

Model oceny potencjału pasażerskiego w transporcie publicznym dla województwa dolnośląskiego

Sławomir Susz, Marcin Pawęska

Artykuł podsumowuje model oceny popytu na transport publiczny w jednym z regionów w Polsce. Taki model może być używany do tworzenia kompleksowej strategii komunikacji publicznej i ma na celu wspieranie decydentów w optymalnym wyborze w odniesieniu do różnych form transportu i kierunków wspierania transportu publicznego przez władze publiczne.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNIŚW

data zgłoszenia do redakcji: 21.11.2013

data akceptacji do druku: 01.03.2014



Dr inż. Sławomir Susz jest adiunktem na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej w Katedrze Technologii Laserowych, Automatyzacji i Organizacji Produkcji slawomir.susz@pwr.edu.pl



Dr Marcin Pawęska zarządza spółką CL Consulting i Logistyka. Wicekanclerz Międzynarodowej Wyższej Szkoły Logistyki i Transportu we Wrocławiu mpaweska@msl.com.pl

Wstęp

Ustawa z dnia 16 grudnia 2010 r. o publicznym transporcie zbiorowym [1] określa zasady organizacji i funkcjonowania regularnego przewozu osób w publicznym transporcie zbiorowym realizowanego na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej oraz w strefie transgranicznej, głównie w transporcie drogowym i kolejowym. Jednym z celów ustawy jest usystematyzowanie pasażerskiego transportu zbiorowego, poprzez ustanowienie nowego organu, zwanego organizatorem, który ma za zadanie, zapewnić funkcjonowanie publicznego transportu zbiorowego na danym obszarze, koncentrując się na wybranych rodzajach połączeń (międzynarodowych; między wojewódzkich; wewnątrz wojewódzkich, powiatowych i gminnych). Do zadań organizatora (w zależności od obszaru: ministra właściwego do spraw transportu, a w odniesieniu do wojewódzkiego, powiatowego albo gminnego regularnego przewozu osób odpowiednio marszałka, wojewodę,

starostę, wójta albo burmistrza / prezydenta miasta), należy:

1. planowanie rozwoju transportu,
2. organizowanie publicznego transportu zbiorowego,
3. zarządzanie publicznym transportem zbiorowym.

Plan zrównoważonego rozwoju publicznego transportu zbiorowego uchwalony przez właściwe organy jednostek samorządu terytorialnego stanowi akt prawa miejscowego i w szczególności określa:

1. sieć komunikacyjną, na której jest planowane wykonywanie przewozów o charakterze użyteczności publicznej,
2. ocenę i prognozy potrzeb przewozowych,
3. przewidywane finansowanie usług przewozowych,
4. preferencje dotyczące wyboru rodzaju środków transportu,
5. zasady organizacji rynku przewozów,
6. pożądany standard usług przewozowych w przewozach o charakterze użyteczności publicznej,
7. przewidywany sposób organizowania systemu informacji dla pasażera.

Plan transportowy jest o tyle ważnym dokumentem, iż przykładowo umowy o świadczenie usług publicznych zawierane są przez organizatorów publicznego transportu kolejowego wyłącznie na podstawie i w zakresie określonym w obowiązujących planach transportowych. Dlatego też zapisy planu mogą być traktowane jako swoiste zobowiązanie organizatora do zapewnienia operatorom ale i użytkownikom końcowym (pasażerom) standardu gwarantowanego usługi publicznego transportu zbiorowego. Praktyka wskazuje, iż przy nierównomiernym popycie dobowym na transport publiczny połączonym z małą elastycznością tegoż transportu w dopasowaniu się do popytu, możliwości budżetowe rzadko kiedy zapewniają utrzymanie standardu gwarantowanego na poziomie oczekiwanym przez klientów. Dlatego też istotne jest jak najbardziej racjonalne wykorzystanie istniejących środków tak, aby zapewnić możliwie najwyższy poziom satysfakcji klienta końcowego. Na poziom satysfakcji klienta składają się poniższe elementy [2].

Jednocześnie tak ujęte kryterium satysfakcji trudno jest skwantyfikować. Uprasz-



1 Jakość transportu oczami klienta końcowego - pasażera

czając, kryterium satysfakcji można opisać jako iloczyn czasu przejazdu oraz kosztu przejazdu, traktując inne zmienne jako stałe. Jest to o tyle zasadne, iż Plan nie jest związany z działaniami, które należy traktować jako inwestycyjne, jak np. budowa nowych dróg i linii kolejowych, zmiany w jakości taboru itp., lecz z działaniami ukierunkowanymi na funkcjonowanie i rozwój transportu publicznego przy wykorzystaniu dostępnej infrastruktury drogowej i kolejowej. Przy tak zdefiniowanym kryterium satysfakcji, oraz biorąc pod uwagę możliwości budżetowe określenie siatki połączeń i standardów na wybranych liniach, obsługiwanych przez operatora, może być dokonane dzięki użyciu zaawansowanych modeli symulacyjnych. Poniższy artykuł przedstawia model symulacyjny zbudowany w oparciu o modele grawitacyjne, które są szeroko opisywane w literaturze [3].

W dalszej części artykułu przyjęto następujące definicje ważniejszych terminów:

- **Punkt Transportowy** - miejsce generujące i przyjmujące ruch pasażerski oraz rozdzielające ruch na różne kierunki. Na potrzeby modelu dla województwa dolnośląskiego ustalono 90 Punktów Transportowych (miejscowości), które są źródłem i celem ruchu pasażerskiego i rozdzielają ruch na różne kierunki, oraz 16 punktów specjalnych (w większości również miejscowości), które służą wyłącznie jako skrzyżowania rozdzielające ruch. Każdy Punkt Transportowy jest opisany liczbą mieszkańców (w przypadku punktów specjalnych liczba ta wynosi 0, co oznacza brak możliwości generowania i przyjmowania ruchu) oraz średnim wynagrodzeniem miesięcznym (w przypadku skrzyżowań – jak wyżej),
- **Środek Transportu** - możliwy sposób przemieszczenia się pomiędzy dwoma sąsiadującymi Punktami Transportowymi. Dla budowanego modelu przyjęto jako dostępne trzy środki transportu - kolej, autobus oraz samochód osobowy,
- **Połączenie** - możliwość przemieszczenia się danym środkiem transportu pomiędzy dwoma sąsiadującymi Punktami Transportowymi. Każde połączenie charakteryzuje się długością [km] oraz czasem przejazdu [min], jak również typem połączenia (kolejowe, autobusowe, samochodowe). Dodatkowo założono, że wszystkie połączenia kolejowe i autobusowe są połączeniami **publicznymi** (organizowanymi i dofinansowanymi przez organizatora transportu publicznego [1]), a samochodowe – **prywatnymi**,
- **Ciążeniem** Punktu Transportowego „m” do Punktu Transportowego „n” (ozna-

czonym jako c_{nm}) nazwiemy iloraz sumy mieszkańców obu punktów i kwadratu odległości pomiędzy tymi punktami. W modelach grawitacyjnych (bazujących na tej definicji) potok pasażerski przyjmuje się za proporcjonalny do ciężenia pomiędzy punktem początkowym i końcowym połączenia,

- **Sieć transportową** zdefiniujemy jako zbiór punktów transportowych oraz bezpośrednich połączeń pomiędzy nimi umożliwiających transport pasażerów,
- **Trasą** nazwiemy uporządkowany zbiór połączeń występujących w sieci transportowej, który łączy dwa dowolne Punkty Transportowe. Trasy dzielimy na **publiczne** (złożone z połączeń publicznych – autobusy, kolej) i **prywatne** (złożone z połączeń prywatnych – samochody),
- **Trasowaniem** nazwiemy wybór optymalnej dla pasażera trasy (ze względu na kryterium satysfakcji) pomiędzy dwoma Punktami Transportowymi,
- **Potencjałem pasażerskim** nazwiemy maksymalną liczbę pasażerów chcących (zgodnie z modelem matematycznym) przejechać pomiędzy dwoma Punktami Transportowymi,
- **Maksymalnym popytem pasażerskim** (dla danego połączenia) nazwiemy sumę potencjałów pasażerskich wszystkich tras korzystających z danego połączenia.

Model oceny potencjału pasażerskiego

Każdy projekt symulacyjny, którego celem jest opracowanie modelu symulacyjnego i przeprowadzenie szeregu eksperymentów określających odpowiedź modelu, przy zadanych warunkach brzegowych przebiega według ustalonego schematu:

1. określenie celu i warunków brzegowych modelu,
2. zbieranie i analiza danych,
3. opracowanie, weryfikacja i walidacja modelu symulacyjnego,
4. przeprowadzenie symulacji,
5. analiza wyników symulacji i sporządzenie prognoz.

Zwykle najbardziej pracochłonne są etapy 2 i 3. Z wieloletnich doświadczeń autorów [3], [5], [6] wynika, że oba etapy razem zajmują większość (ok. 75%) czasu projektu symulacyjnego. W ramach tego projektu czas pracy poświęcony na budowę modelu symulacyjnego można było skrócić (przynajmniej przy opracowywaniu modelu matematycznego) wykorzystując szeroką wiedzę w obszarze modelowania międzyaglomeracyjnego ruchu pasażerskiego istniejącą w literaturze [4]. Niemniej i tak pierwsze analizy wyników symulacji można było przeprowa-

dzić dopiero po trzech miesiącach od momentu rozpoczęcia prac nad projektem.

Określenie celu i warunków brzegowych modelu.

Celem modelu jest określenie popytu na publiczny transport pasażerski w woj. dolnośląskim do 2025 roku. Dodatkowo zostały ustalone następujące warunki brzegowe:

1. popyt powinien być określony dla trzech horyzontów czasowych (dla 2015 roku, 2020 oraz 2025),
2. popyt powinien być przedstawiony w trzech wariantach: optymistycznym, neutralnym i pesymistycznym,
3. dane do budowy modelu powinny zostać zaczerpnięte z istniejących źródeł (w ramach projektu nie przewidziano przeprowadzania dodatkowych badań i pomiarów),
4. na etapie wstępnym projektu ustalono, że model będzie obejmował trzy środki transportu: kolej, autobusy i samochody osobowe,
5. sieć transportowa powinna obejmować istniejące drogi i połączenia kolejowe (działające), o charakterze wojewódzkim, łączące zdefiniowane Punkty Transportowe.

Zebranie i analiza danych

W pierwszej fazie opracowywania modelu należało zebrać jak największą ilość danych dotyczących demografii, poziomu rozwoju oraz ruchu pasażerskiego dla wszystkich zdefiniowanych punktów transportowych województwa dolnośląskiego. Dane te to m.in.:

- potoki pasażerskie dla autobusów i pociągów, a także estymacja potoków dla samochodów osobowych (częstotliwość kursowania, dostępność czasowa do przystanku, cena biletu za przejazd, czas przejazdu pomiędzy punktami, prędkość techniczna, itd.),
- dane ekonomiczne dla punktów i powiatów (PKB, średni dochód, wielkość produkcji przemysłowej, wielkość konsumpcji, poziom bezrobocia, itd.),
- dane demograficzne (liczba mieszkańców, przyrost naturalny, status materialny, liczba osób pracujących, liczba studentów i uczniów, liczba osób powyżej 60 roku życia, liczba turystów przyjeżdżających, odległość punktu od granic państw sąsiadujących, komfort podróży, dane o dofinansowaniu (dofinansowanie dla uczniów, dofinansowanie dla emerytów, dofinansowanie dla innych, itd.).

Wyniki całego projektu zależały w sposób zasadniczy od jakości i ilości zebranych da-

nych. Dane te otrzymano od Urzędu Marszałkowskiego Województwa Dolnośląskiego.

Opracowanie modelu symulacyjnego

Etap modelowania wstępnego jest najważniejszym etapem opracowywania każdego modelu symulacyjnego. To w tym etapie ustala się koncepcję tego jak model ma przekształcać dane źródłowe w rezultaty symulacji. Idealnym rozwiązaniem jest opracowanie modelu matematycznego, opartego w 100% na analitycznych równaniach matematycznych, co pozwala uniknąć błędów przybliżeń dla modeli numerycznych.

Już pierwsze analizy stanu wiedzy wykazały, że rozwinięcie będzie się opierało na wieloetapowym modelu, którego poszczególne części będą kolejnymi modelami matematycznymi dostarczającymi danych dla następnego etapu. Wyróżniono 5 poniższych etapów:

1. ustalenie, dla każdego z Punktów Transportowych, maksymalnej liczby pasażerów chcących w danym okresie przemieścić się poza dany Punkt Transportowy,
2. obliczenie potencjałów pasażerskich pomiędzy danym Punktem Transportowym a każdym innym Punktem Transportowym (innymi słowy, ustalić, dokąd pasażerowie, zdefiniowani w poprzednim punkcie, chcą się udać),
3. wykonanie trasowania w sieci transportowej, czyli wyznaczenie optymalnej trasy publicznej i prywatnej pomiędzy każdą parą Punktów Transportowych generujących i przyjmujących ruch pasażerski,
4. ustalenie, jak potencjał pasażerski pomiędzy każdą parą Punktów Transportowych „rozłoży się” pomiędzy trasę publiczną i prywatną,
5. obliczenie maksymalnego popytu pasażerskiego na każdym połączeniu w sieci (przez zsumowanie potencjałów wynikających ze wszystkich tras korzystających z danego połączenia).

Ustalenie kryterium satysfakcji - analiza danych

Kryterium satysfakcji jest jednym z najważniejszych pojęć w Planie Transportowym. Plan ma na celu maksymalizację satysfakcji klienta końcowego – pasażera, określając i uzasadniając najbardziej pożądaną z punktu widzenia celowości, trafności oraz efektywności prognoz demograficznych i gospodarczych, standardów obecnie świadczonych usług, a także strategicznych dokumentów o znaczeniu wojewódzkim, z uwzględnieniem standardu jakości dostępu do infrastruktury drogowej i kolejowej,

bazową ofertę do objęcia użytecznością publiczną oraz standardy obsługi na niej, w ramach Planu zrównoważonego rozwoju publicznego transportu zbiorowego dla województwa dolnośląskiego.

Jeżeli przyjmiemy, że pasażer jest zdecydowany przemieścić się pomiędzy początkowym i końcowym Punktem Transportowym, to terminem „kryterium satysfakcji” nazwiemy współczynnik bezpośrednio wpływający na wybór przez pasażera określonego środka transportu oraz trasy łączącej oba wyżej wymienione Punkty (przy założonych warunkach technicznych oferowanych przez sieć transportową). W opracowywanym modelu zostały uwzględnione trzy podstawowe środki lokomocji: kolej, autobus i samochód osobowy. Ustawa o transporcie publicznym wymienia również inne rodzaje transportu, takie jak na przykład transport śródlądowy. Jednak transport wodny śródlądowy w niniejszym opracowaniu nie został wzięty pod uwagę, gdyż z uwagi na obecny stan techniczny Odrzańskiej Drogi Wodnej żegluga śródlądowa odgrywa w Polsce marginalną rolę (również na odcinku dolnośląskim). Dotyczy to transportu towarowego i pasażerskiego.

Analiza stanu wiedzy i opracowanie modelu matematycznego

Na potrzeby niniejszego opracowania przeprowadzono wstępną analizę zebranych danych, starając się uzyskać zależność pomiędzy potokiem pasażerskim a danymi opisującymi obecną sytuację demograficzną, społeczną i ekonomiczną na obszarze województwa oraz prognozami tychże danych obejmującymi horyzont działania Planu Transportowego. Przyjęto podejście szeroko prezentowane w literaturze opisującej modelowanie ruchu pasażerskiego [4]. W literaturze tej przyjmuje się, że najważniejszym czynnikiem motywującym do wybrania danego środka transportu jest tzw. koszt generalizowany przejazdu pomiędzy dwoma Punktami Transportowymi. Kryterium satysfakcji będzie zależało zatem głównie od czasu przejazdu i kosztu tego przejazdu oraz wartości „kosztu czasu” dla poszczególnych pasażerów.

Obliczenie liczby osób chcących podróżować poza Punkt Transportowy

W celu obliczenia liczby osób chcących podróżować posłużono się modelem matematycznym zaprezentowanym w pracy Żurkowskiego [4] - tzw. model Daly'ego, który oblicza prawdopodobieństwo η_n , że pojedynczy mieszkaniec Punktu Transportowego „n” podejmie podróż:

$$\eta_n = \frac{b}{1 + e^{(-\lambda_n)}} \quad (1)$$

$$\lambda_n = \sum_m a_m \cdot x_m \quad (2)$$

gdzie:

λ – użyteczność podróży – zależna od takich parametrów x_m jak: dochód mieszkańca, współczynnik motoryzacji, zasobność gospodarstw itp.,

b – współczynnik, którego wartość należy ustalić w celu skorelowania modelu z danymi rzeczywistymi.

W konsekwencji po przemnożeniu prawdopodobieństwa η_n przez liczbę mieszkańców Punktu Transportowego otrzymamy liczbę mieszkańców chcących podróżować w danym okresie poza Punkt Transportowy:

$$P_n = M_n \cdot \eta_n \quad (3)$$

gdzie:

P_n – potencjał pasażerski dla Punktu „n”,
 M_n – liczba mieszkańców Punktu „n”.

Obliczenie potencjałów pasażerskich pomiędzy wszystkimi Punktami Transportowymi

Po wyliczeniu liczby mieszkańców chcących podróżować ze wszystkich Punktów Transportowych generujących ruch należy ustalić, dokąd będą chcieli się udać.

Przyjęto założenie (zgodne z ogólnie znanymi modelami „grawitacyjnymi”), że liczba pasażerów podejmujących podróż do innego Punktu Transportowego jest wprost proporcjonalna do ciężenia tego Punktu względem Punktu początkowego:

$$c_{nm} = \frac{M_n + M_m}{S_{nm}} \quad (4)$$

gdzie:

c_{nm} – ciężenie Punktu „n” względem Punktu „m”,
 M_m – liczba mieszkańców Punktu „m”,
 M_n – liczba mieszkańców Punktu „n”,
 S_{nm} – odległość [km] od Punktu „m” do Punktu „n”.

Oznacza to, że potencjał pomiędzy dwoma Punktami Transportowymi „m” i „n” będzie równy:

$$P_{nm} = P_n \cdot \frac{c_{nm}}{\sum_{i=1}^k c_{im}} \quad (5)$$

gdzie:

k – liczba analizowanych Punktów.

Model ustala potencjał pasażerski pomiędzy Punktem „m” i każdym innym Punktem przez podział potencjału Punktu „m” proporcjonalnie do udziału ciężenia względem wybranego Punktu w sumie ciężerzy względem wszystkich Punktów.

Ustalenie tras, jakimi będą się przemieszczać pasażerowie w sieci transportowej

Następnym etapem jest ustalenie dwóch tras (publicznej i prywatnej) pomiędzy dwoma dowolnymi Punktami Transporto-

wymi w sieci, optymalnych z punktu widzenia pasażera.

Założono, że pasażer wybiera trasę (a tym samym środek transportu), kierując się zdefiniowanym wcześniej kryterium satysfakcji, czyli minimalizacją kosztu przejazdu i czasu przejazdu. Tak więc ustalono, że optymalna trasa będzie wybierana na podstawie minimum iloczynu kosztu przejazdu i czasu przejazdu.

Koszt podróży dla transportu publicznego (koleje i autobusy)

przyjęto zgodnie z obowiązującymi cennikami (w przypadku kolei – cennik „Regio”, w przypadku autobusów – cennik „PKS Dzierżoniów”). Przy wyborze cenników kierowano się kompletnością cennika (przejazdy jednorazowe i miesięczne, maksymalna odległość podróży uwzględniona w cenniku) oraz informacją o tym, jak zwiększa się cena biletu po przekroczeniu ostatniej odległości w cenniku. Z dostępnych informacji o kilku taryfach kolejowych wybrano cennik dla Przewozów Regionalnych (cennik zawierał cenę dla biletów jednorazowych i miesięcznych; w przypadku biletów jednorazowych taryfa była identyczna jak Kolei Dolnośląskich). Dla autobusów wybrano cennik przedsiębiorstwa „PKS Dzierżoniów” ze względu na jego kompletność oraz to, że pozostałe cenniki przewoźników przewożących znaczną liczbę pasażerów, nie były tak kompletne, a nie różniły się istotnie. Ze względu na konieczność uwzględnienia w koszcie podróży biletów miesięcznych ustalono, że koszt ten będzie równy średniej ważonej z kosztu dla biletów jednorazowych oraz kosztu biletów miesięcznych. Na potrzeby dalszych obliczeń założono, że podróżny kupujący bilet miesięczny to osoba pracująca lub ucząca się oraz że korzysta on z takiego biletu dwukrotnie (dojazd do/z pracy/szkoły) we wszystkie dni robocze (przyjęto średnią 21 dni roboczych na miesiąc).

W 2011 roku (najświeższe dane, z terenu województwa dolnośląskiego, jakimi dysponowano w czasie wykonywania obliczeń) wszyscy przewoźnicy autobusowi, którzy przekazali taką informację, sprzedali łącznie 26 524 782 biletów, z czego 1 562 199 to bilety miesięczne. Z prostych obliczeń wynika, że całkowita liczba sprzedanych biletów równa się 68 391 przejazdów jednorazowych na dzień i 179 760 przejazdów w ramach biletów miesięcznych na dzień. Przejazdy w ramach biletów miesięcznych stanowią 72,4% wszystkich przejazdów. Dodatkowo, na podstawie danych GUS [7] ustalono, że 82,1% osób pracujących dojeżdża do pracy na odległość do 20 km, 13,1% na odległość 21-50 km, a 4,8% na odległość powyżej 50

km (dla uproszczenia przyjęto, że maksymalny dystans to 100 km). Jednocześnie założono, że uczniowie szkół ponadgimnazjalnych i studenci szkół wyższych dojeżdżają w tych samych proporcjach (uczniowie szkół podstawowych i gimnazjów mają własny transport lub używają transportu wewnątrzpowiatowego).

Koszt podróży dla transportu prywatnego (samochodu)

przyjęto jako iloczyn długości trasy (w kilometrach) oraz jednostkowego kosztu za kilometr równego 0,8358 zł (wartość przyjęta jako ryczałt za kilometr używania prywatnego samochodu osobowego z silnikiem o pojemności powyżej 900 cm³ do celów służbowych).

Prognoza czasu przejazdu komunikacji drogowej:

- Prognoza czasu przejazdu oparta jest o budowę modelu ruchu zawartą w „Opracowaniu metodologii liczenia wskaźnika międzygałęziowej dostępności transportowej terytorium Polski oraz jego oszacowanie” (PAN, opracowanie dla Ministerstwa Rozwoju Regionalnego, 2008) [8].
- Czas przejazdu na odcinkach dróg uzależniany jest od ich kategorii (autostrady, drogi ekspresowe dwu- i jednojezdniowe, drogi krajowe dwu- i jednojezdniowe oraz pozostałe) oraz od wskaźnika zmotoryzowania ludności zamieszkałej na terenie wokół przebiegu danego odcinka. W opracowaniu przyjęto promień o długości 1 km wokół odcinka drogi.
- Współczynnik motoryzacji został wyliczony na podstawie danych historycznych dostępnych w opracowaniu GUS „Transport – wyniki działalności w 2012 r.” [9].
- Obliczenia dotyczące prędkości zostały obliczone zarówno dla wariantu bazowego, jak i dla wariantów dla 2015, 2020 i 2025 roku.

Wariant bazowy został porównany z czasami rzeczywistymi, a różnica w czasie (stały czas opóźnień na danym odcinku związany z liczbą miejscowości, ukształtowaniem terenu i trasowaniem drogi) została dodana do wszystkich późniejszych prognoz (na 2015, 2020 i 2025 rok).

Czas podróży dla transportu publicznego (koleje i autobusy) oblicza się następująco:

$$t_{publ} = t_{DP} + t_p + t_{prz} + t_{PD} \quad (6)$$

gdzie:

t_p – całkowity czas podróży transportem publicznym,

t_{DP} – czas „drzwi–przystanek” – średni czas dotarcia na przystanek autobusowy/stację

kolejową i oczekiwania na odjazd autobusu/pociągu,

t_p – czas podróży pomiędzy przystankiem początkowym i końcowym,

t_{prz} – suma czasów przesiadek z autobusu na pociąg i odwrotnie,

t_{PD} – czas „przystanek–drzwi” – średni czas dotarcia z końcowego przystanku/stacji do celu podróży.

W modelu przyjęto następujące wartości:

t_{DP} – funkcja liniowa proporcjonalna do liczby mieszkańców Punktu początkowego trasy (od 10 minut dla miejscowości o liczbie mieszkańców poniżej 5000 osób do 30 minut dla miejscowości powyżej 100 000 mieszkańców),

t_p – wynikające z normalnego czasu przejazdu pomiędzy dwoma punktami po najkrótszej trasie oraz obsługi przystanków na tej trasie (dla autobusów czas obsługi przystanku = 1 min, 1 przystanek co 3 km – wartości średnie uzyskane z analizy danych o połączeniach autobusowych w województwie dolnośląskim; dla kolei czas podróży wynika bezpośrednio z rozkładów jazdy uwzględniających czas obsługi przystanków),

t_{prz} – liczba przesiadek autobus/kolej (i odwrotnie) pomnożona przez stałą wartość średniego czasu przesiadki równą 15 minut,

t_{PD} – funkcja liniowa proporcjonalna do liczby mieszkańców Punktu końcowego trasy (od 10 minut dla miejscowości o liczbie mieszkańców poniżej 5000 osób do 30 minut dla miejscowości powyżej 100 000 mieszkańców).

Czas podróży dla transportu prywatnego (samochodu) oblicza się następująco:

$$t_{pryw} = t_{DS} + t_p + t_{SD} \quad (7)$$

gdzie:

t_s – całkowity czas podróży samochodem,

t_{DS} – czas „drzwi–samochód” – średni czas dotarcia do samochodu,

t_p – czas podróży pomiędzy przystankiem początkowym i końcowym,

t_{SD} – czas „samochód–drzwi” – średni czas parkowania i dotarcia od samochodu do celu podróży.

W modelu przyjęto następujące wartości:

t_{DS} – funkcja liniowa proporcjonalna do liczby mieszkańców Punktu początkowego trasy (od 1 minuty dla miejscowości o liczbie mieszkańców poniżej 5000 osób do 10 minut dla miejscowości powyżej 100 000 mieszkańców),

t_p – wynikające z normalnego czasu przejazdu pomiędzy dwoma Punktami po najkrótszej trasie,

t_{SD} – funkcja liniowa proporcjonalna do liczby mieszkańców Punktu końcowego trasy (od 5 minut dla miejscowości o licz-

bie mieszkańców poniżej 5000 osób do 20 minut dla miejscowości powyżej 100 000 mieszkańców).

Ustalenie, ilu pasażerów wybierze transport publiczny, a ilu prywatny

Przy wyborze środka transportu (w naszym modelu publicznego i prywatnego) pasażer kieruje się minimalizacją tzw. kosztu generalizowanego [4]:

$$G = \sum_{i=1}^k c_i + \left(\sum_{i=1}^l \beta_i \cdot t_i \right) \cdot h_r \quad (8)$$

gdzie:

c_i – składniki kosztu podróży daną trasą (k – liczba składników kosztu podróży),

β_i – współczynnik dla czasu podróży (l – liczba składników czasu podróży) – na potrzeby modelu przyjęto $\beta = 1$,

t_i – składnik czasu podróży (l – liczba składników czasu podróży),

h_r – koszt jednostkowy czasu podróжного r.

Kluczowe znaczenie ma ustalenie tzw. kosztu jednostkowego czasu każdego podróжного. Powyższy wzór ma charakter funkcji liniowej i przy założeniu, że czasy przejazdu transportem publicznym i prywatnym na danej trasie różnią się, powoduje to ustalenie dwóch funkcji kosztu generalizowanego (rys. 2), które przecinają się dla ustalonej wartości h_0 , którą możemy nazwać obojętnym kosztem czasu. Jeśli czas podróży trasą publiczną jest większy od czasu podróży trasą prywatną (założenie słuszne dla większości przypadków), to pasażerowie, dla których wartość kosztu jednostkowego jest mniejsza od h_0 (czyli osoby mniej zarabiające), będą wybierać transport publiczny, pozostali wybiorą transport prywatny

Pozostaje do ustalenia liczba pasażerów, których wartość $h_r < h_0$, oraz pozostałych.

Zgodnie z literaturą rozkład wartości czasu h_r przyjmuje się za identyczny jak rozkład przychodów w społeczeństwie. A ten z kolei przybliża się rozkładem logarytmiczno-normalnym lub rozkładem Pareto. Dla potrzeb modelu przyjęto założenie, że rozkład (gęstość) wartości h_r w społeczeństwie jest opisany rozkładem Pareto w postaci:

$$f(x) = \frac{1}{x^\alpha} \quad (9)$$

gdzie:

α – współczynnik rozkładu, który dla modelu przyjęto na poziomie [0,1].

Stąd liczba pasażerów, których wartość $h_r < h_0$ jest proporcjonalna do:

$$P_1 = \int_{h_{\min}}^{h_0} f(x) dx \quad (10)$$

a liczba pasażerów, których wartość $h_r > h_0$, jest proporcjonalna do:

$$P_2 = \int_{h_0}^{h_{\max}} f(x) dx \quad (11)$$

Po podstawieniu wartości dla parametrów h_{\min} , h_0 , h_{\max} otrzymuje się proporcję liczby pasażerów wybierających transport publiczny $P_1/(P_1+P_2)$ do liczby pasażerów wybierających transport prywatny $P_2/(P_1+P_2)$.

Wartość h_{\min} do obliczeń przyjęto jako równą 20 zł, a h_{\max} równe 200 zł. Jeżeli obliczona wartość h_0 dla konkretnej trasy przekroczy h_{\max} , z definicji wszyscy pasażerowie wybiorą transport publiczny, jeżeli będzie mniejsza od h_{\min} – wszyscy pasażerowie wybiorą trasę prywatną.

Ustalenie całkowitego potencjału pasażerskiego na każdym połączeniu w sieci transportowej

Ostatnim etapem jest ustalenie całkowitego potencjału pasażerskiego na danym połączeniu. Oblicza się powyższe, sumując potencjały pasażerskie wszystkich tras zawierających w sobie dane połączenie.

Przeprowadzenie symulacji

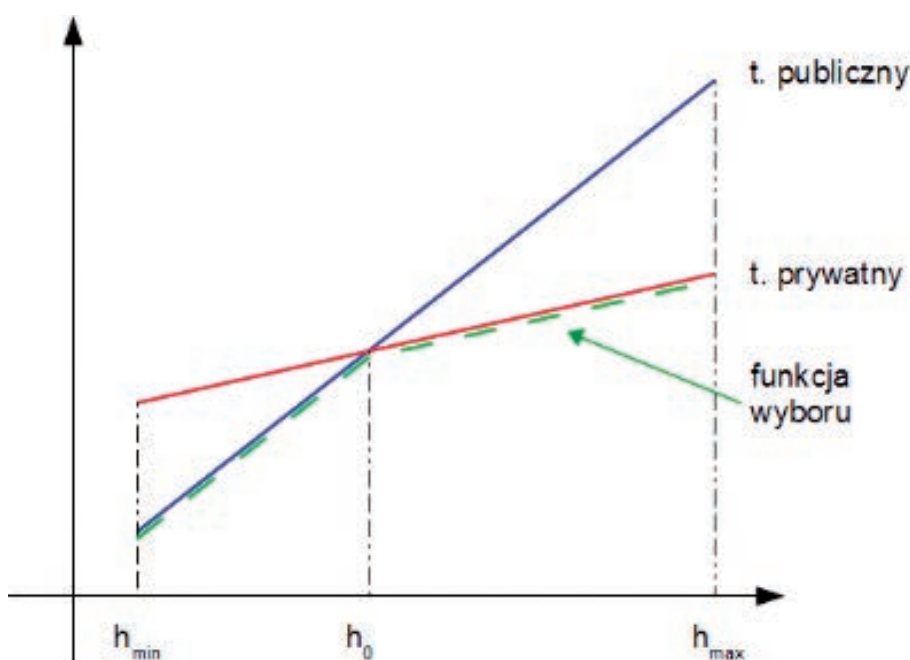
Po uwzględnieniu danych statystycznych dostarczonych przez Urząd Marszałkowski Województwa Dolnośląskiego i wykorzystując model opisany powyżej można było zaplanować szereg eksperymentów symulacyjnych uwzględniających potrzeby projektu.

W trakcie implementacji modelu matematycznego do postaci symulacyjnej przeprowadzono analizę zależności danych wyjściowych (potoków pasażerskich) od danych opisujących (między innymi danych demograficznych) i okazało się, że tak budowany model zależy głównie od trzech wskaźników (zmiennych): liczby mieszkańców w analizowanych Punktach Transportowych, średniego wynagrodzenia dla Punktów Transportowych oraz czasów przejazdu na wszystkich analizowanych połączeniach (kolejowych, autobusowych i samochodowych) i ich kosztu. Pozostałe współczynniki są stałe dla wybranych okresów planowania, zależą od wyżej wymienionych trzech podstawowych czynników, lub w wyniku analizy statystycznej ustalono, że ich wpływ na zmienną wyjściową jest nieistotny.

W ramach modelu uwzględniono trzy zasadnicze motywacje, jakie wpływają na podjęcie podróży przez potencjalnego pasażera: praca, szkoła oraz inne. Z racji tego, jak jest zdefiniowany model prawdopodobieństwa podjęcia podróży przez mieszkańca Punktu Transportowego (pierwszy etap budowy modelu opisany w rozdziale 1), motywacje te są zagregowane w modelu matematycznym. Jednak są uwzględniane w sposób szczególny w dalszych etapach modelowania (np. przy obliczaniu kosztów podróży transportem publicznym – patrz uwzględnienie biletu miesięcznego oraz dystansu podróży w rozdziale 1).

Model symulacyjny, z powodu założeń poczynionych w modelu matematycznym, prognozuje potrzeby transportowe jako potencjały pasażerskie:

- przy częstotliwości połączeń dążącej do nieskończoności oraz
- braku jakichkolwiek czynników zniechęcających pasażera do podróży wybranym środkiem transportu, takich jak np.:
- zły stan techniczny taboru,



2. Funkcja kosztu generalizowanego

- ograniczenia w odczycie bądź złe rozumienie informacji o połączeniach,
- nieodpowiednia taryfa (konieczność wykupienia wielu biletów jednorazowych i/ lub ograniczenie w zastosowaniu biletu miesięcznego),
- zły stan techniczny przystanków.

Drugim założeniem jest przyjęcie, że każdy pasażer w modelu kieruje się racjonalnymi przesłankami w wyborze połączenia, bazującymi na koszcie i czasie, a na jego decyzję nie mają wpływu inne przesłanki, takie jak np.: przyzwyczajenie, niewiedza o faktycznych wartościach czasu i kosztów, istnienie tańszego substytutu (np. środka transportu organizowanego przez pracodawcę).

Można powiedzieć w uproszczeniu, że model prognozuje liczbę pasażerów, którzy w idealnych warunkach chcieliby skorzystać z danego połączenia.

Ponieważ model ustala optymalną (z punktu widzenia satysfakcji klienta) trasę publiczną, mogącą się składać z dowolnej kombinacji połączeń kolejowych i autobusowych, jest to jednocześnie informacja o prognozowanych preferencjach podróżnych dotyczących wyboru środka transportu. Bezpośrednio z rezultatów takiej prognozy można zaczerpnąć informację o podziale potencjału pasażerskiego pomiędzy autobus i kolej.

Trasowanie sieci transportowej

W czasie ustalania sieci transportowej drogowej i kolejowej dla potrzeb modelu oparto się na danych:

- czas przejazdu pomiędzy punktami transportowymi,
- odległość pomiędzy punktami transportowymi,
- liczba mieszkańców Punktów Transportowych.

W efekcie otrzymano sieć drogową i kolejową zaprezentowaną na poniższych mapach:

Dla tak przyjętej sieci wykonano trasowanie (ustalenie optymalnej trasy publicznej i prywatnej dla każdej pary Punktów Transportowych), opierając się na kryterium satysfakcji klienta - czyli minimalizacji iloczynu kosztu i czasu przejazdu.

W wyniku otrzymano ponad 8 000 tras składających się z około 100 000 połączeń dla każdego z wariantów symulacji. Wyniki te posłużyły do obliczenia maksymalnego popytu dla każdej trasy.

Ustalenie popytu pasażerskiego dla zadanych horyzontów czasowych i wariantów

W trakcie implementacji modelu matematycznego do postaci symulacyjnej prze-

prowadzono analizę zależności danych wyjściowych (potoków pasażerskich) od danych opisujących (między innymi danych demograficznych) i okazało się, że tak budowany model zależy głównie od trzech wskaźników (zmiennych): liczby mieszkańców w analizowanych Punktach Transportowych, średniego wynagrodzenia dla Punktów Transportowych oraz czasów przejazdu na wszystkich analizowanych połączeniach (kolejowych, autobusowych i samochodowych) i ich kosztu. Pozostałe współczynniki są stałe dla wybranych okresów planowania, zależą od wyżej wymienionych trzech podstawowych czynników, lub w wyniku analizy statystycznej ustalono, że ich wpływ na zmienną wyjściową jest nieistotny.

W ramach modelu uwzględniono trzy zasadnicze motywacje, jakie wpływają na podjęcie podróży przez potencjalnego pasażera: praca, szkoła oraz inne. Z racji tego, jak jest zdefiniowany model prawdopodobieństwa podjęcia podróży przez mieszkańca Punktu Transportowego, motywacje te są zagregowane w modelu matematycznym.

Model symulacyjny, z powodu założeń poczynionych w modelu matematycznym, prognozuje potrzeby transportowe jako potencjały pasażerskie:

- przy częstotliwości połączeń dążącej do nieskończoności oraz
- braku jakichkolwiek czynników zniechęcających pasażera do podróży wybranym środkiem transportu, takich jak np.:
- zły stan techniczny taboru,
- ograniczenia w odczycie bądź złe rozumienie informacji o połączeniach,
- nieodpowiednia taryfa (konieczność wykupienia wielu biletów jednorazowych i/ lub ograniczenie w zastosowaniu biletu miesięcznego),
- zły stan techniczny przystanków.

Drugim założeniem jest przyjęcie, że każdy pasażer w modelu kieruje się racjonalnymi przesłankami w wyborze połączenia, bazującymi na koszcie i czasie, a na jego decyzję nie mają wpływu inne przesłanki, takie jak np.: przyzwyczajenie, niewiedza o faktycznych wartościach czasu i kosztów, istnienie tańszego substytutu (np. środka transportu organizowanego przez pracodawcę).

Można powiedzieć w uproszczeniu, że model prognozuje liczbę pasażerów, którzy w idealnych warunkach chcieliby skorzystać z danego połączenia.

Ponieważ model ustala optymalną (z punktu widzenia satysfakcji klienta) trasę publiczną, mogącą się składać z dowolnej kombinacji połączeń kolejowych i autobusowych, jest to jednocześnie informacja

o prognozowanych preferencjach podróżnych dotyczących wyboru środka transportu. Bezpośrednio z rezultatów takiej prognozy można zaczerpnąć informację o podziale potencjału pasażerskiego pomiędzy autobus i kolej.

W ramach projektu opracowano prognozę popytu na transport publiczny w założonym okresie planowania (rok 2015, 2020 oraz 2025). Ponieważ każda prognoza obarczona jest błędem, oznaczało to równocześnie opracowanie kryteriów różnicujących wariant optymistyczny (maksymalizujący popyt) oraz pesymistyczny (minimalizujący popyt) od wariantu neutralnego (przyjęto założenie, że wariant neutralny jest wariantem najbardziej prawdopodobnym). Poniżej zaprezentowano szczegółowe ustalenia dotyczące definicji wariantu optymistycznego, neutralnego i pesymistycznego.

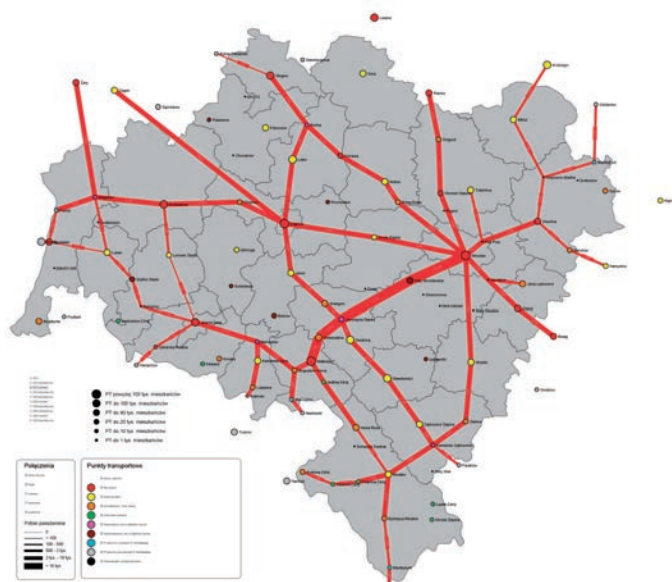
Wnioski końcowe

Prognoza preferencji podróżnych w zakresie wyboru środka transportu jest zaprezentowana na mapach w załączniku nr 13. Dla uproszczenia zaprezentowano poniżej cztery mapy (wariant neutralny dla 2015 roku – autobusy i koleje oraz wariant neutralny dla 2025 roku – również autobusy i koleje). Grubością linii jest oznaczona wielkość potencjału pasażerskiego (rysunki 3 - 6).

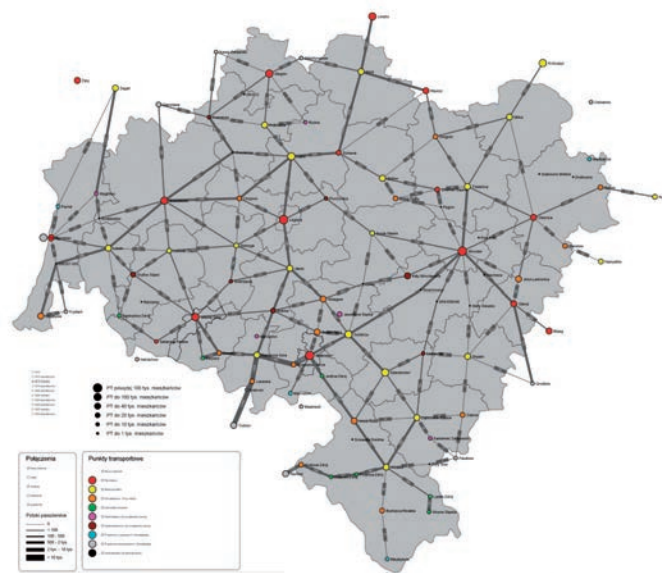
Podróźni (zgodnie z wynikami symulacji omówionymi powyżej) będą mieli skłonność do wybierania kolei jako głównego środka transportu. Jest to widoczne na poniższych mapach dla kolei, gdzie rysuje się znaczne zwiększenie potencjału pasażerskiego na trasie Wrocław – Wałbrzych oraz (w 2025 roku) Wrocław – Legnica i dalej w kierunku Zgorzelca. W tym samym czasie potencjały dla autobusów są ustabilizowane na mniej więcej tym samym poziomie.

Założeniem prognozy było także sprawdzenie, jaki potok w dobie wygenerują połączenia kolejowe dziś niedziałające, a potencjalnie możliwe do uruchomienia, czyli: Legnica – Lubin – Rudna lub Węglińiec – Lubań Śląski. Połączenia te byłyby istotne z punktu widzenia logiki tworzenia sieci kolejowej. Analiza wyników modelu (potoki na tych trasach) pozwoli ocenić, czy warto proponować je w sieci połączeń Planu Transportowego.

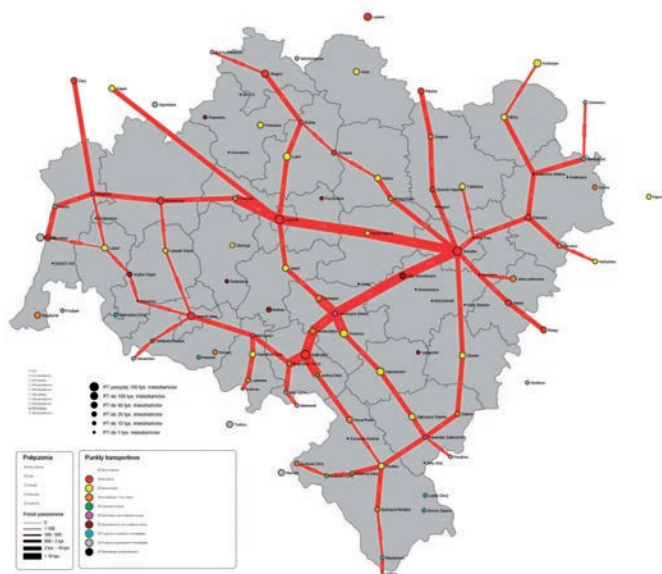
W przypadku pierwszego połączenia prognozowany potencjał w 2015 roku ukształtował się na poziomie około 3500 pasażerów dla połączenia Legnica – Lubin oraz około 1700 pasażerów dla połączenia Lubin – Rudna. W 2025 roku potencjał rośnie do odpowiednio około 7000 i około 4200 pasażerów. ◀



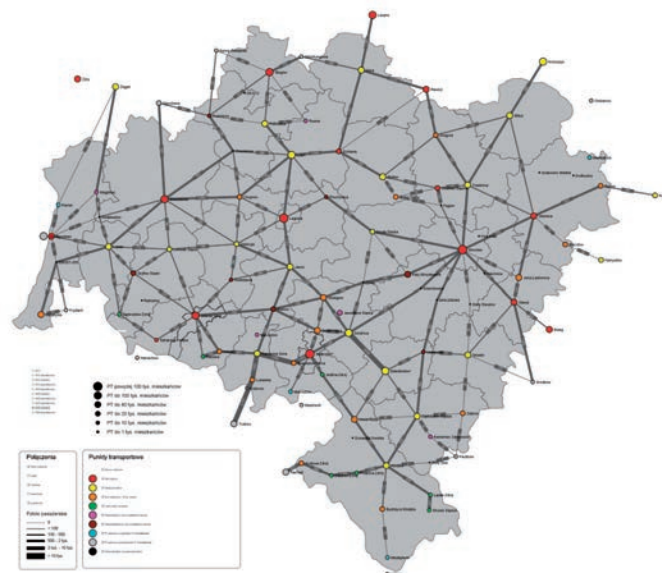
3. Mapa potencjałów pasażerskich dla kolei na rok 2015



4. Mapa potencjałów pasażerskich dla autobusów na rok 2015



5. Mapa potencjałów pasażerskich dla kolei na rok 2025



6. Mapa potencjałów pasażerskich dla autobusów na rok 2025

Materiały źródłowe

- [1] Dz. U. z 2011 r. Nr 5, poz. 13, Nr 228, poz. 1368.
- [2] Wyszomirski O., Grzelec K., Hebel K., Postulaty przewozowe mieszkańców Gdyni według badań marketingowych z 1996 roku, *Transport Miejski*, 1997, nr 6.
- [3] Susz S., *Metodyka analizy i oceny zlecenia produkcyjnego na etapie technicznego przygotowania produkcji* -praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, 2004.
- [4] Żurkowski A.: Modelowanie przewozów międzyaglomeracyjnych, *Problemy kolejnictwa - zeszyt 148*, 2009, <http://www.problemykolejnictwa.pl/index.php/tom-53-2009/zeszyt-nr-148>.
- [5] Susz S, Kowalski A., Burduk A., Rapid simulation models, w: *Rapid Production 2004. Innovation - knowledge - industry*. 1st International conference, Wrocław, 2004, s. 251–256.
- [6] Chlebus E., Kowalski A., Susz S., Zarządzanie zasobami produkcyjnymi za pomocą narzędzi symulacyjnych. *Zarządzanie przedsiębiorstwem*, nr 6, 2003, s. 4–11.
- [7] GUS: „Dojazdy do pracy w 2010 roku na podstawie BAEL”, http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/PUBL_pw_dojazdy_do_pracy_w_2010_r_na_podstawie_BAEL.pdf, [dostęp: 5.11.2013].
- [8] http://www.ewaluacja.gov.pl/Dokumenty_ewaluacyjne/Documents/Opracowanie__metodologii_wmdt.pdf, [dostęp: 5.11.2013].
- [9] GUS: „Transport – wyniki działalności w 2012 r.”, http://www.stat.gov.pl/gus/5840_748_PLK_HTML.htm, [dostęp: 5.11.2013].