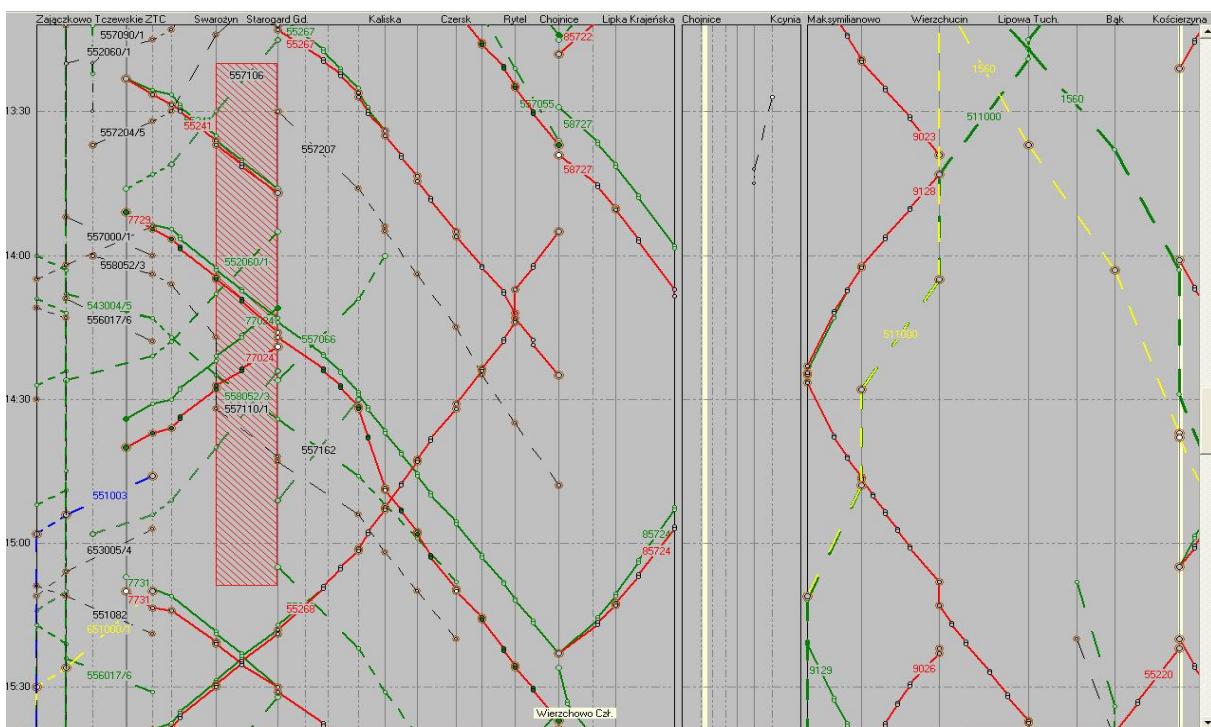


URBANIAK Michał¹

Optymalizacja rozkładu jazdy na kolei z uwzględnieniem efektywności hamowania odzyskowego

WSTĘP

Rozkład jazdy w ruchu kolejowym jest niezwykle istotnym elementem organizacji przewozów. Umożliwia on ich planowanie w sposób terminowy, ekonomiczny i bezpieczny [8]. Z definicji, rozkład jazdy pociągów jest planem pracy kolei odpowiedzialnym za ruch wszystkich pociągów po sieci kolejowej lub jej fragmencie [3]. W rzeczywistości jest to wykres zależności drogi od czasu (rysunek 1) i stanowi podstawę do przedstawienia rozkładów jazdy w postaci tabelarycznej dla poszczególnych linii i odcinków kolejowych [17].

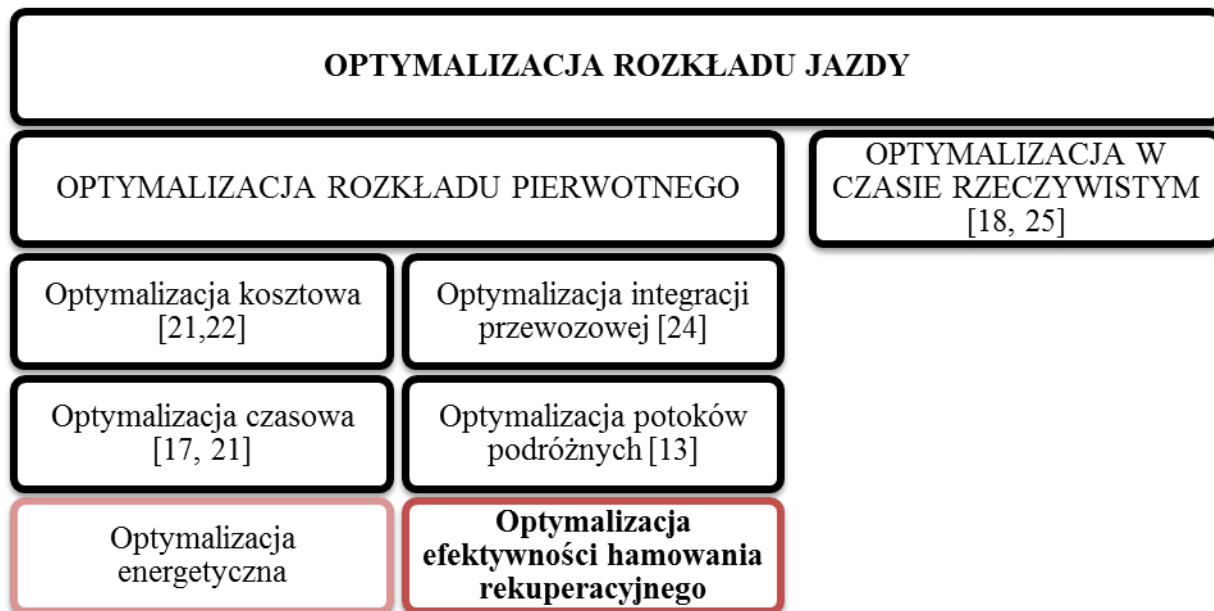


Rys. 1. Przykładowy rozkład ruchu na trasie Zajączkowo - Kościerzyna

Proces konstrukcji kolejowego rozkładu jazdy w Polsce składa się z dwóch głównych etapów. Pierwszy obejmuje przygotowanie oferty przewozowej (towarowej i pasażerskiej) i leży po stronie przewoźników. Drugi natomiast to fizyczna konstrukcja rozkładu jazdy leżąca po stronie obowiązków zarządcy infrastruktury. Szczegółowy schemat procesu konstrukcji rozkładu jazdy pociągów w Polsce został przedstawiony w pracy [8]. Do zapewnienia efektywnego zarządzania ruchem kolejowym (zarówno w aspekcie ekonomicznym jak i niezawodnościowym) konieczna jest dokładna realizacja założonego rozkładu jazdy. W przypadku wystąpienia zakłóceń wynikłych ze złego stanu infrastruktury, zamknięć torowych spowodowanych przeprowadzaniem planowych robót, braku obsługi lub uszkodzenia rogatki, awarii taboru, trudnych warunków atmosferycznych czy zaniku zasilania w trakcji zelektryfikowanej konieczna jest jego ponowna optymalizacja [10].

¹ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, 80-233 Gdańsk; ul. Gabriela Narutowicza 11/12. Tel. +48 58 348-60-89, michal.urbaniak@pg.gda.pl

Optymalizacja rozkładu jazdy jest to dążenie do osiągnięcia jak największej efektywności wykorzystania środków posiadanych przez kolej (finansowych, technicznych i logistycznych) w celu zapewnienia bezpieczeństwa i jednocześnie pożądanej częstotliwości kursów wynikających z zapotrzebowania podróżnych. Optymalizację można przeprowadzić na kilku poziomach oraz pod kątem różnych kryteriów (rysunek 2) związanych bezpośrednio z oceną jakości ruchu pociągów [17].



Rys. 2. Kryteria optymalizacji rozkładu jazdy

Pierwszy poziom to optymalizacja pierwotnego rozkładu jazdy. Obejmuje on kryterium kosztowe, które określa efektywność finansową. Może być wyznaczona przez stosunek zysku z prowadzonej działalności przewozowej do kosztów poniesionych na funkcjonowanie całego procesu przewozów. Szczegółowe informacje na temat podejścia marketingowego i finansowego zawiera praca [22]. Optymalizacja pod względem integracji przewozowej dąży przede wszystkim do zapewnienia jak najdogodniejszych skomunikowań na linii kolejowej [24]. Wiąże się to zarówno z wewnątrzgałęziową integracją rozkładu jak i między różnymi gałęziami transportu. Kryterium czasowe rozumiane jest jako dążenie do jak najkrótszych czasów podróży na odcinkach z miejsca początkowego do docelowego [17, 21]. Analiza potoków ruchu pozwala na zoptymalizowanie stopnia wykorzystania potencjału potrzeb przewozowych. Jego wzrost może być osiągnięty przykładowo poprzez spełnienie oczekiwań społeczeństwa dotyczących częstotliwości i kierunku danych połączeń [13]. Optymalizacja pod względem energetycznym związana jest z obniżeniem energochłonności.

Drugi poziom jest to adaptacyjne sterowanie ruchem [18, 25] w sytuacji wystąpienia nieprzewidzianych zdarzeń [10].

Cały proces tworzenia pierwotnego rozkładu jazdy i jego optymalizacja jest w dzisiejszych czasach wspomagany analizą komputerową. Przykład algorytmu wspomagającego ten proces został przedstawiony w pracy [7]. Nie ma natomiast w polskiej literaturze prac ujmujących problem ze względu na optymalizację tworzenia pierwotnego rozkładu pod kątem efektywności energetycznej przejazdu. Już na etapie planowania przejazdów można zminimalizować koszty związane z poborem energii poprzez wprowadzenie jazdy ekonomicznej. Polega ona na realizacji przejazdu z uwzględnieniem forsownego rozruchu, długiego wybiegu oraz hamowania z największym możliwym opóźnieniem.

W niniejszym artykule zaproponowano uwzględnienie dodatkowego kryterium opartego na efektywności wykorzystania energii odzyskanej w procesie hamowania rekuperacyjnego. W pracy [1] uwzględniono możliwość adaptacyjnego sterowania ruchem jako czynnika poprawiającego efektywność rekuperacji na drodze pojazd – pojazd. Praca ta, podobnie jak [2],



dotyczyła wyłącznie ruchu w komunikacji miejskiej i nie podnosiła tematu tworzenia rozkładu ruchu pojazdów.

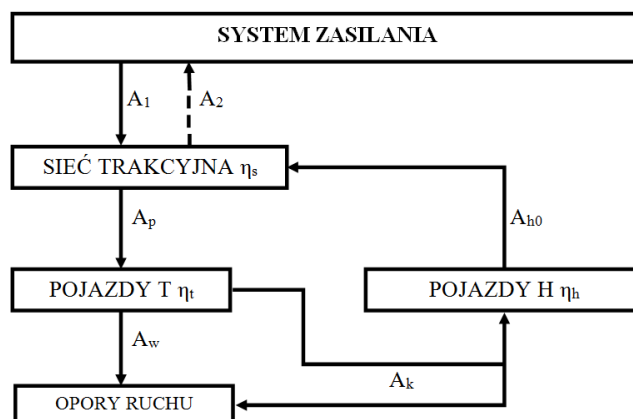
Mimo, iż kryterium optymalizacji energetycznej jest podrzędnym w stosunku do pozostałych, należy je zdecydowanie uwzględnić już w procesie konstrukcji rozkładu jazdy. Jest to istotne, zarówno z punktu widzenia możliwości ograniczenia ciągle rosnącego zużycia i kosztu energii, jak również ochrony środowiska. Idea ta dokładnie wpisuje się w politykę i zalecenia Europejskiej Agencji Środowiska [5]. Trend w dążeniu do wydajności energetycznej zauważalny jest w literaturze światowej. W [6, 9, 15, 16] autorzy przedstawili możliwości optymalizacji rozkładu jazdy na liniach metra z uwzględnieniem efektywności wykorzystania energii możliwej do odzyskania w procesie hamowania na drodze pojazd – pojazd.

1 METODY REKUPERACJI ENERGII

W przypadku konwencjonalnych pojazdów kolejowych energia kinetyczna wytracana podczas fazy hamowania jest bezpowrotnie marnowana w postaci energii cieplnej w mechanicznych układach hamulcowych. W pojazdach elektrycznych zasilanych z sieci trakcyjnej i wyposażonych w energoelektroniczne układy napędowe możliwe jest odzyskanie części energii pochodzącej z hamowania w postaci energii elektrycznej [11]. Wynika to z wykorzystania odwrotnej pracy silnika trakcyjnego jako prądnicy. Energię odzyskiwaną w procesie hamowania rekuperacyjnego można wykorzystać na trzy różne sposoby.

Jednym ze sposobów zagospodarowania odzyskanej energii elektrycznej jest wykorzystanie jej na nietrakcyjne potrzeby własne pojazdu - pracę klimatyzacji, ogrzewania, oświetlenia itp. Istnieje również możliwość przekazania nadmiaru energii do globalnej sieci energoelektrycznej. Konieczne jest przy tym zastosowanie układów elektronicznych przekształcających prąd stały DC na prąd zmienny AC. Ponadto, energia może być magazynowana w zasobnikach umieszczonych na pojeździe lub w najbliższej podstacji trakcyjnej. Wiąże się to jednak ze znacznymi nakładami finansowymi związanymi z zakupem odpowiednich zasobników i ich montażem. Szczegółowy przegląd zasobników energii, ich wady i zalety, został omówiony między innymi w [14, 19, 20, 23].

Możliwy jest również inny, nie wymagający bezpośrednich nakładów finansowych, sposób wykorzystania energii odzyskanej w procesie hamowania. Jest to odzysk bezpośrednio do sieci trakcyjnej. Umożliwia on wykorzystanie nadmiaru energii przez inny pojazd znajdujący się na trasie i mający zapotrzebowanie na trakcyjną energię elektryczną. Przepływ energii w takim obiegu przedstawia schemat na rysunku 3.



Rys. 3. Przepływ energii w trakcyjnym systemie transportu szynowego [1]

Na samym początku energia A_1 przekazywana jest z podstacji trakcyjnej do sieci, która następnie zasilą energią A_p (po uwzględnieniu strat wynikających ze sprawności sieci η_s) pojazdy T. W skład energii dostarczonej do pojazdu wchodzi energia konieczna do pokonania oporów ruchu A_w oraz energia kinetyczna A_k , którą można odzyskać przy zastosowaniu hamowania odzyskowego

(z uwzględnieniem strat wynikających ze sprawności hamowania odzyskowego η_h). Energia A_{h0} jest więc całkowitą energią, jaką można przekazać z powrotem do sieci i jaka może być wykorzystana przez inny pojazd.

Do użytku tego modelu i wykorzystania energii z hamowania odzyskowego konieczne jest spełnienie dwóch warunków. Pierwszy dotyczy spełnienia zależności wynikającej ze wzoru (1).

$$E_s \geq U + I_s \cdot R_s \quad (1)$$

gdzie:

- E_s – siła elektromotoryczna indukowana w silniku,
- U – napięcie znamionowe sieci zasilającej,
- I_s – prąd silnika,
- R_s – rezystancja silnika.

Oznacza to, że siła elektromotoryczna musi być większa od napięcia charakteryzującego w danym momencie sieć trakcyjną. Prąd rekuperacyjny popłynie jedynie w chwili, gdy siła elektromotoryczna generowana przez prądnicę będzie wyższa niż napięcie w sieci [12]. Zaznaczyć trzeba, że są możliwe sytuacje, gdy napięcie w sieci będzie zbyt wysokie i powyższy warunek nie będzie spełniony. Z tego względu zawsze konieczne jest współistnienie dwóch układów hamowania: odzyskowego i konwencjonalnego oporowego, umożliwiającego wytracenie energii na opornikach w postaci ciepła.

Drugim warunkiem jest istnienie takiej sytuacji ruchowej na sieci kolejowej, w której na jednym odcinku zasilania znajdują się zarówno pojazdy pobierające, jak i oddające energię do sieci w tym samym czasie. Konstrukcja rozkładu jazdy musi w takim przypadku zakładać przynajmniej jeden skład kolejowy w fazie rozruchu i jeden w fazie hamowania.

2 OCENA ROZKŁADU JAZDY ZE WZGLĘDU NA EFEKTYWNOŚĆ WYKORZYSTANIA ENERGII Z REKUPERACJI

Efektywność hamowania rekuperacyjnego zależy od kilku czynników. Jednym z nich jest sprawność przesyłu energii w poszczególnych elementach uczestniczących w tym procesie (sieć trakcyjna, przekładnie, układ hamowania odzyskowego) [1]. Sprawność sieci trakcyjnej związana jest z rezystancją występującą w przewodach. Jak wynika ze wzoru (2), rezystancja samych przewodów sieci jezdnej jest ściśle zależna od ich przekroju oraz odległości na jaką ma nastąpić przesył energii.

$$r_{pj} = \frac{L}{\gamma \cdot s_{pj} \cdot m \cdot p} [\Omega] \quad (2)$$

gdzie:

- r_{pj} - rezystancja przewodów sieci jezdnej,
- L - długość
- γ - konduktywność miedzi,
- s_{pj} - przekrój przewodu jezdnego,
- m - współczynnik zużycia przewodu,
- p - liczba przewodów jezdnych.

Im większa odległość, na którą ma być dokonany przesył energii, tym wyższe straty, a co za tym idzie niższa efektywność całego systemu odzyskowego. Należy zatem dążyć do skracania odległości przesyłowych. Pod tym względem najbardziej efektywne jest magazynowanie odzyskanej energii do zasobników umieszczonych na pojeździe. Z kolei przy magazynowaniu energii w zasobnikach poza pojazdem należy uwzględnić ich stosunkowo częste rozmieszczenie wzdłuż linii. W przypadku przesyłu energii pomiędzy dwoma kooperującymi pojazdami konieczna jest odpowiednia synchronizacja ich cyklu jazdy, a co za tym idzie odpowiednia konstrukcja rozkładu jazdy. Niezbędne jest określenie optymalnych punktów rozpoczęcia hamowania oraz zakończenia rozruchu, które może prowadzić do wzrostu efektywności hamowania odzyskowego.



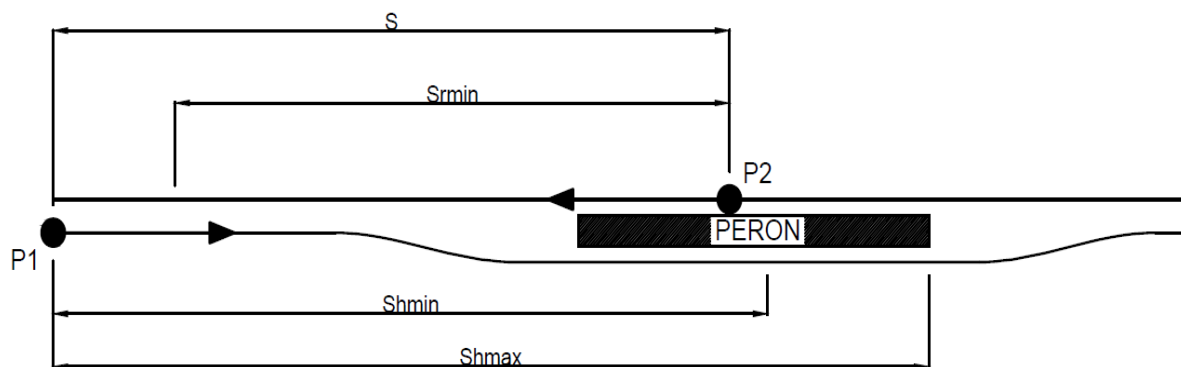
3 WARIANTY OPTIMALIZACJI ROZKŁADU JAZDY ZE WZGLĘDU NA ODZYSK ENERGII

3.1 Założenia ogólne

W artykule przeanalizowano sytuację dla dwóch wariantów: optymalizacji dla odstępu drogi (rysunek 4) oraz dla odstępu czasu (rysunek 5). Dla obu wariantów wprowadzono założenia:

- pojazdy poruszają się w przeciwnych kierunkach,
- pojazdy znajdują się w różnych fazach ruchu (rozruch i hamowanie),
- analiza dotyczy obszaru stacyjnego, w rejonie którego najczęściej dochodzi do hamowania i rozruchu pojazdów, możliwego do kontrolowania przy pomocy służbowego rozkładu jazdy,
- pojazdy zostały sprowadzone do punktu materialnego.

Pierwszy wariant optymalizacji ze względu na odległość między kooperującymi pojazdami przedstawia rysunek 4. Pojazdy zostały oznaczone na nim jako P1 oraz P2 i zgodnie z założeniami poruszają się w przeciwnych kierunkach. Minimalną drogę rozruchu potrzebną do osiągnięcia prędkości towarowej oznaczono jako S_{rmin} , minimalną drogę konieczną do wyhamowania pociągu oznaczono jako S_{hmin} , natomiast przewidywaną maksymalną drogę hamowania opisano jako S_{hmax} .



Rys. 4. Schemat sytuacyjny w odstępie drogi s

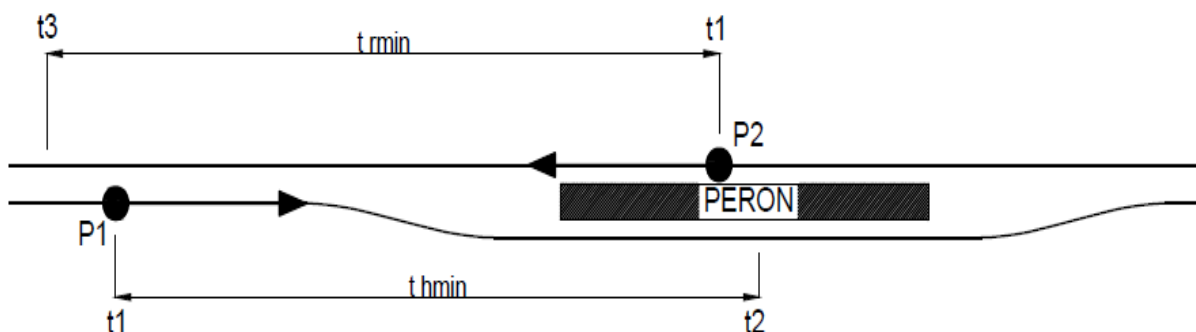
Należy dążyć do sytuacji, gdzie odległość S , między współpracującymi pojazdami P1 i P2 będzie jak najmniejsza. Związane jest to z koniecznością zastosowania elementów jazdy forsownej. Przeprowadzenie rozruchu przy najwyższym możliwym opóźnieniu do osiągnięcia prędkości komunikacyjnej doprowadzi do osiągnięcia S_{rmin} , a rozruchu z wykorzystaniem największego przyspieszenia pozwalającego na przyjęcie S_{hmin} .

$$S \rightarrow \min \quad \wedge \quad S \geq \sup\{S_r, S_h\} \quad \text{oraz} \quad S_r \rightarrow \min \quad \wedge \quad S_h \rightarrow \min$$

Spowoduje to obniżenie ubytków przesyłowych energii. Idealna sytuacja, ze względu na straty wynikające ze sprawności sieci, byłaby wówczas, gdy odległość między pojazdami $S = 0$ [m]. Fizycznie jest to jednak niemożliwe.

Drugi wariant podejścia optymalizacyjnego dotyczy minimalizacji długości czasu trwania faz hamowania i rozruchu. Sytuację tą przedstawia rysunek 5. Pojazdy zostały oznaczone jak na schemacie 4, natomiast symbolami t_{rmin} opisano minimalny czas potrzebny do rozpędzenia pojazdu od prędkości $v = 0$ [km/h] do prędkości eksploatacyjnej. Symbolem t_{hmin} opisano minimalny czas wymagany do zatrzymania pojazdu.





Rys. 5. Schemat sytuacyjny w odstępie czasu t

Czas t_{hmin} równy jest rzeczywistemu czasowi t potrzebnemu na przebycie drogi S_{hmin} . Dla osiągnięcia idealnej sytuacji pod względem efektywności hamowania odzyskowego na drodze pojazd - pojazd czas t_{hmin} powinien być równy czasowi rozpędzania pojazdu t_{rmin} .

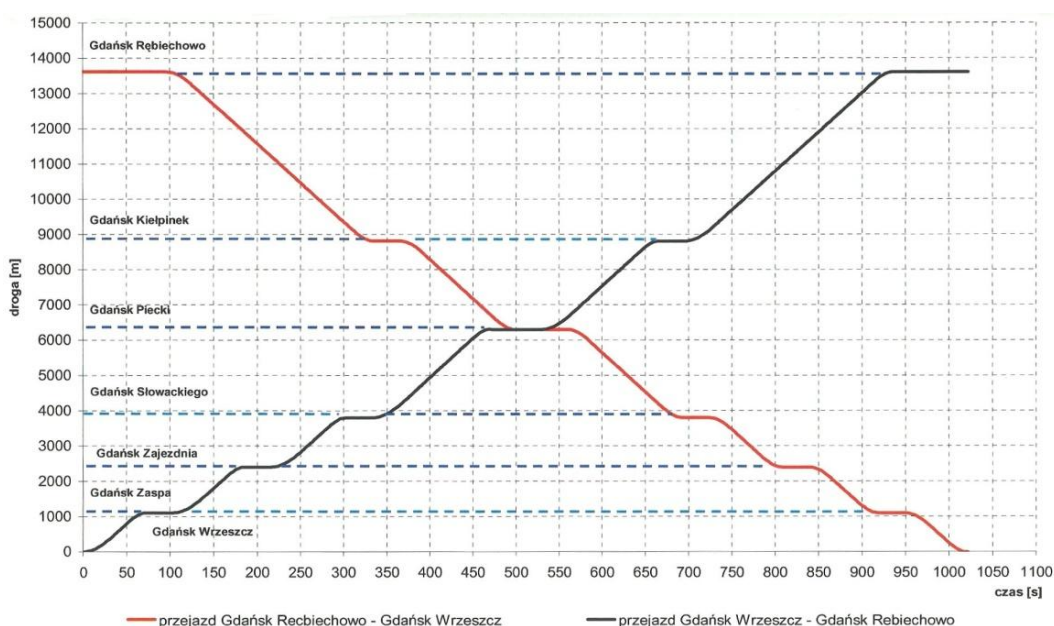
Daje to możliwość maksymalnego wykorzystania energii odzyskanej na przestrzeni całego cyklu rozruchu pojazdu P1 i hamowania pojazdu P2. Funkcję oceny jakości ze względu na parametr optymalizacji O_t można opisać wzorem (3). Im wyższy parametr tym efektywniejsza rekuperacja.

$$O_t = \frac{t_h}{t_r} \quad \wedge \quad t_r \geq t_h \quad (3)$$

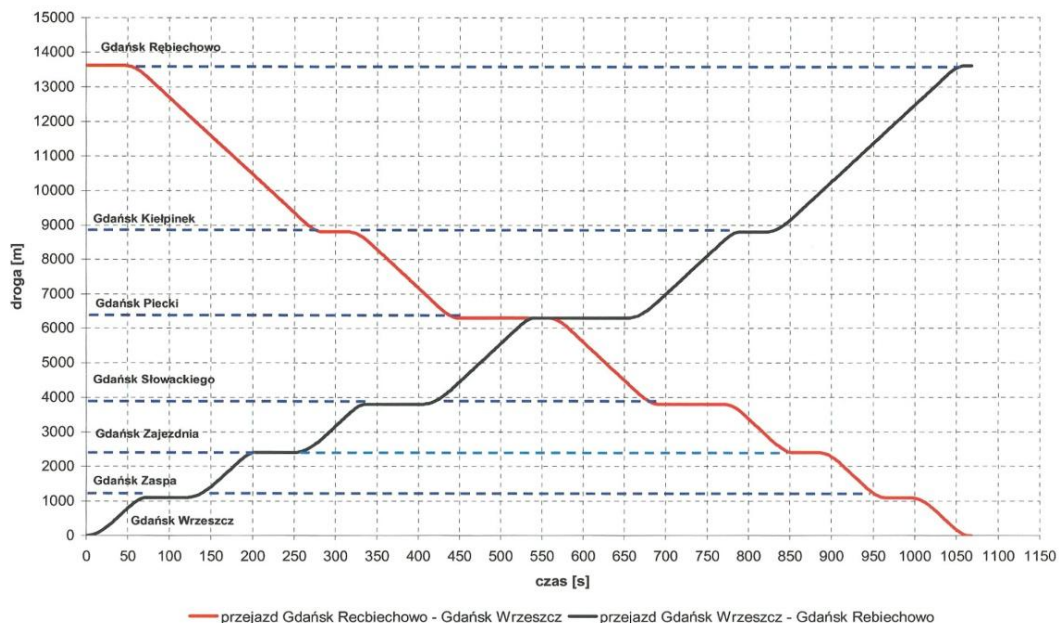
W rzeczywistości nie ma możliwości, aby parametr O_t osiągnął wartość równą 1. Związane jest to z innymi kryteriami optymalizacji rozkładu jazdy, które są priorytetowe i należy je uwzględnić.

3.2 Analiza porównawcza zużycia energii dla modelu zelektryfikowanej linii relacji Gdańsk Wrzeszcz - Lotnisko Rębiechowo

W pracy [4] wykazano, że poprzez odpowiednie sterowanie ruchem, zaplanowanie dłuższego wybiegu i nieznaczne zwiększenie czasu przejazdu (rysunek 6, 7), możliwe jest zwiększenie odzyskanej energii blisko 4-krotnie (tabela 1). Przytoczona analiza została przeprowadzona dla linii Gdańsk Wrzeszcz - Lotnisko Rębiechowo i pojazdu szynowego PESA serii EN81, przy danym profilu trasy. Dla uproszczenia obliczeń, w przeciwieństwie do rzeczywistego rozwiązania, przyjęto model linii jednotorowej.



Rys. 6. Wykres ruchu na trasie Gdańsk Wrzeszcz - Lotnisko Rębiechowo przy nominalnym czasie jazdy [4]

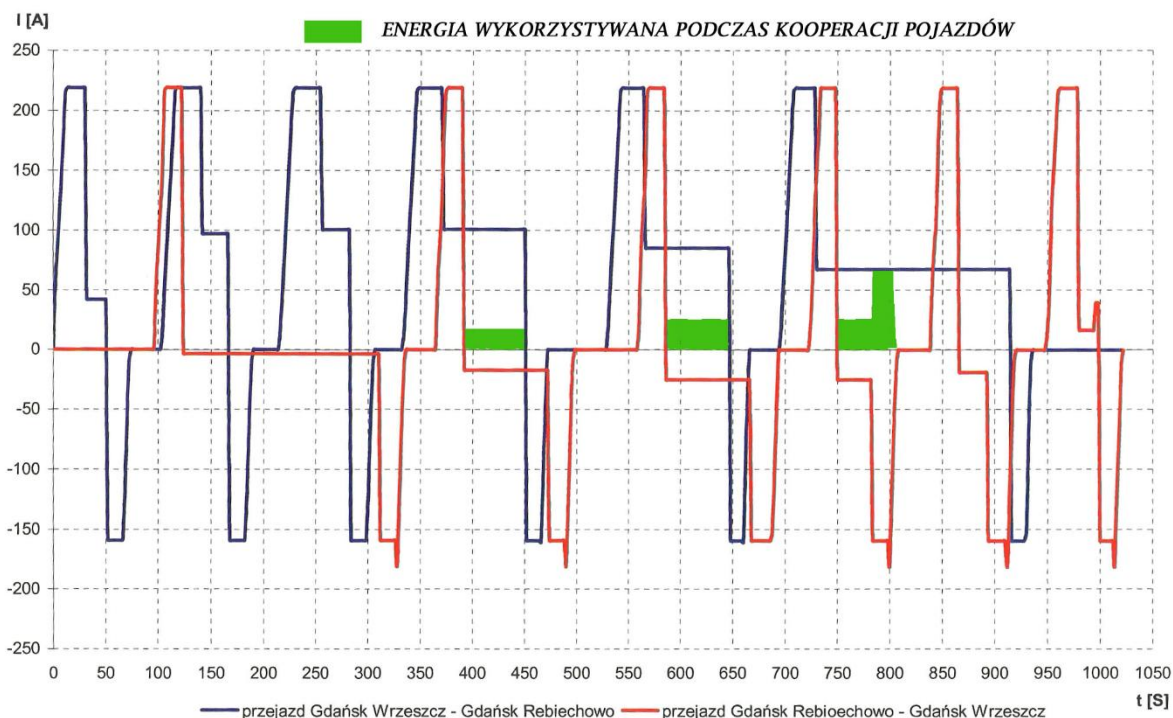


Rys. 7. Wykres ruchu na trasie Gdańsk Wrzeszcz - Lotnisko Rębiechowo przy skróconym czasie jazdy [4]

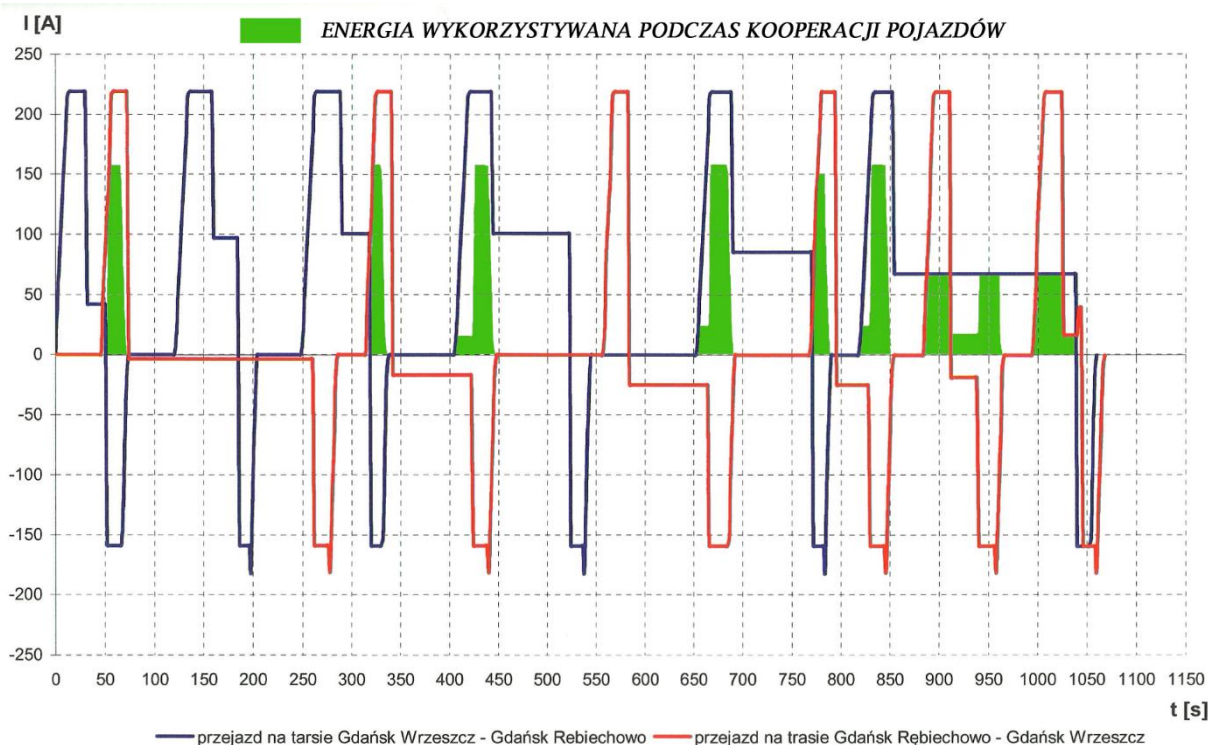
Tab. 1. Bilans zużycia energii [4]

Czas przejazdu na trasie o długości 27200 [m]	Całkowita energia pobrana	Całkowita energia możliwa do odzyskania	Energia odzyskana w wymianie między dwoma pojazdami	Energia wytracana na rezystorach
[s]	[kWh]			
1862	77,29	35,78	7,09	28,69
2123	58,22	35,78	26,77	9,01

Wykresy na rysunkach 8 i 9 wizualnie uzasadniają przesunięcie faz rozruchu i hamowania pojazdów w czasie. Po wydłużeniu czasu jazdy możliwe jest nałożenie na siebie okresów, w których jeden z pojazdów pobiera prąd z sieci, a drugi oddaje go w procesie hamowania.



Rys. 8. Wykres prądu na trasie Gdańsk Wrzeszcz - Lotnisko Rębiechowo przy nominalnym czasie jazdy [4]



Rys. 9. Wykres prądu na trasie Gdańsk Wrzeszcz - Lotnisko Rębiechowo przy wydłużonym czasie jazdy [4]

Nawet przy niewielkim stopniu uwzględnienia efektywności hamowania odzyskowego w układzie pojazd - pojazd możliwe jest osiągnięcie znacznych korzyści finansowych. W przykładowej analizie koszt energii trakcyjnej, potrzebnej do przebycia trasy, mógłby być ograniczony blisko o 46%. Za cenę energii przyjęto ofertę złożoną w odpowiedzi na przetarg Kolei Mazowieckich: Zakup (dostawa) elektrycznej energii trakcyjnej, znak: MWZ4-205-159-2013.

WNIOSKI

Wykorzystanie hamowania odzyskowego stanowi ogromny potencjał w dążeniu do zrównoważonego ekonomicznie transportu. W przypadku pojazdów wyposażonych w układy hamowania rekuperacyjnego możliwy jest odzysk nawet 70% traconej w tym procesie energii i wykorzystanie jej do potrzeb trakcyjnych. Jednym ze sposobów na wykorzystanie energii z rekuperacji jest odzysk bezpośrednio do sieci trakcyjnej i natychmiastowe spożytkowanie jej przez inny pojazd. Efektywność stosowania tej metody na kolei jest uzależniona od sprawnie funkcjonującego i dobrze opracowanego rozkładu jazdy ruchu pociągów. Istnieje możliwość takiego skonstruowania rozkładu, aby czasy trwania faz rozruchu i hamowania różnych pojazdów pokrywały się, a odległości między kooperującymi pojazdami były jak najmniejsze. W takim systemie zyskana energia może stanowić nawet 46% zapotrzebowania i tym samym ograniczyć koszty.

Odpowiednio skonstruowany rozkład jazdy zapewni nie tylko bezpieczne i efektywne ale również ekonomiczne funkcjonowanie przewozów kolejowych z uwzględnieniem elementów ochrony środowiska.

Streszczenie

Na wstępie artykułu przybliżono czytelnikowi, czym jest rozkład jazdy na sieci kolejowej, na czym polega jego optymalizacja oraz odwołano się do literatury opisującej proces jego konstrukcji. W dalszej części przedstawiono kryteria optymalizacji rozkładu jazdy i zaproponowano podejście od strony efektywności wykorzystania energii pochodzącej z hamowania rekuperacyjnego, realizowanego metodą odzysku bezpośrednio do sieci trakcyjnej. Przedstawiono również inne metody wykorzystania energii z rekuperacji przy zastosowaniu zasobników pokładowych lub umieszczonych w podstacji trakcyjnej. Następnie zaprezentowano ideę optymalizacji pod kątem efektywności hamowania rekuperacyjnego i określono czynniki ją determinujące. Na koniec przedstawiono możliwości poprawy omawianej efektywności. Zaproponowano również globalne



spojrzenie na aspekt optymalizacji rozkładu jazdy jako dokumentu determinującego bezpieczne, efektywne i co ważne ekonomiczne funkcjonowanie ruchu na kolei.

Słowa kluczowe: kolej, kolejowy rozkład jazdy, optymalizacja rozkładu jazdy, hamowanie rekuperacyjne, hamowanie odzyskowe

Timetable optimization account the efficiency of regenerative braking

Abstract

At the beginning of the article the railway timetable was defined. The optimization of railway timetable was described according to the literature that shows the process of timetable construction. Next the criteria of the timetable optimization was shown. The approached of using the effectiveness of the energy from recuperative braking that is realized directly by the recovery to the overhead contact line was proposed. The other methods of energy recovery using on-board energy storage or energy storage placed in traction substation were also presented. Then, the idea of recuperative braking efficiency optimization and identifying determining factors were shown. Finally, the possibility of improving the efficiency of regenerative braking were presented. It was also suggested to look at the aspect of global timetable optimization as a document which determines safe, efficient and economical operation of the railway traffic which is important matter in this field.

Keywords: railway, railway timetable, timetable optimization, regenerative braking

BIBLIOGRAFIA

1. Czucha J., Kamonciak A., Karwowski K., Mizan M., Pazdro P., Skibicki J.: Optymalizacja efektów hamowania odzyskowego w komunikacji miejskiej przez sterowanie adaptacyjne. Raport Projektu Badawczego KBN, Gdańsk 2003
2. Czucha J., Karwowski K., Mizan M., Pazdro P.: Efektywność odzysku energii hamowania elektrodynamicznego w komunikacji miejskiej. Przegląd elektrotechniczny 2004 nr 80
3. Dąbrowa-Bajon M., Sitek I., Karolak J., Moczarski J.: Leksykon Terminów Kolejowych. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2011
4. Diduch R.: Studium projektowe elektryfikacji linii kolejowej Gdańsk Wrzeszcz - Lotnisko Rębiechowo. Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Gdańska 2006
5. European Environment Agency: Adaptation of transport to climate change in Europe. EEA Report no 8/2014
6. Gao Z., Li X., Tang T., Su S.: A Subway Train Timetable Optimization Approach Based on Energy-Efficient Operation Strategy. Intelligent Transportation Systems 2013
7. Gołębiowski P., Jacyna M.: Wspomaganie komputerowe konstrukcji rozkładu jazdy pociągów. Logistyka 4/2012
8. Gołębiowski P., Jacyna M.: Wybrane problemy planowania ruchu kolejowego. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej Transport z. 97 2013, str. 123-133
9. Gong C., Jiang J., Wang X., Zhang F., Zhang S.: An Integrated Energy-Efficient Operation Methodology for Metro Systems Based on a Real Case of Shanghai Metro Line One. Energies 2014
10. Grazma G., Kwaśnikowski J.: Analiza wybranych zakłóceń w ruchu kolejowym. Problemy Eksploatacji 2/2007, str. 89-96
11. Juda Z.: Zastosowanie superkondensatorów w układzie odzysku energii pojazdu z napędem elektrycznym. Czasopismo Techniczne z. 6-M/2008
12. Kacprzak J., Mysłek J., Podoski J.: Zasady trakcji elektrycznej. WKiŁ, Warszawa 1980
13. Koźlak A.: Kierunki zmian w planowaniu rozwoju transportu w miastach jako efekt dążenia do zrównoważonego rozwoju. Transport miejski i Regionalny 2009 nr 7-8.
14. Krzemińska E., Urbaniak M.: Energetyka transportu szynowego na linii Gdańsk Wrzeszcz – Lotnisko Rębiechowo. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Gdańska 2012
15. Li X., Ning B., Song X., Tang T., Yang X.: A Subway Timetable Optimization Model for Maximizing the Utilization of Recovery Energy. Joint Rail Conference 2013

16. Nasri, A., Moghadam, M.F., Mokhtari, H.: Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems. Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion 2010
17. Nowosielski L.: Organizacja przewozów kolejowych. KOW, Warszawa 1999
18. Palikowska K.: Zarządzanie opóźnieniami w ruchu kolejowym z zastosowaniem programowania ewolucyjnego. Logistyka 4/2012
19. Paruzel P. M.: Energochłonność Pomorskiej Kolei Metropolitalnej na odcinku Gdynia Główna – Lotnisko Rębiechowo. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Gdańska 2013
20. Pawłuszek M., Skarbierz M.: Projekt wstępny szybkiej linii tramwajowej Gdańsk Wrzeszcz – Lotnisko Rębiechowo., praca dyplomowa magisterska, Politechnika Gdańska 2009
21. Peeters L.: Cyclic Railway Timetable Optimization. Praca doktorska, Erasmus Universiteit Rotterdam 2003
22. Perenc J.: Podstawy myślenia i działania marketingowego w transporcie. KOW, Warszawa 1995
23. Serowik T.: Analiza efektywności hamowania odzyskowego na trasie Pomorskiej Kolei Metropolitalnej., praca dyplomowa magisterska, Politechnika Gdańska 2014
24. Solecka K.: Integration of public transport in Polish and EU documents and examples of solutions for integration of public transport in Poland and in the other world. Transport problems 2011 Volume 6 Issue 4
25. Wolfenburg A.: Optymalne kierowanie ruchem pociągów w obszarze sieci kolejowej. WPWSZ, Gorzów Wielkopolski 2011