zarówno przeprowadzone badania, jak i utworzony model są podstawą do wysunięcia następujących wniosków, które dotyczą aspektów nie tylko teoretycznych, ale także utylitarnych w aspekcie transferu kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją:

- a) Otrzymane wyniki badań poszerzyły dotychczasowy stan wiedzy w aspekcie bezpiecznego sposobu realizacji przejęcia kontroli przez kierowcę w pojazdach

z warunkową autonomizacją. W dysertacji wskazano m.in. czas niezbędny do poprawnego przejęcia kontroli nad pojazdem w sytuacji tego wymagającej. Wiedza ta może posłużyć do wdrożenia odpowiednich systemów w nowopowstających zautonomizowanych pojazdach.

- b) W części praktycznej wskazano także najefektywniejszy sposób informowania kierowców o konieczności przejęcia kontroli za pomocą dedykowanych interfejsów wykorzystujących konkretne modalności. Wykazano również różnice pomiędzy odbiorem informacji z interfejsów o różnej modalności w poszczególnych grupach wiekowych oraz wśród kobiet i mężczyzn.
- c) Rezultaty dysertacji skierowane są przede wszystkim do przedstawicieli przemysłu motoryzacyjnego w tym producentów pojazdów, w których przewidziano wykorzystanie technologii opartych na systemach autonomizujących jazdę. Implementacja opracowanej metody w postaci modelu może zostać wykorzystana do projektowania interfejsów HMI w pojazdach z warunkową autonomizacją. Utworzony model po zaimplementowaniu może stanowić zarówno samodzielny system, jak również być częścią składową większego systemu, w którym zostaną uwzględnione dodatkowe czynniki, które zostały pominięte w rozprawie (np. parametry pojazdu).
- d) Efekty rozprawy rozszerzyły dotychczasowy stan wiedzy, a realizacja pracy przyczyniła się do rozwoju stanu zagadnienia związanego z transferem kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją. Otrzymane wyniki badań pozwoliły zrozumieć rolę czynnika ludzkiego w transferze kontroli oraz umożliwiły opracowanie metody oceny tego procesu. Jednocześnie stały się punktem wyjścia do kontynuowania badań, mających na celu analizę innych cech czynnika ludzkiego w aspekcie ich wpływu na czas transferu kontroli, których ze względu na brak obecnie wystarczającej wiedzy nie udało się zrealizować w przedstawionych badaniach. Poznanie ich wpływu pozwoli na rozszerzenie metody oceny poprawności o dodatkowe parametry.
- e) Utworzony model ma charakter uniwersalny, co świadczy o możliwości praktycznego wykorzystania go wśród całej populacji kierowców.
- f) Teza dysertacji: „Badania na symulatorze jazdy oraz metody statystyczne i heurystyczne wykorzystujące dane eksperymentalne mogą być narzędziem do badania i oceny poprawności przejęcia kontroli przez kierowcę w pojazdach z warunkową autonomizacją (na poziomie L3)” została udowodniona.

Podsumowanie obszernej analizy istniejącej literatury oraz otrzymane wyniki i wnioski wskazują na możliwość i konieczność realizacji dalszych badań w podjętej tematyce. Wprowadzenie do scenariusza większej różnorodności sytuacji drogowych oraz zmiennej charakterystyki otoczenia drogi umożliwi adaptację modelu i wykorzystanie go w szerszym spektrum. Pozwoli to na kontynuowanie badań w zakresie procesu przejmowania kontroli w pojazdach z warunkową autonomizacją. Innym kierunkiem badań uzupełniających może być analiza czynników bezpośrednio wpływających na czas przejmowania kontroli nad pojazdem. Rozszerzenie zaproponowanego modelu czasu o dodatkowe zmienne wejściowe umożliwi wskazanie czynników mających pośredni wpływ na poprawność transferu kontroli. W dalszych badaniach w szczególności należałoby uwzględnić inne niebezpieczne sytuacje drogowe, które wymagają nagłego przejścia przez kierowcę kontroli nad pojazdem np. wystąpienie oznakowania eksperymentalnego, wjechanie w gęstą mgłę. Różnorodność scenariuszy umożliwi dostosowanie zaimplementowanego modelu do realnych warunków drogowych, jednocześnie pozwalając na jego walidację. Przeprowadzenie rozszerzonych badań na większej grupie kierowców z wykorzystaniem dodatkowych parametrów oceny (np. utrzymaniem pozycji w pasie ruchu, drobnymi korektami ruchu kołem kierownicy) umożliwi utworzenie submodelu, który stanowić może dodatkowe wejście do głównego modelu. Stanowić to będzie uzupełnienie istniejącej metody oceny poprawności przejmowania kontroli. Dalszym etapem badań powinno być także wprowadzenie dodatkowego zadania niezwiązanego z kierowaniem pojazdem np. pisania wiadomości tekstowych na telefonie, ustawiania nawigacji czy wybierania stacji radiowej, co pozwoliłoby uwzględnić rozproszenie uwagi kierowcy, mogące mieć wpływ na poprawność przejmowania kontroli nad kierowanym pojazdem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Banks V. A., Stanton N. A.: Keep the driver in control: Automating automobiles of the future. *Applied Ergonomics*, 53, pp. 389-395, 2016.
- [2] Baudin M.: Working with machines: the nuts and bolts of lean operations with Jidoka. Productivity Press, pp. 250-255, 2007.
- [3] Beede K. E., Kass S. J.: Engrossed in conversation: The impact of cell phones on simulated driving performance. *Accident Analysis and Prevention*, 38, pp. 415-421, 2006.
- [4] Bella F.: Driving simulator for speed research on two-lane rural roads. *Accident Analysis and Prevention*, 40, pp. 1078-1087, 2008.
- [5] Bella F.: Driving simulator validation for work-zone design. *Transportation Research Record*, 1937, pp. 136-144, 2005.
- [6] Bella F., Garcia A., Solves F., Romero M. A.: Driving simulator validation for deceleration lane design (CD-ROM). *Proceedings of the 87th Annual Meeting Of The Transportation Research Board*, Washington, D.C., USA, 2007.
- [7] Bella F.: Operating speed predicting models on two-lane rural roads from driving simulation. In: *Proceedings of the 84th Annual Meeting Transportation Research Record*, Washington, 2005.
- [8] Bella F.: Parameters for evaluating speed differential: contribution using driving simulator. *Transportation Research Board*, 2023, pp. 37-43, 2007.
- [9] Bella F.: Safety in work zones: experiences with driving simulator. In: *Proceedings of the Annual Meeting and Exhibit, Institute of Transportation Engineers*, Lake Buena Vista, FL, USA, 2004.
- [10] Bella, F.: Validation of a driving simulator for work zone design. *Transportation Research Board*, 1937, pp. 136-144, 2005.
- [11] Blanco M., Atwood J., Vasquez H. M., Trimble T. E., Fitchett V. L., Radlbeck J., Morgan J. F.: Human factors evaluation of level 2 and level 3 automated driving concepts. Report No. DOT HS 812 182. DC: National Highway Traffic Safety Administration. Washington, 2015.
- [12] Bolc L., Cytowski J.: *Metody przeszukiwania heurystycznego*, t. 1, 2, PWN, Warszawa, 1989, 1991.
- [13] Brooks J. O., Goodenougha R. R., Crisler M. C., Kleina N. D., Alleya R. L., Koon B. L., Logan W. C., Ogleb J. H., Tyrrell R. A., Willsa R. S.: Simulator sickness

- during driving simulation studies. *Accident Analysis and Prevention*, 42, pp. 788-796, 2010.
- [14] Broughton K. L., Switzer F., Scott D.: Car following decisions under three visibility conditions and two speeds tested with a driving simulator. *Accident Analysis and Prevention*, 39, pp. 106-116, 2007.
- [15] Caird J., Rizzo M., Hancock P.: Critical issues in driving simulation methods and measures. *Proceedings Of The Human Factors And Ergonomics Society 48th Annual Meeting, Surface Transportation*, Ed. Human Factors and Ergonomics Society, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 2252-2255, 2004.
- [16] Cao Y., Mahr A., Castronovo S., Muller C.: On timing and modality choice with local danger warnings for drivers. *1st Intern. Conf. On Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (Automotive UI 2009)*, Essen. ACM Press, pp. 75-78, 2009.
- [17] Cao Y., Mahr A., Castronovo S., Theune M., Stahl C., Müller C.: Local danger warning for drivers: the effect of modality and level of assistance on driver reaction. In the *Proceedings of the 15th International Conference on Intelligent User Interfaces*, Hong Kong, China, 2010.
- [18] Carsten O., Lai F. C. H., Barnard Y., Jamson A. H., Merat N.: Control task substitution in semi-automated driving: Does it matter what aspects are automated? *Human Factors*, 54, pp. 747-761, 2012.
- [19] Chapman P. R., Underwood G.: Visual search of driving situations: danger and experience. *Perception*, 27, pp. 951-964, 1998.
- [20] Choromański W., Grabarek I., Spirzewska A.: Systemy human machine interface (HMI) dedykowane samochodom poziomów L2/L3. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - Transport*, Oficyna Wydawnicza PW, 115, pp. 35-45, 2017.
- [21] Cobb S., Nichols S., Ramsey A., Wilson J.: Virtual reality-induced symptoms and effects (VRISE). *Presence*, 8 (2), pp. 169-186, 1999.
- [22] Cunha J.C., Iacono D., Rossi F.: Towards Certification of Automotive Software, Cristiana Areias, 2014 *IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops*, pp. 491-496, 2014.
- [23] Dingus T. A., Klauer S. G., Neale V. L., Petersen A., Lee S. E., Sudweeks J., Perez M. A., Hankey J., Ramsey D., Gupta S., Bucher C., Doerzaph Z. R., Jermeland J., Knipling R. R.: The 100-Car Naturalistic Driving Study. Phase II-

- Results of the 100-Car Field. Experiment., Technical Report, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2006.
- [24] Dingus T.A., McGehee D. V., Manakkal N., Jahns S. K., Carney C., Hankey J. M.: Human factors field evaluation of automotive headway maintenance/collision warning devices. *Human Factors*, 39 (2), pp. 216-229, 1997.
- [25] Easa S.M., He W.: Modeling driver visual demand on three-dimensional highway alignments, *J. Transport. Eng.*, 132 (5), pp. 357-365, 2006.
- [26] Endsley M., Kaber D.: Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42 (3), pp. 462-492, 1999.
- [27] Endsley M. R., Kiris E. O.: The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation, *Human Factors*, 37, pp. 381-394, 1995.
- [28] Enquist J., Rudin-Brown C. M., Lenne M. G.: The effects of on-street parking and road environment Visual complexity on Ravel Speer and re action time. *Accident Analysis and Prevention*, 45, 2012.
- [29] Esser M.: Automated Driving. Prezentacja wygłoszona podczas spotkania: OICA 5th meeting of the Informal Working Group on ITS/Automated Driving. Submitted by the experts of OICA, Berlin, 2015.
- [30] Fujishiro R., Takahashi H.: Research on driver acceptance of LDA system, *ESV 2015 proceedings*, Gotheburg, Sweden, 2015.
- [31] Funkhouser D., Sayer J.: Naturalistic census of cell phone use. Paper presented at the Proceedings of the 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2012.
- [32] Gielen S. C., Schmidt R. A., Van den Heuvel P. J.: On the nature of intersensory facilitation of reaction time. *Perception & Psychophysics*, 34, pp. 161-168, 1983.
- [33] Gietelink O., Ploeg J., De Schutter B., Verhaegen M.: Development of advanced driver assistance systems with vehicle hardware-in-the-loop simulations. *Vehicle System Dynamics*, 44 (7), pp. 569-590, 2006.
- [34] Gish K., Staplin L., Stewart J., Perel M.: Sensory and cognitive factors affecting automotive head-up display effectiveness. *Journal of the Transportation Research Board*, 1694, pp. 10-19, 1999.
- [35] Godley S. T., Fildes B. N., Triggs T. J., Brown L. J.: *Perceptual Countermeasures: Experimental Research (Report CR 182)*. Australian Transport Safety Bureau (ATSB), Canberra, Australia, 1999.

- [36] Grabarek I.: Projektowanie ergonomiczne środków transport miejskiego, 2017.
- [37] Grey R.: Looming Auditory Collision Warnings for Driving. *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53 (1), pp. 63-74, 2011.
- [38] Grover C., Avery M., Knight I.: The development of a consumer test procedure for pedestrian sensitive AEB, *ESV 2015 Proceedings*, Gotheburg, Sweden, 2015.
- [39] Gschwendtner K., Kiss M., Feig P., Lienkamp M.: Prospective estimation of the effectiveness of driver assistance systems in property damage accidents, *ESV 2015 Proceedings*, Gotheburg, Sweden, 2015.
- [40] Harms L.: Driving performance on a real road and in a driving simulator: results of a validations study, *Vis. Vehicles V*, 1994.
- [41] Hart S. G., Staveland L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research. In: Hancock P. A., Meshkati N.: *Human Mental Workload*, Elsevier Science, Amsterdam, 1988.
- [42] Higashimata A., Adachi K., Hashizume T., Tange S.: Design of a headway distance control system for ACC, *JSAE Review* 22, pp. 15-22, 2001.
- [43] Ho C., Spence C., Tan H. Z.: Warning signals go multisensory. In: *Proceedings of HCI International 2005*, 2284, pp. 1-10, 2005.
- [44] Hoeger R., Kunert M., Hoess A.: Highly automated vehicles for intelligent transport, 7th Framework programme ICT-2007.6.1, *ICT for intelligent vehicles and mobility services*. Grant agreement no.: 212154 - Final report, 2007.
- [45] Horrey W. J., Wickens C. D.: Driving and side task performance: The effects of display clutter, separation, and modality, *Human Factors*, 46, pp. 611-624, 2002.
- [46] Huang Y. C., Tsai C. J., Kuo J. Y., Wu F. G.: The comparison of different sensory outputs on the driving overtake alarm system. *Universal Access in Human-Computer Interaction. Context Diversity*, pp. 290-297, 2011.
- [47] Instytut Transportu Samochodowego, Regulamin korzystania z symulatora z załącznikami, dokument wewnętrzny Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie, 2020.
- [48] Isaksson-Hellman I., Lindman M.: Real-world performance of city safety based on Swedish Insurance Data, *ESV 2015 Proceedings*, Gotheburg, Sweden, 2015.
- [49] ISO 5725-5: Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów - Część 5: Alternatywne metody wyznaczania precyzji standardowej metody pomiarowej, 2002.

- [50] ISO/TR 21959-1:2018 (E): Road vehicles-Human performance and state in the context of automated driving - Part 1: Common underlying concepts, Switzerland, 2018.
- [51] Juchem R., Knorr B.: Complete Automotive Electrical System Design, Vehicular Technology Conference 2003, IEEE, 58, pp. 3262-3266, 2003.
- [52] Kacprzyk J.: Wieloetapowe sterowanie rozmyte, WNT, Warszawa, 2001.
- [53] Kaptein N. A., Theeuwes J., Van Der Horst R.: Driving simulator validity: some considerations. *Transport. Res. Rec. J. Transport. Res. Board*, 1550, pp. 30-36, 1996.
- [54] Kaptein N. A., Theeuwes J., van der Horst A. R. A., Van Velze R.: Behavioural evaluation of tunnel design characteristics. *Proceedings of driving simulator conference*, Sophia Antipolis, France, pp. 409-420, 1995.
- [55] Karkula M.: Weryfikacja i walidacja dynamicznych modeli symulacyjnych procesów logistycznych, *Logistyka*, 2, pp. 717-726, 2012.
- [56] Keith K., Trentacoste M., Depue L., Granda T., Huckaby E., Ibarguen B., Kantowitz B., Lum W., Wilson T.: Roadway human factors and behavioral safety in Europe. Report No.: FHWA-PL-05-005, 2005.
- [57] Kennedy R. S., Lane N. E., Berbaum K. S., Lilienthal M. G.: A simulator sickness questionnaire (SSQ): A new method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3 (3), pp. 203-220, 1993.
- [58] Kibbe M., Mcdowell E. D.: Operator decision making: information on demand. In: Fuller R., Johnston N., McDonald N. (eds.): *Human Factors in Aviation Operations* (Aldershot: Avebury, Aviation, Ashgate Publishing), 43, 1995.
- [59] Kruszewski M., Razin P., Niezgoda M., Smoczyńska E., Kamiński T.: Analiza efektów oddziaływania symulatora na powstawanie choroby symulatorowej w badaniach kierowców, *Systemy Logistyczne Wojsk*, 44, Warszawa, pp. 188-201, 2016.
- [60] Krzyśko M., Wołyński W., Górecki T., Skorzybut M.: *Systemy uczące się. Rozpoznawanie wzorców, analiza skupień i redukcja wymiarowości*, wyd. I, WNT, Warszawa, 2008.
- [61] Labiale G.: In-car road information: Comparisons of auditory and visual presentations. In *Proceedings Human Factors and Ergonomics Society 34th Annual Meeting*, 34, pp. 623-627, 1990.
- [62] Lattke B., Eckert A., Feifel H., Fröhlich D., McClain J., Adireddy G., Janda F., Fuchs E.: Road departure protection-a means of increasing driving safety beyond road limits, *ESV 2015 Proceedings*, Gotheburg, Sweden, 2015.

- [63] Lee J. D., Gore B. F., Campbell J. L.: Display alternatives for in-vehicle warning and sign information: Message style, location, and modality. *Transportation Human Factors*, 1 (4), pp. 347-375, 1999.
- [64] Lee J. D., McGehee D. V., Brown T. L., Marshall D.: Effects Of Adaptive Cruise Control And Alert Modality On Driver Performance, *Transportation Research Record*, 1980 (1), pp. 49-56, 2006.
- [65] Lee Y., Yi K., Yoo H., Chong H., Ko B.: Risk management algorithm for rear-side collision avoidance using a combined steering torque overlay and differential braking, *Vehicle System Dynamics*, 53 (6), pp. 812-832, 2015.
- [66] Liu Y. C.: Comparative Study of Effects of Auditory, Visual and Multimodality Displays on Drivers' Performance in Advanced Traveller Information Systems. *Ergonomics*, 44 (4), pp. 425-442, 2001.
- [67] Liu Y. C.: Effect of advanced traveler information system displays on younger and older drivers' performance. *Displays*, 21, pp. 161-168, 2000.
- [68] Lozia Z.: Praktyczne zastosowania symulatorów jazdy samochodem. *Postępy nauki i techniki*, 14, pp. 148-156, 2012.
- [69] Ma R., Kaber D. B.: Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35 (10), pp. 939-953, 2005.
- [70] Maculewicz J., Larsson P., Fagerlönn J.: Intuitive and subtle motion-anticipatory auditory cues reduce motion sickness in self-driving cars, *International Journal of Human Factors and Ergonomics*, 8 (4), pp 370-392, 2021.
- [71] Maggi D., Romano R., Carsten O.: Handing control back to drivers: Exploring the effects of handover procedure during transitions from Highly Automated Driving, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 84, pp. 9-20, 2022.
- [72] Maltz M., Shinar D.: Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid drivers. *Human Factors*, 46 (2), pp. 357-366, 2004.
- [73] Matthews G., Sparkes T., Bygrave H.: Attentional overload, stress, and simulated driving performance. *Human Performance*, 9 (1), pp. 77-101, 1996.
- [74] Matysiak A., Razin P.: Analysis of the advancements in real-life performance of highly automated vehicles' with regard to the road traffic safety, *MATEC Web of Conferences*, 2018.

- [75] McAvoy D. S., Schattler K. L., Datta T. K.: Driving simulator validation for nighttime construction work zone devices. In: Proceedings of the 86th Annual Meeting Transportation Research Record, Washington, January, 2007.
- [76] Merat N., Jamson H.: How do drivers behave in a highly automated car? Proceedings of the Fifth International Driving Symposium on Human Factor in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Montana, USA, 2009.
- [77] Merat N., Jamson H., Lai F., Daly M., Carsten O.: Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, pp. 274-282, 2014.
- [78] Meskali M., Hirt S., Aillerie I., Gineyt G., Louveton N., Berthelon C.: Effect of moderated doses of alcohol on behavior of drivers confronted to simulated scenarios of accident. *Advances in Transportation Studies an International Journal, Section B*, 25, pp. 91-96, 2005.
- [79] Misiurek B.: Metodyka standaryzacji autonomicznych procesów eksploatacyjnych zorientowana na poprawę efektywności maszyn zautomatyzowanych, praca doktorska, Politechnika Wrocławska, pp. 35-37, 2015.
- [80] Mohebbi R., Gray R., Tan H. Z.: Driver Reaction Time to Tactile and Auditory Rear-End Collision Warnings While Talking on a Cell Phone. *Human Factors*, 51, pp. 102-110, 2009.
- [81] Mollenhauer M., Lee J., Cho K., Hulse M., Dingus T.: The effects of sensory modality and information priority on in-vehicle signing and information systems. *Proceedings of Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 38, pp. 1072-1076, 1994.
- [82] Ng A. W. Y., Chan A. H. S.: Finger Response Times to Visual, Auditory and Tactile Modality Stimuli. *IMECS 2012, Hong Kong*, 2012.
- [83] Niezgoda M., Tarnowski A., Kruszewski M., Kamiński T.: Towards testing auditory-vocal interfaces and detecting distraction while driving: A comparison of eye-movement measures in the assessment of cognitive workload. *Transportation Research Part F*, 32, pp. 23-34, 2015.
- [84] Norman D. A.: The 'Problem' with Automation: Inappropriate Feedback and Interaction, no 'Over-automation'. In: Broadbent D. E., Reason J., Baddeley A. (eds.): *Human Factors in Hazardous Situations*, Oxford Science Publications, Oxford, 1989.
- [85] Noyce D. A., Smith C. R.: Driving simulators for evaluation of novel traffic-control devices. *Transport. Res. Rec. J. Transport. Res. Board*, 1844, pp. 25-34, 2003.
- [86] OECD/ITF Road Safety Annual Report 2016. OECD Publishing Paris, 2016.

- [87] Parasuraman R., Molloy R., Singh I. L.: Performance consequences of automation-induced 'complacency', *International Journal of Aviation Psychology*, 3, pp. 1-23, 1993.
- [88] Parasuraman R., Riley V.: Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, 39 (2), pp. 230-253, 1997.
- [89] Philip P., Sagaspe P., Taillard J., Valtat C., Moore N., Akerstedt T.: Fatigue, sleepiness and performance in simulated versus real driving conditions. *Sleep*, 28, pp. 1511-1516, 2005.
- [90] Ploeg J., Scheepers B., van Nunen E., van de Wouw N., Nijmeijer H.: Design and Experimental Evaluation of Cooperative Adaptive Cruise Control, 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Washington, USA, pp. 260-265, 2011.
- [91] Ranney T., Harbluk J., Noy Y.: Effects of voice technology on test track driving performance: Implications for driver distraction. *Human Factors*, 47 (2), pp. 439-454, 2005.
- [92] Razin P., Grabarek I.: Koncepcja oceny przejęcia kontroli sterowania przez kierowcę w pojazdach z warunkową autonomizacją, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - Transport*, 121, pp. 319-327, 2018.
- [93] Razin P., Grabarek I.: Subjective assessment of the process of taking over vehicle control with conditional autonomy. In: *Research Methods and Solutions to Current Transport Problems*, pp. 374-380, 2020.
- [94] Razin P., Matysiak A., Kruszewski M., Niezgoda M.: The impact of the interfaces of the driving automation system on a driver with regard to road traffic safety. *MATEC Web of Conferences*, 2018.
- [95] Richards D., Stedmon A.: To delegate or not delegate: a review of control frameworks for autonomous car. *Applied Ergonomics*, 53, pp. 383-386, 2016.
- [96] Rizzo M., Sheffield R. A., Stierman L., Dawson J.: Demographic and driving performance factors in simulator adaptation syndrome. *Proceedings of the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 2003.
- [97] Rodway P.: The modality shift effect and the effectiveness of warning signals in different modalities. *Acta Psychologica*, 120, pp. 199-226, 2005.

- [98] Rosey F., Auberlet J.: Driving simulator configuration impacts drivers' behavior and control performance: An example with studies of a rural intersection. *Transportation Research Part F*, 27, pp. 99-111, 2014.
- [99] Rudin-Brown C. M., Parker H.: Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7, pp. 59-76, 2004.
- [100] Rutkowski L.: *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, PWN, Warszawa, 2006.
- [101] SAE International, *Surface vehicle recommended practice, J3016, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, pp. 17, 2016.
- [102] Schwalk M., Kalogerakis N., Maier T.: Driver support by a vibrotactile seat matrix – Recognition adequacy and workload of tactile patterns in take-over scenarios during automated driving, *Proc. 6th Int. Conf. AHFE*, pp. 1427-1434, 2015.
- [103] Scott J.J., Gray R.: A comparison of tactile, visual, and auditory warnings for rear-end collision prevention in simulated driving. *Human Factors*, 50 (2), pp. 264-275, 2008.
- [104] Selcon S. J.: Decision support in the cockpit: probably a good thing? In: *Proceedings of the Human Factors Society 34th Annual Meeting*, Santa Monica, CA: Human Factors Society, pp. 46-50, 1990.
- [105] Seppelt B., Wickens C. D.: In-vehicle tasks: Effects of modality, driving relevance, and redundancy. *Technical Report AHFD-03-16/GM-03-2*, GM Corp, 2003.
- [106] Sodnik J., Dicke C., Tomažič S., Billingham M.: A user study of auditory versus visual interfaces for use while driving. *Int. Journal of Human-Comput. Stud.*, 66 (5), pp. 318-332, 2008.
- [107] Spence C., Nicholls M., Driver J.: The cost of expecting events in the wrong sensory modality. *Perception & Psychophysics*, 63, pp. 330-336, 2001.
- [108] Srinivasan R., Jovanis P.: Effect of selected in-vehicle route guidance systems on driver reaction times. *Human Factors*, 39 (2), pp. 200-215, 1997.
- [109] Stanton N. A., Marsden P.: From fly-by-wire to drive-by-wire: Safety implications of automation in vehicles. *Safety Science*, 24, pp. 35-49, 1996.
- [110] Stanton N. A., Salmon P. M.: Human error taxonomies applied to driving: A generic driver error taxonomy and its implications for intelligent transport systems. *Safety Science*, 47, pp. 227-237, 2009.
- [111] Stanton N. A., Young M. S.: *Vehicle Automation and Driving Performance*. *Ergonomics*, 41 (7), pp. 1014-1028, 1998.

- [112] Toffetti A., Wilschut E., Martens M. H., Schieben A., Rambaldini A., Merat N.: CITYMOBIL: Human factors issues regarding highly-automated vehicles on an eLane. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2110, pp. 1-8, 2009.
- [113] Tornos J.: Driving behaviour in a real and a simulated road-tunnel: a validation study. *Accident Analysis and Prevention*, 30 (4), pp. 497-503, 1998.
- [114] Trojanowski K.: *Metaheurystyki praktyczne*, WIT, Warszawa 2005.
- [115] Van der Horst R., de Ridder S.: The influence of roadside infrastructure on driving behavior: driving simulator study. In: *Proceedings of the 86th Annual Meeting Transportation Research Record*, Washington, 2007.
- [116] Venhovens P., Naab K., Adiprasito B.: Stop and Go Cruise Control, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress 2000, Seoul, Korea, 2000.
- [117] Walker J., Alicandri E., Sednew C., Roberts K.: In-vehicle navigation devices: Effects on the safety of driver performance. Washington, DC: Federal Highway Administration (FHWA-RD-90-053), 1990.
- [118] Warsza Z.: Zastosowanie statystycznych metod odpornościowych przy opracowaniu wyników porównań międzylaboratoryjnych. Referat z dn. 3.03.2017 w Głównym Urzędzie Miar, Warszawa, 2017.
- [119] Wickens C. D.: Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3 (2), pp.159-177, 2002.
- [120] Wongun K., Dongwook K., Kyongsu Y., Jin Kim H.: Development of a path-tracking control system based on model predictive control using infrastructure sensors. *Vehicle System Dynamics*, 50 (6), pp. 1001-1023, 2012.
- [121] Yan X., Abdel-Aty M., Radwan E., Wang X., Chilakapati P.: Validating a driving simulator using surrogate safety measures. *Accident Analysis and Prevention*, 40, pp. 274-288, 2008.
- [122] Yue Guo R., Jones P.: A Study of Approaches for Model Based Development of an Automotive Driver Information System, *IEEE SysCon 2009 – 3rd Annual IEEE International Systems Conference*, 2009.

WYKAZ SKRÓTÓW

Skrót	Rozwinięcie w języku angielskim	Rozwinięcie w języku polskim
ACC	Adaptive Cruise Control	adaptacyjny tempomat
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems	zaawansowany system wspomagania kierowcy
ADR	fr. Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route	umowa europejska dotycząca międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych
ADS	Automated Driving System	zautomatyzowany system jazdy
BAST	niem. Bundesanstalt für Straßenwesen	-
BRD	Road Traffic Safety	bezpieczeństwo ruchu drogowego
DDT	Dynamic Driving Task	dynamiczne zadanie prowadzenia pojazdu
EPS	Electronic Power Steering System	elektroniczny system wspomagania układu kierowniczego
ESC	Electronic Stability Control	elektroniczny układ stabilizacji toru jazdy
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme	-
HMI	Human-Machine Interface	interfejs człowiek-maszyna
L0-L5	Level 0 – Level 5	poziom 0 – poziom 5 (poziomy autonomizacji)
MSE	mean square error	błąd średniokwadratowy
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration	-
OEDR	Object and Event Detection and Response	detekcja obiektów i zdarzeń oraz reagowanie
OICA	fr. Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles	Międzynarodowa Organizacja Producentów Pojazdów Samochodowych
OOD	Operational Design Domain	zdefiniowane warunki użytkowania
PDT	Peripheral Detection Task	test detekcji peryferyjnej

Skrót	Rozwinięcie w języku angielskim	Rozwinięcie w języku polskim
RSSQ	Revised Simulator Sickness Questionnaire	poprawiony kwestionariusz choroby symulatorowej
RtI	Request to Intervene	znacznik czasowy
SAE	Society of Automotive Engineers	-
SSQ	Simulator Sickness Questionnaire	kwestionariusz choroby symulatorowej
TOR	Take over request	zadanie przejęcia kontroli
V2I	Vehicle-to-Infrastructure	komunikacja pojazd-infrastruktura
V2V	Vehicle-to-Vehicle	komunikacja pojazd-pojazd

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1 Kategoryzacja systemów autonomizujących jazdę (grupa C) wraz z „mapą czasową” badań w poszczególnych kategoriach	21
Rys. 2.2 Prognoza ewolucji systemów ADAS i ADS.....	21
Rys. 2.3 Poziom automatyzacji 0 (brak automatyzacji).....	24
Rys. 2.4 Zadania kierowcy i systemu na poziomie automatyzacji 1.....	25
Rys. 2.5 Zadania kierowcy i systemu na poziomie automatyzacji 2.....	25
Rys. 2.6 Zadania kierowcy i systemu na poziomie automatyzacji 3.....	26
Rys. 2.7 Zadania kierowcy i systemu na poziomie automatyzacji 4.....	26
Rys. 2.8 Zadania kierowcy i systemu na poziomie automatyzacji 5.....	27
Rys. 2.9 Czas reakcji na nieprzewidziane wydarzenia drogowe a modalność informacji.....	30
Rys. 2.10 Czas reakcji na nieprzewidziane wydarzenia drogowe a modalność bodźca i czas ostrzeżeń.....	31
Rys. 2.11 Liczba kolizji a modalność bodźca	31
Rys. 2.12 Prędkość kątowna kierownicy a modalność i złożoność komunikatu podczas odpowiedzi na komunikaty nie informujące o zdarzeniach niebezpiecznych	34
Rys. 2.13 Czas reakcji na wydarzenia krytyczne na drodze a modalność i istotność komunikatu.....	35
Rys. 2.14 Czas reakcji na zadanie dodatkowe a złożoność i modalność informacji.....	36
Rys. 2.15 Czas reakcji na niespodziewane zdarzenia drogowe a rodzaj wyświetlacza.....	39
Rys. 2.16 Modalność i typ komunikatu a reakcja kierowcy na zauważenie wiadomości.....	40
Rys. 2.17 Niebezpieczne zachowania kierowcy a modalność ostrzeżenia i pomoc systemu ..	42
Rys. 2.18 Odsetek poprawnych odpowiedzi w zadaniu dodatkowym a modalność ostrzeżenia	43
Rys. 2.19 Reakcje na nieistotne komunikaty (w procentach) a modalność ostrzeżenia	44
Rys. 2.20 Subiektywne poczucie satysfakcji z poszczególnych modalności ostrzeżeń.....	45
Rys. 2.21 Sekwencja ukazująca działanie ADS, awarię pojazdu i przejęcie kontroli nad pojazdem przez kierowcę.....	62
Rys. 2.22 Sekwencja ukazująca działanie ADS, awarię ADS i przejęcie kontroli nad pojazdem przez kierowcę	62
Rys. 2.23 Sekwencja ukazująca działanie ADS, opuszczenie ODD i przejęcie kontroli nad pojazdem przez kierowcę.....	63

Rys. 2.24	Sekwencja ukazująca działanie ADS, awarię ADS i wykonanie manewru minimalnego ryzyka przez system	63
Rys. 2.25	Sekwencja ukazująca działanie ADS, zbliżanie się do opuszczenia obszaru ODD i wykonanie manewru minimalnego ryzyka przez system	64
Rys. 2.26	Transfer kontroli zainicjowany przez system z trybu automatycznego do manualnego	64
Rys. 2.27	Transfer kontroli zainicjowany przez kierowcę z trybu automatycznego do manualnego	65
Rys. 3.1	Schemat przebiegu procedury badawczej podczas badań eksperymentalnych	73
Rys. 3.2	Symulator samochodu osobowego AS1200-6	76
Rys. 3.3	Moduł wizualny stanowiska HMI	79
Rys. 3.4	Moduł wizualny stanowiska HMI – widok działania w symulatorze	80
Rys. 3.5	Moduł wizualny stanowiska HMI przedstawiający konieczność przejęcia kontroli .	80
Rys. 3.6	Moduł wizualny stanowiska HMI przedstawiający konieczność przejęcia kontroli – widok działania w symulatorze	80
Rys. 3.7	Projekt fotela wykorzystany w badaniach	81
Rys. 3.8	Rozmieszczenie silników wibracyjnych w fotelu kierowcy – elemencie stanowiska haptycznego	82
Rys. 3.9	Konsola użytkownika do zarządzania systemami ADS w symulatorze jazdy	82
Rys. 3.10	Pierwsza sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR1) – widok początku odcinka w edytorze środowiska symulacyjnego	84
Rys. 3.11	Pierwsza sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR1) – widok dalszej części odcinka w edytorze środowiska symulacyjnego	84
Rys. 3.12	Pierwsza sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR1) – widok podczas dojeżdżania do miejsca wystąpienia zdarzenia	85
Rys. 3.13	Pierwsza sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR1) – widok w miejscu wystąpienia zdarzenia edytorze środowiska symulacyjnego	85
Rys. 3.14	Druga sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR2) – widok podczas dojeżdżania do miejsca wystąpienia zdarzenia w edytorze środowiska symulacyjnego	86
Rys. 3.15	Druga sytuacja wymagająca przejęcia kontroli nad pojazdem (TOR2) – widok w miejscu wystąpienia zdarzenia w edytorze środowiska symulacyjnego	86

Rys. 3.16 Trzecia sytuacja wymagająca przejścia kontroli nad pojazdem (TOR3) - widok podczas dojeżdżania do miejsca wystąpienia zdarzenia w edytorze środowiska symulacyjnego	87
Rys. 3.17 Trzecia sytuacja wymagająca przejścia kontroli nad pojazdem (TOR3) - widok w miejscu wystąpienia zdarzenia w edytorze środowiska symulacyjnego	87
Rys. 3.18 Skala ocen w badaniach ankietowych.....	88
Rys. 3.19 Model kontrolera rozmytego - widok ze środowiska MATLAB.....	91
Rys. 3.20 Funkcje przynależności wejścia „czas”	92
Rys. 3.21 Funkcje przynależności wejścia „ocena”	93
Rys. 3.22 Funkcje przynależności wyjścia „poprawność”	93
Rys. 3.23 Funkcja zależności wyjścia „poprawność” od wartości wejść „czas” i „ocena”	94
Rys. 3.24 Model czasu transferu kontroli - widok ze środowiska MATLAB	95
Rys. 4.1 Wykres średniego czasu reakcji (w sekundach) na żądanie przejścia kontroli dla wszystkich trzech sytuacji TOR pomiędzy grupami z różnymi interfejsami HMI....	98
Rys. 4.2 Wykres czasu reakcji (w sekundach) na żądanie przejścia kontroli z podziałem na trzy sytuacje TOR pomiędzy grupami z różnymi interfejsami HMI	98
Rys. 4.3 Wykres średniego czasu reakcji [s] na żądanie przejścia kontroli dla sytuacji drogowej TOR1 pomiędzy grupami z różnymi interfejsami HMI	100
Rys. 4.4 Wykres średniego czasu reakcji [s] na żądanie przejścia kontroli dla sytuacji drogowej TOR2 pomiędzy grupami z różnymi interfejsami HMI	100
Rys. 4.5 Wykres średniego czasu reakcji [s] na żądanie przejścia kontroli dla sytuacji drogowej TOR3 pomiędzy grupami z różnymi interfejsami HMI	101
Rys. 4.6 Ocena komfortu przejścia kontroli z trybu autonomicznego do manualnego (podział kierowców ze względu na doświadczenie)	103
Rys. 4.7 Ocena komfortu przejścia kontroli z trybu autonomicznego do manualnego (podział kierowców ze względu na wiek)	103
Rys. 4.8 Ocena komfortu przejścia kontroli z trybu manualnego do autonomicznego (podział kierowców ze względu na doświadczenie – po lewej; podział kierowców ze względu na wiek – po prawej).....	104
Rys. 4.9 Subiektywna ocena poziomu bezpieczeństwa podczas jazdy autonomicznej (podział kierowców ze względu na doświadczenie – po lewej; podział kierowców ze względu na wiek – po prawej).....	105
Rys. 4.10 Średnie wyniki działania modelu.....	107

Rys. 4.11 Średnie wyniki działania modelu z podziałem na grupy wiekowe (1 – poniżej 25 r.ż.; 2 – 30-40 lat; 3 – powyżej 55 r.ż.).....	108
Rys. 4.12 Średnie wyniki działania modelu z podziałem na płeć (k – kobiety; m – mężczyźni)	108
Rys. 4.13 Procentowy udział kierowców poprawnie wykonujących przejmowanie kontroli	110
Rys. 4.14 Procentowy udział kierowców poprawnie wykonujących przejmowanie kontroli z podziałem na grupy wiekowe.....	111
Rys. 4.15 Procentowy udział kierowców poprawnie wykonujących przejmowanie kontroli z podziałem na płeć.....	112

SPIS TABEL

Tabela 2.1 Poziomy automatyzacji pojazdów	17
Tabela 2.2 Podsumowanie poziomów automatyzacji jazdy według rekomendowanych praktyk SAE	19
Tabela 2.3 Czas reakcji kierowcy i liczba poprawnych reakcji a modalność informacji	32
Tabela 2.4 Wpływ wieku i modalności komunikatu na czas reakcji kierowcy, ilość pominiętych naciśnięć przycisku i odchylenie położenia koła kierownicy	37
Tabela 2.5 Wpływ złożoności (trudności) i modalności komunikatu na wydajność kierowcy	37
Tabela 2.6 Podsumowanie analizy badań	51
Tabela 3.1 Przyporządkowanie do kategorii symptomów w kwestionariuszu SSQ	71
Tabela 3.2 Lista parametrów rejestrowanych w symulatorze jazdy	77
Tabela 3.3 Ideogramy w modelu lingwistycznym	89
Tabela 3.4 Wpływ czasu reakcji oraz oceny na poprawność przejęcia kontroli.....	90
Tabela 4.1 Statystyki opisowe dla czasów przejęcia kontroli w trzech sytuacjach TOR1, TOR2 i TOR3	96
Tabela 4.2 Jednoczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) dla trzech różnych interfejsów HMI zastosowanych w badaniu (trzy scenariusze TOR)	99
Tabela 4.3 Statystyka opisowa dla sytuacji ponownego włączenia trybu jazdy asystenta (włączenia systemu ADS) dla wszystkich trzech sytuacji TOR	101
Tabela 4.4 Wyniki działania modelu dla grupy badawczej w kolejnych sytuacjach TOR (V – interfejs wizualny, VA – interfejs wizualny i dźwiękowy, VAH – interfejs wizualny, dźwiękowy i haptyczny)	106
Tabela 4.5 Przykładowe wartości parametrów wejściowych dla wyjściowej wartości granicznej	109
Tabela 4.6 Wyniki analizy działania modelu dla całej próby	110
Tabela 4.7 Wyniki analizy działania modelu dla grupy wiekowej do 25 roku życia	110
Tabela 4.8 Wyniki analizy działania modelu dla grupy wiekowej 30 – 40 lat	111
Tabela 4.9 Wyniki analizy działania modelu dla grupy wiekowej powyżej 55 roku życia...	111
Tabela 4.10 Wyniki analizy działania modelu dla grupy kobiet.....	112
Tabela 4.11 Wyniki analizy działania modelu dla grupy mężczyzn.....	112

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik nr 1 – Checklist

Godz. przyścia

Dokumenty

1. Zgoda na udział w badaniu
2. Oświadczenie (symulator)
3. Ankieta (metryczka)

Symulator Godz. rozpoczęcia

4. SSQ1 – przed symulatorem
5. Scenariusz 0 - adaptacyjny
6. SSQ2 – po jeździe na symulatorze (adaptacji)

Przerwa

Symulator Godz. rozpoczęcia

7. Scenariusz 1 ZGRAĆ DANE!!!
8. SSQ3

9. Kwestionariusz dot. autonomizacji

Godz. wyjścia

Numer badanego 1

Załącznik nr 2 – Zgoda na udział w badaniu

Kod osoby

ZGODA NA UDZIAŁ W BADANIU

Ja niżej podpisany(a), niniejszym oświadczam, iż wyrażam zgodę na udział w badaniu empirycznym zatytułowanym: „Innowacyjne technologie symulacyjne do oceny systemów automatyzujących prowadzenie pojazdów w aspekcie bezpieczeństwa ruchu drogowego” prowadzonym przez pracowników Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie.

Niniejszym oświadczam również, że zostałem(am) poinformowany(a) o celach badania, jego procedurze i spodziewanych korzyściach z uczestnictwa w tym badaniu.

Prowadzący badanie zapewnił mnie o zachowaniu mojej anonimowości.

„Wyrażam zgodę na przetwarzanie moich danych osobowych w celach związanych z realizacją empirycznego badania zatytułowanego: „Innowacyjne technologie symulacyjne do oceny systemów automatyzujących prowadzenie pojazdów w aspekcie bezpieczeństwa ruchu drogowego”, zgodnie z wymogami Ustawy o ochronie danych osobowych z dn. 29.08.1997 r. a prowadzonego przez pracowników Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa. Jednocześnie oświadczam, że tym samym zostałem(am) powiadomiony(a) o przysługującym mi prawie wglądu do danych oraz poprawiania.”

Nazwisko i imię badanego:

.....

Podpis badanego i data podpisu:

.....

Nazwisko osoby odpowiedzialnej za przebieg badań:

Załącznik nr 3 – Oświadczenie osoby przystępującej do jazdy na symulatorze

Kod osoby.....

.....

Imię i nazwisko

.....

.....

Adres zamieszkania

Warszawa, dnia roku

OŚWIADCZENIE

osoby przystępującej do jazdy na symulatorze samochodu osobowego AS 1200-6

Ja niżej podpisany(a) oświadczam, że zapoznałem(-am) się z „Regulaminem korzystania z symulatora” – rozumiem i akceptuję wszystkie jego postanowienia.

Jednocześnie wyrażam zgodę na przeprowadzenie z moim udziałem jazdy na symulatorze samochodu osobowego stanowiącym własność Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie i oświadczam, że zostałem(am) poinformowany(a) o zasadach korzystania z symulatora, a także uprzedzony(a) o przeciwwskazaniach dotyczących korzystania z symulatora przez osoby cierpiące na jakiegokolwiek schorzenie, które stanowiłoby przeszkodę do przeprowadzenia z ich udziałem jazdy na symulatorach, a w szczególności osobom cierpiącym na choroby związane z błędnikiem.

Oświadczam ponadto, iż zostałem(am) uprzedzony(a), iż korzystanie z symulatora może wpływać na samopoczucie i powodować czasowe ograniczenie zdolności prowadzenia pojazdów.

Tym samym oświadczam, że korzystam z symulatora na własną odpowiedzialność i nie będę dochodzić wobec Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie jakichkolwiek roszczeń z tego tytułu.

Obowiązuję się również do naprawienia wszelkich szkód wyrządzonych podczas korzystania z symulatora.

.....

Podpis osoby składającej oświadczenie

Załącznik nr 4 – Ankieta uczestnika (metryczka)

Kod osoby

ANKIETA

Poniżej znajdują się pytania dotyczące funkcjonowania na drodze. Prosimy o ustosunkowanie się do każdego pytania poprzez wybór właściwej odpowiedzi (postawić krzyżyk pod wybraną przez siebie odpowiedzią). W niektórych pytaniach/stwierdzeniach możliwe jest zaznaczenie więcej niż jednej odpowiedzi. Badanie jest anonimowe, a dane zostaną wykorzystane tylko do celów naukowych. Prosimy zatem o szczerą odpowiedź.

1. Wiek

2. Płeć: Kobieta / Mężczyzna

3. Wykształcenie

Zasadnicze zawodowe	Średnie	Wyższe niepełne	Wyższe (w tym licencjat)

4. Kategoria prawa jazdy

A	B	C	D	B+E	C+E	D+E

5. Czy posiada Pani/Pan dodatkowe uprawnienia (np. ADR)

Tak (jakie?)	Nie

6. Od ilu lat prowadzi Pani/Pan aktywnie pojazd (więcej niż 1000 km rocznie)?.....

7. Jak ocenia Pani/Pan swoje umiejętności prowadzenia pojazdu?

Bardzo słabo	Słabo	Przeciętne	Dobrze	Bardzo dobrze

8. Jak często prowadzi Pani/Pan samochód?

Bardzo rzadko (np. Kilka razy w roku)	Rzadko (np. Kilka razy w miesiącu)	Kilka razy w tygodniu	Codziennie

9. Ile kilometrów miesięcznie przejeżdża Pani/Pan?

Do 250 km	260-850 km	860-1700 km	Powyżej 1800 km

10. Ile godzin dziennie spędza Pani/Pan za kierownicą?

Do 1 godziny	1-3 godzin	4-7 godzin	8 i powyżej

11. Czy kiedykolwiek spowodował/a Pani/Pan kolizję drogową?

Tak	Nie

12. Czy kiedykolwiek spowodował/a Pani/Pan wypadek drogowy?

Tak	Nie

13. Czy zdarza się Pani/u odczuwać zmęczenie za kierownicą ?

Nie	Rzadko	Czasami	Często	Zawsze

14. Jak ocenia Pani/Pan swoje umiejętności prowadzenia samochodu?

Bardzo dobrze	Dobrze	Umiarkowanie	Słabo	Bardzo słabo

15. Które z niżej wymienionych zachowań zdarzają się Pani/u i jak często?

Rodzaj zachowania	Codziennie	Raz w tygodniu	Kilka razy w miesiącu	Bardzo rzadko	Nigdy
Zajeżdżanie drogi					
Przekraczanie prędkości					
Gwałtowne/niespodziewane manewry					
Jazda „na ogonie’					
Nadużywanie klaksonu					
Ruszanie z „piskiem” opon					
Komentowanie jazdy innych kierowców					
Pouczanie innych					
Krzyczenie na innych użytkowników drogi					
Gestykulacja w stosunku do innych					
Częsta zmiana pasów ruchu					
Nieużywanie kierunkowskazów					
Rozmowa przez telefon (bez zestawu)					
Ustawianie GPS podczas jazdy					
Pisanie wiadomości tekstowych/maili i in.					
Niezapięcie pasów					
Prowadzenie pojazdu po spożyciu alkoholu					
Przejeżdżanie na czerwonym świetle					
Inne (wymień)					
.....					
.....					

Prosimy o upewnienie się, że wszystkie pytania zostały uzupełnione

Dziękujemy z udział w badaniu.

Załącznik nr 5 – SSQ1

Kod osoby

Samopoczucie (przed jazdą symulatorem – adaptacja)

Niniejszy kwestionariusz ma na celu sprawdzenie jakie jest Państwa aktualne samopoczucie. Proszę zaznaczyć krzyżykiem (X) w kratce, który z podanych poniżej symptomów odnosi się do Pana/Pani aktualnego stanu. Dopuszczalne jest udzielenie tylko jednej odpowiedzi (postawienie tylko jednego krzyżyka w jednej linii).

LP		Brak	Nieznaczny	Umiarkowany	Dotkliwy
1	Ogólny dyskomfort				
2	Zmęczenie				
3	Znudzenie				
4	Senność				
5	Ból głowy				
6	Zmęczenie oczu				
7	Trudności ze skupieniem się				
8a	Zwiększone wydzielanie śliny				
8b	Suchość w ustach				
9	Pocenie się				
10	Mdłości				
11	Trudność z koncentracją				
12	Depresja				
13	Dezorientacja				
14	Niewyraźne widzenie				
15a	Oszłomienie przy oczach otwartych				
15b	Oszłomienie przy oczach zamkniętych				
16	Zawroty głowy				
17	Przebłyski pamięci				
18	Ogólne osłabienie				
19	Potrzeba zaczerpnięcia oddechu				
20	Dolegliwości żołądkowe				
21	Utrata apetytu				
22	Wzmoczony apetyt				
23	Potrzeba wypróżnienia				
24	Poczucie zagubienia				
25	Uczucie odbijania się				
26	Wymioty				
27	Inne (jakie?):				

Załącznik nr 6 – SSQ2

Kod osoby

Lista symptomów (po jeździe symulatorem - adaptacja)

Niniejszy kwestionariusz ma na celu sprawdzenie jaki wpływ symulator jazdy wywiera na Pana/Pani samopoczucie. Proszę zaznaczyć krzyżykiem (X) w kratce, który z podanych poniżej symptomów odnosi się do Pana/Pani aktualnego stanu. Dopuszczalne jest udzielenie tylko jednej odpowiedzi (postawienie tylko jednego krzyżyka w jednej linii).

LP		Brak	Nieznaczny	Umiarkowany	Dotkliwy
1	Ogólny dyskomfort				
2	Zmęczenie				
3	Znudzenie				
4	Senność				
5	Ból głowy				
6	Zmęczenie oczu				
7	Trudności ze skupieniem się				
8a	Zwiększone wydzielanie śliny				
8b	Suchość w ustach				
9	Pocenie się				
10	Mdłości				
11	Trudność z koncentracją				
12	Depresja				
13	Dezorientacja				
14	Niewyraźne widzenie				
15a	Oszłomienie przy oczach otwartych				
15b	Oszłomienie przy oczach zamkniętych				
16	Zawroty głowy				
17	Przebłyski pamięci				
18	Ogólne osłabienie				
19	Potrzeba zaczerpnięcia oddechu				
20	Dolegliwości żołądkowe				
21	Utrata apetytu				
22	Wzmożony apetyt				
23	Potrzeba wypróżnienia				
24	Poczucie zagubienia				
25	Uczucie odbijania się				
26	Wymioty				
27	Inne (jakie?):				

Oceń od 1 (bardzo słabo) do 10 (świetnie) jak dobrze radziłeś sobie w symulatorze jazdy?

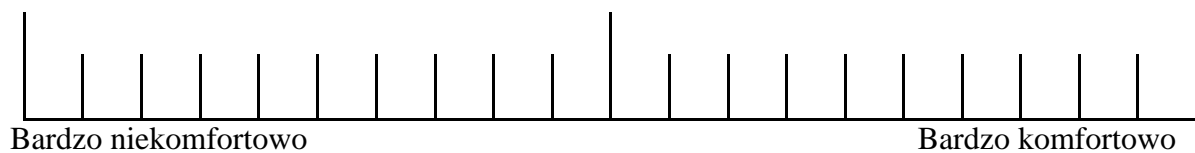
Załącznik nr 7 – Kwestionariusz dotyczący autonomizacji

.....
Kod osoby

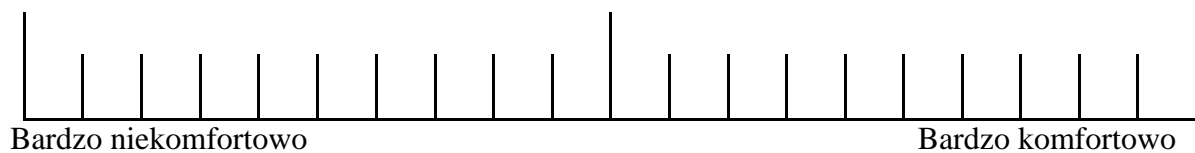
KWESTIONARIUSZ

Poniżej znajdują się pytania dotyczące sytuacji przejęcia kontroli w samochodzie. Oceń sytuacje drogowe na 20-stopniowej skali, zakładając, że 1 stopień (kratka) oznacza Twoją negatywną ocenę, a 20 stopień (kratka) Twoją pozytywną ocenę.

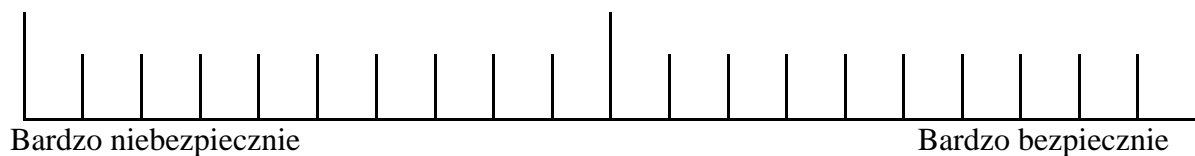
1. Jak oceniasz sytuację przejęcia kontroli (z trybu manualnego jazdy do trybu autonomicznego)?



2. Jak oceniasz sytuację przejęcia kontroli (z trybu autonomicznego jazdy do trybu manualnego)?



3. Jak się czuleś podczas jazdy autonomicznej?



Prosimy o upewnienie się, że wszystkie pytania zostały uzupełnione

Dziękujemy za udział w badaniu.

Załącznik nr 8 – Lista parametrów rejestrowanych przez symulator

TYP DANEJ	NAZWA	OPIS
<u>unsigned int</u>	<u>timeTOR</u>	Czas liczony od początku wysłania informacji o konieczności przejęcia kontroli przez system HMI do momentu znaczącej interwencji kierowcy (wciśnięcia jednego z pedałów lub obrotu kierownicą) [ms]
<u>unsigned int</u>	<u>timeADS</u>	Czas liczony od początku wysłania informacji o możliwości włączenia trybu autonomicznej jazdy przez system HMI do momentu włączenia systemu przez kierowcę [ms]
unsigned char	getLightRear	Tylne światła (1 – wł., 0 – wył.)
unsigned char	getLightReverse	Światło cofania (1 – wł., 0 – wył.)
unsigned int	Time	Czas liczony od początku symulacji [ms]
float	getPositionX	Współrzędna x pozycji
float	getPositionY	Współrzędna y pozycji
float	getPositionZ	Współrzędna z pozycji
float	getBodyOrientationX	Składowa x znormalizowanego wektora orientacji
float	getBodyOrientationY	Składowa y znormalizowanego wektora orientacji
float	getBodyOrientationZ	Składowa z znormalizowanego wektora orientacji
float	getVelocityVectorX	Składowa x wektora prędkości [m/s]
float	getVelocityVectorY	Składowa y wektora prędkości [m/s]
float	getVelocityVectorZ	Składowa z wektora prędkości [m/s]
float	getSpeed	Prędkość pojazdu [m/s]
float	getAccelerator	Stopień wciśnięcia pedału przyspieszenia (zakres [0 ÷ 1])
float	getBrake	Stopień wciśnięcia pedału hamulca (zakres [0 ÷ 1])
float	getClutch	Stopień wciśnięcia pedału sprzęgła (zakres [0 ÷ 1])
unsigned char	getGear	Numer biegu: Wsteczny: 0, Neutralny: 1, Pierwszy: 2, Drugi: 3...
unsigned char	getDirectionIndicationHazard	Stan włącznika świateł awaryjnych (1 – wł., 0 – wył.)

unsigned char	getDirectionIndicationLeft	Stan włącznika kierunkowskazu lewego (1 – wł., 0 – wył.)
unsigned char	getDirectionIndicationRight	Stan włącznika kierunkowskazu prawego (1 – wł., 0 – wył.)
float	getEngineRev	Prędkość obrotowa silnika [rad/s]
unsigned char	getHeadlightHigh	Stan włącznika świateł długich (1 – wł., 0 – wył.)
unsigned char	getHeadlightLow	Stan włącznika świateł mijania (1 – wł., 0 – wył.)
unsigned char	getHorn	Stan włącznika klaksonu (1 – wł., 0 – wył.)
unsigned char	getIgnitionKey	Stan stacyjki [0, 3]: 0 - wyłączony 1 - wyłączenie blokad 2 - prąd 3 - rozrusznik
unsigned char	getindicatorParkingBrake	Stan wskaźnika hamulca ręcznego (1 – wł., 0 – wył.)
unsigned char	getLightBrake	Stan świateł stop (1 – wł., 0 – wył.)
unsigned char	getLightFog	Stan światła przeciwmgłowego (1 – wł., 0 – wył.)
unsigned char	getLightPark	Stan świateł pozycyjnych (1 – wł., 0 – wył.)
float	getSteeringWheel	Kąt skrętu kierownicy podawany w zakresie [-1 ÷ 1]: -1 – kierownica skręcona maksymalnie w lewo 0 – kierownica w położeniu środkowym 1 – kierownica skręcona maksymalnie w prawo
float	getWheelSlip1	Poślizg przedniego prawego koła [m/s]
float	getWheelSlip2	Poślizg przedniego lewego koła [m/s]
float	getWheelSlip3	Poślizg tylnego prawego koła [m/s]
float	getWheelSlip4	Poślizg tylnego lewego koła [m/s]

Źródło: opracowanie własne