

Modelowanie emisji zanieczyszczeń z pojazdów poruszających się na skrzyżowaniach

ZDZISŁAW CHŁOPEK

Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów,
Zakład Silników Spalinowych

TOMASZ POLICHNOWSKI

Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie

Ekologiczne właściwości silników pojazdów, np. natężenie emisji zanieczyszczeń, są zależne od warunków pracy silników, zdeterminowanych przebiegami prędkości jazdy pojazdu. Przebiegi prędkości pojazdów w centrach miejskich są zależne od parametrów charakteryzujących sterowanie ruchu na skrzyżowaniach. Istnieje zatem możliwość rozpatrywania zagadnienia optymalizacji sterowania ruchu pojazdów na skrzyżowaniach ze względu na minimalizację emisji zanieczyszczeń. W pracy przedstawiono ogólne zasady modelowania emisji zanieczyszczeń z pojazdów poruszających się na skrzyżowaniach, a teoretyczne rozważania zilustrowano wynikami badań symulacyjnych, wykonanych dla rzeczywistych warunków ruchu pojazdów w obszarze skrzyżowań.

Oznaczenia

Oznaczenia wielkości charakteryzujących ruch pojazdów i emisję zanieczyszczeń:

b	— średnia emisja drogowa z pojazdu
$b_{\text{mod } i}$	— emisja drogowa dla i — tego modelu ruchu (z i — tą prędkością średnią)
$b_{\text{apr}}(v_{s,i})$	— emisja drogowa aproksymowana dla i — tej prędkości średniej
E	— średnie natężenie emisji
L	— wielkości charakteryzujące sterowanie ruchu
K	— wielkości charakteryzujące konfigurację skrzyżowań
S	— wielkości charakteryzujące strukturę pojazdów
n	— liczba modeli ruchu w miastach dla danej kategorii ¹ pojazdów
N	— liczba pojazdów
m	— emisja

¹ Kategoria jest to zbiór elementów o pewnych wspólnych cechach [5, 7]. Kategorie pojazdów mogą być elementarne na różnych poziomach szczegółowości lub skumulowane na wysokim poziomie ogólności.

t	— czas
T	— czas przejazdu pojazdu przez odcinek kontrolny skrzyżowań
s	— droga kontrolnego odcinka skrzyżowań
R	— natężenie ruchu pojazdów
v	— prędkość pojazdu
v_{st}	— średnia prędkość ruchu pojazdów
$v_{st,i}$	— prędkość średnia dla i — tego modelu ruchu
δE	— zmniejszenie średniego globalnego natężenia emisji zanieczyszczeń z pojazdów w analizowanym rejonie
δb	— średnia względnych różnic emisji drogowej: zgodnej z modelami ruchu i aproksymowanej
	Oznaczenia substancji zanieczyszczających środowisko, emitowanych z silników pojazdów:
CO	— tlenek węgla
HC	— węglowodory
NO _x	— tlenku azotu w przeliczeniu na dwutlenek azotu
PM	— cząstki stałe
	Oznaczenia kategorii pojazdów:
SO	— samochody osobowe
SC	— samochody ciężarowe
AM	— autobusy miejskie

1. Wprowadzenie

Emisja substancji szkodliwych dla środowiska jest jedną z największych uciążliwości motoryzacji, szczególnie w miejscach o dużej gęstości zamieszkania ludności i dużym natężeniu ruchu pojazdów, a więc przede wszystkim w centrach wielkich miast [1–4, 6, 8, 9, 12]. Do innych uciążliwości zalicza się również m.in. emisję hałasu oraz powodowanie drgań podłoża i ich propagację w otoczeniu dróg. Wielkościami charakteryzującymi szkodliwość emitowanych zanieczyszczeń są stężenia zanieczyszczeń rozproszonych w powietrzu atmosferycznym, tzw. imisje: ich wartości oraz czasy oddziaływania na środowisko [3–10, 12]. Na imisje podstawowy wpływ mają natężenia emisji zanieczyszczeń z pojazdów oraz charakterystyka zjawisk rozpraszania zanieczyszczeń, m.in. ukształtowanie powierzchni (np. kaniony uliczne) oraz warunki atmosferyczne (głównie kierunki i prędkości wiatrów) [3, 5–10, 12, 15]. Wynika z tego, że ze względu na traktowanie motoryzacji jako podmiotu oddziaływania na środowisko, uciążliwość komunikacyjnych zanieczyszczeń jest związana przede wszystkim z globalnym natężeniem emisji w rozpatrywanym obszarze [3–9]. Globalne natężenie emisji zanieczyszczeń komunikacyjnych jest zależne od [3–6, 7, 8, 11, 14, 16]: natężenia ruchu pojazdów, ich struktury ze względu na zastosowanie (np. samochody osobowe, ciężarowe i autobusy) i umowną wielkość, ekologicznej jakości pojazdów (co jest związane m.in. z ich wiekiem i stanem technicznym) oraz z warunkami ruchu. Należy zwrócić uwagę na dużą wrażliwość emisji zanieczyszczeń z pojazdów na warunki ruchu [1–9, 11, 13, 14, 16]. Stwierdza się przede wszystkim, że dla ruchu charakterystycznego w miastach szczególnie jazda na zatłoczonych ulicach (w tzw. korkach ulicznych) sprzyja bardzo znacznemu zwiększeniu się emisji substancji szkodliwych dla środowiska, głównie tlenku węgla, związków organicznych (węglowodorów i ich pochodnych) oraz — w wypadku pojazdów z silnikami o zapłonie samoczynnym — również cząstek

złych [1, — 9, 13, 14, 16]. Podobna zależność występuje w wypadku zużycia paliwa w modelu ruchu w korkach ulicznych, tzw. „Stop and Go” ze średnią prędkością jazdy mniejszą niż 6 km/h, przeciętne zużycie paliwa wynosi dla samochodu osobowego ponad 20 dm³/100 km!) [1, 13].

Możliwości zmniejszenia globalnego natężenia emisji zanieczyszczeń komunikacyjnych w rozpatrywanym obszarze są zatem następujące [3–6, 8]:

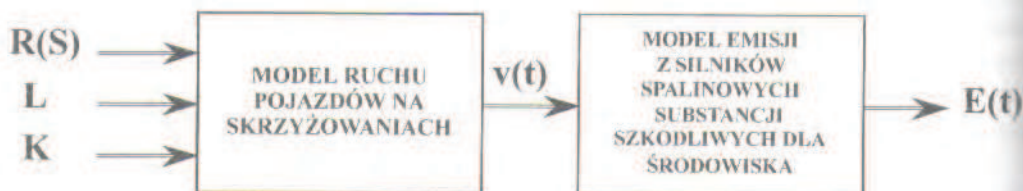
- ograniczenie natężenia ruchu pojazdów, co wymaga wprowadzenia restrykcyjnych zakazów ruchu i powoduje zwiększenie natężenia ruchu w innych obszarach miasta; ten sposób wymaga kompleksowej optymalizacji planowania ruchu pojazdów na obszarze całej aglomeracji;
- zmiana jakości ekologicznej użytkowanych pojazdów, co należy uznać za rozwiązanie utopijne;
- zmiana warunków ruchu pojazdów.

Z tym ostatnim rozwiązaniem trzeba wiązać realne szanse poprawy stanu środowiska w związku z jego zanieczyszczeniem przez motoryzację. Na zmianę warunków ruchu mają wpływ przede wszystkim: konfiguracja dróg ze szczególnym uwzględnieniem skrzyżowań oraz sterowanie ruchu pojazdów [2]. Ogólnie można stwierdzić, że zapewnienie płynnego ruchu pojazdów z umiarkowanymi prędkościami jest w miastach rozwiązaniem optymalnym ze względu na minimalizację emisji zanieczyszczeń oraz zużycia paliwa. Z racjonalnym sterowaniem ruchu pojazdów są związane duże nadzieje — potwierdza to praktyka, często istnieją jednakże poważne ograniczenia fizycznej przepustowości dróg i skrzyżowań, wynikające z ich budowy. Możliwość poprawy ekologicznej sytuacji jest uwarunkowana wówczas przebudową dróg. Jak zwykle w takich wypadkach podejmowane decyzje muszą uwzględniać kompromis zysków i strat (m.in. również nakładów), związanych z takimi przedsięwzięciami. Należy pamiętać, że w ogólności wszystkie działania cywilizacyjne są obciążone taką odpowiedzialnością [9], a nieświadomość tego faktu np. w wypadku działań naiwnych, choć o intencjach niewątpliwie szlachetnych, nie zwalnia z tejże odpowiedzialności: przykładowo zwiększone zanieczyszczenie środowiska skutkuje m.in. pogorszeniem stanu zdrowia ludności, pogorszeniem warunków życia ludzi, zmniejszeniem wydajności ich pracy oraz koniecznością wydatkowania większych środków na leczenie.

2. Ogólne zasady modelowania emisji zanieczyszczeń z pojazdów poruszających się na skrzyżowaniach

Modelowanie emisji zanieczyszczeń z pojazdów poruszających się na skrzyżowaniach obejmuje zagadnienia modelowania warunków pracy silników w warunkach użytkowania pojazdów w ruchu w centrach miejskich oraz modelowania ekologicznych właściwości silników w tych warunkach [2]. Schemat zastosowanego modelowania przedstawiono na rysunku 1.

Podstawowym założeniem przyjmowanym w modelach emisji globalnej substancji szkodliwych dla środowiska z trakcyjnych silników spalinowych jest założenie o adytywności natężeń emisji substancji z poszczególnych źródeł emisji [3–6, 8]. Założenie



Rys. 1. Schemat modelowania emisji substancji szkodliwych dla środowiska ze względu na organizację ruchu pojazdów na skrzyżowaniach; oznaczenia: R — natężenie ruchu; L — wielkości charakteryzujące sterowanie ruchu; K — wielkości charakteryzujące konfigurację skrzyżowań; S — wielkości charakteryzujące strukturę pojazdów; $v(t)$ — prędkość pojazdów; $E(t)$ — natężenie emisji zanieczyszczeń, t — czas.

Fig. 1. Diagram of the pollution emission modelling in the respect of the traffic organisation at the intersections; symbols: R — traffic intensity; L — quantities describing traffic control; K — quantities describing the structure of vehicles; S — quantities describing characterising the structure of vehicles; $v(t)$ — speed of vehicles; $E(t)$ — emission intensity; t — time.

to wynika z zasady zachowania masy pod warunkiem, że substancje emitowane z silników są stabilne w środowisku. W rzeczywistości emitowane substancje po opuszczeniu silników podlegają zmianom, niekiedy znacznym — szczególnie po długim czasie przebywania w środowisku. W związku z tym jest konieczne traktowanie bilansowanych substancji jako sprowadzonych do takiej postaci, jaką mają w warunkach badań silnikowych. Przyjęcie założenia o addytywności natężeń emisji substancji z poszczególnych źródeł emisji oznacza, że emisja globalna z pojazdu jest superpozycją emisji zachodzących w elementarnych warunkach stanu pojazdu oraz że emisja globalna jest superpozycją emisji z poszczególnych pojazdów.

Ekologiczne właściwości silników zależą w warunkach dynamicznych (a więc typowych dla rzeczywistego użytkowania) w sposób operatorowy od stanu pracy silnika, który może być opisany obciążeniem silnika (np. momentem obrotowym), prędkością obrotową oraz wielkościami, charakteryzującymi stan cieplny oraz warunki otoczenia [5, 7]. W rozpatrywanych warunkach otoczenia oraz ustabilizowanym stanie cieplnym silnika możliwe jest przy znacznej standaryzacji konstrukcji pojazdów w porównywalnych kategoriach przedstawienie ekologicznych właściwości silników (i pojazdów) jako zależnych operatorowo od przebiegów prędkości jazdy [7], np. emisja drogowa — b jest przedstawiona jako zależność operatorowa przebiegu prędkości jazdy — $v(t)$

$$b = B_v[v(t)]. \quad (1)$$

Również inne charakterystyki ekologiczne mogą być modelowane w taki sposób, m.in. natężenie emisji.

Traktowanie ekologicznych charakterystyk silników jako zależności operatorowych przebiegów prędkości znacznie utrudnia praktyczne modelowanie tych charakterystyk. Zgodnie z (1) ekologiczne właściwości silników są w ogólności inne dla każdego przebiegu prędkości jazdy samochodu. W celu umożliwienia praktycznego modelowania tych charakterystyk konieczne jest przyjęcie założenia o możliwości ich modelowania jako funkcji pewnych wielkości, charakteryzujących przebiegi prędkości. Takie założenie

nie jest możliwe do przyjęcia w wypadku, gdy przebiegi prędkości można zakwalifikować do pewnych klas procesów, charakteryzujących się znacznym podobieństwem. Jest sprawą względną, jakie należy przyjąć kryteria podobieństwa procesów prędkości. Można rozpatrywać te kryteria w kategoriach m.in. w dziedzinach czasu, częstotliwości i wartości. Istnieje jednak w tym wypadku możliwość wykorzystania właściwości przebiegów prędkości pojazdów jako rzeczywistych procesów, których zaistnienie determinują obiektywne warunki. Warunki te ograniczają m.in. zakres częstotliwości oraz ekstremalne wartości (przede wszystkim prędkości i przyspieszeń). Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że skutecznym sposobem modelowania ekologicznych właściwości silników jest rozpatrywanie tego zagadnienia w dziedzinach: prędkości oraz iloczynu prędkości i przyspieszenia [1, 7]. Przy nałożeniu jeszcze bardziej ostrych ograniczeń (np. jazda w miastach) skutecznym rozwiązaniem może się okazać modelowanie ekologicznych charakterystyk silników jako funkcji średniej prędkości pojazdu, co potwierdzają liczne badania empiryczne i symulacyjne [3–9] oraz opracowane w Unii Europejskiej modele emisji zanieczyszczeń komunikacyjnych [11, 14, 16].

W niniejszych rozważaniach przyjęto zatem założenie, że dla rozpatrywanego charakteru ruchu pojazdów emisja zanieczyszczeń jest zależna przede wszystkim od średniej prędkości pojazdów. Na tę prędkość mają wpływ głównie: konfiguracja skrzyżowań oraz natężenie i sposób sterowania ruchu pojazdów.

Przy przyjętych założeniach podstawowe zależności opisujące ruch pojazdów są scharakteryzowane przez średnią prędkość jazdy — v_{sr}

$$v_{sr} = \frac{s}{T} \quad (2)$$

oraz średnie natężenie ruchu — R

$$R = \frac{N}{T} \quad (3)$$

gdzie:

s — droga kontrolnego odcinka skrzyżowań,

T — czas przejazdu pojazdu przez odcinek kontrolny skrzyżowań,

N — liczba pojazdów.

Ekologiczne właściwości silników w warunkach ruchu pojazdów są opisane średnią emisją drogową — b

$$b = \frac{m}{s} \quad (4)$$

oraz średnim natężeniem emisji — E

$$E = \frac{m}{T} \quad (5)$$

gdzie: m — emisja.

Całkowita emisja z N pojazdów kategorii wynosi

$$m = b \cdot s \cdot N = \frac{b \cdot R \cdot s^2}{v_{st}} \quad (6)$$

Całkowita emisja ze wszystkich kategorii jest sumą emisji z poszczególnych kategorii. Średnie natężenie emisji z N pojazdów kategorii wynosi

$$E = \frac{m}{T} = b \cdot R \cdot s \quad (7)$$

Całkowite średnie natężenie emisji ze wszystkich kategorii jest sumą średnich natężeń emisji z poszczególnych kategorii.

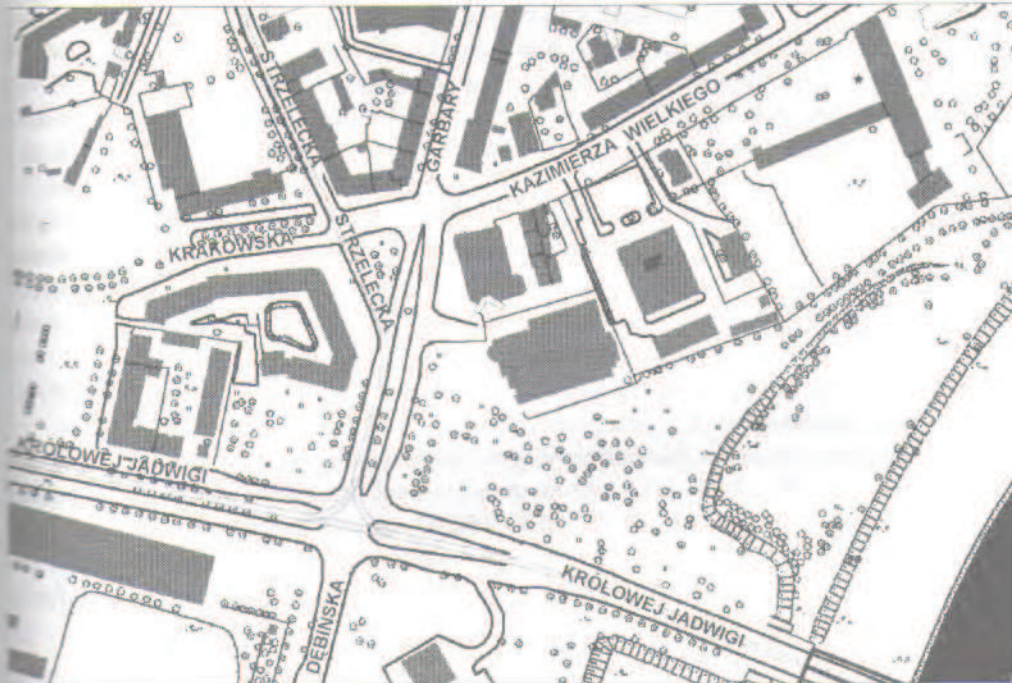
Ten rodzaj modelowania umożliwia zatem ocenę wpływu organizacji ruchu na emisję zanieczyszczeń w rozpatrywanym rejonie. Istnieje możliwość wykorzystania opracowanej metodyki do badań symulacyjnych, m.in. prognozy oddziaływania motoryzacji na środowisko ze względu na emisję spalin oraz oceny skuteczności rozpatrywanych rozwiązań w zakresie sterowania ruchu a także innych przedsięwzięć, planowanych w intencjach jako proekologiczne (choć w istocie mogących okazać się — jak niekiedy bywa — antyekologicznymi, np. zmniejszenie przed kilkoma latami m.in. w niektórych gminach w Warszawie podatku od środków transportu dla właścicieli samochodów z silnikami o zapłonie iskrowym, zasilanych skroplonym gazem propanbutan, bez względu na ekologiczny poziom pojazdu!).

3. Przykład zastosowania modelowania emisji zanieczyszczeń z pojazdów poruszających się na skrzyżowaniach

Metodykę modelowania emisji substancji szkodliwych dla środowiska ze względu na organizację ruchu pojazdów na skrzyżowaniach zastosowano w firmie NH Polska z Przemierowa pod Poznaniem. Autorzy dokonali oceny zanieczyszczenia środowiska przez spaliny pojazdów w rejonie dwóch skrzyżowań: ul. Królowej Jadwigi z ul. Strzelecką oraz ul. Garbary z ul. Krakowską (rys. 2), dla wariantów organizacji ruchu, których propozycję przedstawił Zarząd Dróg Miejskich w Poznaniu. Pierwszy wariant dotyczy dotychczasowego stanu, drugi — modernizacji skrzyżowań i sterowania ruchu. Modernizacja ta polega na [2]:

- poszerzeniu wlotu ul. Strzeleckiej z jednego pasa ruchu do trzech,
- poszerzeniu wlotu ul. Królowej Jadwigi (od strony zjazdu z Mostu Królowej Jadwigi),
- zmianie sposobu sterowania ruchem na obu skrzyżowaniach, ze stałoczasowego na acykliczne przy zastosowaniu algorytmu sterowania typu Flecs firmy NH Polska.

Do modelowania ruchu pojazdów na drogach wykorzystano program VISSIM [2]. Do stworzenia wirtualnych sterowników, symulujących algorytmy sterowania w środowisku laboratoryjnym odpowiadającym rzeczywistemu zastosowano program Traffic 2002 firmy NH Polska [2]. Struktura pojazdów została podzielona na kategorie:



Rys. 2. Schemat rejonu analizowanych skrzyżowań.
Fig. 2. Diagram of the area of analysed intersections.

- samochody osobowe — SO,
- ciężarowe — SC,
- autobusy miejskie — AM.

W celu stworzenia warunków ruchu przybliżonych do rzeczywistych została uwzględniona w modelu symulacyjnym obecność pojazdów szynowych, rowerzystów oraz pieszych. Dane wejściowe do modelu zostały przyjęte po uzgodnieniach z Zarządem Dróg Miejskich w Poznaniu: dla obydwu analizowanych wariantów organizacji ruchu są takie same: natężenia ruchu i struktura pojazdów.

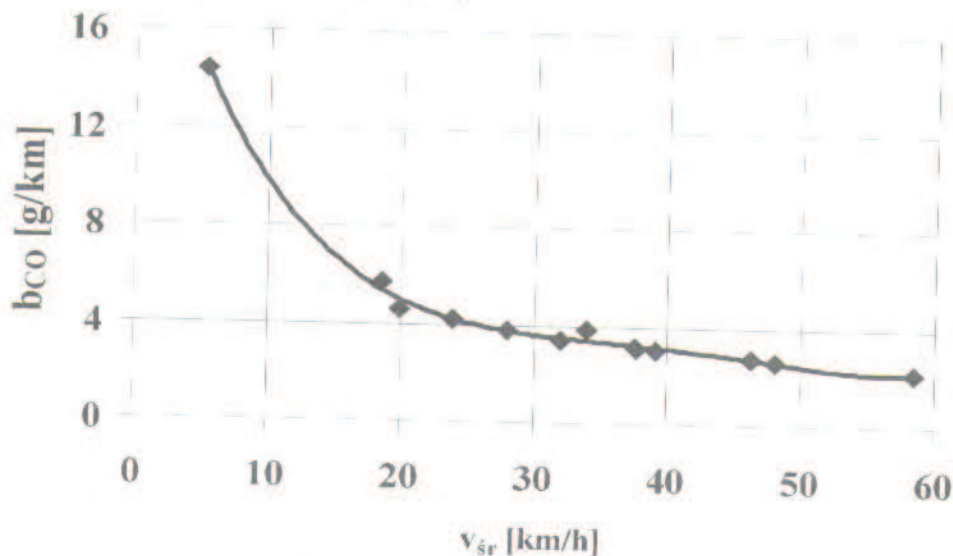
Modelowano ruch na poszczególnych pasmach ruchu z uwzględnieniem zróżnicowania natężenia ruchu i prędkości pojazdów każdej z rozpatrywanych kategorii skumulowanych. Wartości prędkości średniej pojazdów i średnich emisji drogowych zanieczyszczeń wyznaczano jako kombinacje liniowe uśrednianych wartości, odpowiadających poszczególnym pasmom ruchu, oraz natężeń ruchu na tych pasmach.

Do modelowania emisji zanieczyszczeń z silników pojazdów zastosowano model INFRAS [1, 13]. Wyznaczano dla rozpatrywanych kategorii pojazdów emisje drogowe oraz natężenia emisji:

- tlenku węgla — CO,
- węglowodorów — HC,
- tlenków azotu (tlenku i dwutlenku, sprowadzonych do dwutlenku) — NO_x,
- cząstek stałych — PM.

Do wyznaczenia ww. charakterystyk ekologicznych przyjęto strukturę skumulowanych kategorii pojazdów typową dla Niemiec [1, 13] oraz model opóźnienia stanu technicznego polskiej motoryzacji względem motoryzacji zachodnioeuropejskiej [3–8]. Skumulowane kategorie obejmują w niniejszej pracy pojazdy sklasyfikowane zgodnie z kryterium zastosowania: samochody osobowe, ciężarowe i autobusy miejskie². Struktura skumulowanych kategorii jest określona ze względu na [1, 3–8, 11, 13, 14, 16]:

- rodzaj zastosowanego silnika: silniki o zapłonie iskrowym i samoczynnym oraz — w wypadku samochodów osobowych — silniki dwusuwowe i czterosuwowe,
- umowną wielkość pojazdu, definiowaną przez objętość skokową silnika w wypadku samochodów osobowych oraz masę całkowitą w wypadku samochodów ciężarowych i autobusów miejskich,
- poziom techniczny, determinujący kategorię ekologiczną, definiowany przez:
 - rok produkcji,
 - poziom przepisów homologacyjnych, spełnianych przez pojazd, np. regulaminy UN ECE (*United Nations Economic Commission for Europe*) — Europejska Komisja Gospodarcza ONZ (EKG ONZ),
 - zastosowane rozwiązania techniczne, umożliwiające zmniejszenie emisji zanieczyszczeń (w wypadku samochodów osobowych), np. silniki z wielofunkcyjnymi reaktorami katalitycznymi.



Rys. 3. Zależność średniej emisji drogowej tlenku węgla dla kategorii samochodów osobowych od średniej prędkości ruchu pojazdów: punkty — dla modeli ruchu w miastach, linia — aproksymacja funkcją wielomianową.
Fig. 3. Relationship between the average carbon monoxide road emission for the category of passenger cars and the average vehicles speed depending: points — for the models of traffic in cities, line — for the models of traffic in cities approximated by multinomial function.

² Ogólny sposób modelowania struktury pojazdów obejmuje następujące kategorie skumulowane: samochody osobowe, dostawcze i ciężarowe, autobusy miejskie i dalekobieżne oraz motocykle i motorowery. Szczegółowo kryteria kwalifikowania pojazdów do kategorii elementarnych są opisane w literaturze [1, 3–8, 11, 14, 16].

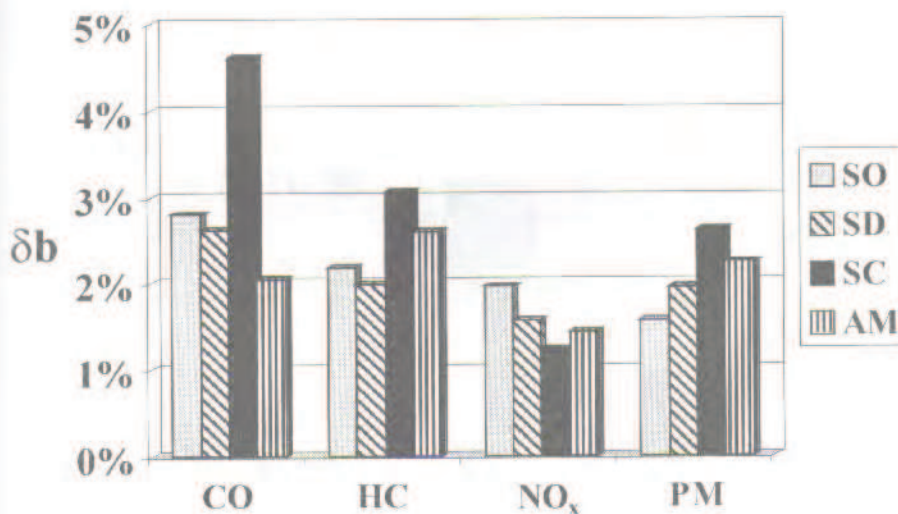
Model opóźnienia stanu technicznego polskiej motoryzacji względem motoryzacji zachodnioeuropejskiej został przyjęty w postaci [3–8]:

- samochody osobowe — 5 lat,
- samochody ciężarowe — 10 lat,
- autobusy miejskie — 7 lat.

Jako warunki ruchu w modelu INFRAS zostały przyjęte wyniki symulacji w programie VISSIM. Model ruchu identyfikowano na podstawie kryterium równości średniej prędkości jazdy. Na rysunku 3 przedstawiono przykładową zależność emisji drogowej tlenku węgla dla kategorii samochodów osobowych od średniej prędkości ruchu pojazdów. Punktami zaznaczono wyniki dla modeli ruchu, opracowanych dla jazdy w miastach w modelu INFRAS, zaś linia stanowi wynik aproksymacji zbioru punktów funkcją wielomianową.

W celu oszacowania przeciętnego błędu, związanego z zastosowaniem jako kryterium identyfikacji modelu ruchu jedynie prędkości średniej, wyznaczono średnią względną różnicę emisji drogowej: zgodnej z modelami ruchu w miastach i aproksymowanej, dla poszczególnych substancji i kategorii pojazdów (rys. 4).

$$\delta b = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|b_{\text{mod } i} - b_{\text{apr}}(v_{\text{sr } i})|}{b_{\text{mod } i}} \quad (8)$$

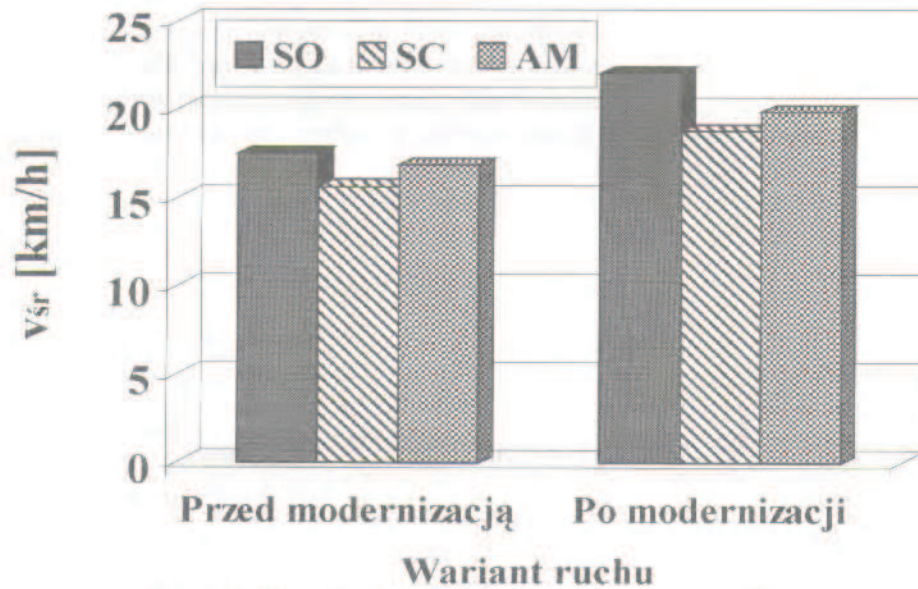


Rys.4. Średnia względnych różnic emisji drogowej: zgodnej z modelami ruchu w miastach i aproksymowanej, dla poszczególnych substancji i kategorii pojazdów.

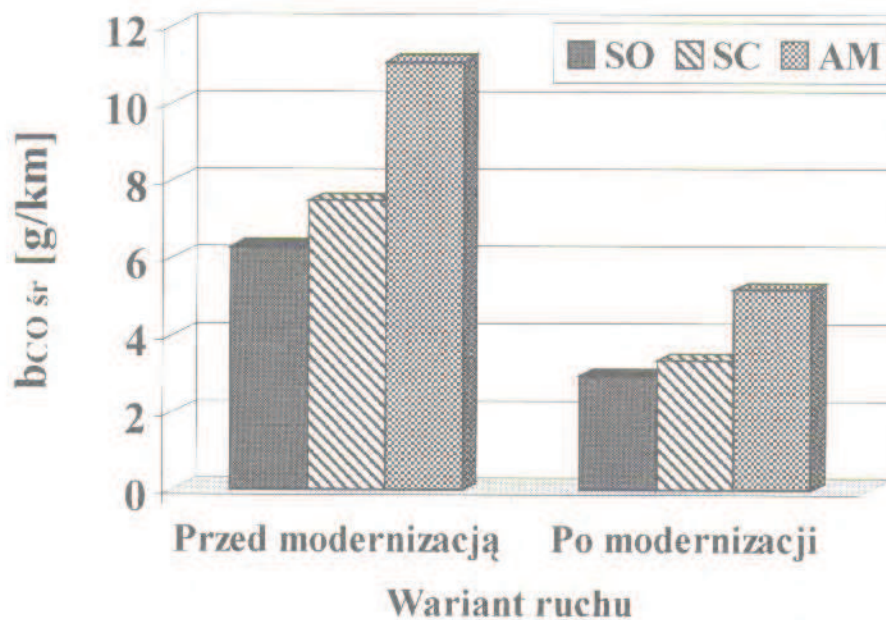
Fig. 4. Average off the relative differences road emission: consistent with traffic models in cities and approximated for the individual emission and the category of vehicles.

Różnice te należy uznać za nieduże — nie przekraczają one 5%, a przeciętnie są na poziomie (2÷3)%. W stosunku do innych założeń, np. związanych z określeniem struktury pojazdów i natężeń ruchu, błędy w oszacowaniu emisji drogowej są źródłem stosunkowo dobrze określonej niewiedzy.

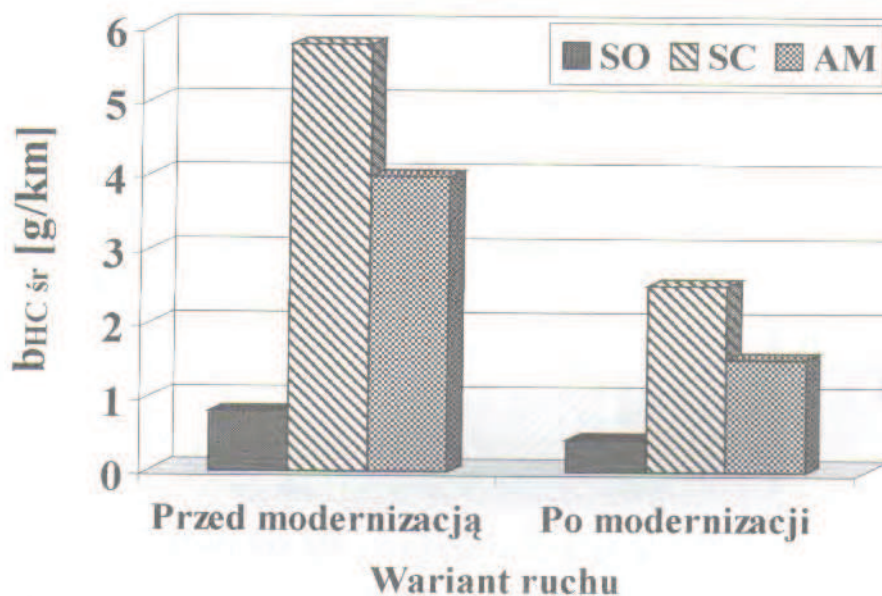
W wyniku symulacji ruchu pojazdów uzyskano porównanie średnich prędkości ruchu w analizowanym rejonie (rysunek 5).



Rys. 5. Średnie prędkości ruchu pojazdów w analizowanym rejonie.
Fig. 5. Average vehicles speed depending in the analysed area.

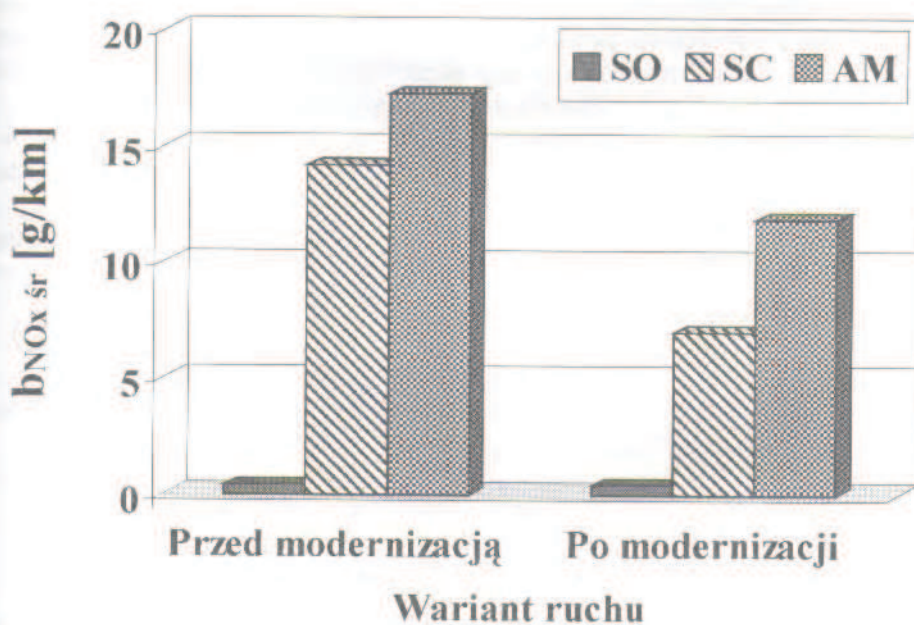


Rys. 6. Średnia emisja drogowa tlenku węgla z pojazdów poszczególnych kategorii w analizowanym rejonie.
Fig. 6. Average carbon monoxide road emission of the individual category vehicles in the analysed area.



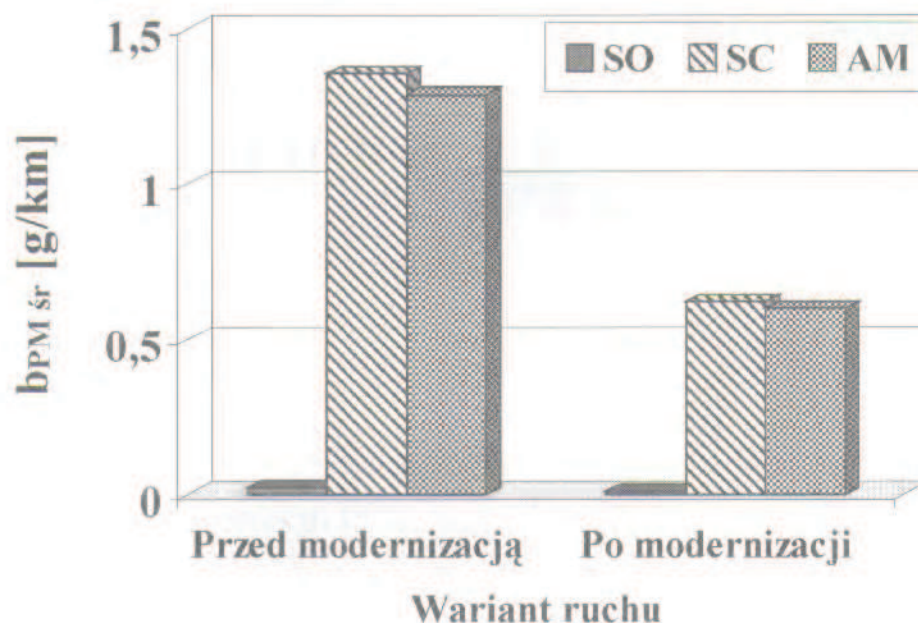
Rys. 7. Średnia emisja drogowa węglowodorów z pojazdów poszczególnych kategorii w analizowanym rejonie.

Fig. 7. Average hydrocarbons road emission of the individual category vehicles in the analysed area.



Rys. 8. Średnia emisja drogowa tlenków azotu z pojazdów poszczególnych kategorii w analizowanym rejonie.

Fig. 8. Average nitrogen oxides road emission of the individual category vehicles in the analysed area.



Rys. 9. Średnia emisja drogowa cząstek stałych z pojazdów poszczególnych kategorii w analizowanym rejonie.
Fig. 9. Average particulate matter road emission of the individual category vehicles in the analysed area.

Na skutek modyfikacji organizacji ruchu na skrzyżowaniu nastąpiło wyraźne zwiększenie średniej prędkości ruchu. Zwiększenie się średniej prędkości ruchu, związane z jej większą stabilizacją, powoduje znaczne zmniejszenie emisji zanieczyszczeń — na rys. 6–9 przedstawiono średnie emisje drogowe poszczególnych składników spalin w rozpatrywanych wariantach ruchu dla analizowanych kategorii pojazdów.

Wyraźnie widoczna jest duża wrażliwość ekologicznych właściwości silników na warunki ruchu pojazdów, ze znaczną korzyścią dla modeli ruchu o większych średnich prędkościach jazdy.

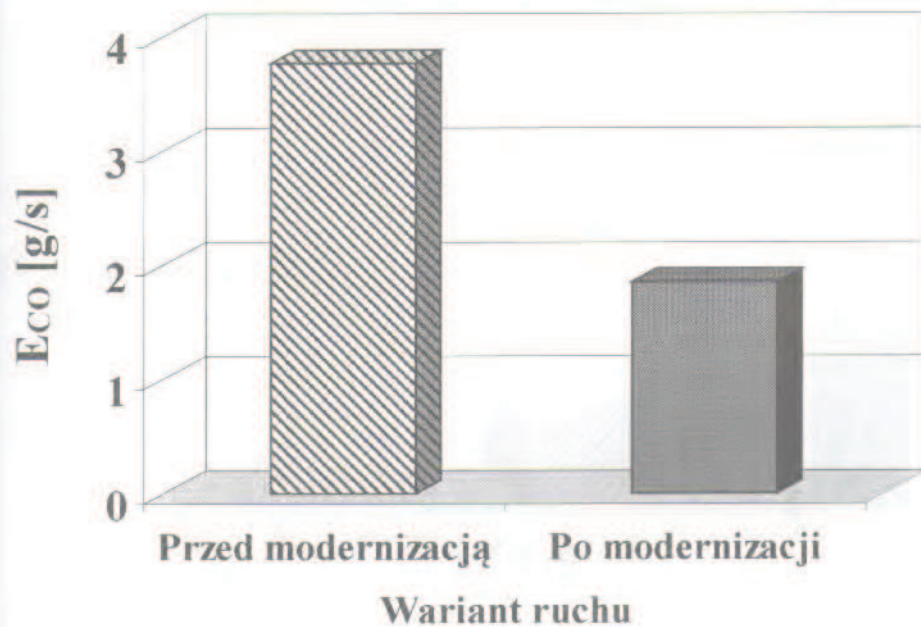
W wyniku badań symulacyjnych wyznaczono porównanie całkowitych średnich natężeń emisji poszczególnych substancji szkodliwych dla środowiska dla rozpatrywanych wariantów organizacji ruchu (rys. 10–13).

W związku z poprawą warunków ruchu następuje wyraźne zmniejszenie się średniego całkowitych średnich natężeń emisji poszczególnych zanieczyszczeń.

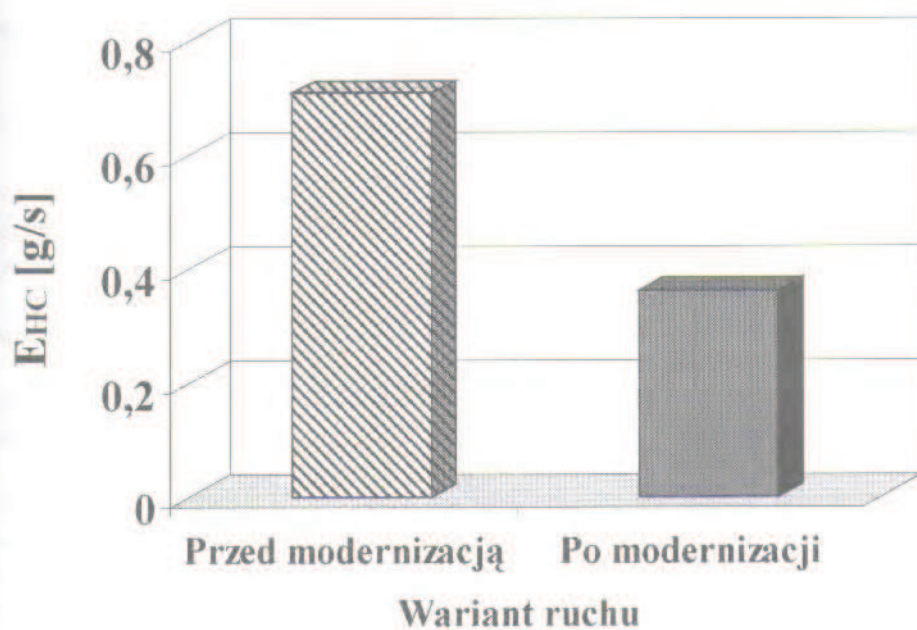
Jako miarę zmiany oddziaływania motoryzacji na środowisko ze względu na emisję spalin przyjęto względną zmianę całkowitego natężenia emisji

$$\delta E = \frac{E_0 - E_1}{E_0}$$

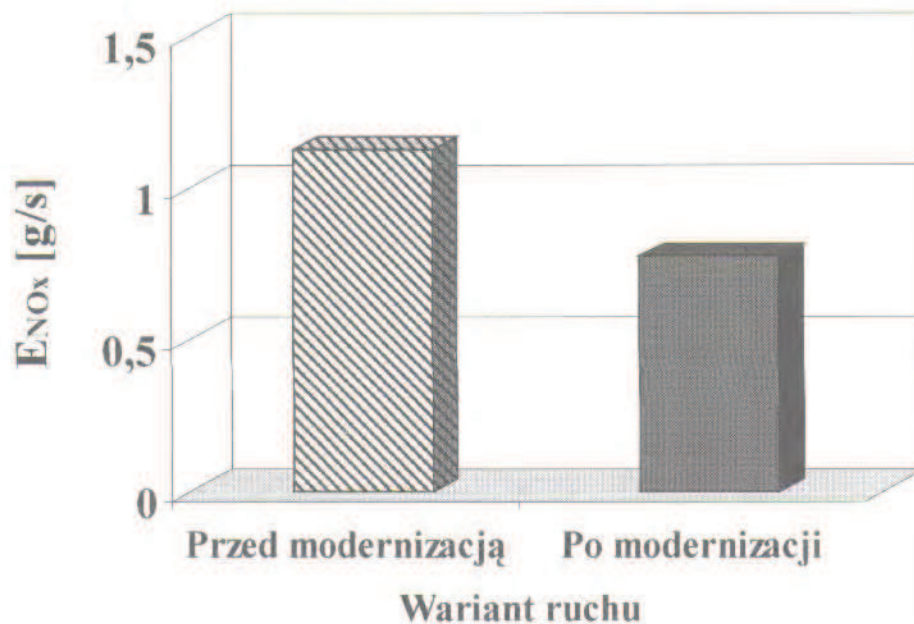
Na skutek modyfikacji organizacji ruchu nastąpiło wymierne zmniejszenie średniego globalnego natężenia emisji zanieczyszczeń z pojazdów w analizowanym rejonie — rys. 14.



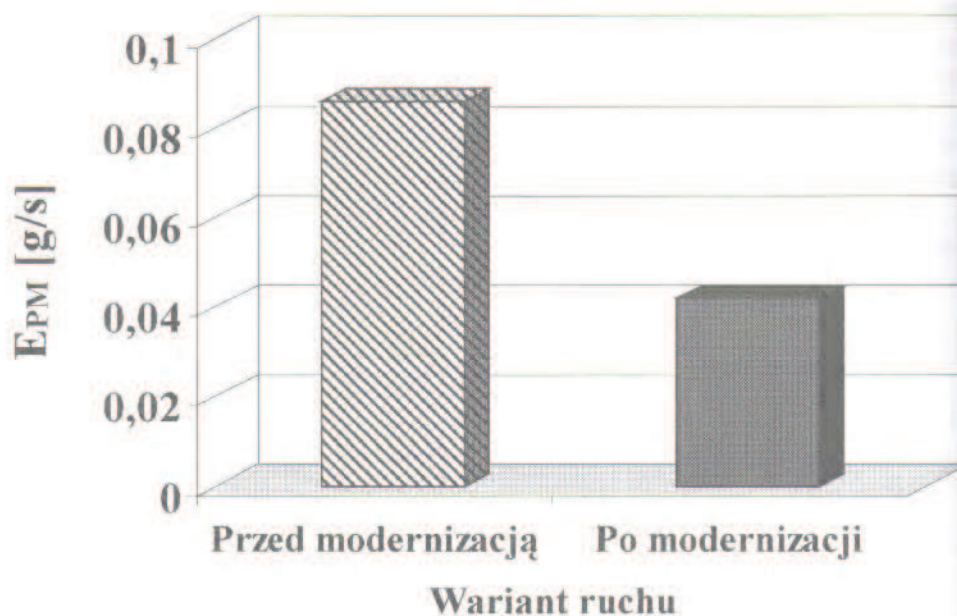
Rys. 10. Średnie globalne natężenie emisji tlenku węgla z pojazdów w analizowanym rejonie.
Fig. 10. Average global emission intensity of carbon monoxide for the vehicles in the analysed area.



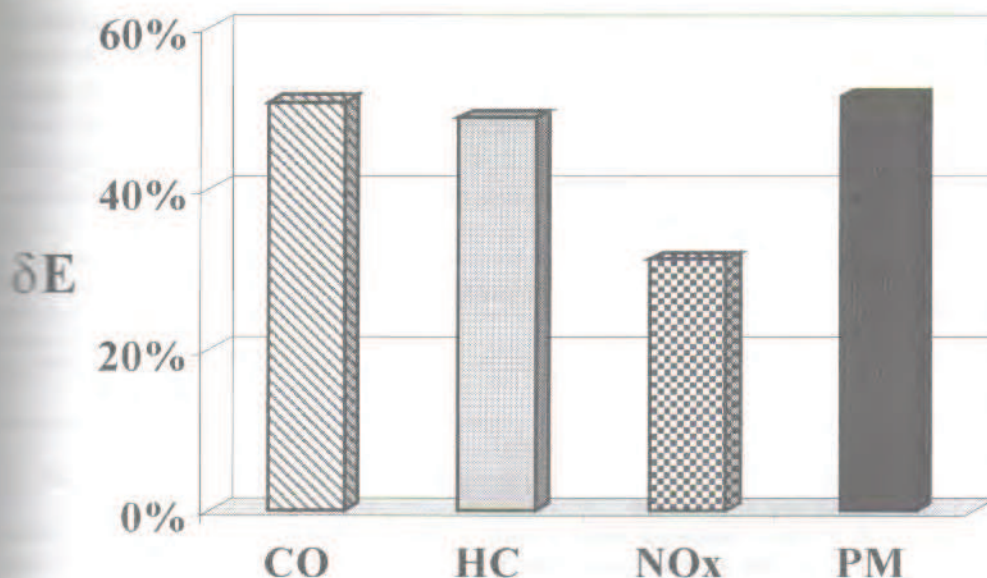
Rys. 11. Średnie globalne natężenie emisji węglowodorów z pojazdów w analizowanym rejonie.
Fig. 11. Average global emission intensity of hydrocarbons for vehicles in the analysed area.



Rys. 12. Średnie globalne natężenie emisji tlenków azotu z pojazdów w analizowanym rejonie.
Fig. 12. Average global emission intensity of nitrogen oxides for the vehicles in the analysed area.



Rys. 13. Średnie globalne natężenie emisji cząstek stałych z pojazdów w analizowanym rejonie.
Fig. 13. Average global emission intensity of particulate matter for the vehicles in the analysed area.



Rys. 14. Zmniejszenie średniego globalnego natężenia emisji zanieczyszczeń z pojazdów w analizowanym rejonie.

Fig. 14. Reduction of the average global emission intensity from the vehicles in the analysed area.

Uzyskane wyniki należy uznać za bardzo znaczące ze względu na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń zawartych w spalinach w obszarze analizowanych skrzyżowań,

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, że modyfikacja organizacji ruchu w rozpatrywanym rejonie powoduje zmianę charakteru jazdy pojazdów, zniemną większą stabilizacją prędkości i w konsekwencji:

- zwiększenie średniej prędkości jazdy rządu (15÷20%): około 20% dla samochodów osobowych oraz (15÷16)% dla samochodów ciężarowych i autobusów;
- zmniejszenie średniego natężenia emisji substancji szkodliwych dla środowiska rządu 50% dla tlenku węgla, węglowodorów i cząstek stałych oraz 30% dla tlenków azotu.

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych można sformułować zatem wniosek, że zmiana organizacji ruchu pojazdów w rozpatrywanym rejonie spowoduje znaczące zmniejszenie emisji globalnej substancji szkodliwych dla środowiska. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych są zgodne ze stanem wiedzy na temat zanieczyszczenia środowiska spalinami z silników pojazdów.

Przeprowadzone rozważania dowodzą konieczności dokonywania racjonalnej oceny skuteczności przedsięwzięć, podejmowanych na rzecz poprawy stanu środowiska w związku z użytkowaniem pojazdów.

Rozważania teoretyczne, przedstawione w niniejszej pracy, poparte wynikami praktycznego zastosowania opracowanej metody oceny emisji zanieczyszczeń komunikacyjnych w miastach, wskazują na możliwość skutecznego badania modeli emisji zanieczyszczeń ze względu na czynniki, determinujące te zjawiska. Szczególnie cenna jest możliwość optymalizacji sterowania ruchu pojazdów w wielkich aglomeracjach miejskich ze względu na minimalizację emisji substancji szkodliwych dla środowiska.

Piśmiennictwo

- [1] BUWAL, INFRAS AG: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950 — 2010. BUWAL-Bericht, 255, 1995.
- [2] CHŁOPEK Z., POLICHNOWSKI T.: *Emisja substancji szkodliwych dla środowiska z pojazdów poruszających się na skrzyżowaniach*. Polskie Drogi, Nr 4, 1990.
- [3] CHŁOPEK Z.: Badania modelu globalnej emisji spalin z silników pojazdów drogowych. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna*, 6, Nr 8, 1999.
- [4] CHŁOPEK Z.: *Badania symulacyjne emisji globalnej substancji szkodliwych dla środowiska z silników trakcyjnych*. PAN Oddział w Krakowie. Teza Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji. Kraków 2001.
- [5] CHŁOPEK Z.: *Główne problemy modelowania emisji substancji szkodliwych dla środowiska z silników spalinowych*. Komitet Transportu PAN. „MODES” Modelowanie Systemów Energetycznych z Silnikami Spalinowymi — Konferencja Naukowa dla uczczenia 70-lecia Profesora Mariana Cichego. Gdańsk 2001.
- [6] CHŁOPEK Z.: *Modelowanie emisji globalnej spalin z silników pojazdów drogowych*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej, 4, 1999.
- [7] CHŁOPEK Z.: *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych*. Prace Naukowe. Seria „Mechanika” z. 173. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999.
- [8] CHŁOPEK Z.: *Ocena wpływu organizacji ruchu pojazdów drogowych na globalną emisję substancji szkodliwych dla środowiska naturalnego*. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna*, T. 7, Nr 7, 2000.
- [9] CHŁOPEK Z.: *Pojazdy samochodowe*. Ochrona środowiska. WKŁ, Warszawa 2002.
- [10] CHRÓŚCIEL S., JAGUSIEWICZ A., JAWORSKI W., JUDA J., NOWICKI M., WARCHALOWSKI A.: Wytyczne obliczania stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. PZITS. Zeszyt 359/II. Warszawa 1981/83.
- [11] COPERT III — Methodology and Emission Factors. European Environment Agency. European Topic Center on Air Emission, 2000.
- [12] CUPIAL K., DUŻYŃSKI A., GRUCA M.: *Program „Skanmot” do analizy numerycznej rozkładu zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego wywołanych ruchem samochodów i próba jego ekstremalnej weryfikacji*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej, 4, 1997.
- [13] INFRAS AG: *Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs*. Version 1.2. Bern 1999.
- [14] JOURMARD R.: *Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-the art*. INRETS report LTE 9901. Bron, France and European Commission, DG Transport EUR 18902, Luxembourg 1999.
- [15] MARCZUK G.I.: *Modelowanie matematyczne problemów środowiska naturalnego*. PWN, Warszawa 1995.
- [16] SAMARAS Z., ZIEROCK K.-H.: *COPERT: Computer programme to calculate emissions from road traffic in computer techniques in environmental studies III*. Computational Mechanics Publications, Springer Verlag 1990.

MODELLING OF THE POLLUTION EMISSION FROM VEHICLES MOVING AT THE INTERSECTIONS

Summary

Ecological characteristics of vehicles engines, ex. the intensity of pollution emission, depends on the conditions of engine work determined by the course of vehicle speed. Courses of vehicles speed in the city centres depend on the parameters characterising traffic control at the intersections. Thus, there is a possibility of analysing the problem of traffic control at the intersections with respect to the minimisation of emission. In this paper general rules of emission modelling at the intersections are presented and the theoretical part are illustrated by the results of simulation researches carried out for the real traffic conditions in the area of intersections.