

Tomasz Ambroziak¹, Marianna Jacyna²

Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej

Ilona Jacyna-Gołda³

Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej

Roland Jachimowski⁴

Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej

Agnieszka Merkisz-Guranowska⁵

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Politechnika Poznańska

Dariusz Pyza⁶, Jolanta Żak⁷

Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej

O pewnym podejściu do modelowania systemu transportowego w aspekcie zrównoważonego rozwoju

1. WSTĘP

W 2017 roku minie trzydzieści lat od podania pierwszej definicji zrównoważonego rozwoju (1987 r. Raport ONZ Nasza Wspólna Przyszłość) wg której jest to rozwój, który zapewnia zaspokojenie potrzeb obecnych pokoleń, nie przekreślając możliwości zaspokojenia potrzeb pokoleń następných. Idea zrównoważonego rozwoju znalazła szeroki oddźwięk zarówno w Polsce jak i na arenie światowej. Definicja przedstawiona w 1987 roku była w późniejszych latach uszczegółowiana przez wiele środowisk naukowych i gospodarczych. Jedną z definicji zapisanych w raporcie Światowej Unii Ochrony Przyrody (IUCN), głosi że „zrównoważony rozwój polega na maksymalizacji korzyści netto z rozwoju ekonomicznego, chroniąc jednocześnie oraz zapewniając odtwarzanie się użyteczności i jakości zasobów naturalnych w długim okresie. Rozwój gospodarczy musi oznaczać nie tylko wzrost dochodów per capita, ale poprawę także innych elementów dobrobytu społecznego. Musi obejmować również niezbędne zmiany strukturalne w gospodarce i całym społeczeństwie”.

Transport, ze względu na destrukcyjny wpływ na otoczenie znalazł się w głównym obszarze zainteresowań zrównoważonego rozwoju, w konsekwencji doprowadzając do powstania idei *zrównoważonego transportu*. Według ekspertów Komisji Europejskiej system transportowy spełniający założenia zrównoważonego rozwoju (tzw. transport zrównoważony) to taki, który:

- „zapewnia dostępność celów komunikacyjnych w sposób bezpieczny, niezagrożący zdrowiu ludzi i środowisku w sposób równy dla obecnej i następných generacji;
- pozwala funkcjonować efektywnie, oferować możliwość wyboru środka transportowego i podtrzymać gospodarkę oraz rozwój regionalny;
- ogranicza emisje i odpady w ramach możliwości zaabsorbowania ich przez ziemię, zużywa odnawialne zasoby w ilościach możliwych do ich odtworzenia, zużywa nieodnawialne zasoby w ilościach możliwych do ich zastąpienia przez odnawialne substytuty, przy minimalizowaniu zajęcia terenu i hałasu”[22].

Ponieważ jednocześnie transport jest jednym z generatorów rozwoju gospodarczego należy poszukiwać możliwości zaspokajania potrzeb przewozowych przy minimalizacji negatywnego wpływu transportu na

¹ tam@wt.pw.edu.pl

² maja@wt.pw.edu.pl

³ jacyna.golda@gmail.com

⁴ rjach@wt.pw.edu.pl

⁵ agnieszka.merkisz-guranowska@put.poznan.pl

⁶ dpz@wt.pw.edu.pl

⁷ j.zak@wt.pw.edu.pl

środowisko. Wśród negatywnych skutków wpływu transportu na środowisko naturalne należy wyróżnić: zanieczyszczenia powietrza, zmiany klimatyczne, hałas, kongestię, wypadki.

Podjętym jest wiele działań zmierzających do ograniczenia tych skutków. W artykule ograniczono się do analizy systemu transportowego z punktu widzenia jego emisyjności, czyli wpływu na zanieczyszczenie powietrza i zmiany klimatyczne.

2. ZAŁOŻENIA MODELU ZRÓWNOWAŻONEGO SYSTEMU TRANSPORTOWEGO

Zanieczyszczenie powietrza emitowane przez pojazdy oraz zmiany klimatyczne zależą od wielu czynników. Wśród nich można wyróżnić: skład paliwa, rodzaj i podstawowe cechy pojazdu, rozmieszczenie infrastruktury transportowej, prędkość, miejsca powstawania zatorów komunikacyjnych i inne. Natomiast miernikami zanieczyszczenia powietrza są: emisje i stężenie poszczególnych zanieczyszczeń pierwotnych (tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla CO i cząstki stałe PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$ a także kurz i sadzę). Zanieczyszczenia te negatywnie oddziałują na tworzywa i budynki, uprawy rolne i lasy a co najważniejsze są szkodliwe dla zdrowia i życia ludzi.

Zmiany klimatyczne wywoływane są głównie przez emisję gazów cieplarnianych tj. takich gazów, które dzięki swoim własnościom fizykochemicznym mają zdolność zatrzymywania energii słonecznej w obrębie atmosfery ziemskiej. Należą do nich: para wodna H_2O , CO_2 , NO_2 , CH_4 , ozon O_3 , freony i inne. Podczas działalności transportowej emitowane do atmosfery są: CO_2 , NO_2 , CH_4 . Emisja substancji szkodliwych dla środowiska, pochodzących z pojazdów, wynika głównie ze składu i właściwości paliw, jak ma to miejsce np. w przypadku związków siarki, węglowodorów pierścieniowych czy metali ciężkich.

Kształtowanie zrównoważonego systemu transportowego powinno wynikać z jednej strony z prognoz potrzeb przewozowych a drugiej z dostosowania infrastruktury i wymogów prawa do standardów i wymogów dotyczących zrównoważonego transportu. Minimalizacja negatywnego wpływu transportu na środowisko i spełnienie rosnących oczekiwań przewozowych są kryteriami przeciwstawnymi. Niezbędnym jest więc poszukiwanie rozwiązania wykorzystującego ocenę wielokryterialną uwzględniającą te kryteria.

Podstawową wielkością charakteryzującą ekologiczne właściwości pojazdów jest emisja drogowa zanieczyszczeń, będącą pochodną emisji (masy zanieczyszczeń) względem drogi pokonywanej przez pojazd. Emisja drogowa zanieczyszczenia jest funkcją prędkości pojazdu. Przyjmuje się, że całkowita emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w obszarze bilansowania jest sumą emisji [7]:

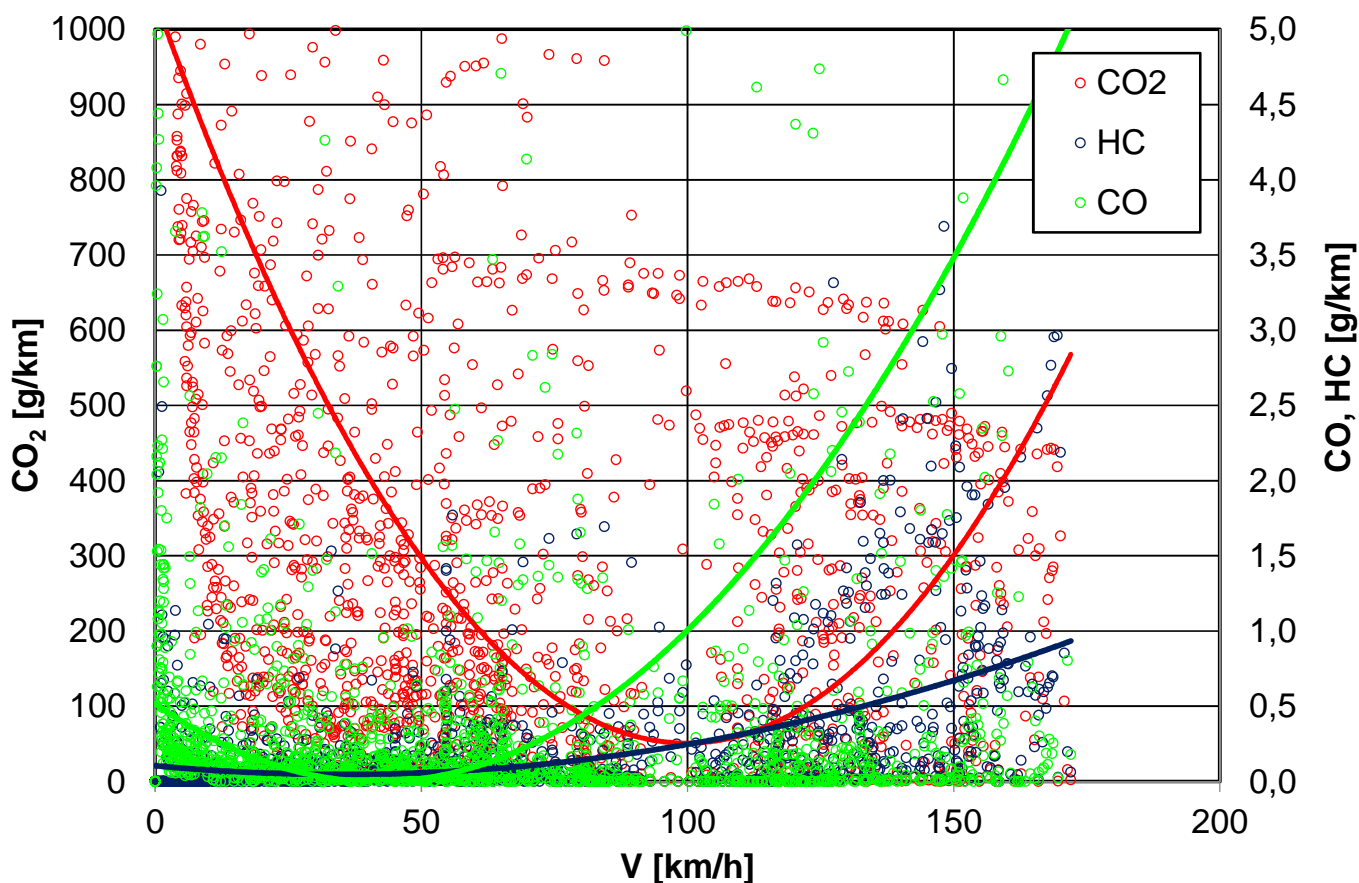
- z silników nagranych do temperatury normalnej eksploatacji,
- związanej z nagrzewaniem się silników do temperatury normalnej eksploatacji,
- parowania par paliwa z układu paliwowego pojazdu.

Zatem, jednym z mierników powinna być średnia prędkość na danej drodze [17]. Oczywiście, wśród mierników należy wymienić poziom emisji poszczególnych rodzajów zanieczyszczeń na jednostkę drogi (g/km) lub jednostkę energii (g/kWh) dla: CO, HC, NO_x , CO_2 . Wielkość masy i stężenia oraz liczby cząstek stałych poszczególnych rodzajów zanieczyszczeń na jednostkę drogi (g/km) lub jednostkę energii (g/kWh) w tym zależności od rodzaju używanego paliwa lub rodzaju napędu pojazdu. Na rysunku 1 przedstawiono wielkość emisji drogowej wybranych składników spalin w zależności od prędkości jazdy pojazdu.

Najprostszą metodą zmniejszenia emisji spalin jest zmniejszenie liczby pojazdów. Można tego dokonać m.in. poprzez bardziej efektywne wykorzystanie pojazdów np. uzyskując wyższe średnie współczynniki obciążenia pojazdów, zmniejszając puste przebiegi pojazdów itp.

W artykule przyjęto, że system transportowy definiowany jest on jako układ środków technicznych, organizacyjnych i ludzkich, powiązanych ze sobą w taki sposób, aby sprawnie realizować przemieszczanie osób i (lub) rzeczy [14]. W takim ujęciu elementy systemu transportowego stanowią przede wszystkim:

- sieć transportowa różnych rodzajów transportu,
- punkty obsługi ruchu towarowego i pasażerskiego,
- środki przewozowe przeznaczone do przewozu ładunków oraz pasażerów,
- urządzenia ładunkowe umożliwiające obsługę środków transportu zewnętrznego,
- urządzenia zabezpieczenia ruchu wraz z przepisami bezpieczeństwa i kontroli ruchu,
- załoga systemu.



Rys. 1. Zmiana wartości emisji drogowej wybranych składników spalin w zależności od prędkości jazdy pojazdu osobowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [18].

Podczas badania Zrównoważonego Systemu Transportowego (EST), w stosunku do systemu transportowego, należy dodatkowo uwzględnić emitowane związki szkodliwe oraz obszary wrażliwe (cenne przyrodniczo, skupiska ludzkie itp.) Reasumując w modelu proekologicznego (zrównoważonego) systemu transportowego uwzględniono dodatkowo analizę przemieszczania pojazdów między elementami struktury EST z punktu widzenia problematyki minimalizacji emisji związków szkodliwych przez transport. Model matematyczny stanowi narzędzie podejmowania decyzji w zakresie kształtowania rozwoju tego systemu oraz dystrybucji zadań przewozowych pomiędzy gałęzie transportu.

Działaniami podejmowanymi wewnątrz zrównoważonego systemu transportowego są decyzje dotyczące kształtowania zasobów EST oraz ich dostosowania do realizacji postawionych przed tym systemem zadań oraz ograniczeń wynikających z przepisów dotyczących ekologii. Działania tego drugiego rodzaju są określone jako organizacja, rozumiana jako sposób realizacji zadań. Reasumując w wyniku organizacji, określony zostanie sposób realizacji zadań przewozowych co w efekcie powinno skutkować otrzymaniem wymaganej efektywności systemu przy zachowaniu ograniczeń wynikających ze szkodliwości działalności przewozowej. Zatem musi być ustalana przy uwzględnieniu kryterium kosztów całkowitych transportu (przewozu oraz kosztów zewnętrznych) i kryterium wielkości emitowanych środków szkodliwych.

Możliwość dostosowania poszczególnych zasobów EST do realizacji zadań przewozowych oraz jakość tego dostosowania są uwarunkowane charakterystykami elementów EST (np. zdolnościami przewozowymi poszczególnych rodzajów transportu, kosztami przewozu wg rodzajów transportu). Stąd w modelu EST konieczne jest także uwzględnienie charakterystyk wszystkich jego elementów.

Dokonując analizy lub oceny jakiegokolwiek zjawiska, procesu, systemu należy zawsze doprecyzować punkt widzenia z jakiego będzie dokonywana ta analiza czy ocena. W przypadku systemu transportu zrównoważonego wskaźnikiem oceny może być np. wielkość emisji spalin, kosztów zewnętrznych lub jakość realizacji zadań itp.

Uwzględniając powyższe wśród elementów zrównoważonego systemu transportowego wyróżniono następujące rodzaje:

- punkty rozpoczęcia przewozu (źródła potoku pojazdów);
- punkty zmiany charakterystyk dróg (skrzyżowania, zmiana liczby pasów, itp.) oraz zmiany rodzaju środka transportowego wraz z towarzyszącą im infrastrukturą punktową transportu, nazwane tu w skrócie punktami pośrednimi;
- punkty zakończenia przewozu (ujścia potoków pojazdów);
- powiązania transportowe między w/w punktami występujące jako istniejąca infrastruktura liniowa transportu;
- środki transportu, które zdeterminowane są parametrami infrastruktury (wymiary, ładowność, prędkość przemieszczania) i parametrami ekonomicznymi (koszty jednostkowe) oraz charakterystykami emitowanych związków szkodliwych;
- organizacji i sieci przekazywania informacji.

Przyjęto, że zapotrzebowanie na przemieszczanie ładunków może być realizowane z dowolnego węzła na sieci transportowej, do innego usytuowanego wzdłuż tego samego lub innego ciągu komunikacyjnego. Z tego powodu, w rzeczywistości, dla tej samej relacji przewozu wybierane będą różne drogi przewozu, a co za tym idzie różne rodzaje transportu.

Przemieszczanie ładunków i osób w systemie transportowym realizowane jest z wykorzystaniem różnych środków transportowych. Oznacza to, że wzrost efektywności systemu transportowego przy jednoczesnej minimalizacji emisji związków szkodliwych można osiągnąć przede wszystkim poprzez racjonalne wykorzystanie infrastruktury transportowej. Przy czym parametry infrastruktury transportu podobnie jak jej rozmieszczenie, nasycenie w obszarach geograficznych, poziom techniczny konstrukcji i stan utrzymania wpływają na możliwości, koszt, jakość i czas przewozu [13], [25], [26].

Narzędziem analizy i oceny funkcjonowania istniejących bądź projektowanych systemów jest model, w którym odwzorowane powinny być te właściwości systemu, które są istotne z punktu widzenia celu badań [12]. Biorąc pod uwagę charakter oraz zadania realizowane przez system transportowy jest konieczne, aby w jego modelu odwzorowane były takie właściwości, jak:

- struktura EST przedstawiająca rzeczywiste połączenia transportowe między elementami systemu;
- charakterystyki elementów struktury EST przedstawiające odwzorowanie rzeczywistych właściwości elementów systemu istotnych z punktu widzenia minimalizacji emisji spalin, np. techniczne, ekonomiczne, organizacyjne, itp.;
- zadanie transportowe EST określające wielkość obciążenia systemu strumieniami ładunków i osób w relacji źródło - ujście;
- organizacja EST przedstawiająca sposób dostosowania elementów infrastruktury wraz wyposażeniem do realizowanych zadań.

Formalnie, model systemu transportu proekologicznego (**MEST**) możemy zapisać jako uporządkowaną piątkę postaci:

$$\mathbf{MEST} = \langle \mathbf{GE}, \mathbf{FE}, \mathbf{QE}, \mathbf{OE} \rangle \quad (1)$$

gdzie:

- MEST** – model proekologicznego systemu transportowego
GE – struktura proekologicznego systemu transportowego
FE – zbiór charakterystyk elementów struktury proekologicznego systemu transportowego
QE – wielkość zadań przewozowych, jakie **MEST** ma zrealizować

3. MODEL SYSTEMU TRANSPORTOWEGO W ASPEKTCIE ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU

3.1. Struktura sieci transportowej

Struktura **MEST** określa powiązania między wymienionymi w punkcie 2 elementami, a także z otoczeniem. Zgodnie ze zwyczajową notacją przyjęto, że:

$$GE = \langle WE, LE \rangle \quad (2)$$

gdzie: **GE** – graf struktury sieci transportowej,
WE – zbiór elementów struktury (węzłów),
LE – zbiór połączeń transportowych występujących między elementami struktury.

Powiązania pomiędzy wszystkimi elementami stanowią istniejące połączenia transportowe. Każde połączenie transportowe charakteryzuje się wieloma parametrami wśród których można wyróżnić: liczbę pasów ruchu, obszarem w którym się znajduje (miasto, teren chroniony), przepustowość czy też inne.

Elementy liniowej infrastruktury (drogi, tory kolejowe) w zależności od obciążającego je potoku ruchu charakteryzują się różną prędkością potoku ruchu, która jak wcześniej wspomniano determinuje wielkość emisji związków szkodliwych. Zatem po dokonaniu rozłożenia potoku ruchu na sieć transportową oraz ustaleniu średniej prędkości potoku ruchu i struktury pojazdów możliwe będzie wyznaczanie dla transportu drogowego rzeczywistej emisji związków szkodliwych.

3.2. Stosowane w modelu indeksy

Elementy analizowanego systemu zostały formalnie zapisane, najważniejsze z nich zapisano w tab. 1

Tabela 1. Stosowane w modelu indeksy

Indeks	Nazwa
i, i', i''	indeks węzła transportowego, $i, i', i'' \in WE$
st	indeks typu środka transportowego, $st \in ST$
rsp	indeks typu silnika, $rsp \in RSP$
s	indeks typu spalin, $s \in S$
o	indeks typu obszaru, $o \in O$
neu	indeks normy euro, $neu \in NEU$
v	indeks prędkości, $v \in V$
k	indeks rodzaju transportu (kolejowy, drogowy, lotniczy,...), $k \in K$
p	indeks drogi w relacji przewozu $(a,b) \in E$ $p \in P^{ab}$
m	indeks typu transportu (pasażerski, towarowy), $m \in M$
$nr(st)$	numer normy euro środka transportowego typu st

Źródło: opracowanie własne.

3.3. Parametry modelu

Parametry elementów systemu zostały formalnie zapisane. Najważniejsze z nich podano w tabeli 2.

Tabela 2. Stosowane w modelu parametry

$l_{i,i'}$	długość (i,i') -tego połączenia transportowego
$x(a,b,m)$	zapotrzebowanie na przewóz w relacji $(a,b) \in E$ m -tego typu transportu
$q(st,m)$	średnie wykorzystanie ładowności/ pojemności pojazdu st -tego typu m -tego typu transportu
$nr(st)$	numer normy euro pojazdu st -tego typu
$d_{i,i'}$	przepustowość (i,i') -tego połączenia transportowego
$c_{i,i',st,rsp}$	przeciętny koszt przejazdu środka tr. st -ego typu (i,i') -tym połączeniem transportowym
$\lambda_{\max}(s,o)$	maksymalny poziom wielkości emisji związku szkodliwego s -tego typu na obszarze o
$em(s,st,neu,rsp,v)$	emisja s -tego związku szkodliwego spalin przez st -ty typ pojazdu z silnikiem rsp -tego typu spełniający neu -tą normę emisji podczas jazdy z prędkością v na jedn. odległości
$neu(i,i')$	numer dopuszczalnej normy euro dla odcinka $(i,i') \in LE$
$v_{i,j}^{\max}$	maksymalna, zgodna z przepisami drogowymi, prędkość przejazdu na połączeniu (i,i')
Γ_i^{-1}	zbiór węzłów będących poprzednikami węzła i
Γ_i	zbiór węzłów będących następnikami węzła i

Źródło: opracowanie własne.

3.4. Zmienne decyzyjne

Ze względu na aspekt proekologiczny systemu transportowego, wielkością poszukiwaną jest liczba pojazdów przemieszczająca się po sieci transportowej. Zatem zmienna decyzyjna oznaczona jako $x(st, rsp, neu, i, i', k)$ w sformułowanym zadaniu optymalizacyjnym będzie rozumiana jako zmienna decyzyjna zadania rozłożenia strumienia pojazdów (liczba pojazdów danego typu) na sieć transportową MEST.

3.5. Funkcja kryterium

Jak wspomniano w punkcie 2 model sytemu transportowego uwzględniający zasady zrównoważonego transportu jest modelem wielokryterialnym. Pierwsze grupa kryteriów dotyczy minimalizacji emisji związków szkodliwych dla każdego z emitowanych związków osobno.

$$\forall s \in S, \sum_{st \in ST} \sum_{neu \in NEU} \sum_{(i, i') \in LE} \sum_{k \in K} \sum_{rsp \in RSP} x(st, rsp, neu, i, i', k) l_{i, i'} em(s, st, neu, rsp, v) \longrightarrow \min \quad (3)$$

osiągała minimum.

Oczywiście drugim kryterium, które będzie brane pod uwagę jest kryterium kosztowe

$$\sum_{st \in ST} \sum_{neu \in NEU} \sum_{(i, i') \in LE} \sum_{k \in K} \sum_{rsp \in RSP} x(st, rsp, neu, i, i', k) l_{i, i'} c_{i, i', st, rsp} \longrightarrow \min \quad (4)$$

3.6. Ograniczenia

Ze względu na ograniczenia wydawnicze w artykule przedstawiono tylko niektóre ograniczenia:

1. na realizację zapotrzebowania na przewóz,

$$\forall (a, b) \in E \quad \forall m \in M \quad \sum_{p \in P^{a,b}} \sum_{st \in ST} \sum_{neu \in NEU} \sum_{(i, i') \in LE} \sum_{k \in K} \sum_{rsp \in RSP} x^p(st, rsp, neu, i, i', k) q(st, m) \geq x(a, b, m) \quad (5)$$

2. ograniczenia wynikające z zadanych przepustowości połączeń (odcinków) dróg:

$$\forall (i, i') \in LE \quad \sum_{st \in ST} \sum_{neu \in NEU} \sum_{rsp \in RSP} \sum_{k \in K} x(st, rsp, neu, i, i', k) \leq d_{i, i'} \quad (6)$$

3. warunki nakładane na potok ruchu:

(a) - nieujemności (NP) potoku ruchu:

$$\forall (i, i') \in LE, \quad \forall neu \in NEU, \quad \forall rsp \in RSP \quad \forall k \in K, \quad \forall st \in ST \quad x(st, rsp, neu, i, i', k) \geq 0 \quad (7)$$

(b) - addytywności potoku (AP) ruchu:

$$\forall (i, i') \in LE, \quad \forall neu \in NEU, \quad \forall rsp \in RSP \quad \forall k \in K, \quad \forall st \in ST \quad \sum_{(a, b) \in E} \sum_{p \in P^{a,b}} x^p(st, rsp, neu, i, i', k) = x(st, rsp, neu, i, i', k) \quad (8)$$

(c) - zachowania potoku (ZP) ruchu:

$$\forall i \in P \quad \sum_{i' \in \Gamma_i^{-1}} \sum_{k \in K} \sum_{rsp \in RSP} \sum_{neu \in NEU} \sum_{st \in ST} x(st, rsp, neu, i', i, k) - \sum_{i'' \in \Gamma_i^{-1}} \sum_{k \in K} \sum_{rsp \in RSP} \sum_{neu \in NEU} \sum_{st \in ST} x(st, rsp, neu, i, i'', k) = 0 \quad (9)$$

4. na ograniczenie wjazdu do obszaru ze względu dopuszczalna na normę Euro

$$\forall k \in K \quad \forall neu \in NEU, \quad \forall rsp \in RSP \quad \forall st \in ST \quad \forall (i, i') \in LE \quad \text{sgn } x(st, rsp, neu, i, i', k) nr(st) \leq neu(i, i') \quad (10)$$

5. na typ zmiennej decyzyjnej

$$\forall st \in ST \quad \forall k \in K \quad \forall neu \in NEU, \quad \forall rsp \in RSP, \quad \forall (i, i') \in LE \quad x(st, rsp, neu, i, i', k) \in N \quad (11)$$

i inne [13], [25], [26].

4. WNIOSKI

Stosowane dotychczas metody minimalizacji emisji poprzez zastosowanie innowacyjnych technologii (zmiany w konstrukcji silników, zmiany paliwa) ze względu na ciągły wzrost liczby przewozów pasażerskich i towarowych są niewystarczające. Tym bardziej, że ponad połowa przejazdów w Europie to przewozy na odległość do 5 km, czyli takie dla których ilość emitowanych do atmosfery szkodliwych substancji jest najwyższa. Należy zatem podejść do problemu w sposób kompleksowy a więc zmieniając cały system transportowy a nie poprawiając jego elementy (pojazdy). Przyjęta polityka transportowa powinna:

- zachęcać do stosowania energooszczędnych i mniej obciążających środowisko środków transportu osób i towarów,
- zwiększać efektywności użytkowania środków transportu
- oddziaływanie na zmniejszenie ruchliwości zwłaszcza w podróży samochodem,
- działanie w kierunku stosowania i egzekwowania norm emisji spalin i hałasu dla pojazdów oraz stosowanie niskoemisyjnych paliw odnawialnych.

Jedną z dróg umożliwiających osiągnięcie tego celu jest zbudowanie modelu matematycznego a następnie opartego na nim symulacyjnego, które umożliwią dokładną analizę i ocenę systemu transportowego.

Streszczenie

W artykule przedstawiono model systemu transportowego w aspekcie zrównoważonego rozwoju. Zdefiniowano pojęcia zrównoważonego rozwoju i zrównoważonego transportu. Zidentyfikowano podstawowe negatywne skutki wpływu transportu na środowisko naturalne tj.: zanieczyszczenie powietrza, zmiany klimatu, hałas, kongestię oraz wypadki. W modelu ograniczono się do analizy systemu transportowego z punktu widzenia jego emisyjności, czyli wpływu na zanieczyszczenie powietrza i zmiany klimatyczne. W sposób formalny zapisano dane, zmienne decyzyjne, ograniczenia i funkcje kryterium.

Słowa kluczowe: transport zrównoważony, model matematyczny, proekologiczny system transportowy.

About modelling transport system in aspect of sustainable development

Abstract

The article presents a model of the transport system in the context of sustainable development. The concept of sustainable development and sustainable transport were defined. The main negative effects of the impact of transport on the environment, such as: air pollution, climate change, noise, congestion and accidents were identified. The model is limited to the analysis of the transport system from the point of view of its emissivity, i.e. the impact on air pollution and climate change. Data, decision variables, constraints and features criterion were formalized.

Key words: sustainable transport, mathematical model, environmentally friendly transport system.

Praca naukowa zrealizowana w ramach projektu badawczego pt. „Kształtowanie proekologicznego systemu transportowego” (EMITRANSYS) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

- [1] Air quality in Europe — 2012 report. EEA Report No 4/2012
- [2] Ambroziak T., Żak J.: - Kryteria oceny rozłożenia strumienia ładunków w sieci logistycznej uwzględniając komodalność transportu. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej serii Transport, z. nr 75, Warszawa 2010

- [3] Ambroziak, T., Gołębiowski, P., Pyza, D., Jacyna-Gołda, I., Merksiz-Guranowska, A.: Identification and Analysis of Parameters for the Areas of the Highest Harmful Exhaust Emissions in the Model EMITRANSYS. Journal of KONES Powertrain and Transport, 2013, cz. 20, nr 3
- [4] Chłopek Z., Laskowski P.: Charakterystyki emisji zanieczyszczeń wyznaczane metodą Monte Carlo Eksploatacja i Niezawodność Nr 2/2009
- [5] Daganzo C. (1999). "Logistics systems analysis", Berlin, New York, Springer.
- [6] Danklefsen, N., (red), Obliczanie kosztów zewnętrznych w sektorze transportu, Parlament Europejski, Bruksela, 2009
- [7] Green Paper on „Towards fair and efficient pricing in transport”. European Commission. COM (95) 691 final Brussels 20.12.1995. Fair Payment for Infrastructure Use: A phased approach to a common transport infrastructure-charging framework in the EU. COM (1998) 466 final. Brussels. 27.07.1998
- [8] Gronowicz, J.: Ochrona środowiska w transporcie lądowym. Wydawnictwo Instytutu Technologii i Eksploatacji, Poznań – Radom 2004,
- [9] Inspekcja Ochrony Środowiska: Ocena jakości powietrza w strefach w Polsce za rok 2011, Warszawa 2012, WWW: <http://www.gios.gov.pl>
- [10] Inspekcja Ochrony Środowiska: Zanieczyszczenie powietrza w Polsce w 2009 roku na tle wielolecia, Warszawa 2011, [www: powietrze.gios.gov.pl](http://www.powietrze.gios.gov.pl)
- [11] Jachimowski R., Kłodawski M., Lewczuk K., Szczepański E., Wasiak M., Implementation of the model of proecological transport system, Journal of KONES Powertrain and Transport, Institute of Aviation (Aeronautics) BK, Vol. 20, No. 4, Warszawa 2013, str. 129-139.
- [12] Jacyna M. (red.): System logistyczny Polski. Uwarunkowania techniczno-technologiczne komodalności transportu, Wydawnictwo Oficyny Wydawniczej Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012
- [13] Jacyna M., Wasiak M., Jacyna-Gołda I., Pyza D., Merksiz-Guranowska A., Merksiz J., Lewczuk, K. Żak J., Pielecha J., A holistic approach to modelling of the ecological domestic transport system, Materiały konferencyjne XVIII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística (PANAM 2014), Santander, 06-2014.
- [14] Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych, Wydawnictwo Oficyny Wydawniczej Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [15] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami: Krajowy bilans emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 2010 – 2011 w układzie klasyfikacji SNAP raport syntetyczny. Warszawa, 2013 <http://www.kobize.pl>
- [16] Logistyka transportu towarowego w Europie – klucz do zrównoważonej mobilności, Komunikat Komisji Wspólnot Europejskich do Rady, Parlamentu Europejskiego, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów z dnia 28.6.2006 r.
- [17] Merksiz J., Pielecha J., Fuć P. Badania emisji spalin w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego– aktualne możliwości badawcze Logistyka 2010, nr 4
- [18] Merksiz J., Pielecha J., Radzimirski S., New Trends in Emission Control in the European Union. Springer Tracts on Transportation and Traffic, Vol. 1, 2014, p. 170.
- [19] Ministerstwo Infrastruktury: Polityka Transportowa Państwa na lata 2006 – 2025. <http://cms.transport.gov.pl>
- [20] Polityka Transportowa Państwa na lata 2005-2020, Rynek Kolejowy, Październik, 2004
- [21] Projekt rozwojowy nt. „Model systemu logistycznego Polski jako droga do komodalności transportu w UE”. Sprawozdanie merytoryczne z zadania 1 i 7. Kierownik projektu M. Jacyna, Warszawa 2010
- [22] White Paper: European transport policy for 2010: time to decide, EC 2001
- [23] Wood D. F: AMACOM International logistics Books New York, N.Y., London 2002.
- [24] www.eea.europa.eu/pl/pressroom/newsreleases/zmniejszenie-kosztow-zdrowotnych-blisko-45
- [25] Jacyna M., Żak J., Jacyna-Gołda I., Merksiz J., Merksiz-Guranowska A., Pielecha J.: Selected Aspects of the Model of Proecological Transport System, Journal of Kones, Powertrain and Transport, Institute of Aviation, ISSN 1231-4005
- [26] Jacyna M., Merksiz J., Merksiz-Guranowska A., Jacyna-Gołda I. Żak J.: The role of inland waterways in the development of environmentally friendly transport system, Recenzowane Materiały konferencyjne 2nd International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems October 9-11, 2013, Nice, France.