

**Prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek**

**Mgr inż. Katarzyna Bebkiewicz**

Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie  
Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE)  
Ul. Chmielna 132/134, 00-805 Warszawa  
E-mail: [zdzislaw.chlopek@kobize.pl](mailto:zdzislaw.chlopek@kobize.pl), [katarzyna.bebkiewicz@kobize.pl](mailto:katarzyna.bebkiewicz@kobize.pl)

## **Model struktury pojazdów samochodowych dla kryterium poziomu technicznego ze względu na emisję zanieczyszczeń**

**Słowa kluczowe:** *pojazdy samochodowe, inwentaryzacja emisji zanieczyszczeń, kategorie pojazdów samochodowych*

**Streszczenie:** Inwentaryzacja całkowitej emisji zanieczyszczeń samochodowych jest możliwa tylko dzięki zastosowaniu modelowania emisji zanieczyszczeń. Jednym z najtrudniejszych problemów modelowania całkowitej emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych jest identyfikacja ich struktury. O ile jest możliwe wykorzystanie danych związanych z rejestracją pojazdów samochodowych do modelowania liczności kategorii pojazdów samochodowych, o tyle wyznaczenie reprezentatywnych przebiegów pojazdów elementarnych kategorii jest zadaniem bardzo trudnym ze względu na brak wyników badań empirycznych. W artykule zaproponowano dwa modele struktury pojazdów samochodowych dla kryterium poziomu technicznego ze względu na emisję zanieczyszczeń. Przedstawiony w niniejszym artykule sposób modelowania intensywności użytkowania pojazdów samochodowych kategorii elementarnych ze względu na emisję zanieczyszczeń jest pierwszym unikatowym przedsięwzięciem w tym zakresie w skali światowej. Metodę tę zastosowano do inwentaryzacji zanieczyszczeń pojazdów samochodowych w Polsce w latach 2000–2015.

### **1. Wstęp**

Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie autorskiego oryginalnego modelu matematycznego intensywności użytkowania pojazdów samochodowych do wykorzystania w inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego. Miarą intensywności użytkowania samochodów w wypadku bilansowania emisji zanieczyszczeń w ciągu jednego roku jest przebieg roczny pojazdów. Wyznaczenie intensywności użytkowania pojazdów samochodowych przy ich bardzo dużej różnorodności jest jednym z najtrudniejszych zadań inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego. Liczne publikacje, zarówno artykuły naukowe [6, 7, 18, 24, 25, 27, 31, 35], jak i poradniki metodyczne oraz raporty z inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń [1, 8, 14–17, 19–21, 23, 28, 30, 32], nie zawierają żadnych modeli intensywności użytkowania pojazdów samochodowych. W wypadku lokalnego bilansowania emisji zanieczyszczeń, np. w obszarach aglomeracji miejskich, wykorzystuje się często do oceny przebiegów pojazdów wyniki badań empirycznych z użyciem czujników do identyfikacji charakterystyki ruchu i rodzaju samochodów (m.in. pętle indukcyjne i systemy kamer) [24, 25]. W tym wypadku ocena natężenia ruchu dotyczy tylko kategorii pojazdów na bardzo wysokim poziomie skumulowania, np. podział wyłącznie na kategorie: małe pojazdy (samochody osobowe i lekkie samochody ciężarowe) i duże pojazdy (samochody ciężarowe i autobusy). Dane te – w celu wykorzystania ich do powszechnie stosowanych oprogramowań do inwentaryzacji zanieczyszczeń z transportu drogowego, np. COPERT

(ang. *Computer Programme for calculating Emissions from Road Traffic* – komputerowy program do obliczania emisji zanieczyszczeń z ruchu drogowego) [14, 18] – są zatem całkowicie bezużyteczne. Podobnie jest w wypadku wykorzystywania danych o natężeniu ruchu pojazdów w stanie lokalnym z zastosowaniem programów do symulacji ruchu drogowego, np. VISUM, VISSIM, TREM i VADIS [7]. Również wykorzystanie systemów złożonych, np. wyników badań empirycznych oraz modelowania ruchu pojazdów z użyciem m.in. sieci neuronowych [24] czy fali kinematycznej Newella do modelowania ruchu pojazdów [35], nie daje możliwości identyfikacji intensywności użytkowania samochodów z uwzględnieniem różnych kryteriów klasyfikacji pojazdów ze względu wymagania oprogramowań do bilansowania emisji zanieczyszczeń, np. COPERT.

W niektórych publikacjach, m.in. w raportach z inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń [20, 28, 30, 32], znajdują się jedynie jakościowe opisy wyznaczania rocznych przebiegów samochodów, mianowicie na podstawie danych zarejestrowanych w czasie technicznych przeglądów kontrolnych. Dane te są wykorzystywane do wyznaczania rocznych przebiegów samochodów kategorii skumulowanych – przebiegi te są szacowane jako wartości średnie na podstawie danych dla poszczególnych pojazdów. Brak jest jednak jakichkolwiek uogólnień, a tym bardziej prób modelowania intensywności użytkowania pojazdów samochodowych. W raportach tych znajduje się jedynie jakościowa ocena intensywności użytkowania pojazdów samochodowych, mianowicie że samochody nowsze mają większe średnie przebiegi roczne niż samochody starsze, a zatem samochody o lepszych właściwościach ekologicznych ze względu na emisję zanieczyszczeń są intensywniej użytkowane [20, 28].

Jest, w związku ze stwierdzonym stanem wiedzy, celowe ze względów zarówno poznawczych, jak i praktycznych, podjęcie próby uogólnienia wiedzy na temat uzależnienia intensywności użytkowania pojazdów samochodowych od ich jakości ze względu na emisję zanieczyszczeń. Praktyczny aspekt modelowania intensywności użytkowania pojazdów samochodowych w zależności od ich właściwości ekologicznych jest jednoznaczny – jest to jedyna możliwość dostarczenia danych do inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z ruchu drogowego w związku z brakiem, przynajmniej w Polsce, danych empirycznych o rocznych przebiegach samochodów różnych kategorii ekologicznych.

Opracowany przez autorów model intensywności użytkowania pojazdów samochodowych jest pierwszą w skali światowej próbą rozwiązania tego ważnego zagadnienia eksploatacji pojazdów samochodowych. Dotychczasowe doświadczenia zarówno autorów [3–5], jak i praktyków, zajmujących się oceną oddziaływania transportu drogowego na środowisko, z wykorzystania opracowanego modelu umożliwiają sformułowanie pozytywnych opinii o jego przydatności.

## **2. Podstawy modelowania całkowitej emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych**

Całkowitą emisję zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych można wyznaczyć tylko dzięki zastosowaniu modelowaniu tej emisji [1, 3–8, 13–21, 23–25, 27, 28, 30–32, 35]. Podobnie jest dla całkowitego zużycia energii przez pojazdy samochodowe [13]. Natomiast w wypadku zużycia paliwa jest możliwe – przynajmniej przybliżone – oszacowanie tej wielkości [11]. Z tego powodu w celu oceny zanieczyszczenia środowiska przez pojazdy samochodowe jest konieczne modelowanie emisji zanieczyszczeń związanej z transportem drogowym.

Model całkowitej emisji zanieczyszczeń jest prosty: całkowita emisja zanieczyszczeń jest superpozycją emisji zanieczyszczeń z poszczególnych pojazdów [3, 8, 13–19, 23]. Przyjmuje się w tym wypadku założenia [3, 8, 13]:

- natężenie emisji poszczególnych zanieczyszczeń jest wielkością addytywną,

- inwentaryzacja emisji zanieczyszczeń dotyczy substancji w stanie emitowanym z pojazdów, a nie substancji, które podlegają przemianom w środowisku.

Natężenie emisji zanieczyszczeń, związane z użytkowaniem pojazdów samochodowych z silnikami spalinowymi, jest sumą natężenia emisji zanieczyszczeń dla stanów [3, 8, 13–19, 23]:

- silnika spalinowego nagrzanego do ustabilizowanej temperatury,
- nagrzewania się silnika spalinowego,
- parowania paliwa z układu paliwowego samochodu.

$$E_x = E_{x_s} + E_{x_h} + E_{x_v} \quad (1)$$

gdzie:  $E_x$  – natężenie emisji zanieczyszczenia „x”,

$E_{x_s}$  – natężenie emisji zanieczyszczenia dla silnika spalinowego nagrzanego do ustabilizowanej temperatury,

$E_{x_h}$  – natężenie emisji zanieczyszczenia dla nagrzewania się silnika spalinowego,

$E_{x_v}$  – natężenie emisji zanieczyszczenia dla parowania paliwa z układu paliwowego samochodu.

Ze względu na cel artykułu dalsze rozważania będą prowadzone na przykładzie emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych nagranych do ustabilizowanej temperatury. Modelowanie struktury pojazdów samochodowych, będące przedmiotem pracy, znajduje również zastosowanie w wypadku dwóch pozostałych stanów pracy silnika [3, 8, 13–19, 23].

Najtrudniejszym problemem modelowania całkowitej emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych jest identyfikacja modelu. Oczywiście jest niemożliwe modelowanie emisji zanieczyszczeń ze wszystkich indywidualnych pojazdów. Przede wszystkim w modelowaniu emisji zanieczyszczeń wprowadza się pojęcie kategorii pojazdów. Kategoria oznacza w filozofii pojęcie wprowadzające strukturę, w związku z czym pod pojęciem kategorii rozumie się klasę obiektów mających określone cechy i powiązanych wzajemnymi relacjami. Podstawowymi kryteriami kwalifikowania pojazdów samochodowych do kategorii są [3, 8, 13–19, 23]:

- przeznaczenie pojazdu,
- umowna wielkość pojazdu lub silnika spalinowego,
- właściwości ze względu na zastosowane rozwiązania konstrukcyjne,
- stosowane paliwo,
- poziom techniczny, przede wszystkim ze względu na emisję zanieczyszczeń.

Do kategorii elementarnej pojazdów samochodowych ze względu na przyjęte cechy kryterialne są zaliczane pojazdy o wszystkich rozpatrywanych cechach kryterialnych. Do kategorii skumulowanych pojazdów samochodowych należą pojazdy o nie wszystkich takich samych rozpatrywanych cechach kryterialnych. W związku z tym są możliwe różne poziomy skumulowania kategorii pojazdów samochodowych.

W modelowaniu emisji zanieczyszczeń wprowadza się również pojęcia warunków ruchu, charakteryzowanych właściwościami procesu ruchu pojazdów. W związku z tym przyjmuje się, że natężenie emisji zanieczyszczeń jest superpozycją z poszczególnych pojazdów w poszczególnych rozpatrywanych warunkach ruchu, determinujących emisję zanieczyszczeń.

Warunki ruchu pojazdów samochodowych są modelowane w oprogramowaniach do inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń w postaci ruchu charakterystycznego dla jazdy pojazdów samochodowych [3, 8, 13–19, 23]:

- w miastach,
- poza miastami,
- na autostradach i drogach ekspresowych.

Istnieje również możliwość wyodrębnienia z modelu ruchu pojazdów samochodowych w miastach ruchu w zatorach ulicznych – w takiej sytuacji w miejsce modelu ruchu w miastach są stosowane modele jazdy pojazdów samochodowych [9]:

- w zatorach ulicznych,
- w miastach z wyłączeniem zatorów ulicznych.

Dodatkowo w modelowaniu emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w modelowych warunkach ruchu dodatkowo uwzględnia się bardziej szczegółową zależność emisji zanieczyszczeń od procesu prędkości [1, 3, 8, 13–19, 21, 23]. Najczęściej jako zero-wymiarową charakterystykę procesu prędkości pojazdu jest przyjmowana wartość średnia prędkości [1, 3, 8, 13–19, 21, 23]. Wykorzystywaną w modelowaniu całkowitej emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych jest emisja drogowa – pochodna emisji zanieczyszczeń (masy) względem drogi przebytej przez pojazd [3, 13].

W konsekwencji przyjętych założeń można modelować natężenie całkowitej emisji zanieczyszczeń uśrednionej w ciągu jednego roku dla każdej z elementarnych kategorii w każdym z modelowanych warunków ruchu jako wielkość proporcjonalną do [1, 3, 8, 13–19, 23]:

- liczności pojazdów kategorii,
- drogi przebytej przez reprezentatywny samochód kategorii w ciągu jednego roku, będącej miarą intensywności użytkowania pojazdu,
- charakterystyki emisji drogowej zanieczyszczeń dla reprezentatywnego pojazdu kategorii.

$$E_{ax} = N \cdot p \cdot b_x \quad (2)$$

gdzie:  $N$  – liczność pojazdów kategorii,

$p$  – droga przebywana przez reprezentatywny pojazd kategorii w ciągu jednego roku,  
 $b_x$  – emisja drogowa zanieczyszczenia „x”.

Natężenie całkowitej emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych jest superpozycją z poszczególnych kategorii pojazdów w poszczególnych rozpatrywanych warunkach ruchu, determinujących emisję zanieczyszczeń [3, 13].

Natężenie całkowitej emisji rocznej zanieczyszczeń w odniesieniu do uśredniania w okresie jednego roku jest nazywane emisją roczną [3–5, 13], a w raportach inwentaryzacji emisji rocznej zanieczyszczeń dla każdego z państw stosuje się termin – krajowa emisja roczna zanieczyszczeń [3–5].

Kryteriami klasyfikowania pojazdów samochodowych są [1, 3, 8, 13–19, 21, 23]:

1. Przeznaczenie pojazdów:
  - samochody osobowe,
  - lekkie samochody ciężarowe (tzw. samochody dostawcze),
  - samochody ciężarowe,
  - autobusy miejskie,
  - autobusy dalekobieżne,
  - motocykle,
  - motorowery<sup>1</sup>.
2. Umowna wielkość, właściwości oraz poziom techniczny pojazdów samochodowych:
  - umowna wielkość ze względu na: dla samochodów osobowych i lekkich samochodów ciężarowych oraz dla motocykli i motorowerów – objętość skokową silników

---

<sup>1</sup> Zgodnie z ustawą z dnia 20 czerwca 1997 r. „Prawo o ruchu drogowym” (Dz. U. z 2012 r. poz. 1137) pojazd samochodowy to pojazd wyposażony w silnik, z wyjątkiem motorowerów i pojazdów szynowych. Niezależnie od tej definicji w modelowaniu emisji zanieczyszczeń ze środków transportu drogowego w zbiorze pojazdów samochodowych uwzględnia się również motorowery.

spalinowych, dla samochodów ciężarowych oraz autobusów – masę maksymalną pojazdu,

- rodzaj systemu spalania silnika spalinowego: silniki o zapłonie iskrowym i silniki o zapłonie samoczynnym,
- rodzaj obiegu: silniki czterosurowe i silniki dwusurowe,
- poziom techniczny pojazdów drogowych ze względu na etap przepisów ochrony środowiska przed skutkami eksploatacji pojazdów samochodowych oraz ze względu na czas wprowadzenia pojazdów na rynek,
- zastosowane paliwa: benzynę silnikową, olej napędowy, skroplony gaz ropopochodny (LPG – ang. *Liquefied Petroleum Gas*), gaz ziemny (CNG – ang. *Compressed Natural Gas* i LNG – ang. *Liquefied Natural Gas*) oraz inne paliwa niekonwencjonalne.

Liczność pojazdów poszczególnych kategorii elementarnych można – przynajmniej w przybliżeniu – wyznaczyć na podstawie informacji o zarejestrowanych samochodach. Jednym z najpoważniejszych problemów identyfikacji modelu emisji całkowitej z pojazdów samochodowych jest wyznaczenie intensywności użytkowania pojazdów samochodowych poszczególnych kategorii, szczególnie kategorii elementarnych. W ramach opracowywania oprogramowań wspomagających wyznaczanie emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych pod koniec XX w. podjęto w państwach rozwiniętych gospodarczo programy badawcze, których celem było oszacowanie przebiegów rocznych pojazdów samochodowych kategorii elementarnych [8, 15, 19]. Mimo znacznych środków przeznaczonych na te programy, udało się tylko częściowo uzyskać wyniki uzasadniające praktyczne zastosowanie, m.in. w Niemczech i Szwajcarii [8, 15, 19]. Analiza wyników badań struktury pojazdów samochodowych w Europie Zachodniej na podstawie raportów programu CORINAIR (ang. *Core Inventory of Air Emissions* – inwentaryzacja emisji do powietrza) [15, 19] umożliwiła opracowanie modelu opóźnienia stanu motoryzacji w Polsce w stosunku do stanu motoryzacji w Europie Zachodniej [12], jednak model ten może być wykorzystany jedynie w odniesieniu co najwyżej do kategorii na wysokim stopniu kumulacji, np.: samochodów osobowych, lekkich samochodów ciężarowych, samochodów ciężarowych i autobusów oraz motocykli i motorowerów. W związku z brakiem dostatecznie bogatego materiału empirycznego do wyznaczenia przebiegów rocznych reprezentatywnych pojazdów kategorii elementarnych w Polsce, w szczególności ze względu na poziom techniczny samochodów, podjęto tematykę modelowania intensywności użytkowania pojazdów kategorii elementarnych.

### **3. Modelowanie intensywności użytkowania pojazdów samochodowych kategorii elementarnych**

Informacje związane z rejestracją samochodów mogą stanowić podstawę do opisu struktury. Dotyczy to przeznaczenia pojazdów oraz ich umownej wielkości. W szczególności data wprowadzenia na rynek pojazdu samochodowego determinuje jego właściwości ze względu na emisję zanieczyszczeń [2–5]. Oczywiście, w związku z dużą – niekiedy – szczegółowością kryteriów klasyfikowania pojazdów ze względu na ich właściwości, jak ma to miejsce np. w wypadku oprogramowania COPERT, istnieją pewne trudności w skutecznym wykorzystaniu informacji z baz danych o zarejestrowanych pojazdach do opisu struktury pojazdów. Mimo tych trudności dotychczasowe doświadczenia autorów wskazują na możliwość skutecznego wykorzystania oficjalnych danych o liczności pojazdów, zawartych w bazach Systemu Informatycznego Centralnej Ewidencji Pojazdów i Kierowców (CEPiK), do zastosowania w oprogramowaniu COPERT [2–5].

Największym problemem w opisie struktury pojazdów są dane na temat rocznego przebiegu reprezentatywnych samochodów poszczególnych kategorii elementarnych. Do-

tychczas nie ma jeszcze informatycznych systemów gromadzenia danych o przebiegach rocznych poszczególnych pojazdów, choć takie próby są podejmowane. Jeśli jednak nawet uda się takie przedsięwzięcie, to i tak nie będzie danych na temat przebiegów samochodów w poprzednich latach, a w inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych ważną rolę odgrywa badanie trendów emisji poszczególnych zanieczyszczeń [4, 5].

Dotychczasowe badania przebiegów rocznych pojazdów samochodowych w Polsce, przeprowadzane na zbiorach pojazdów o licznosci, uniemożliwiającej wnioskowanie statystyczne, umożliwiają jednak przybliżone wyznaczenie przebiegów rocznych pojazdów kategorii skumulowanych opisujących przeznaczenie pojazdów oraz – w mniejszym stopniu – ich umowną wielkość i właściwości konstrukcyjne [11]. Największym problemem jest wyznaczenie przebiegów rocznych dla elementarnych kategorii pojazdów ze względu na emisję zanieczyszczeń. W związku z tym podjęto się modelowania intensywności użytkowania pojazdów samochodowych dla elementarnych kategorii pojazdów ze względu na emisję zanieczyszczeń.

Informacje zawarte w bazach danych wykorzystywanych w oprogramowaniach do wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych, przede wszystkim z oprogramowania INFRAS AG [21], wynika charakterystyczna właściwość dotycząca przebiegów rocznych pojazdów kategorii elementarnych o różnej klasie emisji zanieczyszczeń. Kategorie te są opisywane nazwami kolejnych etapów przepisów homologacyjnych pojazdów samochodowych ze względu na emisję zanieczyszczeń [2, 33, 34]:

- dla samochodów o masie maksymalnej mniejszej od 3,5 Mg dla etapów przepisów Euro 1 – 4 oraz o masie odniesienia mniejszej od 2,61 Mg dla etapów Euro 5 i 6: Pre Euro (ew. inna nazwa: Conventional), Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4, Euro 5 i Euro 6;
- dla samochodów o masie maksymalnej większej od 3,5 Mg dla etapów Euro I – IV oraz o masie odniesienia większej od 2,61 Mg dla etapów Euro V i VI: Pre Euro (ew. inna nazwa: Conventional), Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV, Euro V i Euro VI.

Niekiedy kategorie te są jeszcze bardziej szczegółowe w zależności od podetapów kolejnych przepisów Euro, np. Pre Euro (Pre ECE<sup>2</sup>, ECE 15/00-01, ECE 15/02, ECE 15/03 i ECE 15/04), Euro 5 i Euro 6 (Euro 6 i Euro 6c).

Charakterystyczna właściwość dotycząca przebiegów rocznych pojazdów kategorii elementarnych o różnej klasie emisji zanieczyszczeń to fakt bardziej intensywnego użytkowania nowszych pojazdów, a więc o wyższej kategorii ze względu na emisję zanieczyszczeń. Fakt ten potwierdzają również wyniki przeglądowych badań prowadzonych w związku z bilansowaniem zużycia paliw [8, 20, 21, 28, 30, 32].

Model intensywności użytkowania pojazdów samochodowych dla elementarnych kategorii pojazdów samochodowych ze względu na emisję zanieczyszczeń postanowiono przyjmując w postaci rosnącej funkcji wielkości opisującej kolejne etapy przepisów homologacyjnych pojazdów ze względu na emisję zanieczyszczeń – wartości tej wielkości są rosnące w miarę coraz nowszych etapów przepisów. Zaproponowany model jest stworzony zgodnie z kryterium podobieństwa funkcjonalnego (model behawiorystyczny) [10, 26].

Modelowanie intensywności użytkowania pojazdów samochodowych elementarnych kategorii ekologicznych ze względu na emisję zanieczyszczeń obejmuje następujące elementy:

1. Arbitralne przyporządkowanie poszczególnym kategoriom ekologicznym pojazdów samochodowych nieujemnych liczb rzeczywistych zgodnie z zasadą, że kategoriom o wyższej jakości ekologicznej odpowiadają większe liczby. Sposób przyporządkowania

---

<sup>2</sup> ECE – Europejska Komisja Gospodarcza – EKG (ang. *United Nations Economic Commission for Europe*, skrótowiec: UNECE lub ECE).

liczb poszczególnym kategoriom ekologicznym pojazdów samochodowych, wykorzystywany w niniejszej pracy, jest przedstawiony w tabelach 1–4.

Tab. 1. Sposób przyporządkowania liczb poszczególnym kategoriom ekologicznym samochodów osobowych

Kategoria	y
Pre ECE	0
ECE 15/00-01	1
ECE 15/02	2
ECE 15/03	3
ECE 15/04	4
Euro 1	5
Euro 2	6
Euro 3	7
Euro 4	8
Euro 5	9
Euro 6	10

Tab. 2. Sposób przyporządkowania liczb poszczególnym kategoriom ekologicznym lekkich samochodów ciężarowych

Kategoria	y
Coventional	0
Euro 1	1
Euro 2	2
Euro 3	3
Euro 4	4
Euro 5	5
Euro 6	6

Tab. 3. Sposób przyporządkowania liczb poszczególnym kategoriom ekologicznym samochodów ciężarowych, autobusów miejskich i autobusów dalekobieżnych

Kategoria	y
Conventional	0
Euro I	1
Euro II	2
Euro III	3
Euro IV	4
Euro V	5
Euro VI	6

Tab. 4. Sposób przyporządkowania liczb poszczególnym kategoriom ekologicznym motocykli i motorowerów

Kategoria	y
Coventional	0
Euro 1	1
Euro 2	2
Euro 3	3

2. Przyjęcie modeli względnej intensywności – k użytkowania pojazdów samochodowych elementarnych kategorii ekologicznych ze względu na emisję zanieczyszczeń w postaci: Model 1 jest w postaci [29]:

$$k_1 = 1 - \exp(-a \cdot x^{c+1}) \cdot (1 - k_{\min}) \quad (3)$$

Model 2 przyjęto jako funkcję:

$$k_2 = \left\{ \frac{\arctg[d \cdot (x - 0,5)]}{\arctg(0, d) - \arctg(-0,5 \cdot d)} + 0,5 \cdot \frac{1 + k_{\min}}{1 - k_{\min}} \right\} \cdot (1 - k_{\min}) \quad (4)$$

przy czym

$$x = \frac{y}{y_{\max}} \quad (5)$$

gdzie:  $y_{\max}$  – maksymalna wartość liczb y z tabel 1–4 dla danego roku bilansowania emisji zanieczyszczeń.

Wielkość  $k_{\min}$  jest względną intensywnością użytkowania pojazdów samochodowych najniższej kategorii ekologicznej.

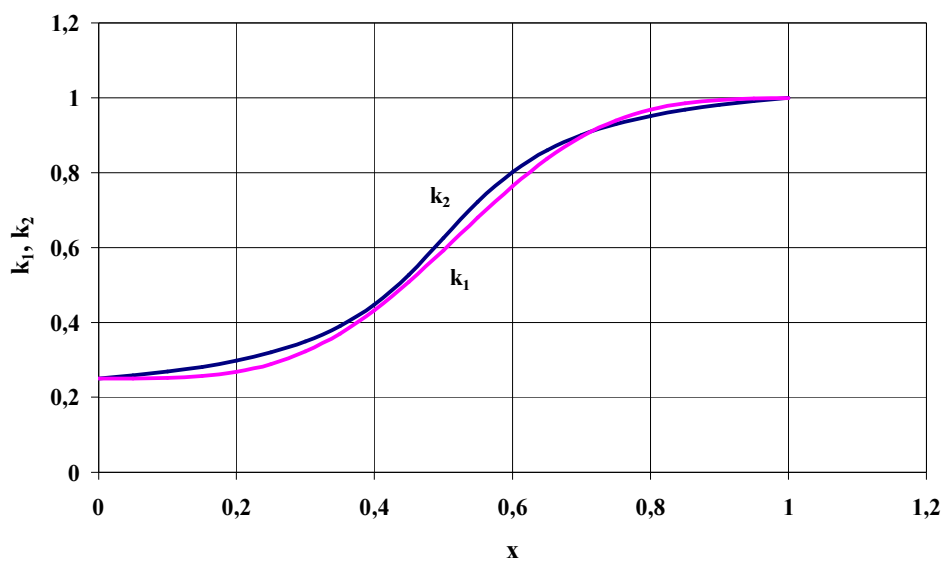
Parametrami modeli są:

- dla modelu 1: a, c;
- dla modelu 2: d.

3. Skalowanie średnich rocznych przebiegów pojazdów samochodowych elementarnych kategorii ekologicznych ze względu na emisję zanieczyszczeń do średnich rocznych przebiegów pojazdów samochodowych skumulowanych kategorii.

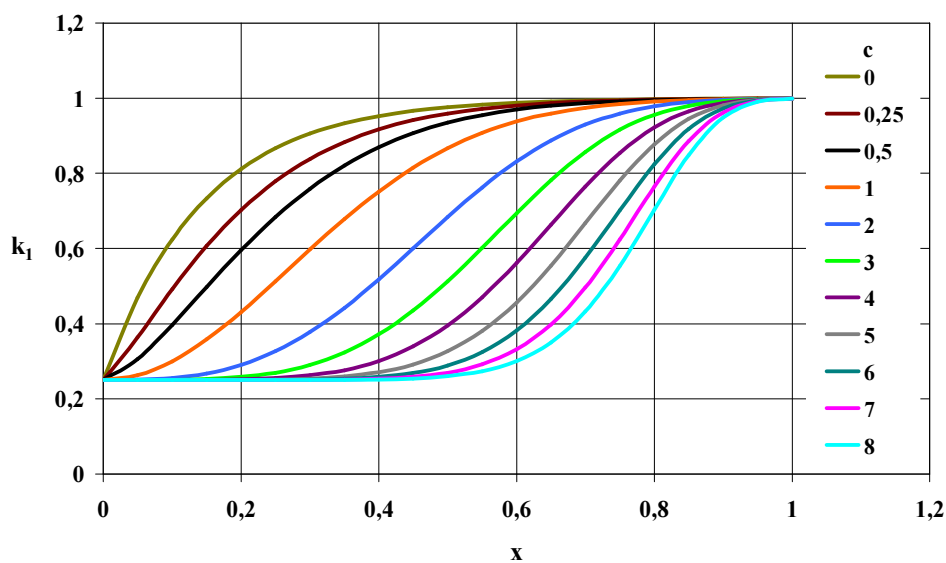


Na rysunku 1 przedstawiono porównanie obydwu modeli dla  $k_{min} = 0,25$  oraz parametrów modeli :  $a = 6,908$ ,  $c = 2,5$  i  $d = 7$ .

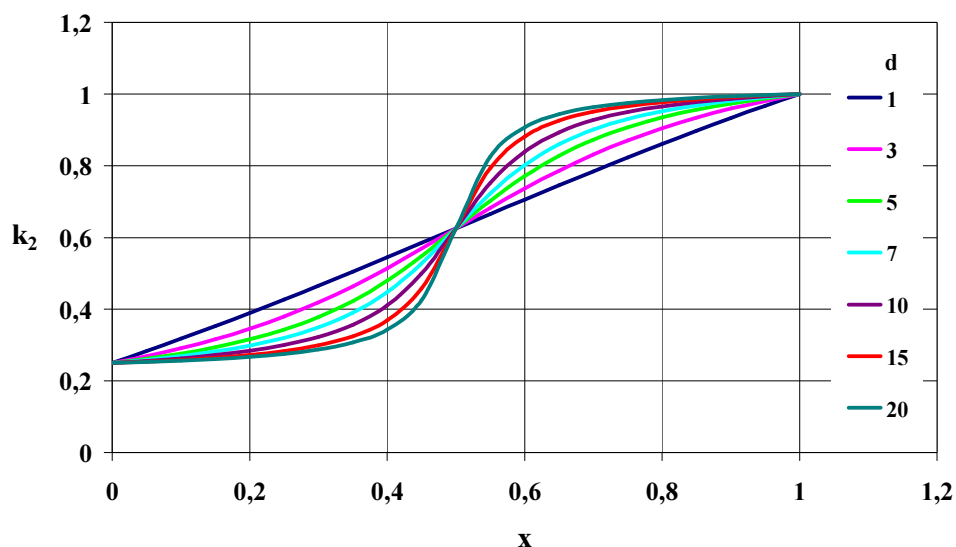


Rys. 1. Modele względnej intensywności użytkowania pojazdów samochodowych elementarnych kategorii ekologicznych ze względu na emisję zanieczyszczeń

Przeprowadzono badania modeli ze względu na parametry. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Wyniki badania modelu 1 dla zmiennego parametru  $c$



Rys. 3. Wyniki badania modelu 2 dla zmiennego parametru  $d$

Model 1 jest znacznie bardziej wrażliwy na parametr  $c$ . Znamienna jest dla modelu 2 antysymetryczność, niezależnie od parametru. Dotychczasowa wiedza, wynikająca z badań własnych na podstawie danych z oprogramowania INFRAS AG oraz z raportów państw członkowskich Unii Europejskiej w ramach programu CORINAIR, wskazuje, że model 1 w skuteczniejszy sposób umożliwia modelowanie intensywności użytkowania pojazdów samochodowych ze względu na ich kategorie, charakteryzujące emisję zanieczyszczeń.

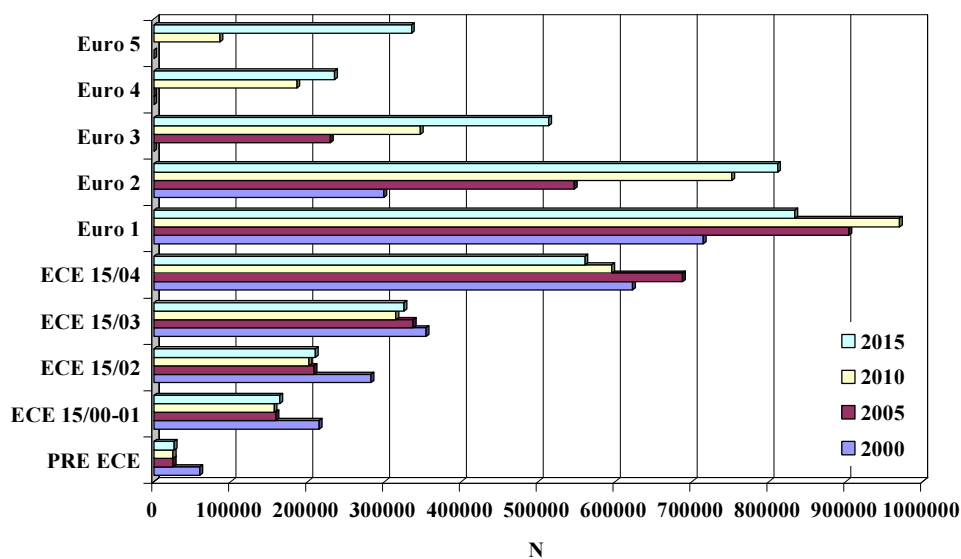
Oczywiście, w związku z brakiem dostatecznie bogatego materiału empirycznego, największym problemem jest identyfikacja modeli. Trudność ta jest jednak znacznie złagodzona faktem, że zakres rozpatrywanych parametrów modeli może być na podstawie dotychczasowej wiedzy ograniczony do granic:

- dla modelu 1:  $c = 1 \div 4$ ;
- dla modelu 2:  $d = 7 \div 15$ ;

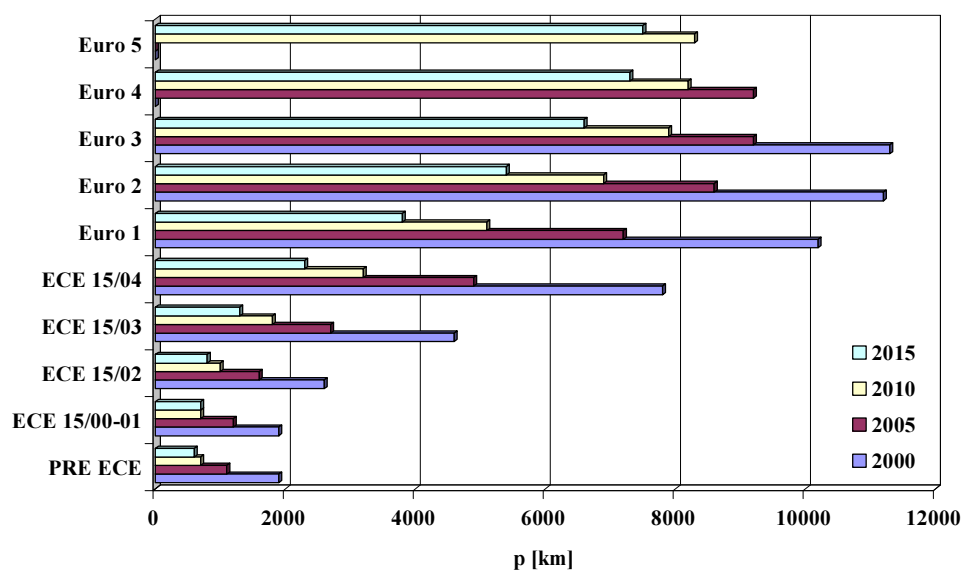
a wrażliwość modeli w zakresie tych wartości parametrów nie jest silna.

W praktyce jest brak możliwości zastosowania klasycznych metod identyfikacji [22] zaproponowanych modeli. Dokonuje się – w związku z tym – dostrojenia modeli, a weryfikacją jest badanie zgodności całkowitego rocznego zużycia paliw przez pojazdy samochodowe: wyniku modelowania oraz oficjalnych danych Głównego Urzędu Statystycznego [3–5].

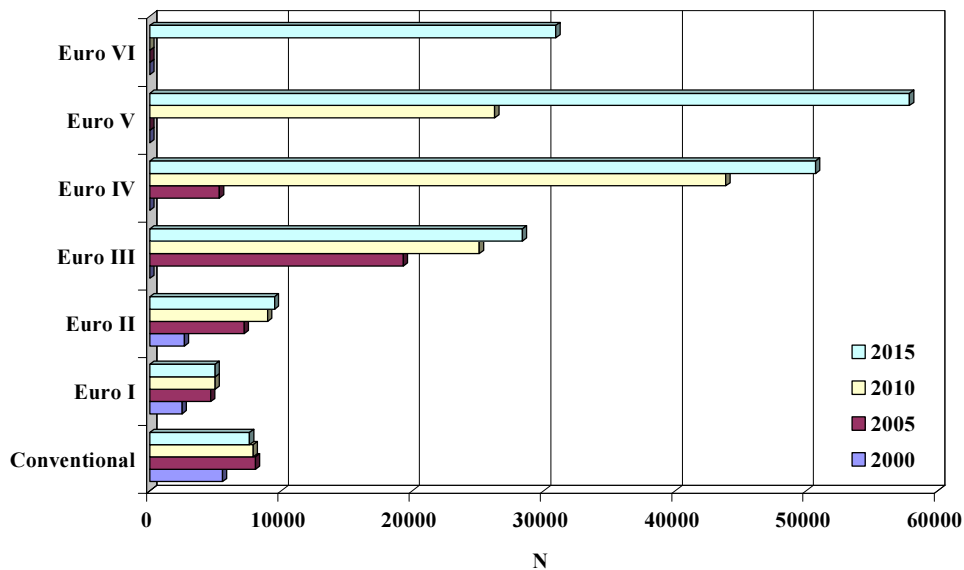
Na rysunkach 4–7 przedstawiono przykładowo licznosc i przebieg roczny pojazdów kategorii ekologicznych dwóch kategorii skumulowanych: samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym o objętości skokowej zawartej w granicach  $(1.4 \div 2) \text{ dm}^3$  oraz ciągników siodłowych o masie maksymalnej zawartej w granicach  $(34 \div 40) \text{ Mg}$  dla lat 2000, 2005, 2010 i 2015. Licznosc pojazdów kategorii ekologicznych dla lat 2000, 2005 i 2010 wyznaczono na podstawie danych zawartych w bazach Systemu Informatycznego Centralnej Ewidencji Pojazdów i Kierowców, natomiast dla 2015 r. strukturę licznosciową samochodów oszacowano na podstawie danych Głównego Urzędu Statystycznego (z powodu braku danych z CEPiK). Do wyznaczenia przebiegu pojazdów kategorii ekologicznych wykorzystano model 1 intensywności użytkowania pojazdów samochodowych z parametrami:  $a = 6,908$  oraz  $m = 2,5$ .



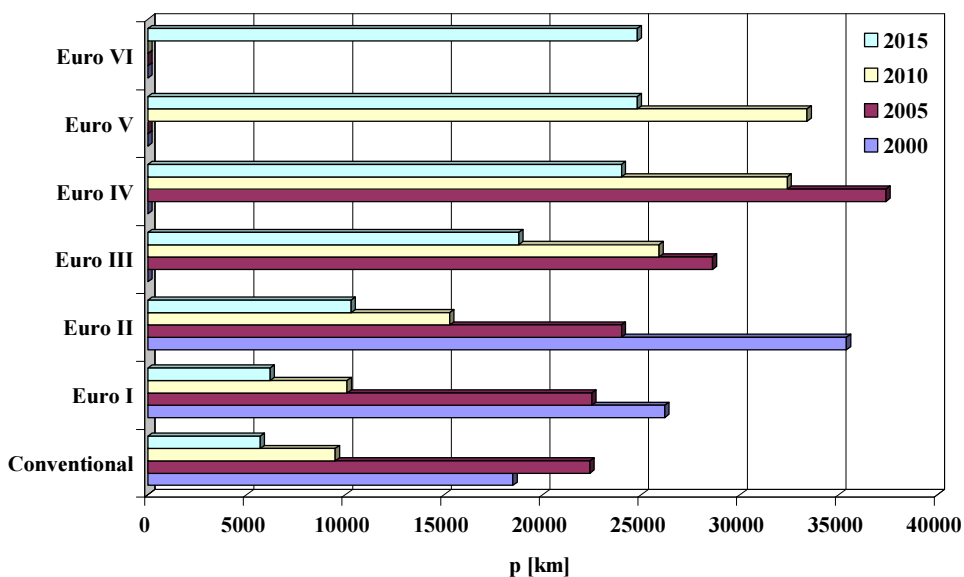
Rys. 4. Liczność samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym o objętości skokowej zawartej w granicach  $(1,4 \div 2) \text{ dm}^3$  w kategoriach ekologicznych



Rys. 5. Średni przebieg roczny samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym o objętości skokowej zawartej w granicach  $(1,4 \div 2) \text{ dm}^3$  w kategoriach ekologicznych



Rys. 6. Licznosc ciągników siodłowych o masie maksymalnej zawartej w granicach (34 ÷ 40) Mg w kategoriach ekologicznych



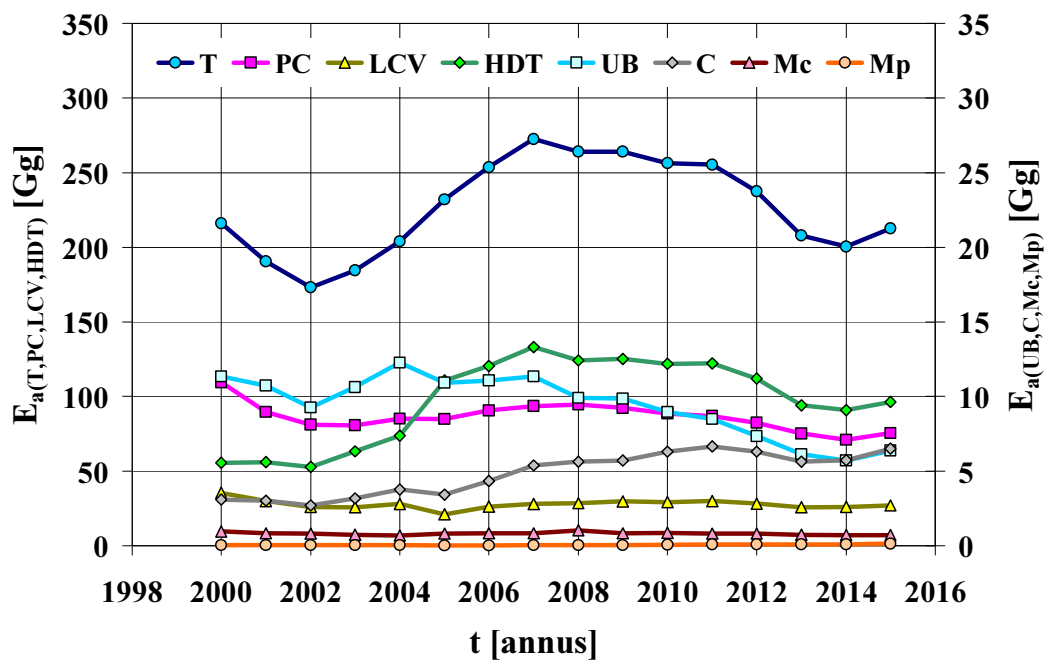
Rys. 7. Średni przebieg roczny ciągników siodłowych o masie maksymalnej zawartej w granicach (34 ÷ 40) Mg w kategoriach ekologicznych

Wyraźnie widoczne są wyniki zastosowania modelu: zwiększający się przebieg roczny pojazdów wyższych kategorii ekologicznych.

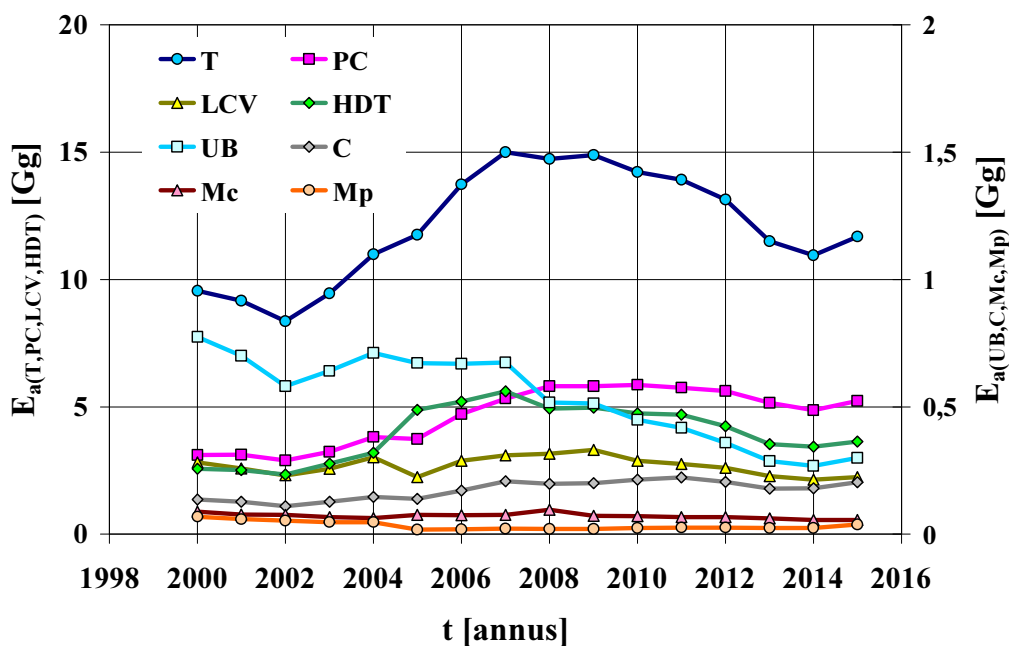
Zastosowanie modelu 1 intensywności użytkowania pojazdów samochodowych umożliwiło badanie krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w Polsce [3–5].

Na rysunkach 8–10 przedstawiono przykładowe wyniki dla lat 2000–2015 – krajową emisję roczną –  $E_a$  tlenków azotu, cząstek stałych PM10 i cząstek stałych PM2.5 dla kategorii skumulowanych: wszystkich pojazdów samochodowych – T, samochodów osobowych – PC,

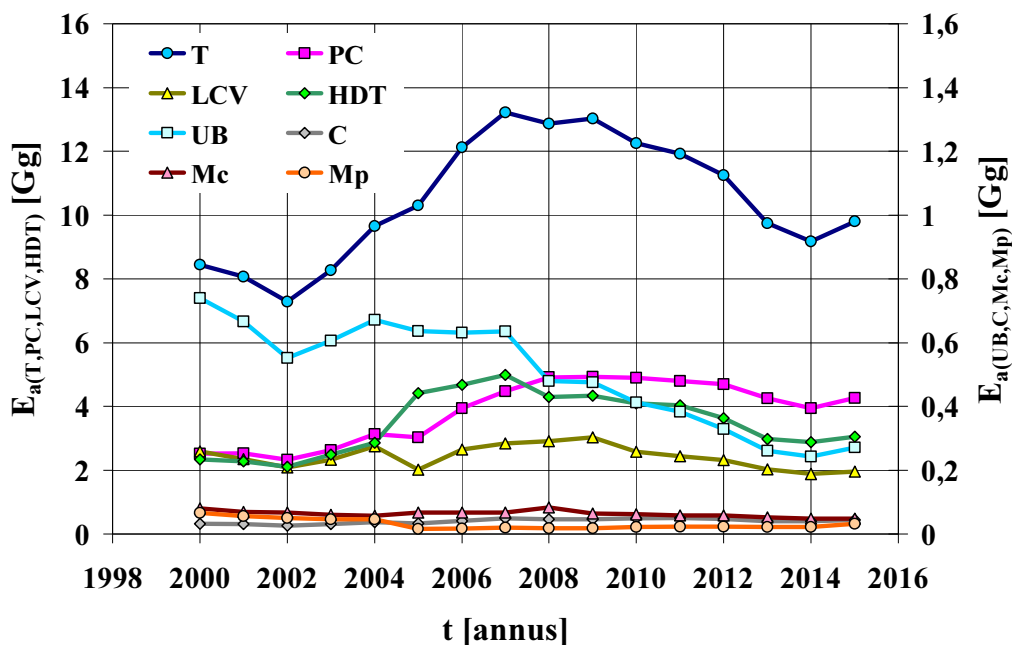
lekkich samochodów ciężarowych – LCV, samochodów ciężarowych – HDT, autobusów miejskich – UB, autobusów dalekobieżnych – C, motocykli – Mc oraz motorowerów – Mp.



Rys. 8. Krajowa emisja roczna tlenków azotu z pojazdów skumulowanych kategorii



Rys. 9. Krajowa emisja roczna cząstek stałych PM10 z pojazdów skumulowanych kategorii



Rys. 10. Krajowa emisja roczna cząstek stałych PM<sub>2.5</sub> z pojazdów skumulowanych kategorii

Z rysunków 8–10 wyraźnie wynika, że dla przykładowo rozpatrywanych w niniejszej publikacji substancji, których emisja jest jednym z najpoważniejszych problemów eksploatacji pojazdów samochodowych, krajowa emisja roczna zmniejsza się od około 2007 r., mimo że znacznie zwiększa się liczba pojazdów oraz intensywność ich użytkowania. Jest to wynik postępu technicznego w konstrukcji pojazdów samochodowych.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawiony w niniejszym artykule sposób modelowania intensywności użytkowania pojazdów samochodowych kategorii elementarnych ze względu na emisję zanieczyszczeń jest pierwszym unikatowym przedsięwzięciem w tym zakresie w skali światowej. Zaproponowane modele są zbudowane zgodnie z kryterium podobieństwa funkcjonalnego. Badania modeli wskazują, że w zakresie realnych wartości ich parametrów wrażliwość modeli na te parametry nie jest na tyle duża, aby nie było możliwe dostrojenie tych modeli z wykorzystaniem jako kryterium zgodności całkowitego zużycia paliw: z modeli oraz z publikowanych oficjalnie danych. Przedstawione wyniki zastosowania jednego z opracowanych modeli są zgodne ze stanem wiedzy. Przykładem praktycznego wykorzystania jednego z opracowanych modeli jest inwentaryzacja emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w Polsce w latach 2000–2015, wykonana z zastosowaniem oprogramowania COPERT. Wyniki te są przedstawiane w oficjalnych raportach Unii Europejskiej.

#### Piśmiennictwo

1. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>. (2016–12–06).
2. AVL Emission Testing Handbook 2016.

3. Bebkiewicz K, Chłopek Z, Szczepański K, Zimakowska-Laskowska M. Issues of modeling the total pollutant emission from vehicles. *Proceedings of the Institute of Vehicles*. 2017; 110 (1): 103–118.
4. Bebkiewicz K, Chłopek Z, Szczepański K, Zimakowska-Laskowska M. Results of air emission inventory from road transport in Poland in 2014. *Proceedings of the Institute of Vehicles* 2017; 110 (1): 77–88.
5. Bebkiewicz K, Chłopek Z, Szczepański K, Zimakowska-Laskowska M. The influence of the properties of vehicles traffic on the total pollutant emission. *Proceedings of the Institute of Vehicles* 2017; 110 (1): 89–102.
6. Borge R et al. Development of road traffic emission inventories for urban air quality modeling in Madrid (Spain). 21st USEPA International Emission Inventory Conference. April 13–16, 2015. San Diego (California).
7. Borrego C et al. Integrated modelling of road traffic emissions: application to Lisbon air quality management. *Cybernetics and Systems. An International Journal* 2004; 35(5–6): 535–548.
8. BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), INFRAS AG (Infrastruktur-, Umwelt- und Wirtschaftsberatung). *Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950–2010, BUWAL-Bericht* 1995; 255.
9. Chłopek Z, Biedrzycki J, Lasocki J, Wójcik, P. Comparative examination of pollutant emission from an automotive internal combustion engine with the use of vehicle driving tests. *Combustion Engines* 2016; 164 (1): 56–64.
10. Chłopek Z, Piaseczny L. Remarks about the modelling in science researches. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2001; 11 (4): 47–57.
11. Chłopek Z, Waśkiewicz J. Projections of the fuel consumption by the road transport in Poland. *Journal of KONES* 2013; 20 (2): 33–39.
12. Chłopek Z. Testings of vehicle ecological structure in European Union countries in consideration of emission model adaptation into polish conditions. *Journal of KONES* 2000: 65–76.
13. Chłopek Z. Zasady modelowania zużycia paliwa i energii oraz emisji zanieczyszczeń związanych z użytkowaniem pojazdów drogowych. (Principles of modeling of fuel and energy consumption and emission of pollutants associated with the use of road vehicles). *Technika Transportu Szynowego* 2015; 12: 262–267. (In Polish).
14. COPERT Training 5. COPERT 5 vs COPERT 4. European Environment Agency. 2016. [http://emisiam.com/sites/default/files/COPERT\\_5\\_features.pdf](http://emisiam.com/sites/default/files/COPERT_5_features.pdf). (2016–12–06).
15. CORINAIR – Coordinated Information on the Environment in the European Community – Air. <http://reports.eea.europa.eu/EMEPCORINAIR4/en/page002.html>. (2016–12–06).

16. COST 319. Estimation of pollutant emissions from transport. <http://lat.eng.auth.gr/COPERT/>. (2016–12–06).
17. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2016. European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>. (2016–12–06).
18. Gkatzoflias D, Kouridis Ch, Ntziachristos L, Samaras Z. COPERT 4 Computer programme to calculate emissions from road transport User manual (version 9.0). European Environment Agency. Emisia SA. 2012. (2016–12–06).
19. <http://www.eea.europa.eu/publications/EMEP-CORINAIR5>. (2014–08–24).
20. Informative inventory report Sweden 2016. Swedish Environmental Protection Agency. Stockholm. 2016.
21. INFRAS AG. Handbook emission factors for road transport 3.2. Quick reference. Version 3.2. Bern, 2014.
22. Mańczak K.: Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1979. (In Polish).
23. MEET. Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport. <http://lat.eng.auth.gr/COPERT/>. (2016–12–06).
24. Naranjo J E, Jimenez F, Serradilla F J, Zato J G. Floating car data augmentation based on infrastructure sensors and neural networks. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Transactions on Intelligent Transportation Systems 2012; 13: 107–114.
25. Reynolds A W, Broderick B M. Development of an emissions inventory model for mobile sources. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2016; 5: 77–101.
26. Rosenbluth A., Wiener N: The role of models in science. Phil. Sci. 1945: 12 (4).
27. Saikawa et al. The impact of China's vehicle emissions on regional air quality in 2000 and 2020: a scenario analysis. Atmospheric Chemistry and Physics 2011; 11: 9465–9484.
28. Sandmo T. The Norwegian Emission Inventory 2013. Documentation of methodologies for estimating emissions of greenhouse gases and long-range transboundary air pollutants. Statistics Norway. Oslo-Kongsvinger. 2013.
29. Vibe I I. Nowoje o rabocziem cikle dvigatieliej (Вибе И.И.: Новое о рабочем цикле двигателей – New about working cycle of engines). Sverdlovsk (Свердловск): Mashgiz Moskow (Машгиз Москва), 1962. (In Russian).
30. Wakeling D et al. UK informative inventory report (1990 to 2015). Final Version (v1.0). Ricardo Energy & Environment. March 2017. [https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat07/1703161205\\_GB\\_IIR\\_2017\\_Final\\_v1.0.pdf](https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat07/1703161205_GB_IIR_2017_Final_v1.0.pdf).



31. Wang H Z, Ni D H, Chen C Y, Li J. Stochastic modeling of the equilibrium speed-density relationship. *Journal of Advanced Transportation* 2013; 1(47): 126–150.
32. Winther M.: Danish emission inventories for road transport and other mobile sources. Inventories until the year 2010. National Environmental Research Institute. University of Aarhus. 2012. Scientific Report No. 24. <http://www.dmu.dk/Pub/SR24.pdf>. (2017–05–01).
33. Worldwide emission standards. Heavy duty & off-road vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2015/2016.
34. Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2016/2017.
35. Zhou X et al. Integrating a simplified emission estimation model and mesoscopic dynamic traffic simulator to efficiently evaluate emission impacts of traffic management strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2015; 37: 123–136.

#### **Model of the structure of motor vehicles for the criterion of technical level due to pollutant emission**

**Abstract:** The inventory of the total vehicle pollution emission is only possible through the use of the modeling of pollutant emission. One of the most difficult problems of modeling total pollutant emission from motor vehicles is the identification of their structure. Where it is possible to use vehicle registration data to model vehicle categories, it is very difficult to design representative vehicles for the category vehicles because of the lack of empirical evidence. The article proposes two models of the structure of motor vehicles for the criterion of technical level due to pollutant emission. The method of modeling the intensity of vehicle use in the category of pollution-based vehicles, presented in this article, is the first unique undertaking in this field on a global scale. This method was used for the inventory of pollutant emission of motor vehicles in Poland in 2000–2015.

**Key words:** motor vehicles, inventory of pollutant emission, categories of motor vehicles