

OCENA KORZYŚCI ZASTOSOWANIA NAPĘDÓW HYBRYDOWYCH W POJAZDACH KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

Jednym ze sposobów ograniczenia negatywnego oddziaływania transportu na środowisko jest wzrost udziału pojazdów z napędami elektrycznymi lub hybrydowymi. Napędy te charakteryzują się niższym poziomem emisji substancji szkodliwych w spalinach oraz mniejszą energochłonnością niż pojazdy z napędem konwencjonalnym. W artykule przedstawiono oszacowanie wartości zużycia paliwa i energii rekuperowanej, uzyskane na podstawie badań symulacyjnych opartych na testach SORT dla modeli autobusów miejskich z napędem konwencjonalnym i hybrydowym.

WSTĘP

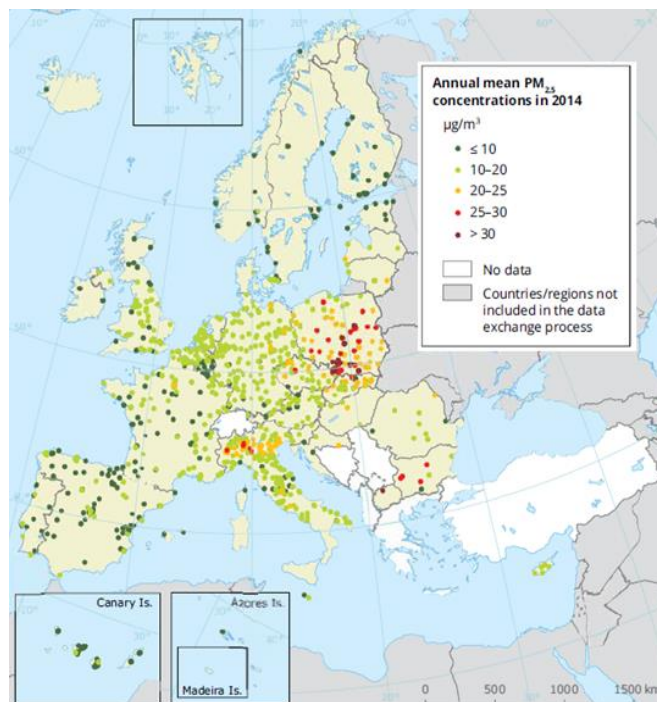
W polskich miastach coraz bardziej dotkliwy staje się problem smogu. Przyczyną powstawania tego zjawiska jest unoszenie się w powietrzu pyłów zawieszonych PM_{2,5} i PM₁₀, a także tlenków siarki, tlenków azotu, tlenku węgla, benzo(a)pirenu. Znaczący udział w powstawaniu smogu ma transport samochodowy.

Zgodnie z raportem Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) długotrwałe narażenie na działanie pyłu zawieszzonego PM_{2,5} powoduje wzrost liczby zgonów z powodu chorób i nowotworów układu oddechowego i krążenia oraz wzrost ryzyka nagłych przypadków wymagających hospitalizacji, związanych z m.in. nasileniem objawów astmy, ostrej reakcji układu oddechowego, czy osłabienia czynności płuc [20]. Według raportu Europejskiej Agencji Środowiska (EEA) w 2015 r. w krajach UE przez narażenie na wysokie stężenie pyłu PM_{2,5} co roku umiera przedwcześnie średnio 467 tysięcy osób. Z kolei przez zbyt wysokie stężenie dwutlenku azotu rocznie umiera ok. 70 tysięcy Europejczyków. Według raportu EEA w Polsce z powodu wysokiego poziomu PM_{2,5} przedwcześnie umiera ok. 48 tysięcy osób, natomiast z powodu nadmiernego stężenia dwutlenku azotu - 1600 osób [17]. Na rys. 1 przedstawiono średnie roczne stężenia pyłu PM_{2,5} w krajach UE. Według norm WHO średnie roczne stężenie pyłu PM_{2,5} nie powinno przekraczać 10 µg/m³. Zgodnie z raportem EEA średnia roczna wartość stężenia pyłu w 2015 r. w Polsce wyniosła 22,8 µg/m³.

Ruch pojazdów samochodowych, szczególnie nasilony w godzinach szczytu, przyczynia się do pogorszenia jakości powietrza w miastach. Duży udział w emisji szkodliwych związków mają samochody ciężarowe, do których zaliczane są także autobusy miejskie. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w 2015 roku w Polsce udział samochodów ciężarowych wynosił 14% wszystkich pojazdów. Emisja pyłów zawieszonych, pochodzących z pojazdów ciężarowych, jest o 7% wyższa niż emisja pyłów samochodów osobowych [18][19].

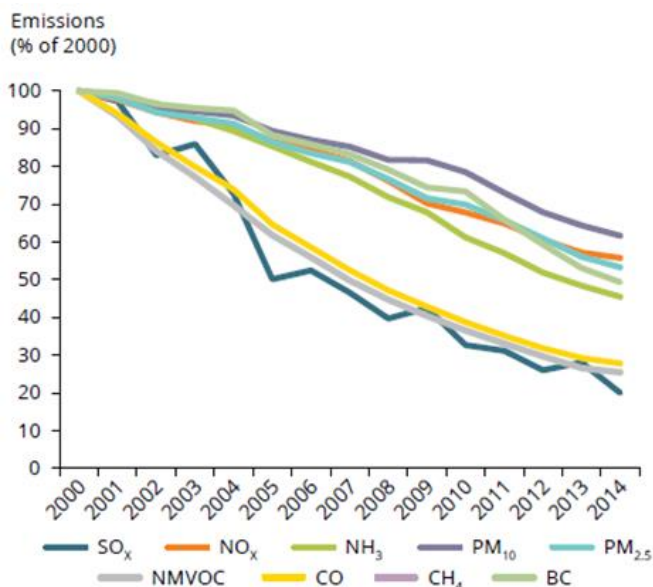
W Unii Europejskiej warunkiem uzyskania homologacji dla pojazdów ciężkich jest spełnienie standardów emisyjnych wprowadzonych w normach Euro. Zgodnie z tymi procedurami na hamowni silnikowej wykonywane są badania jednostek spalinowych w zdefiniowanych cyklach pomiarowych statycznych i dynamicznych. Dzięki wprowadzeniu restrykcyjnych norm oraz zastosowaniu nowoczesnych rozwiązań w jednostkach spalinowych na przestrzeni ostatnich lat poziom emisji szkodliwych związków spalin maleje

(rys.2.). Jednym ze sposobów poprawienia jakości powietrza w miastach jest ograniczenie liczby środków transportu wyposażonych silniki zasilane paliwami konwencjonalnymi i promocja pojazdów niskoemisyjnych. W tym celu UE wspiera programy i projekty dofinansowujące zakup środków transportu publicznego wyposażonych w napędy alternatywne (elektryczny, hybrydowy) lub zasilanych paliwami alternatywnymi, tj. paliwami gazowymi (CNG, LPG), biopaliwami, alkoholami, czy wodorem.



Rys. 1. Średnie roczne stężenie pyłu PM_{2,5} w krajach UE [17]

Celem artykułu jest oszacowanie poziomu zużycia paliwa przez pojazdy komunikacji miejskiej z napędem konwencjonalnym i hybrydowym badanych w testach SORT przy użyciu pakietu symulacyjnego ADVISOR.



Rys. 2. Emisja substancji szkodliwych generowanych przez sektor transportu [17]

1. NAPĘDY ALTERNATYWNE

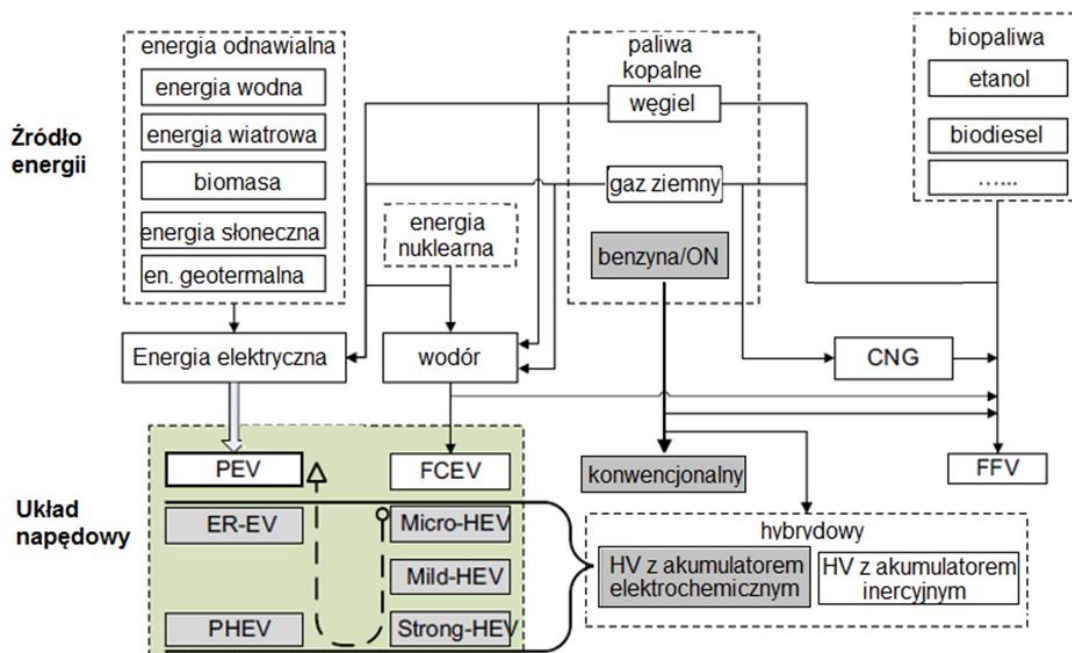
W napędzie hybrydowym (HV) współpracują co najmniej dwa układy napędowe zasilane różnymi źródłami energii. W autobusach miejskich obecnie najczęściej stosowane są układy spalinowo-elektryczne (HEV). W układzie tym silnik spalinowy współpracuje z silnikiem elektrycznym pobierającym energię z akumulatora elektrochemicznego (rys. 3.). Budowa hybrydowego układu napędowego może zależeć od wielu rozwiązań, np. liczby maszyn elektrycznych, rodzaju i liczby urządzeń sprzęgających i przekładni mechanicznych, sposobu połączenia elementów i strategii zarządzania energią. Klasyfikację układów hybrydowych można przeprowadzić ze względu na stopień (poziom) elektryfikacji (electrification level).

Kryterium (wyznacznikiem) tej klasyfikacji jest pojemność energetyczna zasobnika, która przekłada się bezpośrednio na wartości energii wydatkowanej i rekuperowanej [4]. W tej klasyfikacji wyróżnia się [11]:

- micro HEV – w układzie silnik elektryczny nie ma możliwości przekazywania energii do kół pojazdu, jest wykorzystywany do zatrzymywania i uruchamiania silnika spalinowego w określonych warunkach ruchu (system Start-Stop);
- mild HEV – w układzie tym zastosowanie napędu elektrycznego ma charakter wspomagający. Zadaniem silnika elektrycznego jest odzyskiwanie energii podczas hamowania i wspomaganie silnika spalinowego podczas rozpędzania samochodu;
- strong HEV – w napędzie tym istnieje możliwość przekazywania energii do kół wyłącznie przez silnik elektryczny lub jednocześnie przez silnik spalinowy i elektryczny;
- plug-in HEV (PHEV) – napęd hybrydowy, w którym zasobnik energii może zostać dodatkowo doładowywany z sieci elektrycznej.

Do napędów hybrydowych zalicza się także układy, w których współpracują ogniwa paliwowe i silnik elektryczny, czerpiący energię z akumulatora elektrochemicznego (FCEV). W ogniwie wodorowym energia powstaje wskutek reakcji utleniania wodoru. Produktem tego procesu jest para wodna. Szacuje się, że obecnie koszt eksploatacji autobusu z ogniwami wodorowymi jest porównywalny z kosztem eksploatacji autobusu z silnikiem spalinowym. Barięrou rozwoju dla tego typu napędów jest przede wszystkim wysoki koszt budowy stacji ładowania [3].

W napędach hybrydowych wyróżnia się dwie główne konfiguracje: szeregową i równoległą, ewentualnie ich kombinacje. W konfiguracji szeregowej silnik spalinowy połączony jest z generatorem, który przekształca energię cieplną ze spalania paliwa w energię elektryczną i przekazuje ją do akumulatora. Trakcyjny silnik elektryczny pobiera energię z zasobnika i za pośrednictwem przekładni lub bezpośrednio przekazuje ją do kół. Konfiguracja ta charakteryzuje się brakiem mechanicznego połączenia pomiędzy



Rys. 3. Alternatywne układy napędowe [4]

HV – napęd hybrydowy (Hybrid Vehicle), EV – napęd elektryczny (Electric Vehicle), PEV – napęd czysto elektryczny (Pure Electric Vehicle), HEV – napęd spalinowo-elektryczny (Hybrid Electric Vehicle), FCEV – napęd hybrydowy z ogniwami wodorowymi i akumulatorem elektrochemicznym (Fuel Cell Electric Vehicle), PHEV – napęd hybrydowy typu plug-in (Plug-in Hybrid Electric Vehicle), ER-EV – napęd elektryczny o wydłużonym zasięgu (Extended Range Electric Vehicle), FFV – pojazdy z silnikami spalinowymi zasilane paliwami alternatywnymi (Fuel Flexible Vehicle)

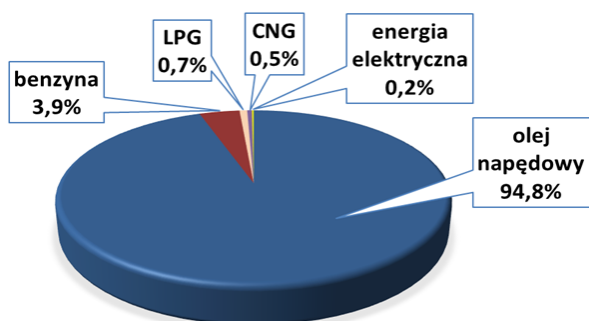
silnikiem spalinowym a kołami napędowymi. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest uzyskanie największych oszczędności paliwa, gdyż przez większą część cyklu jazdy silnik pracuje w wąskim zakresie prędkości obrotowej i obciążenia. Podczas hamowania możliwe jest odzyskiwanie energii, wtedy elektryczny silnik napędowy pracuje jako generator, dostarczając energię do ładowania akumulatorów [1][2][5][7][12][13][14].

W równoległych napędach hybrydowych silnik spalinowy wspomagany jest przez silnik elektryczny. Energia z obu źródeł jest łączona i sumowana przez przekładnię mechaniczną,

a następnie przekazywana do kół. W hybrydzie równoległej funkcję generatora pełni maszyna elektryczna, która spełnia także rolę generatora podczas hamowania oraz w sytuacji, gdy silnik spalinowy pracuje z większą mocą niż wymagają tego warunki trakcyjne. W konfiguracji tej silnik spalinowy jest podstawowym źródłem energii. Jeśli zapotrzebowanie przekracza moc silnika spalinowego, niedobór mocy pokrywa silnik elektryczny, pobierający energię z akumulatorów [1][2][9][10][13].

Udział autobusów z napędem elektrycznym (PEV) w taborze przedsiębiorstw komunikacji publicznej stale wzrasta. Charakteryzują się one niskim poziomem emisji związków szkodliwych w spalinach i niższym poziomem hałasu. Do pojazdów z napędem elektrycznym zalicza się także trolejbusy, które napędzane są energią elektryczną bezpośrednio pobieraną z sieci trakcyjnej za pomocą pantografu. Pojazdy te mogą być dodatkowo wyposażone w zasobnik energii, który pozwala na jazdę bez pobierania energii z sieci jeśli wystąpi taka konieczność (ER-EV).

Obecnie w autobusach miejskich najczęściej stosowane są konwencjonalne układy napędowe, w których wysokoprężny silnik spalinowy połączony jest ze skrzynią biegów i elementami układu przeniesienia napędu. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w 2015 r. autobusy zasilane olejem napędowym stanowiły dominującą część taboru autobusowego (rys. 4.). Środki transportu zbiorowego zasilane paliwami alternatywnymi oraz wyposażone w napęd elektryczny miały udział wynoszący około 1,5% [19].



Rys. 4. Struktura autobusów ze względu na rodzaj zasilania [19]

2. PROCEDURA PRZEPROWADZENIA BADAŃ SYMULACYJNYCH

2.1. Testy SORT

Testy SORT (Standardised On-Road Tests Cycles) zostały opracowane przez Międzynarodową Organizację Transportu publicznego (UITP) do badań przebiegowego zużycia paliwa autobusów. Na testy SORT składają się trzy profile prędkości [15][16]:

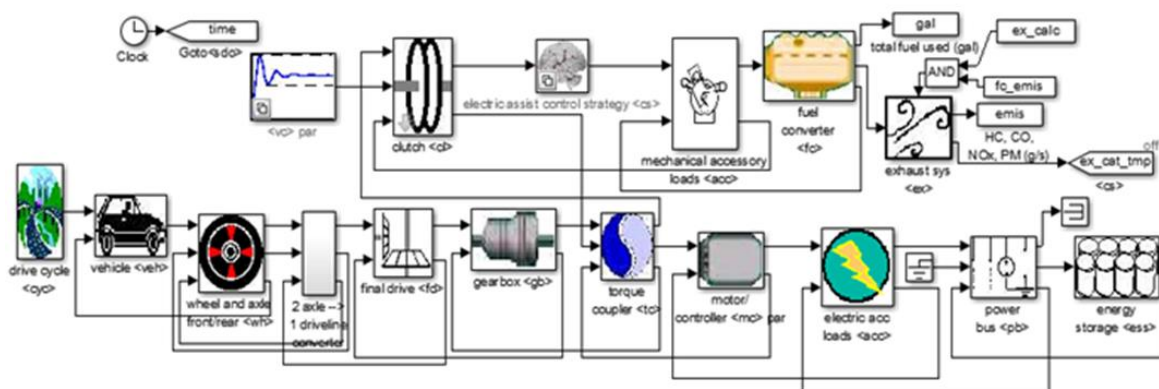
- SORT 1 – (Heavy Urban) odzwierciedla jazdę w centrum miasta, średnia prędkość to 12,6 km/h, prędkość maksymalna to 40 km/h, udział postoju w teście wynosi około 40%;
- SORT 2 – (Easy Urban) obrazuje jazdę miejską, średnia prędkość to 18,6 km/h, prędkość maksymalna wynosi 50 km/h, udział postoju w teście to 33,4%;
- SORT 3 – (Suburban) oddaje warunki jazdy na przedmieściach miast, średnia prędkość wynosi 26,3 km/h, prędkość maksymalna to 60 km/h, udział postoju w teście stanowi 20%.

Każdy test składa się z trzech modułów, obejmujących przyspieszanie, jazdę ze stałą prędkością, hamowanie i postój. Dzięki temu możliwe jest zbudowanie wielomodułowego cyklu jazdy, odzwierciedlającego warunki ruchu miejskiego. Testy te mogą być prowadzone na hamowni podwozowej lub w warunkach rzeczywistych.

2.2. Program

W badaniach symulacyjnych wykorzystano program ADVISOR, działający w środowisku Matlab/Simulink. Program jest narzędziem przeznaczonym do symulacji pojazdów z różnymi konfiguracjami napędów. Został opracowany przez naukowców z amerykańskiego Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnych (NREL). Program posiada wbudowane modele pojazdów z napędem konwencjonalnym, hybrydowym szeregowym i równoległym oraz pojazdu z napędem elektrycznym z różnymi typami zasobników energii. Na rys. 5 przedstawiono model pojazdu z hybrydowym napędem równoległym. Program umożliwia modyfikację modeli poprzez wprowadzenie plików z danymi pojazdu, charakterystyk i parametrów elementów układu napędowego i zasobnika lub zaprojektowanie i zaimplementowanie własnego modelu [6], [21].

W pierwszym oknie dialogowym użytkownik wybiera typ napędu i pojazd oraz poszczególne elementy układu napędowego, określając ich moc, sprawność i masę. W kolejnym oknie wybierany jest cykl jazdy. Program pozwala na wprowadzenie własnego cyklu jazdy poprzez wczytanie plików z parametrami takimi, jak prędkość w funkcji czasu, kąt nachylenia drogi w funkcji drogi. Przy założonej konfiguracji napędu i określonym cyklu jazdy program umożliwia wyznaczenie charakterystyk napędowych oraz analizę energetyczną opracowanego pojazdu.



Rys. 5. Model pojazdu z napędem hybrydowym równoległym w programie ADVISOR

2.3. Obiekt badań

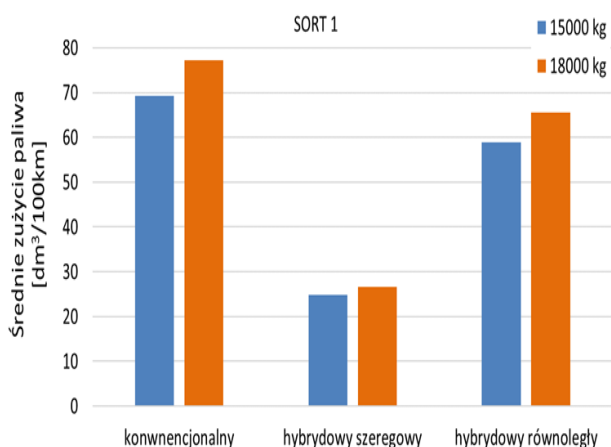
Dostępne w programie ADVISOR modele pojazdów zmodyfikowano i opracowano modele autobusów miejskich z napędem konwencjonalnym oraz hybrydowym: równoległym i szeregowym. Analizowany pojazd ma powierzchnię czołową 7,24 m², współczynnik oporu toczenia wynosi 0,001, a współczynnik oporu aerodynamicznego - 0,6. W badaniach symulacyjnych rozpatrywano także wpływ obciążenia na poziom zużycia paliwa pojazdów z napędem hybrydowym i konwencjonalnym. W związku z tym masa pojazdu, równa 18000 kg, odpowiadała maksymalnemu obciążeniu autobusu. Natomiast masa, wynosząca 15000 kg, odpowiadała autobusowi obciążonemu w 50%.

W autobusie z napędem hybrydowym równoległym maksymalna moc silnika spalinowego wynosi 190 kW, natomiast silnika elektrycznego 55 kW. W pojeździe zastosowano akumulator litowo-jonowy o pojemności energetycznej 1,8 kWh o wadze 109 kg. Początkowy stan naładowania zasobnika wynosił 70%. W pojeździe z napędem hybrydowym szeregowym maksymalna moc silnika spalinowego wynosiła 170 kW, moc generatora - 180 kW, a trakcyjnego silnika elektrycznego - 180 kW. W napędzie hybrydowym zastosowano akumulator litowo-jonowy o pojemności energetycznej 2,6 kWh i wadze 183 kg. Początkowy stan naładowania zasobnika wynosił 50%. W autobusie z napędem konwencjonalnym maksymalna moc silnika spalinowego wynosi 205 kW.

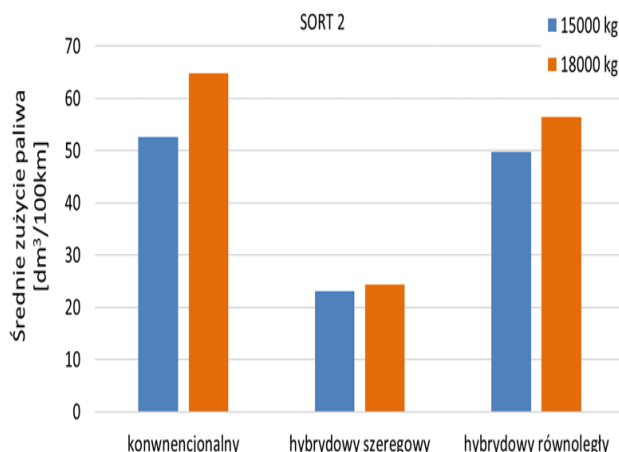
3. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

W teście SORT 1 najniższe zużycie paliwa uzyskał pojazd z napędem hybrydowym szeregowym. Przy obu rozpatrywanych obciążeniach uzyskano zużycie paliwa o 65% niższe niż w przypadku pojazdu z napędem konwencjonalnym (rys. 6.). Dla hybrydy równoległej uzyskano zużycie paliwa o 15% niższe niż w przypadku pojazdu z napędem konwencjonalnym. W pełni obciążone pojazdy z napędem konwencjonalnym i hybrydowym równoległym osiągnęły o 10% wyższe zużycie paliwa niż przy obciążeniu 50-procentowym. W przypadku hybrydy szeregowej różnice te wyniosły 6%.

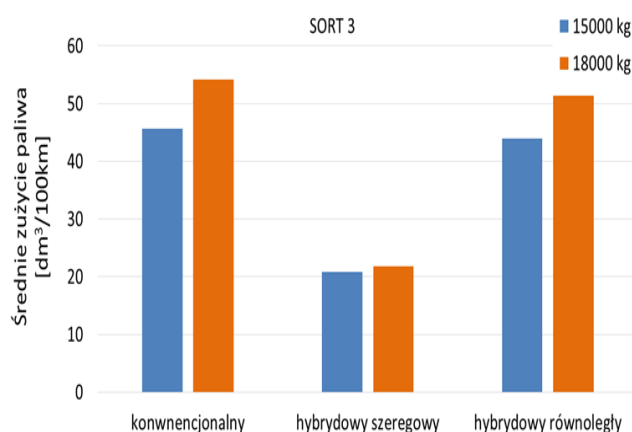
W teście SORT 2 przy 50% obciążeniu dla pojazdu z napędem szeregowym uzyskano o 54% niższe zużycie paliwa niż dla pojazdu z napędem konwencjonalnym. Różnice te w przypadku hybrydy równoległej wyniosły 5% (rys. 7). W pełni obciążone autobusy z napędem hybrydowym uzyskały odpowiednio o 66% i 14% niższe zużycie paliwa niż autobusy z napędem konwencjonalnym.



Rys. 6. Wartości średniego zużycia paliwa w teście SORT 1



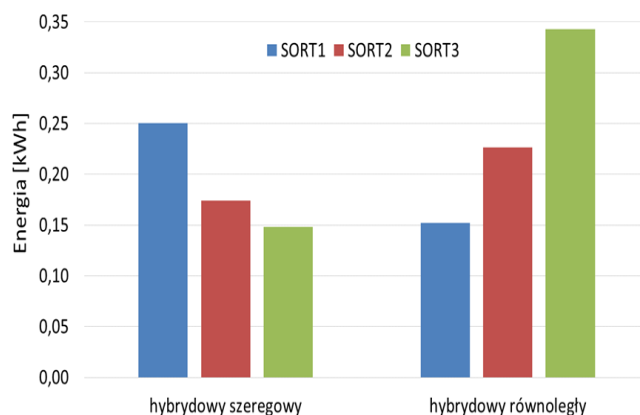
Rys. 7. Wartości średniego zużycia paliwa w teście SORT 2



Rys. 8. Wartości średniego zużycia paliwa w teście SORT 3

Dla testu SORT 3 w porównaniu z pojazdem konwencjonalnym wartości średniego zużycia paliwa uzyskane przez pojazdy z napędem hybrydowym równoległym były niższe o 5%, zaś dla pojazdu z napędem szeregowym - o 55%. Hybrydy równoległe o masie 15000 kg odnotowały o 14% niższe zużycie paliwa niż przy pełnym obciążeniu, hybrydy szeregowy - o 5% (rys. 8.)

Pojazdy hybrydowe mają możliwość odzyskania części energii podczas hamowania. Na rys. 9 przedstawiono wartości energii rekuperowanej w testach SORT. Pojazdy z szeregowym napędem hybrydowym uzyskały wyższe wartości energii zrekuperowanej w teście SORT 1, a pojazdy z napędem hybrydowym równoległym - w teście SORT 3.



Rys. 9. Wartości energii rekuperowanej w testach SORT (masa pojazdu 15000 kg)

Na rys. 10 przedstawiono zmiany stopnia naładowania zasobnika (SOC) oraz poziom zużycia paliwa pojazdów z napędem hybrydowym w teście SORT2. W hybrydzie szeregowym znaczną część cyklu pojazd przejechał używając wyłącznie energii z zasobnika. Natomiast w przypadku hybrydy równoległej silnik spalinowy pracował przez cały okres jazdy. Podczas rozpędzania energia, przekazywana do kół, pochodziła jednocześnie z silnika spalinowego i z zasobnika energii. Rozbieżności w wartościach zużycia paliwa dla pojazdów z napędem hybrydowym szeregowym i równoległym wynikają z różnic w budowie oraz strategii zarządzania energią obu konfiguracji.

PODSUMOWANIE

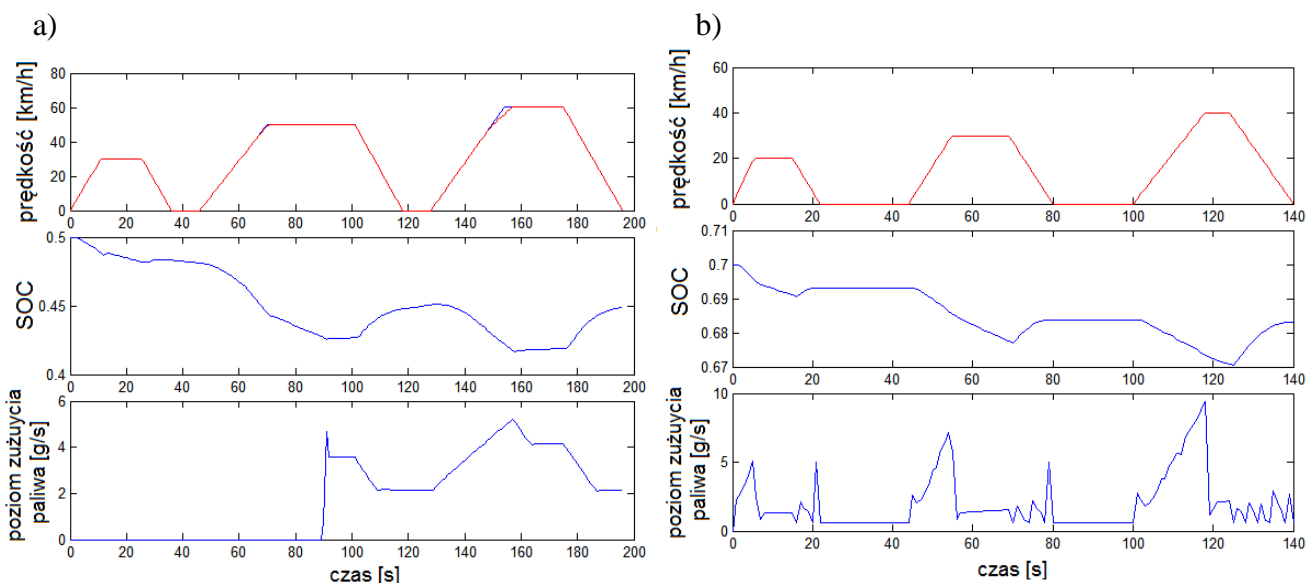
Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że pojazdy z napędem hybrydowym charakteryzują się mniejszym zużyciem paliwa niż pojazdy z napędem konwencjonalnym. Największe oszczędności paliwa pojazdy hybrydowe uzyskały w teście SORT 1. Różnice w wartościach zużycia paliwa dla pojazdów hybrydowych wynikają z użytych rozwiązań technologicznych zastosowanych w obu konfiguracjach.

Wyniki symulacji wykazały również, że obciążenie znacząco wpływa na uzyskiwane wartości zużycia paliwa, zarówno w przypadku pojazdów z napędem konwencjonalnym, jak i dla pojazdów hybrydowych. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że hybrydy uzyskały wyższe oszczędności paliwa w stosunku do pojazdu z napędem konwencjonalnym dla maksymalnego obciążenia pasażerami.

BIBLIOGRAFIA

1. Chau K.T., *Electric vehicle machines and drives design, analysis and application*, IEEE Wiley, 2015.
2. Ehsani M., Gao Y., Emadi A., *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Fundamentals, theory and design*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2010.
3. Gis W., Menes E., Waśkiewicz J., *Uwarunkowania wodoryzacji transportu samochodowego w Polsce*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej: Transport z. 112, 2016, s. 111-117.
4. Guang Wu, Xing Zhang, Zuomin Dong, *Powertrain architectures*

- of electrified vehicles: Review, classification and comparison*, Journal of the Franklin Institute 352, 2015, s. 425-448.
5. Maggetto G., Van Mierlo J., *Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey*, IEE Seminar on Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles, London, UK, 2000, s. 1-11.
6. Markel T., Brooker A., Hendricks T., Johnson V., Kelly K., Kramer B., O'Keefe M., Sprik S., Wipke K., *ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling*, Journal of Power Sources 110, 2002, s. 255-266.
7. Mi C., Masrur M. A., Wenzhong Gao D., *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives*, John Wiley & Sons, 2011.
8. Merksiz J., Molik P., Nowak M., Ziolkowski A., *Cykle jezdne pojazdów komunikacji miejskiej na przykładzie aglomeracji poznańskiej*, Logistyka 3/12, s. 1501-1509.
9. Merksiz J., Pielecha I., *Alternatywne napędy pojazdów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
10. Michałowski K., Ocioszyński J., *Pojazdy samochodowe o napędzie elektrycznym i hybrydowym*, WKiŁ, Warszawa 1989.
11. Pielecha I., Cieślik W., Borowski P., Czajka J., Bueschke W., *The development of combustion engines for hybrid drive systems*, Combustion Engines 158 (3), 2014, s. 23-35.
12. Szumanowski A., *Akumulacja energii w pojazdach*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1984.
13. Szumska E., Młodzińska D., Pawełczyk M., *Ocena energochłonności napędów konwencjonalnych i napędów hybrydowych w ruchu miejskim*, X International Science Technical Conference, Automotive Safety 2016, s. 362-369.
14. Williamson S.S., Emadi A., *Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well to wheel efficiency analysis*, IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 54 (3), 2005, s. 856-862.
15. UITP 2004: SORT - Standardised On-Road Test Cycles. UITP - International Association of Public Transport, Bruksela 2004.
16. UITP 2009: UITP Project 'SORT' Standardised On-Road Test Cycles. UITP - International Association of Public Transport, Bruksela 2009.
17. Air quality in Europe — 2016 report EEA, <http://www.eea.europa.eu>
18. Ochrona Środowiska 2016 - Raport GUS, <http://stat.gov.pl>



Rys. 10. Profil prędkości, przebieg poziomu zużycia paliwa i stopnia naładowania zasobnika (SOC) w pojeździe z napędem hybrydowym a) szeregowym, b) równoległym w teście SORT 2

20. Transport. Wyniki działalności w 2015 r. - Raport GUS, <http://stat.gov.pl>
21. Health risk assessment of air pollution. General principles (2016), <http://www.euro.who.int>
22. http://adv-vehicle-sim.sourceforge.net/advisor_doc.html

Benefits of hybrid electric drive technology in city bus

The current transportation systems come along with a wide range of problems including global warming, environmental degradation, health implications, and emission of greenhouse gases. The solution is greening of the transport sector, which suggests any sort of transportation vehicle

environmentally friendly and doesn't emit toxic gasses that could impact the environment and human health. The vehicles equipped with alternative fuels and alternative propulsion have been developed and are gaining mainstream popularity. The aim of this paper is to compare fuel consumption from hybrid electric and conventional city bus in SORT test.

Autorzy:

mgr inż. **Emilia Szumska** – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

dr hab. inż. **Marek Pawełczyk**, prof. PŚk – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego