

CYKLE JEZDNE WYKORZYSTYWANE DO BADAŃ EKSPLOATACYJNYCH AUTOBUSÓW MIEJSKICH Z NAPĘDEM HYBRYDOWYM

Prof. dr hab. inż. Kazimierz LEJDA, Dr inż. Paweł WOJEWODA

W artykule przedstawiono analizę cykli jezdnych wykorzystywanych w badaniach eksploatacyjnych autobusów miejskich z napędem konwencjonalnym jak i hybrydowym. Zaprezentowano również dostępne wyniki badań zużycia paliwa autobusów miejskich z napędem konwencjonalnym i hybrydowym, przeprowadzonych zgodnie z metodą SORT oraz w rzeczywistych warunkach drogowych na wybranych liniach.

1. WSTĘP

Centra wielkich aglomeracji miejskich charakteryzują się dużą emisją zanieczyszczeń w związku z działalnością gospodarczą i komunalną oraz dużym natężeniem ruchu pojazdów. Na oddziaływanie zanieczyszczeń narażone są liczne zbiorowości ludzkie przebywające tam w dużym zagęszczeniu i w ciągu długiego czasu. Jednym z istotnych źródeł emisji zanieczyszczeń w centrach miejskich są autobusy komunikacji miejskiej, napędzane w zdecydowanej większości silnikami o zapłonie samoczynnym. Silniki o zapłonie samoczynnym, mimo znacznego postępu technicznego, charakteryzują się uciążliwą emisją tlenków azotu i cząstek stałych – substancji szczególnie szkodliwych dla zdrowia ludzi. Te i inne zagrożenia, takie jak hałas, sprawiają, że poszukuje się rozwiązań zmniejszających uciążliwość dla zdrowia ludzi i ich środowiska wynikających z eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej [16].

Jedną z metod zmniejszenia zagrożeń środowiska ze względu na emisję zanieczyszczeń jest poprawa sprawności zespołów napędowych autobusów miejskich i może być ona osiągnięta m. in. przez zastosowanie napędów hybrydowych. Istotą napędu hybrydowego jest zastosowanie co najmniej dwóch rodzajów silników, a wymierne korzyści można osiągnąć wykorzystując dodatkowo akumulację energii. Najbardziej istotne znaczenie w poprawie sprawności zespołów napędowych autobusów miejskich, dzięki zastosowaniu rozwiązań hybrydowych, mają: możliwość wykorzystania silników spalinowych o mniejszej mocy i stabilizacja warunków ich pracy oraz częściowe odzyskiwanie energii w czasie hamowania i nadmiaru chwilowej mocy silnika spalinowego. Wiąże się to z opracowaniem właściwej metody wyznaczania parametrów energetycznych autobusów hybrydowych w oparciu o badania eksperymentalne, modelowe i symulacyjne, w których wykorzystywane powinny być cykle jezdne bazujące na zarejestrowanych (w czasie rzeczywistym) danych, w postaci zmian mocy oporów ruchu na kołach jezdnych i bezpośrednio związanych z rodzajem eksploatowanego pojazdu i obsługiwaną trasą. Jest sprawą oczywistą, że profil i charakterystyka analizowanej trasy przejazdu autobusu są związane z konkretną aglomeracją miejską [16].

2. ANALIZA CYKLI JEZDNYCH DO BADANIA AUTOBUSÓW MIEJSKICH

Zmienna prędkość pojazdu samochodowego wynika w znacznej mierze z konieczności dostosowywania realizowanego profilu prędkości do warunków narzuconych przez otoczenie, a determinowanych własnościami drogi i obecnością innych jej użytkowników.

Profil prędkości samochodu, przebywającego odpowiednio długi odcinek drogi, charakteryzują powtarzające się okresowo (w sposób nieregularny) moduły, obejmujące rozpędzanie, odcinki jazdy ze stałą prędkością, zwalnianie oraz hamowanie. Profile prędkości każdego z modułów różnią się czasem trwania poszczególnych faz ruchu, a także zakresem i intensywnością zmiany prędkości. W ruchu miejskim moduły te są z reguły krótkie i oddzielone okresami postoju [13, 14].

Wyróżnia się następujące cykle jazdy w postaci $V(t)$ [15]:

Cykl statyczny jazdy – jest to zlinearyzowany rozkład prędkości w czasie, uzyskany metodami statystyki, który obrazuje średnie warunki jazdy w mieście w postaci przyspieszeń,

hamowań i postojów, uwzględniający w dużym zakresie właściwości komunikacyjne danej aglomeracji.

Statystycznie określone reprezentatywne cykle jazdy stanowią podstawę do analizy energetycznej ruchu określonego pojazdu, gdyż ich powtarzanie n -krotnie odwzorowuje energetyczne procesy losowe jazdy między n -rzeczywistymi przystankami; odwzorowanie jest tym wierniejsze, im liczba n analizowanych procesów międzyprzystankowych jest większa.

Cykl rzeczywisty jazdy – jest to rozkład prędkości w czasie, uzyskany dla określonego pojazdu poruszającego się cyklicznie po trasie z góry wyznaczonej; zapis funkcji może być dokonany metodą bezpośrednią, tzn. poprzez rejestrację prędkości chwilowych pojazdu, lub też pośrednio, na podstawie średnich prędkości jazdy pojazdu na określonych odcinkach cyklu.

Cykl prosty jazdy – jest to rozkład prędkości w czasie dla ruchu przyspieszonego, ustalonego i opóźnionego, przy czym przyspieszenie i opóźnienie jest stałe i równe co do wartości bezwzględnej.

Cykl zastępczy (reprezentatywny) – jest to cykl prosty, uzyskany poprzez redukcję rzeczywistego cyklu jazdy.

Ze względu na profil prędkości cykle jezdne możemy podzielić na [8, 13]:

- pojedyncze jednosegmentowe:
 - trapezowe,
 - trójkątne,
- złożone wielosegmentowe:
 - trapezowe,
 - mieszane.

Do pojedynczych trapezowych profili prędkości można zaliczyć cykle jezdne CUNA, MAN'a, Voith'a, Regara, natomiast do pojedynczych trójkątnych cykl Hartiga oraz cykl Schrecka [11, 13]. Złożone trapezowe profile prędkości występują w cyklach jezdnych: Central Business District Cycle, ECE, Katowickim, Warszawskim, Wrocławskim oraz cyklach SORT 1 (rys. 1), SORT 2 (rys. 2), SORT 3 (rys. 3). Złożone mieszane cykle jezdne są realizowane m. in. w Japońskim I, Japońskim II, Manhattan Cycle, Kalifornijskim oraz Darmstadt [11, 13, 19].

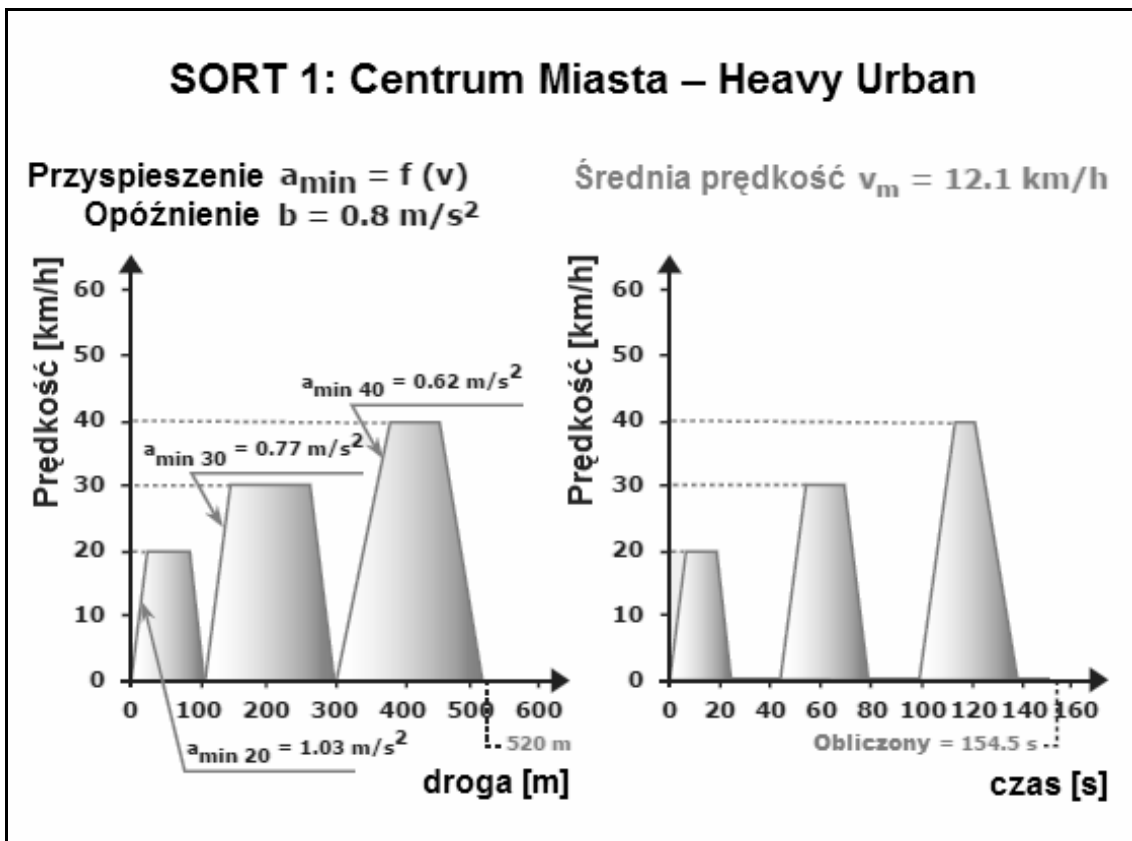
Cykle jezdne SORT (Standardised On-Road Tests Cycles) zostały opracowane przez Międzynarodową Organizację Transportu Publicznego UITP (International Association of Public Transport) specjalnie do badania zużycia paliwa przez autobusy komunikacji miejskiej. Cykle SORT powstały jako efekt współpracy wielu czołowych przedstawicieli organów i podmiotów gospodarczych transportu publicznego, instytutów naukowych, producentów autobusów, jak i przedsiębiorstw świadczących usługi komunikacyjne. Zostały opracowane trzy cykle jezdne odzwierciedlające następujące kategorie ruchu [18, 19]:

- SORT 1 w centrach miast – Heavy Urban,
- SORT 2 w miastach – Easy Urban,
- SORT 3 na trasach podmiejskich – Easy Suburban.

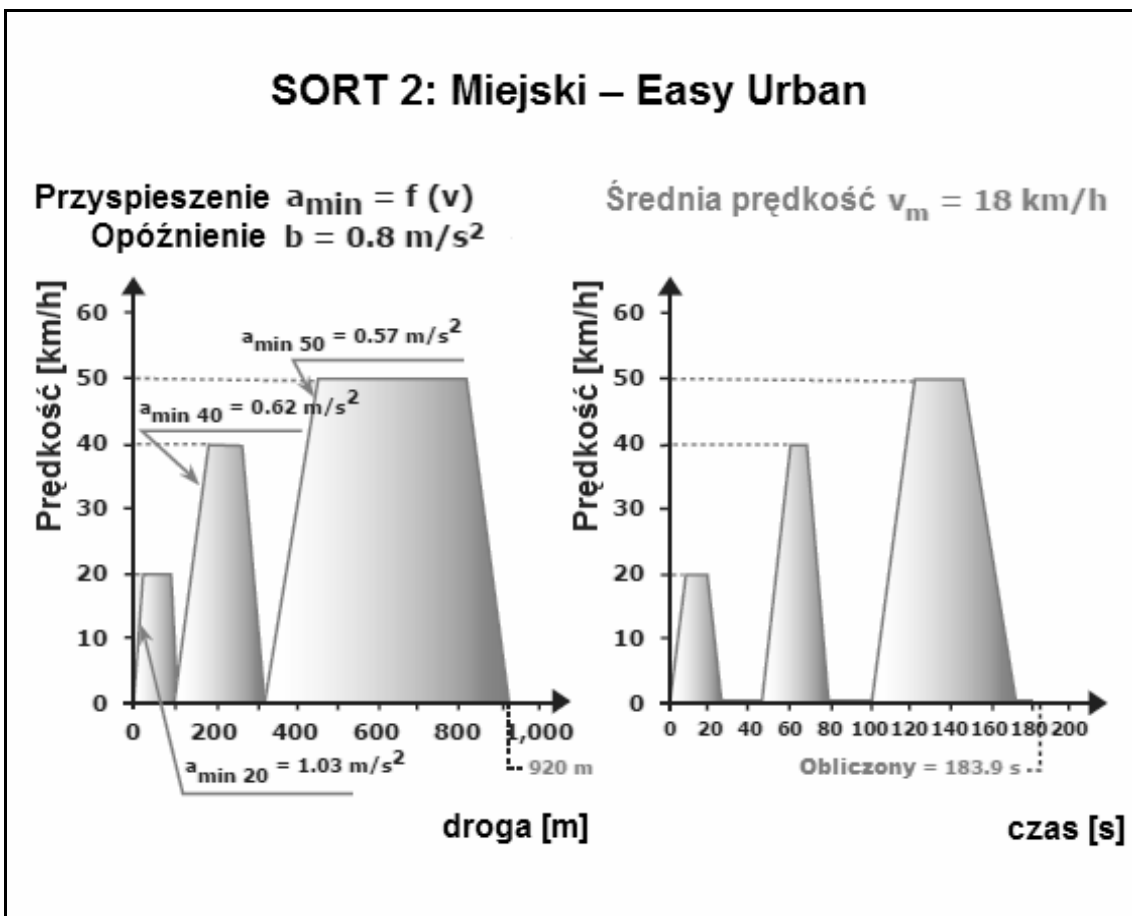
W Stanach Zjednoczonych Ameryki prowadzone są najbardziej zaawansowane badania właściwości autobusów z napędami hybrydowymi. W literaturze [1, 3, 7]. zawarte są wyniki porównawczych badań autobusów z napędami klasycznymi i hybrydowymi. Badania przeprowadzono na hamowni podwoziowej, wykorzystując do tego celu cykle jezdne symulujące warunki ruchu w miastach. Spośród kilku cykli jezdnych wykorzystywanych w badaniach autobusów wybrano dwa znacznie różniące się od siebie.

Pierwszy z nich to cykl Central Business District Cycle (CBD) posiadający charakter statystyczny i został stworzony na zasadzie podobieństwa charakterystyk ruchu autobusu miejskiego (rys. 4).

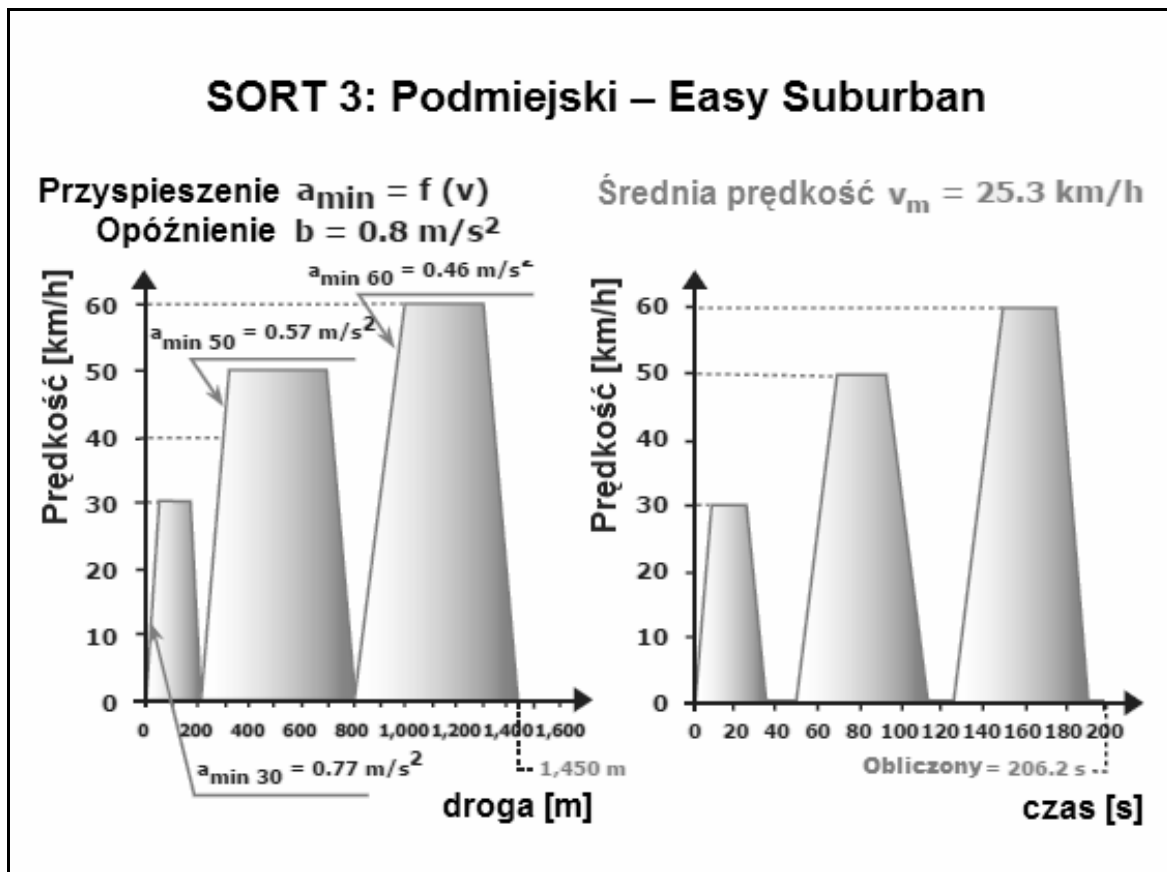
Drugi cykl badawczy opracowano na zasadzie symulacji wiernej przebiegowi czasu. Jest to cykl jezdny Manhattan Cycle (rys. 5), odzwierciedlający jazdę autobusów w warunkach znacznych utrudnień ruchu [1, 3, 7].



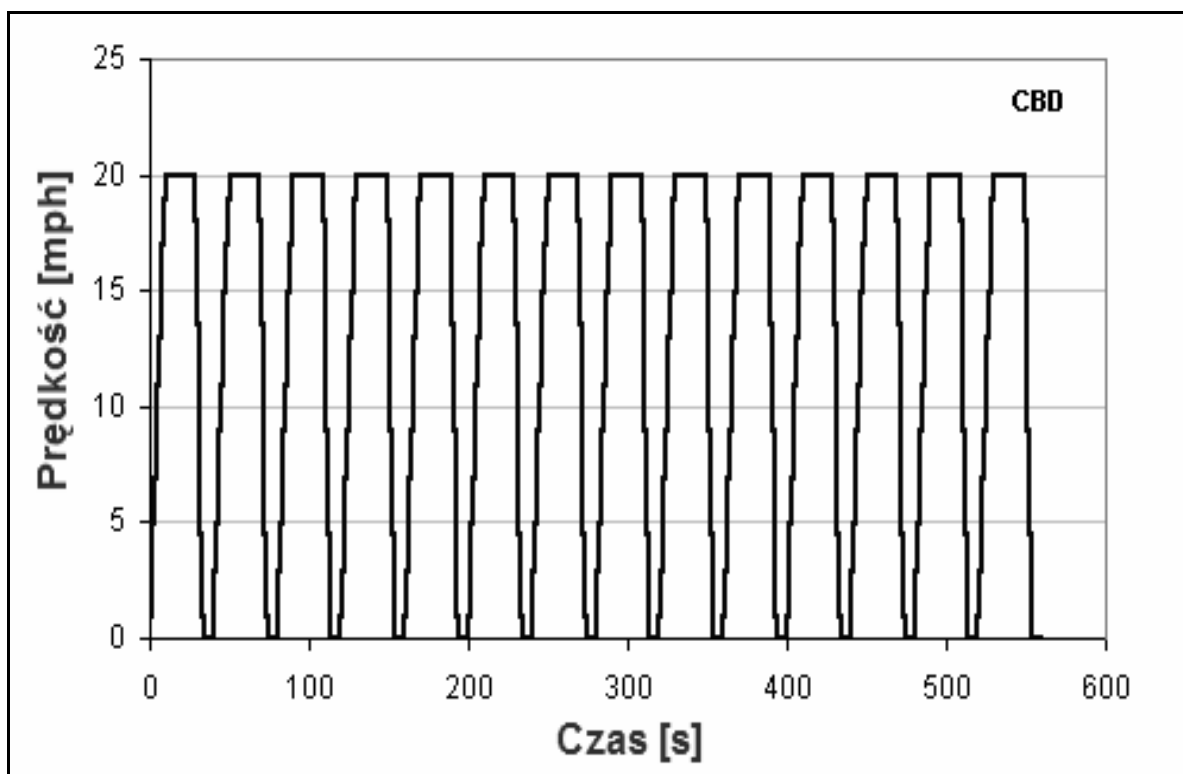
Rys. 1. Cykl jezdny SORT 1 do badania autobusów miejskich [19]



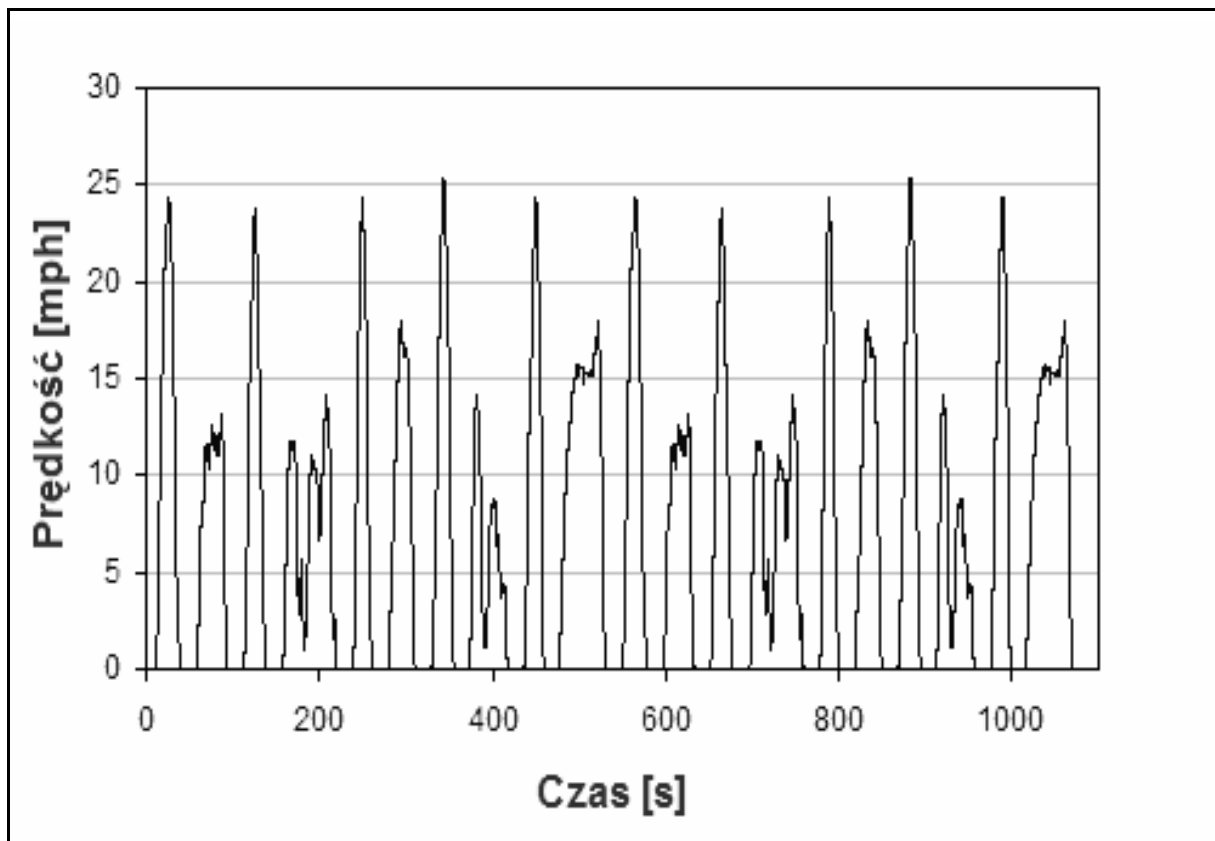
Rys. 2. Cykl jezdny SORT 2 do badania autobusów miejskich [19]



Rys. 3. Cykl jezdny SORT 3 do badania autobusów miejskich [19]



Rys. 4. Cykl jezdny Central Business District Cycle (CBD) do badania autobusów miejskich: czas trwania: 560 s, prędkość średnia: 20,23 km/h, prędkość maksymalna: 32,18 km/h (20 mph), droga cyklu: 3,22 km, średnie przyspieszenie: 0.89 m/s^2 , maksymalne przyspieszenie: 1.79 m/s^2 [17]



Rys. 5. Cykl jezdny Manhattan Cycle do badania autobusów miejskich: czas trwania: 1089 s, prędkość średnia: 11,0 km/h (6,8 mph), prędkość maksymalna: 40,88 km/h (25,4 mph) [17]

Ruch miejski charakteryzuje się znaczną różnorodnością oraz przypadkowością. Dla przeprowadzenia oceny układów napędowych autobusów miejskich pod kątem zużycia paliwa i energochłonności ruchu, niezbędne jest opracowanie rzeczywistych cykli jezdnych na podstawie badań prowadzonych w prawdziwym cyklu jazdy, w rzeczywistych warunkach drogowych i rozpatrywanej aglomeracji miejskiej. Cykle takie stanowią wiarygodne źródło informacji o dynamice ruchu i są przydatne do projektowania napędów hybrydowych dla autobusów miejskich. Ponadto, są pomocne w obliczeniach mających na celu określenie podstawowych parametrów podzespołów układu oraz przy doborze układu sterowania [8, 14].

3. WYNIKI BADAŃ ZUŻYCIA PALIWA AUTOBUSÓW MIEJSKICH Z NAPĘDEM HYBRYDOWYM

Badania zużycia paliwa autobusu Solaris Urbino 12 Hybrid, przeprowadzone przez dwa niezależne instytuty badawcze (niemiecki TÜV SAD i hiszpański IDIADA) zgodnie z metodą SORT (*Standardised On-Road Tests Cycles*), potwierdziły dobre wyniki dla tego układu hybrydowego. Szczegóły wyników badań przedstawiono w tabeli 1. Uzyskano znaczne oszczędności sięgające poziomu 19÷33%; najlepszy wynik osiągnięto w najbardziej wymagającym cyklu SORT 1. Mniejsze zużycie paliwa oznacza nie tylko niższe koszty eksploatacji, ale także niższą emisję CO₂ i innych szkodliwych związków do atmosfery [9, 12].

Włoski producent w swoim komunikacie prasowym podaje dane dotyczące próbnej eksploatacji autobusu hybrydowego Citelis 12M z układem hybrydowym firmy BAE Systems, która została przeprowadzona w mieście Lyon. Następnie zostały one porównane z wynikami eksploatacyjnymi autobusów Citelis z silnikami na olej napędowy dostarczonymi przez grupę SYTRAL (*Syndicat des Transports Mixte pour le Rhône et l'Agglomération Lyonnaise*) oraz firmę Keolis Lyon. Na linii nr 27 (Laurent Bonnevey-Ratusz), o płaskim przebiegu, autobus hybrydowy Citelis 12M osiągnął mniejsze zużycie paliwa o 39% w porównaniu z Citelisem 12M na olej

napędowy, przy średniej prędkości 11,5 km/h. Na linii nr 49 (Perrache-Sainte-Foy-lès-Lyon), przebiegającej przez pagórkowaty teren, autobus hybrydowy Citelis 12M osiągnął mniejsze zużycie paliwa o 33% w porównaniu z Citelitem 12M na olej napędowy, przy średniej prędkości 12,8 km/h. Na linii nr 40 (Pêcherie-Neuville), wychodzącej poza teren miasta, autobus hybrydowy Citelis 12M osiągnął mniejsze zużycie paliwa o 24 % w porównaniu z Citelitem 12M na olej napędowy, przy średniej prędkości 24 km/h. Oprócz wymiernych oszczędności ekonomicznych należy zaznaczyć względy ekologiczne. Osiągnięte wyniki w Lyonie oznaczają o 600 gramów mniejszą emisję dwutlenku węgla na kilometr przez jeden pojazd. Przy założeniu, że autobus miejski przejeżdża 50000 km w ciągu roku, oszczędności w zakresie emisji CO₂ wynoszą aż do 30 ton na jeden pojazd [9].

Tabela 1. Wyniki badań zużycia paliwa w cyklach SORT autobusu Solaris Urbino 12 Hybrid w porównaniu do jego tradycyjnego odpowiednika Solaris Urbino 12 [9, 12]

Cykle badawcze SORT dla autobusów	Silnik wysokoprężny DAF (9.2 l, 231 kW), skrzynia ZF EcoLife	Silnik wysokoprężny Cummins (6.7 l, 165 kW), skrzynia Eaton Hybrid	Oszczędności w zużyciu paliwa	Oszczędności w zużyciu paliwa
	Zużycie paliwa w dm ³ /100 km		dm ³ /100 km	%
SORT 1 z średnią prędkością 12 km/h	54.7	36.5	18.2	33.3%
SORT 2 z średnią prędkością 17 km/h	43.3	33.7	9.6	22.2%
SORT 3 z średnią prędkością 27 km/h	38.0	30.8	7.2	18.9%

4. PODSUMOWANIE

Troska o środowisko oraz jak najmniejsze zużycie paliwa to główne cele przyświecające przy konstrukcji i późniejszej eksploatacji miejskich autobusów z napędem hybrydowym. Osiągnięcie znacznej redukcji emisji spalin sprawia, że miejskie autobusy hybrydowe są przyjazne środowisku naturalnemu i mieszkańcom aglomeracji miejskich.

Różnego rodzaju cykle jezdne są ważnym zagadnieniem, ściśle powiązanim z metodami wyznaczania parametrów energetycznych autobusów hybrydowych jak i ich późniejszego testowania. Informacje zawarte w dostępnych publikacjach pozwoliły na analizę cykli jezdnych stosowanych do badań autobusów miejskich. Dla przeprowadzenia oceny wyników badań układów napędowych autobusów miejskich pod kątem zużycia paliwa, emisji związków toksycznych oraz energochłonności ruchu, prace autorów w tym zakresie można podzielić na dwie grupy. Grupę pierwszą stanowiły prace poświęcone badaniom, w których wykorzystywane były teoretyczne, statystyczne i uśrednione cykle jezdne symulujące warunki ruchu w miastach, natomiast grupę drugą prace dotyczące badań prowadzonych w oparciu o rzeczywiste cykle jezdne.

W przypadku badań silników spalinowych, różnice występujące w strukturze testów statycznych (bazujących na cyklach statystycznych) mogą skutkować dużymi rozrzutami w emisjach jednostkowych zanieczyszczeń. Wynika to ze znacznej wrażliwości emisji zanieczyszczeń na statyczne warunki pracy silnika spalinowego, uwarunkowane właściwościami ekologicznymi silników o różnych zastosowaniach. Jeszcze większa jest wrażliwość emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych na występowanie stanów dynamicznych, szczególnie dla niektórych zanieczyszczeń, m.in. emisji cząstek stałych w czasie przyspieszania, czy węglowodorów w czasie zwalniania (zwłaszcza hamowania silnikiem). Autorzy pozycji literaturowych [4, 5, 6] uzasadniają celowość – oprócz stosowania testów statycznych – wykorzystywanie również testów dynamicznych do badania ruchu pojazdów.

W pracy [10] przedstawiono wyniki badań pomiaru stężenia gazów cieplarnianych w cyklu jazdy przeprowadzonym w rzeczywistych warunkach drogowych. Uzyskane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi dla tego samego pojazdu w czasie testu NEDC (*New European Driving Cycle*) na hamowni podwoziowej. Analiza porównawcza została przeprowadzona w cyklu miejskim

i pozamiejskim. Dodatkowo, analizy emisji spalin i zużycia paliwa przeprowadzono w odniesieniu do rodzaju ukształtowania terenu (jazda górską). Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy jednoznacznie zauważyli, że emisja spalin w rzeczywistych warunkach drogowych znacznie różni się od emisji uzyskanej na hamowni podwoziowej.

Profil prędkości realizowany przez autobus miejski na dowolnym odcinku trasy zależy głównie od warunków ruchu, na które mają wpływ: poprzeczny i podłużny profil jezdny (zakręty, skrzyżowania, przejścia dla pieszych, wzniesienia), liczba pasów ruchu, oznakowanie, sygnalizacja, ograniczenia prędkości oraz przeszkody utrudniające ruch, np. czynniki atmosferyczne (wiatr, opady, mgła, temperatura itp.) i natężenie ruchu. Charakterystyczną cechą jazdy autobusu miejskiego są częste zmiany prędkości, które wynikają w dużej mierze z konieczności dostosowania realizowanego profilu prędkości do warunków narzuconych przez otoczenie, głównie determinowanych organizacją ruchu i obecnością innych jej użytkowników [2, 13]. Osiągane parametry jazdy autobusu miejskiego zależą w dużym stopniu od obciążenia, gdyż masa autobusu zmienia się podczas kursu ze względu na zmiany w liczbie pasażerów.

Wyniki badań prezentowane w przeanalizowanych pozycjach literaturowych świadczą o złożoności tego problemu i potwierdzają prowadzenie dalszych prac w rzeczywistych warunkach drogowych, jako najbardziej miarodajnych.

LITERATURA

- [1] Andersson C.: Observations on Electric Hybrid Bus Design. Universitetstryckeriet Lund University, Lund 2001.
- [2] Augustynowicz A., Broł S.: Zastosowanie ciągłego przekształcenia falkowego do estymacji typu kierowcy w warunkach ruchu miejskiego. *Archiwum Motoryzacji*, 4, 2007, 293-307
- [3] Barnitt R. A., Chandler K.: New York City Transit (NYCT) Hybrid (125 Order) and CNG Transit Buses. Technical Report, NREL/TP-540-40125, November 2006.
- [4] Chłopek Z., Laskowski P.: Charakterystyki emisji zanieczyszczeń wyznaczane metodą Monte Carlo. *Eksploatacja i Niezawodność*, nr 2, 2009, 42-51.
- [5] Chłopek Z., Marecka-Chłopek E.: Synteza testów statycznych do badania silników spalinowych o zastosowaniach innych niż samochodowe ze względu na emisję zanieczyszczeń i zużycie paliwa. *Przegląd Mechaniczny* nr 9/2007, 35-40.
- [6] Chłopek Z., Rostkowski J.: Analiza emisji zanieczyszczeń z silników autobusowych w warunkach rzeczywistego użytkownika. *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, Vol. 10, No. 3-4, 2003, 41-49.
- [7] Chłopek, Z. Hadała, A.: Ekologiczne właściwości pojazdów użytkowych z napędami hybrydowymi. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów - Politechnika Warszawska*, z. 2/69, 2008, 133-142.
- [8] Lejda K., Lew K., Wojewoda P.: Zasady konstruowania cyklu jezdny w aglomeracji miejskiej dla autobusu. *Międzynarodowa Konferencja Naukowa w Kijowie, ВІСНИК №18*, s. 41-45, Kijów 2009.
- [9] Materiały informacyjne firm: BAE Systems, Irisbus, Solaris 2010 - 2011.
- [10] Merksiz J., Fuc P., Lijewski P., Bielaczyc, P.: The Comparison of the Emissions from Light Duty Vehicle in On-road and NEDC Tests. *SAE Technical Paper 2010-01-1298*, 2010.
- [11] Pawelski Z.: Napęd hybrydowy dla autobusu miejskiego. *Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej*, Łódź 1997.
- [12] Rusak Z.: Rodzina hybrydowych autobusów z Bolechowa powiększa się. *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 2010, nr 4, s.18-23.
- [13] Siłka W.: *Energochłonność ruchu samochodu*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
- [14] Siłka W.: *Teoria ruchu samochodu*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [15] Szumanowski A.: *Akumulacja energii w pojazdach*. WKiŁ, Warszawa 1984.
- [16] Wojewoda P.: *Metodyka doboru silnika spalinowego do wybranej konfiguracji napędu hybrydowego autobusu miejskiego*. Rozprawa doktorska, Rzeszów 2012.
- [17] <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/> Emission Test Cycles.
- [18] UITP 2004: SORT - Standardised On-Road Test Cycles. UITP - International Association of Public Transport, Brussels 2004.
- [19] UITP 2009: UITP Project 'SORT' Standardised On-Road Test Cycles. UITP - International Association of Public Transport, Brussels 2009.

DRIVING CYCLES USED FOR EXPLOITATION TESTS OF HYBRID URBAN BUSES

This paper presents an analysis of driving cycles used for exploitation tests of hybrid and conventionally powered urban buses. Also were presented results of research available fuel of hybrid and conventionally powered urban buses, performed in accordance with the method of SORT and in real traffic conditions on selected lines.