

MICHAŁ PIETRUCH  
ANDRZEJ MŁYNIEC  
ANDRZEJ WETULA

## Przegląd i perspektywa metod testowania wykorzystywanych do weryfikacji i walidacji ADAS, systemów aktywnego bezpieczeństwa oraz jazdy autonomicznej

*W ostatnich latach znacznie wzrosła liczba zaawansowanych systemów wspomagających kierowcę. Spowodowało to potrzebę opracowania metod testowania ich jakości i niezawodności. Artykuł przedstawia przegląd metod badawczych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym wykorzystywanych w weryfikacji i walidacji zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy (ADAS), aktywnego bezpieczeństwa i systemów jazdy autonomicznej. W pierwszej części przedstawiono podejście do testów nazywanych testowaniem w pętli, takich jak model w pętli, oprogramowanie w pętli itd., prezentując najciekawsze implementacje. Następnie omówiono testy wykonywane na różnych terenach testowych, które mają udowodnić niezawodność i jakość systemu. Testowymi terenami mogą być tory testowe, sztuczne miasta czy drogi publiczne. W ostatniej części przedstawiono walidację wykonaną w laboratorium z wykorzystaniem metod zarówno inwazyjnych, jak i nieinwazyjnych, opartych na wirtualnych jazdach testowych, symulatorach czujników i hamowniach podwoziowych. Ponadto zidentyfikowaliśmy najbardziej obiecujące podejścia do skutecznej weryfikacji i walidacji systemów ADAS, aktywnego bezpieczeństwa oraz jazdy autonomicznej. Na koniec wskazujemy potencjalne luki w tym temacie, które wymagają dalszych badań.*

Słowa kluczowe: ADAS, weryfikacja systemów aktywnego bezpieczeństwa, jazda autonomiczna, metody testowania, testowanie w pętli

### 1. WPROWADZENIE

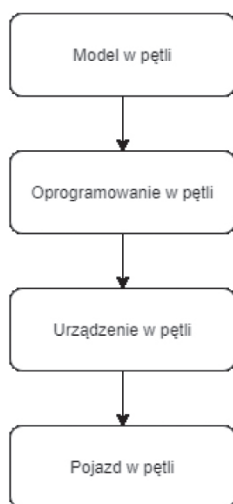
Nowoczesne samochody są wyposażone w coraz bardziej zaawansowane systemy aktywnego bezpieczeństwa. Obecnie nie ma samochodów w pełni autonomicznych, jednak niektóre z nich coraz bardziej ograniczają potrzebę interakcji z kierowcą. Systemy jazdy autonomicznej są opracowywane na podstawie metod SIL (oprogramowanie w pętli) i HIL (urządzenie w pętli), natomiast testy wykonywane są manualnie na torach testowych i/lub na drogach publicznych przez kierowców testowych. Metody te są dalekie od doskonałości ze względu na brak możliwości stworzenia wielu przypadków testowych, wymaganą obecność człowieka w samochodzie podczas testów, a przede wszystkim istnienia problemu z wielokrotnym odtworzeniem identycznych warunków drogo-

wych. Takie warunki można zreprodukować tylko w laboratorium przy użyciu specjalistycznych narzędzi. Wykonanie testów w laboratorium pozwoliłoby na testowanie samochodów w identycznych warunkach. To z kolei pozwoliłoby na porównywanie skuteczności działania systemów pomiędzy samochodami, a przede wszystkim umożliwiłoby na certyfikowanie oparte na określonych procedurach i standardach testowych. Istnieje wiele publikacji przedstawiających różne podejścia do testowania systemów aktywnego bezpieczeństwa i systemów jazdy autonomicznej – od testów laboratoryjnych po testy w ruchu drogowym. Obecnie testy w laboratorium zwane testowaniem pojazdu w pętli koncentrują się głównie na testach pojedynczego urządzenia, takiego jak radar czy lidar. Inżynierowie od jakiegoś czasu próbują stworzyć środowisko testowe, które będzie w stanie testować kilka systemów

jednocześnie, ale niestety wciąż nie zostało ono opracowane. W związku z tym pojawia się pytanie – czy jest możliwe stworzenie środowiska testowego, które będzie w stanie symulować świat zewnętrzny w laboratorium tak, aby można było kompleksowo przetestować systemy wspomagania kierowcy lub jazdy autonomicznej? W artykule dokonano przeglądu tego tematu i podjęto próbę określenia brakujących technologii.

## 2. TESTOWANIE W PĘTLI

Testowanie w pętli (X w pętli) to konwencja nazewnictwa, w której X oznacza obiekt poddawany testom. Ponieważ testowanie nie jest czynnością wykonywaną jednokrotnie, ale czynnością cykliczną, nazywane jest testowaniem w pętli. W branży motoryzacyjnej można w pętli testować różne rzeczy, które zostaną tutaj przybliżone. Podejścia te są uporządkowane chronologicznie zgodnie z harmonogramem rozwoju testowanego systemu, jak pokazano na rysunku 1. Należy jednak pamiętać, że nie wszystkie kroki muszą zostać wykonane, gdyż to zależy od specyfiki i złożoności systemu. Warto również zauważyć pewną różnicę pomiędzy weryfikacją i walidacją. Weryfikacja jest to sprawdzenie, czy system spełnia wcześniej zdefiniowane wymagania, standardy i normy, natomiast walidacja dostarcza dowodów, że system spełnia swoją funkcję w prawdziwym zastosowaniu, w docelowym środowisku [1].

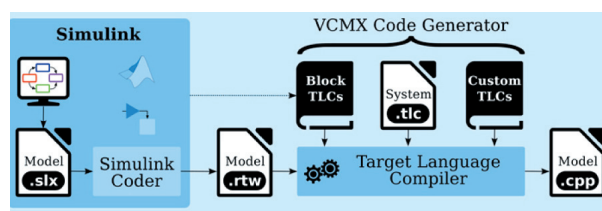


Rys. 1. Etapy tworzenia systemu

### 2.1. Model-in-the-loop (MIL)

Pierwszym krokiem podczas wytwarzania systemu jest stworzenie modelu w pętli (MIL), gdzie projekto-

wany system ma postać modelu stworzonego w narzędziu modelującym, np. w MATLAB-Simulink. Z podstawowych komponentów tworzony jest ogólny, wysokopoziomowy model działania systemu. Dzięki temu możemy zaprojektować system bez wchodzenia w szczegóły implementacyjne, które zależą od języka programowania. Dodatkowo, mając taki model, możemy automatycznie wygenerować kod w określonym języku programowania za pomocą np. Simulink Coder lub Target Link [2], dzięki czemu unikamy ręcznego pisania kodu [3], jak pokazano na rysunku 2. Testowanie stworzonego modelu obejmuje dostarczenie zestawu symulowanych sygnałów jako wejście do modelu i sprawdzenie jego odpowiedzi na te sygnały.



Rys. 2. Proces generowania kodu z wykorzystaniem Simulink [2]

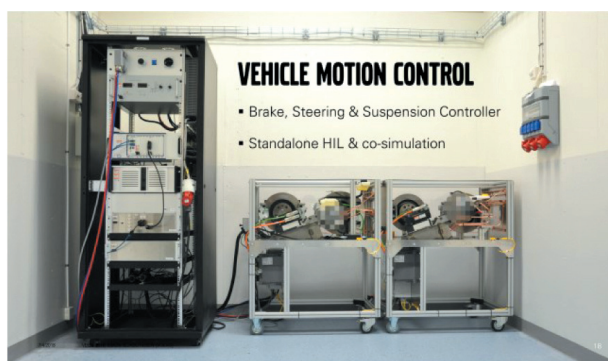
### 2.2. Oprogramowanie w pętli (SIL)

Kolejnym krokiem jest oprogramowanie w pętli (SIL), gdzie przedmiotem testów nie jest już model blokowy, ale kod w określonym języku programowania, np. C++. Możemy następnie przetestować ten kod, dostarczając do jego wejść odpowiednie sztuczne lub pozyskane dane. Dzięki temu można zweryfikować poprawność zaimplementowanych algorytmów w określonym języku programowania niezależnie od docelowego sprzętu, np. z kodem uruchomionym na komputerze PC [4]. Takie podejście niesie za sobą pewne ryzyko. Przede wszystkim, jeśli program komputerowy jest kompilowany innym kompilatorem od docelowego, to kod maszynowy może się nieco różnić. Podczas wykonywania program może zachowywać się nieco inaczej, więc nie ma 100% pewności, że program zadziała dokładnie tak samo na docelowym sprzęcie.

### 2.3. Urządzenie w pętli (HIL)

Po zakończeniu testów SIL przeprowadzane są testy urządzenia w pętli (HIL), gdzie oprogramowanie jest już testowane na docelowym sprzęcie, ale nadal jeszcze nie w docelowym środowisku. Oznacza to, że wszystkie inne współpracujące urządzenia elektroniczne muszą zostać sztucznie zasymulowane, ale

z funkcjonalnego punktu widzenia testowanego urządzenia nie ma większej różnicy, czy znajduje się ono w środowisku rzeczywistym, czy symulowanym. To chyba najczęstszy rodzaj testów wykonywanych w branży motoryzacyjnej, ponieważ zwykle producent projektowanego urządzenia odpowiada tylko za jedno z nich i nie ma dostępu do innych współpracujących urządzeń. Przykładem HIL może być urządzenie, które jest odpowiedzialne za rozpoznawanie linii rozdzielających pasy na drodze, które jest testowane w symulowanym środowisku [5] czy HIL pokazany na rysunku 3. Główną wadą tej metody jest to, że urządzenie nie jest testowane w rzeczywistym środowisku z innymi rzeczywistymi urządzeniami, z docelowymi zasilaczami itp., dlatego istnieje ryzyko, że w rzeczywistym środowisku urządzenie nie będzie działać do końca poprawnie.



Rys. 3. HIL system testujący kontrolery hamowania, sterowania oraz zawieszenia [6]

## 2.4. Pojazd w pętli (VIL)

Ostatnim etapem testów jest przetestowanie samochodu w całości. Najczęściej ustawia się go na hamowni podwoziowej, która przykładając odpowiedni moment obrotowy do kół, symuluje jazdę pod wznieśnienie oraz inne opory ruchu. Dodatkowo różne czujniki samochodu są stymulowane za pomocą różnego rodzaju urządzeń współpracujących z symulatorami jazdy odpowiedzialnymi za wirtualne jazdy testowe. W tej metodzie badawczej często można spotkać się z terminami, takimi jak testowanie w pętli otwartej oraz zamkniętej, które tutaj pokrótce omówię.

### 2.4.1. Testowanie w pętli otwartej

Testowanie w pętli otwartej polega na tym, że testowane urządzenie czy system jest stymulowany z zewnątrz, ale jego odpowiedź nie jest zwracana do symulatora. Z tego powodu w symulacji nie pojawia

się informacja o reakcji samochodu na wygenerowany sygnał stymulujący. Przykładem testowania w otwartej pętli może być urządzenie, które odpowiada za detekcję innych samochodów podczas jazdy [7]. Pierwszym krokiem było nagranie filmu podczas prawdziwej jazdy testowej, następnie identyczna jazda testowa została przeprowadzona w symulatorze, a na koniec samochody z wirtualnej jazdy testowej zostały wyekstrahowane i nałożone na nagrany, rzeczywisty film, co pokazano na rysunku 4. Końcowy test polegał na przesłaniu tego filmu z dodanymi samochodami do kamery i przeanalizowaniu, czy urządzenie wykryło inne pojazdy na drodze. W takich warunkach nie jest możliwe przetestowanie działania systemu aktywnego bezpieczeństwa, gdyż nagrane wideo nie reaguje i nie odzwierciedla odpowiedzi systemu.



Rys. 4. Kadr z filmu z rzeczywistej jazdy testowej rozszerzony o samochody wirtualne [7]

### 2.4.1. Testowanie w pętli zamkniętej

Testowanie w pętli zamkniętej polega na tym, że odpowiedź testowanego systemu jest zwracana do symulatora. Dzięki temu w symulacji widoczna jest reakcja samochodu. Testowanie w pętli zamkniętej zapewnia interakcję pomiędzy symulowanym światem a rzeczywistym samochodem, ale jest znacznie bardziej wymagająca w implementacji niż metoda otwartej pętli.

## 2.5. Inne metody

Oprócz metod standardowych opisanych powyżej istnieje wiele innych, bardziej szczegółowych metod, takich jak silnik w pętli (EIL) czy bateria w pętli (BIL), w których silnik spalinowy [8] lub baterie są poddawane testom w pętli [9]. Czasami również człowiek jest poddawany testom w celu oceny jego zachowania w określonych sytuacjach lub oceny jego współpracy z systemami bezpieczeństwa.



### 2.5.1. Kierowca w pętli (DIL)

Oprócz testowania wyprodukowanego systemu można również przetestować zachowanie kierowcy podczas jazdy samochodem (rys. 5). Dzięki temu można uzyskać informacje o zachowaniu kierowcy w różnych sytuacjach i tym samym lepiej zaprojektować system w samochodzie. Ponadto można ocenić współpracę kierowcy np. z aktywnymi systemami bezpieczeństwa w celu sprawdzenia, czy dodatkowe systemy bezpieczeństwa poprawiają, czy pogarszają reakcję kierowcy. Przykładem może być badanie czasu reakcji kierowcy podczas hamowania przy współpracy z inteligentnymi lampami [10]. Oczywiście kierowcę również można przetestować w mniej realnym środowisku, np. podczas całkowicie wirtualnej jazdy testowej, niemniej jednak najdokładniejszą metodą jest sprawdzenie zachowania kierowcy w prawdziwym pojeździe podczas prawdziwej jazdy testowej. Takie podejście daje najdokładniejsze wyniki oraz pewność, że zaprojektowany system bezpieczeństwa poprawia lub pogarsza bezpieczeństwo kierowcy.



Rys. 5. Symulator dynamicznej jazdy marki Volvo [6]

### 2.5.2. Pieszy w pętli (PIL)

Zachowanie pieszych można badać podobnie jak zachowanie kierowcy. Obserwując pieszych w różnych sytuacjach, można ocenić, jak wchodzi w interakcję z samochodem. Ciekawy przykład podano w publikacji [11], w której obserwuje się zachowanie kilku osób podczas niebezpiecznego zdarzenia z samochodem autonomicznym. Piesi podczas testu mają na głowach gogle VR, w których wyświetlana jest wirtualna jazda testowa. Podobne testy przeprowadzono z jednym przechodniem, którego zadaniem było wejście w odpowiednim momencie na przejście dla pieszych w celu sprawdzenia, czy algorytm awaryjnego hamowania pojazdu zadziała prawidłowo [12], co ukazano na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Pieszy z goglami VR [12]



Rys. 7. Obraz widziany przez pieszego z rysunku 6 [12]

## 3. METODY TESTOWANIA POJAZDU

Do tej pory zaprezentowano podejście testowania w pętli. Ostatnim krokiem jest przeprowadzenie testów pojazdu w rzeczywistych warunkach. Istnieją trzy główne rodzaje testów: ruch drogowy, sztuczne miasta i tory testowe.

### 3.1. Testowanie w ruchu drogowym

Jazdy testowe w ruchu drogowym to najpopularniejsza metoda testowania jazdy autonomicznej i systemów aktywnego bezpieczeństwa. Oprócz oczywistych zalet wynikających z jazdy w naturalnym, docelowym środowisku ma również wiele wad. Pierwszą wadą jest mała powtarzalność warunków testowych, które są w zasadzie nieodtwarzalne. Po drugie, samochód musi być w pełni sprawny, aby wykonać testy, więc testy te jedynie mogą być przeprowadzone pod koniec tworzenia produktu, tym samym wydłużając całkowity czas produkcji. Po trzecie, jazda testowa może spowodować zagrożenie dla innych uczestników ruchu oraz samego kierowcy, dlatego unika się testowania niedojrzałych systemów. Po czwarte, testowanie na drogach publicznych jest niewygodne i czasochłonne, ponieważ każda modyfikacja urządzenia lub oprogramowania wymaga powrotu do siedziby firmy. Niestety w coraz większej liczbie

krajów zakazuje się testowania samochodów autonomicznych w ruchu drogowym z powodu wypadków, jednak skutkuje to rozwojem nowych, alternatywnych metod testowania. Przykład testu w ruchu ulicznym został pokazany na rysunku 8.



Rys. 8. Testowanie w ruchu ulicznym [13]

### 3.2. Testowanie na terenach zamkniętych

Oprócz testów w ruchu drogowym wykonuje się testy na terenach zamkniętych specjalnie przystosowanych do testów.

#### 3.2.1. Sztuczne miasta

Alternatywą może być testowanie samochodów w sztucznych warunkach. Może to być na przykład sztuczne miasto, które zostało zbudowane specjalnie do celów testowych. Takie miasta istnieją m.in. w Korei Południowej – K-city [14] czy w Stanach Zjednoczonych – Mcity [15]. Na rysunku 9 przedstawiono mapę takiego miasta.



Rys. 9. Mapa Mcity [5]

Mcity składa się z czterdziestu fasad budynków, z tunelu, mostu, czteropasmowej autostrady, a nawet

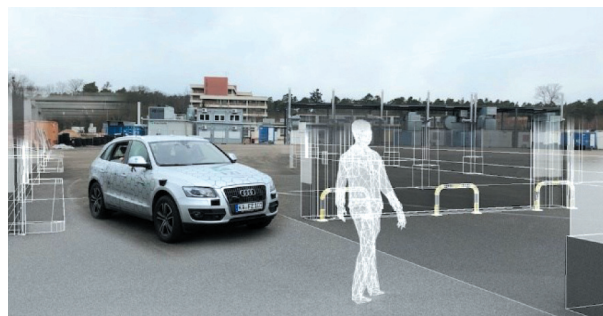
mechanicznych pieszych, którzy mogą wchodzić na przejście dla pieszych. Ponadto jest wyposażone w standardowe oznakowanie drogowe oraz sygnalizację świetlną [15]. Fragment Mcity pokazano na rysunku 10. Testowanie w takich warunkach ma wiele zalet, np. możliwość testowania w warunkach, które nie zagrażają innym użytkownikom drogi. Ponadto warunki testowe są w większości odtwarzalne z wyjątkiem warunków pogodowych. Istotną zaletą jest możliwość dowolnej konfiguracji otoczenia, na przykład przez zmianę znaków czy sygnalizacji świetlnej. Pomimo tych zalet metoda ta ma jednak pewne wady, np. nadal istnieje pewne zagrożenie dla kierowcy podczas wykonywania testów. Poza tym budowa takiego miasta jest bardzo kosztowna i długotrwała, a sam samochód nadal musi być w pełni funkcjonalny.



Rys. 10. Mcity [16]

#### 3.2.1. Tory testowe

Tańszą alternatywą jest testowanie na torach testowych lub wszelkiego rodzaju pustych placach czy zamkniętych drogach. Zwykle na torze znajdują się pojedyncze przeszkody, które pozwalają na walidację pojedynczego systemu aktywnego bezpieczeństwa, np. hamowania awaryjnego. Przykład testowania na placu testowym został pokazany na rysunku 11. Ten rodzaj testowania jest prawdopodobnie najpopularniejszy, ponieważ jest najtańszy i najszybszy do zrealizowania. Często jest to faza początkowa przed testowaniem w ruchu drogowym.



Rys. 11. Samochód testowany na torze testowym w rozszerzonej rzeczywistości [17]



### 3.2.1. Testy półwirtualne

Powszechną praktyką jest również łączenie wirtualnej jazdy testowej z rzeczywistą jazdą testową. Na początku w symulacji odwzorowuje się prawdziwy tor. Następnie podczas rzeczywistego przejazdu samochód testowy wyposażony w bardzo dokładny różnicowy GPS (DGPS) przesyła swoją lokalizację do symulatora, który następnie odsyła dane w odpowiednim formacie, np. do radaru. Te dane są przesyłane bezpośrednio do sterownika radaru z pominięciem samego czujnika radarowego i wyzwalany jest system aktywnego bezpieczeństwa [18, 19]. Dzięki temu test odbywa się na prawdziwym torze, na którym nie ma innych uczestników ruchu drogowego, natomiast z perspektywy samochodu jedzie on po tym samym torze jednocześnie z innymi samochodami. Również często w takich przejazdach kierowca wyposażony jest w gogle, w których rzeczywistość jest rozszerzona o elementy generowane przez symulator. Dzięki takiemu podejściu kierowca unika choroby lokomocyjnej, a ponadto jest świadomy czynników powodujących manewry samochodu.

Innym podejściem do testów półwirtualnych jest jazda po pustym torze, na którym kierowca wyposażony jest w gogle VR wyświetlające całkowicie wirtualną jazdę testową, co pokazano na rysunku 12. Zaletą tego podejścia jest to, że kierowca doświadcza wszystkich sił podczas wirtualnej jazdy próbnej [20].

Testy półwirtualne można również zastosować podczas testowania kontrolera zarządzania sygnalizacją świetlną. Kontroler przydziela czas, w którym każdy samochód może przejechać przez skrzyżowanie. Ponieważ testowany samochód nie był wyposażony w układy wykonawcze będące w stanie sterować samochodem, był on prowadzony przez kierowcę wykonującego polecenia sterownika, które były wysyłane do specjalnej aplikacji na smartfonie [21].



Rys. 12. Rzeczywista jazda testowa rozszerzona o wirtualne samochody [20]

Testy półwirtualne często wymagają obecności kierowcy w samochodzie, co może być niebezpieczne, zwłaszcza gdy pojazd jest prototypem. Ryzyka tego można uniknąć, zastępując kierowcę układami wykonawczymi, którymi następnie można sterować zdalnie.

### 3.3. Testy w laboratorium

Jeśli chodzi o testowanie pojazdu w pętli w warunkach laboratoryjnych, problemem jest symulacja świata zewnętrznego i stymulowanie czujników samochodu, aby można było przetestować konkretną funkcjonalność. Można to zrobić na kilka sposobów, które zostaną przedstawione poniżej.

#### 3.3.1. Metody inwazyjne

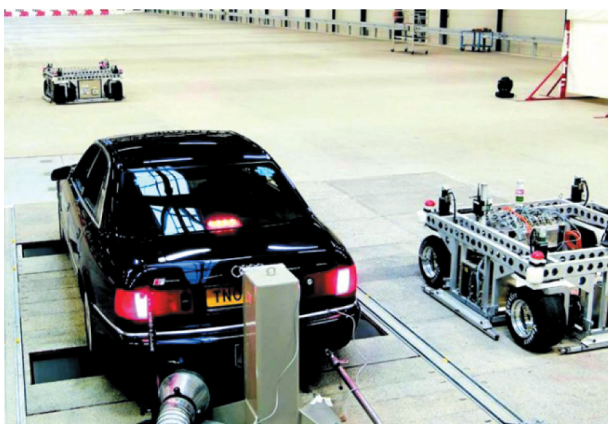
W metodach inwazyjnych zachodzi ingerencja w konstrukcję samochodu. Najbardziej inwazyjną metodą jest odłączenie zarówno czujnika, jak i sterownika i wprowadzenie odpowiednich danych bezpośrednio do magistrali komunikacyjnej [22]. Na przykład sterownik radaru może zostać całkowicie odłączony, a na magistrale komunikacyjną są wstrzykiwane ramki zawierające określone wartości. Dzięki temu możemy obserwować reakcję pojazdu na te dane. Metoda ta jest niewygodna i w zasadzie rzadko stosowana, ponieważ wymaga sporej ingerencji w konstrukcję samochodu oraz dogłębnej znajomości przesyłanych struktur danych na magistrali. Z tego powodu metoda ta jest wykorzystywana przez producentów samochodów, którzy posiadają wszelkiego rodzaju dokumentację potrzebną do wykonania takich testów.

Mniej inwazyjnym sposobem jest pozostawienie podłączonego sterownika, ale odłączenie samego czujnika, a następnie wysłanie sygnałów elektrycznych do sterownika zgodnie ze specyfikacją czujnika. Ze względu na znacznie łatwiejszy dostęp do dokumentacji czujnika niż do dokumentacji opisującej komunikację wewnętrzną samochodu metoda ta jest już stosowana sporadycznie.

#### 3.3.2. Metody nieinwazyjne

Istnieje też kilka metod, które nie ingerują w konstrukcję samochodu. Pierwsza z nich polega na ustawieniu fizycznych obiektów przed samochodem w celu uruchomienia testowanych systemów, np. systemu awaryjnego hamowania.

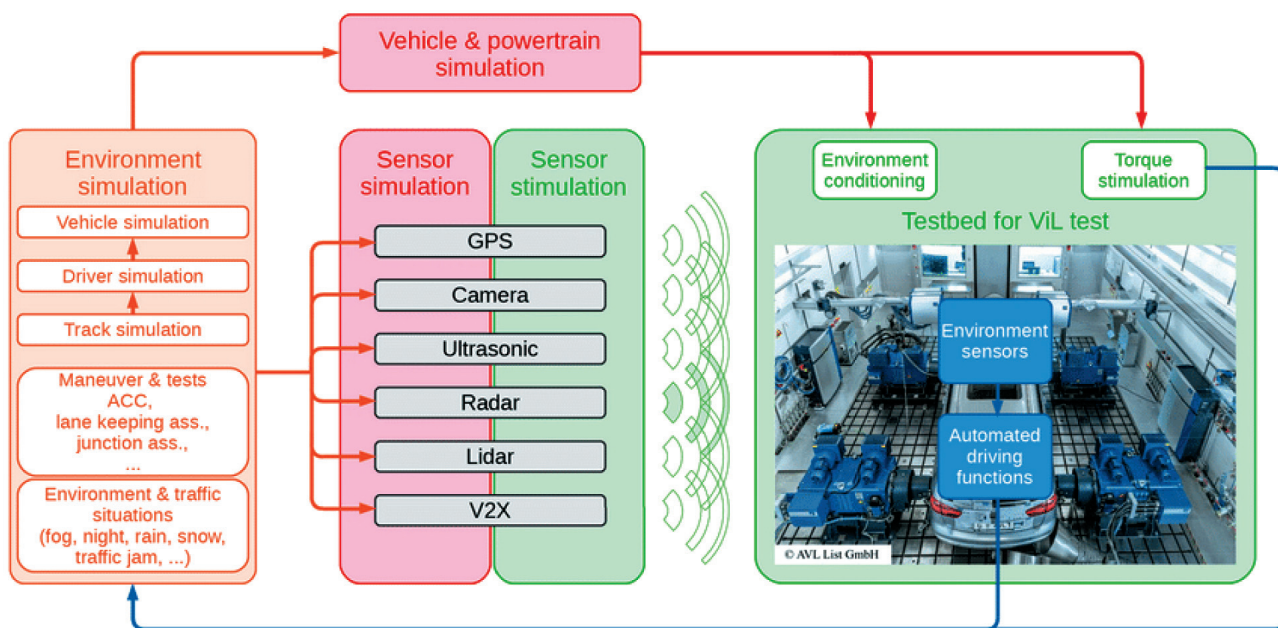
Do tego celu można na przykład wykorzystać dużą halę, na której samochód jest ustawiony na hamowni podwoziowej, a pozostałe sztuczne samochody poruszają się ruchem względnym wobec tego samochodu [23], jak pokazano na rysunku 13. Niestety to rozwiązanie ma wiele wad. Jest bardzo kosztowne, ponieważ trzeba zbudować sztuczne samochody lub inne obiekty, które będą wchodzić w interakcję z testowanym samochodem, oraz konieczne jest również posiadanie dużego pomieszczenia o długości około 100 m [23]. Ponadto takie przedsięwzięcie niesie pewne niebezpieczeństwo dla otoczenia, gdyż pojazdy są w permanentnym ruchu.



Rys. 13. Testowany pojazd na hamowni z sztucznymi samochodami [23]

Kolejnym rozwiązaniem jest stymulacja czujników samochodu za pomocą przeznaczonych do tego urządzeń – stymulatorów. Podejście to jest powszechnie stosowane podczas testowania systemów aktywne-

go bezpieczeństwa lub zaawansowanych systemów wspomagania kierowców – ADAS. System testowy tego typu składa się z kilku elementów. Obejmuje symulator jazdy będący programem komputerowym wykonującym wirtualne jazdy testowe. W takim narzędziu można tworzyć specyficzne drogi, określać liczbę pasów, poziom nachylenia drogi, wstawiać drzewa i innych uczestników ruchu, takich jak samochody, piesi itp. [24]. Rzeczywisty samochód jest odwzorowywany w symulatorze, a w literaturze jest określany jako pojazd EGO. Symulator ma wbudowane modele czujników, takich jak radar, lidar itp., dzięki czemu dostarcza sygnały w formacie używanym w badanym systemie, które następnie przesyłane są bezprzewodowo do odpowiednich czujników w samochodzie za pomocą specjalistycznego sprzętu. Badany samochód reaguje na otrzymane dane, zmieniając trajektorie ruchu lub aktywując odpowiedni system aktywnego bezpieczeństwa. Odpowiedź tego systemu jest mierzona, a wartości fizyczne są przesyłane z powrotem do symulatora. Na podstawie tych danych pojazd EGO odzwierciedla zachowanie badanego pojazdu podczas wirtualnej jazdy testowej. Przykładem tego rozwiązania jest projekt *Driving Cube* [25, 26], w którym samochód został umieszczony na hamowni podwoziowej, a z przodu samochodu umieszczono specjalne urządzenia do bezprzewodowego stymulowania czujników, jak pokazano na rysunku 14. Specjalistyczny program komputerowy wykonał wirtualną jazdę testową i wygenerował dane dla stymulatorów oraz hamowni podwoziowej.



Rys. 14. *Driving Cube* – stanowisko testowe do kompleksowego testowania jazdy autonomicznej [27]



#### 4. PODSUMOWANIE

Istnieje kilka sposobów weryfikacji i walidacji zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy ADAS, systemów aktywnego bezpieczeństwa i jazdy autonomicznej – od testów w laboratorium do testów w ruchu drogowym. Obecnie badania laboratoryjne są szeroko stosowane i stale rozwijane, jednak ze względu na koszty mogą sobie na to pozwolić tylko największe koncerny samochodowe i ośrodki badawczo-rozwojowe. Niestety nie ma systemu testowego VIL, który byłby w stanie stymulować jednocześnie wszystkie systemy używane do jazdy autonomicznej. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu stwierdzono, że istnieją systemy, które testują jedynie pojedyncze systemy. *Driving Cube* jest rzadkim przykładem, w którym radar i kamera są testowane jednocześnie. W takim systemie brakuje przede wszystkim stymulacji lidarów oraz stymulatora GPS, które są kluczowymi systemami wykorzystywanymi podczas jazdy autonomicznej. Pomimo ciągle rozwijanych metod do osiągnięcia opisanego powyżej celu niezbędna jest odpowiedź na pytanie: Czy możliwe jest stworzenie środowiska testowego, które będzie w stanie symulować w laboratorium świat zewnętrzny, w którym systemy wspomagania kierowcy oraz autonomicznej jazdy będą kompleksowo testowane? Zdaniem autorów jest szansa na zrealizowanie takiego projektu, ale będzie to czasochłonne, kosztowne i wymagające multidyscyplinarnego zespołu ludzi. Głównym zadaniem w takim projekcie byłoby zintegrowanie istniejących systemów testowych w taki sposób, aby nie przeszkadzały i nie zakłócały się nawzajem i były w stanie stymulować wszystkie testowane systemy jednocześnie.

#### Literatura

- [1] Systems Engineering: *IEEE 1012-2016 – IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation*, [https://standards.ieee.org/standard/1012\\_2016.html](https://standards.ieee.org/standard/1012_2016.html) [8.07.2021].
- [2] Bücs R.L., Reyes Aristizábal J.S., Leupers R., Ascheid G.: *Multi-level vehicle dynamics modeling and export for ADAS prototyping in a 3D driving environment*, IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Yokohama, Japan 2017.
- [3] Xu F., Shen T.: *A traffic-in-loop simulation system for validation of emission control strategy in diesel engine*, IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), Sankt Petersburg, Russia 2018.
- [4] Yao S., Zhang J., Hu Z., Wang Y., Zhou X.: *Autonomous-driving vehicle test technology based on virtual reality*, The 2<sup>nd</sup> 2018 Asian Conference on Artificial Intelligence Technology, Chongqing, China 2018.
- [5] Von Neumann-Cosel K., Roth E., Lehmann D., Speth J., Knoll A.: *Testing of image processing algorithms on synthetic data*, 4<sup>th</sup> International Conference on Software Engineering Advances, Porto, Portugal 2009.
- [6] *National Instrument. Volvo Cars Improves Ride Quality Using an Open-HIL Platform and Dynamic Vehicle Simulation*, <https://www.ni.com/pl-pl/innovations/case-studies/19/volvo-cars-improves-ride-quality-using-an-open-hil-platform-and-dynamic-vehicle-simulation.html> [8.07.2021].
- [7] Zofka M.R., Kohlhaas R., Schamm T., Zöllner J.M.: *Semi-virtual simulations for the evaluation of vision-based ADAS*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn, Michigan, USA 2014.
- [8] Kammerer C., Schmidt R., Hochmann G.: *A Common Testing Platform for Engine and Vehicle Testbeds*, ATZ Worldwide 2009.
- [9] Chen C., Xiong R., Shen W.: *A Lithium-Ion Battery-in-the-Loop Approach to Test and Validate Multiscale Dual H Infinity Filters for State-of-Charge and Capacity Estimation*, IEEE Transactions on Power Electronics 2018.
- [10] Laschinsky Y., Von Neumann-Cosel K., Gonter M., Wegwerth C., Dubitzky R., Knoll A.: *Evaluation of an active safety light using virtual test drive within vehicle in the loop*, IEEE International Conference on Industrial Technology, Via del Mar, Chile 2010.
- [11] Hartmann M., Viehweger M., Desmet W., Stolz M., Watzenig D.: *Pedestrian in the loop: An approach using virtual reality*, 26<sup>th</sup> International Conference on Information, Communication and Automation Technologies, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina 2017.
- [12] Zofka M.R., Ulbrich S., Karl D., Fleck T., Kohlhaas R., Rönnau A., Dillmann R., Zöllner M.: *Traffic Participants in the Loop: A Mixed Reality-Based Interaction Testbed for the Verification and Validation of Autonomous Vehicles*, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Maui, HI, USA 2018.
- [13] Frost A.: *Autonomous EV completes UK's longest and most complex self-driving car journey*, <https://www.traffictechtoday.com/news/autonomous-vehicles/autonomous-ev-completes-uks-longest-and-most-complex-self-driving-car-journey.html> [8.07.2021].
- [14] Xu S., Peng H., Song Z., Chen K., Tang Y.: *Design and Test of Speed Tracking Control for the Self-Driving Lincoln MKZ Platform*, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020.
- [15] Huang W.L., Wang K., Lv Y., Zhu F.H.: *Autonomous vehicles testing methods review*, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Rio de Janeiro, Brazil 2016.
- [16] Mcity: *Mcity Test Facility*, <https://mcity.umich.edu/our-work/mcity-test-facility/> [28.05.2020].
- [17] Zofka M.R., Essinger M., Fleck T., Kohlhaas R., Zöllner J.M.: *The sleepwalker framework: Verification and validation of autonomous vehicles by mixed reality LiDAR stimulation*, IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots, Brisbane, QLD, Australia 2018.
- [18] Bokc T., Maurer M., Farber G.: *Validation of the Vehicle in the Loop (VIL); A milestone for the simulation of driver assistance systems*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey 2007.
- [19] Sieber M., Berg G., Karl I., Siedersberger K., Siegel A., Färber B.: *Validation of driving behavior in the Vehicle in the Loop: Steering responses in critical situations*, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, The Hague, Netherlands 2013.
- [20] Ruger F., Nitsch V., Farber B.: *Automatic Evasion Seen from the Opposing Traffic-An Investigation with the Vehicle in the Loop*, IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Gran Canaria, Spain 2015.



- [21] Fayazi A., Vahidi A.: *Vehicle-in-the-loop (VIL) verification of a smart city intersection control scheme for autonomous vehicles*, 1<sup>st</sup> Annual IEEE Conference on Control Technology and Applications, Maui, HI, USA 2017.
- [22] Galko C., Rossi R., Savatier X.: *Vehicle-hardware-in-the-loop system for ADAS prototyping and validation*, International Conference on Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling and Simulation, Agios Konstantinos, Greece 2014.
- [23] 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” 2006, 44, 7: 569–590.
- [24] Geneder S., Pfister F., Wilhelm C., Arnold A.: *Development of Connected Powertrains at the Power Test Bed*, ATZ Worldwide 2016.
- [25] Gadringer M. E., Maier F. M., Schreiber H., Makkapati V. P., Gruber A., Vorderderfler M., Amschl D., Metzner S., Pflügl H., Bösch W., Horn M., Paulweber M.: *Radar target stimulation for automotive applications*, IET Radar, Sonar & Navigation, 2018.
- [26] Förster M., Hettel R., Schyr C., Pfeffer P. E.: *Lateral dynamics on the vehicle test bed – a steering force module as a validation tool for autonomous driving functions*, 9<sup>th</sup> International Munich Chassis Symposium, Munich, Germany 2018.
- [27] Gadringer M., Schreiber H., Gruber A., Vorderderfler M., Amschl D., Bösch W., Metzner S., Pflügl H., Paulweber M.: *Virtual reality for automotive radars*, Elektrotechnik & Informationstechnik 2018.

*mgr inż. MICHAŁ PIETRUCH*  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
mpiet@agh.edu.pl

*dr hab. inż. ANDRZEJ MŁYNYEC*  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
mlyniec@agh.edu.pl

*dr inż. ANDRZEJ WETULA*  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
wetula@agh.edu.pl