

Andrzej Żurkowski

# Techniczno-ruchowe aspekty wykorzystania linii dużych prędkości do przewozów regionalnych

*Uruchomienie w Polsce w grudniu 2014 r. połączeń międzyaglomeracyjnych pociągami ED250 (Pendolino), osiągającymi prędkość 200 km/h na zmodernizowanej linii CMK stanowi, zgodnie z dyrektywą 2008/57 o interoperacyjności kolei, uruchomienie połączeń kolejami dużych prędkości (KDP). Jednocześnie po raz pierwszy zastosowano urządzenia ETCS poziomu 1 do prowadzenia ruchu pociągów. Wydarzenia te stanowią przesłankę do podjęcia szeregu prac badawczo-technicznych, które byłyby podstawą do zdobywania krajowych doświadczeń w zakresie przedmiotowym. Przygotowana z inicjatywy Instytutu Kolejnictwa monografia na temat KDP potwierdza [9], że już obecnie wielu polskich specjalistów dysponuje obszerną wiedzą teoretyczną na temat najnowszych rozwiązań technicznych w tym zakresie. Specyfika polskich uwarunkowań wymaga jednocześnie, aby zostały one odpowiednio zaadaptowane.*

W artykule kontynuowane są wcześniejsze rozważania autora na temat zdolności przepustowej, a w konsekwencji także przewozowej systemu KDP [12, 13, 14]. Zagraniczne doświadczenia w tym zakresie wskazują, że w wielu przypadkach linie dużych prędkości (LDP), zwłaszcza jeśli łączą one bardzo duże aglomeracje, szybko ulegają saturacji. Problemem jest wówczas osiągnięcie zarówno dużej przepustowości węzłów kolejowych [11], aby możliwe było wyprawianie kolejnych pociągów KDP z możliwie krótkimi czasami następstwa, jak i zagęszczenie ruchu na samych liniach [10].

W warunkach polskich można założyć, że taka saturacja na liniach dużych prędkości (projektowana linia „Y”, CMK i inne) nastąpi najwcześniej w perspektywie kilku- lub kilkunastoletniej. W celu podniesienia efektywności technicznej i ekonomicznej LDP warto zatem rozważyć możliwość wykorzystania ich jednocześnie do przewozów regionalnych. Praktyka europejskich systemów KDP w Hiszpanii czy w Niemczech również dostarcza doświadczeń w tym zakresie.

Rozpatrywane w dalszej części artykułu zmiany w zdolności przepustowej, związane z wprowadzeniem na liniach dużej prędkości ruchu regionalnego, poprzedzone zostały informacjami dotyczącymi ogólnych zasad jej obliczania oraz przeglądem wybranych elementów organizacji przewozów pasażerskich w systemie KDP w kontekście kompleksowej organizacji przewozów na całej sieci kolejowej.

## Zasady obliczania zdolności przepustowej linii dużych prędkości

Zdolność przepustowa linii kolejowych określana jest liczbą par pociągów, które mogą przez nią przejechać w ciągu doby. Metody obliczania tej zdolności rozwijane są od wielu lat [2, 3], a podejście klasyczne odnoszące się do tzw. handlowego rozkładu jazdy (o zróżnicowanych czasach przejazdu pociągów) polega na wyznaczeniu odcinka linii o najdłuższym czasie zajętości (tzw. odcinka krytycznego) i obliczeniu jego przepustowości [8].

W wymiarze międzynarodowym zasady obliczania zdolności przepustowej zostały zunifikowane i opisane w Karcie UIC [1]. Z uwagi na stały postęp techniki w zakresie prowadzenia ruchu pociągów, który w warunkach europejskich oznacza obecnie stopniowe wdrażanie na kolejnych liniach systemu ERTMS, wskazana Karta UIC jest nowelizowana co kilka lat.

W przypadku linii dużych prędkości wykorzystywanych tylko do ruchu KDP, metoda obliczeniowa jest bardzo prosta [1, 2, 14]. Wynika to z faktu, że linie takie są zazwyczaj dwutorowe, a identyczne lub zbliżone parametry techniczno-ruchowe składów KDP oznaczają zastosowanie równoległego rozkładu jazdy. Zdolność przepustową określa zatem wzór:

$$N_d = k \cdot \frac{60}{t_n} \quad (1)$$

gdzie:

$N_d$  – dobową zdolność przepustową linii dużych prędkości,  
 $k$  – liczba godzin kursowania składów KDP na dobę,  
 $t_n$  – minimalny czas następstwa pociągów [min].

Pociągi dużych prędkości uruchamiane są w porze dziennej, zazwyczaj w godzinach 6–23, zatem można przyjąć, że  $k=17$ . O przepustowości LDP decyduje zatem minimalny czas następstwa pociągów  $t_n$ . Zależy on od szeregu czynników technicznych związanych z parametrami linii kolejowej oraz taboru, wydajnością systemu zasilania trakcyjnego, a zwłaszcza z rodzajem zastosowanego systemu sterowania ruchem kolejowym. Wzorcowy sposób obliczania czasu  $t_n$  dla LDP został szczegółowo opisany w monografii M. Leboeufa [5], a jego zastosowanie do warunków polskich na linii CMK wyposażonej w ETCS poziomu 1 przedstawiono w artykułach autora [12, 13].

Metoda ta polega na wyznaczeniu minimalnej odległości  $D_{min}$  pomiędzy czołami kolejnych składów takiej, aby w przypadku hamowania nagłego wdrożonego przez skład poprzedzający jego następcą mógł zostać bezpiecznie zatrzymany w trybie hamowania służbowego. Odległość ta jest następnie dzielona przez maksymalną prędkość dopuszczoną na linii. Najnowocześniejsze urządzenia sygnalizacji kabinowej pozwalają na prowadzenie ruchu na LDP z czasami minimalnymi następstwa wynoszącymi około 3 min.

Warto przy tym zauważyć, że z uwagi na nieliniową zależność pomiędzy  $D_{min}$  a prędkością jazdy pociągów czas następstwa zmienia się również nieliniowo w funkcji prędkości. Wykres takiej funkcji ma postać paraboli, a zatem możliwe jest wyznaczenie takiej prędkości pociągów, przy której czas następstwa pociągów jest najkrótszy, a przepustowość największa [12, 13].

Wyznaczony w ten sposób czas następstwa musi zostać skonfrontowany z ograniczeniami zdolności przepustowej wynikającymi z:

- ♦ sygnalizowanych wcześniej ograniczeń przepustowości węzłów kolejowych znajdujących się na początku i na końcu rozważanej LDP,

**Tab. 1. Rekomendowane wartości zajętości infrastruktury kolejowej**

Lp.	Rodzaj linii kolejowej	Godziny szczytu [%]	Pozostałe godziny [%]
1.	Linie dedykowane do ruchu podmiejskiego	85	70
2.	Linie dużych prędkości	75	60
3.	Linie o ruchu mieszanym*	75	60

\* Ruch mieszany oznacza w tym przypadku wykorzystywanie linii kolejowych zarówno do przewozów pasażerskich, jak i towarowych.

Źródło: oprac. na podst. [1, 9].

- ♦ stratami czasu na posterunkach odgałęźnych w przypadku wykorzystywania przez pociągi niektórych relacji tylko części LDP,
- ♦ stacyjnych czasów związanych z wyprzedzaniem pociągów w przypadku lokalizacji stacji pośrednich na LDP.

Drugi i trzeci z wymienionych przypadków może dotyczyć zarówno połączeń pociągami KDP, jeśli część z nich ma wyznaczone postoje handlowe na stacjach pośrednich lub nie wykorzystuje LDP na całej długości, jak i połączeń regionalnych. Szczegółowe obliczenia w tym zakresie będą przedmiotem dalszych rozważań.

Karta UIC zaleca przy tym, aby obliczoną teoretycznie zdolność przepustową (dla każdego rodzaju linii kolejowej) zmniejszyć w celu uwzględnienia rzeczywistych warunków eksploatacyjnych, czyli zapewnienia płynności ruchu oraz zmniejszenia wpływu ewentualnych opóźnień. Rekomendowane współczynniki przedstawiono w tabeli 1.

Korzystając z wzoru (1) oraz uwzględniając opisane powyżej uwarunkowania można zatem ustalić wartość interwału I dla równoległego wykresu ruchu dla całej LDP. Ustalenie jego wartości pozostaje kompetencją zarządcy infrastruktury, ale musi być dokonywane w porozumieniu z przewoźnikiem (lub przewoźnikami). Dotyczy to zwłaszcza sytuacji, gdy oferta przewozowa na sieci kolejowej zbudowana jest w oparciu o cykliczny (a tym bardziej – symetryczny) rozkład jazdy, a linia dużych prędkości nie funkcjonuje w modelu eksploatacji rozłącznej [13], ale w ścisłym powiązaniu z innymi liniami.

## Organizacyjne warianty wykorzystania LDP do przewozów regionalnych

Założmy zatem, że od strony techniczno-ruchowej istnieje możliwość wykorzystania linii dużych prędkości do przewozów regionalnych. Oznacza to, że składy regionalne wyposażone są w systemy sygnalizacji kabinowej, a ich konstrukcja (w tym prędkość) jest adekwatna do warunków na LDP. Jednocześnie układy torowe tych linii pozwalają na obsługę stacji pośrednich (postoje handlowe) z wymianą pasażerów na peronach zlokalizowanych, z uwagi na bezpieczeństwo podróżnych, w torach głównych dodatkowych (rys. 1) z dostępem poprzez tunel lub kładkę.

Potencjalnie istnieje szereg wariantów wykorzystania LDP do przewozów regionalnych. Zostały one symbolicznie przedstawione na rysunku 2. Wariant I dotyczy przypadku, gdy relacja pociągów regionalnych pokrywa się z relacją KDP, a zatem pociągi te kursują na całej długości

linii, spełniając w ten sposób funkcje dowożenia i odwożenia podróżnych ze stacji pośrednich do stacji węzłowych A oraz B. W kolejnych wariantach pociągi regionalne wykorzystują tylko część LDP łącząc stacje pośrednie z węzłowymi (II), stacje pośrednie pomiędzy sobą (III) lub stacje leżące poza linią dużych prędkości (wariant IV).

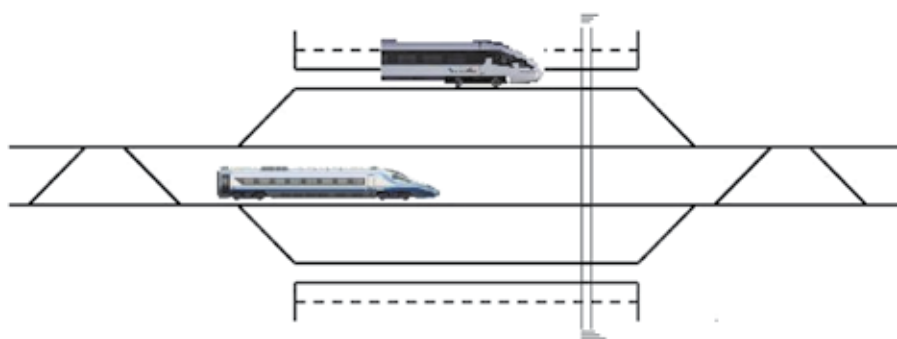
Obniżenie zdolności przepustowej LDP wynika zarówno z różnicy prędkości jazdy pociągów KDP i regionalnych, jak również z czasów dodatkowych związanych z wjazdem i wyjazdem pociągów regionalnych na stacje pośrednie (we wszystkich wariantach) oraz czasami dodatkowymi na posterunkach odgałęźnych, co ma miejsce w wariantach II oraz IV.

Jednocześnie, z uwagi na niższe prędkości jazdy wszystkich pociągów przy wjeździe i wyjeździe ze stacji węzłowych A i B oraz ich ruchu w głowicach tych stacji, można przyjąć, że czasy jazdy pociągów KDP oraz regionalnych w tych rejonach są identyczne, a zatem nie mają wpływu na zdolność przepustową.

Ważnym elementem wpływającym na ocenę korzyści z wykorzystania LDP do ruchu regionalnego jest przyjęty sposób organizacji przewozów pasażerskich na całej sieci kolejowej, a zatem rodzaj zastosowanego wykresu ruchu. Podstawowe rodzaje takich wykresów przedstawiono na rysunku 3.

Jak już wcześniej wspomniano typowym dla ruchu pociągów KDP na dedykowanych liniach jest wykres równoległy (równoodstępowy). W przypadku przewozów na liniach konwencjonalnych (zazwyczaj o ruchu mieszanym) zastosowanie znajduje tradycyjny, handlowy wykres ruchu.

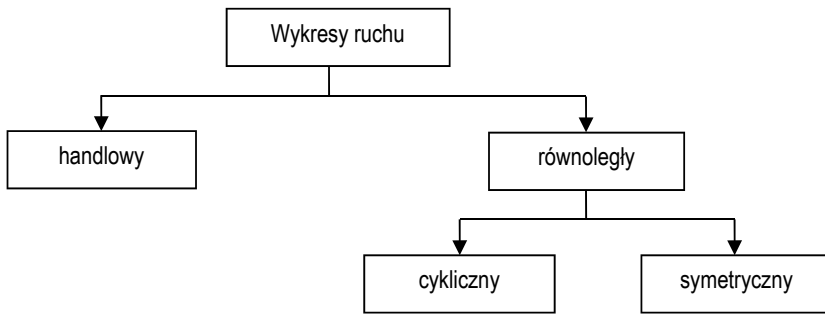
Tak zwana strukturyzacja wykresów ruchu [8] pociągów pasażerskich ułatwia zapamiętanie rozkładu jazdy przez podróżnych poprawiając znacznie ofertę przewozową kolei. Może ona polegać na zastosowaniu rozkładu cyklicznego, gdzie stałe końcówki minut przyjazdu i odjazdu pociągów na stacje z postojami handlowymi zależą od konstruktora wykresu lub rozkładu symetrycznego. W tym drugim przypadku dla całej sieci kolejowej ustalona zostaje jedna oś symetrii, a przyjazdy i odjazdy pociągów na każdej stacji następują symetrycznie w stosunku do niej.



**Rys. 1. Pociąg KDP wyprzedzający pociąg regionalny na stacji pośredniej**



**Rys. 2. Warianty wykorzystania LDP do przewozów regionalnych**



**Rys. 3.** Rodzaje wykresów ruchu stosowane w przewozach pasażerskich

Wykresy równoległe mogą prowadzić do obniżenia zdolności przepustowych poszczególnych linii kolejowych. Są one jednak coraz powszechniej stosowane przez przewoźników kolejowych z uwagi na ich wysoką wartość marketingową.

Szczegółowe przeanalizowanie wpływu zastosowania jednego z powyższych wykresów w powiązaniu z wariantami wykorzystania LDP do przewozów regionalnych wymagałoby bardzo rozszerzonej analizy. W dalszej części zostanie ona zatem ograniczona do elementarnego przypadku, który pozwoli przedstawić najważniejsze zależności w tym zakresie oraz ocenić stopień obniżenia przepustowości LDP w wyniku wprowadzenia na nią ruchu regionalnego.

### Wpływ ruchu regionalnego na zdolność przepustową LDP

Rozważmy zatem przykład linii dużych prędkości o długości rzędu kilkuset kilometrów, na której fragmencie o długość 100 km kursują pociągi regionalne. Przyjmijmy jednocześnie 3 progi prędkości dla pociągów KDP, wynoszące kolejno 250, 300 i 320 km/h oraz dwa dla ruchu regionalnego: 160 i 200 km/h. Współczynnik wykorzystania prędkości maksymalnej – obliczany jako iloraz prędkości pociągów przyjmowanej na wykresie ruchu i prędkości drogowej (maksymalnej prędkości) na danym odcinku linii kolejowej [8] – w obu przypadkach jest równy 0,85. Czas następstwa pociągów KDP (interwał  $I$ ) wynosi 5 min i uwzględnia również stacyjne odstępy czasu na stacji pośredniej. Przykład ten odpowiada wariantowi II na rysunku 2, przy czym zakładamy, że wyjazd ze stacji pośredniej na linię konwencjonalną jest bezkolizyjny w stosunku do LDP.

Problem sprowadza się do wyznaczenia współczynnika redukcji  $\varepsilon$  wskazującego, ile tras pociągów KDP na wykresie ruchu (w ciągu jednej godziny) zostaje zredukowanych przez 1 pociąg regionalny [4]. Analitycznie wartość współczynnika  $\varepsilon$  obliczyć można ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{n \cdot I}{60} \quad (2)$$

gdzie:

- $\varepsilon$  – współczynnik redukcji tras na wykresie ruchu pociągów,
- $n$  – liczba zredukowanych tras pociągów KDP,
- $I$  – interwał (czas następstwa pociągów) na wykresie ruchu [min],
- 60 – liczba minut w godzinie [min].

Liczba zredukowanych tras zależy zarówno od różnicy w czasach przejazdu pociągów KDP i regionalnych, jak i organizacji przewozów na KDP. Zakładając zatem, że ruch pociągów KDP odbywa się ze stałym interwałem możliwe są tutaj 2 rozwiązania:

- na wykresie ruchu trasa pociągu KDP wyprawianego po pociągu regionalnym powinna uwzględniać jedynie czas następstwa na ostatnim odcinku przed stacją pośrednią,

- pociąg KDP powinien być wyprawiony z taką końcówką minutową, aby odpowiadała ona cyklowi wcześniejszych odjazdów takich pociągów.

Drugie z powyższych rozwiązań obniża nieznacznie (w większości przypadków) zdolność przepustową LDP, odpowiada natomiast wymaganiom strukturyzacji rozkładu jazdy i jego cykliczności w wymiarze marketingowym.

Zakładając zatem zastosowanie drugiego rozwiązania można podać ogólny wzór na obliczanie liczby  $n$ . Ma on następującą postać (wzór 2).

Wykorzystano tutaj zmienną  $m$ , która oznacza mantysę (część ułamkową) liczby wynikającej z podzielenia  $\Delta t$  przez  $I$ .

$$n = \begin{cases} \left[ \frac{\Delta t}{I} \right] + 2, & \text{gdy } m > 0 \\ \left[ \frac{\Delta t}{I} \right] + 1, & \text{gdy } m = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Schematyczny wykres ruchu odwzorowujący rozważany przykład przedstawiono na rysunku 4 (dla większej przejrzystości na wykresie odzwierciedlono ruch pociągów tylko w jednym kierunku). Zawiera on prezentację pierwszego z rozważanych przypadków, a zatem przejazd pociągu regionalnego z prędkością 160 km/h, natomiast pociągów KDP z prędkością 250 km/h. Rozkładowe czasy tych przejazdów, uwzględniające założony współczynnik wykorzystania prędkości maksymalnej, wynoszą odpowiednio 44 i 28 min. Pociąg regionalny wyprawiany jest ze stacji początkowej B z czasem następstwa 5 min. Uruchomienie kolejnego pociągu KDP jest możliwe wtedy, gdy jego rozkładowy przyjazd na stację A nastąpi nie wcześniej niż po upływie 5 min po przyjeździe pociągu regionalnego. Liczbę zredukowanych tras pociągów KDP można ustalić na podstawie analizy wykresu ruchu na rysunku 4.

Wytrasowanie pociągu regionalnego eliminuje 5 tras pociągów KDP. Potwierdzają to obliczenia analityczne. Różnica czasów jazdy  $\Delta t = 16$  min, zatem iloraz  $\Delta t/I$  wynosi 3,2. Mantysa tej liczby jest różna od zera, zastosowanie znajduje zatem wzór z pierwszego równania (3), którego wynik wynosi 5. Po podstawieniu do wzoru (2) otrzymujemy współczynnik redukcji  $\varepsilon = 0,42$ .

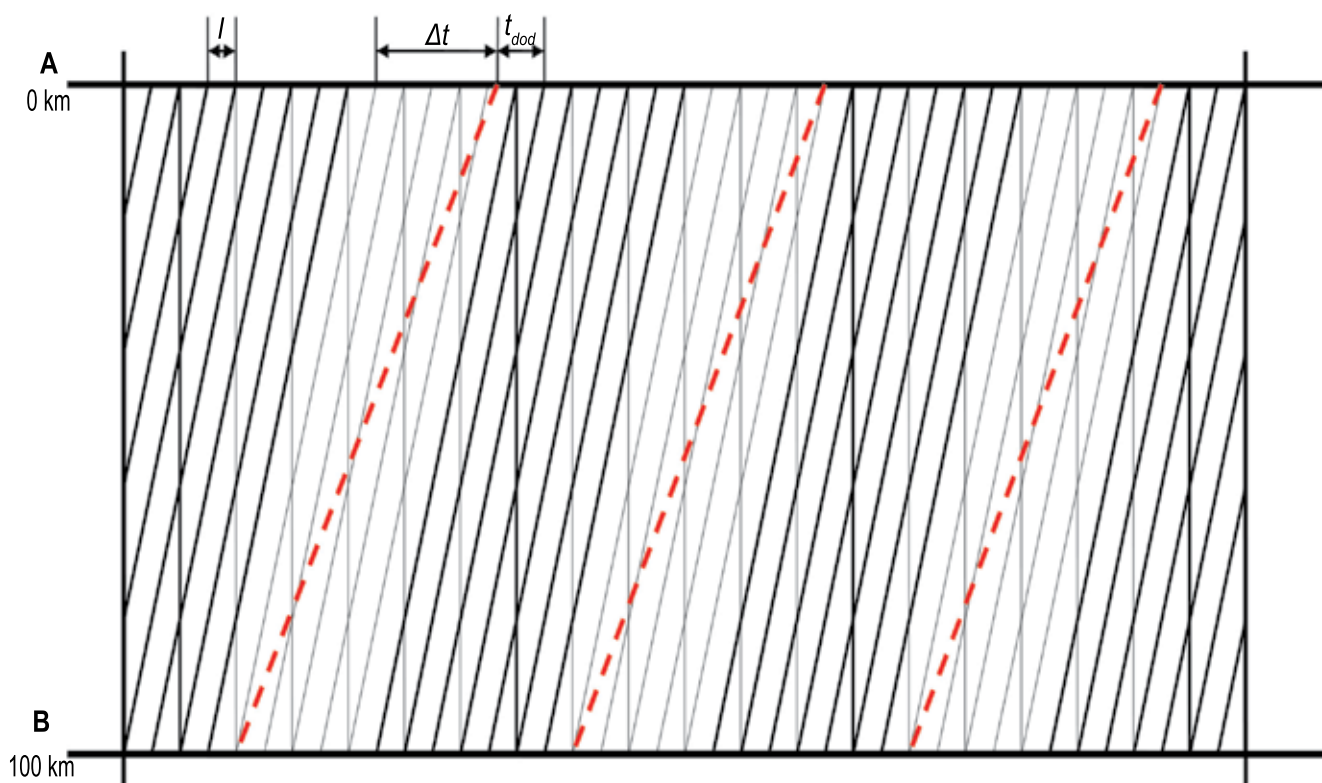
Zdolność przepustowa analizowanej linii dużych prędkości, która w przypadku ruchu wyłącznie składów KDP wynosiłaby  $N_g = 12$  par pociągów na godzinę, zostaje zmniejszona do 8 par pociągów (w tym jeden regionalny).

Przeprowadzając podobne obliczenia dla założonych uprzednio prędkości obu rodzajów pociągów, otrzymujemy wartości współczynnika redukcji  $\varepsilon$ , zebrane w tabeli 2.

Wprowadzenie ruchu regionalnego na linię dużych prędkości implikuje zatem istotne ograniczenie jej przepustowości. Rozpatrywany przykład należy traktować jako przypadek uproszczonej, a dla warunków rzeczywistych potrzebna byłaby rozszerzona analiza, która oprócz uwarunkowań techniczno-ruchowych

**Tab. 2.** Współczynniki redukcji tras pociągów KDP

Współczynnik redukcji $\varepsilon$	Przewozy pociągami KDP			
	250 km/h	300 km/h	320 km/h	
Przewozy regionalne	160 km/h	0,42	0,50	0,50
	200 km/h	0,25	0,33	0,33



Rys. 4. Wykres ruchu dla przykładu obliczeniowego

uwzględniałaby również szersze aspekty organizacyjne i eksploatacyjne, a przede wszystkim ekonomiczne.

## Wnioski

Decyzja o budowie linii dużych prędkości poprzedzana jest długoterminowymi prognozami przewozowymi. Prognozy te powinny być bardzo dokładne, a zatem budowane modele ekonometryczne (modelowania podróży i prognozowania ruchu [12]) powinny opierać się na możliwie dużym i szczegółowym zbiorze danych dotyczących przewidywanego rozwoju społeczno-gospodarczego rozpatrywanego kraju i regionu. Badanie potencjalnej mobilności układu osadniczego powinno uwzględniać także ruch regionalny, co pozwoli ocenić pożytki z ewentualnego wykorzystywania LDP do takich przewozów.

Składy pociągów regionalnych kierowane na linie dużych prędkości powinny charakteryzować się możliwie dużym przyspieszeniem oraz wysoką prędkością maksymalną, aby w jak najmniejszym stopniu ograniczać zdolność przepustową. Konieczne jest także wyposażanie ich w urządzenia sygnalizacji kabinowej. Jeśli miałyby obsługiwać relacje pomiędzy dużymi miastami alternatywnie do połączeń KDP, to stosowane taryfy nie powinny być konkurencyjne.

Linie dużych prędkości wymagają znacznych nakładów inwestycyjnych i są kosztowne w eksploatacji. W przypadku niepełnego wykorzystania ich zdolności przepustowych przez KDP racjonalne jest zatem wprowadzenie ruchu regionalnego, co pozwala na poprawienie ich rentowności.

## Bibliografia:

1. Code UIC 406 R Capacité, UIC, Paris 2013.
2. Dąbrowa-Bajon M., *Podstawy sterowania ruchem kolejowym*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2007.

3. Hansen A. I., Pacht J., *Railway Timetabling & Operations*, Eurailpress, Hamburg 2014.
4. Kudriavceva V. A. (red.), *Osnovy ekspluatacji železnych dorog*, Akademia, Moskwa 2005.
5. Leboeuf M., *Grande vitesse ferroviaire. Le cherche midi*, Paris 2013.
6. Massel A., *Dostosowanie Centralnej Magistrali Kolejowej do dużych prędkości jazdy*, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 4.
7. Massel A., *Improvement of railway infrastructure in Poland*, „Technika Transportu Szynowego” 2014, nr 6.
8. Pawlik M., Żurkowski A., *Ruch kolejowy i przewozy. Sterowanie ruchem*, KOW, Warszawa 2010.
9. Siergiejczyk M. (red.), *Koleje Dużych Prędkości w Polsce*, wyd. Instytut Kolejnictwa, Warszawa 2015.
10. Winter P. (red.), *Influence of the ETCS on line capacity. Generic study*, UIC, Paris 2008.
11. Winter P. (red.), *Influence of the ETCS on the capacity of nodes*, UIC, Paris 2010.
12. Żurkowski A., *Badanie wpływu prędkości jazdy pociągów na zdolność przepustową linii szybkiego ruchu*, „Logistyka” 2015, nr 4.
13. Żurkowski A., *Kształtowanie i ocena zdolności przewozowej systemu Kolei Dużych Prędkości*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport z. 109, Warszawa 2016.
14. Żurkowski A., *Metody obliczania zdolności przepustowej linii szybkiego ruchu*, „Logistyka” 2015, nr 3
15. Żurkowski A., *Przewozy pasażerskie w systemie kolei dużych prędkości*, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 4.

## Autor:

dr inż. **Andrzej Żurkowski** – Instytut Kolejnictwa