

Witold Kobos, Michał Ciąćka, Piotr Chudzik
ZEP ENIKA, Łódź

TROLEJBUSOWY NAPĘD TRAKCYJNY Z ZASOBNIKIEM SUPERKONDENSATOROWYM

ELECTRIC TROLLEYBUS DRIVE WITH ULTRACAPACITORS

Abstract: In the paper are presented criteria and assumption for design and practical realization of asynchronous 125 kW trolleybus drive as well as measured saving energy parameters. Drive structure and capacitance of supercapacitor bank seems to be the most important questions which ought to be consider to find good balance between technical and economical aspects. There are also described control algorithms and shown some examples of costs. It also outlines and discuss the results of tests of the vehicle after two years of operation.

1. Wstęp

Współczesne napędy trakcyjne, stosowane w pojazdach transportu miejskiego, posiadają zdolność oddawania do sieci energii odzyskanej podczas hamowania. W porównaniu ze starszymi generacjami tramwajów i trolejbusów jest to właściwość umożliwiająca znaczne podniesienie sprawności pojazdów. Warunkiem pozwalającym na skorzystanie z tej funkcjonalności w pełnym zakresie jest jednak możliwość przyjęcia tej energii przez sieć trakcyjną. Zwykle podstacje zasilające są układami prostownikowymi, więc jedynymi odbiorcami nadmiaru energii oddawanej przez hamujący odzyskowo napęd, stają się inne pojazdy. Jeżeli w danej chwili moc oddawana do sieci przekracza możliwości odbiorców, następuje szybki wzrost napięcia na odcinku sieci trakcyjnej i niezbędne staje się załączenie rezystorów hamowania w celu wytracenia nadmiaru energii. Taka sytuacja, w której nikt nie „skonsumuje” oddawanej energii, pomimo zdolności napędu do jej odzyskiwania, sprawia, że nie osiąga się spodziewanych korzyści energetycznych związanych z zastosowaniem napędów z rekuperacją. Jednym z pomysłów, pozwalających na niezależne od aktualnych możliwości sieci „uchronienie” energii hamowania przed wytraceniem jest jej zgromadzenie w stacjonarnych zasobnikach, umieszczonych w podstacjach zasilających [1] lub w bateriach superkondensatorów montowanych w pojeździe [2].

W niniejszym artykule zostały przedstawione założenia konstrukcyjne, zasada działania oraz wnioski wypływające z zastosowania zasobnika w trolejbusie Skoda 14TR zmodernizowanym w 2010 roku w Kownie (Litwa), przez łódzką firmę ZEP Enika.



Rys.1. Zmodernizowany trolejbus Skoda 14TR z napędem asynchronicznym wyposażonym w zasobnik superkondensatorowy

2. Określenie założeń konstrukcyjnych dla zasobnika energii trolejbusu

Pojawienie się nowoczesnych kondensatorów o bardzo dużej szybkości ładowania i ogromnej gęstości absorbowanej energii w jednostkowej masie i objętości umożliwiło zbudowanie lokalnych zasobników energii o niespotykanych dotąd możliwościach. Realne stało się lokalne gromadzenie energii odzyskanej podczas hamowania pojazdu i oddanie jej w trakcie rozruchu. Podstawową barierą utrudniającą dzisiaj szersze stosowanie superkondensatorów jako zasobników jest ich wysoka cena, która powoduje, że uzyskanie korzyści ekonomicznych z odzyskanej energii nie jest oczywiste i wymaga dokładnej znajomości szerokiej gamy parametrów pojazdu i sieci zasilającej, a nawet wiedzy o obciążeniu sieci przez inne pojazdy. W początkowej fazie projektu układu zasobnika energii dla zmodernizowanego trolejbusu Skoda 14TR z napędem asynchronicznym, przyjęto

założenie o zastosowaniu baterii o jak najmniejszej pojemności (cena), która zapewniłaby zgromadzenie całej energii, odzyskiwanej w czasie hamowania ze średniej prędkości. Ze względu na straty w wywołane oporami ruchu oraz ograniczoną sprawnością w przekładni ($\eta_P \approx 0,96$), silniku ($\eta_S \approx 0,94$), falowniku ($\eta_F \approx 0,98$) oraz przekształtniku zasobnika ($\eta_Z \approx 0,96$) w kondensatorze można zgromadzić tylko część energii kinetycznej, którą określa się w przybliżeniu następującą zależnością:

$$E_{ZAS} \approx \eta_E \frac{m_P \cdot \alpha \cdot V_P^2}{2} \quad (1)$$

gdzie: m_P - masa pojazdu,
 α - współczynnik mas wirujących,
 V_P - prędkość początku hamowania.
 $\eta_E = \eta_P \eta_S \eta_F \eta_Z \approx 0,849$

Sprawność przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną ($E \rightarrow M$), kształtuje się w podobny sposób. Z zależności (1) wynika, że wielkość zasobnika jest wprost proporcjonalna do masy pojazdu oraz do kwadratu prędkości początku hamowania V_P . Tak więc szczególnie istotne jest przyjęcie właściwej wartości V_P . Na podstawie pracy [3] przyjęto $V_P = 40$ km/h, stąd dla średnio załadowanego trolejbusu otrzymujemy z (1), przy: $m_P = 13\ 000$ kg, $\alpha = 1,2$, $V_P = 40$ km/h (11,1 m/s) wartość energii zgromadzonej w zasobniku kształtuje się na poziomie:

$$E_{ZAS} = 815\ 921\ \text{J} = 0,227\ \text{kWh},$$

Koszt zakupu zasobnika o tej pojemności energetycznej przy obecnych cenach (0,013 EUR/J) wynosi: $815\ 921 \cdot 0,013 = 10607$ EUR.

Jak łatwo można pokazać, zwiększenie prędkości początku hamowania z $V_P = 40$ km/h do $V_P = 50$ km/h podnosi cenę zasobnika o około 56%.

Ze względu na zalecenia producenta kondensatorów, warunkujące ich długą żywotność, napięcie kondensatorów powinno zawierać się w zakresie od połowy napięcia znamionowego (175V - co odpowiada $\frac{1}{4}$ energii w zasobniku) do napięcia znamionowego (350 V - co odpowiada w pełni naładowanemu zasobnikowi). Wynika z tego, że zasobnik dysponuje energią na poziomie $\frac{3}{4}$ całkowitej energii kondensatora.

Przyjęte założenia doprowadziły do wyznaczenia wartości pojemności zasobnika zgodnie z zależnością.

$$C_{ZAS} = \frac{2 \cdot E_{ZAS}}{U^2} = 17,76\ \text{F}.$$

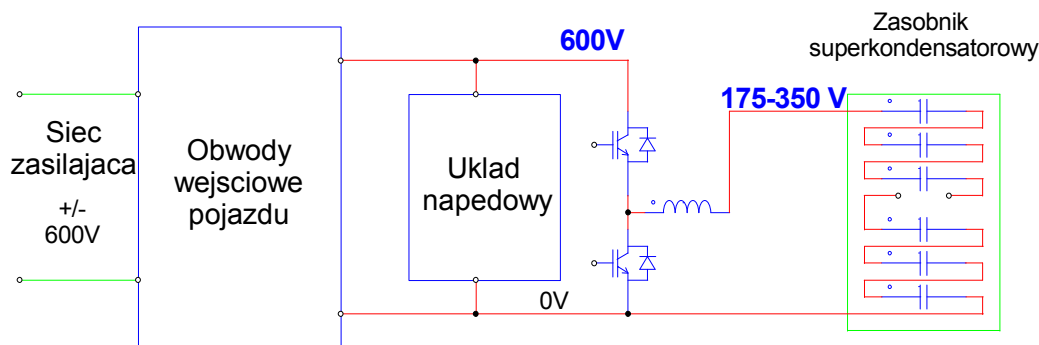
Innym, ważnym czynnikiem, warunkującym możliwości zasobnika jako magazynu energii jest wartość maksymalna prądu baterii superkondensatorów i układu przekształtnikowego. Ze względu na zależność napięcia baterii kondensatorów od poziomu jej naładowania wielkość ta decyduje o mocy chwilowej zasobnika. Wartość mocy maksymalnej jest największa, gdy zasobnik jest naładowany, a najmniejsza, gdy jest rozładowany. W omawianym pojeździe w stanie rozładowania do najniższego napięcia (175V) moc zasobnika jest zaledwie połową mocy maksymalnej. Określenie optymalnej wartości prądu dopuszczalnego podczas pracy zasobnika wymaga wzięcia pod uwagę nie tylko katalogowych parametrów kondensatora ale również parametrów tranzystorów, częstotliwości pracy i indukcyjności dławika.

3. Budowa układu zasobnika superkondensatorowego

Zasobnik zamontowany w zmodernizowanym trolejbusie składa się z 8 szeregowo połączonych modułów BMOD0165 firmy Maxwell. Każdy moduł ma pojemność 165F i maksymalne napięcie pracy 48V. Cały zasobnik ma pojemność 21F i maksymalne napięcie 350V. Moduły zostały umieszczone w metalowej, ocynkowanej obudowie. Pokrywy obudowy można otworzyć. Zasobnik przystosowany jest do montażu na dachu pojazdu. Chłodzenie zapewnia pęd powietrza wytworzony podczas jazdy.



Rys. 2. Widok zasobnika superkondensatorowego



Rys. 3. Schemat blokowy układu napędowego ENI ZNAP 100/Z z zasobnikiem superkondensatorowym

Zastosowanie baterii superkondensatorów w układzie zasilania pojazdu elektrycznego wymaga zbudowania dwukierunkowego przekształtnika umożliwiającego z jednej strony pobieranie energii z obwodu pośredniczącego falownika i przekazywanie jej do zasobnika, a z drugiej odbieranie energii z zasobnika i przekazywanie jej do obwodu pośredniczącego falownika. Na rysunku 3 zamieszczono schemat blokowy, pokazujący strukturę połączeń układu napędowego i zasobnika kondensatorowego.

4. Algorytm sterowania zasobnikiem superkondensatorowym

W czasie hamowania odzyskowego układ przekształtnika DC/DC pracuje jako czoper obniżający napięcie, przekazując energię z obwodu pośredniczącego (600V) falownika do zasobnika (175 V – 350 V). Ze względu na możliwość bezpośredniego oddawania do sieci energii odzyskanej z hamowania przyjęto, że układ przetwornika załącza się tylko wtedy, gdy sieć nie jest w stanie przyjąć energii od hamującego napędu i konieczne byłoby jej wytracenie na rezystorze hamowania. Takie założenie powoduje, że proces ładowania baterii kondensatorów jest zależny od intensywności hamowania, możliwości odbierania energii przez sieć oraz stanu naładowania zasobnika. Algorytm sterowania przepływem energii z napędu do zasobnika ma odmienną strukturę, niż w przypadku oddawania energii z zasobnika do napędu. W przypadku ładowania zasobnika układ regulacji ma strukturę kaskadową z nadrzędną pętlą regulacji napięcia, która podczas hamowania nie dopuszcza do podniesienia napięcia

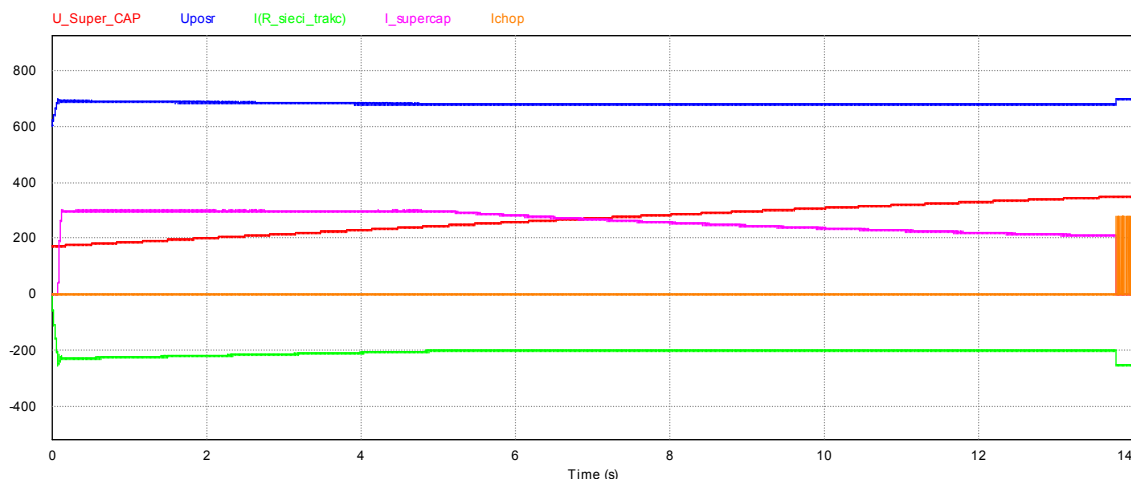
na obwodzie pośredniczącym do wartości załączenia rezystora hamowania.

Podczas rozpędzania, kiedy zasobnik oddaje energię, rolę nadrzędną pełni układ regulacji prądu. Jego zadaniem jest jak najszybsze rozładowanie baterii prądem o takiej wartości, która nie spowoduje oddawania w tym stanie energii do sieci.

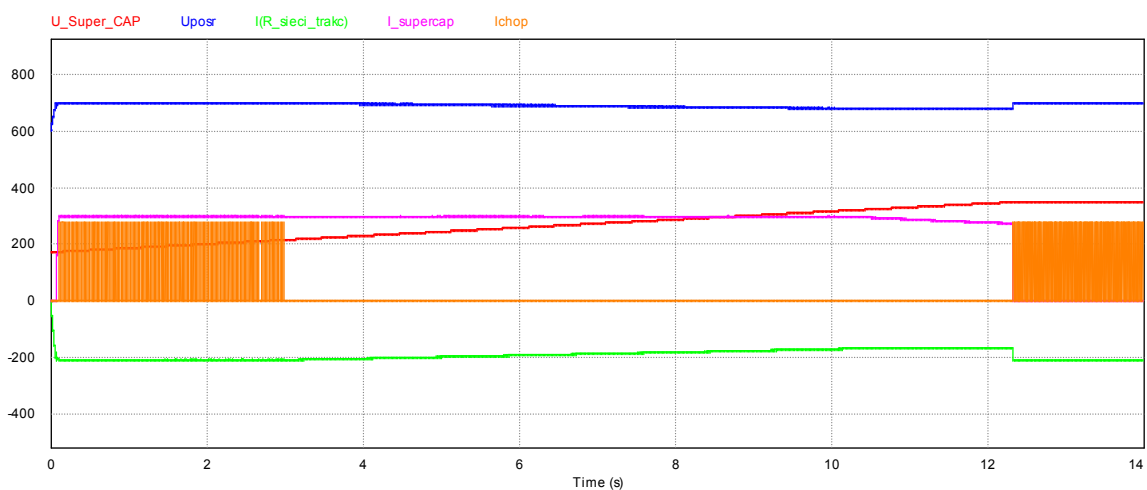
W celu zobrazowania charakterystycznych stanów pracy napędu przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wykonane w programie PSIM. Na rysunkach 4a-c zamieszczono przebiegi wybranych napięć i prądów w napędzie z zasobnikiem. Na rys. 4a przedstawiono przebiegi napięć i prądów w przypadku intensywnego hamowania odzyskowego. Sieć zasilająca jest w stanie przyjąć znaczną wartość energii, więc układ zasobnika jest ładowany prądem wynikającym z różnicy między prądem oddawanym przez pojazd i prądem odbieranym przez sieć, przy napięciu obwodu pośredniczącego nie powodującym załączenia rezystora hamowania, aż do osiągnięcia pełnego naładowania zasobnika do napięcia 350V (rys. 4a).

W przypadku intensywnego hamowania do sieci oddawana jest duża wartość energii. Jeżeli zasobnik jest aktualnie rozładowany (napięcie ok. 175V), to na skutek ograniczenia prądu ładowania baterii pojawia się znaczne ograniczenie mocy przez niego odbieranej. Niezbędne staje się wytracenie pozostałej części energii na rezystorze hamowania (rys. 4b).

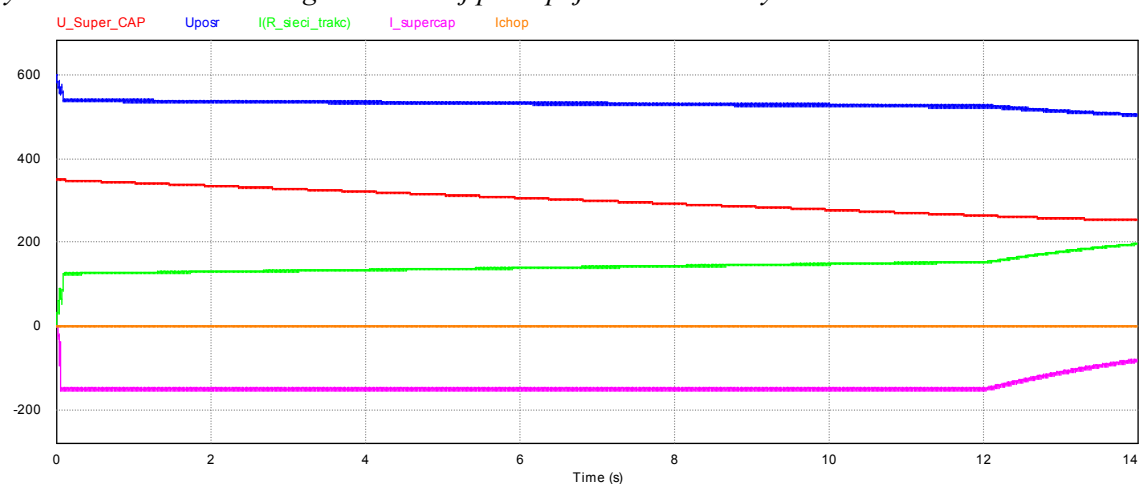
W czasie rozruchu energia zgromadzona w baterii kondensatorów, przekazywana jest za pomocą przetwornika podwyższającego z baterii do falownika. Na rysunku 4c zamieszczono przebiegi napięć i prądów podczas rozładowania zasobnika.



Rys. 4a. Duża wartość energii oddawanej przez pojazd. Sieć o znacznych możliwościach odbioru energii, niskie napięcie początkowe baterii



Rys. 4b. Duża wartość energii oddawanej przez pojazd. Sieć o małych możliwościach odbioru energii



Rys. 4c. Rozładowanie zasobnika.

Oznaczenia sygnałów: U_{Super_Cap} - napięcie baterii kondensatorów, U_{posr} - napięcie obwodu pośredniczącego, $I_{R_sieci_trakc}$ - prąd pobierany z sieci trakcyjnej (znak „-” oznacza oddawanie energii przez pojazd), $I_{supercap}$ - prąd ładowania baterii kondensatorów, I_{chop} - prąd rezystora hamowania

5. Wyniki eksploatacyjne

Zastosowanie zasobnika superkondensatorowego w trolejbusie z napędem asynchronicznym umożliwia zmniejszenie ilości energii pobranej przez pojazd z sieci trakcyjnej. Przy założeniu, że sieć trakcyjna nie odbiera energii od hamującego pojazdu, maksymalna ilość energii zaoszczędzonej w jednym miesiącu eksploatacji zasobnika może osiągnąć wartość 2270kWh, co pozwala uzyskać zwrot nakładów na zasobnik po upływie 6,26 roku [4]. Dodatkowym elementem utrudniającym analizę ekonomiczną stosowania superkondensatorów jest ich ograniczony czas życia. Dane techniczne udostępniane przez producentów tych elementów zapewniają, że są one przewidziane do przeprowadzenia minimum 10^5 pełnych cykli, ładowanie - rozładowanie. Przy założeniu, iż miesięcznie wystąpi 10 000 cykli uzyskujemy:

$$T_{\text{eksp}} = \frac{10^6}{10^4} = 100 \text{ miesięcy, co daje 8 lat i 4msc}$$

czasu użytkowania, po którym powinna nastąpić wymiana superkondensatorów. Dokładne oszacowanie rzeczywistego zysku jaki można osiągnąć poprzez zastosowanie zasobnika jest utrudnione ze względu na znaczny wpływ na tak przeprowadzoną analizę, możliwości odbioru energii przez sieć trakcyjną, a nawet sposobu jazdy kierowcy. W czasie testów próbnych modernizowanego trolejbusu wykonano badania poboru mocy napędu. W jeździe pojazdem obciążonym balastem ok. 4 tony, na odcinku pomiarowym o długości 13,4 km. napęd pobrał z sieci trakcyjnej 21 kWh i oddał do sieci 8 kWh. Od chwili dopuszczenia do ruchu prowadzono rejestrację energii pobranej i oddawanej przez napędy dwóch kowieńskich trolejbusów o numerach 345 i 348. Wybrane dane eksploatacyjne zamieszczono w tabeli.

Nr pojazdu	345	348
Przebieg [km]	117208	125078
Energia pobrana z sieci [kWh]	116936	120983
Energia zwrócona do sieci [kWh]	43009	38529
Jednostkowe zużycie energii [kWh/km]	0,63	0,66

Dwuletni okres eksploatacji napędu z zasobnikiem w zmodernizowanym trolejbusie Skoda 14TR pokazał, że zasobnik sterowany zgodnie z założonymi kryteriami, czyli przeznaczony głównie do gromadzenia energii odzyskanej podczas hamowania, nie jest wykorzystywany tak często, jak zakładano na etapie projektowania. Okazuje się, że na wspólnym odcinku sieci, na którym porusza się kilka pojazdów, rzadko się zdarza sytuacja, w której występuje nadmiar energii wymagający załączenia rezystorów hamowania. Wynika to ze specyfiki ruchu trolejbusów, które ze względu na opory ruchu, pobierają znaczną energię nawet podczas jazdy ze stałą prędkością. Zdecydowanie odmienne warunki oddawania energii do sieci występują w przypadku trakcji tramwajowej, gdzie jazda tramwajów ze stałą prędkością, zwana wybiegiem, która jest bardzo częstym stanem pojazdu, odbywa się przy znikomym poborze prądu z sieci. Dzięki temu podczas hamowania częściej pojawia się potrzeba wytracenia nadmiaru energii w rezystorach hamowania. Poważną zaletą napędu wyposażonego w zasobnik okazała się natomiast zdolność jazdy bez zasilania z sieci trakcyjnej. Po naładowaniu kondensatorów do napięcia 350V możliwe było pokonanie dystansu około 700m (płaskie podłoże), czas jazdy wynosił 4min. i 45sek. Testy wykazały, że dystans ten jest wystarczający do zjazdu trolejbusu ze skrzyżowania po zaniku napięcia sieci trakcyjnej.

6. Podsumowanie

Wyniki otrzymane z pomiarów przepływu energii między siecią trakcyjną, pojazdem i zasobnikiem, zarejestrowanych podczas pracy trolejbusu w ruchu miejskim pokazały, że zastosowanie zasobnika superkondensatorowego w trolejbusie, jako magazynu energii traconej podczas pracy rezystorów hamowania podnosi sprawność pojazdu. Wartość tej sprawności jest uzależniona od wielu czynników, takich jak zdolność sieci do odbierania energii, specyfika trasy pokonywanej przez pojazd, a nawet sposób jazdy kierowcy. Określenie optymalnych warunków pracy zasobnika, pozwalających na uzyskanie możliwie jak największej korzyści ekonomicznej z jego zastosowania, wymaga wzięcia pod uwagę wszystkich parametrów wpływających na jego czas eksploatacji. Bardzo ważne jest wyznaczenie wartości prądów zasobnika w różnych stanach pracy i określenie pożądanego w danym stanie stanu naładowania

baterii. Ze względów bezpieczeństwa istotne jest zapewnienie właściwych temperatur pracy baterii i niedopuszczenie do przekroczenia napięć maksymalnych na ogniwach. Obecnie prowadzone są również prace zmierzające do wzbogacenia algorytmu sterowania zasobnikiem montowanym na pojeździe o funkcję zmniejszenia strat energii związanych z przesyłaniem z podstacji do pojazdu i odwrotnie, od pojazdu do sieci.

7. Literatura

- [1]. Barrero, R.; Tackoen, X.; Van Mierlo, J.; *Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles*; Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. 1-3 Sept. 2008 Page(s):1512-1517.
- [2]. Giziński P., Giziński Z.: *Kondensatorowy zasobnik energii dla pojazdów trakcji elektrycznej*. Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej. Semtrak 2006, Zakopane,.
- [3]. Dariusz Stanisławczyk: *Badanie celowości i możliwości zastosowania kondensatorowych zasobników energii w trakcji miejskiej*. Praca Dyplomowa Magisterska. Politechnika Łódzka, Łódź czerwiec 2009.
- [4]. Michał Ciąćka, Witold Kobos: *Trakcyjny napęd asynchroniczny o podwyższonej sprawności energetycznej z wykorzystaniem pojemnościowego zasobnika energii*. Semtrak 2010, XIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa z zakresu Trakcji Elektrycznej i VI Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, Zakopane.
- [5]. R. Barrero, X. Tackoen, J. Van Mierlo: *Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles*. 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008).
- [6]. Sejin Noh, Jaeho Choi, Hyung-Cheol Kim, Eun-Kyu Lee.: *PSiM Based Electric Modeling of Supercapacitors for Line Voltage Regulation of Electric Train System*. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia, PsiM.
- [7]. L. Latkovskis, V. Bražis: *Simulation of the Regenerative Energy Storage with Supercapacitors in TatraT3A Type Trams*. Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation.
- [8]. Ricardo Barrero, Xavier Tackoen, Joeri Van Mierlo: *Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro Network*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008, Harbin, China.
- [9]. Diego Iannuzzi: *Improvement of the Energy Recovery of Traction Electrical Drives using Supercapacitors*. 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008).

Autorzy



mgr inż. Witold Kobos
Dyrektor działu technicznego
ZEP ENIKA Łódź.
email: w.kobos@enika.pl



mgr inż. Michał Ciąćka
Kierownik projektu
ZEP ENIKA Łódź.
email: m.cacka@enika.pl



dr inż. Piotr Chudzik
Specjalista konstruktor
ZEP ENIKA Łódź
email: p.chudzik@enika.pl