

Marianna Jacyna, Dariusz Pyza

Problemy decyzyjne w kształtowaniu proekologicznego systemu transportowego

JEL: D81, Q01 DOI: 10.24136/atest.2019.126
Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

W artykule omówione zostały problemy decyzyjne związane z kształtowaniem proekologicznego systemu transportowego. Przedstawiono problematykę kształtowania systemu transportowego z uwzględnieniem aspektów proekologicznych oraz omówiono kryteria oceny. Przedstawiono model proekologicznego systemu transportowego oraz sformułowano przykładowe zadanie optymalizacyjne rozłożenia potoku ruchu dla proekologicznego systemu transportowego.

Słowa kluczowe: proekologiczny system transportowy, model systemu, emisja spalin.

Wstęp

Rozwój krajowego systemu transportowego z uwzględnieniem aspektów ekologicznych w literaturze przedmiotu definiowany jest, na ogół, jako kształtowanie zrównoważonego systemu transportowego. Zatem kształtowanie zrównoważonego systemu transportowego wiąże się nie tylko z realizacją celów polityki transportowej, ale również z zagadnieniami ekologicznymi [1, 2, 4, 12, 13, 19], dotyczącymi m. in.: zanieczyszczenia powietrza, gruntu i wody, hałasu, czy też drgań emitowanych przez środki transportu. Poza tym polityka transportowa w zakresie rozwoju krajowego systemu transportowego poszczególnych krajów Unii Europejskiej wynika z jednej strony z prognoz potrzeb przewozowych a drugiej z dostosowania infrastruktury systemu do standardów i wymogów Unii Europejskiej.

Komisja Europejska zwraca szczególną uwagę na potrzebę zrównoważonego rozwoju transportu oraz transportu przyjaznego dla środowiska. Transport generuje wiele kosztów, przy czym część jest płacona przez użytkowników, a pozostałe obciążają wszystkich podatników. Oznacza to, że koszt zewnętrzny jest kosztem, za który nie płacą podmioty go wytwarzające. Są to koszty zużycia środków służących do wytworzenia usługi transportowej, które nie są ponoszone przez kupującego i wytwórcę usługi, ale przez podmiot trzeci, czyli ogół społeczeństwa. Co ważne rozwój społeczno-gospodarczy oraz wzajemna współpraca krajów implikuje rozwój potrzeb przewozowych, których realizacja dokonywana jest przez różne gałęzie transportu. Podział zadań przewozowych pomiędzy poszczególne gałęzie transportu, czyli struktura systemu transportowego, szczególnie w warunkach gospodarki rynkowej, determinowana jest rachunkiem ekonomicznym prowadzonym przez użytkowników transportu.

Dokonując analizy, w jaki sposób powinno się kształtować system transportowy, należy pamiętać, iż poszczególne gałęzie transportu są integralnymi elementami systemu transportowego i rozwój każdej z nich wywołuje określone skutki w pozostałych gałęziach [5, 9]. Wciąż aktualna jest kwestia relacji między transportem samochodowym, a innymi gałęziami transportowymi, w tym przede wszystkim transportem kolejowym.

Transport odgrywa kluczową rolę w efektywnie funkcjonującym systemie gospodarczym. Potrzeby przewozowe determinowane są

zarówno czynnikami przestrzennymi, ekonomicznymi i technologiczno-produkcyjnymi jak również kooperacyjnymi i społecznymi. Czynniki przestrzenne wynikają z rozmieszczenia dóbr naturalnych i siły wytwórczej, z kolei technologiczna specjalizacja jest wynikiem kooperacji produkcyjnej wielu ogniw sieci dostaw w procesie przetwarzania produktu podstawowego na produkt finalny. W procesach technologiczno-produkcyjnych, determinowanych wzrostem wydajności pracy oraz specjalizacji produkcji, występuje również zjawisko koncentracji produkcji, niosące ze sobą wzrost zapotrzebowania na surowce i półfabrykaty oraz energię i wywóz skoncentrowanych odpadów produkcyjnych. Wszystko to stanowi o nowych źródłach potrzeb przewozowych [3, 14, 17, 18].

Zmiana zachowań rynkowych przedsiębiorstw oraz różne trendy z tym związane w obszarze gospodarki, wpływają na zwiększenie intensywności przepływu dóbr materialnych oraz na skracanie czasu, jaki upływa między poszczególnymi etapami produkcji a ogniwem końcowym łańcucha dostaw. Zjawisko takie prowadzi do wzrostu wymagań stawianych transportowi.

Transport jest głównym czynnikiem umożliwiającym rozwój gospodarczy i społeczny, związane jest to zarówno z dostawami w sieciach handlowych jak i zaopatrzeniem przedsiębiorstw produkcyjnych. Zapotrzebowanie na transport przy jego systematycznym wzroście powoduje, że jest on w coraz większym zakresie głównym czynnikiem wpływającym negatywnie na środowisko i utrudniającym życie społeczne. Szczególnie wysokie zanieczyszczenie powietrze powodowane jest przez transport drogowy, przez co istnieje konieczność, wprowadzania rozwiązań proekologicznych właśnie w transporcie drogowym.

Promowanie zrównoważonego transportu drogowego wymaga zmniejszenia negatywnego oddziaływanie transportu na środowisko, w szczególności emisji zanieczyszczeń do atmosfery, które wywołują szkody dla środowiska oraz zdrowia ludzi. Wymogi ochrony środowiska muszą zostać ponadto włączone do procesu określania i realizacji polityki Wspólnoty w innych dziedzinach, w tym wspólnej polityki transportowej.

Zrównoważony rozwój transportu oraz ochrona środowiska naturalnego należą do obszarów zainteresowania, które są związane z kształtowaniem proekologicznego systemu transportowego. W dokumentach Unii Europejskiej dotyczących wspólnej polityki transportowej i transportu już od wielu lat są przyjęte cele, priorytety oraz odpowiadające im działania, które mają na celu zapewnienie zrównoważonego rozwoju w danym obszarze [11, 15, 17,].

1. Uwarunkowania ekologiczne kształtowania zrównoważonego rozwoju systemu transportowego

Kształtowanie systemu transportowego z uwzględnieniem aspektów ekologicznych jest zagadnieniem wieloaspektowym. Należy wziąć pod uwagę, m. in.:

- potrzeby nabywców usług transportowych,
- potencjał techniczny dostawców usług transportowych, w tym ich możliwościami na wprowadzanie zmian,
- stan infrastruktury transportowej,
- rozwiązania w zakresie organizacji ruchu w poszczególnych obszarach, regionach,

- politykę transportową danego kraju czy regionu,
 - uwarunkowania ekologiczne.
- Ponadto, każdy z przedstawionych aspektów zawiera wiele problemów, które należy rozwiązać. Z jednej strony jest to problem bardzo skomplikowany a z drugiej strony wymusza na konstruktorach, analitykach, projektantach poszukiwania nowych rozwiązań. Głównym czynnikiem prowadzącym do rozwoju techniki i technologii we wszystkich dziedzinach przemysłu jest konieczność ograniczania jego negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Co ważne, aktualnie rośnie świadomość zagrożeń, jakie niesie rosnąca emisja szkodliwych związków pochodzących z transportu. Negatywny wpływ transportu na środowisko naturalne to przede wszystkim [6, 9, 11, 13, 16]
- emisja gazów cieplarnianych przyczyniających się do zmian klimatycznych,
 - emisja zanieczyszczeń powietrza wpływających negatywnie na zdrowie ludzi i środowisko przyrodnicze, zwłaszcza w aglomeracjach miejskich,
 - zajmowanie cennych przyrodniczo terenów i rozcinanie ich ciągłości (fragmentacja) nowobudowanymi ciągami infrastruktury technicznej, przyczyniające się do utraty różnorodności biologicznej, emitowanie hałasu zagrażającego ludzkiemu zdrowiu.

Utrzymujące się wzrostowe trendy w przewozach pasażerskich i towarowych powodują, że skutki podejmowanych działań w celu zmniejszenia negatywnych zjawisk są niwelowane w dużym stopniu przez zwiększoną pracę przewozową zarówno transportu towarowego, jak i pasażerskiego. Z analizy wielu badań [1, 16], wynika, że transport drogowy ma największy udział w ogólnej emisji szkodliwych związków do otoczenia. Utrzymująca się przewaga udziału transportu drogowego w przewozach, utrudnia osiągnięcie pożądaných efektów podejmowanych działań.

Współpraca międzynarodowa wymaga tworzenia sieci transportowej, która spełniałaby potrzeby wzrastających zadań przewozowych. Stąd, rozwój systemu transportowego powinien polegać na ustaleniu związków między przewidywaną wielkością zadań, wyposażeniem systemu a kosztem realizacji tychże zadań. Jednakże modernizacja i rozbudowa nie może polegać tylko na stworzeniu zintegrowanej sieci transportowej i zwiększeniu przepustowości – chociaż jest to bardzo ważne – ale musi iść w parze z poprawą bezpieczeństwa i ochroną środowiska naturalnego [5, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 16].

Badanie rozwoju infrastruktury systemu transportowego wymaga rozwiązania ciągu problemów, odpowiadających kolejnym etapom realizacji inwestycji zmieniających strukturę i charakterystyki elementów tej struktury oraz łącznej dla wszystkich etapów analizy rezultatów. Zakładamy, że rozłożenie środków finansowych wiąże się ściśle z rozłożeniem potoków ładunków, czyli organizacją potoków ładunków w sieci transportowej. Dokonując, modyfikacji charakterystyk obiektów logistycznych i połączeń transportowych modyfikujemy również strukturę sieci transportowej. Wymiarowanie wyposażenia systemu transportowego, to dobieranie jego wyposażenia do wielkości zadań przewozowych [7].

Ocena jakości doboru wyposażenia tego systemu do zadań przewozowych z centralnego punktu widzenia, wymaga odwzorowania w modelach charakterystyk wyposażenia integrujących charakterystyki elementów sieci i pojazdów tworzących potok ładunków. Mówiąc o rozwoju systemu transportowego musimy określić związki

między przewidywaną wielkością zadań, wyposażeniem systemu a kosztem realizacji tychże zadań oraz doboru środków do zadań [14, 17,].

2. Kryteria analizy systemu transportowego z uwzględnieniem emisji związków szkodliwych spalin

Organizacja systemów transportowych warunkuje emisję zanieczyszczeń do środowiska. Emisja zanieczyszczeń pochodzących ze sfery transportu jest dużo bardziej szkodliwa dla ludzi niż zanieczyszczenia pochodzące z przemysłu. Spowodowane jest to rozprzestrzenianiem się zanieczyszczeń motoryzacyjnych w bezpośrednim sąsiedztwie ludzi o wysokich stężeniach i na niskich wysokościach.

Zanieczyszczenie powietrza pochodzące z transportu drogowego zależy od wielu czynników. Zaliczyć do nich można m. in.: skład paliwa, rodzaj i podstawowe cechy pojazdu, rozmieszczenie infrastruktury, prędkość, miejsca powstawania zatorów komunikacyjnych (rys. 1) [17].



Rys. 1. Czynniki wpływające na zanieczyszczenie powietrza pochodzące ze sfery transportu samochodowego [17]

Zanieczyszczenie powietrza mierzy się za pomocą emisji i stężenia poszczególnych zanieczyszczeń pierwotnych (szkodliwych związków spalin powstających podczas jazdy). Wśród nich można wyróżnić: tlenki azotu (NOx), tlenek węgla (CO), dwutlenek siarki (SO2), ołów (Pb) i cząstki stałe (PM10) i (PM2,5) a także kurz i sadzę.

Wymienione zanieczyszczenia mogą negatywnie oddziaływać na tworzywa i budynki, uprawy rolne i lasy oraz mogą być szkodliwe dla roślin, zdrowia i życia zwierząt oraz ludzi.

Według Instytutu Ochrony Środowiska – Państwowego Instytutu Badawczego w roku 2016 w Polsce transport drogowy był odpowiedzialny za 31,8% całkowitej emisji tlenków azotu (NOx), 20,0% emisji tlenku węgla (CO) oraz 4,1% pyłów (TSP). Ponadto wielkość emisji frakcji pyłu PM10 i PM2,5 wynosiła odpowiednio 4,9% oraz 7,35 % [17]. Szczegółowe dane zanieczyszczenia powietrza w latach 2015÷2016 przedstawiono na rys. 2.

Struktura emisji i stężenia poszczególnych zanieczyszczeń pierwotnych zmienia się, niemniej jednak transport drogowy jest nadal tym obszarem, w którym istnieje konieczność wprowadzania rozwiązań proekologicznych.

Ochrona środowiska w Polsce jest istotnym zagadnieniem, regulowanym przez szereg aktów normatywnych, które bezpośrednio bądź pośrednio odnoszą się do obowiązków poszczególnych organów administracyjnych. Najważniejsze regulacje prawne w zakresie wpływu transportu na środowisko, to [17]:

- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska, Dz.U. z 2018 r. poz. 799, z późniejszymi zmianami;
- Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody, Dz.U. z 2018 r. poz. 1614;
- Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko Dz.U. z 2017 r. poz. 1405, z późniejszymi zmianami;
- Ustawa z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie, Dz. U. z 2018 r. poz. 954;
- Polityka Transportowa Państwa na lata 2006-2025, Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa 2005;
- Ustawa z dnia 11 stycznia 2018 r. o elektromobilności i paliwach alternatywnych, Dz.U. 2018 poz. 317.

Ponadto obowiązuje wiele regulacji prawnych wydanych w formie rozporządzeń odnoszących się bezpośrednio bądź pośrednio do obowiązków poszczególnych władz w tym zakresie.

Pierwsze regulacje prawne w Europie dotyczące ograniczania emisji spalin powstały w roku 1972. Opracowana wówczas norma nosiła nazwę ECE 15/01 (ECE – Economic Commission for Europe, Europejska Komisja Gospodarcza – EKG). W roku 1982 uchwalono kolejną normę (R 49) będącą jednocześnie normą poprzedzającą serię norm Euro. Serię norm Euro rozpoczęła norma Euro 0 wprowadzona w 1988 roku [17]. Lata obowiązywania poszczególnych norm emisji spalin Euro przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Klasy emisji spalin [17]

Rok produkcji środka transportu	Norma emisji spalin	Nr dyrektywy wprowadzającej	Uwagi
1988	1992	Euro 0	-
1993	1995	Euro 1	91/441/EC oraz 93/59/EC Zaostrzenie norm emisji. Części sady, jako dodatkowe kryterium
1996	2000	Euro 2	94/12/EC oraz 96/69/EC Zaostrzenie norm dla cząstek sady
2001	2005	Euro 3	98/69/EC Emisję cząstek stałych uzależniono od pojemności silnika
2006	2008	Euro 4	98/69/EC oraz 2002/80/EC Konieczność zastosowania specjalistycznych technologii redukcji zanieczyszczeń
2009	2013	Euro 5	2007/715/EC
2014		Euro 6	2007/715/EC Aktualnie obowiązująca

Ocena jakości systemu transportowego w aspekcie jego proekologiczności jest zagadnieniem wieloznacznym. Wynika to z głównie z szeregu czynników, które należy uwzględnić dokonując jego oceny. Czynniki te należy rozpatrywać w aspekcie ekonomicznym, społecznym i środowiskowym. Zatem proekologiczny system transportowy to taki, który spełnia oczekiwania społeczeństwa, korzystny ekonomicznie oraz minimalizujący szkodliwy wpływ środków transportu na środowisko.

Ekonomiczne kryteria oceny systemu transportowego są związa-

ne z kosztami przemieszczania, na które składają się m. in. [7]:

- koszty przemieszczania środków transportu,
- koszty utrzymania infrastruktury punktowej i liniowej,
- koszty budowy i modernizacji elementów infrastruktury transportowej.

W aspekcie środowiskowym i społecznym kryteria oceny jakości systemu transportowego związane są z kosztami zewnętrznymi transportu odnoszonymi się do [3, 10]:

- Emisji zanieczyszczeń,
- Emisji hałasu,
- Wypadków transportowych,
- Kongestii transportowej.

Kryteriami umożliwiającymi ocenę jakości systemu transportowego z punktu widzenia emisji zanieczyszczeń są m. in.:

- Wskaźnik natężenia emisji całkowitej zanieczyszczenia w rozpatrywanym obszarze,
- Wskaźnik przekroczenia dopuszczalnej wielkości emisji szkodliwych związków danego typu dla danego rodzaju pojazdu,
- Wskaźnik liczby pojazdów spełniających dana normę emisji spalin.

Działalność przewozowa negatywnie wpływa na środowisko, zatem kształtowanie proekologicznego systemu transportowego winno uwzględniać zależności między strukturą sieci transportowej i jej parametrami a oddziaływaniem działalności transportowej na środowisko.

System transportowy powinien być tak kształtowany, aby spełniał założone ograniczenia w zakresie oceny efektywności działania w zakresie proekologiczności. Zatem potok ruchu na sieci transportowej powinien być rozkładany przy możliwie najniższych kosztach, uwzględniając jednocześnie negatywny wpływ środków transportu na środowisko naturalne [6, 8].

3. Model decyzyjny analizy i oceny kształtowania proekologicznych systemów transportowych

3.1. Założenia ogólne

Badanie wpływu różnych strategii organu zarządzającego np. polityki transportowej, na zachowanie się dostawców usług transportowych kształtujących infrastrukturę sieci transportowej, uwarunkowane jest dysponowaniem przez ten organ odpowiednich narzędzi badawczych umożliwiających prowadzenie badań. Konieczne jest przy tym uogólnienie modelu rozłożenia potoku ładunków w systemie transportowym w ten sposób, aby możliwa i wystarczająca była ocena stopnia dostosowania charakterystyk elementów infrastruktury w odniesieniu do realizowanych zadań transportowych.

Ogólnie model to odwzorowanie rzeczywistości lub jej fragmentu [7, 17]. Model systemu, w tym i krajowego systemu transportowego, jest ilościową i jakościową reprezentacją badanego systemu na innej bazie materialnej, ujmującą te cechy systemu, które są istotne z punktu widzenia prowadzonych badań. Oznacza to, że model traktuje się, jako uproszczoną – umyślnie i celowo - reprezentację rzeczywistości, tj. jej podstawowych cech, istotnych ze względu na zamierzony cel badań. Zatem nie zawsze jest konieczne ujmowanie wszystkich szczegółów systemu, przy czym stopień



Rys. 2. Struktura zanieczyszczeń powietrza, pochodzących ze sfery transportu drogowego w latach 2015+2016 [17]

uproszczenia określany jest przez cel badań. Stąd dla danego systemu może istnieć wiele modeli. Są one tworzone zależnie od sformułowanego celu lub celów badań, jak również mogą one ulegać zmianie, w miarę jak zmienia się nasza wiedza o badanym systemie.

Odwzorowanie rzeczywistości w modelu zależy od wielu czynników, w tym przede wszystkim od umiejętności i zdolności badacza, a przede wszystkim od celu badań. Traktując model, jako pewien zamiennik rzeczywistości, ujmujemy w nim tylko tę część, która jest istotna z punktu widzenia celu badań, pozbawiamy go natomiast wielu szczegółów i cech nieistotnych z punktu widzenia celów badań. Dlatego też konstruując model krajowego systemu transportowego w ujęciu zrównoważonego rozwoju należy wziąć pod uwagę te aspekty, które są istotne przy kształtowaniu polityki transportowej i zrozumiałe dla uczestnika procesu transportowego [6, 7, 12, 13].

Z punktu widzenia analizy systemów, zbiór relacji określonych na elementach systemu zależy od celu lub celów jakie system realizuje. System zawsze realizuje określony, ściśle sprecyzowany cel. Celem badania systemu może być, m.in.:

- poznanie praw rządzących procesami zachodzącymi w badanym systemie. Uzyskane informacje mogą stanowić dane do dalszych badań,
- identyfikacja i optymalizacja struktury oraz sterowań systemu. Otrzymane informacje mogą stanowić dane do analiz decyzyjnych odnośnie np. wielokryterialnych ocen różnego stopnia dostosowania infrastruktury do realizacji ustalonych zadań.

W przypadku, gdy celem badań jest wyznaczenie, z punktu widzenia przyjętych kryteriów, optymalnego sterowania (znalezienie takich reguł sterowania dla zadanego systemu, które zapewnią osiągnięcie najkorzystniejszych wartości przyjętych kryteriów) lub optymalnej struktury technicznej badanego systemu (najbardziej dopasowanego wyposażenia do realizacji przewidzianych zadań), itp., możliwe są następujące podejścia [7, 8, 10, 14, 16, 17]:

- prowadzenie badań na systemie rzeczywistym;
- opracowanie modelu badanego systemu i prowadzenie badań, w interesującym nas zakresie, na tym modelu.

Podejście pierwsze z wielu powodów może być niemożliwe. Przyczyną mogą być zarówno względy szeroko rozumianego bezpieczeństwa, skala przedsięwzięcia i związane z tym koszty, bądź też fakt, że system nie istnieje (jest w stadium projektowania). W takich sytuacjach uciekamy się do badań przy zastosowaniu modeli, będących analogiami badanego systemu, w zadawalającym stopniu odzwierciedlającymi właściwości systemu. Nasze oceny i decyzje odnośnie funkcjonowania rzeczywistego systemu opieramy na wynikach uzyskanych z badań prowadzonych na modelu matematycznym.

Modele matematyczne stanowią w dużym stopniu odzwierciedlenie wiedzy badacza o strukturze i działaniu systemu rzeczywistego, o zjawiskach (procesach) w nim zachodzących. Stopień użyteczności modelu zależy również od umiejętności badacza w zakresie modelowania. Szczegółowość odzwierciedlenia w modelu właściwości fragmentu rzeczywistego zależy od celu badań. Model uwzględniający zbyt wiele szczegółów staje się nadmiernie (w stosunku do celu) rozbudowany, a tym samym nastęrcza duże trudności (nieraz wręcz uniemożliwia) wyznaczenie pożądanych charakterystyk.

Na ogół przyjmuje się, że system składa się z określonej liczby elementów i relacji, ponadto każdy z elementów systemu opisany jest zbiorem cech (wartości cech dla różnych elementów systemu mogą być różne). Zawsze można dobrać zbiór cech mierzalnych w pełni charakteryzujących obiekt z punktu widzenia celu zaplanowanych badań. Na przykład, celem działania systemu transportowego

jest przewóz osób i (lub) ładunków w czasie i przestrzeni. Stąd oceny jakości działania tego systemu dokonujemy z punktu widzenia np.: czasu realizacji wyznaczonego celu (np. czasu przemieszczenia), kosztu realizacji celu działania (np. kosztu przewozu), itp.

Wychodząc z powyższych założeń model EMITRANSYS opracowany przez zespół badawczy Zakładu Inżynierii Systemów Transportowych i Logistyki Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej, zdefiniowany został z wykorzystaniem następujących elementów [6]:

- bazy typów środków transportowych wykorzystywanych do realizacji zadań przewozowych,
- struktury przedstawiającej istniejące połączenia transportowe między węzłami transportowymi,
- bazy charakterystyk środków przewozowych oraz elementów struktury przedstawiających rzeczywiste właściwości zarówno środków jak i połączeń transportowych (charakterystyki zaczerpnięte z istniejących baz danych),
- zadań realizowanych przez krajowy system transportowy wynikających z zapotrzebowania na przewóz zarówno osób jak i ładunków,
- organizacji rozumianej jako sposób rozłożenia ruchu na sieci uwzględniając poziom emisji spalin i strukturę środków transportowych oraz stan infrastruktury.

Zakładając, że odwzorowanie bazy danych środków transportowych oznaczone jest symbolem BST , struktury systemu krajowego systemu transportowego oznaczane jest symbolem GE , bazy charakterystyk środków przewozowych i elementów struktury – symbolem BFE , macierzy zadań realizowanych przez system – symbolem QE , organizacji ruchu na sieci – symbolem OE . Model proekologicznego systemu transportowego ($MEST$) można zapisać, jako uporządkowaną piątkę, postaci [6]:

$$MEST = \langle BST, GE, BFE, QE, OE \rangle \quad (1)$$

Baza danych środków transportowych została zapisana, jako wektor o trzech elementach, tj.:

$$BST = \langle ST, S, v(st) \rangle \quad (2)$$

przy czym:

ST jest zbiorem typów pojazdów $ST = \{st : st = \overline{1, ST}\}$, S jest

zbiorem typu związku szkodliwego spalin, $S = \{s : s = \overline{1, S}\}$, natomiast

$v(st)$ jest wektorem parametrów techniczno-technologicznych, ekologicznych oraz ekonomicznych charakteryzujących st – ty typ pojazdu, postaci;

$$v(st) = \langle rs(st), ne(st), q^*(st), rt(st), kp(st), em(s, st) \rangle$$

gdzie: $rs(st)$ – rodzaj silnika st – ego typu pojazdu, $ne(st)$ – rodzaj normy Euro st – ego typu pojazdu, $q^*(st)$ – dopuszczalna ładowność/pojemność st – ego typu pojazdu, $rt(st)$ – rodzaj transportu st – ego typu pojazdu, $kp(st)$ – jednostkowy koszt transportu st – tym typem pojazdu, $em(st)$ – jednostkowa wielkość emisji s – tego typu związku szkodliwego spalin dla st – ego typu pojazdu.

Struktura systemu transportowego w modelu $MEST$ została odwzorowana za pomocą grafu $GE = \langle WE, LE \rangle$, przy czym zbiór

WE jest zbiorem numerów węzłów transportowych, które w rzeczywistej sieci transportowej stanowią punkty powstawania i zankania potoków pasażerów, punkty nadania i odbioru ładunków oraz punkty pośrednie obsługi ładunków lub pasażerów (np. punkty

przeładunkowe, centra logistyczne, terminale transportu intermodalnego itp.), natomiast LE jest zbiorem rzeczywistych połączeń transportowych.

Bazy charakterystyk środków transportowych i elementów struktury systemu transportowego BFE została zapisana, jako wektor postaci: $BFE = \langle FLE, FWE, FSP \rangle$, przy czym FLE jest bazą danych dotyczących połączeń, FWE bazą danych dotyczących węzłów transportowych, natomiast FSP bazą danych dotyczących środków transportowych. Wielkość zadań przewozowych w modelu EMITRANSYS zapisano za pomocą dwuelementowego wektora $QE = \langle X1, X2 \rangle$, gdzie $X1$ to macierz zapotrzebowania na przewozy ładunków, zaś $X2$ to macierz zapotrzebowania na przewozy pasażerów.

Przyjmuje się, że rozłożenie ruchu w sieci systemu transportowego jest podstawą do optymalnej organizacji potoku ruchu w sieci na potrzeby kształtowania zrównoważonego rozwoju systemu transportowego. Zakłada się, że określone jest zapotrzebowanie na transport w relacjach przewozu, przy czym jest ono stałe w ustalonych przedziałach czasowych. Drogi przewozu w poszczególnych relacjach przewozu, a także wielkość potoku ruchu przemieszczanego po poszczególnych drogach nie są natomiast znane.

Rozłożenie potoku ruchu w sieci transportowej polega na wybrze takich dróg w sieci, po których przemieszczany jest potok ruchu, aby techniczne, ekonomiczne oraz ekologiczne ograniczenia dróg sieci były spełnione. Wśród technicznych ograniczeń dróg sieci systemu transportowego wyróżnia się przepustowość drogi, która wynika z przepustowości poszczególnych odcinków drogi. Przepustowość drogi od góry ograniczona jest przez minimalną przepustowość odcinka należącego do drogi. Z drugiej zaś strony minimalne wykorzystanie przepustowości drogi związane jest z dużymi jednostkowymi kosztami przewozu. Jest to ograniczenie ekonomiczne drogi sieci transportowej nakładane na wielkość potoku ruchu. Nadmierne, ale dopuszczalne wykorzystanie przepustowości drogi związane jest także z dużymi kosztami przewozu, które wynikają z dużych kosztów związanych z kongestią ruchu. Ograniczenie ekologiczne dotyczy dopuszczalnego poziomu emisji związków szkodliwych spalin emitowanych przez środki transportu.

Przyjmuje się zatem, że dla każdego odcinka drogi sieci transportowej są zadane ograniczenia techniczne, ekonomiczne oraz ekologiczne, które określają uzasadnioną wielkość rozłożenia potoku ruchu na każdym odcinku drogi, a tym samym i na drodze sieci systemu transportowego.

Rozłożenie potoku ruchu wymaga formułowania odpowiednio, względem rozważanej sytuacji decyzyjnej, zadania optymalizacyjnego w wyniku rozwiązania, którego otrzymuje się optymalne, w sensie przyjętego kryterium, rozłożenie potoku ruchu w zadanej sieci transportowej. Wyróżnia się warunki oraz ograniczenia przy zachowaniu, których poszukuje się optymalnego rozłożenia potoku ruchu w zadanej sieci transportowej.

3.2. Formułowanie zadania optymalizacyjnego rozłożenia potoku ruchu dla proekologicznego systemu transportowego

Parametryzacja elementów modelu:

- Zbiór numerów rodzajów transportu: $RT = \{rt : rt = \overline{1, RT}\}$,
- Zbiór numerów podsystemów przewozowych: $K = \{k : k \in \{1, 2\}\}$, przy czym $k = 1$ – podsystem przewozów pasażerskich, $k = 2$ – podsystem przewozów towarowych,
- Segmenty popytu, obsługiwane w poszczególnych podsystemach przewozowych: $sp(k)$,

- Zbiór rejonów odwzorowujących obszary istotne w aspekcie ochrony środowiska np. Obszary Natura 2000, jak również obszary, na których wprowadzone są ograniczenia w ruchu pojazdów niektórych typów: $OB = \{ob : ob = \overline{1, OB}\}$,
- Zbiór źródeł strumieni ładunków i (lub) osób: $N = \{a : a = \overline{1, N}\}$,
- Zbiór ujść strumieni ładunków i (lub) osób: $O = \{o : o = \overline{1, O}\}$,
- Zbiór numerów węzłów pośrednich: $PS = \{i : i = \overline{1, I}\}$,
- Relacja przewozu w sieci transportowej: $(a, b) \in E$, przy czym dla każdej relacji istnieje niepusty zbiór dróg przewozu oznaczony, jako P^{ab} ,
- Zapotrzebowanie na przewóz: $x((a, b), k)$, wyrażone w tonach lub liczbie pasażerów w zależności od podsystemu przewozowego. Macierze zapotrzebowania na przewóz mają postać: $X1 = [x((a, b), 1)]$ oraz $X2 = [x((a, b), 2)]$.

Zmienne decyzyjne modelu:

- Liczba pojazdów st – tego typu, obciążających p – tą drogę w relacji (a, b) : $xp(p, (a, b), st)$. Uwzględniając podsystemy przewozowe zmienne decyzyjne zapisane są w postaci macierzy: $XP = [xp(p, (a, b), st) : st \in ST(1)]$, dla przewozów pasażerskich oraz $XT = [xp(p, (a, b), st) : st \in ST(2)]$, dla przewozów towarowych,
- Liczba pojazdów st – tego typu, obciążających p – tą drogę w relacji (a, b) , które spełniają ne – tą normę emisji spalin oraz są wyposażone w silnik rs – tego rodzaju.

Wartości zmiennych decyzyjnych $xp(p, (a, b), st)$ wynikają ze skierowania na poszczególne drogi zidentyfikowanych dla poszczególnych segmentów popytu potoków pasażerskich oraz towarowych, które są odwzorowane za pomocą zmiennych $x(p, (a, b), sp(1), st)$ oraz $x(p, (a, b), sp(2), st)$.

Na potrzeby uzyskania liczby pojazdów obciążających elementy sieci transportowej przyjęto, że dla poszczególnych środków transportu i dla poszczególnych segmentów popytu znane są maksymalne pojemności środków transportu $q(st, sp(k))$ będące funkcją ich ładowności maksymalnych $q_{max}(st)$, ładowności dopuszczalnych $q_{dop}(st)$ i pojemności $p(st)$, jak również parametrów przedmiotów przewozu charakterystycznych dla danych segmentów popytu $sp(k)$, tj.:

$$q(st, sp(k)) = q(st, q_{max}(st), q_{dop}(st), p(st), sp(k)).$$

Ponadto, uwzględniając zdefiniowane dla środków transportu średnie współczynniki wykorzystania ich maksymalnych pojemności $c(st, sp(k))$, potoki osób oraz ładunków obciążające elementy struktury systemu transportowego $x(p, (a, b), sp(1), st)$ oraz $x(p, (a, b), sp(2), st)$ w modelu są przeliczane na potoki pasa-

żerskich i towarowych środków przewozowych $xp(p, (a, b), st)$ z wykorzystaniem zależności:

$$\forall (a, b) \in E \quad \forall p \in P^{a,b} \quad \forall k \in K \quad st \in ST(k)$$

$$xp(p, (a, b), st) = \sum_{sp(k) \in SP(k)} \frac{x(p, (a, b), sp(k), st)}{q(st, sp(k)) \cdot c(st, sp(k))} \quad (3)$$

Ponadto uwzględniając warunek addytywności potoku ruchu, obciążenie potokami pojazdów dla poszczególnych połączeń transportowych oznaczone symbolem $xp(st, (i, i'))$ wyrażono następującą zależnością:

$$\forall st \in ST \quad \forall (i, i') \in LE^{pp}$$

$$xp(st, (i, i')) = \sum_{(a,b) \in E} \sum_{p \in P_{i,i'}^{ab}} xp(p, (a, b), st) \quad (4)$$

przy czym, $P_{i,i'}^{ab}$ jest zbiorem numerów dróg w (a, b) – tej relacji przewozu, które przechodzą przez (i, i') – ty odcinek sieci transportowej.

Zdanie optymalizacyjne rozłożenia potoku ruchu na sieć systemu transportowego w MEST

Dla danych

- zbiorów: WE , LE , LE_p^{ab} , N , O , PS , E , ST , S , RS , NE , K , $X1$, $X2$
 - przepustowości (i, i') – tego połączenia transportowego,
 - kosztu przejazdu środka transportu st – tego typu (i, i') – tym połączeniem transportowym,
 - zbioru P^{ab} dróg w relacji przewozu $(a, b) \in E$,
 - wielkości emisji s – tego związku przez st – ty typ pojazd z rs – tego typu silnikiem spełniającym i nr – tą normę emisji spalin na jednostkę odległości,
 - współczynnika poziomu emisji s – tego związku szkodliwego zależnego od typu pojazdu i normy Euro, rodzaju silnika i typu paliwa oraz długości przejazdu,
 - numeru dopuszczalnej normy Euro dla odcinka $(i, i') \in LE$,
 - długości (i, i') – tego odcinka sieci transportowej,
 - prędkości potoku ruchu na (i, i') – tym odcinku sieci transportowej,
 - określony na jednostkę odległości poziom jednostkowej emisji s – tego związku szkodliwego spalin zidentyfikowanych dla pojazdu st – tego typu wyposażonego w rs – ty typ silnika, który spełnia nr – tą normę emisji spalin oraz porusza się po (i, i') – tym odcinku sieci transportowej,
 - i innych.
- należy wyznaczyć macierze zmiennych decyzyjnych $XP = [xp(p, (a, b), st)]$ oraz $XT = [xp(p, (a, b), st)]$ liczby pojazdów przemieszczanych w sieci transportowej, przy ograniczeniach na:
- realizację zapotrzebowania na przewóz,
 - liczbę środków przewozowych wykorzystywanych do realizacji zapotrzebowania na przewóz,
 - strukturę wykorzystywanych środków przewozowych,
 - addytywność potoku ruchu,
 - nieujemność potoku ruchu,

- zachowanie potoku ruchu w pośrednich węzłach transportowych,
- nieprzekroczenie zdolności przepustowej odcinków sieci transportowej,
- nieprzekroczenie zdolności przepustowej węzłów sieci transportowej,
- nieprzekroczenie zdolności obsługowej węzłów sieci transportowej,
- nieprzekroczenie dysponowanej liczby środków przewozowych,
- możliwość poruszania się środków transportowych poszczególnych typów po połączeniach transportowych,
- możliwość obsługi tras pojazdami spełniającymi określone normy emisji spalin.

Tak, aby funkcja kryterium o interpretacji wielkości poziomu emisji spalin emitowanych przez środki transportu realizujące zadania przewozowe na wybranym obszarze sieci, postaci:

$$\forall s \in S, \forall k \in K$$

$$FK(s, k) = 3600 \cdot 10^{-6} \cdot$$

$$\sum_{(a,b) \in E} \sum_{p \in P^{ab}} \sum_{st \in ST(k)} \sum_{ne \in NE} \sum_{re \in RE} xp(p, (a, b), st, ne, rs) \cdot \quad (5)$$

$$\sum_{(i,i') \in LE: st \in ST(i,i') \wedge p \in P_{i,i'}^{ab}} \frac{l(i, i')}{v(i, i')} \cdot em(s, st, ne, rs, (i, i'))$$

osiągnęła wartość minimalną.

Podsumowanie

Kształtowanie proekologicznego systemu transportowego ma na celu zmniejszenie degradacyjnego oddziaływania transportu na środowisko. Badania prowadzone w projekcie EMITRANSYS pozwalają na ocenę wpływu emisji związków szkodliwych spalin środków transportu drogowego na zanieczyszczenie środowiska naturalnego.

W wielu krajach rośnie świadomość zagrożeń, jakie niesie dla zdrowia emisja szkodliwych związków spalin spowodowana rozwojem motoryzacji. Pomimo podejmowanych działań zmierzających do ograniczenia emisji poprzez zastosowanie innowacyjnych technologii, np. instalowanie reaktorów katalitycznych, obniżenie zużycia paliwa itp., emisja zanieczyszczeń jest nadal istotnym problemem.

Programowanie rozwoju systemu transportowego w ujęciu proekologicznym polega na ustaleniu zależności między wyposażoną wielkością zadań dla systemu transportowego, jego wyposażeniem oraz kosztem realizacji zadań przez ten system przy uwzględnieniu aspektów ekologii transportu. W tym aspekcie, można mówić po pierwsze o modelach, których celem jest odwzorowanie związków między wielkością zadań realizowanych przez dany system transportowy, jego wyposażeniem oraz kosztem realizacji ujmującym również degradację środowiska naturalnego, a po drugie o modelach, których celem jest dobór nakładów do realizacji zadań skierowanych z otoczenia do tego systemu, aby degradacja środowiska była jak najmniejsza. Oznacza to, że koszty realizacji przewozów powinny również uwzględniać np. koszty poziomu emisji spalin emitowanych przez środki transportu [1, 6, 11, 16, 17].

Poszczególne gałęzie transportu są integralnymi elementami systemu transportowego i rozwój każdej z nich wywołuje określone skutki w pozostałych rodzajach transportu. W miarę rozwoju sieci transportowych, wzrostu intensywności potoku ruchu oraz prędkości, coraz bardziej akcentowane są czynniki oddziaływujące na środowisko – aspekty ekologiczne, bezpieczeństwo – wypadkowość oraz energochłonność poszczególnych rodzajów transportu.

Bibliografia:

1. Ambroziak T., Gołębiowski P., Pyza D., Jacyna-Golda 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*, vol. 20, No. 3, Warszawa 2013.
2. Comi, A., Buttarazzi, B., Schiraldi, M., Innarella, R., Varisco, M., Traini, P., (2018). An advanced planner for urban freight delivering. *Archives of Transport*, 48(4), 27-40. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.8363>
3. Danklefsen N. (red.). Obliczanie kosztów zewnętrznych w sektorze transportu. Parlament Europejski, Bruksela 2009.
4. European Environment Agency, Air quality in Europe – 2012 report, EEA Report No 4/2012, Copenhagen 2012.
5. Jachimowski, R., Szczepański, E., Kłodawski, M., Markowska, K., & Dąbrowski, J. (2018). Selection of a container storage strategy at the rail-road intermodal terminal as a function of minimization of the energy expenditure of transshipment devices and CO2 emission. *Annual Set The Environment Protection*, 20, 965–988.
6. Jacyna M., Merksiz J.: Proecological approach to modelling traffic organization in national transport system. *Archives of Transport*, 30(2), 2014.
7. Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
8. Jacyna, M., & Wasiak, M. (2015). Multicriteria Decision Support in Designing Transport Systems. W J. Mikulski, J. Mikulski (Red.), *Tools of Transport Telematics* (ss. 1–13). Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-24577-5>
9. Jacyna, M., Gołębiowski, P., & Szczepański, E. (2015). City transport service model taking into account different means of transport. W R. Kersys, R. Kersys (Red.), *19th International Conference Transport Means 2015. Proceedings* (ss. 160–168). Kaunas University of Technology.
10. Jacyna, M., Wasiak, M., Lewczuk, K., & Karoń, G. (2017). Noise and environmental pollution from transport: decisive problems in developing ecologically efficient transport systems. *Journal of Vibroengineering*, 19(7), 5639–5655. <http://doi.org/10.21595/jve.2017.19371>
11. Jacyna, M., Wasiak, M., Lewczuk, K., Chamier-Gliszczyński, N., & Dąbrowski, T. (2018). Decision problems in developing proecological transport system. *Annual Set The Environment Protection*, 20, 1007–1025.
12. Jacyna-Golda I., Żak J., Gołębiowski P.: Models of traffic flow distribution for scenario of the development of proecological transport system. *Archives of Transport*, 32(4), 2014
13. Jacyna-Golda, I., Gołębiowski, P., Izdebski, M., Kłodawski, M., Jachimowski, R., & Szczepański, E. (2017). The evaluation of the sustainable transport system development with the scenario analyses procedure. *Journal of Vibroengineering*, 19(7), 5627–5638. <http://doi.org/10.21595/jve.2017.19275>
14. Jacyna-Golda, I., Izdebski, M., & Podvieszko, A. (2017). Assessment of the efficiency of assignment of vehicles to tasks in supply chains: A case-study of a municipal company. *Transport*, 32(3), 243–251. <http://doi.org/10.3846/16484142.2016.1275040>
15. Koźlak A., *Ekonomika transportu. Teoria i praktyka gospodarcza*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2008.
16. Pyza D., Jacyna-Golda I., Golda P., Gołębiowski P.: Alternative fuels and their impact on reducing pollution of the natural environment. [w:] *Annual Set The Environment Protection*, vol. 20, no.1, 2018.
17. Pyza D.: *Systemy przewozowe – problemy obsługi, potencjał i jego utrzymanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019.
18. Romanow P., *Zarządzanie transportem przedsiębiorstw przemysłowych*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Logistyki, Poznań 2003.
19. Sendek-Matysiak E., D. Pyza: The assignment of vehicle assessment based on multi criteria decision making. *Archives of Transport*, 48(4), 2018.

Decision-making problems in shaping the sustainable development of the transport system

The article discusses decision problems related to shaping the pro-ecological transport system. The problems of shaping the transport system including pro-ecological aspects were discussed and evaluation criteria were discussed. The model of a pro-ecological transport system was presented and an exemplary task of optimizing the distribution of a traffic flow for a pro-ecological transport system was formulated.

Keywords: environmentally friendly transport system, system model, exhaust emission.

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. **Marianna Jacyna** – Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, maja@wt.pw.edu.pl

Dr hab. inż. **Dariusz Pyza**, prof. PW – Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, dpz@wt.pw.edu.pl