

Prof. Jerzy Merkisz, DSc., DEng.

Łukasz Rymaniak, DEng.

Institute of Combustion Engine and Transport
Poznan University of Technology
Piotrowo 3 str., 60-965 Poznan, Poland
e-mail: Jerzy.Merkisz@put.poznan.pl, Lukasz.Rymaniak@put.poznan.pl

Ocena emisji zanieczyszczeń z pojazdów w odniesieniu do CO₂ na podstawie badań autobusów miejskich w rzeczywistych warunkach eksploatacji

The assessment of vehicle exhaust emissions referred to CO₂ based on the investigations of city buses under actual conditions of operation

Słowa kluczowe: *autobus miejski, emisja CO₂ i związków toksycznych w spalinach, eksploatacyjne i testowe warunki badań, układ napędowy, wskaźnik toksyczności.*

Keywords: *city bus, emission of CO₂ and other exhaust components, laboratory and actual test conditions, powertrain, emission index.*

Streszczenie: W artykule przedstawiono rozważania dotyczące oceny emisji zanieczyszczeń z pojazdów ciężkich na podstawie badań realizowanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Przedstawiane do tej pory charakterystyki ekologiczne silnikowych środków transportu opierały się przede wszystkim na emisji jednostkowej lub drogowej. W pracy przedstawiono analizę emisji związków toksycznych odniesioną do związku szkodliwego CO₂, dla którego założono, że jest miarą poprawności realizacji procesu spalania. Wyznaczone w ten sposób parametry nazwano wskaźnikami toksyczności. Obiekty badawcze stanowiły osiemnastometrowe autobusy miejskie wyposażone w trzy rodzaje układów napędowych: konwencjonalny i hybrydowy z silnikami ZS, a także pojazd zasilany sprężonym gazem ziemnym z silnikiem ZI. Wszystkie autobusy spełniały normę Euro V-EEV. Pomiary wykonano zgodnie z procedurą testu jeźdnego SORT 2 oraz na trasie badawczej w aglomeracji poznańskiej. Badania w warunkach rzeczywistej eksploatacji pozwalają dokonać rzetelnej oceny ekologiczności danego obiektu badawczego, ponieważ obejmują znacznie większy obszar zmienności parametrów pracy silników spalinowych w porównaniu z laboratoryjnymi testami homologacyjnymi. Wykonane badania drogowe i ich analiza pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących słuszności stosowania opracowanej metody oceny emisji zanieczyszczeń, bazującej na wskaźnikach toksyczności, dla pojazdów wyposażonych w różne rodzaje układów napędowych.

Abstract: The paper discusses the assessment of the exhaust emissions from heavy-duty vehicles following investigations under actual traffic conditions. The environmental characteristics presented thus far were mainly based on unit or road emissions. The paper presents an analysis of exhaust emissions referred to the harmful CO₂, which was assumed as measure of correctness of the combustion process. The parameters determining this way are referred to as emission indexes. The research objects were 18-meter city buses fitted with three types of powertrains: conventional engine, hybrid (electric motor combined with a diesel engine) and a spark ignition engine fuelled with compressed natural gas (CNG). All buses were Euro V-EEV compliant. The measurements were performed according to the SORT 2 driving test procedure on the test route within the Poznan agglomeration. Investigations performed under actual traffic conditions allow a true assessment of environmental performance of a given research object because they cover a much greater engine operating parameter variability range compared to laboratory and homologation tests. The performed road tests and their analysis led to conclusions related to the applicability of the developed method of emission assessment based on emission indexes for vehicles fitted with different powertrains.

1. Wprowadzenie

Warunki pracy silnika spalinowego podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdu charakteryzują się szerokim obszarem zmienności prędkości obrotowej wału korbowego oraz momentu obrotowego. Ma to bezpośredni wpływ na zużycie paliwa oraz emisję zanieczyszczeń, która może być wyrażana w postaci różnego rodzaju charakterystyk. Dla pojazdów klasy PC (passenger car) najczęściej wykorzystuje się drogową emisję zanieczyszczeń, a więc masę określonego związku odniesioną do danego dystansu (np. g/km). W przypadku pojazdów HDV (heavy duty vehicles) i pozadrogowych najskuteczniejszą metodą oceny oddziaływania na środowisko jest wykorzystanie jednostkowej emisji zanieczyszczeń, czyli masy danego związku odniesionej do wykonanej pracy (np. g/(kW·h)). W konstrukcji pojazdów ciężkich wykorzystuje się jednostki spalinowe charakteryzujące się znacznym momentem obrotowym, w związku z tym, ich badania homologacyjne wykonuje się wyłącznie na hamowaniach silnikowych (m.in. ze względu na ograniczenie kosztów związanych z realizacją pomiarów). W tych testach symulowane są w pewnym zakresie warunki rzeczywistej eksploatacji silnika, jednak są one nieadekwatne do warunków panujących w rzeczywistej eksploatacji, szczególnie autobusów miejskich [11].

Na podstawie prowadzonych w ostatnich latach prac należy stwierdzić, że pomiary jakościowe i ilościowe gazów wylotowych z silników spalinowych wykonywane w warunkach laboratoryjnych, mogą znacznie różnić się od rzeczywistej emisji pojazdu danej kategorii, w tym także HDV [7, 13]. W związku z tym prowadzone są nieustanne działania mające na celu opracowanie szczegółowych i uniwersalnych metod oceny emisji zanieczyszczeń w warunkach drogowych RDE (real driving emissions) [2, 6, 8–10]. Postępujący w ostatnich latach rozwój i miniaturyzacja aparatury pomiarowej należącej do grupy mobilnych analizatorów spalin PEMS (portable emission measurement system), pozwala wykonywać coraz dokładniejsze badania ekologiczności pojazdów w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Obecnie na całym świecie prowadzone są programy pilotażowe dotyczące tego typu zagadnień [1, 3, 8, 12].

Stosowane do tej pory normy homologacyjne dotyczące oceny oddziaływania na środowisko naturalne dla pojazdów różnych kategorii, przewidywały wykonywanie wyłącznie badań laboratoryjnych na hamowniach podwoziowych lub silnikowych. Wprowadzone na obszarze Unii Europejskiej wytyczne legislacyjne Euro VI/6 stanowią o konieczności realizacji pomiarów podczas rzeczywistej eksploatacji [4]. Ma to na celu m.in. ocenę ekologiczności danego rozwiązania w punktach pracy silnika lub pojazdu innych niż w zdefiniowanych z góry testach laboratoryjnych, a także określenie wskaźników emisyjnych na zgodność w eksploatacji. W pracach konstrukcyjno-rozwojowych często korzysta się z tzw. charakterystyk gęstości czasu pracy TD (time density) i tworzonych na tej podstawie trójwymiarowych charakterystyk emisyjnych, gdzie przedstawiana jest emisja sekundowa danego zanieczyszczenia w funkcjach: prędkość obrotowa wału korbowego – moment obrotowy ($n-T$) lub prędkość – przyspieszenie pojazdu ($V-a$). Uwzględniając czas pracy, możliwe jest scharakteryzowanie ruchu funkcją dyskretną o współrzędnych T i n .

Do wyznaczenia charakterystyk emisyjnych wykorzystywane są parametry związane z ruchem lub pracą pojazdu. Odnosząc się do emisji drogowej nie ma problemu z określeniem pokonanego dystansu, który rejestrowany jest zarówno z pokładowego systemu diagnostycznego (obliczany na podstawie prędkości chwilowej), jak i systemu GPS (global positioning system), będącego nieodzownym elementem aparatury typu PEMS. Trudniejsze jest określenie rzeczywistej pracy wykonanej przez silnik spalinowy lub cały układ napędowy (w przypadku rozwiązań hybrydowych) podczas wyznaczania emisji jednostkowej danego związku szkodliwego. Chwilową moc oblicza się na podstawie prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia, których wartości można odczytywać z pokładowych systemów

diagnostycznych. Pierwszy z wymienionych parametrów jest wyznaczany bezpośrednio przy wykorzystaniu czujników indukcyjnych lub wykorzystujących zjawisko Halla, a uzyskane tą metodą dane są wystarczające. Natomiast moment obrotowy wyznaczany jest na podstawie wartości ciśnienia w układzie zasilania oraz czasu otwarcia wtryskiwacza, co ma istotny wpływ na otrzymanywane dokładności [5]. W testach homologacyjnych konieczne jest uwzględnienie parametrów netto: mocy i obciążenia, a więc uzyskanych na stanowisku pomiarowym, na końcu wału korbowego z urządzeniami dodatkowymi [14]. W związku z tym pojawiają się pewne rozbieżności dotyczące wartości uzyskanych w warunkach drogowych, ponieważ w odczytach z pokładowego systemu diagnostycznego uwzględniania się również opory wewnętrzne silnika. W obliczeniach można ująć ten problem, przez uwzględnienie procentowego udziału obciążenia związanego m.in. z tarciami, jednak stanowi to pewne uproszczenie, ponieważ rzeczywiste opory zależą od wielu czynników. Z reguły nie są one liniowe i zmieniają się w zależności od aktualnych parametrów pracy spalinowej jednostki napędowej.

2. Ocena emisji zanieczyszczeń w odniesieniu do CO₂

W wyniku spalania paliwa węglowodorowego w silniku powstaje energia cieplna oraz szereg produktów szkodliwych i toksycznych, które negatywnie wpływają na środowisko naturalne. Dwutlenek węgla CO₂ powstaje w wyniku utleniania zupełnego, natomiast tlenek węgla CO, węglowodory THC, tlenki azotu NO_x oraz cząstki stałe PM (w zakresie masy i liczby) powstają podczas spalania niezupełnego, niecałkowitego oraz w obecności wysokich temperatur. Są one produktami niepożądanymi, które mają istotny wpływ na degradację środowiska. W związku z tym w różnych regionach/państwach świata wprowadzane są różnego rodzaju limity ich emisji przez pojazdy silnikowe. Dwutlenek węgla nie jest traktowany jako związek toksyczny, ale jako szkodliwy – przyczynia się do powstawania efektu cieplarnianego, w większych stężeniach jest trujący dla organizmów żywych.

Ze względu na fizykochemiczny przebieg utleniania w komorze spalania silnika, można przyjąć, że CO₂ jest miarą poprawności realizacji tego procesu. Z tego powodu da się go wykorzystać podczas oceny emisji zanieczyszczeń z różnego rodzaju jednostek spalinowych. Ponadto, definiując układ napędowy jako silnik spalinowy wraz z pozasilnikowymi układami oczyszczania spalin, można również dokonać rozważań w aspekcie oddziaływania na środowisko pojazdów różnych kategorii, szczególnie w obszarze badań drogowych. Aby to zrealizować konieczne jest wykorzystanie ilościowego wskaźnika toksyczności M, który definiowany jest ilorazem:

$$M_j = b \cdot \frac{e_{\text{real}, j}}{e_{\text{CO}_2}} \quad (1)$$

gdzie: M – bezwymiarowy wskaźnik toksyczności [–]; j – związek toksyczny, dla którego wyznaczono wskaźnik emisji; b – stała uniwersalna (dla CO, THC i NO_x = 10³, dla PM = 10⁵); e_{real, j} – emisja jednostkowa, drogowa lub masa związku toksycznego j wyznaczona podczas badań w teście [g/(kW·h); g/(km); g]; e_{CO₂} – emisja jednostkowa, drogowa lub masa CO₂ wyznaczona podczas badań w teście (tożsama z e_{real, j}) [g/(kW·h); g/(km); g].

3. Metodyka badań w warunkach rzeczywistej eksploatacji

Do badań wykorzystano trzy autobusy miejskie o długości osiemnastu metrów, charakteryzujące się zbliżonymi właściwościami użytkowymi. Takie pojazdy najczęściej wykorzystywane są na obciążonych liniach komunikacyjnych, gdzie przewożonych jest dużo

pasażerów. Pierwszy obiekt badawczy wyposażony był w konwencjonalny układ napędowy z silnikiem ZS, drugi w napęd hybrydowy o konfiguracji szeregowej, natomiast trzeci w jednostkę ZI zasilaną sprężonym gazem ziemnym (rys. 1). W artykule oznaczono je kolejno: ON, HYBRYDA i CNG. Wszystkie autobusy były homologowane, kompletne oraz sprawne technicznie. Każdy obiekt spełniał normę emisji spalin Euro V – EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle). W celu przygotowania pojazdów do badań, zastosowano ładunek zastępczy, który miał odzwierciedlać obciążenie pasażerów podczas codziennej eksploatacji – masa autobusu z obciążeniem wynosiła 24 000 kg.

a)



Parametr	ON
Typ/paliwo	4-suwowy, ZS/ olej napędowy
Objętość skokowa [dm ³]	9,2
Stopień sprężania	17,5
Maksymalna moc [kW]/[obr/min]	265/1900
Maksymalny moment obrotowy [N·m]/[obr/min]	1450/1100–1700
Układ oczyszczania spalin	SCR/DPF

b)



Parametr	HYBRYDA
Typ/paliwo	4-suwowy, ZS/ olej napędowy
Objętość skokowa [dm ³]	6,7
Stopień sprężania	17,2
Maksymalna moc [kW]/[obr/min]	209/2300
Maksymalny moment obrotowy [N·m]/[obr/min]	1008/1200–1800
Układ oczyszczania spalin	SCR/DPF

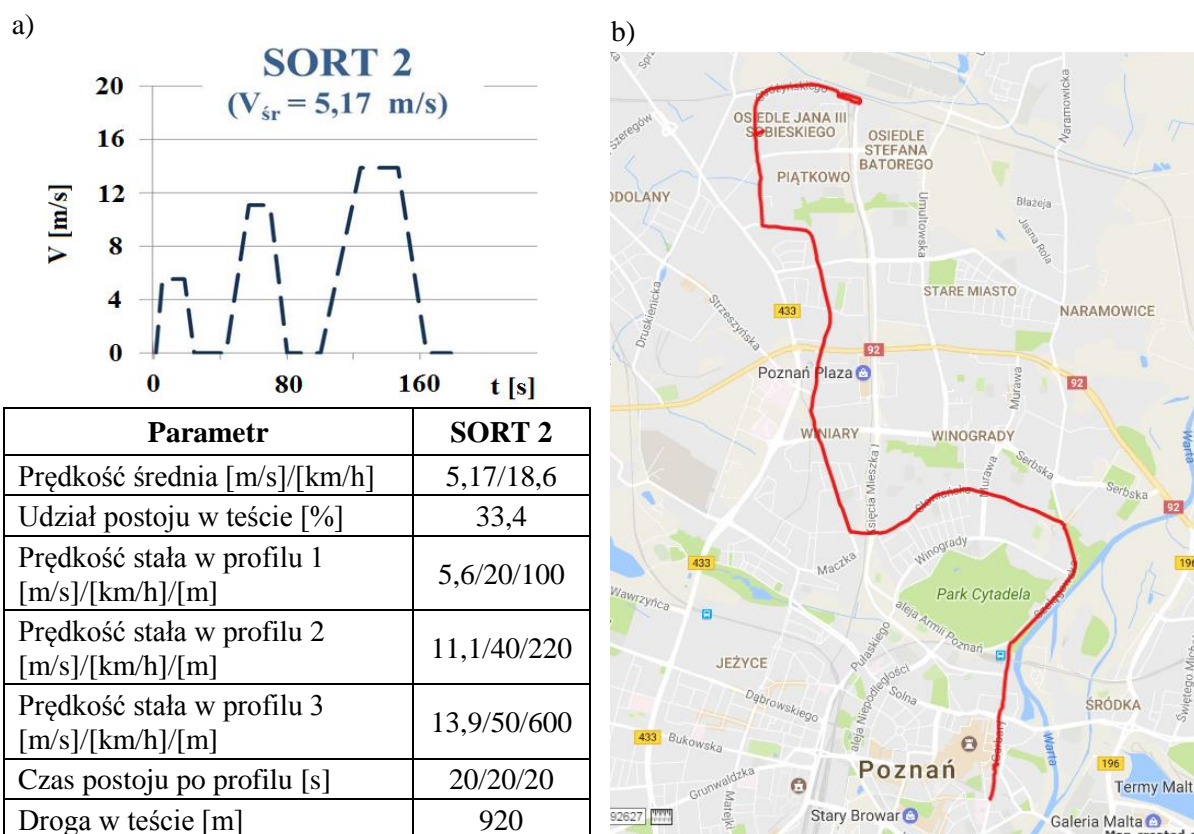
c)



Parametr	CNG
Typ/paliwo	4-suwowy, ZI/ sprężony gaz ziemny
Objętość skokowa [dm ³]	8,9
Stopień sprężania	12
Maksymalna moc [kW]/[obr/min]	239/2000
Maksymalny moment obrotowy [N·m]/[obr/min]	1356/1300–1400
Układ oczyszczania spalin	TWC

Rys. 1. Dane techniczne obiektów badawczych

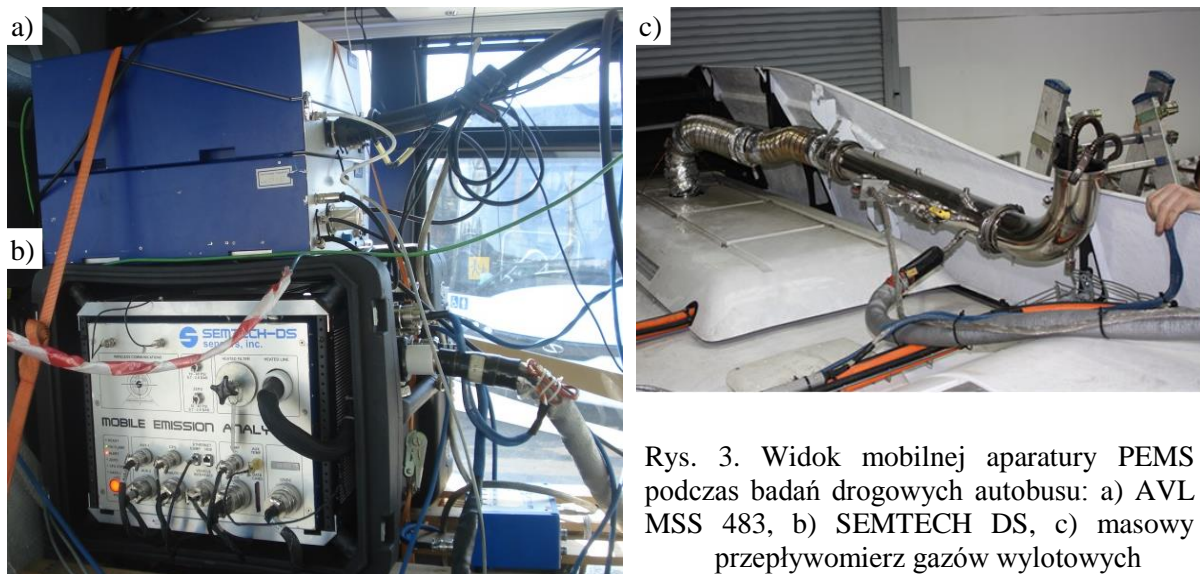
Badania emisji zanieczyszczeń wykonywane w warunkach drogowych umożliwiają wyznaczenie rzeczywistych wskaźników ekologicznych i ekonomicznych pojazdów. W procesie opracowywania metodyki pomiarów bardzo istotny jest dobór tras badawczych (rys. 2). W ruchu miejskim na warunki eksploatacji ma wpływ wiele czynników (m.in. kongestie, organizacja ruchu, sygnalizacja świetlna), w związku z tym charakteryzuje się on dużą różnorodnością oraz przypadkowością. Podczas opracowywania metodyki badań przyjęto, że wykonane zostaną pomiary emisji zanieczyszczeń z autobusów miejskich w rzeczywistej eksploatacji i w złożonych trapezowych testach znormalizowanych SORT 2 (Standardised On-Road Tests 2 – Easy Urban) zdefiniowanych przez UITP (Union Internationale des Transports Publics – Międzynarodową Organizację Transportu Publicznego) [13]. Charakterystykę testu przedstawiono na rys. 2a. Ponadto przeprowadzono badania na linii miejskiej, obsługiwanej przez lokalnego operatora komunikacyjnego, klasyfikowanej jako jedna z bardziej obciążonych w aspekcie długości i liczby przewożonych pasażerów (rys. 2b). Całkowity jej dystans wynosił 11,2 km i obejmował dwadzieścia siedem przystanków wraz z pętlami. Przejazd rozpoczął się w północnej części miasta i wiódł arteriami o różnym natężeniu ruchu do ścisłego centrum Poznania.



Rys. 2. Metodyka badań w rzeczywistej eksploatacji: a) test jezdny SORT 2, b) linia miejska [15]

Do badań autobusów w rzeczywistych warunkach eksploatacji wykorzystano mobilne przyrządy SEMTECH DS oraz AVL MSS przeznaczone do badań w rzeczywistych warunkach ruchu, klasyfikowane do grupy PEMS. Urządzenia pozwalają realizować badania silników o zapłonie iskrowym oraz samoczynnym spełniające normy Euro III i nowsze (rys. 3). Gazy wylotowe badanego pojazdu kierowane są do sondy masowego natężenia przepływu, gdzie pobierana jest próbka spalin. Badana objętość gazów transportowana jest grzanym przewodem do zestawu analizatorów przyrządu SEMTECH DS. W tym miejscu następuje pomiar stężeń składników gazowych: THC (analizator FID – flame ionization detector), NO_x (analizator NDUV – non-dyspersive detector ultra violet), CO_x (analizator NDIR – non-

dyspersive detector infra red), a także O_2 (metoda elektrochemiczna). Równolegle pobierana jest próbka gazów wylotowych do mobilnego analizatora AVL MSS, gdzie wyznaczane jest stężenie PM na podstawie metody fotoakustycznej.

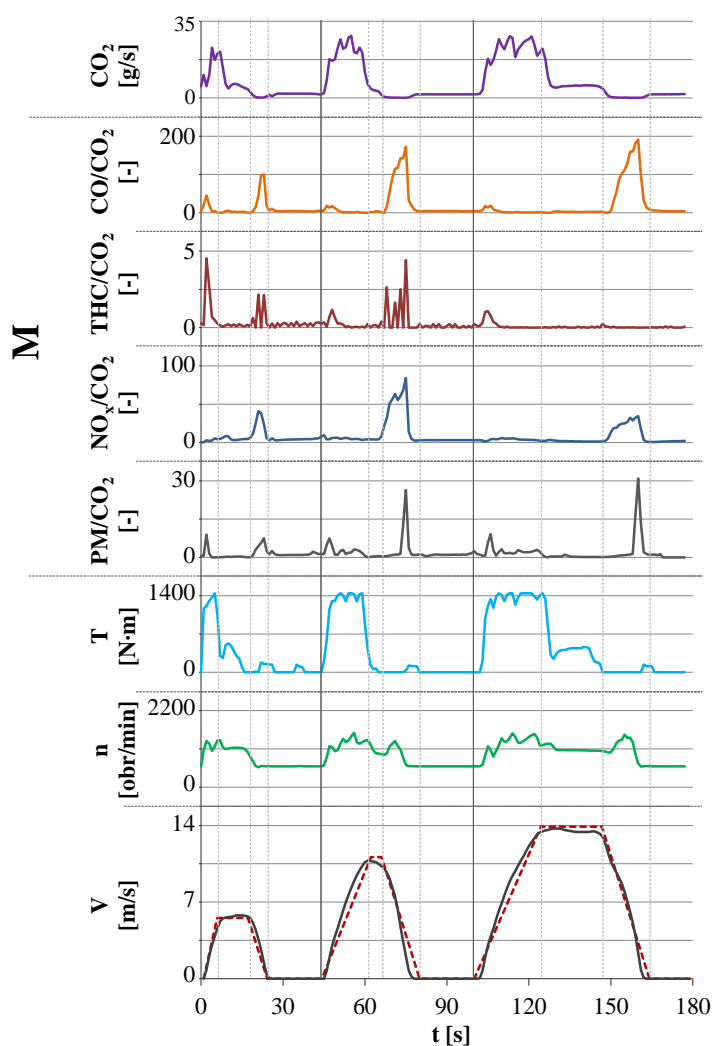


Rys. 3. Widok mobilnej aparatury PEMS podczas badań drogowych autobusu: a) AVL MSS 483, b) SEMTECH DS, c) masowy przepływomierz gazów wylotowych

4. Wyniki badań

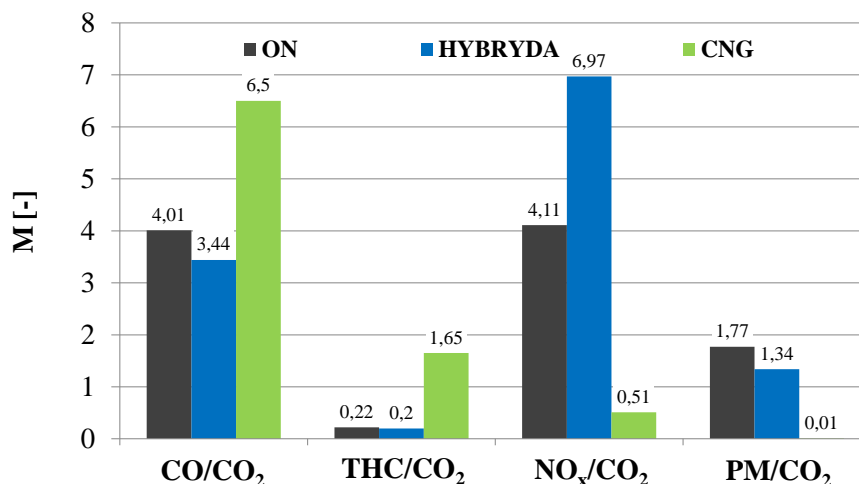
4.1. Emisja związków toksycznych odniesiona do CO_2 w teście SORT

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono emisję sekundową poszczególnych związków toksycznych (CO , THC , NO_x , oraz PM), którą odniesiono do emisji sekundowej CO_2 . Poszczególne zależności wraz z parametrami pracy silników spalinowych oraz przebiegami prędkości autobusu oznaczonego ON, wybranego do prezentacji wyników, przedstawiono na rys. 4. Zestawienie wskazuje, że zawsze podczas hamowania silnikiem kiedy jednostka napędzana jest przez koła pojazdu a emisja sekundowa CO_2 jest bliska zeru, następuje istotne zwiększenie bezwymiarowego wskaźnika M . Świadczy to o występowaniu negatywnych zjawisk w cylindrach silnika – gaszenie płomienia, spalanie niezupełne i niecałkowite oraz nieprawidłowe działania układów oczyszczania spalin. Taka sytuacja ma miejsce zawsze w chwili redukcji biegu, o czym świadczy przebieg momentu obrotowego i prędkości obrotowej. Na podstawie wartości uzyskanych dla wskaźnika M_{NO_x}/CO_2 (85 podczas hamowania w drugim profilu testu), możliwe jest sformułowanie wniosku o małej skuteczności konwersji pozasilnikowego układu selektywnej redukcji katalitycznej SCR, którego działanie jest uzależnione przede wszystkim od temperatury oraz masowego natężenia przepływu spalin. Maksymalne wartości poszczególnych wskaźników osiągnięto dla: $M_{CO}/CO_2 = 191$ oraz $M_{PM}/CO_2 = 31$ w trzecim profilu testu SORT 3, natomiast $M_{THC}/CO_2 = 4,6$ wystąpiło w pierwszej części rozpatrywanego cyklu.



Rys. 4. Przebieg prędkości pojazdu, prędkości obrotowej wału korbowego, momentu obrotowego natężenia emisji CO₂ oraz wskaźnika M dla CO, THC, NO_x i PM zarejestrowane podczas badań w teście drogowym SORT 2

Biorąc pod uwagę zarejestrowane wartości emisji poszczególnych związków szkodliwych dokonano zestawienia obliczonych wskaźników M dla testu jezdnego SORT 2 (rys. 5). Dla CO i THC odniesionych do CO₂ największe wartości uzyskał pojazd zasilany sprężonym gazem ziemnym. Około ośmiokrotnie większy wynik dla M_{THC/CO₂} niż w pozostałych obiektach badawczych, osiągnął pojazd z silnikiem ZI, co wynikało z cech zastosowanego paliwa. Należy zaznaczyć, że znaczący udział, powyżej 98% w tym wyniku stanowią węglowodory niemetaanowe (NMHC) – uznawane jako szkodliwe, ale nie toksyczne. Największy wskaźnik M_{NO_x/CO₂} wynoszący 6,97 wykazano dla napędu hybrydowego, gdzie zastosowano silnik charakteryzujący się najmniejszym maksymalnym momentem obrotowym w porównaniu do innych jednostek. W związku z tym pojazd ten często pracował w obszarze większego obciążenia (wyższe sprawności, znaczne temperatury w cylindrach podczas spalania), co miało istotny wpływ na uzyskane wyniki. Zastosowanie paliwa alternatywnego oraz napędu hybrydowego, gdzie silnik elektryczny skutecznie wspomagał pracę silnika spalinowego podczas ruszania i przyspieszania pojazdu, przyczyniło się do uzyskania mniejszych wartości M_{PM/CO₂} niż dla rozwiązania konwencjonalnego ON. Dla tego autobusu obliczony wskaźnik toksyczności wyniósł M_{PM/CO₂} = 1,77. Ponadto w trzecim badanym pojeździe nie zastosowano żadnego układu oczyszczania dedykowanego dla cząstek stałych, a uzyskanie tak małych wartości wynikało z zastosowania paliwa gazowego, które bardzo dobrze miesza się z powietrzem w komorze spalania, a także obiegu termodynamicznego, w którym pracowała jednostka spalinowa.



Rys. 5. Zestawienie wskaźników toksyczności M dla CO, THC, NO_x oraz PM podczas badań w znormalizowanym teście SORT 2

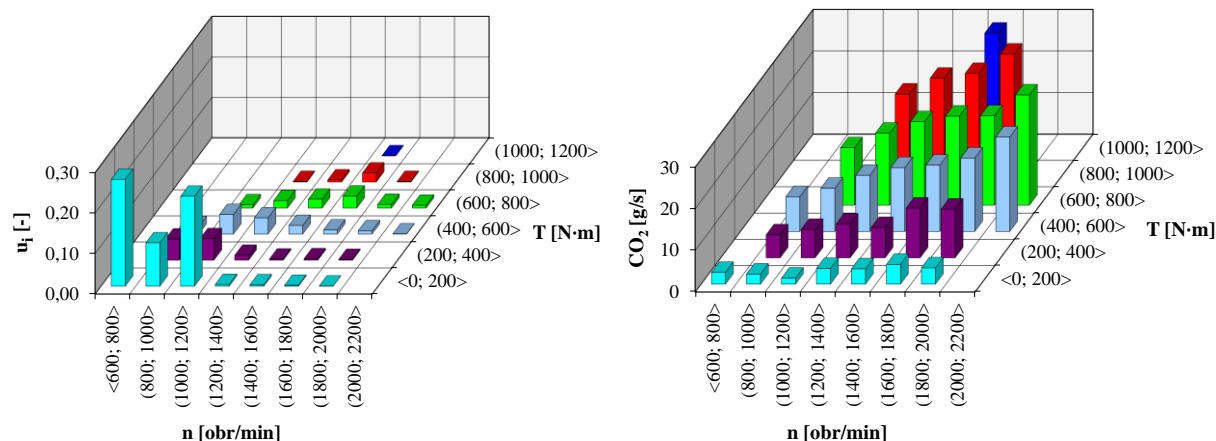
4.2. Emisja związków toksycznych odniesiona do CO₂ na linii miejskiej

Na podstawie analizy udziału czasu pracy silnika spalinowego można stwierdzić, że autobus hybrydowy osiągnął największe wartości 26,4% w obszarze prędkości biegu jałowego dla momentu obrotowego w przedziale $\langle 0 \text{ N}\cdot\text{m}; 200 \text{ N}\cdot\text{m} \rangle$ (rys. 6a). W rozpatrywanym teście badawczym odnotowano także istotną część czasu pracy przy parametrach $\langle 1000 \text{ obr/min}; 1200 \text{ obr/min} \rangle$ i $\langle 0 \text{ N}\cdot\text{m}; 200 \text{ N}\cdot\text{m} \rangle$, która stanowiła 22% całego przejazdu na linii miejskiej. Dla przedziału znajdującego się między wymienionymi zakresami wyznaczono udział czasu pracy 10,7%. Sumaryczny udział czasu pracy jednostki napędowej w obszarze $\langle 800 \text{ obr/min}; 1200 \text{ obr/min} \rangle$ i $\langle 200 \text{ N}\cdot\text{m}; 600 \text{ N}\cdot\text{m} \rangle$ stanowiło 17,2%. Dla niewymienionych pojedynczych zakresów rozpatrywane wartości nie przekraczały 4%.

Dla silników ZS natężenie emisji CO₂ uzależnione jest przede wszystkim od obciążenia. W autobusie hybrydowym, ze względu na współpracę elementów napędu, wpływ na uzyskiwane wartości miały nie tylko generowane momenty obrotowe, ale także uzyskiwane prędkości obrotowe (rys 6b). Spowodowane to było wykorzystaniem energii elektrycznej do wspomaganie pracy pojazdu, szczególnie podczas przyspieszania. Maksymalna wartość rozpatrywanego obiektu badawczego osiągnęła 28,7 g/s w przedziale $\langle 1600 \text{ obr/min}; 1800 \text{ obr/min} \rangle$ dla największych obciążeń. Średnia dla całego przejazdu stanowiła 13,8 g/s, a najmniejsze natężenie emisji CO₂ uzyskano w obszarze obciążeń do 200 N·m w całym zakresie prędkości obrotowych.

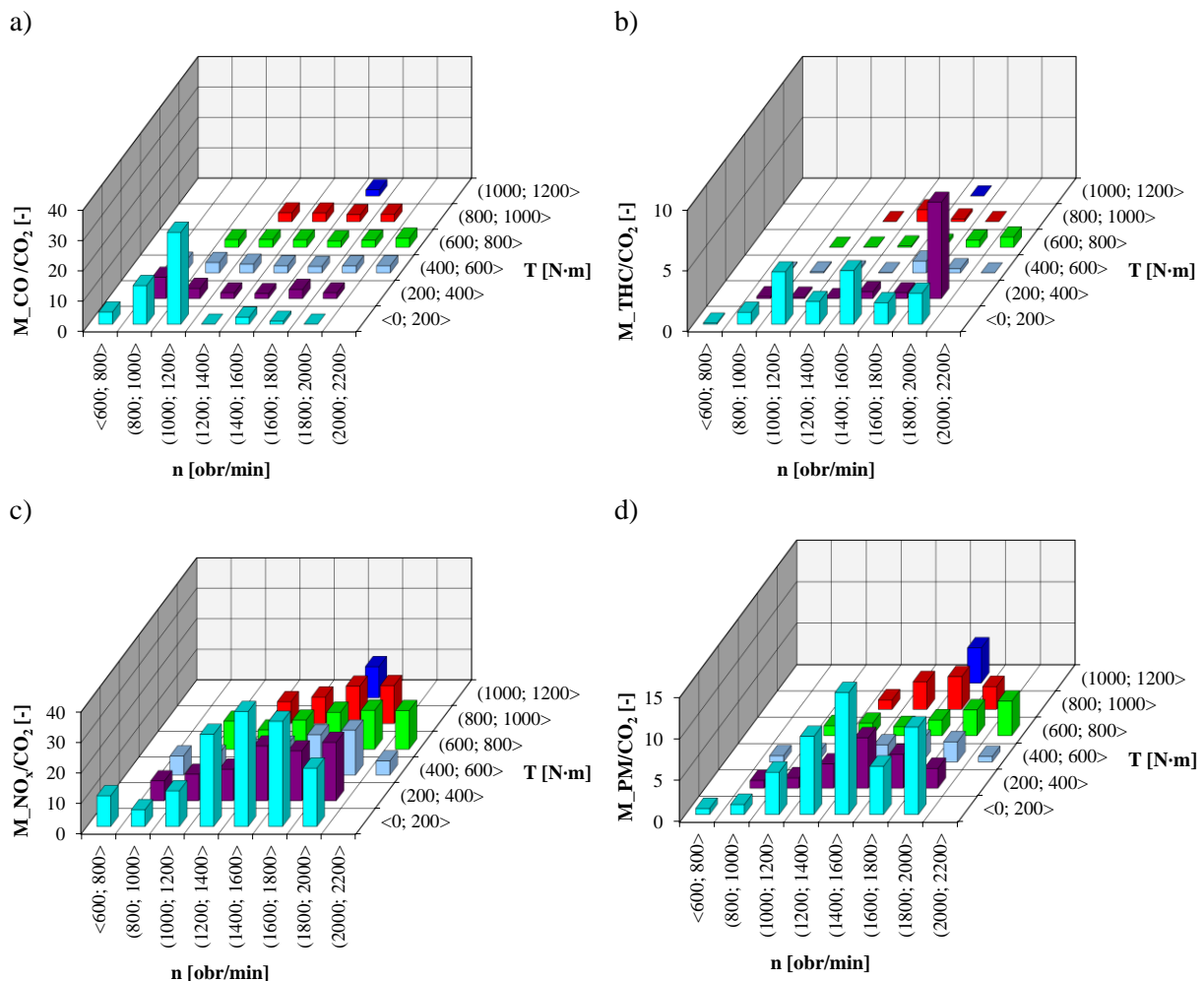
a)

b)



Rys. 6. Charakterystyki pojazdu hybrydowego podczas pomiarów na linii miejskiej: a) udział czasu pracy silnika spalinowego, b) natężenie emisji CO₂ w przedziałach prędkości i momentu obrotowego

Natężenie emisji poszczególnych związków toksycznych zarejestrowane podczas badań na linii miejskiej autobusu hybrydowego odniesiono do emisji CO₂. Dla wskaźnika toksyczności M_CO/CO₂ największe wartości uzyskano w obszarze prędkości (800 obr/min; 1200 obr/min) przy najmniejszych obciążeniach, gdzie w kolejnych pojedynczych przedziałach uzyskano odpowiednio: 12,7 i 30,2 (rys. 7a). W pozostałych zakresach średnia wyniosła 2,5, a rozkład charakterystyki był równomierny. Współczynnik M_THC/CO₂ uzyskał istotne wartości (średnio 3) w obszarze najmniejszych obciążeń do 200 N·m, przy prędkościach w zakresie (1000 obr/min; 2000 obr/min) (rys. 7b). Dla przedziału opisanego parametrami (200 N·m; 400 N·m) oraz (1800 obr/min; 2000 obr/min) wykazano wskaźnik wynoszący 7,9, który może świadczyć o znacznym wygaszaniu płomienia (zaniku spalania) w cylindrach silnika. Pozostałe pojedyncze przedziały charakteryzowały się współczynnikami nie większymi niż 0,97.

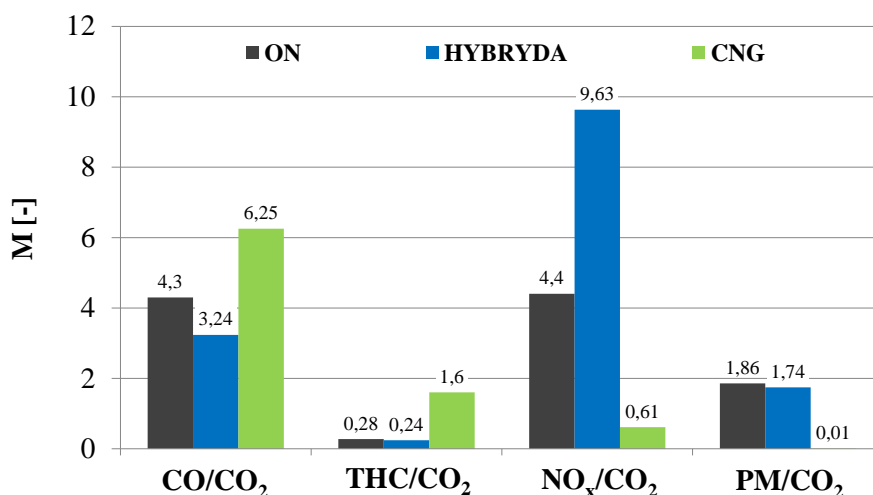


Rys. 7. Charakterystyki bezwymiarowego wskaźnika M pojazdu hybrydowego podczas pomiarów na linii miejskiej dla poszczególnych związków toksycznych: a) CO, b) THC, c) NO_x oraz d) PM

Największe wartości wskaźnika toksyczności M_{NO_x/CO_2} (do 37,7) wyznaczono dla przedziału prędkości obrotowych (1200 obr/min; 2000 obr/min) przy obciążeniach do 200 N·m (rys. 7c). Świadczy to o ograniczonym działaniu układu selektywnej redukcji katalicznej, która dozuje czynnik redukujący w zależności od temperatury i strumienia przepływu gazów wylotowych. W przywołanym obszarze występują niekorzystne warunki dla wysokich sprawności konwersji. W pozostałym zakresie pracy silnika uzyskano równomierny rozkład z tendencją zwiększania się wartości współczynnika wraz ze

zwiększaniem prędkości obrotowej wału korbowego – dla pozostałych przedziałów charakterystyki uzyskano średnio 10,5. W zakresie prędkości obrotowych powyżej 1000 obr/min, obejmującym najmniejsze obciążenia, uzyskano największe współczynniki M_{PM/CO_2} , gdzie w pojedynczych przedziałach wykazano wartości od 5,2–14,7 (rys. 7d). W obszarze średnich momentów, w całym zakresie prędkości obrotowej uzyskano najmniejsze wartości rozpatrywanego wskaźnika emisyjnego, co świadczy o występowaniu najkorzystniejszego (zupełnego i całkowitego) spalania w tym przedziale parametrów pracy silnika badanego pojazdu.

Zestawienie wskaźników toksyczności wszystkich badanych obiektów wskazuje, tak jak podczas badań w teście jezdnym SORT 2, że najmniejsze wartości M_{CO/CO_2} oraz M_{THC/CO_2} wyznaczono dla autobusu z napędem hybrydowym (rys. 8). Połączenie cech silnika spalinowego i elektrycznego umożliwiło zwiększenie sprawności napędu, co wpłynęło korzystnie na rozpatrywane współczynniki, które osiągnęły odpowiednio wartości 3,24 oraz 0,24. Ponownie największe wyniki w tym zakresie uzyskano dla pojazdu zasilanego CNG, który był wyposażony w trójfunkcyjny reaktor katalityczny charakteryzujący się dużym stopniem konwersji (redukcji) NO_x . To przyczyniło się do osiągnięcia bardzo małego wskaźnika M_{NO_x/CO_2} wynoszącego 0,61. W obszarze obejmującym PM największe wskaźniki uzyskał pojazd konwencjonalny – 1,86. Hybrydyzacja napędu korzystnie wpłynęła na M_{PM/CO_2} , jednak zastosowanie paliwa gazowego pozwala uzyskać blisko 100-krotnie mniejsze wartości w rozważanym obszarze.



Rys. 8. Zestawienie wskaźników toksyczności M dla CO, THC, NO_x oraz PM podczas badań drogowych na linii miejskiej

5. Podsumowanie

Przedstawiona ocena emisji zanieczyszczeń z autobusów miejskich, na podstawie badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji, pozwala na sformułowanie wniosków dotyczących zarówno samego silnika spalinowego, jak i całego zespołu napędowego (z uwzględnieniem pozasilnikowych układów oczyszczania spalin). Zaprezentowane i omówione wyniki badań dowodzą, że użycie wskaźnika toksyczności, stanowiącego stosunek emisji danego związku toksycznego do emisji CO_2 , umożliwia przeprowadzenie rozważań dla rozwiązań konwencjonalnych, hybrydowych oraz wykorzystujących do zasilania paliwa alternatywne. Jego interpretację można przeprowadzać dla różnego rodzaju charakterystyk (również dyskretnych), co jest niezwykle przydatne w badaniach ekologiczności środków transportu, szczególnie podczas rzeczywistej eksploatacji. Przedstawiony współczynnik jest

pewnego rodzaju miarą nieprawidłowości spalania paliwa w cylindrach silnika oraz miarą efektywności pracy układów oczyszczania gazów wylotowych. Wskaźnik toksyczności M niewątpliwie powinien być wykorzystywany w badaniach drogowych, ponieważ daje nowe możliwości poznawcze dzięki swojej bezwymiarowości – jego konstrukcja uniezależnia końcowe wyniki badań m.in. od przebytego dystansu oraz wykonanej pracy przez zespół napędowy w teście. Możliwe jest ograniczenie liczby zakładanych warunków brzegowych dla warunków jako muszą zostać spełnione podczas rzeczywistej eksploatacji. Jest to bardzo korzystne w procesie oceny ekologiczności i realizacji pomiarów, ponieważ homologacyjne badania drogowe są trudne do zrealizowania ze względu na wiele obostrzeń dotyczących m.in. czasu, udziału prędkości i przyspieszeń, dystansu oraz wykonanej pracy przez silnik. Z tych powodów jego zastosowanie może być szczególnie przydatne podczas oceny napędów hybrydowych. Przedstawione w pracy analizy są jednymi z pierwszych tego rodzaju, a ich wyniki i wnioski motywują do dalszych prac nad przedstawionym zagadnieniem oceny emisji związków toksycznych z pojazdów w aspekcie emisji CO₂.

Źródło finansowania: Prace sfinansowano ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju – program INNOTECH (umowa nr INNOTECH-K2/IN2/36/182269/NCBR/12).

Acknowledgement: The research was funded by the National Centre for Research and Development – the INNOTECH Programme (contract No. INNOTECH-K2/IN2/36/182269/NCBR/12).

Literatura

1. Almén J. Swedish In-Service Testing Programme 2010 on Emissions from Heavy-Duty Vehicles. AVL Certification & Regulation Compliance, Södertälje 2010.
2. Bajerlein M., Rymaniak Ł. The Reduction of Fuel Consumption on the Example of Ecological Hybrid Buses. *Applied Mechanics and Materials* Vol. 518 (2014), 96–101, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.518.96.
3. Bonnel P., Rubino L., Carriero M., Krasenbrink A. Portable Emission Measurement System (PEMS) for Heavy Duty Diesel Vehicle PM Measurement: the European PM PEMS Program. SAE Technical Paper 2009-24-0149.
4. Commission Regulation (EU) No 582/2011 of 25 May 2011 implementing and amending Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council with respect to emissions from HDV (Euro VI) and amending Annexes I and III to Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council.
5. Čupera J., Sedlák P. Design and Verification of Engine Power Calculation Model Using the Data of a Digital Bus Built into an Agricultural Tractor. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, no. 6, Brno 2011.
6. Czerwinski J., Comte P., Zimmerli Y. et al. Testing emissions of passenger cars in laboratory and on-road (PEMS, RDE). *Combustion Engines*. 2016, 166(3), 17–23. doi:10.19206/CE-2016-326.
7. Fuc P., Lijewski P., Ziolkowski A., Dobrzynski M., Dynamic Test Bed Analysis of Gas Energy Balance for a Diesel Exhaust System Fit with a Thermoelectric Generator, „*Journal of Electronic Materials*” 2017, Vol. 46, No. 5, p. 3145–3155.
8. Fulper C. New Measurement Techniques & Procedures for Measuring “Real World” Emissions with PEMS and PAMS. 2013 PEMS Conference & Workshop University of California, Riverside 2013.

9. Kuranc A. Exhaust emission test performance with the use of the signal from air flow meter. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 17 (1): 129–134.
10. Merkisz J., Kozak M., Lijewski P., Fuć P. Exhaust Emissions from Heavy-Duty Vehicles Under Actual Traffic Conditions in the City of Poznań. SAE Technical Paper 2013-01-0119.
11. Nylund N.O., Erkkilä K., Hartikka T.: Fuel Consumption and Exhaust Emissions of Urban Buses. VTT Tiedotteita Research Notes 2373, Helsinki 2007.
12. Petrović V.S., Janković S.P, Tomić M.V., Jovanović Z.S., Knežević D.M. The Possibilities for Measurement and Characterization of Diesel Engine Fine Particles – a Review. *Thermal Science*, no. 4/2011 (15), 915–938.
13. UITP 2009: UITP Project SORT Standardized On-Road Test Cycles. UITP – International Association of Public Transport, Bruksela 2009.
14. United Nations Economic Commission for Europe: Global technical regulation No. 4: Test procedure for compression-ignition (C.I.) engines and positive ignition (P.I.) engines fuelled with natural gas (NG) or liquefied petroleum gas (LPG) with regard to the emission of pollutants. ECE/TRANS/180/Add.4, 2007.
15. <http://gpsvisualizer.com> (dostęp: 30.01.2017).