

# Wybrane zagadnienia wielokryterialnej optymalizacji ruchu kolejowego w aspekcie minimalizacji kosztów

Michał URBANIAK<sup>1</sup>, Marianna JACYNA<sup>2</sup>

## Streszczenie

W artykule opisano podział kosztów w transporcie kolejowym z uwzględnieniem kosztów zewnętrznych i wewnętrznych przedsiębiorstwa kolejowego. W zakresie kosztów zewnętrznych zwrócono uwagę na konkurencyjność transportu kolejowego w stosunku do pozostałych gałęzi transportu. Stwierdzono, że w wyniku wielokryterialnej optymalizacji ruchu pociągów na sieci kolejowej można dodatkowo znacznie ograniczyć zużycie energii i generowane przez nią koszty. Osiągnięcie tego celu jest możliwe bez ponoszenia dodatkowych nakładów na infrastrukturę i specjalistyczne urządzenia. Przytoczono przykłady energooszczędnych rozwiązań, w tym stosowanie optymalnej strategii prowadzenia pojazdów (*eco-driving*) lub systemu odzysku energii. W wielokryterialnej optymalizacji ruchu pociągów zaproponowano wyróżnienie kryterium efektywności wykorzystania odzyskiwanej energii w systemie pojazd – pojazd oraz kryterium minimalnego zużycia energii trakcyjnej podczas przejazdu.

**Słowa kluczowe:** transport kolejowy, optymalizacja wielokryterialna, koszty transportu, energochłonność

## 1. Wprowadzenie

Prowadzenie ruchu kolejowego nieodzownie wiąże się z procesem jego organizacji, który obejmuje planowanie relacji pociągów i przebiegu tras, konstrukcję rozkładów jazdy, przydział krawędzi peronowych na stacjach z zatrzymaniami handlowymi pociągów, planowanie obiegów taboru, a także pracy drużyn trakcyjnych i konduktorskich [12]. Na każdym z wymienionych etapów przeprowadzana jest optymalizacja procesów mająca istotny wpływ na czasy przejazdów, skomunikowania, rezerwy czasu przejazdu lub ponoszone koszty przewozów. W optymalizacji organizacji ruchu kolejowego według kryterium minimum kosztów można wyróżnić [1, 10, 24]:

- optymalizację technik prowadzenia pojazdów trakcyjnych,
- optymalizację liczby składów pasażerskich obsługujących rozpatrywany zbiór połączeń,
- minimalizację pustych przebiegów wagonów towarowych w aspekcie kosztów przewoźnika,
- optymalizację planów pracy drużyn trakcyjnych i konduktorskich z uwzględnieniem kosztów ich zatrudnienia,
- optymalizację ruchu pociągów w czasie rzeczywistym z uwzględnieniem oszczędności zużycia

energii oraz minimalizowania opóźnień ich przejazdów.

Koszty przewozów w dużej mierze wpływają na rentowność i perspektywę rozwoju przedsiębiorstwa transportowego. Uzasadnione jest zatem pytanie, jakie środki organizacyjne, związane z prowadzeniem ruchu pojazdów szynowych, mogą przyczynić się do ograniczania ponoszonych kosztów. Dodatkowym aspektem są tu również koszty ponoszone pośrednio przez środowisko. W ostatnich latach duży nacisk kładzie się na ograniczanie energochłonności gospodarki, zwłaszcza w transporcie. Świadczą o tym zarówno dokumenty międzynarodowe, dotyczące ograniczenia energochłonności transportu na terenie Unii Europejskiej [7, 22], jak również prace poświęcone zagadnieniom usprawniania przewozów w celu pośredniej i bezpośredniej redukcji emisji gazów cieplarnianych do atmosfery [2, 16, 17, 19].

## 2. Koszty transportu

Ponoszenie kosztów w większości przypadków wiąże się z pewną wielkością środków pieniężnych, wynikającą często z fizycznego bądź naturalnego zu-

<sup>1</sup> Mgr inż.; Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiskowej; e-mail: micurban@pg.gda.pl.

<sup>2</sup> Prof. dr hab. inż.; Politechnika Warszawska, Wydział Transportu; e-mail: maja@wt.pw.edu.pl.

życia środków trwałych. Przytoczone pojęcie jest jednak mocno ogólne. W przypadku kosztów transportu (zarówno kolejowego, drogowego, lotniczego, jak i innych gałęzi) należy zaznaczyć, że istnieją koszty dodatkowe, obciążające inne jednostki, niezwiązane bezpośrednio z przedsiębiorstwami transportowymi. Można zatem wyróżnić dwie podstawowe grupy kosztów [28, 31]:

- 1) koszty wewnętrzne w aspekcie funkcjonowania przedsiębiorstwa transportu kolejowego,
- 2) koszty zewnętrzne, odnoszone do jednostek niezwiązanych bezpośrednio z transportem, do otoczenia lub społeczeństwa.

Wśród kosztów wewnętrznych przedsiębiorstwa kolejowego można wyróżnić grupę kosztów związanych z dostępem do infrastruktury oraz grupę kosztów własnych, do której zaliczają się [28, 31]:

- koszty stałe, ponoszone niezależnie od prowadzenia w danym okresie działalności transportowej (np. leasing środków trwałych),
- koszty zmienne, ulegające zwiększeniu lub zmniejszeniu w zależności od intensywności oraz organizacji działalności na rzecz przewozów (np. koszty energii elektrycznej).

Do kosztów zewnętrznych transportu, czyli nie związanych w sposób bezpośredni z pojazdami i użytkownikami transportu, należą koszty wynikające z procesów usuwania lub łagodzenia szkód powstałych wskutek działania transportu. Do takich szkód w głównej mierze należą: zanieczyszczenie powietrza (w tym zmiany klimatyczne), zanieczyszczenie wody i gleby, generowany hałas oraz wibracje, skutki wypadków (wypadków) w transporcie, a także zajętość terenu i straty czasu (np. wynikające z kongestii) [23, 28]. Należy zwrócić uwagę, że zwłaszcza ze względu na niskie koszty zewnętrzne związane z energochłonnością i emisją szkodliwych substancji do atmosfery, transport szynowy wydaje się niezwykle korzystnym rozwiązaniem (tablica 1).

Pojęcie kosztów transportu jest również często utożsamiane z ceną za usługę lub odpłatnością pracy ludzkiej w celu uzyskania zamierzonych korzyści [31]. Co ciekawe, w tym aspekcie transport kolejowy okazuje się zdecydowanie droższy i mniej konkurencyjny w stosunku do transportu drogowego [9], rysunek 1.

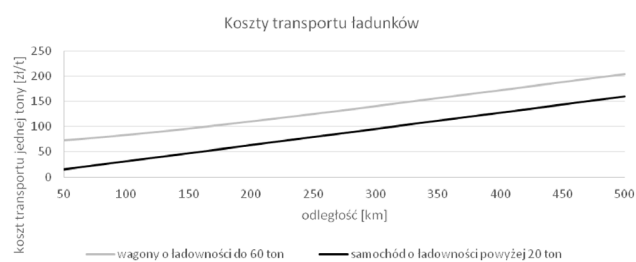
Konieczne jest zatem takie obniżenie kosztów w transporcie szynowym, które nie tylko będzie związane z kosztami zewnętrznymi lub wewnętrznymi, ale przełoży się również bezpośrednio na cenę usług świadczonych przez przedsiębiorstwo kolejowe.

Tablica 1

### Zestawienie zużycia energii i emisji do atmosfery w poszczególnych gałęziach transportu

Obciążenie środowiska	Gałąź transportu			
	Transport wodny	Transport szynowy	Transport drogowy	Transport powietrzny
<b>Energochłonność [kJ/tkm]</b>	423	677	2890	15 839
Emisja szkodliwych substancji do atmosfery [g/tkm]				
<b>Dwutlenek węgla</b>	30	41	207	1206
<b>Węglowodory</b>	0,04	0,06	0,3	2
<b>Tlenki azotu</b>	0,4	0,2	3,6	5,5
<b>Tlenki węgla</b>	0,12	0,05	2,4	1,4

Źródło: opracowanie własne na podstawie [23]



Rys. 1. Porównanie kosztów transportu ładunków w transporcie drogowym i kolejowym [Źródło: opracowanie własne na podstawie [9]]

W optymalizacji wielokryterialnej, autorzy przyjęli kryterium kosztów zużycia energii jako jeden z głównych czynników umożliwiających minimalizację zarówno kosztów zewnętrznych transportu kolejowego, jak i kosztów w kategorii handlowej czy ekonomicznej [15]. Do zasilania pojazdów szynowych są obecnie wykorzystywane dwa podstawowe rodzaje trakcji: spalinowa oraz elektryczna. Charakterystyka porównawcza tych dwóch różnych trakcji wymaga dogłębnej analizy, w artykule skupiono się tylko na kosztach związanych z trakcją elektryczną.

Głównym dostawcą energii na polskiej sieci kolejowej jest spółka PKP Energetyka S.A. Do jej głównych zadań należą obrót i dystrybucja energii elektrycznej oraz świadczenie usług energoelektrycznych. Można do nich zaliczyć czynności utrzymania, modernizacji oraz odtwarzania urządzeń trakcyjnych [35]. Zasady dystrybucji, sposobu rozliczania i koszty jednostkowe energii trakcyjnej przedstawiono w „Taryfie dla energii elektrycznej 2015” [32]. Systemem rozliczeniowym na polskich liniach kolejowych był do niedawna stosowany system ryczałtowy, czyli umowna opłata za usługę wyliczana na podstawie stosownych

algorytmów uzależnionych od wielkości przewozów. Nie była to sytuacja korzystna do rozwijania i inwestowania w energooszczędne technologie i rozwiązania, ponieważ nie przynosiły one wymiernych (finansowych) korzyści ani przedsiębiorstwom kolejowym, ani klientom. Dopiero uwolnienie rynku energetyki trakcyjnej na kolei oraz wprowadzenie liczników rzeczywistego zużycia energii w pojazdach, stało się bodźcem do stosowania energooszczędnych technologii. 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 [6]. Już w pierwszym roku nowego systemu rozliczenia i wprowadzenia projektu *Eco-driving* spółka zaoszczędziła 14 mln zł w stosunku do roku poprzedniego (tablica 2).

Tablica 2  
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

Źródło: opracowanie własne na podstawie [21]

### 3. Strategie ograniczania kosztów zużycia energii w transporcie kolejowym

#### 3.1. Eco-driving

Przy prowadzeniu elektrycznych pojazdów kolejowych są inne zasady jazdy energooszczędnej (tzw. *eco-driving*) niż w pojazdach transportu drogowego. W celu zmniejszenia zużycia paliwa, kierowca ruszając powinien możliwie płynnie i szybko zmieniać biegi na wyższe przed osiągnięciem wysokich obrotów, a co za tym idzie przed uzyskaniem wysokiej mocy. Również proces hamowania powinien następować stopniowo przez redukcję biegów i dopiero w końcowym etapie przez łagodne hamowanie aż do zatrzymania [3].

Przy prowadzeniu elektrycznego pojazdu trakcyjnego, głównym założeniem jest poprowadzenie rozruchu na styku przyczepności układu koło – szyna z największym dopuszczalnym przyspieszeniem aż do

uzyskania maksymalnej prędkości eksploatacyjnej. Następnie zaleca się możliwie najdłuższą jazdę na tak zwanym wybiegu, czyli jazdę siłą rozpędu bez poboru energii. W tym przypadku wskazane jest również pominięcie jazdy z prędkością ustaloną. W końcowym etapie należy zahamować pojazd z największym możliwym opóźnieniem. W warunkach rzeczywistych, energooszczędny przejazd pociągu można realizować dwoma głównymi sposobami [23]:

1. Przejazd quasi-forsowny (SL – *speed limit*) zakładający trzy fazy ruchu: rozruch – jazda ustalona – hamowanie; jest to przejazd w zadanym czasie  $t$  większym od minimalnego czasu przejazdu  $t_{min}$  ale mniejszym (lub równym) od rozkładowego czasu  $t_p$ , w którym oszczędność energii elektrycznej  $E$  jest uzyskiwana przez obniżenie maksymalnej prędkości przejazdu.
2. Przejazd energooszczędny (FC – *fixed coasting*) realizowany z wykorzystaniem faz rozruchu – jazdy ustalonej (lub z jej pominięciem) – wybiegu – hamowania w czasie przejazdu  $t = t_p$ , którym obniżenie zużycia  $E$  osiągnięte jest przez skrócenie czasu jej pobierania.

Do porównania wymienionych trybów jazdy energooszczędnej z jazdą forsowną (*MT* – *minimum time*) mogą służyć następujące zależności [23]:

$$t_{MT} = t_{min} \text{ i } E_{MT} = E_{max}, \quad (1)$$

$$t_{SL} = t_f \geq t_{min} \text{ i } E_{SL} \leq E_{MR}, \quad (2)$$

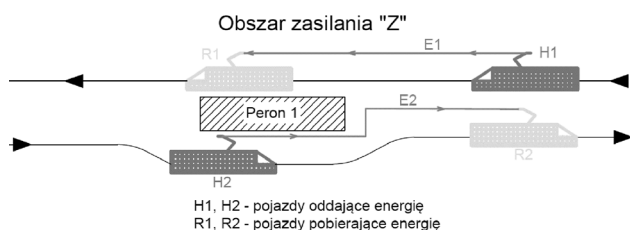
$$t_{FC} = t_f \geq t_{min} \text{ i } E_{FC} \leq E_{SL} \leq E_{MR}. \quad (3)$$

Szczegółowe zasady ekonomicznego prowadzenia elektrycznych pojazdów kolejowych oraz przykłady optymalizacji w tym zakresie zawierają prace [20, 33, 34, 36].

#### 3.2. Odzysk energii w technologii pojazd – pojazd

Warunkiem wykorzystania energii odzyskiwanej w technologii pojazd – pojazd jest istnienie takiej sytuacji ruchowej, w której [4, 29]:

- oba pojazdy, zarówno oddający energię do sieci (np. pojazd hamujący), jak i pobierający energię z sieci (np. pojazd ruszający), znajdują się na tym samym odcinku zasilania, np. w pobliżu posterunku ruchu (rys. 2), wówczas droga przepływu energii hamowania pojazd – sieć trakcyjna – pojazd jest optymalna z punktu widzenia strat przesyłu,
- pojazdy pobierające i oddające energię do sieci trakcyjnej znajdują się na sąsiednich odcinkach zasilania – ze względu na straty przesyłu energii wariant ten pominięto.



Rys. 2. Uproszczony schemat rekuperacji energii w systemie pojazd – pojazd w rejonie posterunku ruchu  
[Źródło: opracowanie własne]

Aby zapewnić opisaną sytuację, już podczas konstruowania rozkładów jazdy należy uwzględnić kryterium efektywności rekuperacji. Nie może być to jednak kryterium nadrzędne, ponieważ uzyskanie idealnej sytuacji ruchowej dla efektywności odzysku energii wymaga znacznej ingerencji w czasy jazdy pociągów względem pierwotnego rozkładu jazdy. Należy również pamiętać, że podczas reorganizacji rozkładu jazdy muszą być zachowane kryteria bezpieczeństwa przejazdu, które są określone między innymi przez zachowanie kryterium odstępu czasu i drogi, a także stacyjne oraz szlakowe odstępy czasu. Możliwości rekonstrukcji rozkładu jazdy są również ściśle związane ze zdolnością przepustową linii i stacji kolejowych [27].

Temat rekuperowania energii w technologii pojazd – pojazd był do tej pory podejmowany przez wielu autorów, głównie dla systemów metra. W pracy [30] autorzy zaproponowali nowy rozkład jazdy dla trzeciej linii metra w Madrycie. Udowodnili, że jego wprowadzenie umożliwi zaoszczędzenie 7% energii elektrycznej potrzebnej na cele trakcyjne. Okazało się, że już po trzech dniach od wprowadzenia nowego rozkładu, oszczędności sięgały 3%. Koncepcję odzysku energii w technologii pojazd – pojazd, przedstawiono w [29], a także w [5] dla linii metra w Rennes, gdzie zdaniem autorów jej wprowadzenie umożliwiłoby oszczędności energii elektrycznej rzędu 12%. W [25] zaprezentowano metodę optymalizacji rozkładu jazdy opartą na algorytmach genetycznych, umożliwiającą wykorzystanie rezerw czasu przejazdu na takie prowadzenie ruchu pociągów, które umożliwi maksymalizację wykorzystania energii z hamowania rekuperacyjnego przez inne pojazdy. Metodę tę zasymulowano dla przykładowego systemu metra i wykazano, że dzięki niej jest możliwe zaoszczędzenie energii trakcyjnej rzędu 14%.

#### 4. Optymalizacja wielokryterialna

Zainteresowanie metodami wielokryterialnego programowania wynika przede wszystkim z ich praktycznej przydatności. Można zauważyć, że przy wyborze optymalnym, decydent w procesie podejmowania

decyzji posługuje się na ogół nie jednym, a wieloma kryteriami jednocześnie. Metody wielokryterialnego wyboru pozwalają uwzględnić wiele, często konfliktowych, punktów widzenia (kryteriów). Jest to istotne zwłaszcza w przypadku podejmowania decyzji w sprawie przedsięwzięć inwestycyjnych, dotyczących np. rozwoju infrastruktury systemu transportowego lub zmiany organizacji ruchu na sieci, np. kolejowej.

Uwzględniając w zagadnieniach optymalizacji wielokryterialnej funkcję kryterium złożoną z wielu cząstkowych funkcji celu oraz ich wag, można modelować rzeczywiste problemy transportowe, które uwzględniają różne cele [15]. Podstawowa trudność w praktycznej realizacji metody optymalizacji wielokryterialnej, zarówno w badaniach naukowych, jak i działalności gospodarczej polega na tym, że tylko w nielicznych przypadkach istnieje możliwość podjęcia decyzji zapewniającej wzajemną zgodność ekstremalnych wartości poszczególnych cząstkowych funkcji celu.

Z reguły, uwzględnienie w modelu kilku odmiennych funkcji celu prowadzi do tzw. konfliktu celów. Oznacza to, że nie można uzyskać jednoznacznie najlepszego rozwiązania, które zapewniałoby optimum dla wszystkich cząstkowych kryteriów optymalizacji jednocześnie. Wyjątki stanowią modele wykorzystujące tylko zgodne funkcje celu – w takich przypadkach konflikt nie może występować, a możliwość poprawy jednego rozwiązania nie oznacza konieczności pogorszenia parametrów drugiego [8]. Celami zgodnymi w wielokryterialnej optymalizacji organizacji ruchu kolejowego mogą być minimalizacja czasu przejazdu, minimalizacja postojów i maksymalizacja prędkości. Do celów przeciwstawnych można natomiast zaliczyć minimalizację czasu przejazdu przy minimalizacji kosztów zużycia energii trakcyjnej [18]. Wielokryterialne problemy decyzyjne można podzielić na cztery podstawowe grupy [8, 11, 13-15]:

1. Problemy wielokryterialnego wyboru, w których problem decyzyjny polega na określeniu jednego wariantu spośród zbioru wariantów.
2. Problemy wielokryterialnego porządkowania, w których problem decyzyjny polega na uporządkowaniu zbioru wariantów.
3. Problemy wielokryterialnej klasyfikacji, polegające na zdefiniowaniu klas oraz przydzieleniu poszczególnych wariantów do tych klas.
4. Problemy wielokryterialnego opisu.

Opierają się one na dwóch następujących, podstawowych postulatach:

1. **Postulat dominacji** – jeżeli są dwie propozycje dopuszczalnych rozwiązań i uznaje się, że jedna z nich jest korzystniejsza niż druga przynajmniej ze względu na jedno kryterium, a pod każdym innym względem nie jest od niej gorsza, to należy pierwszą z nich uznać za lepszą.

2. **Postulat przechodniości dominacji** [26] – jeżeli w wyniku porównań uznaje się, że wariant **A** jest lepszy niż **B**, a z kolei **B** za lepszy niż **C**, to konsekwentnie należy uznać, że wariant **A** jest lepszy niż **C**.

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 zbiór liczb rzeczywistych). W zależności od postaci analitycznej poszczególnych funkcji kryterium oraz ograniczeń, można mówić o różnych rodzajach wielokryterialnego programowania matematycznego.

W ogólny sposób zadanie optymalizacji wielokryterialnej można sformułować następująco [8, 11, 13, 14, 15]: przy spełnieniu ograniczeń  $\mathbf{X} \in \mathbf{X}^{dop}$ , należy wyznaczyć wektor zmiennych decyzyjnych  $\mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}}$ , dla którego funkcja kryterium osiągnie wartość ekstremum (w zależności od celu zadania optymalizacyjnego min lub max):

$$g(\hat{\mathbf{X}}) = \text{extr}[g_n(\mathbf{X}) : n = 1, \dots, k] \quad (4)$$

gdzie:

- $g_n(\mathbf{X})$  – wartość  $n$ -tej funkcji kryterium,
- $\mathbf{X}$  – dowolne rozwiązanie zadania,
- $\mathbf{X}^{dop}$  – zbiór rozwiązań dopuszczalnych,
- $\hat{\mathbf{X}}$  – wektor rozwiązań,
- $k$  – liczba funkcji celu.

Globalną funkcję celu  $G(\mathbf{X})$  w przypadku minimalizacji kosztów energii elektrycznej podczas przejazdu z zachowaniem innych kryteriów, można zapisać następująco [18]:

$$G(\mathbf{X}) = [g_1(\mathbf{X}), g_2(\mathbf{X}), g_3(\mathbf{X}), g_4(\mathbf{X}), g_5(\mathbf{X}), g_6(\mathbf{X})] \quad (5)$$

gdzie:

- $g_1(\mathbf{X})$  – funkcja minimalizująca czas pojedynczego przejazdu,
- $g_2(\mathbf{X})$  – funkcja minimalizująca czasy przejazdów wszystkich pociągów poruszających się po analizowanym odcinku z uwzględnieniem ich wag (ważności),
- $g_3(\mathbf{X})$  – funkcja minimalizująca czasy oczekiwania na przesiadkę przy przejazdach wymagających skomunikowania,
- $g_4(\mathbf{X})$  – funkcja minimalizująca czasy postojów / maksymalizująca efektywny czas przejazdu,
- $g_5(\mathbf{X})$  – funkcja minimalizująca zużycie energii trakcyjnej (minimalizująca koszty energii trakcyjnej),
- $g_6(\mathbf{X})$  – funkcja maksymalizująca wielkość energii odzyskanej z procesu hamowania,

przy czym ostatnia grupa wymienionych funkcji,  $g_5(\mathbf{X})$  i  $g_6(\mathbf{X})$ , powoduje konflikt w odniesieniu do pozostałych.

## 5. Wnioski

Wielokryterialna optymalizacja daje możliwość dokładnego badania rzeczywistych problemów transportowych. Wprowadzenie wielu funkcji celu do problemu decyzyjnego pozwala znaleźć najlepsze rozwiązanie pod względem bezpieczeństwa, organizacji przewozów oraz kosztów. Wśród kosztów transportu, na które ma wpływ organizacja ruchu kolejowego, należy wyróżnić koszty energii elektrycznej. Ograniczenie jej zużycia ma wpływ zarówno na koszty zewnętrzne, jak i wewnętrzne oraz na ceny usług.

Na podstawie przedstawionych rozwiązań ograniczających koszty przewozu związane z energochłonnością można stwierdzić, że u większości polskich przewoźników kolejowych istnieje duży potencjał zmniejszenia tych kosztów. Możliwości w tym zakresie dają zarówno tworzenie zoptymalizowanych rozkładów jazdy z uwzględnieniem kryterium minimalizacji kosztów zużycia energii (przy wykorzystaniu systemu odzysku energii w technologii pojazd – pojazd), jak również energooszczędne prowadzenie pociągu przez maszynistę.

## Literatura

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 ekojazdy, czyli integralna część szkolenia w przedsiębiorstwach świadczących usługi transportowe*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Organizacja i Zarządzanie 6/2013.
4. Bartłomiejczyk M., Połom M.: *Napięcie sieci trakcyjnej jako wyznacznik możliwości zwiększenia odzysku energii*, Technika Transportu Szynowego 4/2013, Łódź 2013, s. 42-46.
5. Boizumeu J. R., Leguay P., Navarro E.: *Braking energy recovery at the Rennes metro*, Workshop on Braking Energy Recovery Systems – Ticket to Kyoto, Bielefeld 2011.
6. Brzozowski A.: *Kontrakty pod napięcie*, Kurier Kolejowy 14/2014, Warszawa 2014, s. 14-16.



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*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1985.
9. Gawlik L., Kryzia D., Uberman R.: *Koszty transportu kolejowego i samochodowego w kontekście bilansowania rynku surowców skalnych w Polsce*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013, s. 21-35.
10. Geraets F., Kroon L., Schoebel A., Wagner D. et al.: *Algorithmic Methods for Railway Optimization*, Springer, Berlin 2004, s. 126-144, 276-294.
11. Giedymin O.: *Programowanie przy wielorakości celów a sterowanie optymalne*, Przegląd Statystyczny, tom 30, nr z. 3/4, Warszawa 1983.
12. Gołębiowski P., Jacyna M.: *Wybrane problemy planowania ruchu kolejowego*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport 97/2013, Warszawa 2013, s. 123-133.
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 Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
16. Jacyna M., Merkiż 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 M., Urbaniak M.: *Wybrane zagadnienia optymalizacji organizacji ruchu kolejowego w celu minimalizacji kosztów zużycia energii elektrycznej*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport 109/2016, Warszawa 2016, s. 45-58.
19. Jacyna-Golda 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.
20. Kacprzak J., J. Mysłęk, Podoski J.: *Zasady trakcji elektrycznej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
21. Koleje Mazowieckie – KM Sp. z o.o.: *Management Report*, Warszawa, 2010-2012.
22. Komisja Europejska: *Biała Księga - Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu*, Bruksela 2011.
23. Kwaśnikowski J.: *Elementy teorii ruchu i racjonalizacji prowadzenia pociągu*, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Radom 2013.
24. Lukaszewicz P.: *PhD Energy consumption and running time for trains*, Royal Institute of Technology, Stockholm 2001.
25. Nasri A., Fekri Moghadam M., Mokhtari H.: *Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion – SPEEDAM, Pisa 2010.
26. Neumann J., Morgenstern O.: *Theory of games and economic behaviour*, Princeton University Press, Princeton 1944.
27. Nowosielski L.: *Organizacja przewozów kolejowych*, Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1999.
28. Pawłowska B.: *Zewnętrzne koszty transportu*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2000.
29. Pazdro P.: *Koncepcja ruchowej optymalizacji efektywności hamowania odzyskowego*, Technika Transportu Szynowego 1-2/2003, Łódź 2003, s. 62-64.
30. Pena-Alearaz M., Fernandez A., Cucala A. P. et al.: *Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy*, Journal of Rail and Rapid Transit 226/2011, s. 397-408.
31. Pietrzak K., Pietrzak O.: *W Ekonomiczne i organizacyjne aspekty transportu*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Gospodarki w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2013, s. 47-68.
32. PKP Energetyka S.A.: *Taryfa dla energii elektrycznej 2015*, Warszawa 2015.
33. Podoski J.: *Zasady trakcji elektrycznej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1967.
34. Przerembel S.: *Rozruch pociągu podmiejskiego i kryteria jego oceny*, Trakcja i Wagony, 1981 nr 3.
35. Railway Bussines Forum: *Elektroenergetyka kolejowa*, Warszawa 2011.
36. Rudowski M.: *Zmniejszenie zużycia energii na cele trakcyjne przez właściwe określenie czasów jazdy*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału Krakowskiego SITK, Kraków 1993, s. 155-162.



## Some Aspects of Multi-criteria Optimization of Rail Traffic Organization in Terms of Minimizing Costs

### Summary

In the article the division of costs (internal and external) in rail transport was presented. In terms of external costs attention to the „attractiveness” of rail transport in relation to other modes of transport was paid. Moreover, was found that the multi-criteria optimization of the organization of movement of trains can also significantly reduce energy consumption and thus the costs generated by it. Achieving this is possible without incurring additional expenditure on infrastructure and specialized equipment. The examples of energy efficient solutions in this subject applying the optimal strategy for carrying vehicles (*eco-driving*) or energy recovery system. As part of the multi-criteria optimization of train traffic distinction criterion of efficiency recovered in the energy system of the vehicle – vehicle and the criterion of minimum energy consumption traction during transit was proposed.

**Keywords:** railway transport, multi-criteria optimization, cost of transport, energy consumption

## Выбранные вопросы многокритериальной оптимизации железнодорожного движения в аспекте минимизации расходов

### Резюме

В статье представлено разделение расходов в железнодорожном транспорте с учетом внешних и внутренних расходов железнодорожного предприятия. В аспекте внешних расходов обращено внимание на конкурентоспособность железнодорожного транспорта относительно к остальным отраслям транспорта. Более того обнаружено, что благодаря многокритериальной оптимизации движения поездов в железнодорожной сети можно также значительно ограничить затраты энергии, и следовательно генерированные расходы. Достижение этой цели возможно без добавительных расходов на инфраструктуру и специализированное оборудование. Приведены примеры энергосберегающих решений, в том числе решения включающие употребление оптимальной стратегии вождения подвижной единицы („*eco-driving*”) или системы рекуперации энергии. В рамках многокритериальной оптимизации движения поездов предложено выделение критерия эффективности использования восстановленной в процессе энергии в системе двух подвижных единиц, а также критерий минимальной затраты тяговой энергии во время движения.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, многокритериальная оптимизация, расходы на транспорт, энергоёмкость

