

KRYSTIAN SIWEK

mgr inż., Politechnika Krakowska,
ul. Warszawska 24,
31-155 Kraków
tel.: +48 889486359, e-mail:
krystian.siwek@gmail.com

Wybrane zagadnienia budowy modeli popytu w Wielkiej Brytanii¹

Streszczenie: Celem artykułu jest omówienie wybranych elementów budowy modeli popytu w Wielkiej Brytanii. Precyzyjne odzwierciedlenie przemieszczeń na obszarze poddanym analizie jest kluczowym punktem tworzenia modelu symulacyjnego i prognoz ruchu. Dzięki zrozumieniu zasad formowania podróży, istnieje możliwość tworzenia wiarygodnych scenariuszy prognostycznych. W artykule przedstawiono podstawowe aspekty trzech wybranych elementów budowy popytu – tworzenie więzby na rok bieżący, jej kalibrację oraz funkcjonalność modelu zmiennego popytu. Omówienie zawiera podstawowe funkcje oraz powiązane z metodami wzory.

Słowa kluczowe: modele popytu, więzba ruchu, kalibracja więzby ruchu

Wprowadzenie

Planowanie transportowe oparte na podejściu systemowym przybyło do Wielkiej Brytanii ze Stanów Zjednoczonych już w latach 60. XX wieku [5]. Początkowo wykorzystywano podejście czterostadiowe, jednak wraz z rozwojem praktyki rozpoczęto modyfikować przyjęte metody. Już pod koniec dziesięciolecia rozwinięto metody analizy w oparciu o typy domostw, odchodząc od modeli generacji podróży za pomocą regresji liniowej. Wraz z rozwojem metod i narzędzi metody stosowane w Wielkiej Brytanii ewoluowały [5].

Ponad 50 lat rozwoju modeli transportowych przyczyniło się do stworzenia baz danych dotyczących m.in. zachowań komunikacyjnych czy sieci drogowej. Dostarczane przez tamtejsze Ministerstwo Transportu prognozy National Trip End Model i oprogramowanie TEMPro pozwalają mieć dostęp do szerokiej bazy danych, m.in. do populacji, zatrudnienia czy współczynników wzrostu z podziałem na obszary [6]. Integrated Transport Network (ITN) jest z kolei bazą wszystkich dróg w Wielkiej Brytanii i pozwala m.in. porównać średnią prędkość przejazdu na odcinku z modelem symulacyjnym.

Jednym z wielu programów wykorzystywanych do budowy modeli na Wyspach Brytyjskich jest SATURN, rozwijany już od końca lat 70. XX wieku. Jest to duży pakiet często samodzielnych programów, pozwalający, oprócz budowy układu drogowego i rozkładu ruchu na sieci, także na kalibrację modelu popytu [2]. Jego funkcje podążają za wymaganiami brytyjskiego rynku, a sam program rozwija się zgodnie z ewolucją tamtejszego podejścia.

W niniejszym artykule omówiono niektóre kwestie budowy modelu popytu w oparciu o wytyczne pochodzące z instytucji rządowych. Wytyczne te nie są zbiorem ścisłych zasad, lecz raczej wskazówek i dobrych praktyk w przygo-

towaniu modelu, do których ustosunkowanie się zależy m.in. od zakresu projektu.

Wybrane elementy budowy modelu popytu opisano zgodnie z kolejnością ich opracowania. Najpierw tworzona jest macierz na rok bazowy bezpośrednio z uzyskanych danych (ankiet, wywiadów, danych demograficznych), a następnie poddawana jest kalibracji. Po stworzeniu ostatecznej macierzy na rok bazowy budowany jest model popytu, który będzie w stanie odwzorować tę więzbę za pomocą zależności matematycznych. Nie jest on jednak używany do modelu na rok bazowy, a jedynie do prognoz. Funkcjonuje więc podział na więzbę opracowaną bezpośrednio z badań ruchu (rok bazowy) i więzbę syntetyczną z modelu popytu (prognozy).

Wieżba ruchu oparta na danych z telefonów komórkowych

Tradycyjne więzby ruchu w Wielkiej Brytanii budowane są w oparciu o wykonane badania ruchliwości, ankiety, pomiary i dane demograficzne. Służą one do stworzenia wzorca zachowań pomiędzy rejonami komunikacyjnymi w poszczególnych motywacjach i wybranych środkach przewozowych. Poprzez rozszerzenie wyników z próby na populację tworzona jest więzba ruchu pochodząca bezpośrednio z rzeczywistych danych. Jest ona następnie uzupełniania o brakujące podróże, które nie zostały ujęte w ankietach poprzez syntetyczną macierz podróży. Tak stworzona więzba jest następnie odwzorowywana w jednym z wielu typów modeli popytu w celu tworzenia modeli prognostycznych.

Od kilku lat w Wielkiej Brytanii zaczęto używać danych komórkowych do wspomaganie modelowania podróży. Ten rodzaj danych jest typowym przykładem tzw. *Big Data*, czyli dużej bazy różnych informacji, do której analizy wymagane są obszerne metody badawcze. Ten rodzaj danych charakteryzuje się wysokimi kosztami uzyskania, jednak w założeniach powinien odzwierciedlać rzeczywiste przemieszczenia osób na analizowanym obszarze. Uproszczony proces tworzenia macierzy z danych komórkowych obrazuje rysunek 1.

Pierwszym krokiem jest pozyskanie danych z telefonów komórkowych. System sieci komórkowej notuje tzw. wydarzenia dla każdego telefonu podłączonego do sieci, zapisując zarazem godzinę oraz lokalizację [4]. Wydarzeniem może być zarówno wykonanie telefonu czy wysłanie wiadomości tekstowej, jak i zmiana lokalizacji pomiędzy stacjami GSM. Te następnie dzielone są na:

- zatrzymania, wydarzenia, które pokazują, że użytkownik pozostaje w jednym miejscu,
- podróż, wydarzenia w czasie których użytkownik przemieszcza się między zatrzymaniami.

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2016.



Rys. 1. Uproszczony proces budowy więzby z danych telefonów komórkowych
źródło: [4]

Te dwie grupy wykorzystywane są do określenia punktów zainteresowania użytkowników w sieci. Są one przypisywane do krajowego brytyjskiego systemu rejonów. Wykorzystywane dane reprezentują zwykle około 30% populacji Wielkiej Brytanii [4]. Dlatego też koniecznym jest stworzenie odpowiednich współczynników do ich rozszerzenia. Tak stworzona baza danych o zatrzymaniach pozwala zdefiniować punkty generacji i absorpcji podróży, które następnie są łączone z przemieszczeniami, tworząc ścieżki w sieci. Wykorzystując specjalistyczne algorytmy, podróże są dzielone według typu trasy – linią kolejową czy w ruchu drogowym. Kolejnym krokiem jest powiązanie punktów zainteresowania z motywacjami, określając m.in. obszary mieszkalne czy strefy biurowe [4]. Przy przyjętej metodzie istnieje ryzyko nieuwzględnienia krótkich podróży, dlatego te dodawane są za pomocą syntetycznych macierzy.

Zdecydowaną zaletą używania danych komórkowych jest ich zasięg – pozwala zbadać zachowania komunikacyjne mieszkańców całego analizowanego obszaru przy dużej wielkości próby i z wielu dni [1]. Dodatkowo są to oszczędności środków finansowych na prowadzenie badań i pomiarów [1]. Z procesem wiążą się jednak pewne niepewności – opiera się on na dużej liczbie założeń dotyczących samych podróży, wybranych środków przewozowych czy motywacji [1]. Mechanizmy wyznaczania tych danych nie są dostępne publicznie na mocy umowy między operatorem a klientem. Dodatkowo w celu zachowania ochrony danych osobowych wszystkie podróże w sieci są anonimowe, a same wartości poddawane zaokrągleniom [1] [4].

Kalibracja więzby ruchu

Przygotowana macierz na rok bazowy powinna zostać zweryfikowana i kalibrowana względem pomiarów. Celem takiego działania jest poprawa dopasowania macierzy szczególnie w tych punktach, które nie zostały szczegółowo ob-

jęte w badaniach. Przedstawiony poniżej proces opiera się na metodologii zastosowanej w pakiecie SATURN.

Estymacja macierzy może zwiększyć lub zmniejszyć liczbę podróży jedynie w komórkach niezerowych, dlatego też nie pozwala to na dodanie nowych podróży w połączeniach, które zostały określone jako zerowe [7].

Podstawowym celem estymacji macierzy jest udoskonalenie istniejącej więzby względem pomiarów, przy czym zmiany te powinny być utrzymane na minimalnym poziomie. Krytycznym jest, by macierz po estymacji nie różniła się w znaczny sposób od początkowej [7].

Do kalibracji wykorzystuje się dostępne pomiary, zarówno te z kordonów, jak i pojedynczych punktów. Z racji na dokładną i gęstą sieć punktów pomiarowych w Wielkiej Brytanii dostępność dużej i aktualnej bazy pozwala na precyzyjny proces estymacji.

Kalibracja macierzy przebiega przy użyciu dwóch programów z pakietu SATURN, mianowicie SATPIJA i SATMe2 [2]. Przebieg iteracyjnego procesu estymacji obrazuje rysunek 2.

W pierwszym kroku Prior Matrix, czyli bazowa macierz, jest rozkładana na sieci. Następnie program PIJA lokalizuje wszystkie punkty pomiarowe w modelu i wyszukuje wszystkie pary O-D, których potoki przebiegają przez te punkty [2]. W kolejnym kroku określa procentowy udział potoku z każdej z tych par, jaki przechodzi przez każdy z punktów pomiarowych. Tworzy więc bazę informacji o wszystkich punktach pomiarowych i powiązanych z nimi parami O-D. Dane te są przekazywane do programu SATMe2, który ma możliwość kalibracji macierzy [2]. W punkcie (a) podstawiana jest do niego więzba Prior Matrix. Celem oprogramowania jest poprawa dopasowania pomiędzy danymi pomiarowymi a potokami poprzez zmianę wybranych komórek w macierzy. Różnicę pomiędzy zaktualizowaną a poprzednią macierzą prezentuje wzór (1):

$$D(T, t) = \sum_{ij} (T_{ij} \log \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} + t_{ij}) \quad (1)$$

$$T_{ij} = t_{ij} \prod_a X_a^{P_{ija}} \quad (2)$$

gdzie:

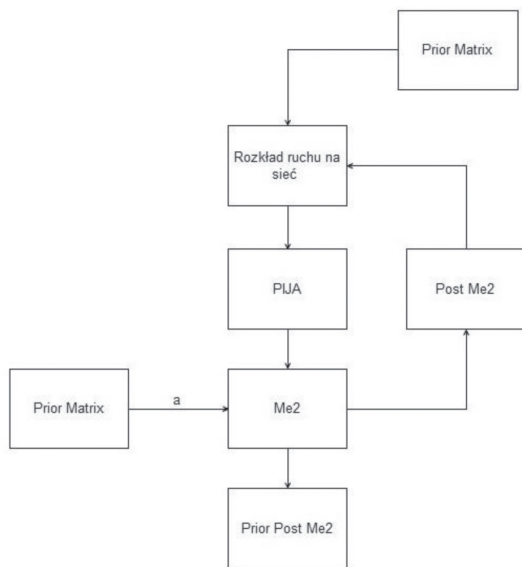
t_{ij} – komórka z więzby Prior Matrix

T_{ij} – komórka z zaktualizowanej więzby

X_a – współczynnik balansujący powiązany z konkretnym odcinkiem a.

Proces SATMe2 jest iteracyjny i polega na poszukiwaniu takiego współczynnika X_a , by potoki odpowiadały pomiarom (wzór 2). Efektem tego jest macierz nazwana PostMe2.

Taka macierz wraca do początku pętli i jest ponownie rozkładana na sieci zgodnie ze schematem na rysunku [2]. Program SATPIJA ponownie sprawdza potoki i pomiary, a SATMe2 kalibruje pierwotną macierz Prior załadowaną w punkcie (a). Tak skonstruowany iteracyjny proces pozwala na poszukiwanie najlepszego rozwiązania przy zmianach



Rys. 2. Schemat procesu kalibracji macierzy z wykorzystaniem modułów SATURN
źródło: [2]

wprowadzanych zawsze na tej samej macierzy, dzięki czemu minimalizuje się różnice w stosunku do jej pierwotnej postaci. Gdy zaproponowany proces osiągnie zbieżność, wyliczona w ten sposób macierz zostaje zapisana pod nazwą PostMe2 Matrix [2].

W SATMe2 możliwe jest ustawienie pewnych ograniczeń do procesu kalibracji. Podróże w wybranych komórkach macierzy mogą zostać uznane za stałe, jeżeli istotnym jest zachowanie obecnej wielkości potoków na wybranym obszarze. Takie podejście pozwala na kalibrację jedynie tych obszarów, gdzie pomiary ruchu i ankiety zostały wykonane na zbyt małej próbie. Jednak „zamrożenie” zbyt dużej liczby komórek może spowodować, że dla edytowalnej części zostaną przyjęte bardzo wysokie współczynniki w celu poprawy dopasowania w całej sieci. Możliwe jest także ustalenie dolnej i górnej granicy potoku na zadanym odcinku. Często praktyką jest ustawienie jako maksimum wartości przepustowości odcinka [2].

W celu zachowania zgodności tendencji ruchowych i liczby podróży skalibrowanej macierzy z jej pierwotną postacią w wytycznych Ministerstwa Transportu przygotowano szereg statystyk, które powinny spełniać porównanie więźb (tabela 1).

Tabela 1

Dopuszczalne różnice przy kalibracji więźby	
Miara	Wymagania
Wartości komórek więźby	Wynik regresji liniowej a między 0,98 a 1,02 b bliskie 0 R ² większe niż 0,95
Wartości P/A dla rejonów	Wynik regresji liniowej a między 0,99 a 1,01 b bliskie 0 R ² większe niż 0,98
Długość podróży	Różnica wartości średniej mniejsza niż 5% Różnica odchylenia standardowego mniejsza niż 5%
Macierz sektorów	Różnica wartości komórek mniejsza niż 5%

Źródło: [7]

Testy te mają dać odpowiedź, czy zmiany dokonane w więźbie przez kalibrację były znaczące. Każdorazowe przekroczenie któregoś z tych kryteriów powinno zostać dokładnie zbadane, włącznie z oszacowaniem wpływu tych zmian, zwłaszcza na obszar analiz. W przypadku, gdy zmiany są istotne statystycznie i w wyraźny sposób wpływają na stan sieci, zalecana jest ponowna weryfikacja modelu sieci i więźby ruchu. Jeżeli zmiany uznaje się za nieistotne, powinno to zostać udokumentowane w specyfikacji modelu [7].

Budowa więźby prognostycznej przy użyciu modeli zmiennego popytu

Należy wyraźnie podkreślić, że więźba ruchu na rok bazowy nie pochodzi bezpośrednio z modelu, lecz jest macierzą powstałą z rzeczywistych danych. Po jej opracowaniu i kalibracji należy stworzyć odpowiedni zestaw procedur, odwzorowujący zawarte w niej tendencje ruchowe. Tak zbudowany model popytu pozwala następnie tworzyć macierze dla poszczególnych modeli prognostycznych. *Variable demand models* (ang. modele zmiennego popytu) pozwalają na modelowanie przemieszczeń zarówno w projektach komunikacji indywidualnej, jak i transportu zbiorowego. Określenie popytu jest procesem iteracyjnym, zależnym od złożonego kosztu podróży w sieci [6].

Każda zmiana warunków ruchowych w modelu wpływa na popyt. Głównym celem VDM jest możliwość prognozowania i zdefiniowania tych zmian. Podejście to powinno dać odpowiedź o liczbie (częstości) podróży w ciągu doby, wybranych środkach przewozowych, celu podróży, a także porze dnia, gdy wykonano przemieszczenia. Dodatkowo powinno być to powiązane z prognozowanymi wartościami produkcji i atrakcji rejonów komunikacyjnych [6].

Model popytu oraz rozkład ruchu wymagają odmiennego podziału elementów składowych. Model z racji na swoją strukturę powinien charakteryzować się wyższą szczegółowością danych w celu określenia, jak duży potok oraz jakiego typu (motywacji, klasy pojazdu) jest produkowany bądź absorbowany przez konkretne rejonu [6]. Jest to istotne również dlatego, że różne grupy użytkowników reagują w odmienny sposób na zmiany warunków na sieci oraz w koscie podróży.

Segregacja elementów w modelu popytu zależy od obszaru poddawanego analizie, celów i struktury projektu, dostępnych danych, wymaganych analiz. Przyjmuje się poniższy podział jako fundamentalny, jednak istotnym jest, że zależy on zawsze od konkretnego przypadku [6].

1. Typ domostwa/typ podróznego – podział tworzony jest według struktury domostw, liczby dzieci czy osób pracujących. Pozwala przyporządkować zachowania komunikacyjne zgodne z typem domostwa. Istnieje również możliwość podziału w zależności od dostępności samochodu. Model, które analizuje jedynie ruch w komunikacji indywidualnej, bierze pod uwagę jedynie tych użytkowników, którzy mają dostęp do samochodu.
2. Wartość czasu – różnica w wadze jednostki czasu dla poszczególnych użytkowników sieci drogowej ustalana

jest zwykle według podziału na motywacje. Dodatkowo, jeżeli projekt zawiera punkty poboru opłat, konieczne jest określenie dochodów kierowców lub ich chęć do uiszczania opłat.

- Motywacja – przynajmniej trzy kategorie: związane z pracą (W), wyjazdy służbowe (EB) oraz inne (O). Mogą się one różnić elastycznością oraz dystrybucją w sieci czy też wartością jednostki czasu.
- Systemy transportowe – zwykle przynajmniej dwa – komunikacja indywidualna oraz zbiorowa. W projektach przeważnie jest wymagane, by istniała możliwość zmiany środka transportowego w iteracyjnym modelu popytu.
- Typ odcinków w sieci – przeznaczone dla pojazdów osobowych oraz inne, przy czym te drugie mogą zawierać m.in. wydzielone buspasy, drogi dla pojazdów towarowych czy linie kolejowe.

VDM jest procesem iteracyjnym składającym się z wielu punktów decyzji (nazywanych tu „krokami”), koniecznych do należytego określenia popytu [6]. Zwyczajowo przyjmuje się je następująco:

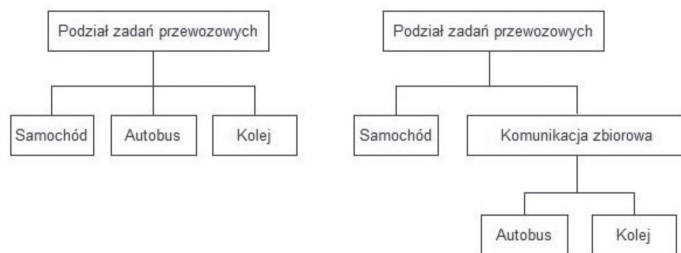
- częstość podróży (ang. *trip frequency*),
- podział zadań przewozowych (ang. *modal split*),
- dystrybucja podróży (ang. *trip distribution*),
- przedział czasowy (ang. *time interval*).

Częstość podróży [6] – określa, ile podróży wykonują w analizowanym okresie użytkownicy. Tworzona jest na bazie zaobserwowanego schematu podróży w taki sposób, by reagowała na zmiany w czasie przejazdu oraz kosztach. Dla każdej z motywacji podróży tworzony jest zwykle osobny model częstości. Podejście to jest odmienne od klasycznej generacji ruchu opartej na czynnikach demograficznych oraz socjoekonomicznych. W typowym przypadku wzrost liczby podróży w prognozach wynika ze wskaźników wzrostu określonych w The National Trip End Model. Ten krok jest zwykle najmniej wrażliwy na zmiany kosztów.

Gdy częstość podróży nie zawiera podróży pieszych oraz rowerowych, zmiana liczby podróży wywołana zmianami kosztów oznacza przeniesienie podróży pomiędzy transportem indywidualnym lub zbiorowym a podróżami pieszymi bądź rowerowymi (które nie występują w modelu). Jeżeli te podróże znajdują się w modelu popytu, nie powinna następować widoczna zmiana częstości podróży w zależności od kosztów.

Podział zadań przewozowych [6] – podstawą dla określenia podziału zadań przewozowych są informacje na temat dostępności samochodu. Docelowo należałoby przyporządkować informację o dokładnej liczbie dostępnych pojazdów dla użytkownika, jednak nie zawsze określenie takich danych jest możliwe. Ponownie parametry modelu powinny być zależne również od motywacji.

Zwykle podział zadań przewozowych rozważa wybór pomiędzy samochodem a komunikacją zbiorową. Częstym przypadkiem jest podział na trzy kategorie, np. samochód, autobus i kolej lub samochód, komunikacja zbiorowa i podróże piesze. Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie tzw.



Rys. 3. Schematy podziału zadań przewozowych

Źródło: opracowanie własne

zagnieżdżonego podziału (ang. *nested choice*) [2] [6]. Sprowadza się to do podziału w dwóch lub więcej krokach. Przykład obrazuje rysunek 3.

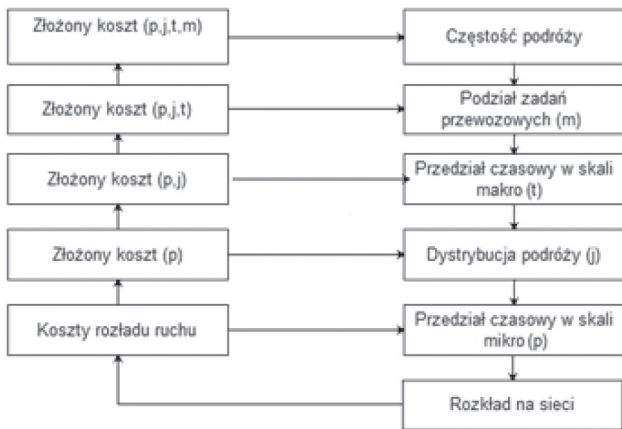
Dystrybucja podróży [6] – dystrybucja określa liczbę podróży pomiędzy poszczególnymi parami rejonów komunikacyjnych. Zaleca się stworzenie ograniczeń wielkości podróży na konkretnych obszarach lub też funkcji zmniejszających ich atrakcyjność, by poprawnie odwzorować zachowania komunikacyjne. Typowym przy prognozach jest używanie podwójnych ograniczeń w motywacjach związanych z pracą oraz edukacją przez ustalenie stałej wartości dla produkcji i atrakcji poszczególnych rejonów (*trip ends*) oraz pojedynczego ograniczenia dla pozostałych motywacji, gdzie jedynie produkcja rejonów jest ustalana na stałym poziomie. Wewnętrzne procedury dystrybucji podróży zawierają m.in. funkcję oporu przeszerzeni.

Główną przeszkodą w wykorzystaniu modelu dystrybucji podróży jest estymacja współczynników absorpcji podróży dla każdego rejonu w wiarygodny sposób i określenie parametrów, które pozwolą na miarodajną predykcję liczby podróży. Jest to o tyle problematyczne, że określane na rok bazowy parametry odwzorowują zaobserwowane schematy na szerokim obszarze, gdzie zachowania uzależnione są od wielu czynników historycznych oraz socjoekonomicznych, które nie mogą być w prosty sposób ujęte we współczynnikach. W konsekwencji przyjmuje się, że możliwość predykcji przyszłości przez modele dystrybucji jest generalnie niepotwierdzona [6]. Dlatego tak ważne jest bazowanie na jak największej rzeczywistej próbie danych w celu jak najlepszego odzwierciedlenia tendencji w zachowaniu użytkowników sieci.

Przedział czasowy [6] – pozwala zamodelować wybór godziny rozpoczęcia podróży zarówno w makro przedziale czasu (szeroki wybór między interwałami, np. 2–3 godziny, wybór pomiędzy godzinami analiz), jak i w skali mikro (wybór pomiędzy 1 h–15 min wewnątrz analizowanego przedziału). W Wielkiej Brytanii zwykle modeluje się od 8 do 16 godzin w dobie, z uwzględnieniem okresów szczytowych i międzyszczytowych. Zdefiniowane w modelu przedziały czasu powinny być zgodne z tymi zakodowanymi w modelu popytu. Model wyboru przedziału powinien różnić się w zależności od motywacji, ponieważ podróże obowiązkowe zwykle nie mogą rozpoczynać się w dowolnie wybranej godzinie. Jest mało prawdopodobnym, by model popytu zmieniał godziny rozpoczęcia podróży w całym

okresie analiz, jednak w niektórych przypadkach i wybranych godzinach takie przesunięcie może wpłynąć na koszty podróży w sieci.

W analizie można wziąć pod uwagę także inne kroki decyzyjne. Składowe te mogą być uwzględnione poprzez wielomianowy model logitowy, zaniedbując jednak wpływ czułości poszczególnych decyzji na końcowy rezultat. Dlatego też koniecznym jest ustawienie hierarchii kolejnych wyborów w modelu popytu. Budowa modelu często różni się w zależności od motywacji podróży, a przedział czasu w skali makro wykorzystywany jest bardzo rzadko. Należy podkreślić, że model niekoniecznie musi odwzorowywać proces decyzyjny użytkownika [6]. Jedną z możliwości układu kroków obrazuje rysunek 4.



Rys. 4. Przykładowy schemat VDM
źródło: [6]

Uogólniony koszt podróży (ang. *generalised cost*) jest konieczny dla prawidłowego działania modelu popytu. Koszt powinien zależeć zarówno od czasu, jak wydatków, dlatego tak ważnym jest stworzenie odpowiedniej kombinacji tych dwóch grup czynników wyrażającą, jak bardzo wykonanie konkretnej podróży jest zniechęcające (ang. *disutility*) [6]. By określić te koszty i ich wpływ na zmianę popytu w modelu, konieczne jest stworzenie odpowiednich wag dla czasu i wydatków, które dotyczą podróżnych. Pozwala to na analizę przypadków, gdy możliwy jest wybór droższego, ale szybszego środka przewozowego lub tańszego ale jednak wolniejszego.

Uogólniony koszt może być modyfikowany dwoma typami zmiennych:

- zmienne odnoszące się do rozważanych podróży,
- zmienne odnoszące się do indywidualnych cech podróżnego.

Te dwa czynniki pozwalają określić różnorodność w populacji na analizowanym obszarze. W pierwszej grupie mogą znajdować się czynniki dotyczące środków przewozowych (czas przejazdu, opłaty za autostrady), a w drugiej odnoszące się do użytkownika (przychody, motywacja podróży). Struktura uogólnionego kosztu pozwala na rozważanie różnic w zachowaniu i decyzjach użytkowników, co wpływa także na przebieg budowania prognoz.

Uogólniony koszt dla podróży samochodem osobowym zawiera zwykle następujące czynniki:

- koszty eksploatacji (w tym paliwo),
- czas podróży,
- koszt parkowania,
- czas dojścia i odejścia od pojazdu,
- opłaty za przejazd.

Przy uwzględnieniu tych wskaźników postać kosztu uogólnionego może być następująca:

$$G_{car} = t_{walk} * v_{walktime} + t_{ride} + \frac{d * VOC}{(occ * VOT)} + \frac{d * c_{park}}{(occ * VOT)} \quad (3)$$

gdzie:

- G_{car} – uogólniony koszt podróży samochodem
- t_{walk} – całkowity czas dojścia do i od samochodu
- $v_{walktime}$ – waga dla czasu dojścia
- t_{ride} – czas spędzony w pojeździe
- VOC – koszt eksploatacji pojazdu na kilometr, zależny od motywacji
- occ – liczba osób w pojeździe (pozwala podzielić koszty eksploatacji)
- VOT – odpowiedni koszt czasu według motywacji
- c_{park} – koszt parkowania.

Zwyczajowo uogólniony koszt podawany jest w jednostce czasu, jednak jest możliwe podanie go również w spieniężonej postaci poprzez przemnożenie całego równania przez VOT.

Hierarchia sekwencji kroków decyzyjnych powinna być determinowana przez ich wrażliwość na złożony koszt podróży (ang. *composite costs*) [6]. Im decyzja znajduje się wyżej na schemacie, tym powinna być mniej wrażliwa na koszt, więc mniej podatna na zmiany. Parametryzowane jest to przez współczynnik λ . Decyzje znajdujące się wyżej w hierarchii funkcjonują jako ograniczenia dla późniejszych decyzji. Dlatego też, jeżeli wrażliwość kolejnych kroków malałaby (zamiast rosnać), istniałoby zagrożenie, że byłyby one zbyt mocno ograniczone wcześniejszymi wyborami, a cała procedura nie działała prawidłowo. Złożony koszt podróży wyrażany jest poniższym wzorem:

$$G_{comp}^{y-1} = -\frac{1}{\lambda_y} \ln \left(\sum_x e^{(-\lambda_y G_x^y)} \right) \quad (6)$$

gdzie:

- G_{comp}^{y-1} – złożony koszt zsumowany dla możliwych wyborów x w kroku y
- G_x^y – uogólniony koszt dla wyboru x w kroku y
- λ_y – parametr wrażliwości dla wyborów podejmowanych w kroku y .

Koszt ten jest obliczany dla każdego z kroków jako średnia z kosztów bardziej wrażliwych kroków (rys. 4). Wartość ta nie może być określana za pomocą średniej arytmetycznej, lecz odpowiednio ważona. Jeżeli podział zadań przewozowych jest mniej wrażliwy (czyli znajduje się wyżej w schemacie) niż dystrybucja podróży, wtedy złożony koszt podróży (wzór 6)

samochodem z rejonu i obliczany jest jako logsum podróży samochodem (krok y) do wszystkich możliwych docelowych rejonów (wybór x). Na etapie dystrybucji do rejonów z wysokim kosztem podróży zostaje wyznaczona mała liczba podróży samochodem, a użytkownicy chętniej wybiorą podróże do bliższych rejonów. Jednak poprzez przypisanie niskiej wagi dla tych kosztownych podróży będzie to stanowiło mały udział w koszcie złożonym dla etapu będącego wyżej, czyli podziału zadań przewozowych [6]. Jeżeli zaś dystrybucja podróży jest mniej wrażliwa niż podział zadań przewozowych, do jej określenia wykorzystuje się złożony koszt dla wszystkich możliwych dostępnych środków transportowych dla każdej pary początek–koniec podróży [6].

Gdy rozważa się najbardziej wrażliwy (najniższy, poprzedzający rozkład na sieci) krok, złożony koszt dla każdej z opcji będzie miał przypisaną wagę odpowiadającą proporcji atrakcji dla rejonów – pozwala to uniknąć sytuacji, w której podróże są kierowane do łatwo dostępnych rejonów, które w rzeczywistości mają bardzo niską lub zerową atrakcję.

Udokumentowano, że wrażliwość popytu na uogólniony koszt maleje wraz ze zwiększaniem się długości podróży [3]. Jeżeli zakres projektu dotyczy dużego obszaru, zaaplikowanie takiej metody może być konieczne dla uzyskania wysokiej zgodności modelu z rzeczywistością. Zjawisko to nazywane jest tłumieniem kosztu (ang. *cost damping*). Jako że modele w Wielkiej Brytanii zawierają często sieć drogową całej wyspy (z odpowiednim stopniem szczegółowości, najwyższym w obszarze zainteresowania projektu i bardzo niskim w obszarach najbardziej oddalonych), koniecznym jest użycie modelu tłumienia, by zbyt duże koszty nie uniemożliwiały wykonywania najdłuższych podróży.

Zarządzanie iteracyjnym modelem popytu w połączeniu z iteracyjnym procesem rozkładu ruchu na sieć jest możliwe dzięki wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania. Jednym z tego typu programów jest DIADDEM (Dynamic Integrated Assignment and DEMand Modelling) [6]. Został on specjalnie przygotowany, by ułatwić naprzemienny proces iteracyjny, doprowadzając do zbieżności modelu popytu. Pozwala również ocenić aktualną zbieżność modelu poprzez badanie różnicy pomiędzy popytem a podażą (GAP, w j. ang. przerwa) wyrażoną wzorem:

$$\frac{\sum_a C(X_a^n) |D(C(X_a^n)) - X_a^n|}{\sum_a C(X_a^n) X_a^n} * 100 \quad (7)$$

gdzie:

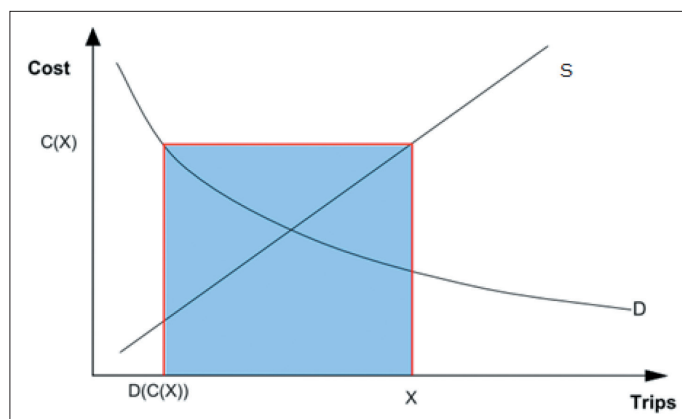
X_a^n – komórka a w macierzy podróży z poprzedniego rozkładu ruchu dla iteracji n -tej

$C(X_a^n)$ – komórka a w macierzy uogólnionych kosztów powstała z rozkładu macierzy

$D(C(X_a^n))$ – komórka a w macierzy podróży powstałej po rozkładzie ruchu opartym na koszcie $C(X_a^n)$. W przypadku VDM jest to równoznaczne z oznaczeniem X_a^{n+1} .

a – reprezentuje każdą możliwą kombinację początku i końca podróży, motywacji, przedziału czasowego i wybranego środka przewozowego.

Przyjmuje się, że zbieżność modelu jest osiągnięta wtedy, gdy wynik powyższego równania wynosi 0, co oznacza, że nie ma zmian pomiędzy poprzednią a nowo powstałą więźbą ruchu. Proces zbieżności dla jednego potoku prezentuje rysunek 5. Krzywa S jest krzywą podaży, gdzie koszt wzrasta wraz ze wzrostem liczby podróży w sieci. Krzywa D jest krzywą popytu, która prezentuje spadek liczby podróży w sieci wraz ze wzrostem kosztów. Zakreślony obszar pokazuje przestrzeń będącą różnicą pomiędzy podażą a popytem według powyższego wzoru. Z kolejnymi krokami iteracyjnymi przestrzeń ta się zmniejsza, aż pozostaje punktem na przecięciu obu krzywych, co oznacza pełną zbieżność modelu.



Rys. 5. Proces zbieżności pomiędzy popytem a podażą
Źródło: saturn

Zwykle modele popytu opierają się na podróżach (ang. *trip*). Istnieje jednak bardziej złożone podejście związane z łańcuchem podróży (ang. *tour*) zaczynającym się i kończącym w rejonie komunikacyjnym będącym domem dla osoby podróżującej. Wszystkie podróże pomiędzy są automatycznie rozpoznawane jako części składowe większej całości. Podejście to charakteryzuje się wyższą dokładnością w reprezentacji zachowań w konkretnych modelach, np. odzwierciedlających model miejsca do parkowania lub też system opłat za wjazd uzależniony od konkretnej godziny. Zaleca się obserwowanie zmian w GAP w kolejnych iteracjach, by prześledzić proces zbieżności modelu.

Wartym podkreślenia jest, że pojazdy ciężarowe są wyłączone z tej metody, ponieważ ich ruch jest oparty na złożonym łańcuchu logistycznym, co uniemożliwia modelowanie każdego przemieszczenia z osobna. Dlatego też w przypadku ruchu towarów przyjmuje się prostą metodę przemnażania macierzy przez współczynniki w prognozach. Podobne podejście przyjmuje się, jeżeli w modelu występuje ruch zewnętrzny spoza obszaru modelu.

Podsumowanie

Opisane metody przedstawiają aspekty jednej z metod budowy modelu popytu. Duży nacisk położono w nich na szczegółowy opis zjawisk zachodzących w układach transportowych. Wykorzystując szeroką bazę danych dostępną w Wielkiej Brytanii, istnieje możliwość użycia metod wychodzących poza ramy klasycznego modelu czterostadiowego.

Dokończenie tekstu na stronie 13

Oba modele spełniły swoje zadania, jednak wykonano je zupełnie innym nakładem pracy. Przygotowanie modelu w programie Vissim zajęło czterokrotnie więcej czasu niż w przypadku pracy z programem Synchro, zaowocowało to jednak symulacją o wiele bardziej zbliżoną do sytuacji rzeczywistej i dużo lepiej przemawiającą do niedoświadczonego obserwatora.

Podsumowując: gdy mamy możliwość poświęcenia czasu na kalibrację modelu, chcemy przedstawić wyniki naszej pracy szerszej publiczności lub rozwiązanie projektowe będą ocenian przez osoby nieposiadające specjalistycznej wiedzy, zaleca się wybrać do przedstawienia wyników program Vissim. Oprogramowanie firmy PTV sprawdzi się również w przypadku, gdy chcemy odwzorować obiekt o złożonej geometrii lub nietypowych rozwiązaniach inżynierii ruchu. Jeśli natomiast mamy niewiele czasu na wykonanie analizy i zależy nam na szybkim wyznaczeniu wskaźników oceny warunków ruchu, a skrzyżowanie nie jest skomplikowane, zaleca się użycie programu Synchro, który bardzo dobrze sprawdza się przy ilościowej ocenie efektywności sterowania i przy wykonywaniu porównań różnych wariantów tego samego skrzyżowania.

Dokończenie tekstu ze strony 8

Podjmuje się w nich próbę opisu zachowań komunikacyjnych oraz relacji pomiędzy popytem a podażą na wysokim poziomie dokładności.

Dzięki rozwojowi metod pracy na tzw. *Big Data*, w ostatnich latach pojawiła się możliwość opracowywania więzby na bazie danych komórkowych. Przy wykorzystaniu specjalistycznych algorytmów i znajomości m.in. punktów zatrzymań i prędkości przemieszczeń określa się motywacje i wybrane środki przewozowe w systemie transportowym. Taka metoda pozwala pominąć kosztowne badania i ankiety, jednak wiąże się z nią niepewność przy określeniu kolejnych elementów macierzy. Dlatego tak ważna jest gruntowna weryfikacja powstałej więzby.

Kalibracja więzby ruchu jest dopuszczalna głównie w celu poprawy zgodności modelu na obszarach, które w niewystarczający sposób były objęte badaniami. Ten iteracyjny proces skupia się na dopasowaniu wielkości popytu do pomiarów zgodnie z wybranymi ścieżkami, przy czym jest ograniczany m.in. przepustowością odcinka. Zmiany w więzbie ruchu nie mogą być znaczne i są weryfikowane wielowskaźnikowo.

Variable Demand Model pozwala na tworzenie modelu popytu dla prognoz z uwzględnieniem wielu czynników i etapów planowania podróży. Przy opracowywaniu tego iteracyjnego modelu, który jest skorelowany bezpośrednio z rozkładem ruchu, wymagany jest szeroki zakres danych dotyczących ruchliwości mieszkańców i tego, jak podróżują. Pozwala badać, jak w przypadku zmiany kosztów podróży zmienia się nie tylko podział zadań przewozowych, ale także częstotliwość podróży czy lokalizacja docelowa.

Literatura

1. Bąk R., Ostrowski K., *Analiza konieczności kalibracji programu Vissim w modelowaniu skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, „Logistyka”, 2014, nr 6.
2. Buda M., Górka A., Krukowicz T., *Wpływ przepisów dotyczących obsługi skrętu w lewo na przepustowość skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, „Technika Transportu Szybnego”, 2015, nr 12.
3. Dybicz T., *Kalibracja modelu ruchu w programie Vissim dla przypadku dużego zatłoczenia ruchem drogowym*, „Logistyka”, 2014, nr 6.
4. Górka A., *Ocena efektywności funkcjonowania wariantowych rozwiązań organizacji ruchu dla wybranego fragmentu miejskiego układu komunikacyjnego*, praca magisterska na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej, 2015.
5. *Infographic: Simulating driving behaviour*, <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim/> (dostęp 15.04.2016 r.)
6. Krawiec S., Celiński I., *Symulacja mikroskopowa ruchu w modelu obszarowym sieci drogowej*, „Zeszyty naukowe Politechniki Warszawskiej”, 2012, nr 86.
7. PTV-Ag, PTV VISSIM 8 User Manual, Karlsruhe 2015.
8. Trafficware, Synchro Studio 7 User Guide, Sugar Land 2006.
9. Wiedemann, R., *Simulation des Verkehrsflusses*, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 8, Universität (TU) Karlsruhe, Germany, 1974.

Należy mieć na uwadze, że budowanie modeli w oparciu o dużą ilość danych i z bardzo wysokim poziomem szczegółowości, przekłada się na długi okres opracowania projektu, ten zaś wiąże się z wysokimi kosztami. Dlatego istotnym jest, by zastosowane metody korelowały z wymaganiami i zakresem projektu.

Literatura

1. Cox A., Himlin R., *Regional Transport Models: Highways England*, SATURN User Group Meetings 2015.
2. D. Van Vliet, *Saturn Manual Version 11.3*, Wielka Brytania 2015.
3. Daly A., *The Relationship of Cost Sensitivity and Trip Length*, European Transport 2008.
4. Conference, Transport Modelling Seminar, Holandia.
5. Jacobs, *Trip Information System Provisional Matrices*, 11 09 2015 [Online], Dostępny: <https://prezi.com/abw3ovqphfzk/jacobs-urban-mobility-/>
6. Der-Horng L., Boyce D.E., *Urban and Regional Transportation Modelling*, 2004.
7. WebTAG (Transport Analysis Guidance) M2: Variable Demand Modelling, Department for Transport, Wielka Brytania, 2014.
8. WebTAG (Transport Analysis Guidance) M3.1: Highway Assignment Modelling, Department for Transport, Wielka Brytania, 2014.