Optymalizacja efektywności hamowania odzyskowego w transporcie szynowym przez sterowanie czasem przyjazdu na stację

Michał URBANIAK[1], Ewa KARDAS-CINAL[2]

Streszczenie
Artykuł nawiązuje do poprzednich prac autorów, w których przedstawiono model organizacji ruchu kooperujących pociągów z uwzględnieniem optymalizacji wykorzystania energii zwracanej do sieci jezdnej. W przedstawionym artykule zmodyfikowano model, zmieniając główną zmienną sterującą mającą wpływ na efektywne wykorzystanie energii, z czasu odjazdu na czas przyjazdu pociągu na stację lub przystanek. Optymalizacja jest dokonywana przez sterowanie czasem przyjazdu na stację w dopuszczalnym (rozkładowym) jego zakresie i przy zachowaniu rozkładowego czasu odjazdu, z wykorzystaniem metody równego podziału (bisekcji) do osiągnięcia optymalnego rozwiązania. Zmodyfikowaną metodę optymalizacji zaimplementowano w autorskim modelu organizacji ruchu kolejowego. Uwzględniono w nim optymalne wykorzystanie energii odzyskanej podczas hamowania elektrodynamicznego, przy zastosowaniu strategii przesyłu energii do sieci jezdnej, zakładając kooperację pary pociągów, całkowitą wielkość energii możliwej do odzyskania oraz czas postoju na stacji.

Słowa kluczowe: transport szynowy, hamowanie odzyskowe, optymalizacja rekuperacji energii, organizacja ruchu

1. Wstęp

Potrzeba optymalizacji efektywności hamowania odzyskowego w transporcie szynowym jest wynikiem istniejących problemów transportowych, tj. konieczności ograniczenia kosztów przewozu przy jednoczesnym zachowaniu dopuszczalnych standardów, ograniczenia emisji zanieczyszczeń przy zachowaniu wymaganej ładowności oraz wzroście zapotrzebowania na usługi transportowe. Poza racjonalizacją pracujących pociągów [12], konieczne jest wprowadzenie nowoczesnych oraz ekologicznych technologii zgodnych z dokumentami publikowanymi przez instytucje krajowe oraz Unię Europejską [19].

Jednym ze sposobów na ograniczenie poboru energii w transporcie kolejowym, a tym samym zmniejszenie kosztów (w tym środowiskowych), jest zastosowanie technologii rekuperacji w celu odzyskania części prądu w czasie hamowania elektrodynamicznego. Odzyskana w ten sposób energia może być ponownie użyta i w efekcie może pomóc poprawić bilans energii nie tylko pojedynczego przejazdu, ale także całego systemu transportu szynowego. Spośród różnych sposobów wykorzystania energii pochodzącej z hamowania odzyskowego, można wyróżnić następujące metody [8, 23, 24]:

1) wykorzystanie energii bezpośrednio w pociągach do potrzeb nietrakcyjnych, tj. oświetlenia, klimatyzacji,
2) przechowywanie jej w stacjonarnych lub pokładowych magazynach energii, a następnie użycie w czasie zwiększonego zapotrzebowania [3, 14].
3) przekazanie odzyskanej energii do krajowej sieci energetycznej [1, 13, 25],
4) przekazanie odzyskanej energii do sieci trakcyjnej, co umożliwi bezpośrednie jej użycie przez inny pojazd w fazie przyspieszania [10, 15, 16] lub utrzymanie prawidłowego poziomu napięcia w sieci.

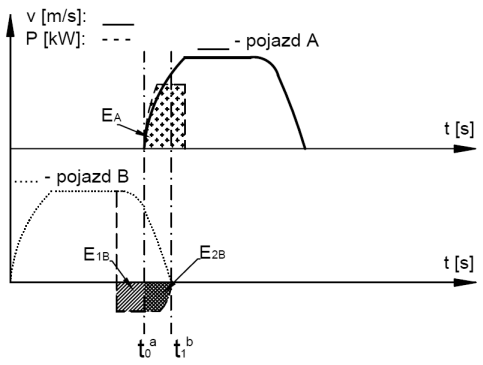
Każda z wymienionych metod ma swoje wady i zalety [8, 23], należy jednak zauważyć, że tylko bezpośrednie wykorzystanie odzyskanej energii, pomijające proces magazynowania lub zamiany prądu z DC na AC (sytuacja konieczna w polskim systemie zasilania), nie wymaga ponoszenia dodatkowych kosztów infrastrukturalnych. Zarówno użycie energii z hamowania odzyskowego do celów nietrakcyjnych

[1] Mgr inż., doktorant Politechniki Warszawskiej, Wydział Transportu; asystent Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska; e-mail: michal.urbaniak@pg.edu.pl.
[2] Dr hab. inż., prof. PW; Politechnika Warszawska, Wydział Transportu.

pojazdu, jak i zwracanie odzyskanej energii do sieci jezdnej, w warunkach energetycznej kooperacji kilku pojazdów, można nazwać metodami bezkosztowymi. Użycie odzyskanej energii do nietrakcyjnych potrzeb pociągu nie wymaga dodatkowej ingerencji w proces techniczny lub organizacyjny. Zwrócenie odzyskanej energii z powrotem do sieci jezdnej i wykorzystanie jej przez inne pociągi zależy od koordynacji rozkładu jazdy pociągów oraz natężenia ruchu.

2. Model kooperacji pociągów z uwzględnieniem rekuperacji energii

Opisany model zakłada, że przy danym i obowiązującym rozkładzie jazdy, będzie możliwe przekazanie energii z rekuperacji hamującego pociągu (pojazd *B*) przez sieć jezdną do innego pojazdu, który wyjeżdża ze stacji (pojazd *A*). Doprowadzi to do ograniczenia zapotrzebowania na energię przekazywaną z podstacji trakcyjnej w czasie rozruchu (rys. 1). Ilość odzyskanej oraz użytej w ten sposób energii będzie zależeć od czasu odjazdu pociągu, w zakresie dopuszczalnym przez rozkład.



EA - energia zużyta podczas rozruchu pojazdu A
E1B - niewykorzystana energia z hamowania rekuperacyjnego pojazdu B
E2B - niewykorzystana energia z hamowania rekuperacyjnego pojazdu B

Rys. 1. Wykorzystanie odzyskanej energii a sterowanie czasem przyjazdu pociągu; opracowanie własne na podstawie [20, 21, 24]

Odzysk oraz wykorzystanie energii z hamowania elektrodynamicznego wymaga współpracy co najmniej pary pojazdów i jest możliwe przede wszystkim na stacjach lub przystankach, gdzie występuje największe natężenie i powtarzalność procesów rozruchu i hamowania pociągów [9, 10]. Idealną sytuacją byłoby, gdyby przyspieszanie oraz hamowanie pary kooperujących pojazdów poruszających się w przeciwnych kierunkach, miało miejsce na każdej stacji lub przystanku danej linii kolejowej (rys. 2).

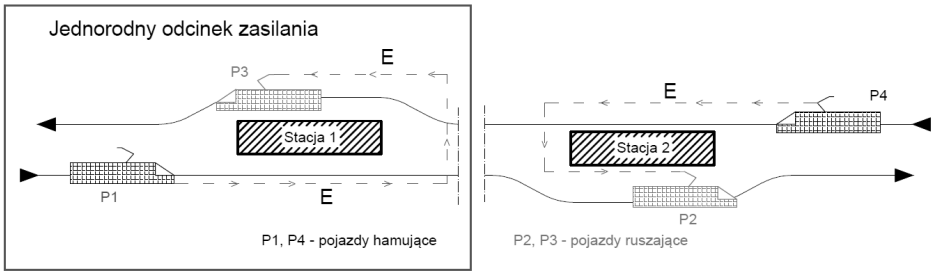
W praktyce to założenie jest niestety bardzo wymagające i można je wprowadzić jedynie w perfekcyjnie funkcjonujących systemach metra (gdzie nie występują nawet minimalne opóźnienia). Z tego powodu proponowany model zakłada możliwość energetycznej kooperacji jedynie na pojedynczych stacjach oraz przystankach.

Podstawy modelowania jazdy pojazdów szynowych opisano już między innymi w pracach J. Podoskiego i innych autorów [17, 18], niemniej modele obliczeniowe są stale modyfikowane oraz dopracowywane przez różnych naukowców, w zależności od nadrzędnego celu, który ma być osiągnięty. Model teoretycznego przejazdu w głównej mierze sprowadza się do rozwiązania równania ruchu pojazdu kolejowego (równanie Newtona), gdzie pociąg jest traktowany jako punkt materialny o masie *m*. Można je sformułować w następujący sposób [20, 21, 22, 24]:

$$\begin{cases} km\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = u(t) - R_s(v) - R_g(x), \\ \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = v(t), \end{cases} \tag{1}$$

gdzie: siła $u(t)$ działająca na pojazd jest siłą rozruchu $u = F(t)$ lub siłą hamowania $u = -F(t)$, w zależności od fazy ruchu, zaś współczynnik k uwzględnia momenty bezwładności mas wirujących. Celem tych obliczeń jest ustalenie parametrów przejazdu pociągu (np. natężenia prądu pobranego z sieci trakcyjnej, zapotrzebowania na moc w celu zrealizowania przejazdu itd.), w zależności od czasu oraz odległości pokonanej przy danej charakterystyce trakcyjnej pojazdu oraz znanych parametrach geometrycznych trasy.

Opory ruchu $R_s(v)$ są głównie związane z siłami aerodynamicznymi i oddziaływaniami koło – szyna.



Rys. 2. Schemat idealnej koordynacji na liniach podmiejskich lub metra między hamującymi i ruszającymi pociągami; opracowanie własne na podstawie [10]

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Ich zależność od prędkości jazdy v jest zazwyczaj opisywana funkcją kwadratową [7, 20, 21]:

$$R_s(v) = k_0 + k_1 v + k_2 v^2, \tag{2}$$

gdzie: współczynniki k_0, k_1, k_2, są stałymi związanymi z konstrukcją taboru: jego masą oraz parametrami opisującymi oddziaływanie koła z szyną.

Opory ruchu $R_g(x) = mgp(x)$ natomiast w prosty sposób zależą od pochylenia $p(x)$ linii kolejowej, które zmienia się wraz z aktualnym położeniem x wzdłuż toru. Pochylenie to jest zdefiniowane jako $p = \Delta h / l$ gdzie Δh jest różnicą wysokości pomiędzy dwoma punktami toru odległymi od siebie o l i jest zazwyczaj wyrażane w promilach. Wówczas wyrażenie przyjmuje postać: $R_g(x) = mgp(x) / 1000$.

Ponadto, jeżeli w chwili t moc pobierana przez pojazdy w fazie rozruchu wynosi $P_a(t)$, natomiast moc generowana podczas hamowania elektrodynamicznego jest oznaczona jako $P_{b,r}(t,s)$, to dla danych przebiegów prędkości pojazdów A i B: $v_a = v_a(t)$ i $v_b = v_b(t)$, wielkości $P_a = F(t)v_a(t)$ i $P_{b,r}(t,s) = \varphi(s)B(t)v_b(t)$ można wyznaczyć bezpośrednio z równania ruchu [24]:

$$\begin{cases} P_a(t) = \left[\frac{1}{2}mv_a^2(t+\Delta t) - \frac{1}{2}mv_a^2(t) + \Delta E_{loss,a}\right] / \Delta t, \\ P_{b,r}(t,s) = \varphi(s)\left[\frac{1}{2}mv_b^2(t) - \frac{1}{2}mv_b^2(t+\Delta t) - \Delta E_{loss,b}\right] / \Delta t, \end{cases} \tag{3}$$

gdzie: Δt jest krótkim odcinkiem czasu t, zaś $\varphi(s)$ jest parametrem o wartościach z przedziału [0, 1], który określa efektywność transferu energii w zależności od odległości s pomiędzy kooperującymi pojazdami.

W przedstawionym w pracach [20, 21, 24] modelu optymalizacji, minimalizowany jest jedynie rzeczywisty pobór energii w czasie przejazdu, który przyjmuje formę:

$$E_p = E - E_r, \tag{4}$$

gdzie: $E = E_a + E_b$ jest sumą energii trakcyjnych zużytych przez pojazdy A i B, zaś E_r jest wykorzystaną częścią energii odzyskanej podczas hamowania pojazdu B, wyrażoną przez:

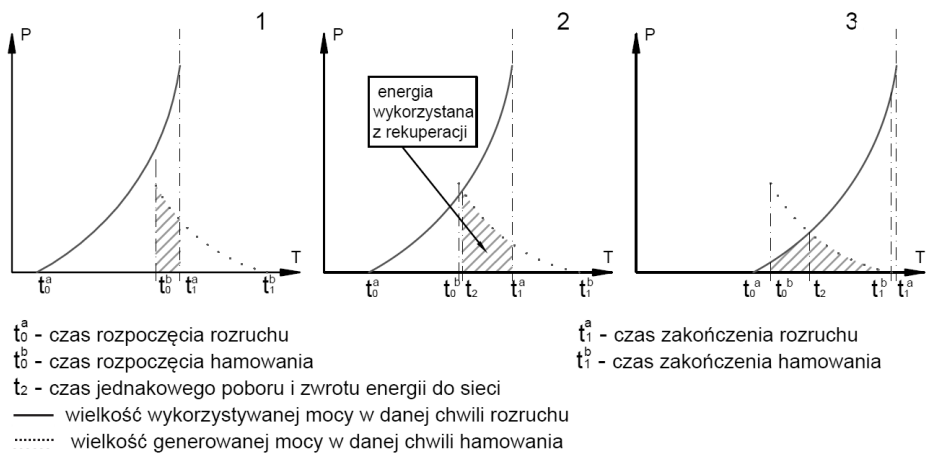
$$E_r = \int_0^T \min\{P_a(t), P_{b,r}(t,s)\}\mathrm{d}t. \tag{5}$$

Dla każdego z tych pojazdów energia zużyta w trakcie przejazdu w przedziale czasu $[0,T]$ wyraża się przez całkę z mocy związanej z siłą trakcyjną:

$$E_n = \int_0^T \max\{u(t),0\}v(t)\mathrm{d}t = \int_0^T \frac{u(t)+|u(t)|}{2}v(t)\mathrm{d}t \quad (n=a,b). \tag{6}$$

Specyfikę procesu optymalizacji, uwzględniającą zależności pomiędzy różnymi wariantami czasów odjazdów ze stacji z możliwością kooperacji hamujących i przyspieszających pojazdów szynowych, przedstawiono na rysunku 3. W rozważanych trzech przypadkach pociąg A jest w fazie rozruchu, natomiast pociąg B jest w fazie hamowania. Czas rozpoczęcia i czas zakończenia hamowania (t_0^b oraz t_1^b) pociągu B są takie same we wszystkich trzech przypadkach, natomiast zmienia się czas rozpoczęcia rozruchu t_0^a pociągu A. Może być on opóźniany aż do granicznego t_{0gr}^a, umożliwiającego planowy przyjazd na kolejną stację.

W wyniku zmian czasu odjazdu t_0^a zmienia się wykorzystanie przez pociąg A energii odzyskanej



Rys. 3. Wykorzystanie odzyskanej energii a sterowanie czasem odjazdu pociągu; opracowanie własne na podstawie [20, 21, 24]

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

podczas hamowania pociągu *B* co przedstawiają trzy zależności [20, 21, 24]:
– w przypadku 1:

$$E_r = \int_{t_0^b}^{t_1^a} P_{b,r}\left(t,s\right)\mathrm{d}t\,, \tag{7}$$

– w przypadku 2:

$$E_r = \int_{t_0^b}^{t_2} P_a\left(t,t_0^a\right)\mathrm{d}t + \int_{t_2}^{t_1^a} P_{b,r}\left(t,s\right)\mathrm{d}t, \tag{8}$$

– w przypadku 3:

$$E_r = \int_{t_0^b}^{t_2} P_a\left(t-t_0\right)\mathrm{d}t + \int_{t_2}^{t_1^b} P_{b,r}\left(t,s\right)\mathrm{d}t\cdot \tag{9}$$

Po wykonaniu analizy charakteru zmiany wykorzystania energii rekuperacji E_r w zależności od czasu odjazdu t_0^a (rośnie w przypadkach 1 i 2 lub maleje w przypadkach 2 i 3), można stwierdzić, że może być ona opisana funkcją unimodalną. Następnie należy zauważyć, że zgodnie z następującymi relacjami przedstawionymi w pracach [20, 21, 24]:

$$\begin{cases} \dfrac{dE_p}{dt_0^a} < 0, \ \text{gdy } t_0^a < t^{**}, \\ \dfrac{dE_p}{dt_0^a} = 0, \ \text{gdy } t_0^a = t^{**}, \\ \dfrac{dE_p}{dt_0^a} > 0, \ \text{gdy } t_0^a > t^{**}, \end{cases} \tag{10}$$

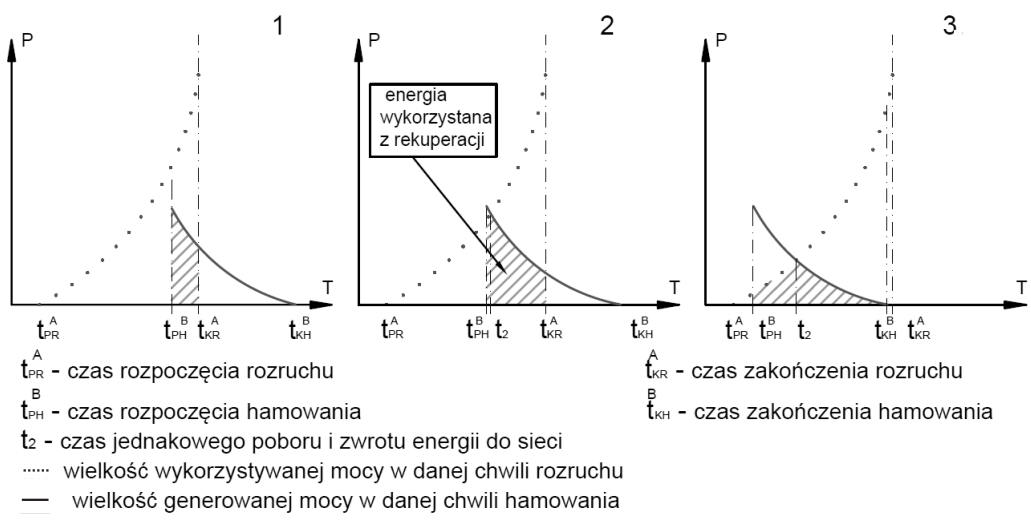
rzeczywiste zużycie energii trakcyjnej E_p w pierwszym etapie maleje, a następnie rośnie wraz ze zwiększeniem opóźnienia czasu odjazdu pociągu ze stacji. Oznacza to, że minimalne rzeczywiste zużycie energii trakcyjnej E_p występuje dla czasu odjazdu $t_0^a = t^{**}$ i można je wyznaczyć, korzystając z metody równego podziału (bisekcji) [4, 5], rozwiązując równanie nieliniowe w postaci:

$$\mathrm{d}E_p / \mathrm{d}t_0^a = 0\,. \tag{11}$$

Algorytm tego rozwiązania polega na założeniu najwcześniejszego i możliwie najpóźniejszego czasu odjazdu pociągu ze stacji oraz wyznaczeniu gradientu rzeczywistego zużycia energii trakcyjnej dla tych dwóch czasów odjazdów. W przypadku, gdy obie otrzymane wartości są dodatnie należy stwierdzić, że najwcześniejszy możliwy czas odjazdu ze stacji jest rozwiązaniem optymalnym. W każdym innym przypadku wyznacza się optymalną wartość t_0^a, zawężając stopniowo przedział czasów odjazdu i analogicznie szukając optymalnego rozwiązania metodą bisekcji zastosowaną do funkcji $\mathrm{d}E_p / \mathrm{d}t_0^a$, w którym oba gradienty będą wartościami dodatnimi [24].

3. Modyfikacja modelu

Na wstępie należy przyjąć, że sieć trakcyjna jest zasilana prądem o stałym napięciu (np. 3 kV DC, które jest typowym napięciem zasilania na polskich liniach kolejowych), a stan taboru oraz infrastruktury umożliwi wykorzystanie technologii hamowania rekuperacyjnego z przesyłem odzyskanej energii do sieci jezdnej [11]. W przedstawionym modelu, w odróżnieniu od modelu wyjściowego, zaproponowano zmienną sterującą przejazdem teoretycznym w postaci czasu zakończenia hamowania (t_{KH}^B). Wartość ta jest równoznaczna z rzeczywistym czasem przyjazdu pociągu *B* na stację lub przystanek, czyli $t_{KH}^B = T_{RP}^B$. Sytuację tę ilustruje rysunek 4.



Rys. 4. Wykorzystanie odzyskanej energii a sterowanie czasem przyjazdu pociągu; [opracowanie własne]

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Jest to sytuacja, gdy czasy rozpoczęcia i zakończenia rozruchu przez pojazd A są wartościami stałymi ($t_{PR}^{A} = const.$ oraz $t_{KR}^{A} = const.$), a co za tym idzie charakterystyka prowadzenia pojazdu A nie ulega zmianie w zakresie rozruchu i wymaganej do jego przeprowadzenia energii. Przesunięciu podlegają natomiast czasy rozpoczęcia i zakończenia hamowania pociągu B (t_{PH}^{B} oraz t_{KH}^{B}), przy czym najwcześniejszy moment zakończenia hamowania pociągu B nie może nastąpić wcześniej niż czas rozpoczęcia rozruchu pociągu A ($t_{KH}^{B} \geq t_{PR}^{A}$),najpóźniejszy zaś czas rozpoczęcia hamowania pojazdu B nie może nastąpić później niż moment zakończenia rozruchu pojazdu A ($t_{PH}^{B} \leq t_{KR}^{A}$). Należy przy tym również pamiętać, że rzeczywisty czas przyjazdu pociągu B na stację T_{RP}^{B} musi zawierać się w przedziale między najwcześniejszym i najpóźniejszym czasem przyjazdu danego pociągu na stację, dopuszczalnym przez służbowy rozkład jazdy: $T_{RP}^{B} \in \left\langle T_{PP}^{B}; T_{WP}^{B} \right\rangle$.

Dalsze, podstawowe założenia modelu przejazdu teoretycznego (1)–(3) pozostawiono niezmienione. Niemniej, wiedząc że sieć trakcyjna jest zasilana prądem o stałym napięciu, a moc prądu stałego wyraża się iloczynem napięcia U i natężenia prądu I:

$$P(t) = \eta U I(t), \tag{12}$$

gdzie: η to sprawność silnika (η_E) lub sprawność hamownia rekuperacyjnego (η_B), a $I(t)$ pobierane lub generowane natężenie prądu.

Wówczas otrzymuje się:

$$\begin{cases} \eta_E U I_A(t) = \left[\frac{1}{2} m v_a^2(t+\Delta t) - \frac{1}{2} m v_a^2(t) + \Delta E_{loss,a} \right] / \Delta t, \\ \eta_B U I_B(t,s) = \varphi(s) \left[\frac{1}{2} m v_b^2(t) - \frac{1}{2} m v_b^2(t+\Delta t) - \Delta E_{loss,b} \right] / \Delta t, \end{cases} \tag{13}$$

gdzie: energia niezbędna do pokonania oporu ruchu wyrażana jest przez [22]:

$$\begin{aligned} \Delta E_{loss,a} &= \left[R_{s,a}(v_a) + R_{g,a}(x_a) \right] \Delta x_a, \\ \Delta E_{loss,b} &= \left[R_{s,b}(v_b) + R_{g,b}(x_b) \right] \Delta x_b, \end{aligned} \tag{14}$$

gdzie: $\Delta x_a = v_a \Delta t$ i $\Delta x_b = v_b \Delta t$ są długościami odcinków toru, które przebyły odpowiednio: pojazd A będący w fazie rozruchu i pojazd B będący w fazie hamowania.

Natężenie pobieranego / indukowanego prądu I można natomiast wyznaczyć, znając siłę potrzebną na pokonanie oporów ruchu $F(t)$, aktualną prędkość pojazdu $v(t)$ oraz sprawność silnika / silnika – prądnicy η:

$$I = F(t) \cdot \frac{v(t)}{U \cdot \eta}. \tag{15}$$

Siłę pociągową $F(t)$ dla fazy rozruchu pociągu można określić z zależności [17, 18]:

$$F_{A1} = k \cdot \mathrm{m} \cdot a_A. \tag{16}$$

dla przyspieszania przy stałej sile, gdzie a_A to maksymalne przyspieszenie rozruchu, natomiast dla przyspieszenia ze stałą mocą maksymalną siła ta równa się:

$$F_{A2} = \frac{P_E \cdot \eta_E}{v_A(t)}, \tag{17}$$

gdzie: P_E to moc wszystkich silników pojazdu, a $v_A(t)$ to charakterystyka prędkość obliczana z warunku $F_{A1} = F_{A2}$.

Podobnie, siłę trakcyjną $F(t)$ można wyznaczyć dla pociągu hamującego:

$$F_{B1} = k \cdot \mathrm{m} \cdot a_B, \tag{18}$$

$$F_{B2} = \frac{P_E \cdot \eta_E}{v_B(t)}, \tag{19}$$

gdzie: a_B to maksymalne opóźnienie hamowania, $v_B(t)$ to prędkość charakterystyczna odpowiadająca $F_{B1} = F_{B2}$.

Ponieważ największe zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną występuje podczas prowadzenia rozruchu, te potrzeby można zmniejszyć przez odpowiednie wykorzystanie energii pochodzącej z hamowania odzyskowego innego pociągu. Zapotrzebowanie na energię elektryczną w takim przypadku będzie równe bilansowi energii potrzebnej na wykonanie rozruchu i możliwej do wykorzystania części energii odzyskanej z hamowania [17, 18, 24]. W proponowanym podejściu sterowania czasem przyjazdu nie ma konieczności dodatkowej optymalizacji całego przejazdu w celu osiągnięcia stosunkowo wymiernych korzyści w bilansie energetycznym, a jedynie fragmentu dotyczącego hamowania i rozruchu. Z tego powodu, jako główną składową funkcji celu zaproponowano:

$$E_P = E - E_{RW} \rightarrow \min, \tag{20}$$

gdzie: E_P jest rzeczywistą wartością energii zużytą podczas rozruchu pojazdu A, E jest wielkością energii potrzebną na wykonanie rozruchu natomiast E_{RW} jest energią odzyskaną podczas hamowania elektrodynamicznego pojazdu B i wykorzystaną w procesie kooperacji obu pociągów. Pamiętając o zależności (12)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

poszczególne wartości energii można wyznaczyć następująco:

$$E = U \int_{T_{PR}}^{T_{KR}} I(t)dt, \tag{21}$$

$$E_{RW} = U \int_{T_{PR}}^{T_{KH}} \min\{I_A(t), I_B(t,s)\}dt, \tag{22}$$

gdzie: $I_A(t)$ to prąd pobierany przez pociąg przyspieszający (A), a $I_B(t,s)$ to prąd generowany przez pociąg hamujący (B).

Stwierdzono również, że istnieją inne kryteria, które powinny być uwzględnione przy optymalizacji wielokryterialnej, dlatego przyjęto:

$$E_{RO} = U \int_{T_{PH}}^{T_{KH}} I_B(t)dt \to \max, \tag{23}$$

gdzie: E_{RO} jest całkowitą odzyskaną energią podczas hamowania rekuperacyjnego pojazdu B, możliwą do wykorzystania również w inny sposób, niż bezpośredni przesył do sieci jezdnej (np. dodatkowe zasobniki energii) oraz:

$$T_P = T_O^B - T_{RP} \to \min, \tag{24}$$

gdzie: T_P oznacza czas postoju, który powinien być możliwie minimalny ze względu na możliwości przepustowe stacji, T_O^B jest rozkładowym czasem odjazdu pociągu B, natomiast T_{RP} jest jego rzeczywistym czasem przyjazdu.

Biorąc pod uwagę przedstawione rozważania, otrzymuje się globalną funkcję celu postaci:

$$F(T_O^B, T_{RP}) = w_1 E_P - w_2 E_{RO} + w_3 T_P \to \min, \tag{25}$$

gdzie: w_1, w_2, w_3 są wagami poszczególnych funkcji składowych, odzwierciedlającymi ich ważność w zależności od stawianych celów. Funkcja ta jest minimalizowana, zatem funkcje cząstkowe, które również są minimalizowane zapisuje się ze znakiem dodatnim (E_P,T_P), natomiast maksymalizowaną funkcję cząstkową (E_{RO}) zapisuje się ze znakiem ujemnym.

Korzystając z przedstawionego modelu, zoptymalizowano wielkość odzyskanej oraz wykorzystanej przy kooperacji pociągów energii dla stacji kolejowej Gdańsk Żabianka AWFiS na linii kolejowej nr 250 Gdańsk Główny – Rumia (tabl. 1). W wyniku optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu świetlika wykazano, że w ciągu doby, podczas hamowania rekuperacyjnego istnieje możliwość odzyskania energii elektrycznej o wartości E_{RO} = 97,44 kWh, z czego E_{RW} = 65,44 kWh może zostać wykorzystana w procesie energetycznej kooperacji pociągów. W przypadku całkowitego zapotrzebowania pociągów na energię trakcyjną na analizowanym odcinku (Gdańsk Oliwa – Gdańsk Żabianka AWFiS – Sopot Wyścigi), wynoszącemu E_P = 162,10 kWh, energia wykorzystana bezpośrednio w procesie energetycznej kooperacji pociągów stanowi ponad 40% całkowitego zapotrzebowania. Oznacza to, że rzeczywiste zapotrzebowanie na energię trakcyjną wynosi 96,66 kWh. Wynik ten jest zbliżony do wielkości energii możliwej do wykorzystania przy uwzględnieniu energetycznej kooperacji pociągów, określonej w pracach [2] lub [6].

Tablica 1

Wyniki optymalizacji za pomocą algorytmu świetlika dla przystanku pociągu Gdańsk Żabianka AWF

	E_P [kWh]	E_{RO} [kWh]	E_{RW} [kWh]
	15,3999	9,7495	5,8728
	15,9565	9,5664	6,9408
	18,8695	10,0022	7,1727
	15,3999	9,7495	6,3806
	17,0331	9,2331	6,5425
	15,4019	9,7509	6,3814
	17,0616	9,3467	6,5860
	15,3885	9,7153	6,3669
	16,1888	10,5684	6,8135
	15,4021	9,7543	6,3826
Suma:	**162,10**	**97,44**	**65,44**

[Opracowanie własne]

4. Wnioski

Podsumowując, należy stwierdzić, że istnieją już pewne modele i sposoby optymalizacji wykorzystania energii pochodzącej z rekuperacji z wykorzystaniem przesyłu do sieci jezdnej oraz wzajemnej kooperacji kilku pojazdów, np. przez sterowanie czasem odjazdu pociągu. Należy jednak zaznaczyć, że nadal istnieje wiele niezbadanych możliwości zwiększenia efektywności hamowania odzyskowego, jak choćby jego optymalizacja z wykorzystaniem rezerwy czasu przejazdu uwzględnionej w rozkładzie jazdy przez sterowanie czasem przyjazdu. Metody te, choć podobne, różnią się sposobem prowadzenia pojazdu i poborem energii. W pierwszym przypadku (sterowanie czasem odjazdu), wraz z jego stopniowym opóźnieniem, zwiększa się energia konieczna na pokonanie kolejnego odcinka międzystacyjnego, związana między innymi z koniecznością uzyskania większych prędkości. W drugim przypadku natomiast (sterowanie czasem przyjaz-

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

du na stację), wraz z opóźnieniem przyjazdu spada zapotrzebowanie na energię np. dzięki wydłużeniu jazdy bez poboru prądu, rozwijaniu niższych prędkości czy maksymalnemu opóźnieniu hamowania.

Znane modele w dalszym ciągu można modyfikować i rozwijać, dostosowując je do stawianych wymagań, istniejących (zmieniających się) warunków i potrzeb, np. przez doprecyzowanie zapisu, wprowadzając możliwość edycji podstawowych danych lub rezygnując z części obliczeń, zastępując je innymi zależnościami, potencjalnie skracając tym samym cały proces obliczeń i analizy.

W kontekście optymalizacji trzeba podkreślić, że organizacji ruchu pociągów (czy innych systemów transportu szynowego) nie można modyfikować wyłącznie pod względem optymalizacji zużycia energii czy efektywności rekuperacji. Ze względu na nadrzędne kryteria, takie jak określony czas przejazdu, czas postoju, zdolności przepustowe linii kolejowych i stacji, ale przede wszystkim wymagania od strony popytu, możliwa jest reorganizacja ruchu tylko w wąskim zakresie. Znalazło to odzwierciedlenie zarówno w założeniach modelu $\left(T_{RP}^{B} \in \left\langle T_{PP}^{B}; T_{WP}^{B} \right\rangle\right)$, jak i w minimalizowanej globalnej funkcji celu.

Zastosowanie zaproponowanego modelu, zakładającego wykorzystanie energii z rekuperacji, przy uwzględnieniu energetycznej kooperacji pociągów wraz z optymalizacją przejazdu, wskazało że w przypadku analizy wykonanej dla pojedynczej stacji istnieje możliwość zaoszczędzenia nawet do 40% energii trakcyjnej.

Literatura

1. ABB, ENVILINE ERS – trakcyjny układ odzyskiwania energii, Rynek Infrastruktury, http://www.rynekinfrastruktury.pl/wiadomosci/enviline-ers-trakcyjny-uklad-odzyskiwania-energii-13893.html [dostęp 15.11.2017].
2. Açikbaş S., Söylemez M.T.: *Parameters affecting braking energy recuperation rate in DC rail transit*, Joint Rail Conference, 2007, s. 263–268.
3. Barrero R., Tackoen X., van Mirelo J.: *Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in metro network,* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, nr 224, pp. 207–225.
4. Burden R.L., Faires J.D.: *The bisection algorithm*. PWS Publishers, Boston 1985.
5. Corliss G.: *Which root does the bisection algorithm find?* SIAM 1977 2/19, p. 325–327.
6. Czucha J., Karwowski K., Mizan M., Pazdro P.: *Efektywność odzysku energii hamowania elektrodynamicznego w komunikacji miejskiej*, Przegląd Elektrotechniczny, 10/2004, s. 1016–1019.
7. De Martinis V., Gallo M.: *Models and methods to optimize train speed profiles with and without energy recovery systems: a suburban test case*. Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2013, Vol. 87, pp. 222–233.
8. Gonzalez-Gil A., Palacin R., Batty P., Powell J.P.: *Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal manage-ment of regenerative braking Energy,* Transport Research Arena, Paryż 2014.
9. Jacyna M., Urbaniak M.: *Organizacja ruchu pociągów w obrębie stacji a oszczędność energii,* Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport, z. 115/2017, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, s. 181–189.
10. Jacyna M., Urbaniak M.: *Wybrane zagadnienia optymalizacji organizacji ruchu kolejowego w celu minimalizacji kosztów zużycia energii*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport, z. 109, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016, s. 45–58.
11. Karkosińska-Brzozowska N., Urbaniak M.: *Bariery stosowania technologii odzysku energii w transporcie szynowym*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport, z. 115/2017, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, s. 69–80.
12. Kwaśnikowski J.: *Elementy teorii ruchu i racjonalizacji prowadzenia pociągów*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2013.
13. Ortega J.M., Ibaiondo H.: *Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid*, WCRR 2011, Lille, Francja.
14. Pawełczyk M.: *Rozwój systemów wykorzystujących akumulację energii w transporcie szynowym*, TTS Technika Transportu Szynowego 2011, nr 10/2011, s. 41–46.
15. Pazdro P.: *Koncepcja ruchowej optymalizacji efektywności hamowania odzyskowego*. TTS Technika Transportu Szynowego – Eksploatacja 2003, nr 1–2/2003, s. 62–64.
16. Pena Alcaraz M. et.al.: *Optimal underground timetable design based on power flow maximizing the use of regenerative-braking Energy*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, nr 226, pp. 397–408.
17. Podoski J., Masłek J., Kacprzak J.: *Zasady trakcji elektrycznej*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
18. Podoski J.: *Zasady trakcji elektrycznej,* Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1967.
19. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0144&from=EN [dostępny 15.11.2017 r.].

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

20. Su S., Tang T., Roberts C.: A Cooperative Train Control Model for Energy Saving. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, tom: 16, wydanie: 2, s. 622–631.
21. Su S., Tao T., Wang Y.: *Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model*, Energies 2016, 9(2), nr 105.
22. Tomczyk M., Pacholczyk M., Karwowski K.: *Comprehensive modelling of the cost effectivness of railway line electrification*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2016, nr 51, s. 197–200.
23. Urbaniak M., Jacyna M., Kardas-Cinal E.: *Metody wykorzystania rekuperacji w transporcie szynowym*, TTS Technika Transportu Szynowego, 2016, 12(273), s. 355–359.
24. Urbaniak M., Kardas-Cinal E.: *Modelowanie reorganizacji ruchu w transporcie szynowym zwiększającej efektywne wykorzystanie energii z hamowania odzyskowego*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport, z. 118, Warszawa 2017, s. 325–337.
25. Warin Y., Lanselle R., Thiounn M.: *Active sudstation*, 9-ty Światowy Kongres dot. Badań Kolejowych – WCRR 2011, Lille, Francja.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl