

# Model Ruchu na potrzeby PKP Polskich Linii Kolejowych SA – komponent pasażerski<sup>1</sup>

**ADAM KONARSKI**

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA

**MIKOŁAJ KLIKOWSKI**

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA

**BARTŁOMIEJ MIKULSKI**

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA

**MICHAŁ MOKRZAŃSKI**

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA

**MICHAŁ PYZIK**

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA

e-mail: [michal.pyzik@plk-sa.pl](mailto:michal.pyzik@plk-sa.pl)

**Streszczenie:** PKP Polskie Linie Kolejowe SA nie posiadały do tej pory systemu pozwalającego na potencjalne ocenianie reakcji rynku przewozów pasażerskich i towarowych na wprowadzane w sieci zmiany parametrów obsługi. Poszczególne inwestycje firmy były prowadzone w oparciu o punktowe/ odcinkowe Studia Wykonalności, gdzie przeprowadzano proces weryfikacji korzyści z realizacji inwestycji dla ograniczonego obszaru oddziaływania. Model Ruchu daje możliwość wykazania wpływu inwestycji na funkcjonowanie rynku przewozów w skali kraju, a także podejmowanie decyzji inwestycyjnych z wykorzystaniem rekomendacji pochodzących z analiz. Zbudowany wewnętrznie, przez pracowników Spółki Model Ruchu, pozwala na porównanie oferty pasażerskich przewozów kolejowych z konkurencyjnymi gałęziami transportu: transportem indywidualnym i transportem zbiorowym. Zastosowano model 4-stadiowy, w którym obszar rejonu odpowiada gminie. Na etapie generacji podróży uwzględniony jest wpływ otoczenia rozpatrywanej gminy. W modelu zastosowano wieloczynnikową funkcję podziału zadań przewozowych. Transport zbiorowy w modelu, w tym transport autobusowy, został oparty na rozkładach jazdy. Paradigmat decyzyjny użytkowników systemu transportowego został oparty na zbiorze ankietowych badań ruchu pozyskanych od jednostek samorządu terytorialnego i z pilotażowego badania przeprowadzonego przez Główny Urząd Statystyczny. W artykule przekrojowo opisano założenia i wnioski z realizacji komponentu pasażerskiego Modelu Ruchu PKP PLK SA.

**Słowa kluczowe:** modelowanie transportu, transport pasażerski, transport kolejowy, przepustowość.

## Geneza modelu ruchu

Wymóg wdrożenia modelu ruchu przez zarządcę infrastruktury kolejowej został sformułowany w Dokumentie Implementacyjnym do Strategii Rozwoju Transportu do 2020 r. [1] PKP Polskie Linie Kolejowe SA nie posiadały systemu pozwalającego na potencjalne ocenianie reakcji rynku przewozów pasażerskich i towarowych na wprowadzane w sieci zmiany parametrów obsługi. Poszczególne inwestycje firmy prowadzone były w oparciu o punktowe/ odcinkowe Studia Wykonalności, gdzie doszło do procesu weryfikacji korzyści z przeprowadzenia inwestycji, tylko i wyłącznie dla ograniczonego obszaru oddziaływania inwestycji. Dla Spółki istotnym jest możliwość zbadania i wykazania wpływu inwestycji na funkcjonowanie rynku przewozów w skali kraju, a także podejmowanie decyzji inwestycyjnych z wykorzystaniem rekomendacji pochodzących z analiz. Model Ruchu PKP PLK SA (Model

Ruchu lub Model) pozwala na porównanie oferty przewozów kolejowych z innymi gałęziami transportu. Brak tego typu narzędzia skutkował czasochłonnością prowadzenia analiz oraz zwiększał ryzyko podjęcia nietrafnych decyzji, dotyczących zakresu prac inwestycyjnych. W efekcie przeprowadzane prace inwestycyjne mogły okazać się nieadekwatne do potrzeb, a środki przeznaczane na ich realizację zostać nieefektywnie wykorzystane. Jest to istotne ze względu na skalę finansową zadań inwestycyjnych oraz czasochłonność ich realizacji. Błędnie podjęte decyzje dotyczące zakresu inwestycji w najgorszym przypadku mogą spowodować pogorszenie oferty kolei w stosunku do stanu dotychczasowego.

PKP PLK SA rozpoznała też sytuację pod kątem adaptowania istniejących na rynku modeli, co doprowadziło do decyzji o potrzebie opracowania modelu od podstaw. W związku z dostępem do danych o sieci kolejowej i chęcią posiadania wpływu na finalny kształt modelu założono, że Model będzie powstawał wewnętrznie w PKP PLK SA i będzie realizowany zasobami własnymi spółki.

Doświadczenia zagraniczne wskazują, że warunkiem koniecznym do tego, aby uzyskiwać dokładne wyniki, jest stałe aktualizowanie Modelu, również po uzyskaniu jego pierwszej wersji, a także systematyczne wprowadzanie ulepszeń oraz nowych rozwiązań. Opracowany i opisany w niniejszym artykule model pasażerski stanowi bazę umożliwiającą wprowadzanie ulepszeń w kolejnych etapach rozwoju. Struktura danych stanowiących Model, przygotowana jest tak, aby możliwe były regularne aktualizacje po zakończeniu projektu, w zakresie sieci, danych demograficznych, badań potoków ruchu, badań zachowań komunikacyjnych itd.

## Założenia Modelu

Podstawowe wymagania, jakie zostały postawione przed Modelem Ruchu w fazie koncepcji, to – oprócz rzetelności – jego elastyczność oraz łatwość aktualizacji i późniejszej rozbudowy. Biorąc pod uwagę powyższe wymagania, zdecydowano o modułowej budowie Modelu. Model podzielono na moduły odpowiedzialne za poszczególne obszary działań. Obszary działań wykonywanych podczas tworzenia, korzystania i utrzymywania Modelu Ruchu można podzielić na kilka grup:

- gromadzenie i weryfikacja danych,
- analiza danych,
- zasadnicza faza modelowania ruchu,

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2018. Wkład autorów w publikację: A. Konarski 20%, M. Klikowski 20%, B. Mikulski 20%, M. Mokrzański 20%, M. Pyzik 20%

- prezentacja wyników modelu,
- aktualizacja modelu,
- rozwój modelu.

### Założenia dotyczące modelowania

Zasadniczą część modelowa jest oparta na metodzie opisywanej w literaturze (np. [2]) jako model cztero-stadiowy. Wynikiem modelowania są przede wszystkim potoki ruchu na sieci transportowej. W celu otrzymania potoków ruchu konieczne jest posiadanie macierzy przemieszczeń użytkowników (macierze źródło–cel). Macierze przemieszczeń wyliczane są na podstawie danych socjodemograficznych, a następnie dzielone na gałęzie transportu (np. transport indywidualny, kolej regionalna lub autobus). Otrzymane, podzielone macierze rozkładane są na sieć transportową, dając ostateczny wynik w postaci potoków ruchu na sieci.

W przypadku niektórych części Modelu (takich jak np. ruch związanych z zagranicą, kołowy ruch towarowy, podróże studentów), dla których nie były dostępne spójne dane o zadowalającej jakości, zastosowano odmienne metodyki.

### Modelowane środki transportu

W Modelu przyjęto następujące środki transportu:

- Transport indywidualny – są to wszystkie podróże odbywane za pomocą samochodu osobowego przez użytkowników, którzy są kierowcami, jak i osobami korzystającymi z samochodu jako pasażerowie. Z uwagi na odmienną wrażliwość na występujące na drogach warunki (inne parametry funkcji oporu na odcinkach sieci) podzielono ten meta-środek transportu ze względu na środki w motywacjach:
  - samochody osobowe w motywacjach obligatoryjnych (praca, edukacja) – skrócona nazwa: SO Dojazd,
  - samochody osobowe w motywacji biznes<sup>2</sup> – SO Biznes,
  - samochody osobowe w innych motywacjach – SO Inne;
- Transport zbiorowy –  $PuT$ , w podziale na:
  - transport drogowy – BUS, modelowany przy wykorzystaniu rozkładów jazdy:
    - o autobusy ekspresowe – BUS Ex,
    - o autobusy pospieszne (międzyregionalne) – BUS MR,
    - o autobusy zwykłe (regionalne) – BUS R,
  - transport kolejowy – K, modelowany przy wykorzystaniu rozkładów jazdy:
    - o pociągi z segmentu premium – K EIP,
    - o pociągi międzyregionalne – K MR,
    - o pociągi regionalne – K R,
  - transport pomocniczy – AUX, modelowany w sposób uproszczony;
- Drogowy transport ładunków – FRE, używany w modelu pasażerskim do obciążania sieci transportowej w celu uzyskania urealnionych czasów przejazdu:

- samochody dostawcze – SD,
- samochody ciężarowe – SC,
- samochody ciężarowe z przyczepą – SCP.
- Transport pieszy – W, transport pieszy wykorzystywany w dojściu na przystanek w celu odbycia podróży środkami transportu zbiorowego.

Elementy sieci transportowych posiadają odmienne charakterystyki w zależności od rozpatrywanego środka transportu. Na przykład na drodze danego typu samochód osobowy może poruszać się z większą dozwoloną prędkością niż samochód ciężarowy z przyczepą, autobus natomiast porusza się z prędkością zależną od czasu przejazdu autobusu wyliczoną na podstawie rozkładu jazdy i warunków ruchu na drogach.

### Gałęzie transportu

Gałęzie transportu (w Visum: *ang. modes*) to grupy środków transportu, wewnątrz których możliwa jest zmiana wykorzystywanego przez użytkownika środka transportu. W tabeli 1 przedstawiono listę gałęzi transportu zbiorowego wraz z przyporządkowanymi do nich środkami transportu.

Tabela 1

| Schemat przyporządkowania środków transportu do gałęzi transportu  |        |                    |                |                            |                     |
|--|--------|--------------------|----------------|----------------------------|---------------------|
|  |        | Gałęzie transportu |                |                            |                     |
|  |        | Pomocniczy AUX     | Autobusowy BUS | Kolej międzyregionalna KMR | Kolej regionalna KR |
| Środki transportu  | AUX    | X                  | P              | P                          | P                   |
|  | BUS EX |                    | X              |                            |                     |
|  | BUS MR |                    | X              |                            |                     |
|  | BUS R  |                    | X              | P                          |                     |
|  | K EIP  |                    |                | X                          |                     |
|  | K MR   |                    |                | X                          |                     |
|  | K R    |                    |                | P                          | X                   |
|  | W      | P                  | P              | P                          | P                   |
| X – środek transportu występuje w gałęzi transportu, P – środek transportu występuje w gałęzi pomocniczo, przejazdy w ramach gałęzi realizowane tylko za pomocą środków występujących pomocniczo są w Modelu zabronione. |        |                    |                |                            |                     |

Gałęzie dla transportu indywidualnego i towarowego są tożsame ze środkami transportu. Nie występują w tym przypadku żadne możliwości zmiany środka transportu.

### Modelowanie w Modelu podaży

System podaży w Modelu Ruchu odpowiada za umożliwienie użytkownikom wykonania przemieszczeń wygenerowanych w części popytowej. W pośredni sposób wpływa także na obliczenia części popytowej poprzez czasy i odległości podróży, które są m.in. produktem opartym na właściwościach sieci i jej oferty przewozowej. System podaży w Modelu Ruchu został odwzorowany z dużym poziomem dokładności. Składają się nań:

- sieć transportu kolejowego wraz z rozkładem jazdy pociągów,
- sieć transportu drogowego wraz z rozkładem jazdy autobusów.

<sup>2</sup> Jako motywację Biznes rozumieć należy wszystkie podróże odbywane w ramach wykonywanej pracy, nie będące jednak podróżami dojazdowymi do i z pracy.

Sieci, drogowa oraz kolejowa, zostały odwzorowane w postaci grafów składających się z wierzchołków i krawędzi wraz z przyporządkowanymi do nich parametrami. Na obu sieciach zlokalizowano punkty zatrzymań (są to stacje i przystanki kolejowe, a także zagregowane przystanki autobusowe) oraz umożliwiono wykonanie przesiadek pomiędzy różnymi środkami transportu w ramach odpowiednich gałęzi transportu.

### Sieć transportu kolejowego

Graf przebiegu torów kolejowych zbudowano na podstawie danych pochodzących z wewnętrznych systemów Spółki: POS – Prowadzenie Opisu Sieci oraz SILK – System Informacji dla Linii Kolejowych. Dzięki stworzeniu procesów ETL, pobierających dane bezpośrednio z wymienionych systemów i zapisujących je do bazy danych, możliwe są regularne aktualizacje sieci kolejowej.

Integralną częścią sieci kolejowej w Modelu Ruchu jest odwzorowanie oferty przewozowej dla statystycznego pasażera. W Modelu Ruchu oferta przewozowa odwzorowana jest za pomocą szczegółowego rozkładu jazdy. Dane o rozkładzie jazdy dla sieci kolejowej pochodzą z wewnętrznego systemu spółki – Systemu Konstrukcji Rozkładu Jazdy (SKRJ). Dane z systemu dostarczane są w postaci zestawu plików XML na konkretny dzień. Pliki te przetwarzane są przez jeden ze stworzonych pakietów ETL, a wynik przetworzenia zapisywany jest w bazie danych. Do Modelu wprowadzono dane z dnia 7 grudnia 2015 roku.

Obliczenia w Modelu skupione są na ruchu prowadzonym po liniach kolejowych zarządzanych przez PKP Polskie Linie Kolejowe SA, a także na liniach innych zarządców, jeśli pociągi wykorzystujące sieć PLK mogą takie linie wykorzystywać. Nie wyczerpuje to listy szynowych systemów transportowych w Polsce. Niektóre z pozostałych systemów mają istotny wpływ na kształtowanie się ruchu międzygminnego i dopływ pasażerów do pociągów prowadzonych po sieci PLK. Takimi systemami są:

- tramwaje (ujęte razem z pomocniczą komunikacją autobusową ze względu na ich ścisłą współpracę w obszarze miast),
- metro,
- Warszawska Kolej Dojazdowa (WKD),
- w przyszłości celowe może być odwzorowanie ewentualnej zrewitalizowanej kolei wąskotorowej (np. Żnińskiej Kolei Powiatowej), jeśli zaobserwowane zostanie jej wykorzystanie przy codziennych przejazdach.

Powyższe systemy zostały w Modelu przedstawione jako uproszczony środek transportu (w nomenklaturze pakietu Visum system taki traktowany jest jako pomocniczy – *PuT-AUX*). W tym przypadku nie jest odwzorowywany szczegółowy rozkład jazdy, a jedynie umożliwiające poruszanie się użytkownika po odpowiednich odcinkach systemu ze średnią prędkością komunikacyjną.

### Sieć transportu drogowego

Źródłem danych, użytym do stworzenia sieci drogowej, była sieć zaczerpnięta z *Krajowego Modelu Ruchu*, udostępnianego przez GDDKiA. Powyższy model nie wykracza poza granice Polski, a dodatkowo charakteryzuje się wyższym stopniem agregacji rejonów komunikacyjnych niż ma to miejsce w Modelu Ruchu. W związku z powyższym sieć w nim zawartą zaktualizowano i uzupełniono.

Dane na temat oferty przewozowej w transporcie autobusowym pozyskano od operatora internetowego planera podróży e-podróżnik. Dane pozyskano w postaci bazy danych, która za pomocą pakietu ETL została przetworzona, a informacje w niej zawarte wprowadzone do bazy danych Modelu.

Lokalna komunikacja została oddana w Modelu jako środek transportu typu *PuT-AUX* w kilku grupach. W Modelu zadaniem opisywanych środków jest przede wszystkim dowieszenie pasażerów do Punktów Zatrzymań, w niektórych miejscach jednak stanowią one samoistną konkurencję dla pozostałych gałęzi transportu.

### Modelowanie przesiadek pomiędzy gałęziami transportu

W Modelu Ruchu zapewniona jest możliwość wymiany ruchu pomiędzy środkami transportu w obrębie odpowiednich gałęzi transportu, np. przesiadki pociągiem międzyregionalnym a autobusem regionalnym. Połączenia pomiędzy dwoma sieciami transportowymi (drogową i kolejową) uzyskano poprzez utworzenie dodatkowych odcinków łączących kolejowe Punkty Zatrzymań z Punktami autobusowymi.

### Modelowanie w Modelu popytu

W Modelu przyjęto, że *podróż* jest przemieszczeniem wiążącym się z przekroczeniem granicy gminy. Oznacza to m.in., że w Modelu nie są uwzględniane podróże wewnątrz gmin.

### Motywacje podróży

Model operuje motywacjami podróży zestawionymi w tabeli 2.

Tabela 2

| Lista motywacji używanych w Modelu Ruchu         |   |
|--|---|
| Motywacja podróży                                | Opis  |
| Dom-Praca<br>Praca-Dom                           | Obejmuje codzienne wyjazdy z domu do pracy i powroty z pracy do domu  |
| Dom-Szkoła<br>Szkoła-Dom                         | Obejmuje codzienne wyjazdy z domu do szkoły (dotyczy głównie szkół ponadgimnazjalnych) oraz powroty ze szkoły do domu   |
| Dom-Uczelnia<br>Uczelnia-Dom                     | Obejmuje codzienne wyjazdy studentów zamieszkałych w domach rodzinnych na uczelnię oraz powroty z uczelni do domu   |
| Biznesowe  | Podróże odbywane w celach związanych z prowadzoną działalnością gospodarczą, jako właściciel lub pracownik, nie będące dojazdami do pracy   |
| Inne Krótkie w gospodarstwach zmotoryzowanych    | Podróże o zasięgu do 50 km odbywane przez osoby z gospodarstw posiadających co najmniej 1 samochód niezaliczone do obligatoryjnych i biznesowych (np. odwiedziny, wizyta u lekarza, zakupy) |
| Inne Krótkie w gospodarstwach niezmotoryzowanych | Podróże o zasięgu do 50 km odbywane przez osoby z gospodarstw nieposiadających samochodu niezaliczone do obligatoryjnych i biznesowych (np. odwiedziny, wizyta u lekarza, zakupy)           |
| Inne Długie                                      | Podróże o zasięgu powyżej 50 km niezaliczone do obligatoryjnych i biznesowych (np. odwiedziny, wizyta u lekarza, zakupy)  |
| Związane z Warszawą                              | Podróże z i do Warszawy, nienależące do podróży dojazdowych, oraz nie związane z edukacją (szkoła, uczelnia), wyłączone – ze względu na specyfikę Warszawy – do osobnej motywacji podróży   |

Podział podróży fakultatywnych na motywacje (krótkie, długie, wydzielenie podróży związanych z Warszawą) wprowadzono na podstawie analizy danych z badań ruchu, która wykazała znaczące różnice w charakterystyce podróży fakultatywnych. Podział podróży fakultatywnych na często stosowane motywacje, takie jak np. rozrywka, zakupy, centrum handlowe, odwiedziny itp., okazał się niemożliwy z uwagi na niewielkie próby tak pogrupowanych podróży oraz niespójności pomiędzy poszczególnymi badaniami.

### Rejony komunikacyjne

Przystępując do budowy Modelu Ruchu zespół przeanalizował wstępnie dane pozyskane oraz możliwe do pozyskania. Wynikiem analizy była konkluzja, że Model posiadać musi rozwiązanie umożliwiające daleko idącą elastyczność w dziedzinie definicji rejonów oraz umożliwiające przeliczenie wartości zmiennych objaśniających bądź wynikowych podróży w podziale na zadane rejony. Podział zastosowany w Modelu składa się z:

- rejonów tożsamych obszarowo z gminami – jest to podstawowy typ rejonu, stosowany jeżeli nie zachodzą inne przesłanki;
- małych rejonów – podzielone na nie zostały miasta w Polsce o liczbie mieszkańców większej niż 150 000 w roku 2015 oraz gminy posiadające nietypowe połączenia z siecią transportu zbiorowego;
- rejonów w państwach przygranicznych należących do Układu z Schengen;
- rejonów-prześć granicznych z sąsiadującymi państwami;
- rejonów reprezentujących dalsze obszary państw należących do Układu z Schengen.

### Rejony oparte na gminach

Jest to podstawowy typ rejonu wykorzystywany w Modelu. Pierwotnie Model miał wykorzystywać definicję rejonu opartego na powiatach. Wyniki analiz prowadzonych przy okazji kalibracji generacji i dystrybucji podróży zadecydowały o zdyskwalifikowaniu takiego podejścia. Powiaty w Polsce, powstałe na skutek reformy administracyjnej z 1999 roku, mimo ich pozornego oparcia na powiatach istniejących w Polsce do 1975 roku, stały się bytami, na których kształcie zaważyły przesłanki inne niż związane z odwzorowaniem zjawisk transportowych i zachowaniem więzi społecznych. W wielu miejscach podział administracyjny przeciął ukształtowane więzy gospodarczo-społeczne. Dodatkowo w sposób dosyć arbitralny wyodrębniono z części powiatów powiaty grodzkie. Skutkiem tego jest duże zróżnicowanie powiatów, objawiające się statystycznie krańcowo różną liczbą mieszkańców czy miejsc pracy. Negocjacje dotyczące przynależności poszczególnych gmin do powiatów i wydzielenie powiatów grodzkich spowodowały powstanie powiatów, dla których niemożliwe jest jednoznaczne ustalenie środka ciężkości. Z danych kalibracyjnych wynika także, że prawie 70% wszystkich analizowanych podróży to podróże do 20 km. W Polsce średni rozmiar powiatu to około 30 km. Przy podziale na rejony

komunikacyjne na poziomie powiatów macierz odległości pomiędzy rejonami jest obciążona istotnym błędem w obszarze krótkich relacji. To wszystko powoduje, że niemożliwe jest stworzenie dla takiego podziału generacji i dystrybucji ruchu.

Zdecydowano się w tej sytuacji na zastosowanie gminy jako podstawowej wielkości rejonu. Za takim podejściem, oprócz powyższego opowiadała się dostępność danych. Dostępne w tym przypadku są zarówno zmienne objaśniające (np. ludność), jak i dane wykorzystywane w kalibracji Modelu (np. badanie dojazdów do pracy).

### Małe rejony transportowe

W toku prac nad Modelem ujawniła się potrzeba dalszej dezagregacji podróży w większych ośrodkach miejskich i niektórych gminach wiejskich (bądź wiejsko-miejskich) ze szczególnie złożonym układem transportowym na ich terenie. Wprowadzenie małych rejonów transportowych umożliwiło dokładniejsze operowanie podziałem międzygminowym w sytuacjach, w których posługiwanie się całym rejonem gminy mogło powodować istotne przekłamanie.

Podział gmin na małe rejony oparty został na wykorzystanym przez GUS w NSP (Narodowym Spisie Powszechnym) w 2011 roku podział na rejony statystyczne. Przy wyznaczaniu małych rejonów kierowano się następującymi kryteriami:

- rejon powinien być zamieszkały przez min. 30 tysięcy (nie dotyczy gmin wiejskich i wiejsko-miejskich, dzielonych ze względu na układ linii kolejowych), a maksimum 100 tysięcy mieszkańców;
- rejon powinien stanowić obszar zwarty komunikacyjnie, powinno być możliwe wyznaczenie dla niego środka ciężkości położonego w tym rejonie;
- w miarę możliwości powinien zawierać kolejowy Punkt Zatrzymań, chyba że dana część miasta jest znacznie od niego oddalona.

### Zmienne objaśniające

W ramach prac nad Modelem Ruchu zebrano szereg zmiennych socjoekonomicznych, które następnie zostały wykorzystane przy obliczeniu pierwszych trzech kroków Modelu czterostadiowego. W niniejszym artykule nazywane są zmiennymi objaśniającymi. Niektóre z nich pochodzą bezpośrednio z zewnętrznych źródeł danych, inne są danymi przetworzonymi według autorskich założeń. Wykaz wykorzystanych zmiennych przedstawiony został poniżej:

- Wskaźnik Większych Miast (WWM),
- liczba mieszkańców ogółem,
- liczba mieszkańców aktywna zawodowo,
- liczba mieszkańców w wieku szkolnym,
- PKB per capita,
- urealniony wskaźnik motoryzacji,
- liczba miejsc w szkołach,
- liczba miejsc na uczelniach,
- gęstość zaludnienia,
- powierzchnia użytkowa obiektów noclegowych,
- wskaźnik siły ośrodków akademickich.

## Wskaźnik Większych Miast

Wskaźnik Większych Miast ma za zadanie wskazać, w jakim otoczeniu znajduje się rozpatrywany rejon transportowy. W tym rozumieniu *większymi miastami* są miejscowości o znacząco większej liczbie ludności od rozpatrywanego. WWM to autorski wskaźnik mający na celu prawidłowe oddanie wpływu otoczenia rejonu na jego generację ruchu. W Modelu nie uwzględnia się podróży wewnątrz rejonowych. Z uwagi na to wskaźniki ruchliwości różnych typów ośrodków znacząco różnią się między sobą. Prawidłowe odwzorowanie tych różnic wymagało zastosowania WWM. Parametry WWM opracowano iteracyjnie, bazując na wynikach badań ruchu.

Algorytm wyliczenia zmiennej  $w$  polega na wyznaczeniu macierzy współczynników  $W$  wg wzoru:

$$W_{ij} = \begin{cases} l_j & \text{dla } k_j - k_i \geq 2 \wedge t_{ij} \leq t_{max} \\ 0 & \text{dla } k_j - k_i < 2 \vee t_{ij} > t_{max} \end{cases}$$

gdzie:

- $k_i$  – klasa wielkości rejonu wg przyjętej klasyfikacji – rejon powyżej 1,3 mln mieszkańców posiadają klasę nr 7, rejon poniżej 46 tysięcy mieszkańców posiadają klasę 0 – dla rozpatrywanego rejonu,
- $k_j$  – klasa wielkości rejonu wg przyjętej klasyfikacji dla danego rejonu  $j$  w otoczeniu rejonu  $i$ ,
- $l_j$  – ludność w rejonie końca relacji,
- $t_{ij}$  – czas przejazdu transportem indywidualnym z rejonu  $i$  do rejonu  $j$ ,
- $t_{max}$  – czas podróży transportem indywidualnym określający zasięg wpływu rejonu zależny od motywacji  $i$  i jego wielkości.

Posiadając macierz  $W$ , można obliczyć wartość wskaźnika  $w$  dla rejonu  $i$  sumując wszystkie wartości wiersza  $i$ :

$$w_i = \sum_{j=1}^n W_{ij}$$

Następnie wartość  $w$  klasyfikowana jest analogicznie jak ludność w rejonach komunikacyjnych. Numer tak przyporządkowanej klasy stanowi finalną wartość wskaźnika większych miast. Wartość Wskaźnika Większych Miast zależy od czasu przejazdu pomiędzy rejonami komunikacyjnymi, a to oznacza, iż może się ona zmieniać wraz ze zmianami dokonywanymi w sieci transportowej. Z tego powodu wskaźnik jest każdorazowo wyliczany w każdym horyzoncie prognostycznym.

Generacja ruchu w wielu motywacjach opiera się na wskaźniku dużych miast. Wskaźnik ten służy do oszacowania atrakcyjności otoczenia rejonu źródłowego – czy warto wyjeżdżać z danego rejonu. Należy zwrócić uwagę, że jest to pewne złamanie konwencji modelu czterostadiowego, gdyż wskaźnik ten poniekąd należy również do dystrybucji ruchu, tzn. pewne elementy dystrybucji ruchu zostały przeniesione do generacji. Jest to swoiste zaadaptowanie idei teorii pośrednich możliwości, o której pisał Stoufert [3] – w oryginalnym artykule badacz opisywał, jak na prawdo-

podobieństwo migracji wpływa sama możliwość migracji (atrakcyjne miejsca nowego zamieszkania), przeciwstawiając tę zależność podejściu opartemu tylko na dystansie. Zastosowanie takiego podejścia zostało częściowo wymuszone dostępnymi danymi oraz brakiem informacji o liczbie podróży wewnątrzmiennych w wielu badaniach.

## Urealniony wskaźnik motoryzacji

Jest to liczba zarejestrowanych pojazdów w danej gminie przypadających na 1000 mieszkańców. Dane na temat liczby zarejestrowanych pojazdów pochodzą z zweryfikowanych wpisów bazy danych CEPiK. Weryfikacja polegała na usunięciu wpisów o pojazdach, dla których właściciel urzędowej związanej z danym pojazdem. Dane opisujące liczbę ludności w danej gminie pochodzą ze zmiennej Ludność. Źródłem danych jest zlecenie przez PKP PLK SA opracowanie Instytutu Badania Rynku Motoryzacyjnego SAMAR.

## Wskaźnik siły ośrodków akademickich

Siła ośrodków akademickich wyznaczona została na potrzeby motywacji Dom-Uczelnia. Wykorzystano ją podczas modelowania z użyciem uproszczonego algorytmu pośrednich możliwości. Została policzona według następującego algorytmu:

W pierwszym kroku jako daną wejściową przyjęto Ranking Szkół Wyższych PERSPEKTYWY 2016 [4]. Jest to coroczny ranking jakościowy uczelni publicznych i niepublicznych, uwzględniający prestiż uczelni, efektywność naukową, potencjał naukowy, innowacyjność i inne wskaźniki. Na jego podstawie określono punktową rangę każdej uczelni, przypisując odpowiednio:

- 1,5 pkt dla uczelni na miejscach 1–7,
- 1,2 pkt dla uczelni na miejscach 8–15,
- 1 pkt dla uczelni 16–50,
- 0,5 pkt dla uczelni na miejscach 51–60.

W drugim kroku punkty uczelni zostały posumowane w obrębie ośrodków akademickich. Porównanie wartości dla ośrodków (zestawionych z informacjami o zachowaniach komunikacyjnych studentów w tych ośrodkach) pozwoliło wyznaczyć naturalne granice do stworzenia grup ośrodków o podobnych zachowaniach. W ten sposób wyróżniono cztery grupy ośrodków:

- grupa A – powyżej 10 punktów,
- grupa B – ponad 5 do 10 punktów,
- grupa C – od 0,5 punktu do 5 punktów,
- grupa D – poniżej 0,5 punktu.

## Generacja i dystrybucja ruchu

Generacja i dystrybucja ruchu zostały wyliczone w podziale na motywacje podróży. Jako podstawowe założenie przyjęto, że w przypadku, gdy pozyskane dane to umożliwiają, stosowane będą modele regresji liniowej dla generacji ruchu oraz model grawitacyjny dla dystrybucji ruchu. W niektórych przypadkach jakość danych lub charakterystyka danej moty-

Tabela 3

| Wzory generacji ruchu oraz parametry dystrybucji ruchu  |   |                |                        |  |                             |         |         |
|---|---|----------------|------------------------|--|-----------------------------|---------|---------|
| Motywacja podróży   | Produkcja   | R <sup>2</sup> | Atrakcja               | R <sup>2</sup>   | Parametry dystrybucji ruchu |         |         |
|   |   |                |                        |  | a                           | b       | c       |
| Dom–Praca   | $(0.09213 + 0.01059 \cdot W_{wm} - 0.010996 \cdot k) \cdot L_p$                 | 0.82           | 1.4071 · PKB           | 0.91   | 3.6354                      | -1.3191 | -0.0388 |
| Dom–Szkoła  | Dla $k = 0$ : $0.29544 \cdot L_s$   | 0.80           | $0.17394 \cdot L_{ms}$ | 0.82   | 1.4926                      | -0.6730 | -0.0901 |
|   | Dla $k \neq 0$ : $(0.05936 + 0.01702 \cdot W_{wm} - 0.00596 \cdot k) \cdot L_s$ | 0.74           | $0.17394 \cdot L_{ms}$ | 0.82   |                             |         |         |
| Inne krótkie, użytkownicy zmotoryzowani   | $(0.36139 + 0.01020 \cdot W_{wm} - 0.04165 \cdot k) \cdot L_{zm}$               | 0.79           | – <sup>3</sup>         | –  | 0.4168                      | 0       | -0.0932 |
| Inne krótkie, użytkownicy niezmotoryzowani  | $(0.04651 + 0.00183 \cdot W_{wm} - 0.00610 \cdot k) \cdot L_{znm}$              | 0.86           | – <sup>3</sup>         | –  | 2.3602                      | -0.9546 | -0.0757 |
| Inne długie   | $0.00590 \cdot L_c$   | 0.91           | $0.00525 \cdot S_n$    | 0.85   | 0.1910                      | 0.3631  | -0.0254 |
| Oznaczenia zmiennych:   |   |                |                        |  |                             |         |         |
| $L_c$ – ludność całkowita<br>$L_{zm}$ – ludność zmotoryzowana (na podstawie urealnionego wskaźnika motoryzacji)<br>$L_{znm}$ – ludność niezmotoryzowana<br>$L_p$ – ludność aktywna zawodowo<br>$L_s$ – ludność w wieku szkolnym |   |                |                        | $L_{ms}$ – liczba miejsc w szkołach<br>$W_{wm}$ – Wskaźnik Większych Miast<br>$k$ – klasa wielkości rejonu<br>PKB – Produkt Krajowy Brutto<br>$S_n$ – powierzchnia użytkowa obiektów noclegowych |                             |         |         |

wacji nie pozwoliła na takie podejście (motywacja Uczelnia-Dom, Biznes, podróże związane z Warszawą), w tych przypadkach stosowano odmienne metodyki wyliczeń, które opisane są w szczegółowej dokumentacji modelu.

Okres modelowania w Modelu Ruchu to doba. Dla motywacji obligatoryjnych oraz podróży innych długich przyjęto uproszczenie, że każda podróż rozpoczyna się w danej dobie musi posiadać podróż powrotną w relacji odwrotnej. Przyjęcie takiego założenia upraszczającego było możliwe dzięki przeanalizowaniu danych zebranych w bazie danych Kompleksowych Badań Ruchu, z których wynika, że jest to sytuacja bardzo zbliżona do rzeczywistości. Założenie to zrealizowano poprzez wygenerowanie podróży w motywacji podstawowej np. Dom–Praca, a następnie otrzymaną macierz transponowano, otrzymując macierz motywacji odwrotnej np. Praca–Dom.

Wzory funkcji generacji oraz funkcji oporu przestrzeni używanych w obliczeniach dystrybucji ruchu w podziale na motywacje przedstawiono w tabeli 3. W obliczeniach dystrybucji posługiwano się wzorem:<sup>3</sup>

$$T_{ij}^{m,g} = \frac{P_i A_j f(U_{ij})}{\sum_{j'=1}^n A_{j'} f(U_{ij'})}$$

gdzie:

- T<sub>ij</sub> – liczba podróży odbywanych pomiędzy rejonem i-tym a rejonem j-tym,
- m – motywacja (Dom–Praca, inne krótkie, pozostałe),
- g – grupa użytkowników (zmotoryzowani, niezmotoryzowani),
- P – produkcja rejonu komunikacyjnego wyrażona w liczbie podróży w dobie dla typowego dnia roboczego,
- A – atrakcja rejonu komunikacyjnego wyrażona w liczbie podróży w dobie dla typowego dnia roboczego,

$U_{ij}$  – w przypadku analizowanych motywacji używano odległości pomiędzy rejonami liczonej wzdłuż sieci drogowej.

f(U<sub>ij</sub>) – funkcja oporu przestrzeni dana wzorem:

$$f(U_{ij}) = a \cdot U_{ij}^b \cdot e^{c \cdot U_{ij}}$$

### Podział międzygałęziowy

Podział międzygałęziowy wyznaczano na dwa sposoby. Dla motywacji, w których zmienne objaśniające miały istotny wpływ na podejmowane decyzje wyznaczano parametry modelu logitowego. W przeciwnym przypadku zastosowano podział stały oparty na danych empirycznych pochodzących z bazy danych Kompleksowych Badań Ruchu. W pierwszym przypadku na podstawie informacji o realnie wykonanych podróżach, pozyskanych z bazy danych Kompleksowych Badań Ruchu, wyznaczono parametry modelu logitowego dla każdej kombinacji motywacji podróży oraz grupy użytkowników. Do wykonania tego zadania posłużono się oprogramowaniem BIOGEME. Jako zmienne objaśniające użyto głównie czasów podróży wszystkimi środkami transportu oraz częstotliwość kursowania i liczbę przesiadek dla środków transportu zbiorowego.

### Rozkład ruchu na sieć transportową

Dla różnych gałęzi transportu wykorzystywano różne procedury rozkładu ruchu na sieć:

- dla transportu indywidualnego – Equilibrium LUCE (procedura programu Visum),
- dla transportu zbiorowego – Timetable-based (procedura programu Visum).

Proces obliczeniowy składa się z pętli, gdzie:

- w pierwszej iteracji wyliczany jest pierwszy rozkład ruchu na sieć z inicjalnymi wartościami zmiennych wpływających na podział międzygałęziowy,
- następnie wykonywane jest ponowne przeliczenie zmiennych (np. czasy jazdy samochodem osobowym, opóźnienia autobusów<sup>4</sup> itp.),

<sup>3</sup> W motywacji „Inne krótkie” z uwagi na niewielką liczbę danych podróże opisane w badaniach zagregowano, eliminując zwrot wykonywanej podróży, analizując tylko relację. W związku z tym wyliczony wzór na produkcję rejonu używany jest również jako atrakcja rejonu.

<sup>4</sup> Opóźnienia autobusów wyliczane są w Modelu na podstawie warunków ruchu na sieci drogowej

- ponownie liczony jest podział międzygałęziowy,
- następuje ponowne wyliczenie rozkładu ruchu na sieć.

Pętla wykonywana jest pięciokrotnie. Ostatni rozkład ruchu na sieć przyjmowany jest jako finalny.

### Dane zebrane w celu dokonania kalibracji i weryfikacji modelu Kompleksowe Badania Ruchu

W ramach prac nad Modelem niezbędne było pozyskanie informacji o zachowaniach komunikacyjnych mieszkańców Polski. Umożliwiło to poprawne skonstruowanie trzech z czterech stadiów modelu, czyli generację podróży, dystrybucję i podział międzygałęziowy. W tym celu zebrano szereg opracowań, zarówno o zasięgu krajowym, regionalnym, jak i lokalnym. Przede wszystkim były to badania ankietowe stanowiące część Kompleksowych Badań Ruchu. Zamawiający powyższe opracowania definiowali różne potrzeby oraz zakresy badań. Badania były realizowane przez wielu różnych Wykonawców posługujących się różnorodnymi metodykami. Mając to na uwadze, przeanalizowano dane pod kątem jakości i spójności oraz zdecydowano, które z nich są możliwe do wykorzystania. Ostatecznie niezbędne było opracowanie zestawu wag, aby wszystkie z wykorzystanych badań można było potraktować jako jeden zestaw danych. W tabeli 4 przedstawiono zestawienie badań ruchu, jakie pozyskano i dokonano próby przeważenia (po weryfikacji, czy badanie jest możliwe do ważenia):

Tabela 4

| Zestawienie analizowanych badań ruchu |                              |  |      |
|---------------------------------------|------------------------------|--|------|
| Lp.                                   | Nazwa skrótna                | Obszar badania   | Rok  |
| 1                                     | POPT1 <sup>4</sup>           | Polska   | 2015 |
| 2                                     | PZRT <sup>5</sup> Pomorskie  | województwo pomorskie z wyłączeniem Trójmiasta   | 2013 |
| 3                                     | KBR Warszawa                 | Miasto Warszawa  | 2015 |
| 4                                     | KBR Białystok                | Miasto Białystok   | 2014 |
| 5                                     | PZRT Kujawsko – Pomorskie    | województwo kujawsko-pomorskie z wyłączeniem miast: Bydgoszcz, Grudziądz, Toruń, Włocławek oraz 3 gmin wiejskich: Brodnica, Golub-Dobrzyń, Rogowo  | 2013 |
| 6                                     | KBR Gdańsk                   | Miasto Gdańsk  | 2009 |
| 7                                     | PZRT Małopolskie             | województwo małopolskie z wyłączeniem Krakowa i powiatu krakowskiego   | 2013 |
| 8                                     | KBR Bielsko-Biała            | Miasto Bielsko-Biała   | 2014 |
| 9                                     | TRM <sup>6</sup> Mazowieckie | województwo mazowieckie z wyłączeniem Warszawy, Płocka, Ostrołęki, Ciechanowa, Siedlec i Radomia. Przy doborze próby zastosowano znaczną nadreprezentację populacji zamieszkującej korytarz kolejowy (połowa próby zrealizowana w pasie o szerokości 10 km wzdłuż linii kolejowej) | 2014 |
| 10                                    | KBR Wrocław                  | Miasto Wrocław   | 2011 |
| 11                                    | LGOF                         | Zespół 37 gmin należących do Legnicko-Głogowskiego Obszaru Funkcjonalnego  | 2014 |
| 12                                    | PZRT Wielkopolskie           | województwo wielkopolskie z wyłączeniem miasta Poznań i powiatu poznańskiego   | 2013 |
| 13                                    | KBR Kielce                   | Miasto Kielce  | 2015 |
| 14                                    | KBR Kraków                   | Krakowski Obszar Metropolitalny – Miasto Kraków oraz 33 gminy ościenne   | 2013 |
| 15                                    | KBR Poznań                   | Miasto Poznań i powiat poznański   | 2013 |
| 16                                    | KBR Katowice                 | Miasto Katowice  | 2015 |
| 17                                    | KBR Rybnik                   | Aglomeracja rybnicka: miasto Rybnik i 14 gmin ościennych   | 2015 |

<sup>3</sup> Pilotażowe badanie zachowań komunikacyjnych przeprowadzane przez GUS w ramach Programu Operacyjnego Pomoc Techniczna 2007–2013

<sup>6</sup> Plan Zrównoważonego Rozwoju Transportu

<sup>7</sup> Badanie ruchu zostało wykonane w ramach projektu Trendy Rozwojowe Mazowska

Dla wszystkich powyższych badań przeprowadzono szczegółową analizę zawartych w nich danych. Na tej podstawie zidentyfikowano opracowania, które ze względu na jakość lub zastosowaną metodykę nie mogły być wykorzystane w dalszych pracach. Ostatecznie odrzucono badania: TRM Mazowieckie, KBR Wrocław oraz KBR Poznań.

Dla zespoleonego zbioru badań opracowano zmienne korygujące, nazywane wagami statystycznymi. Celem takiego zabiegu jest zmniejszenie negatywnego wpływu zniekształcenia różnorodności składowych zbiorów danych, ostatecznie otrzymując jednolity zestaw, z którego można wyciągać wnioski na temat zachowań komunikacyjnych ludności. Wagi zostały obliczone na podstawie różnic rozkładu cech populacji uwzględnionej w poszczególnych badaniach, a charakterystyką populacji zamieszkującej dany obszar. Przeważenia danych dokonał – na zamówienie PKP PLK SA – podmiot Rubika Tomasz Dziedzic. Finalnie do kalibracji wykorzystano dane z 14 badań, w ramach których zostało przebadane 80 000 gospodarstw domowych, w których przeprowadzono wywiady ze 183 000 osób.

### Pomiary potoków ruchu

- Generalny Pomiar Ruchu GDDKiA – pozyskano dane na rok 2015 (pomocniczo również na 2005, 2010). Punkty pomiarowe przypisano do odcinków sieci drogowej Modelu, a następnie wartości pomiarowe zapisano w bazie danych.
- Dane od Przewozy Regionalne sp. z o.o. – uzyskano dane na temat wymiany pasażerskiej na kolejnych stacjach wzdłuż biegu pociągów na niektórych trasach w roku 2013. Otrzymany zbiór dotyczył tylko części uruchomionych pociągów, co udało się potwierdzić, porównując otrzymane pliki z ówczesnymi rozkładami jazdy. Do porównania z wynikami Modelu przyjęto tylko te odcinki, dla których analiza wskazywała na kompletność danych. Zbiór ten nie jest niestety liczny, biorąc za punkt odniesienia obszar działalności przewoźnika.
- Dane od Szybka Kolej Miejska sp. z o.o. – pozyskano dane pochodzące z systemu automatycznego zliczania pasażerów stosowanych w pojazdach przewoźnika. Potoki pozyskane z tego źródła wydają się być istotnie zawyżone. Analiza danych wskazała, że zastosowana technologia jest podatna na błędy, w tym nadmiarowe zliczenia. Z uwagi na małą wiarygodność danych nie wykorzystano ich w procesie kalibracji.

### Macierze biletowe

- „Koleje Mazowieckie – KM” sp. z o.o. – KM udostępniły na potrzeby Modelu Ruchu pełną macierz biletową za rok 2015. Dane pomyślnie zaimportowano do bazy danych i wykorzystano w procesie kalibracji.
- Koleje Śląskie – KŚ dostarczyły macierz przejazdów. Wielkość potoków pasażerskich uzyskanych z tych macierzy od początku budziła wątpliwości. Poddano więc porównaniu wyniki napełnień z badaniem wiel-

kości wymiany pasażerskiej na wybranych stacjach, zrealizowanych przez marszałka województwa śląskiego w 2011 roku (te ostatnie dane pozyskano w formie papierowej, stąd ich brak wśród materiałów kalibracyjnych). Okazało się, że wyniki różnią się co do rzędu wielkości, dlatego też zdecydowano nie wykorzystywać danych Kolei Śląskich w procesie kalibracji.

### Wymiana pasażerów w punktach zatrzymań

- Badanie na dworcach autobusowych – w ramach prac nad Modelem wykonano pomiary potoków pasażerskich wśród wybranych przewoźników autobusowych na wybranych dworcach autobusowych w Polsce. Badanie polegało na zliczeniu pasażerów, podróżujących autobusami na regularnie obsługiwanych trasach o zasięgu międzyregionalnym, międzyaglomeracyjnym i międzynarodowym. W badaniu nie liczone pasażerów przewoźników o charakterze lokalnym. Pomiary trwały całą dobę i były prowadzone w Typowym Dniu Roboczym. Prowadzone były w największych polskich miastach. Uzyskane wyniki pomocniczo wykorzystano w procesie kalibracji Modelu.
- Dane z UTK – Urząd Transportu Kolejowego udostępnił dane, o wymianie pasażerskiej na większych Punktach Zatrzymań kolejowych w roku 2013. Dane przedstawiono dla wymiany średniodobowej, nie w postaci dokładnej liczby, lecz w formie przedziałów. W zależności od charakterystyki pociągów zatrzymujących się w danym punkcie granulacja przedziałów różni się między sobą. Dane zostały włączone do Modelu ruchu i użyte w procesie kalibracji. Pomimo znacznych uproszczeń, jakimi się charakteryzują, uważa się, że jest to jeden z najistotniejszych zbiorów, gdyż jako jedyny kompleksowo przedstawia wymianę pasażerską dla systemu kolejowego w całym kraju.
- Dane od Koleje Dolnośląskie SA – KD dostarczyły dane o wymianie pasażerskiej na stacjach i przystankach za rok 2014. Niemal wszystkie Punkty Zatrzymań z przekazanego zakresu danych obsługiwane były wówczas również przez Przewozy Regionalne oraz PKP Intercity – czyli dwóch przewoźników, od których nie udało się otrzymać informacji o wymianie pasażerskiej. Uzyskane wartości odnoszą się więc tylko do pewnej części wymiany pasażerskiej. Z tego powodu nie można było użyć tego zbioru danych do kalibracji Modelu.

### Inne dane używane podczas modelowania

- Opracowanie nt. dojazdów do pracy autorstwa GUS (rok 2006 oraz 2011) – powstało w głównej mierze na podstawie danych zawartych w zeznaniach podatkowych udostępnionych przez Ministerstwo Finansów. Poziomem agregacji terytorialnej jest gmina, a wszystkie zapisane przejazdy dotyczą podróży przekraczających granicę gminy. Nie ma w nich podróży wewnętrz-

nych, więc swoim charakterem wpisują się w definicję podróży przyjętą w Modelu.

- Dane pochodzące z Systemu Informacji Oświatowej – zestaw opisujący przypisanie uczniów do szkół podstawowych i ponadpodstawowych, z wyłączeniem uczelni wyższych. Terytorialnie informacja zagregowana jest do gminy. Zbiór powstał poprzez zanonimizowanie i wyeksportowanie danych za rok 2015 z SIO przez Ministerstwo Edukacji Narodowej. Na jego podstawie została skalibrowana macierz podróży w motywacji Dom–Szkoła–Dom.

### Proces kalibracji

Zbiór pozyskanych danych kalibracyjnych wymagał autorskiej koncepcji oceny uzyskiwanych wyników obliczeń. Punktem wyjściowym do powyższej była klasyczna metoda weryfikacji jakości kolejnych stadiów modelu. W rezultacie proces kalibracji przebiegał wg działań opisanych poniżej. Zaznaczyć należy, że w niektórych przypadkach, gdy kalibracja nie dawała spodziewanych efektów, konieczna była modyfikacja założeń przyjętych na etapie koncepcji.

Warto zwrócić uwagę, że przeprowadzone rozpoznanie w zakresie stosowanych praktyk za granicą wskazuje, iż modele ruchu o zasięgu krajowym tworzone na podstawie dużo lepszych wejściowych danych kalibracyjnych (np. model słowacki, oparty przede wszystkim na danych z projektu Brawissimo [5]) w zasadzie nie dążyły usilnie do oddania istniejących potoków, ale koncentrowały się na zgodności z trzema pierwszymi krokami modelu czterostadiowego. Również kolejowy model dla Holandii weryfikowany był głównie za pomocą opinii eksperckiej dotyczącej poszczególnych aspektów jego działania.

### Generacja i dystrybucja ruchu

W Modelu Ruchu modelowane są tylko podróże zewnętrzne. Z uwagi na to założenie wskaźnik ruchliwości (dla podróży zewnętrznych) w różnych typach ośrodków (gminy wiejskie, miejskie, gminy w okolicy dużych miast) jest bardzo zróżnicowany. W celu uwzględnienia tych różnic wprowadzono podział rejonów ze względu na wielkość oraz, w niektórych przypadkach, zastosowano we wzorach na generację ruchu specjalny wskaźnik modelujący dostępność rejonu do większych ośrodków (sposób wyliczenia wskaźnika opisuje powyżej). Wskaźnik większych miast pozwala, na etapie generacji ruchu, uwzględnić otoczenie analizowanego rejonu (im atrakcyjniejsze, tym więcej podróży rejon generuje), a także zmniejszenie ruchliwości w podróżach zewnętrznych wywołane atrakcyjnością własną rejonu.

### Podział międzygałęziowy

Dla motywacji, w których wyznaczono model logitowy podziału międzygałęziowego, na potrzeby weryfikacji poprawności modelu sprawdzano:

- statystykę  $\rho^2$  – przy kalibracji dążono do tego, aby wartość tej statystyki była jak największa,  $\rho^2$  to miara



opisująca, w jakim stopniu wyliczony model lepiej odwzorowuje rzeczywistość od modelu, w którym dla każdej funkcji użyteczności rozważanego środka transportu występuje wyłącznie składnik losowy [6]. Wartości powyżej 0,5 uważane są za zadowalające. Wartości powyżej 0,2 mogą być uważane za wystarczające, pod warunkiem dalszej dokładnej weryfikacji wyniku;

- T-test – wynik testu t-Studenta dla istotności zmiennej objaśniającej. Założono poziom istotności równy  $\alpha = 0,025$ ;
- znaki przy wyliczonych parametrach – wszystkie parametry dla zmiennych oznaczających koszt powinny być ujemne (zmniejszając użyteczność danego środka transportu), wszystkie parametry dla zmiennych oznaczających korzyści powinny być dodatnie (zwiększając użyteczność danego środka transportu);
- dla danych wejściowych wyliczono wtórnie prawdopodobieństwa wybrania środków transportu, korzystając z wyznaczonych parametrów, i porównano z rzeczywistym wyborem użytkowników.

### Rozkład ruchu na sieć transportową

Po obliczeniach rozkładu ruchu na sieć transportową przeprowadzono kompleksową analizę otrzymanych wyników z danymi kalibracyjnymi, która obejmowała:

- wyznaczenie kordonów i ekranów pomiarowych (rysunek 1),
- porównanie sum podróży w motywacjach,
- porównanie sum podróży w środkach transportu,
- ocenę globalnego podziału międzygałęziowego,
- średnie długości i czasy podróży:

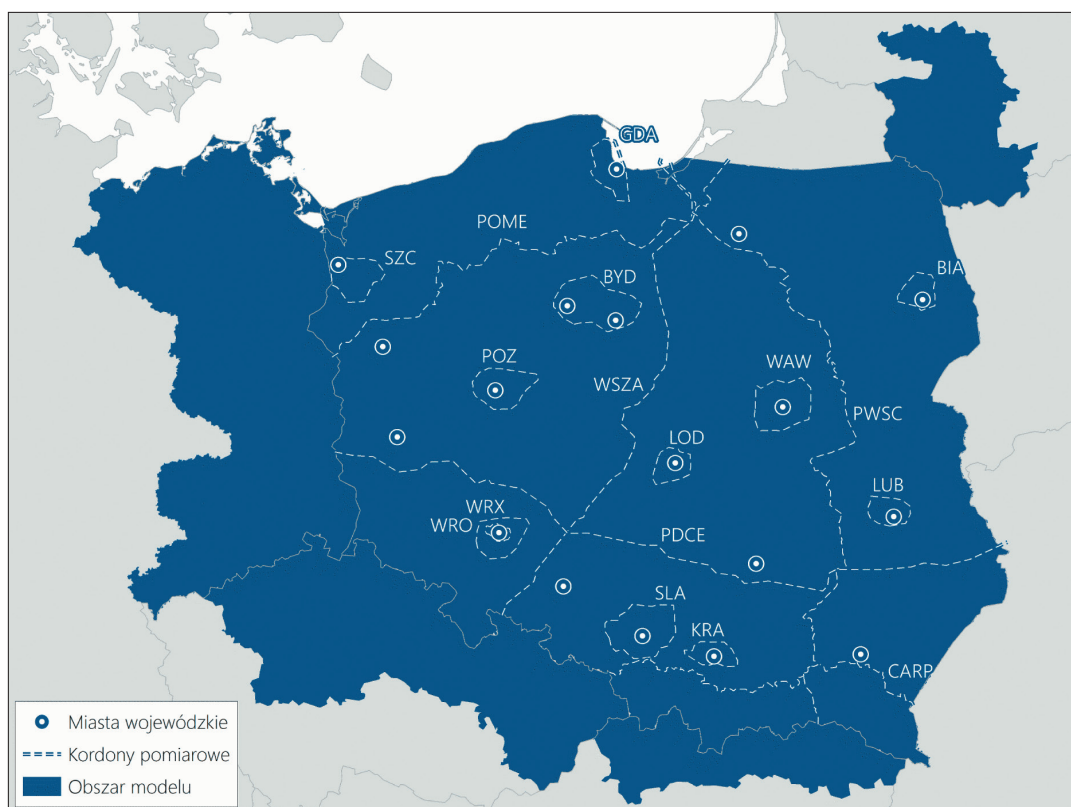
- średnie długości podróży w motywacjach,
- średnie długości podróży w środkach transportu,
- średni czas podróży w środkach transportu,
- potoki ruchu:
  - potoki w ruchu kołowym,
  - porównanie potoków w ruchu kołowym na kordonach,
  - wymianę pasażerską w miejscach postojów handlowych,
  - porównanie potoków w ruchu kolejowym regionalnym,
  - potoki pasażerskie w transporcie autobusowym,
  - porównanie potoków w ruchu kołowym na kordonach.

### Podsumowanie i rekomendacje

Artykuł syntetycznie opisuje założenia i metodykę opracowania komponentu pasażerskiego Modelu Ruchu PKP PLK SA. Podsumowanie zdecydowano się ukierunkować na ocenę wymagania dotyczącego zapewnienia możliwie rzetelnego odwzorowania działania transportu pasażerskiego w skali Polski.

Wymaganie to oznaczało, że mechanizm Modelu ma pozwolić na odtworzenie w przestrzeni matematycznej, możliwie zbliżonego do rzeczywistości obrazu typowego dnia roboczego. Istotne jest też, by odpowiedź Modelu na zmiany była wytłumaczalna. Droga do tego wiodła przez:

- zebranie szerokiego materiału umożliwiającego weryfikację tworzonego mechanizmu,
- przeprowadzenie możliwie skutecznego procesu kalibracji Modelu,
- przeprowadzenie badania wrażliwości Modelu na zmiany.



Rys. 1.  
Kordony i ekrany pomiarowe w Modelu

Pozyskanie rzetelnych materiałów, a następnie przetworzenie informacji okazało się zadaniami najbardziej czasochłonnym w ciągu tworzenia Modelu.

W opinii autorów rekomendowane są następujące działania:

1. Opracowanie, wypromowanie i ustanowienie jednolitego standardu badań ankietowych. Badania pozyskane dotychczas przez zespół pokazały nagłą potrzebę wypracowania takiego standardu (uzyskanie spójnego materiału badawczego na ich podstawie okazało się zadaniem trudnym i wymagającym wielu uproszczeń). Rekomendowaną do tego rodzaju działań jednostką jest Główny Urząd Statystyczny. Dzięki temu samorządy będą w stanie przygotowywać rzetelne badania. Oczekuje się m.in. realizacji następujących postulatów:
  - przyjęcie metody pozwalającej na uzyskanie odpowiedzi od osób wysoce mobilnych, a więc zazwyczaj nieobecnych w chwili ankietowania, krytyce powinien zostać też poddany mechanizm *random route* [7] doboru próby,
  - ograniczenia liczby pytań do niezbędnych tak, aby nie zniechęcać respondenta długością ankiety,
  - przyjęcie standardu zapisywania, znajdującego się poza obszarem badań, początku lub końca podróży z zachowaniem co najmniej gminy (w Polsce),
  - wprowadzenie w kafeterii odpowiedzi na pytanie o środek transportu, rozróżnienia na pociągi regionalne, międzyregionalne i ekspresowe, autobusy na zwykłe, pociągi ekspresowe,
  - notowania motywacji źródłowej i docelowej, godziny rozpoczęcia podróży (a nie przedziału),
  - obligatoryjnego wydzielenia w kafeterii odpowiedzi na pytanie o motywację podróży służbowej bądź biznesowej,
  - uwzględniania w ankietach osób mogących wykonywać podróże do szkoły czy uczelni, w tym zwłaszcza grup często dyskryminowanych w takich badaniach: studentów (zwłaszcza zamieszkałych w akademikach, stacjach) oraz uczniów w wieku co najmniej gimnazjalnym;
2. Wspieranie samorządów i innych instytucji w przeprowadzaniu ankietowych badań ruchu. Bazowanie na jednym standardzie badawczym poszerza grupę potencjalnych interesariuszy, a bazujące na nim łączenie różnych badań może być użyteczne zarówno na poziomie krajowym, jak również regionalnym czy miejskim;
3. Brak danych o ruchu transgranicznym każe wspomnieć o wsparciu inicjatyw mających na celu zbadanie mobilności osób zamieszkujących obszary nadgraniczne, zarówno po stronie polskiej, jak i kraju-sąsiada. PKP PLK SA w trakcie powstawania Modelu brała udział również w inicjatywie, mającej na celu przeprowadzenie takich badań. Źródłem finansowania tych badań miał być jeden z programów INTERREG. Mimo fiaska tej inicjatywy należy podobne działania wspierać w przyszłości;
4. W przypadku ruchu drogowego indywidualnego należy uznać sytuację za satysfakcjonującą (za wyjątkiem agre-

gacji mikrobusów do kategorii samochodów osobowych, o czym poniżej). Być może warto, by zarządca dróg publikował nie tylko wartości Średniodobowego Ruchu Roczego, ale przygotował agregat dla typowego dnia roboczego. Być może warto również rozbudować GPR o ankietę kierowców przekraczających przejścia graniczne, zwłaszcza te z państwami spoza Strefy Schengen.

5. Zespół już po zakończeniu prac nad Modelem pozyskał od PKP Intercity macierze biletowe. Przy najbliższej aktualizacji Modelu dane te zostaną wprowadzone jako dane weryfikujące i dokonana zostanie rekalicacja Modelu. W dalszym ciągu należy dokonywać wysiłków na rzecz pozyskania kolejnych wartości potoków podróży na odcinkach (mogą to być również statystyki wsiadł-wysiadł) i macierzy biletowych. Uzyskane dane, zwłaszcza w przypadku istotnego stopnia pokrycia odcinków kolejowych, powinny zostać wykorzystane do rekalicacji kolejnej wersji Modelu.
6. Należy pozyskać statystyki UTK dotyczące średniorocznej wymiany pasażerskiej dla kolejnych lat i na podstawie tych danych dokonać ewentualnej rekalicacji Modelu. Korzystne byłoby stworzenie mechanizmu zbierania danych (o zdefiniowanej zawartości i formie) od przewoźników kolejowych przez niezależną instytucję. Instytucja ta mogłaby dokonywać agregacji danych, tak aby nie narażać interesów poszczególnych przewoźników i udostępniać agregat.
7. Warto, aby zarządca infrastruktury drogowej przy przeprowadzaniu kolejnego GPR rozważył przeprowadzenie uzupełniającego badania potoków podróży korzystających z autobusów i mikrobusów.

## Literatura

1. *Dokument implementacyjny do strategii rozwoju transportu do 2020 r.*, Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju, Warszawa 2014.
2. Ortúzar J.d.D., Willumsen L.G., *Modelling transport*, Chichester, West Sussex, Wielka Brytania 2011.
3. Stouffer S.A., *Intervening Opportunities: A Theory Relating to Mobility and Distance*, American Sociological Review, tom 5, nr 6, 1940.
4. Ranking uczelni akademickich 2016, Perspektywy, 2016. [Online]. Available: <http://www.perspektywy.pl/RSW2016/ranking-uczelni-akademickich>. [Data uzyskania dostępu: 14.06.2016].
5. BRAWISIMO – Region Bratislava Vienna: Mobility Study, Universität für Bodenkultur Wien, Wiedeń 2015.
6. Bierlaire M., *BisonBiogeme: estimating a first model*, Lipiec 2015. [Online]. Available: <http://biogeme.epfl.ch/documentation/bisonfirstmodel/bisonfirstmodel.html>. [Data uzyskania dostępu: 19 kwietnia 2018].
7. Techniki, metody badawcze, próby, TNS OBOR, [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20090514024243/http://www.tns-global.pl/przewodnik/proby>. [Data uzyskania dostępu: 17 kwietnia 2018].
8. Prognoza Ludności na lata 2014–2050, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2014.
9. Krych A., Kaczkowski M., *Słownictwo kompleksowych badań i modelowania potoków ruchu*, w: *Modelowanie podróży i pognozowanie ruchu*, Kraków 2010.