

KRYSTIAN SIWEK

mgr inż., doktorant na Wydziale Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
tel.: +48 889 486 359,
e-mail: krystian.siwek@gmail.com

Modele mikrosymulacyjne na Wyspach Brytyjskich, teoria i praktyka, część 1¹

Streszczenie: Artykuł przedstawia angielskie i irlandzkie podejście związane z modelowaniem mikrosymulacyjnym. Ten rodzaj analiz jest szeroko wykorzystywany, szczególnie w przypadku inwestycji na terenie miast, gdzie duży poziom szczegółowości jest wymagany, aby oddać specyfikę zachowań komunikacyjnych i interakcję pomiędzy wszystkimi grupami użytkowników ruchu. Skupiono się na wybranych zagadnieniach, wliczając w to kwestie doboru modelowanego zakresu, potrzeby pozyskania szerokiej bazy danych oraz omówiono konkretne techniki modelowania na przykładzie oprogramowania Vissim. Omówiono proces budowy modeli bazowych, opisujących aktualny stan sieci i zachowania komunikacyjne oraz modele prognostyczne, będące zwykle meritum opracowania. Prawidłowo przygotowane prognozyki są najważniejszym elementem projektu, ponieważ pozwalają z dużą dozą prawdopodobieństwa określić przyszłe zachowania komunikacyjne, co jest podstawą do podjęcia decyzji odnośnie inwestycji czy zmiany organizacji ruchu. Modele prognostyczne powinny zawsze być oparte o szeroką bazę danych i najlepiej powiązane z innymi opracowaniami, zapewniając zgodność pomiędzy projektami. Odpowiednio przygotowane modele pozwalają na rzetelną i prawidłową analizę, wspierając i usprawniając proces decyzyjny.

Słowa kluczowe: modele mikrosymulacyjne, Wielka Brytania, Irlandia, Vissim, dobre praktyki

Wprowadzenie

Wraz z rozwojem układów komunikacyjnych i zwiększaniem natężeń ruchu, zarządcy i planiści stoją przed wyzwaniem kształtowania warunków zapewniających komfortowe warunki w podróży. Zapewnienie wysokiej dostępności z uwzględnieniem zrównoważonej mobilności, zwłaszcza dla dużych ośrodków miejskich jest kluczowym elementem podnoszenia jakości życia oraz prawidłowego rozwoju tkanki miejskiej. Optymalne wykorzystanie istniejących narzędzi, które pozwalają wspomóc procesy decyzyjne przy planowaniu projektów transportowych we wszelkiej skali powinno być obowiązkiem zarządców i specjalistów.

Modele mikro-symulacyjne (w Anglii nazywane po prostu „modelami symulacyjnymi”, gdy skala makro nazywana jest „strategiczną”) pozwalają na odzwierciedlenie zachowań indywidualnych użytkowników ruchu – pojazdów czy pieszych – dzięki stosownym formułom matematycznym i opisom tendencji w sieci drogowej. Wykorzystywanie tych narzędzi, przy zachowaniu odpowiedniego poziomu precyzji i rzetelności, pozwala opracowywać prognozy i badać wpływ zarówno miękkich, jak i twardych środków zarządzania transportem na funkcjonowanie układów drogowych.

Pierwsze modele w skali mikro zaczęły być tworzone w Wielkiej Brytanii już w połowie lat 90. XX wieku [1]. W pierwszych latach najczęściej wykorzystywanym oprogramowaniem była DRACULA – stworzony na uniwersytecie w Leeds program do prowadzenia analiz ruchu o dużej szczegółowości. W latach obecnych inne programy zajęły miejsce Draculi, m.in. Paramics, Aimsun. Jednak dziś najbardziej rozpowszechnionym w użytku programem jest Vissim [2] niemieckiej firmy PTV GV. Sytuacja ta jest podobna na rynku polskim, gdzie również najczęściej spotykanym oprogramowaniem wykorzystywanym do mikrosymulacji jest produkt firmy PTV.

W celu zapewnienia wysokiej jakości standardów modeli ruchu, w Wielkiej Brytanii stworzono odpowiednie dokumenty służące jako podstawa przy poprawnej budowie modeli ruchu. Rządowa instrukcja WebTAG skupia się na kwestiach modelowania w skali makro, gdy wydawany przez Transport of Londyn – urząd właściwy do spraw transportu miasta Londyn – dokument *Traffic Modelling Guidelines* kładzie duży nacisk na tematy modelowania w skali lokalnej oraz mikro. Dokument ten nie jest bezpośrednio instrukcją budowy modeli, a w dużej mierze zbiorem dobrych praktyk, których przestrzeganie pozwala przygotować projekt zgodnie ze sztuką. Powstał w celu zachowania standardów dla wszystkich projektów i opracowań przygotowywanych dla miasta Londyn, lecz nabrał międzynarodowego znaczenia. Z uwagi na wysoki poziom opracowania, *Traffic Modelling Guidelines* stało się wzorem dla podobnych instrukcji, m.in. w Irlandii i Australii.

W niniejszej publikacji autor powołuje się zarówno na dokument *Traffic Modelling Guidelines*, irlandzką instrukcję *Construction of Transport Models*, jak i doświadczenia własne z pracy nad modelami w programie Vissim w Wielkiej Brytanii i Irlandii. Nacisk położono głównie na kwestie powiązane z modelowaniem grup kołowych, uwzględniając wybrane kwestie, które prezentują odmienne podejście niż na rynku polskim. Publikacja nie jest spisem porad dla budowy modeli w oprogramowaniu Vissim, choć omówione kwestie wiążą się z tym programem. Skupiono się jednak na ogólnych zasadach i dobrych praktykach, które mogą być przeniesione także do innych środowisk symulacyjnych.

Pierwsze etapy budowy modelu

Pierwszym krokiem przy rozważaniach projektowych jest ustalenie potrzebnych analiz dla danego zagadnienia transportowego. Wykorzystanie narzędzi mikrosymulacyjnych zawsze powinno być uzasadnione. Przyjmuje się, że konieczność

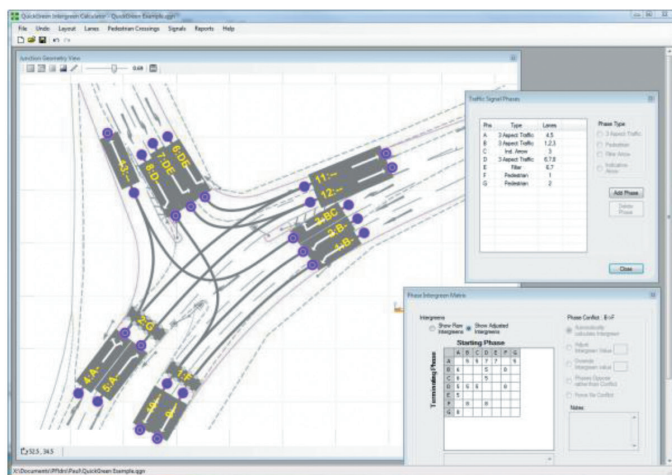
¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2017.

budowy modelu powinna wynikać z następujących warunków [2]:

- gdy na analizowanym obszarze występuje wyczerpanie przepustowości układu oraz ma miejsce częste blokowanie pojazdów,
- gdy planowane są znaczące zmiany w układzie drogowym – przebudowa infrastruktury, wprowadzenie nowego systemu sterowania ruchem, duże zmiany w popycie,
- gdy dokładna prognoza czasu przejazdu jest istotnym punktem prowadzonych analiz – np. wydzielenie pasa autobusowego,
- gdy niezbędnym jest zademonstrowanie projektowanych rozwiązań dla klienta lub opinii publicznej.

Punkt ostatni, z uwagi na duże możliwości oprogramowania Vissim na polu wizualizacji 2D i 3D, praktycznie zawsze może być argumentem za stosowaniem tego narzędzia.

Wykorzystanie możliwe dużej i wiarygodnej bazy danych jako podstawy do budowy modelu symulacyjnego jest jednym z podstawowych warunków przeprowadzenia rzetelnych analiz. Na Wyspach Brytyjskich przyjęto, że wszelkie formy modelowania powinny być ze sobą powiązane przez transfer informacji pomiędzy opracowaniami [2] [1]. Modele mikrosymulacyjne powinny być opracowywane przy użyciu danych pochodzących z modeli makro oraz modeli lokalnych w skali skrzyżowań. Mówiąc o tych ostatnich, autor ma na myśli programy pozwalające prowadzić lokalne analizy dla skrzyżowań i sieci skrzyżowań oparte na inżynierii ruchu [2]. Programy te stanowią najniższy poziom oprogramowania symulacyjnego – skupiają się na obliczaniu parametrów pracy i oceny poziomu swobody ruchu na węzłach, nie zaś na opisie zachowań poszczególnych pojazdów i wizualizacji, jak chociażby programy w skali mikro. Nie umożliwiają także wyboru trasy w sieci i nie pozwalają badać wpływu inwestycji na wielkość potoków ruchu [3] – takie dane muszą pochodzić z innych opracowań. Przykładami takich programów są m.in. *Transyt* czy *LinSig* (rysunek 1). W angielskiej nomenklaturze nie ma jednoznacznej nazwy na tę grupę programów, funkcjonują m.in.



Rys. 1. Przykładowy ekran z programu LinSig

Źródło: [4]

określenia *network simulation*, *traffic simulation*, *local area simulation*, *simple simulation*. W zależności od konkretnego programu pozwalają one na prowadzenie obliczeń dla skrzyżowań sygnalizowanych, z pierwszeństwem, rond oraz arterii skrzyżowań.

Głównym zadaniem dla modeli lokalnych jest wstępny test proponowanych przedsięwzięć – modelowanie wielu wariantów w Vissimie może być procesem długotrwałym i kosztownym. Testowanie różnych opcji w mniej złożonym oprogramowaniu pozwala na wstępie wyłonić najlepsze alternatywy, które później powinny być przetestowane w skali mikro [2]. Zwykle przeznaczonych do modelowania w Vissimie jest od 1 do maksymalnie 3 opcji, a oprócz tego scenariusz „nic nie zmieniaj” (jako referencyjny) [1]. Wykorzystanie oprogramowania w skali lokalnej ma zasadność jedynie przy projektach związanych bezpośrednio z ruchem kołowym – testowanie opcji skupiających się na ruchu pieszym nie jest możliwe.

Modele mikro powinny być także powiązane z modelami strategicznymi. Wiąże się to z następującymi kwestiami [2]:

- model makro nie jest niezbędny do prowadzenia analiz mikrosymulacyjnych, jednak pozwala przyspieszyć i uwiarygodnić ich rezultaty,
- obszar objęty modelem mikrosymulacyjnym powinien być zawarty wcześniej w modelu skali makro (np. model miasta, w którym przeprowadza się analizę mikro wycinka sieci), dzięki czemu znane są potoki ruchu w roku bazowym i zmiana więźby ruchu w kolejnych latach,
- dane z modelu makro na rok bazowy są pomocnicze i nie mogą zastąpić szerokich badań ruchu stanu obecnego dla obszaru modelu mikro,
- częstym przypadkiem jest, że model makro będzie operował na danych z innego roku niż model makro – wtedy dane ruchowe z roku bazowego modelu makro są jedynie wstępem do budowy bazowego modelu mikro,
- planowane przedsięwzięcie będące przedmiotem opracowania (np. przebudowa skrzyżowania, zmiana organizacji ruchu) powinno być również zamodelowane w modelu w skali makro, by umożliwić przeniesienie danych ze scenariuszy prognostycznych.

Jeżeli obszar analizy nie jest uwzględniony w żadnym ze strategicznych modeli lub też są one od dawna nieaktualizowane, model powinien być oparty na danych pomiarowych.

Prawie zawsze celem budowy modelu ruchu jest możliwość prowadzenia analiz proponowanych zmian i wybór najbardziej korzystnej opcji. Jednak pierwszym krokiem powinno być możliwe najwierniejsze odwzorowanie stanu obecnego zgodnie z posiadaną wiedzą, jako że jest to punkt wyjścia dla prowadzonych analiz prognostycznych.

Zakres modelu

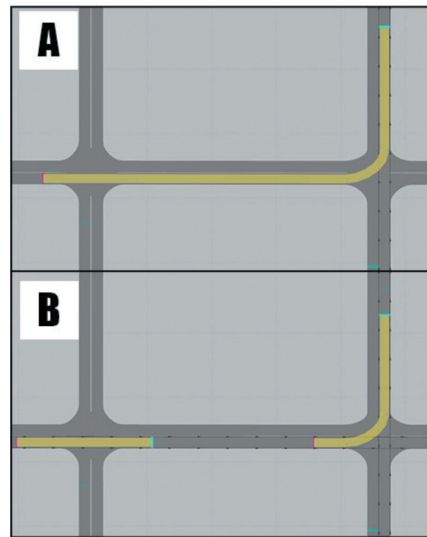
Zakres modelowanego obszaru jest istotną kwestią, która może zaważyć na całym procesie budowy modelu. Obszar modelowania powinien być przede wszystkim wybrany ze

względu na zakładany obszar wpływu planowanej zmiany – np. przebudowa skrzyżowania ma nie tylko punktowy wpływ na jego funkcjonowanie, ale także na okoliczną sieć: drogi i sąsiednie skrzyżowania. Zarazem ważne jest, by wybrany obszar nie był zbyt rozległy – niepotrzebnie wydłuży to proces modelowania i późniejszych prognoz, a także wpłynie na szybkość samej symulacji i może utrudnić proces analizy otrzymanych wyników. Z uwagi na potrzebę prowadzenia rzetelnych analiz wymagany jest, by odcinki drogowe stanowiące granicę obszaru posiadały odpowiednią pojemność. Jeżeli część pojazdów nie mogłaby być wczytana i nie pojawiłaby się na sieci, może to powodować przekłamania w otrzymanych wynikach. Zapewnienie odpowiedniej długości granicznych odcinków pozwala zidentyfikować zjawisko rozlewania się kolejek na kolejne skrzyżowania, jak i przeprowadzić dokładne analizy wyników, gdyż nie pomija się części pojazdów [2].

Kolejnym krokiem jest decyzja o ilości modeli bazowych. Ich wybór zależy od specyfiki lokalizacji i problematyki projektu. W typowych sytuacjach bezwzględny minimum jest symulacja obu szczytów – porannego i popołudniowego, często spotyka się także modele dla godziny okresu międzyszczytowego. Jeżeli jednak modelowany obszar charakteryzuje się niecodziennymi zachowaniami – jest to na przykład zabytkowe centrum miasta, obszar o dużym znaczeniu turystycznym lub handlowym, gdzie wzmożone potoki mają miejsce wieczorem lub w weekendy, występuje potrzeba przygotowania modelu także dla tych okresów. W sytuacji, gdy ciężar projektu przeniesiony jest na te nietypowe pory/dni, wykonanie modeli dla szczytów dnia powszedniego wciąż jest wskazane [2].

Wraz z wyborem zakresu modelowanego obszaru, należy uzgodnić sposób modelowania ruchu. Producent oprogramowania Vissim przewiduje 2 możliwe podejścia do modelowania – statyczne i dynamiczne. Wykorzystując jednak możliwości programu, w Anglii wyodrębniono ostatecznie trzy metody: statyczne, dynamiczne i statyczno-dynamiczne.

Model statyczny (ang. „static model”) jest podstawową formą modelu w Vissimie. Nazwa „statyczny” wynika z faktu, że wszystkie zachowania komunikacyjne w modelu są z góry ustalane w czasie jego budowy. Opiera się on na wprowadzeniu generatorów pojazdów na krańcach sieci oraz punktów decyzji o wyborze trasy. Wprowadzone trasy mogą mieć dowolną długość i liczebność, pozwalając na dużą dowolność przy tyczeniu tras. Istnieje zarówno możliwość tworzenia decyzji o trasie przy każdym z krańców sieci (pojazd ma przypisaną jedną trasę przez całą sieć – rysunek 2 część A) lub punktowo przed każdym ze skrzyżowań (przed każdym z rozjazdów pojazd dokonuje wyboru jaki manewr wykona – rysunek 2 część B). Pierwsze podejście pozwala mieć pełną kontrolę nad zachowaniem pojazdów z konkretnych wlotów – jest tak naprawdę interpretacją więzby ruchu, a przeniesienie jej do modelu jest procesem utrudnionym i pracochłonnym. Drugie podejście pozwala na łatwiejsze modelowanie zachowań, jednak nie ma się kontroli nad wielkością potoków w konkretnych parach



Rys. 2.
Dwa typy ścieżek statycznych w Vissimie
Źródło: opracowanie własne

źródło – cel. Takie podejście jest możliwe tylko w uzasadnionych przypadkach (m.in. niewielki zakres modelowanego obszaru). Do wersji Vissima 5.40 włącznie istniała możliwość półautomatycznego przeniesienia ścieżek z programu SATURN stosownymi narzędziami zewnętrznymi. Wraz ze zmianą struktury plików Vissim w kolejnych wersjach oprogramowania, owe narzędzia straciły na aktualności [1].

Dynamiczne modele (ang. „dynamic models”) charakteryzują się dynamicznym wyborem trasy w sieci. Ponownie określa się punkty generacji ruchu na jej skrajach, a wprowadzenie ruchu następuje poprzez przygotowaną wcześniej macierz ruchu. Trasa wybierana jest dla każdego z pojazdów indywidualnie w oparciu o ogólny koszt, którego główną składową stanowi czas podróży. Pojazdy początkowo podróżują bez znajomości sieci, gdyż koszt nie jest znany, lecz z każdą kolejną symulacją informacja ta jest zapisywana i na jej podstawie prowadzone są zmiany ścieżek podróży. Wybór trasy jest procesem iteracyjnym, a więc czasochłonnym i mocno uzależnionym od skomplikowania sieci. Podobnie jak w modelach w skali makro, konieczne jest przeprowadzenie testów zbieżności modelu (ang. „convergence”). Punkt ten jest osiągnięty, gdy kolejne iteracje nie prowadzą do istotnych z modelowego punktu widzenia zmian w koszcie podróży i wynikających z niego zmian zachowań. Innymi słowy osiągnięta jest równowaga sieci w rozumieniu Wardropa. Dotyczy to zarówno czasu przejazdu, jak i wielkości potoków na poszczególnych odcinkach trasy. Wymogi zgodne z TfL [2] to:

- 95% ze wszystkich potoków na ścieżkach nie może zmienić się o więcej niż 5% w kolejnych 4 iteracjach,
- 95% ze wszystkich czasów przejazdu nie może zmienić się o więcej niż 20% w kolejnych 4 iteracjach.

W celu zapewniania prawidłowego procesu nauki w iteracyjnym poszukiwaniu tras, zaleca się rozpocząć symulacje z macierzą ruchu wielkości 20% i powiększać tę wartość o dodatkowe 10%-20% z każdą iteracją. Dzięki temu odnalezienie najlepszej trasy jest procesem szybszym i pozwala uzyskać wiarygodniejsze wyniki [2]. Modele dynamiczne

z racji na swoją budowę pozwalają wykorzystać więźbę ruchu pochodzącą z modelu strategicznego, wcześniej odpowiednio zmniejszoną do obszaru będącego przedmiotem projektu.

Modele statyczno-dynamiczne (ang. „static-dynamic models”) łączą zalety dwóch poprzednich typów. To podejście może być wykorzystane jedynie przy projektach, gdzie obszar symulacji jest korytarzem, tj. nie ma możliwości zmiany trasy (ang. „re-routing”). Taki model buduje się jak model dynamiczny, lecz nie ma w nim miejsca iteracyjny proces wyboru trasy. Powodem jest to, że dla każdej pary O-D istnieje tylko jedna ścieżka. Dzięki temu proces wyszukiwania najtańszej ścieżki praktycznie nie istnieje, gdyż każda z istniejących tras jest zarazem tą preferowaną. Metoda ta pozwala na znaczną oszczędność czasu, a dzięki wykorzystaniu macierzy – łatwą aktualizację zmian potoków w czasie kalibracji i w modelach prognostycznych. Zjawisko zmiany tras w tych ostatnich, naturalne przy zmianach w sieci, powinno być uwzględniane w pomocniczym modelu strategicznym, z którego będzie następnie pochodziła nowa macierz. Pozwala to w modelu, który w teorii nie pozwala na re-routing uwzględnić jego wpływ na sieć.

Rysunek 3 przedstawia potencjalny zakres modelu w zależności od wybranego podejścia. Jako przykład wykorzystano obszar Podgórze w Krakowie z ulicami Konopnickiej, Wadowicką, Kapelańką. Obszar czerwony pozwala na wybór ścieżki między drogami, więc został przygotowany pod model statyczny bądź dynamiczny. Niebieski zaś został tak wytyczony, by między poszczególnymi skrajami sieci była tylko jedna trasa – jest to właśnie model statyczno-dynamiczny.

Przyjmuje się, że tworzenie dynamicznych modeli w Vissimie jest procesem o dużym poziomie skomplikowania i trudności [2]. Z racji na wysokie koszty budowy takich modeli, TfL zaleca budowanie modeli statycznych lub statyczno-dynamicznych.



Rys. 3. Przykładowy zakres modelu; czerwona ramka – dynamiczny lub statyczny, niebieska – statyczno-dynamiczny

Źródło: OpenStreetMaps

Przygotowanie modelu symulacyjnego powinno zostać rozpoczęte od dokładnej analizy celu projektu. W zależności od wytycznych, zakres modelu, jak i podejście do jego budowy może się różnić. Koniecznym jest także zebranie wszystkich dostępnych danych w celu określenia podejścia do budowy prognoz.

Badania ruchu

W celu prawidłowego odwzorowania zachowań w modelu, koniecznym jest przeprowadzenie badań ruchu. Podstawową informacją jest natężenie ruchu w obrębie modelowanego obszaru. Pomierzone być ono powinno na skrzyżowaniach, rejestrując osobno natężenia na każdej z relacji, uwzględniając również strukturę rodzajową. Badania powinny być przeprowadzone dla wszystkich planowanych dni, uwzględniając, jeżeli wymagane, także weekendy. Przyjęło się, że natężenia mierzone są w interwałach 5-minutowych [2]. Dla modeli w skali mikro nie powinno wykorzystywać się pomiarów przekrojowych na odcinkach, gdyż dane te są zbyt ogólne.

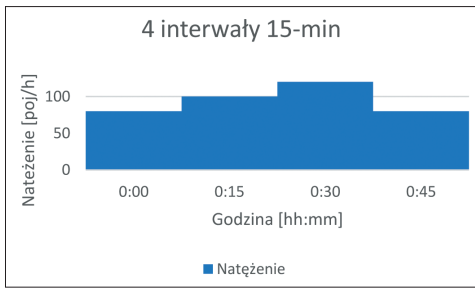
Czasy przejazdu powinny być pomierzone pomiędzy charakterystycznymi punktami na sieci w ilości adekwatnej do długości trasy i wielkości sieci. Długości kolejek jako miary bardzo zależnej od percepcji pomiarowego, zawsze są kwestią umowną i traktowane jako dana pomocnicza w procesie budowy modelu [1]. Przyjmuje się, że podobnie jak w przypadku natężeń, długość kolejek powinna być mierzona w interwałach 5-minutowych.

Dodatkowo powinno się pozyskać informacje dotyczące m.in. funkcjonowania komunikacji zbiorowej (linie, częstotliwości, lokalizacje przystanków), czasów sygnałów zielonych, napełnień parkingów, natężeń nasycenia na wlotach [2]. Kluczowym jest także pozyskanie informacji dotyczących układu drogowego – do czego zwykle zaleca się wykorzystanie podkładów CAD zamiast zdjęć satelitarnych (np. z Google Maps). Bardzo duży nacisk kładzie się na rzeczywiste odwzorowanie sieci, uwzględniając szczególnie wszelkiego rodzaju krzywizny i krętość dróg. Jest to związane zarówno z kwestią perfekcji w odwzorowaniu toru jazdy pojazdów, jak i wizualizacją wysokiej jakości.

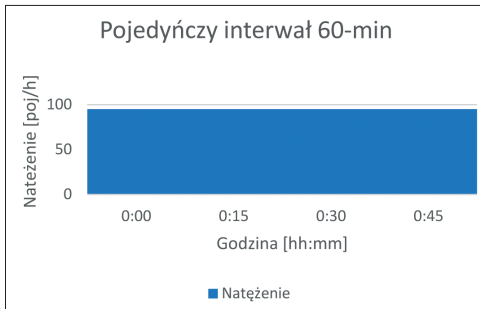
Istotnym jest, by opracowujący model był zaangażowany w prowadzenie pomiarów jako główny zainteresowany, wliczając proces planowania pomiarów i sposób pozyskiwania danych [2].

Modelowanie interwałów

Możliwości Vissima pozwalają na elastyczne modelowanie interwałów. Podstawowym okresem analizy jest typowa godzina szczytu, która powinna być podzielona na 4 interwały 15-minutowe [2] (rysunek 4). Modelowanie jej jako osobnych interwałów pozwala odwzorować typową dla ruchu zmienność w czasie, a więc przybliżyć symulację do rzeczywistości. Agregacja interwału do pełnej godziny prowadzi do uproszczeń utrudniających odwzorowanie prawdziwych zachowań w sieci (rysunek 5). Na obu rysunkach sumaryczny potok godzinowy to 380 pojazdów, jednak rysunek 5 nie odzwierciedla dobrze rzeczywistości. Istotnym



Rys. 4.
Natężenie ruchu dla
interwału 15-minutowego
Źródło: opracowanie własne



Rys. 5.
Natężenie ruchu dla
interwału godzinowego
Źródło: opracowanie własne

elementem jest również stworzenie dodatkowych interwałów – poprzedzające godzinę szczytu (ang. „warm-up”) oraz po jej zakończeniu (ang. „cooldown”). W pierwszym przypadku wprowadza się rzeczywiste potoki pojazdów zgodnie z pomiarami, zaś w drugim generacja jest wstrzymana, a pojazdy będące już w sieci mogą dokończyć rozpoczęte podróże. Podejście to pozwala prowadzić analizy godziny szczytu na zapełnionej wcześniej sieci, a po jej zakończeniu mieć pewność, że nie występują problemy z zakończeniem wszystkich podróży. Napełnianie i opuszczanie sieci powinno trwać 15-30 minut każde, co oznacza, że symulacja najkrócej może dotyczyć przynajmniej 1,5 godziny. Najczęściej jednak przyjmuje się układ 30 min + 60 min + 30 min [2].

Odzworowanie losowości

Warunki ruchu w sieci drogowej podlegają ciągłym zmianom, czego rezultatem jest losowość w zachowaniach kierowców, takich jak preferowana prędkość, moment zmiany pasów czy czas postoju na parkingu. Oprogramowanie Vissim pozwala odzworować te codzienne losowe zmiany w zachowaniach poprzez zmianę indywidualnych decyzji kierowców w oparciu o liczby pseudolosowe [2]. Liczby pseudolosowe generowane są na bazie „ziarna” (ang. „random seed”), które wykorzystywane jest w procesie obliczeniowym. Z matematycznego punktu widzenia nie ma bezpośredniego związku pomiędzy wartością wprowadzoną a wynikowymi liczbami pseudolosowymi. Oznacza to, że wartości wygenerowane z kolejnych ziaren (np. 5,6,7) nie muszą być wobec siebie podobne. Taki mechanizm w oprogramowaniu Vissim pozwala, przy pomocy kolejnych wartości ziarna, wygenerować różne serie zachowań i decyzji kierowców. Dzięki temu istnieje możliwość symulacji serii wyników odzworowujących codzienne zmiany na sieci. Wartość ziarna nie powinna mieć wpływu na popyt, a jedynie zachowania kierowców wewnątrz samej sieci.

Wykorzystanie jedynie jednego „ziarna” przy opracowaniu modelu może mieć niekorzystny wpływ na wyniki, gdyż istnieje szansa, że będą one wypaczone. Dopiero prowadzenie symulacji na bazie serii wartości pozwala uzyskać uśrednione „typowe” wartości. Stwierdzono, że im nasycenie sieci jest większe, tym wahania wyników są większe [2]. Nawet małe zmiany w zachowaniach w sieci (np. odnośnie zmiany pasów) mogą mieć duży wpływ na zapełnionej sieci. Zgodnie z TfL, przyjmuje się, że satysfakcjonującą liczbą symulacji jest 10, liczba ta jednak może być zwiększona w razie potrzeb. Liczba ziaren powinna być ustalona przed rozpoczęciem procesu kalibracji, a uśrednione wyniki wykorzystywane przy procesie oceny modelu.

Kalibracja i walidacja

Sprawdzenie modelu jest dwuetapowe – pierwszym krokiem jest kalibracja, a kolejnym walidacja. Oba procesy mają na celu określenie, jak dobrze model odwzorowuje rzeczywistość i z tego powodu są też często mylone [3]. Kalibracja jest procesem, który pozwala określić jak blisko rzeczywistości jest opracowany model i jak dobrze odzwierciedla rzeczywiste zachowania na sieci. Z kolei walidacja jest procesem weryfikacji, gdzie przy pomocy wcześniej nieużywanych danych potwierdza się zgodność modelu [3]. Przykładowo, w przypadku modeli strategicznych jako walidację rozumie się wykorzystanie 20% punktów pomiarowych wcześniej losowo wydzielonych z bazy pomiarów i na tej podstawie weryfikuje model. Z kolei w skali mikro inny rodzaj danych wykorzystywany jest do kalibracji i walidacji. Ponadto cały proces jest iteracyjny – jeżeli walidacja wykaże, że jej warunki nie są spełnione, wymagany jest powrót do etapu kalibracji w celu poprawy wyników.

Wszystkie dane wykorzystane w procesie kalibracji i walidacji powinny być możliwe do weryfikacji – tj. mierzalne i mające potwierdzenie w rzeczywistości (np. długości odcinków drogowych, czas sygnałów zielonych czy zapis pomiarów ruchu).

Przyjmuje się, że proces kalibracji rozpoczyna się już w trakcie budowy modelu. Precyzyjne odzworowanie sieci czy implementacja poprawnej sygnalizacji są częścią procesu kalibracji, zapewniającym dobrą zgodność z rzeczywistymi warunkami. Kluczową kwestią jest jednak oddanie kwestii ruchowych. Zgodnie z dokumentem TfL [2]] proces kalibracji i walidacji powinien obejmować natężenie ruchu, czas przejazdu, wpływ zgłoszeń, natężenie nasycenia i długość kolejek.

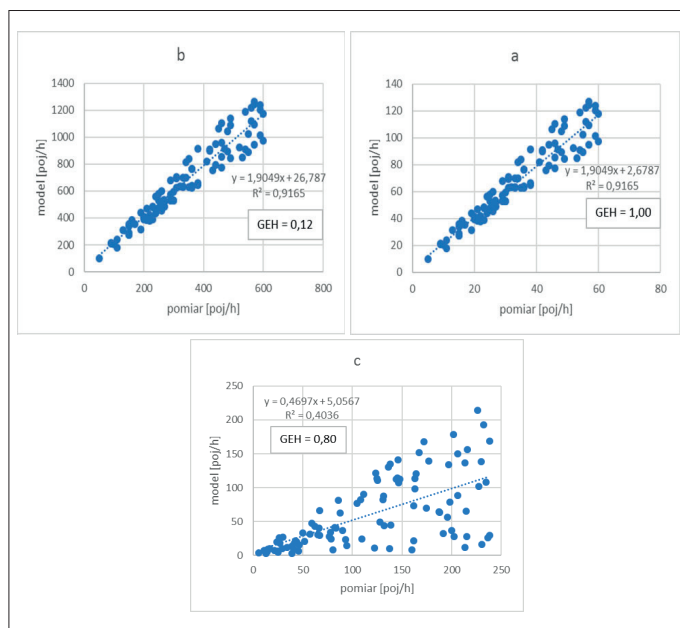
Natężenie ruchu – jakoś odzworowania potoków sprawdzana jest przy pomocy pseudo-statystyki GEH (wzór 1). Badane wyniki powinny być średnią z wielu ziaren. Przyjmuje się, że wynik poniżej wartości 5 dla punktu pomiarowego potwierdza zgodność, a łącznie przynajmniej 85% punktów powinno spełniać ten warunek. Dla obszarów Londynu o bardzo dużym znaczeniu, TfL zaleca zwiększenie wymogów odpowiednio do wartości 3 i 95%.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}} \quad (1)$$

Gdzie:

M – wartość modelowana,
C – wartość obserwowana.

Wskaźnik GEH z uwagi na budowę wzoru kładzie większy nacisk na zgodność dużych natężeń niż mniejszych – dzięki czemu odchylenia dla niskich wartości słabiej wpływają na jakość dopasowania modelu [2] [5]. Nie opiera on bowiem na procentowej różnicy między modelowaną wartością a pomiarową, a uwzględnia również rząd wielkości. W rzeczywistości wahania są nieodłącznym elementem zmienności ruchu, np. zmiana z 10 poj/h do 15 poj/h to wzrost aż o 50%, lecz z praktycznego punktu widzenia nie ma dużego wpływu na działanie sieci. Taka zmiana może wystąpić np. między kolejnymi dniami pomiarowymi, dlatego też wskaźnik GEH traktuje te wartości „łagodnie”. Z kolei różnica pomiędzy 1000 a 1500 poj/h (znowu +50%) jest znacząca i tak też rozumiana jest według wskaźnika GEH. Do prowadzenia testów nie zwykło się stosować współczynnika determinacji R^2 , który obrazuje zachowanie tendencji, a nie samą zgodność wyników. Na rysunku 6 zobrazowano 3 serie teoretycznych wyników, przedstawiających zależność pomiędzy wartością obserwowaną a modelowaną. Część A przedstawia wyniki, gdzie wartość modelowana jest iloczynem wartości pomiarowej i liczby pseudolosowej z przedziału $A = (1,6; 2,4)$, co oznacza, że $model = A \times pomiar$. Średnio parametr A wynosi 2, oznacza to, że przeciętnie model jest w stosunku do wartości obserwowanej większy 2-krotnie. Wartość R^2 wyniosła ponad 0,91 (bardzo dobre dopasowanie), gdy GEH aż 1,00 (pełna zgodność dla wartości granicznej 5). Przykład ten obrazuje, że zachowanie tendencji (wszystkie wartości modelowane większe około 2-krotnie) pozwala osiągnąć dobrą zgodność statystyką R^2 , a ze względu na małe wartości natężeń, warunki dla wskaźnika GEH również są spełnione (wynik prowadzi do refleksji czy użycie wartości 5 jako granicznej nie jest za mało rygorystyczne). Część B przedstawia sytuację, gdzie wyniki są 10-krotnością wyników z części A – obie serie danych zostały przemnożone przez liczbę 10. Ponownie wartość statystyki R^2 wynosi 0,91, pomimo tego, że średnia różnica między daną pomiarową a modelowaną wynosi aż 572 pojazdów. Ten problem wyłapuje wskaźnik GEH, otrzymując poprawny wynik jedynie dla 12% punktów pomiarowych. Przykład ten obrazuje, że opieranie się głównie na statystyce R^2 może dać fałszywy obraz zgodności w modelu i dlatego też tak ważne jest wykorzystywanie wskaźnika GEH przy budowie modeli symulacyjnych. Możliwa jest też sytuacja, w której statystyka R^2 będzie niska, a wartość GEH wysoka, ponieważ pomimo braku jasnej tendencji w wynikach, model będzie dobrze odzwierciedlał rzeczywistość. Tę sytuację obrazuje część C, gdzie wyniki modelowe uzyskano poprzez operację $model = C \times pomiar$, gdzie C jest liczbą pseudolosową z prze-



Rys. 6. Przykładowe zgodności danych pomiarowych i pochodzących z modelu
Źródło: opracowanie własne

działu (0,5;1,5). R^2 wyniósł jedynie 0,40 co oznacza brak zgodności, a wskaźnik GEH wartość 0,80 – co oznacza dobre, choć niewystarczające dopasowanie modelu. Takie sytuacje są możliwe głównie dla niższych potoków ruchu.

Czas przejazdu – modelowane czasy przejazdu powinny być testowane jako średnia z wielu symulacji (ziaren). Powinny zarazem mieścić się w przedziale $\pm 15\%$ od wartości zmierzonej [2] [3]. Test powinien być przeprowadzony zarówno dla pojazdów, które przejechały całą trasę, jak i tylko jej segment. Oznacza to, że jeżeli zmierzony czas przejazdu dotyczy sekwencji skrzyżowań A-B-C, należy porównać czas przejazdu pojazdów poruszających się przez segment A-B, B-C, jak i dla tych, które przejechały całą trasę A-B-C.

Wpływ zgłoszeń [2] – pozwala zbadać, czy sygnalizacje zmiennoczasowe prawidłowo reagują na zgłoszenia na skrzyżowaniach. Możliwe jedynie przy modelu korzystającym z sygnalizacji akomodacyjnych i sterownika VAP lub zewnętrznych. Test polega na porównaniu częstości zmiany sygnału na skrzyżowaniu. Jeżeli potoki zostały prawidłowo zamodelowane, sygnalizacja powinna nadawać sygnały zielone w podobny sposób w modelu jak w rzeczywistości. Wymagane minimum to zgodność w 90% przypadków.

Natężenie nasycenia [2] – zgodność tej miary powinna być sprawdzona dla wlotów wszystkich skrzyżowań. Istnieje możliwość wykorzystania wartości pomierzonych bądź pochodzących ze zweryfikowanych i zatwierdzonych opracowań opartych o programy do symulacji skrzyżowań. Kalibracja tych wartości powinna odbywać się głównie przez kodowanie poprawnych prędkości na wlotach skrzyżowań oraz ostrożną edycję parametrów zachowań kierowców (zwykle – w modelu Wiedemmana 74).

Długości kolejek [2] – nie są typową miarą zgodności modelu, pozwalają jednak określić funkcjonowanie sieci. Z racji na trudności w mierzeniu kolejek (kwestia percepcji

jest bardzo indywidualna i każdy pomiarowy kolejkę może interpretować inaczej), nie stworzono ścisłych wytycznych dot. zgodności. Najważniejszą kwestią jest, by obrazowały one poprawny rząd wielkości. Preferuje się, by były one mierzone w metrach, nie zaś w pojazdach.

Model prognostyczny

Po zakończonym procesie kalibracji i walidacji, uznaje się, że model/modele na rok bazowy zostały ukończone. Kolejnym etapem powinny być prognozy ruchu. Przygotowanie prognoz jest zwykle głównym celem każdego z projektów i pozwala zbadać zachowania komunikacyjne w narzuconych warunkach infrastrukturalnych i społeczno-gospodarczych. Zwykle badaną kwestią jest wprowadzenie konkretnego rozwiązania w układzie drogowym bądź zmiana organizacji ruchu.

Pierwszym krokiem w celu przygotowania prognoz jest ponownie zebranie wszystkich dostępnych danych. Jeżeli model został oparty na informacjach pochodzących z modelu strategicznego, przygotowane tam prognozy mogą być cennym źródłem informacji na temat zmian w ruchu i infrastrukturze. Dane te, głównie prognostyczna więźba ruchu, pozwolą z łatwością określić, jak powinien wyglądać prognostyczny model w wariacie referencyjnym „nic nie zmieniaj”.

Dodatkowo, jeżeli możliwe, należy stworzyć odpowiednie modyfikacje w prognostykach modelu strategicznego w celu zbadania wpływu badanej inwestycji będącej przedmiotem projektu. Jak wspomniano wcześniej, również modelowanie w skali lokalnej powinno być zaangażowane w proces budowy modeli prognostycznych. Przebieg procedury powinien być następujący:

- 1) Modelowanie proponowanych zmian w modelu strategicznym z niską szczegółowością.
- 2) Modelowanie proponowanych zmian w modelu lokalnym z dużą szczegółowością.
- 3) Transfer więźby ruchu z modelu strategicznego do modelu lokalnego.
- 4) Iteracyjny proces optymalizacji sygnalizacji świetlnej (jeżeli dotyczy).
 - a) Przygotowanie programu sygnalizacji świetlnej w modelu w skali lokalnej.
 - b) Przeniesienie programu sygnalizacji do modelu strategicznego.
 - c) Uzyskanie nowych potoków i ponowny transfer macierzy do skali lokalnej, patrz pkt. 3 (proces iteracyjny).
- 5) Wybór preferowanych opcji do dokładnej analizy w skali mikroskopowej – część opcji odrzucona.
- 6) Modelowanie opcji wybranych w pkt. 5 w modelu mikroskopowym z dużą szczegółowością.
- 7) Transfer macierzy ruchu z modelu strategicznego do modelu mikroskopowego.
- 8) Przeprowadzenie symulacji.
- 9) Analiza wyników.

Transfer macierzy ruchu do modelu w skali mikro można rozumieć zarówno jako bezpośrednie przeniesienie macierzy (model dynamiczny lub statyczno-dynamiczny) lub ręczną aktualizację ścieżek (model statyczny). Z kolei itera-

cyjny proces optymalizacji czasów zielonych jest wymagany w celu dostosowania programu do faktycznych warunków ruchowych i uwzględnienia wpływu na rozkład w modelu strategicznym. Wymaga to zarazem oparcia modelu strategicznego na oporze na węzłach, nie zaś odcinkach drogowych, co jest częściej spotykane w Polsce [6]. Oprogramowanie wykorzystywane na Wyspach Brytyjskich, SATURN i Visum z modulem ICA (*Intersection Capacity Analysis*), pozwalają uwzględniać przepustowość skrzyżowań jako istotny parametr wpływający na rozkład ruchu [2].

Powyższy proces jest zadaniem czasochłonnym i wymaga zaangażowania wszystkich poziomów modelowania, jednak pozwala osiągnąć możliwie prawdopodobne wyniki prognoz. Należy zwrócić uwagę, że końcowy wynik prognozy w modelu mikroskopowym jest tak dobry, jak wypadkowa wszystkich poprzednich opracowań – jeżeli model strategiczny nosi znamiona zaniedbań lub błędów, celowość jego wykorzystania powinna budzić wątpliwości i powinna być poddana dokładnej analizie. Rzetelność projektów jest więc tym bardziej istotna, że służą one także jako dane wejściowe do wielu innych analiz na zadanym obszarze.

Jeżeli nie istnieje możliwość wykorzystania istniejących prognoz lub nie ma do nich dostępu, należy je przeprowadzić samodzielnie. W Wielkiej Brytanii istnieją banki informacji TEMPro i TRICS – pierwszy zawiera zmienne objaśniające (np. populację, zatrudnienie), zaś drugi pozwala określić zmianę liczby podróży w zależności od regionu kraju i typu obszaru. Na bazie tych danych istnieje możliwość wykonania prognozy ruchu na zadane lata przy użyciu macierzy z roku bazowego. Podobne bazy funkcjonują także w Irlandii.

Niezależnie od wybranego podejścia, budowa modeli prognostycznych oznacza potrzebę budowy serii macierzy/potoków dla poszczególnych szczytów, horyzontów i scenariuszy. Dla przyspieszenia procesu modelowania, często podejmuje się decyzję o operowaniu na pojazdach umownych, co zmniejsza liczbę wprowadzanych danych do jedynie pojazdów osobowych. Oznacza to również, że model na rok bazowy powinien opierać się na pojazdach umownych.

Oczywiście uzyskanie macierzy ruchu z modelu strategicznego nie jest jedyną operacją niezbędną do wykonania prognoz. Wymagane jest też uwzględnienie innych inwestycji, nie tylko transportowych, szczególnie, gdy może to mieć duży wpływ na modelowany obszar. Pominięcie tego elementu może w rezultacie powodować, że otrzymane wyniki nie są rzetelne i nie powinny być wykorzystane w procesie decyzyjnym. W procesie budowy prognoz wymagany jest też podjęcie innych działań, zależnych od modelowanego obszaru, m.in. zaktualizowanie rozkładów jazdy komunikacji zbiorowej lub uwzględnienie zmian w parkowaniu.

Wyniki symulacji powinny być zestawione pod postacią podstawowych miar, tj. przede wszystkim natężeń, czasów podróży, wielkości czasu traconego, długości kolejek. Wyniki te pozwalają na analizę efektywności poszczególnych wariantów względem scenariusza bezinwestycyjnego oraz pomieędzy poszczególnymi opcjami.

Analiza wielokryterialna wyników

Wyniki otrzymane z modelu pozwalają nie tylko na analizę ruchową, ale także ocenę wpływu na środowisko i wypadkowość. Decyzja o wyborze opcji preferowanych powinna być oparta o wszystkie poniższe aspekty [7]:

- dostępność i czynniki społeczne – analizie należy poddać zmianę dostępności komunikacyjnej wynikającej z proponowanej inwestycji oraz sprawdzić jak różne grupy (np. osoby z wózkiem dziecięcym, niepełnosprawne, starsze) zostały uwzględnione w opracowaniu,
- integracja – należy zbadać, jaki wpływ na powiązania ze wszystkimi gałęziami transportu ma analizowana propozycja; powinno się też uwzględniać zajętość terenu oraz zgodność z lokalną polityką transportową i mobilności,
- aktywizacja – wiąże się z kwestiami zdrowotnymi, ale także jak inwestycja wpływa na aspekty estetyczne,
- środowisko – analiza środowiskowa powinna obejmować zmianę hałasu, emisji spalin i ogólnego wpływu na okoliczny ekosystem,
- bezpieczeństwo – analiza BRD pozwala określić, jak zmienia się zagrożenie na analizowanym obszarze, wliczając w to redukcję punktów niebezpiecznych czy kolizji rowerzystów i pieszych z grupami kołowymi,
- ekonomia – analiza zysku i kosztów jest oparta w dużej mierze na wynikach analiz ruchowych i pozwala określić jak zmiana natężeń i czasów podróży wpływa na ekonomiczny wymiar inwestycji.

Podsumowanie

Na każdym etapie budowy modelu wymagana jest precyzja i planowanie prac. Zakres modelu musi być ustalony na samym początku projektu w celu prawidłowego przeprowadzenia analiz i uniknięcia zbędnych prac. Przy ustaleniu zakresu należy ustalić, jakiego typu ma być model – statyczny, dynamiczny czy statyczno-dynamiczny. Modele powinny być przygotowywane przynajmniej na oba szczyty, lecz jeżeli specyfika lokalizacji tego wymaga, również na okresy niestandardowe, np. weekendy. Zgodnie z wybranym okresem analiz koniecznym jest pozyskanie wszelkich możliwych danych, szczególnie dotyczących aktualnego stanu infrastruktury oraz pomiarów opisujących warunki ruchu.

Niezbędnym elementem przy tworzeniu projektów transportowych jest posiłkowanie się wynikami z pokrewnych analiz oraz wykorzystanie różnych narzędzi symulacyjnych. Dzięki temu istnieje możliwość m.in. oparcia prognoz o już istniejące analizy oraz opracowanie poprawnych programów sygnalizacji. Modele w skali lokalnej (oparte na podstawach inżynierii ruchu) pozwalają także przyspieszyć proces decyzyjny, eliminując już na wstępie najmniej korzystne opcje.

Model na rok bazowy może być oparty o istniejące dane z modeli pokrewnych, ostatecznie jednak musi być powiązany ze wszystkimi uzyskanymi danymi pomiarowymi. Dla modelu w Vissim koniecznym jest przygotowanie odpowiedniej struktury interwałów zapewniających zmienność ruchu, uwzględniając również okres napełnienia sieci poprzedzający analizę, a następnie jej opuszczenia. Elementy te są niezbędne

dla prawidłowej reprezentacji zachowań komunikacyjnych i odzwierciedlenia rzeczywistości. W celu uwzględnienia codziennych zmian w sieci należy stosować ziarna, czyli liczby pseudolosowe wpływające na zachowania na drodze.

Przeprowadzenie rygorystycznego procesu kalibracji i walidacji jest wymagane, by przygotować model odzwierciedlający rzeczywistość. Proces ten powinien być oparty przynajmniej na trzech miarach – potoków na relacjach skrajnych, czasów przejazdu i długości kolejek. Jednak jako proces kalibracji można również rozumieć prawidłowe odwzorowanie prędkości, linii zatrzymań czy zakodowanie funkcjonowania komunikacji zbiorowej zgodnie z rzeczywistością. Do procesu kalibracji i walidacji należy stosować osobne serie danych, gdyż walidacja jest etapem sprawdzającym i potwierdzającym kalibrację.

Zwykle przygotowanie modelu na rok bazowy jest tylko pierwszym etapem, służącym jako baza do prowadzonych analiz prognostycznych. Te ponownie powinny być oparte o wszystkie dostępne dane, wliczając w to inne modele symulacyjne. Koniecznym jest tworzenie przynajmniej dwóch serii modeli – inwestycyjne, uwzględniające przedmiot projektu (zmiana organizacji ruchu, przebudowa infrastruktury) oraz referencyjne, tzw. „nic nie zmieniaj”, gdzie dana inwestycja nie ma miejsca. W obu przypadkach należy jednak uwzględnić wszystkie inne planowane zmiany w sieci. Tak przygotowane modele, uwzględniające zmianę popytu, pozwalają porównać badane warianty i ocenić ich efektywność. Oprócz kwestii ruchowych, wyniki modelu mogą posłużyć do analiz środowiskowych oraz wypadkowości.

Powyższe kwestie są podstawowymi zasadami pracy na modelach w skali mikro w oparciu o oprogramowanie Vissim. Zasady te mogą być też stosowane w innych programach, gdyż np. pokrewny program Paramics również pozwala na korzystanie z ziaren (tzn. „random seed”). Niezależnie od użytego oprogramowania, kwestie modelowe są kluczowymi dla przygotowywania prognoz ruchu i prowadzenia analiz transportowych. Dlatego też każdy z etapów budowy modelu wymaga odpowiedniego podejścia i rzetelności. Choć modele w oprogramowaniu Vissim są zakresem znacznie mniejsze od opracowań strategicznych, wymagają bardzo dużych nakładów pracy i nie powinny być lekceważone jako profesjonalne narzędzie do analiz ruchu.

Literatura

1. *Materiały niepublikowane Firmy Gibb*, Bristol, Wielka Brytania, 2017.
2. *Transport for London, Traffic Modelling Guidelines*, London, 2010.
3. *Transport Infrastructure Ireland, Project Appraisal Guidelines for National Roads Unit 5.1 – Construction of Transport Models*, Dublin: TII, 2016.
4. JCT Consultancy Ltd, 2017. [Online]. Available: <http://www.jctconsultancy.co.uk/>.
5. Jastrzębski W., *Blaski i cienie statystyki GEH do oceny poprawności modeli ruchu*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2016, nr 6.
6. Drabicki A., Szarata A., Kucharski R., *Modelowanie oporu skrzyżowań w modelach makroskopowych*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2016, nr 8.
7. *Galway City Council, Kirwan Roundabout Upgrade Project*, Kraków/Dublin/Glasgow, 2017.