

Przemysław Pazdro

Koncepcja ruchowej optymalizacji efektywności hamowania odzyskowego

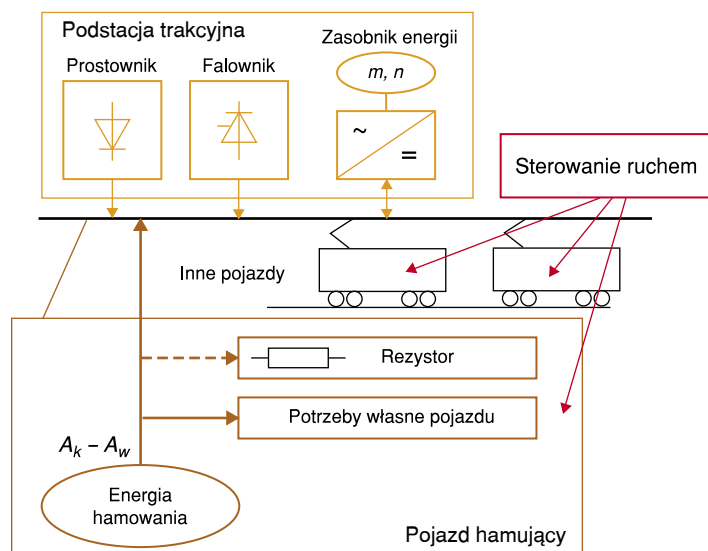
Probleem wykorzystania energii hamowania przez jej odzysk na drodze elektrycznej nabrął znaczenia wraz z wprowadzeniem do eksploatacji pojazdów wyposażonych w energoelektroniczne przekształtnikowe układy napędowe, pozwalające na odzysk energii hamowania praktycznie w całym przedziale prędkości eksploatacyjnych. Jednym jednak z oczywistych warunków odzysku energii jest możliwość jej przejścia przez inne pojazdy lub system zasilania.

Struktura energetyczna zelektryfikowanego systemu transportowego, wykorzystującego hamowanie odzyskowe, pokazano na rysunku 1. Zwiększenie efektywności wykorzystania energii może być rozwiązane w zasadzie czterema drogami działań, tj. przez:

- 1) dostosowanie topologii sieci zasilającej do warunków maksymalizacji odzysku energii i jej wykorzystania przez inne pojazdy;
- 2) zainstalowanie w podstacjach falowników umożliwiających przekazanie nadwyżek energii do sieci energetycznej;
- 3) zastosowanie elektromechanicznych (lub elektrycznych) akumulatorów energii w pojazdach lub podstacjach;
- 4) wprowadzenie kryterium odzysku energii do systemu sterowania ruchem pociągów.

Proponowane w metodzie pierwszej rozwiązania, polegające na wydłużeniu odcinków wspólnego zasilania i modyfikacji poziomów napięć, daje efekty, ale wymaga rozbudowy systemów zabezpieczeń [1].

Metoda druga, o charakterze inwestycyjnym, wydaje się być najefektywniejsza energetycznie, ale ze względu na wysokie koszty nie znalazła szerszego zastosowania w praktyce [2].



Rys. 1. Struktura energetyczna systemu hamowania odzyskowego

Elektromechaniczne zasobniki energii, działające na zasadzie akumulowania energii w masach wirujących [3, 4], zaczynają się pojawiać w zastosowaniach praktycznych. Powstaje jednak pytanie, czy ze względu na rozbudowaną strukturę przekształtnikowa stanowią konkurencję dla falowników sprzęgających sieć trakcyjną z systemem elektroenergetycznym.

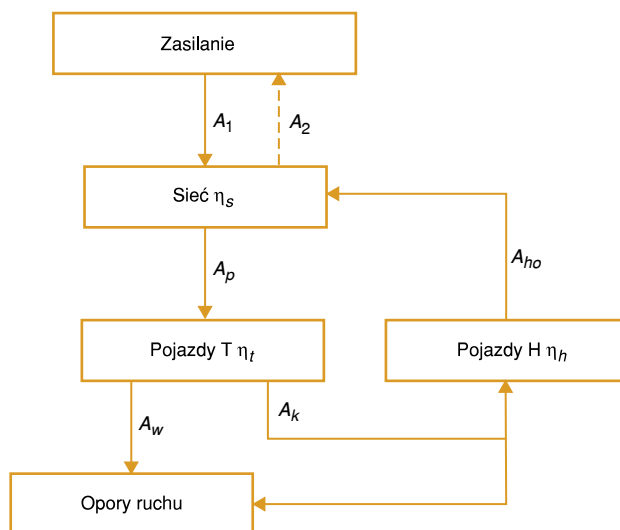
Ostatnia wreszcie metoda to powiązanie sterowania ruchem pociągów z wprowadzeniem kryterium maksymalizacji odzysku energii. Metoda ta jest przedmiotem rozważań zawartych w tym artykule.

Bilans energetyczny w systemie transportowym

Obieg energii w przykładowym zelektryfikowanym systemie transportowym można przedstawić w pewnym uproszczeniu, jak na rysunku 2.

Energia A_1 pobrana z systemu zasilania (podstacji trakcyjnej) po uwzględnieniu strat w sieci trakcyjnej i układach napędowych oraz po zaspokojeniu potrzeb własnych, zawiera dwa składniki: energię na pokonanie oporów ruchu A_w i energię kinetyczną A_k . Po uwzględnieniu strat w układzie hamowania elektrodynamicznego, teoretycznie możliwą do odzyskania jest energia hamowania odzyskowego A_{ho} . Jej wartość względna w stosunku do energii pobranej zależy oczywiście od odległości międzyprzystankowej. Dla warunków metra, np. przy odległościach między stacjami rzędu kilkuset metrów, można szacować jej udział na 50–60%. Wykorzystanie jej będzie w zamkniętym obiegu obciążone dodatkowo stratami przesyłu w sieci trakcyjnej, które można szacować na kilka do kilkunastu procent, w zależności od odległości przesyłu i parametrów sieci.

Analizując możliwości wykorzystania tej energii w zamkniętym obiegu trakcyjnym należy ocenić realne możliwości wynikające z charakterystyk trakcyjnych pojazdów.



Rys. 2. Bilans energetyczny systemu transportowego

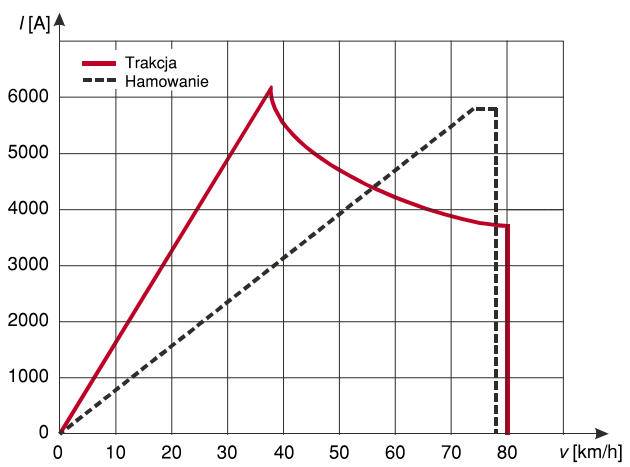
Aby umieścić rozważania w realnych warunkach, można się posłużyć przykładowymi charakterystykami dla współczesnych pociągów metra wyposażonych w falownikowe układy napędowe. Przebiegi prądów mierzone na odbierakach prądu dla takich pojazdów pokazano na rysunku 3.

Przyjmując wyizolowany odcinek zasilania pomiędzy podstacjami zasilającymi (rys. 4) i jedynie dwa pojazdy, z których jeden pobiera energię a drugi hamuje, można stworzyć teoretyczny wzorzec wymiany energii pomiędzy tymi pojazdami. Przenosząc przebiegi z rysunku 3 w dziedzinę czasu uzyskuje się przebiegi jak na rysunku 5.

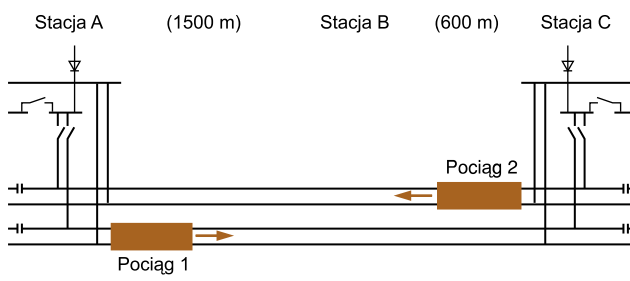
Widać wyraźnie, że ze względu na asymetrię przebiegów prądów rozruchu i hamowania, zbilansowanie się chwilowych wartości prądów tych dwóch pojazdów może nastąpić tylko w pojedynczych punktach czasowych. Ważny z energetycznego punktu widzenia jest jednak nie bilans chwilowy, ale suma tych przebiegów odniesiona do czasu [As].

Można to przedstawić jako wykres różnicy prądów pobieranych przez pojazd i prądu oddawanego przez pojazd hamujący ΔI w funkcji czasu. W zależności od momentu rozpoczęcia hamowania w stosunku do momentu początku rozruchu drugiego pojazdu można uzyskać różne efekty bilansu. Dążenie do minimalizacji tej różnicy prądu hamowania i prądu pobieranego przez pojazd może być elementem optymalizacji energetycznej procesu sterowania pojazdami. Istotnym wnioskiem z przeprowadzonego rozumowania jest fakt, że o wynikach bilansu energetycznego decydują pojedyncze sekundy w ruchu pociągów przedstawione jako $v = f(t)$.

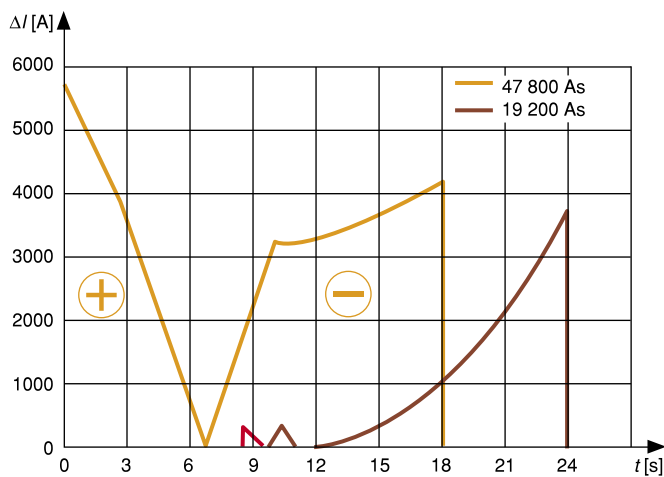
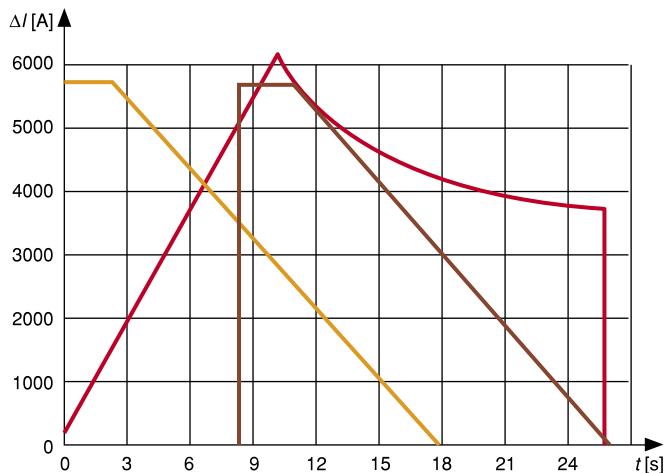
Z podanego przykładu wynika, że przesunięcie faz procesu rozruchu i hamowania zaledwie o 10 s daje ponad 100% zmianę bilansu energetycznego.



Rys. 3. Przykładowy przebieg prądu jazdy i hamowania pociągu metra



Rys. 4. Przykładowy odcinek zasilania linii metra



Rys. 5. Korelacja prądów jazdy i hamowania

- + nadwyżka prądu hamowania (energia tracona w rezystorze)
- niedobór prądu hamowania dla pokrycia potrzeb napędu

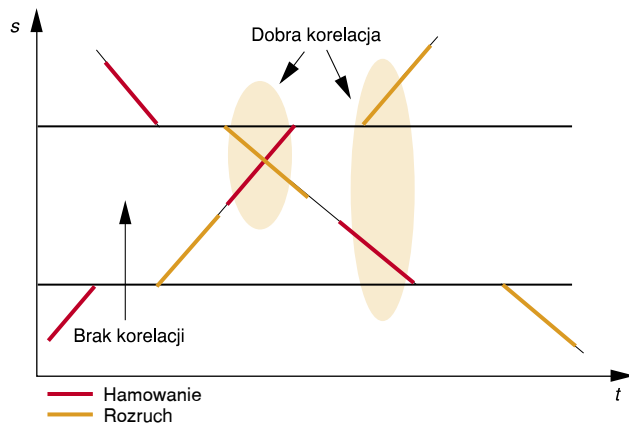
Organizacja ruchu jako narzędzie optymalizacji energetycznej

Można przyjąć hipotezę, że dla rozpatrywanego przypadku należy tak skoordynować w czasie ruch pociągów, aby nadwyżka prądu hamowania była zminimalizowana.

Korelacja przebiegów rozruchu i hamowania może być uzyskana przez odpowiednią budowę rozkładów jazdy i ich rygorystyczne przestrzeganie. Przykładowo pokazano to na rysunku 6. Jest oczywiste, że idealne skorelowanie wszystkich przebiegów rozruchu i hamowania nie jest w praktyce możliwe. Wydaje się jednak możliwe takie ułożenie rozkładów jazdy, aby prawdopodobieństwo powstania obszarów skojarzenia było jak największe.

W praktyce realizacja rozkładów jazdy podlega zakłóceniom wynikającym ze zmian natężenia potoków podróźnych, a w konsekwencji zmian czasu postoju na przystankach. Dla lepszego dostosowania się pojazdów do wymagań może się okazać konieczne wprowadzenie dodatkowych czasów opóźnienia momentu ruszenia t_o . Analizie musi zostać poddana maksymalna dopuszczalna wartość tego czasu, bez ograniczenia zdolności przewozowej.

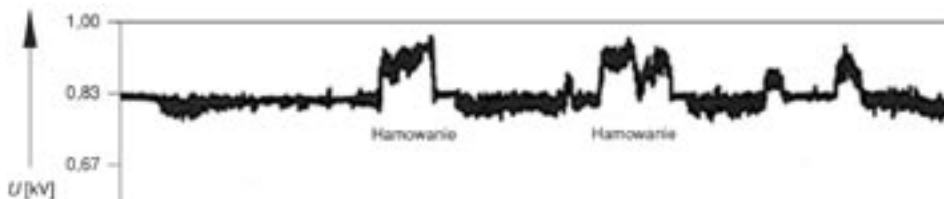
W proponowanej metodzie konieczne będzie doprowadzenie do pojazdu dodatkowego sygnału zezwalającego na ruszenie. Może to być sygnał dla maszynisty (podporządkowany systemowi ZRK) lub układ automatyczny działający poza maszynistą.



Rys. 6. Korelacja procesów rozruchu i hamowania w rozkładzie jazdy

Powstaje problem wyboru metody i narzędzi do wypracowania tego sygnału w celu uzależnienia w pewnym ograniczonym zakresie od wymagań optymalizacji wykorzystania energii hamowania. Można rozważyć trzy metody:

- 1) obserwacja ruchu pociągów w czasie rzeczywistym i na podstawie aktualnej sytuacji ruchowej przekazywanie odpowiednich sygnałów sterujących do pojazdów; wymaga to detekcji położenia pociągów w czasie rzeczywistym i rozbudowanego systemu komunikacji z maszynistami;
- 2) obserwacja wartości i dynamiki zmian napięcia zasilającego w sieci trakcyjnej i na tej podstawie generacja sygnałów sterujących (zezwolenia na rozruch); byłby to system rozproszony, powiązany z poszczególnymi pojazdami, ale prawdopodobnie najprostszy (wpływ hamowania odzyskowego na wartość napięcia sieci pokazano przykładowo na rysunku 7);



Rys. 7. Wpływ hamowania odzyskowego na wartość napięcia [3]

3) stworzenie systemu sterującego uczącego się, z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji; zakłada się tu pewną statystyczną powtarzalność stanów ruchu na linii i w ciągu określonego czasu.

Prezentowany artykuł jest to wstępne, koncepcyjne studium realizowanego projektu badawczego finansowanego przez KBN. Podstawą szczegółowych analiz będą warunki metra warszawskiego, a wyniki zostaną zaprezentowane na konferencji MET 2003.

Literatura

- [1] Mierzejewski L., Szelaąg A.: *Wpływ taboru z rekuperacją energii na warunki funkcjonowania elektroenergetyki trakcyjnej prądu stałego*. Materiały konferencji MET '2001, Gdańsk 31.05–02.06.2001 r.
- [2] *Analiza efektywności technicznej hamowania rekuperacyjnego wagonów METROPOLIS...* (praca zespołowa). Politechnika Warszawska, Zakład Trakcji Elektrycznej. Warszawa, kwiecień 2000 r. (praca niepublikowana).
- [3] Gunselmann W., Hoeschler P., Reiner G.: *Energiespeichereinsatz im Stadtbahnnetz Koeln*. El. Bahnen 11-12/2000.
- [4] Briest B. und and.: *Einsatz rotierender Energiespeicher im Fahrleitungsnetz der USTRA Hannover*. El. Bahnen 5-6/2000.

Autor

prof. Przemysław Pazdro – kierownik Katedry Trakcji Elektrycznej na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, absolwent Politechniki Warszawskiej, w 1956 r. uzyskuje magisterium na Wydziale Elektrycznym w specjalności trakcja elektryczna; pracownik naukowy Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej, w 1988 r. uzyskuje tytuł profesora, zajmuje się problemami sterowania napędami pojazdów elektrycznych oraz diag-nostyką techniczną urządzeń trakcyjnych

I Międzynarodowa Konferencja Naukowa sponsorowana przez Unię Europejską

CESURA '2000

Clean, Efficient & Safe Urban Transport

Gdańsk, 4–6 czerwca 2003 r.

Wydział Elektrotechniki i Automatyki zaprasza na interdyscyplinarną konferencję naukową poświęconą współczesnemu transportowi miejskiemu

Tematyka: sprawność energetyczna i oddziaływanie na środowisko transportu miejskiego ■ multimodalność i współdziałanie różnych środków transportu miejskiego ■ gospodarowanie środkami transportu i infrastrukturą ■ bezpieczeństwo transportu miejskiego ■ polityka transportowa Unii Europejskiej (InfoDay)

Język konferencji – angielski.

Informacje: Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
80-952 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12
fax (58) 34 10 880 ■ e-mail: cesura@ely.pg.gda.pl ■ www.cesura.pl