

Marianna Jacyna

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Michał Urbaniak

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

WYBRANE ZAGADNIENIA OPTIMALIZACJI ORGANIZACJI RUCHU KOLEJOWEGO W CELU MINIMALIZACJI KOSZTÓW ZUŻYCIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Rękopis dostarczono: styczeń 2016

Streszczenie: W artykule przedstawiono podział kosztów w transporcie kolejowym z uwzględnieniem kosztów wewnętrznych przedsiębiorstwa, do których zaliczają się między innymi koszty dostępu do infrastruktury, czy koszty energii. Stwierdzono, że przy odpowiedniej organizacji ruchu pociągów na sieci kolejowej, bez ponoszenia dodatkowych nakładów na infrastrukturę i specjalistyczne urządzenia, można znacznie ograniczyć zużycie energii, a co za tym idzie koszty z nią związane. Przytoczono stosowane rozwiązania polegające na monitorowaniu energetyki przejazdu i dążeniu do jak najmniej energochłonnych cykli jazdy oraz przedstawiono dokładniej ideę optymalnej strategii prowadzenia pojazdu szynowego w celu zaoszczędzenia energii.

Dodatkowo zaproponowano uwzględnienie, przy procesach optymalizacji organizacji ruchu pojazdów na sieci kolejowej, kryterium efektywności transferu energii pochodzącej z rekuperacji między pojazdami. Zwrócono uwagę na czynniki sprzyjające takiej kooperacji (odległość między pojazdami, pokrywanie się czasów hamowania i rozruchu i inne), ale także problemy techniczne i organizacyjne z tym związane.

Przedstawiony przegląd rozwiązań organizacyjnych pozwala stwierdzić, że u większości polskich przewoźników kolejowych istnieje duży potencjał ograniczenia kosztów transportowych przedsiębiorstw. Możliwości w tym zakresie daje odpowiednie organizowanie przewozów, w tym tworzenie zoptymalizowanych rozkładów jazdy z uwzględnieniem kryterium minimalizacji kosztów zużycia energii. Przedstawione rozwiązanie daje szansę pełniejszego wykorzystania wdrażanych technologii i ograniczenia zużycia energii.

Słowa kluczowe: transport kolejowy, organizacja ruchu, optymalizacja, koszty transportu

1. WSTĘP

Zagadnienie organizacji ruchu kolejowego obejmuje wiele składowych. Są nimi: planowanie przebiegu tras, konstrukcja rozkładów jazdy w postaci wykresów ruchu,

przydział krawędzi peronowych naposterunkach ruchu, planowanie obiegów taboru, a także prac zespołów obsługujących pociągi. Każda z tych składowych ma mniejszy lub większy wpływ na koszty ponoszone przez przewoźników kolejowych. Optymalizacja organizacji ruchu ma na celu wybór najlepszego z możliwych wariantów na każdym szczeblu organizacyjnym. Najważniejszą składową procesy organizacji ruchu kolejowego jest etap fizycznej konstrukcji rozkładów jazdy pociągów [11]. Optymalizacja rozkładu jazdy jest dążeniem do osiągnięcia maksymalnej efektywności wykorzystania środków finansowych, technicznych i logistycznych posiadanych przez kolej. Ma to na celu zapewnienie pożądanej częstotliwości kursów, które wynikają z zapotrzebowania podróżnych.

Optymalizacja organizacji ruchu kolejowego według kryterium minimum kosztów obejmuje [1, 9, 22]:

- optymalizowanie ruchu pociągów w czasie rzeczywistym z uwzględnieniem oszczędności zużycia energii oraz minimalizowania opóźnień ich przejazdów,
- optymalizowanie technik jazdy dla maszynistów w ruchu towarowym,
- optymalizację liczby składów obsługujących połączenia w aspekcie kosztów pustych przebiegów,
- optymalizację planu pracy załóg konduktorskich i obsługi pociągów z uwzględnieniem kosztów ich utrzymania.

W związku z tym, że koszty przewozów w dużej mierze wpływają na rentowność i perspektywę rozwoju przedsiębiorstwa transportowego należy znaleźć odpowiedź na pytanie jakie środki organizacyjne związane z prowadzeniem ruchu pojazdów szynowych mogą przyczynić się do oszczędności wynikających z ograniczania ponoszonych kosztów.

Niezwykle istotnym efektem doboru odpowiednich kryteriów do algorytmu usprawniania organizacji przewozów kolejowych może się okazać ograniczenie (pośrednie i bezpośrednie) emisji gazów cieplarnianych, w tym CO₂, do atmosfery [2, 16, 17, 18]. Optymalizacja ruchu pociągów pod kątem ograniczania zużycia energii, a także technicznych możliwości jej odzysku w procesie hamowania, wpisuje się doskonale w ideę ograniczania energochłonności transportu kolejowego [7], na którą jest kładziony szczególny nacisk w polityce Unii Europejskiej.

2. KOSZTY W TRANSPORCIE KOLEJOWYM

2.1. ZAŁOŻENIA OGÓLNE

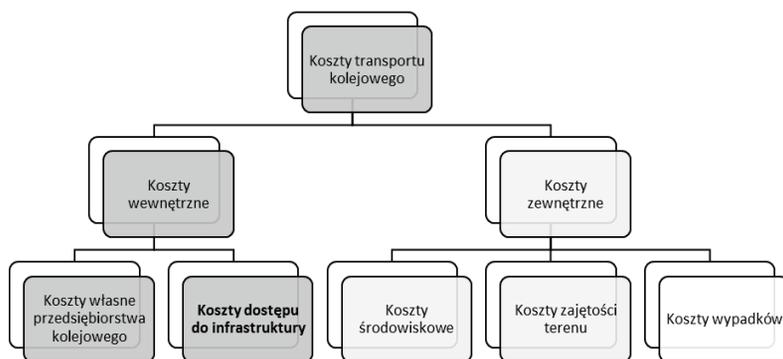
Pojęcie ponoszenia kosztów w większości przypadków wiąże się bezpośrednio z pewną wielkością środków pieniężnych, często wynikającą z fizycznego bądź naturalnego zużycie środków trwałych. Często utożsamiane jest również z ceną za usługę lub opłaceniem pracy ludzkiej w celu uzyskania zamierzonych korzyści. Przedstawione ujęcie jest jednak mocno zawężone i nie oddaje w pełni aspektu kosztów transportu kolejowego, ogranicza się jedynie do określonej jednostki przedsiębiorstwa i jej kosztów własnych. W przypadku kosztów transportu (zarówno kolejowego, drogowego, lotniczego, jak i innych gałęzi)



należy zaznaczyć, że istnieją koszty dodatkowe, obciążające inne jednostki organizacyjne i społeczne, niezwiązane bezpośrednio z przedsiębiorstwami kolejowymi. Można zatem wyróżnić dwie podstawowe grupy kosztów:

- koszty wewnętrzne w aspekcie funkcjonowania przedsiębiorstwa transportu kolejowego,
- koszty zewnętrzne, odwołujące się do jednostek nie związanych bezpośrednio z transportem kolejowym, natomiast ponoszonym przez otoczenie lub ogół społeczeństwa.

Podział kosztów w transporcie kolejowym przedstawia rysunek 1, natomiast w dalszej części artykułu główną uwagę skupiono na kosztach wewnętrznych, bezpośrednio ponoszonych przez przedsiębiorstwo kolejowe, które można ograniczyć poprzez odpowiednią organizację ruchu kolejowego.



Rys. 1. Struktura kosztów transportu kolejowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [26]

Wśród kosztów własnych przedsiębiorstw można dodatkowo wyróżnić:

- koszty stałe, które są ponoszone niezależnie od prowadzenia w danym okresie działalności transportowej i mogą być związane np. z leasingiem środków trwałych,
- koszty zmienne, ulegające zwiększeniu lub zmniejszeniu w zależności od intensywności oraz organizacji działalności przewozowej i mogą być nimi na przykład **koszty zużycia energii** [26].

2.2. KOSZT DOSTĘPU DO INFRASTRUKTURY KOLEJOWEJ

Bardzo ważnym elementem wpływającym na ceny usług w transporcie kolejowym są koszty dostępu do infrastruktury. W Polsce głównym zarządcą infrastruktury kolejowej są PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (PKP PLK S.A.), które odpowiadają między innymi

za opracowywanie oraz aktualizowanie rozkładów jazdy oraz utrzymanie dobrej jakości państwowej infrastruktury kolejowej. Jako zarządca państwowego mienia PKP PLK S.A. ma obowiązek ustalenia stawek za użytkowanie infrastruktury przez przewoźników kolejowych. Koszty dostępu do infrastruktury są ustalane w oparciu o przepisy Ustawy z dnia 28 marca 2003 r. o Transporcie Kolejowym (Dz. U. z 2007 r., nr 16, poz. 94, z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 27 lutego 2009 r. w Sprawie Warunków Dostępu i Korzystania z Infrastruktury Kolejowej (Dz. U. z 2009 r., nr 35, poz. 274) [6].

Aktualny wykaz stawek jednostkowych opłat za korzystanie z infrastruktury kolejowej zarządzanej przez PKP PLK S.A. obowiązujący od 14 grudnia 2014 roku zawiera takie pozycje jak [27]:

- stawki jednostkowe opłaty podstawowej:
 - stawki jednostkowe opłaty podstawowej za minimalny dostęp do infrastruktury kolejowej, wyrażone w zł/pocmk,
 - stawki jednostkowe opłaty podstawowej za dostęp do urządzeń związanych z obsługą pociągów, którymi są: urządzenia zaopatrzenia w paliwo [zł/km przejazdu], stacje i przystanki [zł/wagon lub zł/postój, terminale towarowe [zł/km przejazdu], górki rozrządowe [zł/rozzrządzony wagon], urządzenia do formowania składów pociągów [zł/pociąg], tory postojowe oraz tory przy rampach i placach ładunkowe [zł/godz./tor],
 - stawki jednostkowe opłat dodatkowych, do których zalicza się: udzielanie pomocy wprowadzeniu pociągów nadzwyczajnych, dostarczanie informacji uzupełniających o przejeździe pociągu, przydzielanie i przygotowanie trasy pociągu poza rocznym rozkładem jazdy, udostępnianie regulaminu oraz wykazu stacji kolejowych i punktów handlowych w formie wydruku, a także udostępnianie wyciągów z regulaminów i innych dokumentów wymagających poniesienia kosztów przez PKP PLK S.A.

Warto zwrócić uwagę, że koszt dostępu do linii kolejowych, na których są dostępne urządzenia trakcji elektrycznej, jest wyższy średnio o ok. 16% (w zależności od kategorii linii) [27].

2.3. KOSZT ZUŻYCIA ENERGII

W transporcie kolejowym do zasilania pojazdów są obecnie wykorzystywane dwa podstawowe rodzaje trakcji: spalinowa oraz elektryczna. Ponieważ charakterystyka porównawcza tych dwóch różnych trakcji wymaga dodatkowo dogłębnej analizy, w artykule skupiono się tylko na zasilaniu energią elektryczną i kosztami z nią związanymi.

Głównym podmiotem wyspecjalizowanym w dostarczaniu energii trakcyjnej i nietrakcyjnej na polskiej sieci kolejowej jest PKP Energetyka S.A. Do jej głównych zadań należą obrót i dystrybucja energii elektrycznej oraz świadczenie usług energoelektrycznych, do których można zaliczyć czynności utrzymania, modernizacji oraz odtwarzania urządzeń trakcyjnych [31]. Szczegółowe zasady dystrybucji, sposobu rozliczania i koszty jednostkowe energii trakcyjnej zostały przedstawione w "Taryfie dla



energii elektrycznej 2015" [28].

Do niedawna jedynym systemem rozliczeniowym na PKP był system ryczałtowy, czyli umowna opłata za usługę wyliczana na podstawie stosownych algorytmów uzależnionych od wielkości przewozów. Nie wpłynęło to pozytywnie na stosowanie energooszczędnych technologii. Dzięki uwolnieniu rynku energetyki trakcyjnej na kolei oraz wprowadzeniu technologii umożliwiających mierzenie rzeczywistego zużycia energii przez pojazdy, stało się możliwe stosowanie korzystniejszego dla przewoźników korzystających z energooszczędnych technologii rozliczenia za energię rzeczywistą. W Polsce za wiodącą spółkę w rozliczeniu rzeczywistego zużycia energii elektrycznej na cele trakcyjne można uznać Koleje Mazowieckie (KM), które korzystają z niego od 2011 roku [5]. Jak wynika z tablicy 1 już w pierwszym roku nowego systemu rozliczenia udało się zaoszczędzić tej spółce 14 mln zł w stosunku do roku poprzedzającego.

Tab. 1

Zestawienie porównawcze kosztów zużycia energii trakcyjnej w Kolejach Mazowieckich przy rozliczeniu ryczałtowym i licznikowym

Typ rozliczenia	Rok	Praca przewozowa [mln pockm]	Energia rozliczona [mln kWh]	Koszt energii [mln zł]	Cena jednostkowa energii [zł/kWh]
Rozliczenie ryczałtowe	2010	13,9	186,6	91,7	0,493
Rozliczenie licznikowe	2011	14,6	162,8	77,5	0,478
	2012	16,6	181,8	87,4	0,480

Zródło: opracowanie własne na podstawie [21]

W kontekście optymalizacji kosztów energii trakcyjnej w przedsiębiorstwie kolejowym tylko rozliczenie "licznikowe" (tablica 1) ma finansowe uzasadnienie. Pozwala ono na pełne wykorzystanie najnowszego taboru, technologii oraz rozwiązań organizacyjnych ograniczających zużycie energii elektrycznej przy odzwierciedleniu ich stosowania w niższych kosztach.

3. ORGANIZACJA RUCHU KOLEJOWEGO A KOSZTY ZUŻYCIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

3.1. ISTOTA OPTIMALIZACJI WIELOKRYTERIALNEJ

Analizując proces podejmowania decyzji, można zauważyć, że przy wyborze optymalnych decyzji decydent posługuje się na ogół nie jednym, lecz wieloma kryteriami jednocześnie. Uwzględniając w zagadnieniach optymalizacji wielokryterialnej, funkcję kryterium



złożoną z wielu cząstkowych funkcji celu, można modelować rzeczywiste problemy transportowe, które uwzględniają różne cele [15].

Podstawowa trudność w praktycznej realizacji koncepcji uwzględniającej wiele kryteriów cząstkowych, zarówno w badaniach naukowych jak i działalności gospodarczej polega na tym, że tylko w wyjątkowych przypadkach mamy do czynienia z decyzją zapewniającą wzajemną zgodność ekstremalnych wartości cząstkowych funkcji celu. Z reguły uwzględnienie w modelu więcej niż jednej funkcji celu nie prowadzi do jednoznacznie najlepszego rozwiązania, tj. takiego, które zapewniałoby optimum dla wszystkich cząstkowych kryteriów optymalizacji jednocześnie. Wariant optymalny z punktu widzenia kryterium cząstkowego może być gorszy z punktu widzenia innych kryteriów, co przy ich często równorzędnym charakterze utrudnia dokonywanie wyboru rozwiązania optymalnego.

Ogólnie zadanie optymalizacji wielokryterialnej można sformułować następująco [8, 10, 13, 14, 15]:

przy spełnieniu ograniczeń:

$$\mathbf{X} \in \mathbf{X}^{dop} \quad (1)$$

Należy wyznaczyć wektor zmiennych decyzyjnych $\mathbf{X} = \widehat{\mathbf{X}}$, dla którego:

$$g(\widehat{\mathbf{X}}) = \text{extr}\langle g_n(\mathbf{X}) : n = 1, \dots, k \rangle \quad (2)$$

gdzie:

\mathbf{X} – rozwiązanie zadania optymalizacyjnego,

\mathbf{X}^{dop} – zbiór rozwiązań dopuszczalnych,

$\widehat{\mathbf{X}}$ – wektor rozwiązań,

k – liczba funkcji celu.

Wielokryterialne problemy decyzyjne można podzielić na cztery grupy [8, 10, 13, 14, 15]:

- problemy wielokryterialnego wyboru, w których problem decyzyjny polega na określeniu jednego wariantu spośród zbioru wariantów;
- problemy wielokryterialnego porządkowania, w których problem decyzyjny polega na uporządkowaniu zbioru wariantów;
- problemy wielokryterialnej klasyfikacji, polegające na zdefiniowaniu klas oraz przydzieleniu poszczególnych wariantów do tych klas;
- problemy wielokryterialnego opisu.

Wielokryterialne problemy optymalizacyjne charakteryzują się dwoma podstawowymi elementami, tj. opisem zbioru rozwiązań dopuszczalnych oraz zbiorem funkcji (kryteriów) odwzorowujących zbiór rozwiązań w zbiór ocen jakości (na ogół, w zbiór liczb rzeczywistych). W zależności od postaci analitycznej poszczególnych funkcji kryterium oraz ograniczeń można mówić o różnych rodzajach wielokryterialnego programowania matematycznego.

Zainteresowanie metodami wielokryterialnego programowania wynika przede wszystkim z ich przydatności praktycznej. Pozwalają one uwzględnić wiele przeciwstawnych często punktów widzenia (kryteriów). Nie jest to bez znaczenia, w przypadku podejmowa-



nia decyzji odnośnie przedsięwzięć inwestycyjnych, zwłaszcza dotyczących rozwoju infrastruktury systemu transportowego czy zmiany organizacji ruchu na sieci np. kolejowej.

Wielokryterialne problemy decyzyjne opierają się na dwóch podstawowych postulatach, tj.:

- postulat dominacji – jeżeli mamy dwie propozycje dopuszczalnych rozwiązań i uznajemy, że jedna z nich jest przynajmniej ze względu na jedno kryterium korzystniejsza niż druga, a pod każdym innym względem nie jest od niej gorsza, to powinniśmy pierwszą z nich uznać za lepszą;
- postulat przechodniości dominacji (przysposobiony z teorii oczekiwanej użyteczności [24]) – jeżeli w wyniku porównań uznamy, że wariant A jest lepszy niż B, a z kolei B za lepszy niż C, to konsekwentnie powinniśmy uznać, że wariant A jest lepszy niż C.

Powyższe oznacza konieczność przestrzegania w optymalizacji wielokryterialnej raz przyjętego systemu wartościowania.

W dalszej części badań zostaną przeanalizowane takie grupy kryteriów cząstkowych jak:

- minimalizacja czasu pojedynczego przejazdu,
- minimalizacja czasów przejazdów wszystkich pociągów poruszających się po analizowanym odcinku z uwzględnieniem ich wag (ważności),
- minimalizacja zużycia energii trakcyjnej, równoznaczna z minimalizacją kosztów energii trakcyjnej,
- maksymalizacja wielkości energii odzyskanej z procesu hamowania energii,
- minimalizacja czasów oczekiwania na przesiadkę przy przejazdach wymagających skomunikowania.

3.2. STRATEGIE JAZDY OPTYMALNEJ

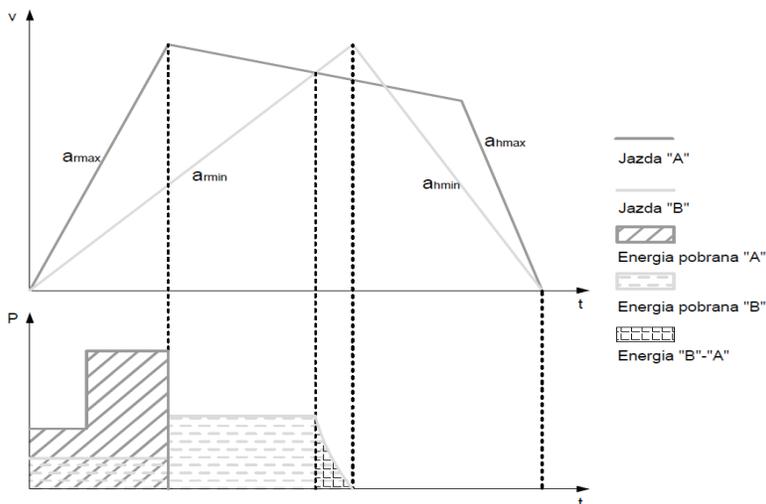
Podstawowe założenia dla energooszczędnej jazdy zostały sformułowane w literaturze przedmiotu już w latach sześćdziesiątych XX wieku [1], a następnie podano w latach osiemdziesiątych między innymi w [20, 29]. W celu najefektywniejszego energetycznie prowadzenia pojazdu szynowego zasilanego trakcją elektryczną należy:

- przeprowadzić rozruch pojazdu z najwyższym dopuszczalnym przyspieszeniem, czyli na styku przyczepności ośrodków koło – szyna, aż do uzyskania zakładanej prędkości eksploatacyjnej,
- możliwie jak najdłużej kontynuować jazdę na tak zwanym wybiegu, to znaczy jeździe siłą rozpędu, bez pobierania energii z sieci trakcyjnej,
- przeprowadzić możliwie jak najpóźniej hamowanie z wykorzystaniem jak największej wartości opóźnienia.

Powyższe zasady różnią się od postulowanych zaleceń tzw. "eco-drivingu" przy prowadzeniu pojazdów (głównie drogowych) zasilanych silnikami spalinowymi. W tym przypadku, w celu obniżenia zużycia paliwa, wskazane jest szybkie, ale i płynne przyspieszanie wraz ze zmianą biegów na wyższe. Unika się tym samym wchodzenia



na wysokie obroty silnika, a co za tym idzie uzyskiwania wysokich mocy i zwiększonego zużycia paliwa. Hamowanie również, odmiennie niż dla elektrycznych pojazdów trakcyjnych, następuje stopniowo poprzez redukowanie biegów i dopiero wkońcowym etapie jazdy łagodne zatrzymanie pojazdu [3, 23].



Rys. 2. Zestawienie porównawcze $v(t)$ oraz $P(t)$ dla dwóch różnych typów prowadzenia elektrycznego pojazdu trakcyjnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [30]

Na rysunku 2 przedstawiono przybliżone zestawienie porównawcze dwóch różnych sposobów prowadzenia elektrycznego pojazdu trakcyjnego za pomocą funkcji $v(t)$ oraz $P(t)$. Ilustruje on jednoznacznie, że realizację przejazdu z wykorzystaniem maksymalnego przyspieszenia rozruchu (a_{max}) oraz maksymalnego opóźnienia hamowania (a_{hmax}) potrzebna jest mniejsza ilość elektrycznej energii trakcyjnej niż przy przejeździe "B". Algorytm optymalizacji kosztów energii dla przejazdu pojedynczego pociągu został przedstawiony już między innymi w pracy [4]. Autorzy tej pracy zaproponowali analizę kosztów energii trakcyjnej w czasie rzeczywistym podczas przejazdu oraz optymalizację kierowania pojazdem z uwzględnieniem dodatkowo wagi (ważności) kryterium czasu przejazdu. Algorytm ten odpowiednio przelicza parametry energetyczne przejazdu i analizuje czy należy wprowadzić zmiany w prowadzeniu pojazdu dla ograniczenia zużycia energii.

Do wdrożenia strategii jazdy optymalnej w celu obniżenia kosztów energii, zarówno trakcyjnej jak inietrakcyjnej, dążą KM. Wdrożony projekt "EcoDriving" daje możliwości efektywnego zarządzania energią przy ogrzewaniu pojazdu, ale przede wszystkim przy odpowiednim prowadzeniu pojazdu. Składy trakcyjne wyposażone w odpowiednie liczniki zbierają dane na temat ilości pobieranej energii oraz charakterystyki jej zużycia. Następnie są one analizowane i porównywane z innymi przejazdami. Możliwa jest dzięki

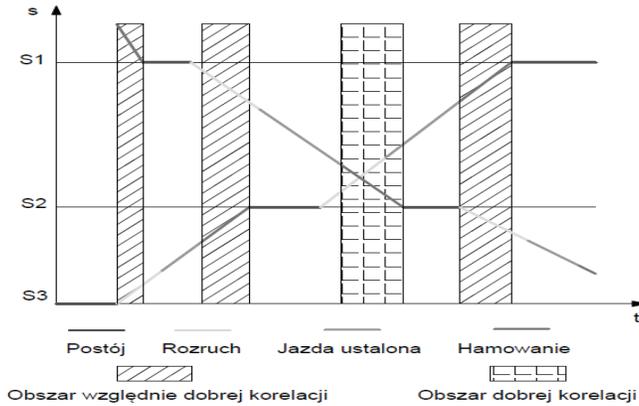
temu optymalizacja organizacji ruchu pojazdów KM poprzez prowadzenie szkoleń i instruktaży dla maszynistów mających na celu poprawę efektywności energooszczędnego prowadzenia pojazdów [19].

3.3. STRATEGIA WYMIANY ENERGII MIĘDZY POJAZDAMI TRAKCYJNYMI

Efektywne wykorzystanie energii elektrycznej pochodzącej z rekuperacji można ściśle powiązać z zarządzaniem ruchem w transporcie kolejowym, a ściślej ujmując z procesem tworzenia rozkładów jazdy. Ważne jest to w przypadku gdy odzyskiwana energia jest wymieniana bezpośrednio między różnymi pojazdami na trasie. Rozwiązanie to jest o tyle korzystne względem wykorzystania zasobników energii (pokładowych lub stacjonarnych), że nie wymaga dodatkowych nakładów finansowych na specjalistyczne urządzenia i infrastrukturę. W praktyce wiąże się ono "jedynie" z koniecznością odpowiedniego skoordynowania ruchu pojazdów na danym odcinku zasilania, tak aby możliwa była kooperacja między procesami pobierania i oddawania energii. Odpowiednie skorelowanie pojazdów na sieci w taki sposób, żeby energia oddawana w procesie hamowania była w całości wykorzystywana na potrzeby rozruchu innych pojazdów jest właściwie niemożliwe [25]. Należy jednak zauważyć, że zmiana rozkładu jazdy dla poszczególnych przejazdów o około 10 sekund może zmienić bilans energetyczny o blisko 100%.

Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że w przyszłym algorytmie optymalizacji ruchu kolejowego należy uwzględnić parametr określający stopień wykorzystania energii pochodzącej z rekuperacji w wariantach jej wymiany między pojazdami. Rozwiązanie to ma zastosowanie głównie w ruchu miejskim i podmiejskim, jak również na głównych stacjach węzłowych. Wynika to z dużej częstotliwości kursowania pociągów, a co za tym idzie mnogości powtarzanych cykli rozruch – hamowanie. W takich sytuacjach nawet, zdawałoby się mała zmiana w rozkładzie jazdy może przynieść znaczne oszczędności w postaci mniejszego zużycia energii elektrycznej na cele trakcyjne. Przykład korzystnej sytuacji dla wymiany energii między pojazdami został przedstawiony na wykresie ruchu (rys.3).



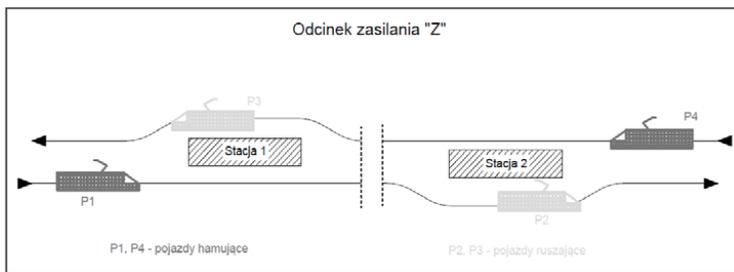


Rys. 3. Obszary możliwej wymiany energii między pojazdami

Źródło: opracowanie własne

Przykładowa sytuacja koordynacji rozkładowej między hamującymi i ruszającymi pojazdami, tak aby był możliwy transfer energii między nimi, istnieje na liniach SKM oraz metra (rys.4). Wpływają natomiast warunki takie jak:

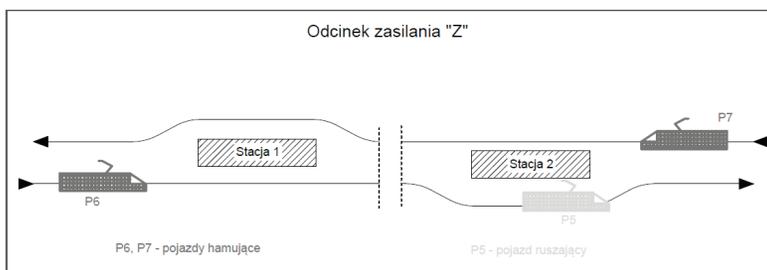
- liczność cykli hamowania i rozruchu, związana z dużym natężeniem ruchu na linii,
- stosowanie zazwyczaj tego samego rodzaju taboru,
- cykliczność rozkładu jazdy,
- niewielkie odległości między pojazdami na sieci, a co za tym idzie niskie straty transferu energii między pojazdami,
- stosunkowo nieskomplikowany układ torowy,
- na prostych, liniowych układach torowych brak konieczności skomunikowania pojazdów poruszających się w przeciwnych kierunkach.



Rys. 4. Schemat koordynacji rozkładowej cykli hamowania i rozruchu na obszarach stacyjnych linii podmiejskiej

Źródło: opracowanie własne

Możliwe jest zatem wprowadzenia do algorytmu wspomagającego układanie rozkładów jazdy dodatkowych ograniczeń tak, aby czas rozpoczęcia hamowania przez pojazd P1 (rys. 4) był możliwie jak najbardziej zbliżony do czasu rozpoczęcia rozruchu przez pojazd P3 (analogicznie dla pojazdów P2 i P4). Ponadto warto dopuścić sytuację, że na obszarze jednej stacji nie muszą znajdować się jednocześnie 2 pojazdy o przeciwnych kierunkach jazdy (rys. 5). Należy zatem uwzględnić sytuację z przeanalizowaniem ruchu na całym odcinku zasilania, tak aby optymalne skoordynowanie procesów rozruchu i hamowania dotyczyło nie tylko wyodrębnionych stacji. W tym przypadku optymalnym rozwiązaniem będzie zgranie jednocześnie trzech pojazdów. Czas rozpoczęcia rozruchu przez pojazd P5 (rys. 5) powinien być możliwie zbliżony do czasu rozpoczęcia hamowania zarówno przez pojazd P6 jak i P7 - dążąc do maksymalizacji wykorzystania energii pochodzącej z rekuperacji.



Rys. 5. Schemat koordynacji rozkładowej cykli hamowania i rozruchu na całym odcinku zasilania linii podmiejskiej

Źródło: opracowanie własne

Korzystanie z opisanej koncepcji rozkładowego zsynchronizowania hamujących i ruszających pojazdów jest omawiane w literaturze głównie w kontekście metra [12, 32]. We wskazanych pracach udowodniono możliwość zaoszczędzenia ponad 14% energii, co daje wymierne korzyści zarówno ekonomiczne jak i środowiskowe.

Dużo bardziej rozbudowana sytuacja będzie miała miejsce na obszarach stacji węzłowych. Wynika to z bardziej rozbudowanego układu torowego, różnorodności obsługiwanego taboru, większej rotacji ruchu pojazdów, ale również z konieczności uwzględnienia integracji rozkładowej umożliwiającej przesiadki pasażerów. W tym przypadku optymalizacja kosztów zużycia energii będzie zatem miała podrzędny aspekt w stosunku do integracji poszczególnych połączeń. Nadrzędnym kryterium optymalizacji pozostanie również czas przejazdu. Przy ograniczeniach omawianej strategii należy również wspomnieć o aspekcie technicznym projektowania i budowy napowietrznych linii zasilających, gdzie przęsła izolowane lub izolatory sekcyjne znajdują się najczęściej na odcinkach gdzie pociągi cyklicznie hamują. W przypadku gdy w sąsiednich sekcjach zasilania będzie panowało różne napięcie, pojazd przejeżdżający przez taki odcinek izolowany z poborem lub oddawaniem energii do sieci może wytworzyć łuk elektryczny pomiędzy odbierakiem a przewodem zasilającym. Prowadzi to do szybszej degradacji zarówno sieci trakcyjnej jak i odbieraków prądu pojazdów trakcyjnych [33].



4. WNIOSKI

Optymalizacja organizacji ruchu na kolei ma na celu wybór na każdym szczeblu organizacyjnym najlepszego z możliwych wariantów, przy czym za punkt centralny całego procesu organizacji ruchu można przyjąć etap konstrukcji rozkładów jazdy pociągów. Śledząc proces podejmowania decyzji, należy zauważyć, że przy wyborze optymalnych decyzji decydent posługuje się na ogół przynajmniej kilkoma kryteriami jednocześnie. Przy optymalizacji organizacji ruchu kolejowego mogą to być: minimalizacja czasu pojedynczego przejazdu, minimalizacja czasów przejazdów wszystkich pojazdów poruszających się po analizowanym odcinku z uwzględnieniem wag poszczególnych połączeń, minimalizacja czasów oczekiwania na przesiadkę w połączeniach wymagających skomunikowania, minimalizacja opóźnień i ich propagacji, a także minimalizacja kosztów, w tym tych związanych z energią trakcyjną.

Sam proces dążenia do ograniczania zużycia energii, równoznacznego z ograniczeniem ponoszonych na nią kosztów, będzie zasadny jedynie przy rozliczaniu licznikowym zużytej energii. Energooszczędność w organizacji ruchu kolejowego można osiągnąć nie tylko poprzez stosowanie jazdy możliwie efektywnej pod względem energetycznym, ale również poprzez stosowanie nowoczesnych technik wymiany energii między pojazdami w procesie hamowania rekuperacyjnego. Niezwykle ważne jest uwzględnienie możliwości tych procesów już przy konstrukcji rozkładów jazdy, a nie jedynie na poziomie działań wewnętrznych w przedsiębiorstwach transportu kolejowego.

Bibliografia

1. Albrecht, T., Oettich S.: *A new integrated approach to dynamic schedule synchronization and energy saving train control*. Computers in railways VIII, Southampton 2002.
2. Ambroziak T., Jachimowski R., Pyza D., Szczepański E.: *Analysis of the traffic stream distribution in terms of identification of areas with the highest exhaust pollution*. Polish Academy of Sciences Archives of Transport 4/32, Warszawa 2014, s. 7-16.
3. Auerbach P., Kukla W.: *Istota i zasady ekof jazdy, czyli integralna część szkolenia w przedsiębiorstwach świadczących usługi transportowe*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej: Organizacja i Zarządzanie 60/2013, Poznań 2013, s. 5-19.
4. Bocharnikov Y.V., Goodman C.J., Hillmansen S., Roberts C., Tobias A.M.: *Optimal driving strategy for traction energy saving*. Electric Power Applications 5/2007, Birmingham 2007, s. 675-682.
5. Brzozowski A.: *Kontrakty pod napięciem*. Kurier Kolejowy 14/2014, Warszawa 2014, s. 14-16.
6. Engelhardt J.: *Problemy metodyczne kalkulacji stawek dostępu do infrastruktury kolejowej*. Technika Transportu Szynowego 4/2013, Łódź 2013, s. 16-24
7. European Environment Agency: *Adaptation of transport to climate change in Europe*. EEA 8/2014, Luxembourg 2014.
8. Galas Z., Nykowski I., Żółkiewski Z.: *Programowanie wielokryterialne*. PWE, Warszawa 1985
9. Geraets F., Kroon L., Schoebel A., Wagner D. et al.: *Algorithmic Methods for Railway Optimization*, Springer, Berlin 2004, s. 126-144, 276-294.
10. Giedymin O.: *Programowanie przy wielorakości celów a sterowanie optymalne*. Przegląd Statystyczny, tom 30, nr z. 3/4, Warszawa 1983.
11. Gołębiowski P., Jacyna M.: *Wybrane problemy planowania ruchu kolejowego*. Prace Naukowe PW Transport 97/2013, Warszawa 2013, s. 123-133



12. Gonzalez-Gil A, Palacin R., Batty P., Powell J.P.: *Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy*. Transport Research Arena, Paris 2014.
13. Gutenbaum J.: *Modelowanie matematyczne systemów*. PWN, Warszawa - Łódź 1978.
14. Jacyna M.: *Some aspects of multicriteria evaluation of traffic flow distribution in a multimodal transport corridor*. Polish Academy of Sciences, Archives of Transport 1-2/10, Warszawa 1998, s. 37-52.
15. Jacyna M.: *Modelowanie i ocena systemów transportowych*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2009.
16. Jacyna M., Merkisz J.: *Proecological approach to modelling traffic organization in national transport system*. Polish Academy of Sciences, Archives of Transport 2/30, Warszawa 2014, s. 31-41.
17. Jacyna M., Wasiak M., Lewczuk K., Kłodawski M.: *Simulation model of transport system of Poland as a tool for developing sustainable transport*. Polish Academy of Sciences, Archives of Transport 3/31, Warszawa 2014, s. 23-35.
18. Jacyna-Gołda I., Żak J., Gołębiowski P.: *Models of traffic flow distribution for various scenarios of the development of proecological transport system*. Polish Academy of Sciences, Archives of Transport 4/32, Warszawa 2014, s. 17-28.
19. Jędrysa T.: *Projekt Eco Driving - Efektywność energetyczna na kolei*. Konferencja: Telekomunikacja i Informatyka na Kolei, Wisła 2014.
20. Kacprzak J., J. Mysłek, Podoski J.: *Zasady trakcji elektrycznej*. WKiŁ, Warszawa 1980.
21. Koleje Mazowieckie - KM Sp. z o.o.: *Management Report*. Warszawa, 2010-2012.
22. Łukasiewicz P.: *PhD Energy consumption and running time for trains*, Royal Institute of Technology, Stockholm 2001.
23. Merkisz J., Jacyna M., Merkisz-Guranowska A., Pielecha J.: *The Parameters of Passenger Cars Engine in Terms of Real Drive Emission Test*. Polish Academy of Sciences, Archives of Transport 4/32, Warszawa 2014, s. 43-50.
24. Neumann J., Morgenstern O.: *Theory of games and economic behaviour*. Princeton University Press, Princeton 1944.
25. Pazdro P.: *Koncepcja ruchowej optymalizacji efektywności hamowania odzyskowego*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2003, Łódź 2003, s. 62-64.
26. Pietrzak K., Pietrzak O.: *Ekonomiczne i organizacyjne aspekty transportu kolejowego*. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Gospodarki w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2013.
27. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.: *Cennik stawek jednostkowych opłat za korzystanie z infrastruktury kolejowej zarządzanej przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. obowiązujący od 14 grudnia 2014 r.*, dostęp Online: www.plk-sa.pl (14.10.2015).
28. PKP Energetyka S.A.: *Taryfa dla energii elektrycznej 2015*. Warszawa 2015.
29. Podoski J.: *Zasady trakcji elektrycznej*. WKiŁ, Warszawa 1967.
30. Przerembel S.: *Rozruch pociągu podmiejskiego i kryteria jego oceny*. Trakcja i Wagony 3/1981, Warszawa 1981, dostęp Online: www.zeus.krb.com.pl (14.10.2015).
31. Railway Bussines Forum: *Elektroenergetyka kolejowa*. Warszawa 2011.
32. Shuai S., Tao T., Xiang L., Ziyou G.: *A Subway Train Timetable Optimization Approach Based on Energy-Efficient Operation Strategy*. Intelligent Transportation Systems 2/14, 2013, s. 883-893.
33. Zagozdón P.: *SKM Warszawa - doświadczenia z pomiarem energii trakcyjnej oraz perspektywa wdrożenia rekuperacji energii hamowania*. Transport i Komunikacja 3/2009, Warszawa 2009, s. 38-41.

SOME ASPECTS OF OPTIMIZATION OF RAIL TRAFFIC ORGANIZATION IN ORDER TO MINIMIZE THE COSTS OF ELECTRICITY CONSUMPTION

Summary: In the article the distribution of costs in rail transport with emphasis on the cost of company policy, which include, inter alia, costs for infrastructure and energy costs were presented. Was found that proper organization of the movement of trains on the rail network without incurring additional expenditure on infrastructure and specialized equipment, can significantly reduce energy consumption and reduced the costs associated with it. Used solutions for energy monitoring consumption and optimization of cycles for the least



energy-intensive ride were presented. Also the idea of an optimal strategy for driving in order to save energy was discussed.

In addition, for the processes of optimizing the organization of traffic on the rail network, energy transfer efficiency criterion derived from recovery between vehicles was proposed. Attention is paid to the affect factors for cooperation between trains (the distance between vehicles, braking times overlap and start-up, etc.), but also the technical and organizational problems associated with it.

Presented an overview of organizational solutions shows that for the majority of polish railway, there is great potential to reduce costs for transport companies. The possibilities in this area gives the proper organization of transport, including the creation of optimized timetable taking into account the criterion of minimizing the costs of electricity consumption. This solution gives the opportunity to more fully exploit the implemented technology and reducing cost of energy consumption.

Keywords: railway transport, traffic management, optimization, costs of transport