

Optymalizacja zużycia energii trakcyjnej przy zastosowaniu inteligentnych systemów prowadzenia ruchu kolejowego

Optimization of traction energy consumption using intelligent rail traffic management systems

Janusz Szkopiński

Dr inż.

PKP Polskie Linie Kolejowe SA,
janusz.szkopinski@plk-sa.pl

Streszczenie: Przedmiotem pracy jest analiza korzyści z wdrożenia inteligentnych systemów prowadzenia ruchu kolejowego w aspekcie uzyskania płynności jazdy pociągu i w konsekwencji na zmniejszeniu zużycia energii trakcyjnej pociągu. Analiza przeprowadzona jest w odniesieniu do stosowanych na kolejach europejskich rozwiązań technicznych, umożliwiających optymalizację ruchu pociągu. Jednym z czynników pozwalających na taką optymalizację jest takie kształtowanie profilu prędkości pociągu, aby czas jazdy pociągu do semafora wskazującego sygnał „Stój” był nie krótszy niż przewidywany czas do zmiany sygnału na zezwolenie na dalszą jazdę. W ramach tej analizy przeprowadzono symulacje ruchu w oparciu o model pociągu ETR610 typu ED250, dla różnych wariantów sterowania prędkością pociągu i dwóch wariantów odległości wstępnej do semafora. Rezultatem pracy są spostrzeżenia o możliwości wdrożenia inteligentnych systemów prowadzenia ruchu kolejowego, w tym porównanie możliwych oszczędności w zużyciu energii trakcyjnej.

Słowa kluczowe: *Optymalizacja; Zużycie energii; Prowadzenie ruchu kolejowego*

Abstract: The subject of the work is an analysis of the benefits of implementing intelligent rail traffic control systems in terms of achieving smooth train travel and, consequently, reducing the train's traction energy consumption. The analysis is carried out in relation to the technical solutions used on European railways, enabling the optimization of train traffic. One of the factors allowing for such optimization is shaping the train speed profile in such a way that the train travel time to the semaphore indicating the "Stop" signal is not shorter than the expected time until the signal changes to permission to continue. As part of this analysis, traffic simulations were carried out based on the ETR610 train model of the ED250 type, for different variants of train speed control and two variants of the initial distance to the semaphore. The result of the work are observations on the possibility of implementing intelligent rail traffic management systems, including a comparison of possible savings in traction energy consumption.

Keywords: *optimization; Energy consumption; Rail traffic management*

Wstęp

Prowadzenie ruchu kolejowego oparte jest na rozkładzie jazdy pociągów oraz możliwościach przepustowych danej linii kolejowej [4]. Opracowanie rozkładu jazdy pociągów realizowane jest na podstawie planowanej oferty przewozowej, możliwości realizacji jazd przez poszczególne składy, ograniczeń infrastruktury (np. dopuszczalnych prędkości, nacisków na oś i skrajni), zdolności przepustowej, koniecznych zatrzymań i postojów wynikających z potrzeb ruchowych, eksploatacyjnych i handlowych, jak również identyfikacji ewentualnych kolizji w ruchu tych pociągów. O zdolności przepustowej natomiast decyduje m.in. liczba posiadanych torów oraz systemy sterowania ruchem na szlakach i posterunkach ruchu, umożliwiającymi zachowanie od-

powiednich, bezpiecznych, odległości pomiędzy pociągami.

Przewidywanie w czasie rzeczywistym pozycji pociągów jest podstawowym wymogiem skutecznego wyznaczania tras, sterowania ruchem pociągów oraz ewentualnych zmian rozkładu jazdy. W praktyce [5] w centrach sterowania ruchem znane są tylko sumaryczne i końcowe wartości opóźnienia pociągów, a dyspozytorzy muszą przewidywać czasy przyjazdu pociągów wyłącznie na podstawie doświadczenia, bez odpowiedniego wsparcia komputerowego. Często prowadzi to do prostej ekstrapolacji bieżących opóźnień na oczekiwane opóźnienia przyjazdów. Niektóre koleje wykorzystują liniowe przesunięcie rozkładu jazdy, aby ekstrapolować obecne opóźnienia na przyszłość. W metodzie tej pomija się fakt, że niektóre pociągi

mogą (częściowo) nadrobić zaległości za pomocą skrócenia czasu jazdy, podczas gdy inne mogą być (bardziej) opóźnione z powodu konfliktów tras.

W związku z powyższymi problemami, pojawiły się rozwiązania połączenia centr sterowania ruchem z centrami zarządzania ruchem, aby przyspieszyć przepływ sterowania z poziomu kierowania planistycznego na poziom operacyjny [3]. Nowe kanały komunikacji między dyspozytorami w centrach zarządzania ruchem a maszynistami są w stanie natomiast zapewnić ciągłą i bezpośrednią kontrolę ruchu pociągów, jak również na bieżąco porównywać rzeczywiste przemieszczanie się pociągu z modelem szacowanego ruchu tego pociągu.

Artykuł jest kontynuacją pracy autorów nad zagadnieniem efektywności energetycznej jazdy pociągu w wyni-

ku optymalizacji jego profilu prędkości [11], biorąc pod uwagę następstwo pociągów na linii kolejowej ze stałymi odstępami blokowymi [9] jak również z ruchomymi odstępami blokowymi [10]. W publikacjach tych zostały poruszone zagadnienie odpowiedniego sterowania prędkością pociągu „następującego”, na podstawie rozszerzonej informacji o prędkości pociągu „poprzedzającego”. Jak zauważono, wyniki były silnie uwarunkowane przyjętymi kontekstami ruchu pociągu „poprzedzającego” oraz momentem (odległością między pociągami) w chwili rozpoczęcia sterowania pociągiem „następującym”.

W obecnej publikacji skoncentrowano się natomiast nad możliwością uzyskania zmniejszenia zużycia energii ruchu pociągu, dzięki zastosowaniu inteligentnych systemów prowadzenia ruchu kolejowego.

Inteligentne systemy prowadzenia ruchu kolejowego

Dzisiejsze nowoczesne stanowisko dyspozytorskie, m.in. na kolejach SBB, wyposażone są w zespół monitorów dostarczających (niemal) aktualnych informacji o stanie sytuacji ruchowej za pomocą różnych graficznych interfejsów użytkownika (GUI) [3].

Najważniejszy GUI dyspozytora wyświetla tzw. wykres czasowo-dystansowy, gdzie dyspozytor może wybrać konkretną linię kolejową, wyświetlić prognozy ruchu pociągów oraz dokonać zmian w czasie jazdy pociągów poprzez wydawanie bezpośrednich decyzji dyspozytorskich do systemu sterowania i do pociągów, czy prowadzenie pociągu przez maszynistę. Efektem takiej możliwości jest adaptacyjne sterowanie pociągiem, które pozwala na optymalizację profilu prędkości pociągów, realizując tzw. politykę zielonej fali polegającą na unikaniu zbędnych zatrzymań pociągów na sygnałach „Stój” [3].

Zastosowanie takiej optymalizacji profilu prędkości pociągów pozwala na osiągnięcie większej przepustowości i płynności ruchu pociągów, i tym samym, uzyskanie zmniejszenia zuży-

cia energii ruchu pociągów.

W artykule [5] przedstawiono narzędzie (model demonstracyjny zastosowany na linii Haga – Rotterdam w Holandii) do ciągłego przewidywania ruchu pociągów w czasie rzeczywistym za pomocą wykresu zdarzeń w czasie. Narzędzie to pozwala na rejestrację wszystkich zaplanowanych zdarzeń i relacji kolejności pociągów m.in. minimalne wymagane odstępy między pociągami oraz ich ewentualne skomunikowanie. Wykres ruchu jest regularnie aktualizowany, gdy pojawiają się nowe informacje na temat pozycji pociągów lub decyzji kontroli ruchu. Czasy realizacji wszystkich zdarzeń na wykresie są przewidywane z uwzględnieniem wykorzystania buforów czasu jazdy, a także straty czasu z powodu konfliktów tras na podstawie schematu wykrywania konfliktów w ramach algorytmu predykcji.

W szwajcarskim systemie sterowania ruchem RCS-DISPO [8] zaimplementowano narzędzie predykcyjne „on-line”. Główną częścią tego narzędzia jest model mikroskopowy oparty na skierowanym grafie acyklicznym z wagami łuków, obliczanymi za pomocą równań ruchu pociągu przy uwzględnieniu opisu infrastruktury oraz charakterystyk dynamiki jazdy pociągu. Narzędzie jest stosowane w przypadku dużej liczby pociągów (między 900 a 2000) z dokładnością predykcji na poziomie błędu mniejszego niż 1 minuta dla zdarzeń w 20-minutowym horyzoncie czasu.

Drugim interesującym rozwiązaniem zastosowaniem przez kolej SBB jest narzędzie RCS-HOT (Hub Optimization Technology) [8], który pozwala na optymalizację zarządzania grupami pociągów w problematycznych, pod względem przepustowości, punktach sieci torowej. Narzędzie to oblicza idealny profil jazdy dla każdego pociągu i przekazuje te informacje załodze lokomotywy za pośrednictwem urządzeń przytorowych lub tabletu w pojeździe. HOT oblicza również najlepszą kolejność pociągów i automatycznie przesyła dane do systemów sterowania i bezpieczeństwa, umożliwiając w ten sposób, efektywniejsze wykorzystanie

przepustowości tras pociągów.

Pozytywnym zwiastunem zastosowania inteligentnego systemu prowadzenia ruchu na sieci kolejowej w Polsce jest realizowany na zlecenie Centralnego Portu Komunikacyjnego „Plan wdrażania systemu kierowania i sterowania ruchem kolejowym w architekturze RCA-CPK” [14].

Architektura RCA-CPK bazuje na doświadczeniu z wcześniejszych międzynarodowych prac w ramach inicjatyw: EULYNX (standardy dla interfejsów), RCA (kształt struktury poszczególnych systemów ksrk), Smartrail 4.0 (modułowa budowa systemów ksrk), BRIK (uniwersalny protokół transmisji oraz standaryzacja podstawowych interfejsów), OCORA (architektura referencyjna CCS na pojeździe) itd.

RCA zwiększa interoperacyjność i zapewnia wymiennność elementów, bazuje na architekturze i standardzie EULYNX oraz pozwala na integrację z regułami ERTMS, a tym samym, umożliwia na włączenie w jednolitą architekturę systemu ETCS oraz jego przyszłego rozszerzenia m.in. w obszarze ATO (ang. Automatic Train Operation).

RCA opiera się na założeniu budowy systemów ksrk z modułów stanowiących pewne wyodrębnione części systemu (komponenty), co wynika z podziału na funkcje, cykl życia poszczególnych komponentów i wymagań bezpieczeństwa.

Jedną z warstw zarządzanych w architekturze RCA-CPK jest warstwa zarządzania, kierowania i sterowania ruchem (TMS, ang. Train Management System), która obejmuje funkcje: planowania ruchu pociągów, konstrukcji wykresów ruchu, realizacji planu przewozowego i rozkładu jazdy, kierowania i sterowania ruchem, w szczególności: automatyczne rozwiązywanie konfliktów ruchowych, kontroli dyspozytorskiej oraz przekazywania informacji o pociągach, automatycznego nastawiania przebiegów, zdalnego sterowania, wyznaczania parametrów optymalizacji jazdy pociągów itd.

RCA zapewnia centralizację funkcji zależnościowych i sterowania ruchem na poziomie odcinkowo-węzłowym, znacznie powyżej pojedynczego po-

sterunku ruchu. Górnym poziomem do którego specyfikowane są interfejsy jest poziom planowania i analiz, określony jako moduł TMS-PAS.

Wyniki obliczeń wypracowane na poziomie centrum dyspozytorskiego (TMS-PAS) przekazywane są do obszarowych centrów sterowania, do modułu TMS-PE (ang. *Traffic Management system – Plan Execution*) oraz do modułu TMS-AE (ang. *Traffic Management system – ATO Execution*), który dedykowany jest do generowania komunikatów przekazywanych przez moduły pośredniczące do pojazdu, w ramach realizacji funkcjonalności ATO.

Z perspektywy wdrożenia omawianego w artykule zagadnienia, zastosowanie warstwy zarządzania, kierowania i zdalnego sterowania ruchem (TMS) umożliwi uzyskanie nowych funkcjonalności w obszarze kontroli przebiegu procesu ruchowego i podejmowania decyzji dyspozytorskich, w tym: optymalizacji trasy pociągu, optymalizacji obciążenia infrastruktury na stacjach węzłowych oraz optymalizacji jazdy pociągu.

Moduł TMS-PAS współpracuje z modułem TMS-PE i modułem TMS-AE poprzez wykorzystanie modułu śledzenia sytuacji ruchowej i zastosowanych funkcji:

- odbierania danych o sytuacji ruchowej z posterunków,
- automatycznego wykrywania odchyleń od planowanego przebiegu procesu ruchowego,
- generowania informacji o opóźnieniach pociągów,
- sygnalizacji potencjalnych sytuacji konfliktowych,

w wyniku zastosowania modułu wspomagania decyzji dyspozytorskich w obszarze:

- planowania ruchu pociągów,
- prognozowania sytuacji ruchowej,
- symulacji sytuacji ruchowej dla planowanych zmian na bieżącą sytuację ruchową,

i ostatecznie zastosowaniu modułu dynamicznej optymalizacji trasy pociągu oraz modułu dynamicznej optymalizacji jazdy pociągu za pomocą funkcji:

- automatycznej analizy wpływu proponowanych zmian na bieżącą sytuację ruchową,
- dynamicznej optymalizacji trasy pociągu,
- optymalizacji obciążenia infrastruktury na stacjach węzłowych,
- optymalizacji jazdy pociągu w celu zapewnienia płynności, efektywności energetycznej, punktualności („zielona fala”).

Zagadnienie najbardziej zbliżone do przedmiotu analizy w publikacji jest funkcja optymalizacji jazdy pociągu, w celu uzyskania tzw. zielonej fali.

Jak zostało przedstawione przez autorów pracy [14]: *Potocznie efekt wdrożenia takiej funkcji określa się jako „zielona fala” ponieważ pociągi jadą zasadniczo z prędkością maksymalną lub najwyższą możliwą do uzyskania przy zachowaniu warunków ograniczenia zbędnego hamowania i przyspieszania do minimum. „Zielona fala” ogranicza zatrzymania pojazdów przed semaforami z sygnałem „Stój”.*

Optymalizacja jazdy pociągu

Przedstawione przez autorów zagadnienie optymalizacji ruchu pociągów rozważane jest w wybranym aspekcie kształtowania się profilu prędkości pociągu, na podstawie posiadanych informacji o odległości pociągu do semafora wskazującego sygnał $S1$ „Stój” ($D0$) oraz czasu T , po którym sygnał na semaforze zmieni się na sygnał $Sp2$ (zezwolenie na jazdę z największą dozwoloną prędkością).

Informacja o odległości uzyskuje się z systemu sterowania ruchem pociągu, natomiast informacje o T na podstawie

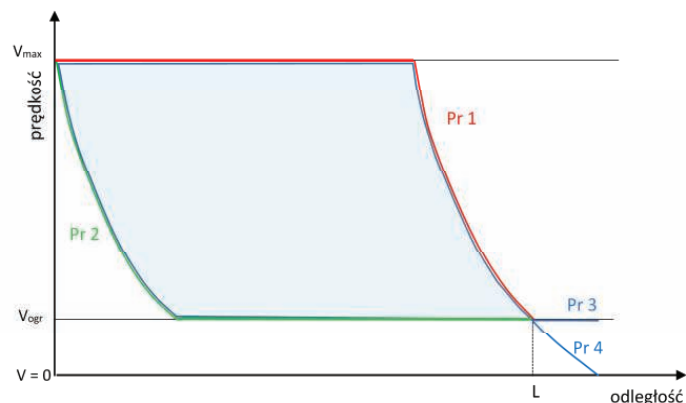
informacji predykcyjnych z inteligentnego systemu prowadzenia ruchu kolejowego (m.in. w oparciu o sytuację ruchową na linii kolejowej przed pociągiem).

Na rysunku 1 przedstawione są dwa profile prędkości jazdy pociągu: $Pr1$ i $Pr2$, ograniczające zbiór szukanych rozwiązań (zaznaczony kolorem niebieskim).

Profil $Pr1$ polega na utrzymaniu najwyższej dopuszczalnej prędkości jazdy pociągu na danym odcinku linii kolejowej. Jego ograniczenie wynika z krzywej hamowania umożliwiającego na zatrzymanie pociągu w odległości bezpiecznej od semafora wskazującego sygnał „Stój”. Profil ten cechuje najkrótszy czas jazdy, ale wymaga największego zużycia energii mechanicznej na pokonanie największych oporów ruchu przy prędkości maksymalnej (siła oporu ruchu zależy m.in. od kwadratu prędkości jazdy pociągu).

Profil $Pr2$ polega na zastosowaniu hamowania (według krzywej hamowania roboczego) już w początkowym etapie jazdy pociągu oraz na kontynuację jazdy z minimalną prędkością do ww. semafora. Profil ten cechuje najdłuższy czas przejazdu do punktu L , ale charakteryzuje się najmniejszym zużyciem energii mechanicznej, co wynika z długości odcinka na którym porusza się pociąg ze stałą minimalną prędkością jazdy.

W sytuacji ruchowej, gdy pociąg w punkcie L uzyska zezwolenia na dalszą jazdę, kontynuuje jazdę z prędkością V_{ogr} (linia $Pr3$), w przypadku braku zezwolenia na dalszą jazdę następuje jego hamowanie ze zmniejszeniem prędkości poniżej V_{ogr} (linia $Pr4$), aż do zatrzymania pociągu. Linie $Pr3$ i $Pr4$ sta-



1. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych dla hamującego pociągu (źródło: opracowanie własne)

nowią kontynuację profili prędkości ze zbioru szukanych rozwiązań.

Zadanie optymalizacyjne polega na wskazaniu takiego profilu prędkości pociągu, aby pociąg w najmniejszym stopniu utracił energię kinetyczną ruchu dojeżdżając do ww. semafora, w tym nie zachodziła konieczność zatrzymania i postoju pociągu.

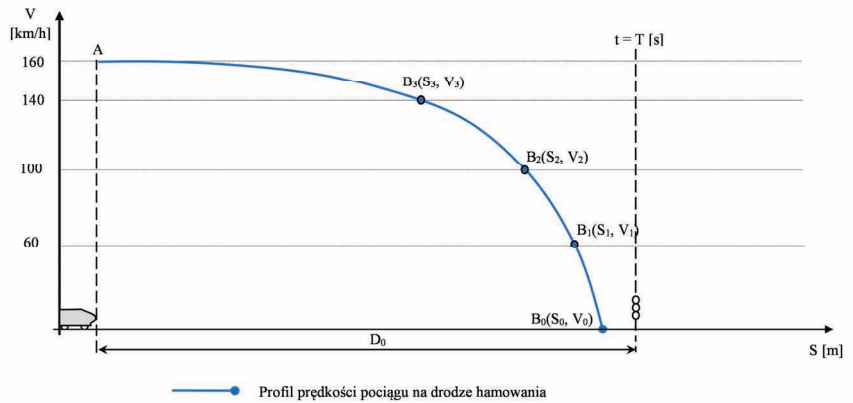
Przedmiotem optymalizacji jest zatem znalezienie takiego profilu prędkości pociągu (przedstawiono przykład na rysunku 2), aby poruszający się pociąg z punktu A uzyskał w czasie T punkt B, o określonej prędkości i przebytym dystansie. Kryterium zaś oceny stanowi miara zużycia energii mechanicznej potrzebnej na przywrócenie prędkości maksymalnej pociągu i odzyskanie utraconego dystansu, w stosunku do przypadku jazdy pociągu bez wystąpienia ograniczenia prędkości (pociąg odniesienia Pw).

Przedstawione na rysunku 2 punkty: B_0, B_1, B_2, B_3 stanowią punkty na krzywej hamowania pociągu zgodnie z instrukcją le-4 [7].

Pierwszym etapem analizy jest sprawdzenie, dla którego punktu na krzywej hamowania (określającej prędkość pociągu i jego odległość do semafora w chwili zmiany sygnału z $S1$ na $Sp2$) uzyskuje się najmniejsze zużycie energii mechanicznej, aby przywrócić utraconą prędkość i drogę z powodu zastosowanego hamowania. W kolejnym etapie dokonano symulacji ruchu pociągu od punktu A do punktu B przy założeniu znajomości wymaganego czasu na zmianę sygnału z $S1$ na $Sp2$ (czas symulacji $T = 133$ s, dla dwóch scenariuszy odległości wstępnej do semafora wynoszących D_0 : 3 km i 5 km).

Symulacje realizuje się dla różnych sposobów prowadzenia pociągu, z zachowaniem wymaganej drogi hamowania (zależnie od prędkości) przed semaforem z sygnałem $S1$, według następujących wariantów:

- W1: hamowanie z opóźnieniem $a_h = -1,0$ m/s² i następnie jazda ze stałą prędkością,
- W2: hamowanie z opóźnieniem $a_h = -0,5$ m/s² i następnie jazda ze stałą prędkością,
- W3: hamowanie z opóźnieniem $a_h =$



2. Punkty na krzywej hamowania (źródło: opracowanie własne na podstawie [7])

-1,0 m/s², odcinek jazdy ze stałą prędkością oraz ruch z maksymalnym przyspieszeniem.

W4: hamowanie z opóźnieniem $a_h = -0,5$ m/s², odcinek jazdy ze stałą prędkością oraz ruch z maksymalnym przyspieszeniem.

W5: jak w wariantcie 3 ale na krótszym odcinku z niższą prędkością stałą.

Zużycie energii mechanicznej liczone jest jako cząstkowe sumy energii potrzebnej na pokonanie oporów ruchu, natomiast w przypadku zwiększenia prędkości, dodatkowo różnicy energii kinetycznej w granicach zmiany prędkości.

W przypadku energii potrzebnej na pokonanie oporów ruchu, określono siłę oporu dla średniej prędkości w sekundowym przedziale czasu, i pokonanego w tym czasie dystansu:

$$Z_{opr} = \sum_{i=1}^{Tn} F_{sr} \Delta S_i \quad (1)$$

gdzie: i stanowi numer kolejnych 1 sekundowych odcinków czasu takich że, $i: \{i = 1, \dots, Tn\}$, a Tn jest czasem trwania analizowanej zmiany, natomiast F_{sr} stanowi średnią siłę oporu działającą dla określonego odcinka czasu Ti .

Dla ruchu przyspieszonego zużycie energii kinetycznej w czasie Tn od prędkości V_1 do prędkości V_2 wynosi:

$$Z_{\Delta V} = \int_{V_1}^{V_2} m_f V dV \quad (2)$$

gdzie: m_f – masa uwzględniająca energię masy wirującej, V – prędkość pociągu, natomiast sumaryczne zużycie energii mechanicznej dla ruchu przyspieszonego wynosi:

$$Z_m = Z_{opr} + Z_{\Delta V} \quad (3)$$

Metoda porównania wyników (normalizacja)

Celem normalizacji nie jest wyznaczenie wielkości zużytej energii mechanicznej przez pociąg (wartość taka bowiem zależy od różnych czynników jak np. profil linii kolejowej, łuki poziome, przyczepność koło-szyna itd.), lecz możliwość dokonania, dla identycznych warunków eksploatacyjnych, porównania wariantów prowadzenia pociągu za pomocą jednego kryterium oceny, jakim jest zużycie energii mechanicznej.

Zastosowanie w optymalizacji kryterium zużycia energii mechanicznej wymaga zdefiniowania metody porównania wartości tj. prędkość pociągu (Pn) i jego odległość do semafora uzyskanych w momencie $t = T$. Realizuje się to poprzez wyznaczenie wielkości zużycia energii mechanicznej pociągu, która jest wymagana do „odzyskania” utraconej prędkości i dystansu.

Utracone wielkości odnosi się do tzw. pociągu odniesienia (Pw), dla którego przyjmuje się brak konieczności ograniczenia prędkości – semafor wyświetla sygnał $Sp2$ już w momencie $t = 0$ gdy pociąg znajduje się w punkcie A.

Zagadnienie normalizacji realizowane jest za pomocą symulacji jazdy pociągu dla różnych wariantów wartości wejściowej. Proces normalizacji przeprowadzony jest zaś w następujący sposób (rysunek 3):

1. Podniesienie prędkości pociągu Pn do wartości prędkości pociągu Pw .

W symulacji wyznacza się czas T_{B-s1} i energię mechaniczną $Z(\Delta V)$ konieczną na odzyskanie przez P_n prędkości jak dla pociągu P_w (odcinek $B - s1$).

2. Pokonanego dystansu przez pociąg P_n do miejsca gdzie był pociąg P_w w chwili rozpoczęcia procesu normalizacji.

Wyznacza się potrzebny czas t_{s1-s2} i energię mechaniczną $Z(\Delta S)$ potrzebną na pokonanie brakującego dystansu do miejsca, gdzie w momencie $t = T$ był P_w (odcinek $s1 - s2$).

3. Wyrównanie powstałego czasu opóźnienia pociągu P_n do pociągu P_w .

Wyznacza się energię mechaniczną $Z(\Delta T)$ potrzebną na tzw. dogonienie przez pociąg P_n pociągu P_w (odcinek $s2 - C$), co możliwe jest poprzez hipotetyczne podniesienie prędkości powyżej ustalonej prędkości maksymalnej: $V_H > V_{max}$.

Uzyskane zużycie energii pociągu pomniejszone o zużycie energii pociągu odniesienia stanowi wartość, którą należy porównać między analizowanymi wariantami ruchu pociągu P_n .

$$uZ_m = Z_B + Z(\Delta V) + Z(\Delta S)Z(\Delta T) - Z_{w_{A-s2}} - Z_{w_{s2-C}} \quad (4)$$

gdzie:

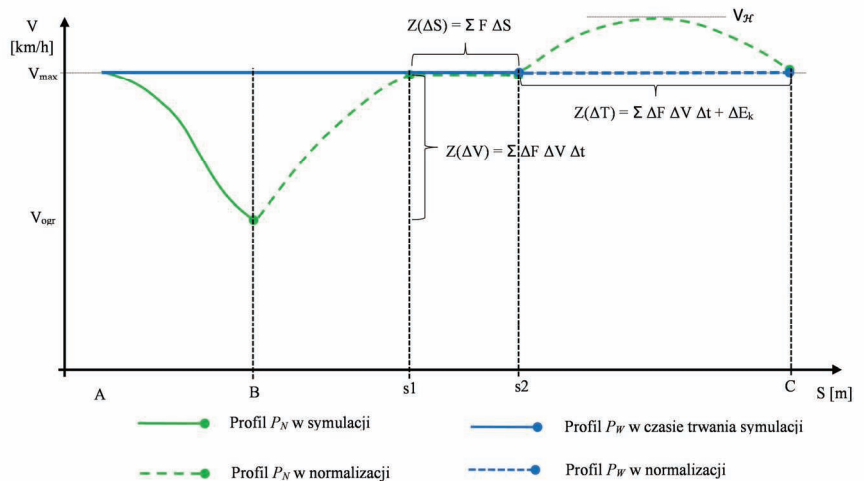
Z_B – zużycie energii przez pociąg P_n na odcinku $A-B$, w czasie od $t = 0$ do $t = T$;
 $Z(\Delta V)$ – zużycie energii przez pociąg P_n na odzyskanie prędkości w procesie normalizacji;

$Z(\Delta S)$ – zużycie energii przez pociąg P_n na odzyskanie drogi w procesie normalizacji;

$Z(\Delta T)$ – zużycie energii przez pociąg P_n na odzyskanie czasu w procesie normalizacji;

$Z_{w_{A-s2}}$ – zużycie energii przez pociąg P_w na odcinku $A-s2$, w czasie od $t = 0$ do $t = T$;

$Z_{w_{s2-C}}$ – zużycie energii przez pociąg P_w w procesie normalizacji.



3. Proces normalizacja wyników

Symulacja

Model symulacyjny oparty jest na charakterystykach pociągu ETR610 typu ED250.

Parametry przyspieszeń ustalone zostały w oparciu o informacje w publikacji [13], gdzie dla przyspieszenia pociągu na prostym i poziomym torze, z normalnym obciążeniem (masa 427 ton) i 100% dostępnej mocy trakcyjnej, stosuje się następujące wartości:
 $a_r = 0,49 \text{ m/s}^2$ – średnie przyspieszenie od prędkości 0 km/h do 40 km/h,
 $a_r = 0,42 \text{ m/s}^2$ – średnie przyspieszenie od prędkości 0 km/h do 120 km/h,
 $a_r = 0,36 \text{ m/s}^2$ – średnie przyspieszenie od prędkości 0 km/h do 160 km/h,
 $a_r = 0,07 \text{ m/s}^2$ – przyspieszenie resztkowe przy prędkości 250 km/h.

Opór ruchu wyznaczono na podstawie parametrów określonych dla zespołów w trakcyjnych publikacjach: [1][2] i opisany został charakterystyką: $F = 8V^2 + 130V + 4000 \text{ [N]}$ dla prędkości określonych w m/s.

Pociąg ETR610 o długości 187,4 m posiada masę $m = 427$ ton, w przeliczeniu na masę uwzględniającą energię elementów wirujących [12] – $m_f = 452$ ton.

Wyniki symulacji

Analiza wymaganego wydatkowania energii mechanicznej na odzyskania utraconej prędkości i dystansu (punkty na krzywej hamowania) zostały przedstawione w tabeli 1.

Z uzyskanych obliczeń wynika, iż najmniejsze zużycie energii jest dla sytuacji w B3, gdzie w chwili zmiany sygnału S1 na Sp2 na semaforze pociąg posiada prędkość 140 km/h oraz znajduje się w odległości 1000 m do tego semafora. Taki stan rzeczy wskazuje, iż zachowanie jak największej energii kinetycznej pociągu do momentu $t = T$ (zmiany sygnału na semaforze z S1 na Sp2) jest rozwiązaniem najkorzystniejszym według kryterium minimalizacji zużycia energii.

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki, wykonano obliczenia dla różnych profili kształtowania się prędkości pociągu, z uwzględnieniem zmniejszenia zużycia energii mechanicznej pociągu w wyniku uzyskania niższych wartości siły oporu ruchu dla niższych prędkości jazdy pociągu.

Uzyskane wyniki z symulacji oraz normalizacja wyników dla dwóch wybranych odległości wstępnych pociągu od semafora ($D0 = 3 \text{ km}$ i 5 km) zostały przedstawione w tabelach 2 i 3

Tab. 1. Zużycie energii mechanicznej z normalizacji wyników dla różnych punktów B

Punkt na krzywej hamowania			Normalizacja wyników			
B	V [km/h]	Sb [m]	tN [s]	ZN [kWh]	Zw [kWh]	ZN-Zw [kWh]
B3	140	1000	24	166,117	50,025	116,092
B2	100	700	27	224,873	65,198	159,675
B1	60	400	34	273,239	83,852	189,387
B0	0	100	55	339,067	121,722	217,345

oraz na rysunkach: 4 – 7.

Przeprowadzone symulacje wskazały, iż najmniejsze zużycie energii mechanicznej uzyskujemy dla wariantu W1 i W2, gdzie pociąg wstępnie hamuje, aby poruszać się do punktu B ze stałą prędkością.

Dla dystansu $D0 = 3$ km różnice zużycia energii między wariantami (tab. 2):

$$\Delta Z_{21} = Z_{w2} - Z_{w1} = 225,430 - 214,219 = 11,211 \text{ [kWh]},$$

$$\Delta Z_{31} = Z_{w3} - Z_{w1} = 231,586 - 214,219 = 17,367 \text{ [kWh]},$$

$$\Delta Z_{41} = Z_{w4} - Z_{w1} = 227,391 - 214,219 = 13,172 \text{ [kWh]},$$

$$\Delta Z_{51} = Z_{w5} - Z_{w1} = 223,827 - 214,219 = 9,608 \text{ [kWh]}.$$

Dla dystansu $D0 = 5$ km różnice zużycia energii między wariantami (tab. 3):

$$\Delta Z_{12} = Z_{w1} - Z_{w2} = 148,751 - 145,477 = 3,274 \text{ [kWh]},$$

$$\Delta Z_{32} = Z_{w3} - Z_{w2} = 152,509 - 145,477 = 7,032 \text{ [kWh]},$$

$$\Delta Z_{42} = Z_{w4} - Z_{w2} = 150,666 - 145,477 = 5,189 \text{ [kWh]},$$

$$\Delta Z_{52} = Z_{w5} - Z_{w2} = 187,554 - 145,477 = 42,077 \text{ [kWh]}.$$

Z przedstawionych wyników można zauważyć, iż zastosowanie sterowania prędkością pociągu w jak najwcześniejszym etapie jazdy (odpowiednio dużej odległości do semafora $D0 = 3$ km i 5 km), pozwala na uzyskanie wyższych

prędkości stałych pociągu, co przynosi się na uzyskanie niższego zużycia energii. Dla przyjętego stałego czasu T (zmiany sygnału z $S1$ na $Sp2$), w rozwiązaniu z odległością 3 km wymagana prędkość stała kształtuje się na poziomie 40 km/h – 60 km/h, podczas gdy dla odległości 5 km, prędkość ta mieści się w granicach 100 km/h – 120 km/h.

Istotne jest, iż intuicyjne dążenie do uzyskania najwyższej prędkości pociągu w chwili $t = T$ (jak uzyskano w etapie 1 dla punktu B3, wyniki w tabeli 1) nie gwarantuje optymalnego zużycia energii. Warianty z zastosowaniem przyśpieszenia na etapie zbliżania się do semafora (wariant: W3, W4 i W5) wymagają bowiem ostatecznie większego zużycia energii, niż wariant 1 i 2, z zastosowaniem stałej prędkości zbliżania się do semafora. Należy zwrócić uwagę, iż dla każdego wariantu w normalizacji przyjęte jest na odcinku B–s1 (rysunek 3) odzyskanie prędkości maksymalnej, czyli w każdym przypadku obliczenia zużycia energii mechanicznej występuje faza przyśpieszenia pociągu.

Taki stan rzeczy wskazuje, iż rozważenie prędkości pociągu wyłącznie na drodze hamowania do semafora jest nie wystarczające, a istotny wpływ na wynik obliczeń ma zachowanie odpowiedniego profilu prędkości pociągu na odcinku dłuższym niż droga hamowania do ww. semafora.

Dodatkową zaletą zastosowania

sterowania prędkością na dłuższym odcinku jazdy jest możliwość zastosowania łagodniejszych zmian prędkości pociągu, gdzie dla odległości 3 km najkorzystniejszy jest wariant W1 z opóźnieniem hamowania $a_h = -1,0$ m/s², natomiast dla odległości 5 km – wariant W2 z opóźnieniem hamowania $a_h = -0,5$ m/s².

Wnioski

Zastosowanie inteligentnych systemów prowadzenia ruchu kolejowego pozwala na uzyskanie oszczędności energetycznych dzięki odpowiedniej modyfikacji profilu prędkości pociągu. Korzyści energetyczne wynikają podstawowo ze zmniejszenia prędkości pociągu, co przenosi się na mniejsze siły oporu ruchu działające na pociąg. Wyklucza się jednocześnie przypadek zatrzymania pociągu, co powoduje konieczność wydatkowania znacznego zużycia energii na przywrócenie jego energii kinetycznej.

Najkorzystniejszy wariant rozważa się z punktu widzenia najmniejszej utraty prędkości oraz najdłuższej przebytej drogi przez pociąg, co implikuje wielkość wydłużenie czasu jego jazdy. Przeliczenie (normalizacja) utraconych wielkości do wariantu ruchu pociągu nie podlegającego ograniczeniu prędkości, pozwala na oszacowanie ewentualnego zwiększenia zużycia energii mechanicznej, i tym samym, na porównanie wariantów różnego kształtowania profilu prędkości pociągu.

Z przeprowadzonych analiz można wnioskować o istotności momentu uzyskania informacji o przewidywanym czasie zmiany sygnału (z $S1$ „Stój” na $Sp2$ „Zezwolenie na jazdę z największą dozwoloną prędkością”) biorąc pod uwagę odległość do przedmiotowego ograniczenia prędkości. Pozwala to na uniknięcie nadmiernego zastosowania siły hamowania (utrata energii kinetycznej) jak i, w konsekwencji, wydłużenia drogi na której konieczne będzie zastosowanie siły trakcyjnej na przyśpieszenie pociągu.

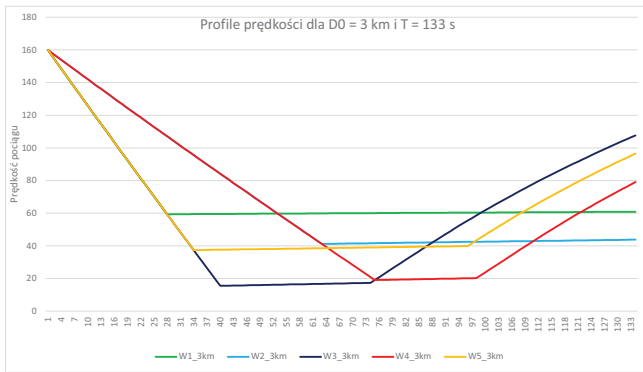
Wartym rozważenia jest więc wdrożenie, na przykładzie szwajcarskich kolei SBB, inteligentnego systemu prowa-

Tab. 2. Zużycie energii mechanicznej dla różnych wariantów symulacji przy $D0 = 3$ km

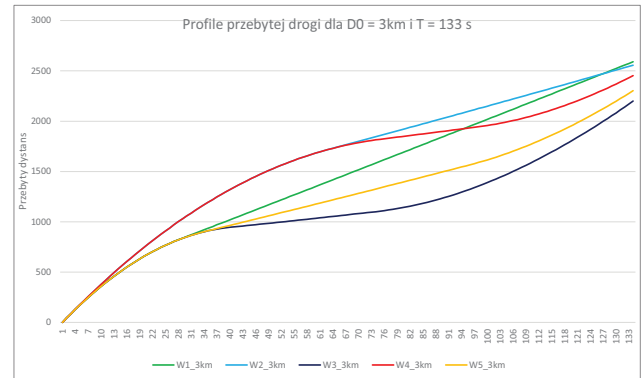
Wariant	Symulacja ($D0 = 3$ km, $T = 133$ s)			Normalizacja wyników ($V_{max} = 160$ km/h; $V_H = 200$ km/h)			
	Vn [km/h]	Sn [m]	Zn [kWh]	tN [s]	ZN [kWh]	Zw [kWh]	Zn+ZN-Zw [kWh]
W1	61	2591	5,047	99	417,320	208,148	214,219
W2	44	2557	2,609	107	444,013	221,192	225,430
W3	108	2200	58,364	91	360,899	187,678	231,586
W4	79	2453	29,811	96	397,161	199,581	227,391
W5	97	2303	41,553	93	374,080	191,806	223,827

Tab. 3. Zużycie energii mechanicznej dla różnych wariantów symulacji przy $D0 = 5$ km

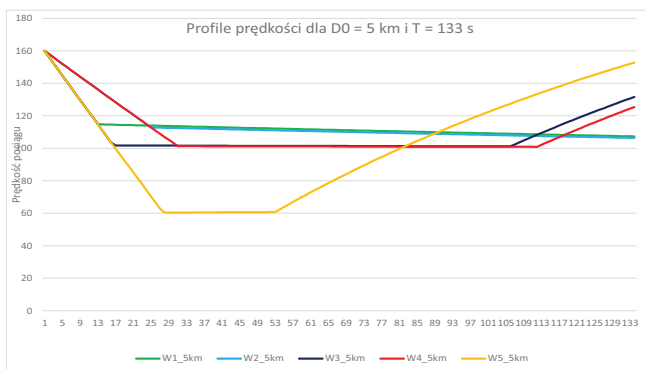
Wariant	Symulacja ($D0 = 5$ km, $T = 133$ s)			Normalizacja wyników ($V_{max} = 160$ km/h; $V_H = 200$ km/h)			
	Vn [km/h]	Sn [m]	Zn [kWh]	tN [s]	ZN [kWh]	Zw [kWh]	Zn+ZN-Zw [kWh]
W1	107	4187	16,175	48	264,409	131,832	148,751
W2	106	4225	14,159	47	262,702	131,385	145,477
W3	132	3995	48,348	46	226,540	122,378	152,509
W4	125	4056	38,817	46	236,471	124,622	150,666
W5	153	3757	108,425	49	197,576	118,447	187,554



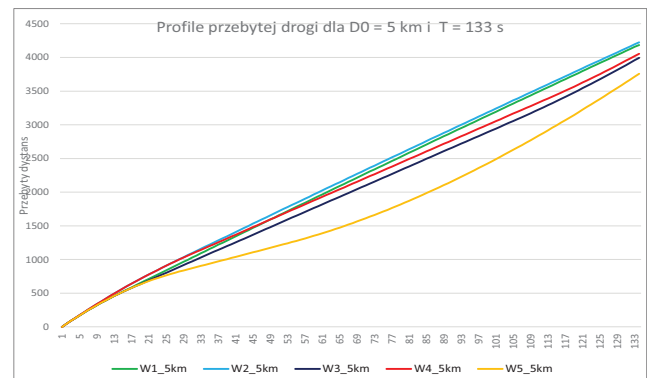
4. Profile prędkości pociągu na odc. A – B dla $D_0 = 3\text{ km}$
(źródło: opracowanie własne)



5. Profil przebytej drogi na odc. A – B dla $D_0 = 3\text{ km}$
(źródło: opracowanie własne)



6. Profile prędkości pociągu na odc. A – B dla $D_0 = 5\text{ km}$
(źródło: opracowanie własne)



7. Profil przebytej drogi na odc. A – B dla $D_0 = 5\text{ km}$
(źródło: opracowanie własne)

dzenia ruchu kolejowego, biorąc pod uwagę korzyści wynikające z oszczędności energii, jak i uzyskania większej płynności ruchu pociągów (unikanie zbędnego hamowania i przyśpieszania pociągu). Jak podano w publikacji [8] zastosowanie systemu RCS koleje SBB uzyskały oszczędności około 74 gigawatogodzin energii elektrycznej w skali roku, natomiast sam system pozwala na wykrywanie w ciągu dnia około milion możliwych konfliktów ruchowych, co umożliwia na zwiększenie płynności ruchu pociągów, optymalizując około 2000 operacji wyznaczanych tras. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Biliński J., Błazejewski M., Malczewska M., Szczepiórkowska M. „Opory ruchu pojazdów trakcyjnych”. Technika Transportu Szynowego, 3/2019.
- [2] Durzyński Z., Łastowski M., „Energochłonność pociągów zespołowych na duże prędkości”, Pojazdy szynowe nr 3/2010.
- [3] Fuchsberger M., Doctoral Thesis: “Algorithms for railway traffic management in complex central station areas”. ETH Zurich, 2012.
- [4] Jacyna M., Gołębiowski P., Krześniak M., Szkopiński J., “Organizacja ruchu kolejowego”. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2019 r. 384 s., ISBN 978-83-01-20689-5.
- [5] Kecman P., Goverde Rob M.P., “An online railway traffic prediction model”, Conference: 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis - Rail Copenhagen, The Netherland, May 2013.
- [6] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., „Instrukcja sygnalizacji le-1 (E-1)”. Warszawa, 2020 r.
- [7] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., „Wytyczne techniczne budowy urządzeń sterowania ruchem kolejowym. le-4 (WTB-E10)”. Warszawa, 2019 r.
- [8] SBB CFF FFS, “The swiss way to capacity optimization for Traffic Management”, White Paper. 23 August 2017.
- [9] Szkopiński, J.; Kochan, A. Energy Efficiency and Smooth Running of a Train on the Route While Approaching Another Train. Energies 2021, 14, 7593. <https://doi.org/10.3390/en14227593>.
- [10] Szkopiński, J.; Kochan, A. Maximization of Energy Efficiency by Synchronizing the Speed of Trains on a Moving Block System. Energies 2023, 16, 1764. <https://doi.org/10.3390/en16041764>.
- [11] Szkopiński, J., „Sterowanie ruchem pociągu w aspekcie minimalizacji zużycia energii”, Materiały Konferencyjne NOVKOL 2022. SITK RP, Oddział w Krakowie. ISBN 978-83-63492-18-2.
- [12] Szelaż A.: „Trakcja elektryczna – podstawy”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019 r.
- [13] Wawrzyniak A., „Elektryczne pociągi zespołowe ETR610 serii ED250 dla PKP Intercity S.A.”, Technika Transportu Szynowego nr 9/2013.
- [14] Wontorski P., Kochan A., Malinowski M., Śmieszek M., Dzierżak M., Więsek A.: „Plan wdrażania systemu kierowania i sterowania ruchem kolejowym w architekturze RCA-CPK, opartej o zestandaryzowane moduły i interfejsy”, Centralny Port Komunikacyjny, Warszawa 01.2022 r.