

Andrzej Białoń, Paweł Gradowski, Marta Gryglas

Wpływ systemu sterowania ruchem kolejowym ERTMS/ETCS na zwiększenie przepustowości linii kolejowych

System ETCS został zaprojektowany do stosowania na wszystkich kategoriach infrastruktury obejmującej ruch pasażerski i towarowy, odcinki linii dużych prędkości, obsługę pociągu na liniach konwencjonalnych i regionalnych, węzły, stacje i stacje rozrządowe. Warunkiem o wysokim priorytecie jest osiągnięcie przepustowości dla każdej aplikacji ETCS, stosowanej na liniach lub węzłach kolejowych. W celu oszacowania i spełnienia warunków pojemności linii należy rozważyć następujące parametry: cechy charakterystyczne infrastruktury, plany transportowe i poziom punktualności.

Sposób osiągnięcia przepustowości linii został zdefiniowany w karcie UIC 406 Przepustowość, która jest podstawą wspólnego porozumienia w sprawach obciążenia i zawiera uzgodnioną metodę do obliczania osiągnięcia przepustowości. Ponieważ karta UIC 406 opisuje jedynie ocenę dla linii z konwencjonalną sygnalizacją, zaprezentowany model został poddany przebudowie, w celu umożliwienia dostosowania również dla ETCS we wszystkich trzech poziomach aplikacyjnych. Został on opisany w podstawie teorii czasu blokowania.

Definicje terminów

Czas blokowania

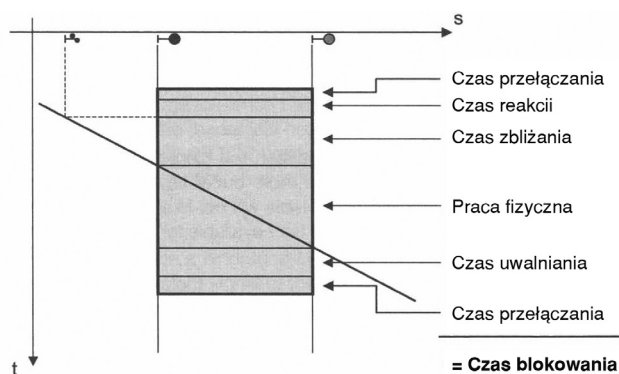
Niezbędne jest opracowanie modelu określającego ilość współdziałania między indywidualnymi trajektoriami pociągów, a także do obliczania współczynnika sprawności infrastruktury. W Niemczech model czasu blokowania jest stosowany od lat 60. XX w., którego celem jest osiągnięcie przepustowości. Z chwilą wprowadzenia do życia codziennego komputerów i wykorzystywana narzędzia oprogramowania do wspomagania zarządzania trajektoriami pociągu, model ten jest w dalszym ciągu używany do zestawiania rozkładów jazdy. Ponadto UIC zaleca stosowanie tego modelu do wykorzystywania przy szacowaniu przepustowości.

Zasadniczą zasadą czasu blokowania jest kolejność operacji zajęcia odstępów blokady przez poruszający się pociąg. Odstęp blokowy wyznaczany jest przez dwa kolejne semafony. W takiej sekcji zajęcie bloku następuje wyłącznie przez pociąg, tzn. że tylko jeden pociąg może znajdować się w takim odcinku blokady. Zapewnia to technologia i kontrola bezpieczeństwa. Zajętość odstępów blokowych pokazano na rysunku 1.

Czas blokowania jest dłuższy niż aktualna fizyczna czynność zajętości odcinka. Do elementów czasu blokowania zaliczamy następujące składniki:

- czas przełączania (*switching time*) do utworzenia i zatwierdzenia trasy lub rozwiązania trasy; wartości tego elementu są zależne od nastawnicy;

- czas reakcji (*reaction time*) do optycznego spostrzeżenia z odległości sygnału; wielkość dla systemów konwencjonalnej sygnalizacji wynosi w przybliżeniu 0,2 min;
- czas zbliżania (*approaching time*) dla ruchu między odległym i głównym sygnalizatorem;
- fizyczny czas (*physical time*) zajęcia;
- czas oczyszczenia (*clearing time*) do przejazdu pod drugi główny sygnalizator i gdy koniec pociągu osiągnie punkt wolnego miejsca na szlaku (zależny od długości pociągu).

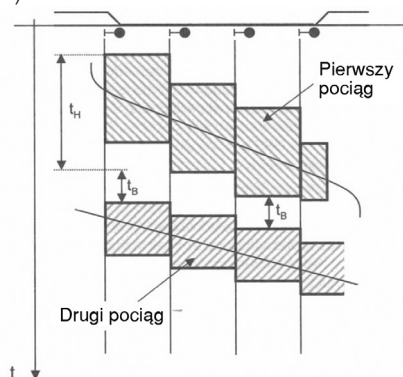


Rys. 1. Składniki czasu blokowania

Ten komplet segmentów czasu blokowania jest tak zwaną kolejnością czasu blokowania (*blocking time*) i wskazuje na osiągnięcie przepustowości ruchu pociągów.

Minimalny czas odstępu

Minimalny czas odstępu jest odległością w czasie między dwoma pociągami bez ich wzajemnego hamowania. Odnosi się to do linii podzielonej na odcinki, jako powiązanie między dwoma stacjami/węzłami, gdzie istnieje możliwość zmiany kolejności lub umożliwienie przepuszczenia pociągów, które doganiają wolniejsze (rys. 2).



Rys. 2. Sekwencja czasu blokowania dla dwóch pociągów

W celu określenia średniego czasu odstępu, kolejność czasu blokowania drugiego pociągu jest przesunięta aż do momentu, gdy dotyka wykresu poprzedzającego pociągu. Średni czas odstępu (definiowany dla pary pociągów) jest okresem czasu od rozpoczęcia czasu blokowania pierwszego pociągu w pierwszej selekcji bloku.

Bufor czasowy

Istotny w rozkładach jazdy, bufor czasowy t_b między kolejnymi czasami blokowania jest konieczny, w celu zmniejszenia propagacji opóźnień. Stały rozkład jazdy możemy osiągnąć, gdy bufor będzie zawarty między kolejnymi czasami blokowania. Czasy buforu także zużywają pojemność, której nie można wykorzystać do dodatkowych trajektorii pociągu.

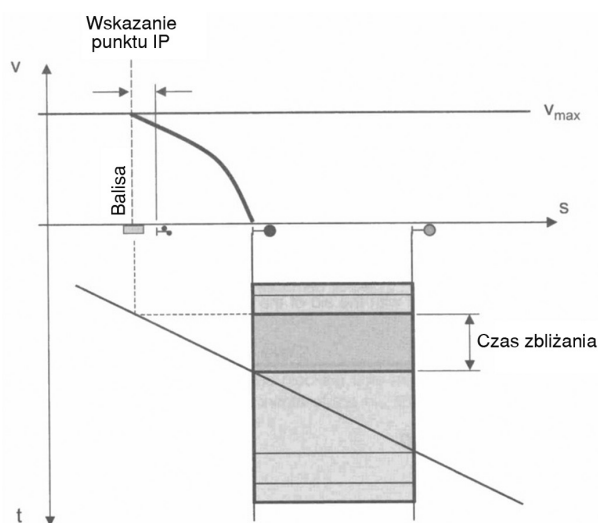
Bufor czasowy znajduje się pośrodku kolejnych czasów blokowania i ma stałe znaczenie dla istniejących rozkładów jazdy. Niestety, pochłania on przepustowość, która tym samym nie jest dostępna dla dodatkowych trajektorii pociągu.

Kalkulacja wpływu ETCS na osiągnięcie przepustowości

System ETCS stosowany jest na różnych poziomach aplikacyjnych przy wykorzystaniu odmiennych metod transmisji danych ze szlaku do pociągów oraz do kontroli odcinków blokowych. Wpływ na zachowanie przepustowości musi zostać rozważony oddzielnie dla każdego z poziomów aplikacji.

Model czasu blokowania dla ETCS poziom 1

ETCS poziom 1 można opisać podobnie jak konwencjonalny system sygnalizacji przytorowej z odległym i głównym semaforem (rys. 3). Grupa balis jest zlokalizowana bezpośrednio przy odległym semaforze albo w określonej odległości od sygnalizatora. Balisy powinny zostać umieszczone w punkcie znaku (*indication point IP*) do odniesienia pociągu. Z jednej strony, z powodu krzywych hamowania ETCS i punktu znaku zwiększamy czas zbliżania, z drugiej strony, nie potrzebny jest czas na reakcję maszynisty. Dlatego ta część składowa czasu blokowania może zostać pominięta.



Rys. 3. Model czasu blokowania dla ETCS poziom 1

Należy nadmienić, że grupa balis odnosząca się do miejsca startu czasu blokowania może być różna dla kolejnych pociągów, jako funkcja wydajności parametru hamowania pociągu. Dlatego

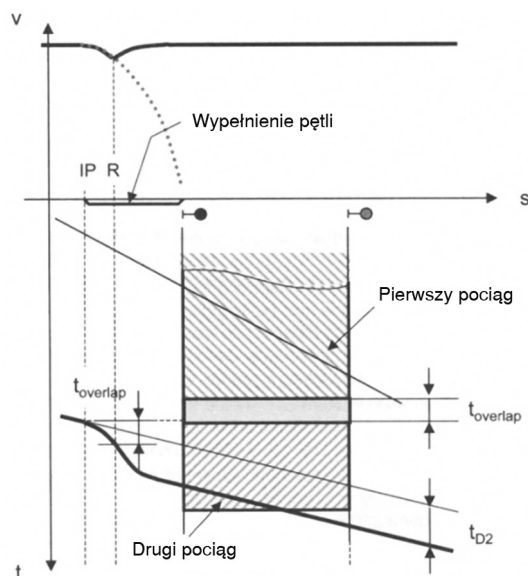
dla niektórych pociągów grupa odniesienia balis do czasu blokowania musi znacznie wydłużyć *IP*. Teoretycznie może to mieć istotny wpływ na wypełnienie czasu odstępu. Formuły hamowania narodowych wartości ETCS muszą być ustawiane z dużą ostrożnością. W przeciwnym razie, ETCS poziom 1 może prowadzić do zmniejszenia osiągniętej przepustowości na istniejących liniach kolejowych.

Wpływ uaktualniania

Wszystkie klasyczne modele czasu blokowania zakładają ruch pociągów bez przeszkód. Czas wymagany dla pociągu, aby przejechać od odległego do pierwszego głównego sygnalizatora w rozważanej sekcji blokowej (albo od grupy balis odniesienia do głównego sygnalizatora), jest wymagany by uwzględnić go w obliczeniach czasu blokowania, jako czas zbliżania. Przyjmuje się, że w relacji wzajemnej pociąg nie będzie musiał wykonywać na tym odcinku blokowym hamowania i tym samym, że sekcja blokady zawczasu zostanie opuszczona przez poprzedzający pociąg w określonym czasie, aby zapobiec kierującemu pociągiem zapalenia się sygnału stój/wolna droga. Jest to przypadek, który zakłada ruch bez przeszkód i komplikacji w rozkładzie jazdy lub bezpośrednio rozważa określoną przepustowość. Ta sytuacja nie zbliża do przyjętych wartości, jedynie krótko szacuje części składowe kontroli pociągu z funkcją uaktualniania.

Ogólne warunki wpływu kontroli urządzeń sterowania pociągiem z funkcją uaktualniania składają się z krzywej nadzoru hamowania unieważnianej w chwili, gdy główny sygnalizator jest przełączony do mniej restrykcyjnego zobrazowania sygnalizacyjnego (od Stój do Wolna droga), a pociąg, którego to dotyczy objęty jest autoryzacją, aby przyspieszyć do maksymalnej dozwolonej prędkości przy pierwszej możliwej okazji. Jednak konieczne może być oczekiwanie na czas potrzebny do zwolnienia hamulca przed ponownym zwiększeniem prędkości.

Jeśli istnieje możliwość stałego przekazywania informacji do pociągu na całej długości odcinka od punktu znaku do głównego sygnalizatora, na którym dochodzi zmiana podstawowego sygnału na mniej restrykcyjny, możliwe jest uzyskanie optymalnego uaktualniania przez długą pętlę uaktualniająca albo przy pomocy uaktualniania radiem.



Rys. 4. Model czasu blokowania dla ETCS poziom 1

Na rysunku 4 pokazano sytuację na linii z długą pętlą uaktualniającej. W tym przypadku powolny pierwszy pociąg zwalnia odstęp blokady, wtedy maszynista pociągu pospiesznego z opóźnieniem ma możliwość przejechania przez sygnał punktu znaku. Możemy zaobserwować na wykresie w płaszczyźnie $s-t$, że czasy blokowania dwóch pociągów pokrywają się częściowo. Powstaje konflikt czasu blokowania (obszar oznaczony na szaro). Czas pokrywania się (*overlap*) obliczany jest według następującego równania:

$$t_{\text{overlap}} = t_{D1} - t_B \quad (1)$$

gdzie:

t_{D1} – reprezentuje aktualne opóźnienie pierwszego pociągu,

t_B – reprezentuje bufor czasowy.

Systemy kontroli do prowadzenia pociągu pospiesznego narzucają stosowanie hamowania służbowego i nadzoru procesu hamowania za pomocą funkcji $v-s$. Drugi pociąg zmniejsza prędkość.

Po dotarciu do punktu R , pierwszy pociąg zwolnił sekcję blokady i wyświetlany sygnał świetlny na głównym sygnalizatorze zmienia obraz sygnałowy. Przejazd przez punkt R został przedstawiony graficznie na wykresie w płaszczyźnie $s-t$. Ponieważ, dla przejazdu obok punktu R mija okres hamowania, w tym momencie podawany jest czas, który dokładnie odpowiada czasowi pokrycia.

Pociąg jest informowany o zmianie sygnału na głównym sygnalizatorze na mniej restrykcyjny, przez co odwoływana jest krzywa nadzoru hamowania i pociąg jest zdolny do przyspieszenia, aż do momentu uzyskania maksymalnej dozwolonej prędkości.

Nieuniknione jednak jest to, że pomimo szybkiego wykonania uaktualnienia – drugi pociąg doświadcza wybicia z czasu jazdy uzyskując opóźnienie t_{D2} w stosunku do zaplanowanej trajektorii przejazdu. Niemniej jednak wybicie się z czasu przejazdu i pojawienie się opóźnienia drugiego pociągu jest mniejsze niż w przypadku jazdy bez uaktualnienia. W związku z tym uaktualnianie może zmniejszać propagację opóźnień.

Faktycznie, bufor czasowy to ta sama funkcja, która występuje w rozkładowych czasach jazdy. Teoretycznie istnieją inne drogi zmniejszenia przenoszenia opóźnień – jest to konieczne, aby włączyć niewiele większe bufora czasowe do rozkładu jazdy. Jak już wspomniano wcześniej, bufor czasowy t_B ma na celu łagodzenie przenoszenia opóźnień, tj. zmniejszenia poziomu wybijania opóźnień t_{D2} . Ten sam cel jest dokonywany przez składniki uaktualnienia, aczkolwiek przez inne możliwości. Bufor czasowy i części składowe uaktualnienia służą temu samemu celowi – łagodzą przenoszenie opóźnień z pociągu i zmniejszają poziom uderzeń opóźnień.

W tej sytuacji mogą zostać zadane pytania, dotyczące przedstawionego problemu. Ile dodatkowego czasu bufora $t_{B,add}$ należałoby zapewnić w rozkładzie jazdy, aby wyciąć tą samą ilość z wybijanych opóźnień, które byłyby dopuszczalne wraz z zastosowaniem pełnego uaktualnienia. W inny sposób zaokrągliła się dodatkowy czas bufora, mogący zostać dostrzeżonym, jako suma czasów bufora, który może zostać uratowany przez instalowanie składników uaktualnienia. Oszczędności czasu bufora zwiększają przepustowość linii kolejowych.

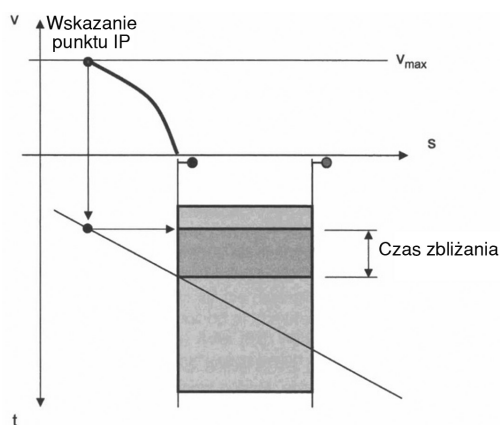
Przy pomocy tego modelu wpływ uaktualniania na przepustowość może pośrednio zostać zmierzony. Wadą jest to, że $t_{B,add}$ zależy od opóźnienia pierwszego pociągu t_{D1} . Czas opóźnienia t_{D1} nie jest wartością zdeterminowaną, ale musi zostać zaprezentowana, jako przypadkowa zmienna. Właśnie dlatego, $t_{B,add}$ może zostać oszacowany jedynie przez możliwości z wyszukanych procesów stochastycznych albo modeli symulacji. W możliwych sytuacjach $t_{B,add}$ może zostać oszacowany, aby wynosić 3–25 s na liniach kolejowych. Wyniki dla stacji węzłowych nadal nie zostały nierozstrzygnięte.

Model czasu blokowania dla ETCS poziom 2

W ETCS poziom 2 punkt początkowy czasu blokowania liczy się bezpośrednio od IP (rys. 5). Inne składniki czasu blokowania nie są wprowadzane przy ETCS poziom 2.

Jeżeli dla pociągu nie wydano pozwolenia na jazdę, pociąg musi zbroczyć z zaplanowanej dla niego trajektorii. Proces zmniejszania prędkości musi rozpocząć się w punkcie znaku uzależnionego od właściwości oddziaływania na pociąg.

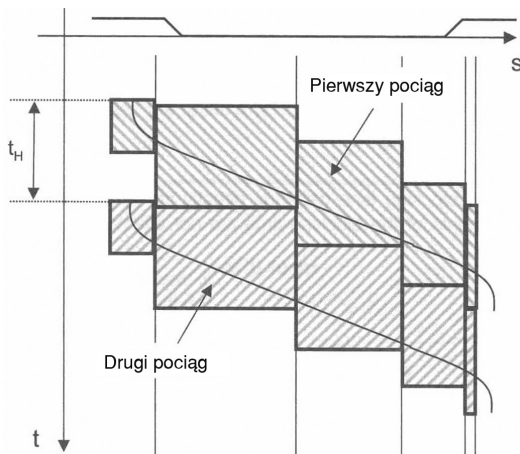
Na liniach z ustalonymi stałymi minimalnymi odstępami sygnalizatorów blokady, dla których dolna granica odległości zależy od uzasadnień ergonomicznych, maszyniści szczególnie w przypadku dużych prędkości nie będą zdolni do bezpiecznego zarejestrowania i rzeczywistego przetworzenia informacji z blisko rozmieszczonych przytorowych sygnalizatorów. ETCS poziom 2 łączy sygnalizację kabinową i ciągłe monitorowanie krzywych hamowania w zasadzie nadaje się do obsługi na liniach z bardzo krótkimi odstępami blokowymi.



Rys. 5. Model czasu blokowania dla ETCS poziom 2

Na liniach z prawie stałymi długościami bloku, sekwencje czasu blokowania objęte są całkowicie zamkniętym wewnętrznym obszarem przyspieszania i zmniejszania prędkości. W związku z tym pośrodku linii można utworzyć rezerwę przepustowości. Optymistyczne jest rozmieszczenie semaforów blokady według dynamiki ruchu pojazdu, przy założeniu możliwości realizacji pod ustalonymi warunkami nawet krótkich odstępów blokowych w obszarze startu i hamowania. W efekcie dałoby to znaczący wzrost redukcji w minimalnych odstępach i w związku z tym nastąpiłby zwiększenie udziału przepustowości dla linii, której to dotyczy.

Na rysunku 6 przedstawiono linię kolejową wyposażoną w ETCS poziom 2 i zoptymalizowane odstępy blokady. Ułatwia to zauważenie, że sekwencje czasu blokowania służą, jako kluczowa pomoc do przygotowania optymalizacji odstępów blokady oraz do późniejszej metody dążenia do celu osiągnięcia zakładanego

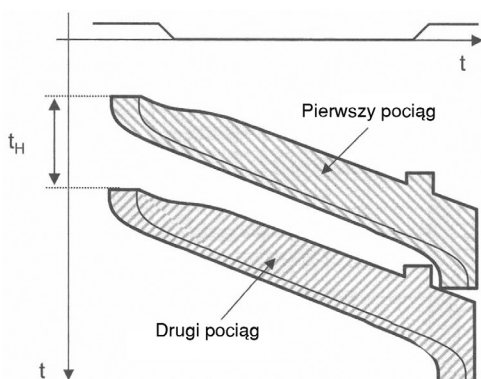


Rys. 6. Optymalizacja sekcjonowania blokady dla ETCS poziom 2

współczynnika przepustowości. Gdy kursowanie odbywa się w minimalnych odstępach, optymalnym jest rozmieszczenie odstępów blokowych do ustalonego porządku pociągów wynikającego ze scenariusza, gdy wszystkie w kolejności części czasu blokowania obejmują tylko kolejne dwa sąsiednie obszary. Ze względu na ograniczenia techniczne jeśli jest to możliwe, dąży się do tego aby osiągnąć w przybliżeniu optimum. Nadzwyczaj krótkie odcinki blokady z reguły wystawiane są do obszaru przyspieszania i hamowania.

Wykonana optymalizacja blokady pod działanie ETCS poziom 2 jest optymalna dopiero dla określonego scenariuszem porządku pociągów. W przypadkach, gdy konieczna jest równoczesna optymalizacja kilku(-nastu) scenariuszy porządku pociągów, muszą zostać przyjęte kompromisowe rozwiązania.

To podstawowe założenie zostało przedstawione do wdrożenia w życie przez Deutsche Bahn w jego koncepcji *CIR-Elke* (Komputerowa integracja transportu kolejowego – podniesienie sprawności wewnątrz rdzenia sieci) przez połączenie automatycznego systemu kontroli pociągu LZB z zaprojektowanymi krótkimi odstępami blokowymi do zoptymalizowanej dynamiki ruchu pojazdu (blokady dużej wydajności). Systemu nie instaluje się w Niemczech (wyjątkiem jest linia między Karlsruhe i Bazyleą) z powodu wysokich kosztów inwestycyjnych i obsługi, generowanych na bardzo krótkich odcinkach blokady. Potencjał blokady o dużej wydajności może być eksploatowany w celu uzyskania większej wydajności na liniach z harmonizowaną prędkością niż na tych, z których korzystają w ruchu mieszanym pociągi szybkie i wolne.



Rys. 7. Model czasu blokowania dla ETCS poziom 3

Model czasu blokowania dla ETCS poziom 3

Gdy wykorzystywany jest system ruchomego odstępu blokowego, ETCS poziom 3 zawsze dostarcza najkrótszego minimalnego odstępu dla wszystkich scenariuszy porządku pociągów. Obsługa ruchomego bloku jest uwarunkowana przez serię ograniczeń, pokrywając część czasu blokowania w ciągłym zakresie czasu blokowania. Głównie ograniczenia wywoływane są przez zespoły zwrotnic i sieciowe separatory odcinkowe na liniach zelektryfikowanych (rys. 7).

Ze względu na cele modelowania, ruchomy odstęp może być postrzegany jako dyskretna zmiana sekwencji następstw czasu blokowania. Krzywa zajętości przedziału czasu blokowania jest określona przez aktualnie wymaganą dla pociągu odległość hamowania przy uwzględnieniu jego długości dla krzywej odwołania z dodatkowym marginesem bezpieczeństwa. Zakres czasu blokowania tworzy w ten sposób funkcję graniczną założoną teoretycznie dla kolejności czasu blokowania, nieskończenie gęsto rozmieszczonej blokady.

Obliczenie osiągnięcia przepustowości dla karty UIC 406

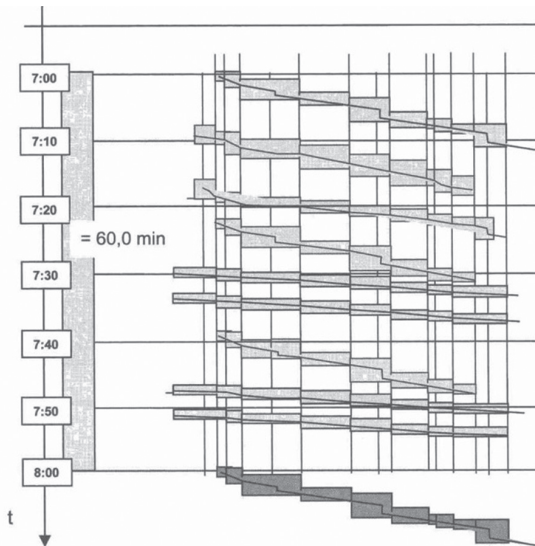
Metoda obliczenia osiągnięcia przepustowości zaproponowana w fiszce UIC 406 Przepustowość oparta jest na kolejności czasów blokowania jako modelu osiągnięcia przepustowości. Dlatego konieczne jest skoncentrowanie się na wzajemnych oddziaływaniach między różnymi trajektoriami pociągu i ich wpływem na przepustowość infrastruktury kolejowej.

Istnieje wiele korzyści, które wpływają na przepustowość sieci kolei. Do analizy pojemności i porównania można brać pod uwagę różne wymagania operacyjne, strategie wysyłania, zasady pierwszeństwa, prędkości, odległości blokowych, wyposażenia systemów sterowania ruchem i sygnalizacji. Ponadto ruch mieszany, stopień współdziałania i interferencji między pojemnością szlaku i pojemnością pociągu może zostać zmieniony z powodu wprowadzania nowych technologii. Przy używaniu w kolejności czasów blokowania i minimalnego czasu odstępu, większość tych wpływów dokładnie jest brana pod uwagę, ponieważ każdy pojedynczy wpływ jest uwzględniony w rachunkach obliczeniowych czasu blokowania i w związku z tym minimalnych czasach odstępu. Wszystkie te rezultaty są rozpatrywane przy minimalnych czasach odstępu między dwoma indywidualnymi trajektoriami pociągu, które mogą zostać niewątpliwie przyjęte do dalszych obliczeń o osiągnięciu przepustowości infrastruktury kolei.

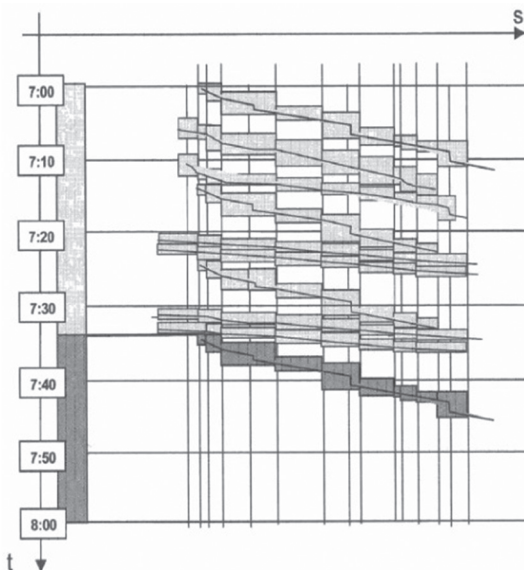
W karcie UIC 406 metodą upakowania przedstawiono procedurę dotyczącą osiągnięcia przepustowości linii kolejowej. Teoretyczne tło metody kompresji zostało przedstawione przez G. Adlera [1]. Wraz z równoczesnym upakowaniem odcinków linii z całkowitą kolejnością czasów blokowania, aż do uzyskania (teoretycznie) minimalnego odstępu zostało poparte w okresie badań.

Na rysunkach 8 i 9 pokazano metodę kompresji dla badanego okresu 60 min. Na rysunku 8 zaprezentowano oryginalny rozkład jazdy, a na rysunku 9 – upakowany rozkład jazdy ze skondensowaną kolejnością czasu blokowania. W tym przykładzie czas zajętości zaczyna się o 7.00, a kończy o 7.33. W ten sposób całkowity czas zajętości w badanym okresie wynosi 33 min.

Kierując się metodologią karty UIC 406, stosunku między całkowitym czasem zajętości i badanym okresem, w naszym przykładzie $\rho = 33/60$ i musi zostać porównany z zalecanym maksymalnym współczynnikiem zajętości (tab. 1).



Rys. 8. Oryginalny rozkład jazdy



Rys. 9. Skompresowany rozkład jazdy

Tabela 1

Rekomendowany maksymalny współczynnik zajętości

P_{max}	Typ linii	
	Okres szczytowy	Okres dzienny
	Dedykowana linia podmiejska	0,85 / 0,70
	Dedykowana linia dużych prędkości	0,75 / 0,60
	Linia ruchu mieszanego	0,75 / 0,60

Ogólne założenia dla wszystkich przypadków

W dalszej części na podstawie przykładów wyjaśniony zostanie wpływ różnych poziomów aplikacji ETCS na przepustowość linii kolejowych. Aby być niezależnym od wpływu narodowych czynników, do oszacowania osiągniętej przepustowości użyto ogólnych cech infrastruktury. Wybrano typowe przypadki infrastruktury: główne linie konwencjonalne, linie dużych prędkości i linie regionalne. Dla każdej linii założony jest określony program operacyjny i określone poziomy punktualności. Analizowane konfiguracje aplikacji ETCS obejmują poziom 1 z ograniczonym nadzorem,

poziom 1, poziom 2 z regularnymi i optymalizowanymi odstępami blokady oraz poziom 3.

W celu uniknięcia złej interpretacji, zwiększenie przepustowości przedstawiono w relacji z podstawowym przypadkiem ETCS poziom 1 bez dodatkowego uaktualniania. W przypadku odniesienia, uwzględniana jest tylko jedna balisa uaktualniająca, umieszczona w punkcie znaku najgorzej hamującego pociągu (pociąg odniesienia). IP jest obliczony zgodnie z [2, 3]. Przepustowość wspomnianego przypadku odniesienia wynosi 100%.

Wszystkie analizowane konfiguracje aplikacji ETCS oparte są na hamowaniu przy pomocy hamowania służbowego, z wyjątkiem scenariuszy: ETCS poziom 1 z niedostępnym hamowaniem służbowym i ETCS poziom 1 z ograniczonym nadzorem.

W badaniu przypadków zostało uwzględnione sześć klas pociągów (tab. 2).

Tabela 2

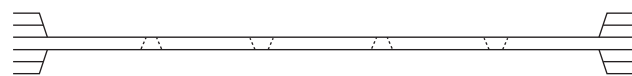
Parametry klas pociągów

Pociąg	Długość [m]	V_{max} [km/h]	Hamowanie		Liczba wagonów	Masa [t]
			[%]	pozycja		
Dużych prędkości	400	300	220	R + Mg	14	800
EuroCity	320	200	220	R + Mg	11	637
Express Regionalny	180	140	145	R	6	282
Regionalny	50	100	145	R		90
Międzyregionalny towarowy	500	100	80	P		1250
Towarowy	500	90	80	P		1000

Przypadek linii dużych prędkości

Kierując się konfiguracjami przebadano:

- ETCS poziom 1 z balisą w odległości najgorszej wydajności hamowania pociągu,
- ETCS poziom 1 z drugą balisą uaktualniającą w odległości 400 m przed głównym semaforem,
- ETCS poziom 2 z regularnymi odstępami blokowymi,
- ETCS poziom 2 z optymalizowanym odstępem blokowym,
- ETCS poziom 3 z ruchomym odstępem.



Infrastruktura

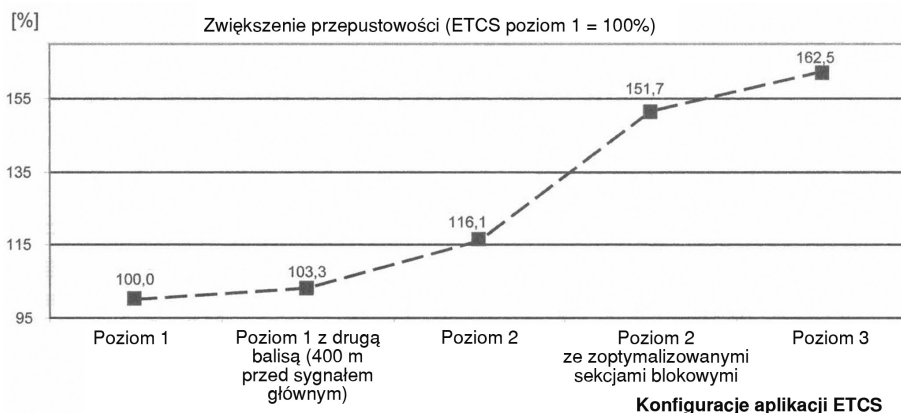
- prędkość 300 km/h
- długość linii 100 km
- stacje na początku i końcu linii
- brak stacji na szlaku
- części łączące nieużywane w normalnej eksploatacji

Schemat dla operowania

- jedynie obsługa długodystansowych pociągów pasażerskich
- 120 pociągów/dzień na kierunek (80 pociągów dużych prędkości i 40 EuroCity)

Rys. 10. Układ torowy i schemat operacyjny dla przypadku linii dużych prędkości

Wyniki obliczeń w przypadku dużych prędkości pokazano na rysunku 11. Wprowadzenie dodatkowego uaktualniania nieznacznie poprawia przepustowość. Wzrost ten jest spowodowany przez oszczędzanie czasów bufora. Wzrost w kontekście z poziomem 2 jest spowodowany przez elastyczne przechodzenie czasu, który określa się przez indywidualny punkt znaku, a nie przez miejsce grupy balis. ETCS poziom 3 (ruchomy odstęp) prowadzi do największego wzrostu przepustowości, która jednakże nie jest o wiele większa od poziomu ETCS 2 z optymalizowanym odstępem blokowym.

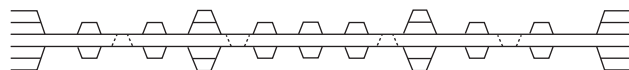


Rys. 11. Obliczona przepustowość dla przypadku linii dużych prędkości

Przypadek głównych linii konwencjonalnych

Biorąc pod uwagę aplikacje ETCS przebadano następujące konfiguracje:

- ETCS poziom 1 z ograniczonym nadzorem (odległość między odległym a głównym sygnalizatorem 1000 m),
- ETCS poziom 1 z niedostępnym hamowaniem służbowym,
- ETCS poziom 1 z balisą w odległości najgorszej wydajności hamowania pociągu,
- ETCS poziom 1 z drugą balisą uaktualniającą w odległości 400 m przed głównym semaforem,
- ETCS poziom 1 z pętlą uaktualniającą albo uaktualnianiem radiowym między odległym a głównym sygnalizatorem (1000 m),
- ETCS poziom 2 z regularnymi odstępami blokowymi,
- ETCS poziom 2 z optymalizowanym odstępem blokowym,
- ETCS poziom 3 z ruchomym odstępem.



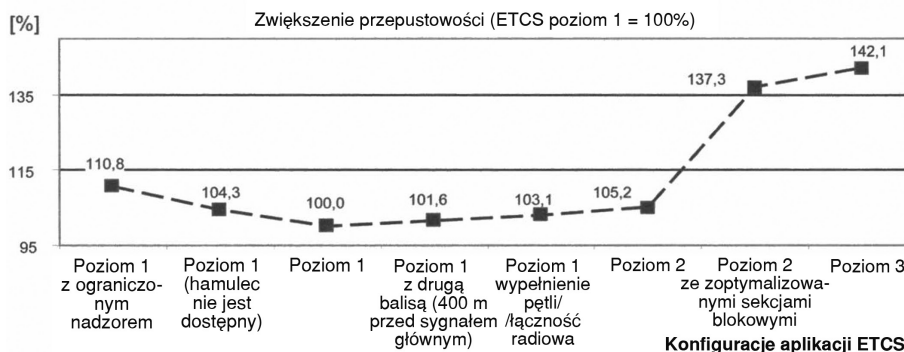
Infrastruktura

- prędkość 160 km/h
- długość linii 100 km
- długość odstępu blokowego 3 km
- stacje na początku i końcu linii
- dwie duże stacje i siedem stacji do wyprzedzania na szlaku

Schemat dla operowania

- obsługa długodystansowych i krótkodystansowych pociągów pasażerskich i towarowych
- 150 pociągów/dzień na kierunek (20 pociągów dużych prędkości 30 EuroCity, 20 szybkich i 20 wolnych pociągów regionalnych, 40 pociągów międzyregionalnych i 20 regionalnych pociągów towarowych)

Rys. 12. Układ torowy i schemat operacyjny dla przypadku linii konwencjonalnych



Rys. 13. Obliczona przepustowość dla przypadku linii konwencjonalnych

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 13. Okazuje się, że podstawowy ETCS poziom 1 prowadzi do stosunkowo małej przepustowości, porównywanej z innymi konfiguracjami. Natomiast porzucenie krzywej hamowania służbowego i ETCS poziom 1 z ograniczonym nadzorem prowadzi do zwiększenia przepustowości. Dla wielu linii z ruchem mieszanym możliwość opisanych konfiguracji mogłaby być właściwym wyborem zamiast podstawowego ETCS poziom 1.

Nawet poziom 2 nie wykazuje znaczącego zwiększenia przepustowości. Jest to spowodowane różnymi profilami prędkości pociągów na badanej linii głównej.

Zdecydowanie minimalne czasy odstępu spowodowane są przez różnice szybkości, które nie mogą zostać zrekomensowane w poziomie 2.

Duży skok w funkcji przepustowości następuje wraz z poziomem 3 i 2 z optymalizowanym odstępem blokowym. Można to wyjaśnić przez początkową sytuację z odległościami blokady o długości 3 km (rys. 12). Jeżeli odległości blokady na istniejącej linii byłyby krótsze, zwiększenia pojemności linii ruchu mieszanego z ETCS poziom 3 można by było zredukować do ponad 40%.

Przypadek linii regionalnych

Kierując się konfiguracjami przebadano:

- ETCS poziom 1 z balisą w odległości najgorszej wydajności hamowania pociągu
- ETCS poziom 2 z regularnymi odstępami blokowymi
- ETCS poziom 3 z ruchomym odstępem.



Infrastruktura

- tor pojedynczy
- prędkość 80 km/h
- długość linii 100 km
- brak odstępów blokowych
- stacje na początku i końcu linii
- cztery stacje do krzyżowania na szlaku

Schemat dla operowania

- obsługa krótkodystansowych pociągów pasażerskich i towarowych
- 25 pociągów/dzień na kierunek (5 szybkich regionalnych pociągów na każdy kierunek, 15 wolnych pociągów regionalnych na każdy kierunek i 5 regionalnych pociągów towarowych na każdy kierunek)

Rys. 14. Układ torowy i schemat operacyjny dla przypadku linii regionalnych

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 15. Nie ma prawie żadnej różnicy przepustowości między poziomem 1 i 2. Spowodowane jest to przez początkową sytuację nie pozwalającą na żadne dodatkowe odstępy blokowe między punktami krzyżowań. Poziom 3 wykazuje olbrzymi skok pojemności. Jest to spowodowane przez przypadkowy wzór operacji, który jest założony w przypadku próbki. Jeżeli wzorujemy się na dokładnej jeździe naprzemian, która zostanie założona na linii jednotorowej – kierunek właściwy/kierunek przeciwny – wzrost przepustowości poziomu 3 byłby bardzo zredukowany.

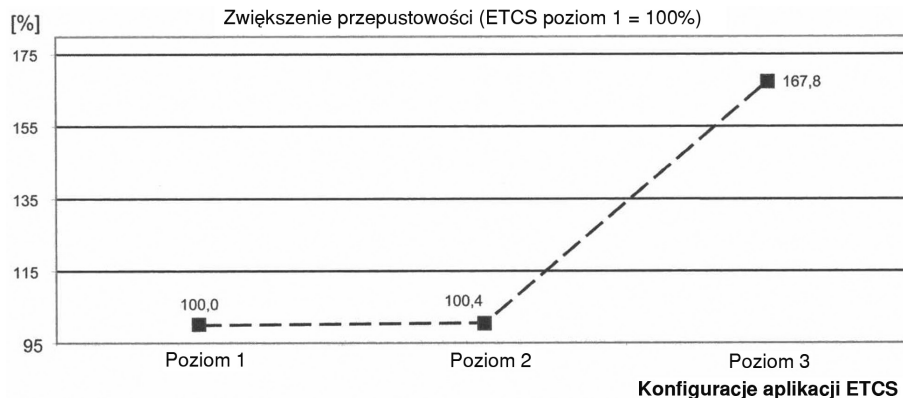
Komentarze do wyników, wnioski

Przedstawione obliczenia przepustowości pozwalają na przedstawienie wstępnych wniosków dla linii dużych prędkości, konwencjonalnych i regionalnych. We wszystkich trzech przypadkach różne konfiguracje ETCS poziom 1 w pełnym nadzorze z interwencją obsługi hamowania dowodzą o najmniejszej przepustowości we wszystkich trzech przypadkach. Wpływ uaktualniania jest marginalny w chwili używania, pociągi pospieszne kursują gęsto za wolniejszymi (ruch zatrzymanie – jazda). Większe wpływy uaktualniania mogą być oczekiwane w odcinkach od linii i w stacjach węzłowych, gdzie ruch manewrowy może zablokować trasy przybywających pociągów oraz w innych specjalnych okolicznościach. W ETCS poziom 1 z ograniczonym nadzorem i ETCS poziom 1 z niedostępnym hamowaniem służbowym powoduje znaczne zmniejszenie szybkości hamowania pomocniczego, co prowadzi do krótszego czasu zbliżania się do głównego sygnalizatora. Dzięki temu, uzyskujemy minimalne zmniejszenie odstępów i zwiększenie przepustowości. Porównując do istniejącej sygnalizacji i systemów kontroli pociągu, należy ostrożnie ustawiać narodowe wartości ETCS formuł hamowania. W przeciwnym razie ETCS poziom 1 może prowadzić do zmniejszenia przepustowości na istniejących liniach kolejowych.

We wszystkich przypadkach operacji pociągu, ETCS poziom 2 pokazuje niewielkie zwiększenie przepustowości w porównaniu do poziomu 1. Na liniach kolejowych poziomu 2 możliwe jest zwiększenie przepustowości, które może być większe z powodu różnic w odległościach hamowania różnych typów pociągu. ETCS poziom 2 z optymalizowanym odstępem blokowym wykazuje znaczącą większą przepustowość.

ETCS poziom 3 ma najwyższy potencjał, co do zwiększenia przepustowości dzięki ruchomemu odstępowi. Jednakże zwiększenie pojemności poziomu 3 w porównaniu do poziomu 2 z optymalizowanym odstępem blokowym jest stosunkowo skromny.

Jest ważne aby zauważyć, że na przepustowość linii kolejowej wpływa kilka parametrów (system sygnalizacji, profile prędkości, model operacyjny, itd.). Dotychczas badane przypadki dają pogląd wpływu ETCS na przepustowość. Nie dopuszcza to do generalizowania wymienionych liczb przepustowości dla wszystkich linii kolejowych. Natomiast, zalecane jest wykorzystywanie ogólnej metodologii dotyczącej teorii czasu blokowania, w celu oszacowania przepustowości określonej linii kolejowej wyposażonej w ETCS według jakiejś aplikacji konfiguracji.



Rys. 15. Obliczona przepustowość dla przypadku linii regionalnych

- [3] Gröpler O.: *Bremswege und Bremswegesicherheit (Braking distances and related safety)*. ZEV Rail Glassers Annalen 132 1-2/2008, s. 31–39
- [4] Happel O.: *Sperrzeiten als Grundlage der Fahrplankonstruktion (Blocking times as base for the timeetabling)*. ETR 8, 2/1959, s. 79–80.
- [5] Meier M, Bär M.: *Minimale Zugfolge und notwendige Pufferzeiten im Hochgeschwindigkeitsverkehr mit ETCS (Minimal train spacing and required buffer times in high-speed train operation with ETCS)*. Proc. 20. Verkehrswiss. Tage, Dresden (2005), Sesion 4c.
- [6] Schwanhäuber W.: *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn (Dimensioning of buffer times in context of railway time-tables)*. Veröffentlichungen des Verkehrswiss. Institut der RWTH Aachen, vol. 20 (1974).
- [7] Mikulski J., Mtyńczak J.: *IMPLEMENTATION OF RELAY SECTION BLOCKS IN THE ERTMS/ETCS SYSTEM*. Materiały 16 Międzynarodowej Konferencji EURNEX – ŻEL 2008 „Towards more competitive european rail system”, Żylna, 2008.
- [8] *UIC Code 406 „Capacity“*. UIC, Editions Techniques Ferroviaires, Paris 2004.
- [9] Wegel H.: *Der Hochleistungblock mit linienförmiger Zugbeeinflussung (High performant block based on LZB)*. Die Deutsche Bahn 68 7/1992, s. 735–739.
- [10] Wendler E.: *Weiterentwicklung der Sperrzeitentreppe für moderne Signalsysteme (Further development of blocking-time sequences related to modern signalling systems)*. Signal+Dracht 87, 7-8/1995, s. 268–273.
- [11] Wendler E.: *ETCS und Kapazität (ETCS and capacity)*. Proc. VDE Kongress 2006 Aachen, vol. 2, s. 369–374, VDE-Verlag Berlin, Offenbach (2006).
- [12] Winter P.: *Global perspectives for ERTMS, ETCS and GSM-R*. UIC, Editions Techniques Ferroviaires, Paris 2007.

Literatura

- [1] Adler G.: *Die Verkettung der Streckenbelegungen einer Gesamtstrecke (Linking of track occupation for railway lines)*. Diss. A., Hochschule für Verkehrswesen, Dresden (1967).
- [2] *Description of the brake curve calculation*. Version 6K, ERTMS Users Group, Brussels (2007)

dr inż. Andrzej Białoń – Instytut Kolejnictwa, Politechnika Śląska, Wydział Transportu

abialon@ikolej.pl, Andrzej.bialon@polsl.pl

mgr inż. Paweł Gradowski Instytut Kolejnictwa
pgradowski@ikolej.pl

mgr Marta Gryglas Instytut Kolejnictwa
mgryglas@ikolej.pl