t. LXXIII ▪ nr 1/2021 ▪ DOI 10.33226/1231-2037.2021.1.2

Dr hab. inż. Tomasz Kamiński
Instytut Transportu Samochodowego
ORCID: 0000-0002-6695-4136
e-mail: tomasz.kaminski@its.waw.pl

Pojazdy zautomatyzowane w aspekcie zrównoważonej mobilności miejskiej

Automated vehicles in context of sustainable urban mobility

Streszczenie

W artykule opisano zagadnienie automatyzacji transportu, stanowiące jeden z aktualnych trendów rozwoju pojazdów i infrastruktury drogowej. Sposób wdrożenia pojazdów zautomatyzowanych, a następnie wykorzystania pojazdów w pełni autonomicznych, nie został jeszcze określony, jednak można przypuszczać, że będą one stanowiły rozwiązanie wspierające zrównoważoną mobilność — szczególnie w obrębie miast i aglomeracji miejskich. Będzie to możliwe dzięki osiągnięciu, charakterystycznego dla zrównoważonej mobilności, kompromisu między celami ekonomicznymi, społecznymi i środowiskowymi. Wdrożenie nowych koncepcji w zakresie mobilności na żądanie, współdzielenia i wypożyczania pojazdów, w połączeniu z automatyzacją transportu powinno przynieść efekt w postaci ograniczenia zatorów drogowych i obniżeniu emisji szkodliwych składników spalin. Zmianie mogą ulec również modele dostaw towarów, które będą się mogły odbywać w porze nocnej, co może poprawić wykorzystanie taboru pojazdów, infrastruktury drogowej i magazynowej. Wybrane właściwości pojazdów zautomatyzowanych i autonomicznych będzie można wykorzystać w celu wsparcia postulatów zrównoważonej mobilności.

Opracowanie miało na celu scharakteryzowanie zagadnień związanych z autonomizacją transportu drogowego. Przedstawiono aspekty mobilności miejskiej, jak również przykładowe pojazdy, których testy są obecnie prowadzone w warunkach rzeczywistych.

Słowa kluczowe:
autonomizacja transportu drogowego, pojazdy autonomiczne, mobilność miejska, nowoczesne technologie w transporcie

Abstract

The article describes the issue of transport automation, which is one of the current trends in the development of vehicles and road infrastructure. The way to implement automated vehicles and then use fully autonomous vehicles has not yet been determined, but it can be assumed that they will provide a solution supporting sustainable mobility — especially within cities and urban agglomerations. It will be possible thanks to reaching a compromise between economic, social and environmental goals, characteristic for sustainable mobility. The implementation of new concepts in the field of mobility on demand, vehicle sharing and rental, combined with transport automation, should result in reducing traffic congestion and lowering the emission of harmful exhaust components. The models for the delivery of goods that can take place at night may also change, which may improve the use of the fleet of vehicles, road and warehouse infrastructure. Selected properties of automated and autonomous vehicles can be used to support the demands of sustainable mobility.

The study was aimed at characterizing the issues related to the autonomy of road transport. Aspects of urban mobility were presented, as well as examples of vehicles that are currently being tested in real conditions.

Keywords:
autonomy of road transport, autonomous vehicles, urban mobility, modern technologies in transport

JEL: O18, R4, Q55

Wprowadzenie

Automatyzacja transportu drogowego ma na celu poprawę bezpieczeństwa i efektywności transportu oraz komfortu podróży w przypadku transportu osób. Coraz większa liczba pojazdów, nawet klasy średniej, wyposażana jest w nowoczesne systemy bezpieczeństwa, m.in. ostrzegające przed kolizją z innymi uczestnikami ruchu, automatycznie rozpoczynające hamowanie awaryjne, informujące o niezaplanowanym zjechaniu na sąsiedni pas ruchu. Zakres realizowanych przez te systemy funkcji obej-

muje także automatyczne utrzymanie pasa ruchu lub automatyczną zmianę pasa (jeżeli taka była intencja kierowcy) oraz zaawansowane systemy, które powinny bezpiecznie prowadzić pojazd w większości sytuacji drogowych, wykonując samodzielnie, ale pod nadzorem kierowcy, manewry wyprzedzania, omijania, parkowania itd. W połączeniu z systemami nawigacji umożliwiającymi przejazd do wyznaczonego celu systemy autonomizujące jazdę będą stanowiły rozwiązanie poprawiające także wykorzystanie infrastruktury drogowej (dzięki zmniejszeniu odstępów między pojazdami, nocnym dostawom towarów itp.) czy poprawiające mobilność osób starszych, z niepełnosprawnościami i wykluczonych transportowo. Zaawansowane rozwiązania autonomizujące transport znajdują się dopiero w fazie rozwoju, ale biorąc pod uwagę rosnące tempo wdrażania technologii informatycznych, nadal spadające ceny tego typu rozwiązań oraz krótki okres przyjmowania się technologii, można się spodziewać, że w najbliższym czasie zrewolucjonizują one transport.

Jednocześnie obserwuje się wysoką transportochłonność przemysłu i handlu oraz wzrost zapotrzebowania na mobilność społeczeństwa. Rośnie popyt na podróże w obrębie miast i aglomeracji miejskich. Jest on związany z dojazdami do pracy, punktów usługowych, centrów handlu i rozrywki, ale również ze zmianą stylu życia. Zjawisko to powoduje wzrost emisji zanieczyszczeń i negatywny efekt w postaci strat czasu powodowanych przez wydłużony czas dojazdu wywołany zatłoczeniem ulic. W związku z powyższym wdrażane są technologie z zakresu „czystego" transportu, takie jak pojazdy elektryczne, pojazdy zasilane gazem ziemnym czy wodorem. Jednak takie rozwiązania nie wystarczą do ograniczenia negatywnego oddziaływania transportu na środowisko i minimalizacji strat czasu. Sprawdzonym rozwiązaniem jest zastosowanie transportu zbiorowego jako najefektywniejszego rozwiązania prowadzącego do obniżenia konsumpcji energii i emisji zanieczyszczeń w odniesieniu do liczby przewiezionych towarów i osób. Jednocześnie minimalizowane jest, dzięki takiemu podejściu, zapotrzebowanie na infrastrukturę drogową.

Dodatkowo, coraz intensywniej wdraża się koncepcje z zakresu ekonomii współdzielenia — MaaS (*Mobility as a Service*), *Car Sharing*, *Bike Sharing*/*Bike Hire* (odpowiednio: „mobilności jako usługi", współdzielenia pojazdów i współdzielenia lub wypożyczania rowerów).

Należy jednak mieć na uwadze, że nie da się całkowicie wyeliminować lub zastąpić substytutami osobistych podróży, przewozu towarów czy dojazdu w celu świadczenia usług. Z jednej strony muszą być zaspokajane potrzeby obywateli. Muszą być również realizowane operacje gospodarcze, które wymagają transportu surowców, podzespołów, części, półproduktów, a następnie gotowych produktów. Z drugiej strony, transport powinien być realizowany z zachowaniem minimalnego oddziaływania na środowisko naturalne, w szczególności przy ograniczeniu emisji spalin.

Ze względu na fakt, że cele te są częściowo przeciwstawne (tzn. nie można np. obniżać poniżej pewnej wartości emisji zanieczyszczeń bez częściowej rezygnacji z przewozu towarów, co nie zawsze jest możliwe), w celu uzyskania pożądanych efektów potrzebne jest podejście polegające na *równoważeniu mobilności*. Uwzględnia ono cele społeczne, ekonomiczne i środowiskowe i polega na znalezieniu kompromisu. Proces równoważenia mobilności obejmuje oddziaływanie na konsumentów w celu zmiany ich zachowań w taki sposób, aby odbywali oni podróże tylko wtedy, kiedy jest to konieczne, zastępując w miarę możliwości przemieszczanie się innymi formami aktywności — telekonferencjami lub wymianą informacji w postaci elektronicznej.

Pojazdy zautomatyzowane powinny być wykorzystywane jako jedno z narzędzi wspierających zrównoważoną mobilność. Dzięki wymianie informacji o aktualnej sytuacji drogowej (roboty drogowe, zatłoczenie, incydenty drogowe) umożliwią one skrócenie trasy przejazdu, m.in. dzięki dynamicznemu planowaniu i optymalizacji trasy pojazdu oraz wykorzystaniu bieżącej informacji o wolnych miejscach parkingowych. Możliwe będzie też lepsze sterowanie sygnalizacją świetlną w efekcie wymiany informacji między infrastrukturą a pojazdami. W przyszłości nie będzie konieczne stosowanie oznakowania drogowego, ponieważ wymagane informacje będzie można zapisać na mapach cyfrowych. Takie rozwiązanie obniżyłoby koszty utrzymania infrastruktury drogowej i poprawiło estetykę miasta.

Systemy ADAS

Zadaniem zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy (ang. *Advanced Driver Assistance Systems*) jest wspomaganie, ostrzeganie i reagowanie w sytuacjach zagrażających bezpieczeństwu uczestników ruchu drogowego. Służą one również poprawie komfortu podróżowania. Stanowią element systemów autonomizujących prowadzenie pojazdu. W sytuacjach niebezpiecznych mogą aktywować alarmy dźwiękowe, świetlne lub haptyczne (bodźce dotykowe) w postaci wibracji kierownicy lub fotela kierowcy. W ten sposób ostrzegają o niebezpieczeństwie. Niektóre z systemów mogą samoczynnie aktywować funkcje wpływające na kierunek i prędkość pojazdu.

System automatycznego hamowania AEB (ang. *Autonomous Emergency Braking*) monitoruje obszar przed pojazdem i aktywuje hamowanie pojazdu w przypadku wykrycia przeszkody. Coraz większa

liczba pojazdów, nawet niższych klas, jest wyposażana w ten właśnie system. Według badań Euro NCAP (europejska instytucja prowadząca testy zderzeniowe pojazdów) umożliwia on uniknięcie 38% kolizji. Zdobycie najwyższej oceny w testach NCAP nie jest możliwe, jeżeli pojazd nie jest wyposażony w ten właśnie system.

Jednym z systemów ADAS jest również **ACC — adaptacyjny tempomat** (ang. *Adaptive Cruise Control*) będący wersją rozwojową tradycyjnego tempomatu CCS (ang. *Cruising Control System*). W ACC pierwszej generacji wykorzystano radar, dzięki któremu po wykryciu przeszkody pojazd zwalnia do 30 km/h, emitując jednocześnie sygnał ostrzegający kierowcę. Całkowite zatrzymanie pojazdu może nastąpić w wyniku reakcji kierowcy. Druga generacja ACC może wykorzystywać do pozyskiwania danych radar, lidar i samochodowe kamery o wysokiej rozdzielczości, jednocześnie współpracując z systemami ABS, ASR i ESP (odpowiednio: system przeciwdziałający blokowaniu kół pojazdu podczas hamowania, system przeciwdziałający poślizgowi podczas ruszania i system stabilizacji toru jazdy podczas poślizgu). W systemie drugiej generacji stosowany jest dodatkowy czujnik krótkiego zasięgu. System umożliwia nie tylko zmniejszenie prędkości pojazdu do 30 km/h, jak to miało miejsce w systemach pierwszej generacji, ale zatrzymanie pojazdu i ponowne jego rozpędzenie. Najbardziej rozbudowane wersje tego systemu umożliwiają również analizę przebiegu drogi i odczytywanie wartości ograniczenia prędkości na znakach drogowych.

System kontroli odstępu (ang. *Front Assist*) z funkcją awaryjnego hamowania i ochrony pieszych i rowerzystów stanowi rozwiązanie wysyłające kierowcy sygnały ostrzegawcze — dźwiękowe i wizualne. W przypadku braku reakcji kierowcy system może zatrzymać pojazd lub ograniczyć jego prędkość w celu zminimalizowania skutków kolizji. System może wykorzystywać czujniki radarowe, laserowe lub kamery.

Asystent pasa ruchu (ang. *Lane Assist*) monitoruje pozycję pojazdu w obrębie zajmowanego pasa ruchu. W przypadku najechania lub przekroczenia linii ograniczającej pas bez włączonego kierunkowskazu takie zdarzenie jest interpretowane przez system jako niezmierzona zmiana pasa ruchu. Wówczas aktywuje się alarm ostrzegający kierowcę o tym fakcie, a w niektórych rozwiązaniach system może korygować kierunek jazdy, jednocześnie nie ograniczając możliwości kierowania pojazdem. Stopień czułości systemu może być dostosowany do indywidualnych preferencji kierowcy.

System rozpoznawania znaków drogowych umożliwia automatyczne rozpoznawanie pionowych znaków drogowych. Informacja o aktualnym ograniczeniu prędkości jest wyświetlana na tablicy rozdzielczej pojazdu. Jednocześnie jest ona przesyłana do innych systemów, np. ACC czy systemu nawigacji.

System monitorowania martwego pola służy do wykrywania pojazdów poruszających się sąsiadującymi pasami ruchu, które mogłyby być niewidoczne dla kierowcy. W przypadku wykrycia pojazdu kierowca jest informowany o tym fakcie przez włączenie ostrzegawczego sygnału świetlnego po stronie wykrytego pojazdu. Najczęściej jest to dioda LED lub symbol ostrzegawczy koloru pomarańczowego umieszczony w pobliżu lub bezpośrednio w bocznym lusterku pojazdu.

System ostrzegania o ruchu poprzecznym z tyłu pojazdu monitoruje obszar podczas cofania i ostrzega kierowcę. W przypadku braku reakcji może samoczynnie zatrzymać pojazd.

Inteligentny asystent bezpieczeństwa (ang. *Emergency Assist*) stanowi grupę rozwiązań monitorujących zachowanie kierowcy. Możliwe jest monitorowanie zmęczenia i rozproszenia uwagi kierowcy. Systemy te są intensywnie rozwijane. Badane są m.in. sposoby diagnozowania stanu kierowcy czy skutecznego sposobu jego informowania o zagrożeniu (sygnały dźwiękowe, wzrokowe lub czuciowe — tzw. haptyczne).

Asystent podróży (ang. *Travel Assist*) jest funkcją jazdy zautomatyzowanej. System łączy ACC i opisany wcześniej *Lane Assist*. Dzięki temu możliwe jest utrzymanie pojazdu w obrębie pasa ruchu i dostosowanie prędkości do warunków i ruchu na drodze. Obecnie w system ten są wyposażane pojazdy wyższych klas oraz pojazdy zautomatyzowane, do których zalicza się m.in. auta takie jak Tesla.

Pojazdy zautomatyzowane

Mówiąc o automatyzacji i autonomizacji, należałoby się zastanowić, czym te pojęcia się różnią. W jednym z artykułów szczegółowo omówiono ten temat (Pindelski, 2017). Rozwiązania, o których możemy mówić, że są „automatyczne", stanowią pierwowzór systemów „autonomicznych". Według autora system automatyczny działa na podstawie wcześniej zdefiniowanych skryptów i algorytmów, a jego sposób działania jest przewidywalny dzięki temu, że dokonuje on wyboru różnego rodzaju opcji, które zostały wcześniej zdefiniowane i znany jest algorytm, zgodnie z którym taki wybór jest dokonywany. Jeżeli sposób postępowania nie będzie dostatecznie zdefiniowany, system automatyczny przestanie działać, oczekując na decyzję operatora (człowieka). Natomiast system autonomiczny podejmie decyzję działania, nie czekając na ingerencję „z zewnątrz". Granica między systemami jest jednak nieoczywista, tym bardziej że na etapie projektowania (programowania) można zdefiniować zestaw czynności, które powinien wykonać system automatyczny w opisanym powyżej przypadku (Pindelski, 2017). Wówczas sam efekt je-

go działania może być zbliżony lub identyczny z działaniem systemu autonomicznego. System autonomiczny przypomina wobec tego sposób funkcjonowania człowieka. Jednocześnie autorzy, powołując się na dane literaturowe, wskazują, że nawet 45% czynności wykonywanych współcześnie przez ludzi (nie tylko czynności związanych z prowadzeniem pojazdu) może być zautomatyzowanych (Pindelski, 2017).

W literaturze związanej w pojazdami autonomicznymi wciąż rozważa się dwie koncepcje w zakresie automatyzacji pojazdów, w ramach których specjaliści zastanawiają się, które rodzaje czujników i bazujących na precyzyjnych modelach algorytmów przetwarzania danych powinny być zastosowane. Alternatywnie — czy należy używać podejścia wykorzystującego sztuczną inteligencję? (Bojarski i in., 2016). Problem automatycznego sterowania dowolnym systemem dotychczas rozwiązywano z wykorzystaniem klasycznej teorii sterowania, w ramach której stosowano analizę fizycznego procesu, a następnie syntezę sterownika (Ainsalu i in., 2018). Jedynie wtedy, kiedy proces fizyczny, którym chcemy sterować, może być całkowicie poznany i opisany formalnie, możliwa jest synteza odpowiedniego sterownika. W przypadku pojazdów zautomatyzowanych zachowanie obiektu fizycznego, jakim jest pojazd i jego otoczenie, może znacznie się zmienić m.in. w zależności od parametrów geometrycznych pojazdu, wielkości i rozmieszczenia ładunku, zmiany współczynnika toczenia i tarcia opony o nawierzchnię drogi (np. na skutek zmiany warunków atmosferycznych). Odpowiedni model, uwzględniający tak dużą liczbę zmiennych w procesie syntezy sterownika pojazdu, jest często uważany za zbyt skomplikowany, aby można było w tym przypadku zastosować klasyczną teorię sterowania (Ainsalu i in., 2018).

Modele poszczególnych procesów zachodzących w czasie jazdy, opracowane dla wielu pojazdów, są obecnie dobrze znane i wdrożone w ramach zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy (ADAS), takich jak „inteligentny" tempomat, system automatycznego hamowania, asystent utrzymania pasa ruchu (Winner i Schopper, 2014). Z drugiej strony podejście z zastosowaniem sztucznej inteligencji uznaje pojazd za tzw. czarną skrzynkę (ang. *black box*), co powoduje automatyczne zbudowanie milionów połączeń między danymi wejściowymi i wyjściowymi, eliminując złożony proces analizy i syntezy sterownika. Taka metoda okazuje się skuteczna w wielu praktycznych zastosowaniach dzięki wysokiemu poziomowi adaptacji i podejściu na zasadzie abstrakcji. Główną potrzebą w takim przypadku jest duża liczba danych wejściowych i ich „etykietowanie" w celu zbudowania znanych połączeń między wejściem a wyjściem systemu. Dzięki zastosowaniu uczenia maszynowego rozwiązywalne stają się zadania takie jak skuteczne rozpoznawanie obiektów i możliwość „oceny" otoczenia. Daje to wymagany poziom „inteligencji" w zdecydowanej większości przypadków, jednak powoduje trudności w przypadkach szczególnych. W efekcie najbardziej rozsądną koncepcją w odniesieniu do pojazdów autonomicznych jest scenariusz, który nie wyklucza ani jednego, ani drugiego z opisanych podejść w zakresie automatyzacji. Taki punkt widzenia obejmuje klasyczne sterowanie niskiego poziomu i analizę na wysokim poziomie sztucznej inteligencji, wykorzystywaną do wspierania podejmowania decyzji (Ainsalu i in., 2018). Wobec tego prawidłowo zadane pytanie dotyczy poziomu, na jakim powinna być wdrożona sztuczna inteligencja. Najbardziej konserwatywne podejście przewiduje zastosowanie metod sztucznej inteligencji do wykonywania zadań na wysokim poziomie abstrakcji, ograniczając jej rolę do narzędzia służącego do wykrywania i rozpoznawania obiektów — np. pieszego, rowerzysty, pojazdu lub innych przeszkód. Wówczas funkcje sterowania niskiego poziomu i zagadnienia związane z bezpieczeństwem są nadal wprowadzane z wykorzystaniem klasycznej teorii sterowania (Ainsalu i in., 2018).

Ze względu na obszar, w którym porusza się pojazd, stosuje się różne metody nawigacji. W jednym przypadku mogą do tego służyć urządzenia nawigacji satelitarnej (GNSS), a w innym — liczniki przebiegu i systemy wizualne. W systemach nawigacji satelitarnej, w celu zwiększenia dokładności pomiaru, mogą być stosowane naziemne stacje bazowe, które poprawiają pomiar pozycji pojazdu, umożliwiając lokalizację z dokładnością do kilku centymetrów. Wadą tego rozwiązania jest wrażliwość na odbicia sygnału od gęstej infrastruktury miejskiej, drzew, a także utrata sygnału w tunelach, kanionach, górach itp. Częściowo problem ten rozwiązuje integracja systemu GNSS z modułem nawigacji inercyjnej. Moduł ten dokonuje pomiaru prędkości kątowej bryły pojazdu i przyspieszeń liniowych z wykorzystaniem akcelerometru i natężenia pola magnetycznego ziemi (magnetometr). Rozwiązanie takie ma również ograniczenia, ponieważ wraz z upływem czasu kumuluje się błąd pomiaru. Może ono zatem krótkoterminowo poprawiać dokładność głównego systemu ustalania pozycji pojazdu. Mimo że system nawigacji satelitarnej może bezpośrednio dokonywać pomiaru pozycji pojazdu, częstotliwość z zakresu 1–20 Hz, z jaką jest ona wyznaczana, nie jest zadowalająca (Ainsalu i in., 2018). Problem ten próbuje się rozwiązać, stosując zestawy kamer i laserów do pozycjonowania pojazdu w otaczającej go przestrzeni, podobnie jak to robi człowiek, używając wzroku do oceny odległości od różnych elementów swojego otoczenia. Takie rozwiązanie poprawia jakość pozycjonowania dzięki rekonstrukcji otoczenia pojazdu i jest stosowane w większości pojazdów autonomicznych poszczególnych dostawców. Technika ta znana jest również jako SLAM lub jednoczesna lokalizacja i mapowanie (ang. *Simultaneous Localization and*

Rysunek 1
Autobus zautomatyzowany firmy Navya (a) i firmy Easy Mile (b)

a)



b)



Źródło: United Nations, 2019.

Mapping) (Ainsalu i in., 2018; Leśko i Guzik, 2000; Bloomberg, 2018). Technika SLAM umożliwia jednoczesną ocenę położenia pojazdu i budowanie mapy otoczenia. Rozwiązania te są na tyle szybkie, że częstotliwość ich aktualizacji wynosi nawet 2 kHz. Technologia ta obecnie dynamicznie się rozwija, a jej zastosowanie nie jest ograniczone jedynie do pojazdów autonomicznych. Trajektoria ruchu pojazdu może być korygowana po każdej ocenie jego położenia, w ramach pętli zamkniętej (Ainsalu i in., 2018; Neumann, 2017). Jednak w praktyce stosuje się zamiennie dwa rozwiązania wykorzystujące GNSS (m.in. autobusy firmy Navya) lub SLAM (m.in. autobusy firmy EasyMile).

We wdrażaniu pojazdów zautomatyzowanych dominują dwa podejścia — bazujące na pojazdach lub na infrastrukturze. W pierwszym pojazd musi być tak wyposażony i zaprogramowany, ażeby możliwa była jazda w każdych warunkach drogowych i atmosferycznych. W przypadku podejścia bazującego na infrastrukturze zakłada się, że to ona ma być podstawą do autonomicznego poruszania się pojazdów. Pośrednim rozwiązaniem jest budowa pojazdu zautomatyzowanego, którego działanie wspierane jest przez rozwiązania należące do infrastruktury. Ich zadaniem jest poprawa skuteczności i niezawodności systemów pojazdowych. Takie rozwiązanie zastosowano na lotnisku Heathrow w Londynie. Wydzielone obszary infrastruktury drogowej z jednej strony minimalizują liczbę możliwych scenariuszy użycia pojazdu, z drugiej podnoszą koszty całego projektu, powodując dodatkowo wyłączenie obszarów dróg z użytkowania przez pojazdy inne niż zautomatyzowane. W pewnych warunkach, np. w gęsto zaludnionych obszarach i na długich drogach szybkiego ruchu, takie rozwiązania mogą okazać się nieakceptowalne (Ainsalu i in., 2018). Z drugiej strony znane są już pojazdy, które w założeniu powinny poruszać się w trybie zautomatyzowanym po większości odcinków dróg publicznych. Zdarzają się jednak kolizje pojazdów zautomatyzowanych wynikające z niedoskonałości systemów pokładowych, co powoduje, że konieczne jest ich dalsze doskonalenie lub poszukiwanie alternatywnych rozwiązań.

Przykładowe miejskie pojazdy zautomatyzowane

Prace nad automatyzacją transportu dotyczą nie tylko samochodów osobowych, ale również pojazdów specjalnych (np. pojazdów oczyszczania miasta) i autobusów. Ze względów bezpieczeństwa dobrym rozwiązaniem na obecnym poziomie zaawansowania są prace i testy nad automatyzacją małych autobusów miejskich, które mogą poruszać się w trybie wahadłowym na krótkich trasach, rozwijając niewielką prędkość. Do tego typu pojazdów należą EZ10 firmy EasyMile oraz pojazd firmy Navya (rysunek 1).

Pierwszy z nich był testowany w ramach projektu SOHJOA, realizowanego w latach 2016–2018 na trzech różnych trasach w Espoo w Helsinkach i Tampere w Finlandii (Ainsalu i in., 2018). Kolejne testy były realizowane w ramach SOHJOA Baltic. Wybierając trasy testowe, założono, że powinny być one zlokalizowane w uczęszczanych obszarach miasta, ażeby zapewnić jednocześnie jego promocję. Uwzględniono, że trasa przejazdu powinna uwzględniać rzeczywistą potrzebę transportową na danym obszarze. Ze względów bezpieczeństwa założono, że na wybieranym obszarze powinno obowiązywać ogra-

Tabela 1
Porównanie pojazdów zautomatyzowanych EasyMile EZ10 (wersja z 2015 r.) i Navya ARMA

Nazwa parametru	EasyMile EZ10	Navya ARMA
Temperatura pracy	od –10°C do +40°C	od –10°C do +35°C
Wilgotność	< 95%	< 95%
Prędkość wiatru (stała)	< 55 km/h	< 55 km/h
Porywy wiatru	< 85 km/h	< 85 km/h
Deszcz	< 5 mm/h	< 5 mm/h
Maksymalna warstwa śniegu na drodze	(lekki śnieg) 10 cm	(lekki śnieg) 10 cm
Oblodzenie	niedopuszczalne	niedopuszczalne
Mgła/para/dym	brak	brak

Źródło: Ainsalu i in., 2018.

niczenie prędkości do 30–40 km/h z powodu względnej prędkości pojazdów jadących z naprzeciwka. Miało to ograniczyć skutki ewentualnej kolizji. Analizując trasę przejazdu, brano pod uwagę możliwość występowania wyjazdów z parkingów, które mogłoby stanowić zagrożenie, szczególnie w przypadku niedostatecznego oznakowania. Uwzględniano też możliwość pojawienia się pojazdów zaparkowanych na drodze. Poszukując właściwej trasy testowej, brano pod uwagę możliwe utrudnienia ruchu powodowane przez wolno poruszające się pojazdy autonomiczne, które mają szerokość około 2 m i mogą utrudniać ruch w niektórych miejscach. Dodatkowym utrudnieniem był fakt, że pojazd EZ10 firmy EasyMile nie ma możliwości komunikowania się z systemem sygnalizacji świetlnej, co może komplikować trasę przejazdu i wydłużać proces przygotowania do testów. Wybierając trasę przejazdu, uwzględniano konieczność zapewnienia możliwości ładowania pojazdu w temperaturze powyżej 0°C, prądem o natężeniu do 16 A. Ze względu na sposób nawigacji pojazdu wykorzystujący technologię satelitarną GNSS konieczne było zapewnienie dostatecznej jakości sygnału na całej trasie przejazdu, jak również przeprogramowanie systemu nawigacji pojazdu w przypadku zmiany trasy.

W tabeli 1 przedstawiono porównanie dwóch najpopularniejszych miejskich pojazdów zautomatyzowanych EasyMile EZ10 i Navya ARMA. W przypadku obu pojazdów ich wdrożenie na poszczególnych trasach przejazdu musi być dokonane przez producenta.

Pojazd ARMA może się poruszać po obszarach o małym natężeniu ruchu, wyłącznie z wykorzystaniem nawigacji satelitarnej, co powoduje jednak, że na trasie jego przejazdu nie mogą się znajdować mosty, drzewa i inne przeszkody wpływające na jakość sygnału nawigacji satelitarnej. Niebezpieczne jest zjawisko wielodrożności sygnału, które poprzez odbicia sygnału od elementów konstrukcyjnych budynków, skarp, nasypów lub od drzew wpływa na jakość pozycjonowania. Jest to szczególnie zauważalne w miastach, w których występuje wysoka zabudowa. Kiedy z opisanych wyżej względów do pozycjonowania pojazdu ARMA nie może być użyty sygnał satelitarny, pojazd może wykorzystywać lidar (wielowiązkowy skaner laserowy). Gdy ARMA jest wyposażony w moduł komunikacji z sygnalizacją świetlną, może samodzielnie pokonywać skrzyżowania o układzie „T" lub ronda, poruszając się z prędkością 25 km/h. Można również zaprogramować pojazd w taki sposób, że przejazd przez skrzyżowanie będzie wymagał zatwierdzenia przez operatora.

W odróżnieniu od tradycyjnych pojazdów, które po opuszczeniu linii produkcyjnej są w pełni skonfigurowane i ich modyfikacja może być dokonywana tylko w niewielkim zakresie (np. doposażenie w czujniki parkowania), pojazdy autonomiczne mogą być modyfikowane m.in. poprzez zastosowanie coraz nowszych wersji oprogramowania. Możliwa jest również modułowa wymiana czujników pojazdu i elementów wykonawczych. W takim ujęciu pojazd — jako urządzenie mechaniczne — staje się nośnikiem nowych technologii. Jednocześnie coraz większego znaczenia nabiera jego wyposażenie elektroniczne w postaci czujników i podzespołów przetwarzających bardzo duże zbiory danych. Wymagane są do tego duże moce obliczeniowe. Być może w przyszłości będą możliwe zmiany w architekturze/konfiguracji pojazdu, ponieważ pojazdy zautomatyzowane (w przyszłości w pełni autonomiczne) są zbudowane z wykorzystaniem architektury modułowej. Można wyróżnić cztery warstwy tej architektury:

- pojazd z urządzeniami fizycznymi zapewniającymi połącznie z innymi warstwami architektury oraz system operacyjny z urządzeniami wykonawczymi zapewniającymi możliwość kierowania pojazdem,
- warstwę sieciową wraz z urządzeniami fizycznymi (czujniki radarowe, mikrofalowe i ultradźwiękowe

oraz kamery i lidary) oraz skojarzone z nimi mechanizmy logicznego przetwarzania informacji na poziomie sprzętowym,
- warstwę usług realizowanych przez aplikacje w celu gromadzenia, przetwarzania i przechowywania informacji związanych m.in. z pokonywanymi przez pojazd trasami przejazdu, natężeniem ruchu drogowego, infrastrukturą drogową i dostępnością miejsc parkingowych,
- warstwę zawierającą treści niezbędne do funkcjonowania i doskonalenia (procesu uczenia) systemów autonomizujących pojazdu, związane z obrazem i dźwiękiem oraz metadanymi, znacznikami treści i innymi niezbędnymi informacjami.

Konsekwencją zastosowania warstwowej i modułowej architektury pojazdu autonomicznego będzie zmiana możliwości związanych z tradycyjnym (nieautonomicznym) pojazdem. Do tej pory pojazdy były produkowane i serwisowane przez producentów i serwisy samochodowe. Dzięki bardziej rozwiniętemu środowisku informatycznemu pojazdów zautomatyzowanych możliwy będzie udział większej grupy dostawców rozwiązań i tworzenie rozwiniętych platform wokół produktu, jakim jest pojazd zautomatyzowany/autonomiczny.

Rozwój technologii C-ITS

Wdrożenie pojazdów autonomicznych — jako rozwiązanie z zakresu tzw. inteligentnych systemów transportowych — będzie stanowiło podstawę do rozwoju tego typu rozwiązań. Dzięki technologiom z zakresu kooperacyjnych inteligentnych systemów transportowych C-ITS (ang. *Cooperative Intelligent Transport Systems*), możliwa będzie wymiana danych między pojazdami oraz pojazdami i infrastrukturą drogową. W wyniku tych zmian oprócz szybkiego reagowania na zdarzenia drogowe, jazdy w peletonie (ang. *platooning*) i innych zalet (Kamiński, 2020), możliwe będzie zastosowanie tzw. inteligentnych skrzyżowań. W obrębie skrzyżowań dochodzi obecnie do wielu kolizji. Są one także istotne z punktu widzenia efektywności ruchu drogowego, ponieważ wymagają zatrzymania pojazdów i ograniczenia prędkości, ograniczając swobodny ruch pojazdów. W związku z tym już w 2012 r. informatycy z University of Texas w Austin opracowali koncepcję inteligentnych skrzyżowań. Nie wymagałyby one instalowania sygnalizatorów świetlnych, znaków „STOP" (B-20), „ustąp pierwszeństwa przejazdu" (A-7) i malowania znaków poziomych na drodze. Zgodnie z tą koncepcją informacja przekazywana dotychczas kierowcom w tradycyjny sposób byłaby przekazywana do pojazdu dzięki komunikacji pojazdu z infrastrukturą zewnętrzną. Ocenia się, że pojazd niepołączony (niewyposażony w rozwiązania C-ITS) będzie w przyszłości stanowił najsłabsze ogniwo w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa ruchu drogowego. Jak przewiduje think tank Nordic Communications Corporation, tego typu pojazdy będą coraz mniej pożądane na drogach (Nordic Communications Corporation, 2016). Autorzy raportu twierdzą również, że oprócz inwestycji w infrastrukturę drogową wiele długoterminowych inwestycji społecznych będzie wymagało przedefiniowania. Jest to związane z rosnącymi inwestycjami w technologie autonomizujące jazdę i ze spadkiem cen używanych podzespołów tych systemów. Autorzy przewidują, że opcjonalne dzisiaj wyposażenie pojazdów stanie się obowiązkowe. Potwierdzeniem tego mogą być trwające obecnie prace gremiów na poziomie Komisji Europejskiej i grup Europejskiej Komisji Gospodarczej — EKG ONZ.

W 2017 r. naukowcy z Arizona State University zaproponowali metodykę zarządzania ruchem na skrzyżowaniu nazwaną Crossroads, wykazując, że jest ona odporna na opóźnienia w sieci C-ITS i maksymalną zwłokę w sterowaniu (ang. *Worst-Case Execution Time*) wprowadzaną przez sterownik na skrzyżowaniu. W 2018 r. zaproponowano ulepszony algorytm odporny na niedopasowanie modelu i zakłócenia zewnętrzne.

Problemem podczas wdrażania, dotyczącym obu opisanych powyżej rozwiązań, będzie początkowo mała liczba pojazdów wyposażonych w odpowiednie urządzenia umożliwiające współpracę z systemami sterującymi na skrzyżowaniach. Barierę we wdrożeniu będą również stanowiły obawy użytkowników pojazdów związane z prawem do prywatności i ochrony danych osobowych.

Doskonalenie pojazdów zautomatyzowanych

Rozwiązania stosowane w pojazdach zautomatyzowanych wykorzystują metody sztucznej inteligencji i głębokiego uczenia maszynowego. Sztuczne sieci neuronowe wymagają pokonywania milionów kilometrów, ażeby przetworzone przez nie dane pochodzące z otoczenia pojazdu stanowiły wystarczającą próbę (zbiór danych) do nauczenia sieci sterowania pojazdem w każdych lub prawie każdych warunkach drogowych. W celu przyspieszenia tego procesu dane mogą być zbierane przez flotę pojazdów, które wymieniają się danymi. Na przykład firma Apple zwiększyła liczbę pojazdów zbierających dane z trzech używanych w kwietniu 2017 r. do 45 wykorzystywanych w okresie do marca 2018 r. (Krok, 2018; Zac, 2018).

Aby samochód był w stanie poradzić sobie w 95% sytuacji, musi przejechać prawidłowo ok. 400 mln km. Wymagane jest przejechanie kilku milionów mil, aby pojazd był o 10–20% bezpieczniejszy od człowieka (Kaufman, 2020). W celu zwiększenia szybkości uczenia możliwe jest częściowe zastąpienie jazdy

w rzeczywistych warunkach drogowych symulacją w środowisku zamkniętym (drogi niepubliczne, miasteczka testowe) lub zastosowanie symulacji komputerowych. Symulacje komputerowe, mimo że nie zastąpią całkowicie jazdy w rzeczywistych warunkach drogowych, mają tę dodatkową zaletę, że nie wymagają stałego nadzoru kierowcy, który musi reagować w sytuacjach krytycznych w celu zapewnienia bezpieczeństwa jazdy.

Miarą doskonałości pojazdów zautomatyzowanych może być liczba dezaktywacji systemów pojazdu w celu przejęcia kontroli przez kierowcę-operatora. W 2017 r. należąca do koncernu Alphabet firma Waymo odnotowała 63 takie przypadki na 567 366 km przejechanych w trybie autonomicznym. W innym ujęciu stanowi to średnio 9006 km między kolejnymi przejęciami kontroli przez kierowcę i jest najwyższą wartością upublicznioną dotychczas przez firmę dostarczającą auta autonomiczne.

Podsumowanie

Wdrażanie idei zrównoważonej mobilności od wielu lat stanowi nieodłączny element tzw. planów mobilności miejskiej. W Polsce promowana jest inicjatywa SUMP polegająca na opracowaniu lub aktualizacji planów zrównoważonej mobilności miejskiej w taki sposób, aby zachęcić lokalne władze (samorządy) do podjęcia zintegrowanych działań mających na celu zapewnienie i rozwój mobilności w miastach. Planowanie zgodne z ideą SUMP powinno uwzględniać analizy zróżnicowanych potrzeb mieszkańców w celu poprawy jakości życia w mieście i poprawy atrakcyjności miasta, jakości powietrza i efektywniejszego wykorzystania infrastruktury. Wszystkie wymienione aspekty są zbieżne z głównymi celami wdrożenia pojazdów autonomicznych, wobec czego pojazdy te mogą być istotnym narzędziem zapewnienia zrównoważonej mobilności miejskiej.

Bibliografia/References

Ainsalu, J., Arffman, V., Bellone, M., Ellner, M., Haapamäki, T., Haavisto, N., Josefson, E., Ismailogullari, A., Lee, B., Madland, O., Madžulis, R., Müür, J., Mäkinen, S., Nousiainen, V., Pilli-Sihvola, E., Rutanen, E., Sahala, S., Schonfeldt, B., Smolnicki, P. M., Soe, R. M., Sääski, J., Szymańska, M., Vaskinn, I., Aman, M. (2018). State of the Art of Automated Buses. *Sustainability*, *10*(9), https://doi.org/10.3390/su10093118

Bloomberg (2018). *Bloomberg Aspen Initiative on Cities and Autonomous Vehicles*. Technical Report, https://avsincities.bloomberg.org/ (10.05.2018).

Bojarski, M., Del Testa, D., Dworakowski, D., Firner, B., Flepp, B., Goyal, P., Jackel, L. D., Monfort, M., Muller, U., Zhang, J., Zhang, X., Zhao, J., Zieba, K. (2016). *End to end learning for self-driving cars*, https://arxiv.org/abs/1604.07316 (15.01.2021).

Kamiński, T. (2020). Kooperacyjne Inteligentne Systemy Transportowe (C-ITS) jako rozwiązania podnoszące bezpieczeństwo i efektywność transportu drogowego. *Gospodarka Materiałowa i Logistyka*, (6), 10–18. https://doi.org/10.33226/1231-2037.2020.6.2

Kaufman, W., (2020). Liability, Safety and Infrastructure Concerns Slow Development of Self-Driving Cars. *Insurance Journal*, 5.11.2020, https://www.insurancejournal.com/news/national/2020/11/05/589778.htm (15.01.2021).

Krok, A. (2018). *Apple increases self-driving test fleet from 3 to 27*, 25.01.2018; https://www.cnet.com/roadshow/news/apple-increases-self-driving-test-fleet-from-3-to-27/ (15.01.2021).

Leśko, M., Guzik, J. (2000). *Sterowanie ruchem drogowym — sterowniki i systemy sterowania i nadzoru ruchu*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

Neumann, T. (2017). „Koncepcja zastosowania technologii RFID w transporcie drogowym". *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 2017.

Nordic Communications Corporation (2016). *Mobility* 2020 (8.01.2016).

Nowacki, G. (red.) (2008). *Telematyka transportu drogowego*. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Transportu Samochodowego.

Pindelski, M. (2017). Społeczna odpowiedzialność nowych technologii i big data. W: P. Płoszajski (red.), *Czy społeczna odpowiedzialność firmy wspomaga jej innowacyjność?* Warszawa: Oficyna Wydawnicza SGH.

United Nations (2019). *World Urbanization Prospects. The 2018 Revision*, New York.

Winner, H., Schopper, M., (2014). *Adaptive cruise control. In Handbook of Driver Assistance Systems: Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort*. Berlin: Springer.

Zac, H., (2018). Apple ramping self-driving car testing, more CA permits than Tesla and Uber. *Financial Times* (20.03.2018).

Dr hab. inż. Tomasz Kamiński

Specjalista z zakresu inteligentnych systemów transportowych i innowacyjnych rozwiązań w transporcie drogowym. Doktor habilitowany nauk technicznych. Absolwent studiów MBA w Akademii Leona Koźmińskiego w Warszawie. Członek Polskiego Stowarzyszenia Telematyki Transportu i Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych. Członek Założyciel stowarzyszenia „Ekomobilność" oraz członek Stowarzyszenia ITS Polska. Kierownik i uczestnik 34 krajowych i międzynarodowych projektów badawczych. Uczestnik Komitetu Technicznego nr 17 Polskiego Komitetu Normalizacyjnego. Autor około 250 publikacji naukowych i publikacji o charakterze popularyzatorskim, a także współautor monografii i podręczników z dziedziny transportu. Pasjonat modelarstwa lotniczego.

Dr hab. inż. Tomasz Kamiński

A specialist in the field of Intelligent Transport Systems and innovative solutions in road transport. Habilitated doctor of technical sciences. A graduate of MBA studies at the Kozminski University in Warsaw. Member of the Polish Association of Transport Telematics and the Polish Engine for Combustion Engines. Founder member of the "Ekomobilność" association and member of the ITS Polska Association. Manager and participant of 34 national and international research projects. Participant of Technical Committee No. 17 of the Polish Committee for Standardization. Author of about 250 scientific and popularizing publications, as well as co-author of monographs and textbooks in the field of transport. A passionate of aircraft RC models.