

Kolejowy Model Towarowy – Model Ruchu na potrzeby PKP Polskich Linii Kolejowych SA¹

MACIEJ KACZOREK

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA,
Politechnika Warszawska, Wydział
Transportu

MIKOŁAJ KLIKOWSKI

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA

ADAM KONARSKI

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA

STANISŁAW LENART

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA

BARTŁOMIEJ MIKULSKI

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA

MICHAŁ MOKRZAŃSKI

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA

MICHAŁ PYZIK

mgr inż., PKP Polskie Linie Kolejowe SA
e-mail: michal.pyzik@plk-sa.pl

Streszczenie: PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. nie posiadały dotychczas systemu pozwalającego na potencjalne ocenianie reakcji rynku przewozów towarowych na wprowadzane w sieci zmiany parametrów ruchu. Artykuł traktuje o przyjętych dla budowy Modelu Ruchu założeniach, wybranych zastosowanych rozwiązaniach oraz uzyskanych wynikach. W ramach prac nad Modelem Ruchu podjęto próbę stworzenia 5-stopniowego modelu towarowego opartego o następujące kroki: generacja ruchu, rozkład przestrzenny ruchu, podział zadań przewozowych, załadunek towarów na pojazdy i rozkład ruchu na sieć. Zidentyfikowano brak dostępnych danych, pozwalających na rzetelne odwzorowanie każdego z pięciu kroków modelu, co doprowadziło do decyzji o odwzorowaniu wyizolowanego ruchu kolejowego. Efektem powyższego jest nazwanie go Kolejowym Modelem Towarowym, w którym zawężono model 5-stopniowy do 3 kroków: 1. załadunek na pojazdy – podział ruchu na składy z uwzględnieniem wykorzystywanej długości pociągu, 2. rozkład ruchu na sieć, 3. obliczenie wolumenu przewożonego towaru na podstawie ruchu bazowego i różnic w efektywnych parametrach sieci. Każdy z kroków został scharakteryzowany w treści referatu.

Słowa kluczowe: modelowanie transportu, transport towarowy, transport kolejowy, przepustowość

Geneza Kolejowego Modelu Ruchu

Wymóg wdrożenia modelu ruchu przez zarządcę infrastruktury kolejowej został zapisany w Dokumentie Implementacyjnym do Strategii Rozwoju Transportu do 2020 roku (z perspektywą 2030). PKP Polskie Linie Kolejowe SA nie posiadały systemu pozwalającego na potencjalne ocenianie reakcji rynku przewozów pasażerskich i towarowych na wprowadzane w sieci zmiany parametrów ruchu. Poszczególne inwestycje firmy prowadzone były w oparciu o punktowe/odcinkowe Studia Wykonalności, gdzie przeprowadzano proces weryfikacji korzyści z przeprowadzenia inwestycji tylko i wyłącznie dla ograniczonego obszaru oddziaływania inwestycji. Dla spółki istotnym jest możliwość zbadania i wykazania wpływu inwestycji na funkcjonowanie rynku przewozów w skali kraju, a także podejmowanie decyzji inwestycyjnych z wykorzystaniem rekomendacji pochodzących z analiz. Model Ruchu PKP

PLK SA (dalej w tym kontekście używa się sformułowań Model Ruchu lub Model, w odróżnieniu od innych modeli i modelu jako pojęcia) pozwala na porównanie oferty przewozów kolejowych z innymi gałęziami transportu. Brak tego typu narzędzia skutkowało czasochłonnością prowadzenia analiz oraz zwiększało ryzyko podjęcia niefortunnych decyzji, dotyczących zakresu prac inwestycyjnych. W efekcie przeprowadzane prace inwestycyjne mogły okazać się nieadekwatne do potrzeb, a środki przeznaczane na ich realizację mogły zostać nieefektywnie wykorzystane. Jest to istotne ze względu na skalę finansową zadań inwestycyjnych oraz czasochłonność ich realizacji. Błędnie podjęte decyzje dotyczące zakresu inwestycji w najgorszym przypadku mogą spowodować pogorszenie oferty kolei w stosunku do stanu dotychczasowego.

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

Jednym z celów Modelu Ruchu jest wsparcie decyzji o remoncie bądź budowie konkretnych linii czy odcinków i wymiarowania ich parametrów. Z tego też powodu zespół nie mógł zaadaptować jednego z istniejących modeli międzynarodowych (np. Transtools). Byłoby to nieocenione wsparcie w sytuacji braku danych polskich umożliwiających stworzenie modelu pięciostopniowego. Niestety, modele takie – skupione na obszarze Europy – charakteryzują się mniejszą dokładnością w wymiarze krajowym i regionalnym.

Doświadczenia zagraniczne wskazują, że warunkiem koniecznym do tego, aby uzyskiwać dokładne wyniki, jest stałe aktualizowanie Modelu, również po uzyskaniu jego działającej wersji, a także systematyczne wprowadzanie ulepszeń oraz nowych rozwiązań. Opracowany i opisany w niniejszym referacie Model Towarowy stanowi bazę umożliwiającą wprowadzanie ulepszeń w kolejnych etapach rozwoju. Struktura danych stanowiących Model przygotowana jest tak, aby możliwe były regularne aktualizacje po zakończeniu projektu, w zakresie sieci, danych o grupach produktowych itd.

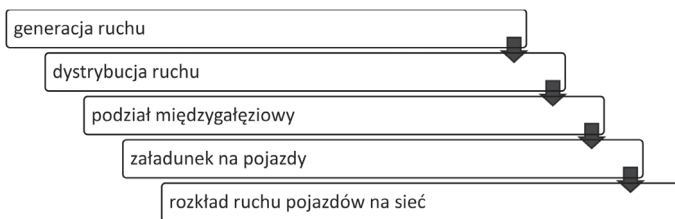
¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2018. Wkład autorów w publikację: M. Kaczorek – 10%, M. Klikowski – 10%, A. Konarski – 10%, S. Lenart – 15%, B. Mikulski – 20%, M. Mokrzański – 10%, M. Pyzik – 25%.

Geneza Kolejowego Modelu Towarowego

Przemieszczenia ładunku towarowego uzupełniają obraz ruchu na sieci transportowej, którego część składową – ruch pasażerski – opisano w referacie *Model Ruchu na potrzeby PKP Polskie Linie Kolejowe SA – komponent pasażerski*. Ruch pasażerski i towarowy posiadają inną charakterystykę: w modelu pasażerskim decyzje podejmowane są w sposób rozproszony, a ich modelowanie jest możliwe tylko w ujęciu stochastycznym. W Modelu Towarowym ładunek nie ma wpływu na to, dokąd zmierza (i jakim środkiem transportu), takie decyzje podejmowane są przez zewnętrznych aktorów – przewoźników, spedytorów, nadawców i odbiorców. Stąd też, o ile model pasażerski koncentruje się na odwzorowaniu paradygmatu postrzegania podróży przez pojedynczego pasażera, o tyle model towarowy skupia się na odwzorowaniu mechanizmu decyzyjnego wspomnianych aktorów.

Podjęcie klasyczne – model pięciostopniowy

Klasyk, opisywany w literaturze [1] model towarowy (pięciostopniowy) składa się z następującej sekwencji czynności:



Rys. 1. Sekwencje czynności w modelu pięciostopniowym wykorzystywanym w modelowaniu ruchu towarowego

Źródło: opracowanie własne

Pozornie dodatkowa – w stosunku do modelu pasażerskiego – czynność załadunku na pojazdy, czyli przeliczenia wolumenu towarów przez średnie napełnienie pojazdów (należy zwrócić uwagę, że podobna operacja jest stosowana dla potoków pasażerów korzystających z samochodów) została wyodrębniona ze względu na nietrywialność zadania, a także wpływ utylizacji pojazdu na wybór gałęzi transportu.

Dostępność danych i jej następstwa

Pierwotnym założeniem Modelu było zbudowanie pełnego, komplementarnego do pasażerskiego, modelu towarowego. Niestety, w toku prac stwierdzono, że w chwili obecnej nie jest to możliwe, ze względu na brak wystarczających danych pozwalających porównać dwie wiodące gałęzie transportu towarowego tj. kolejową i drogową. O ile ta druga, dzięki wielu badaniom (w tym zwłaszcza badaniom Głównego Urzędu Statystycznego – GUS) jest stosunkowo dobrze zbadana, to w zakresie przewozu ładunków kolejją zakres dostępnych danych jest niewystarczający.

Statystyki prowadzone przez zarządcę infrastruktury kolejowej (SOLK, d. OBLIKO) – PKP Polskie Linie Kolejowe SA – dotyczą wyłącznie masy brutto pociągu i długości składów. W statystykach tych dzieli się pociągi na następujące kategorie:

- TG – pociągi towarowe w ruchu międzynarodowym: ładunki masowe i ruch transgraniczny,
- TK – pociągi towarowe w ruchu krajowym: pociągi towarowe do obsługi stacji i bocznicy w obszarze oddziaływania stacji przelotowej,
- TM – pociągi towarowe w ruchu krajowym: dla przewozu towarów masowych składy załadowane oraz puste,
- TN, TL – pociągi towarowe w ruchu krajowym: dla przewozu towarów innych niż masowe w pojedynczych i pogrupowanych wagonach,
- TP - pociągi towarowe w ruchu krajowym: pociągi dużej prędkości do przewozu cargo w pojedynczych i pogrupowanych wagonach,
- TA, TB – krajowe i międzynarodowe pociągi towarowe dla przewozów priorytetowych,
- TC, TD – krajowe i międzynarodowe pociągi towarowe dla przewozów intermodalnych.

Podział pociągów na poszczególne kategorie w żaden sposób nie ujawnia i nie może ujawniać podróży poszczególnych towarów – ta wiedza bowiem jest uznawana przez przewoźników za istotną tajemnicę handlową. Należy nadmienić, że mimo ubóstwa dostępnych danych SOLK jest dla polskiego rynku przewozów kolejowych jedynym źródłem zdezagregowanych danych.

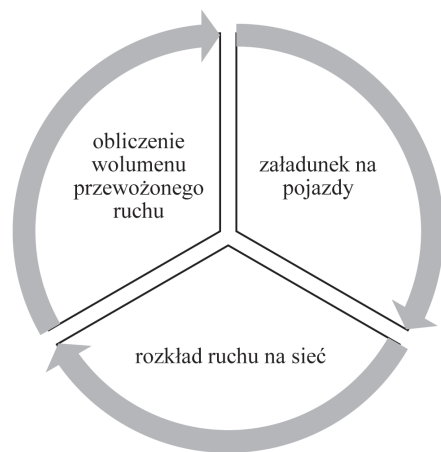
W Modelu Ruchu, ze względu na oczekiwane zastosowanie, zdecydowano się na odwzorowanie wyizolowanego ruchu kolejowego. Efektem powyższego jest nazwanie go Kolejowym Modelem Towarowym (KMT). Wstępnie poczynione rozpoznanie wskazało, iż generacja i dystrybucja ruchu towarów przewożonych koleją (w tym rodzaju przewożonych ładunków, np. koks, rudy żelaza) istotnie się różnią. Z tego też powodu niemożliwe okazało się powiązanie przewozów towarowych: kolejowych i – dużo bardziej szczegółowo rozpoznanych – drogowych.

Działanie Kolejowego Modelu Towarowego

Mając na uwadze opisane w poprzedniej części ograniczenia w dostępności danych, konieczna stała się przebudowa łańcucha czynności na następujący:

1. obliczenie wolumenu przewożonego ruchu – obliczenie wolumenu przewożonego ruchu na podstawie ruchu bazowego i (dla horyzontów przyszłych) zmian globalnego popytu czy zmiany kosztów prowadzenia przewozów.
2. załadunek na pojazdy – podział ruchu na składy z uwzględnieniem możliwej i wykorzystywanej długości pociągu,
3. rozkład ruchu na sieć.

Ponieważ zmiany kosztów prowadzenia przewozów są zależne m.in. od dynamicznego stanu sieci (czyli np. wykorzystania przepustowości odcinków sieci), czynności powyższe wykonywane są w pętli, aż do uzyskania stabilnego stanu, w którym zmiany liczby pociągów i przewożonego wolumenu będą niewielkie – prowadzone prace wykazały, że dla jego uzyskania potrzebne jest maksymalnie 5 iteracji.



Rys. 2. Sekwencje czynności w Kolejowym Modelu Towarowym
Źródło: opracowanie własne

Strukturalnie Kolejowy Model Towarowy można podzielić na dwie zasadnicze części:

- część podażową, na którą składają się informacje o sieci transportowej; część podażowa jest odpowiedzialna za podanie właściwych informacji umożliwiających trasowanie pociągu,
- część popytową, na którą składają się informacje o przewozach ładunków; część popytowa odwzorowuje ogół decyzji aktorów.

Jako baza dla systemu podaży w Kolejowym Modelu Towarowym została przyjęta sieć opracowana na potrzeby modelu pasażerskiego. Na potrzeby budowy KMT opisany tam graf sieci uszczegółowiono o informacje niezbędne do przeprowadzenia modelowania ruchu pociągów towarowych.

Model popytu Kolejowego Modelu Towarowego ma za zadanie odwzorować występujące kierunki przewozu ładunków. Odwzorowuje on matematycznie ogół decyzji aktorów, podejmowanych na podstawie ofert hipotetycznego przewozu konstruowanych na bazie systemu podaży. Wynikami działania systemu są potoki ruchu pociągów (liczba składów) i wielkość strumienia ładunku przewożonego przez te pociągi (w tonach).

Obliczenie wolumenu przewozów

Model używa Bazowych Macierzy Przemieszczeń (BMP) jako stanu odniesienia dla stanu istniejącego i prognoz w kolejnych latach. Bazowe Macierze Przemieszczeń zawierają obraz przemieszczeń ogółu ładunków uzyskany na podstawie informacji o przejazdach pociągów.

Dane dla BMP zostały opracowane na podstawie informacji zawartych w bazie SEPE, obejmujących okres grudzień 2014 roku – grudzień 2015 roku. Dane te zostały przetworzone do struktury, w której możliwa była dalsza analiza z wykorzystaniem następujących informacji:

- data przewozu,
- skrót grupy pociągu,
- rodzaj pociągu,
- długość pociągu,
- stacja początkowa,

- stacja końcowa,
- rejon transportowy początku,
- rejon transportowy końca.

Powyższe dane zderzone z wiedzą ekspercką pozwoliły na uzyskanie macierzy w układzie źródło-cel (granulacja do poziomu gminy) wraz z podziałem na przewozy w poszczególnych grupach produktowych, na które popyt w przyszłości może podlegać prognozowaniu, tj.:

- węgiel kamienny,
- kruszywa i rudy,
- produkty rafinacji,
- wyroby chemiczne,
- koks,
- wyroby metalowe,
- przewozy intermodalne bez identyfikacji przewożonych towarów
- pozostałe.

Trasy przejazdu pociągów, które są możliwe do pozyskania z SEPE, zostały celowo usunięte z zestawu danych. Wybór ścieżki, jaką poruszają się pociągi towarowe w stanie istniejącym – i co istotne – w okresach progностycznych, jest wynikiem działania modelu trasowania pociągów opisanego w dalszej części artykułu.

Obliczenia dla typowego dnia roboczego

Ruch w Kolejowym Modelu Towarowym modelowany jest dla typowego dnia roboczego. Dla potrzeb stworzenia BMP dane z bazy SEPE pozyskano – w celu zachowania reprezentatywności – dla okresu 12 miesięcy. Na podstawie analizy danych SEPE wyznaczono współczynnik pozwalający przeliczyć dane roczne na 1 dzień reprezentatywny. Wartość tego współczynnika oszacowano na 1/320.

Załadunek na pociągi

Podział ładunku na pociągi odbywa się na podstawie:

- obliczonej średniej ważonej dopuszczalnej długości pociągu, wartość ta jest następnie skorygowana o współczynnik średniego wykorzystania maksymalnej dopuszczalnej długości pociągu;
- obliczeniu maksymalnego możliwego ładunku przenieszonego przez pociąg w danej relacji w oparciu o średnią ważoną dopuszczalnej długości pociągu i wartości ilości ładunku na 1mb pociągu, wartości te wyliczane są osobno dla poszczególnych typów pociągów;
- podzieleniu strumienia ładunku przez iloczyn wartości uzyskanych w poprzednim punkcie i wartości średniej utylizacji maksymalnej długości pociągu.

Masa składu próżnego

Aby uzyskać wielkości masy netto (ładunku), zapisane w BMP, należy od wartości mas pociągów pobranych z SEPE (brutto) odjąć masę samego składu (tarę). Po analizie danych z SEPE wyznaczono wskaźnik średniej masy próżnego pociągu towarowego przypadającej na 1 metr bieżący składu. Wartość ta jest równa 1,50 t/mb.

Wyjątek stanowią pociągi intermodalne (pociągi TC i TD), dla których nie podjęto próby wyznaczenia masy netto z uwagi na bardzo dużą różnorodność ładunków przewożonych pociągami intermodalnymi oraz niski udział masy netto ładunku w stosunku do wagi całego składu. W przypadku pociągów intermodalnych przyjęto do dalszych obliczeń masę brutto.

Pochodną powyższego obliczenia jest wartość średniego ładunku przypadającego na 1mb pociągu, którą uzyskano na podstawie danych pochodzących z SEPE, odejmując od masy brutto pociągu wagę samego składu.

Tabela 1

Wartość średniego załadunku netto przypadająca na 1mb pociągu	
Nazwa parametru	Wartość [ton/mb]
TG	3,83
TK	2,00
TM	4,20
TN/TL/TR	3,00
TP	2,00
TA/TB	3,00
TC/TD ¹	2,17

Źródło: opracowanie własne

Współczynnik średniego wykorzystania maksymalnej dopuszczalnej długości pociągu

Współczynnik średniego wykorzystania maksymalnej dopuszczalnej długości pociągu informuje, jak długie w rzeczywistości pociągi są uruchamiane przez przewoźników w stosunku do możliwości oferowanych przez sieć kolejową w danej relacji. Wartość współczynnika uzyskano, porównując maksymalne długości pociągów z Modelem i danych SEPE.

Tabela 2

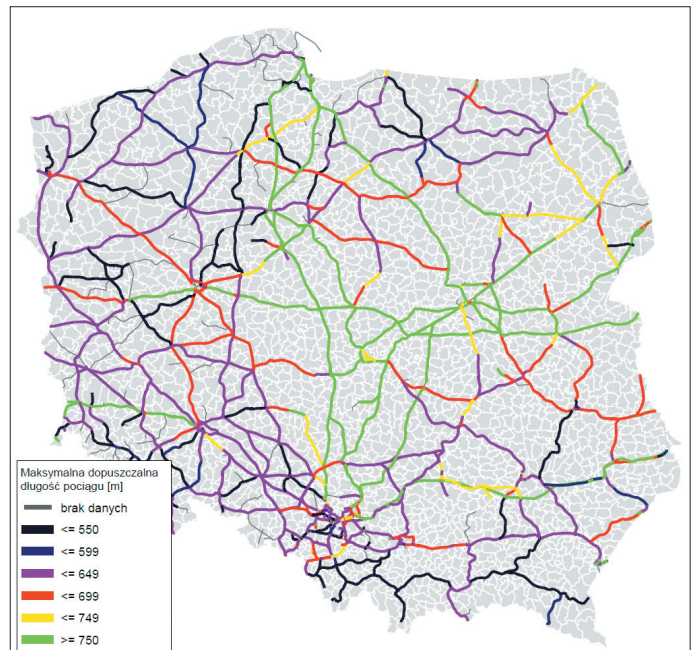
Współczynnik średniego wykorzystania maksymalnej dopuszczalnej długości pociągu	
Kategorie pociągów	Wartość
TG	0,72
TK	0,60
TM	0,82
TN/TL/TR	0,65
TP	0,77
TA/TB	0,80
TC/TD	0,89

Źródło: opracowanie własne

Powyższe wyniki odzwierciedlają ogólnie znane zjawiska, tzn.²:

- przewoźnicy przy wykonywaniu przewozów masowych dążą do minimalizacji kosztów przewozu, w związku z tym wykorzystanie długości jest wysokie i wynosi 0,82;
- przewoźnicy towarowi wykonujący przewozy towarów o wyższej wrażliwości na czas, tj. w kategoriach TA, TB, TC, TD i TP, konkurując z przewoźnikami drogowymi, dążą do wykorzystania całej możliwej długości składu;

- przewozy zdawcze (TK) realizowane są przeważnie na krótszych trasach, już bezpośrednio do klienta, przez co długość składów zależy już raczej od wielkości zamówienia dla odbiorcy końcowego, a niekoniecznie od dostępnych wysokich (np. w zakresie maksymalnych długości pociągów) parametrów infrastruktury.



Rys. 3. Maksymalna dopuszczalna długość pociągów według Kolejowego Modelu Towarowego dla stanu bazowego (rok 2015) wyrażona w metrach.

Źródło: opracowanie własne

Moduł podziału ładunku na pociągi podlegał kalibracji. W procesie kalibracji istotna była możliwie wysoka zgodność dla pociągów masowych (TM), które stanowią ponad 55% liczby pociągów pojawiających się na sieci. Dla każdej z badanych grup pociągów błąd był mniejszy od 5%, natomiast dla sumy pociągów uzyskano błąd na poziomie 0,4%, co stanowi rozbieżność w liczbie pociągów w ciągu 1 roku o wartości 1 888 pociągów przy sumie pociągów towarowych w 1 roku równej 435 229.

Rozkład ruchu na sieć

Kolejnym krokiem jest rozkład wyliczonych w poprzednich krokach pociągów na sieć kolejową za pomocą autorskiego mechanizmu trasowania. Mechanizm trasowania pociągów oparto na zasadzie poruszania się hipotetycznego pociągu po krawędziach grafu sieci o najmniejszej wadze (oporze) – analogicznie do zjawisk opisywanych przez hydrodynamikę, co jest typową praktyką stosowaną w modelowaniu ruchu. Z uwagi na brak w Polsce badań opór na sieci kolejowej wyznaczono w oparciu o konsultacje z ekspertami ds. ruchu towarowego, a także w wyniku pozyskanych doświadczeń w modelowaniu ruchu towarowego – były to m.in. doświadczenia niemieckie, austriackie, holenderskie, czeskie, a także doświadczenia Inicjatywy Jaspers [2]. Na trasowanie pociągów towarowych ma wpływ szereg czynników infrastrukturalnych i ich pochodnych, których wpływ w większości jest możliwy do zmonety-

² w przypadku pociągów z grupy TC i TD podano wartość załadunku wyrażoną w masie brutto

zowania, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie sumarycznego kosztu przejazdu poszczególnymi trasami.

Trasowanie pociągów – czynniki oporu odcinków sieci (funkcja kosztu)

W Modelu dla obliczenia kosztów przejazdu wykorzystuje się następujące informacje, przyporządkowane do każdego odcinka sieci kolejowej:

- maksymalne prędkości dla pociągów towarowych,
- stawki dostępu w podziale na kategorie pociągów,
- dopuszczalne maksymalne długości pociągów,
- dopuszczalne naciski na oś,
- występowanie znaczących pochyleń podłużnych,
- występowanie posterunków ruchu, które są nieczynne w wybrane dni,
- obecność samoczynnej blokady liniowej (SBL),
- maksymalne prędkości dla pociągów pasażerskich,
- informacja o ich liczbie w ciągu doby.

Koszty brane w Modelu pod uwagę przy trasowaniu pociągów można podzielić na dwie grupy:

- koszty zależne od odległości:
 - stawki dostępu do infrastruktury kolejowej – przejazd każdego 1 metra związany jest z koniecznością poniesienia kosztu zależnego jeszcze od tonażu,
 - koszt paliwa w podziale na:
 - trakcję spalinową,
 - trakcję elektryczną,
- koszty zależne od czasu,
 - koszty wynagrodzenia pracowników (np. maszynistów),
 - koszty wykorzystania lokomotyw w podziale na:
 - lokomotywy spalinowe,
 - lokomotywy elektryczne,
 - koszty wykorzystania wagonów,
- koszty pozostałe (w tym np. koszty administracyjne czy marketingowe firm).

Ponadto w przypadku przewozów intermodalnych uwzględniono fakt, że są to zazwyczaj przewozy wysokowartościowe, gdzie terminowość i dowóz na czas jest istotnym czynnikiem wyboru środka transportu, dlatego uwzględniono wartość czasu ładunków.

W funkcji oporu, oprócz wyłącznie czynników kosztowych, wykorzystywane przy obliczaniu oporu poszczególnych odcinków i relacji skrajnych wykorzystuje się następujące parametry:

- **KT_KARA_ZMIANA_CZOLA** – opór relacji skrajnej w postaci dodatkowego czasu potrzebnego na wykonanie operacji zmiany czoła pociągu; czas potrzebny na zmianę czoła jest też podstawą do obliczenia wartości innych parametrów, w tym kosztów (lokomotyw, wagonów, podwojona obsada pracownicza na wykonanie czynności zmiany czoła pociągu);
- **KT_BRAK_PRZEJAZDU_DŁUGOŚĆ** – opór odcinka związany z dopuszczalną długością pociągów na odcinku – odcinek o najkrótszej dopuszczalnej długości determinuje długość składu dla relacji;

- **KT_BRAK_PRZEJAZDU_NOŚNOŚĆ** – opór odcinka związany z dopuszczalną nośnością na odcinku – odcinek o najmniejszej dopuszczalnej nośności determinuje dopuszczalny nacisk na oś dla relacji;
- **KT_KARA_WYBRANE_DNI** – opór odcinka związany z posterunkami ruchu funkcjonującymi w wybrane dni lub godziny, co oznacza w praktyce brak możliwości przejazdu wybranym fragmentem sieci kolejowej;
- **KT_KARA_NACHYLENIE** – opór odcinka związany z odcinkami o znacznych pochyleniach podłużnych – wpływa na: ograniczenie prędkości pociągów towarowych, a w konsekwencji przepustowość, ograniczona maksymalna ładowność składów (brak możliwości podjazdu pod górę składem ładownym), zwiększa zużycie energii;
- **KT_KARA_PRZEKROCZENIE_GRANICY** – opór odcinka związany z koniecznością przejazdu zagraniczną siecią kolejową; została zastosowana w celu uniknięcia reakcji Modelu polegającej na wykonywaniu przewozu w relacjach wewnętrznych (w Polsce) za pomocą sieci zagranicznej (np. Dolny Śląsk – port w Świnoujściu – pomimo niskich parametrów na ciągu nadodrzańskim przejazdy odbywają się po polskiej sieci); faktyczny przejazd przez granicę oznacza m.in. zmianę systemu zasilania z prądu stałego na prąd zmienny w przypadku lokomotyw (w tym czas potrzebny na zmianę lokomotywy) czy inne stawki dostępu.

Wybrane aspekty przepustowości sieci

W trakcie procesu kalibracji Kolejowego Modelu Towarowego występował problem nadmiernego obciążenia najkrótszych tras w poszczególnych relacjach w stosunku do wartości rzeczywistych. Sytuacja taka miała miejsce np. w korytarzu Wrocław-Gliwice (brak obciążenia linii 277 kosztem linii 132) czy nadmiernego obciążenia jednotorowej linii nr 8 na trasie Warszawa-Radom (kosztem linii nr 7, która przenosiła mniej ruchu, niż wynikało to z danych empirycznych).

Analiza m.in. powyższych przypadków doprowadziła do stwierdzenia następujących wniosków:

- Istnieje duży wpływ ograniczeń przepustowości na liniach kolejowych na ruch i trasowanie pociągów towarowych.
- Istnieje duży wpływ pociągów pasażerskich i wykorzystania przez nie przepustowości na szlakach, co prowadzi do sytuacji, w której niektórymi liniami nie jest w ogóle możliwe prowadzenie ruchu towarowego.
- Model podaży musi uwzględniać przepustowość sieci dostępną dla ruchu towarowego.
- Istotne z punktu widzenia modelowania towarowego ruchu kolejowego jest to, że na polskiej sieci kolejowej występują odcinki niewyposażone w samoczynną blokadę liniową (SBL) z długimi szlakami, na których może się znaleźć w danym momencie tylko jeden pociąg. Ma to szczególne znaczenie na liniach towaro-

wych, gdzie prędkość maksymalna dla pociągów towarowych nie przekracza 30–60 km/h, a czas następstwa wynikający z instrukcji Ir-11 [3] to 2 minuty dla jazdy z postoju i 5 minut przy jeździe na biegu i jazdach kolizyjnych.

Uwzględnienie wyżej wymienionych czynników wymagało od zespołu opracowania autorskiego algorytmu, który kwantyfikował wpływ powyższych zagadnień. Algorytm służy do wyznaczenia maksymalnej liczby pociągów, która jest w stanie przejechać danym odcinkiem sieci w ciągu 1h, a następnie wartość ta jest rozszerzona do całej doby przy założeniu, że ruch towarowy odbywa się przez 16h w dobie. Wartość współczynnika rozszerzenia na dobę została dobrana iteracyjnie w toku procesu kalibracji.

Algorytm rozpoczyna się od wyznaczenia teoretycznej maksymalnej liczby pociągów mogących przejechać po linii w okresie jednej godziny. W przypadku linii wyposażonych w SBL przyjmowana jest wartość równa 10. Dla linii niewyposażonych w SBL wyliczana jest średnia prędkość dla pociągów towarowych i pasażerskich. Przy założeniu minimalnego następstwa pomiędzy kolejnymi pociągami równego 2 minuty wyliczana jest maksymalna teoretyczna liczba pociągów mogących przejechać danym szlakiem, jednak nie większa niż 10 pociągów na kierunku w 1 godzinie.

W kolejnym kroku następuje zwiększenie lub zmniejszenie przepustowości w zależności od jednorodności ruchu na szlaku, a więc:

- w przypadku linii wyposażonych w SBL:
 - jeżeli ruch pociągów towarowych nie jest zakłócony przez poruszające się ze znacznie większą prędkością pociągi dalekobieżne (ich liczba na szlaku jest równa 0), to przepustowość szlaku jest zwiększana o 10% – zakłada się, że pociągi regionalne mają prędkość handlową porównywalną z prędkością handlową pociągów towarowych,
 - jeżeli ruch pociągów towarowych jest zakłócony przez pociągi pasażerskie, ale wykres prędkości dla nich jest podobny do wykresu pociągów towarowych (tzn. poruszają się z prędkościami nieprzekraczającymi 100 km/h), to przepustowość szlaku redukowana jest o 10%,
 - jeżeli ruch pociągów towarowych jest zakłócony przez pociągi pasażerskie poruszające się z prędkością powyżej 100 km/h, to przepustowość szlaku redukowana jest o 20%;
- w przypadku linii niewyposażonych w SBL:
 - jeżeli ruch pociągów towarowych jest zakłócony przez pociągi pasażerskie poruszające się z prędkością powyżej 100 km/h, to przepustowość szlaku redukowana jest o 5%,
 - jeżeli ruch pociągów towarowych jest zakłócony przez pociągi pasażerskie poruszające się z prędkością poniżej 100 km/h, to przepustowość szlaku redukowana jest o 10%.

Ostatnim krokiem algorytmu jest uwzględnienie wpływu znacznych pochyłeń podłużnych na liniach kolejowych na przepustowość. W przypadku występowania długich podjazdów (od kilku do kilkunastu kilometrów) o znacznych pochyleniach zastosowano następujące korekty przepustowości:

- jeżeli liczba pociągów pasażerskich na kierunek w 1 godzinie jest większa od 1, ale mniejsza od 2 – przepustowość szlaku redukowana jest o 10%,
- jeżeli liczba pociągów pasażerskich na kierunek w 1 godzinie jest większa od 2, ale mniejsza od 3 – przepustowość szlaku redukowana jest o 30%,
- jeżeli liczba pociągów pasażerskich na kierunek w 1 godzinie jest większa od 3 – przepustowość szlaku redukowana jest o 50%.

Jest to odwzorowanie sytuacji, w której pociąg towarowy jadący pod górę znacznie wydłuża czas jazdy (z racji dużej masy nie jest w stanie osiągnąć dopuszczalnej prędkości maksymalnej), a co za tym idzie, potrzebuje dłuższego odstępu pomiędzy poprzedzającym i następującym pociągiem.

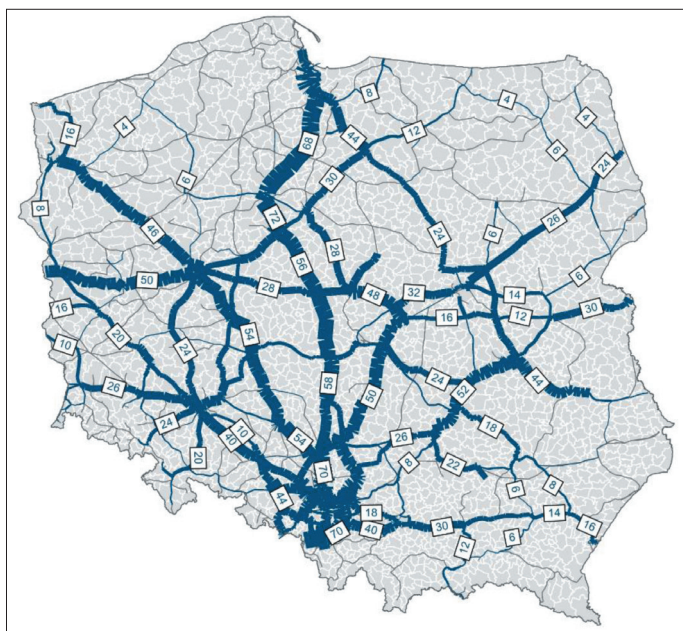
Rozkład ruchu na sieć wyrażony w liczbie pociągów

Proces rozkładu pociągów na sieć odbywa się przy użyciu mechanizmu oporu – opisanego w poprzednich punktach – w silniku wykonawczym – PTV Visum wykorzystywana jest procedura dla rozkładu pojazdów indywidualnych – *PrT Assignment*.

Macierze są rozkładane na sieć kolejową w programie VISUM przy wykorzystaniu funkcji *Incremental Assignment*: zdefiniowane parametry funkcji zakładają rozkład w pięciu transzach-iteracjach po 20% każda. Każda transza ruchu nakładana jest przy uwzględnieniu warunków ruchu stworzonych przez pociągi osobowe i rozłożone już na sieć transze. Po każdej iteracji zwiększane jest odpowiednio obciążenie sieci kolejowej o lokomotywy jeżdżące luzem, których występowanie na sieci jest ściśle powiązane z pociągami towarowymi. Ponadto przed każdą iteracją algorytm szacowania przepustowości sprawdza, czy dany szlak posiada przepustowość dla kolejnego pociągu towarowego, porównując aktualną liczbę pociągów na szlaku z wyliczoną wg powyższego algorytmu maksymalną liczbą. Jeżeli liczba pociągów na odcinku w n-tej iteracji jest równa lub przekroczy maksymalną liczbę, to w iteracji n+1 nie jest możliwy przejazd kolejnego pociągu towarowego.

Rozkład ruchu na sieć wyrażony w masie brutto

Wartości przemieszczanej masy są wartościami pochodnymi do liczby pociągów w danej relacji. Dla tego obliczenia wykorzystano funkcję silnika wykonawczego: Visum, jaką jest rozkład ruchu po istniejących ścieżkach – *Distribution of demand matrix to paths*. Funkcja ta, na podstawie przejazdów pociągów, rozkłada przewożone przez nie masy. Masy w relacji są rozkładane proporcjonalnie do liczby pociągów jadących daną trasą.



Rys. 3. Rozkład ruchu na sieć według Kolejowego Modelu Towarowego dla stanu bazowego (rok 2015) wyrażonego w liczbie pociągów

Źródło: opracowanie własne

Wnioski i rekomendacje

Obraz Kolejowego Modelu Towarowego jest wynikiem kompromisów, których dokonać musiał zespół tworzący Model, aby otrzymać działające narzędzie. Uzyskano interesujące rozwiązanie, którego ograniczeń są świadomi jego autorzy. Stąd też podsumowaniem artykułu są rekomendacje dla dalszego rozwoju narzędzia, które jednak są ważne nie tylko z punktu widzenia Modelu, ale również innych przedsięwzięć modelarskich o skali regionalnej czy ogólnopolskiej.

Sprawą największej wagi jest zapewnienie rzetelnych danych o przewozie towarów koleją, rozagregowanych w stopniu większym niż do tej pory. Stąd też należy podejmować wysiłki na rzecz pozyskania od przewoźników danych o przewożonych towarach i relacjach ich przewozu. Po zakończeniu prac nad tą wersją Modelu Ruchu udało się uzyskać od niektórych przewoźników takie dane. Niestety, najwięksi udziałowcy rynku dotychczas nie nawiązali współpracy, stąd potrzeba również działań zewnętrznych instytucji jak np. GUS lub UTK.

Rozbudowa Modelu w zakresie działań doraźnych powinna zapewnić odwzorowanie przewozu poza granicami Polski w celu pełniejszego odtworzenia kosztów transportu towarów.

Z kolei prace o charakterze horyzontalnym proponuje zorganizować się – bazując na doświadczeniach własnych i doświadczeniach innych krajów – w ten sposób, że w dalszym ciągu bazą byłby Kolejowy Model Towarowy, natomiast prace nad modelem pięciostopniowym prowadzone byłyby w poszczególnych grupach przewożonych towarów, zgodnie z klasyfikacją NST 2007 (z uwzględnieniem przesyłek kontenerowych). Powstały model hybrydowy (docelowo w pełni pięciostopniowy) pozwoliłby zachować najlepsze mechanizmy KMT, rozszerzając rozwiązanie tam, gdzie w chwili obecnej jest ono uproszczone.

Podsumowanie

W artykule opisano metodykę i proces budowy komponentu towarowego Model Ruchu na potrzeby PKP Polskie Linie Kolejowe SA nazwanego Kolejowym Modelem Towarowym. W ramach przeprowadzonych prac konieczne było zmierzenie się z istotnymi brakami w dostępnych danych, które pozwalałyby na stworzenie pełnego modelu 5-stopniowego, czego efektem są kompromisy w stopniu złożoności narzędzia oraz ograniczenie wszelkich analiz wyłącznie do wyizolowanego segmentu kolejowych przewozów towarowych. Efektem przyjętych założeń i przeprowadzonych prac jest uzyskanie gotowego narzędzia pozwalającego na wykonywanie analiz i ocenę skutków – m.in. poszczególnych zmian w infrastrukturze kolejowej na terenie Polski i uwzględnianie w ten sposób efektu sieciowego – czy to prowadzonych inwestycji (np. dopuszczenie funkcjonowania długich pociągów towarowych na istotnych ciągach krajowych lub międzynarodowych), czy też badanie i ocenę skutków zamknięć torowych poszczególnych odcinków sieci kolejowej w trakcie robót budowlanych i ich wpływ na segment kolejowych przewozów towarowych. Zbudowane mechanizmy w zakresie systemu popytu pozwalają na wykonywanie analiz wpływu trendów w poszczególnych grupach produktowych na obciążenie ruchem sieci kolejowej. Przykładem takich dynamicznych zmian, które warto poddawać analizom, są np. przewozy intermodalne [4].

Literatura

1. Ortúzar J.d.D., Willumsen L.G., *Modelling transport*, Chichester, West Sussex, Wielka Brytania 2011.
2. Guidance on Appraising the Economic Impacts of Rail Freight Measures, JASPERS, 2017.
3. Instrukcja o rozkładzie jazdy pociągów Ir-11, PKP Polskie Linie Kolejowe SA, Warszawa 2015.
4. *Analiza kolejowych przewozów intermodalnych w Polsce*, Urząd Transportu Kolejowego, Warszawa 2016.
5. Dodatek 1 do wewnętrznego rozkładu jazdy pociągów zawierający warunki techniczno-ruchowe linii na terenie Zakładów Linii Kolejowych, PKP Polskie Linie Kolejowe SA, Warszawa 2016.
6. Transport – wyniki działalności w 2015 r., Warszawa, Główny Urząd Statystyczny, 2016.
7. Zużycie paliw i nośników energii w 2014 r., Warszawa, Główny Urząd Statystyczny, 2015.
8. Regulamin przydzielania tras pociągów i korzystania z przydzielonych tras pociągów przez licencjonowanych przewoźników kolejowych w ramach rozkładu jazdy pociągów 2015/2016, PKP Polskie Linie Kolejowe SA, Warszawa 2015.
9. Krajowy Program Kolejowy do 2023 roku, Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa, Warszawa 2016.
10. Kearney A.T., *Kolejowe przewozy towarowe w Polsce – wzrost w trybie warunkowym*, Warszawa 2013.
11. Szelaż A., *Problemy oddziaływania trakcji elektrycznej na środowisko*, Warszawa 2006.
12. Lorant T., *Modelling Freight Transport*, 2013.