

Mikołaj Bartłomiejczyk, Marcin Połom, Krzysztof Staroński,

Próbną eksploatacja zasobnika superkondensatorowego w gdyńskiej sieci trolejbusowej

W ciągu ostatnich lat elementem wyposażenia elektrycznych pojazdów komunikacji miejskiej stały się układy napędowe umożliwiające hamowanie odzyskowe (rekuperacyjne) [5]. Podstacje trakcyjne w Polsce nie są wyposażone w układy akumulacji energii z rekuperującego pojazdu. Możliwe jest wykorzystanie energii pochodzącej z hamowania odzyskowego jedynie, gdy w danym momencie znajduje się w tym samym obszarze zasilania inny pojazd mający możliwość jej zaabsorbowania. Mając na względzie szybkie zwiększenie liczby pojazdów wyposażonych w możliwość hamowania odzyskowego uzasadnione staje się podjęcie kroków zwiększających stopień wykorzystania energii rekuperacji.

W 2009 r. Przedsiębiorstwo Komunikacji Trolejbusowej Sp. z o.o. w Gdyni (PKT) nawiązało współpracę z Zakładem Trakcji Instytutu Elektrotechniki w Warszawie (IEL) celem wprowadzenia do testowej eksploatacji zasobnika superkondensatorowego umieszczonego na jednej z gdyńskich podstacji trakcyjnych. Zadaniem urządzenia miała być akumulacja energii hamowania odzyskowego. „Gdyński” zasobnik zamontowano w kwietniu 2011 r.

Zaprezentowane badania miały na celu przedstawienie empirycznego modelu wyznaczenia potencjału oszczędności zużycia energii przez zasobnik superkondensatorowy w zależności od intensywności ruchu pojazdów. Przedstawiono także sposób przeprowadzania pomiarów i uzyskane rejestracje zużycia energii, jak również normalizację wyników pomiarów związaną z niwelacją wpływu warunków pogodowych i obsługi taborowej oraz zaprezentowano zależność czasu zwrotu inwestycji od intensywności ruchu pojazdów.

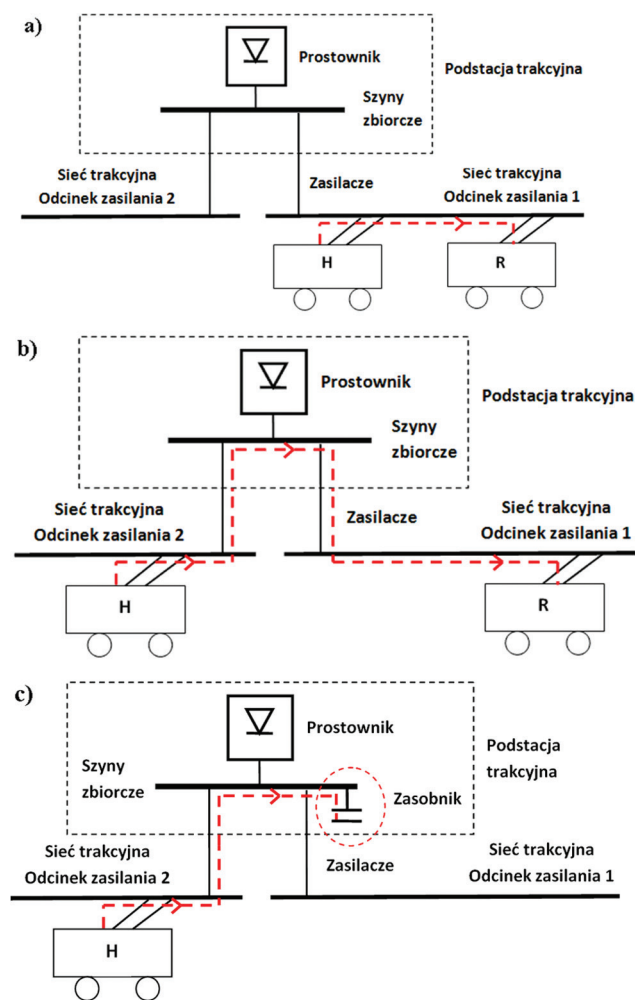
Przepływ energii hamowania odzyskowego

W klasycznym układzie zasilania, w którym podstacje nie są wyposażone w urządzenia akumulujące energię, przepływ prądu hamowania rekuperacyjnego może odbywać się dwiema drogami [1, 2] na drodze:

- pojazd – sieć trakcyjna – pojazd, gdy pojazd hamujący i ruszający znajdują się na jednym odcinku zasilania (rys. 1a),
- pojazd – sieć trakcyjna – zasilacz – szyny zbiorcze podstacji trakcyjnej – zasilacz – sieć trakcyjna – pojazd, gdy pojazdy znajdują się na dwóch odcinkach zasilania (rys. 1b).

Prawdopodobieństwo przepływu energii odzysku na drugiej drodze zwiększa się wraz z liczbą zasilaczy w podstacji trakcyjnej [3], co powoduje wzrost efektywności rekuperacji. Odwrotnie, w przypadku niewielkich podstacji, zasilających 1 lub 2 zasilacze, prawdopodobieństwo wystąpienia odzysku energii na drodze po-

jazd – pojazd staje się mniejsze. W takim przypadku uzasadnione jest zastosowanie urządzeń akumulujących energię elektryczną.



Rys. 1. Drogi przepływu energii hamowania odzyskowego w klasycznych podstacjach trakcyjnych (a, b) i podstacji wyposażonej w zasobnik energii (c); kolorem czerwonym oznaczono prąd rekuperacji, H – trolejbus hamujący, R – trolejbus pobierający energię

Zainstalowany zasobnik

Testowany zasobnik zainstalowano w trolejbusowej podstacji trakcyjnej (PT) Północna. Jest to dwuzespołowa podstacja trakcyjna, która była poddana całkowitej modernizacji w sierpniu 2010 r. Wyposażona jest ona w dwa zespoły prostownikowe o mocy transformatorów 1200 kVA każdy i zasila 6 zasilaczy. Obecnie jest to największa podstacja trakcyjna w gdyńskiej sieci trolejbusowej. Zasobnik ten umieszczono w miejscu przeznaczono-

nym na ewentualną instalację trzeciego zespołu prostownikowego (rys. 2).

Zasobnik składa się z następujących zasadniczych elementów (rys. 3):

- modułu wejściowego, zawierającego zabezpieczenia oraz filtr wejściowy (F1, X0, CF1);
- przekształtnika DC / DC podwyższająco-obniżającego napięcie (T0, T1, T2, D0, CF2, X1) o mocy 150 kW;
- czterech modułów superkondensatorowych LS MTron 201,6 V 41 F (SC1);
- rezystora rozładowczego superkondensatorów R2;
- układu sterowania.

Pojemność energetyczna obecnie zainstalowanych modułów superkondensatorowych wynosi 0,7 kWh.

Algorytm pracy zasobnika oparty jest na pomiarze napięcia szyn zbiorczych podstacji trakcyjnej oraz prądu zespołów prostownikowych. Podstawowym kryterium jest napięcie szyn zbiorczych. Pomiar prądu zespołów prostownikowych służy do uniknięcia ładowania się zasobnika kondensatorowego z prostowników podstacji trakcyjnej.

Pomiary pracy zasobnika

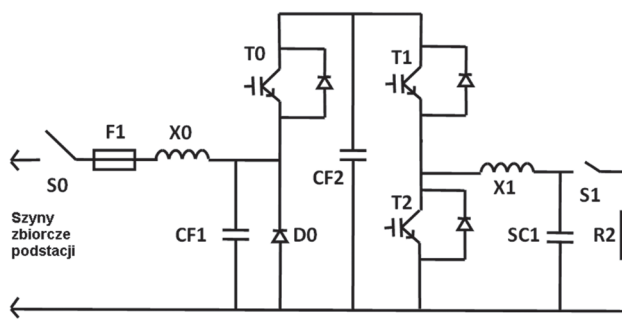
Lokalizacja zasobnika na podstacji Północnej była podyktowana względami organizacyjno-eksploatacyjnymi, lecz z energetycznego punktu widzenia podstacja ta nie jest optymalna dla celów instalacji zasobnika [4]. PT Północna charakteryzuje się rozległym obszarem zasilania, na którym porusza się znaczna liczba pojazdów, co zwiększa prawdopodobieństwo przepływu energii hamowania odzyskowego na drodze pojazd – pojazd. W związku z tym ilość niewykorzystanej energii rekuperacji jest niewielka i instalacja zasobnika superkondensatorowego staje się nieefektywna. Chcąc przeprowadzić badania pracy zasobnika dla możliwie największego zakresu warunków ruchowych zmodyfikowano układ pracy podstacji trakcyjnej, co polegało na blokadzie przepływu energii hamowania odzyskowego między poszczególnymi zasilaczami (rys 1b). Dzięki takiemu rozwiązaniu stały się możliwe badania pracy zasobnika akumulującego energię hamowania odzyskowego tylko z jednego zasilacza (rys 1a), przez co stworzono warunki występujące w podstacji trakcyjnej wyposażonej w jeden zasilacz. Modyfikacja polegała na umieszczeniu diody D w polu wyłącznika rezerwowego WSR. Uproszczony schemat rozdzielnic prądu stałego wraz z wprowadzoną modyfikacją przedstawiono na rysunku 4.

W stanie normalnym energia elektryczna przepływa z zespołów prostownikowych, szynę główną SG podstacji, wyłącznik szybki WS pola zasilacza do zasilacza. W przypadku wystąpienia hamowania odzyskowego energia rekuperacji wpływa z zasilacza przez wyłącznik szybki WS na szynę główną SG i następnie absorbowana jest przez pozostałe zasilacze. W celu zablokowania przepływu energii odzysku z jednego z zasilaczy musi on zostać przetłączony do zasilania z pola zasilacza rezerwowego. Polega to na wyłączeniu wyłącznika szybkiego WS wybranego zasilacza, załączeniu odłącznika obejściowego OB. w polu zasilacza i załączeniu wyłącznika rezerwowego WSR. Wówczas dopływ energii do zasilacza odbywa się na drodze: zespoły prostownikowe – szyna główna SG – wyłącznik WSR – dioda D – szyna obejściowa SO – wyłącznik obejściowy OB – wybrany zasilacz. Dodatkowa dioda D uniemożliwia przepływ energii rekuperacji do pozostałych zasilaczy. W przypadku wystąpienia odzysku energii zwracana jest



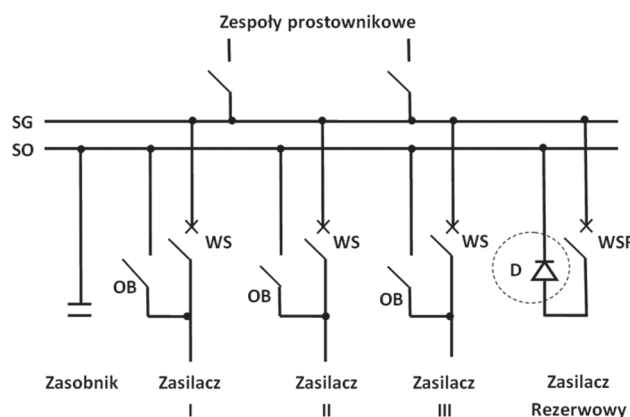
Rys. 2. Zasobnik superkondensatorowy zainstalowany w trolejbusowej podstacji trakcyjnej Północna w Gdyni

1 – moduły superkondensatorowe, 2 – przekształtnik DC/DC wraz z układem sterowania, 3 – moduł zabezpieczeń i filtra wejściowego



Rys. 3. Uproszczony schemat ideowy zasobnika

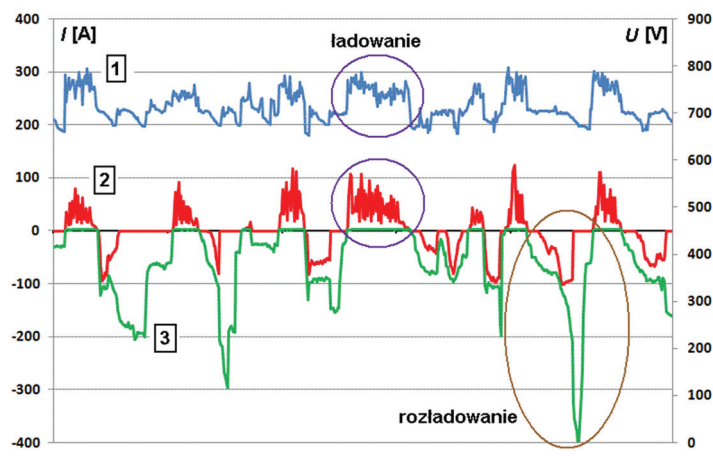
ona przez szynę obejściową SO do zasobnika. Dzięki temu możliwa staje się symulacja warunków pracy jakie występują w małej podstacji trakcyjnej, przy różnej intensywności ruchu drogowego w zależności od przyłączonego zasilacza.



Rys. 4. Uproszczony schemat rozdzielnic prądu stałego podstacji trakcyjnej wraz z wprowadzoną modyfikacją do celów badania zasobnika

Na rysunku 5 przedstawiono fragment rejestracji pracy zasobnika superkondensatorowego. Krzywe 1, 2, 3 oznaczają kolejno napięcie zasilacza, prąd zasobnika superkondensatorowego oraz prąd pobierany z szyn główne podstacji trakcyjnej SG (zespół prostownikowych). Dodatkna wartość prądu zasobnika

oznacza jego ładowanie, ujemna rozładowanie. Kolorem fioletowym zaznaczono jeden z momentów ładowania zasobnika superkondensatorowego energią hamowania odzyskowego. Widoczny jest wzrost napięcia zasilacza w momencie hamowania rekuperacyjnego. W momencie wystąpienia obciążenia zasilacza następuje rozładowanie zasobnika, obciążenie zasilacza rozkłada się między zasobnik superkondensatorowy i zespoły prostownikowe (zakreślenie na kolor brązowy).



Rys. 5. Fragment rejestracji pracy zasobnika superkondensatorowego

Względna wartość e oszczędności energii przez zasobnik może być zdefiniowana jako:

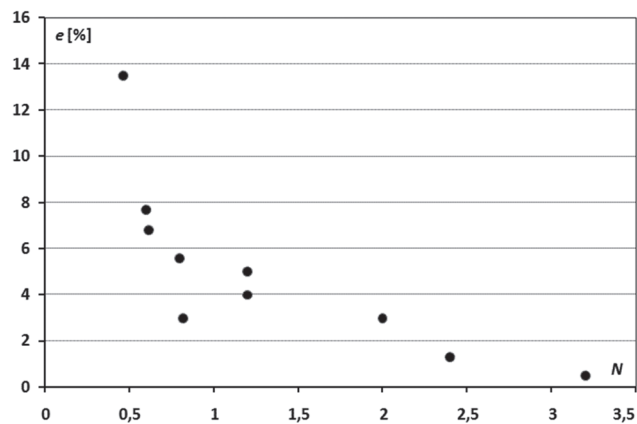
$$e = \frac{E_z}{E_{PT}} \quad (1)$$

gdzie:

E_z – ilość energii zakumulowane przez zasobnik w jednostce czasu,

E_{PT} – ilość energii pobranej z podstacji trakcyjnej w jednostce czasu.

Pomiary pracy zasobnika przeprowadzono dla poszczególnych zasilaczy PT Północna podczas dni roboczych oraz świątecznych. Tym sposobem uzyskano zależność wartości względnej oszczędności energii elektrycznej od średniej liczby pojazdów N znajdujących się na odcinku zasilania. Zależność tę przedstawiono na rysunku 6. Zgodnie z oczekiwaniami, zwiększenie liczby



Rys. 6. Zależność względnej oszczędności energii elektrycznej przez zasobnik e od średniej liczby pojazdów N znajdujących się na odcinku zasilania

pojazdów N powoduje zwiększenie prawdopodobieństwa wystąpienia przepływu energii rekuperacji na drodze pojazd – pojazd, a co za tym idzie, zmniejszenie stopnia wykorzystania zasobnika.

Normalizacja danych pomiarowych

Pomiary pracy zasobnika przeprowadzono w listopadzie i grudniu 2012 r. Okres wykonywania pomiarów wynikał z ograniczeń techniczno-eksploatacyjnych. W związku z tym istnieją różnice zarówno w warunkach pogodowych, jak i obsadzie taborowej linii w poszczególnych dniach wykonywania pomiarów. Efektem tego konieczna jest normalizacja danych, której zadaniem jest zniwelowanie różnic wynikających z odmiennych warunków pogodowych i ruchowych. Celem normalizacji jest wyznaczenie potencjału względnej oszczędności energii elektrycznej przez zasobnik w sytuacji wyposażenia parku taborowego wyłącznie w pojazdy posiadające hamowanie odzyskowe.

Normalizacja została oparta na następujących założeniach:

- ilość energii E_z zwracana do zasobnika w jednostce czasu jest proporcjonalna do udziału liczby pojazdów wyposażonych w odzysk energii w stosunku do wszystkich pojazdów znajdujących się w ruchu;
- ilość energii E_{PT} pobranej z podstacji trakcyjnej w jednostce czasu jest uzależniona od temperatury otoczenia – spadek temperatury otoczenia powoduje zwiększenie zużycia energii na ogrzewanie pojazdów.

Dla pierwszego założenia przyjęto, że całkowita ilość energii hamowania odzyskowego E_{ho} zwracana na określonym obszarze w jednostce czasu może być zdefiniowana jako:

$$E_{ho} = E_{hp} \cdot n_z \quad (2)$$

gdzie:

E_{hp} – średnia wartość energii zwracanej do sieci podczas jednego hamowania,

n_z – łączna liczba zatrzymań pojazdów w ciągu jednostki czasu, która jest proporcjonalna do liczby pojazdów w ruchu.

Założenie to wiąże się z powstaniem błędu, gdyż zwiększenie liczby pojazdów wyposażonych w rekuperację powoduje nie tylko zwiększenie ilości energii zwracanej do sieci, lecz także zmniejszenie jej wykorzystania przez inne pojazdy. Jednakże uproszczenie to powoduje powstanie błędu w „bezpieczną stronę”, tzn. w realnych warunkach potencjał akumulacji energii w zasobniku będzie większy niż wyznaczony analitycznie.

Potencjał względnej wartości e' oszczędności energii przez zasobnik, przy parku taborowym wyposażonym całkowicie w pojazdy z rekuperacją energii, może być określony jako:

$$e' = \frac{E_z}{k_t(T) \cdot k_p \cdot E_{PT}} \quad (3)$$

gdzie:

k_p – względna liczba pojazdów z odzyskiem energii w ruchu,

k_t – współczynnik wpływu temperatury na zużycie energii, zdefiniowany jako:

$$k_t(T) = \frac{E_d(T)}{E_{dr}} \quad (4)$$

gdzie:

$E_d(T)$ – dzienne zużycie energii przy średniej dobowej temperaturze T ,

E_{dr} – średnie zużycie energii w ciągu dnia.

Wartości k_f , k_p , E_z , E_{PT} są odniesione do dnia, w którym wykonywano pomiary.

Wartość współczynnika k_f wyznaczono na podstawie pomiarów zużycia energii w PKT Gdynia, opisany jest on zależnością:

$$k_f = 1,29 - 0,03T \quad (5)$$

W tabeli 1 przedstawiono warunki pogodowo-ruchowe panujące podczas wykonywania pomiarów pracy zasobnika.

Tabela 1

Warunki pogodowo ruchowe podczas przeprowadzania rejestracji pracy zasobnika

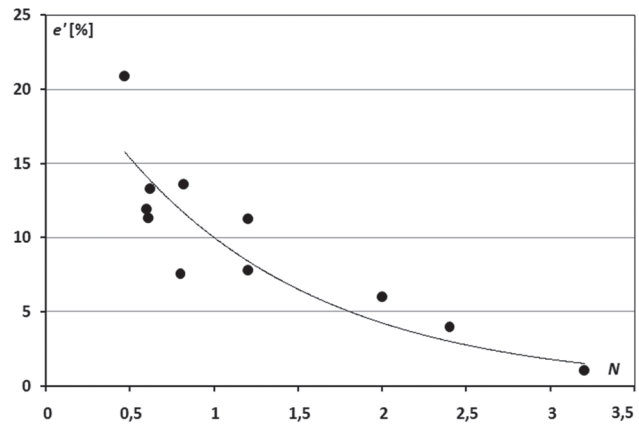
Dzień	Odcinek zasilania	k_p	T [°C]	k_f
19.11	Wiejska	0,50	5,5	1,13
21.11	Gazownia	0,59	5,0	1,14
22.11	Kcyńska	0,56	5,8	1,13
25.11	Gazownia	0,74	4,9	1,14
27.11	Gazownia	0,81	6,4	1,10
29.11	Wiejska + Kcyńska	0,54	5,6	1,12
03.12	Wiejska + Gazownia	0,50	-7,6	1,52
07.12	Gazownia	0,53	-2,4	1,36
09.12	Gazownia	0,73	-4,5	1,43
19.12	Pustki	0,29	-0,2	1,30

Na rysunku 7 przedstawiono znormalizowaną zależność względnej oszczędności energii elektrycznej przez zasobnik e' od średniej liczby pojazdów N znajdujących się na odcinku zasilania. Na jej podstawie, przyjmując koszt zakupu stacjonarnego zasobnika energii na poziomie 400 tys. zł i uśrednioną cenę energii elektrycznej wraz z opłatą przesyłową 400 zł za 1 MWh, sporządzono zależność czasu zwrotu inwestycji zakupu zasobnika t_{zw} od intensywności ruchu wyrażonej średnią liczbą pojazdów N znajdujących się na odcinku zasilania (rys. 8).

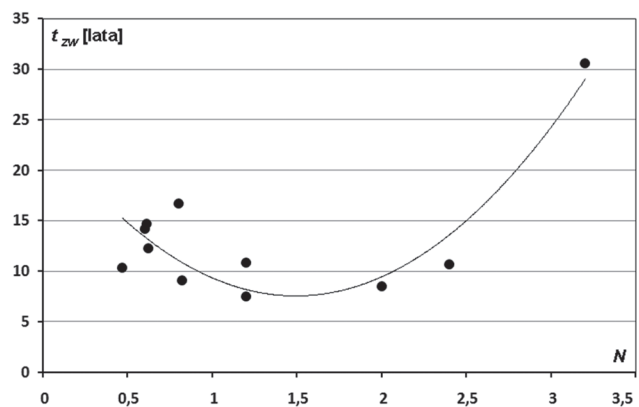
Wnioski

Efektywność oszczędności energii przez zasobnik superkondensatorowy jest ściśle uzależniona od warunków ruchowych. W przypadku dużej intensywności kursowania pojazdów zwiększa się prawdopodobieństwo wystąpienia przepływu energii hamowania odzyskowego na drodze pojazd – pojazd, co zmniejsza celowość instalacji zasobnika superkondensatorowego. Przy niezbyt intensywnym ruchu względna oszczędność energii po zainstalowaniu zasobnika jest znaczna, lecz ze względu na całkowite niewielkie jej zużycie wartość bezwzględna zaoszczędzonej energii jest nieznaczna, co także czyni niecelową instalację zasobnika superkondensatorowego. Z podsumowania wynika, że wyposażenie podstacji trakcyjnych w zasobnik energii elektrycznej jest uzasadnione przy intensywności ruchu pojazdów mieszczącej się w określonych granicach.

W środowisku osób zajmujących się energetyką trakcji miejskiej często niedoceniana jest możliwość rekuperacji energii elektrycznej na drodze pojazd – pojazd (rys. 1 a, b) i tym samym przeceniane są możliwości oszczędności energii wynikające z zainstalowania zasobnika. W polskich systemach transportowych, eksploatujących pojazdy elektryczne, dominuje zcentralizowany



Rys. 7. Zależność względnej oszczędności energii elektrycznej przez zasobnik e' od średniej liczby pojazdów N znajdujących się na odcinku zasilania



Rys. 8. Zależność czasu zwrotu inwestycji zakupu zasobnika podstawacyjnego od intensywności ruchu trolejbusów.

układ zasilania z rozległymi obszarami zasilania i znaczną liczbą pojazdów w ruchu. Można więc stwierdzić, że w takich warunkach korzyści z instalacji zasobnika będą nieznaczne. Instalacja zasobnika jest uzasadniona w przypadku niewielkich podstacji bądź terenów górskich [6].

Przedstawione pomiary przeprowadzono w trolejbusowym systemie energetycznym. W przypadku trakcji tramwajowej należy oczekiwać, że zależności między oszczędnością energii a intensywnością ruchu pojazdów będą zbliżone. Różnica będzie miała charakter ilościowy.

□

Literatura

- [1] Bartłomiejczyk M.: *Výpočet nap jen trolejbusových systémů metodou Monte Carlo*. XLII. Sešit Katedry Elektrotechniky. VŠB Ostrava, Ostrava 2010.
- [2] Bartłomiejczyk M.: *Analýza efektivnosti rekuperace trolejbusom dopravy metodou Monte Carlo*. XLIII. Sešit Katedry Elektrotechniky. VŠB Ostrava, Ostrava 2010.
- [3] Judek S., Skibicki J.: *Wyznaczenie parametrów elektrycznych trakcyjnego układu zasilania dla złożonych warunków ruchu przy wykorzystaniu programu pspice*. Przegląd Elektrotechniczny 12/2009, s. 270–273.
- [4] Gutten M.: *Diagnostic of Distribution Transformers by SFRA Method*. Przegląd Elektrotechniczny 4(83)/2007, s. 144–146.

- [5] Kobryń J.: *Kierunki rozwoju transportu w Polsce. Polityka gospodarcza i społeczna wobec wyzwań współczesności* (red.) M. Czapka i B. Klimas. Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji w Bytomiu, Bytom 2011, s. 224–231.
- [6] Kolar V., Paleček J., Kocman S., Trung Vo T., Orság P., Styskala V., Hrbac R.: *Interference between electric traction supply network and distribution power network – resonance phenomenon*. Paper presented at the ICHQP 2010 – 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ISBN 978-142447244-4. 2010.

Podziękowania

Autorzy artykułu serdecznie dziękują Fundacji „Agencja Regionalnego Monitoringu Atmosfery Aglomeracji Gdańskiej” ARMAAG z siedzibą w Gdańsku za udostępnienie danych o warunkach pogodowych.

dr inż. Mikołaj Bartłomiejczyk
Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu
Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska
mbartlom@ely.pg.gda.pl
Katedra elektrotechniki
Fakulta elektrotechniki a informatyki
VŠB - TU Ostrava (Republika Czeska)

mgr Marcin Polom
Katedra Geografii Rozwoju Regionalnego, Instytut Geografii,
Wydział Oceanografii i Geografii, Uniwersytet Gdański
geompo@univ.gda.pl

mgr inż. Krzysztof Staroński,
Zakład Trakcji Elektrycznej, Instytut Elektrotechniki w Warszawie,
k.staronski@iel.waw.pl

➤ Dokończenie ze s. 39

Urządzenia pojazdowe SHP aktualną informację o prędkości dozwolonej $vV(t)$ otrzymują w sposób punktowy, na początku odstępu blokowego lub w sposób ciągły na całej długości odstępu blokowego.

Przy transmisji punktowej informacja jest aktualna tylko w punkcie przekazywania. Jeżeli prędkość rzeczywista w tym punkcie przekracza prędkość dozwoloną, urządzenia SHP włączają hamowanie nagłe pociągu. Poza punktami przekazywania, czyli praktycznie na całej długości odstępu blokowego, prędkość bezpieczna jest szacowana przez maszynistę na podstawie wskazań semafora. Maszynista opowiada za bezpieczną jazdę pociągu poza punktami kontroli prędkości.

Przy transmisji ciągłej obwodem szynowym informacja o prędkości dozwolonej jest aktualizowana podczas jazdy na całym odstępie blokowym. Pociąg prowadzi maszynista, a w przypadku przekroczenia prędkości dozwolonej vV urządzenia SHP włączają hamowanie nagłe.

Systemy automatycznego ograniczania prędkości ATP działają na podstawie informacji przekazywanych dwoma kanałami:

- punktowym – prędkość dopuszczalna cV (parametry toru)
- ciągłym – prędkość dozwolona vV (wskazania semaforów).

Jeżeli prędkość rzeczywista zbliża się do prędkości bezpiecznej następuje kolejno:

- odłączenie napędu,
- włączenie hamowania służbowego,
- w razie potrzeby hamowania nagłego.

Za bezpieczeństwo ruchu odpowiada system ATP i kontroluje czynności wykonywane przez maszynistę.

W systemach ATP kontrolę niezajętości toru na szlakach – zdaniem autorów – powinno się dokonywać za pomocą współczesnych obwodów torowych, które również sprawdzają ciągłość szyn (toru). Na stacjach do kontroli niezajętości rozjazdów i torów głównych dodatkowym celem jest stosowanie liczników osi.

Informacje przekazywane tylko punktowo są podstawą działania rozwiązań starszych, takich jak niemieckie Indusi, czy francuskie KVB, a także i współczesnych, jak EBICAB, czy ETCS poziom 1. Jednakże większość nowoczesnych systemów korzysta

z informacji przekazywanych zarówno punktowo (informacje stałe w czasie), jak i w sposób ciągły (zmiennie w czasie). Chronologicznie biorąc pierwszym takim systemem był japoński system na linii Nowe Tokaido, kolejne to między innymi niemiecki LZB, francuski TVM, europejski ETCS poziom 2 i 3, a także polski system SOP, stosowany na liniach metra.



Literatura

- [1] Barański S., Karbowski H.: *Systemy automatycznego ograniczania prędkości ATP na sieci kolei i w metrze – analiza procesów*. Technika Transportu Szynowego 10/2012, Instytut Naukowo-Wydawniczy „TTS” Łódź 2012.
- [2] Barański S., Kubik S.: *System ATP typu SOP-2P dla linii A metra praskiego*. Materiały Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej Semtrak, Zakopane 2002.
- [3] Bergiel K., Karbowski H.: *Automatyzacja prowadzenia pociągu*. Wydawnictwo EMIPRESS, Łódź 2005.
- [4] Bergiel K., Karbowski H.: *Data transmission in automatic train protection systems with transmitting antenna covering many block sections*. Archiwum transportu nr 3/2006.
- [5] Dyduch J., Pawlik M.: *Systemy automatycznej jazdy pociągu*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2002.
- [6] Karbowski H.: *Kanały przekazywania informacji w systemach automatycznego ograniczania prędkości ATP*. Telekomunikacja i Sterowanie Ruchem 2/2009, Wydawnictwo EMIPRESS, Łódź 2009.
- [7] Karbowski H., Barański S.: *Bezpieczeństwo ruchu w transporcie*. Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź 2011
- [8] Karbowski H., Barański S.: *Nowe możliwości systemu przekazywania informacji do pojazdu trakcyjnego za pomocą obwodu szynowego przez zastosowanie cyfrowej modulacji fazy SPI-P*. Przegląd Kolejowy 2/1993.
- [9] Karbowski H., Barański S., Kubik S.: *Systemy automatycznego ograniczania prędkości – AOP (ATP) w metrze warszawskim i dla linii A metra Praga*. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Transport XXI wieku”, Politechnika Warszawska Wydział Transportu, Warszawa 2001.