

Modele mikrosymulacyjne sieci kolejowej w studiach wykonalności realizowanych dla PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

Damian Kosicki, Bartosz Uryga, Michał Jasiak



mgr inż. Damian Kosicki

Zakład Budowy Mostów i
Dróg Kolejowych, Politechnika
Poznańska
BBF Sp. z o.o.

damian.kosicki@put.poznan.pl



inż. Bartosz Uryga

Biuro Planowania Strategicznego
PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

bartosz.uryga@plk-sa.pl



mgr inż. Michał Jasiak

Biuro Planowania Strategicznego
PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

michal.jasiak@plk-sa.pl

Potrzeba zmian w procesie przygotowywania dokumentacji przedprojektowej

Istotne zwiększenie środków przeznaczonych na inwestycje w infrastrukturę kolejową w perspektywie UE na lata 2014-2020 wymagało podjęcia działań przez PKP PLK S.A., które umożliwiłyby ich wydanie w jak najbardziej efektywny sposób. Na podstawie doświadczeń z poprzedniej perspektywy unijnej podjęta została decyzja o zmianie podejścia do opracowywania dokumentacji przedprojektowej. Zgodnie z nią studia wykonalności są przygotowywane w oparciu o zestandaryzowane wymagania (na podstawie tzw. bazowego opisu przedmiotu zamówienia), a dużo większa uwaga jest położona na analizy ruchowe. Dotychczas były one wykonywane metodami eksperckimi, w sposób praktycznie uniemożliwiający weryfikację poprawności i realności przyjętych założeń. Dlatego wprowadzone zostały wymagania wykorzystania specjalnych narzędzi informatycznych – komercyjnego oprogramowania mikrosymulacyjnego – które umożliwiają przeprowadzenie symulacji rozkładu jazdy na zadanej infrastrukturze. Dzięki temu analizy ruchowe są dokładniejsze oraz wspierają pro-

ces definiowania rozwiązań inwestycyjnych jak najbardziej dostosowanych do przewidywanego ruchu pociągów. Na dzień 10 września 2015 r. modelami mikrosymulacyjnymi objętych jest nieco ponad 3000 kilometrów istniejących linii kolejowych, a także odcinek projektowanego tunelu średnicowego w Łodzi na odcinku Łódź Fabryczna - Łódź Kaliska/Łódź Żabieniec (rys. 1).

Wprowadzenie teoretyczne

Podstawowym celem stosowania modeli mikrosymulacyjnych jest badanie wzajemnej relacji rozkładu jazdy pociągów i infrastruktury kolejowej. Za ich pomocą można z dużą dokładnością odzwierciedlić ruch pojedynczego pociągu, zależności zachodzące między poszczególnymi pociągami, zasady prowadzenia ruchu kolejowego oraz oddziaływanie typowych zakłóceń na realizację zaplanowanego rozkładu jazdy. Możliwe jest przeprowadzanie analiz zarówno dla pojedynczej linii kolejowej, jak również dla fragmentu sieci. Modele mikrosymulacyjne składają się z trzech zasadniczych części, odpowiadających za odwzorowanie:

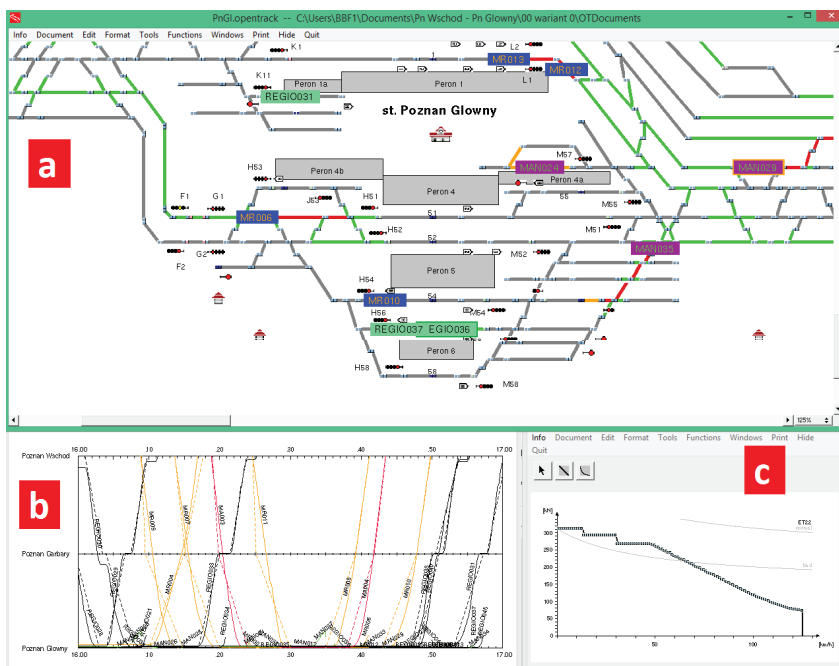
1. infrastruktury kolejowej, na którą składa się warstwa drogi kolejowej oraz warstwa urządzeń sterowania ruchem kolejowym (srk),
2. fizyki ruchu i czasów jazdy pociągów,
3. rozkładu jazdy i zasad prowadzenia ruchu pociągów.

Na tym poziomie widać duże podobieństwo do systemów informatycznych służących do numerycznego opisu sieci kolejowej oraz konstrukcji rozkładu jazdy pociągów, stosowanych m.in. przez PKP PLK S.A. Unikalną możliwością jaką oferują modele mikrosymulacyjne jest przeprowadzanie symulacji ruchu, która pozwala na bezpośrednią obserwację sytuacji ruchowej na linii oraz na wykonywanie różnego rodzaju analiz.

Podstawą do osiągnięcia wymaganej szczegółowości jest mikroskopowy model infrastruktury wykonany w postaci grafu [3]. W przeciwieństwie do modeli makroskopowych, które odwzorowują sieć w sposób uproszczony agregując wiele obiektów i cech infrastruktury, modele mikroskopowe wiernie odwzorowują pojedyncze elementy fizycznie istniejące w terenie (np. tory, rozjazdy, sygnalizatory, punkty zatrzymań pociąg-



1. Mapa przedstawiająca odcinki linii kolejowych, dla których wykonano modele mikrosymulacyjne, lub modele są w trakcie realizacji (kolor niebieski – OpenTrack, kolor zielony – RailSys, kolor żółty – nie dokonano jeszcze wyboru oprogramowania), źródło: materiały PKP PLK S.A.



2. Widok okien programu OpenTrack: 1- układ torowy wraz z aktualnie symulowaną sytuacją ruchową, 2- wykres ruchu, 3 – charakterystyka trakcyjna lokomotywy, źródło: opracowanie własne.

gów itp.), jak i parametry infrastruktury (np. kilometraż, wielkości pochyłeń podłużnych, prędkości drogowe, miejsca widoczności sygnałów itp.). Odzworowywane są wszystkie tory szlakowe, a na posterunkach ruchu tory główne zasadnicze i dodatkowe, a także drogi zwrotnicowe po których odbywają się jazdy na sygnały zezwalające. Na stacjach z dużym znaczeniem ruchu manewrowego mogą być zamodelowane także tory boczne wraz z przebiegami manewrowymi. Przykład modelu układu torowego stacji, odzworowanego wraz z torami bocznymi, przedstawiono na rysunku 2a. Stanowi to podstawę do jednoznacznego odzwierciedlenia w modelu przebiegów wraz ze wszystkimi istotnymi cechami, takimi jak: droga jazdy i droga ochrona, prędkość maksymalna wskazywana przez semafor, odcinek toru na którym obowiązuje zmniejszona prędkość wskazywana przez semafor, sposób zwalniania przebiegu określany przez punkty oddziaływania, czas przygotowania i rozwiązania drogi przebiegu.

Oprócz modelu infrastruktury kolejowej koniecznym elementem jest odzworowanie parametrów taboru, a w szczególności charakterystyk trakcyjnych pojazdów [4, 10] (rys. 2c). Przemieszczanie się pociągów modelowane jest w programie mikrosymulacyjnym w oparciu o równanie ruchu pociągu: przyspieszenia pojazdów obliczane są na podstawie znanej zależności siły pociągowej od prędkości oraz wzorów określających opory ruchu, dobieranych w zależności od typu taboru z którego zestawiony jest skład pociągu. Obliczane jest położenie oraz prędkość pociągów w każdym kroku symulacji.

Opis infrastruktury oraz taboru kolejowego stanowi podstawę do konstrukcji rozkładu jazdy pociągów. Jest on wizualizowany na

wykresie ruchu, który jest jednym z podstawowych narzędzi do przeprowadzania analiz (rys. 2b). Umożliwia on m.in. graficzne przedstawienie zajętości odstępów (szlakowych i stacyjnych), na którą oprócz fizycznego czasu zajęcia toru przez pociąg składają się: czas przygotowania drogi przebiegu, czas przejazdu od punktu widoczności tarczy ostrzegawczej (lub poprzedzającego semafora) do semafora osłaniającego ten odstęp, czas przejazdu od końca odstępu do miejsca minięcia przez koniec pociągu punktu oddziaływania, czas potrzebny na rozwiązanie drogi przebiegu. Pod warunkiem dokładnego opisanie infrastruktury oraz odpowiedniego doboru czasów technologicznych obsługi urządzeń srk umożliwia to wykrywanie konfliktów ruchowych między pociągami, określanie minimalnego czasu następstwa czy obliczanie zdolności przepustowej linii i jej wykorzystania. Oprócz wykresów ruchu typową funkcjonalnością oferowaną przez oprogramowanie do wykonywania mikrosymulacji jest tworzenie graficznego zestawienia zajętości elementów infrastruktury, np. planów użycia krawędzi peronowych. Umożliwia to właściwe stworzenie stacyjnego planu jazd pociągów pasażerskich.

Bardzo praktyczną funkcjonalnością jest możliwość przeprowadzania symulacji ruchu pociągów na podstawie zaplanowanego wcześniej rozkładu jazdy. W teorii można wyróżnić dwa rodzaje symulacji: asynchroniczne i synchroniczne [3]. Pierwszy rodzaj polega na symulowaniu jazd pociągów w sposób nierównoczesny, tj. poczynając od tych o najwyższym priorytecie. Powoduje to, że nie można przeanalizować w wierny sposób wszystkich zależności zachodzących między pociągami. W oprogramowaniu wymaga-

nym przez PKP PLK S.A. przy wykonywaniu dokumentacji przedprojektowej możliwy jest jednak drugi, bardziej zaawansowany rodzaj symulacji synchronicznych. Ruch wszystkich pociągów odwzorowywany jest w sposób dyskretny, z ustalonym krokiem czasowym, który wynosi minimalnie 1 sekundę. Proces symulacji realizowany jest za pomocą kolejki zdarzeń, z których każde odpowiada realnym sytuacjom ruchowym, takim jak uruchomienie pociągu, jazda pociągu, oczekiwanie pod semaforem, postój handlowy, zakończenie biegu pociągu itp. Algorytm sterujący symulacją realizuje kolejno następujące kroki: wybiera zdarzenia z kolejki wg kryterium czasu, realizuje obliczenia związane ze zdarzeniem (np. położenie i prędkość, jakie będą osiągnięte przez pociąg w kolejnym kroku czasowym), tworzy kolejne zdarzenie odpowiadające następnemu krokowi czasowemu i umieszcza je w kolejce. Działanie realizowane jest, dopóki kolejka zdarzeń nie zostanie opróżniona. O ile omówione wcześniej elementy modelu, takie jak opis infrastruktury, są statyczne i jednoznacznie określone w momencie ich zakodowania, o tyle symulacja ruchu nie musi taka być. Wyróżnia się bowiem dwa rodzaje symulacji: deterministyczne i niedeterministyczne. Pierwszy z nich sprowadza się do realizacji zaplanowanego rozkładu jazdy. Jeżeli jest on poprawny, tj. bez kolizji ruchowych oraz z realnymi czasami jazdy, to symulacja przebiegnie zgodnie z tym, co zostało zaplanowane na wykresie ruchu. Rolą takiej symulacji jest weryfikacja ułożonego rozkładu jazdy. Drugi sposób oferuje o wiele większe możliwości badawcze, ponieważ umożliwia zamodelowanie zakłóceń w ruchu pociągów. Odbywa się to przez uwzględnienie w modelu rozkładu statystycznego opóźnień. Rozkład taki powinien być określony na podstawie danych rzeczywistych, które są zbierane w systemach dyspozytorskich (na PKP PLK S.A. w Systemie Ewidencji Pracy Eksploatacyjnej: SEPE). Empiryczny rozkład opóźnień może zostać przybliżony rozkładem teoretycznym o określonych parametrach (np. rozkładem wykładniczym [3]) lub odwzorowany wprost. Dzięki temu możliwa jest analiza dopasowania infrastruktury kolejowej do faktycznych warunków ruchowych odzwierciedlanych nie tylko poziomem obciążenia ruchem, ale także jego jakością (której miarą są odstępowstwa od rozkładu jazdy) specyficzną dla danego fragmentu sieci kolejowej. Ruch pociągów w symulacji podlega zasadom dyspozytorskim, które określają sposób i kolejność wyprawiania pociągów w sytuacjach odbiegających od zaplanowanego rozkładu jazdy. Każdy z pociągów ma przypisane różne warianty tras przejazdu, które określają dobór konkretnych torów na posterunkach ruchu i stacjach. Pociągi i warianty ich tras przejazdu mają przypisane priorytety, które są używane przy określaniu pierwszeństwa podczas odchyłeń od zaplanowanej sytuacji ruchowej.

Modele mikrosymulacyjne w studiach wykonalności

Wykorzystanie w procesie przygotowania dokumentacji przedprojektowej modeli mikrosymulacyjnych, budowanych w nowoczesnym oprogramowaniu komputerowym, jest na polskim rynku całkowitą nowością. Ich stosowanie zostało zainicjowane przez PKP PLK S.A. po raz pierwszy w 2014 r. Było to działanie pionierskie, ponieważ żadna z polskich uczelni, instytutów, firm doradczych i projektowych nie stosowała dotąd tego narzędzia. W związku z tym w celu uporządkowania wymagań oraz metodologii wykonywania modeli opracowano "Wytyczne do budowy modeli mikrosymulacyjnych w PKP Polskie Linie Kolejowe S.A." [14]. Omawiają one m. in.: fazy wykonywania, wytyczne budowy, sposób sprawdzania poprawności i kalibracji modelu oraz sposób wykonywania symulacji.

Sposób wykonywania modelu mikrosymulacyjnego jest ściśle określony. Z jednej strony wynika on z ogólnych zasad modelowania, a z drugiej z dopasowania do struktury opracowywanego studium wykonalności. Modele mikrosymulacyjne opracowywane w ramach studiów wykonalności mają służyć nie tylko weryfikacji poprawności i zasadności realizacji określonych wariantów inwestycyjnych, ale przede wszystkim mają stanowić narzędzie do tworzenia i testowania nowych rozwiązań projektowych. Dlatego PKP PLK S.A. jako zamawiający wymaga ścisłej współpracy twórców modelu z branżystami wykonującymi analizy techniczne i wstępny projekt infrastruktury. Idealną sytuacją byłoby, gdyby wykonawcy modelu i branżysta stanowili jeden zespół projektowy, co w wielu wypadkach niestety nie jest możliwe z powodu podziału pracy nad dokumentacją między wielu podwykonawców. Dla projektów zakładających przebudowę istniejącej infrastruktury kolejowej punktem wyjścia do określenia zakresu rzeczowego wariantów inwestycyjnych jest stan istniejący. Zakłada się ewolucyjne kształtowanie układów torowych oraz ich parametrów. Ponadto niezbędne jest przeprowadzenie weryfikacji i kalibracji modelu, która polega na sprawdzeniu w jakim stopniu wykonany model odzwierciedla rzeczywistość. Z tych dwóch względów w pierwszej kolejności wymagane jest wykonanie modelu stanu istniejącego, który nazywany jest wariantem bazowym. Składa się on z modelu istniejącej infrastruktury oraz istniejącego rozkładu jazdy. Weryfikacja modelu polega nie tylko na sprawdzeniu czy wszystkie elementy poprawnie odzwierciedlono, ale także na tym czy pomiędzy poszczególnymi elementami modelu spełnione są logiczne zależności (np. czy drogi ochronne zachodzące na rozjazdy powodują sprzeczność przebiegów). Dalším etapem sprawdzania działania modelu jest jego kalibracja odbywająca się poprzez

porównanie technicznych (surowych) czasów jazdy z rzeczywistego rozkładu jazdy PKP PLK S.A. z minimalnymi czasami jazdy wyliczonymi w modelu. Powstałe rozbieżności mogą być spowodowane nie tylko odmiennym sposobem obliczania czasów jazdy, ale także niewychwyconymi wcześniej błędami w odwzorowaniu infrastruktury. Zweryfikowany i skalibrowany model stanu bazowego jest podstawą do tworzenia modeli wariantów inwestycyjnych. Wymogi tworzenia dokumentacji przedprojektowej określają, że jej wykonawca musi przedstawić cztery różne warianty inwestycyjne, w tym przynajmniej jeden wariant ograniczonego zakresu. Kluczem do wypracowania właściwych rozwiązań projektowych jest znalezienie zależności pomiędzy rozkładem jazdy a infrastrukturą. Z jednej bowiem strony infrastruktura kolejowa ogranicza możliwości konstrukcji rozkładu jazdy. Natomiast z drugiej, aby oferta przewozowa była konstruowalna na wykresie ruchu, może wymagać konkretnych rozwiązań infrastrukturalnych. Zatem środek ciężkości analiz powinien być położony na dostosowanie linii kolejowej do wymagań wynikających z prognozowanej oferty przewozowej. W założeniach prognoza ta ma wynikać z makroskopowego modelu ruchu, jednak nie zawsze jest możliwe zebranie zestawu danych umożliwiających stworzenie wiarygodnego modelu. W takim przypadku oferta przewozowa w segmencie przewozów pasażerskich przewidywana jest na podstawie dokumentów strategicznych właściwych organizatorów transportu, planów przewoźników lub na podstawie minimalnych standardów ofertowych. Natomiast w zakresie przewozów towarowych przyjmowana jest metoda tworzenia tras katalogowych, układanych w ramach wolnej przepustowości. Należy podkreślić, że przy prawidłowo wykonanym makroskopowym modelu ruchu pomiędzy modelami powinno zachodzić sprzężenie zwrotne. Czas przejazdu, częstotliwość obsługi czy rodzaj (pojemność) dobranego taboru, określone w mikrosymulacji, są używane w procedurze rozkładu ruchu na sieć i mają wpływ m. in. na podział zadań przewozowych w modelu makrosymulacyjnym. Praca nad konstrukcją oferty przewozowej i schematem funkcjonalnym linii powinna być wspomagana wstępnymi symulacjami i analizami ruchu pociągów. Jest to proces iteracyjny: jeżeli to zasadne, to wstępne analizy wykonywane w modelu wariantów inwestycyjnych powinny prowadzić do refleksji skutkującej zmianami rozwiązań projektowych. Jego wynikiem powinny być propozycje układów torowych i urządzeń srk dostosowane do przeniesienia prognozowanego obciążenia ruchowego przy zachowaniu niezbędnych rezerw przepustowości.

Opis oprogramowania

W modelach wykonywanych na rzecz PKP PLK S.A. wykorzystywane jest wiodące na świecie oprogramowanie mikrosymulacyjne. Z 30 projektów 21 zostało wykonanych w programie OpenTrack firmy OpenTrack Railway Technology Ltd (Zürich), natomiast 9 w pakiecie RailSys firmy Rail Management Consultants GmbH (Hannover). To oprogramowanie jest używane powszechnie w wielu krajach do wsparcia procesu modernizacji infrastruktury i tworzenia rozkładu jazdy: przykładowo w pierwszym z nich wykonano model holenderskiej sieci kolejowej na użytek planowania rozkładu jazdy [5], a w drugim studium wykonalności dotyczące cyklicznego rozkładu jazdy pociągów dalekobieżnych w Niemczech [1, 2]. W założeniach oba programy oferują wiele podobnych funkcjonalności, jednak różnice między nimi objawiają się w sposobie ich realizacji. Największą różnicą między programami jest oferowana przez RailSys'a możliwość obliczania technicznych czasów jazdy pociągów bezpośrednio w momencie konstrukcji rozkładu jazdy, bez konieczności uruchamiania symulacji, która z kolei jest wymagana w OpenTrack'u. RailSys oferuje także automatyczne wykrywanie kolizji między pociągami i wizualizację ich na wykresie ruchu poprzez zaznaczanie części wspólnych zachodzących na siebie prostokątów symbolizujących zajęcie odstępu. Z kolei OpenTrack oferuje bardziej elastyczne możliwości odwzorowania warstwy sterowania ruchem kolejowym, w szczególności dokładniej można odwzorowywać sposób zwalniania przebiegów oraz łatwiej zindywidualizować przypisane im czasy przygotowania i rozwiązania drogi przebiegu. Ponadto warto zaznaczyć, że RailSys umożliwia przeprowadzenie obliczeń przepustowości metodą kompresji zgodnie z kartą UIC 406 [11] w sposób automatyczny przez dedykowany moduł oprogramowania. Natomiast w OpenTrack'u obliczenia przepustowości metodą kompresji muszą być wykonane ręcznie przez użytkownika.

Przykład kompleksowej analizy z wykorzystaniem oprogramowania mikrosymulacyjnego

Przegląd spektrum zagadnień, jakie mogą być przedmiotem analiz z wykorzystaniem oprogramowania mikrosymulacyjnego, można przedstawić na przykładzie studium wykonalności budowy łódzkiego tunelu średnicowego, łączącego stację Łódź Fabryczna ze stacjami Łódź Kaliska i Łódź Włókniarzy [12]. Analizy rozpoczęto od sprawdzenia zależności pomiędzy maksymalną prędkością projektową a czasem przejazdu. W przypadku tego projektu miało to szczególnie istotne znaczenie ze względu na małe odległości pomiędzy przystankami i stacjami, a

także głowicami rozjazdowymi, na których niezbędne jest ograniczanie prędkości, z uwagi na jazdę na kierunki zwrotne rozjazdów. Jednocześnie projektowanie układów torowych na prędkości, których pociągi nie są w stanie w rzeczywistości osiągnąć, lub które nie przynoszą zauważalnych oszczędności czasu są częstym zarzutem podnoszonym wobec modernizacji linii kolejowych [7]. Wykonano 40 symulacji jazd pociągów kilku kategorii, obsługiwanych różnym taborem i dla różnych poziomów prędkości maksymalnych. Wyniki analizy pozwoliły udowodnić, że projektowanie układu torowego w tunelu średnicowym na prędkości większe niż 100 km/h przynosi znikome skrócenie czasu jazdy pociągów aglomeracyjnych i regionalnych (zatrzymujących się na wszystkich stacjach i przystankach), a projektowanie układu torowego na prędkości większe niż 140 km/h nie przyniesie już zysków czasowych dla żadnego z symulowanych pociągów. Prędkość maksymalna ma również wpływ na długość drogi hamowania, warunkującą minimalne długości odstępów. Analizie poddano także to zagadnienie. Ostatecznie biorąc pod uwagę zyski czasowe, nakłady niezbędne do osiągnięcia danej prędkości i długości odstępów wynikające z prędkości maksymalnej zarekomendowano prędkość równą 100 km/h.

W kolejnym kroku przeprowadzono analizę przepustowości projektowanego odcinka linii kolejowej. Miała ona dać odpowiedź na pytanie o wpływ budowy przystanków na długości tunelu średnicowego na przepustowość linii. Istniała obawa, że lokalizacja kilku (maksymalnie trzech) przystanków będzie skutkowała nadmiernym zmniejszeniem zdolności przepustowej, co stanie się przeszkodą w realizacji atrakcyjnej oferty przewozowej. Przepustowość obliczono metodą bazującą na kompresji tras pociągów (opis oryginalnej metody przedstawia karta UIC 406 [11]). Wykorzystanie w analizach oprogramowania symulacyjnego pozwoliło uwzględnić takie elementy jak kolizyjność ruchu na głowicach rozjazdowych i zajętości torów stacyjnych. Te aspekty są najczęściej pomijane przy stosowaniu metody kompresji tras pociągów, prowadząc do przeszacowania wyników obliczeń [6]. Analizy przepustowości zostały zilustrowane ponadto wykresami procentowego udziału czasu zajętości poszczególnych elementów infrastruktury takich jak tory stacyjne, odstępy szlakowe i rozjazdy. Pozwoliło to zidentyfikować najbardziej obciążone elementy układu torowego, a w przypadku odstępów samoczynnej blokady liniowej – zweryfikować lokalizację semaforów sb1 dla uzyskania zbliżonych czasów zajętości wszystkich odstępów na danym szlaku.

Symulacja daje możliwość uwzględnienia w analizach ruchowych czynników losowych, takich jak opóźnienia pociągów, pojawiające się w codziennej eksploatacji.

Pozwala to na ocenę zdolności układu do tłumienia zakłóceń ruchu. W przytaczanym studium symulowano losowe opóźnienia pociągów pojawiających się w modelu, o znanym rozkładzie prawdopodobieństwa i sprawdzano średnie wartości opóźnień pociągów opuszczających model. Pozwoliło to określić średnie wartości opóźnień, które mogą być zredukowane podczas przejazdu na długości rozpatrywanego odcinka. Przeprowadzono analizę porównawczą różnych wariantów realizacji inwestycji, której wyniki okazały się zgodne z zależnością teoretyczną – warianty o wyższym poziomie wykorzystania zdolności przepustowej charakteryzowały się mniejszą zdolnością do tłumienia zakłóceń ruchu. Należy jednak zwrócić uwagę, że na polskiej sieci kolejowej nie są obecnie określone minimalne poziomy zdolności do tłumienia zakłóceń ruchu, co powinno być, zdaniem autorów, przedmiotem szerszej dyskusji. Na przykład na niemieckiej sieci kolejowej wg [13] określa się maksymalną sumaryczną wartość opóźnień wtórnych, które odpowiadają akceptowalnej przez rynek jakości ruchu. Wartość ta jest uzależniona od udziału pociągów pasażerskich w całkowitym obciążeniu ruchowym.

W symulacjach z losowo generowanymi opóźnieniami sprawdzono także zasadność budowy dodatkowej stacji w tunelu średnicowym, wyposażonej w tory główne dodatkowe, w założeniach mające skrócić czas następstwa pociągów przy długich postojach handlowych warunkowanych czasem wymiany podróżnych. W symulacji przypisano wszystkim pociągom aglomeracyjnym i regionalnym możliwość opcjonalnego zjazdu na tor główny dodatkowy w przypadku zajęcia toru głównego zasadniczego przez inny pociąg. Okazało się jednak, że w ciągu całej doby z tej możliwości algorytm dyspozytorski programu korzystał incydentalnie. Dalsza szczegółowa analiza symulacji wykazała, że mała odległość od sąsiednich stacji, a także duże znaczenie kolizyjności ruchu na sąsiednich głowicach rozjazdowych przesądza o braku zasadności budowy stacji na długości tunelu średnicowego. Co więcej brak stacji pozwala na większą swobodę lokalizacji semaforów samoczynnej blokady liniowej, co korzystnie wpływa na zmniejszenie minimalnego czasu następstwa pociągów.

Praktyczne wnioski dla projektowania

Z wykorzystania w analizach ruchowych modelu mikrosymulacyjnego wynikają praktyczne zalecenia dla kształtowania rozwiązań technicznych podczas remontów i modernizacji sieci kolejowej. Wnioski te można podzielić na dwie grupy:

- wynikające bezpośrednio z prostej analizy statystyk generowanych przez program po zakończeniu symulacji,
- wynikające ze szczegółowej analizy sy-

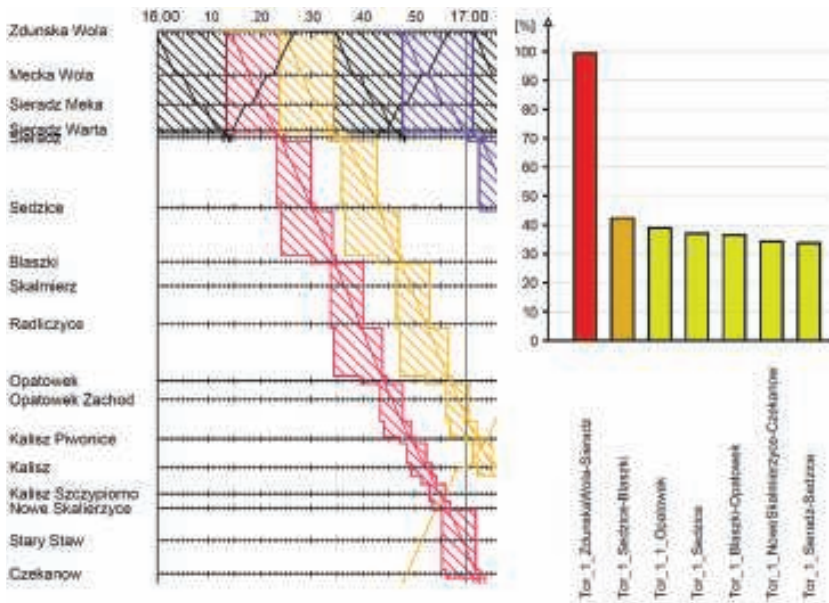
mulowanej sytuacji ruchowej, wymagające przeprowadzenia wielu cykli symulacyjnych, z różnymi scenariuszami opóźnień.

Przykładem zaliczającym się do pierwszej grupy jest zidentyfikowanie niewystarczającej zdolności przepustowej szlaku Zduńska Wola – Sieradz w studium wykonalności dla prac na linii kolejowej nr 14 i 811, na odcinku Łódź Kaliska – Zduńska Wola – Ostrów Wielkopolski [8]. Wniosek ten wynikał z analizy wykresu obrazującego czas zajętości poszczególnych elementów infrastruktury – krytyczny szlak w godzinie szczytowej obciążony był przez blisko 100% czasu (rys. 3). Jako rozwiązanie powyższego problemu zaproponowano podział szlaku za pomocą posterunku odstępowego. Jego dokładne umiejscowienie określono na podstawie pochodzących z mikrosymulacji danych o czasie zajętości poszczególnych odstępów (na jednym z nich zlokalizowany jest przystanek osobowy). Celem było wzajemne zrównoważenie tych czasów, pozwalające na najlepsze zdefiniowanie maksymalnej przepustowości szlaku.

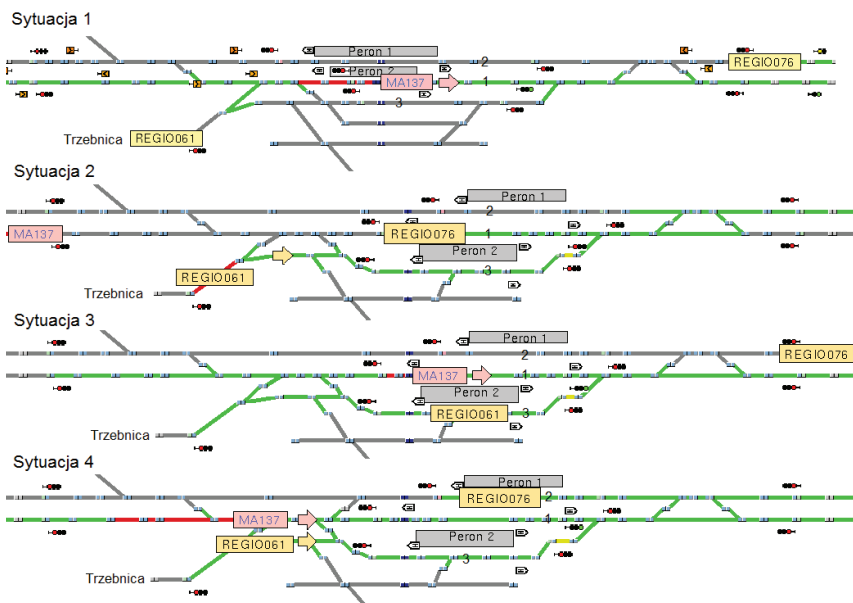
Do drugiej grupy można zaliczyć wnioski o niewystarczającej funkcjonalności układu torowego stacji Wrocław Psie Pole, zawarte w studium wykonalności dla prac na linii kolejowej nr 143 na odcinku Kluczbork – Oleśnica – Wrocław Mikołajów [9]. Jednocześnie przykład ten jest dobrą ilustracją iteracyjnej metody projektowania infrastruktury, w celu jak najlepszego jej dostosowania do wymagań ruchowych. W pierwszej kolejności przeanalizowano istniejący układ torowy stacji Wrocław Psie Pole. Ponieważ pociągi regionalne z i do Trzebnicy wjeżdżają wyłącznie na tor drugi, w trakcie symulacji z opóźnieniami często dochodziło do sytuacji 1 zilustrowanej na rys. 4. Pociągi regionalne (REGIO061 i REGIO076) zatrzymywane były przed semaforami wjazdowymi stacji ze względu na ułożenie drogi przebiegu dla pociągu dalekobieżnego (MA137) po torze drugim. Po zwolnieniu toru drugiego najpierw obsługiwany był pociąg z Trzebnicy (REGIO061), a dopiero następnie pociąg do Trzebnicy (REGIO076). Jako rozwiązanie powyższego problemu zaproponowano zmianę lokalizacji peronu nr 2 na międzytorze nr 1 i 3. Dzięki temu pociągi z i do Trzebnicy mogły być przyjmowane na dwóch torach stacyjnych, ale i tak prowadziło to, w zależności od scenariusza opóźnień, do sytuacji 2 lub 3 zobrazowanych na rys. 4. W sytuacji 2 pociąg MA137 był zatrzymywany przed semaforem wjazdowym, ze względu na obsługę na stacji obu pociągów regionalnych. W sytuacji 3 pociąg REGIO076 był zatrzymywany przed semaforem wjazdowym ze względu na ułożoną drogę przebiegu dla pociągu MA137. Jednocześnie wjazd pociągu REGIO076 był kolizyjny z wyjazdem pociągu REGIO061, co znacznie zwiększało opóźnienia. Uznano, że również taki układ torowy nie

Materiały źródłowe

- [1] Anlagen Z20/SeV/288.3/1324/LA15 Machbarkeitsstudie zur Prüfung eines Deutschland -Takts im Schienenverkehr. Opracowano na zlecenie Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015.
- [2] Bericht Z20/SeV/288.3/1324/LA15 Machbarkeitsstudie zur Prüfung eines Deutschland -Takts im Schienenverkehr. Opracowano na zlecenie Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015.
- [3] Hansen I, Pacht J. (red). Railway timetable & traffic. Eurailpress, 2008.
- [4] Huerlimann D., Nash A. OpenTrack. Simulation of Railway Networks. Version 1.6. OpenTrack Railway Technology Ltd. and ETH Zurich, Institute for Transport Planning and Systems
- [5] Koopman D., Assessment of operational feasibility, Dutch network, Timetable 2014-2015. Royal HaskoningDHV. Prezentacja z konferencji IT15.rail: The Industrialized Railway, 2015.
- [6] Linder T. Applicability of the analytical UIC Code 406 compression method for evaluating line and station capacity. Journal of Rail Transport Planning Management, 1 (1), pp. 49-57, 2011.
- [7] Maciąg M., Rytel K. Ocena efektywności modernizacji i remontów linii kolejowych w Polsce. Raport 3/2006. Centrum Zrównoważonego Transportu, Warszawa 2006.
- [8] Opracowanie dokumentacji przedprojektowej dla prac na liniach kolejowych nr 14, 811, na odcinku Łódź Kaliska – Zduńska Wola – Ostrów Wielkopolski. BBF Sp. z o.o., 2015.
- [9] Opracowanie dokumentacji przedprojektowej dla projektu "Prace na linii kolejowej nr 143 na odcinku Kluczbork – Oleśnica – Wrocław Mikołajów". BBF Sp. z o.o., 2015.
- [10] RailSys User Manual 9. Rail Management Consultants GmbH, 2014.
- [11] UIC leaflet 406, Capacity. UIC International Union of Railways, France 2004.
- [12] Uzupełniające studium wykonalności wraz z dokumentacją przetargową dla wariantu XIV tunelu średnicowego realizowanego w ramach budowy linii kolejowej w tunelu od stacji Łódź Fabryczna do linii nr 15. SAFAGE Oddział w Polsce, Schuessler – Plan Inżynierzy Sp. z o.o., BBF Sp. z o.o., 2015.
- [13] Verkehrswissenschaftliches Institut, RWTH Aachen University. Influence of ETCS on line capacity – Generic study. UIC International Union of Railways, Paris 2008.
- [14] Wytyczne do budowy modeli mikrosymulacyjnych ruchu kolejowego w PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Wersja 1.0. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2015.



3. Przykład identyfikacji niewystarczającej zdolności przepustowej szlaku Zduńska Wola – Sieradz w wyniku symulacji przeprowadzonych w programie OpenTrack, źródło: [8]



4. Analiza funkcjonalności układu torowego stacji Wrocław Psie Pole – wizualizacja różnych sytuacji ruchowych, pojawiających się w trakcie symulacji w programie OpenTrack, źródło: [9]

jest właściwie przystosowany do zakładanego obciążenia ruchowego, tym bardziej, że ze względu na brak czynnych posterunków zapowiadawczych na linii nr 326, mijanie pociągów kursujących z i do Trzebnicy będzie się odbywało właśnie na stacji Wrocław Psie Pole. Ostatecznie zaproponowano dobudowę półtrapezu na wschodniej głowicy stacji, umożliwiającego wyjazd z toru drugiego w kierunku Trzebnicy, co znacznie zwiększy funkcjonalność układu torowego stacji (sytuacja 4 na rys. 4) i pozwoli na zwiększenie zdolności do tłumienia opóźnień.

Podsumowanie

Wprowadzenie obowiązku sporządzania modeli mikrosymulacyjnych sieci kolejowej na etapie opracowywania dokumentacji przed-

projektowej pozwala na istotną poprawę jakości analiz ruchowych, a w konsekwencji na racjonalne projektowanie przebudowy i modernizacji układów torowych pod kątem wymagań ruchowych. Nowoczesne oprogramowanie mikrosymulacyjne umożliwi wiernie odwzorowywanie układu torowego, urządzeń sterowania ruchem kolejowym, parametrów taboru, rozkładu jazdy i sposobu prowadzenia ruchu pociągów. Dobrze opracowany model mikrosymulacyjny może być bardzo dużym wsparciem dla projektantów branżowych, dającym możliwość porównywania szczegółowych rozwiązań technicznych i poszukiwania rozwiązań najlepiej przystosowanych do prognozowanego obciążenia ruchowego. ◀