

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej

ROZPRAWA DOKTORSKA

Mgr inż. Katarzyna Bebkiewicz

Modelowanie emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego do celów jej inwentaryzacji

Promotor

Prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek

Promotor pomocniczy

Dr hab. inż. Krystian Szczepański, Prof. IOŚ-PIB

Katowice 2024

Spis treści

Streszczenie	2
Oznaczenia	4
1. Wstęp	6
2. Pojęcia występujące w inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych...	9
3. Cele modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego	14
4. Przegląd modeli emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego	21
4.1. Wiadomości wprowadzające.....	21
4.2. Model COPERT	21
4.3. Model HBEFA INFRAS AG	22
4.4. Model GAINS	24
4.5. Model MOVES	25
4.6. Model PRIMES-TREMOVE	26
4.7. Model VECTO	26
4.8. Model CO2MPAS	27
4.9. Model SULTAN	27
4.10. Model SIBYL.....	27
4.11. Podsumowanie przeglądu modeli emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego ...	28
5. Problem badawczy rozprawy	30
5.1. Cel rozprawy	30
5.2. Teza rozprawy	30
5.3. Zadania badawcze rozprawy	31
6. Usystematyzowanie problemów modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego	33
7. Badania modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych.....	42
7.1. Charakterystyki emisji zanieczyszczeń stosowane w modelowaniu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.....	42
7.2. Zakres badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych.....	46
7.3. Badania modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych ze względu na lata bilansowania	50
7.4. Badania modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na modelowe warunki ruchu pojazdów	108
7.5. Podsumowanie wyników badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych	121
8. Podsumowanie	123
Piśmiennictwo	126

Streszczenie

Znajomość emisji całkowitej zanieczyszczeń z transportu drogowego w skali czasu, przestrzeni, w zależności od rodzajów pojazdów oraz warunków ich użytkowania jest konieczne do oceny oddziaływania transportu drogowego na środowisko ludzi zarówno naturalne, jak i cywilizacyjne. Jedynym sposobem wyznaczenia emisji całkowitej zanieczyszczeń ze źródeł mobilnych jest modelowanie.

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest zbadanie możliwości wykorzystania procedur stosowanych w oficjalnej inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego do badania modelu tej emisji ze względu na dane wejściowe i parametry modelu, charakteryzujące strukturę, intensywność i sposób użytkowania pojazdów drogowych.

Zadaniem badawczym rozprawy jest usystematyzowanie problemów modelowania emisji zanieczyszczeń oraz identyfikacji modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.

Przeprowadzone zostały badania krajowej emisji zanieczyszczeń dla lat 2000 – 2020 w warunkach ruchu pojazdów: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych. Badania te przeprowadzono ze względu na wielkości wejściowe takie jak liczność pojazdów drogowych kategorii skumulowanych oraz intensywność użytkowania pojazdów drogowych kategorii skumulowanych. Przeprowadzono również badania modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego ze względu na parametry modelu, przede wszystkim ze względu na charakter ruchu pojazdów drogowych w warunkach specyficznych. Zbadano wrażliwość modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego na modelowe warunki ruchu pojazdów. Struktura pojazdów drogowych była modelowana w postaci kategorii elementarnych i skumulowanych.

Stwierdzono wyraźną tendencję do zmniejszania się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń mimo dynamicznego zwiększania się intensyfikacji motoryzacji. Szczególnie wyraźna poprawa jest w wypadku emisji tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych. Jest to wynikiem zmiany struktury pojazdów drogowych ze względu na właściwości ekologiczne – emisję zanieczyszczeń.

Ponadto w wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że wartość średnia prędkości pojazdów jest skuteczną charakterystyką zerowymiarową prędkości do oceny właściwości ruchu pojazdów w zadaniu inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.

Summary

Modeling of pollutant emissions from road transport for inventory purposes

Knowledge of the total emission of pollutants from road transport in time and space, depending on the types of vehicles and conditions of their use, is necessary to assess the impact of road transport on the human environment, both natural and civilization. The only way to determine the total emissions of pollutants from mobile sources is modeling.

The aim of this dissertation is to investigate the possibility of using the procedures used in the official road transport emissions inventory to study a model of these emissions in view of the input data and model parameters characterising the structure, intensity and use of road vehicles. The research task of the dissertation is to systematise the problems of modelling emissions and to identify a model for road transport emissions. A study of national emissions was carried out for the years 2000 – 2020 under different vehicle traffic conditions: in urban congestion, urban with no congestion, rural and on motorways and highways. These studies were carried out due to input values such as the number of road vehicles in the cumulative categories and the intensity of use of road vehicles in the cumulative categories. Research was also carried out on the model of pollutant emissions from road transport due to the model parameters, primarily due to the nature of road vehicle traffic in specific conditions. The sensitivity of the road transport pollutant emissions model to model vehicle traffic conditions was examined. The structure of road vehicles was modeled as elementary and cumulative categories.

A clear trend towards decreasing national annual emissions of pollutants was found despite the dynamic increase in the intensification of motorisation. The improvement is particularly noticeable in the case of emissions of carbon monoxide and non-methane volatile organic compounds. This is the result of a change in the structure of road vehicles due to their ecological properties – pollutant emissions.

Moreover, as a result of the conducted research, it was found that the average value of vehicle speed is an effective zero-dimensional speed characteristic for assessing the traffic characteristics of vehicles in the road transport emissions inventory.

Oznaczenia

Symbol	Znaczenie
C	autobusy dalekobieżne
CADC	(ang. <i>The Common Artemis Driving Cycles</i>) – test jezdny
CEPiK	Centralna Ewidencja Pojazdów i Kierowców
Cg	model ruchu w zatorach ulicznych w miastach
CH ₄	metan
CLRTAP	(ang. <i>Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution</i>) Konwencja w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości
CO	tlenek węgla
CO ₂	dwutlenek węgla
COPERT	(ang. <i>Calculation of Emissions from Road Transport</i>) – model do szacowania emisji zanieczyszczeń powietrza z transportu drogowego
EEA	(ang. <i>European Environment Agency</i>) – Europejska Agencja Środowiska
EMEP	(ang. <i>European Monitoring and Evaluation Programme</i>) – Wspólny program monitorowania i oceny przenoszenia zanieczyszczeń powietrza na dalekie odległości w Europie – program funkcjonujący w ramach konwencji LRTAP
EMISIA	spółka Uniwersytetu Arystotelesa w Salonikach, twórca modelu COPERT
FTP-75	(ang. <i>Federal Test Procedure</i>) – federalna procedura badawcza
H	model ruchu na drogach ekspresowych i autostradach
HBEFA	(ang. <i>Handbook Emission Factors for Road Transport</i>) – model do szacowania emisji zanieczyszczeń powietrza z transportu drogowego
HC	węglowodory
HDV	samochody ciężarowe
IIASA	Międzynarodowy Instytut Analizy Systemów Stosowanych w Austrii
INFRAS AG	(niem. <i>Infrastruktur-, Umwelt- und Wirtschaftsberatung</i>) – Ośrodek Doradztwa w Zakresie Gospodarki i Środowiska – Zurich
IOŚ-PIB	Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy
KOBiZE	Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami
LCV	lekkie samochody ciężarowe
LZO	lotne związki organiczne
Mc	motocykle
MP	motorowery
NECD	(ang. <i>New European Driving Cycle</i>) – test jezdny
NMLZO	niemetanowe lotne związki organiczne (ang. <i>non-methane volatile organic compounds</i> – NMVOC)
NO _x	tlenki azotu
PC	samochody osobowe
PEMS	(ang. <i>Portable Emission Measurement System</i>) – przenośny system do pomiaru emisji
PM	(ang. <i>Particulate Matter</i>) – cząstki stałe
PN	(ang. <i>Particulate Number</i>) – liczba cząstek stałych
PTV	producent oprogramowania do planowania ruchu, symulacji i zarządzania w czasie rzeczywistym, PTV Visum i PTV Vissim
R	model ruchu poza miastami
RDE	(ang. <i>Real Driving Emissions</i>) – emisja zanieczyszczeń w ruchu rzeczywistym pojazdów
RV	pojazdy drogowe
SO _x	tlenki siarki
T	krajowa emisja zanieczyszczeń we wszystkich warunkach ruchu
TSP	(ang. <i>total suspended particulate</i>) całkowity pył zawieszony
U	model ruchu w zatorach poza zatorami ulicznymi w miastach
UB	autobusy miejskie

UE	Unia Europejska
UNFCCC	(ang. <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>) – Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu
W	współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń
WHSC	(ang. <i>World Harmonized Stationary Cycle</i>) – test jezdny
WHTC	(ang. <i>World Harmonized Transient Cycle</i>) – test jezdny
WLTC	(ang. <i>Worldwide Harmonised Light Vehicles Cycle</i>) – test jezdny
WLTP	(ang. <i>Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure</i>) – procedura do szacowania rzeczywistego poziomu zużycia paliwa i emisji spalin
Yanosik	systemem ostrzegania o sytuacji na drodze, stworzonym przez kierowców dla kierowców
δ	współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń

1. Wstęp

Przedmiotem rozprawy jest modelowanie emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego do celów jej inwentaryzacji. Rozprawa dotyczy emisji zanieczyszczeń substancjalnych¹ zarówno szkodliwych dla zdrowia i życia organizmów żywych, jak substancji sprzyjających intensyfikacji zjawiska cieplarnianego w dolnych warstwach atmosfery, substancji powszechnie zwanych gazami cieplarnianymi².

Modelowanie emisji zanieczyszczeń ze źródeł mobilnych jest jedynym sposobem wyznaczenia emisji całkowitej zanieczyszczeń ze zbioru tych źródeł. O ile ze źródeł stacjonarnych jest możliwe dokonywanie badań z poszczególnych źródeł emisji i wyznaczenia na zasadzie superpozycji całkowitej emisji zanieczyszczeń, o tyle ze źródeł mobilnych nie jest możliwe zastosowanie takiej metody badawczej.

Takimi mobilnymi źródłami emisji zanieczyszczeń są pojazdy drogowe.

Znajomość emisji całkowitej zanieczyszczeń z transportu drogowego w skali czasu, przestrzeni, w zależności od rodzajów pojazdów oraz warunków ich użytkowania jest konieczna do oceny oddziaływania transportu drogowego na środowisko ludzi zarówno naturalne, jak i cywilizacyjne. Z tego powodu w międzynarodowych programach prowadzi się inwentaryzację emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego, podobnie jak z innych sektorów emisji zanieczyszczeń, w tym z sektorów źródeł antropogenicznych.

Inwentaryzacja emisji zanieczyszczeń jest obecnie powszechnie stosowanym narzędziem w ochronie środowiska [1, 2, 11 – 27, 36, 38, 39, 47, 48, 52, 53, 63, 74, 88, 89]. Służą temu usankcjonowane procedury umożliwiające krytyczną ocenę oddziaływania działalności cywilizacyjnej na środowisko. Szczególną rolę odgrywa w ochronie środowiska emisja zanieczyszczeń z transportu drogowego, w znacznej mierze z powodu masowości użytkowania pojazdów drogowych, dodatkowo w skupiskach dużej gęstości zamieszkania ludności – w wielkich aglomeracjach miejskich.

Inwentaryzację emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego prowadzi się obecnie we wszystkich rozwiniętych państwach [2, 58, 65, 82, 100]. Przykładowo w [2] jest rozpatrywana emisja zanieczyszczeń z transportu drogowego w obszarze Wielkiego Dublina. W raporcie [58] jest przedstawiona emisja zanieczyszczeń z transportu drogowego

¹ Definicje stosowanych pojęć są przedstawione w rozdziale piątym.

² Formalnie nazwa „gazy cieplarniane”, powszechnie stosowana, nie jest ścisła. W rzeczywistości intensyfikacji zjawiska cieplarnianego w dolnych warstwach atmosfery są również substancje w innych stanach skupienia niż gazowy – substancje w stanie ciekłym i w stanie stałym (pyły).

w Anglii, Walii, Szkocji i Irlandii Północnej w latach 2005 – 2020. Dużą rolę do emisji zanieczyszczeń ze źródeł motoryzacyjnych przywiązuje się w krajach dynamicznie rozwijających się.

W publikacji [82] są przedstawione wyniki inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego w Indiach w 2020 r., a w [100] w Chinach w latach 1998 – 2015.

W Polsce prace, dotyczące inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń, są prowadzone w Krajowym Ośrodku Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE) w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym (IOŚ-PIB). Wyniki badań KOBiZE [66, 78] są raportowane do Konwencji Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości (*The Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution – CLRTAP*) [94] oraz do Unii Europejskiej zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/2284 z dnia 14 grudnia 2016 r. w sprawie redukcji krajowych emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń atmosferycznych (tzw. dyrektywą pułapową) [51]. Raporty KOBiZE są również wykorzystywane przez Główny Urząd Statystyczny.

Niniejsza rozprawa składa się ze spisu oznaczeń, z ośmiu rozdziałów oraz spisu cytowanego piśmiennictwa. Rozprawa jest poprzedzona streszczeniem w języku polskim i angielskim. Rozdział pierwszy stanowi niniejszy wstęp. W rozdziale drugim przedstawiono pojęcia występujące w inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych. W rozdziale trzecim usystematyzowano cele modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego. W rozdziale czwartym dokonano przeglądu modeli emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.

Rozdział piąty zawiera opis problemu badawczego rozprawy. W rozdziale przedstawiono cel i tezę rozprawy oraz zadania badawcze, umożliwiające osiągnięcie celu i udowodnienie tezy.

Rozdział szósty dotyczy usystematyzowania problemów modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.

W rozdziale tym wyróżniono:

- problemy struktury modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego,
- usystematyzowanie problemów identyfikacji modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.

W rozdziale siódmym przedstawiono wyniki badań emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego ze względu na wielkości wejściowe i parametry modelu.

W rozdziale zdefiniowano zakres badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych. Pierwsza część badań została przeprowadzona ze względu na lata bilansowania emisji zanieczyszczeń. W drugiej części badań przedstawiono wyniki ze względu na wielkości wejściowe modelu. Trzeci rodzaj badań był przeprowadzany ze względu na parametry modelu. W tym zakresie opisano zasady modelowania ruchu pojazdów drogowych. Następnie przeprowadzono badania wrażliwości modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych na modelowe warunki ruchu pojazdów.

Rozdział ósmy stanowi podsumowanie rozprawy.

W zakończeniu pracy umieszczono spis cytowanego piśmiennictwa.

2. Pojęcia występujące w inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych

Zanieczyszczenie środowiska to występowanie substancji i oddziaływań niepożądanych dla środowiska, w intensywności umożliwiającej umowną zmianę jego właściwości. Zanieczyszczenia mogą mieć w szczególności szkodliwy wpływ na zdrowie ludzi i innych organizmów żywych [14, 15, 20, 36].

Zanieczyszczenia można podzielić na:

- zanieczyszczenia związane z materią: zanieczyszczenia substancjalne – wprowadzanie do środowiska substancji;
- zanieczyszczenia związane z oddziaływaniami:
 - zanieczyszczenia energetyczne – wprowadzanie do środowiska oddziaływania energetycznego, np. hałasu, promieniowania elektromagnetycznego,
 - zanieczyszczenia informacyjne – wprowadzanie do środowiska (cywilizacyjnego) informacji.

W niniejszej pracy przedmiotem badań są zanieczyszczenia substancjalne.

Podstawowym pojęciem, związanym z ochroną środowiska ludzi i organizmów żywych przed zanieczyszczeniami jest emisja.

Emisja to masa zanieczyszczeń – m wyprowadzanych z ich źródła. Jednocześnie z powodu niestaranności metodycznych termin emisja jest używany również jako nazwa zjawiska – wyprowadzania zanieczyszczeń ze źródła. Emisja zanieczyszczeń może być przedstawiona jako funkcja współrzędnych przestrzeni (najczęściej powierzchni) oraz czasu.

Emisję zanieczyszczeń charakteryzuje się również liczbą cząstek stałych – PN.

Jako funkcja czasu charakterystyką emisji zanieczyszczeń jest natężenie emisji zanieczyszczeń. Jest to pochodna emisji zanieczyszczeń względem czasu – t .

$$E_m = \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

Rozpatruje się także natężenie liczby cząstek stałych:

$$E_{PN} = \frac{dPN}{dt} \quad (2)$$

Są to charakterystyki funkcyjne.

Stosuje się również zerowymiarowe charakterystyki emisji zanieczyszczeń. Zerowymiarowe charakterystyki emisji zanieczyszczeń to funkcjonały procesów opisujących emisję zanieczyszczeń [44].

W zastosowaniach motoryzacyjnych ważną rolę odgrywa emisja drogowa zanieczyszczeń. Jest to pochodna emisji zanieczyszczeń względem długości drogi przebywanej przez pojazd drogowy – s :

$$b_m = \frac{dm}{ds} \quad (3)$$

Liczba drogowa cząstek stałych to pochodna liczby cząstek stałych względem długości drogi przebywanej przez pojazd:

$$b_{PN} = \frac{dPN}{ds} \quad (4)$$

Zazwyczaj rozpatruje się uśrednioną emisję drogową zanieczyszczeń i liczbę drogową cząstek stałych, ponieważ dla zerowej prędkości jazdy pojazdu emisja drogowa zanieczyszczeń i liczba drogowa cząstek stałych są nieokreślone.

Emisja jednostkowa zanieczyszczeń to pochodna emisji zanieczyszczeń względem pracy – L wykonanej przez silnik spalinowy:

$$e_m = \frac{dm}{dL} \quad (5)$$

Liczba jednostkowa cząstek stałych to pochodna emisji zanieczyszczeń względem pracy – L wykonanej przez silnik spalinowy:

$$e_{PN} = \frac{dPN}{dL} \quad (5)$$

Wskaźnik emisji zanieczyszczeń jest to pochodna emisji zanieczyszczeń względem masy zużytego paliwa – m_F :

$$W_m = \frac{dm}{dm_F} \quad (7)$$

Wskaźnik liczby cząstek stałych to pochodna liczby cząstek stałych względem masy zużytego paliwa:

$$W_m = \frac{dPN}{dm_F} \quad (8)$$

Wskaźnik energetyczny emisji zanieczyszczeń to pochodna emisji zanieczyszczeń względem energii równoważnej zużytemu paliwu – EN_F :

$$WE_m = \frac{dm}{dEN_F} \quad (9)$$

Wskaźnik energetyczny liczby cząstek stałych to pochodna liczby cząstek stałych względem energii równoważnej zużytemu paliwu – EN_F :

$$WE_{PN} = \frac{dPN}{dEN_F} \quad (10)$$

Emisja zanieczyszczeń i natężenie emisji zanieczyszczeń są wielkościami ekstensywnymi. Jako funkcje czasu mogą być traktowane jako procesy [29, 44, 71, 72].

Ogólnie proces to wielkości określone na pewnej przestrzeni unormowanej. Dziedzina, na której jest zdefiniowany proces jest najczęściej czas lub monotoniczna funkcja czasu (proces jest wówczas funkcją czasu, inaczej szeregiem czasowym) lub obszar przestrzeni (proces jest wówczas polem). W niniejszych pracach będzie wykorzystywane pojęcie procesu jako funkcji czasu. Jeśli proces jest niezdeterminowany, to każda możliwa jego realizacja jest przebiegiem.

Wielkości o charakterze intensywnym, stosowane do opisu emisji zanieczyszczeń, są zerowymiarowymi charakterystykami emisji zanieczyszczeń.

Zespół wyżej wymienionych pojęć umożliwia jednoznaczny opis zjawisk emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych oraz silników spalinowych pojazdów drogowych oraz maszyn roboczych.

Zanieczyszczenia wprowadzone do środowiska podlegają rozprzestrzenianiu się, które obejmuje:

- dyspersję zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym,
- przemiany zanieczyszczeń i usuwania ich z powietrza atmosferycznego.

Dyspersja to zjawiska transportu i dyfuzji zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym.

Termin imisji zanieczyszczeń jest również dwuznaczny, podobnie jak termin emisji. Jako zjawisko imisja zanieczyszczeń jest to przyjmowanie zanieczyszczeń przez środowisko.

Jako wielkość fizyczna imisja zanieczyszczeń to stężenie zanieczyszczenia rozproszonego w powietrzu atmosferycznym na wysokości 1,5 m nad powierzchnią.

Imisja zanieczyszczeń jako wielkość fizyczna jest wielkością charakteryzującą szkodliwość dla środowiska zanieczyszczeń emitowanych ze źródeł zanieczyszczeń.

Krajowa roczna emisja zanieczyszczenia z transportu drogowego to natężenie zanieczyszczenia na terenie państwa uśrednione w roku kalendarzowym.

W inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego wprowadza się systematykę pojazdów drogowych oraz warunków ich ruchu.

Pojazdy drogowe klasyfikuje się w postaci kategorii [1, 11 – 27, 30, 47, 47, 52, 52]. Ogólnie kategoria (z gr. *κατηγορεῖν* – *katēgorein* – orzekać) jest to zbiór bytów mających pewne wspólne cechy i powiązanych wzajemnymi relacjami.

Kategorie pojazdów drogowych są ustalane ze względu na kryteria m.in. [1, 11 – 27, 30, 47, 47, 52, 52]:

- przeznaczenie,
- umowną wielkość,
- właściwości,
- paliwo,
- poziom techniczny.

Kategoria elementarna pojazdów drogowych to pojazdy o wszystkich takich samych cechach kryterialnych. Przykładem jest np. kategoria samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym o objętości skokowej większej niż 2 dm³, o poziomie technicznym ze względu na emisję zanieczyszczeń Euro 3, zasilane benzyną.

Kategoria skumulowana pojazdów drogowych to pojazdy o nie wszystkich takich samych cechach kryterialnych. Przykładami są np.:

- samochody osobowe z silnikami o zapłonie iskrowym o objętości skokowej większej niż 2 dm³,
- pojazdy drogowe – najbardziej skumulowana kategoria pojazdów drogowych.

Inwentaryzacja emisji zanieczyszczeń szkodliwych dla zdrowia organizmów żywych z transportu drogowego dotyczy wyznaczania krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń [12 – 14, 19 – 27, 47, 48, 52]:

- tlenku węgla,
- niemetanowych lotnych związków organicznych,
- tlenków azotu sprowadzonych do dwutlenku azotu,
- metanu,
- całkowitego pyłu zawieszonego,
- cząstek stałych PM10,
- cząstek stałych PM2.5,
- sadzy,
- ołowiu,

- tlenków siarki sprowadzonych do dwutlenku siarki,
- amoniaku.

Źródłem emisji pyłów z transportu drogowego są nie tylko spaliny z silnika, ale i pary trybologiczne w pojeździe oraz produkty współpracy pojazdu ze środowiskiem [12 – 14, 19 – 27, 47, 48, 52]. Pary trybologiczne w pojeździe to przede wszystkim: układ hamulcowy i sprzęgło cierne. Źródłem emisji pyłów współpracy pojazdu ze środowiskiem jest ścieranie się ogumienia opon oraz nawierzchni jezdnej. Natomiast wzniesienie pyłów przez pojazd z nawierzchni jezdnej, tzw. unos wtórny, powoduje zwiększenie stężenia pyłów w powietrzu, ale nie jest źródłem pyłów.

Inwentaryzacja emisji zanieczyszczeń sprzyjających intensyfikacji zjawiska cieplarnianego w atmosferze z transportu drogowego dotyczy wyznaczania krajowej emisji rocznej następujących substancji [1, 11, 37 – 39, 47, 48, 52, 53]:

- dwutlenku węgla,
- metanu,
- podtlenku azotu,
- fluorowanych gazów przemysłowych (HFC, PFC i SF₆)
 - wodorofluorowęglowodory – HFC,
 - perfluorowęglowodory – PFC,
 - heksafluorek siarki – SF₆,
 - trifluorek azotu – NF₃.

3. Cele modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego

Badania empiryczne emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego oraz zużycia paliwa i zużycia energii w warunkach symulujących ich rzeczywiste użytkowanie należą do niezwykle trudnych i kosztownych. W warunkach rzeczywistego użytkowania przeprowadza się tzw. badania RDE (*Real Driving Emissions*) [4, 5, 8, 9, 49, 102]. Badania te są wykonywane dopiero od kilku lat. Do pomiarów jest wykorzystywana specjalistyczna kosztowna przenośna aparatura tzw. PEMS (*Portable Emission Measurement System*) [73] z analizatorem Semtech-DS [79].

W artykułach [4, 5, 8, 9] przedstawiono wyniki badań empirycznych w rzeczywistych warunkach użytkowania samochodu osobowego. Rejestrowano przebiegi prędkości pojazdu, stanów pracy silnika (sterowania silnika, prędkości obrotowej i względnego momentu obrotowego) oraz natężenia emisji zanieczyszczeń i natężenia liczby cząstek stałych, a także natężenia emisji masowego zużycia paliwa. Zarejestrowane wyniki badań przefiltrowano z użyciem filtru Savitzky'ego – Golaya [78] w celu zmniejszenia w sygnałach udziału szumów o dużych częstotliwościach. W wyniku tak przeprowadzonych badań było możliwe wyznaczenie emisji zanieczyszczeń dla stanów pracy silników odpowiadających warunkom pracy w pojeździe w czasie rzeczywistego użytkowania trakcyjnego w odróżnieniu od badań w warunkach testów homologacyjnych – tak wyznaczone charakterystyki emisji zanieczyszczeń odpowiadają jedynie stanom pracy silników w warunkach badań homologacyjnych.

Stany pracy silnika spalinowego, determinujące jego właściwości, to [4, 6 – 8, 32, 33 – 35, 44]:

- częstotliwość obiegów pracy, opisywana prędkością obrotową;
- obciążenie silnika, opisywane mocą użyteczną lub – częściej – momentem obrotowym (skoro już jednym ze stanów jest prędkość obrotowa); obciążenie silnika może być opisane również średnim ciśnieniem użytecznym (jest to wielkość liniowo zależna od momentu obrotowego), a także np. dawką paliwa, niekiedy – w silnikach o zapłonie iskrowym – natężeniem przepływu powietrza zużywanego przez silnik oraz podciśnieniem w układzie dolotowym;
- stan cieplny silnika, opisany zbiorem temperatur części, zespołów i materiałów eksploatacyjnych silnika (przede wszystkim czynnika chłodzącego i oleju silnikowego).

W ustabilizowanych warunkach ruchu pojazdu (przy stałej prędkości jazdy) właściwości użytkowe samochodu są zdeterminowane stałymi wartościami procesów prędkości obrotowej i momentu obrotowego silnika. W nieustabilizowanych warunkach ruchu stany pracy silnika opisują procesy dynamiczne³. W związku z tym właściwości użytkowe silników i – w konsekwencji – pojazdów są zależne od każdorazowej realizacji procesów prędkości obrotowej i momentu obrotowego silnika. Z tego powodu jest konieczne do badania tych właściwości wykorzystywanie testów jezdnych symulujących rzeczywiste użytkowanie pojazdów.

Znacznie łatwiej jest przeprowadzać badania emisji zanieczyszczeń z silników pojazdów drogowych w testach jezdnych symulujących rzeczywiste użytkowanie pojazdów na hamowni podwoziowej. Badania w warunkach rzeczywistego użytkowania trakcyjnego są znacznie bardziej skomplikowane i kosztowne niż badania na hamowni podwoziowej.

Testy jezdne opracowuje się zgodnie z następującymi kryteriami podobieństwa z rzeczywistymi warunkami ruchu pojazdu:

1. Wierna symulacja procesu prędkości na podstawie zarejestrowanych realizacji tego procesu w rzeczywistych warunkach ruchu pojazdu. Zarejestrowane procesy prędkości są przetwarzane w celu wyznaczenia ich zerowymiarowych charakterystyk, takich jak [30, 33 – 35, 44, 45]: wartość średnia prędkości, wartości ekstremalne prędkości, wartość średniokwadratowa prędkości, wartości ekstremalne przyspieszeń, wartość średnia dodatniego przyspieszenia, wartość średnia ujemnego przyspieszenia, wartość średnia wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia. Ta ostatnia wielkość ma specyficzną interpretację – charakteryzuje średnie obciążenie silnika. Na podstawie porównania zerowymiarowych charakterystyk procesu prędkości wybiera się fragmenty o zbliżonych właściwościach ze względu na przyjęte kryteria. Zazwyczaj testy opracowywane zgodnie z zasadą wiernej symulacji w dziedzinie czasu nie są wprost wynikiem pomiarów empirycznych, tylko wynikiem ich przetwarzania, np. kombinacji fragmentów zarejestrowanych realizacji procesu o porównywalnych właściwościach. Przykładami takich testów są: FTP-75 (*Federal Test Procedure*) I WLTC (*Worldwide Harmonised Light Vehicles Cycle*) [5, 49, 102].
2. Synteza testów jezdnych na podstawie arbitralnie przyjętych procesów prędkości (potocznie: o przyjętym „kształcie” wykresu prędkości w dziedzinie czasu) oraz

³ Procesy dzieli się na statyczne – niezależne od czasu i dynamiczne – zależne od czasu.

identyfikacji parametrów procesu takich jak: wartość średnia prędkości, wartości ekstremalne prędkości, wartości ekstremalne przyspieszeń i inne. Kryterium identyfikacji jest podobieństwo rozpatrywanych charakterystyk zerowymiarowych w opracowywanym teście i w rzeczywistym użytkowaniu pojazdu. Jest również możliwe rozpatrywanie podobieństwa w dziedzinie wartości procesu, np. czasu udziału w teście prędkości zerowej, czy nawet gęstości prawdopodobieństwa.

Przykładami takich testów są: NEDC (*New European Driving Cycle*) i Japanese 10-15 Mode [49, 102].

3. Synteza testów jezdnych na podstawie podobieństwa charakterystyki procesu prędkości w dziedzinie częstotliwości [45].

Stany pracy silnika są bezpośrednio wykorzystywane w badaniach właściwości użytkowych ciężkich silników spalinowych do napędu: samochodów ciężarowych i autobusów, a także pojazdów niefazowych i maszyn roboczych oraz innych obiektów i urządzeń [28, 49, 61, 97]. Są to testy zarówno statyczne, np. WHSC (*World Harmonized Stationary Cycle*) i NRSC (*Nonroad Steady Cycle*), jak i dynamiczne, np. WHTC (*World Harmonized Transient Cycle*) i NRTC (*Nonroad Transient Cycle*) [49, 103].

W wielu publikacjach są przedstawiane wyniki analizy testów jezdnych i stanów pracy silników spalinowych. W [30] jest opisana procedura tworzenia testów jezdnych, wykorzystanych m.in. do tworzenia oprogramowania HBEFA (*Handbook Emission Factors for Road Transport*) INFRAS AG (*Infrastruktur-, Umwelt- und Wirtschaftsberatung*) [60] do symulacji emisji zanieczyszczeń. W zastosowanych procedurach wykorzystano m.in. metodę analizy skupień do syntezy testów jezdnych. W pracy [3] przedstawiono wyniki analizy testów jezdnych CADC (*The Common Artemis Driving Cycles*).

Niewiele jest prac, dotyczących stanów pracy silników w testach jezdnych. W pracach [6 – 9, 32 – 35] analizowano wpływ stanów dynamicznych w testach jezdnych na emisję zanieczyszczeń.

Znajomość wyników badań emisji zanieczyszczeń z silników pojazdów w testach o różnych właściwościach stwarza możliwość zdobycia wiedzy w taki sposób, że jest możliwe wykorzystanie jej do poznania właściwości ekologicznych silników spalinowych ze względu na emisję zanieczyszczeń w różnych warunkach użytkowania pojazdów. Takim przykładem jest model emisji zanieczyszczeń COPERT (*Calculation of Emissions from*

Road Transport) [47, 47], wykorzystywany w inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.

Ogólnie modelowanie to budowa i badanie modeli [40, 42, 50, 69, 90]. Model to twór uczyniony na wzór i podobieństwo obiektu modelowania, który jest wynikiem poznania.

Modele mogą być zarówno fizyczne, jak i teoretyczne [40, 42]. Modele teoretyczne, opisane za pomocą formalizmu matematycznego, są nazywane modelami matematycznymi. Wynikiem poznania zmysłowego są zjawiska, a ich opis matematyczny to procesy. Modele uczynione na wzór i podobieństwo zjawisk to modele fizyczne [40, 42].

Wynikiem poznania umysłowego (teoretycznego, inteligibilnego) są pojęcia. Pojęcia wykorzystane do opisu zjawisk, tworzące procesy, są podstawą opracowywania modeli matematycznych.

Modele mogą być tworzone na zasadzie podobieństwa formy (in. strukturalnego lub morfologicznego) oraz podobieństwa funkcjonalnego. Modele tworzone na zasadzie podobieństwa funkcjonalnego są nazywane modelami behawiorystycznymi [40, 42, 50, 69, 90].

Właściwość modelu, wywodząca się z zastosowania do jego tworzenia kryteriów podobieństwa strukturalnego, nazywa się izomorfizmem (niekiedy: homomorfizmem), natomiast właściwość, wywodząca się z zastosowania kryteriów podobieństwa funkcjonalnego – izofunkcjonalizmem [40, 42, 50, 69, 90].

Pierwszym systematycznym działaniem w procesie modelowania jest dobór układu fizycznego przedmiotu poznania, czyli zbioru wielkości fizycznych opisujących spostrzeżenia związane z przedmiotem poznania.

Kolejnym elementem modelowania jest tworzenie modelu fizycznego przedmiotu poznania. Modelem fizycznym jest zbiór elementów o wzajemnych zależnościach, który może być opisany wielkościami fizycznymi, przyjętymi jako układ fizyczny przedmiotu poznania. Na etapie tworzenia modelu fizycznego wykorzystuje się kryteria podobieństwa do przedmiotu poznania.

Następnym elementem modelowania jest tworzenie modelu matematycznego. Model matematyczny jest opisem modelu fizycznego za pomocą aparatu matematycznego.

Ważna klasyfikacja dotyczy sposobu traktowania modelowanych zjawisk ze względu na ich określoność, wynikającą z obowiązywania związku przyczynowo-skutkowego [29, 40, 41, 44, 69, 71, 72, 90]. Modele, w których między wszystkimi wielkościami fizycznymi

mogą zachodzić jedynie związki przyczynowo-skutkowe nazywamy modelami przyczynowymi (inaczej: zdeterminowanymi). Jeśli w modelu występuje między wielkościami fizycznymi przynajmniej jeden związek nie będący związkiem przyczynowo-skutkowym, to model nazywa się przypadkowym (inaczej: losowym, niekiedy probabilistycznym, stochastycznym, statystycznym⁴). O sposobie traktowania modelu jako przyczynowego lub przypadkowego decyduje na etapie tworzenia układu fizycznego lub modelu fizycznego akt wyboru badacza.

Ze względu na rodzaj zależności występujących w modelu matematycznym można wyróżnić modele opisane funkcjami o wartościach liczbowych lub operatorami [44].

Ważną klasyfikacją modeli matematycznych jest podział na modele liniowe i nieliniowe. Inna klasyfikacja dotyczy liczby stopni swobody modeli: modele o skończonej liczbie stopni swobody (dyskretne) i o nieskończonej (ciągłe) [40, 42, 50, 69, 90].

Istnieje jeszcze wiele możliwości klasyfikowania modeli, często określanych w znacznie intuicyjny sposób. Do takich kryteriów należą m.in.: prawdziwość, dokładność, adekwatność, odpowiedniość, zgodność, niesprzeczność, trafność, użyteczność i skuteczność [40, 42, 50, 69, 90].

Niektóre z tych kryteriów można sformalizować.

Zgodnością modelu z przedmiotem modelowania jest niesprzeczność wyników analizy modelu z empiryczną weryfikacją zgodnie z przyjętymi kryteriami oceny. Kryterium może być np. wielkość odpowiadająca pojęciu metryki w analizie funkcjonalnej. Sąd o zgodności modelu jest formułowany na podstawie porównania wartości miary kryterium oceny z przyjętą wartością kwalifikacyjną.

Przez empiryczną weryfikację modelu rozumie się porównanie wyników analizy modelu i empirycznie wyznaczonych wartości wielkości fizycznych przedmiotu modelowania.

Dokładnością modelu jest zgodność dla kryterium różnicy wartości wyniku analizy modelu z empiryczną weryfikacją dla przyjętych więzów nałożonych na model i przedmiot modelowania. Dokładność modelu jest właściwością podrzędną w stosunku do zgodności modelu. Zgodność modelu jest zatem dokładnością modelu powiększą o kryteria oceny zgodności.

⁴ Lepszym terminem do nazwania nieokreśloności przedmiotu badań jest przypadkowość, a nie losowość, bowiem losowość zgodnie z pochodzeniem tego terminu z mitologii greckiej to w istocie przyczynowość. Zgodnie z mitologią grecką los rządzi życiem ludzi, a przypadek chodzi po ludziach. Trzy córki Zeusa i Temidy: Kloto, Lachesis i Atropos nieuchronnie decydują o losie każdego człowieka. Kloto rozpoczyna nić życia, Lachesis ją snuje, a Atropos ucina.

Skuteczność (efektywność) modelu jest jego prakseologiczną właściwością, charakteryzującą spełnianie przez niego określonych celów zgodnie z przyjętymi kryteriami, wśród których jest zawarte kryterium relacji skutków badania modelu do nakładów, związanych z jego używaniem.

Użyteczność modelu to prakseologiczna właściwość, charakteryzująca spełnianie przez niego określonych celów zgodnie z przyjętymi kryteriami, wśród których jest zawarte kryterium praktycznego zastosowania.

Wyróżnia się cztery rodzaje badania modeli matematycznych: zadanie proste – analiza, identyfikacja, badanie wrażliwości i zadanie odwrotne – sterowanie [40, 41, 44].

Pierwszy rodzaj to zadanie proste – analiza. Jest to rozwiązanie opisu matematycznego dla zadanych danych: parametrów modelu i danych wejściowych [40, 41, 44].

Drugi rodzaj badań to identyfikacja. Identyfikacja może być strukturalna i parametryczna [40, 41, 44]. Do identyfikacji strukturalnej w wypadku modeli zbudowanych na zasadzie podobieństwa strukturalnego dochodzi na etapie opisu procesów z wykorzystaniem formalizmu matematycznego. Identyfikacja strukturalna modeli behawiorystycznych to arbitralne przyjęcie zależności matematycznych wielkości wyjściowych modelu od wielkości wejściowych. W obydwu wypadkach te opisy mają nieznanne parametry. Identyfikacja parametryczna polega na wyznaczeniu wartości tych parametrów.

Analiza wrażliwości (inaczej analiza czułości) polega na badaniu wpływu parametrów modelu na wielkości wyjściowe [40, 41, 44].

Zadanie odwrotne (sterowanie) polega na wyznaczeniu takich wartości wielkości wejściowych modelu, aby uzyskać oczekiwane wartości wielkości wyjściowych [40, 41, 44].

Istnieją trzy główne cele modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego [23]:

1. Inwentaryzacja emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego w skali czasu, przestrzeni, w zależności od rodzajów pojazdów oraz warunków ich użytkowania.
2. Badanie wpływu struktury pojazdów drogowych oraz warunków ich użytkowania na emisję zanieczyszczeń z transportu drogowego.
3. Ocena oddziaływania zanieczyszczeń emitowanych z transportu drogowego na środowisko.

Temat niniejszej pracy jest związany z inwentaryzacją emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.

Inwentaryzacja emisji zanieczyszczeń jest prowadzona w Polsce przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE) w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym (IOŚ-PIB) [63, 74].

Wyniki badań KOBiZE są raportowane do:

- Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu (UNFCCC) z 1994 r. i Protokołu z Kioto,
- Konwencji Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości (*The Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution – CLRTAP* [94]),
- Unii Europejskiej zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/2284 z dnia 14 grudnia 2016 r. w sprawie redukcji krajowych emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń atmosferycznych (tzw. dyrektywą pułapową) [51].

Raporty KOBiZE są również wykorzystywane przez Główny Urząd Statystyczny.

Do inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń ze źródeł cywilizacyjnych jest stosowana procedura EMEP/EEA (*European Monitoring and Evaluation Programme – European Environment Agency*) [52]. W Krajowym Ośrodku Bilansowania i Zarządzania Emisjami wykorzystuje się jako standard oprogramowanie COPERT. W związku z tym w niniejszej rozprawie rozważania na temat modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego są odnoszone do oprogramowania COPERT.

4. Przegląd modeli emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego

4.1. Wiadomości wprowadzające

Istnieje wiele modeli służących do badania emisji zanieczyszczeń środowiska (zanieczyszczeń szkodliwych dla zdrowia i życia organizmów żywych oraz gazów sprzyjających intensyfikacji zjawiska cieplarnianego w atmosferze – gazów cieplarnianych) z transportu drogowego. Modele te różnią się m.in. rodzajem wprowadzanych danych i otrzymywanych wyników, a także umożliwiającymi prognozowanie emisji zanieczyszczeń oraz wspierającym podejmowanie działań związanych z jej ograniczeniem. Poniżej przedstawiono podstawowe informacje na temat wybranych modeli.

4.2. Model COPERT

COPERT (*COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport*) jest modelem stworzonym na zlecenie Europejskiej Agencji Środowiska (EEA) przez firmę EMISIA [47] do szacowania emisji zanieczyszczeń powietrza z transportu drogowego w Europie. Model COPERT jest stale rozwijany i obecnie jest dostępna już wersja 5.6.5 (kwiecień 2023 r.). Metodyka zastosowana w modelu jest zgodna z wytycznymi do szacowania emisji zanieczyszczeń powietrza *EMEP/EEA Inventory Guidebook* [52] oraz wytycznymi do szacowania gazów cieplarnianych *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [1]. Model ten został szczerzej opisany w rozdziale 6.

Charakterystyka wybranych podstawowych wielkości modelu jest następująca:

- Dane wejściowe:
 - liczność pojazdów kategorii elementarnych (każda kategoria elementarna uwzględnia m.in. rodzaj pojazdu, rodzaj stosowanego paliwa, masę pojazdu, poziom techniczny pojazdu ze względu na emisję zanieczyszczeń oraz jego wiek),
 - przebiegi roczne pojazdów kategorii elementarnych,
 - udziały długości drogi przebywanej przez pojazdy kategorii elementarnych w modelowych warunkach ruchu (w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych) w całkowitej długości drogi we wszystkich warunkach ruchu,
 - prędkość średnia pojazdów kategorii w modelowych warunkach ruchu,
 - długość drogi przebywanej przez pojazdy po uruchomieniu pojazdów z silnikami nienagrzanymi do ustabilizowanej temperatury,
 - dane dotyczące parowania benzyny,

- współczynniki nachylenia drogi, obciążenia, klimatyzacji i systemów zmniejszania emisji zanieczyszczeń w spalinach,
- emisja drogowa zanieczyszczeń (dostępna w programie jako funkcja prędkości średniej).
- Emisja drogowa zanieczyszczeń powietrza jest wyznaczana na podstawie wyników badań empirycznych i danych literaturowych.
- Uzyskane wyniki są następujące:
 - emisja roczna zanieczyszczeń obejmujące: tlenki azotu – NO_x, tlenki siarki – SO_x, pyły (ze spalania oraz ze ścierania), lotne związki organiczne – LZO, tlenek węgla – CO, dwutlenek węgla – CO₂, metan – CH₄, metale ciężkie, trwałe zanieczyszczenia organiczne,
 - emisja roczna zanieczyszczeń w podziale na emisję tzw. „zimną” (dla rozruchu nienagranego silnika), emisję tzw. „gorącą” (dla rozruchu nagranego silnika) i emisję całkowitą oraz w podziale na warunki drogowe dla każdej z kategorii elementarnej pojazdów.

4.3. Model HBEFA INFRAS AG

HBEFA (*Handbook Emission Factors for Road Transport*) INFRAS AG (*Infrastruktur-, Umwelt- und Wirtschaftsberatung Aktiengesellschaft*) [60] to model stworzony przez program Transportu i Ochrony Środowiska Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ (UNECE) do szacowania emisji zanieczyszczeń środowiska z transportu drogowego. W lutym 2022 r. zaktualizowano model do wersji 4.2.

Model uwzględnia podobne dane wejściowe jak opisany wyżej model COPERT.

Uwzględnia następujące kategorie pojazdów:

- samochody osobowe,
- lekkie pojazdy ciężarowe i mikrobusy (o masie maksymalnej mniejszej od 3,5 Mg),
- pojazdy ciężarowe (o masie maksymalnej większej od 3,5 Mg),
- autobusy dalekobieżne i autobusy miejskie,
- motocykle.

Ponadto pojazdy są podzielone ze względu na rodzaj stosowanego paliwa oraz poziom techniczny pojazdów ze względu na emisję zanieczyszczeń (normy Euro). Model HBEFA INFRAS podobnie jak model COPERT uwzględnia warunki drogowe i styl jazdy, emisję

zanieczyszczeń w stanie pracy silnika nienagrzanego do ustabilizowanej temperatury, emisję zanieczyszczeń z parowania oraz ze źródeł trybologicznych.

Jednak modele te mogą się różnić w niektórych szczegółach dotyczących modelowania emisji zanieczyszczeń. Szczegóły dotyczące programu można znaleźć w dokumentacji [60].

Emisja drogowa zanieczyszczeń zastosowana w modelu, podobnie jak w modelu COPERT są oparte zarówno na wynikach badań empirycznych jak i danych literaturowych.

Model HBEFA INFRAS umożliwia wyznaczenie emisji następujących zanieczyszczeń środowiska z układu wylotowego pojazdów:

- tlenek węgla – CO,
- węglowodory – HC,
- tlenki azotu sprowadzone do dwutlenku azotu – NO_x,
- cząstki stałe – PM (frakcji o średnicy aerodynamicznej mniejszej niż 10 μm jako ekwiwalent PM10),
- całkowity dwutlenek węgla – CO₂-total (zgodnie z założeniem, że węgiel w paliwie jest całkowicie utleniony do dwutlenku węgla),
- dwutlenek węgla raportowany –CO₂-rep (bierze pod uwagę tylko „kopalną” część paliwa bez udziału biopaliw),
- ekwiwalent dwutlenku węgla – CO_{2e} (zawiera kombinację liniową emisji dwutlenku węgla, metanu i podtlenku i ich wskaźników GWP – Global Warming Potential),
- ołów – Pb,
- dwutlenek siarki – SO₂,
- metan – CH₄,
- niemetanowe lotne związki organiczne – NMLZO (ang. *non-methane volatile organic compounds* – NMVOC) ,
- benzen, toluen, ksyleny,
- podtlenek azotu – N₂O,
- amoniak – NH₃,
- dwutlenek azotu – NO₂,
- liczba cząstek stałych,
- sadza – BC.

Ponadto ze źródeł trybologicznych wyznacza emisję cząstek stałych PM10 i sadzy – BC.

Model HBEFA INFRAS umożliwia wyznaczenie emisji mniejszej liczby zanieczyszczeń, np. tylko emisja ołowiu jest wyznaczana w wypadku metali ciężkich, podczas gdy model COPERT podaje emisję dziewięciu zanieczyszczeń z tej grupy.

4.4. Model GAINS

Model GAINS (*Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies*) [59, 91 – 93] to model opracowany w 2006 r. przez Międzynarodowy Instytut Analizy Systemów Stosowanych (IIASA) w Austrii i służy głównie do analizy strategii zmniejszania emisji zanieczyszczeń środowiska. Model GAINS jest używany do analiz polityki w ramach Konwencji w sprawie transgranicznego zanieczyszczenia powietrza na dalekie odległości (CLRTAP), np. do rewizji protokołu z Göteborga oraz przez Komisję Europejską do celów strategii tematycznej UE w sprawie zanieczyszczenia powietrza i przeglądu polityki dotyczącej powietrza. Pierwotnie model nosił nazwę RAINS (*Regional Air Pollution Information and Simulation*), ale na potrzeby negocjacji w ramach Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (UNFCCC) opracowano specjalną wersję uwzględniającą również gazy cieplarniane i zmieniono nazwę na GAINS [59, 91 – 93]. Model pozwala na szacowanie skutków środowiskowych oraz kosztów dla całościowych strategii zmniejszania emisji zanieczyszczeń nie tylko z sektora transportu drogowego, ale również innych źródeł, np.: transport pozadrogowy, rolnictwo, odpady, sektory energetyczne w tym przemysł i gospodarstwa domowe [91 – 93]. W zakresie prognoz zużycia energii model korzysta z danych z modelu PRIMES. Emisja zanieczyszczeń jest szacowana dla następujących zanieczyszczeń:

- amoniak – NH_3 ,
- tlenki azotu – NO_x ,
- pyły – TSP, PM10, PM2.5, PM1,
- dwutlenek siarki – SO_2 ,
- lotne związki organiczne – LZO,
- dwutlenek węgla – CO_2 ,
- metan – CH_4 ,
- podtlenek azotu – N_2O ,
- gazy fluorowane – HFCs, PFCs, SF6.

Emisja zanieczyszczeń z transportu drogowego jest szacowana na podstawie tzw. wielkości aktywności, tj. zużycia paliw, liczby pojazdów danego typu i przebiegu rocznego pojazdów

oraz wielkości intensywnej – charakterystyki emisji dla danej substancji. Na podstawie wartości emisji zanieczyszczeń i ich rozkładu przestrzennego są szacowane stężenia zanieczyszczeń w powietrzu, a następnie wpływ tych zanieczyszczeń na zdrowie organizmów żywych i na ekosystem.

Charakterystyki emisji zanieczyszczeń zostały przygotowane tak, aby uwzględniały różnice wynikające z warunków występujących w różnych krajach. Zebrano informacje dotyczących poszczególnych krajów w celu ilościowej oceny takich uzasadnionych odchyleń od wartości podanych w literaturze ogólnej. Gdy nie było to możliwe zastosowano charakterystyki emisji zanieczyszczeń z literatury [93].

Pojazdy w transporcie drogowym dzielą się na następujące kategorie:

- motocykle, motorowery i samochody z silnikami dwusuwowymi,
- motocykle i motorowery z silnikami czterosuwowymi,
- samochody osobowe i małe autobusy z silnikami czterosuwowymi,
- lekkie samochody ciężarowe z silnikami czterosuwowymi,
- autobusy ciężarowe,
- ciężkie samochody ciężarowe.

Dla każdego typu pojazdu model GAINS potrzebuje informacji o całkowitym rocznym zużyciu paliwa według rodzaju paliwa, rocznych przebiegów oraz liczby pojazdów.

4.5. Model MOVES

MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator*) jest modelem opracowanym przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych Ameryki (EPA – *Environmental Protection Agency*) [54, 55, 68, 70] do szacowania emisji zanieczyszczeń środowiska z transportu drogowego oraz maszyn pozadrogowych. W styczniu 2021 r. ukazała się wersja modelu MOVES3 [54, 68, 70]. Model jest przystosowany do szacowania emisji zanieczyszczeń na obszarze Stanów Zjednoczonych Ameryki. Model MOVES uwzględnia różne czynniki wpływające na emisję zanieczyszczeń z transportu drogowego, takie jak dane dotyczące zbioru pojazdów (rodzaj i poziom techniczny ze względu na emisję zanieczyszczeń), rodzaj paliwa, lokalizacje dróg, rodzaje ruchu i inne parametry techniczne. Dane dotyczące zbioru pojazdów mają poziom szczegółowości zbliżony do danych z modelu COPERT. W wyniku pracy modelu otrzymujemy wartości emisji wszystkich podstawowych zanieczyszczeń powietrza.

4.6. Model PRIMES-TREMOVE

Model PRIMES-TREMOVE (Price-Induced Market Equilibrium System – Transport & Mobility Leuven) [75] jest kompleksowym modelem transportu i środowiska opracowanym przez E3MLab (*Energy Economy Environment Modeling Laboratory*) na Uniwersytecie Technicznym w Atenach jako jeden z modułów modelu PRIMES. Model łączy aspekty związane z transportem drogowym, emisją zanieczyszczeń środowiska i kosztami, umożliwiając również szacowanie wpływu działań podejmowanych w sektorze transportu na stan jakości powietrza w krajach Unii Europejskiej i wybranych krajach EFTA (*European Free Trade Association – Europejskie Stowarzyszenie Wolnego Handlu*) [83]. Model jest dostosowany do obliczeń dla wybranych lat historycznych (2005, 2010 i 2015), ale jego głównym zadaniem są symulacje do 2070 r., w odstępach 5-letnich.

Model PRIMES-TREMOVE uwzględnia szeroki zakres czynników wpływających na emisję zanieczyszczeń z transportu drogowego, takich jak rodzaj pojazdu, rodzaj paliwa, zużycie paliwa (obliczane w oparciu o metodykę modelu COPERT), warunki drogowe, styl jazdy, politykę transportową, dostępność infrastruktury, poziom techniczny pojazdów ze względu na emisję zanieczyszczeń i wiele innych danych, np. dane gospodarcze, dane o infrastrukturze drogowej, prognozy demograficzne, politykę transportową. Model uwzględnia również specyficzne czynniki i uwarunkowania dla poszczególnych krajów europejskich.

W wyniku badania modelu otrzymujemy m.in. prognozy: emisji dwutlenku węgla, tlenku węgla, tlenków azotu, cząstek stałych PM2.5 i dwutlenku azotu, zapotrzebowania na energię, kosztów inwestycji, wymiany zbioru pojazdów oraz wpływu na koszty zewnętrzne zanieczyszczenia środowiska, zatorów komunikacyjnych, hałasu i wypadków.

4.7. Model VECTO

VECTO (*Vehicle Energy Consumption calculation Tool*) [98, 99] to narzędzie stworzone przez Komisję Europejską w celu wspierania monitorowania emisji dwutlenku węgla z pojazdów ciężarowych w Europie. Jego stosowanie jest obowiązkowe w Europie do certyfikacji pojazdów ciężarowych w zakresie emisji dwutlenku węgla zgodnie z rozporządzeniem Komisji Europejskiej z dnia 12 grudnia 2017 r. (2017/2400/UE). Model VECTO może być wykorzystywany w badaniach oceny wpływu określonych rozwiązań technicznych na zużycie paliwa i emisję dwutlenku węgla oraz formułowaniu i analizie przyszłych scenariuszy politycznych.

Model przeznaczony wyłącznie do pojazdów ciężarowych i emisji dwutlenku węgla.

4.8. Model CO2MPAS

Model CO2MPAS (*Comparison of measured and simulated CO2*) [67, 101] to narzędzie stworzone przez Komisję Europejską do obliczania emisji dwutlenku węgla, zużycia energii i paliwa przez samochody osobowe i lekkie samochody ciężarowe. Wykorzystuje dane uzyskane z hamowni podwoziowej lub testów drogowych do symulacji działania pojazdów w różnych warunkach eksploatacji. Podstawowym zastosowaniem przewidzianym dla tego modelu jest skorelowanie emisji dwutlenku węgla do celów homologacji, wyznaczonej dla lekkich pojazdów ciężarowych zgodnie z procedurą badania WLTP określoną w rozporządzeniu Komisji 2017/1151, z emisją dwutlenku węgla wyznaczoną zgodnie ze starą procedurą badania NEDC określoną w Rozporządzenie Komisji (WE) nr 692/2008. Model przeznaczony wyłącznie do lekkich pojazdów ciężarowych i emisji dwutlenku węgla.

4.9. Model SULTAN

SULTAN (*SUstainabLe TrANsport*) [86, 87] to model opracowany na zlecenie Komisji Europejskiej przez Ricardo Energy & Environment, który umożliwia opracowywanie i testowanie szerokiego zakresu polityk transportowych, oceniając ich wpływ głównie na emisję gazów cieplarnianych, a także na wybrane zanieczyszczenia (cząstki stałe i tlenki azotu) związane z jakością powietrza w skali Unii Europejskiej oraz poszczególnych krajów.

4.10. Model SIBYL

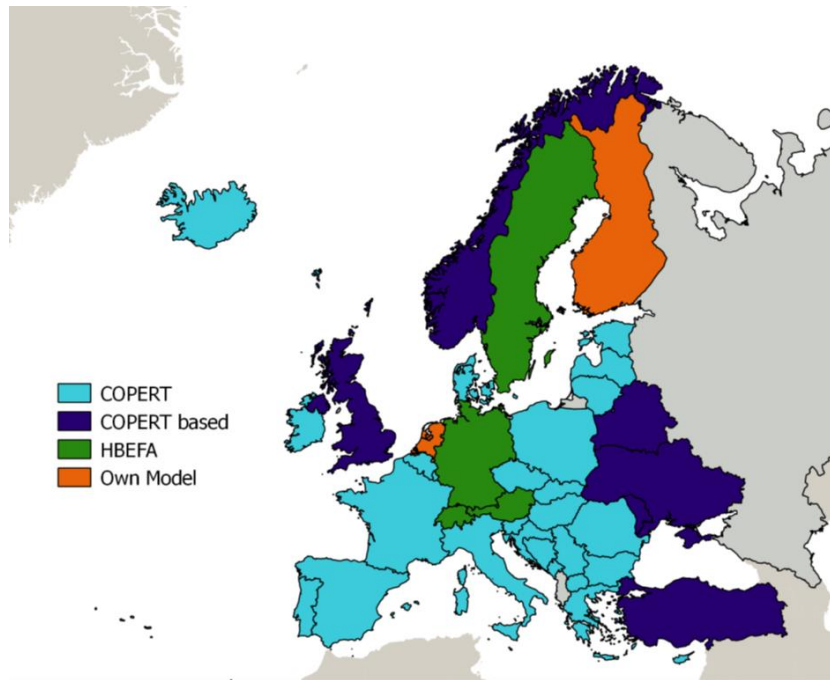
SIBYL (*Vehicle Stock, Air Pollutants, and GHG Projection Policy Evaluation Tool*) [80, 81] jest modelem stworzonym przez firmę EMISIA z Salonik. Jest to narzędzie do prognozowania rozwoju zbioru pojazdów, zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń, a także oceny scenariuszy w transporcie drogowym dla krajów europejskich. EMISIA niedawno przeprojektowała linię bazową SIBYL, która jest teraz zbiorem danych zgodnym z oprogramowaniem COPERT. Baza SIBYL zapewnia historyczne i prognozowane dane dotyczące zbioru pojazdów, emisji zanieczyszczeń i zużycia energii dla całego okresu 1990 – 2050. Model SIBYL wykorzystuje charakterystyki emisji zanieczyszczeń z najnowszej wersji COPERT, ale lista pojazdów została rozwinięta w taki sposób, aby uwzględniała wszystkie alternatywne układy napędowe. Model SIBYL ma w sumie 760

różnych kategorii pojazdów z transportu drogowego. Model zapewnia prognozy scenariuszy dla 37 różnych krajów europejskich, a jako dane wyjściowe dostarcza szczegółowych informacji na temat zbioru pojazdów, emisji zanieczyszczeń środowiska oraz zapotrzebowania na energię dla wszystkich lat w scenariuszu.

4.11. Podsumowanie przeglądu modeli emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego

Na rynku istnieje wiele różnych modeli do szacowania emisji zanieczyszczeń środowiska zarówno przeznaczonych dla sektora transportu drogowego, jak i dla innych sektorów transportu. Różnią się też cele do, których zostały opracowane poszczególne metody oraz obszary stosowania.

Do celów inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń powietrza najodpowiedniejszymi modelami są COPERT i HBEFA INFRAS, które są przeznaczone właśnie dla sektora transportu drogowego i mają najszerszy zakres analizowanych zanieczyszczeń powietrza. Modele COPERT i HBEFA INFRAS są wykorzystywane przez większość krajów europejskich głównie do celów związanych z inwentaryzacją emisji zanieczyszczeń środowiska na potrzeby raportowania do Unii Europejskiej oraz Konwencji Klimatycznej (rysunek 4.1).



Rys. 4.1. Wykorzystanie modeli do szacowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego w krajach europejskich [47, 48]

Modele różnią się pod względem metodyki. COPERT uwzględnia wiele czynników, takich jak typy pojazdów, rodzaje paliw, warunki drogowe, styl jazdy i inne czynniki wpływające na emisję zanieczyszczeń. Model HBEFA INFRAS opiera się na empirycznych czynnikach emisji zanieczyszczeń, które są oparte na wynikach badań drogowych i badań laboratoryjnych. Niemniej w niektórych przypadkach modele korzystają wzajemnie ze swoich danych np. charakterystyki emisji podtlenku azotu i amoniaku w HBEFA INFRAS zostały oparte na charakterystykach z modelu COPERT, również metodyka szacowania emisji związków organicznych z parowania jest przyjęta z modelu COPERT. Natomiast model COPERT korzysta z niektórych danych HBEFA INFRAS, np. współczynniki zmniejszania emisji zanieczyszczeń dla pojazdów z silnikami o zapłonie samoczynnym Euro 5 opracowano zgodnie z HBEFA INFRAS 4.2, z uwzględnieniem kombinacji sytuacji w ruchu miejskim i pozamiejskim w HBEFA INFRAS.

Oba modele mają swoje zalety i ograniczenia, a ich wybór zależy od konkretnych potrzeb, dostępności danych i preferencji użytkownika.

5. Problem badawczy rozprawy

5.1. Cel rozprawy

Problem badawczy rozprawy jest następujący: badanie emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych w zależności od ich właściwości oraz sposobów ich użytkowania.

Właściwości pojazdów drogowych są charakteryzowane przez:

- umowną wielkość,
- właściwości ze względu na oddziaływanie na środowisko.

Sposób użytkowania pojazdów drogowych jest opisany charakterem ich ruchu.

Celem rozprawy jest wykorzystanie procedur stosowanych w oficjalnej inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego do badania modelu tej emisji ze względu na dane wejściowe i parametry modelu. Dane wejściowe charakteryzują strukturę pojazdów drogowych ze względu na licznosc i intensywnosc użytkowania pojazdów elementarnych kategorii. Podstawowe parametry modelu dotyczą charakteru ruchu pojazdów drogowych. Charakter ruchu pojazdów drogowych elementarnych kategorii jest określony przez dwie wielkości. Pierwszą wielkością jest udział długości drogi przebywanej w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach bez uwzględnienia zatorów ulicznych, poza miastami oraz na autostradach i drogach szybkiego ruchu w całkowitej długości przebywanej drogi. Drugą wielkością jest wartość średnia prędkości pojazdów drogowych elementarnych kategorii w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach bez uwzględnienia zatorów ulicznych, poza miastami oraz na autostradach i drogach szybkiego ruchu.

5.2. Teza rozprawy

Na podstawie analizy rozpatrywanej problematyki sformułowano podstawową tezę rozprawy o następującej treści:

Istnieje możliwość wykorzystania procedur stosowanych w oficjalnej inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego do badania modelu tej emisji ze względu na dane wejściowe i parametry modelu, charakteryzujące strukturę, intensywność i sposób użytkowania pojazdów drogowych.

Tezą dodatkową rozprawy jest sąd:

Wartość średnia prędkości pojazdów jest skuteczną charakterystyką zerowymiarową prędkości do oceny właściwości ruchu pojazdów w zadaniu inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.

5.3. Zadania badawcze rozprawy

Aby zrealizować cel rozprawy oraz udowodnić tezy pracy, sformułowano następujące zadania badawcze:

1. Usystematyzowanie problemów modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.
2. Usystematyzowanie problemów identyfikacji modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.
3. Badania modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego ze względu na wielkości wejściowe modelu w Polsce w latach 2000 – 2020:
 - licznosc pojazdów drogowych kategorii skumulowanych,
 - intensywnosc użytkowania pojazdów drogowych kategorii skumulowanych.
4. Badania modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego ze względu na parametry modelu.
 - 4.1. Modelowanie charakteru ruchu pojazdów drogowych.
 - 4.2. Badania wrażliwości modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego na modelowe warunki ruchu pojazdów.

Zakres modelowania wykorzystywany w rozprawie jest następujący:

1. Modelowanie struktury pojazdów drogowych kategorii elementarnych i skumulowanych ze względu na wielkości i właściwości pojazdów:
 - modelowanie licznosci pojazdów drogowych kategorii elementarnych i skumulowanych ze względu na wielkości i właściwości pojazdów.
 - modelowanie przebiegów rocznych pojazdów drogowych kategorii elementarnych i skumulowanych ze względu na wielkości i właściwości pojazdów.
2. Modelowanie charakteru ruchu pojazdów drogowych kategorii elementarnych i skumulowanych:

- modelowanie prędkości średniej pojazdów drogowych kategorii skumulowanych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych,
 - modelowanie udziałów długości dróg przebywanych przez pojazdy kategorii skumulowanych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.
3. Bilansowanie zużycia paliw i energii przez pojazdy drogowe elementarnych i skumulowanych kategorii ze względu wielkości i właściwości pojazdów w celu skalowania przebiegów rocznych pojazdów drogowych.

6. Usystematyzowanie problemów modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego

Oprogramowanie COPERT jest stosowane do wyznaczania średniej emisji rocznej zanieczyszczeń z pojazdów drogowych [47, 48].

Identyfikacji modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego z wykorzystaniem oprogramowania COPERT podlegają następujące wielkości:

- licznosc pojazdów kategorii elementarnych,
- przebiegi roczne pojazdów kategorii elementarnych,
- udziały długości drogi przebywanej przez pojazdy kategorii elementarnych w modelowych warunkach ruchu (w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami, na autostradach i drogach szybkiego ruchu) w przebiegach rocznych pojazdów kategorii elementarnych,
- prędkość średnia pojazdów kategorii w modelowych warunkach ruchu,
- średnia długość drogi przebywanej przez pojazdy po uruchomieniu pojazdów z silnikami nienagrzanymi do stabilnej temperatury,
- średni czas trwania podróży przez pojazdy po uruchomieniu pojazdów z silnikami nienagrzanymi do stabilnej temperatury,
- ekstremalne temperatury w poszczególnych miesiącach,
- średnia wilgotność powietrza w poszczególnych miesiącach,
- średnia pojemność zbiornika paliwa pojazdów kategorii elementarnych,
- średnia pojemność pochłaniacza par paliwa pojazdów kategorii elementarnych,
- średni udział liczby pojazdów kategorii elementarnych z silnikami z wtryskowym układem zasilania w liczbie wszystkich pojazdów kategorii elementarnych,
- średni udział liczby pojazdów kategorii elementarnych z silnikami ze szczelnymi układami zasilania w liczbie wszystkich pojazdów kategorii elementarnych,
- średnie obciążenie pojazdów kategorii elementarnych w modelowych warunkach ruchu,
- średnie nachylenie dróg w modelowych warunkach ruchu pojazdów kategorii elementarnych,
- liczba osi pojazdów w pojazdach ciężarowych dla każdej kategorii elementarnej z tej grupy pojazdów,
- średni udział liczby pojazdów kategorii elementarnych z klimatyzacją,

- średni udział długości drogi przebywanej przez pojazdy kategorii elementarnych z włączoną klimatyzacją,
- średnie udziały zużycia różnych rodzajów energii przez pojazdy kategorii elementarnych o podwójnych systemach zasilania (np. pojazdy z napędami hybrydowymi, z zasilaniem benzyną i skroplonym gazem ropopochodnym, z silnikami dwupaliwowymi typu *bifuel* – zasilanymi mieszaniną benzyny i paliwa etanolowego E85),
- właściwości fizykochemiczne paliw, m.in. gęstość, prężność par wg Reida, zawartość pierwiastków (wodór, węgiel, tlen, ołów, kadm, miedź, chrom, nikiel, selen, cynk, rtęć, arsen),
- całkowite zużycie poszczególnych rodzajów paliw oraz całkowite zużycie energii.

Jako kryteria kategorii elementarnych przyjmuje się następujące dane [47, 48]:

- zastosowanie pojazdu drogowego,
- umowna wielkość pojazdu drogowego,
- kategoria ekologiczna ze względu na emisję zanieczyszczeń,
- obieg silnika,
- rodzaj paliwa,
- rodzaj silnika i układu napędowego.

Ze względu na zastosowanie pojazdu drogowego wyróżnia się: samochody osobowe, lekkie samochody ciężarowe, samochody ciężarowe z podziałem na ciągniki drogowe z naczepami i samochody ciężarowe skrzyniowe, autobusy miejskie, autobusy dalekobieżne, motocykle i pojazdy kategorii L (motorowery, mikrosamochody i quady).

Kryterium oceny umownej wielkości pojazdu jest [47, 48]:

- dla pojazdów lekkich: samochodów osobowych, lekkich samochodów ciężarowych, motocykli i pojazdów kategorii L – objętość skokowa silnika,
- dla pojazdów ciężkich: samochodów ciężkich, autobusów miejskich i autobusów dalekobieżnych – masa maksymalna pojazdu.

Kategorie ekologiczne ze względu na emisję zanieczyszczeń to [47 – 49, 102, 103]:

- dla pojazdów lekkich: Conventional (Pre Euro, ECE 15/00-01 – ECE15/04), Euro 1 – Euro 6 a/b/c, Euro 6 d-temp, Euro 6 d,
- dla pojazdów ciężkich: Conventional, Euro I – Euro VI, Euro VI A – Euro VI E.

Ze względu na obieg silnik jest stosowana klasyfikacja: silniki dwusuwowe i silniki czterosuwowe.

Rodzaje paliwa są następujące [47, 48]: benzyna, olej napędowy, skroplony gaz ropopochodny, paliwo etanolowe E85, gaz ziemny i estry olejów biologicznych.

Ze względu na rodzaj silnika i układu napędowego wyróżnia się:

- samochody z silnikami spalinowymi,
- samochody z napędami hybrydowymi (z napędami spalinowo-elektrycznymi) oraz samochody z napędami hybrydowymi z zewnętrznym ładowaniem akumulatorów elektrochemicznych (układ *plug-in*).

Oryginalną klasyfikację kategorii elementarnych w oprogramowaniu COPERT przedstawiono w tabeli 6.1 [47, 48].

Tabela 6.1. Oryginalna klasyfikacja kategorii elementarnych w oprogramowaniu COPERT

Kategoria pojazdu	Rodzaj silnika i układu napędowego	Objętość skokowa silnika – V_{ss} Masa maksymalna pojazdu m_{Max}	Kategorie ekologiczne
Samochody osobowe	Silniki o zapłonie iskrowym	Mini	Euro 4 ÷ Euro 6
		Small Medium	PRE ECE, EKG 15/00 – 01, EKG 15/02, EKG 15/03, EKG 15/04, Improved Conventional, Open Loop, Euro 1 ÷ Euro 6
		Large – SUV Executive	PRE ECE, EKG 15/00 ÷ 01, EKG 15/02, EKG 15/03, EKG 15/04, Euro 1 ÷ Euro 6
	Silniki o zapłonie iskrowym dwusuwowe		Conventional
	Napęd hybrydowy	Mini	Euro 4 ÷ Euro 6
		Small, Medium, Large – SUV Executive	PRE ECE, EKG 15/00 ÷ 01, EKG 15/02, EKG 15/03, EKG 15/04, Euro 1 ÷ Euro 6

	Silniki o zapłonie iskrowym. Napędy hybrydowe (PHEV)	Small, Medium, Large – SUV Executive	Euro 6
	Silniki o zapłonie samoczynnym	Mini	Euro 4 ÷ Euro 6
		Small, Medium, Large – SUV Executive	Conventional, Euro 1 ÷ Euro 6
	Silniki o zapłonie samoczynnym. Napędy hybrydowe (PHEV)	Small, Medium, Large – SUV Executive	Euro 6
	LPG Bifuel	Mini, Small, Medium, Large – SUV Executive	Euro 4 ÷ Euro 6
	CNG Bifuel	Mini, Small, Medium, Large – SUV Executive	Euro 4 ÷ Euro 6
	Silniki elektryczne	Small, Medium, Large – SUV Executive	Euro 6
Lekkie samochody ciężarowe	Silniki o zapłonie iskrowym	N1-I, N1-II, N1-III	Conventional, Euro 1 ÷ Euro 6
	Silniki o zapłonie samoczynnym	N1-I, N1-II, N1-III	Conventional, Euro 1 ÷ Euro 6
Samochody ciężarowe	Silniki o zapłonie samoczynnym. Samochody skrzyniowe	$m_{Max} < 7,5 \text{ Mg}$, $m_{Max} = (7,7 \div 12) \text{ Mg}$, $m_{Max} = (12 \div 14) \text{ Mg}$, $m_{Max} = (14 \div 20) \text{ Mg}$, $m_{Max} = (20 \div 26) \text{ Mg}$, $m_{Max} = (26 \div 28) \text{ Mg}$, $m_{Max} = (28 \div 32) \text{ Mg}$, $m_{Max} > 32 \text{ Mg}$	Conventional, Euro I ÷ Euro VI
	Silniki o zapłonie samoczynnym. Ciągniki siodłowe	$m_{Max} = (14 \div 20) \text{ Mg}$, $m_{Max} = (20 \div 28) \text{ Mg}$, $m_{Max} = (28 \div 34) \text{ Mg}$, $m_{Max} = (34 \div 40) \text{ Mg}$, $m_{Max} = (40 \div 50) \text{ Mg}$, $m_{Max} = (50 \div 60) \text{ Mg}$	Conventional, Euro I ÷ Euro VI
Autobusy miejskie	Silniki o zapłonie samoczynnym	Mini $m_{Max} < 15 \text{ Mg}$, Standard $m_{Max} = (15 \div 18) \text{ Mg}$, Przegubowe $m_{Max} > 18 \text{ Mg}$	Conventional, Euro I ÷ Euro VI
	Silniki o zapłonie samoczynnym		Euro VI

	Pojazdy hybrydowe		
	CNG		Euro I ÷ Euro III, EEV
	Biodiesel	-	Conventional, Euro I ÷ Euro VI
Autobusy dalekobieżne	Silniki o zapłonie samoczynnym	Standard $m_{Max} < 18 \text{ Mg}$ Przegubowe $m_{Max} > 18 \text{ Mg}$	Conventional, Euro I ÷ Euro VI
Motorowery	Silniki o zapłonie iskrowym dwusuwowe	$V_{ss} < 50 \text{ cm}^3$	Conventional, Euro 1 ÷ Euro 5
	Silniki o zapłonie iskrowym czterosuwowe	$V_{ss} < 50 \text{ cm}^3$	Conventional, Euro 1 ÷ Euro 5
Motocykle	Silniki o zapłonie iskrowym dwusuwowe	$V_{ss} > 50 \text{ cm}^3$	Conventional, Euro 1 ÷ Euro 5
	Silniki o zapłonie iskrowym czterosuwowe	$V_{ss} < 250 \text{ cm}^3$, $V_{ss} = (250 \div 750) \text{ cm}^3$, $V_{ss} > 750 \text{ cm}^3$	Conventional, Euro 1 ÷ Euro 5
Quady i ATVs	Silniki o zapłonie iskrowym		Euro 1 ÷ Euro 5
Micro-car	Silniki o zapłonie samoczynnym		Euro 1 ÷ Euro 5

Liczność pojazdów kategorii elementarnych jest identyfikowana na podstawie danych statystycznych, przede wszystkim z Centralnej Ewidencji Pojazdów i Kierowców (CEPiK 2). Przebiegi roczne pojazdów kategorii elementarnych są identyfikowane na podstawie informacji z CEPIK 2 oraz z zakładów ubezpieczeniowych. Ponadto przebiegi pojazdów kategorii elementarnych są korygowane na podstawie bilansowania zużycia paliw i energii, które są przyjmowane zgodnie z danymi z Głównego Urzędu Statystycznego.

Ekstremalne temperatury powietrza oraz średnia wilgotność powietrza pochodzą z danych z Głównego Urzędu Statystycznego.

Właściwości fizykochemiczne paliw są przyjmowane na podstawie informacji uzyskanych od wytwórców paliw.

Największy problem stanowi identyfikacja prędkości średniej pojazdów kategorii elementarnych w modelowych warunkach ruchu oraz udziałów długości drogi przebywanej przez pojazdy kategorii elementarnych w modelowych warunkach ruchu w przebiegach rocznych pojazdów kategorii elementarnych [26, 31, 43].

Wartości te są szacowane na podstawie wiadomości o dużym stopniu niepewności. W celu wyznaczenia prędkości średniej w modelowych warunkach ruchu są wykorzystywane dane

dotyczące testów jezdnych, m.in. testu Stop and Go [30] do modelowania ruchu w zatorach ulicznych o prędkości średniej około 5,89 km/h, a do modelowania ruchu na autostradach i drogach ekspresowych – test Autobahn [30] o prędkości średniej 119,0 km/h. Również w wypadku ruchu pojazdów na autostradach i drogach ekspresowych rozrzut prędkości pojazdów nie jest duży, a ich prędkość średnia jest nieznacznie mniejsza od prędkości dopuszczalnej.

Największy problem stanowi identyfikacja udziałów długości drogi przebywanej przez pojazdy kategorii elementarnych w modelowych warunkach ruchu w przebiegach rocznych pojazdów kategorii elementarnych. W tym wypadku praktycznie brak jest informacji na ten temat. W takiej sytuacji jest tylko możliwość wzorowania się na danych z inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego z innych państw na podstawie upublicznionych raportów.

Problem niepewności danych na temat prędkości średniej pojazdów kategorii elementarnych w modelowych warunkach ruchu oraz udziałów długości drogi przebywanej przez pojazdy kategorii elementarnych w modelowych warunkach ruchu w przebiegach rocznych pojazdów kategorii elementarnych ma poważne konsekwencje. Wynika to z faktu, że wrażliwość charakterystyk emisji zanieczyszczeń na prędkość średnią jest duża.

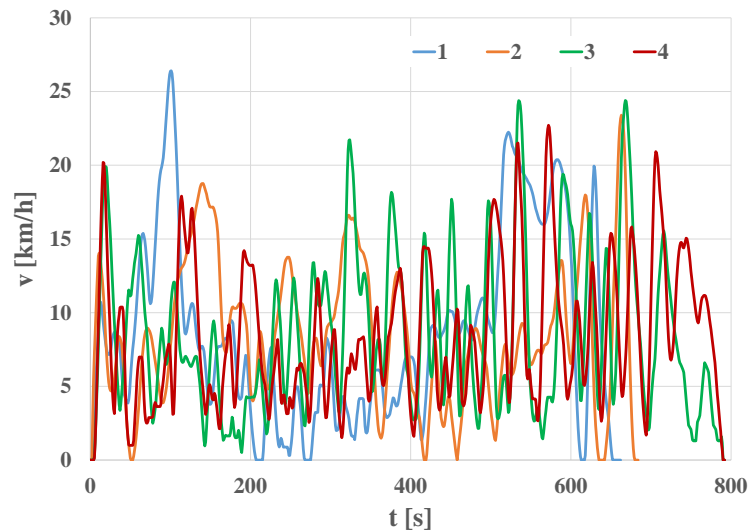
Identyfikacja prędkości średniej pojazdów kategorii elementarnych w modelowych warunkach ruchu oraz udziałów długości drogi przebywanej przez pojazdy kategorii elementarnych w modelowych warunkach ruchu w przebiegach rocznych pojazdów kategorii elementarnych wymaga przeprowadzenia rozbudowanej pracy badawczej, obejmującej nie tylko modelowanie ruchu pojazdów, ale również badania empiryczne szczególnie pracochłonne i kosztowne. Przykłady wyników takich badań samochodu osobowego znajdują się w publikacjach [4, 5, 8, 9, 33 – 35]. W badaniach tych przeprowadzono badania w modelowych warunkach ruchu. Wyznaczono testy w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami, na autostradach i drogach szybkiego ruchu w postaci realizacji procesów stochastycznych.

Do modelowania ruchu pojazdów można wykorzystać informacje m.in.:

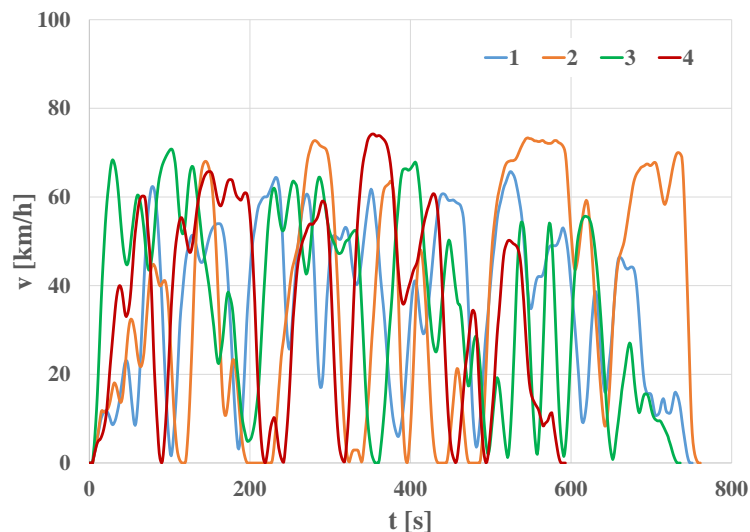
- np. na podstawie danych z programu Yanosik,
- z modelowania z wykorzystaniem oprogramowania PTV [10, 95, 96]:
 - PTV Visum do modelowania ruchu pojazdów w skali mezo,

– PTV Vissim do modelowania ruchu pojazdów w skali mikro.

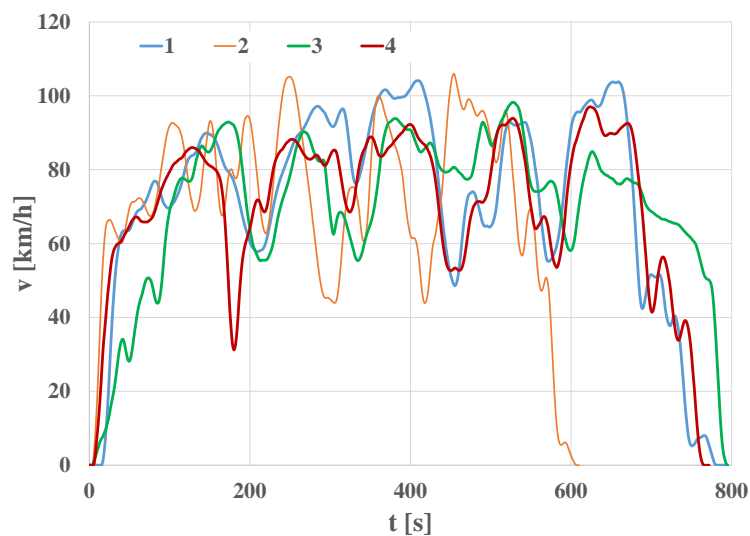
Na rysunkach 6.1 – 6.4 przedstawiono przebiegi prędkości w realizacjach procesów stochastycznych testów jezdnych. Badania przeprowadzono w ramach prac własnych w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji w 2012 r. Wyniki badań są przedstawione m.in. w [33 – 35].



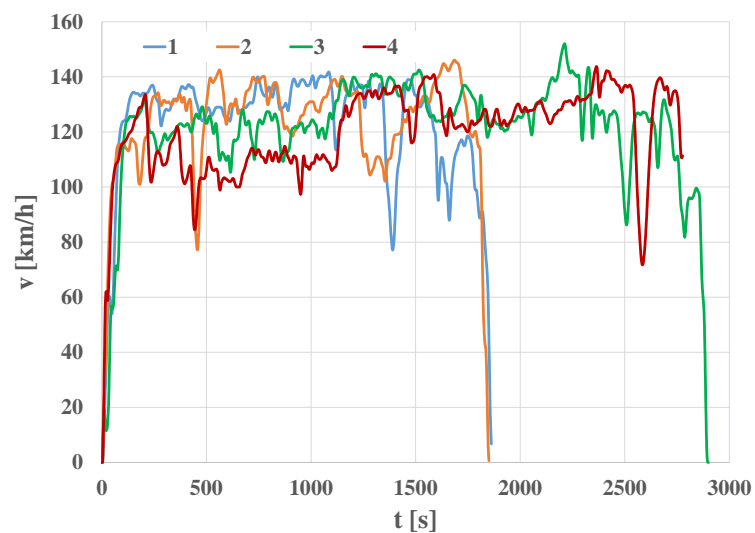
Rys. 6.1. Przebiegi prędkości w realizacjach procesów stochastycznych testu jezdnego w zatorach ulicznych



Rys. 6.2. Przebiegi prędkości w realizacjach procesów stochastycznych testu jezdnego w miastach poza zatorami ulicznymi



Rys. 6.3. Przebiegi prędkości w realizacjach procesów stochastycznych testu jezdnego poza miastami



Rys. 6.4. Przebiegi prędkości w realizacjach procesów stochastycznych testu jezdnego na autostradach i drogach szybkiego ruchu

Uzyskano wyniki prędkości średniej realizacji testów jezdnych są przedstawione w tabeli 6.2.

Tabela 6. 2. Prędkość średnia w realizacjach testów jezdnych

Pierwsza realizacja	Druga realizacja	Trzecia realizacja	Czwarta realizacja	V _{AV}
km/h				
Ruch w zatorach ulicznych				
8,59	8,51	8,54	8,45	8,52
Ruch w miastach poza zatorami ulicznymi				
36,0	36,0	36,0	36,0	36,0
Ruch poza miastami				
70,7	70,6	69,6	70,7	70,4
Ruch na autostradach i drogach szybkiego ruchu				
116,3	123,3	117,6	118,0	118,9

Do celów inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego trzeba przeprowadzić takie badania dla większej liczby pojazdów i, co najmniej, dla pojazdów kategorii skumulowanych:

- samochodów osobowych,
- lekkich samochodów ciężarowych,
- samochodów ciężarowych,
- autobusów miejskich,
- autobusów dalekobieżnych,
- pojazdów drogowych kategorii L:
 - motocykli,
 - motorowerów,
 - quadów,
 - mikrosamochodów.

Pozostałe dane do oprogramowania COPERT są przyjmowane na podstawie danych z raportów z inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego z innych państw. W większości wypadków wrażliwość emisji zanieczyszczeń na te dane jest niewielka, co wynika m.in. z wyników badań symulacyjnych.

7. Badania modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych

7.1. Charakterystyki emisji zanieczyszczeń stosowane w modelowaniu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego

W modelowaniu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego wykorzystuje się charakterystyki emisji zanieczyszczeń w postaci zależności emisji drogowej zanieczyszczeń od prędkości średniej pojazdów.

Emisja zanieczyszczeń jako proces jest zależna w sposób operatorowy od procesów stanu silnika spalinowego, zdeterminowanych przede wszystkim procesem prędkości pojazdu. W rozdziale trzecim jest zawarte usystematyzowanie problemów determinacji emisji zanieczyszczeń z silników i tworzenia testów jezdnych do badania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.

Przy opisie metody tworzenia testów jezdnych zgodnie z kryterium podobieństwa procesu prędkości w dziedzinie czasu wymieniono zerowymiarowe charakterystyki procesu prędkości. Są to m.in.: wartość średnia prędkości, wartości ekstremalne prędkości, wartość średniokwadratowa prędkości, wartości ekstremalne przyspieszeń, wartość średnia dodatniego przyspieszenia, wartość średnia ujemnego przyspieszenia, wartość średnia wartości bezwzględnej iloczynu prędkości i przyspieszenia. Są to wyniki badań procesu prędkości w dziedzinie czasu.

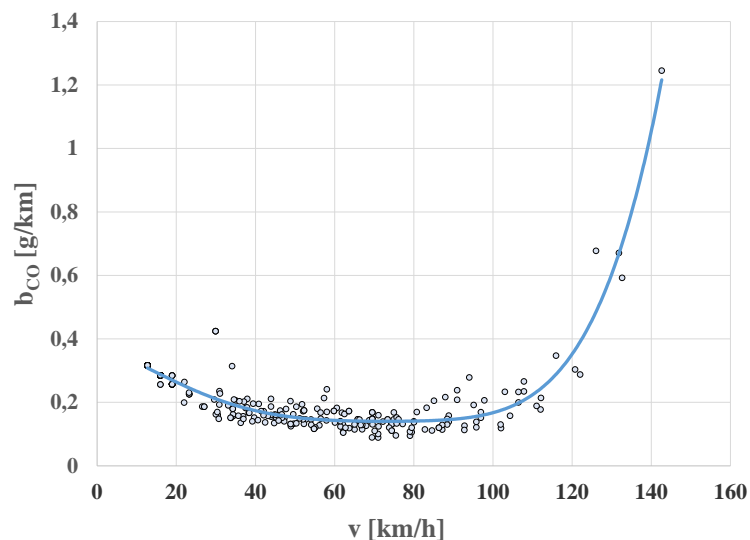
Proces prędkości można również badać w dziedzinie częstotliwości. Charakterystyką taką jest widmowa gęstość mocy [29, 44, 45, 71, 72].

Kolejnym rodzajem badań procesów jest ich badanie w dziedzinie wartości procesu. Takimi charakterystykami są: gęstość prawdopodobieństwa i histogram, liniowo od siebie zależne. Jest wiadome z wielu badań, że niestabilizowane stany pracy silników spalinowych sprzyjają zwiększonej emisji zanieczyszczeń, szczególnie tlenku węgla i związków organicznych. Niestabilizowane stany pracy silnika występują przy niestabilizowanym procesie prędkości, a silnie dynamiczny charakter procesu prędkości występuje przy małej prędkości średniej. W takim wypadku występuje częste hamowanie i przyspieszanie pojazdu. Dodatkowo zwiększonej emisji pyłów oraz tlenków azotu i tlenku węgla sprzyja duże obciążenie silnika, co występuje w wypadku dużej prędkości. Wynika z tych rozważań, że najprostsza charakterystyka zerowymiarowa procesu prędkości pojazdu – prędkość średnia może być uznana za skuteczną wielkość determinującą emisję zanieczyszczeń z silników spalinowych.

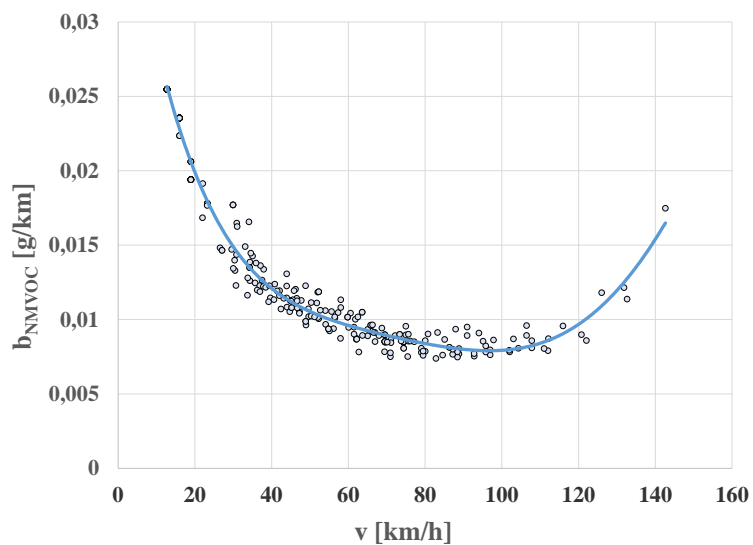
Właściwości dynamiczne procesów można też ocenić na podstawie charakterystyk w dziedzinie częstotliwości. Duża wartość widmowej gęstości mocy dla dużych wartości częstotliwości świadczy o silnych właściwościach dynamicznych procesów [44, 45]. Wykorzystanie jednak tej wiedzy do celów tworzenia charakterystyk emisji zanieczyszczeń jest mało skuteczne.

Najmniej skuteczne jest wykorzystanie do tworzenia charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych charakterystyk w dziedzinie wartości procesu prędkości pojazdu. Z tych powodów w modelach emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych są wykorzystywane zależności emisji drogowej zanieczyszczeń od prędkości średniej pojazdów. Tak jest m.in. w oprogramowaniach HBEFA INFRAS oraz COPERT.

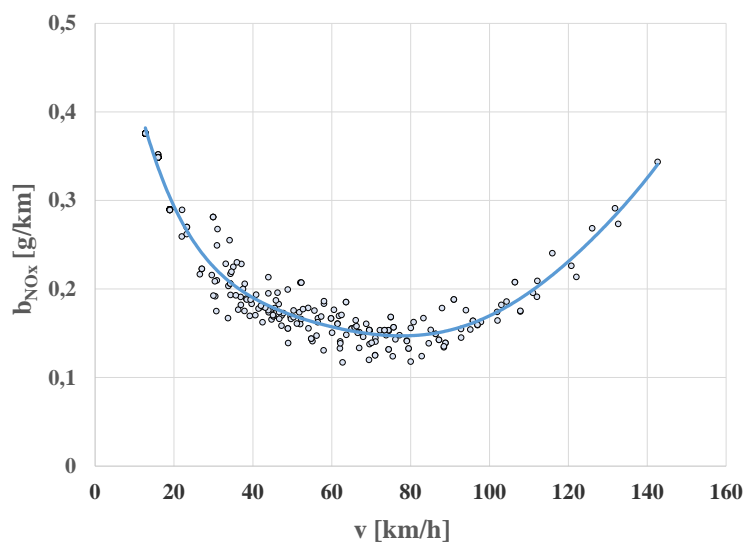
Na rysunkach 7.1 – 7.4 przedstawiono charakterystyki emisji drogowej zanieczyszczeń w zależności od prędkości średniej z kategorii skumulowanej samochodów osobowych w 2020 r. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania HBEFA INFRAS. Charakterystyki wyznaczono na podstawie dyskretnych wartości odpowiadających modelom ruchu w warunkach: w zatorach ulicznych (Cg), w miastach poza zatorami ulicznymi (U), poza miastami (R) oraz na autostradach i drogach ekspresowych (H). Zbiory punktów zostały aproksymowane funkcjami wielomianowymi stopnia piątego.



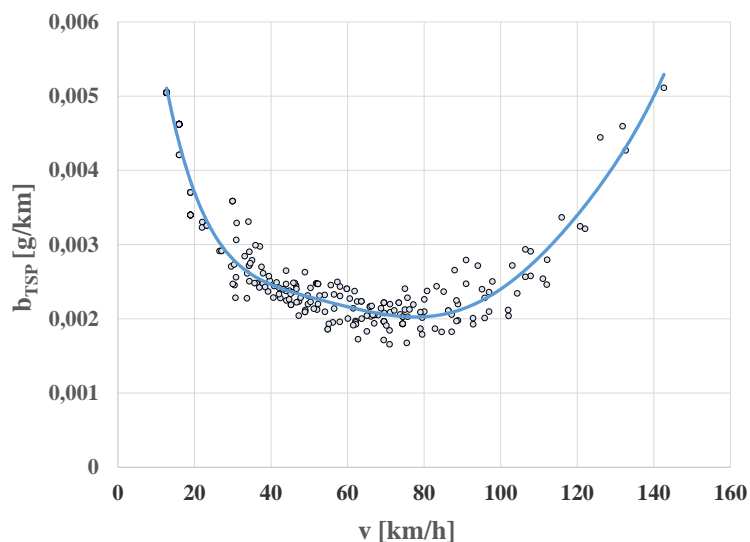
Rys. 7.1. Charakterystyka emisji drogowej tlenku węgla – b_{CO} w zależności od prędkości średniej – v z kategorii skumulowanej samochodów osobowych w 2020 r.



Rys. 7.2. Charakterystyka emisji drogowej niemetalanowych lotnych związków organicznych – b_{NMVOC} w zależności od prędkości średniej – v z kategorii skumulowanej samochodów osobowych w 2020 r.



Rys. 7.3. Charakterystyka emisji drogowej tlenków azotu – b_{NOx} w zależności od prędkości średniej – v z kategorii skumulowanej samochodów osobowych w 2020 r.



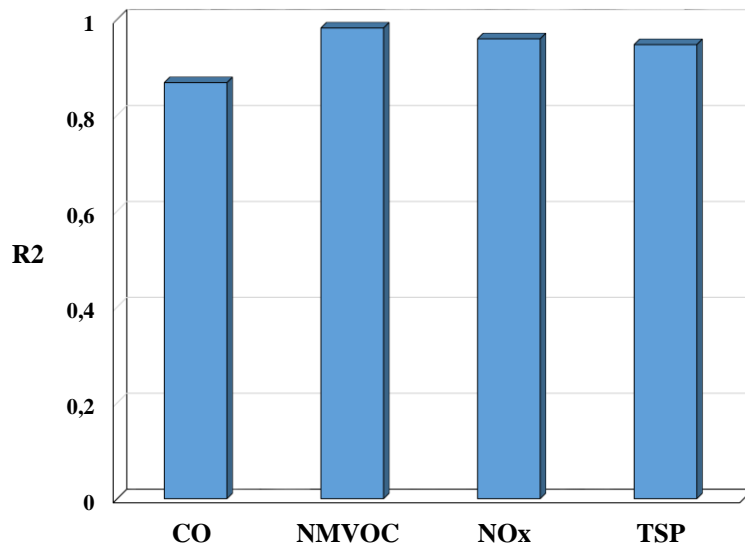
Rys. 7.4. Charakterystyka emisji drogowej cząstek stałych – b_{TSP} w zależności od prędkości średniej – v z kategorii skumulowanej samochodów osobowych w 2020 r.

W tabeli 7.1 przedstawiono współczynnik determinacji R-kwadrat dla aproksymacji zbiorów punktów funkcjami wielomianowymi.

Tab. 7.1 Współczynnik determinacji R-kwadrat dla aproksymacji zbiorów punktów funkcjami wielomianowymi

	R^2
CO	0,8676
NMVOG	0,9816
NO _x	0,9590
TSP	0,9469

Na rysunku 7.5 przedstawiono współczynnik determinacji R-kwadrat dla aproksymacji zbiorów punktów funkcjami wielomianowymi.



Rys. 7.5. Współczynnik determinacji R-kwadrat dla aproksymacji zbiorów punktów funkcjami wielomianowymi

Można ocenić, że współczynnik determinacji R-kwadrat dla aproksymacji zbiorów punktów funkcjami wielomianowymi ma dużą wartość: największą dla niemetanowych lotnych związków organicznych, najmniejszą dla tlenku węgla.

Charakterystyki emisji zanieczyszczeń z samochodowych silników spalinowych są wyznaczone na podstawie wyników badań empirycznych, prowadzonych na hamowni podwoziowej oraz w warunkach rzeczywistego użytkowania pojazdów. Charakterystyki emisji zanieczyszczeń wyznaczone na podstawie badań empirycznych mogą być tworzone dzięki badaniom tego samego egzemplarza pojazdu w wielu testach o różnych prędkościach średnich albo dzięki badaniom pojazdu w jednym teście i zastosowaniu metody Monte Carlo [46, 56, 66].

Formuły takich charakterystyk dla kategorii elementarnych pojazdów są zawarte w oprogramowaniu COPERT, co jest wykorzystywane w badaniach symulacyjnych w niniejszej rozprawie.

7.2. Zakres badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych

Z badaniami modeli emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych są związane:

- systematyka badań modeli emisji zanieczyszczeń z transportu [16, 17, 20, 22, 23, 25 – 27],
- badania procesów prędkości pojazdów oraz stanów pracy silników spalinowych w dziedzinach czasu [4, 6, 8, 9, 44, 45, 71, 72], częstości [4, 9, 44, 45, 71, 72] i wartości

procesów [4, 8, 9, 44, 45, 71, 72] a także badania właściwości statystycznych tych procesów [4, 8, 9, 44, 45, 64, 71, 72],

- badania procesów, charakteryzujących emisję zanieczyszczeń (przede wszystkim natężenia emisji zanieczyszczeń) w dziedzinach czasu [6 – 9, 44], częstości [44] i wartości procesów [44] a także właściwości statystycznych tych procesów [6 – 9, 44, 64],
- badania struktury pojazdów w modelu emisji zanieczyszczeń [12 – 14, 20, 24],
- badania trendów w krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń [11, 14, 19, 21, 22].

Badania modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych obejmują:

- badania ze względu na lata bilansowania [11, 14, 19, 21],
- badania ze względu na modelowe warunki ruchu pojazdów [12, 13, 16, 26, 27].

Badania modelu emisji zanieczyszczeń ze względu na lata bilansowania są wykonywane dla wszystkich kategorii skumulowanych pojazdów.

Z powodu bardzo dużej liczby kombinacji badań symulacje ze względu na wielkości wejściowe i parametry modelu są wykonywane dla samochodów osobowych dla 2020 r. oraz dla wybranych zanieczyszczeń:

- tlenku węgla – CO,
- niemetanowych lotnych związków organicznych – NMVOC,
- tlenków azotu, sprowadzonych do dwutlenku azotu – NO_x,
- całkowitego pyłu zawieszonego – TSP.

Wybór kategorii samochodów osobowych został podyktowany faktem, że emisja zanieczyszczeń jest najbardziej wrażliwa na stany pracy silników spalinowych dla samochodów osobowych.

Mimo że badania symulacyjne są wykonywane tylko dla samochodów osobowych, jest konieczne dostarczenie danych do wszystkich kategorii elementarnych – przede wszystkim ze względu na bilansowanie zużycia paliw i energii przez pojazdy drogowy.

Badania, których wyniki są przedstawione w podrozdziale 7.3, wykonano z wykorzystaniem oprogramowania COPERT [47, 48]. W niniejszym podrozdziale są przedstawione wielkości wejściowe i parametry modelu dla 2000 r. i 2020 r. – tabele 7.2 i 7.3,

Tab. 7.2. Wielkości wejściowe i parametry modelu dla 2000 r.

PC				LCV			
v _{Cg}	v _U	v _R	v _H	v _{Cg}	v _U	v _R	v _H
[km/h]				[km/h]			
6,0	31,5	70,0	110,0	6,0	29,5	65,0	100,0
u _{Cg}	u _U	u _R	u _H	u _{Cg}	u _U	u _R	u _H
0,12	0,30	0,44	0,14	0,12	0,25	0,50	0,13
HDT				UB			
v _{Cg}	v _U	v _R	v _H	v _{Cg}	v _U	v _R	v _H
[km/h]				[km/h]			
6,0	26,0	55,0	80,0	6,0	22,0		
u _{Cg}	u _U	u _R	u _H	u _{Cg}	u _U	u _R	u _H
0,08	0,10	0,70	0,12	0,30	0,70	0,00	0,00
C				Mc			
v _{Cg}	v _U	v _R	v _H	v _{Cg}	v _U	v _R	v _H
[km/h]				[km/h]			
6,0	26,0	55,0	80,0	20,0	45,0	75,0	110,0
u _{Cg}	u _U	u _R	u _H	u _{Cg}	u _U	u _R	u _H
0,08	0,10	0,70	0,12	0,05	0,30	0,50	0,15
Mp							
v _{Cg}	v _U	v _R	v _H				
[km/h]							
20,0	30,0	35,0					
u _{Cg}	u _U	u _R	u _H				
0,05	0,70	0,25	0,00				

Tab. 7.3. Wielkości wejściowe i parametry modelu dla 2020 r.

PC				LZV			
v _{Cg}	v _U	v _R	v _H	v _{Cg}	v _U	v _R	v _H
[km/h]				[km/h]			
6,0	35,0	75,0	115,0	6,0	32,0	70,0	105,0
u _{Cg}	u _U	u _R	u _H	u _{Cg}	u _U	u _R	u _H
0,12	0,30	0,40	0,18	0,12	0,25	0,47	0,16
HDT				UB			
v _{Cg}	v _U	v _R	v _H	v _{Cg}	v _U	v _R	v _H
[km/h]				[km/h]			
6,0	28,0	60,0	85,0	6,0	24,0		
u _{Cg}	u _U	u _R	u _H	u _{Cg}	u _U	u _R	u _H
0,08	0,10	0,68	0,14	0,30	0,70	0,00	0,00
C				Mc			
v _{Cg}	v _U	v _R	v _H	v _{Cg}	v _U	v _R	v _H
[km/h]				[km/h]			
6,0	28,0	60,0	85,0	20,0	50,0	80,0	115,0
u _{Cg}	u _U	u _R	u _H	u _{Cg}	u _U	u _R	u _H
0,08	0,10	0,68	0,14	0,05	0,30	0,50	0,15
Mp							
v _{Cg}	v _U	v _R	v _H				
[km/h]							
20,0	30,0	35,0					
u _{Cg}	u _U	u _R	u _H				
0,05	0,70	0,25	0,00				

Oznaczenia: PC – samochody osobowe

LCV – lekkie samochody ciężarowe

HDT – samochody ciężarowe

UB – autobusy miejskie

C – autobusy dalekobieżne

Mc – motocykle

Mp – motorowery

v – prędkość średnia

u – udział długości drogi przebywanej przez pojazd w modelowych warunkach ruchu w długości drogi przebywanej we wszystkich warunkach ruchu

Indeksy: Modelowe warunki ruchu pojazdów:

Cg – ruch w zatorach ulicznych

U – ruch w miastach poza zatorami ulicznymi

R – ruch poza miastami

H – ruch na autostradach i drogach ekspresowych

Do celów pracy przyjęto założenie, że wielkości wejściowe i parametry modelu zmieniają się od 2000 r. do 2020 r. w sposób liniowy.

7.3. Badania modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych ze względu na lata bilansowania

Program badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych ze względu na lata bilansowania jest przedstawiony w tabeli 7.4.

Tab. 7.4. Program badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych ze względu na lata bilansowania

Lata bilansowania	PC	LCV	HDT	UB	C	Mc	Mp	RV
2000								
2001								
2002								
2003								
2004								
2005								
2006								
2007								
2008								
2009								
2010								
2011								
2012								
2013								
2014								
2015								
2016								
2017								
2018								
2019								
2020								

Oznaczenia są jak dla tabel 7.2 i 7.3. Dodatkowo RV oznacza wszystkie pojazdy drogowe. Dla poszczególnych lat bilansowania jest wyznaczona krajowa emisja zanieczyszczeń w modelowych warunkach ruchu i we wszystkich warunkach ruchu – oznaczenie T.

Wyniki badań dla samochodów osobowych są przedstawione w tabelach 7.5 – 7.8.

Tab. 7.5. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenu węgla

	E _{aCO} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	513,1	855,3	128,8	40,8	1537,9
2001	414,1	707,2	99,4	35,9	1256,6
2002	362,3	629,3	85,7	35,1	1112,3
2003	307,2	546,1	71,0	33,7	958,0
2004	275,8	499,5	63,5	34,7	873,5
2005	251,1	461,9	58,5	35,9	807,3
2006	232,5	433,6	54,9	36,9	757,8
2007	219,1	415,9	51,1	36,8	722,9
2008	209,2	404,4	47,6	35,9	697,1
2009	192,4	376,7	43,5	33,6	646,2
2010	177,2	352,4	39,2	31,0	599,8
2011	162,3	328,2	35,1	28,4	554,0
2012	143,2	294,0	31,0	25,9	494,1
2013	125,8	261,3	28,2	24,3	439,7
2014	118,3	250,2	26,0	23,3	417,9
2015	111,6	240,3	24,5	22,7	399,1
2016	105,4	230,6	23,3	22,3	381,6
2017	105,0	233,9	22,5	22,3	383,7
2018	102,0	230,5	21,4	21,9	375,8
2019	97,5	224,1	20,3	21,3	363,2
2020	86,5	201,4	18,0	19,6	325,5

Tab. 7.6. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna niemetanowych lotnych związków organicznych

	E _{aNMVOC} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	57,25	91,83	19,31	5,30	173,69
2001	48,83	80,12	14,79	4,26	148,00
2002	44,24	73,65	12,45	3,74	134,09
2003	39,33	66,64	10,02	3,20	119,19
2004	36,73	63,01	8,65	2,91	111,29
2005	34,74	60,15	7,68	2,72	105,28
2006	33,13	57,88	6,94	2,57	100,53
2007	31,97	56,50	6,26	2,45	97,18
2008	30,85	55,26	5,63	2,33	94,07
2009	28,68	51,89	4,96	2,19	87,70

	E _a NM _{VOC} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2010	26,56	48,63	4,32	2,04	81,55
2011	24,46	45,29	3,74	1,89	75,38
2012	22,00	40,95	3,22	1,77	67,94
2013	19,95	37,12	2,89	1,70	61,65
2014	18,80	35,25	2,62	1,64	58,31
2015	17,89	33,76	2,42	1,60	55,66
2016	16,99	32,24	2,25	1,56	53,05
2017	16,84	32,33	2,16	1,56	52,88
2018	16,34	31,60	2,06	1,53	51,53
2019	15,72	30,62	1,95	1,51	49,81
2020	14,35	27,83	1,82	1,46	45,46

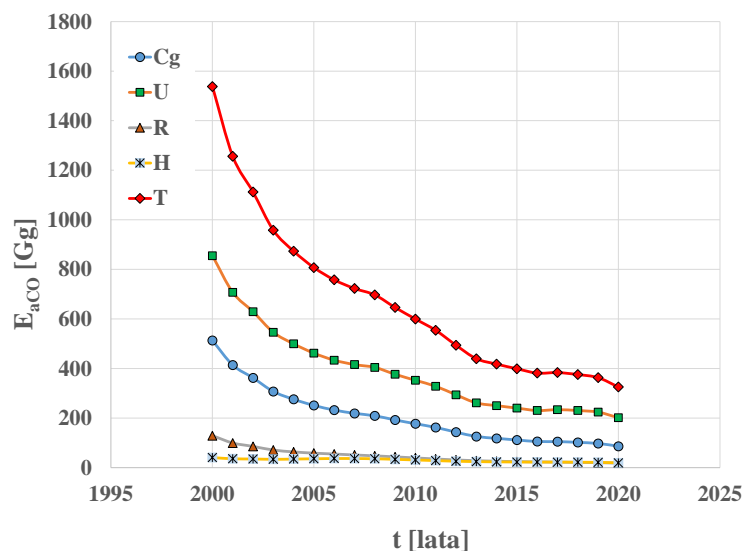
Tab. 7.7. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenków azotu

	E _a NO _x [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	10,22	20,49	40,81	15,14	86,66
2001	9,11	18,04	32,93	12,36	72,43
2002	8,88	17,40	29,74	11,30	67,33
2003	8,48	16,46	25,97	10,03	60,94
2004	8,67	16,70	24,78	9,72	59,87
2005	9,28	17,57	24,56	9,83	61,24
2006	10,02	18,67	24,72	10,15	63,56
2007	10,81	19,78	24,77	10,47	65,84
2008	11,85	21,27	25,18	10,99	69,30
2009	12,61	22,22	24,89	11,26	70,97
2010	12,95	22,58	24,03	11,27	70,82
2011	12,88	22,33	22,67	10,99	68,87
2012	12,60	21,77	21,18	10,62	66,16
2013	12,22	21,12	19,93	10,32	63,59
2014	12,06	20,88	19,08	10,23	62,26
2015	12,38	21,44	19,02	10,59	63,43
2016	12,98	22,44	19,47	11,22	66,11
2017	13,64	23,64	19,95	11,87	69,10
2018	14,09	24,49	20,16	12,37	71,11
2019	13,95	24,37	19,50	12,36	70,16
2020	13,80	24,24	18,83	12,34	69,21

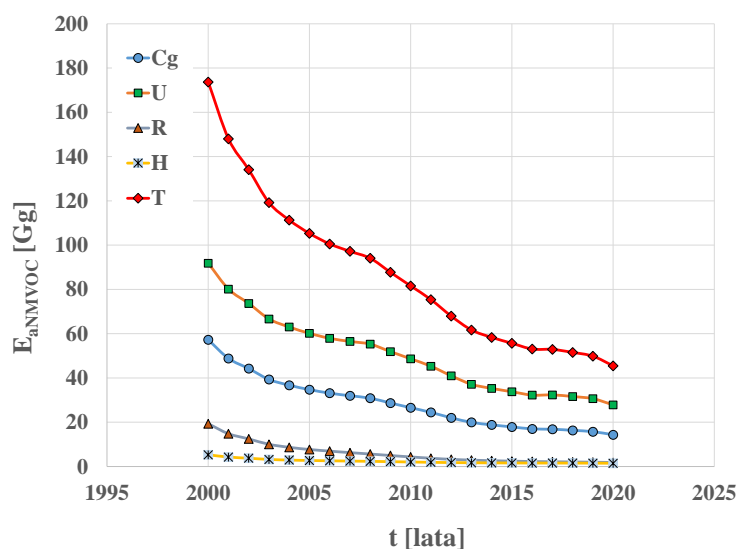
Tab. 7.8. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna całkowitego pyłu zawieszonego

	E _{aTSP} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	0,922	1,770	1,765	0,439	4,896
2001	0,885	1,723	1,708	0,434	4,750
2002	0,923	1,815	1,780	0,471	4,988
2003	0,927	1,844	1,812	0,491	5,074
2004	0,997	2,002	1,936	0,546	5,482
2005	1,105	2,235	2,137	0,629	6,106
2006	1,207	2,463	2,338	0,714	6,723
2007	1,313	2,706	2,523	0,796	7,338
2008	1,451	3,020	2,744	0,893	8,109
2009	1,519	3,197	2,885	0,964	8,565
2010	1,545	3,291	2,931	1,001	8,768
2011	1,527	3,292	2,895	1,007	8,721
2012	1,480	3,228	2,826	1,002	8,536
2013	1,423	3,135	2,745	0,993	8,296
2014	1,407	3,138	2,712	1,003	8,261
2015	1,448	3,267	2,785	1,055	8,555
2016	1,525	3,476	2,925	1,134	9,060
2017	1,625	3,742	3,061	1,213	9,641
2018	1,693	3,936	3,148	1,273	10,051
2019	1,69	3,97	3,10	1,28	10,041
2020	1,685	3,995	3,061	1,290	10,031

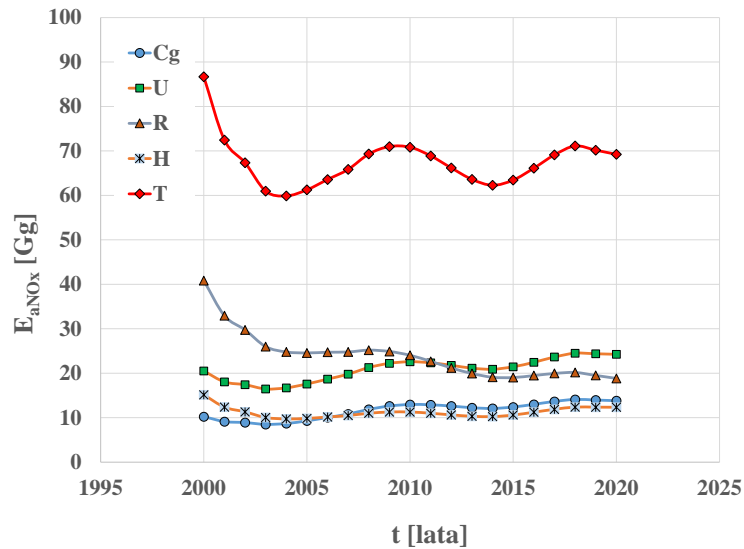
Na rysunkach 7.6 – 7.9 przedstawiono przebiegi krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z samochodów osobowych.



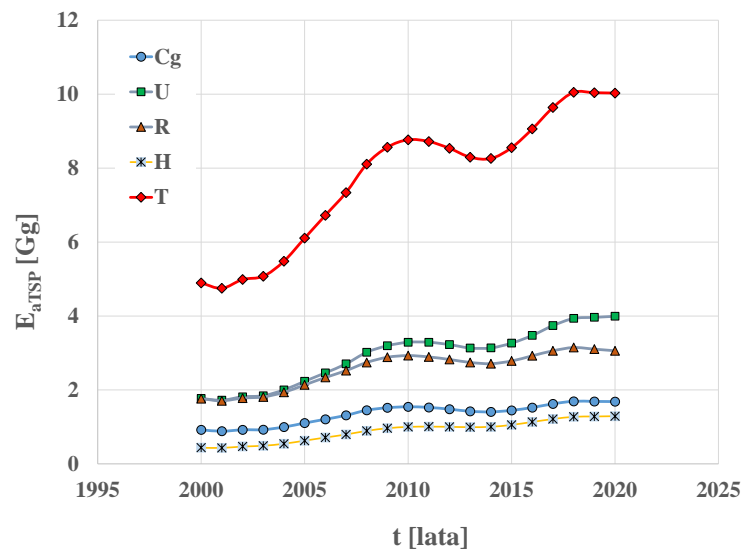
Rys. 7.6. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenku węgla – E_{aCO} z samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.7. Przebieg krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych – E_{aNMVOC} z samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

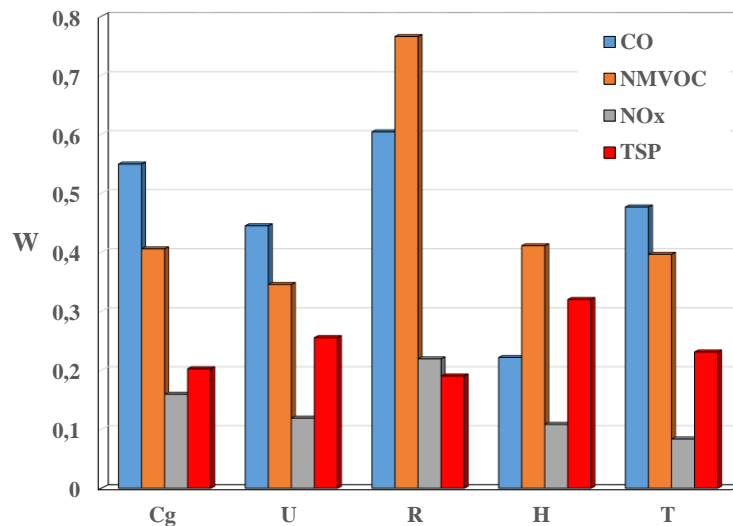


Rys. 7.8. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenków azotu – E_{aNOx} z samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

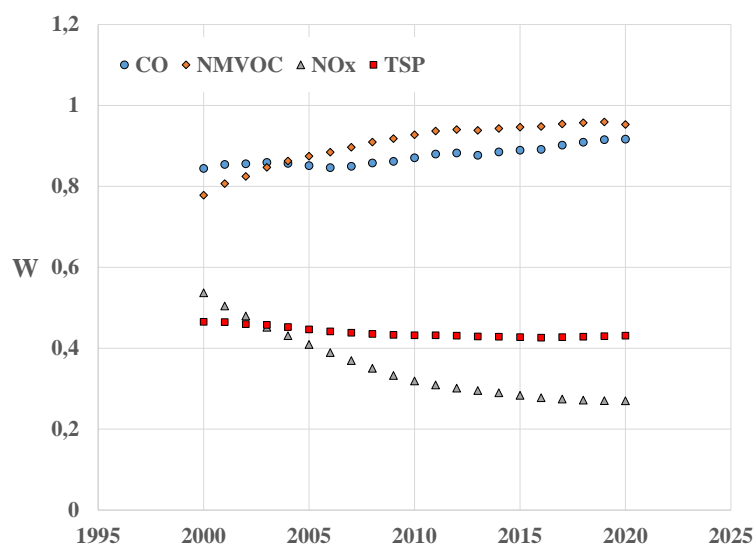


Rys. 7.9. Przebieg krajowej emisji rocznej całkowitego pyłu zawieszony – E_{aTSP} z samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

Na rysunkach 7.10 i 7.11 przedstawiono współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń w latach 2000 – 2020 z samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu: rysunek 7.10 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w latach 2000 – 2020, rysunek 7.11 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.



Rys. 7.10. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



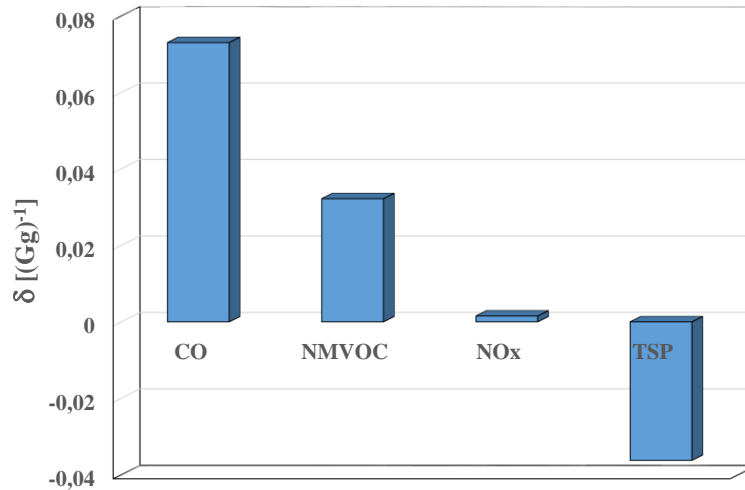
Rys. 7.11. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R oraz na autostradach i drogach ekspresowych – H

Na rysunku 7.12 przedstawiono współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – δ z samochodów osobowych w latach 2000 – 2020, zdefiniowany jako:

$$\delta = - \frac{k[E_a(t)]}{AV[E_a(t)]} \quad (7.1)$$

gdzie: $k[E_a(t)]$ – współczynnik kierunkowy linii prostej aproksymującej zbiór krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń w dziedzinie czasu,

$AV[E_a(t)]$ – wartość średnia krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń w latach 2000 – 2020.



Rys. 7.12. Współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z samochodów osobowych w latach 2000 – 2020

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. W wypadku tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych trend krajowej emisji rocznej w dziedzinie czasu jest jednoznaczny. Krajowa emisja roczna tych substancji wyraźnie zmniejsza się, mimo że intensywność użytkowania samochodów osobowych bardzo znacznie zwiększyła się w Polsce. Wynika to z bardzo znacznego postępu technicznego, w szczególności powszechnego wprowadzenia katalitycznych metod oczyszczania spalin i cyfrowego sterowania procesów roboczych zachodzących w silnikach. W wypadku utleniania składników spalin sprawność reaktorów katalitycznych jest szczególnie duża.
2. W wypadku tlenków azotu trend krajowej emisji rocznej w dziedzinie czasu nie jest jednoznaczny. Wynika to z faktu, że sprawność katalitycznej redukcji tlenków azotu nie jest tak duża jak w wypadku utleniania składników spalin o właściwościach redukujących.
3. Trend krajowej emisji rocznej pyłów jest rosnący w dziedzinie czasu, mimo że w wypadku silników o zapłonie samoczynnym nastąpiło skuteczne zmniejszenie się emisji pyłów dzięki powszechnemu wprowadzeniu filtrów cząstek stałych.

Jednocześnie jednak znaczne zwiększenie się intensywności użytkowania samochodów osobowych spowodowało zwiększenie się emisji pyłów ze źródeł trybologicznych.

4. Krajowa emisja roczna tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych jest największa w warunkach ruchu w miastach, mimo że udział długości drogi przebywanej przez samochody w tych warunkach w całkowitej długości drogi nie jest największy. Podobnie występuje duża krajowa emisja roczna tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych w warunkach ruchu w zatorach ulicznych. W warunkach ruchu pojazdów w miastach, a szczególnie w zatorach ulicznych, są znacznie bardziej niestabilizowane stany pracy silników, a to sprzyja zwiększonej emisji redukujących składników spalin.

W wypadku tlenków azotu największa jest krajowa emisja roczna w warunkach ruchu poza miastami, co ma związek z większym obciążeniem silników niż w wypadku ruchu w miastach. W ostatnich latach krajowa emisja roczna tlenków azotu jest większa w warunkach ruchu w miastach z powodu rosnącej intensywności użytkowania samochodów w tych warunkach.

Krajowa emisja roczna pyłów ma zbliżoną wartość w warunkach ruchu w miastach i poza miastami.

Najmniejsza jest krajowa emisja roczna zanieczyszczeń w warunkach ruchu na autostradach i drogach ekspresowych. Wynika to z faktu stosunkowo małego udziału długości drogi przebywanej przez samochody w tych warunkach w całkowitej długości drogi.

5. Najsilniejsze właściwości dynamiczne procesu krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń są dla niemetanowych lotnych związków organicznych, szczególnie dla warunków ruchu samochodów poza miastami. Najmniej dynamiczny jest proces krajowej emisji rocznej tlenków azotu.
6. Współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z samochodów osobowych w latach 2000 – 2020 jest największy dla tlenku węgla, natomiast najbardziej zwiększa się krajowa emisja roczna całkowitego pyłu zawieszonego, co wynika z intensywnego rozwoju motoryzacji.

Wyniki badań dla lekkich samochodów ciężarowych są przedstawione w tabelach 7.9 – 7.12.

Tab. 7.9. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z lekkich samochodów ciężarowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenku węgla

	E _{aCO} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	84,07	146,46	19,33	12,88	262,74
2001	70,14	122,81	15,34	10,51	218,80
2002	62,12	108,77	13,56	9,49	193,94
2003	54,82	96,00	11,60	8,45	170,87
2004	52,16	90,96	11,15	8,39	162,65
2005	50,67	87,68	11,22	8,68	158,24
2006	49,45	84,91	11,31	8,97	154,64
2007	46,80	80,10	10,84	8,79	146,53
2008	43,49	74,35	10,39	8,47	136,70
2009	37,64	64,28	9,16	7,61	118,69
2010	32,08	54,95	7,82	6,61	101,46
2011	26,70	45,93	6,48	5,57	84,67
2012	22,70	39,10	5,48	4,83	72,10
2013	19,30	33,15	4,74	4,28	61,47
2014	17,02	29,27	4,17	3,85	54,31
2015	15,29	26,29	3,81	3,58	48,97
2016	13,93	23,91	3,61	3,42	44,87
2017	13,34	22,97	3,47	3,33	43,12
2018	12,44	21,47	3,33	3,21	40,45
2019	11,24	19,44	3,12	3,02	36,81
2020	9,60	16,60	2,78	2,71	31,69

Tab. 7.10. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z lekkich samochodów ciężarowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna niemetanowych lotnych związków organicznych

	E _{aNMVOC} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	7,50	12,33	2,28	0,68	22,78
2001	6,09	10,07	1,83	0,56	18,56
2002	5,33	8,85	1,66	0,52	16,36
2003	4,58	7,63	1,46	0,46	14,12
2004	4,33	7,22	1,42	0,46	13,43
2005	4,24	7,03	1,45	0,47	13,20
2006	4,17	6,88	1,47	0,48	13,01
2007	3,99	6,56	1,42	0,48	12,44
2008	3,76	6,19	1,37	0,47	11,78

	E _a NM _{VOC} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2009	3,26	5,39	1,23	0,43	10,30
2010	2,77	4,60	1,07	0,38	8,82
2011	2,28	3,83	0,91	0,33	7,35
2012	1,92	3,23	0,78	0,29	6,22
2013	1,63	2,75	0,69	0,26	5,33
2014	1,43	2,41	0,61	0,24	4,68
2015	1,27	2,16	0,56	0,22	4,21
2016	1,16	1,97	0,54	0,21	3,88
2017	1,10	1,90	0,52	0,21	3,73
2018	1,04	1,80	0,50	0,20	3,54
2019	0,96	1,67	0,47	0,19	3,29
2020	0,84	1,46	0,42	0,18	2,90

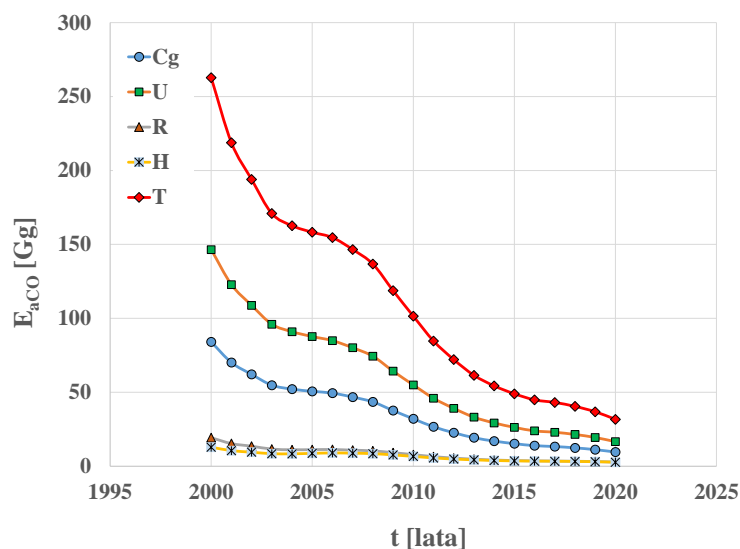
Tab. 7.11. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z lekkich samochodów ciężarowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenków azotu

	E _a NO _x [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	5,28	9,08	12,49	4,16	31,02
2001	4,72	8,05	10,76	3,64	27,18
2002	4,87	8,17	10,58	3,65	27,27
2003	4,80	8,03	10,41	3,66	26,90
2004	4,82	8,02	10,30	3,69	26,83
2005	4,89	8,10	10,37	3,79	27,14
2006	5,03	8,29	10,56	3,93	27,80
2007	5,17	8,48	10,79	4,09	28,53
2008	5,18	8,46	10,81	4,19	28,64
2009	5,34	8,64	11,01	4,36	29,35
2010	5,27	8,43	10,68	4,32	28,70
2011	5,13	8,13	10,25	4,25	27,76
2012	5,04	7,88	9,90	4,21	27,02
2013	5,03	7,76	9,81	4,28	26,88
2014	5,06	7,71	9,81	4,41	26,99
2015	5,08	7,66	9,79	4,52	27,06
2016	5,16	7,72	9,87	4,67	27,42
2017	5,34	7,94	10,09	4,88	28,24
2018	5,66	8,38	10,62	5,23	29,90
2019	5,70	8,47	10,46	5,26	29,89
2020	5,74	8,56	10,29	5,28	29,87

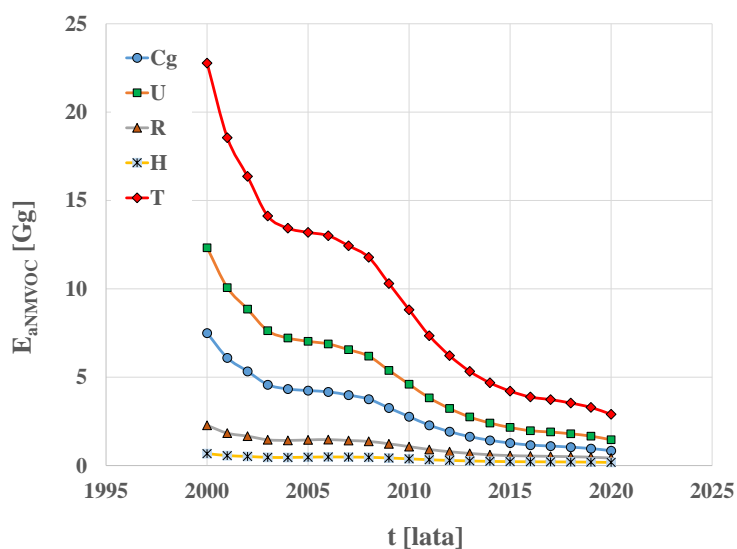
Tab. 7.12. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z lekkich samochodów ciężarowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna całkowitego pyłu zawieszzonego

	E _{aTSP} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	0,792	1,531	1,346	0,399	4,069
2001	0,784	1,503	1,307	0,400	3,994
2002	0,797	1,513	1,311	0,419	4,041
2003	0,778	1,466	1,280	0,423	3,948
2004	0,769	1,440	1,268	0,431	3,908
2005	0,753	1,404	1,248	0,436	3,842
2006	0,731	1,356	1,223	0,437	3,746
2007	0,718	1,330	1,215	0,442	3,705
2008	0,730	1,351	1,210	0,449	3,740
2009	0,729	1,343	1,206	0,456	3,733
2010	0,715	1,315	1,176	0,451	3,657
2011	0,680	1,250	1,109	0,429	3,469
2012	0,633	1,161	1,041	0,406	3,241
2013	0,580	1,062	0,973	0,383	2,998
2014	0,547	1,003	0,925	0,367	2,842
2015	0,541	0,993	0,926	0,369	2,829
2016	0,552	1,014	0,959	0,384	2,909
2017	0,577	1,063	0,992	0,399	3,031
2018	0,590	1,091	1,013	0,409	3,103
2019	0,58	1,07	0,99	0,40	3,037
2020	0,563	1,048	0,968	0,392	2,971

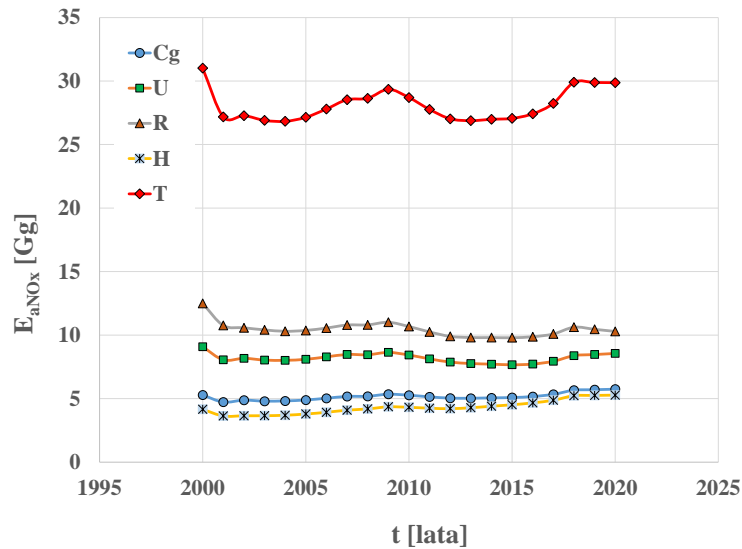
Na rysunkach 7.13 – 7.16 przedstawiono przebiegi krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z lekkich samochodów ciężarowych.



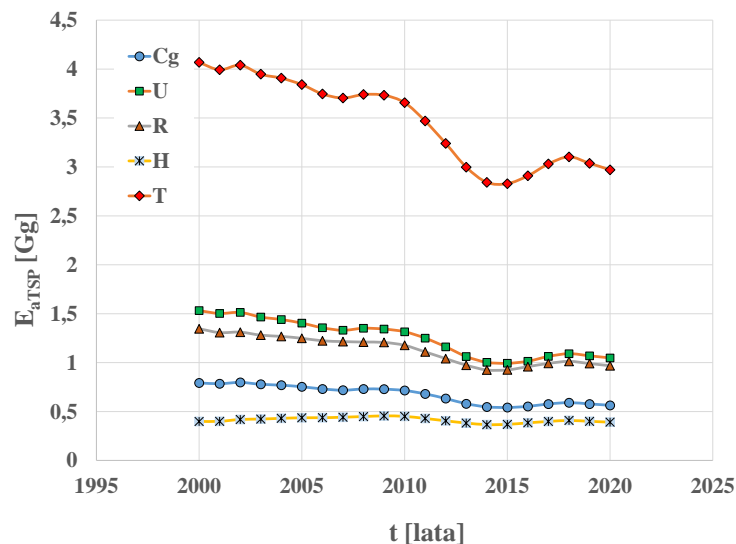
Rys. 7.13. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenu węgla – E_{aCO} z lekkich samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.14. Przebieg krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych – E_{aNMVOC} z lekkich samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

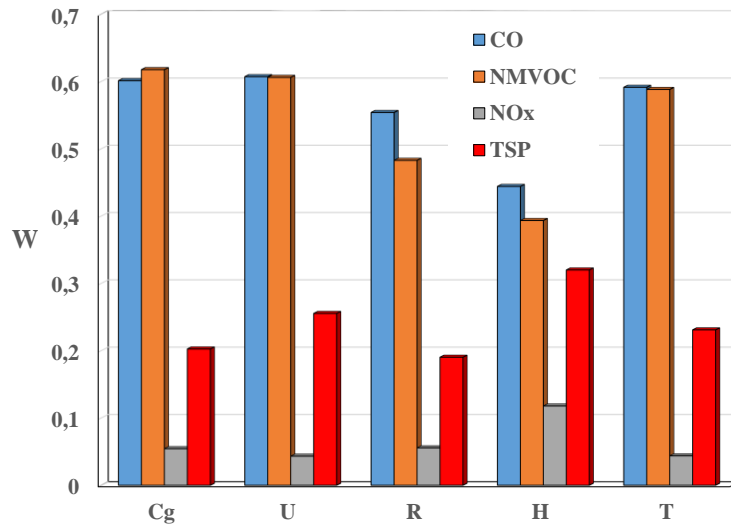


Rys. 7.15. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenków azotu – E_{aNO_x} z lekkich samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

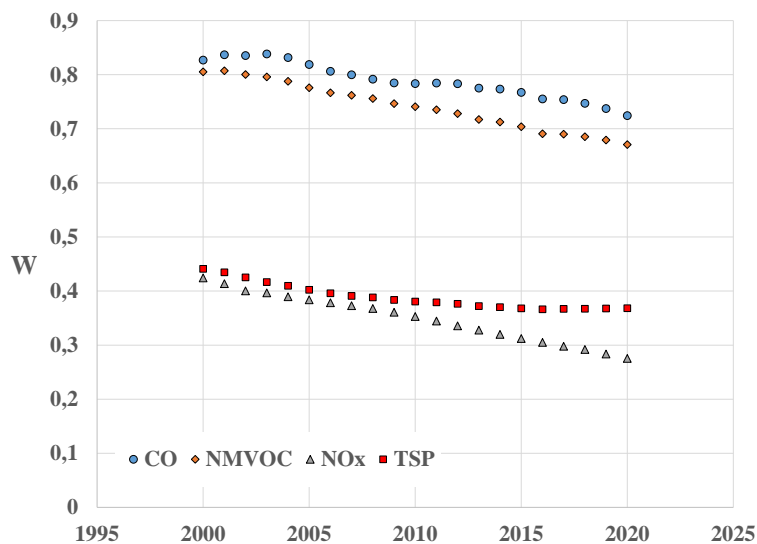


Rys. 7.16. Przebieg krajowej emisji rocznej całkowitego pyłu zawieszonego – E_{aTSP} z lekkich samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

Na rysunkach 7.17 i 7.18 przedstawiono współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń w latach 2000 – 2020 z lekkich samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: rysunek 7.17 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w latach 2000 – 2020, rysunek 7.18 – – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.

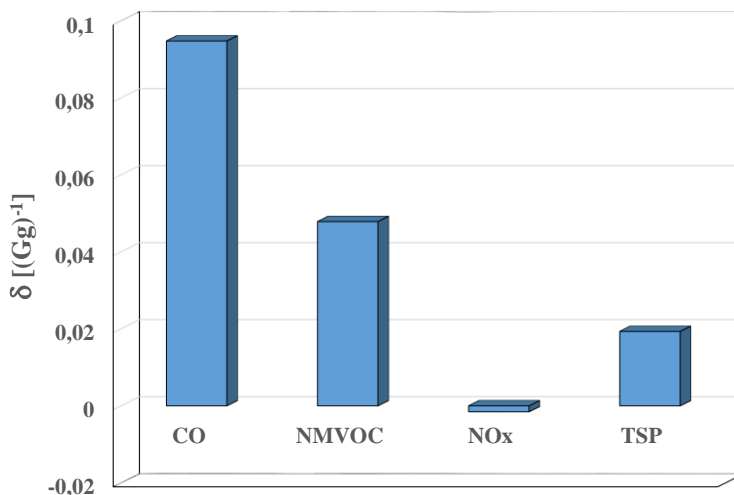


Rys. 7.17. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z lekkich samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.18. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z lekkich samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R oraz na autostradach i drogach ekspresowych – H

Na rysunku 7.19 przedstawiono współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – δ z lekkich samochodów ciężarowych w latach 2000 – 2020.



Rys. 7.19. Współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z lekkich samochodów ciężarowych w latach 2000 – 2020

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Ogólna tendencja krajowej emisji rocznej tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych jest podobny jak w wypadku samochodów osobowych: następuje systematyczne zmniejszanie się krajowej emisji rocznej tych substancji mimo znacznego zwiększenia się intensywności użytkowania tych pojazdów. Jest to wynik znacznej poprawy jakości technicznej pojazdów, w szczególności ze względu na emisję zanieczyszczeń.
2. W wypadku tlenków azotu i całkowitego pyłu zawieszonego tendencja krajowej emisji rocznej nie jest tak jednoznaczna jak w wypadku tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych. Wynika to z mniejszej niż dla tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych skuteczności metod zmniejszania emisji tlenków azotu i całkowitego pyłu zawieszonego.
3. Zależność emisji zanieczyszczeń od warunków ruchu lekkich samochodów ciężarowych jest podobna dla wszystkich zanieczyszczeń.
4. Największy jest współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń dla tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych, najmniejszy dla tlenków azotu.
5. Współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z lekkich samochodów ciężarowych w latach 2000 – 2020 jest dla tlenku węgla. Dla tlenków

azotu następuje nieznaczne zmniejszenie się współczynnika zmniejszenia się krajowej emisji rocznej.

Wyniki badań dla samochodów ciężarowych są przedstawione w tabelach 7.13 – 7.16.

Tab. 7.13. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów ciężarowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenku węgla

	E _{aCO} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	2,19	1,54	6,69	1,02	11,44
2001	2,16	1,52	6,59	1,02	11,30
2002	2,38	1,68	7,24	1,14	12,44
2003	2,91	2,04	8,79	1,41	15,14
2004	3,49	2,43	10,47	1,69	18,09
2005	4,16	2,89	12,41	2,02	21,48
2006	4,75	3,28	14,09	2,32	24,43
2007	5,20	3,58	15,34	2,54	26,67
2008	5,33	3,63	15,52	2,60	27,08
2009	5,46	3,66	15,60	2,64	27,37
2010	5,48	3,61	15,28	2,62	26,99
2011	5,41	3,47	14,63	2,52	26,03
2012	5,34	3,35	14,02	2,44	25,15
2013	5,26	3,22	13,40	2,35	24,22
2014	5,22	3,13	12,93	2,28	23,57
2015	5,41	3,17	13,05	2,32	23,96
2016	5,68	3,27	13,38	2,40	24,73
2017	5,94	3,36	13,66	2,47	25,43
2018	6,06	3,38	13,65	2,48	25,58
2019	6,07	3,33	13,34	2,45	25,19
2020	5,67	3,06	12,17	2,25	23,14

Tab. 7.14. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów ciężarowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna niemetanowych lotnych związków organicznych

	E _{aNMVOC} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	0,95	0,57	2,19	0,26	3,97
2001	0,88	0,53	2,01	0,24	3,67
2002	0,96	0,57	2,15	0,27	3,94

	E _a NM _{VOC} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2003	1,16	0,68	2,58	0,32	4,74
2004	1,39	0,82	3,09	0,39	5,69
2005	1,64	0,96	3,62	0,46	6,68
2006	1,79	1,05	3,92	0,51	7,27
2007	1,83	1,04	3,96	0,51	7,34
2008	1,79	1,04	3,85	0,51	7,19
2009	1,67	0,96	3,53	0,47	6,62
2010	1,51	0,86	3,13	0,42	5,91
2011	1,36	0,77	2,78	0,38	5,29
2012	1,23	0,68	2,47	0,34	4,72
2013	1,11	0,61	2,18	0,30	4,20
2014	1,01	0,55	1,95	0,28	3,79
2015	0,97	0,52	1,83	0,26	3,59
2016	0,97	0,51	1,78	0,26	3,52
2017	0,97	0,51	1,74	0,26	3,48
2018	0,95	0,49	1,68	0,25	3,37
2019	0,91	0,46	1,57	0,24	3,17
2020	0,81	0,41	1,37	0,21	2,80

Tab. 7.15. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów ciężarowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenków azotu

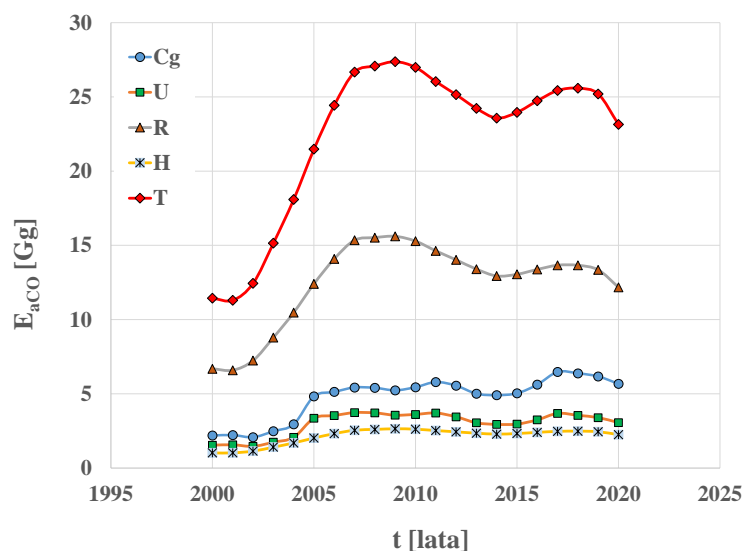
	E _a NO _x [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	6,76	5,52	29,44	4,89	46,61
2001	6,88	5,55	29,21	4,86	46,50
2002	7,66	6,16	32,24	5,41	51,48
2003	9,32	7,45	38,92	6,61	62,30
2004	11,02	8,81	46,03	7,91	73,77
2005	13,09	10,45	54,54	9,45	87,52
2006	15,11	12,01	62,44	10,88	100,44
2007	16,73	13,24	68,42	11,97	110,36
2008	17,47	13,64	69,80	12,25	113,15
2009	18,36	14,03	70,60	12,39	115,39
2010	18,85	14,02	69,14	12,11	114,12
2011	18,84	13,58	65,58	11,48	109,47
2012	18,89	13,16	62,17	10,87	105,09
2013	18,90	12,72	58,70	10,26	100,58
2014	19,15	12,43	56,02	9,79	97,39

	E _{aNO_x} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2015	20,26	12,69	55,86	9,78	98,59
2016	21,69	13,11	56,49	9,91	101,20
2017	23,03	13,49	56,91	10,00	103,42
2018	23,89	13,55	56,08	9,86	103,39
2019	24,33	13,32	53,89	9,49	101,04
2020	23,11	12,17	48,24	8,51	92,02

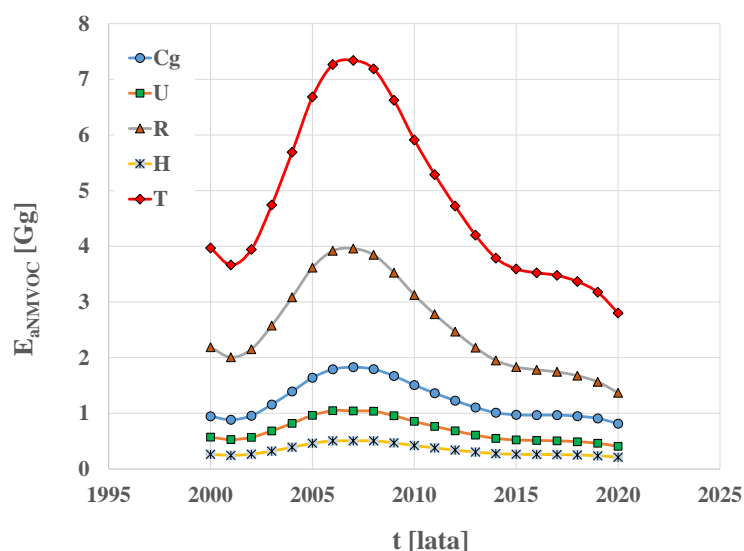
Tab. 7.16. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów ciężarowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna całkowitego pyłu zawieszonego

	E _{aTSP} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	0,401	0,325	1,611	0,237	2,574
2001	0,388	0,319	1,589	0,236	2,532
2002	0,423	0,349	1,743	0,262	2,778
2003	0,507	0,418	2,090	0,318	3,333
2004	0,603	0,495	2,467	0,379	3,944
2005	0,711	0,585	2,916	0,451	4,663
2006	0,798	0,663	3,329	0,518	5,308
2007	0,859	0,721	3,639	0,570	5,789
2008	0,858	0,730	3,713	0,586	5,887
2009	0,847	0,733	3,760	0,598	5,937
2010	0,813	0,715	3,696	0,592	5,816
2011	0,770	0,684	3,552	0,573	5,580
2012	0,734	0,659	3,439	0,558	5,390
2013	0,701	0,638	3,347	0,546	5,231
2014	0,682	0,632	3,332	0,547	5,193
2015	0,701	0,660	3,503	0,579	5,444
2016	0,735	0,701	3,740	0,621	5,798
2017	0,768	0,742	3,972	0,663	6,145
2018	0,787	0,769	4,130	0,693	6,380
2019	0,774	0,766	4,167	0,703	6,409
2020	0,745	0,748	4,040	0,685	6,218

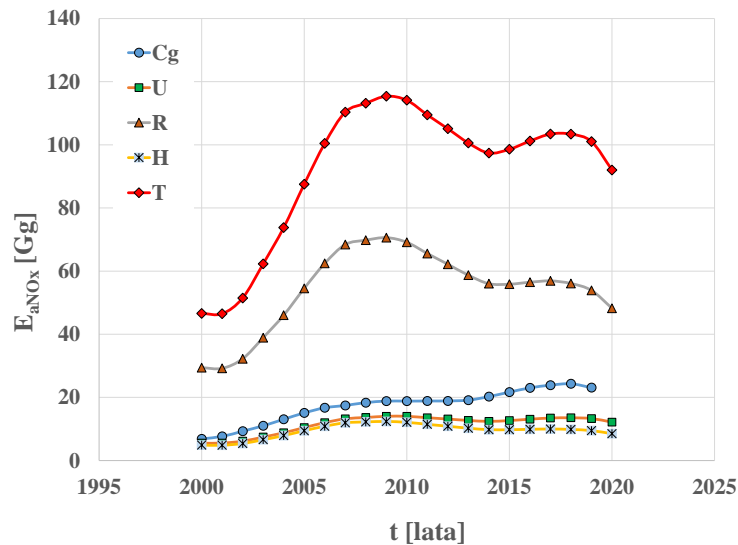
Na rysunkach 7.20 – 7.23 przedstawiono przebiegi krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z samochodów ciężarowych.



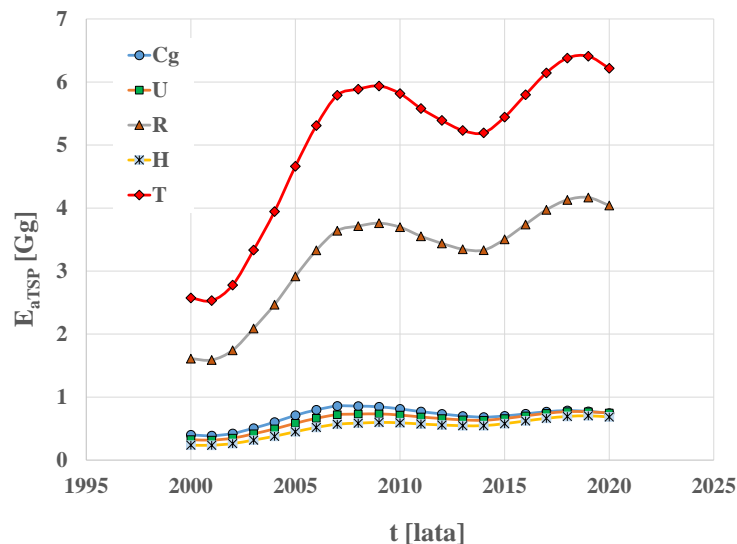
Rys. 7.20. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenku węgla – E_{aCO} z samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.21. Przebieg krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych – E_{aNMVOC} z samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

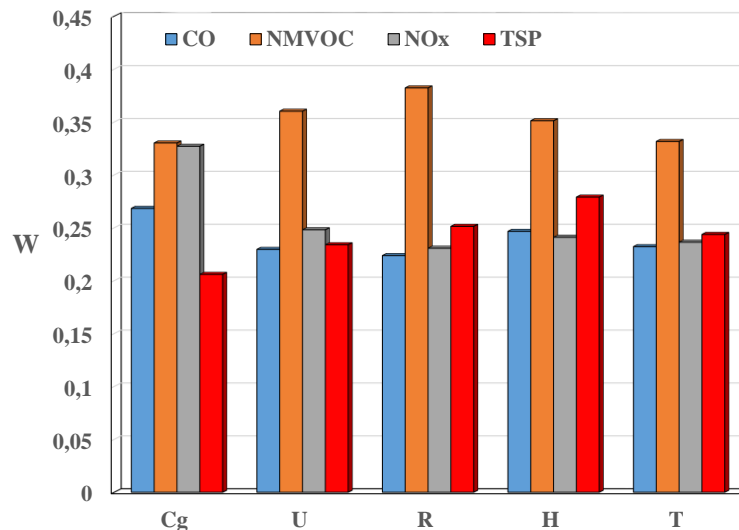


Rys. 7.22. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenków azotu – E_{aNOx} z samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

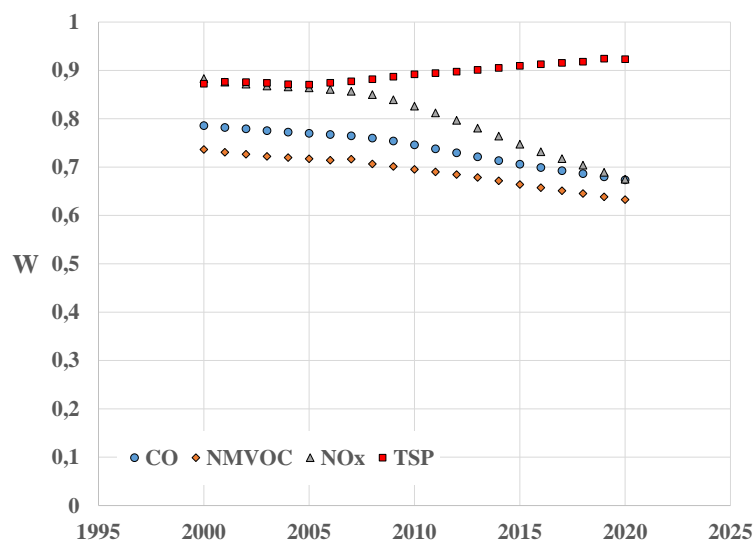


Rys. 7.23. Przebieg krajowej emisji rocznej całkowitego pyłu zawieszonego – E_{aTSP} z samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

Na rysunkach 7.24 i 7.25 przedstawiono współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń w latach 2000 – 2020 z samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: rysunek 7.24 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w latach 2000 – 2020, rysunek 7.25 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.

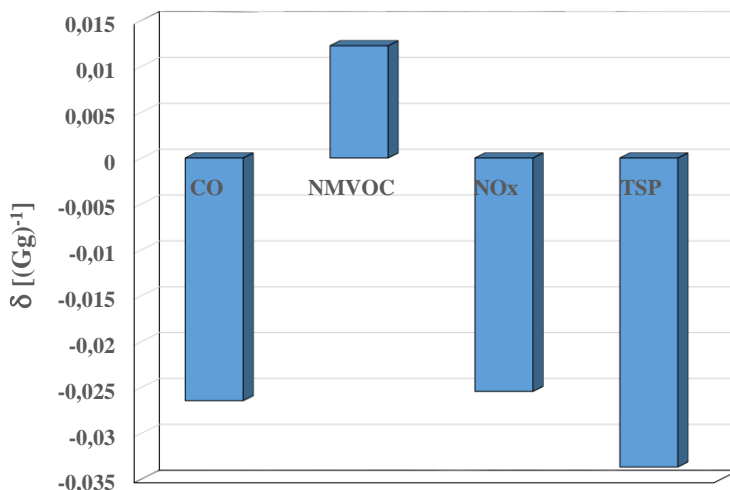


Rys. 7.24. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.25. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z samochodów ciężarowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R oraz na autostradach i drogach ekspresowych – H

Na rysunku 7.26 przedstawiono współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – δ z samochodów ciężarowych w latach 2000 – 2020.



Rys. 7.26. Współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z samochodów ciężarowych w latach 2000 – 2020

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Do 2007 r. – 2009 r. jest wyraźnie widoczne, że dominującym czynnikiem zwiększania się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń jest zwiększanie się intensywności użytkowania pojazdów. Po 2007 r. – 2009 r. istotną rolę w zmniejszeniu się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń odgrywa poprawa skuteczności metod zmniejszenia emisji zanieczyszczeń.
2. Szczególnie silny jest wpływ na zwiększanie się krajowej emisji zanieczyszczeń na skutek zwiększania się intensywności użytkowania pojazdów w wypadku emisji tlenku węgla, tlenków azotu i całkowitego pyłu zawieszonego. Bardzo silnie wzrasta intensywność użytkowania samochodów ciężarowych po 2017 r.
3. Zależność emisji zanieczyszczeń od warunków ruchu samochodów ciężarowych jest podobna dla wszystkich zanieczyszczeń.
4. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń jest największy dla niemetanowych lotnych związków organicznych. Dla pozostałych zanieczyszczeń nie ma dużej regularności.
5. Największe jest względne zmniejszenie się krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych. Dla pozostałych zanieczyszczeń następuje zwiększenia się krajowej emisji rocznej, najbardziej pyłów.

Wyniki badań dla autobusów miejskich są przedstawione w tabelach 7.17 – 7.20.

Tab. 7.17. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z autobusów miejskich ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenku węgla

	E _{aCO} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	0,292	0,394	0,000	0,000	0,686
2001	0,260	0,351	0,000	0,000	0,611
2002	0,258	0,348	0,000	0,000	0,606
2003	0,257	0,346	0,000	0,000	0,602
2004	0,268	0,361	0,000	0,000	0,630
2005	0,285	0,384	0,000	0,000	0,670
2006	0,301	0,406	0,000	0,000	0,707
2007	0,320	0,422	0,000	0,000	0,741
2008	0,344	0,436	0,000	0,000	0,780
2009	0,372	0,447	0,000	0,000	0,819
2010	0,384	0,440	0,000	0,000	0,825
2011	0,387	0,422	0,000	0,000	0,809
2012	0,375	0,396	0,000	0,000	0,772
2013	0,358	0,372	0,000	0,000	0,730
2014	0,337	0,348	0,000	0,000	0,685
2015	0,335	0,343	0,000	0,000	0,677
2016	0,344	0,350	0,000	0,000	0,695
2017	0,355	0,359	0,000	0,000	0,714
2018	0,360	0,358	0,000	0,000	0,718
2019	0,361	0,354	0,000	0,000	0,715
2020	0,343	0,331	0,000	0,000	0,673

Tab. 7.18. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z autobusów miejskich ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna niemetanowych lotnych związków organicznych

	E _{aNMVOC} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	0,128	0,155	0,000	0,000	0,284
2001	0,110	0,132	0,000	0,000	0,242
2002	0,108	0,129	0,000	0,000	0,237
2003	0,101	0,121	0,000	0,000	0,222
2004	0,101	0,120	0,000	0,000	0,221
2005	0,101	0,120	0,000	0,000	0,221
2006	0,098	0,115	0,000	0,000	0,213
2007	0,089	0,105	0,000	0,000	0,195
2008	0,084	0,098	0,000	0,000	0,182

	E _a NM _{VOC} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2009	0,076	0,089	0,000	0,000	0,165
2010	0,066	0,077	0,000	0,000	0,143
2011	0,058	0,068	0,000	0,000	0,126
2012	0,051	0,059	0,000	0,000	0,111
2013	0,046	0,052	0,000	0,000	0,098
2014	0,042	0,046	0,000	0,000	0,088
2015	0,040	0,044	0,000	0,000	0,084
2016	0,041	0,043	0,000	0,000	0,084
2017	0,041	0,043	0,000	0,000	0,084
2018	0,041	0,041	0,000	0,000	0,082
2019	0,040	0,039	0,000	0,000	0,079
2020	0,037	0,035	0,000	0,000	0,072

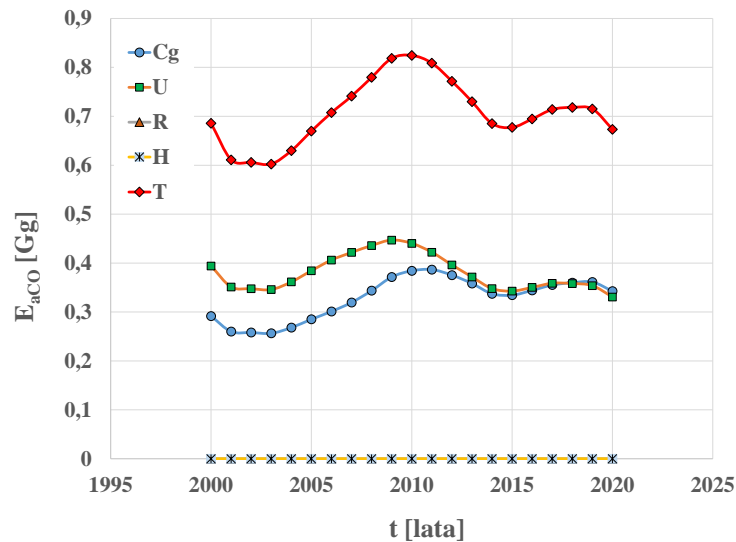
Tab. 7.19. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z autobusów miejskich ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenków azotu

	E _a NO _x [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	0,641	1,042	0,000	0,000	1,683
2001	0,586	0,940	0,000	0,000	1,526
2002	0,604	0,961	0,000	0,000	1,565
2003	0,648	1,011	0,000	0,000	1,658
2004	0,711	1,096	0,000	0,000	1,807
2005	0,813	1,243	0,000	0,000	2,056
2006	0,920	1,389	0,000	0,000	2,309
2007	1,031	1,516	0,000	0,000	2,548
2008	1,123	1,603	0,000	0,000	2,726
2009	1,221	1,672	0,000	0,000	2,893
2010	1,262	1,663	0,000	0,000	2,924
2011	1,249	1,581	0,000	0,000	2,831
2012	1,203	1,475	0,000	0,000	2,678
2013	1,149	1,381	0,000	0,000	2,531
2014	1,094	1,296	0,000	0,000	2,390
2015	1,100	1,280	0,000	0,000	2,380
2016	1,149	1,307	0,000	0,000	2,455
2017	1,199	1,336	0,000	0,000	2,535
2018	1,226	1,328	0,000	0,000	2,554
2019	1,245	1,304	0,000	0,000	2,549
2020	1,186	1,214	0,000	0,000	2,399

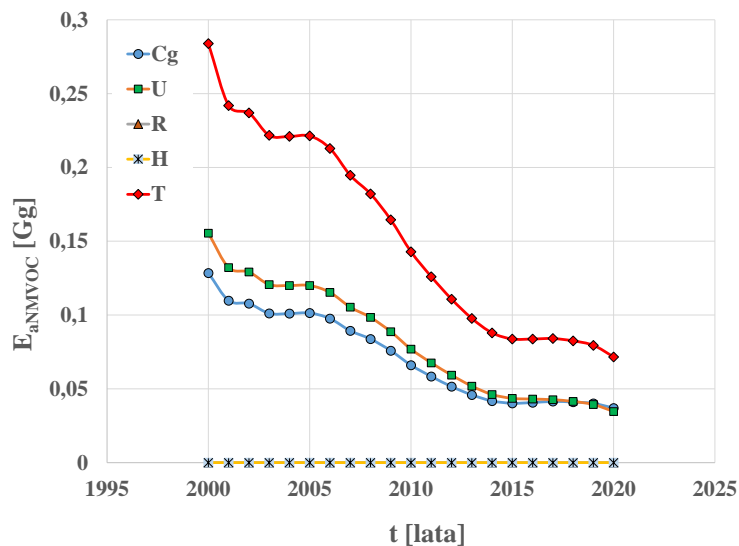
Tab. 7.20. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z autobusów miejskich ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna całkowitego pyłu zawieszonego

	E _{aTSP} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	0,051	0,069	0,000	0,000	0,120
2001	0,044	0,061	0,000	0,000	0,105
2002	0,040	0,060	0,000	0,000	0,100
2003	0,041	0,059	0,000	0,000	0,100
2004	0,042	0,060	0,000	0,000	0,102
2005	0,043	0,064	0,000	0,000	0,107
2006	0,044	0,066	0,000	0,000	0,110
2007	0,043	0,067	0,000	0,000	0,110
2008	0,043	0,069	0,000	0,000	0,112
2009	0,042	0,069	0,000	0,000	0,111
2010	0,039	0,067	0,000	0,000	0,106
2011	0,037	0,063	0,000	0,000	0,100
2012	0,034	0,059	0,000	0,000	0,092
2013	0,031	0,055	0,000	0,000	0,086
2014	0,029	0,052	0,000	0,000	0,082
2015	0,030	0,053	0,000	0,000	0,083
2016	0,031	0,057	0,000	0,000	0,088
2017	0,033	0,061	0,000	0,000	0,094
2018	0,034	0,064	0,000	0,000	0,098
2019	0,035	0,066	0,000	0,000	0,101
2020	0,034	0,065	0,000	0,000	0,099

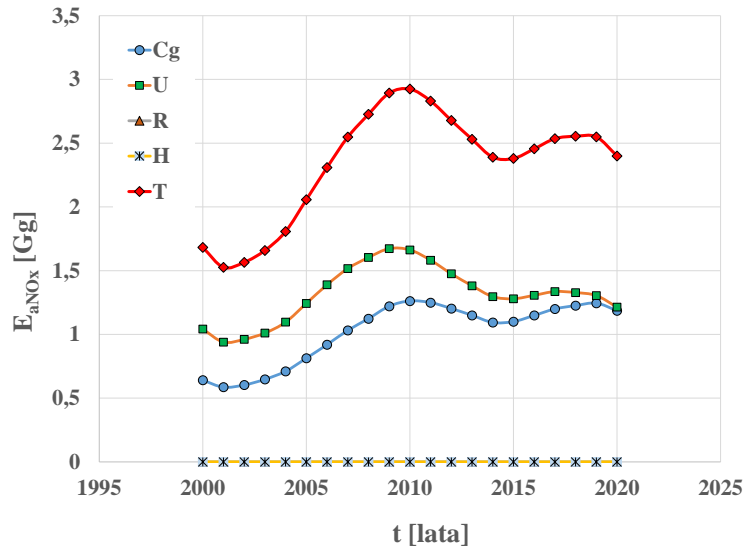
Na rysunkach 7.27 – 7.30 przedstawiono przebiegi krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z autobusów miejskich.



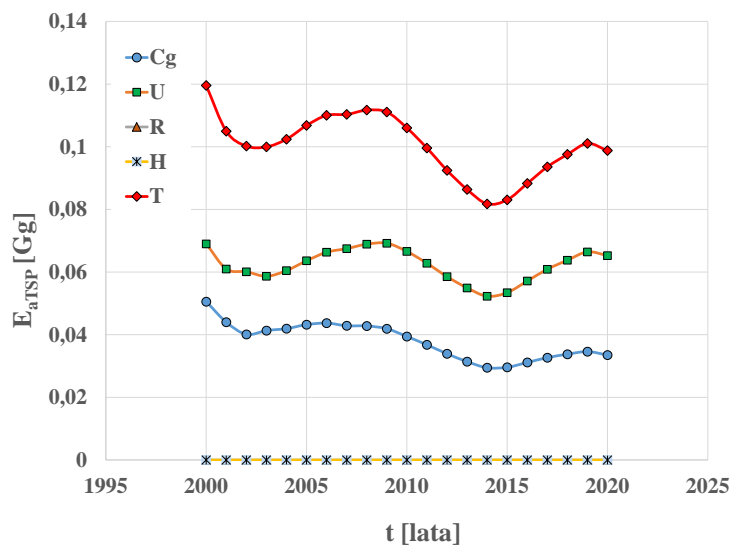
Rys. 7.27. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenku węgla – E_{aCO} z autobusów miejskich w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.28. Przebieg krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych – E_{aNMVOC} z autobusów miejskich w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

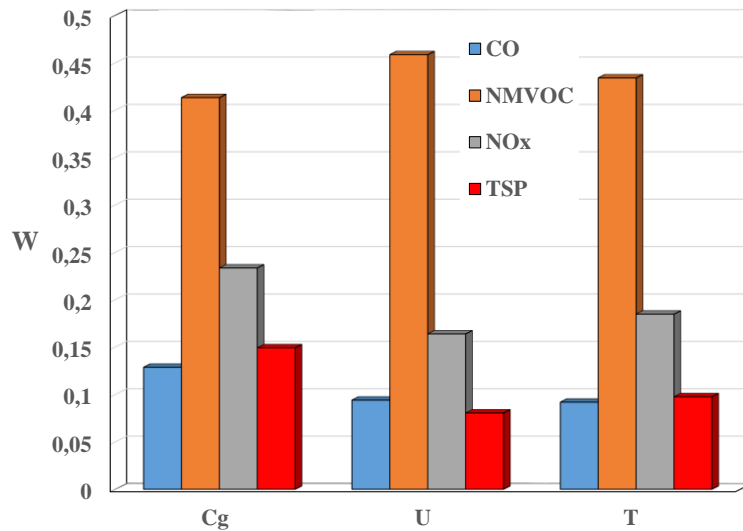


Rys. 7.29. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenków azotu – E_{aNOx} z autobusów miejskich w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

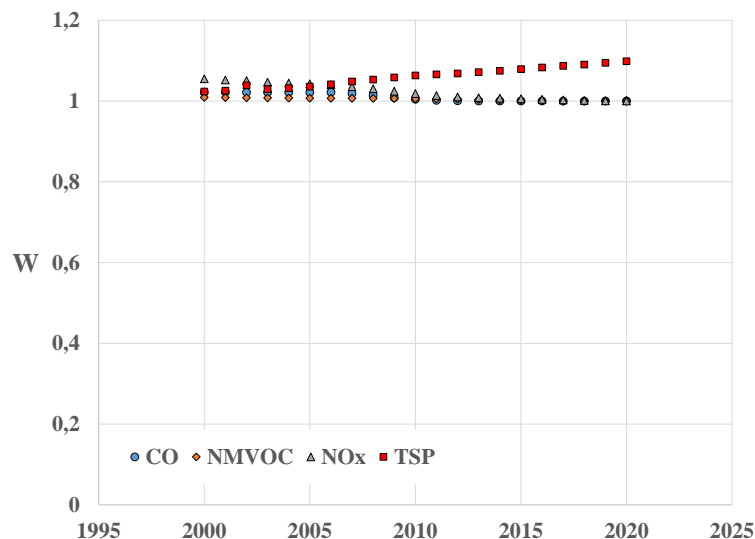


Rys. 7.30. Przebieg krajowej emisji rocznej całkowitego pyłu zawieszonego – E_{aTSP} z autobusów miejskich w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

Na rysunkach 7.31 i 7.32 przedstawiono współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń w latach 2000 – 2020 z autobusów miejskich w modelowych warunkach ruchu: rysunek 7.31 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w latach 2000 – 2020, rysunek 7.32 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.

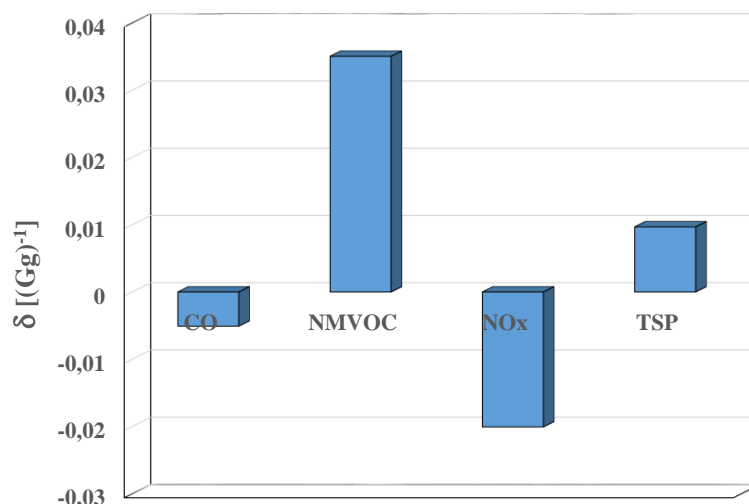


Rys. 7.31. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z autobusów miejskich w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.32. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z autobusów miejskich w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R oraz na autostradach i drogach ekspresowych – H

Na rysunku 7.33 przedstawiono współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – δ z autobusów miejskich w latach 2000 – 2020.



Rys. 7.33. Współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z autobusów miejskich w latach 2000 – 2020

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Do 2010 r. zwiększa się krajowa emisja roczna tlenku węgla i tlenków azotu, co jest związane ze zwiększaniem się intensywności użytkowania pojazdów. Po 2010 r. zmniejsza się krajowa emisja roczna tych zanieczyszczeń. Podobnie nie wzrasta po tym roku krajowa emisja roczna całkowitego pyłu zawieszonego – proporcjonalnie do intensywności użytkowania pojazdów. Jest to wynik poprawy właściwości technicznych autobusów, szczególnie ze względu na emisję zanieczyszczeń.
2. Trend zmniejszania się krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych jest jednoznaczny: wielkość ta wyraźnie zmniejsza się na skutek poprawy właściwości technicznych pojazdów, głównie ze względu na emisję zanieczyszczeń.
3. Zależność emisji zanieczyszczeń od warunków ruchu autobusów miejskich jest podobna dla wszystkich zanieczyszczeń.
4. Najbardziej dynamiczny jest proces krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych, najmniej – pyłów.
5. Najsilniejsze jest zmniejszenie się krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych, natomiast najsilniej wzrasta krajowa emisja roczna tlenków azotu.

Wyniki badań dla autobusów dalekobieżnych są przedstawione w tabelach 7.21 – 7.24.

Tab. 7.21. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z autobusów dalekobieżnych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenku węgla

	E _{aCO} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	0,679	0,430	1,624	0,207	2,940
2001	0,616	0,391	1,471	0,193	2,670
2002	0,624	0,395	1,484	0,198	2,702
2003	0,648	0,411	1,536	0,210	2,805
2004	0,689	0,436	1,629	0,227	2,981
2005	0,756	0,477	1,778	0,251	3,262
2006	0,782	0,494	1,833	0,263	3,372
2007	0,804	0,500	1,844	0,269	3,417
2008	0,819	0,494	1,801	0,266	3,380
2009	0,842	0,485	1,740	0,261	3,329
2010	0,799	0,449	1,594	0,243	3,086
2011	0,762	0,417	1,466	0,226	2,872
2012	0,708	0,382	1,333	0,208	2,631
2013	0,640	0,345	1,201	0,190	2,377
2014	0,569	0,311	1,086	0,175	2,142
2015	0,579	0,312	1,083	0,177	2,151
2016	0,612	0,325	1,124	0,186	2,247
2017	0,646	0,339	1,163	0,194	2,343
2018	0,669	0,346	1,180	0,199	2,394
2019	0,682	0,347	1,176	0,200	2,404
2020	0,650	0,324	1,094	0,188	2,257

Tab. 7.22. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z autobusów dalekobieżnych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna niemetanowych lotnych związków organicznych

	E _{aNMVOC} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	0,227	0,131	0,455	0,051	0,863
2001	0,202	0,117	0,408	0,046	0,774
2002	0,204	0,118	0,410	0,047	0,779
2003	0,209	0,120	0,421	0,049	0,800
2004	0,221	0,127	0,443	0,052	0,843
2005	0,239	0,137	0,477	0,057	0,910
2006	0,239	0,137	0,479	0,058	0,914
2007	0,232	0,133	0,464	0,057	0,885
2008	0,216	0,124	0,432	0,054	0,826

	E _a NM _{VOC} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2009	0,197	0,113	0,392	0,050	0,751
2010	0,173	0,099	0,342	0,044	0,658
2011	0,156	0,089	0,307	0,040	0,591
2012	0,140	0,080	0,275	0,036	0,531
2013	0,126	0,071	0,246	0,033	0,476
2014	0,115	0,065	0,224	0,030	0,434
2015	0,112	0,063	0,217	0,030	0,422
2016	0,115	0,064	0,219	0,030	0,429
2017	0,117	0,065	0,222	0,031	0,435
2018	0,117	0,065	0,219	0,031	0,432
2019	0,114	0,063	0,212	0,031	0,420
2020	0,104	0,057	0,191	0,028	0,379

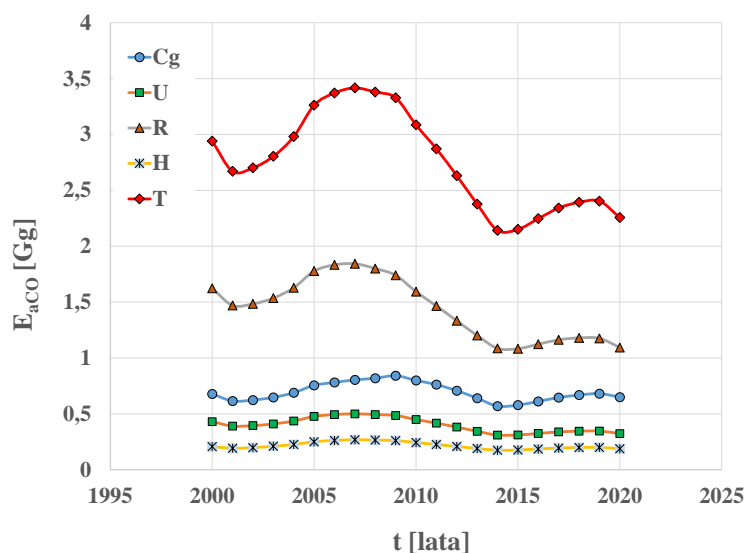
Tab. 7.23. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z autobusów dalekobieżnych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenków azotu

	E _a NO _x [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	2,32	1,69	7,92	1,21	13,14
2001	2,19	1,57	7,28	1,12	12,17
2002	2,25	1,60	7,39	1,15	12,39
2003	2,38	1,67	7,68	1,20	12,94
2004	2,55	1,78	8,11	1,29	13,72
2005	2,80	1,94	8,83	1,41	14,99
2006	2,93	2,01	9,08	1,46	15,47
2007	3,02	2,03	9,05	1,46	15,56
2008	3,05	1,99	8,75	1,42	15,21
2009	3,09	1,95	8,34	1,36	14,73
2010	2,92	1,79	7,56	1,23	13,51
2011	2,76	1,66	6,87	1,13	12,42
2012	2,56	1,51	6,21	1,02	11,31
2013	2,34	1,37	5,57	0,93	10,21
2014	2,13	1,24	5,05	0,85	9,26
2015	2,18	1,24	4,99	0,85	9,25
2016	2,31	1,30	5,13	0,88	9,60
2017	2,44	1,35	5,25	0,90	9,94
2018	2,52	1,37	5,28	0,91	10,07
2019	2,56	1,36	5,19	0,90	10,02
2020	2,43	1,27	4,77	0,83	9,30

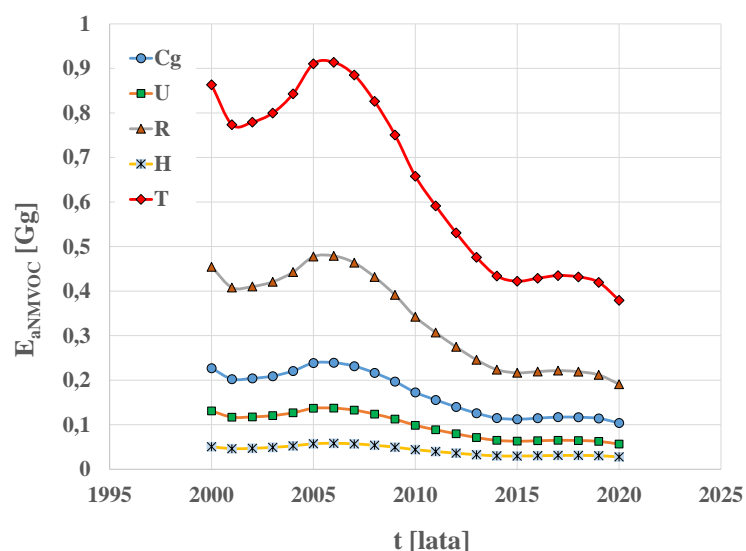
Tab. 7.24. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z autobusów dalekobieżnych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna całkowitego pyłu zawieszonego

	E _{aTSP} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	0,129	0,096	0,428	0,057	0,710
2001	0,112	0,084	0,379	0,052	0,627
2002	0,112	0,084	0,380	0,052	0,627
2003	0,111	0,084	0,383	0,053	0,631
2004	0,115	0,088	0,400	0,056	0,659
2005	0,123	0,094	0,430	0,061	0,708
2006	0,122	0,095	0,435	0,063	0,714
2007	0,118	0,092	0,426	0,062	0,698
2008	0,112	0,088	0,409	0,060	0,668
2009	0,103	0,082	0,384	0,057	0,626
2010	0,091	0,073	0,344	0,052	0,559
2011	0,082	0,066	0,312	0,047	0,507
2012	0,074	0,060	0,282	0,043	0,458
2013	0,066	0,054	0,254	0,039	0,412
2014	0,060	0,049	0,231	0,036	0,376
2015	0,059	0,049	0,232	0,036	0,375
2016	0,061	0,050	0,241	0,038	0,391
2017	0,062	0,052	0,251	0,040	0,406
2018	0,063	0,053	0,256	0,041	0,413
2019	0,062	0,053	0,256	0,042	0,413
2020	0,058	0,049	0,239	0,039	0,385

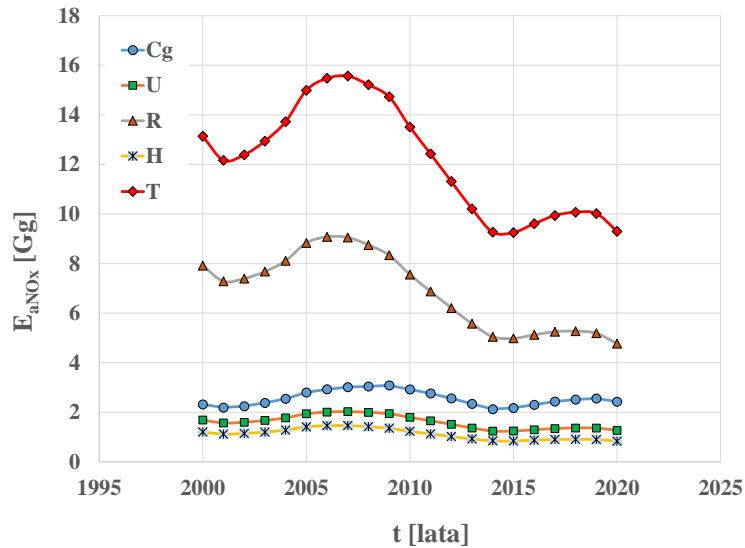
Na rysunkach 7.34 – 7.37 przedstawiono przebiegi krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z autobusów dalekobieżnych.



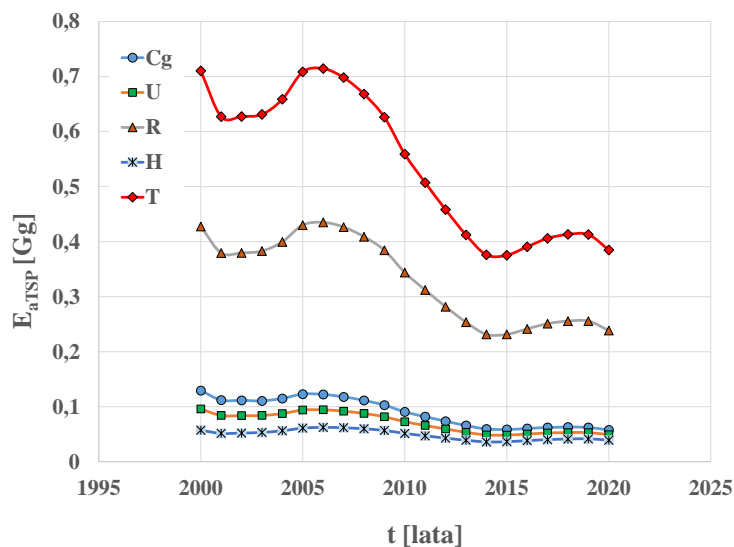
Rys. 7.34. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenku węgla – E_{aCO} z autobusów dalekobieżnych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.35. Przebieg krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych – E_{aNMVOC} z autobusów dalekobieżnych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

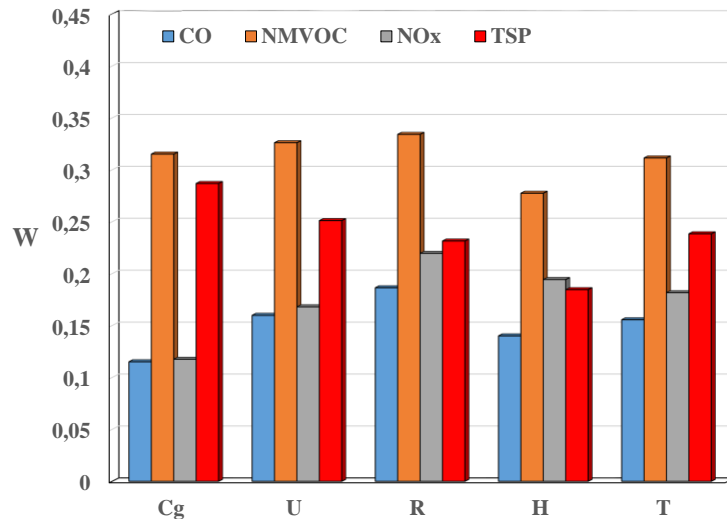


Rys. 7.36. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenków azotu – E_{aNOx} z autobusów dalekobieżnych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

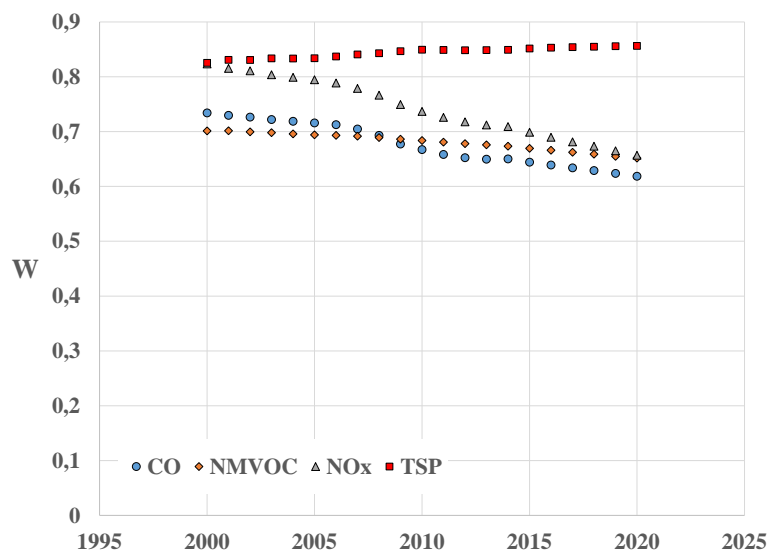


Rys. 7.37. Przebieg krajowej emisji rocznej całkowitego pyłu zawieszonego – E_{aTSP} z autobusów dalekobieżnych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

Na rysunkach 7.38 i 7.39 przedstawiono współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń w latach 2000 – 2020 z autobusów dalekobieżnych w modelowych warunkach ruchu: rysunek 7.38 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w latach 2000 – 2020, rysunek 7.39 – – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.

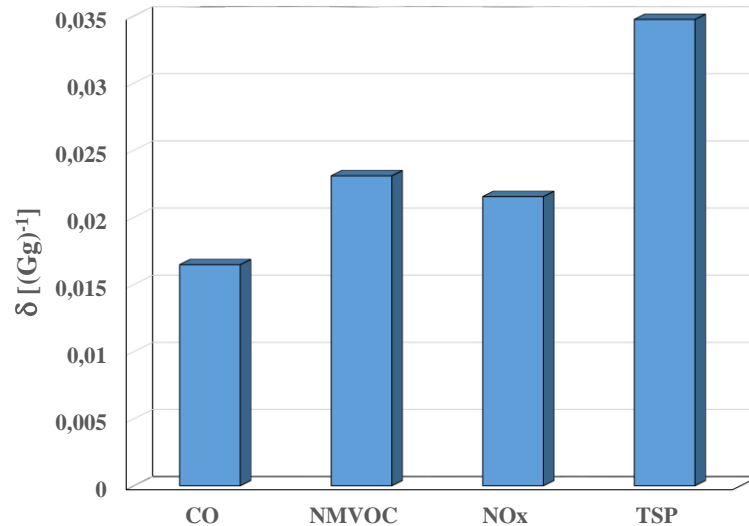


Rys. 7.38. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z autobusów dalekobieżnych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.39. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z autobusów dalekobieżnych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R oraz na autostradach i drogach ekspresowych – H

Na rysunku 7.40 przedstawiono współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – δ z autobusów dalekobieżnych w latach 2000 – 2020.



Rys. 7.40. Współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z autobusów dalekobieżnych w latach 2000 – 2020

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Od 2006 r. – 2007 r. następuje wyraźne zmniejszenie się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń mimo znacznego zwiększenia się intensywności użytkowania pojazdów. To wynik znacznej poprawy właściwości technicznych pojazdów ze względu na emisję zanieczyszczeń.
2. Zależność emisji zanieczyszczeń od warunków ruchu autobusów dalekobieżnych jest podobna dla wszystkich zanieczyszczeń.
3. Najsilniejsze są właściwości dynamiczne procesu krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych, najsłabsze – tlenku węgla i tlenków azotu.
4. Najsilniejsze jest zmniejszenie się krajowej emisji rocznej pyłów, najsłabsze – tlenku węgla.

Wyniki badań dla motocykli są przedstawione w tabelach 7.25 – 7.28.

Tab. 7.25. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z motocykli ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenku węgla

	E _{aCO} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	3,15	13,97	27,78	11,51	56,41
2001	2,82	12,55	25,09	10,38	50,85
2002	2,46	10,91	21,88	9,04	44,29
2003	2,10	9,33	18,74	7,73	37,90
2004	1,84	8,13	16,35	6,73	33,06
2005	1,70	7,46	14,96	6,19	30,30
2006	1,56	6,79	13,57	5,64	27,55
2007	1,54	6,62	13,14	5,51	26,80
2008	1,49	6,40	12,85	5,47	26,22
2009	1,38	5,92	12,05	5,20	24,56
2010	1,27	5,45	11,25	4,92	22,89
2011	1,11	4,74	10,01	4,44	20,29
2012	1,00	4,26	8,94	3,96	18,15
2013	0,93	3,96	8,42	3,78	17,09
2014	0,87	3,69	7,73	3,44	15,72
2015	0,82	3,48	7,14	3,14	14,57
2016	0,80	3,40	6,99	3,10	14,29
2017	0,81	3,41	7,04	3,13	14,39
2018	0,79	3,34	6,69	2,91	13,72
2019	0,79	3,32	6,67	2,92	13,69
2020	0,74	3,14	6,33	2,77	12,99

Tab. 7.26. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z motocykli ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna niemetanowych lotnych związków organicznych

	E _{aNMVOC} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	0,960	2,585	3,481	1,352	8,378
2001	0,913	2,438	3,312	1,294	7,957
2002	0,792	2,093	2,840	1,110	6,835
2003	0,692	1,813	2,467	0,965	5,937
2004	0,613	1,594	2,177	0,852	5,235
2005	0,559	1,444	1,966	0,766	4,734
2006	0,505	1,293	1,754	0,680	4,232
2007	0,482	1,216	1,656	0,643	3,998
2008	0,474	1,177	1,614	0,629	3,894

	E _a NM _{VOC} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2009	0,467	1,140	1,574	0,616	3,797
2010	0,443	1,049	1,448	0,571	3,510
2011	0,419	0,957	1,322	0,526	3,223
2012	0,401	0,875	1,169	0,467	2,913
2013	0,396	0,831	1,099	0,443	2,769
2014	0,387	0,780	0,987	0,399	2,554
2015	0,382	0,738	0,886	0,360	2,366
2016	0,388	0,726	0,850	0,348	2,312
2017	0,414	0,741	0,820	0,340	2,315
2018	0,440	0,755	0,790	0,332	2,317
2019	0,478	0,784	0,782	0,335	2,378
2020	0,493	0,775	0,734	0,322	2,324

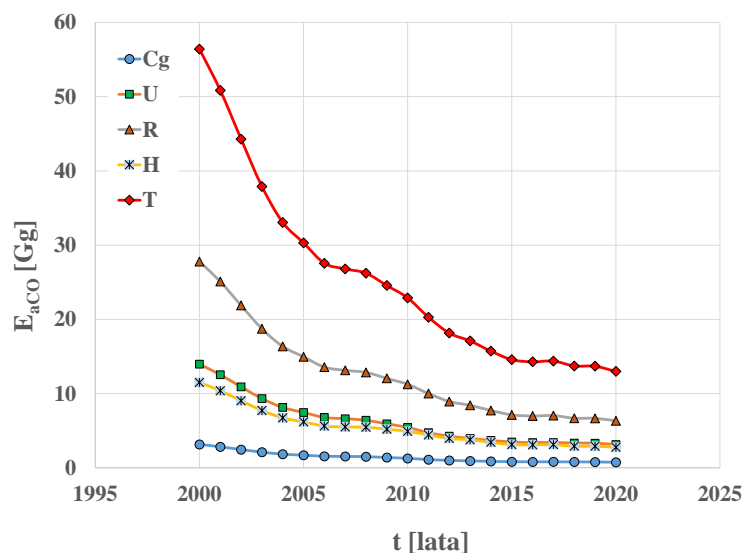
Tab. 7.27. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z motocykli ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenków azotu

	E _a NO _x [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	0,027	0,212	0,497	0,209	0,944
2001	0,023	0,186	0,437	0,183	0,830
2002	0,021	0,164	0,387	0,162	0,734
2003	0,018	0,140	0,329	0,138	0,624
2004	0,015	0,120	0,284	0,120	0,539
2005	0,014	0,110	0,261	0,112	0,496
2006	0,013	0,099	0,237	0,104	0,454
2007	0,013	0,094	0,227	0,103	0,437
2008	0,013	0,093	0,224	0,103	0,433
2009	0,012	0,088	0,214	0,099	0,413
2010	0,012	0,084	0,203	0,094	0,393
2011	0,011	0,077	0,186	0,085	0,359
2012	0,010	0,070	0,170	0,078	0,328
2013	0,009	0,068	0,163	0,076	0,316
2014	0,009	0,063	0,155	0,073	0,300
2015	0,008	0,060	0,149	0,070	0,288
2016	0,008	0,061	0,150	0,071	0,290
2017	0,009	0,062	0,154	0,073	0,297
2018	0,008	0,060	0,151	0,072	0,291
2019	0,008	0,061	0,153	0,073	0,296
2020	0,008	0,059	0,148	0,071	0,285

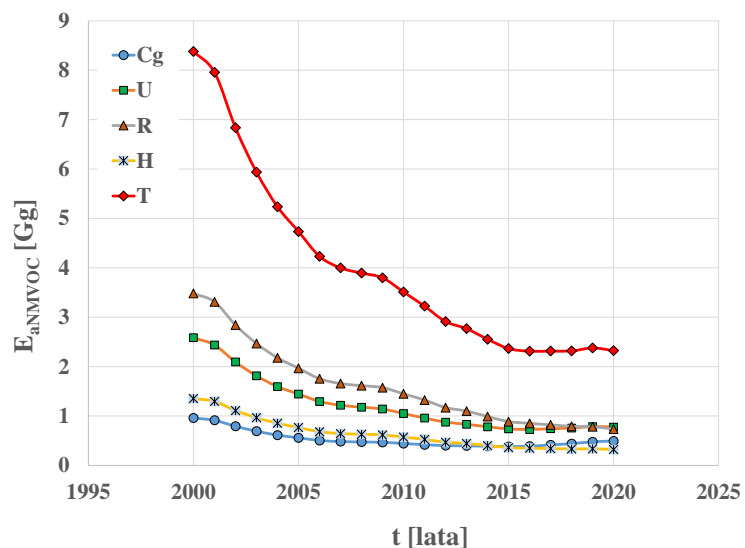
Tab. 7.28. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z motocykli ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna całkowitego pyłu zawieszonego

	E _{aTSP} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	0,0111	0,0657	0,1034	0,0299	0,2101
2001	0,0104	0,0618	0,0975	0,0282	0,1979
2002	0,0092	0,0546	0,0860	0,0249	0,1747
2003	0,0081	0,0482	0,0760	0,0220	0,1544
2004	0,0073	0,0434	0,0685	0,0199	0,1391
2005	0,007	0,040	0,063	0,018	0,1281
2006	0,0062	0,0367	0,0575	0,0166	0,1170
2007	0,0059	0,0349	0,0544	0,0157	0,1109
2008	0,0058	0,0341	0,0529	0,0152	0,1079
2009	0,0056	0,0333	0,0515	0,0148	0,1052
2010	0,005	0,031	0,047	0,014	0,0967
2011	0,0048	0,0280	0,0431	0,0124	0,0882
2012	0,0042	0,0247	0,0380	0,0109	0,0778
2013	0,0040	0,0233	0,0357	0,0102	0,0732
2014	0,0036	0,0210	0,0321	0,0092	0,0658
2015	0,0032	0,0189	0,0288	0,0083	0,0592
2016	0,0031	0,0182	0,0277	0,0079	0,0570
2017	0,0031	0,0182	0,0277	0,0079	0,0569
2018	0,0029	0,0168	0,0256	0,0073	0,0525
2019	0,0028	0,0165	0,0251	0,0072	0,0517
2020	0,0026	0,0154	0,0234	0,0067	0,0482

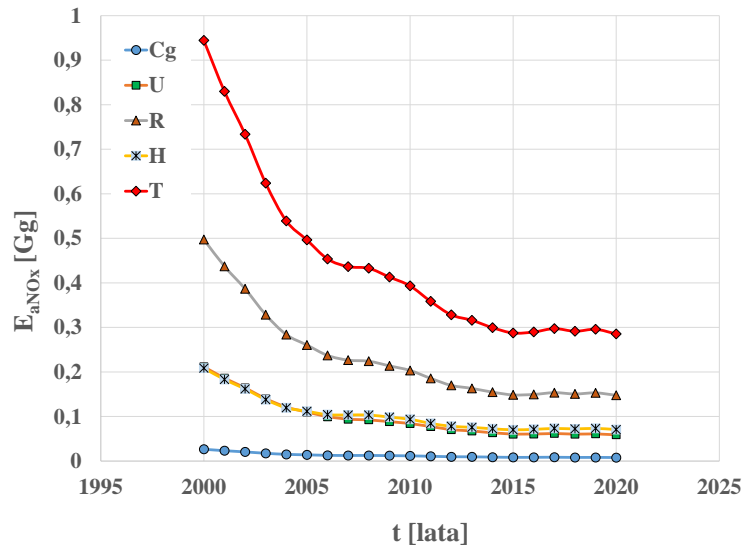
Na rysunkach 7.41 – 7.44 przedstawiono przebiegi krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z motocykli.



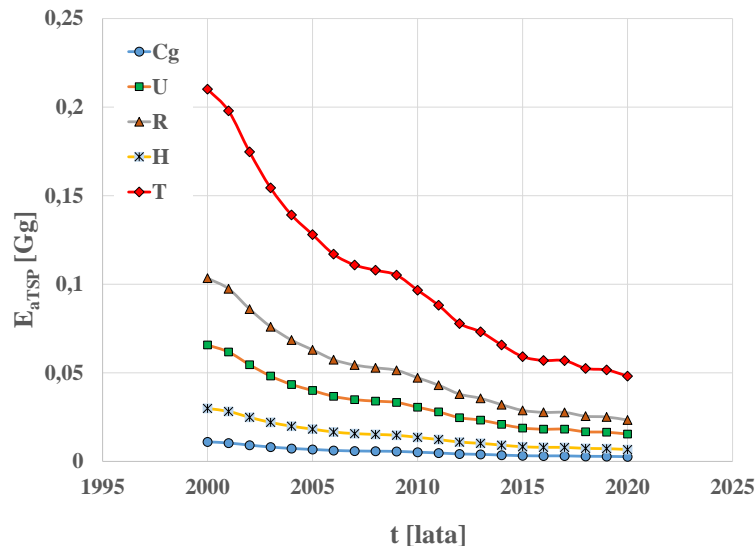
Rys. 7.41. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenku węgla – E_{aCO} z motocykli w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.42. Przebieg krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych – E_{aNMVOC} z motocykli w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

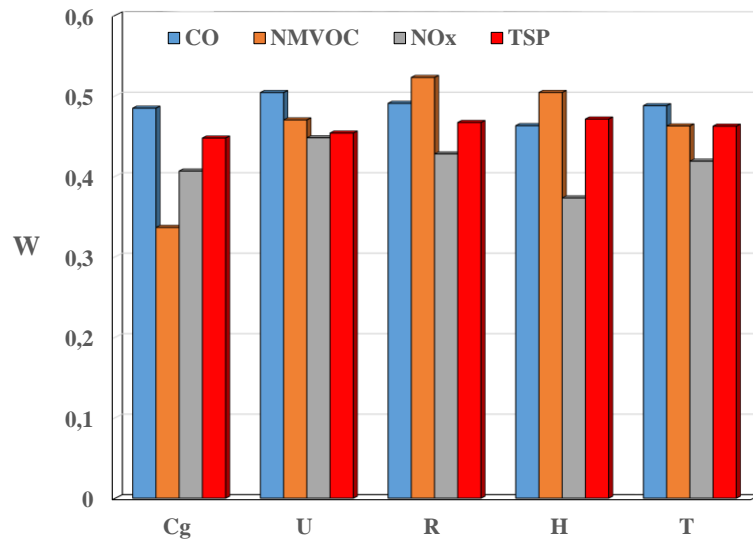


Rys. 7.43. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenków azotu – E_{aNOx} z motocykli w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

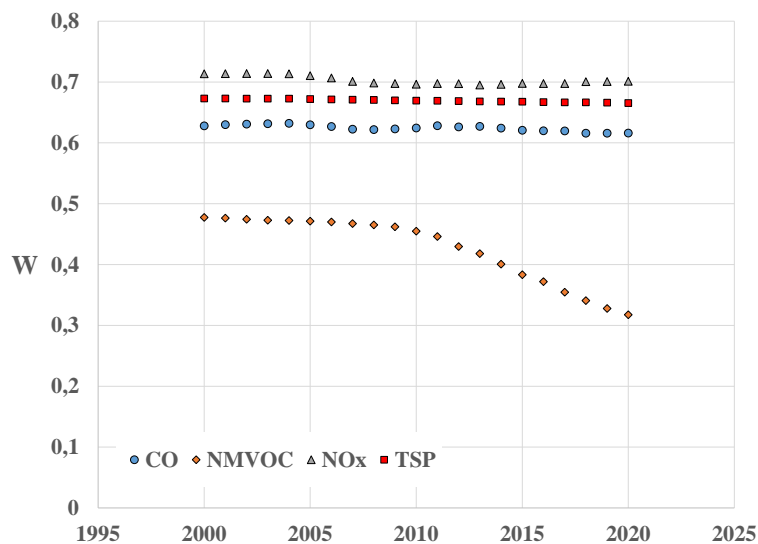


Rys. 7.44. Przebieg krajowej emisji rocznej całkowitego pyłu zawieszonego – E_{aTSP} z motocykli w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

Na rysunkach 7.45 i 7.46 przedstawiono współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń w latach 2000 – 2020 z motocykli w modelowych warunkach ruchu: rysunek 7.45 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w latach 2000 – 2020, rysunek 7.46 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.

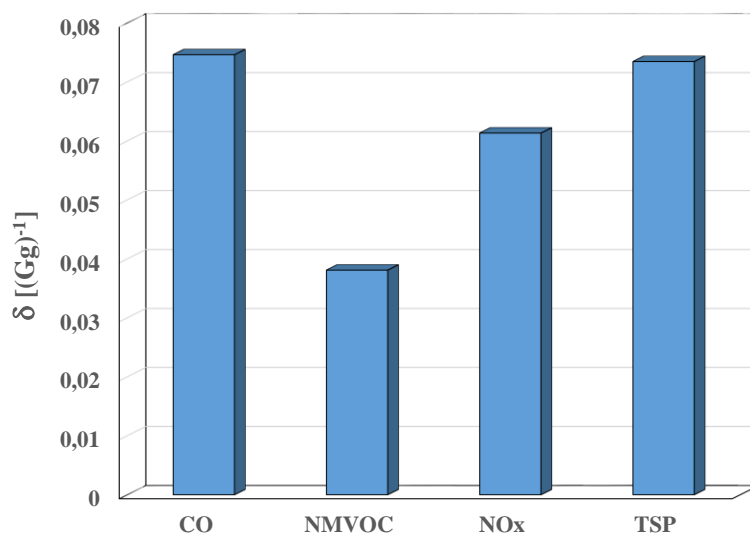


Rys. 7.45. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z motocykli w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.46. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z motocykli w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R oraz na autostradach i drogach ekspresowych – H

Na rysunku 7.47 przedstawiono współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – δ z motocykli w latach 2000 – 2020.



Rys. 7.47. Współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z motocykli w latach 2000 – 2020

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Dla wszystkich zanieczyszczeń jest wyraźna tendencja zmniejszania się krajowej emisji rocznej, mimo znacznego zwiększenia się intensywności użytkowania motocykli. Wynika to z faktu poprawy właściwości technicznych motocykli ze względu na emisję zanieczyszczeń.
2. Zależność emisji zanieczyszczeń od warunków ruchu motocykli jest podobna dla wszystkich zanieczyszczeń.
3. Nie ma dużej różnicy w wartościach współczynnika zmienności krajowej emisji rocznej poszczególnych zanieczyszczeń.
4. Najsilniejsze jest względne zmniejszenie się krajowej emisji rocznej tlenku węgla i pyłów, najslabsze – niemetanowych lotnych związków organicznych. Jest to skutek dużego udziału w kategorii motocykli silników dwusuwowych.

Wyniki badań dla motorowerów są przedstawione w tabelach 7.29 – 7.32.

Tab. 7.29. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z motorowerów ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenku węgla

	E_{aCO} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	0,145	2,029	0,725	0,000	2,898
2001	0,129	1,803	0,644	0,000	2,576
2002	0,115	1,605	0,573	0,000	2,293

	E _{aCO} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2003	0,102	1,435	0,509	0,000	2,047
2004	0,092	1,282	0,452	0,000	1,825
2005	0,084	1,175	0,408	0,000	1,667
2006	0,079	1,105	0,374	0,000	1,557
2007	0,078	1,099	0,360	0,000	1,537
2008	0,078	1,097	0,347	0,000	1,522
2009	0,082	1,149	0,353	0,000	1,584
2010	0,086	1,205	0,358	0,000	1,650
2011	0,089	1,241	0,361	0,000	1,691
2012	0,090	1,264	0,363	0,000	1,717
2013	0,097	1,356	0,374	0,000	1,827
2014	0,098	1,366	0,374	0,000	1,837
2015	0,097	1,364	0,373	0,000	1,834
2016	0,097	1,363	0,371	0,000	1,832
2017	0,096	1,344	0,366	0,000	1,807
2018	0,090	1,258	0,352	0,000	1,699
2019	0,087	1,219	0,342	0,000	1,647
2020	0,079	1,104	0,311	0,000	1,493

Tab. 7.30. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z motorowerów ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna niemetanowych lotnych związków organicznych

	E _{aNMVOC} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	0,105	1,108	0,386	0,000	1,599
2001	0,097	0,988	0,343	0,000	1,428
2002	0,088	0,877	0,303	0,000	1,268
2003	0,082	0,768	0,263	0,000	1,113
2004	0,077	0,674	0,227	0,000	0,978
2005	0,076	0,606	0,199	0,000	0,881
2006	0,079	0,559	0,176	0,000	0,815
2007	0,087	0,547	0,163	0,000	0,798
2008	0,098	0,543	0,152	0,000	0,793
2009	0,113	0,577	0,154	0,000	0,845
2010	0,128	0,614	0,157	0,000	0,899
2011	0,142	0,642	0,158	0,000	0,941
2012	0,154	0,664	0,159	0,000	0,976
2013	0,167	0,718	0,166	0,000	1,051

	E _a NM _{VOC} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2014	0,176	0,731	0,166	0,000	1,073
2015	0,183	0,736	0,165	0,000	1,084
2016	0,190	0,742	0,164	0,000	1,096
2017	0,197	0,742	0,162	0,000	1,102
2018	0,200	0,706	0,154	0,000	1,060
2019	0,208	0,697	0,149	0,000	1,055
2020	0,204	0,647	0,135	0,000	0,987

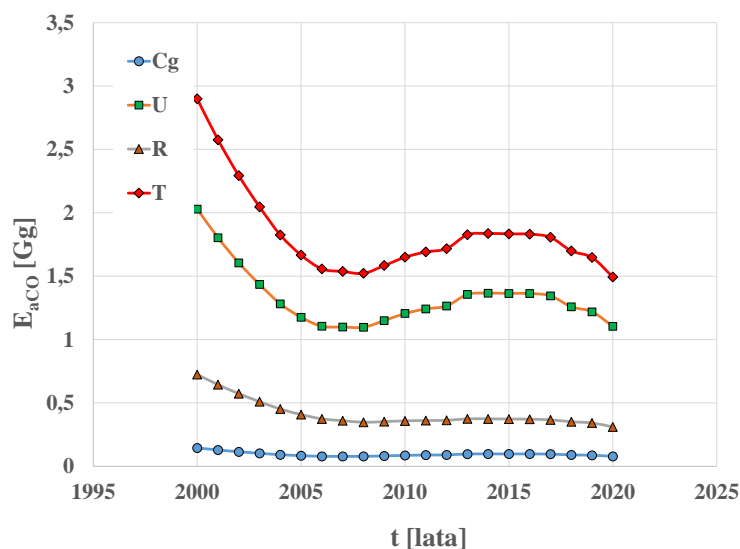
Tab. 7.31. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z motorowerów ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenków azotu

	E _a NO _x [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	0,0008	0,0116	0,0041	0,0000	0,0166
2001	0,0007	0,0103	0,0037	0,0000	0,0148
2002	0,0007	0,0093	0,0033	0,0000	0,0133
2003	0,0008	0,0114	0,0040	0,0000	0,0163
2004	0,0010	0,0133	0,0047	0,0000	0,0190
2005	0,0012	0,0169	0,0059	0,0000	0,0240
2006	0,0016	0,0222	0,0076	0,0000	0,0314
2007	0,0021	0,0297	0,0101	0,0000	0,0419
2008	0,0026	0,0371	0,0125	0,0000	0,0523
2009	0,0032	0,0446	0,0150	0,0000	0,0628
2010	0,0038	0,0526	0,0176	0,0000	0,0740
2011	0,0042	0,0582	0,0195	0,0000	0,0818
2012	0,0044	0,0618	0,0206	0,0000	0,0869
2013	0,0052	0,0733	0,0244	0,0000	0,1029
2014	0,0054	0,0752	0,0250	0,0000	0,1056
2015	0,0054	0,0754	0,0251	0,0000	0,1059
2016	0,0054	0,0758	0,0252	0,0000	0,1065
2017	0,0053	0,0749	0,0249	0,0000	0,1051
2018	0,0047	0,0657	0,0219	0,0000	0,0922
2019	0,0045	0,0630	0,0210	0,0000	0,0886
2020	0,0040	0,0562	0,0187	0,0000	0,0789

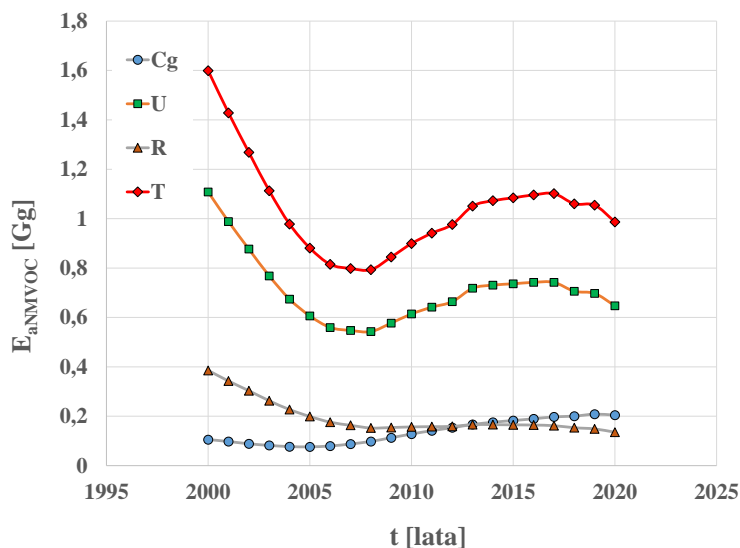
Tab. 7.32. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z motorowerów ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna całkowitego pyłu zawieszonego

	E _{aTSP} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	0,00174	0,02429	0,00868	0,00000	0,03470
2001	0,00154	0,02159	0,00771	0,00000	0,03084
2002	0,00141	0,01968	0,00703	0,00000	0,02812
2003	0,00125	0,01752	0,00626	0,00000	0,02503
2004	0,00111	0,01559	0,00556	0,00000	0,02227
2005	0,00101	0,01414	0,00504	0,00000	0,02019
2006	0,00093	0,01303	0,00463	0,00000	0,01859
2007	0,00089	0,01243	0,00440	0,00000	0,01772
2008	0,00085	0,01191	0,00421	0,00000	0,01696
2009	0,00087	0,01212	0,00427	0,00000	0,01725
2010	0,00088	0,01236	0,00434	0,00000	0,01759
2011	0,00089	0,01250	0,00438	0,00000	0,01777
2012	0,00090	0,01259	0,00441	0,00000	0,01790
2013	0,00094	0,01311	0,00457	0,00000	0,01862
2014	0,00094	0,01312	0,00457	0,00000	0,01862
2015	0,00093	0,01307	0,00455	0,00000	0,01855
2016	0,00093	0,01302	0,00453	0,00000	0,01849
2017	0,00092	0,01284	0,00447	0,00000	0,01822
2018	0,00087	0,01224	0,00427	0,00000	0,01738
2019	0,00085	0,01188	0,00415	0,00000	0,01688
2020	0,00077	0,01081	0,00378	0,00000	0,01536

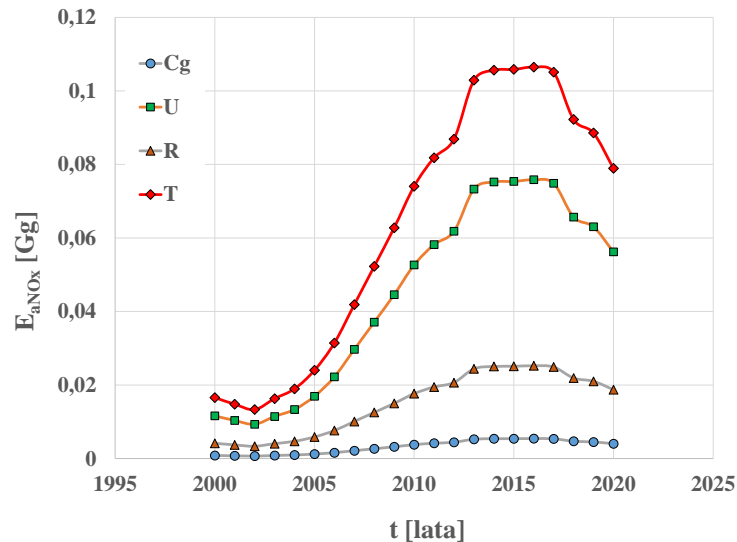
Na rysunkach 7.48 – 7.51 przedstawiono przebiegi krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z motorowerów.



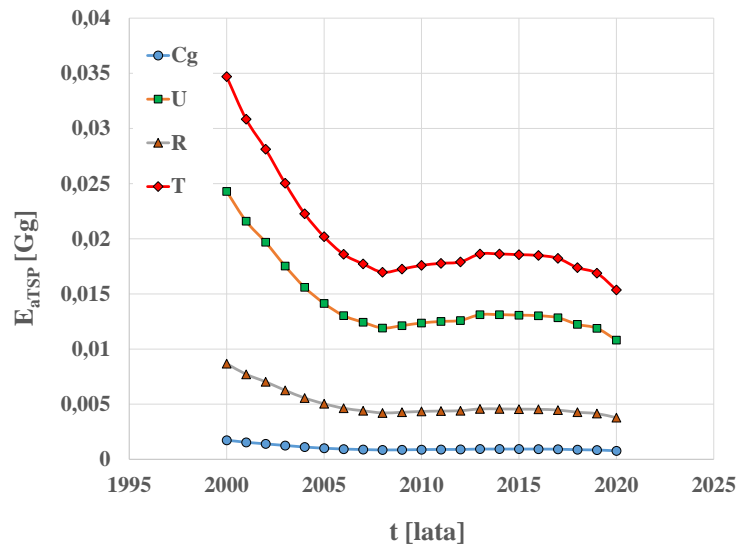
Rys. 7.48. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenku węgla – E_{aCO} z motorowerów w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.49. Przebieg krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych – E_{aNMVOC} z motorowerów w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

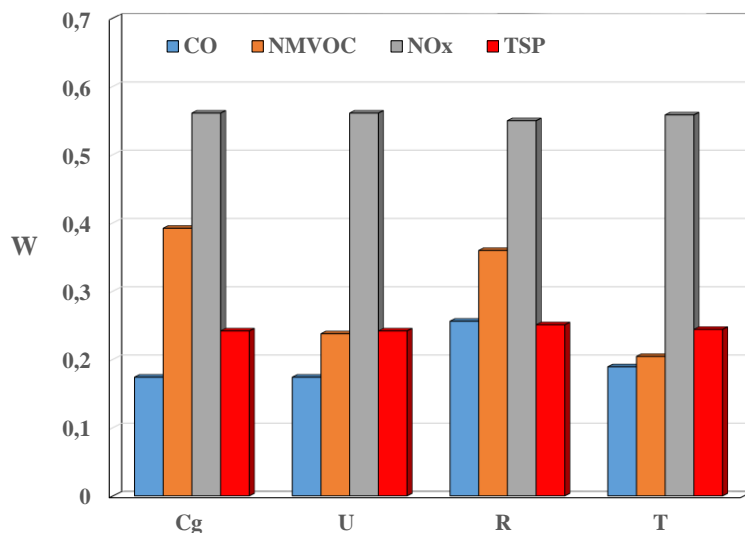


Rys. 7.50. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenków azotu – E_{aNOx} z motorowerów w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

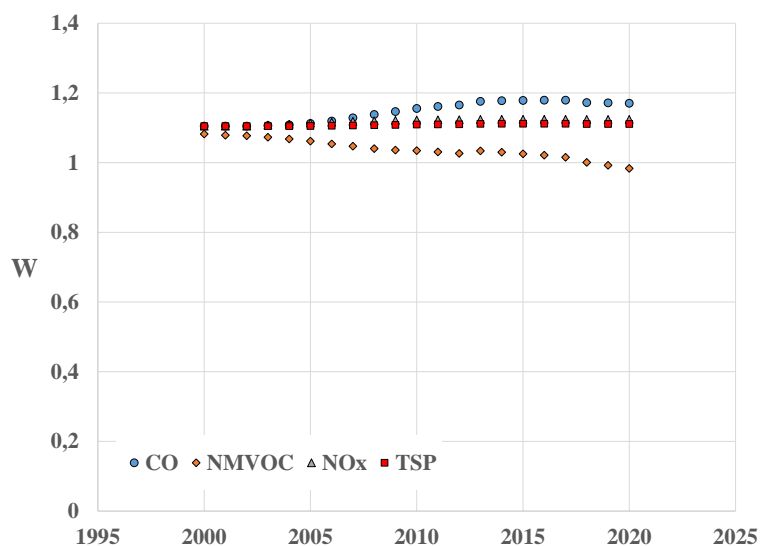


Rys. 7.51. Przebieg krajowej emisji rocznej całkowitego pyłu zawieszonego – E_{aTSP} z motorowerów w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

Na rysunkach 7.52 i 7.53 przedstawiono współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń w latach 2000 – 2020 z motorowerów w modelowych warunkach ruchu: rysunek 7.52 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w latach 2000 – 2020, rysunek 7.53 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.

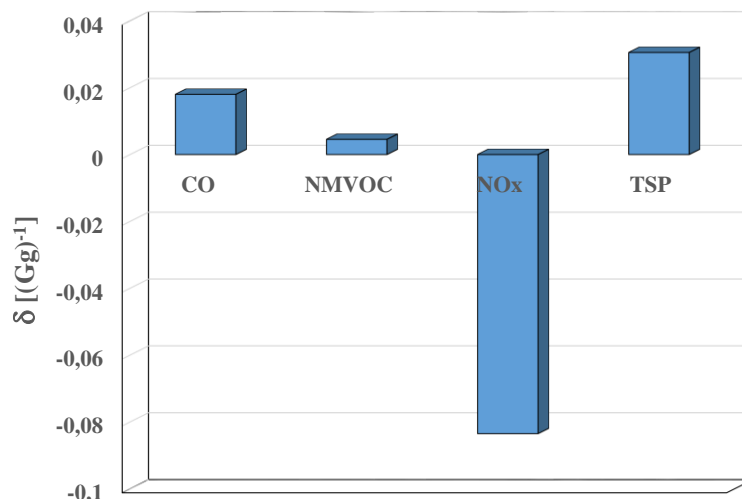


Rys. 7.52. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z motorowerów w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.53. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z motorowerów w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R oraz na autostradach i drogach ekspresowych – H

Na rysunku 7.54 przedstawiono współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – δ z motorowerów w latach 2000 – 2020.



Rys. 7.54. Współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z motorowerów w latach 2000 – 2020

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Oprócz tlenków azotu jest tendencja zmniejszania się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń, co wynika z poprawy jakości technicznej motorowerów ze względu na emisję zanieczyszczeń. Inaczej jest w wypadku tlenków azotu – w tym wypadku ma znaczenie zwiększenie się obciążenia silników motorowerów.
2. Zależność emisji zanieczyszczeń od warunków ruchu motorowerów jest podobna dla wszystkich zanieczyszczeń.
3. Najbardziej dynamiczny jest proces krajowej emisji rocznej tlenków azotu, najmniej dynamiczny – tlenku węgla i pyłów.
4. Najsilniejsze jest zmniejszenie się krajowej emisji rocznej pyłów, natomiast najsilniejsze zwiększenie się krajowej emisji rocznej jest dla tlenków azotu.

Wyniki badań dla kategorii skumulowanej pojazdów drogowych są przedstawione w tabelach 7.33 – 7.36.

Tab. 7.33. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenku węgla

	E _{aCO} [Gg]				
	C _g	U	R	H	T
2000	603,6	1020,1	185,0	66,4	1875,1
2001	490,2	846,6	148,5	58,0	1543,3
2002	430,2	753,0	130,4	54,9	1368,5

	E _{aCO} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2003	368,1	655,6	112,1	51,5	1187,3
2004	334,3	603,0	103,5	51,7	1092,6
2005	308,6	561,3	98,2	52,6	1020,8
2006	289,4	530,8	96,5	54,2	971,0
2007	273,8	508,2	92,5	53,9	928,5
2008	260,7	490,8	88,4	52,7	892,7
2009	238,2	452,9	82,8	49,6	823,5
2010	217,4	419,0	76,3	45,8	758,4
2011	196,7	384,5	68,0	41,2	690,4
2012	173,4	342,7	61,2	37,3	614,6
2013	152,4	303,7	56,3	34,9	547,4
2014	142,4	288,4	52,3	33,1	516,2
2015	134,2	275,3	49,9	32,0	491,4
2016	126,9	263,2	48,7	31,5	470,3
2017	126,2	265,8	48,2	31,4	471,6
2018	122,4	260,7	46,6	30,7	460,3
2019	116,7	252,1	44,9	29,9	443,7
2020	103,5	226,0	40,7	27,5	397,8

Tab. 7.34. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna niemetanowych lotnych związków organicznych

	E _{aNMVOC} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	67,12	108,71	28,10	7,64	211,56
2001	57,12	94,39	22,69	6,41	180,61
2002	51,72	86,28	19,82	5,68	163,51
2003	46,14	77,75	17,20	5,00	146,08
2004	43,45	73,52	16,00	4,66	137,63
2005	41,54	70,29	15,21	4,41	131,46
2006	40,01	67,88	14,73	4,30	126,92
2007	38,72	66,11	14,03	4,16	123,02
2008	37,27	64,43	13,05	3,98	118,74
2009	34,46	60,15	11,84	3,75	110,20
2010	31,66	55,98	10,53	3,48	101,66
2011	28,88	51,64	9,22	3,17	92,90
2012	25,89	46,54	8,08	2,90	83,41
2013	23,43	42,17	7,27	2,74	75,60

	E _a NM _{VOC} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2014	21,96	39,85	6,56	2,58	70,95
2015	20,85	38,04	6,08	2,47	67,45
2016	19,85	36,32	5,82	2,42	64,40
2017	19,69	36,37	5,67	2,41	64,13
2018	19,12	35,46	5,40	2,35	62,33
2019	18,43	34,33	5,14	2,31	60,21
2020	16,84	31,21	4,67	2,20	54,92

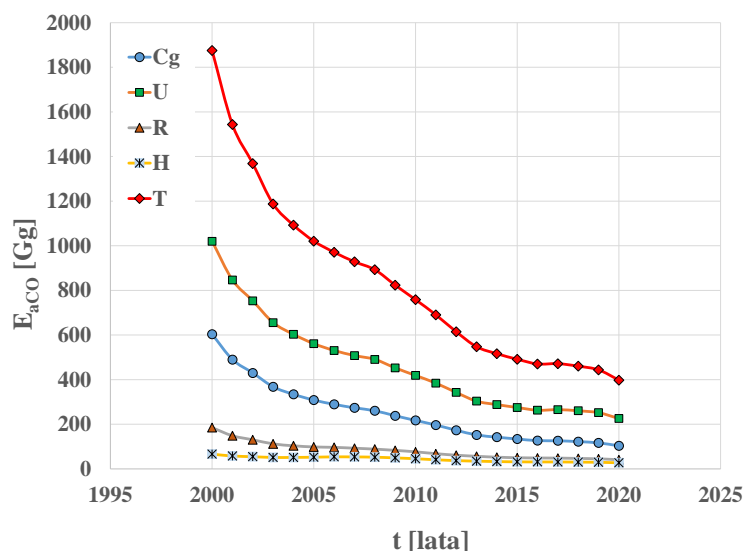
Tab. 7.35. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna tlenków azotu

	E _a NO _x [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	25,25	38,04	91,17	25,60	180,07
2001	23,47	34,26	80,51	22,12	160,36
2002	24,26	34,42	80,28	21,65	160,61
2003	25,47	34,44	82,70	21,42	164,02
2004	27,68	36,34	89,14	22,59	175,74
2005	30,96	39,53	98,64	24,63	193,76
2006	34,07	42,60	107,31	26,61	210,59
2007	36,61	44,95	113,14	28,04	222,74
2008	38,80	47,32	115,07	29,04	230,23
2009	40,71	48,77	115,20	29,51	234,18
2010	41,39	48,81	111,80	29,11	231,11
2011	40,99	47,58	105,68	27,99	222,24
2012	40,38	46,03	99,78	26,86	213,06
2013	39,53	44,29	93,96	25,76	203,53
2014	39,23	43,28	89,59	25,10	197,20
2015	40,83	44,17	89,47	25,63	200,10
2016	43,30	45,98	91,16	26,75	207,20
2017	45,74	47,99	92,61	27,83	214,17
2018	47,40	49,25	92,31	28,45	217,41
2019	48,31	49,72	90,09	28,59	216,70
2020	47,29	48,64	86,19	27,03	209,94

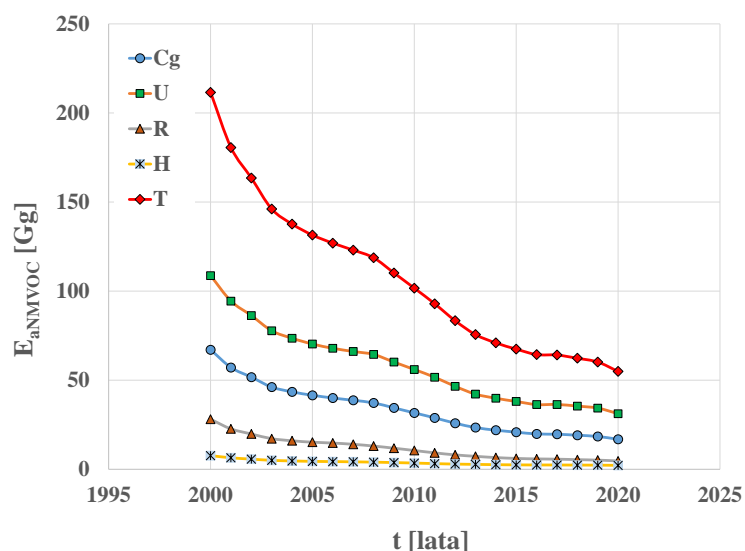
Tab. 7.36. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych ze względu na lata bilansowania – krajowa emisja roczna całkowitego pyłu zawieszzonego

	E _{aTSP} [Gg]				
	Cg	U	R	H	T
2000	2,308	3,882	5,261	1,163	12,613
2001	2,290	3,854	5,250	1,186	12,580
2002	2,272	3,827	5,238	1,209	12,546
2003	2,321	3,840	5,547	1,276	12,984
2004	2,493	4,069	6,063	1,405	14,029
2005	2,734	4,417	6,775	1,588	15,514
2006	2,915	4,703	7,402	1,754	16,773
2007	3,048	4,944	7,839	1,878	17,709
2008	3,206	5,314	8,148	2,009	18,677
2009	3,252	5,480	8,306	2,095	19,132
2010	3,209	5,505	8,201	2,109	19,025
2011	3,102	5,396	7,916	2,069	18,482
2012	2,959	5,204	7,631	2,019	17,813
2013	2,805	4,981	7,358	1,971	17,116
2014	2,730	4,908	7,238	1,962	16,838
2015	2,783	5,055	7,479	2,048	17,364
2016	2,908	5,330	7,897	2,186	18,322
2017	3,069	5,692	8,308	2,323	19,392
2018	3,171	5,942	8,577	2,424	20,114
2019	3,130	5,937	8,456	2,418	19,940
2020	3,088	5,931	8,335	2,412	19,766

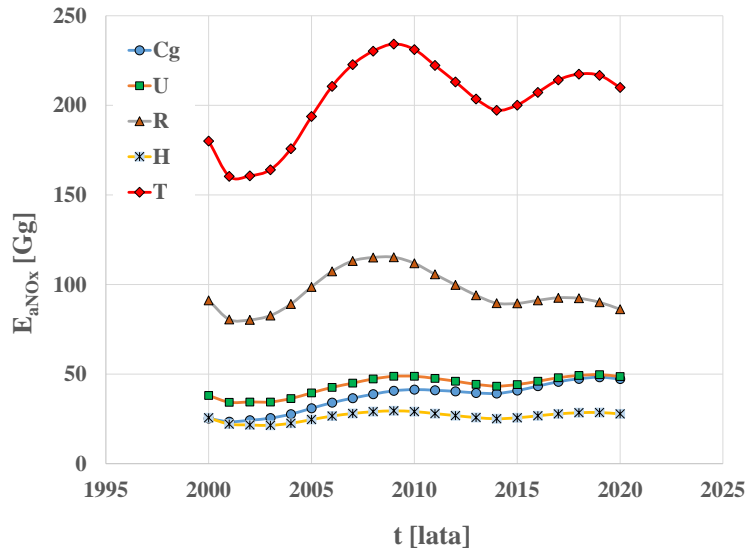
Na rysunkach 7.55 – 7.58 przedstawiono przebiegi krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z pojazdów drogowych.



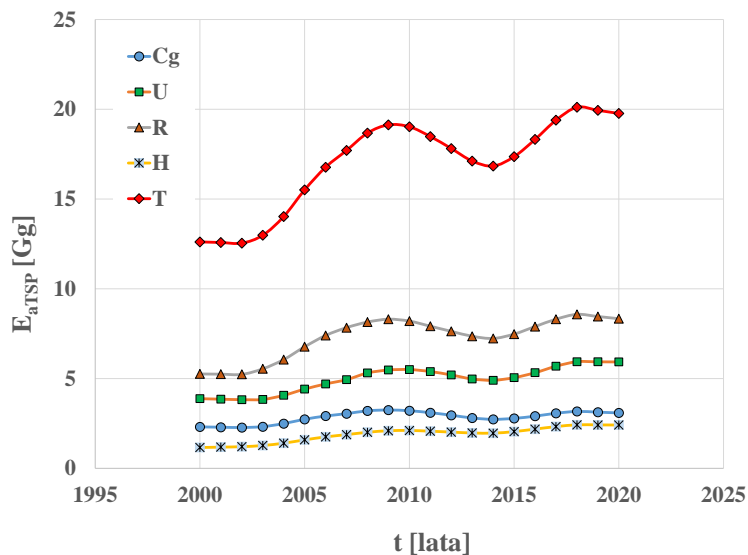
Rys. 7.55. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenku węgla – E_{aCO} z pojazdów drogowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.56. Przebieg krajowej emisji rocznej niemetanowych lotnych związków organicznych – E_{aNMVOC} z pojazdów drogowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

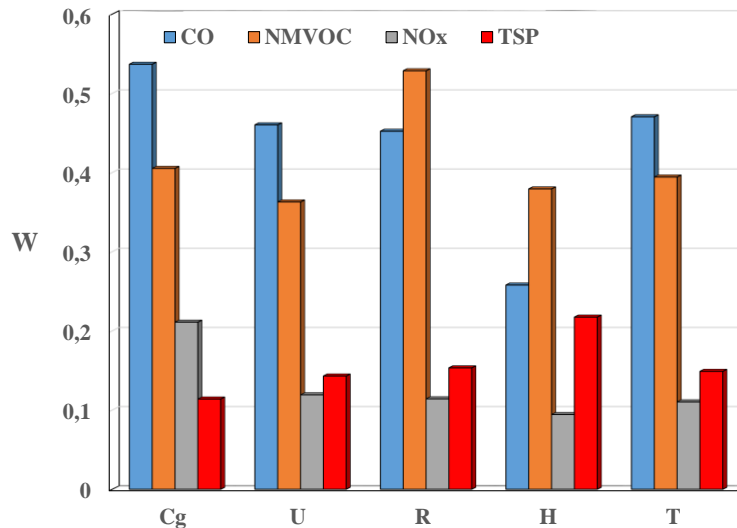


Rys. 7.57. Przebieg krajowej emisji rocznej tlenków azotu – E_{aNOx} z pojazdów drogowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

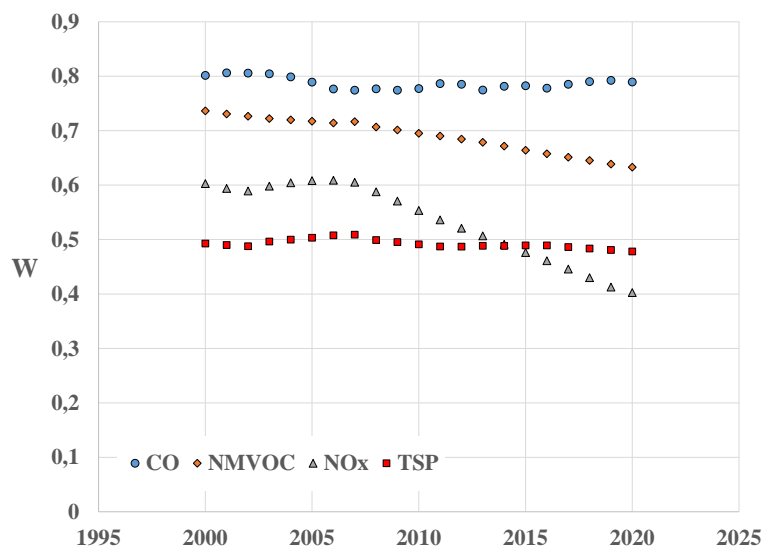


Rys. 7.58. Przebieg krajowej emisji rocznej całkowitego pyłu zawieszonego – E_{aTSP} z pojazdów drogowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T

Na rysunkach 7.59 i 7.60 przedstawiono współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń w latach 2000 – 2020 z pojazdów drogowych w modelowych warunkach ruchu: rysunek 7.59 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w latach 2000 – 2020, rysunek 7.60 – współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń względem wartości w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.

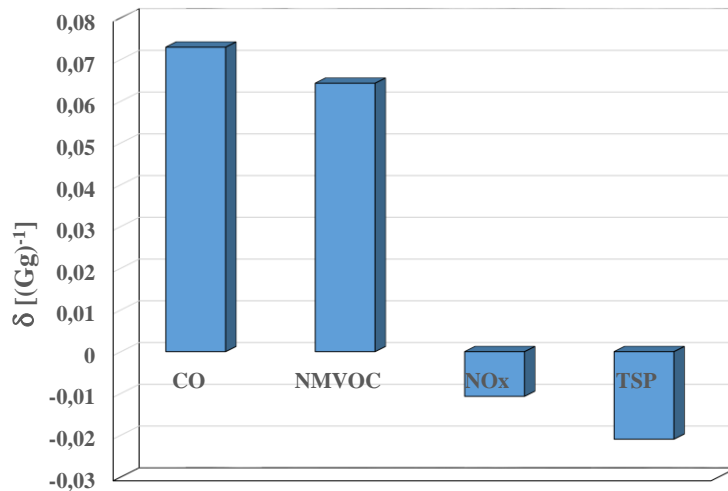


Rys. 7.59. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z pojazdów drogowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R, na autostradach i drogach ekspresowych – H oraz we wszystkich warunkach ruchu – T



Rys. 7.60. Współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – W w latach 2000 – 2020 z pojazdów drogowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych – Cg, w miastach poza zatorami ulicznymi – U, poza miastami – R oraz na autostradach i drogach ekspresowych – H

Na rysunku 7.61 przedstawiono współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń – δ z pojazdów drogowych w latach 2000 – 2020.



Rys. 7.61. Współczynnik zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z pojazdów drogowych w latach 2000 – 2020

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. W wypadku tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych jednoznaczna jest tendencja zmniejszania się krajowej emisji zanieczyszczeń mimo znacznego zwiększenia się intensywności użytkowania pojazdów. Jest to wynik znacznej poprawy właściwości technicznej pojazdów ze względu na emisje zanieczyszczeń.
2. Dla tlenków azotu i całkowitego pyłu zawieszonego nie ma tak wyraźnego trendu jak dla tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych. W tym wypadku decydujące jest znaczne zwiększenie się intensywności użytkowania pojazdów. Poza tym skuteczność zmniejszania emisji tlenków azotu i cząstek stałych jest mniejsza od skuteczności zmniejszania emisji tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych.
3. Zależność emisji zanieczyszczeń od warunków ruchu pojazdów samochodowych jest podobna dla wszystkich zanieczyszczeń.
4. Największy jest współczynnik zmienności krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń dla tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych.
5. Najsilniejsze jest zmniejszenie się krajowej emisji rocznej tlenku węgla i niemetanowych lotnych związków organicznych, natomiast dla tlenków azotu i całkowitych pyłów zawieszonych następuje zwiększenie się krajowej emisji rocznej.

7.4. Badania modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na modelowe warunki ruchu pojazdów

Badania modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na parametry modelu dotyczą oceny wrażliwości charakterystyk emisji zanieczyszczeń z samochodów na modelowe warunki ruchu pojazdów, scharakteryzowane prędkością średnią w modelowych warunkach ruchu. Badania wykonano z wykorzystaniem oprogramowania HBEFA INFRAS [60].

Jako charakterystykę emisji zanieczyszczeń przyjęto emisję drogową zanieczyszczeń.

W tabeli 7.37 przedstawiono program badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na parametry modelu w 2020 r.

Tab. 7.37. Program badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na prędkość średnią samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu

Numer v w wersjach badań		1	2	3	4	5
v_{Cg}	[km/h]	4	5	6	7	8
v_U		30	35	40	45	50
v_R		60	65	70	75	80
v_H		100	105	110	115	120

Wyniki badań przedstawiono w tabelach 7.38 – 7.41.

Tab. 7.38. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na prędkość średnią samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu – emisja drogowa tlenku węgla w modelowych warunkach ruchu

	b_{CO}				
	g/km				
	Numer v w wersjach badań				
	1	2	3	4	5
v_{Cg}	0,405	0,396	0,386	0,377	0,368
v_U	0,212	0,189	0,170	0,156	0,146
v_R	0,140	0,144	0,152	0,165	0,182
v_H	0,296	0,336	0,380	0,429	0,482

Tab. 7.39. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na prędkość średnią samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu – emisja drogowa niemetanowych lotnych związków organicznych w modelowych warunkach ruchu

	b _{NMVOC}				
	g/km				
	Numer v w wersjach badań				
	1	2	3	4	5
v _{Cg}	0,0281	0,0277	0,0272	0,0267	0,0263
v _U	0,0178	0,0163	0,0149	0,0137	0,0126
v _R	0,0109	0,0103	0,0098	0,0095	0,0093
v _H	0,0101	0,0107	0,0114	0,0123	0,0133

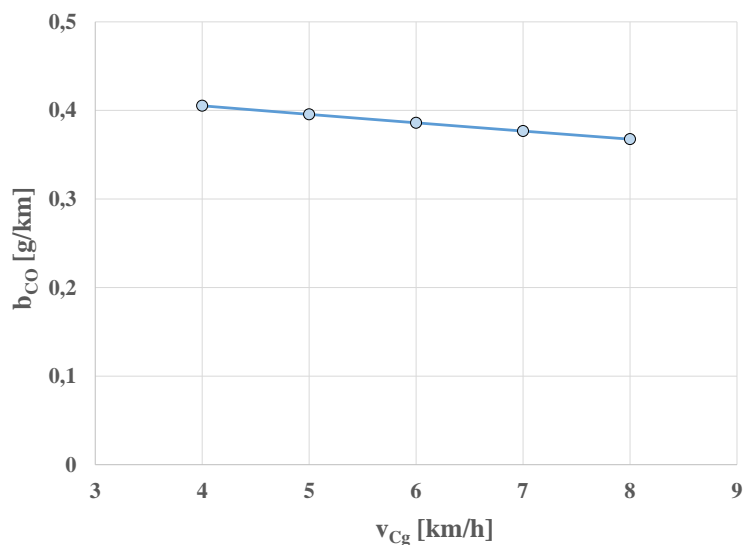
Tab. 7.40. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na prędkość średnią samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu – emisja drogowa tlenków azotu w modelowych warunkach ruchu

	b _{NO_x}				
	g/km				
	Numer v w wersjach badań				
	1	2	3	4	5
v _{Cg}	0,417	0,409	0,402	0,394	0,387
v _U	0,248	0,223	0,201	0,181	0,164
v _R	0,137	0,127	0,120	0,115	0,113
v _H	0,129	0,139	0,152	0,167	0,185

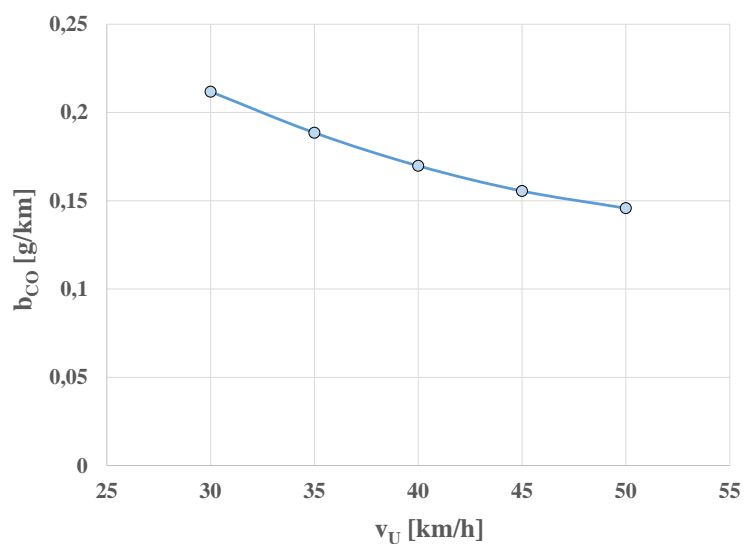
Tab. 7.41. Wyniki badań modelu emisji zanieczyszczeń z samochodów osobowych ze względu na prędkość średnią samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu – emisja drogowa całkowitego pyłu zawieszonego w modelowych warunkach ruchu

	b _{TSP}				
	g/km				
	Numer v w wersjach badań				
	1	2	3	4	5
v _{Cg}	0,00551	0,00542	0,00533	0,00524	0,00515
v _U	0,00362	0,00338	0,00318	0,00302	0,00290
v _R	0,00278	0,00278	0,00282	0,00290	0,00302
v _H	0,00390	0,00422	0,00458	0,00498	0,00542

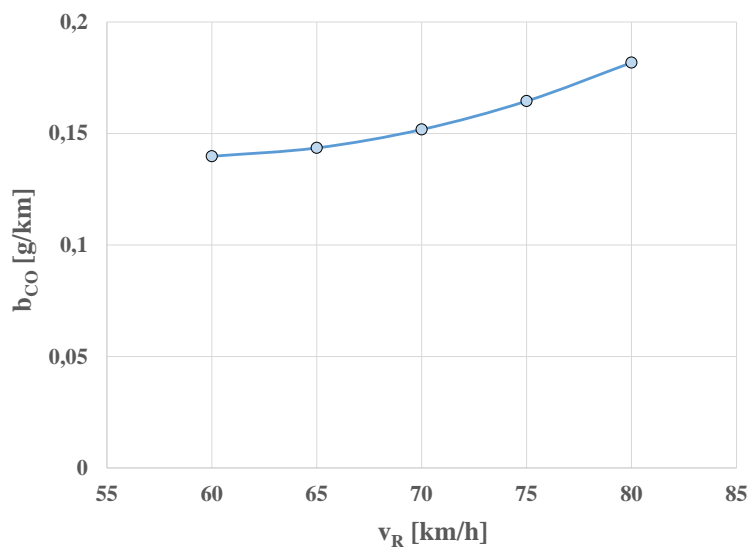
Na rysunkach 7.62 – 7.84 przedstawiono wyniki badań wrażliwości krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń na prędkość średnią samochodów osobowych w modelowych warunkach ruchu.



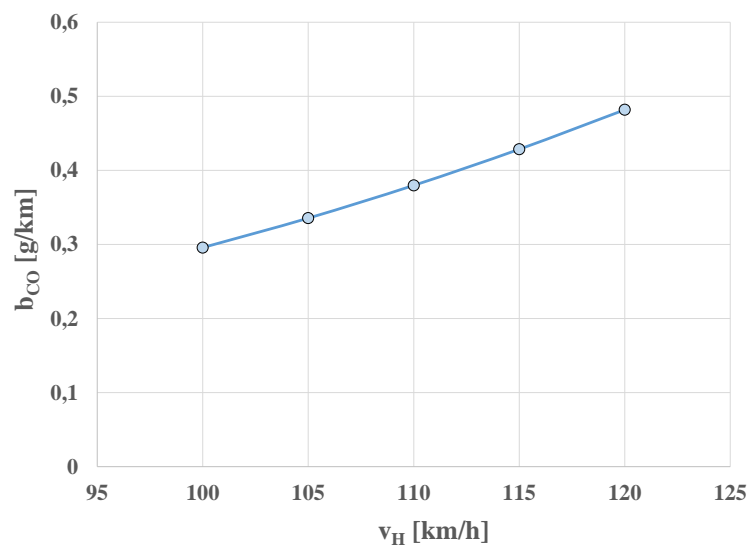
Rys. 7.62. Zależność emisji drogowej tlenku węgla w zatorach ulicznych – b_{CO} z samochodów osobowych od prędkości średniej



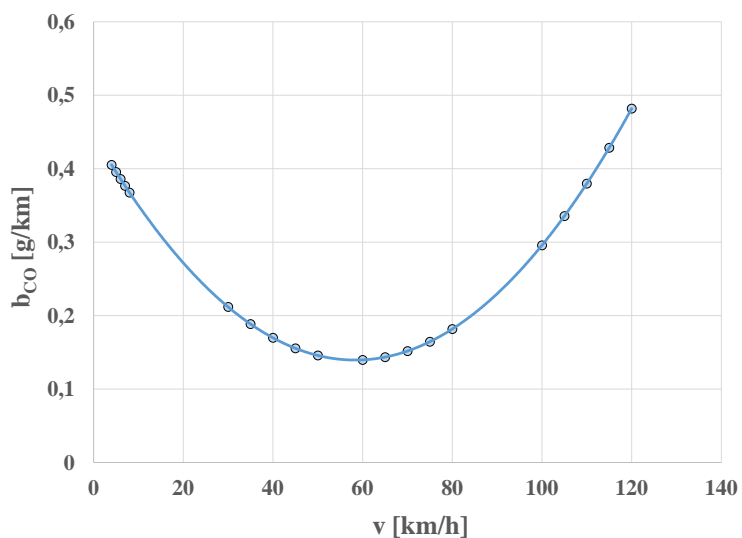
Rys. 7.63. Zależność emisji drogowej tlenku węgla w miastach poza zatorami ulicznymi – b_{CO} z samochodów osobowych od prędkości średniej



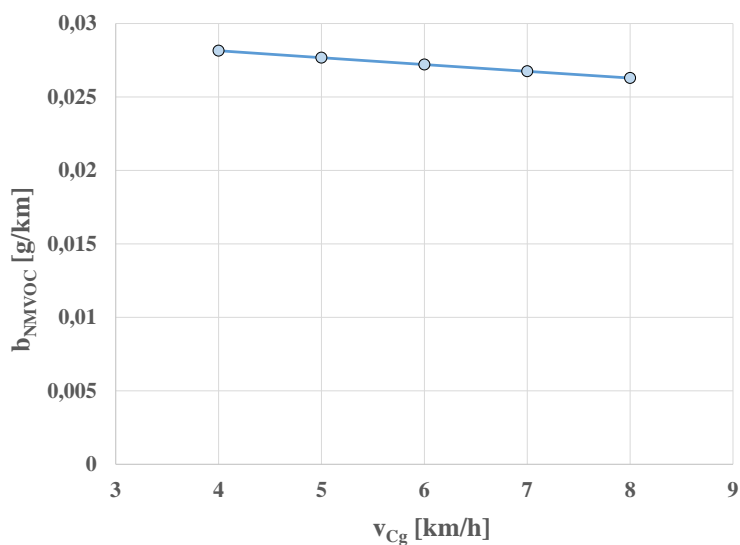
Rys. 7.64. Zależność emisji drogowej tlenku węgla poza miastami – b_{CO} z samochodów osobowych od prędkości średniej



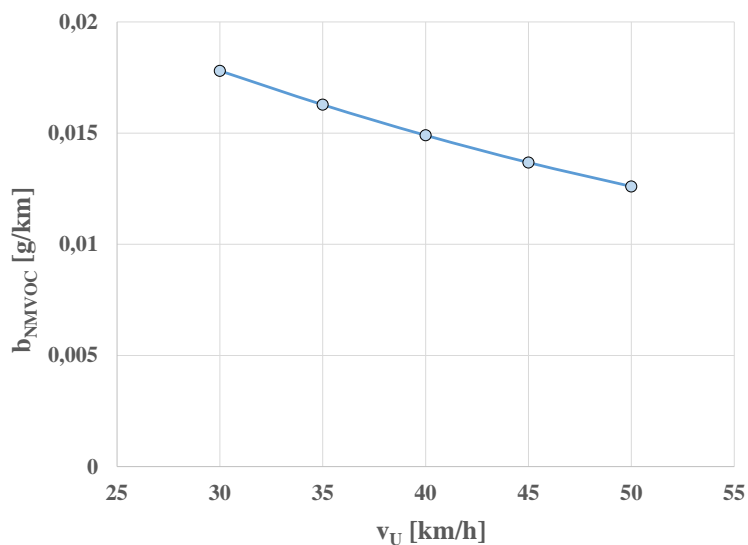
Rys. 7.65. Zależność emisji drogowej tlenku węgla na autostradach i drogach ekspresowych – b_{CO} z samochodów osobowych od prędkości średniej



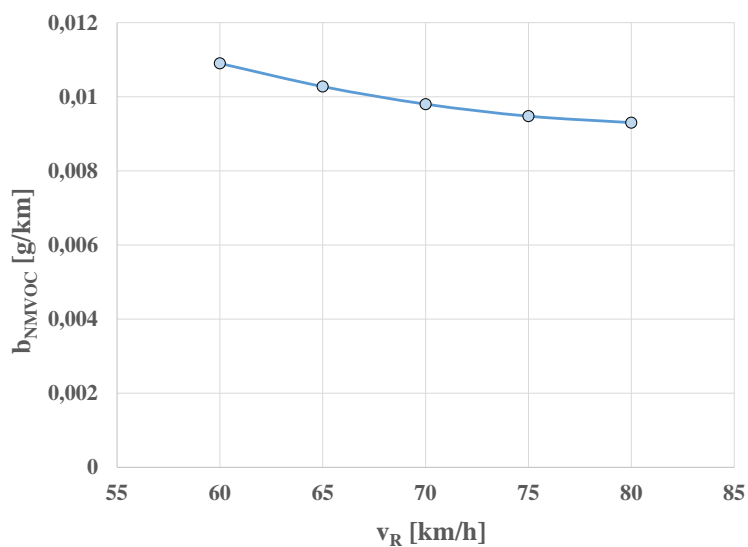
Rys. 7.66. Zależność emisji drogowej tlenku węgla w modelowych warunkach ruchu – b_{CO} z samochodów osobowych od prędkości średniej



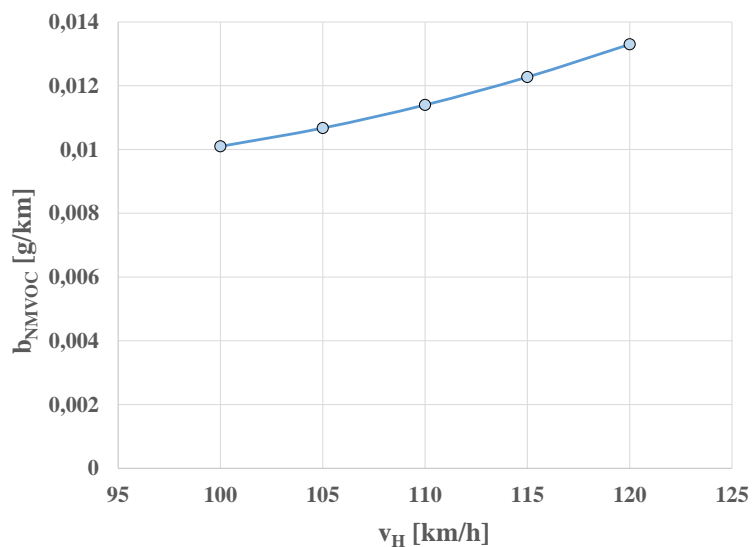
Rys. 7.67. Zależność emisji drogowej niemetanowych lotnych związków organicznych w zatorach ulicznych – b_{NMVOC} z samochodów osobowych od prędkości średniej



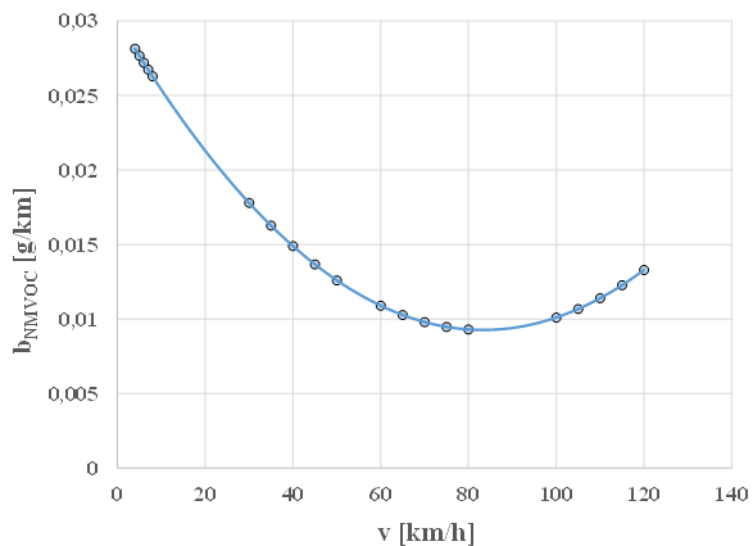
Rys. 7.68. Zależność emisji drogowej niemetanowych lotnych związków organicznych w miastach poza zatorami ulicznymi – b_{NMVOC} z samochodów osobowych od prędkości średniej



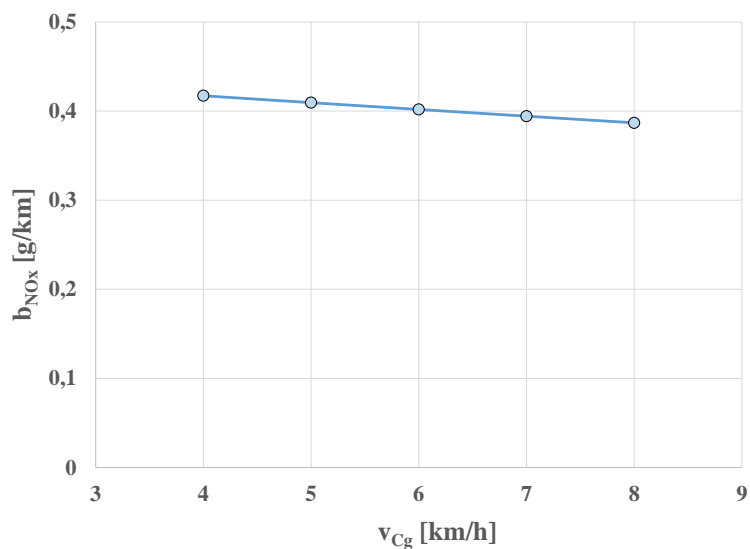
Rys. 7.69. Zależność emisji drogowej niemetanowych lotnych związków organicznych poza miastami – b_{NMVOC} z samochodów osobowych od prędkości średniej



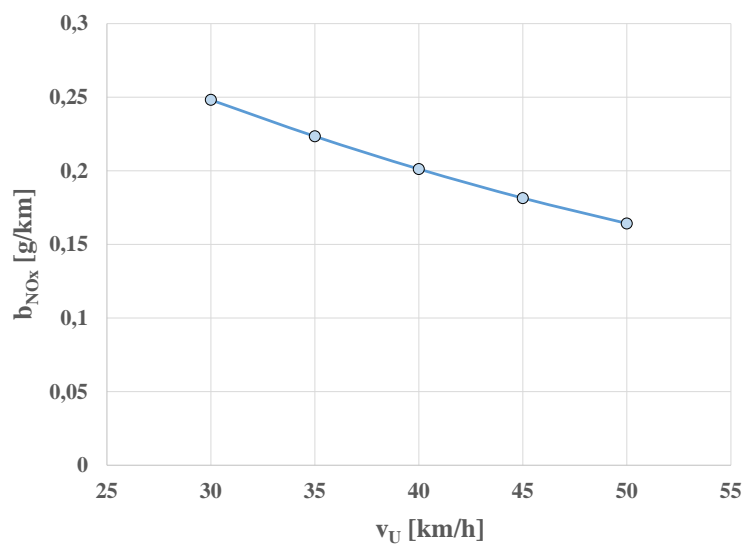
Rys. 7.70. Zależność emisji drogowej niemetaanowych lotnych związków organicznych na autostradach i drogach ekspresowych – b_{NMVOC} z samochodów osobowych od prędkości średniej



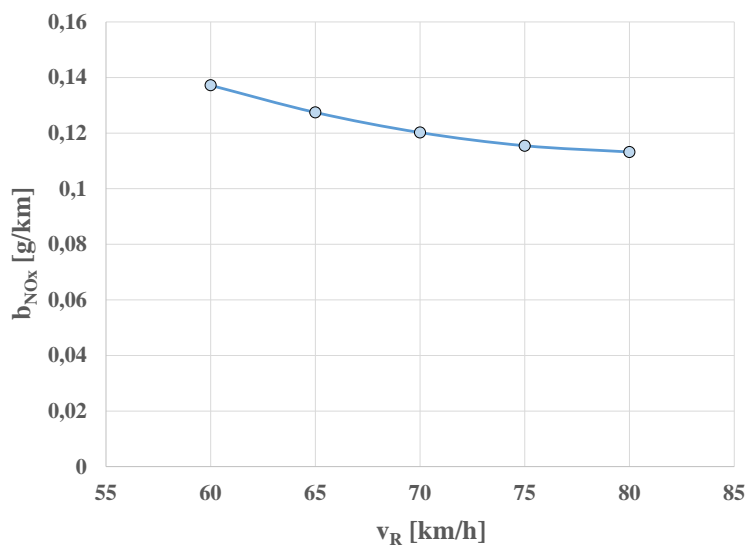
Rys. 7.71. Zależność emisji drogowej tlenku węgla w modelowych warunkach ruchu – b_{NMVOC} z samochodów osobowych od prędkości średniej



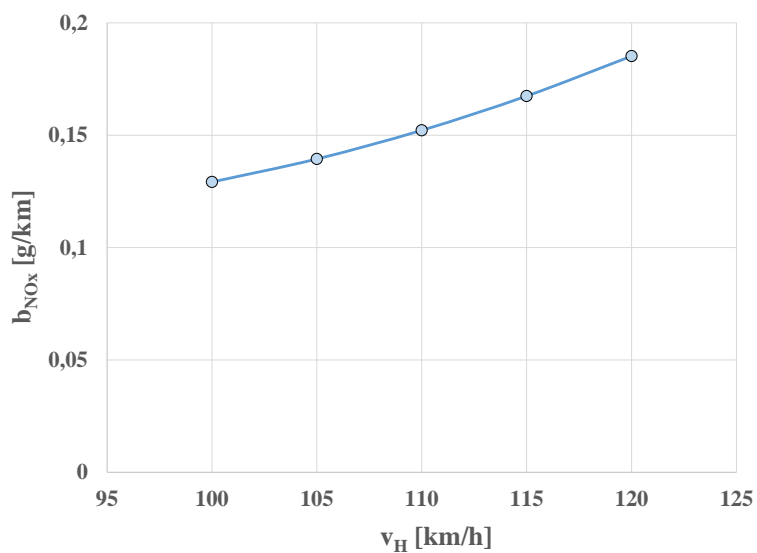
Rys. 7.72. Zależność emisji drogowej tlenków azotu w zatorach ulicznych – b_{NOx} z samochodów osobowych od prędkości średniej



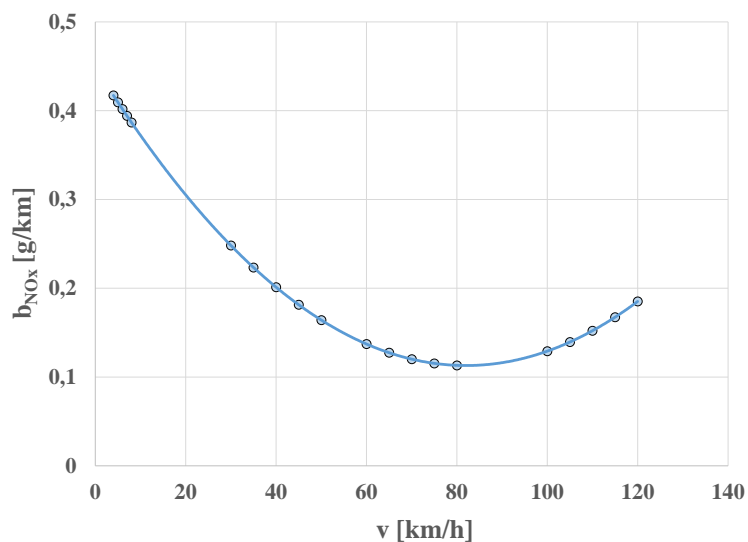
Rys. 7.73. Zależność emisji drogowej tlenków azotu w miastach poza zatorami ulicznymi – b_{NOx} z samochodów osobowych od prędkości średniej



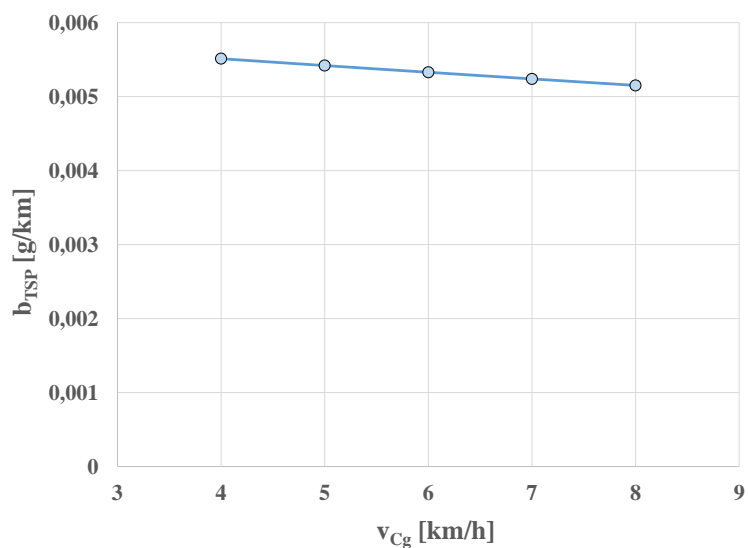
Rys. 7.74. Zależność emisji drogowej tlenków azotu poza miastami – b_{NOx} z samochodów osobowych od prędkości średniej



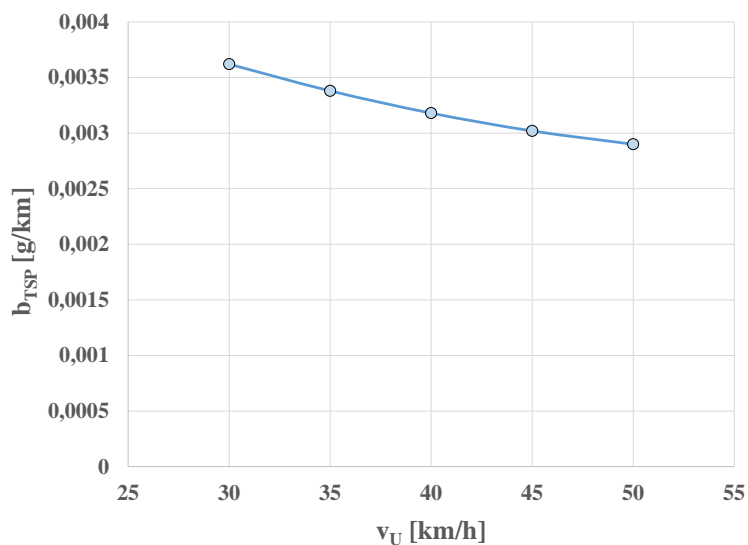
Rys. 7.75. Zależność emisji drogowej tlenków azotu na autostradach i drogach ekspresowych – b_{NOx} z samochodów osobowych od prędkości średniej



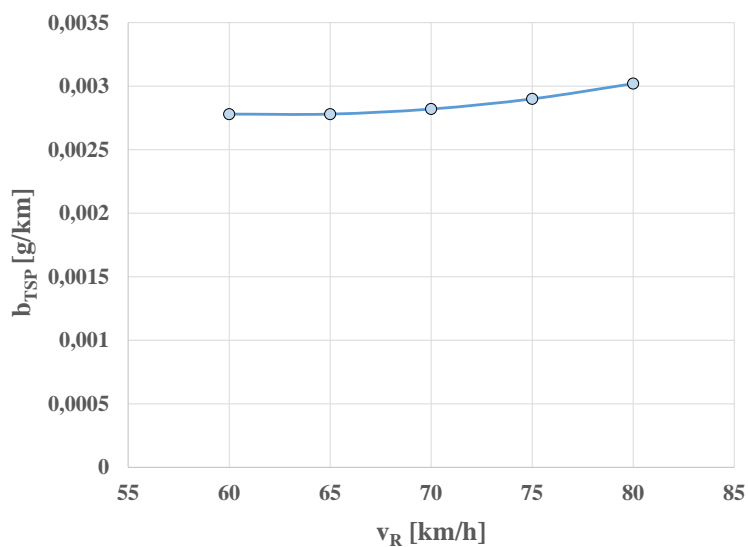
Rys. 7.76. Zależność emisji drogowej tlenku węgla w modelowych warunkach ruchu – b_{NOx} z samochodów osobowych od prędkości średniej



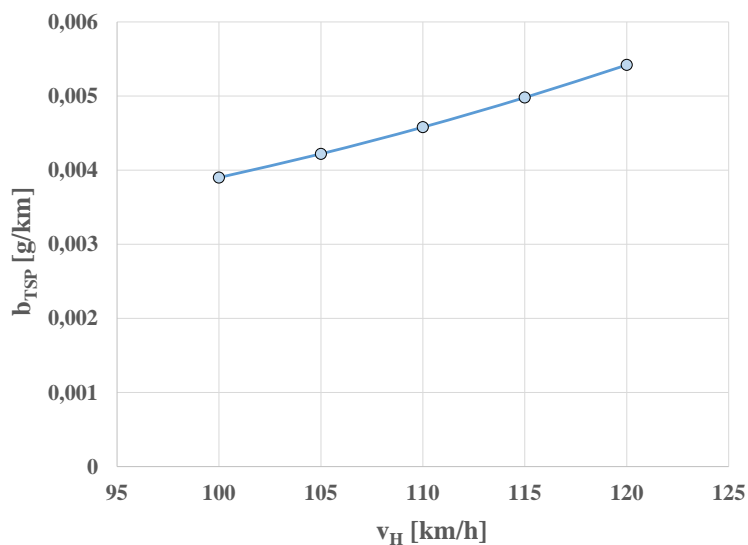
Rys. 7.77. Zależność emisji drogowej całkowitego pyłu zawieszonego w zatorach ulicznych – b_{TSP} z samochodów osobowych od prędkości średniej



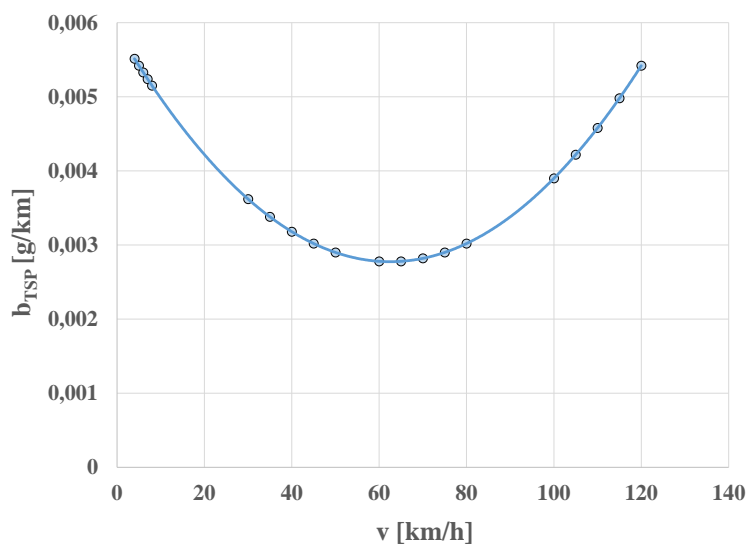
Rys. 7.78. Zależność emisji drogowej całkowitego pyłu zawieszonego w miastach poza zatorami ulicznymi – b_{TSP} z samochodów osobowych od prędkości średniej



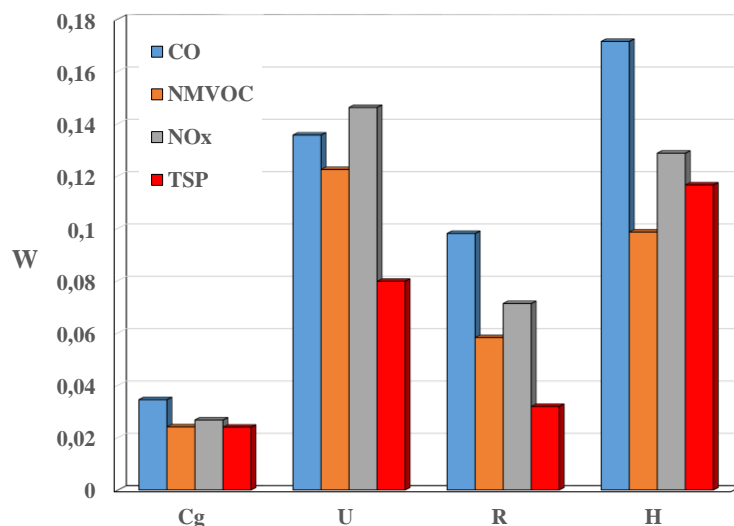
Rys. 7.79. Zależność emisji drogowej całkowitego pyłu zawieszonego poza miastami – b_{TSP} z samochodów osobowych od prędkości średniej



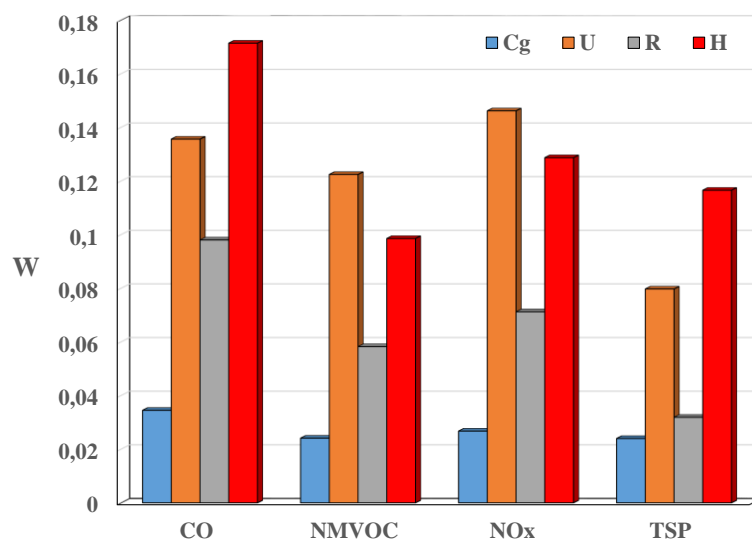
Rys. 7.80. Zależność emisji drogowej całkowitego pyłu zawieszonego na autostradach i drogach ekspresowych – b_{TSP} z samochodów osobowych od prędkości średniej



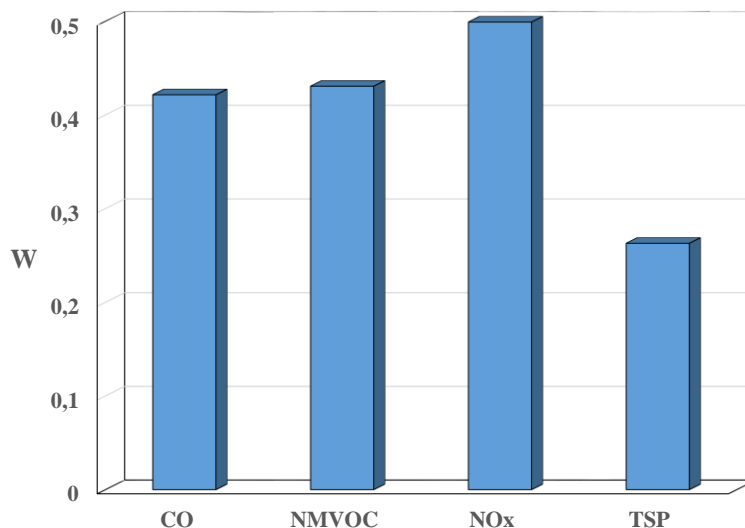
Rys. 7.81. Zależność emisji drogowej tlenku węgla w modelowych warunkach ruchu – b_{TSP} z samochodów osobowych od prędkości średniej



Rys. 7.82. Współczynnik zmienności emisji drogowej zanieczyszczeń w poszczególnych modelowych warunkach ruchu – W z samochodów osobowych



Rys. 7.83. Współczynnik zmienności emisji drogowej zanieczyszczeń w poszczególnych modelowych warunkach ruchu – W z samochodów osobowych



Rys. 7.84. Współczynnik zmienności emisji drogowej zanieczyszczeń we wszystkich modelowych warunkach ruchu – W z samochodów osobowych

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Zależność emisji drogowej zanieczyszczeń z samochodów osobowych od prędkości średniej wykazuje znacząco regularność w zakresach prędkości średniej, odpowiadającej jeździe w warunkach: zatorów ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.
2. Największy jest współczynnik zmienności emisji drogowej zanieczyszczeń w poszczególnych modelowych warunkach ruchu dla tlenku węgla, najmniejszy dla niemetanowych lotnych związków organicznych i pyłów.
3. Największy jest współczynnik zmienności emisji drogowej zanieczyszczeń we wszystkich modelowych warunkach ruchu dla tlenków azotu, najmniejszy – dla pyłów.

7.5. Podsumowanie wyników badań modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych

Badania modelu emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych w Polsce w latach 2000 – 2020 uprawniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Krajowa emisja roczna zanieczyszczeń z pojazdów drogowych w Polsce w latach 2000 – 2020 wykazuje w znacznej mierze tendencję do wyraźnego zmniejszenia się mimo dynamicznego zwiększania się intensywności motoryzacji. To skutek poprawy poziomu technicznego pojazdów drogowych o znacznie lepszych właściwościach ekologicznych ze względu na emisję zanieczyszczeń.

2. Najsilniejsza jest tendencja zmniejszania się emisji tlenku węgla i węglowodorów – wynika to z dużej skuteczności katalitycznych metod utleniania spalin. Mniejsza jest tendencja zmniejszania się emisji tlenków azotu i pyłów. W wypadku zmniejszania emisji tlenków azotu katalityczne metody ich redukcji są trudniejsze do realizacji i mniej skuteczne niż ma to miejsce w wypadku utleniania składników spalin. W wypadku emisji pyłów należy zwrócić uwagę na fakt, że emitowane pyły pochodzą również ze źródeł trybologicznych, szczególnie ze współpracy ogumienia kół z nawierzchnią jezdnią, co jest związane z przyczepnością, a to jedno z podstawowych kryteriów bezpieczeństwa ruchu drogowego.
3. Zależność emisji drogowej zanieczyszczeń z samochodów osobowych od prędkości średniej wykazuje znaczą regularność w zakresach prędkości średniej, odpowiadającej jeździe w warunkach; zatorów ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych. Jest to słuszna zależność dla wszystkich kategorii skumulowanych pojazdów drogowych ze względu na ich zastosowanie.

8. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i rozważań można stwierdzić, że cele rozprawy zostały osiągnięte. Udowodniono tezę pracy, że istnieje możliwość wykorzystania procedur stosowanych w oficjalnej inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego do badania modelu tej emisji ze względu na dane wejściowe i parametry modelu, charakteryzujące strukturę, intensywność i sposób użytkowania pojazdów drogowych oraz że wartość średnia prędkości pojazdów jest skuteczną charakterystyką zerowymiarową prędkości do oceny właściwości ruchu pojazdów w zadaniu inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego.

Tezy rozprawy zostały udowodnione dzięki realizacji zadań badawczych dotyczących modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego. Do obliczeń symulacyjnych emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego wykorzystano oprogramowanie COPERT, stosowane do oficjalnej inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń w Polsce i innych państwach Europy oraz oprogramowanie HBEFA INFRAS.

W zakres zadań badawczych wchodziło usystematyzowanie problemów modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego, w szczególności identyfikacji modelu. Badania modelu przeprowadzono dla Polski dla lat 2000 – 2020 ze względu na wielkości wejściowe modelu, dotyczące liczności i intensywności użytkowania pojazdów drogowych kategorii skumulowanych. Przeprowadzono również badania modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego ze względu na parametry modelu, dotyczące charakteru ruchu pojazdów.

Najważniejsze wnioski, które można sformułować na podstawie wyników przeprowadzonych badań i dokonanych na tej podstawie rozważań są następujące:

1. Modelowanie emisji zanieczyszczeń z pojazdów drogowych jest jedyną możliwością wyznaczenia całkowitej emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego. Z tego powodu wynik badania emisji całkowitej zanieczyszczeń z transportu drogowego jest umowny i w celach prowadzenia badań porównawczych jest konieczne stosowanie metodyk porównawczych. Tak jest w wypadku inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń, gdzie stosuje się metodykę zgodną z procedurami zawartymi w dokumencie „EEA/EMEP Emission Inventory Guidebook 2019” [52] oraz – dla transportu drogowego – jest wykorzystywane oprogramowanie COPERT.

2. Skuteczną charakterystyką zerowymiarową procesu prędkości pojazdów drogowych do oceny charakteru ich ruchu jest wartość średnia prędkości. Potwierdzają to liczne wyniki badań empirycznych oraz przetwarzania tych badań. Z tego powodu jest możliwe kwalifikowanie ruchu pojazdów drogowych do modelowych warunków ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.
3. Do modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego wykorzystuje się informacje w postaci zależności emisji drogowej zanieczyszczeń od prędkości średniej pojazdów kategorii elementarnych. Zależności te wyznacza się na podstawie wyników badań empirycznych.
4. Skutkiem wyraźnej poprawy stanu technicznego pojazdów drogowych w Polsce w latach 2000 – 2020 głównie ze względu na emisję zanieczyszczeń jest wyraźna tendencja do zmniejszenia się krajowej emisji rocznej zanieczyszczeń z transportu drogowego mimo dynamicznego zwiększania się intensywności motoryzacji. Najsilniejsza jest tendencja zmniejszania się emisji tlenku węgla i węglowodorów – wynika to z dużej skuteczności katalitycznych metod utleniania spalin. Mniejsza jest skuteczność ograniczania emisji pyłów oraz redukcji tlenków azotu.
5. Zależność emisji drogowej zanieczyszczeń z samochodów osobowych od prędkości średniej wykazuje znacząco regularność w zakresach prędkości średniej, odpowiadającej jeździe w warunkach: zatorów ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych.

Tematyka modelowania emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego obejmuje jeszcze znacznie więcej zagadnień. Do najważniejszych można zaliczyć:

1. Badania wrażliwości modelu na strukturę modelu ze względu na kategorie charakteryzujące poziom techniczny w związku z emisją zanieczyszczeń. Badania te muszą być prowadzone wieloparametrowo, bowiem struktura ekologiczna pojazdów jest zależna od kategorii skumulowanych pojazdów ze względu na ich zastosowanie oraz umowną wielkość pojazdów i zastosowane źródła energii. Trzeba także pamiętać, że w wypadku napędów elektrycznych pojazdów drogowych do inwentaryzacji emisji zanieczyszczeń należy także zaliczyć emisję zanieczyszczeń związaną z wytwarzaniem i przesyłem energii elektrycznej.

2. Badania wrażliwości modelu emisji zanieczyszczeń z transportu drogowego dla innych niż samochody osobowe kategorii skumulowanych.
3. Badania wrażliwości modelu na strukturę modelu ze względu na kategorie charakteryzujące umowną wielkość pojazdów. Jak wiadomo zwiększanie umownej wielkości pojazdów ma wpływ na zwiększone zużycie paliwa i emisji zanieczyszczeń. Jednocześnie jednak zwiększanie umownej wielkości ma korzystny wpływ dla pojazdów lekkich na zmniejszenie zagrożeń bezpieczeństwa, a więc wyniki takich badań mogłyby być wykorzystane do oceny kompromisu między ochroną środowiska i bezpieczeństwa w związku z transportem drogowym.
4. Celowe jest również rozszerzenie badań o zużycie paliw i innych nośników energii (np. wodoru do zasilania ogniw paliwowych⁵) oraz energii elektrycznej. Jest to także związane z ochroną przed zużywaniem zasobów naturalnych. W tym zakresie jest celowe prowadzenie badań, związanych z działalnością związaną z wytwarzaniem paliw niekonwencjonalnych, badań nie tylko o charakterze naukowo-technicznym, ale również o charakterze ekonomicznym i socjologicznym.
5. Należy również pamiętać o wyraźnych brakach w zakresie pewności danych. Do najważniejszych braków należy zaliczyć kwalifikowanie ruchu pojazdów drogowych w modelowych warunkach ruchu: w zatorach ulicznych, w miastach poza zatorami ulicznymi, poza miastami oraz na autostradach i drogach ekspresowych. Jest to problem w zakresie elementarnych kategorii pojazdów oraz kryteriów uśredniania wielkości charakteryzujących ich ruch. Wielkościami tymi są: prędkość średnia pojazdów w modelowych warunkach ruchu oraz udział długości dróg przebywanych przez pojazdy w modelowych warunkach ruchu w całkowitej długości dróg przebywanych przez pojazdy. Problemem jest również niepewność danych na temat liczności rzeczywiście użytkowanych pojazdów poszczególnych kategorii elementarnych, a szczególnie ich przebiegów rocznych.

Można zatem stwierdzić, że istnieje jeszcze wiele możliwości rozwijania prac z zakresu modelowania emisji z transportu drogowego.

⁵ Formalnie wodór, stosowany do zasilania ogniw paliwowych, nie jest paliwem, ponieważ w ogniwie paliwowym nie występuje spalanie (spalanie – reakcja utleniania egzoenergetyczna, w której wyniku szybkość wydzielania się ciepła powoduje promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości w zakresie promieniowania widzialnego o natężeniu uznanym za umowną granicę świecenia), mimo że tak niefortunnie nazywa się w języku polskim ten przetwornik energii. W języku angielskim termin „paliwo – „fuel” nie ma pochodzenia od terminu „spalanie” – „combustion”. Wodór stosowany do zasilania ogniwa paliwowego jest nośnikiem energii, a nie paliwem. Zbiór paliw jest podzbiorem zbioru nośników energii.

Piśmiennictwo

1. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
2. Alam M. S., Duffy P., Hyde B., McNabola A.: Downscaling national road transport emission to street level: A case study in Dublin, Ireland. *Journal of Cleaner Production*. Volume 183, 10 May 2018: 797-809. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.206.
3. André M.: The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Sci Total Environ*. 2004 Dec 1:334-335:73-84. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.070.
4. Andrych-Zalewska M., Chłopek Z., Merkisz J., Pielecha J.: Analysis of the operation states of internal combustion engine in the Real Driving Emissions test. *Archives of Transport Issue: AoT 2022*; 61 (1): 71-88. DOI: 10.5604/01.3001.0015.8162.
5. Andrych-Zalewska M., Chłopek Z., Merkisz J., Pielecha J.: Comparison of gasoline engine exhaust emissions of a passenger car through the WLTC and RDE Type Approval tests. *Energies 2022*, 15(21), 8157. DOI: 10.3390/en15218157.
6. Andrych-Zalewska M., Chłopek Z., Merkisz J., Pielecha J.: Determination of characteristics of pollutant emission from a vehicle engine under traffic conditions in the engine test. *Combustion Engines*. 2022, 191(4): 58-65. DOI: 10.19206/CE-147327.
7. Andrych-Zalewska M., Chłopek Z., Merkisz J., Pielecha J.: Impact of the internal combustion engine thermal state during start-up on the exhaust emissions in the homologation test. February 2023. *Energies 16(4):1937*. DOI: 10.3390/en16041937
8. Andrych-Zalewska M., Chłopek Z., Merkisz J., Pielecha J.: Investigations of exhaust emissions from a combustion engine under simulated actual operating conditions in Real Driving Emissions Test. *Energies 2021*, 14, 935. DOI: 10.3390/en14040935.
9. Andrych-Zalewska M., Chłopek Z., Merkisz J., Pielecha J.: Investigation of exhaust emissions from the gasoline engine of a light duty vehicle in the Real Driving Emissions test. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2023*;25(2):165880. DOI: 10.17531/ein/165880.
10. Atrish A. K., Bhugra G. S.: Traffic congestion analysis using PTV Vissim Software. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. Volume 10 Issue II Feb 2022. DOI: 10.22214/ijraset.2022.40370.
11. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Lasocki J., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Analysis of emission of greenhouse gases from road transport in Poland between 1990 and 2017, *Atmosphere 2020*, 11(4), 387. DOI: 10.3390/atmos11040387.
12. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Lasocki J., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Characteristics of pollutant emission from motor vehicles for the purposes of the Central Emission Base in Poland. *Combustion Engines 2019*, 177(2): 165 – 171. DOI: 10.19206/CE-2019-229.
13. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Lasocki J., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Inventory of pollutant emission from motor vehicles in Poland using the COPERT 5 software. *Combustion Engines 2019*, 178(3): 150 – 154. DOI: 10.19206/CE-2019-326.
14. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Lasocki J., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: The inventory of pollutants hazardous to the health of living organisms, emitted by road transport in Poland between 1990 and 2017. *Sustainability 2020*, 12: 5387. DOI: 10.3390/su12135387.

15. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Sar H., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Assessment of environmental risks of particulate matter emissions from road transport based on the emission inventory. *Applied Sciences* 2021, 11: 6123. DOI: 10.3390/app11136123.
16. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Sar H., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Assessment of impact of vehicle traffic conditions: urban, rural and highway, on the results of pollutant emissions inventory. December 2021. *Archives of Transport* 60(4): 57 – 69. DOI:10.5604/01.3001.0015.5477.
17. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Sar H., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Influence of the thermal state of vehicle combustion engines on the results of the national inventory of pollutant emissions. *Applied Sciences* 2021, 11: 9084. DOI: 10.3390/app11199084.
18. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Sar H., Szczepański K.: Comparison of pollutant emission associated with the operation of passenger cars with internal combustion engines and passenger cars with electric motors. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2021, 12: 215 – 228. DOI: 10.1007/s40095-021-00382-4.
19. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Assessment of results of pollutant emission inventory of the road transport sector in Poland in 2000 – 2015. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. 2017; 78(4): 5-25. DOI: 10.14669/AM.VOL78.ART1.
20. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Emission of pollutants from motor vehicles in Poland comparing to pollutant emission in the European Union. *Combustion Engines* 2019, 178(3): 56 – 60. DOI: 10.19206/CE-2019-310.
21. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Estimating pollutant emission from motor vehicles in the years 2000 – 2015. *Combustion Engines* 2017, 171(4), 62-67. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-2017-411>.
22. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Evolution of national annual pollutant emission from motor vehicles in Poland. *Combustion Engines* 2017, 4 (171): 92 – 96. DOI: 10.19206/CE-2017-416.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Stosio G., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Effect of average velocity of passenger cars on national annual emission of pollutants. *Combustion Engines* 2017, 4 (171): 121 – 126. DOI: 10.19206/CE-2017-420.
27. Bebkiewicz K., Chłopek Z., Stosio G., Szczepański K., Zimakowska-Laskowska M.: Study on sensitivity of national annual pollutant emission from passenger cars to traffic patterns. *Combustion Engines*, 2017, 4 (171): 170 – 174. DOI: 10.19206/CE-2017-428.
28. Bellagamba D., Margot-Cattin I., Vaucher P.: Standardized on-road tests assessing fitness- to-drive in people with cognitive impairments: A systematic review. Published by Public Library of Science May 2020. DOI:10.1371/journal.pone.0233125.

29. Bendat J. S., Piersol A.G.: Random data: Analysis and measurement procedures. Book Series: Wiley Series in Probability and Statistics. ISBN: 9780470248775. Online ISBN: 9781118032428. DOI:10.1002/9781118032428.
30. BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), INFRAS AG (Infrastruktur, Umwelt- und Wirtschaftsberatung). Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950 – 2010, BUWAL-Bericht 1995; 255.
31. Chłopek Z., Bebkiewicz K.: Model of the structure of motor vehicles for the criterion of the technical level on account of pollutant emission. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19 (4): 501 – 507. DOI: 10.17531/ein.2017.4.2.
32. 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.
33. Chłopek Z., Biedrzycki J., Lasocki J., Wójcik P.: Examination of pollutant emissions and fuel consumption at tests simulating the real conditions of operation of a passenger car. *The Archives of Automotive Engineering. Archiwum Motoryzacji*. Vol. 65, No 3 (2014): 3 – 18. 81 – 96.
34. Chłopek Z., Biedrzycki J., Lasocki J., Wójcik P.: Investigation of pollutant emissions from a motor vehicle engine in tests simulating real vehicle use in road traffic conditions. *Congress on Combustion Engines 2013. Combustion Engines 2013*: 202 – 207.
35. Chłopek Z., Biedrzycki J., Wójcik P., Lasocki J.: Investigation of the motion of motor vehicles in Polish conditions. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji* 2013, 60 (2): 3 – 20.
36. Chłopek Z., Dębski B., Szczepański K.: Theory and practice of inventory pollutant emission from civilization-related sources: share of the emission harmful to health from road transport. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. 2018; 79(1): 5 – 22. DOI:10.14669/AM.VOL.79.ART1.
37. Chłopek Z., Lasocki J., Melka K., Szczepański K.: Equivalent carbon dioxide emission in useful energy generation in the heat-generating plant – Application of the carbon footprint methodology. *Journal of Ecological Engineering* 2021; 22(2):144-154. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/130891>
38. Chłopek Z., Olecka A., Szczepański K., Bebkiewicz K.: Share of road transport in greenhouse gas emissions in Poland in 1988 – 2015. *Environmental Protection and Natural Resources – Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*. 2018; 29; 77(3): 13 – 20. DOI 10.2478/oszn-2018-0014.
39. Chłopek Z., Olecka A., Szczepański K.: Greenhouse gas emission from motor vehicles in Poland in 2015. *Environmental Protection and Natural Resources – Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*. 2018; 29; 76(2): 9 – 13. DOI 10.2478/oszn-20180008.
40. Chłopek Z., Piaseczny L.: O roli modelowania w badaniach naukowych. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*. Rok XLII Nr 2(146). Gdynia 2001. 135 – 145.
41. Chłopek Z., Piaseczny L.: Prolegomena do rozważań o roli modelowania w procesie poznania. „Humanisation of Technology”. *Technika*. Wilno 2001. 208 – 217.
42. Chłopek Z., Piaseczny L.: Remarks about the modelling in science researches. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* Nr 4(11)/2001. 47 – 57.

43. Chłopek Z., Szczepański K.: Modelling of vehicle velocity in the inventory of pollutant emission. *Machine Dynamics Research* 2017; 41 (2): 119 – 139.
44. Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. *Prace Naukowe. Seria „Mechanika”* z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999. Rozprawa habilitacyjna.
45. Chłopek Z.: Synthesis of driving cycles in accordance with the criterion of similarity of frequency characteristics. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2016; 18 (4): 572 – 577. DOI: 10.17531/ein.2016.4.12.
46. Chłopek Z.: The cognitive interpretation of the Monte Carlo method for the technical applications. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* Nr 3 (43)/2009: 38 – 46.
47. COPERT – EMISIA. <https://www.emisia.com/utilities/copert/>. (2024-03-02).
48. COPERT 5 workshop, Materiały ze szkolenia, 2023
49. DieselNet: Engine & Emission Technology. <https://dieselnet.com/technical.html> (2024.02.21).
50. Dietrich M.: O modelowaniu w budowie maszyn. *Mechanika Teoretyczna i Stosowana* 1983, nr 21. - 4.
51. Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, amending Directive 2003/35/EC and repealing Directive 2001/81/EC.
52. EEA/EMEP Emission Inventory Guidebook 2019.
53. Emissions of air pollutants from transport. European Environment Agency. 2021.
54. EPA Official Release of the MOVES3 Motor Vehicle Emissions Model for SIPs and Transportation Conformity, Federal Register/vol.86, No. 4.
55. EPA, MOVES and Mobile Source Emissions Research <https://www.epa.gov/moves>. (2024-03-02).
56. Fishman G. S.: Monte Carlo. Concepts, algorithms and applications. New York: Springer Verlag. 1996.
57. Fontaras G., Rexies M., Hausberger S., Anagnostopoulos K., The Development of a Simulation Tool for Monitoring Heavy-Duty Vehicle CO₂ Emissions and Fuel Consumption in Europe, SAE Technical Papers, September 2013, DOI: 10.4271/2013-24-0150.
58. Garland L. et al.: Air pollutant inventories for England, Scotland, Wales, and Northern Ireland: 2005-2020. Final Issue 1.2. 10th October 2022.
59. IIASA website: <https://iiasa.ac.at/models-tools-data/gains>.
60. INFRAS AG: HBEFA Handbook emission factors for road transport 4.2, INFRAS, Bern 2022.
61. ISO 8178-4:2020. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Steady-state and transient test cycles for different engine applications.
62. Klimont Z. et al.: GAINS model Principle concepts and example applications for Europe and Asia. [gains_pres02_20140214.pdf](#) (ehrn.co.za). (2024-03-02).

63. Krajowy bilans emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 1990 – 2020. Raport syntetyczny. Krajowym Ośrodku Bilansowania i Zarządzania Emisjami, w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym. Warszawa 2022.
64. Lane D. M. et al.: Introduction to statistics – Open Textbook Library (umn.edu). (2024-03-02).
65. Ligterink N. E., Tavasszy L. A., Lange R.: A velocity and payload dependent emission model for heavy-duty road freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Volume 17, Issue 6, August 2012: 487 – 491.
66. Metropolis N., Ulam S.: The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 44, No. 247 (Sep., 1949): 335 – 341.
67. Mogno C. et al.: The application of the CO2MPAS model for vehicle CO2 emissions estimation over real traffic conditions, *Transport Policy* Vol 124, 2022. DOI: [10.1016/j.tranpol.2020.01.005](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.01.005).
68. MOVES3 Technical Guidance: Using MOVES to prepare emission inventories for state implementation plans and transportation conformity. EPA, November 2020.
69. Orkisz M.: Modelowanie systemów rzeczywistych. Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych. Dęblin 1999.
70. Overview of EPA’s MOTO Vehicle Emission Simulator (MOVES3). EPA. March 2021.
71. Papoulis A., Pillai S. U.: Probability, random variables, and stochastic processes. Tata McGraw-Hill, 2002 – 852.
72. Parzen E.: Stochastic processes. Courier Dover Publications. 2015. ISBN 978-0-48679688-8.
73. PEMS Testing – Portable Emissions Measurement Systems (horiba.com). (2024-03-02).
74. Poland’s Informative Inventory Report 2022. Air pollutant emissions in Poland 1990 – 2020. Submission under the UN ECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and Directive (EU) 2016/2284, IOŚ-PIB, KOBiZE, Warszawa 2022.
75. PRIMES Model version 2018, Detailed model description, E3Modelling. (2024-03-02).
76. PTV Visum | Knowledge Base | PTV Group. (2024-03-02).
77. Rosenbluth A., Wiener N: The role of models in science. *Philosophy of Science* 1945, Vol. 12, No 4.
78. Savitzky A., Golay M. J. E.: Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, *Analytical Chemistry*. 1964, 36(8): 1627 – 1639. DOI: [org/10.1021/ac60214a047](https://doi.org/10.1021/ac60214a047).
79. Semtech-DS On Board Vehicle Emissions Analyzer. User Manual. Document: 9510-086, Revision 2.01. October 2010. (2024-03-02).
80. SIBYL – Komisja Europejska <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-sibyl>. (2024-03-02).
81. SIBYL EMISIA <https://www.emisia.com/utilities/sibyl-baseline/>. (2024-03-02). (2024-03-02).
82. Singh N., Mishra T., Banerjee R.: Emissions inventory for road transport in India in 2020: Framework and post facto policy impact assessment. DOI:10.21203/rs.3.rs-297185/v1.

83. Siskos P. et al.: Innovation pathways, strategies and policies for the Low-Carbon Transition in Europe, D3.9 Report on decarbonisation in the transport sector, 2019.
84. Siskos P., Capros P., PRIMES-TREMOVE: A transport sector model for long term energy-economy-environment planning for EU, Conference Paper, National Technical University of Athens 2014.
85. Stojanoska M., Atanasova V.: Example for application of the PTV Vision Visum software tool for the calculation of noise and emissions from motor traffic. Vol 68 No 4 (2022). December 2022. DOI: 10.31075/PIS.68.04.04.
86. SULTAN – transport policy analysis tool, Ricardo Energy & Environment 2017. ([2024-03-02](#)).
87. SULTAN modelling to explore the wider potential impacts of transport GHG reduction policies in 2030, Report for the European Climate Foundation, Ref. DG-1509-55582, Ricardo Energy & Environment 2016. ([2024-03-02](#)).
88. Szczepański K., Bebkiewicz K., Chłopek Z., Sar H., Zakrzewska D.: Analysis of the national annual emission of pollutants from road transport in Poland in the years 1990 – 2020. *Energies* 2023, 16(10), 4083. DOI: 10.3390/en16104083.
89. Szczepański K., Chłopek Z., Sar H., Zimakowska-Laskowska M.: Assessment of pollutant emission in Poland from various categories of transport. *Environmental Protection and Natural Resources Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 2022, Vol. 33 No 1(91): 1 – 6. DOI 10.2478/oszn-2022-0004.
90. Sztoff W.: *Modelowanie i filozofia*. PWN. Warszawa 1972.
91. The GAINS Model for Greenhouse Gases – Version 1.0: Carbon Dioxide (CO₂) Interim Report IR-05-053; Ger Klaassen, Christer Berglund, Fabian Wagner, IIASA 2005. ([2024-03-02](#)).
92. The GAINS User guide, Tutorial for advanced users, IIASA 2021. ([2024-03-02](#)).
93. The RAINS model. Documentation of the model approach prepared for the RAINS peer review 2004. IIASA, 2004. ([2024-03-02](#)).
94. The UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP Convention). ([2024-03-02](#)).
95. Traffic Simulation Software | PTV Vissim | PTV Group. ([2024-03-02](#)).
96. TSI 3090 EEPS™ (Engine Exhaust Particle Sizer™). User Manual. 2008. ([2024-03-02](#)).
97. UITP SORT & E-SORT Brochures. 2023. ([2024-03-02](#)).
98. VECTO Overview <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-vecto/>. ([2024-03-02](#)).
99. VECTO Workshop, Vecto – Overview, JRC ISPRA 2019. ([2024-03-02](#)).
100. Wang H., He X., Evans J. S.: Health benefits of on-road transportation pollution control programs in China. Arild Underdal, University of Oslo, Oslo, Norway, and approved August 25, 2020 (received for review December 4, 2019). *September 23, 2020*, 117 (41): 25370-25377. DOI.org/10.1073/pnas.1921271117.
101. What is CO₂MPAS? <https://co2mpas.readthedocs.io/en/stable/intro.html>. ([2024-03-02](#)).
102. Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2020/2021.

103. Worldwide emissions standards. Heavy duty and off-highway vehicles. Delphi. Innovation for the real world. 2016/17.