

KRAWCZYK Grzegorz¹

Akumulacja energii w transporcie szynowym

Słowa kluczowe: akumulacja, energia, moc, zasobniki, superkondensatory, baterie elektrochemiczne, koła zamachowe, rekuperacja

Streszczenie

W artykule przedstawiono zastosowanie wybranych typów zasobników (koła zamachowe, baterie elektrochemiczne i superkondensatory) w transporcie szynowym. Uwzględniono zarówno zastosowania mobilne (zasobniki energii elektrycznej usytuowane na dachu pojazdu lub w jego wnętrzu), jak i stacjonarne (urządzenia magazynujące energię elektryczną umieszczone w podstacji trakcyjnej lub w jej pobliżu).

STORAGE OF ENERGY IN RAILWAY TRANSPORT

Abstract

In the paper selected types of energy storage devices (flywheel, electrochemical battery and supercapacitors) used in railway transport have been presented. Functioning solutions of both mobile (on the roof or inside the railway vehicles) and stationary applications (energy storage devices is situated in a traction substation or in the vicinity of this substation) have been described.

1. WSTĘP

Ustawiczny wzrost kosztów energii elektrycznej i globalny udział jej zużycia na transport powyżej 25 % [1] sprawiają, że od wielu lat prowadzone są działania, mające na celu ograniczenie tego zużycia.

Wprowadzenie systemu odzyskiwania energii podczas hamowania jest jednym z podstawowych czynników wpływającym na ograniczenie zużycia energii w transporcie szynowym. Zwrot energii elektrycznej do sieci trakcyjnej następuje w trakcie hamowania, pod warunkiem, że na danym odcinku zasilania w tym samym momencie inny pociąg pobiera energię z sieci trakcyjnej. Znaczne odległości między pociągami sprawiają, że straty energii związane z przekazywaniem energii rekuperacji mogą w znacznym stopniu zniwelować efekt odzysku energii. Zastosowanie urządzeń magazynujących energię (ESD – Energy Storage Devices) pozwala na efektywne wykorzystanie energii pochodzącej z hamowania odzyskowego. Ponadto tego typu urządzenia pozwalają na ograniczenie zmienności napięcia w sieci trakcyjnej i zmniejszenie wahań poboru mocy z podstacji trakcyjnej oraz powodują zmniejszenie zużycia paliwa.

2. KONCEPCJA ZASTOSOWANIA URZĄDZEŃ AKUMULUJĄCYCH ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ I PRZEGLĄD DOTYCHCZASOWYCH ZASTOSOWAŃ ZASOBNIKÓW W TRANSPORCIE SZYNOWYM.

Nierównomierność obciążenia podstacji trakcyjnej jest niekorzystna, ponieważ konieczne jest przewymiarowanie systemu zasilania, aby można było obsłużyć przypadki skrajne. Występują one np., gdy z jednego przystanku ruszają jednocześnie dwa pociągi. Pojawia się wówczas impuls równy podwójnej wartości mocy pobieranej z sieci trakcyjnej. Sąsiednie podstacje trakcyjne do pewnego stopnia obsługują ten pociąg, ale tym niemniej, problem związany z nierównomiernością poboru mocy z sieci trakcyjnej, występuje.

Możliwości rozwiązania powyższego problemu są zasadniczo dwie. Zainstalowanie zasobnika bezpośrednio na pojeździe lub w jego wnętrzu (instalacja mobilna). Druga możliwość to podłączenie zasobnika energii do systemu zasilania metra (instalacja stacjonarna).

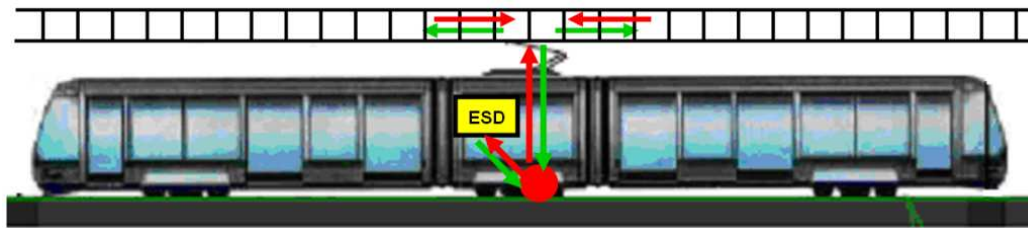
2.1 Mobilne zasobniki energii elektrycznej

Instalacje mobilne zasobników akumulują energię rekuperacji w zasobniku, umieszczonym na pokładzie pojazdu lub na dachu (rys. 1). Może być ona w całości wykorzystana podczas najbliższego rozruchu, minimalizując w ten sposób straty energii związane z jej magazynowaniem. Ponadto zmniejsza się pobór mocy maksymalnej z podstacji trakcyjnej.

Mobilny zasobnik powinien charakteryzować się dużą pojemnością jednostkową (Wh/kg) i dużą mocą jednostkową (W/kg), zapewniającą krótki czas całkowitego ładowania i rozładowywania zgromadzonej energii (do 30s [3]).

¹Krawczyk Grzegorz Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
tel: +48 48 361- 77-55, e-mail: g.krawczyk@pr.radom.pl

Ponadto powinien mieć dużą trwałość i wysoką sprawność cyklu ładowania/rozładowywania zakumulowanej energii oraz wymiary, umożliwiające dopasowanie zasobnika do gabarytów pojazdu.



Rys. 1. Mobilne urządzenia magazynujące energię elektryczną [2]

Rozwiązania mobilne stosowane były już w latach trzydziestych ubiegłego wieku (np. w Stanach Zjednoczonych lokomotywy elektryczne wyposażone w baterię akumulatorów Ni-Fe). Zastosowane akumulatory zapewniały zwiększenie mocy, szczególnie podczas rozruchu [4]. W metrze londyńskim od 1970 r. pracują lokomotywy o napędzie elektryczno-baterijnym, które wykorzystywane są do prac serwisowych w tunelach metra [4].

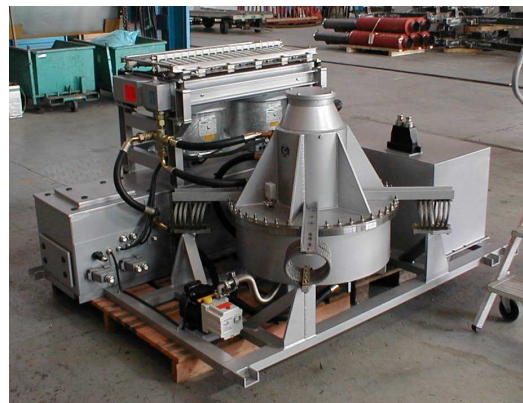
Pojazdy z akumulatorem mechanicznym wprowadzono do eksploatacji w metrze w Nowym Jorku na początku lat osiemdziesiątych. W połowie lat osiemdziesiątych koleje niemieckie wprowadziły do eksploatacji elektryczno-baterijny autobus szynowy [5].

W ramach projektu wspieranego przez Komisję Europejską, testowany był w 2001 r. w Karlsruhe w Niemczech system akumulacji energii z bezwładnikiem mechanicznym umieszczonym na tramwaju. W pojeździe zainstalowano akumulator mechaniczny o mocy 300 kW i pojemności energetycznej 4 kWh. Ładowanie akumulatora mechanicznego odbywało się podczas postoju pojazdu na przystanku z sieci trakcyjnej [6].

W grudniu 2004 r. w Magdeburgu testowano zespół trakcyjny CORADIA LIREX, wyposażony w bezwładnik o mocy 350 kW, pojemności energetycznej 6 kWh i czasie rozładowania 40 s (masa 1300 kg, maksymalna prędkość obrotowa 25000 obr/min) [7].



a) Zdjęcie zespołu trakcyjnego



b) system bezwładnika inercyjnego

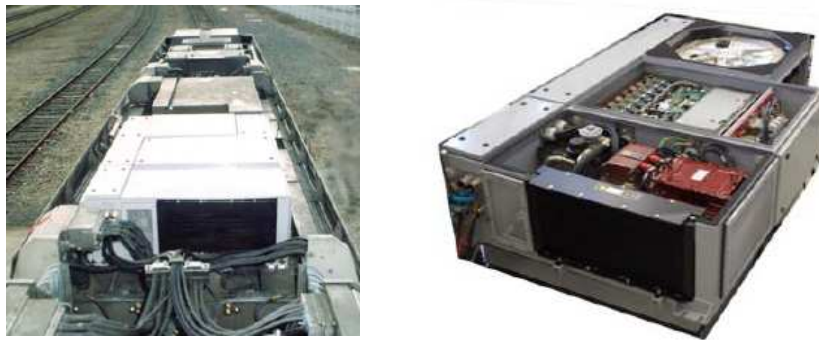
Rys. 2. Zespół trakcyjny Coradia LIREX wyposażony w bezwładnik usytuowany na dachu [8]

Przykładem zastosowania zasobnika mobilnego może być również testowany w marcu 2005 r. japoński zespół trakcyjny o nazwie New Energy Train, z hybrydowym układem napędowym (silnik spalinowy plus zasobnik energii). Na dachu pojazdu usytuowane zostały baterie litowo-jonowe o łącznej energii 10 kWh. Zasobnik baterijny podczas hamowania pociągu pobierał energię rekuperacji, a zwracał ją w trakcie rozruchu i podczas przyśpieszania pociągu. Wyniki testów były pozytywne: zużycie paliwa było o 20% mniejsze w stosunku do konwencjonalnego pojazdu z samym silnikiem diesla [9]. W 2006 r. silnik spalinowy zastąpiono ogniwem paliwowym o mocy 2 x 65 kW, umożliwiającym jazdę pociągu z prędkością 65 km/h.

W 2006 r. na targach Innotrans w Berlinie zaprezentowano hybrydową lokomotywę manewrową 203.7, wyposażoną w akumulatory, ładowane przez agregat prądotwórczy [10]. Po naładowaniu akumulatorów silnik spalinowy lokomotywy wyłączał się. W ten sposób udało się zmniejszyć zużycie paliwa o 40% w stosunku do tradycyjnej lokomotywy spalinowej. Oszczędności kosztów utrzymania wynosiły około 15%.

W przeciągu kilku lat obserwuje się tendencję rosnącą w zakresie zastosowań zasobników energii mechanicznych, bateryjnych i superkondensatorowych w tramwajach oraz trolejbusach.

Tramwaje z akumulatorami elektrochemicznymi testowane były m.in. we Francji w Bordeaux. W Rotterdamie w 2005 r. testowany był tramwaj Citadis z akumulatorem mechanicznym, umieszczonym na dachu pojazdu (rys. 3)[2]. Zasobnik ten gromadził energię odzyskiwaną podczas hamowania tramwaju w formie energii kinetycznej. W 2007 r. został oddany do eksploatacji w Nicei tramwaj Citadis, wyposażony w ogniwa NiMH, który kursuje na odcinkach: Jean Medecin - Massena o długości linii 440 m i Jean Jaures - Garibaldi o długości linii 470 m [2].



Rys. 3. Pojazd szynowy Citadis z zasobnikiem mechanicznym umieszczonym na dachu [11,12]

W Polsce w październiku 2005 r., w Warszawie [13] testowany był tramwaj hybrydowy na trasie z Bemowa do Młocin. Był to tramwaj 116N z bezobsługowymi bateriami niklowo-kadmowymi. Pojemność baterii dobrana była tak, aby tramwaj mógł przejechać 6 km z prędkością 17-20 km/h bez zasilania z sieci trakcyjnej. Rozładowanie baterii nie było większe, niż 30-40%, co miało korzystny wpływ na zwiększenie żywotności baterii. Bateria doładowywana była z sieci trakcyjnej [14]. W tramwaju tego typu zastosowano również wariant zasobnika superkondensatorowego o pojemności 10 F i 750 V [15].

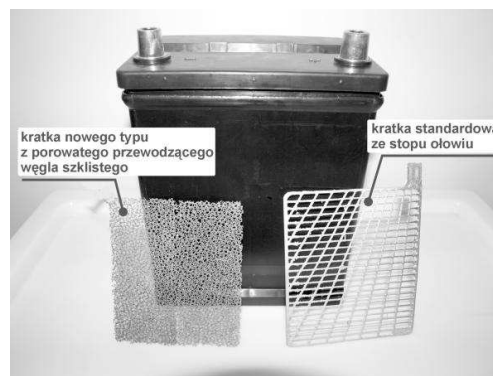
W czerwcu i lipcu 2007 r. w Lublinie testowano trolejbus z kondensatorowym zasobnikiem energii i trolejbus z zasilaniem hybrydowym (kondensatory o napięciu 780V i pojemności energetycznej 0,75 kWh plus bateria akumulatorów o energii 7 kWh) [16]. Zasobnik kondensatorowy umożliwiał jazdę bez zasilania sieciowego zarówno na terenie bazy, jak i na trasie.

Pojazd wyposażony w kondensatory, mógł pokonać odległość ok. 200 - 400 m. Dodatkowo akumulował praktycznie całą energię hamowania i zmniejszał wartości średniej mocy pobieranej z podstacji o około 20-30% [17]. W przypadku wersji z hybrydowym układem zasilania trolejbus miał możliwość pokonania dystansu 2000 m, przy rozładowaniu baterii akumulatorów do 20-30% pojemności znamionowej.

W 2008 r. Instytut Elektrotechniki wykonał układ zasobnika superkondensatorowego do trolejbusu eksploatowanego w Kownie na Litwie. Zastosowanie zasobnika przyniosło około 30% oszczędności energii. Ponadto trolejbus jest w stanie pokonać dystans kilkuset metrów bez podłączenia do sieci [18].

Mobilne zasobniki energii przynoszą ten negatywny efekt, że powiększają masę pociągu. W związku z tym pogarsza się dynamika takiego układu. Z jednej strony poprawia się efektywność wykorzystania tej energii, bo część tej energii można odzyskać do zasobnika i oddać ją w momencie zwrotu, z drugiej - poprzez zastosowanie magazynu energii - zwiększa się jednak masę pojazdu. Wzrost masy pojazdu implikuje również wzrost energii wydatkowanej na cele trakcyjne oraz pogarszają się parametry techniczne, ponieważ przy „gorącej” dynamice poboru podczas rozruchu uzyskuje się niższą prędkość techniczną. Z kolei niższa prędkość techniczna oznacza pogorszenie się przepustowości linii w stosunku do linii, po której poruszają się pojazdy niewyposażone w magazyn energii. Wynika stąd, że zastosowanie wariantu z pokładową akumulacją energii nie jest idealnym rozwiązaniem.

Jednak ciągły rozwój i udoskonalanie istniejących już urządzeń magazynujących energię, pozwala mieć nadzieję, że problem ten zostanie rozwiązany. Przykładem takiego urządzenia magazynującego jest nowy typ akumulatora ołowiowo-kwasowego (rys. 4), w którym tradycyjną kratkę ze stopu ołowiu zastąpiono kratką z porowatego przewodzącego węgla szklanego, który jest 10-krotnie lżejszy [19]. Przez to zmniejszyła się masa baterii, co jest bardzo istotne z punktu widzenia pojazdów elektrycznych i hybrydowych.

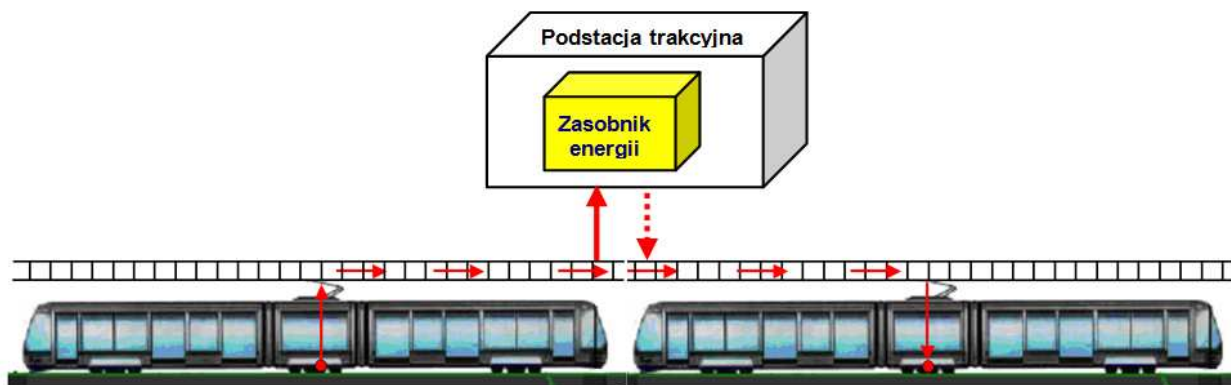


Rys. 4. Nowy typ akumulatora kwasowo-ołowiowego [19]

Zaletą instalacji mobilnych jest fakt, że pojazdy wyposażone w zasobnik mogą przejechać pewien dystans bez zasilania z sieci trakcyjnej. Ponadto rozwiązanie tego typu pozwala wyeliminować straty związane z przesyłem energii pochodzącej z hamowania odzyskowego. Zakumulowana energia wykorzystywana podczas rozruchu powoduje również zmniejszenie spadków napięć i ogranicza pobór prądu z podstacji trakcyjnej [20].

2.2 Stacjonarne zasobniki energii elektrycznej

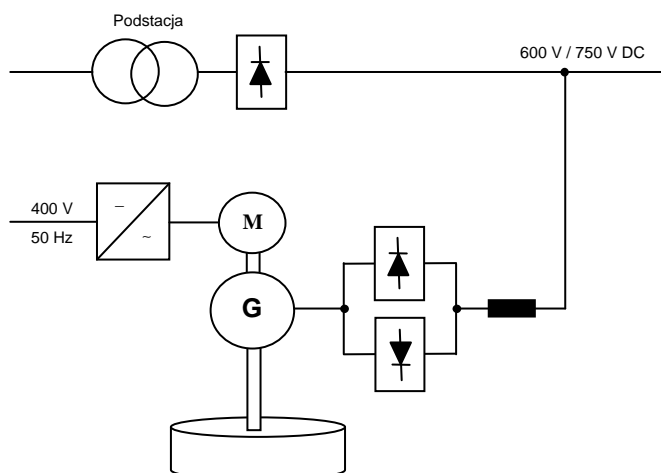
Opcjonalnym rozwiązaniem umożliwiającym akumulację energii do sieci trakcyjnej, jest podłączenie do sieci trakcyjnej stacjonarnych zasobników energii [21], równoległe z podstacjami trakcyjnymi. W tym przypadku gabaryty zasobnika są sprawą drugorzędną, co pozwala na większą swobodę w wyborze typu zasobnika i technologii jego wykonania [22].



Rys. 5. Układ stacjonarny zasobnika energii elektrycznej [2]

Zasobnik, usytuowany w podstacji, minimalizuje wahania poboru mocy z podstacji trakcyjnej, co korzystnie wpływa na zmniejszenie kosztów energii pobieranej z sieci pierwotnej [23].

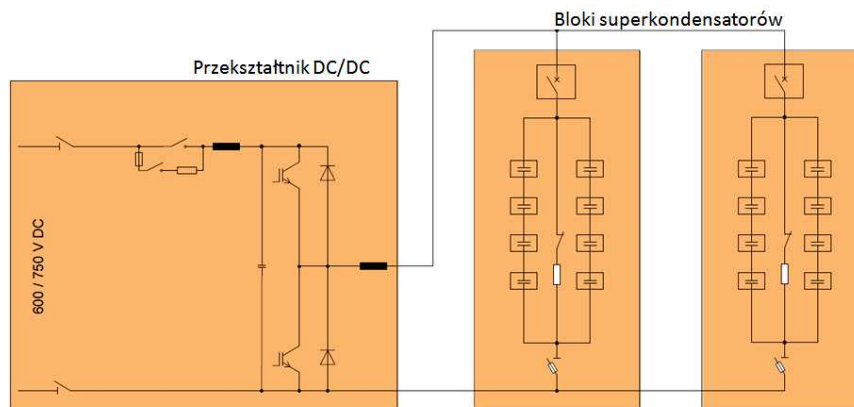
Pierwsze próby zastosowania stacjonarnych zasobników datują się jeszcze na początek XX wieku (Góry Skaliste, USA). Stacjonarne zasobniki energii eksploatowane były w systemie zasilania komunikacji miejskiej w Berlinie oraz w Japonii, od roku 1981 (linia Keihin – elektromechaniczne zasobniki energii o pojemności 15 i 30 kWh). Stacjonarny zasobnik kinetyczny do wyrównywania poziomu obciążeń zastosowano również w systemie zasilania sieci trakcyjnej w Hanowerze w 1998 r. Energia z bezwładnika wykorzystywana była do zapewnienia odpowiedniej mocy chwilowej lub do przyspieszenia pociągu. System akumulował ponadto energię odzyskiwaną podczas hamowania pojazdu [24].



Rys. 6. Schemat instalacji zasobnika inercyjnego w Hanowerze [24].

Kinetyczne zasobniki energii testowane były również m.in. w systemach zasilania metra w Paryżu, Rennes (Francja), Lyonie, Londynie i Nowym Yorku [25] oraz w sieci trakcyjnej w Kolonii i w Hanowerze [25, 26]. Na zastosowanie stacjonarnego bezwładnika, wykonanego w technologii włókien węglowych, zdecydował się ostatnio zarząd metra w Nowym Jorku [27].

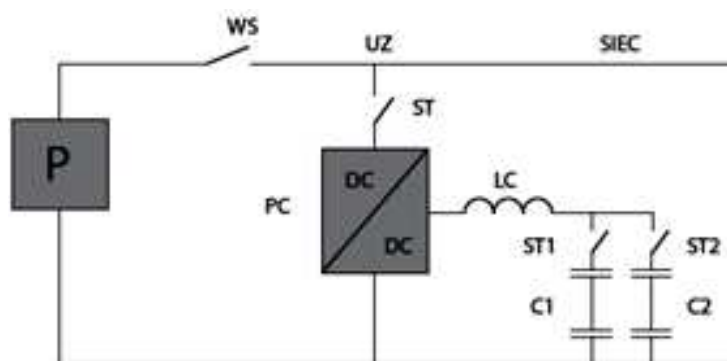
Innym wariantem stacjonarnej akumulacji energii są podstacje trakcyjne wyposażone w superkondensatory, stosowane m.in. w celu stabilizacji napięcia w sieci trakcyjnej oraz do ograniczenia zużycia energii [28]. Instalacje tego typu zasobników (Sistras SES - rys.7) znajdują się m.in. [28, 29] w Niemczech (dwa zasobniki w Kolonii – 2003/2006 r., cztery w Bochum – 2003/2006 r., dwa w Fuerth – 2007 r.), w Hiszpanii (dwa zasobniki w Madrycie – 2003 r.) i w Chinach (cztery w Pekinie – 2006/2008 r.) oraz jedna instalacja w Holandii (Rotterdam 2010 r.).



Rys. 7. Superkondensatorowy system magazynowania energii Sistras SES – schemat blokowy [30]

Na podstacji o nazwie „Stadion“ II linii metra warszawskiego, planowane jest zastosowanie zasobnika superkondensatorowego umożliwiającego zwiększenie efektywności odzysku energii hamujących pojazdów metra. Celem tej instalacji będzie również zmniejszenie obciążeń podstacji oraz możliwość wyprowadzenia składu z tunelu pod Wisłą [31].

W sieci tramwajowej w Elblągu (w 2010 r.) i w sieci trolejbusowej w Trójmieście (w 2011 r.) zainstalowano zasobnik podstacyjny (0,55 kWh i 0,15 kW), opracowany przez Instytut Elektrotechniki w Warszawie [32]. Powyższy patent uzyskał wiele nagród i wyróżnień. Na rysunku nr 8 znajduje się schemat blokowy tego zasobnika.



Rys. 8. Schemat blokowy zasobnika podstacyjnego [32]

Oznaczenia użyte na rysunku nr 8:

- P - podstacja trakcyjna
- WS – wyłącznik szybki zasilacza
- PC – przetwornik IGBT zasobnika
- C1-C2 – bloki superkondensatorów
- LC – dławik zasobnika

Zastosowanie zasobnika superkondensatorowego przyniosło 20-30% oszczędności energii elektrycznej, akumulowanej podczas hamowania pojazdów. Ponadto zainstalowanie tego typu urządzeń pozwala na pokonanie odcinka 200-300 metrów bez zasilania z sieci trakcyjnej (podczas awarii) [32].

3. WNIOSKI

Ograniczanie energochłonności w transporcie kolejowym prowadzi m.in. do konieczności wykorzystania najnowszych technologii, w tym urządzeń umożliwiających magazynowanie energii elektrycznej. Wybranie najbardziej odpowiedniego urządzenia powinno być kompromisem między daną konstrukcją, czyli gabarytami i ciężarem, a kosztami inwestycyjnymi jak i żywotnością oraz sprawnością. Dlatego też wciąż rośnie liczba testów nowych rozwiązań w tym pojazdów szynowych wyposażonych w zasobniki akumulujące energię podczas hamowania pociągu, jak i instalacji podstacji z urządzeniami magazynującymi energię w celu wyeliminowania wahań mocy w sieci trakcyjnej.

W Polsce w ostatnim okresie czasu pojawiły się zasobniki superkondensatorowe oferowane m.in. przez Instytut Elektrotechniki w Warszawie [33]. W związku z tym celowe wydają się wszelkie prace i analizy dotyczące możliwości wykorzystania tego typu urządzeń w transporcie szynowym.

Zastosowanie zasobników jest pożądane nie tylko z powodu ograniczenia kosztów energii elektrycznej czy zmniejszenia poboru mocy z sieci trakcyjnej ale również z punktu widzenia ekologii. Mniejsze zużycie energii wiąże się ze zmniejszonym zapotrzebowaniem na jej wytwarzanie, przez co ogranicza się emisję gazów cieplarnianych.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Mierzejewski L., Szelaǳ A.: *Racjonalizacja zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym - aktualne trendy*. SEMTRAK 2004.
- [2] Internet, http://www.hydrogentrain.dk/Files/System/Hydrogen%20Train/Filer/6_Jean-Paul_Moskowitz.pdf (29.01.2012)
- [3] Maciołek T., Drażek Z.: *Zasobnik energii w tramwaju zmniejszający zużycie energii*. Technika Transportu Szynowego 10/2004.
- [4] Pawełczyk M.: *Rozwój systemów wykorzystujących akumulację energii w transporcie szynowym*. XIX KONFERENCJA NAUKOWA „POJAZDY SZYNOWE” Targanice k/Andrychowa, 15 - 17 września 2010.
- [5] Pawełczyk M.: *Akumulacja energii w transporcie szynowym-ocena korzyści*. Technika Transportu Szynowego, nr 5-6/2002.
- [6] Internet, <http://www.ccm.nl/pdf/FLW-Tech-160204.pdf> (29.01.2012)
- [7] Internet, <http://www.werkstoff-und-struktur.de/information/kunststoffe1004.pdf> (29.01.2012)
- [8] Internet, http://www.uic.org/cdrom/2001/wcrr2001/pdf/sessions/1_1_3/457.pdf (29.01.2012)
- [9] Osawa M., Fujii T.: *Development of a New Energy (NE) Train*. Japanese Railway Engineering No. 156, 2006.
- [10] Rabsztyń M.: *InnoTrans 2006 w Berlinie*. Technika Transportu Szynowego 10/2006.
- [11] Internet, http://www.transport.alstom.com/home/eLIBRARY/technical/environnement/_files/file_24999_94184.pdf (15.02.2008)
- [12] Internet, <http://www.airborne.nl/en/news.phtml?p=News&article=70> (15.02.2008)
- [13] Gąsiewski M.: *Tramwaj z akumulatorowym zasobnikiem energii – wyniki eksploatacji*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2007.
- [14] Raczyński J.: *Pierwszy w Polsce tramwaj hybrydowy*, Wiadomości Elektrotechniczne LXXIV 2006 nr1.
- [15] Biziński Z., Gąsiewski M., Giziński P., Żuławnik M.: *Zasobnikowe układy zasilania w pojazdach trakcyjnych*. Pojazdy Szynowe 3/2011.
- [16] Giziński Z., Żuławnik M., Gąsiewski M., Zych M.: *Hybrydowy układ zasilania trolejbusu*. Technika Transportu Szynowego 9/2007.
- [17] Giziński P.: *Kondensatorowy zasobnik energii do pojazdów trakcji elektrycznej*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2007.
- [18] Giziński Z., Żuławnik M.: *Modernizacja i budowa czystego taboru transportu publicznego na terenie miast i w obszarach metropolitarnych tabor trolejbusowy*. Pojazdy szynowe 3/2009.
- [19] Internet, <http://www.elektroonline.pl/news/3965> (19.05.2011)
- [20] Pawłowski M.: *Pojazdowe zasobniki energii dla trakcji kolejowej*. Pojazdy szynowe 4/2009.
- [21] Iannuzzi D., Ciccarelli F., Lauria D.: *Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks*. Transportation Research Part C. Emerging Technologies Volume 21, Issue 1, 2012, pages 321-337.
- [22] Barrero R., Tackoen X., Mierlo J.: *Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 2010.
- [23] Brenna M., Foadelli F., Zaninelli D.: *Prospective for energy saving by means of Ultracapacitors in electric systems for transportation*. EV-RE. Monaco, March 26-29 2009.
- [24] Internet, <http://www.epri-intelligrid.com/intelligrid/docs/TE-114029.pdf> (26.03.2007)
- [25] Internet, http://www.tickettokyoto.eu/sites/default/files/download/file/T2K_WP2B_deliverable1.pdf (08.01.2012)
- [26] Briest R., Kahler S., Schusdzarra W., Victor M.: *Einsatz rotierender Energiespeicher im Fahrleitungsnetz; der üstra Hannover*. Elektrische Bahnen 98 (2000) 5-6.
- [27] Internet, <http://www.railwaygazette.com/nc/news/single-view/view/new-york-orders-fly-wheel-energy-storage.html> (01.04.2010)
- [28] Internet, <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/Documents/en/rail-solutions/railway-electrification/dc-traction-power-supply/sitras-ses2-en.pdf> (04.02.2012)
- [29] Internet, http://www.tickettokyoto.eu/sites/default/files/download/file/Siemens_SES_T2K_Annuel_Event_May2011.pdf (10.02.2012)
- [30] Internet, <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/Documents/en/rail-solutions/railway-electrification/dc-traction-power-supply/sitras-ses-en.pdf> (10.02.2012)
- [31] Szelaǳ A.: *Efektywność hamowania odzyskowego w zelektryfikowanym transporcie szynowym*. Pojazdy szynowe 4/2009.
- [32] Internet, http://www.pi.gov.pl/PARPFFiles/file/PPP/Tresci_stale/Katalog_PPP_XIV_edycja_2011.pdf (10.02.2012)
- [33] Szelaǳ A., Maciołek T., Drażek Z., Patoka M.: *Aspekty efektywności i energoszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej*. Pojazdy szynowe 3/2011.