

Mariusz Tadeusz Konopczyński

# Zasobniki energii w układach zasilania sieci tramwajowych

*Systemy komunikacji miejskiej (masowej) zasilane są tradycyjnie z zewnętrznych systemów elektroenergetycznych. Rozwiązanie to jednak wywołuje wiele problemów z powodu specyfiki zasilania jakiego wymagają systemy komunikacji miejskiej. Ponieważ funkcją użytkową pociągów tramwajowych jest szybkie przyspieszanie, krótkotrwały jednostajny bieg, a następnie szybkie zwalnianie, a wszystko to w odstępie kilku minut, zasilanie z którego systemy te korzystają poddawane jest dużym szczytom poboru mocy. Uwidacznia się to zwłaszcza w zakładach wytwarzających energię elektryczną w postaci dużych skoków poboru mocy, zwłaszcza jeśli w jednym czasie wystąpi duża liczba pojazdów tramwajowych będących w fazie rozruchu.*

Duże wahania mocy wymagają dużej rezerwy ruchowej, a w konsekwencji wzrost ponoszonych kosztów. W artykule zostaną przedstawione korzyści, jakie może osiągnąć przedsiębiorstwo komunikacyjne (tramwajowe, trolejbusowe itp.) przez zastosowanie systemów magazynowania energii (zasobniki energii).

## Zasobniki energii w transporcie miejskim

Dotychczasowe aplikacje zastosowań zasobników energii ograniczały się do zastosowań w liniach metra lub w transporcie kolejowym. Powodowane to było specyfiką prowadzenia ruchu. W liniach metra, jak i na kolei możemy zaobserwować cykliczność jadących pociągów. Na tej podstawie możemy z dużym prawdopodobieństwem przewidzieć korzyści z zastosowania akumulatorów energii. Drugim aspektem jest liczba taboru zdolnego do reuperowania energii podczas hamowania.

Inaczej sprawa wygląda w ruchu tramwajowym. Ruch pociągów tramwajowych, pomimo iż jest prowadzony według rozkładów jazdy, jest wysoce nieprzewidywalny ze względu na dużą kolizyjność tras tramwajowych. Kolizyjność ta wynika z dużej liczby skrzyżowań z ruchem drogowym nawet dla wydzielonych torowisk. Wyjątek mogą stanowić całkowicie wydzielone trasy, takie jak Poznański Szybki Tramwaj. Ale takich linii jest niewiele. Można by było zatem wnioskować, że na liniach tramwajowych stosowanie zasobnika jest nieopłacalne. Nic bardziej błędnego. To właśnie duże zagęszczenie pociągów tramwajowych, jak i nieprzewidywalność mogą okazać się największym atutem do zastosowań akumulatorów energii.

Jednak zanim wysnujemy wnioski, zapoznajmy się z urządzeniami, jakie służą do gromadzenia energii.

Najogólniej zasobniki energii możemy podzielić na kinetyczne oraz statyczne.

Zasobniki kinetyczne to takie, które energię elektryczną zamieniają na mechaniczną (i odwrotnie) i gromadzą (oddają) ją w wirujących bezwładnikach (kołach zamachowych).

Drugą grupę stanowią zasobniki statyczne, które energię elektryczną zamieniają na chemiczną (baterie akumulatorów), bądź gromadzą w postaci ładunku elektrycznego (kondensatory).

Wszystkie wymienione akumulatory energii mają wady i zalety. Wybranie tego najbardziej nam odpowiadającego będzie zawsze sztuką kompromisu między konstrukcją (gabaryty, ciężar), pojemnością, kosztami inwestycyjnymi wraz z obsługą, żywotnością oraz sprawnością.

## Przegląd konstrukcji zasobników energii Zasobniki kinetyczne

Obecnie budowane kinetyczne zasobniki energii wykonane są jako wolno- i szybkoobrotowe. Energia zgromadzona w zasobniku kinetycznym wyraża się wzorem:

$$E = \frac{J\omega^2}{2}$$

gdzie:

$J$  – moment bezwładności elementu wprowadzonego w ruch wirowy,

$\omega$  – prędkość obrotowa bezwładnika.

Z tego wzoru wynika, że energia zgromadzona w zasobniku jest proporcjonalna do momentu bezwładności elementu wykonującego ruch obrotowy (bezwładnika) i kwadratu prędkości obrotowej. Bardziej efektywne jest zatem zwiększanie prędkości obrotowej niż masy samego bezwładnika. Niestety wzrost prędkości wiąże się z zastosowaniem lekkich materiałów kompozytowych (kevlar, włókna szklano-węglowe itp.) do budowania samych bezwładników, jak również specjalnych konstrukcji łożyskowania samego bezwładnika. Pociąga to za sobą znaczny wzrost kosztów budowy zasobnika. Niewątpliwą przewagą ciężkich kół zamachowych jest ich cena, która jest znacznie niższa. Budowę zasobników kinetycznych przedstawiono na dwóch przykładach:

- 1) szybkoobrotowe koło zamachowe firmy URENCO P.T.,
- 2) wolnoobrotowe koło zamachowe firmy PILLER.

Szybkoobrotowe koło zamachowe firmy URENCO P.T. przedstawiono na rysunku 1. Jest to rura stalowa, wewnątrz której znajduje się kompozytowy rotor węglowo-szklany. Rotor osadzony jest u dołu za pomocą specjalnego łożyska kulowego hydrodynamicznego, a u góry za pomocą łożysk magnetycznych. Wewnątrz panuje, w zależności od konstrukcji, próżnia lub atmosfera gazów szlachetnych pod bardzo niskim ciśnieniem. Całość konstrukcji jest praktycznie bezobsługowa. Jedynymi czynnościami eksploatacyjnymi jest okresowa wymiana olejów w łożysku kulowym. Do konstrukcji koła dołączone są układy sterowania.

## Parametry techniczne

– moc wyjściowa	200 kW
– zakres napięcia eksploatacyjnego	570–900 V DC
– czas rozładowania przy pełnej mocy	26 s

- straty stanu ustalonego (prąd podtrzymania ok. 1,5 A), 1,2 kW
- sprawność układu dla jednego cyklu ok. 96%
- eksploatacyjna prędkość obrotowa 31800–39600 obr./min

Do zalet przedstawionego rozwiązania zaliczamy:

- małe koszty eksploatacyjne,
- szeroki zakres regulacji napięcia wyjściowego,
- niewielkie rozmiary,
- wysoka sprawność energetyczna układu.

Do zasadniczych wad zaliczamy:

- bardzo wysokie koszty inwestycyjne,
- brak możliwości przeciążania układu.

Wolnoobrotowe koło zamachowe przedstawiono na rysunku 2. Rotor ma znacznie większą masę niż w przypadku kół szybkoobrotowych. Na bezwładniki zastosowano specjalne stałe stopy. Na wale głównym, ze względu na dużą masę rotora, znajduje się silnik elektryczny służący do rozruchu urządzenia i doprowadzenia prędkości obrotowej do dolnej granicy pracy eksploatacyjnej. Sam bezwładnik, podobnie jak w poprzednim przypadku, porusza się w komorze próżniowej. Wirnik osadzony jest na łożyskach magnetycznych oraz specjalnych konstrukcjach tradycyjnych łożysk. Podobnie jak w poprzednim przypadku koło

musi pracować z układem sterowniczym. Ciężkie koła zamachowe mają następujące parametry:

- moc wyjściowa znamionowa 1100 kW
- maksymalna moc wyjściowa 1650 kW
- zakres napięcia eksploatacyjnego 405–550 V DC
- czas rozładowania przy mocy znamionowej 16 s
- sprawność układu 70–99%
- eksploatacyjna prędkość obrotowa 1800–3600 obr./min

Do zalet przedstawionego rozwiązania zaliczamy:

- niskie koszty inwestycyjne,
- duże moce gromadzone jednorazowo w kole,
- duża sprawność przy pracy w zakresie mocy znamionowych,
- możliwości przeciążania układu.

Do zasadniczych wad zaliczamy:

- duże gabaryty,
- duże koszty eksploatacyjne,
- konieczność stosowania dodatkowych maszyn rozruchowych,
- duży poziom hałasu.

## Zasobniki statyczne

Zasobniki statyczne nie posiadają elementów ruchomych (bezwładników), a cała energia gromadzona jest w postaci ładunku elektrycznego (baterie superkondensatorów) lub zamieniana na energię chemiczną (baterie akumulatorów). Do zasobników statycznych zaliczamy także akumulatory indukcyjne, które gromadzą energię w postaci pola magnetycznego. Niestety do dnia dzisiejszego nie miały one zastosowania w układach trakcji elektrycznej.

Jako przykład zasobników pojemnościowych przedstawiony zostanie system SITRAS®SES firmy SIEMENS. Wykorzystuje on do gromadzenia energii potężne baterie kondensatorów o bardzo dużej pojemności. Pojedynczy kondensator przedstawiono na rysunku 3.

Energia zgromadzona w kondensatorze wyraża się wzorem:

$$E = \frac{CU^2}{2}$$

gdzie:

$C$  – pojemność kondensatora,

$U$  – napięcie na zaciskach.

Z zależności tej wynika, że znacznie korzystniejsze jest maksymalizowanie dopuszczalnego napięcia na zaciskach kondensatora, niż jego pojemności.

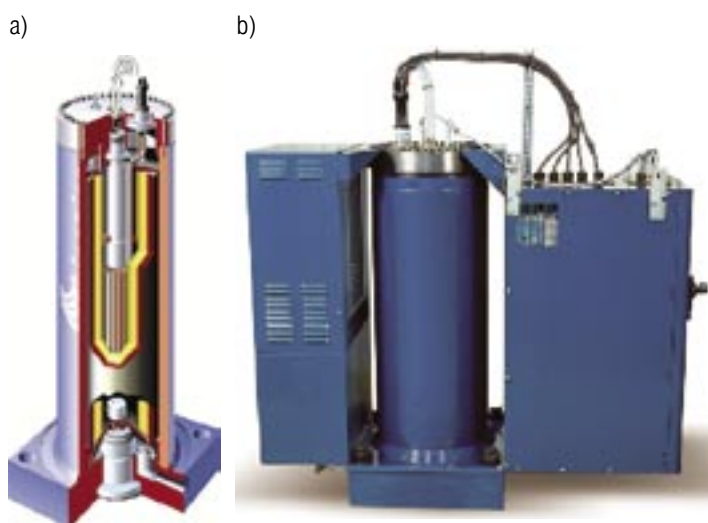
Do zastosowań trakcyjnych firma SIEMENS zbudowała zasobnik statyczny złożony z baterii połączonych kondensatorów. Baterię taką przedstawiono na rysunku 4.

Pojemnościowy zasobnik energii charakteryzuje się następującymi danymi technicznymi:

- napięcie wejściowe 750 V DC
- tolerancja napięcia wejściowego wg EN 50163
- medium kondensatory dwuwarstwowe
- liczba kondensatorów ok. 1300
- całkowita pojemność 64 F
- pojemność energii 2,3 kWh
- moc szczytowa 1 MW
- sprawność baterii kondensatorów 0,95

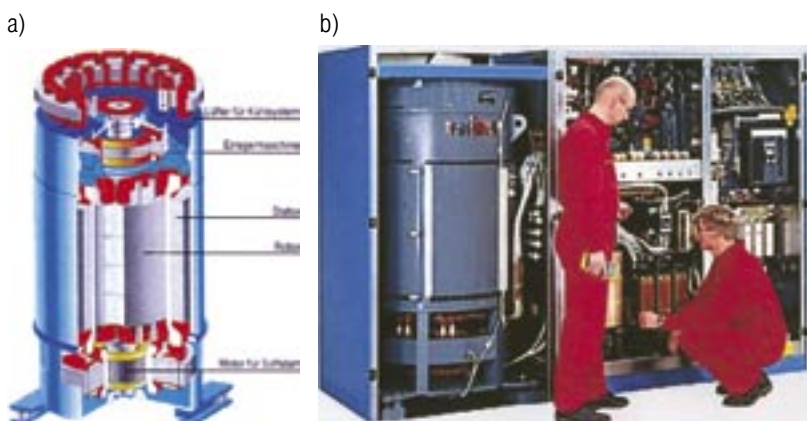
Do zasadniczych zalet tego rozwiązania zaliczamy:

- niskie koszty eksploatacji,
- możliwość uzyskania wysokiej mocy szczytowej,



Rys. 1. Szybkoobrotowe koło zamachowe

a) konstrukcja koła, b) koło zamachowe wraz z zabudowanymi układami sterującymi



Rys. 2. Wolnoobrotowe koło zamachowe

a) konstrukcja koła, b) koło zamachowe wraz z zabudowanymi układami sterującymi

- łatwe dopasowanie systemu do ciężkich pojazdów,
- dużą dynamikę,
- sprzężenie z siecią trakcyjną przy użyciu powszechnie używanych komponentów podstacji trakcyjnych.

Do wad rozwiązania zaliczamy:

- duże gabaryty,
- starzenie się kondensatorów na skutek pracy cyklicznej; konieczność wymiany po deklarowanym czasie pracy.

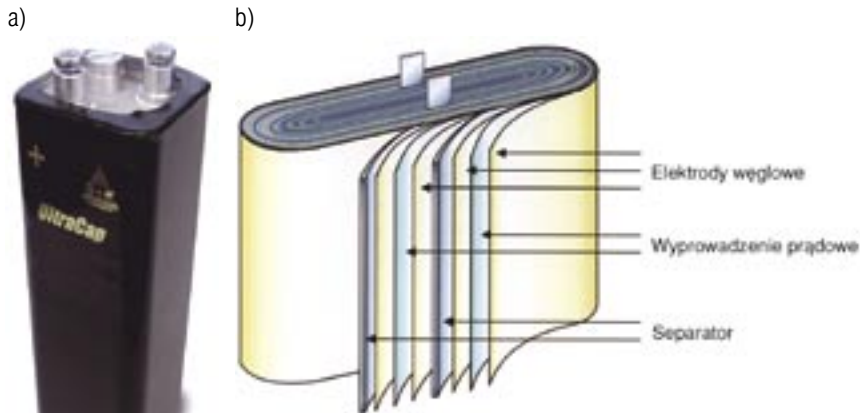
### Układ zasilania sieci tramwajowych

Układ zasilania sieci trakcyjnej tramwajowej w znaczny sposób różni się od sieci kolejowej. Sieć trakcyjna tramwajowa zbudowana jest w układzie gwieździstym, a odcinki zasilane są jednostronnie. Na rysunku 5 przedstawiono obszar zasilania jednej z poznańskich stacji prostownikowych K-249 TRAUGUTTA.

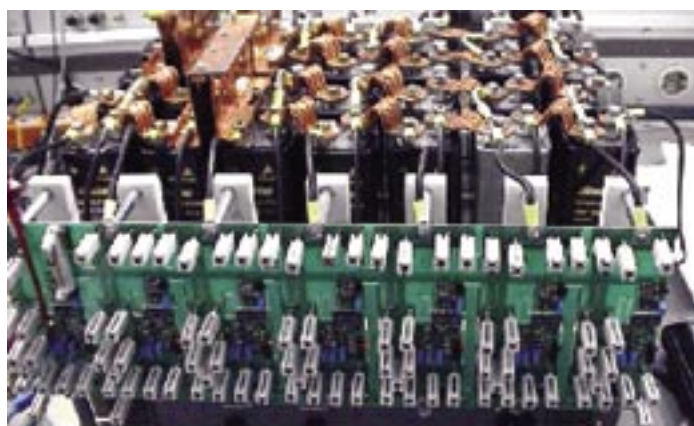
Eksploatowane w Miejskim Przedsiębiorstwie Komunikacyjnym w Poznaniu Sp. z o.o. stacje prostownikowe są zabudowane jako dwu-, trzy- lub czteroprostownikowe. Jedna stacja zasila nawet kilkanaście odcinków zasilania. Zasilane odcinki mają średnio ok. 600 m. Prądy znamionowe płynące poprzez poszczególne zasilacze mają znacznie wyższe wartości niż na kolei i wynoszą nawet 3,5 kA. Specyfika ruchu tramwajowego powoduje duże skoki wartości napięcia i prądu w sieci trakcyjnej, a co za tym idzie duże skoki mocy. Zastosowanie zasobników energii mogłoby w znaczny sposób złagodzić to zjawisko. Na rysunku 6 przedstawiono wykres napięcia na pantografie tramwaju, zarejestrowany na jednym z odcinków zasilania.

### Układy zastosowań zasobników energii

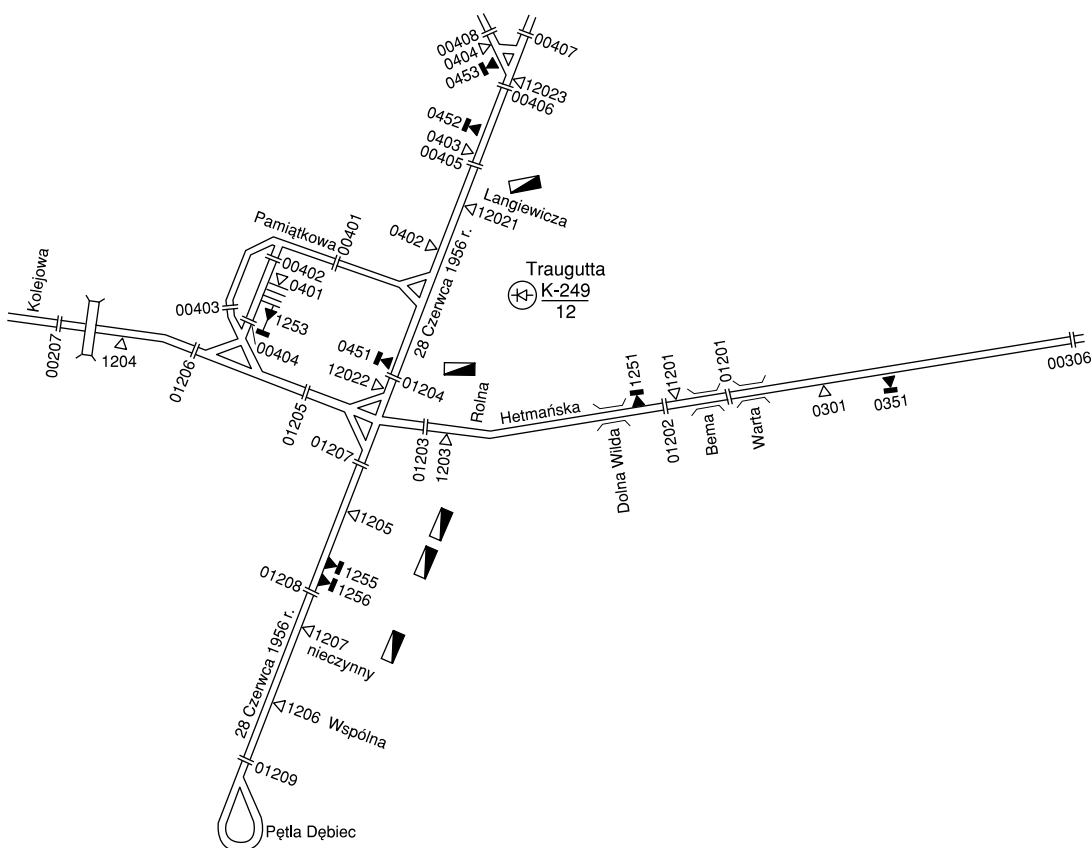
Akumulatory energii mogą być zabudowywane na taborze, w podstacji trakcyjnej lub jako oddzielne konstrukcje ustawione na szlaku. Zabudowanie zasobnika na taborze powoduje najmniejsze straty, gdyż cała energia zgromadzona podczas hamowania zostanie wykorzystana przez ten sam pojazd w fazie rozruchu, z pominięciem układu sieci trakcyjnej. Zasadniczą wadą takiego rozwiązania jest jednak ograniczenie miejsca dla pasażerów, jak również wzrost masy samego pojazdu. Innym sposobem jest zabudowanie akumulatora w podstacji trakcyjnej. Może on być podłą-



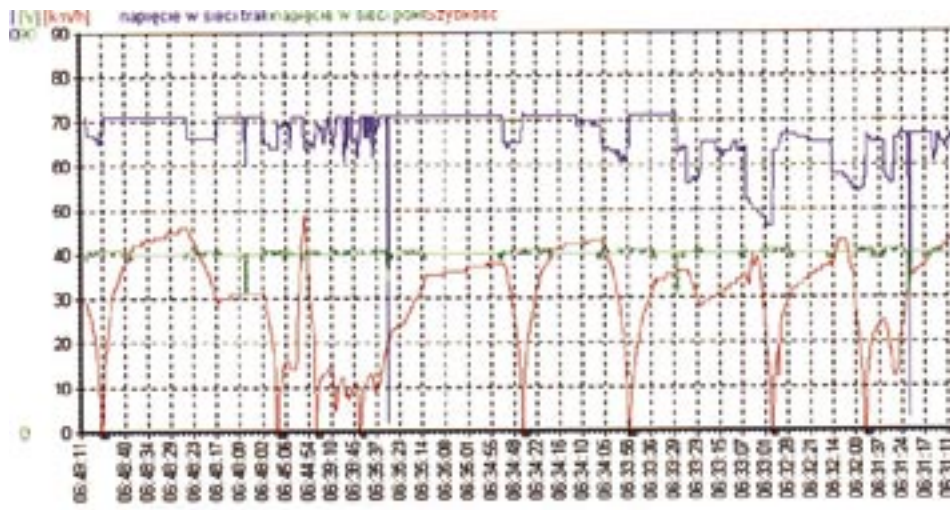
Rys. 3. Superkondensatory  $U = 2,5 \text{ V}$ ,  $C = 2600 \text{ F}$   
a) wygląd zewnętrzny, b) budowa



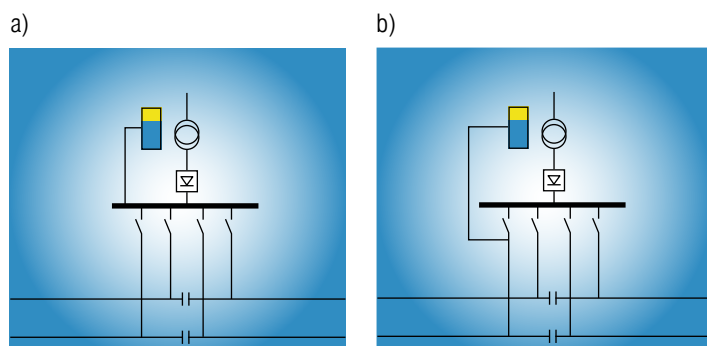
Rys. 4. Bateria kondensatorów



Rys. 5. Obszar zasilania stacji prostownikowej tramwajowej



Rys. 6. Wykres napięcia w sieci trakcyjnej na jednym z odcinków zasilania



Rys. 7. Układy pracy zasobnika energii  
a) na szynę + rozdzielnicę DC, b) na jeden zasilacz

czony do szyn głównych stałoprądowych rozdzielni DC, jak i współpracować tylko z jednym zasilaczem. Układy pracy zasobników w podstacji przedstawiono na rysunku 7.

Na liniach tramwajowych, głównie na dużych skrzyżowaniach, bardzo korzystne może okazać się zastosowanie akumulatora podłączonego do jednego zasilacza. Przykładem takiego skrzyżowania w Poznaniu jest Rondo Kaponiera, gdzie w jednym cyklu zmiany świateł znajdują się zawsze co najmniej dwa pociągi tramwajowe. Niezwykle rzadko zdarza się, by jednocześnie jeden pojazd hamował, a drugi był w fazie rozruchu.

W innych rejonach, gdzie wszystkie zasilacze są obciążane w miarę równomiernie, bardziej korzystny wydaje się układ zasobnika podłączonego do szyny + rozdzielni prądu stałego. Pozwoli to na swobodny przepływ prądów po całym obszarze zasilania stacji prostownikowej.

### Korzyści płynące z magazynowania energii – wnioski

Dlaczego rozpatruje się zastosowanie zasobników energii? Przede wszystkim dlatego, że biorąc pod uwagę charakterystykę ruchu miejskiego większość z oddawanej energii w czasie hamowania ogrzewa powietrze. Zastosowanie zasobnika energii pozwoli na uzyskanie oszczędności wynikających z ograniczenia kosztów zakupu energii. MPK Poznań Sp. z o.o. eksploatuje 11 pociągów

tramwajowych zdolnych rekuperować energię hamowania. Planuje się zakupienie jeszcze kilkunastu nowoczesnych pociągów wyposażonych w układy odzyskowe oraz zmodernizowanie starych. Oczywiście na dzień dzisiejszy 11 pojazdów to zdecydowanie za mało, by zwrócić się duże nakłady inwestycyjne, ale planowane zakupy nowego taboru oraz modernizacja starego może znacznie zmienić tę sytuację. Ponadto czas, który musi upłynąć do chwili dostarczenia taboru zdolnego rekuperować energię, pozwoli naszemu przedsiębiorstwu przetestować dostępne rozwiązania i wybrać najbardziej optymalne. Jednak nie tylko koszty związane ze zużyciem energii przemawiają za zastosowaniem zasobników. Innym czynnikiem jest możliwość obniżenia mocy zamówionej dla danej stacji prostownikowej. Zastosowanie układów magazynujących energię może zredukować liczbę występujących przekroczeń mocy. Dodatkowo zminimalizowanie skoków mocy pozwoli przedsiębiorstwu na inne sposoby zakupu energii elektrycznej, co może przyczynić się do dalszej obniżki kosztów. Jednak potrzeba jeszcze wielu lat doświadczeń oraz dostatecznej liczby nowoczesnego taboru, by jednoznacznie wykazać korzyści płynące z zastosowania zasobników energii.

### Literatura

- [1] Pawełczyk M.: Akumulacja energii w transporcie szynowym – ocena korzyści. Technika Transportu Szynowego 5-6/2002.
- [2] Pawełczyk M.: Analiza statyczna jako metoda określania niezbędnej pojemności energetycznej zasobnika energii współpracującego z systemem zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego. Konferencja Naukowa – Komputerowe Systemy Wspomagania Nauki, Przemysłu i Transportu TRANSCOMP '01, Zakopane 2001.
- [3] Biliński J., Wiśniewski A.: SITRAS®SES – system pojemnościowego magazynowania energii z rekuperacji w systemie zasilania trakcji tramwajowej. Komisja Zasilania MPK Poznań Sp. z o.o., kwiecień 2002.
- [4] Materiały firmy URENCO POWER TECHNOLOGIES.

*Autor*  
mgr inż. Mariusz Tadeusz Konopczyński  
absolwent Wydziału Transportu Politechniki Radomskiej, specjalność – zasilanie trakcji elektrycznej; pracował na PKP, a od 2000 r. jest pracownikiem Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Poznaniu Spółka z o.o.

*Autor składa podziękowania panom: Janowi Firlikowi, Antoniego Grzegorzewskiemu oraz profesorowi Markowi Pawełczykowi za przychylność oraz pomoc merytoryczną. Szczególne podziękowania składam firmom Siemens, URENCO P.T. oraz Piller za udostępnione materiały.*