

ZASTOSOWANIE METODY OCENY CYKLU ISTNIENIA POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH DO BADANIA ODDZIAŁYWANIA MOTORYZACJI NA ŚRODOWISKO

ZDZISŁAW CHŁOPEK¹, JAKUB LASOCKI², ANNA KIERACIŃSKA³

Politechnika Warszawska, Przemysłowy Instytut Motoryzacji

Streszczenie

Ocena cyklu istnienia jest narzędziem analitycznym umożliwiającym ilościowy opis oddziaływania na środowisko obiektów, usług i procesów w całym umownym okresie ich istnienia. Polega ona na identyfikacji i kwantyfikacji zużytych surowców i energii, emitowanych zanieczyszczeń oraz generowanych odpadów, a następnie ocenie potencjalnych skutków, jakie mogą wywołać w środowisku. W artykule rozważono możliwość zastosowania oceny cyklu istnienia do analizy właściwości ekologicznych samochodów. Przedstawiono jej podstawowe aspekty metodyczne. Dokonano analizy wpływu na środowisko samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym. Najwięcej uwagi poświęcono założeniom dotyczącym sposobów użytkowania samochodu. W tym celu opracowano dwa modele ruchu samochodu reprezentujące warunki drogowe w Polsce. W pierwszym modelu uwzględniono ruch samochodu w miastach, poza miastami i na trasach szybkiego ruchu. Drugi model odpowiada warunkom ruchu typowym dla zatorów ulicznych. Utworzone modele zestawiono z modelem ruchu w postaci przebiegu prędkości w homologacyjnym teście jezdnym NEDC. Na podstawie modeli ruchu i stochastycznych charakterystyk emisji zanieczyszczeń utworzonych metodą Monte Carlo wyznaczono emisję drogową zanieczyszczeń i zużycie paliwa przez samochód. Uzyskane dane wykorzystano do opisu użytkowania samochodu w ocenie cyklu istnienia. Stwierdzono znaczną wrażliwość otrzymanych wyników na przyjęte założenia.

Słowa kluczowe: ocena cyklu istnienia – LCA, ochrona środowiska, model ruchu samochodu, silnik spalinowy o zapłonie samoczynny

1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem cywilizacyjnym wzrasta świadomość antropogenicznych zagrożeń środowiska i potrzeba przeciwdziałania im. Jest to szczególnie widoczne w dziedzinie

¹ Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, e-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl, tel. 22 234 85 59

² Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, e-mail: jlasocki@simr.pw.edu.pl

³ Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa, e-mail: a.kieracinska@pimot.org.pl, tel. 22 777 70 73

motoryzacji, w której do zagadnień związanych z ochroną środowiska zaczęto w ostatnich dziesięcioleciach przywiązywać coraz większą wagę [3, 14, 21]. Obecnie właściwości ekologiczne pojazdów, obok stosowanych systemów bezpieczeństwa, uznaje się często za wyznaczniki postępu technicznego w motoryzacji.

Spośród wielu skutków oddziaływania motoryzacji na środowisko najwięcej uwagi poświęca się przede wszystkim: zanieczyszczeniu powietrza substancjami toksycznymi emitowanymi z pojazdów, stanowiącymi zagrożenie dla zdrowia ludzi [1, 32], rosnącemu zużyciu ograniczonych zasobów paliw kopalnych [14] oraz intensyfikacji globalnych zmian klimatycznych spowodowanych emisją gazów cieplarnianych [25]. Bez wątplenia problemy te będą z czasem narastać, gdyż zapotrzebowanie na środki transportu jest coraz większe. Przewiduje się, że do 2050 roku liczba pojazdów wzrośnie ponad dwukrotnie [6, 25], przy czym największe zmiany mają nastąpić w krajach rozwijających się, w tym także w Polsce.

Aby ograniczyć negatywny wpływ samochodów na środowisko wprowadza się nowe rozwiązania konstrukcyjne w silnikach spalinowych i podejmuje próby zastąpienia tradycyjnych paliw – benzyny i oleju napędowego paliwami niekonwencjonalnymi [26]. Duże nadzieje pokłada się także w napędach elektrycznych i hybrydowych oraz w ogniwach paliwowych [23].

Wobec tak wielu zróżnicowanych rozwiązań technicznych, wybór najlepszych ze względu na ochronę środowiska stanowi bardzo trudne zadanie. Wydaje się zatem zasadne postawienie tezy, że skuteczne porównanie poszczególnych rodzajów napędów pojazdów może być dokonane jedynie w oparciu o ich kompleksową ocenę. Analizując wpływ samochodu na środowisko powinno się więc dodatkowo uwzględnić potencjalne skutki związane z powstaniem i użytkowaniem jego wytwórni, infrastruktury drogowej i obsługowej, a także materiałów eksploatacyjnych i ich wytwórni [3, 14]. Takie całościowe podejście cieszy się w ostatnich latach coraz większym zainteresowaniem. Wynika to z faktu, że dla niektórych rozwiązań napędów obciążenie środowiska może być przeniesione z etapu użytkowania pojazdu na etap jego wytwarzania lub – znacznie częściej – wytwarzania nośników energii. Taka sytuacja ma miejsce na przykład w przypadku samochodów elektrycznych [19].

Ocena cyklu istnienia (Life Cycle Assessment – LCA) jest narzędziem analitycznym, które umożliwia ilościowy opis oddziaływania samochodów na środowisko we wszystkich etapach ich istnienia: od projektowania, poprzez wytwarzanie i eksploatację, aż do zagospodarowania po zużyciu. Metoda ta może być w ogólności wykorzystywana do badania wpływu na środowisko różnego rodzaju obiektów, procesów i usług. Początkowo stosowana głównie do porównywania właściwości ekologicznych produktów spożywczych, opakowań oraz prostych obiektów technicznych, od niedawna staje się standardem w motoryzacji, przemyśle chemicznym, petrochemicznym, budownictwie i innych dziedzinach [17].

W motoryzacji ocena cyklu istnienia rozwija się dwutorowo – analizy publikowane są zarówno przez jednostki naukowe, jak i koncerny motoryzacyjne. Niestety otrzymywane wyniki często są trudne w weryfikacji i nie zawsze ze sobą spójne. Wynika to z faktu, że nie wszystkie aspekty oceny cyklu istnienia zostały do tej pory należycie sformalizowane – panuje daleko posunięta dowolność wyboru założeń i danych wejściowych, brakuje

międzynarodowych standardów i obiektywnych, jednoznacznych kryteriów oceny. W dalszym ciągu prowadzone są więc badania mające na celu rozwój, udoskonalanie i – przede wszystkim – ujednoczenie metodyki oceny cyklu istnienia [12, 13].

Dotychczas w Polsce ocenie cyklu istnienia w motoryzacji nie poświęcano wiele uwagi, zagadnienie to jest natomiast rozwijane na świecie – w Europie obecnie najbardziej zaawansowane prace są prowadzone w Szwajcarii, Holandii i Niemczech.

W artykule zajęto się zagadnieniami związanymi z zastosowaniem oceny cyklu istnienia do badań oddziaływania na środowisko pojazdów samochodowych. Skuteczność tej metody, mającej uniwersalny charakter, zależy od przyjęcia racjonalnych założeń, odpowiadających analizowanemu obiektowi. Mając to na uwadze, w wypadku samochodu z silnikiem spalinowym, szczególnie nacisk powinien być położony na opis sposobu jego użytkowania. Użytkowanie bowiem w największym stopniu decyduje o wielkości obciążenia środowiska w całym umownym cyklu istnienia samochodu [2, 18, 26, 33]. W związku z tym przeprowadzono uproszczoną analizę oddziaływania na środowisko samochodu osobowego użytkowanego w różnych warunkach. Za punkt odniesienia przyjęto model ruchu pojazdu w postaci przebiegu prędkości w homologacyjnym teście jezdnym NEDC [3]. Porównano z nim modele ruchu symulujące rzeczywiste warunki użytkowania pojazdu w miastach, poza miastami, na trasach szybkiego ruchu oraz w zatorach ulicznych.

2. Metodyka oceny cyklu istnienia samochodu

Ogólne wytyczne dotyczące oceny cyklu istnienia są zawarte w normach Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej – ISO. Najważniejsze z nich to [15]:

- PN-EN ISO 14040:2009 – Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura,
- PN-EN ISO 14044:2009 – Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne,
- PKN-ISO/TR 14047:2006 – Zarządzanie środowiskowe – Ocena wpływu cyklu życia – Przykłady stosowania ISO 14042.

W normach ISO określono między innymi strukturę oceny cyklu istnienia. Zgodnie z nią, identyfikacja i kwantyfikacja oddziaływania obiektu na środowisko przebiega w czterech fazach [9, 16, 17, 20, 30, 29]:

- określenie celu i zakresu,
- analiza zbioru (Life Cycle Inventory – LCI),
- ocena wpływu (Life Cycle Impact Assessment – LCIA),
- interpretacja.

Pierwsza faza oceny cyklu istnienia determinuje jej dalszy przebieg. Definiowany jest w niej cel badań i zakres, który pozwoli zrealizować przyjęty cel. Granice analizy określa model cyklu istnienia obiektu, którego wpływ na środowisko się rozpatruje. Model ten, w ocenie cyklu istnienia nazywany systemem wyrobu, stanowi system powiązanych ze sobą procesów jednostkowych. Każdy proces jednostkowy odpowiada realizacji

stosownego procesu występującego w cyklu istnienia analizowanego obiektu. Im większa liczba procesów jednostkowych uwzględnionych w modelu okresu istnienia, tym dokładniej uzyskane wyniki opisują rzeczywiste oddziaływanie obiektu na środowisko. Zwiększenie stopnia skomplikowania systemu wyrobu oznacza jednak wzrost kosztów i czasu wykonywania analizy, głównie ze względu na czasochłonne zbieranie danych.

W cyklu istnienia samochodu osobowego, jak również w wypadku większości innych obiektów technicznych, można wyróżnić cztery główne etapy:

- etap projektowania, zwykle pomijany w analizach ze względu trudności w kwantyfikacji występującego w nim obciążenia środowiska [18] (decyzje podejmowane podczas projektowania w dużym stopniu wpływają jednak na właściwości ekologiczne samochodu w późniejszych etapach [3, 7, 15]);
- etap wytwarzania, uwzględniający także wydobycie surowców, wytwarzanie materiałów i ich transport;
- etap eksploatacji, w wypadku samochodu składający się z użytkowania, obsługi i postoju;
- etap zagospodarowania po zużyciu, obejmujący zbórkę odpadów, sortowanie, częściowo ponowne użycie, recykling lub składowanie [2, 3].

W zasadzie w odniesieniu do pojazdu samochodowego powinno się używać pojęcia „okres istnienia” zamiast powszechnie stosowanego „cyklu istnienia”. Drugie z pojęć, które przyjęło się zarówno w Polsce, jak i na świecie nawiązuje do teoretycznej możliwości występowania pętli, czyli powiązań o charakterze cyklicznym między etapami: początkowym i końcowym oraz innymi, nie następującymi bezpośrednio po sobie [31]. Przykładami takich powiązań są: ponowne wykorzystanie używanych części oraz recykling materiałowy.

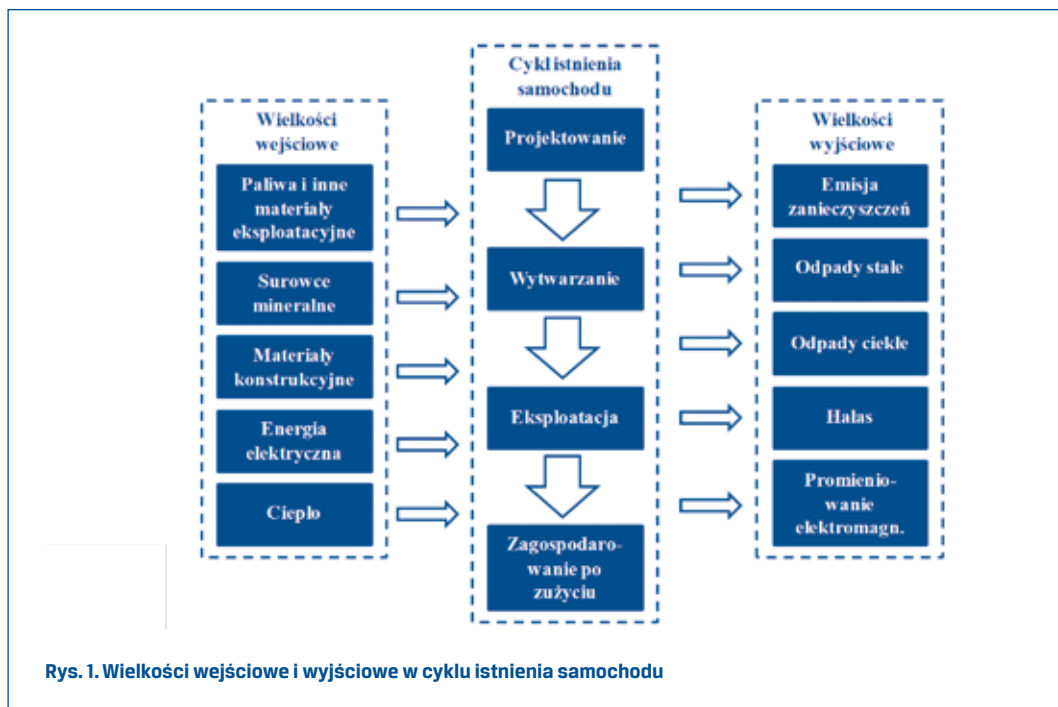
W pierwszej fazie oceny cyklu istnienia przyjmuje się ogólną jednostkę, za pomocą której wyrażona się końcowe wyniki analizy – jednostkę funkcjonalną [9, 17, 30, 31]. Wynika ona z wybranej funkcji spełnianej przez analizowany obiekt i umożliwia porównanie oddziaływania na środowisko kilku obiektów lub procesów mających takie same bądź podobne przeznaczenie. W dziedzinie transportu najczęściej stosuje się [34]:

- kilometr – km – odpowiada długości drogi pokonanej przez pojazd,
- osobokilometr – pkm – odpowiada długości drogi przejechanej pojazdem przez jedną osobę,
- tonokilometr – tkm – odpowiada długości drogi, na której przetransportowano ładunek o masie jednego megagrama.

Pozostałe założenia czynione w pierwszej fazie oceny cyklu istnienia dotyczą: poziomu szczegółowości analizy (konceptyjny, uproszczony lub szczegółowy [9, 17]), zasad alokacji, rodzajów kategorii wpływu i metod oceny wpływu cyklu istnienia. Należy także podać źródła danych, ich zakres czasowy i geograficzny.

Druga faza oceny cyklu istnienia – analiza zbioru – polega na zebraniu danych ilościowych dotyczących wszystkich procesów jednostkowych. Dla każdego procesu jednostkowego wyznacza się zbiory wielkości wejściowych i wyjściowych oraz podaje ich jednostki miar. Na tej podstawie tworzy się bilanse: materiałowy i energetyczny.

W ocenie cyklu istnienia samochodu głównymi wielkościami wejściowymi są: paliwa i inne materiały eksploatacyjne, surowce mineralne, materiały konstrukcyjne, energia elektryczna oraz ciepło. Do najważniejszych wielkości wyjściowych zalicza się natomiast: emisję zanieczyszczeń, odpady stałe i ciekłe, hałas oraz promieniowanie elektromagnetyczne [18, 34]. Wielkości te zostały przedstawione schematycznie na rysunku 1.



W trzeciej fazie – ocenie wpływu cyklu istnienia – wynikiem analizy zbioru przyporządkowuje się do odpowiednie kategorie wpływu, które określają rodzaje skutków oddziaływania na środowisko. Przykładowe kategorie wpływu to: zmiana klimatu, zubożenie warstwy ozonowej, eutrofizacja, zakwaszenie, powstawanie smogu, zatrucie ekosystemów, pogorszenie zdrowia ludzi, zmniejszenie zasobów paliw kopalnych, surowców mineralnych i wody, przekształcanie terenów z naturalnymi ekosystemami [9, 16, 17, 20, 27, 30]. Wybór kategorii wpływu powinien być podyktowany celem i zakresem analizy.

Oddziaływanie obiektu na środowisko można również oceniać w ramach obszarów chronionych, które mają bardziej ogólny wymiar niż kategorie wpływu, agregują bowiem wyniki z kilku kategorii [9, 11, 17, 29, 30, 31]. Według ISO istnieją trzy główne typy obszarów chronionych [15]: zdrowie człowieka, środowisko naturalne i surowce. Towarzystwo SETAC proponuje uwzględnienie dodatkowego obszaru chronionego – środowiska cywilizacyjnego oraz rozdzielenie środowiska naturalnego na biotyczne i abiotyczne [35]. W literaturze można spotkać różne nazwy odnoszące się do tych samych kategorii wpływu i obszarów chronionych.

Zagregowany wpływ na środowisko danej kategorii wpływu określają wskaźniki kategorii, będące ilościowymi wyznacznikami kategorii wpływu. Bazują one na wiedzy dotyczącej mechanizmów środowiskowych, stanowiących ciągi procesów o charakterze związków przyczynowo-skutkowych prowadzące do zmiany właściwości środowiska. Procedura obliczania wartości wskaźników kategorii wpływu dzieli się na czynności obowiązkowe i opcjonalne [17, 29, 30].

Do czynności obowiązkowych należą:

- wybór kategorii wpływu, wskaźników kategorii i modeli charakteryzowania,
- przypisanie wyników analizy zbioru do poszczególnych kategorii wpływu (klasyfikacja),
- obliczenie wartości wskaźników kategorii wpływu z wykorzystaniem współczynników charakteryzowania (charakteryzowanie).

Czynności opcjonalne obejmują:

- obliczenie wartości wskaźników kategorii wpływu w odniesieniu do wartości referencyjnych (normalizację),
- grupowanie wyników,
- wartościowanie (ważenie) wyników,
- analizę jakości danych.

W celu przeliczenia wyników analizy zbioru na wartości wskaźników kategorii wpływu wykorzystuje się predefiniowane algorytmy obliczeniowe w formie metod oceny wpływu. Podstawowe cechy niektórych z nich przedstawiono w tabeli 1.

Poszczególne metody różnią się od siebie uwzględnianymi kategoriami wpływu, modelami charakteryzowania oraz wskaźnikami kategorii (dla punktów pośrednich i punktów końcowych) [9, 17, 30]. Stosuje się także różne sposoby wartościowania wyników. Do najbardziej rozpowszechnionych należą [29, 30, 35]:

- monetaryzacja, w której określonym skutkom oddziaływania na środowisko przypisuje się umowne koszty,
- panel ekspertów, w którym uwzględnia się opinie grupy specjalistów ze środowiska akademickiego, innych jednostek naukowych oraz organizacji zajmujących się ochroną środowiska,
- odległość do celu, w której współczynniki wagowe są dobierane w odniesieniu do różnicy między obecnym poziomem oddziaływania na środowisko a poziomem docelowym określonym przez cele polityczne.

Wartościowanie wyników oceny wpływu niesie ze sobą wiele kontrowersji, gdyż wymaga subiektywnego rozstrzygnięcia kwestii priorytetów w ochronie środowiska, co z kolei wiąże się z uprzywilejowaniem niektórych aspektów socjalnych, politycznych i etycznych względem innych [9, 13]. W rezultacie wyniki analiz przeprowadzonych z zastosowaniem różnych metod oceny wpływu zwykle nie są ze sobą spójne. Ogranicza to możliwość porównania ich i może prowadzić do błędnego wnioskowania.

Tabela 1. Charakterystyka wybranych metod oceny wpływu, na podst. [29, 30]

Nazwa metody	Państwo pochodzenia	Rodzaj wskaźników kategorii		Normalizacja	Zasady ważenia		
		Punkty pośrednie	Punkty końcowe		Monetyzacja	Odległość do celu	Panel ekspertów
CML 1992, 2001	Holandia	X		X	-	-	-
CVAPBI	Grecja	X		X		X	
CAAGE	Brazylia		X	-	X		
Eco-indicator 95, 99	Holandia		X	X			X
Swiss Ecological Scarcity	Szwajcaria	X/-		X		X	
EDIP 1997/2003	Dania	X		X		X	
EPS 2000	Szwecja		X	X	X		
EGHT	Brazylia		X	-	X		
ExternE project	Europa		X	-	X		
IMPACT 2002+	Szwajcaria	X	X	X	-	-	-
IPCC	Europa	X		-			
LCA-net scheme	Japonia	X		X		X	
LIME	Japonia		X	X	X		
TRACI	USA	X		-	-	-	-
WAR algorithm	USA	X		X	-	-	-

W czwartej fazie oceny cyklu istnienia – interpretacji omawia się otrzymane wyniki w kontekście celu badań. Stanowi ona podsumowanie analizy i służy do sformułowania końcowych wniosków. Na jej podstawie tworzone są rekomendacje mające na celu ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko rozpatrywanego obiektu. Interpretacja jest formalnie przedstawiana jako ostatnia faza analizy, lecz nie zawsze powstaje na końcu. Metoda oceny cyklu istnienia ma bowiem charakter iteracyjny [17]. W trakcie prowadzenia badań uzyskuje się czasem dostęp do dodatkowych informacji, które mogą wpłynąć na modyfikację założeń przyjętych w fazach wcześniejszych.

3. Ocena cyklu istnienia samochodu ze względu na założenia dotyczące modelu ruchu

W wypadku samochodu z silnikiem spalinowym kluczową rolę w kompleksowej ocenie jego właściwości ekologicznych odgrywa etap eksploatacji, a dokładnie użytkowanie [2, 26,

33]. Użytkowanie wiąże się z emisją zanieczyszczeń i zużyciem paliwa [4], a te dwa czynniki mają największy udział w obciążeniu środowiska w całym cyklu istnienia samochodu.

W zdecydowanej większości badań z użyciem metody oceny cyklu istnienia do opisu użytkowania samochodu stosuje się na uproszczone modele ruchu. Najczęściej opierają się one na wynikach homologacyjnych testów jezdnych, wykonywanych na hamowni podwozowej. Innym stosowanym rozwiązaniem jest przyjęcie, że emisja zanieczyszczeń z silników spalinowych jest równa wartościom określonym przez obowiązujące normy emisji spalin. Takie podejście ma bardzo poważną wadę – nie uwzględnienia różnych warunków ruchu samochodów, które występują w rzeczywistym użytkowaniu. Opublikowane wyniki prac, np. [22, 24, 28, 36] pozwalają stwierdzić, że wartości emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa uzyskiwane przez samochody w rzeczywistych warunkach użytkowania znacznie się różnią od otrzymywanych podczas badań homologacyjnych w standardowych testach jezdnych. Świadomość występowania tej rozbieżności sprawia, że rozwiązania stosowane dotychczas w ocenie cyklu istnienia samochodu wymagają weryfikacji.

Celem badań jest określenie wpływu założeń przyjętych do opisu sposobu użytkowania samochodu na wielkość obciążenia środowiska wyznaczoną z zastosowaniem oceny cyklu istnienia.

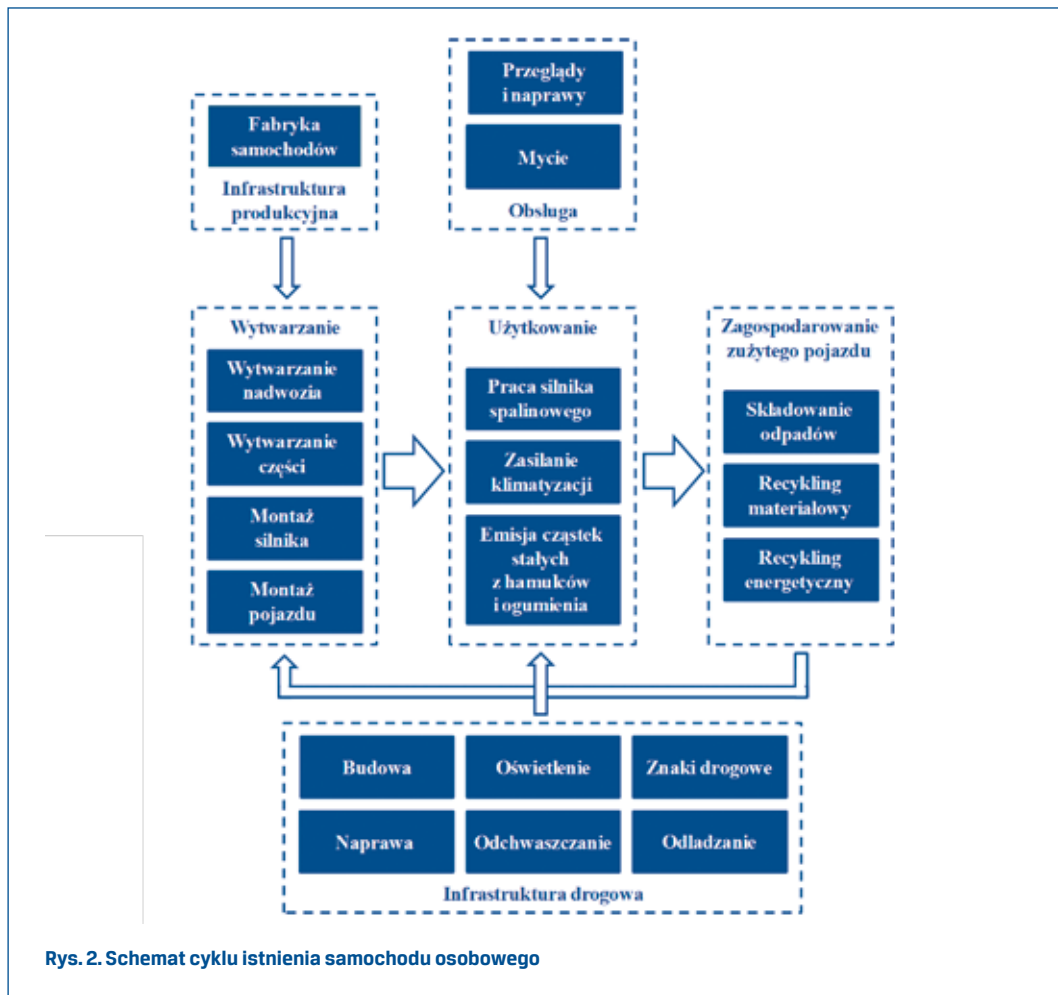
Obiekt analizy stanowi typowy samochód osobowy z silnikiem o zapłonie samoczynnym w warunkach polskich. Do warunków polskich odnoszą się w pracy:

- długość okresu istnienia samochodu – średni okres eksploatacji samochodu w Polsce, oszacowany w oparciu o dane GUS z 2010 roku [8], wynosi ok. 15,5 roku;
- roczny przebieg samochodu – na podstawie szacunków przedstawionych przez ITS w pracy [37], średni przebieg samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym w 2010 roku w Polsce wyniósł 12016 km (przyjęto 12000 km);
- model ruchu reprezentatywny dla lokalnych warunków drogowych, panujących na terenie Warszawy, województwa mazowieckiego i województwa łódzkiego.

Rozważany model cyklu istnienia samochodu osobowego, przedstawiono na rysunku 2. Składa się on z trzech głównych etapów: wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania zużytego pojazdu. W pierwszym etapie wyszczególniono procesy związane z wytwarzaniem nadwozia i części oraz montażem silnika i całego pojazdu. Z czynnościami tymi powiązано infrastrukturę produkcyjną – fabrykę samochodów. Drugi etap stanowi eksploatacja pojazdu. Uwzględniono w niej obciążenie środowiska na skutek użytkowania samochodu, w tym zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń z silnika spalinowego, dodatkowe zużycie energii i emisję zanieczyszczeń wynikające ze stosowania klimatyzacji oraz emisję pyłów ze źródeł innych niż silnik spalinowy, głównie z hamulców, ogumienia kół i nawierzchni jezdni. Z użytkowaniem samochodu powiązано jego obsługę – przeglądy, naprawy i mycie – oraz infrastrukturę drogową – jej budowę, naprawę i niezbędne czynności związane z utrzymywaniem bezpiecznych warunków ruchu. Ostatni etap – zagospodarowanie zużytego pojazdu – to przede wszystkim składowanie odpadów i recykling (materiałowy lub energetyczny).

Silnik spalinowy nie jest jedynym źródłem emisji zanieczyszczeń na skutek użytkowania samochodu. Ocenia się, że zużycie par trących w układzie hamulcowym przeciętnego

samochodu w ciągu jednego roku powoduje emisję pyłów o masie równej około 0,5 kg. Pyły te zawierają dużą ilość metali ciężkich, które są wyjątkowo szkodliwe dla zdrowia ludzi. W Przemysłowym Instytucie Motoryzacji są prowadzone prace nad sposobem zmniejszenia emisji cząstek stałych z układu hamulcowego poprzez ich odsysanie i gromadzenie w filtrze.



Rys. 2. Schemat cyklu istnienia samochodu osobowego

Jako jednostkę funkcjonalną przyjęto pokonanie przez samochód drogi o długości 1 km.

Zbadano trzy warianty modelu ruchu:

- NEDC – model ruchu w postaci przebiegu prędkości pojazdu w homologacyjnym teście jezdnym NEDC (New European Driving Cycle), wykonywanym na hamowni podwoziowej, składającym się z testu miejskiego UDC (Urban Driving Cycle) oraz pozamiejskiego EUDC (Extra Urban Driving Cycle) [3];

- model warunków drogowych, reprezentujący warunki rzeczywistego użytkowania samochodu, oparty na badaniach empirycznych, będący zerowymiarową charakterystyką przebiegów prędkości samochodu podczas jazdy w miastach, poza miastami i na trasach szybkiego ruchu;
- model kongestii, oparty na badaniach empirycznych, będący zerowymiarową charakterystyką przebiegów prędkości samochodu podczas jazdy w zatorach ulicznych w centrach miejskich.

Modele: warunków drogowych i kongestii utworzono na podstawie wyników badań samochodu w ruchu drogowym, przeprowadzonych w Pracowni Silników i Podwozi Przemysłowego Instytutu Motoryzacji w Warszawie. Obiektem badań był samochód Honda Civic wyprodukowany w 2000 roku, napędzany czterocylindrowym, rzędowym silnikiem o zapłonie iskrowym i objętości skokowej 1400 cm³, spełniający wymagania normy czystości spalin Euro 3. Badania wykonano na terenie województwa mazowieckiego i łódzkiego. Trasy przejazdu wyznaczono w taki sposób, aby odpowiadały warunkom ruchu w mieście (Warszawa), poza miastem i na trasach szybkiego ruchu. Program badań obejmował pomiary i rejestrację przebiegów: prędkości obrotowej silnika, sterowania silnika, prędkości pojazdu i jego położenia.

Jako reprezentatywną charakterystykę zerowymiarową przebiegów prędkości przyjęto wartość średnią prędkości samochodu. Założono udziały intensywności użytkowania samochodu w warunkach poszczególnych rodzajów ruchu. Prędkość średnią samochodu obliczono na podstawie wzoru:

$$v_{AV} = k_U \cdot v_{AV_U} + k_R \cdot v_{AV_R} + k_H \cdot v_{AV_H}, \quad (1)$$

$$k_U, k_R, k_H \in < 0; 1 >, \\ \sum k_i = 1,$$

gdzie: v_{AV_U} , v_{AV_R} , v_{AV_H} prędkości średnie samochodu w ruchu w miastach, poza miastami i na trasach szybkiego ruchu, k_U , k_R , k_H – współczynniki intensywności użytkowania samochodu w ruchu w miastach, poza miastami i na trasach szybkiego ruchu.

Założone udziały intensywności użytkowania samochodu i obliczone średnie wartości prędkości przedstawiono w tabeli 2. Średnia prędkość samochodu w modelu warunków drogowych wynosi 55,18 km/h, zaś w modelu kongestii – 8,87 km/h.

W oparciu o powyższe wartości, w fazie analizy zbioru, wyznaczono emisję drogową zanieczyszczeń. W tym celu wykorzystano stochastyczne charakterystyki emisji zanieczyszczeń w postaci zależności średniej emisji drogowej zanieczyszczeń: tlenku węgla, węglowodorów, tlenku azotu, cząstek stałych i dwutlenku węgla od prędkości średniej samochodu, wyznaczone z zastosowaniem metody Monte Carlo. Zostały one opublikowane w pracy [5], tam też przybliżono zasadę ich tworzenia. Wykorzystane charakterystyki opierają się na badaniach emisji zanieczyszczeń na hamowni podwoziowej przeprowadzonych z wykorzystaniem samochodu Citroën Berlingo z silnikiem PSA XUD9 o zapłonie samoczynnym, objętości skokowej 1868 cm³ i znamionowej mocy użytecznej 51 kW.

W wypadku modelu ruchu NEDC, wartości emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa zaczerpnięto bezpośrednio ze świadectwa homologacji samochodu Citroën Berlingo.

Tabela 2. Wielkości charakteryzujące modele ruchu samochodu utworzone na podstawie badań empirycznych

Model ruchu	Ruch	Udział intensywności użytkowania samochodu (k)	Prędkość średnia (VAV)
			[km/h]
Warunki drogowe	w miastach	0,5	27,44
	poza miastami	0,4	71,29
	na trasach szybkiego ruchu	0,1	129,44
Kongestie	w zatorach ulicznych	1	8,87

Założenia dotyczące wpływu klimatyzacji na zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń z silnika spalinowego przyjęto na podstawie pracy [26].

Dane ilościowe i założenia na temat procesów związanych z wytwarzaniem samochodu i jego zagospodarowaniem po zużyciu, a także informacje dotyczące infrastruktury: produkcyjnej, obsługowej i ruchu drogowego pozyskano ze szwajcarskiej bazy danych Ecoinvent (wersja 2.0) [34], powszechnie stosowanej w badaniach oceny cyklu istnienia. Zawiera ona wysokiej jakości dane na temat procesów wytwórczych i przetwórczych związanych z różnymi gałęziami przemysłu. Wykorzystane dane odnoszą się przede wszystkim do warunków ogólnoeuropejskich i szwajcarskich, zaś ich zasięg czasowy zawiera się w granicach od 2000 roku do 2005 roku.

Inwentaryzację danych oraz ocenę wpływu cyklu istnienia przeprowadzono z użyciem programu SimaPro [9]. Program ten spełnia wymagania normy ISO 14040 i pozwala korzystać z kilku różnych baz danych, w tym Ecoinvent.

Oceny wpływu cyklu istnienia dokonano metodą Eco-indicator 99 (H/A) [11]. Wybór kategorii wpływu został podyktowany wiedzą na temat zagrożeń środowiska przez motoryzację oraz występowaniem podobnych kategorii wpływu w innych analizach cyklu istnienia samochodu [18, 26]. W szczególności uwzględniono:

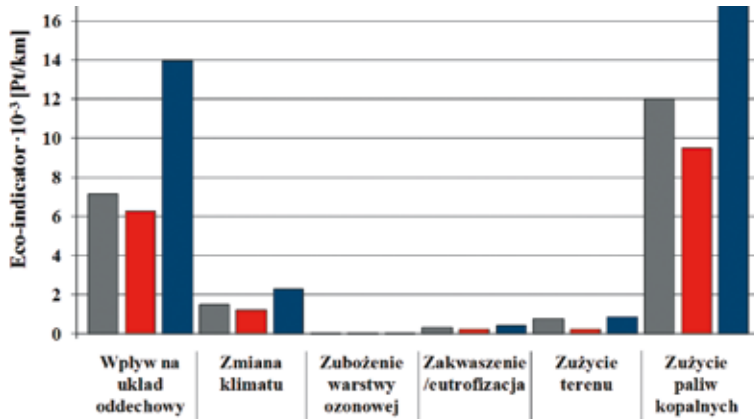
- wpływ na układ oddechowy – związki organiczne i nieorganiczne (respiratory organics, respiratory inorganics) – jednostka wskaźnika: DALY,
- zmiana klimatu (climate change) – jednostka wskaźnika: DALY,
- zubożenie warstwy ozonowej (ozone layer) – jednostka wskaźnika: DALY,
- zakwaszenie/eutrofizacja (acidification/eutrophication) – jednostka wskaźnika: PDF·m²·rok,
- zużycie terenu (land use) – jednostka wskaźnika: PDF·m²·rok,
- zużycie paliw kopalnych (fossil fuels) – jednostka wskaźnika: MJ.

Jednostką wpływu na środowisko w metodzie Eco-indicator 99 jest punkt odniesiony do jednostki funkcjonalnej [11], w tym wypadku 1 kilometra – Pt/km.

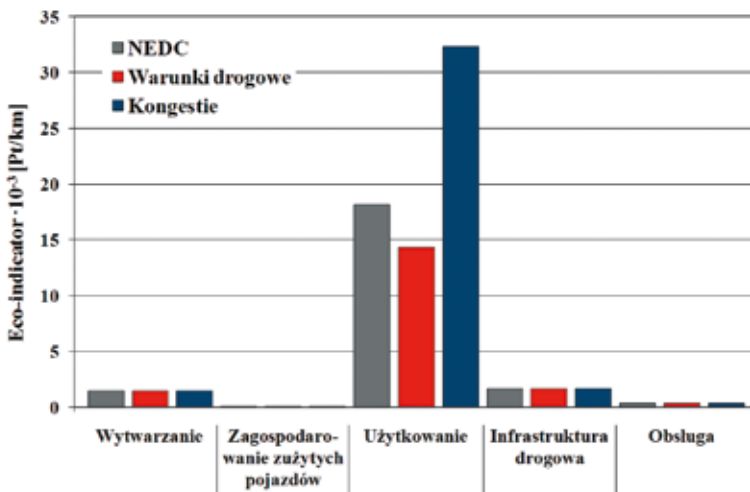
Wybrane wyniki oceny wpływu cyklu istnienia samochodu osobowego, odpowiadające trzem modelom ruchu: NEDC, warunków drogowych i kongestii, zilustrowano wykresami. Na rysunku 3 przedstawiono wskaźniki kategorii wpływu po wartościowaniu.

Niezależnie od modelu ruchu przyjętego do opisu użytkowania samochodu, największe obciążenie środowiska wiąże się ze zużyciem paliw kopalnych. Na drugim miejscu znajduje się wpływ na układ oddechowy. Pozostałe kategorie wpływu mają znacznie mniejszy udział w obciążeniu środowiska. Można je uszeregować według malejących wartości wskaźników kategorii wpływu – najpierw zmiana klimatu, następnie zużycie terenu, zakwaszenie i eutrofizacja, na końcu zaś zubożenie warstwy ozonowej.

Na rysunku 4 przedstawiono wpływ na środowisko poszczególnych elementów związanych z cyklem istnienia samochodu.



Rys. 3. Wskaźniki kategorii wpływu (po wartościowaniu), obliczone z zastosowaniem modeli ruchu: NEDC, warunków drogowych i kongestii



Rys. 4. Wpływ na środowisko poszczególnych elementów związanych z cyklem istnienia samochodu, wyznaczone dla modeli ruchu: NEDC, warunków drogowych i kongestii

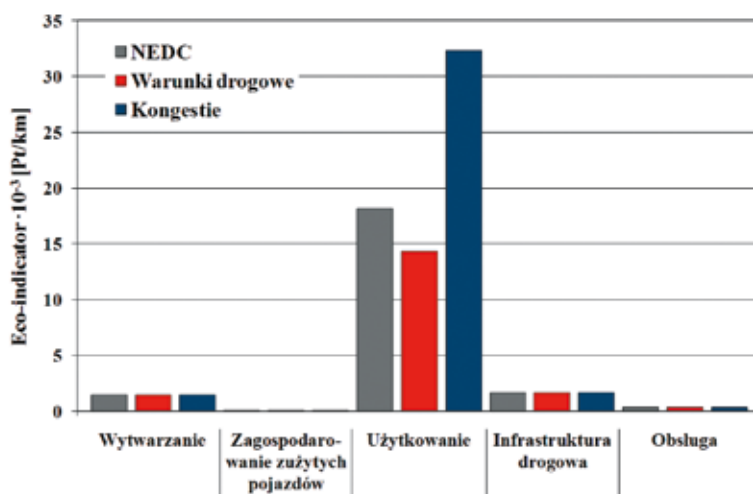
W cyklu istnienia samochodu zdecydowanie najsilniej oddziałuje na środowisko użytkowanie, co pozostaje w zgodzie z doniesieniami literaturowymi. Druga w kolejności jest infrastruktura drogowa, następnie wytwarzanie, obsługa i zagospodarowanie zużytych pojazdów. W zasadzie obciążenie środowiska powodowane przez infrastrukturę drogową i obsługę należałoby dodać do obciążenia środowiska wynikającego z użytkowania samochodu i rozpatrywać wspólnie jako etap eksploatacji.

Jako miarę wpływu modelu ruchu na uzyskane dane dotyczące obciążenia środowiska przyjęto względną zmianę wartości wskaźników kategorii wpływu wskutek zmiany modelu ruchu z NEDC (test homologacyjny) na model ruchu reprezentujący warunki rzeczywiste (model warunków drogowych lub kongestii):

$$\delta_{i,j} = \frac{W_{i,j} - W_{i,NEDC}}{W_{i,NEDC}}, \quad (2)$$

gdzie: i – kategoria wpływu, j – wariant modelu ruchu samochodu w warunkach rzeczywistych, $W_{i,NEDC}$ – wskaźnik kategorii wpływu i dla modelu ruchu NEDC.

Wyniki przedstawiono na rysunku 5. Jest wyraźnie widoczne, że zmiana modelu ruchu z NEDC na inny, w znaczący sposób wpływa na wyniki całej analizy. Zastosowanie modelu warunków drogowych daje wyniki, które jednoznacznie wykazują mniejsze obciążenie środowiska, natomiast wyniki uzyskane przy użyciu modelu kongestii jednoznacznie wskazują, jakoby obciążenie środowiska było znacznie większe. Trend ten dotyczy wszystkich rozważanych kategorii wpływu. U jego podstaw leży analogiczna zależność dotycząca względnej zmiany emisji zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa przy zmianie modelu ruchu z NEDC na inny.



Rys. 5. Względna zmiana obciążenia środowiska w rozważanych kategoriach wpływu. Oznaczenia: WUO – wpływ na układ oddechowy, ZK – zmiana klimatu, ZWO – zubożenie warstwy ozonowej, Z/E – zakwaszenie/eutrofizacja, ZT – zużycie terenu, ZPK – zużycie paliw kopalnych

W wypadku modelu warunków drogowych uzyskano zmniejszenie wartości wskaźników wszystkich kategorii wpływu. Największe – prawie 30-procentowe względne zmniejszenie obciążenia środowiska odpowiada zakwaszeniu/eutrofizacji, mniejsze – około 20-procentowe – zubożeniu warstwy ozonowej, zużyciu paliw kopalnych i zmianie klimatu. Względne zmniejszenie wpływu na układ oddechowy jest ponad 10-procentowe, zaś zużycia terenu – tylko około 5-procentowe.

W wypadku modelu kongestii wartości wskaźników wszystkich kategorii wpływu przy zmianie modelu ruchu z modelu NEDC ulegają znaczącemu zwiększeniu. Największe – około 95-procentowe względne zwiększenie obciążenia środowiska charakteryzuje wpływ na układ oddechowy, drugie w kolejności – ponad 50-procentowe jest zwiększenie trzech wskaźników – zubożenia warstwy ozonowej, zużycia paliw kopalnych i zmiany klimatu, następnie ponad 20-procentowe zwiększenie zakwaszenia/eutrofizacji i 10-procentowe zwiększenie zużycia terenu.

Względna zmiana obciążenia środowiska jest większa w wypadku modelu kongestii, gdyż reprezentuje on szczególnie niekorzystne warunki ruchu, charakteryzujące się dużą emisją zanieczyszczeń i dużym zużyciem paliwa. Mniejsza względna zmiana obciążenia środowiska dla modelu warunków drogowych wynika z uwzględnienia w nim warunków jazdy w mieście, poza miastem i na trasach szybkiego ruchu. Model NEDC, do którego odniesiono wyniki, także składa się z części miejskiej (UDC) i pozamiejskiej (EUDC), jego podobieństwo do modelu warunków drogowych jest więc znacznie większe niż do modelu kongestii.

4. Podsumowanie

Sposób, w jaki samochody oddziałują na środowisko jest bardzo złożony, a ocena ekologicznych skutków tego oddziaływania – skomplikowana i w wielu przypadkach niejednoznaczna. W związku z tym poszukuje się metod oceny, które charakteryzują się podejściem kompleksowym – nie traktują samochodu jak wyizolowanego obiektu, lecz rozpatrują go w ramach systemu, którego elementami są także wytwórnie pojazdów, materiały eksploatacyjne, infrastruktura transportu i wszystkie inne związane z nimi podmioty oddziaływania na środowisko. Jedną z tego typu metod, która w ostatnich latach wzbudza coraz większe zainteresowanie, jest ocena cyklu istnienia.

Problem zastosowania oceny cyklu istnienia w motoryzacji, mimo bogatej literatury, zaangażowania przemysłu i znacznych środków przeznaczonych na programy badawcze, nie został do tej pory w pełni rozwiązany. Opublikowane wyniki analiz niejednokrotnie nie są ze sobą spójne, a nawet prowadzą do sprzecznych wniosków. Powodem takiego stanu jest daleko posunięta dowolność wyboru założeń i danych wejściowych przez autorów badań. W ocenie cyklu istnienia samochodu brak jest jednoznacznych kryteriów – powszechnie stosuje się różne metody, wyniki odnosi do różnych kategorii wpływu, których wskaźniki ilościowe również nie zawsze są takie same. Przekonuje to o znacznej względności wyników publikowanych analiz i skłania do ostrożności w ich interpretacji. Niemniej jednak, ocena cyklu istnienia wydaje się dobrym rozwiązaniem, potrzeba jedynie podjęcia działań zmierzających do osiągnięcia naukowego porozumienia w kwestii ujednoczenia jej metodyki.

W cyklu istnienia samochodu jego użytkowanie stanowi dominujące źródło obciążenia środowiska. W zdecydowanej większości badań metodą oceny cyklu istnienia nie uwzględnia się różnych warunków ruchu, które charakteryzują typowe użytkowanie samochodów. Zamiast tego przyjmuje się założenia na podstawie wyników badań homologacyjnych, opartych na standardowych testach jezdnych, lub nawet zakłada, że wartości emisji zanieczyszczeń są równe limitom ustalonym w normach emisji spalin, które obowiązują dany samochód. Takie podejście umożliwia wprawdzie analizę porównawczą samochodów, lecz w istocie stanowi duże uproszczenie i nie powinno być brane pod uwagę przy ocenie właściwości ekologicznych samochodów w rzeczywistym użytkowaniu.

Literatura

- [1] BALLESTER, F.: *Air pollution and health: An overview with some case studies*. W: NICOLOPOULOU-STAMATI, P., HENS, L., HOWARD, C.V. (red.): *Environmental health impacts of transport and mobility*. Environmental Science and Technology Library 21, 2005, pp. 53-77.
- [2] CASTRO, M.B., REMMERSWAAL, J.A.M., REUTER, M.A.: *Life cycle impact assessment of the average passenger vehicle in the Netherlands*. International Journal of Life Cycle Assessment 5, 8, 2003, pp. 297-304.
- [3] CHŁOPEK, Z.: *Pojazdy samochodowe: Ochrona środowiska naturalnego*. WKŁ, Warszawa 2002.
- [4] CHŁOPEK, Z.: *Uwagi do badań silników spalinowych w stanach dynamicznych*. Silniki Spalinowe - Combustion Engines 143, 4, 2010, ss. 60-79.
- [5] CHŁOPEK, Z., LASKOWSKI, P.: *Pollutant emission characteristics determined using the Monte Carlo method*. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 42, 2, 2009, pp. 42-51.
- [6] DARAGAY, J., GATELY, D., SOMMER, M.: *Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960-2030*. The Energy Journal, 28, 4, 2007, pp. 143-171.
- [7] GEHIN, A., ZWONINSKI, P., BRISAUD, D.: *Towards the use of LCA during the early design phase to define EoL scenarios*. W: *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses. Proceedings of the CIRP Conference on life cycle engineering*, Springer 2007, pp. 23-28.
- [8] GŁÓWNY URZĄD STATYSTYCZNY: *Transport - wyniki działalności w 2011 r.* Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa 2011.
- [9] GOEDKOOP, M., DE SCHRUYVER, A., OELE, M., DURKSZ, S., DE ROEST, D.: *Introduction to LCA with SimaPro 7*. PRÉ Consultants, Amersfoort 2010.
- [10] GOEDKOOP, M., OELE, M., DE SCHRUYVER, A., VIEIRA, M.: *SimaPro Database Manual: Methods library*. PRÉ Consultants, Amersfoort 2008.
- [11] GOEDKOOP, M. and SPIRENSMA, R.: *The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment*. PRÉ Consultants, Amersfoort 2000.
- [12] GUINÉE, J.B., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., ZAMAGNI, A., MASONI, P., BUONAMICI, R., EKVALL, T., RYDBERG, T.: *Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future*. Environmental Science and Technology 45, 1, 2011, pp. 90-96.
- [13] HAUSCHILD, M. Z., HUIJBREGTS, M.A.J., JOLLIET, O., MACLEOD, M., MARGNI, M., VAN DE MEENT, D., ROSENBAUM, R.K., MCKONE, T.E.: *Building a model based on scientific consensus for Life Cycle Impact Assessment of Chemicals: the Search for Harmony and Parsimony*. Environmental Science and Technology 42, 19, 2008, pp. 7032-7037.
- [14] HENSHER, D.A. and BUTTON, K.J.: *Handbook of transport and the environment*. Publisher Elsevier Science, Amsterdam 2003.
- [15] ISO 14000 series. <http://www.iso.org/iso/iso14000>
- [16] KEOLEIAN, G.A. and SPITZLEY, D.V.: *Life cycle based sustainability metrics*. W: ABRAHAM M.A. (red): *Sustainability Science and Engineering: Defining principles*. Elsevier B.V., Amsterdam, 2006, pp. 127-159.
- [17] KOWALSKI, Z., KULCZYCKA, J., GÓRALCZYK, M.: *Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych*. PWN, Warszawa 2007.
- [18] LEDUC, G., MONGELLI, I., UIHLEIN, A., NEMRY, F.: *How can our cars become less polluting? An assessment of the environmental potential of cars*. Transport Policy 17, 6, 2010, pp. 409-419.

- [19] MA, H., BALTHASAR, F., TAIT, N., REIRA-PALOU, X., HARRISON, A.: *A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles*. Energy Policy 44, 2012, pp. 160–173.
- [20] MARGNI, M., GLORIA, T., BARE, J., SEPPÄLÄ, J., STEEN, B., STRUIJS, J., TOFFOLETTO, L., JOLLIET, O.: *Guidance on how to move from current practice to recommended practice in Life Cycle Impact Assessment*. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, Paris 2008.
- [21] MAYYAS, A., QATTAVIA, A., OMARA, M., SHAN, D.: *Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 4, 2012, pp. 1845–1862.
- [22] MERKISZ, J.: *Real Road Tests – Exhaust Emission Results from Passenger Cars*. Journal of KONES Powertrain and Transport, 18, 3, 2011, pp. 253–260.
- [23] MERKISZ, J., PIELECHA, I.: *Alternatywne napędy pojazdów*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [24] MERKISZ, J., PIELECHA, J.: *Charakterystyka emisyjności pojazdów kategorii SUV z silnikami ZS w rzeczywistych warunkach ruchu*. Silniki Spalinowe – Combustion Engines 145, 2, 2011, ss. 58–72.
- [25] MEYER, I., LEIMBACH, M., JAEGER, C.C.: *International passenger transport and climate change: a sector analysis in car demand and associated CO₂ emissions from 2000 to 2050*. Energy Policy 35, 12, 2007, pp. 6332–6345.
- [26] NEMRY, F., LEDUC, G., MONGELLI, I., UIHLEIN, A.: *Environmental improvement of passenger cars (IMPRO-car)*. JRC Scientific and Technical Reports, Seville 2008.
- [27] PATTERSON, J., ALEXANDER, M., GURR, A.: *Preparing for a Life Cycle CO₂ Measure: A report to inform the debate by identifying and establishing the viability of assessing a vehicle's life cycle CO_{2e} footprint*. Low Carbon Vehicle Partnership 2011.
- [28] PELKMANS, L., DEBAL, P.: *Comparison of on-road emissions with emissions measured on chassis dynamometer test cycles*. Transportation Research Part D 11, 2006, pp. 233–241.
- [29] PENNINGTON, D. W., POTTING, J., FINNVEDEN, G., LINDEIJER, E., JOLLIET, O., RYDBERG, T., REBITZER, G.: *Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice*. Environment International 30, 5, 2004, pp. 721–739.
- [30] PIERAGOSTINI, C., MUSSATI, M. C., AGUIRRE, P.: *On process optimization considering LCA methodology*. Journal of Environmental Management 96, 1, 2012, pp. 43–54.
- [31] REBITZER, G., EKVAL, T., FRISCHKNECHT, R., HUNKELER, D., NORRIS, G., RYDBERG, T., SCHMIDT, W. P., SUH, S., WEIDEMA, B. P., PENNINGTON, D. W.: *Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications*. Environment International 30, 5, 2004, pp. 701–720.
- [32] ROUSSOU, T., BEHRAKIS, P.: *The Respiratory Effects of Air Pollution*. W: NICOLOPOULOU–STAMATI P., HENS L., HOWARD C.V. (red): *Environmental health impacts of transport and mobility*. Environmental Science and Technology Library 21, 2005, pp. 79–94.
- [33] SCHWEIMER, G.W., LEVIN, M.: *Life Cycle Inventory for the Golf A4*. Volkswagen AG 2001.
- [34] SPIELMANN, M., DONES, R., BAUER, C.: *Life cycle inventories of transport services: Final report ecoinvent v2.0 No. 14*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf 2007.
- [35] UDO DE HAES, H.A., FINNVEDEN, G., GOEDKOOP, M., HAUSCHILD, M.Z., HERTWICH, E.G., HOFSTETTER, P., JOLLIET, O., KLÖPFFER, W., KREWITT, W., LINDEIJER, E., MUELLER–WENK, R., OLSEN, I., PENNINGTON, D.W., POTTING, J., STEEN, B.: *Life-Cycle Impact Assessment: Striving towards Best Practice*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) 2002.
- [36] VOJTISEK–LOM, M., FENKL, M., DUFEK, M., MAREŠ, J.: *Off-cycle, real-world emissions of modern light duty diesel vehicles*. SAE 2009–24–0148.
- [37] WAŚKIEWICZ, J., RADZIMIRSKI, S., CHŁÓPEK, Z., TAUBERT, S.: *Opracowanie metodologii prognozowania zmian aktywności sektora transportu drogowego (w kontekście ustawy o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji)*. Praca ITS nr 7101/ITS, Warszawa 2011.

Podziękowania

Publikacja została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu rozwojowego nr 10-0050-10/2010 pt. „Opracowanie urządzeń do ograniczenia emisji pyłów z tarczowych i bębnowych układów hamulcowych pojazdów samochodowych”. Projekt jest prowadzony w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji.

Praca naukowa Jakuba Lasockiego jest współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, projekt „Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej”.