

Tadeusz Maciołek

# Zastosowanie zasobników energii w trakcji kolejowej 3 kV DC – nieodległa perspektywa?

*W celu oszczędzania energii w pojazdach – samochodach, trolejbusach, tramwajach, metrze – stosowane są coraz powszechniej zasobniki wykonywane z akumulatorów litowych, superkondensatorów. Są one montowane również stacjonarnie w podstacjach trakcyjnych. Przy zasilaniu trakcji kolejowej wyznaczenie oszczędności energii jest trudne. Ocenę stosowania zasobnika należy oprzeć na wyznaczeniu ilości oszczędzonej energii; trzeba dobrać parametry koniecznego zasobnika w danej podstacji trakcyjnej. Artykuł przedstawia metodę obliczeń oszczędności energii elektrycznej po zastosowaniu zasobnika z superkondensatorem lub akumulatorem chemicznym w kolejowej podstacji trakcyjnej systemu 3 kV DC. Wykorzystane są charakterystyki pojazdów trakcyjnych, charakterystyki układu zasilania i rozkłady jazdy. Wymagane są obliczenia dla układu zasilania, chwilowego położenia i stanu wszystkich pojazdów w obszarze zasilania. Potrzebne jest również uwzględnienie wzajemnego oddziaływania pojazdów między sobą i ich współpracy z układem zasilania. Przeprowadzona została analiza efektów energetycznych dla linii jednotorowej dla zasobnika z superkondensatorem i akumulatorem litowym.*

Tabor ma zwykle zdefiniowane warunki i wymagania co do poprawnej pracy, w tym hamowania rekuperacyjnego. Odzyskiwanie energii hamującego pojazdu należy rozpatrywać szeroko: od taboru, a kończąc na układzie zasilania. Możliwość oddania energii przez pojazd, ustalona poprzez jego charakterystyki, nie jest wystarczająca do jej rekuperacji. Konieczny jest również odbiór tej energii o wymaganej zdolności jej przejęcia oraz układ zasilania zdolny do jej przesłania od pojazdu hamującego rekuperacyjnie do pojazdu pobierającego energię. Brak możliwości odbioru energii powoduje, że energia możliwa do ponownego wykorzystania musi być wytracona na rezystorach pojazdu. Problem ten jest szczególnie istotny na linii jednotorowej. Możliwym sposobem na przejęcie nadwyżkowej energii hamowania jest zastosowanie zasobników energii, które przechowują energię rekuperacji do chwili, w której w sieci pojawi się pojazd pobierający energię. Stosowanie zasobników energii staje się powszechne w niskonapięciowych systemach zasilania prądu stałego trakcji miejskiej, jak i pojazdach autonomicznych [1–4, 6, 8, 11, 13, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 28]. W systemach kolejowych o napięciu 3 kV DC nie są one jednak stosowane [21, 25].

## Podstawowe cechy zasobników

Jako zasobniki stosowane są: akumulatory chemiczne, zasobniki wirujące – bezwładniki [7, 8, 14, 15, 16, 20, 26] i superkondensatory [1–4, 6, 8–10, 14, 15, 17, 18, 23, 24, 28]. Przeprowadzone przez autorów analizy energetyczne i ekonomiczne różnych rozwiązań potwierdziły, że najkorzystniejsze jest zastosowanie superkondensatorowych zasobników energii [12], ale w systemie trakcji 3 kV DC zasobniki nie są stosowane.

Superkondensatory, akumulatory chemiczne stosowane są w pojazdach, na liniach i w podstacjach trakcyjnych (PT) prądu stałego o niskim napięciu. Po zainstalowaniu zasobnika w taborze zmniejszy się obciążenie systemu zasilania [11]. Zasobnik w pojeździe pozwala na pełne wykorzystanie energii hamowania. Nie ma strat na przesył energii. Wadą jest konieczność ograniczenia pojemności zasobnika. Zasobnik zwiększa masę własną pojazdów i prowadzi do strat energii na transport zwiększonej masy. Ze względu na dużą masę i prędkość pociągów w trakcji kolejowej wymagane są znaczne pojemności zasobników w stosunku do tramwajów czy trolejbusów [3, 4]. Pociągi hamują znacznie rzadziej, co ma wpływ na liczbę cykli pracy zasobnika. Wyklucza to zastosowanie zasobników w pociągach, szczególnie

w lokomotywach. W podstacji trakcyjnej zastosowanie zasobnika nie jest ograniczone dopuszczalną masą. Wystąpią jednak straty na podwójny przesył energii. Straty te są tym większe, im większe są rezystancje sieci trakcyjnej; dalej od podstacji znajdują się pojazdy trakcyjne podczas poboru lub rekuperacji energii. Obecnie pojawił się nowy typ akumulatorów hybrydowych litowych o wysokiej sprawności i dużej dopuszczalnej mocy ładowania, tylko kilkukrotnie mniejszej niż dla superkondensatorów. Dopuszczalny prąd ładowania sięga 20 Q.

## Efektywność stosowania zasobników

Wielkość energii pochodzącej z hamowania pociągów w głównej mierze zależy od gęstości ruchu pociągów, częstości ich zatrzymań, masy pociągów, profilu linii, ograniczeń prędkości na trasie. Mniejsze znaczenie ma sprawność elementów systemu zasilania. Maksimum oszczędność energii nastąpi wtedy, gdy w trakcie hamowania energia odzyskana jest jednocześnie zużywana przez inne pociągi. Pozwoli na to odpowiedni rozkład jazdy i konfiguracja układu zasilania. Na linii wielotorowej ruch pociągów zwykle odbywa się z odchyłkami rzędu minut w stosunku do rozkładu jazdy. Nawet jeśli rozkład jazdy będzie optymalizowany pod kątem zmniejszenia zużycia energii, nie należy spodziewać się uzyskania w pełni zaplanowanego efektu, gdyż hamowanie pociągu trwa kilkadziesiąt sekund, a nakładanie się hamowania na pobór energii przez inne pociągi ma charakter losowy [5, 26]. W przypadku linii jednotorowej bezpośredni transfer energii jest utrudniony.

Część energii z hamowania nie będzie wykorzystana i będzie wytracona w rezystorach hamowania, zaś napięcie w sieci trakcyjnej istotnie wzrośnie. Energię tę można odzyskać po zastosowaniu zasobnika w PT. Dla ruchu tramwajowego lub metra czy ruchu podmiejskiego możemy stosować metody uśrednione, jak dla ruchu rozłożonego równomiernie. Dla ruchu kolejowego odcinki zasilania są dłuższe, a pociągi różnego typu jeżdżą rzadziej. Należy uwzględnić oddzielnie przejazdy wszystkich pociągów w długich okresach. Dla obliczenia efektów energetycznych zastosowania zasobników opracowane zostały dość rozbudowane programy obliczeniowe. Uwzględnią się w nich charakterystyki linii kolejowej, profile, parametry układu zasilania, charakterystyki trakcyjne i elektryczne pociągów, rozkłady jazdy oraz parametry zasobników. Istotne są również wartości rezystancji na drodze przepływu prądu rekuperacji, które zależą od: schematu sekcjonowania, odległości między podstacjami, rezystan-

cji jednostkowej sieci trakcyjnej i szyn jezdnych, charakterystyki podstacji trakcyjnej [12, 21, 25].

Jednotorowy obszar (2 odcinki torów przy PT1) zasilany jest z 3 podstacji trakcyjnych PTO –PT2. Przy zasilaniu w układzie dwustronnym część energii przesyłana jest do podstacji analizowanej PT1, a część energii przesyłana jest do podstacji sąsiedniej PTO lub PT2. Aby energia z hamowania została przesłana do zasobnika podstacji, napięcie w punkcie rekuperacji musi być odpowiednio wyższe od napięcia w punkcie odbioru.

## Obliczenia energetyczne

Symulacje ruchu i obciążeń przeprowadzone zostały z krokiem czasowym 1-sekundowym, tak dla godzin szczytowego ruchu, jak i godzin pozaszczytowych. W wyniku obliczeń uzyskane zostały całkowite roczne ilości energii pobranej z systemu zasilania, jak i ilości energii zaoszczędzonej dzięki zasobnikom o określonej pojemności energetycznej, zainstalowanym w podstacji trakcyjnej PTO. Poniżej przedstawiono wyniki analizy oszczędności energii, przeprowadzone dla przyjętego przykładowego odcinka jednotorowego układu zasilania z zasobnikiem umieszczonym w podstacji węzłowej PTO.

Analiza prowadzona jest przy uśrednionych parametrach dla kolejnych kroków czasowych  $\Delta t$ . Dane dla analizy energetycznej uzyskano z programu obliczającego napięcia, prądy, moce na pantografach pociągów w zależności od czasu i położenia w układzie zasilania [22, 23, 25]. Prąd hamowania odzyskowego jest zależny od napięcia rekuperacji na pantografie pojazdu. Średnia wartość napięcia  $U_r$  zależy od rezystancji na drodze: hamujący pociąg (dostawca energii) – odbiór energii, czyli w praktyce od odległości hamującego pojazdu do miejsca odbioru energii:

$$I_{hs} = \frac{P_{hs}}{U_{rs}} \quad (1)$$

gdzie :

$U_{rs}$  – średnie napięcie na pantografie podczas hamowania pociągu na odcinku toru,

$P_{hs}$  – średnia moc uzyskiwana na pantografie podczas hamowania pociągu na danym odcinku toru,

$I_{hs}$  – średni prąd podczas hamowania pociągu na danym odcinku toru.

Prąd pobierany z analizowanej podstacji uzależniony jest od położenia pociągu, jego mocy i strat w sieci trakcyjnej. Podobnie jest z prądem docierającym do podstacji z hamującego pociągu.

$$I_{pos} = \frac{P_{pos}}{U_{pos}} \quad (2)$$

gdzie :

$U_{pos}$  – średnie napięcie na pantografie podczas poboru prądu przez pociąg na odcinku toru,

$P_{pos}$  – średnia moc pobierana przez pociąg na odcinku toru,

$I_{pos}$  – średni prąd pobierany przez pociąg na odcinku toru.

Do obliczeń można wykorzystać współczynnik rozdziału prądu między podstacjami pracującymi w układzie zasilania dwustronnego.

$$I_{top} = I_{hs} \cdot S_{to} \quad (3)$$

$$I_{top} = -I_{pos} \cdot S_{to} \quad (4)$$

gdzie:

$I_{top}$  – wielkość prądu dostarczanego do podstacji przy hamowania pociągu (+) lub pobieranego z podstacji przez pociąg (-),

$S_{to}$  – stopień transmisji prądu z pociągu do analizowanej podstacji z danego odcinka toru.

Stopień transmisji energii między pociągiem a podstacją jest zależny od położenia odcinka względem sąsiednich podstacji. Bezpośrednio zależy od rezystancji wewnętrznych podstacji i rezystancji odcinków sieci trakcyjnych między pociągiem a podstacjami trakcyjnymi. Uśrednianie warunków przepływów prądów wiąże się z przyjęciem uśrednionych napięć w podstacjach. Napięcia jałowe w podstacjach w rzeczywistości wahają się, lecz w długich okresach oscylują wokół pewnej wartości średniej.

Współczynnik  $S_{to}$  wielkości rozplywu prądu do podstacji analizowanej:

$$S_{to} = \frac{R_{p1} + R_{to}}{R_{p1} + R_{mp} + R_{p2}} \quad (5)$$

gdzie:

$R_{p1}$  – rezystancja zastępcza analizowanej podstacji,

$R_{p2}$  – rezystancja zastępcza sąsiedniej podstacji,

$R_{to}$  – rezystancja odcinków sieci od analizowanej podstacji do położenia pociągu,

$R_{mp}$  – rezystancja odcinka sieci między podstacjami.

Prąd pobierany lub dostarczany do podstacji jest sumą prądów ze wszystkich odcinków wszystkich torów, których sieci są bezpośrednio połączone z analizowaną podstacją.

$$I_p = \sum_{k=1}^{k=n} I_{topk} \quad (6)$$

gdzie:

$I_p$  – prąd sumaryczny w analizowanej podstacji z sieci trakcyjnych wszystkich torów,

$n$  – liczba wszystkich odcinków wszystkich torów zasilanych z podstacji.

Napięcie zastępcze jałowe podstacji wynika z przyjętego algorytmu pracy PT. Jest to kryterium pracy zasobnika. Przy napięciu niższym od  $U_j$  zasobnik jest rozładowywany. Przy napięciu wyższym od  $U_j$  zasobnik jest ładowany. Algorytm pracy zasobników może być bardziej skomplikowany i zależny zarówno od obciążeń podstacji, jak i napięć zasilających z systemu elektroenergetycznego. Zasobnik wraz ze sterownikiem musi się również charakteryzować odpowiednią mocą przetwarzania energii. Sterowanie przepływem energii do i z zasobnika musi następować przy obu kierunkach przepływu energii. Moc maksymalna dla sterownika zasobnika podczas procesu ładowania i rozładowania wyznaczone jest według zależności:

$$P_{i \max} = \text{Max}\{P_i\}_{i=1}^{i=m} \quad (7)$$

W każdym kolejnym przedziale czasu  $i$  o długości  $\Delta t$  do podstacji dostarczana jest z sieci trakcyjnych energia  $E_r$  o wartości (+) lub z niej pobierana i przekazywana do sieci (-). Energia w każdym przedziale czasu  $\Delta t$  jest zależna od mocy.

$$E_{ri} = P_{pi} \cdot \Delta t \quad (8)$$

Energia całkowita  $E_{pob}$  pobierana przez podstacje z systemu elektroenergetycznego (SE) obliczana jest w kolejnych krokach:

$$E_{pob} = -\sum_{i=1}^{i=m} \frac{E_{ri}}{\eta_{ps}} \quad (9)$$

– dla  $E_{ri}$  tylko pobieranej (-),  
gdzie  $\eta_{ps}$  – sprawność przesyłu i przetwarzania energii z SE AC do szyn DC w PT.

Zasobnik superkondensatorowy cechuje wysoka sprawność ładowania  $\eta_{zsl}$  i rozładowania  $\eta_{zsr}$  rzędu 92–99% [1, 2, 4, 8], łącznie z układem przekształtnika energoelektronicznego. Nowoczesny zasobnik wykonany z akumulatorów litowych hybrydowych osiąga sprawność na poziomie 90–95%, więc niewiele niższą niż zasobnik superkondensatorowy. W przypadku stosowania zasobnika o znacznie niższym napięciu niż napięcie sieci trakcyjnej (w szczególności odnosi się to do systemu trakcji kolejowej 3 kV DC) wymagane będzie stosowanie separacji transformatorowej lub przekształtnika o przewymiarowanych parametrach prądowych, co spowoduje obniżenie sprawności. Dla zgromadzenia całej dostępnej energii zasobnik musi mieć odpowiednią pojemność oraz określoną moc. Obliczenia pozwalają na określenie wymaganej pojemności zasobnika, który jest w stanie przejmować energię w każdej sytuacji ruchowej. Przeprowadzone zostały obliczenia ilości energii  $E_{zspi}$  (po uwzględnieniu sprawności w układzie) ładującej lub rozładowującej zasobnik  $Z_s$  w każdym kroku czasowym. Jeżeli  $E_{ri} > 0$  to

$$E_{zspi} = E_{ri} \cdot \eta_{zsl} \quad (10)$$

Jeżeli  $E_{ri} < 0$  to

$$E_{zsi+1} = \frac{E_{ri}}{\eta_{zsr}} \quad (11)$$

gdzie:

$\eta_{zsl}$  – sprawność ładowania energii do zasobnika,  
 $\eta_{zsr}$  – sprawność rozładowania energii z zasobnika.

Aby zminimalizować wymaganą pojemność zasobnika, należy stosować algorytm z priorytetem rozładowania. Zasobnik jest rozładowywany przez każdy pobór energii. Zasobnik ma priorytet w zasilaniu odbiorów przed zasilaniem z prostowników trakcyjnych, a ładowany jest tylko wówczas, gdy występuje nadwyżka energii hamowania odzyskowego nad energią pobieraną z sieci przez pojazdy. Chwilowy stan naładowania zasobnika  $E_{zsi+1}$  wyznaczany jest w każdym kroku czasowym. Zasobnik będzie przez większą część czasu rozładowany. Znajduje się on wtedy w stanie gotowości na przyjęcie maksymalnej ilości energii.

Jeżeli  $E_{zsi} + E_{zspi+1} > 0$  to

$$E_{zsi+1} = E_{zsi} + E_{zspi+1} \quad (12)$$

Jeżeli  $E_{zsi} + E_{zspi+1} \leq 0$  to

$$E_{zsi+1} = 0 \quad (13)$$

Pojemność maksymalna zasobnika  $Z_{s1}$  wyznaczana jest jako wartość maksymalna energii  $E_{zsm}$  wynikającej z sumy kroczącej energii ładowanej do zasobnika i rozładowywanej z niego.

$$P_{zsm} = \text{Max}\{E_{zsi}\}_{i=1}^{i=m} \quad (14)$$

Zastosowanie zasobnika  $Z_{s1}$  o pojemności  $E_{zsm}$  pozwala na zaoszczędzenie pewnej ilości energii, bilansowanej w danym okresie, np. roku. Ilość zaoszczędzonej energii jest nieznacznie większa niż ilość energii pobranej z zasobnika. Wynika to z pominięcia strat przesyłu energii z SE oraz strat przetwarzania energii w PT. Ilość energii  $E_{psi}$  zaoszczędzonej w kolejnym cyklu wyznaczana jest z poniższej zależności.

Jeżeli  $E_{zspi} > 0$  to

$$E_{psi} = \frac{E_{zspi} \cdot \eta_{zsr1}}{\eta_{ps}} \quad (15)$$

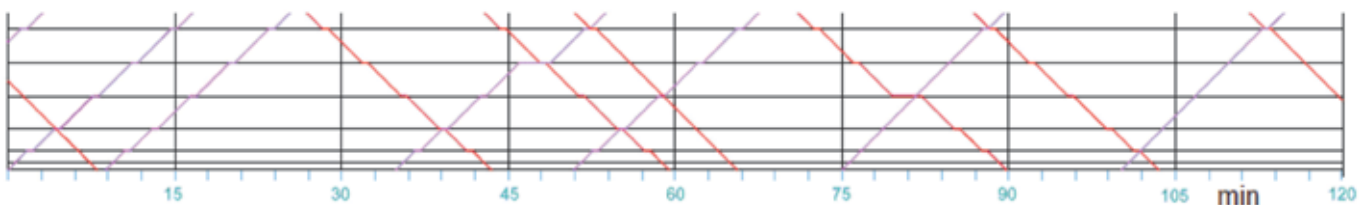
Ilość energii  $E_{pcs}$  zaoszczędzonej rocznie dzięki zasobnikowi  $Z_{s1}$  o pojemność  $E_{zsm}$  jest sumą ilości energii zaoszczędzonej w kolejnych powtórzeniach rozkładu jazdy.

$$E_{pcs} = \left( \sum_{j=1}^{j=m} E_{psi} \right) L_r \quad (16)$$

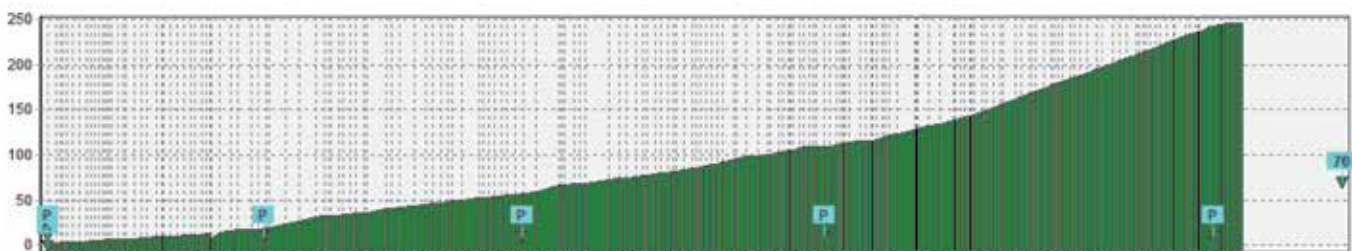
gdzie:

$L_r$  – roczna liczba powtórzeń rozkładów jazdy.

Wzrost pojemności powyżej maksymalnej gromadzonej zapewni przyrost ilości energii na poziomie pojedynczych procentów, ale wymaga to poniesienia dużych kosztów inwestycyjnych. Najczęściej gromadzona w zasobniku  $Z_s$  jest energia do poziomu poniżej 50% pojemności  $E_{zsm}$ . Ilość odzyskiwanej energii będzie malała wolniej niż pojemność zasobnika. Energia odzyskiwana od chwili pełnego naładowania zasobnika  $Z_{sj}$  musi być wytracona



Rys. 1. Przyjęty szczytowy rozkład jazdy



Rys. 2. Przyjęty profil analizowanego odcinka

na rezystorach hamowania. Obliczenia przeprowadzone zostały również dla pojemności zasobników mniejszych od wartości  $E_{zsm}$ .

Obliczone zostały również procentowe stopnie odzysku energii w stosunku do energii zużytej.

$$O_{psj} = \frac{E_{pcsj} \cdot 100}{E_{pob}} \quad (17)$$

## Oszczędność energii

W analizowanym studium przypadku przyjęto ruch następujących pociągów:

- P1 – zespół trakcyjny o mocy 4 MW,
- P2 – pociąg o masie 500 t z lokomotywą 6 MW,
- T1 – pociąg towarowy o masie 1250 t z lokomotywą 6 MW.

Ruch o średnim natężeniu przy jeździe oszczędnej 44 pociągów w ciągu doby roboczej, 4 pociągi w godzinie szczytu (rys. 1) jazda pociągów w układzie grupowym. Przejazd między stacjami po kilka pociągów w jednym kierunku na trasie o charakterze górskim (rys. 2 – maks. profil powyżej 20 promili).

W analizie wykorzystane zostały wyniki symulacyjne, odwierciedlające przejazdy pociągów wg 2 rozkładów jazdy i pobierane przez nie moce (prądy) w funkcji czasu i położenia (rys. 3, 4). Dla każdego kroku czasowego został wyliczony prąd płynący do podstacji lub z niej pobierany dla każdego z 8 torów.

Wyznaczone parametry maksymalne w podstacji:

- ❖ maksymalny prąd dostarczany w trakcie hamowania odzyskowego – 1 kA,

- ❖ maksymalna moc w podstacji w trakcie hamowania odzyskowego – 3,3 MW.

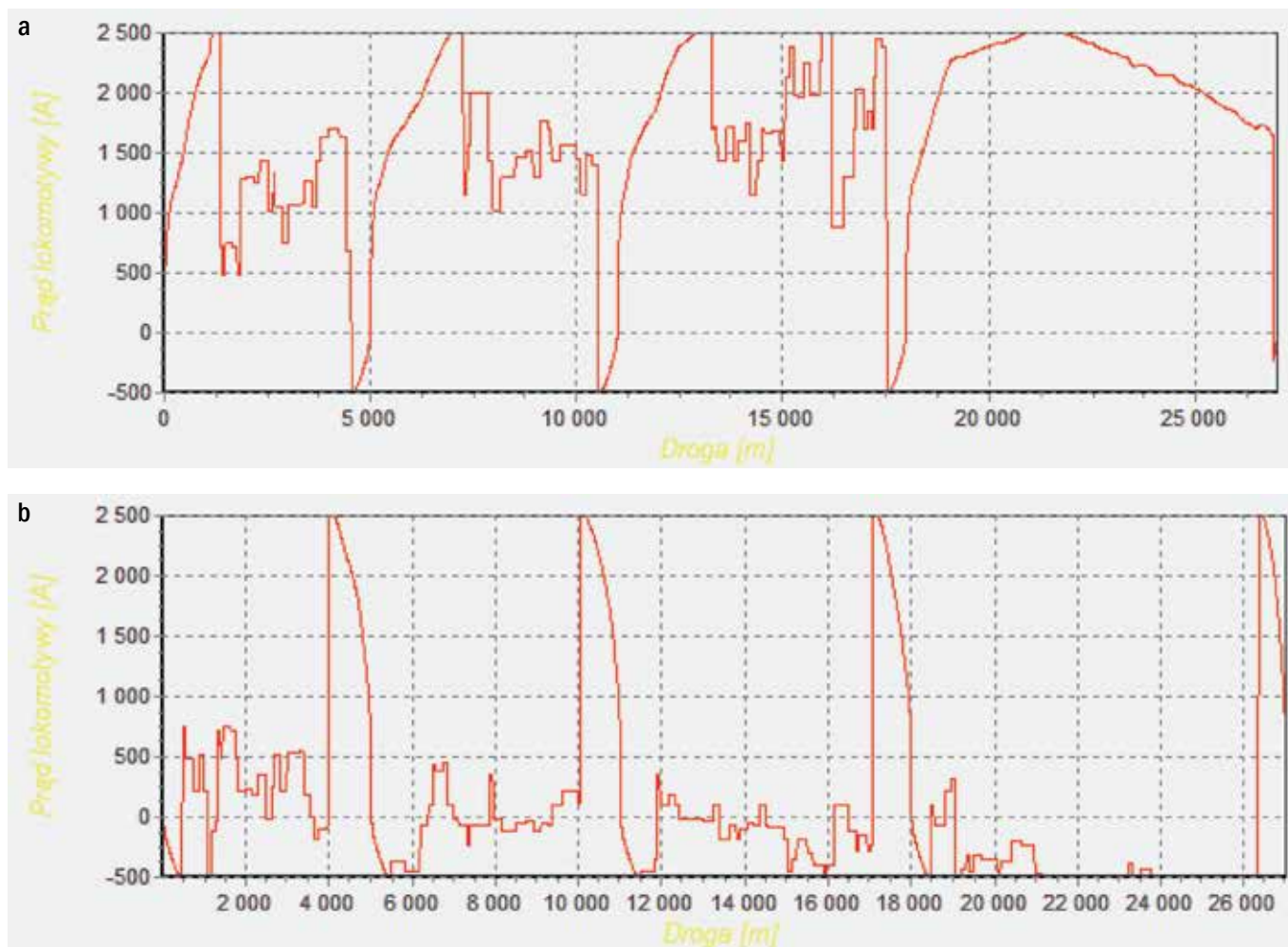
Te same przejazdy pociągów wykorzystane zostały do obliczeń dla różnych pojemności energetycznych zasobników – od 20% do 100% pojemności maksymalnej [23]. Dla różnych pojemności – przy identycznej ilości energii hamowania odzyskowego docierającej do podstacji – oszczędności energetyczne są różne w zależności od rodzaju ruchu. Stwierdzona została bardzo wysoka wrażliwość wyników na rozkład i sposób jazdy. Roczny pobór energii z PT1 na tych odcinkach wyniósł 5 475 MWh. Dzięki zastosowaniu zasobnika superkondensatorowego może zostać zaoszczędzone 377 MWh. Oszczędność względna energii, w stosunku do pobranej z podstacji, wynosi maksymalnie 6,9%. Przy zastosowaniu zasobnika z akumulatorem litowym może zostać zaoszczędzone 354 MWh.

Pojemności energetyczne zasobnika superkondensatorowego zmieniane były w zakresie od 53,1 kWh do 10,6 kWh. Największa pojemność umożliwia wykorzystanie całej energii dostarczanej do PT1, a przy mniejszej pojemności część energii musi zostać wytracona w rezystorach.

W przypadku zasobnika z akumulatorami litowymi ilość energii różniła się w niewielkim stopniu, co wiąże się z mniejszą sprawnością akumulatorów litowych niż superkondensatorów. Wymagana pojemność akumulatorów litowych jest wielokrotnie większa. Wy-



Rys. 3. Prąd pociągu typu P1 przy jeździe – a) tam: 0–26 000 m, b) powrót: 26 000–0 m



Rys. 4. Prąd pociągu typu T1 przy jeździe – a) tam: 0–26 000 m, b) powrót: 26 000–0 m

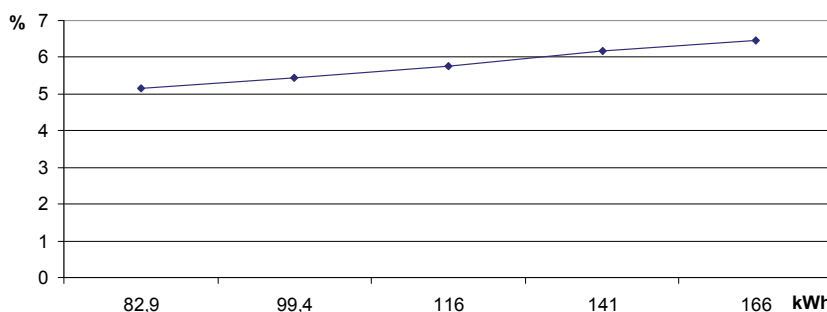
nika to z wielokrotnie mniejszej mocy ładowania i rozładowania akumulatora litowego w stosunku do superkondensatorów.

Przeprowadzona dodatkowo analiza ekonomiczna wykazała, że przy cenie szybkich akumulatorów litowych poniżej 1200 \$/kWh staje się opłacalne stosowanie takich akumulatorów. Taki poziom cen zostanie uzyskany w ciągu kilku najbliższych lat. Jednocześnie większa pojemność takiego zasobnika pozwala na zmniejszenie mocy maksymalnej pobieranej z systemu zasilania podstacji trakcyjnej.

### Wnioski

Przed podjęciem decyzji o instalacji zasobników wskazane jest indywidualne analizowanie poszczególnych podstacji trakcyjnych PT. Zmniejszenie pojemności zasobników o 50%, w stosunku do maksymalnej wymaganej, tylko w niewielkim stopniu obniża ilość zaoszczędzonej energii, ale znacznie obniży koszty inwestycyjne. Korzystne są także perspektywy rozwoju technologii wykonania podzespołów dla zasobników. Zauważalny jest wzrost produkcji i spadek ceny podstawowych elementów superkondensatorów, jak i elementów energoelektronicznych dużej mocy (tranzystorów IGBT). Ulepszane są parametry tych elementów. Prowadzi to do obniżki przyszłych kosztów. Wzrost cen energii elektrycznej będzie zwiększał efekt finansowy, a dodatkowo względy

środowiskowe poprawią efekt ekonomiczny. Istnieje dość duże prawdopodobieństwo, że realizacja systemów 3kV DC z zasobnikiem w krótkim czasie będzie uzasadniona. Energia z zasobnika jest wykorzystywana do zasilania pociągów, zmniejsza także pobór mocy szczytowej, a praca systemu z zasobnikiem nie jest uzależniona od technicznych, jak i prawnych, czynników zewnętrznych, występujących poza linią kolejową, jak w przypadku falowników (np. od zgody dostawcy energii). Zespół zasobnika o dużej pojemności, oprócz obniżenia zużycia energii, pozwoli na zmniejszenie mocy maksymalnej pobieranej z systemu elektroenergetycznego. Uzyskanie powyższego efektu umożliwi wprowadzenie do podstacji akumulatorów litowych szybkiego ładowania. Akumulatory te wykazywać będą się również wystarczającą trwałością.



Rys. 5. Zależność względnej oszczędności energii w % od pojemności zasobnika akumulatorowego litowego w kWh

## Bibliografia:

1. ABB Review. ENVILINE™ ESS voltage support case study How can Rail Transit Authorities mitigate voltage issues due to increased power demand?, ABB edition 10.2014.
2. ABB Review. SEPTA's (Southeastern Pennsylvania Transit Authority) Wayside Energy Storage Project, ABB edition 06.2014.
3. Bartłomiejczyk M., Mirchevski S., Reducing of energy consumption in public transport – results of experimental exploitation of super capacitor energy bank in Gdynia trolleybus system, PEMC 2014 Conference, Antalya 2014.
4. Biczal P., Hybrid energy storage systems in electric traction, Modern Electrified Transport – MET'2015 Conference, Trogir 2015.
5. Buchta K., A. Szelać A., Zastosowanie metod statystyczno-probabilistycznych do oceny napięcia w sieciach trakcyjnych 3 kV DC, 7 Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nowoczesna trakcja elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku”, Warszawa 2005.
6. Drabek P., Streit L., The energy storage system for light traction based on supercapacitors, IEEE, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2012.
7. Flywheel energy storage technology overview: <http://www.flywheelenergysystems.com/flywheel-technology.html> (dostęp z dnia 18.08.2015 r.).
8. Giziński Z., Zuławnik M., Giziński P., Zasobniki kondensatorowe w pojazdach komunikacji miejskiej, Instytut Elektrotechniki, Zakład Trakcji Elektrycznej: <http://www.iel.wroc.pl/files/defaultdphki8408o5si4/gizinski.pdf> (dostęp z dnia 4.06.2015 r.).
9. Juda Z., Zastosowanie superkondensatorów w układzie odzysku energii pojazdu z napędem elektrycznym, „Czasopismo Techniczne. Mechanika” 2008, R. 105, z. 6-M.
10. Krawczyk G., Akumulacja energii w transporcie szynowym, „Logistyka” 2012, nr 3.
11. Maciołek T., Drażek Z., Tram vehicle energy accumulator - on board or in substation, International Conference SPEEDAM 2004, Capri 2004.
12. Maciołek T., Szelać A., Drażek Z., Analysis of effectiveness of energy storage application on a railway line supplied by a 3 kV DC system, Modern Electrified Transport – MET'2015 Conference, Trogir 2015.
13. Mierzejewski L., Szelać A., Aktualne kierunki ograniczania zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym, „Technika Transportu Szynowego” 2004, nr 7–8.
14. Orzyłowski M., Lewandowski M., Zastosowanie rachunku różniczkowego ułamkowego rzędu do modelowania dynamiki superkondensatorów, „Przegląd Elektrotechniczny” 2014, R. 90, nr 8.
15. Pawelski Z., Napęd hybrydowy dla autobusu miejskiego, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1996.
16. Pawełczyk M., Rozwój systemów wykorzystujących akumulację energii w transporcie szynowym, „Pojazdy Szynowe” 2011, nr 2.
17. Rawicki S., Semi-automatic control of tram vehicle with intent to attain minimum electric energy use, „Przegląd Elektrotechniczny” 2009, nr 7.
18. Raczyński J., Pierwszy w Polsce tramwaj hybrydowy, „Technika Transportu Szynowego” 2005, nr 10.
19. Solarek T., Ocena celowości stosowania w taborze trakcji tramwajowej kondensatorowych zasobników energii hamowania odzyskowego, „Technika Transportu Szynowego” 2009, nr 12.
20. Szelać A., Efektywność hamowania odzyskowego w zelektryfikowanym transporcie szynowym, „Pojazdy Szynowe” 2009, nr 4.
21. Szelać A., Maciołek T., A 3 kV DC electric traction system modernisation for increased speed and trains power demand-problems of analysis and synthesis, „Przegląd Elektrotechniczny” 2013, nr 3a.
22. Szelać A., Maciołek T., Drażek Z., Patoka M., Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej, „Pojazdy Szynowe” 2011, nr 3.
23. Szelać A., Maciołek T., Rozwiązania techniczne w układach zasilania poprawiające efektywność energetyczną transportu szynowego, „Pojazdy Szynowe” 2015, nr 3.
24. Szelać A., Mierzejewski L., Ground transportation systems, [in:] *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Supplement I John Wiley & Sons Inc., New York 1999.
25. Szelać A., Mierzejewski L., Modelling and verification of simulation results in computer aided analysis of electric traction systems, COMPRAIL 2000, Computers in railways VII, WIT Press, Bologna 2000.
26. Szelać A., Wpływ napięcia w sieci trakcyjnej 3 kV DC na parametry energetyczno-trakcyjne zasilanych pojazdów, Instytut Naukowo-Wydawniczy „Spatium”, Radom 2013.
27. Szelać A., Zwiększanie efektywności energetycznej transportu szynowego, „Technika Transportu Szynowego” 2008, nr 12.
28. Zhang Y., Wu L., Hu X., Liang H., Model and Control of Supercapacitor-Based Energy Storage System for Metro Vehicles, In Proceedings of 11th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2008), Wuhan 2008.

## Autor:

doc. dr inż. **Tadeusz Maciołek** – Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych, Zakład Trakcji Elektrycznej

## Z OFERTY WYDAWNICZEJ



### Komunikacja miejska w Łodzi 1898-2013

Liczba stron: 184, format: 21×27 cm,  
Oprawa: twarda, szyta, rok wydania: 2013  
Cena 65,00 zł (w tym 5% VAT)

Książka jest albumowym opracowaniem historii komunikacji miejskiej i podmiejskiej Łodzi. W pierwszej części książki omówiono rozwój komunikacji tramwajowej Łodzi od jej powstania w końcu XIX w. do II wojny światowej. W kolejnych rozdziałach książki przedstawiono komunikację tramwajową w okresie II wojny światowej i w okresie powojennym.

Zagadnienia prezentowane w albumie *Komunikacja miejska w Łodzi 1898-2013* zilustrowano kilkuset fotografiami. Wiele z nich opublikowano po raz pierwszy.

Pełna oferta wydawnicza na stronie [www.inw-spatium.pl](http://www.inw-spatium.pl)