

ANALIZA I OCENA ZDOLNOŚCI PRZEPUSTOWEJ LINII KOLEJOWEJ O ZRÓZNICOWANEJ STRUKTURZE RUCHU¹

Radosław Gleba

mgr inż., Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza
11/12, 80-233 Gdańsk

Sławomir Grulkowski

dr inż., Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza
11/12, 80-233 Gdańsk, tel. +48 58 348 6089, e-mail:
slawi@pg.gda.pl

Jerzy Zariczny

mgr inż., Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza
11/12, 80-233 Gdańsk, tel. +48 58 348 6089, e-mail:
jeczarcic@pg.gda.pl

Streszczenie. *W artykule wskazano na metody prowadzenia analiz warunków ruchu kolejowego oparte na dwóch parametrach: zdolności przepustowej i opóźnieniach pociągów. Szczególną uwagę poświęcono ocenie powszechnie stosowanych uproszczeń w analizach.*

Słowa kluczowe: *zdolność przepustowa linii kolejowej, warunki ruchu kolejowego, opóźnienia pociągów*

1. Wprowadzenie

Istnieje wiele metod oceny warunków ruchu na linach kolejowych, których przydatność do konkretnych analiz jest zależna od przyjętego celu analizy, posiadanych danych wejściowych, dysponowania odpowiednimi narzędziami obliczeniowym oraz oczekiwań w stosunku do poziomu dokładności odwzorowania rzeczywistości [6]. Wyróżnia się modele analityczne, optymalizacyjne, symulacyjne oraz hybrydowe, tj. metody łączące w sobie elementy zarówno analityczne, jak i symulacyjne. Metodą kompleksową, uwzględniającą największą liczbę zmiennych oraz założeń, jest metoda symulacyjna, polegająca na budowie komputerowego modelu mikrosymulacyjnego analizowanej linii kolejowej. W 2014 roku obowiązek budowy modeli symulacyjnych na etapie przygotowywania dokumentacji przedprojektowej wprowadził największy zarządca infrastruktury kolejowej w Polsce, tj. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. W założeniu wprowadzenie danego obowiązku ma na celu zminimalizowanie szans na podjęcie realizacji inwestycji niedostosowanej do aktualnego, bądź prognozowanego natężenia ruchu kolejowego [10].

¹ Wkład autorów w publikację: Gleba R. 40%, Grulkowski S. 30%, Zariczny J. 30%

2. Parametry oraz czynniki determinujące warunki ruchu kolejowego

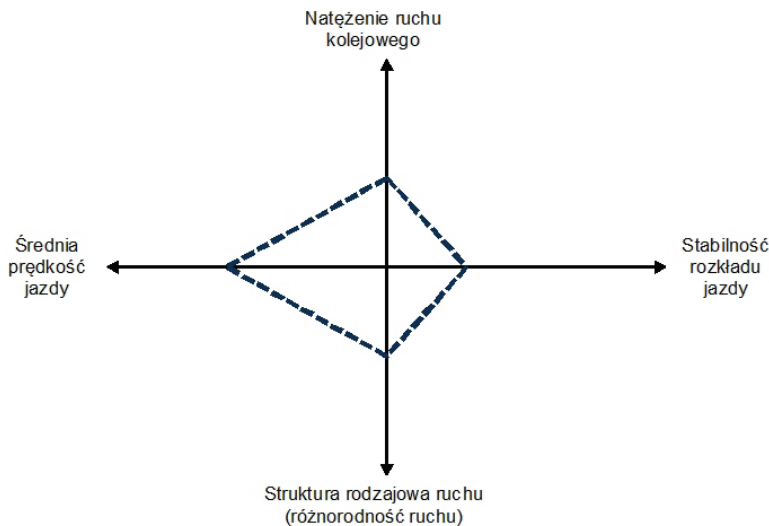
Jedną z głównych cech linii kolejowej jest jej zdolność przepustowa, czyli największa liczba pociągów lub par pociągów, które mogą w sposób płynny przejechać po danej linii w ciągu określonej jednostki czasu (zazwyczaj doby lub godziny szczytowej) [6]. Jednakże zdolność przepustowa sama w sobie niewiele mówi o warunkach i płynności ruchu kolejowego, ponieważ nie jest wskaźnikiem syntetycznym. Linie kolejowe charakteryzujące się zbliżoną wartością zdolności przepustowej mogą w praktyce diametralnie różnić się pod względem płynności ruchu. Związane jest to z dużą liczbą różnorodnych czynników wpływających na wartość zdolności przepustowej. Analiza porównawcza dwóch linii kolejowych lub nawet dwóch odcinków tej samej linii kolejowej możliwa jest dopiero po zestawieniu wartości zdolności przepustowej z wielkością aktualnego bądź prognozowanego natężenia ruchu. Otrzymany w ten sposób wskaźnik syntetyczny określany jest mianem stopnia wykorzystania zdolności przepustowej i pozwala na ocenę warunków ruchu, w tym m.in efektywność infrastruktury w tłumieniu zakłóceń ruchu, wpływ zróżnicowanej struktury ruchu.

Zdolność przepustową określa się przede wszystkim dla szlaków, tj. części linii kolejowej pomiędzy dwoma sąsiednimi posterunkami zapowiadawczymi – stacjami lub posterunkami odgałęźnymi. Wartość danego parametru jest determinowana przez szlak krytyczny lub odcinek krytyczny (w przypadku szlaków wyposażonych w samoczynną blokadę liniową)². Jest to szlak (odcinek), który charakteryzuje się najdłuższym czasem rezerwacji infrastruktury na przejazd pociągu. Dany czas określany jest mianem szlakowego odstępu czasu następstwa pociągów i zależy od [1,3,6]:

- liczby i układu torów szlakowych,
- rozmieszczenia i ukształtowania układów torowych posterunków ruchu,
- parametrów techniczno-eksploatacyjnych linii (w szczególności dopuszczalnej prędkości jazdy dla poszczególnych rodzajów pociągów),
- geometrii linii (wartości promieni łuków poziomych oraz pochyleń podłużnych),
- rodzaju urządzeń sterowania ruchem kolejowym,
- struktury rodzajowej ruchu (różnorodności ruchu),
- spektrum prędkości pociągów,
- parametrów dynamicznych pojazdów trakcyjnych (charakterystyk trakcyjnych),
- organizacji ruchu (m.in. hierarchizacji pociągów oraz sposobu wyprawiania pociągów: np. jazda „pod zielone światło” lub „na zielone światło”),
- rozmieszczenia przystanków osobowych na szlakach.

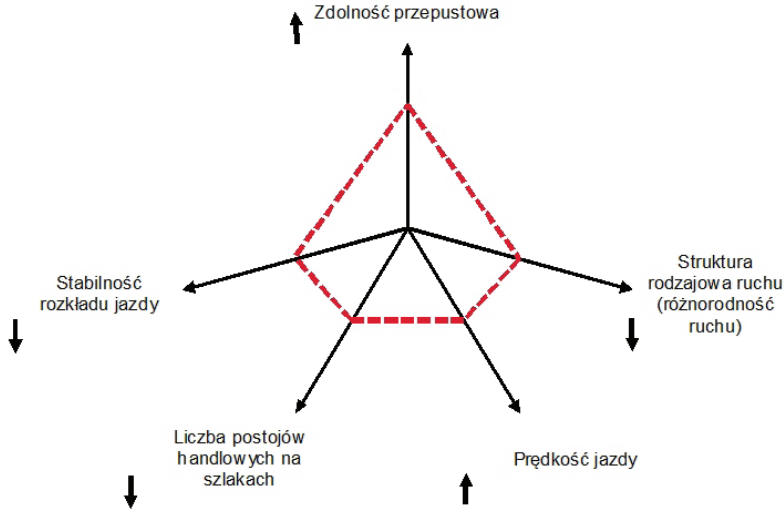
2 Odcinek krytyczny jest fragmentem szlaku wyposażonego w samoczynną blokadę liniową, który składa się z dwóch lub trzech odcinków blokowych – zależnie od przyjętego sposobu wyprawiania kolejnych pociągów na szlak. Rozróżnia się dwa sposoby organizacji ruchu na szlakach wyposażonych w samoczynną blokadę liniową: jazda „pod zielone światło” lub jazda „na zielone światło”. Polegają one na wyprawianiu z posterunku ruchu na przyległy szlak kolejnych pociągów w taki sposób, że są one oddzielone dwoma odcinkami blokowymi („pod zielone światło”) lub trzema odcinkami blokowymi („na zielone światło”). Organizacja ruchu ma na celu zapewnienie odpowiedniej jego płynności oraz eliminację niepotrzebnych czynności związanych z hamowaniem oraz rozruchem pociągów [6].

Relacja pomiędzy zdolnością przepustową, a czynnikami determinującymi jej wartość może być zilustrowana w postaci tzw. wykresu równowagi zdolności przepustowej (ang. *capacity balance*), który został przedstawiony w karcie UIC 406 Międzynarodowego Związku Kolei (rys. 1) [8]. Wykres ten określa zależność zdolności przepustowej od czterech czynników: natężenia ruchu kolejowego, średniej prędkości jazdy pociągów, struktury rodzajowej ruchu (różnorodności ruchu) oraz stabilności rozkładu jazdy (rozumianej jako zdolność do tłumienia zakłóceń ruchu dzięki zapewnieniu odpowiednich marginesów i buforów czasu pomiędzy kolejnymi pociągami wyprawianymi na szlak). Zdolność przepustowa na wykresie reprezentowana jest jako cięciwa łącząca osie opisujące poszczególne czynniki [8]. Przykładowo, zgodnie z danym wykresem, zwiększenie natężenia ruchu kolejowego przy zachowaniu niezmiennej wartości zdolności przepustowej będzie wiązało się ze zmniejszeniem wartości jednego z pozostałych czynników, np. stabilności rozkładu jazdy. Oznacza to, że określona zdolność przepustowa i jej stopień wykorzystania zawsze jest wynikiem kompromisu pomiędzy jakością (średnia prędkość jazdy oraz stabilność rozkładu jazdy) a ilością (natężenie ruchu kolejowego, różnorodność ruchu) [5]. Możliwa jest również inna forma prezentacji danych zależności – bez uwzględniania natężenia ruchu kolejowego, ale przy uwzględnieniu dodatkowego czynnika jakim jest liczba postojów handlowych na szlakach. Na rys. 2 przedstawiono wzajemne oddziaływanie poszczególnych czynników na wartość zdolności przepustowej. Wzrost zdolności przepustowej jest jednoznaczny ze wzrostem prędkości jazdy pociągów oraz zmniejszeniem liczby postojów handlowych na szlakach i różnorodności ruchu. Większa wartość zdolności przepustowej to także zmniejszenie stabilności rozkładu jazdy ze względu na wykorzystanie rezerw i buforów czasu (znajdujących się pomiędzy kolejnymi pociągami) na uruchomienie tras nowych pociągów.



Rys. 1. Wykres równowagi zdolności przepustowej

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8]

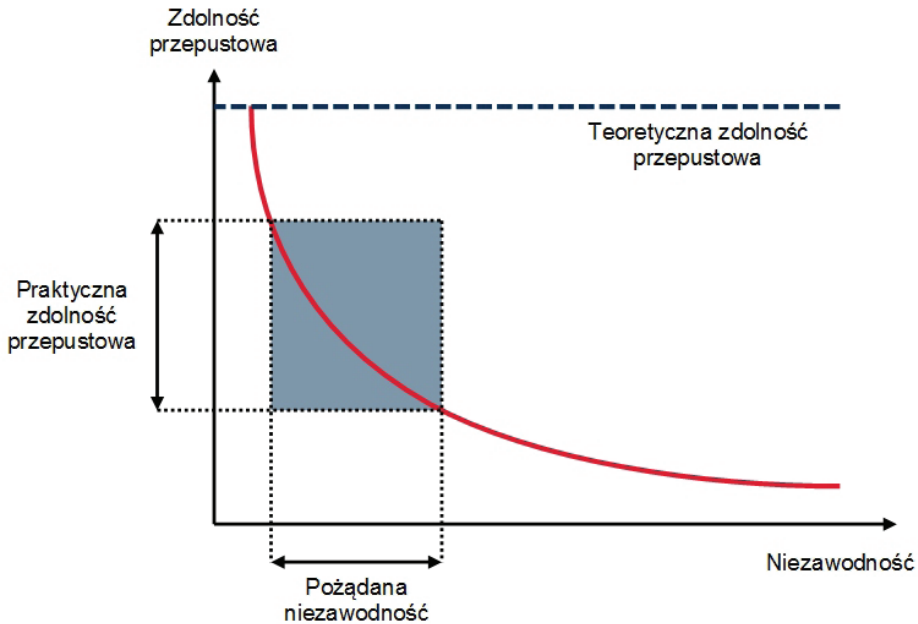


Rys. 2. Wpływ głównych czynników na zdolność przepustową
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

Wyróżnia się kilka rodzajów zdolności przepustowej [1,6]:

- a) **maksymalna teoretyczna zdolność przepustowa** – wartość osiągnięta w idealnych, matematycznych warunkach, gdzie pociągi kursują przy minimalnym szlakowym odstępie czasu następstwa oraz nie występują żadne zakłócenia ruchu (stanowi górną granicę teoretycznie możliwej do osiągnięcia zdolności przepustowej);
- b) **praktyczna zdolność przepustowa** – wartość określająca natężenie ruchu kolejowego, którym może być obciążona infrastruktura, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniego poziomu niezawodności systemu; praktyczna zdolność przepustowa może być określana w oparciu o maksymalną teoretyczną zdolność przepustową, przy jednoczesnym uwzględnieniu odpowiedniego współczynnika płynności ruchu; praktyczna zdolność przepustowa zazwyczaj stanowi ok. 60 – 80% maksymalnej teoretycznej zdolności przepustowej;
- c) **wykorzystana zdolność przepustowa** – jest to wartość zdolności przepustowej odpowiadająca natężeniu ruchu pociągów obciążających analizowany odcinek linii kolejowej; stosunek wykorzystanej zdolności przepustowej do praktycznej zdolności przepustowej, określany jest jako stopień wykorzystania zdolności przepustowej;
- d) **dostępna zdolność przepustowa** – różnica między praktyczną a wykorzystaną zdolnością przepustową, która stanowi rezerwę i w pewnym stopniu (zapewniającym odpowiednią płynność ruchu) może być przeznaczona na przydzielenie tras kolejnym pociągom.

Na rys. 3 przedstawiono zależność między maksymalną teoretyczną oraz praktyczną zdolnością przepustową a niezawodnością systemu transportu kolejowego.



Rys. 3. Zależność między zdolnością przepustową a niezawodnością systemu
Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

3. Zdolność przepustowa

Różnego rodzaju oprogramowanie do symulacji ruchu kolejowego umożliwia szczegółowe odwzorowanie infrastruktury kolejowej oraz posiada bardzo rozbudowany model procesu symulacji, który uwzględnia wiele złożonych zagadnień związanych z prowadzeniem ruchu kolejowego, jak na przykład: priorytetowanie tras pociągów określonych kategorii, dynamiczna zmiana drogi przebiegu pociągu przy uwzględnieniu aktualnej sytuacji ruchowej na linii oraz wyprawianie pociągów zgodnie z zasadą jazdy „pod zielone światło”. Pomimo tak dużych możliwości odwzorowania stanu rzeczywistego analizowanego systemu transportu kolejowego, aplikacje posiadają skromny zasób narzędzi umożliwiających ewaluację danych pochodzących z procesu symulacji. Szczegółowe analizy wymagają obróbki surowych danych i wykorzystania ręcznych metod analitycznych. W związku z tym cały proces badawczy wymaga odpowiedniej wiedzy oraz łączenia wielu metod analizy warunków ruchu kolejowego.

Główną czynnością umożliwiającą przeprowadzenie złożonej analizy warunków ruchu na linii kolejowej jest określenie zdolności przepustowej poszczególnych szlaków. W idealnych warunkach, gdzie struktura ruchu na analizowanym odcinku

linii charakteryzuje się homogenicznością, a pociągi kursują w minimalnych szlakowych odstępach czasu następstwa pociągów, zdolność przepustowa obliczana jest według zależności (1) [2,6]. Daną sytuację ruchową przedstawiono na rys. 4.

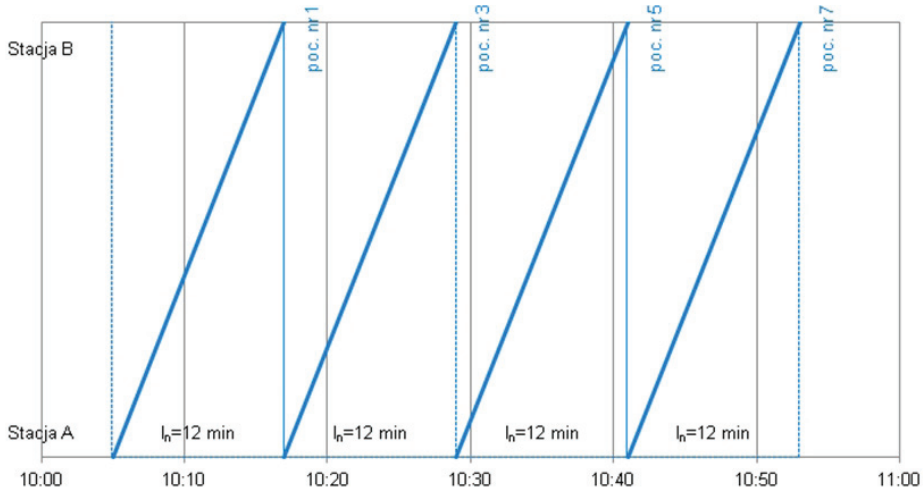
$$N_{max} = \frac{T}{I_n} \quad (1)$$

gdzie:

N_{max} – maksymalna teoretyczna zdolność przepustowa [poc./d lub par poc./d];

T – analizowane okno czasowe (zasadniczo doba: $T = 1440$ min) [min];

I_n – szlakowy odstęp czasu następstwa pociągów [min].



Rys. 4. Jednorodny ruch pociągów kursujących w min. odstępach czasu następstwa

Zródło: opracowanie własne

Przedstawiona na rys. 4 organizacja ruchu zapewnia możliwość wyprawienia na szlak największej możliwej liczby pociągów, ale jest to wizja wyidealizowana, ponieważ z uwagi na brak jakichkolwiek buforów czasu pomiędzy kolejnymi pociągami, charakteryzuje się bardzo dużą podatnością na ewentualną propagację zakłóceń. Ponadto na większości linii kolejowych występuje heterogeniczność w strukturze rodzajowej kursujących pociągów, przez co czas obciążenia szlaku jest zmienny. Różnorodność ruchu wpływa na wzrost spektrum prędkości pomiędzy poszczególnymi rodzajami pociągów, a ich ruch nie jest równomiernie rozłożony w kolejnych oknach czasowych. Pomiędzy kolejnymi pociągami wyprawianymi na szlak występują bufory czasu, mające na celu tłumienie ewentualnych zakłóceń (pierwotnych bądź wtórnych), dzięki czemu wzrasta niezawodność całego systemu [9]. W związku z tym wartość szlakowego odstęp czasu następstwa jest indywidualna dla każdego pociągu uwzględnionego w rozkładzie jazdy i składa się z czasu rezerwacji szlaku przez konkretny pociąg oraz

poprzedzającego go buforu czasu (2). Niejednorodną strukturę ruchu pociągów przedstawiono na rys. 5.

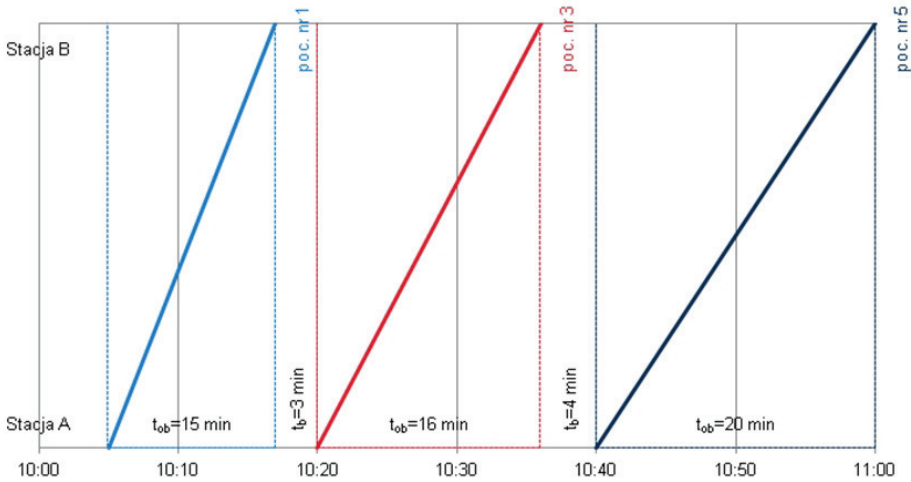
$$I_{n,i} = t_{ob,i} + t_{b,i} \quad (2)$$

gdzie:

$I_{n,i}$ – szlakowy odstęp czasu następstwa odpowiadający pociągowi i w ruchu niejednorodnym [min];

$t_{ob,i}$ – jednostkowy czas rezerwacji szlaku [min];

$t_{b,i}$ – jednostkowy bufor czasu [min].



Źródło: opracowanie własne

Heterogeniczność ruchu pociągów połączona z dużym spektrum prędkości, wpływa na trudności w określeniu zdolności przepustowej szlaków [6]. W przypadku zastosowania metod analizy warunków ruchu kolejowego, w których część parametrów opisujących system transportu kolejowego podlega agregacji (jak np. parametry związane z geometrią torów szlakowych – promienie łuków, wartości pochyłości podłużnych) oraz nie jest uwzględniana relacja pomiędzy kolejnymi pociągami (pomijany jest rozkład jazdy), istnieje możliwość obliczenia teoretycznej zdolności przepustowej zgodnie z zależnością (3).

$$N_t = \frac{(1 - \varphi) \cdot T}{t_{ob,max}} \quad (3)$$

gdzie:

N_t – teoretyczna zdolność przepustowa [poc./d lub par poc./d];

φ – współczynnik płynności ruchu (do obliczeń przyjmuje się $\varphi = 0,2 \div 0,3$);

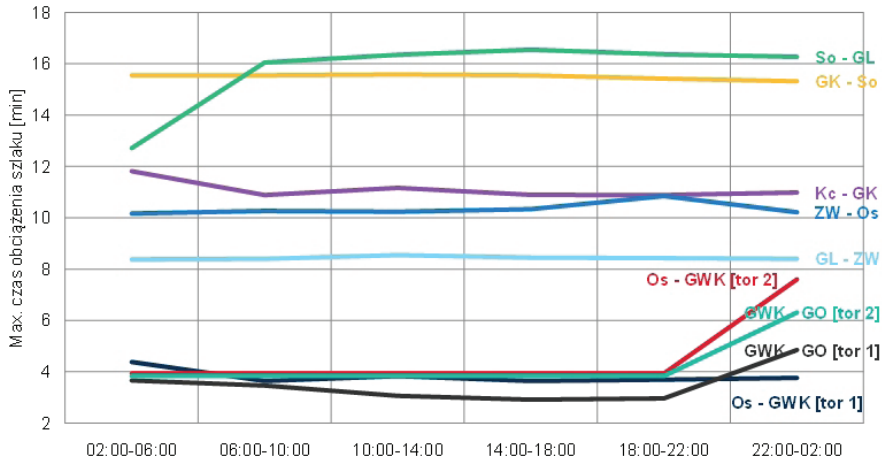
T – analizowane okno czasowe (zasadniczo doba: $T = 1440$ min) [min];

$t_{ob,max}$ – maksymalny czas obciążenia szlaku w analizowanym oknie czasowym [min].

W danym podejściu zakłada się możliwość losowości zgłoszeń pociągu, charakteryzującego się największym czasem obciążenia szlaku. W przypadku gdy pociągi charakteryzujące się największym czasem zajęcia infrastruktury kursują kolejno po sobie, to wartość $t_{ob,max}$ stanowi w rzeczywistości minimalny szlakowy odstęp czasu następstwa pociągów. W przypadku gdy szlak jest obciążany przez pociągi szybsze, to różnica pomiędzy maksymalnym czasem obciążenia szlaku a czasem obciążenia szlaku przez szybszy pociąg jest traktowana jako bufor czasowy. Dodatkowo wprowadza się tzw. współczynnik płynności ruchu ϕ , który zmniejsza długość trwania analizowanego okna czasowego, dzięki czemu zapewniona jest rezerwa na działania związane z diagnostyką i utrzymaniem infrastruktury oraz ewentualne tłumienie zakłóceń.

W wielu sytuacjach obliczenia wykonane w oparciu o zależność (3) są niereprezentatywne. W szczególności dotyczy to szlaków, na których występuje znaczna różnica w minimalnym i maksymalnym czasie zajęcia infrastruktury. W danej metodzie nie uwzględnia się także udziału poszczególnych rodzajów pociągów w całkowitym czasie obciążenia szlaku w ciągu doby, przez co może dochodzić do sytuacji, gdzie jeden rodzaj pociągu, który na kursowanie ma przydzielone stałe okna czasowe, jest pociągiem decydującym o wartości zdolności przepustowej dla całego okresu analizy (zasadniczo doby). Stąd stosując dany sposób analizy warunków ruchu kolejowego należy mieć świadomość dużych uproszczeń, które mogą rzutować na miarodajność przeprowadzonych badań.

Wspomniane uproszczenia wynikające z zastosowania zależności (3) można zobrazować także na przykładzie odcinka Kościerzyna - Gdynia Główna linii kolejowej nr 201 Nowa Wieś Wielka - Gdynia Port. Na rys. 6 przedstawiono wartości maksymalnych jednostkowych czasów obciążenia poszczególnych szlaków w wybranych oknach czasowych. Wartość danego parametru jest zmienna w czasie, a różnice pomiędzy maksimum i minimum mogą być znaczne. Szczególnie zauważalne jest to w przypadku toru parzystego szlaków odcinka Gdańsk Osowa – Gdynia Główna. Różnica w wartości $t_{ob,max}$ w godzinach nocnych w odniesieniu do pozostałych okien czasowych, wynika z faktu, że wolne pociągi towarowe (2 poc./d) zasadniczo wyprawiane są wyłącznie w danym oknie czasowym. W przyjętej na linii organizacji ruchu, z uwagi na natężenie i priorytet pociągów pasażerskich, nie przewiduje się możliwości wyprawiania pociągów towarowych w innych oknach czasowych. W związku z tym, dla tego przypadku bezzasadne jest wyznaczanie zdolności przepustowej dla całego okresu analizy w oparciu o wartość $t_{ob,max}$ determinowaną przez pociągi, których ruch nie jest miarodajny dla całego odcinka. Ponadto dany rodzaj pociągu nie jest reprezentatywny dla analizowanego odcinka z uwagi na udział w strukturze ilościowej pociągów go obciążających – pociągi pasażerskie: 48 poc./d; pociągi towarowe: 2 poc./d.



Rys. 6. Maksymalny czas obciążenia poszczególnych szlaków analizowanego odcinka linii kolejowej

Oznaczenia:

Kc - Kościerzyna, GK - Gołubie Kaszubskie, So - Somonino, GL - Glinicz, ZW - Żukowo Wschodnie, Os - Gdańsk Osowa, GWK - Gdynia Wielki Kack, GO - Gdynia Główna

Źródło: opracowanie własne

Opracowanie modelu mikrosymulacyjnego wymaga wprowadzenia do oprogramowania szczegółowego rozkładu jazdy pociągów. Stwarza to możliwość wykonania analizy warunków ruchu kolejowego, przy uwzględnieniu struktury ruchu i wzajemnych relacji występujących pomiędzy kolejnymi pociągami wyprawianymi na szlak (możliwość uwzględnienia buforów czasowych występujących pomiędzy pociągami). Jak już wspomniano, ruch na większości linii kolejowych charakteryzuje się znaczącą niejednorodnością i występowaniem dużego spektrum prędkości pociągów, co przekłada się na istotne różnice pomiędzy minimalnym a maksymalnym czasem zajęcia infrastruktury. Wpływa to na konieczność zastosowania uproszczeń w obliczeniach, które polegają na operowaniu wartościami średnimi (4) [2,6]. Mimo to przedstawiona poniżej metodologia obliczeń jest reprezentatywna dla większości linii kolejowych w Polsce (w tym linii kolejowej nr 201 Nowa Wieś Wielka – Gdynia Port na odcinku Kościerzyna – Gdynia Główna), ponieważ w oparciu o wartości średnie uwzględniona jest struktura rodzajowa pociągów, ich udział w całkowitym czasie obciążenia szlaku w ciągu doby oraz bufony czasu.

$$N_{pr} = \frac{(1 - \phi) \cdot T}{t_{ob, sr} + t_{b, opt, sr}} \quad (4)$$

gdzie:

N_{pr} – praktyczna zdolność przepustowa [poc./d lub par poc./d];

ϕ – współczynnik płynności ruchu (do obliczeń przyjęto $\phi=0,2$);

T – analizowane okno czasowe (zasadniczo doba: $T=1440$ min) [min];

$t_{ob, sr}$ – średni jednostkowy czas obciążenia szlaku [min];

$t_{b, opt, sr}$ – optymalny średni jednostkowy bufor czasu pomiędzy zgłoszeniami pociągów [min].

Średni jednostkowy czas obciążenia szlaku w analizowanym oknie czasowym wyznaczany jest jako iloraz całkowitego czasu obciążenia szlaku oraz liczby kursujących pociągów:

$$t_{ob, sr} = \frac{\sum_i^n t_{ob, i}}{n} \quad (5)$$

gdzie:

- $t_{ob, sr}$ – średni jednostkowy czas obciążenia szlaku [min];
- $t_{ob, i}$ – jednostkowy czas obciążenia szlaku [min];
- n – liczba pociągów obciążających szlak [-].

Określenie optymalnego średniego jednostkowego buforu czasu pomiędzy zgłoszeniami kolejnych pociągów wymaga przeanalizowania istniejących w rozkładzie jazdy buforów czasu. Pierwszą czynnością jest wyodrębnienie spośród wszystkich buforów czasu tych, które mają wartość mniejszą od $t_{ob, sr}$. Zakłada się, że są to bufony, które nie mogą być przeznaczone na wytrasowanie kolejnych pociągów, w związku z czym stanowią dodatek do średniego jednostkowego czasu obciążenia szlaku, dzięki czemu wzrasta stabilność wykresu ruchu, a tym samym niezawodność systemu transportu kolejowego na analizowanym odcinku.

$$t_{b, i} < t_{ob, sr} \quad (6)$$

gdzie:

- $t_{b, i}$ – bufor czasu poprzedzający pociąg i [min];
- $t_{ob, sr}$ – średni jednostkowy czas obciążenia szlaku [min].

Wartości buforów czasu spełniających nierówność (6) podlegają następnie zsumowaniu oraz podzieleniu przez liczbę pociągów obciążających szlak, które spełniają nierówność (6). Otrzymana w ten sposób wartość określana jest jako optymalny średni jednostkowy bufor czasu pomiędzy zgłoszeniami pociągów:

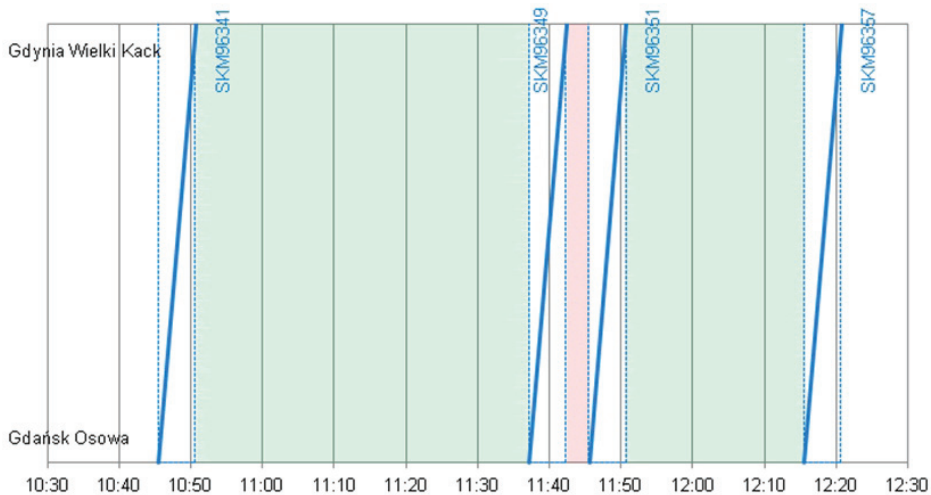
$$t_{b, opt, sr} = \frac{\sum_i^{t_{b, i} < t_{ob, sr}} t_{b, i}}{\sum l_i} \quad (7)$$

gdzie:

- $t_{b, opt, sr}$ – optymalny średni jednostkowy bufor czasu pomiędzy zgłoszeniami poc. [min];
- $t_{b, i}$ – bufor czasu poprzedzający pociąg i mniejszy od $t_{ob, sr}$ [min];
- $\sum l_i$ – łączna liczba pociągów obciążających szlak, które charakteryzują się wartością [-].

Daną metodykę obliczeń dobrze obrazuje rys. 7, na którym widać, że bufor czasu pomiędzy pociągami SKM96349 oraz SKM96351 nie może być przeznaczony na wytrasowanie kolejnego pociągu, ponieważ jest mniejszy niż średni jednostkowy czas obciążenia szlaku. W związku z tym, wartość danego buforu jest uwzględniana przy określaniu optymalnego średniego buforu czasu pomię-

dzy zgłoszeniami kolejnych pociągów i wpływa na zwiększenie stabilności rozkładu jazdy. Bufory czasu pomiędzy pociągami SKM96341 i SKM96349 oraz SKM96351 i SKM96357 są większe od średniego jednostkowego czasu obciążenia szlaku, przez co mogą być przeznaczone na wytrasowanie kolejnych pociągów.



Rys. 7. Bufory czasu pomiędzy kolejnymi pociągami na torze nr 1 szlaku Os – GWK

Źródło: opracowanie własne

Praktyczna zdolność przepustowa, wyznaczana w oparciu o powyżej przedstawioną metodologię jest najbardziej reprezentatywną podstawą do dalszych analiz dla linii, charakteryzujących się dużym spektrum prędkości pociągów oraz nierównomiernym natężeniem ruchu. Obliczenia wykonywane w oparciu o wartość średnią czasu obciążenia szlaku pozwalają na uwzględnienie struktury ruchu w obliczeniach, ponieważ największy wpływ na wartość zdolności przepustowej mają pociągi, które charakteryzują się największym całkowitym czasem zajęcia infrastruktury w ciągu doby. Wiarygodność obliczeń zwiększona jest także dzięki uwzględnieniu buforów czasu, które wpływają na wzrost stabilności rozkładu jazdy. Jest to szczególnie istotne z uwagi m.in. na punktualność pociągów. W 2014 roku spośród wszystkich pociągów towarowych kursujących w Polsce, aż 58,6% było opóźnionych, z czego ponad 40% miało opóźnienia przekraczające 16 minut. W tym samym roku punktualność pociągów pasażerskich wyniosła 91,1% [7].

4. Opóźnienia pociągów

Jednym z najważniejszych wskaźników, który najlepiej obrazuje niezawodność operacji kolejowych, jest propagacja opóźnień. Opóźnienia pociągów można podzielić na pierwotne (spowodowane np. awarią taboru lub infrastruktury) oraz

wtórne, które są konsekwencją opóźnień pierwotnych. Ryzyko wystąpienia opóźnień wtórnych jest tym większe, im mniejsze są wartości buforów czasowych pomiędzy kolejnymi pociągami. W związku z tym największe ryzyko opóźnień wtórnych występuje w przypadku kursowania pociągów w minimalnym szlakowym odstępie czasu (rys. 4). Wyznaczenie wielkości opóźnień wtórnych, w zależności od wartości opóźnienia pierwotnego jednego z pociągów w ruchu niejednorodnym, wymaga szczegółowej analizy, w której należy określić jaki rodzaj pociągu podąża za jakim, ile wynosi dzielący ich bufor czasu oraz gdzie na linii prowadzona jest obserwacja [4]. Dane zagadnienie charakteryzuje się dużą złożonością, przez co w praktyce stosuje się uproszczenia, które podobnie jak w przypadku obliczania zdolności przepustowej opierają się na wartościach średnich. Podstawą analizy są bufony czasu pomiędzy zgłoszeniami pociągów, rozpatrywane w oparciu o wartość średnią:

$$t_{b, sr} = \frac{\sum_i^n t_{b,i}}{n} \quad (8)$$

gdzie:

- $t_{b, sr}$ – średni jednostkowy bufor czasu pomiędzy zgłoszeniami pociągów [min];
- $t_{b,i}$ – jednostkowy bufor czasu [min];
- n – liczba pociągów obciążających szlak [-].

Wyznaczenie średniej wartości buforu czasu umożliwia określenie liczby pociągów, które będą objęte opóźnieniem wtórnym, powstałym w następstwie określonego opóźnienia pierwotnego jednego z pociągów [4]:

$$j = \frac{t_{d,1,i}}{t_{b, sr}} \quad (9)$$

gdzie:

- j – liczba pociągów objętych opóźnieniem wtórnym [-];
- $t_{d,1,i}$ – wartość czasu opóźnienia pierwotnego jednego z pociągów [min];
- $t_{b, sr}$ – średni jednostkowy bufor czasu pomiędzy zgłoszeniami pociągów [min].

W kolejnym kroku określana jest suma opóźnień [4]:

$$\sum t_d = (j + 1) \cdot t_{d,1,i} - \frac{j}{2} \cdot (j + 1) \cdot t_{b, sr} \quad (10)$$

gdzie:

- $\sum t_d$ – suma opóźnień [min];
- j – liczba pociągów objętych opóźnieniem wtórnym [-];
- $t_{d,1,i}$ – wartość czasu opóźnienia pierwotnego jednego z pociągów [min];
- $t_{b, sr}$ – średni jednostkowy bufor czasu pomiędzy zgłoszeniami pociągów [min].

Końcowym wynikiem analizy jest wykres obrazujący proces narastania sumy opóźnień w zależności od wartości opóźnienia pierwotnego jednego z pociągów (rys. 8).



Rys. 8. Narastanie sumy opóźnień w zależności od opóźnienia pierwotnego

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że obliczenia procesu narastania opóźnień, wykonywane w oparciu o średni jednostkowy bufor czasu pomiędzy zgłoszeniami kolejnych pociągów, charakteryzują się dużymi uproszczeniami. Jest to spowodowane znaczącą nierównomiernością ruchu i dużą dysproporcją pomiędzy rzeczywistymi buforami czasu. W związku z tym celowe jest badanie procesu narastania opóźnień wyłącznie dla konkretnych sytuacji ruchowych na szlaku krytycznym, gdzie można odwoływać się do rzeczywistych, a nie uśrednionych wartości buforów czasu.

5. Podsumowanie

Dwa wskazane powyżej główne parametry: zdolność przepustowa i opóźnienia pociągów są tylko punktem wyjścia do analizy z użyciem większej liczby parametrów, takich jak: praktyczna zdolność przepustowa, wykorzystanie zdolności przepustowej, stabilność rozkładu jazdy. Dopiero kompleksowe podejście analityczne, gdzie podstawą jest zindywidualizowane charakteryzowanie każdego pociągu, pozwala na przeprowadzenie rzetelnej oceny warunków ruchu na liniach o zróżnicowanej strukturze ruchu.

Literatura

- [1] Abril M., Barber F., Salido M.A., Tormos P., Lova A., An assessment of railway capacity, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 44, Issue 5, September 2008.
- [2] Gašparík J., Zitrický V., Aspects of railway capacity and occupation time estimation, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, Volume 8, No. 3, March 2014.
- [3] Lai Y.C., Barkan C.P.L., An enhanced parametric railway capacity evaluation tool (RCET), *Proceedings of 88th Transportation Research Board*, Washington, DC, 2009.
- [4] Landex A., Methods to estimate railway capacity and passenger delays – PhD thesis. Technical University of Denmark, Department of Transport, November 2008.
- [5] Lindfeldt A., Railway capacity analysis – methods for simulation and evaluation of timetables, delays and infrastructure. Doctoral Thesis in Infrastructure. KTH Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment, Department of Transport Science, Stockholm 2015.
- [6] Nowosielski L., *Organizacja przewozów kolejowych*. KOW, Warszawa 1999.
- [7] Ocena funkcjonowania rynku transportu kolejowego i stanu bezpieczeństwa ruchu kolejowego w 2014 roku, *Urząd Transportu Kolejowego*, Warszawa 22 września 2015.
- [8] UIC 406 Leaflet – Capacity, *International Union of Railways*, June 2004.
- [9] Woch J., *Narzędzia analizy efektywności i optymalizacji sieci kolejowej*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
- [10] Wytyczne do budowy modeli mikrosymulacyjnych ruchu kolejowego w PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., PKP PLK S.A. – Biuro Planowania Strategicznego, Warszawa 10 marca 2015.