

## METODY WYKORZYSTANIA ENERGII Z REKUPERACJI W TRANSPORCIE SZYNOWYM

### Streszczenie

W artykule przedstawiony został przegląd metod wykorzystania energii pochodzącej z hamowania odzyskowego. Wśród znanych i stosowanych w praktyce metod wymieniono wykorzystanie odzyskanej energii na nietrakcyjne potrzeby własne pojazdu, magazynowanie odzyskanej energii w zasobnikach (pokładowych lub stacjonarnych) i wykorzystywanie jej w razie potrzeby, transformację i zwrot odzyskanej energii do krajowej sieci zasilania, a także możliwość przesyłu odzyskiwanej energii z powrotem do sieci jezdnej i wykorzystanie jej przez inne pojazdy mające zapotrzebowanie na taką energię (np. w fazie rozruchu). Pokrótko omówiono zasady działania wymienionych metod, wskazano ich wady i zalety oraz podano przykłady zastosowania w praktyce. W podsumowaniu stwierdzono, że wskazane byłoby połączenie tych metod w zintegrowany system odzysku energii i zaproponowano ogólny schemat takiego systemu.

### WSTĘP

Transport metropolitalny jest obecnie odpowiedzialny za około 25% całkowitego zanieczyszczenia powietrza CO<sub>2</sub> w Unii Europejskiej (EU) [8]. Dodając do tego zanieczyszczenie powietrza innymi związkami oraz kongestią staje się głównym problemem na wysoko zurbanizowanych terenach. W kontekście wzrostu urbanizacji na świecie inwestowanie w efektywny i relatywnie przyjazny środowisku transport nie jest już celem samym w sobie. Istotny jest także usprawnienie systemu transportu aby ten poprawiał, a nie pogarszał jakość życia w metropoliach.

Na wprost oczekiwaniom wychodzi tutaj transport szynowy – szybka kolej miejska, metro, tramwaje. Dzięki dużym zdolnościom przepustowym, wysokiemu bezpieczeństwu oraz stosunkowo nieznacznemu wpływowi na środowisko jest jednym z rozwiązań umożliwiających redukcję wpływu mobilności społeczeństwa na otoczenie. Elementem dodatkowym przemawiającym za transportem szynowym jest fakt, że obecnie większość nowoczesnego taboru trakcji elektrycznej i spalinowo – elektrycznej wyposażona jest w technologię hamowania odzyskowego.

Technologia hamowania rekuperacyjnego pozwala na odzyskanie części energii wytracanej podczas hamowania elektrycznego i wykorzystanie jej na energetyczne potrzeby własne pojazdu (ogrzewanie, pracę klimatyzacji, oświetlenie itp.), a następnie daje możliwość zmagazynowania nadmiaru odzyskanej energii w zasobnikach lub przesyłu z powrotem do sieci i dalszą jej dystrybucję w systemie. W przypadku braku zastosowania technologii umożliwiającej hamo-

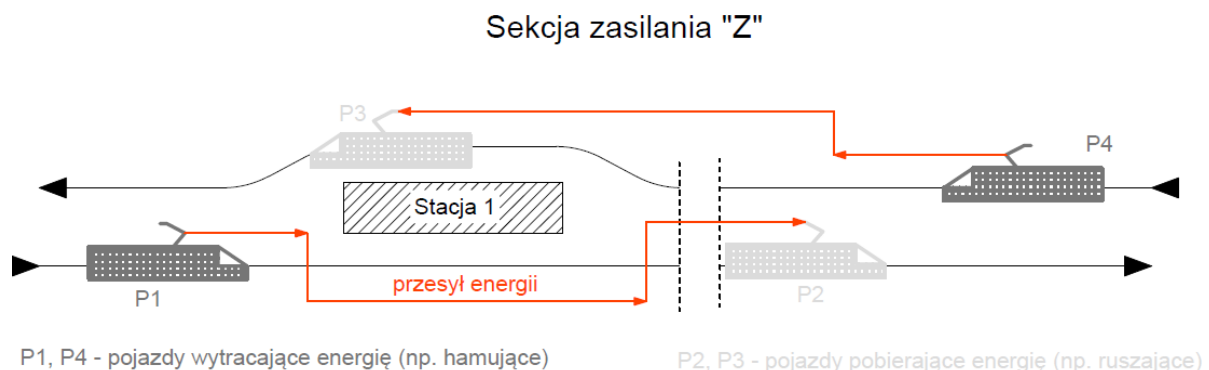
wanie odzyskowe i nieprawidłowym doborze metody jej wykorzystania cały nadmiar wytracanej w hamowaniu elektrycznym energii będzie bezpowrotnie tracony w postaci ciepła na rezystorach [9, 12].

### 1. WYKORZYSTANIE ENERGII Z REKUPERACJI PRZEZ INNY POJAZD - TRANSFER ENERGII MIĘDZY POJAZDAMI

W przypadku wykorzystania energii z rekuperacji przez inny pojazd konieczne jest przesłanie odzyskanej podczas hamowania energii z powrotem do sieci jezdnej oraz istnienie takiej sytuacji ruchowej, w której na jednym odcinku zasilania znajduje się przynajmniej jeden pojazd oddający energię oraz jeden pobierający energię trakcyjną (Rys. 1) [18]. Korzystanie z tej metody jest możliwe bez jakichkolwiek ingerencji w nowoczesny system transportu szynowego, a co za tym idzie można tą metodę określić mianem praktycznie bezkosztowej. Natomiast dopiero wprowadzenie dodatkowych elementów takich jak optymalizacja rozkładu jazdy, czy sterowanie adaptacyjne pojazdami na potrzeby wzrostu efektywności hamowania odzyskowego daje możliwość osiągnięcia wymiernych korzyści w poprawie bilansu energetycznego [11, 18-21].

#### 1.1. Uwzględnienie optymalizacji rozkładu jazdy

Synchronizacja czasów rozruchu i hamowania kilku różnych pojazdów szynowych poprzez optymalizację rozkładu jazdy może być tanią, a zarazem efektywnym rozwiązaniem dążącym do maksymalizacji wykorzystania energii pochodzącej z rekuperacji. Rozwiązanie



Rys. 1. Założenia metody wykorzystania energii hamowania odzyskowego przez inny pojazd [18]

to ma bezpośredni wpływ na zużycie energii trakcyjnej, ale także pozwala ograniczyć występowanie szczytów energetycznych (tzw. „power peaks”) poprzez redukcję jednoczesnych rozruchów kilku pojazdów. Największe efekty powyższej metody można osiągnąć przede wszystkim w gęstej sieci miejskiego transportu szynowego, gdzie synchronizacja czasów rozruchu i hamowania nie wymaga istotnych przesunięć w rozkładzie jazdy pociągów szybkiej kolei miejskiej (SKM), metra czy tramwajów [9].

Pomysł optymalizacji obowiązujących rozkładów jazdy w celu zwiększenia możliwości wykorzystania odzyskanej energii na drodze wymiany między pojazdami był już przytaczany przez wielu autorów. Przykładowo już w 2010 Nasri wraz z zespołem zaproponowali metodę optymalizacji rozkładu jazdy opartą na zastosowaniu algorytmów genetycznych przy wykorzystaniu technicznych rezerw czasu dla maksymalizacji wykorzystania rekuperowanej energii. W pracy [14] dotyczącej przykładowego systemu metra wykazali, że przy zastosowaniu proponowanej optymalizacji możliwe jest zaoszczędzenie nawet do 14% energii trakcyjnej. Następnie w roku 2011 również Pena-Alcaraz wraz z zespołem zaproponowali nowy rozkład jazdy dla trzeciej linii metra w Madrycie oparty na rozwiązaniu częściowo całkowitoliczbowego problemu. Po tygodniu od wprowadzenia w życie nowego rozkładu jazdy bilans zużycia energii trakcyjnej uległ poprawie o 3%, natomiast zdaniem autorów istnieje potencjalna poprawa jeszcze o 7% [21].

W literaturze krajowej również można znaleźć koncepcje mówiące o możliwości wykorzystania energii odzyskanej z procesu hamowania przez inny pojazd szynowy (tramwaj, pociąg) wykorzystując przesył poprzez sieć trakcyjną jezdnią, odpowiednio sterując pojazdami oraz optymalizując organizację ruchu w kontekście efektywności hamowania odzyskowego [11, 18-19]. Ponadto to w pracy [20] Pazdro wraz z zespołem wykazali, że odpowiednie sterowanie ruchem w warszawskim metrze czy gdańskiej SKM przy zastosowaniu hamowania elektrodynamicznego i zwrotu energii do sieci jezdnej może przynieść zmniejszenie zapotrzebowania na energię elektryczną rzędu nawet 30% w odniesieniu do sytuacji bez stosowania hamowania odzyskowego i optymalizacji organizacji ruchu.

## 2. MAGAZYNOWANIE W ZASOBNIKACH ENERGII

Niewątpliwie oba systemy, zarówno magazynowania energii w zasobnikach znajdujących się na/w pojeździe oraz zasobnikach stacjonarnych (umieszczonych wzdłuż trasy np. w podstacjach trakcyjnych), mogą być elementem zwiększającym efektywność wykorzystania energii pochodzącej z hamowania odzyskowego [16]. Schemat działania obu systemów polega na wykorzystaniu cyklu ładowania baterii zasobników podczas hamowania odzyskowego, a następnie rozładowywaniu ich wykorzystując zmagazynowaną energię np. do rozruchu pojazdu.

Wybór jednego z powyższych wariantów zależy zawsze od konkretnego przypadku, natomiast uogólniając, od zasobników przeznaczonych do obsługi systemu hamowania odzyskowego wymaga się przede wszystkim [9]:

- dużej żywotności oraz wysokiego poziomu odporności na dużą liczbę cykli ładowania i rozładowywania,
- dużej pojemności energetycznej,
- relatywnie małej wagi oraz objętości,
- wysokiej sprawności energetycznej,
- braku efektu pamięciowego.

### 2.1. Zasobniki pokładowe

Pokładowe zasobniki energii stosowane w miejskim i podmiejskim transporcie szynowym dają potencjalnie bardzo duże możliwości oszczędności. Jako zespoły magazynujące mogą być używane baterie akumulatorów, baterie kwasowo-ołowiane, niklowo-kadmowe (NiMH), litowo-polimerowe, litowo-jonowe (Li-ion) ale przede wszystkim superkondensatory. Dla przykładu ich zastosowania można przytoczyć prace ukazujące, że zastosowanie takiego rozwiązania w istniejących systemach transportowych może obniżyć koszty zużywanego energii trakcyjnej od 15% do 35% [3-4, 7]. Ponadto stosowanie pokładowych zasobników do magazynowania energii pochodzącej z hamowania odzyskowego może pomóc w ograniczeniu występowania „power peaks” [10]. Co więcej, rozwiązanie to, może pomóc w utrzymaniu stabilności napięcia w sieci trakcyjnej [5], a także umożliwić wprowadzenia tzw. hybrydowych „pojazdów autonomicznych” mogących się poruszać bez podłączenia do trakcyjnej sieci jezdnej korzystając wyłącznie z energii zgromadzonej w zasobnikach (np. w historycznych częściach miasta) [2, 13, 16].

W tabeli 1 przedstawiono przykłady stosowanych lub testowanych bądź rozwijanych rozwiązań w miejskim i podmiejskim transporcie szynowym, wykorzystujących pokładowe zasobniki energii. Jak widać z zestawienia większość z rozwiązań opiera się na wykorzystaniu elektrochemicznych kondensatorów dwuwarstwowych (Electrochemical Double Layer Capacitors – EDLC). Wynika to z ich właściwości, takich jak: możliwość szybkiego ładowania i rozładowywania, wysoka gęstość mocy oraz stosunkowo niska cena.

Wśród wad stosowania pokładowych zasobników energii należy podkreślić przede wszystkim znaczący wzrost masy pojazdu szynowego, a co za tym idzie obniżenie jego osiągnięć przy zachowaniu tych samych wielkości pozostałych parametrów technicznych.

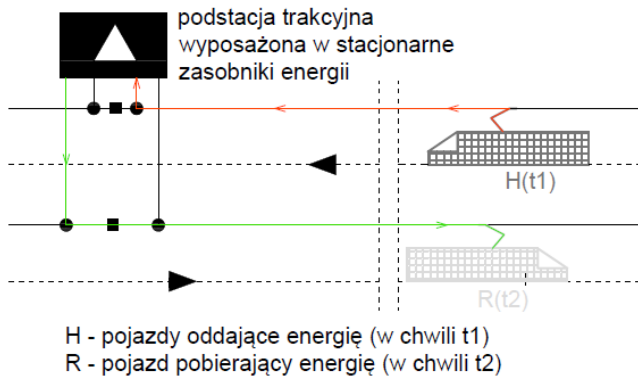
### 2.2. Zasobniki stacjonarne

W odróżnieniu od systemu wykorzystującego pokładowe zasobniki energii wykorzystanie magazynów stacjonarnych charakteryzuje się większymi stratami energii. Wynika to z konieczności przesyłu odzyskanej podczas hamowania energii na większe odległości do zlokalizowanych wzdłuż drogi szynowej magazynów energii (Rys. 2).

**Tab. 1. Wykorzystanie pokładowych zasobników energii w miejskim transporcie szynowym [9]**

Rodzaj zasobnika	Główne charakterystyki	Przykład zastosowania	Rok
EDLC	Moc znamionowa: 288 kW Pojemność: 0,85 kWh Masa: 820 kg Wymiary: 2000x1520x630 mm	Komersyjne zastosowanie w tramwajach w Innsbrucku	2012
EDLC	Moc znamionowa: brak danych Pojemność: 0,8 kWh Masa: 800 kg Wymiary: brak danych	Komersyjne zastosowanie w tramwajach w Seville, Saragossie i Granadzie, testy w tramwajach w Paryżu	2012 / 2010
Li-ion	Moc znamionowa: brak danych Pojemność: 40 kWh Masa: 3200 kg Wymiary: brak danych	Testy w tramwajach w Charlotte	2010
NiMH	Moc znamionowa: 250 kW Pojemność: 120 kWh Masa: 3200 kg Wymiary: brak danych	Testy na sieci Sapporo Municipal Transport	2011

Następnie energia zmagazynowana w podstacji akumulacyjnej o odpowiednich parametrach elektrycznych i energetycznych [17] może być z powrotem zwrócona do sieci trakcyjnej np. w przypadku chwilowych spadków napięć.



**Rys. 2.** Schemat metody magazynowania odzyskanej energii w zasobnikach stacjonarnych i jej zwrotu do sieci trakcyjnej [3, 22]

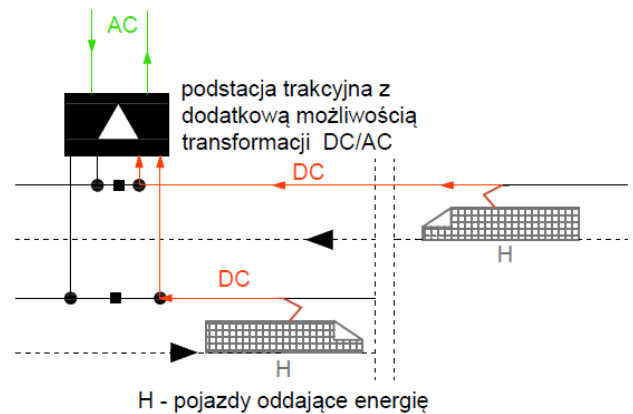
Rozwiązanie wykorzystujące zasobniki stacjonarne również może być z powodzeniem wykorzystywane do poprawy bilansu energetycznego w transporcie szynowym [16]. W pracach teoretycznych Barreto [3], Teymourfar [22] wraz z zespołami przedstawili rozwiązania techniczne wykorzystujące stacjonarne baterie superkondensatorów pozwalające dzięki zasobnikom stacjonarnym ograniczyć zużycie energii trakcyjnej o 15-35%.

Zestawienie przykładowych zastosowań przedstawiono w tabeli 2. Jak z niego wynika, dominującą technologią wśród zasobników stacjonarnych również są baterie EDLC, natomiast pojawiają się również rozwiązania wykorzystujące zasobniki kinetyczne – np. szybkoobrotowe koła zamachowe („Flywheel”). Możliwość ich zastosowania podyktowana jest głównie brakiem narzuconych ograniczeń pod względem masy czy objętości takiego urządzenia.

### 3. ZWROT ENERGII DO SIECI KRAJOWEJ

W przypadku wykorzystania do zasilania pojazdów trakcyjnych prądu stałego DC możliwość przesyłu odzyskanej podczas hamowania energii zapewniają wyspecjalizowane podstacje trakcyjne transformujące prąd stały do standardów krajowej sieci zasilania prądem

przemianym AC i przesyłające go do krajowej sieci zasilania (Rys. 3).



**Rys. 3.** Schemat metody zwrotu odzyskanej energii do sieci energetycznej kraju [1]

Podobnie, jak to miało miejsce przy zastosowaniu zasobników stacjonarnych występują tu zwiększone straty energii powodowane rezystancją przewodów trakcyjnych przy przesyłaniu energii na większe odległości, a dodatkowo straty związane z procesem transformacji z AC na DC. Do wad powyższego systemu można zaliczyć również fakt, że energia odzyskana podczas procesu transportowego nie wraca do niego i nie wpływa bezpośrednio na jego energochłonność.

Do niewątpliwych zalet systemu należy podniesienie efektywności globalnego systemu energetycznego, a w przypadku możliwości odsprzedaży energii do systemu krajowego możliwe są oszczędności rzędu od 7% do 14% nakładów na energię trakcyjną – co wykazały między innymi prace Warina wraz z zespołem [23], Ortegi [15] czy Cornica [6].

Odzysk energii i przesył jej do krajowego systemu zasilania nie jest tak popularny jak stosowanie zasobników energii głównie ze względu na wyższe koszty inwestycyjne. Rozwiązanie to można głównie spotkać na modernizowanych, rewitalizowanych oraz nowopowstałych systemach transportu szynowego w Polsce i na świecie (Tab. 3).

**Tab. 2.** Wykorzystanie stacjonarnych zasobników energii w miejskim transporcie szynowym [9]

Rodzaj zasobnika	Główne charakterystyki	Przykład zastosowania	Rok / Producent
EDLC	Generowane napięcie: 750 V Moc znamionowa: 300-1000 kW Pojemność: 1-4 kWh	Projekt pilotażowy dla tramwajów w Lyonie	2011 / Adetel
EDLC	Generowane napięcie: 500-1850 V Moc znamionowa: 750-4500 kW Pojemność: 0,8-16,5 kWh	W użytku na II linii warszawskiego metra Projekt pilotażowy dla Philadelphia transit system	2012/2016 / ABB
Flywheel	Generowane napięcie: brak danych Moc znamionowa: 500 kW Pojemność: brak danych	Metro w Los Angeles	2013 / Vycon
NiMH	Generowane napięcie: 600-1500 Moc znamionowa: brak danych Pojemność: 150-400 kWh	Projekt pilotażowy dla New York City Transit network	2011 / Ogura
Li-ion	Generowane napięcie: 700 Moc znamionowa: 900-1500 kW Pojemność: 600-40 kWh	Projekt pilotażowy dla Philadelphia transit system	2012 / Polulin

**Tab. 3.** Przykłady zastosowania zwrotu energii z rekuperacji do krajowej sieci energetycznej [9]

Producent	Główne charakterystyki	Przykład zastosowania	Rok
Alstom	Napięcie znamionowe: 750 V Moc znamionowa: 0,3 MW	Metra w Londynie i Medanie	2011
Siemens	Napięcie znamionowe: 750-1500 V Moc znamionowa: 1,5-2,2 MW	Testowane w metrze w Oslo na Holmenkollen Line	2011
ABB	Napięcie znamionowe: 600/750 V Moc znamionowa: 0,5-1 MW	Tramwaje w Łodzi i Olsztynie	2014 / 2016



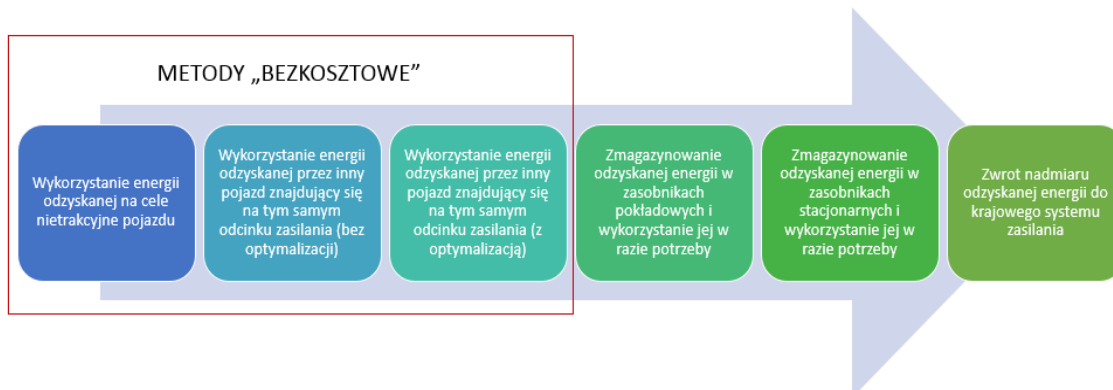
## PODSUMOWANIE

Jak wynika z przedstawionego przeglądu, w transporcie szynowym istnieje wiele metod wykorzystania energii elektrycznej pochodzenia rekuperacyjnego. Wśród nich wyróżnia się wykorzystanie energii na bieżące potrzeby własne taboru, magazynowanie jej w różnego rodzaju zasobnikach energii umieszczonych w na taborze, w podstacjach trakcyjnych lub innych punktach infrastruktury wzdłuż trasy przejazdu i wykorzystanie jej w chwili zwiększonego zapotrzebowania. Możliwe jest również wykorzystanie odzyskanej energii natychmiast, bezpośrednio przez inny pojazd trakcyjny, a także jej przesył do globalnej sieci zasilającej kraju.

Każda z wymienionych w artykule metod ma swoje wady i zalety, przez co nie można wskazać jednoznacznie najlepszej metody wykorzystania energii pochodzenia rekuperacyjnego. Sytuacją idealną byłoby połączenie wszystkich znanych metod w jeden zintegrowany system odzysku energii. Właśnie dlatego, dążąc do perfekcyjnego rozwiązania, należy przeprowadzić badania i proces optymalizacji wykorzystania energii z rekuperacji od określenia jaką jej wielkość można zagospodarować w sposób bezkosztowy - bez inwestycji infrastrukturalnych - a dopiero w dalszej kolejności optymalizować pojemność zasobników czy rozważać transformację energii z DC na AC i jej przesył do sieci globalnej (Rys. 4).

## BIBLIOGRAFIA

1. ABB, *ENVILINE ERS - trakcyjny układ odzyskiwania energii*. Rynek infrastruktury, dostęp on-line 25.09.2016: <http://www.rynekinfrastruktury.pl/wiadomosci/enviline-ers--trakcyjny-uklad-odzyskiwania-energii-13893.html>
2. Allegre A. L., Bouscayrol A., Delarue P., Barrade P., Chattot E., El-Fassi S., *Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway*. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2010, nr 57, s. 4001-4012.
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, s. 207-225.
4. Chymera M., Renfrew A., Barnes M., *Analyzing the potential of energy storage on electrified transit systems*. World Congress on Railway Research – WCRR 2008, Seoul, Korea Południowa.
5. Ciccarelli F., Iannuzzi D., Tricoli P., *Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 2012, nr 24, s. 36-49.
6. Cornic D., *Efficient recovery of braking energy through a reversible ds substation*. 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research – WCRR 2011, Lille, Francja.
7. Dominguez M., Cucala A. P., Fernandez A., Pecharroman R. R., Blanquer J., *Energy efficiency on train control – design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices*. World Congress on Railway Research – WCRR 2011, Lille, Francja.
8. European Commission, *Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*. Dostęp on-line 25.09.2016: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0144&from=EN>
9. 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 2014, Paris.
10. Iannuzzi D., Tricoli P., *Metro trains equipped onboard with supercapacitors: a control technique for energy saving*. SPEEDAM 2010 – International symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion, Pisa, Włochy.
11. 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.
12. Juda Z., *Zastosowanie superkondensatorów w układzie odzysku energii pojazdu z napędem elektrycznym*. Czasopismo Techniczne z. 6-M/2008.
13. Karkosińska-Brzozowska N., Karwowski K., *Elektryczne autonomiczne jednostki trakcyjne na linii Pomorskiej Kolei Metropolitalnej*. Technika Transportu Szynowego – Technika 2015, nr 12/2015, s. 2638-2643.
14. 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 2010, Pisa, s. 1218-1221.
15. Ortega J. M., Ibaiondo H. *Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid*. 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research – WCRR 2011, Lille, Francja.
16. Pawełczyk M., *Rozwój systemów wykorzystujących akumulację energii w transporcie szynowym*. Technika Transportu Szynowego 2011, nr 10/2011, s. 41-46.
17. Pawełczyk M., Krawczyk G., *Metoda wyznaczania podstawowych parametrów urządzeń magazynujących energię elektryczną w trakcji elektrycznej prądu stałego*. Logistyka, 3/2007
18. Pazdro P., *Koncepcja ruchowej optymalizacji efektywności hamowania odzyskowego*. Technika Transportu Szynowego – Eksploatacja 2003, nr 1-2/2003, s. 62-64.
19. Pazdro P., Czucha J., Kamonciak A., Karwowski K., Mizan M., Skibicki J., *Optymalizacja efektów hamowania odzyskowego w*



Rys. 4. Proponowana kolejność wprowadzania metod wykorzystania energii z hamowania odzyskowego

- komunikacji miejskiej przez sterowanie adaptacyjne*. Raport Projektu Badawczego KBN, Gdańsk 2003
20. Pazdro P., Czucha J., Karwowski K., Mizan M., Skibicki J., Efektywność odzysku energii hamowania elektrodynamicznego w komunikacji miejskiej. Przegląd Elektrotechniczny, nr 10/2004, s. 1016-1019.
  21. Pena Alcaraz M., Fernandez A., Cucala A. P., Ramos A., Pecharroman R. R., *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, nr 226, s. 397-408.
  22. Teymourfar R., Asaei B., Iman-Eini H., Nejati fard R., *Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in metro line*. Energy Conversion and Management 2012, nr 56, s. 206-214.
  23. Warin Y., Lanselle R., Thiounn M., *Active substation*. 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research – WCRR 2011, Lille, Francja.

## METHODS OF RECUPERATION ENERGY MANAGEMENT IN RAIL TRANSPORT

### *Abstract*

*This article presents a review of methods for management of energy gained from regenerative braking.*

*Among known and applied methods, the following are specified: using the recovered energy for non-traction own needs of the vehicle, storing the recovered energy in energy storage system (on-board or stationary) and its later use when needed, transformation and return of the recovered energy to the domestic power grid, and also the possibility of transferring the recovered energy to the traction network and its use by other vehicles (e.g., in during their acceleration phase). The principles of these methods are shortly described, their advantages and shortcomings are pointed out, and the practical applications are given. In summary, it is concluded that it would be advantageous to combine these methods into an integrated system of energy regeneration and a general scheme of such a system is proposed.*

Autorzy:

mgr inż. **Michał Urbaniak** – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: micurban@pg.gda.pl  
 prof. dr hab. inż. **Marianna Jacyna** – Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Logistyki i Systemów Transportowych, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: maja@wt.pw.edu.pl  
 dr hab. inż. **Ewa Kardas-Cinal** – Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Podstaw Budowy Urządzeń Transportowych, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: ekc@wt.pw.edu.pl