



Mikołaj Bartłomiejczyk

## Mini Smart Grid system w trakcyjnym układzie zasilania

Przykład praktycznej implementacji rozwiązań Smart Grid w trakcji miejskiej: kontenerowa stacja przekształtnikowa łącząca tramwajowy i trolejbusowy układ zasilania, dodatkowo wyposażona w mały zasobnik energii. Pilzno, Republika Czeska, fot. M. Bartłomiejczyk

Wraz ze wzrostem liczby tramwajów i trolejbusów wyposażonych w hamowanie odzyskowe, wzrasta popularność urządzeń zwiększających efektywność odzysku energii. Są nimi głównie superkondensatorowe zasobniki energii oraz układy falownikowe umożliwiające zwrot energii do sieci prądu przemiennego. Jednak wysoka cena tych urządzeń oraz problemy prawno-organizacyjne stanowią znaczną barierę dla ich szerszego rozpowszechnienia. W artykule przedstawiono koncepcję rozwiązania prostszego, tańszego i łatwiejszego do praktycznej implementacji: wykorzystania energii odzysku dla zasilania potrzeb nietrakcyjnych, takich jak obiekty użyteczności publicznej lub aparatura dodatkowa związana z infrastrukturą komunikacyjną. W takim układzie, wykorzystanie energii rekuperacji może się odbywać wewnątrz przedsiębiorstwa na poziomie niskiego napięcia, co w znacznym stopniu upraszcza aspekty prawno-techniczne.

**Słowa kluczowe:** Trakcja elektryczna, trolejbusy, odzysk energii, oszczędność energii.

### Wstęp

Transport jest odpowiedzialny za blisko 30% całkowitej światowej konsumpcji energii. Co więcej, wraz z bogaceniem się społeczeństw i wzrostem potrzeb przewozowych, zużycie energii w sektorze transportowym wzrasta. Dlatego konieczne staje się wdrażanie technologii pozwalających na zmniejszenie jednostkowego zużycia energii. Dzięki rozwojowi energoelektroniki, napędów

energoelektronicznych oraz systemów gromadzenia energii, takie rozwiązania stały się dostępne dla pojazdów elektrycznych. Jednym z najbardziej obiecujących jest odzysk energii hamowania. Wzrost liczby tramwajów i trolejbusów wyposażonych w układy rekuperacji przyczynia się do zwiększenia odzysku energii podczas hamowania. Jednak systemy zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego cechują się ograniczoną możliwością przyjmowania energii rekuperacji i ze względu na jednokierunkowy przepływ energii w podstacjach trakcyjnych, nie ma możliwości zwrotu nadwyżki energii rekuperacji do otaczającej sieci energetycznej.

W standardowych układach zasilania sieci trakcyjnej prądu stałego odzysk energii odbywa się na drodze pojazd hamujący – pojazd ruszający, jednak w praktyce sposób ten pozwala tylko na częściowe wykorzystanie energii hamowania [4, 6]. Uzupełniającym rozwiązaniem jest instalacja zasobników energii, co jednak wiąże się ze znacznymi nakładami finansowymi. Tańszym rozwiązaniem jest zwrot energii do sieci zasilającej za pomocą falowników, ale na przeszkodzie w rozpowszechnieniu się tej metody stoi brak zainteresowania dostawców energii wykupem energii odzyskiwanej.

Obiecującym rozwiązaniem może stać się zastosowanie technologii Smart Grid w trakcyjnych układach zasilania. Smart Grid nie posiada powszechnie zaakceptowanej definicji. Pod pojęciem Smart Grid kryje się wiele, częstokroć prostych rozwiązań technicznych, które połączone razem mogą zmienić strukturę i popra-

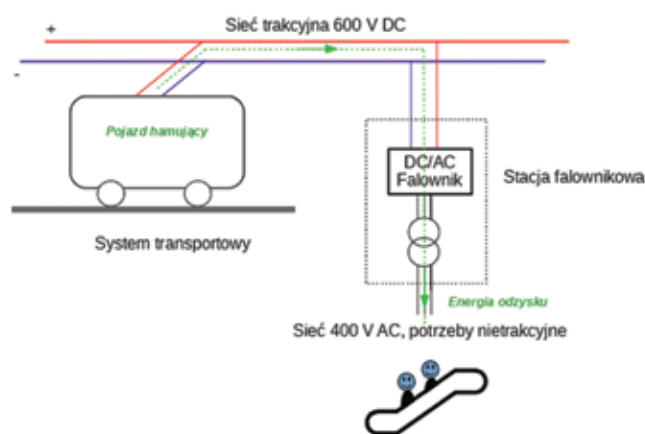
wić efektywność funkcjonowania systemu energetycznego. Smart Grid to inteligentna sieć, w której zaimplementowanych zostaje wiele elementów współpracujących ze sobą [1, 6]. Dzięki rozwiązaniom Smart Grid, układ zasilania trakcji elektrycznej może przestać być pasywnym odbiornikiem energii, a staje się dynamicznym ogniwem systemu energetycznego. Środkiem łączącym elementy mini-systemu Smart Grid w mieście może być trakcyjna sieć prądu stałego komunikacji tramwajowej, trolejbusowej lub metra [9, 10].

Smart Grid w trakcyjnym układzie zasilania oznacza wykorzystanie energii hamowania odzyskowego jednocześnie na wiele sposobów, ograniczając tym sposobem zużycie energii elektrycznej. Poza tzw. klasycznymi odbiornikami energii rekuperacji, jak pojazdy będące w ruchu bądź zasobniki, technologie Smart Grid umożliwiają wykorzystania jej na inne potrzeby. Jednym z możliwych odbiorców są budynki administracyjne, które mogą stać się elementami inteligentnego systemu energetycznego jako elementy w sposób aktywny dopasowujące zapotrzebowanie energii w zależności od potrzeb lub jako element lokalnych platform Smart Grid [9, 10]. Największa generacja energii hamowania odbywa się w obszarach stacji, dlatego możliwe jest jej wykorzystanie na potrzeby urządzeń stacyjnych, takich jak oświetlenie, wentylacja, klimatyzacja, schody ruchome. Współpraca systemu zasilania trakcyjnego DC oraz sieci prądu przemiennego odbywa się na poziomie instalacji niskiego napięcia za pomocą mini stacji falownikowych, co w znaczący sposób upraszcza konstrukcję układu i unika się konieczności podłączenia do sieci wysokiego/średniego napięcia.

## 1. Technologie Smart Grid – mini stacje falownikowe

W klasycznym układzie zasilania trakcji elektrycznej energia przepływa z podstacji trakcyjnej poprzez zasilacze, sieć trakcyjną do pojazdów, natomiast w systemie energetycznym Smart Grid równocześnie pracuje wiele źródeł wytwórczych [1–3]. Głównie są to pojazdy hamujące rekuperacyjnie; dostarczać energii elektrycznej mogą także zasobniki energii elektrycznej oraz lokalne źródła wytwórcze (np. elektrownie fotowoltaiczne). Zastosowanie technologii Smart Grid umożliwia przepływ tej energii do pojazdów oraz sterowanie rozplwem mocy.

Podstawowym elementem systemu Smart Grid jest dwustronne zasilanie sieci trakcyjnej. Ułatwia ono przepływ energii rekuperacji. Co najważniejsze, energia ta może być wykorzystana nie tylko przez inne pojazdy, ale także dla celów ładowania autobusów elektrycznych oraz zasilania obiektów publicznych za pomocą mini stacji falownikowych. Często obiekty publiczne (np. urzędy) cechują



Rys. 2. Schemat ideowy układu odzysku energii Smart Grid z mini stacją falownikową

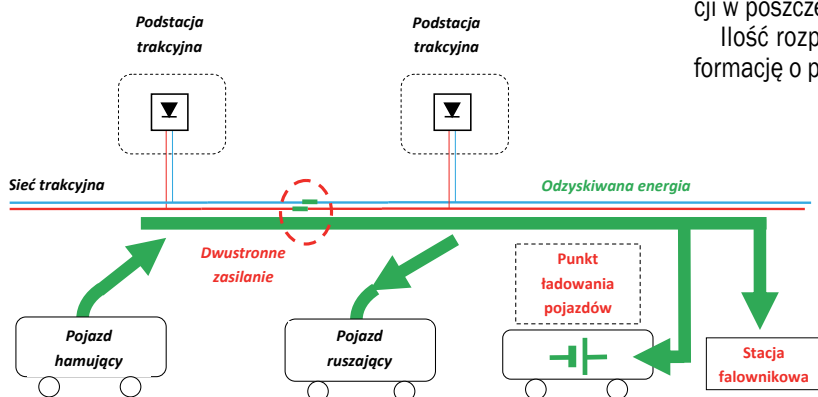
się poborem mocy elektrycznej na poziomie 50–100 kW, co jest zbliżone do przeciętnej generacji mocy rekuperacji trolejbusu podczas hamowania. Połączenia instalacji elektrycznej budynku z siecią trakcyjną można dokonać za pomocą falownika o mocy ok. 100 kW z separacją galwaniczną.

Pozwala to na uzyskanie efektu synergii dzięki połączeniu różnych systemów trakcji elektrycznej. Uproszczony schemat układu zasilania z dwustronnym zasilaniem sieci trakcyjnej, mini stacjami falownikowymi i ładowaniem elektrobusesów przedstawiono na rys. 1 i rys. 2.

## 2. Case study wprowadzenia technologii Smart Grid w gdyńskiej sieci trolejbusowej

Efekty wprowadzenia technologii Smart Grid są ściśle uzależnione od charakteru konkretnego systemu komunikacyjnego. Kluczowe znaczenie ma topologia układu zasilania oraz intensywność ruchu pojazdów [7, 14, 15]. Dla przedstawienia przykładowych korzyści wpływających z wprowadzenia technologii mini stacji falownikowych, przeanalizowano system zasilania gdyńskiej sieci trolejbusowej. W tym celu przeprowadzono analizę potencjału stopnia niewykorzystania rekuperacji w pojazdach na podstawie pomiaru energii wytracanej w rezystorach hamowania trolejbusów. Podstawą tej analizy są dane z pojazdowych układów rejestrujących parametry ruchowo-elektryczne. Dzięki jednoczesnemu pomiarowi prądu pobieranego przez pojazd, prądu rezystora hamowania oraz położenia GPS możliwy jest szacunek potencjału energii rekuperacji w poszczególnych fragmentach sieci.

Ilość rozproszony energii w rezystorze hamowania niesie informację o potencjale zwiększenia stopnia rekuperacji w układzie



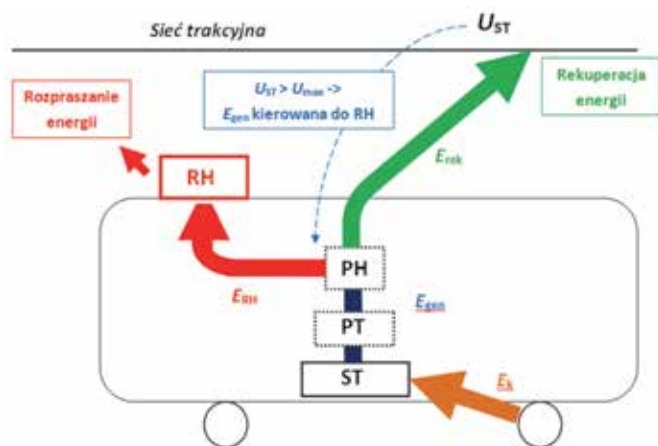
Rys. 1. Schemat przepływu energii rekuperacji z pojazdu hamującego do pojazdu ruszającego w dwustronnym układzie zasilania sieci trakcyjnej wraz ze stacją ładowania pojazdów elektrycznych oraz przekazywaniem energii odzyskanej do sieci prądu przemiennego

Tab. 1. Prawdopodobieństwo  $p_h$  wystąpienia równoczesnego hamowania wielu pojazdów i błąd  $\Delta\epsilon$

Średnia liczba pojazdów	Prawdopodobieństwo $p_h$
1,2	0,04
1,5	0,07
2,6	0,10
4,2	0,14
7,5	0,17
8,6	0,20
10,2	0,23
11,3	0,25
14,2	0,28



zasilania i może być wykorzystana dla celów prognozowania możliwości redukcji zużycia energii. Na rys. 3 schematycznie przedstawiono przepływ energii podczas hamowania elektrycznego pojazdu trakcyjnego. Podczas hamowania silnik trakcyjny ST przechodzi w generatorowy tryb pracy i następuje przekształcenie energii kinetycznej  $E_k$  pojazdu w energię elektryczną, która następnie może



**Rys. 3.** Przepływ energii odzysku podczas hamowania [7, 15];  $U_{ST}$  – napięcie sieci trakcyjnej  $E_k$  – energia kinetyczna pojazdu, ST – silnik trakcyjny, PT – przekształtnik trakcyjny, PH – przekształtnik hamowania, RH – rezystor hamowania

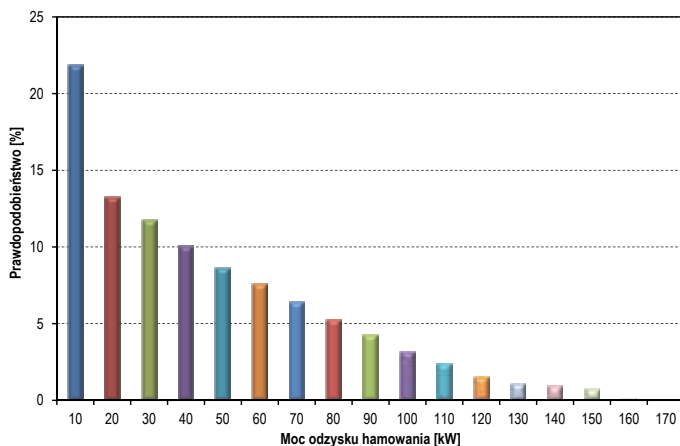
być zwrócona do sieci trakcyjnej. Jednak koniecznym warunkiem dla rekuperacji jest wytworzenie na odbierakach pojazdu napięcia wyższego od panującego w sieci trakcyjnej, w tym celu przekształtnik trakcyjny PT w trakcie hamowania podwyższa napięcie uzyskane z silnika trakcyjnego. W pierwszej kolejności, energia  $E_{gen}$  wygenerowana w układzie napędowym przez przekształtnik hamowania, jest kierowana do sieci trakcyjnej. W przypadku braku odbioru dla energii hamowania  $E_{rek}$ , następuje nadmierny wzrost napięcia sieci trakcyjnej  $U_{ST}$  na odbierakach pojazdu ponad wartość maksymalną napięcia rekuperacji  $U_{max}$ . Powoduje to załączenie przekształtnika hamowania PH, który wygenerowaną energię w układzie napędowym kieruje do rezystora hamowania. Energia ta jest rozproszona w postaci ciepłej. W sieci o napięciu znamionowym 600 V jako górny graniczny poziom napięcia  $U_{max}$  przyjmuje się 770 V. Im gorsze są warunki dla rekuperacji, czyli na sieci trakcyjnej nie ma odbioru, który może przyjąć energię rekuperacji  $E_{rek}$ , tym częściej przekształtnik hamowania PH łączy rezystor hamowania RH. W związku z tym, przekroczenie napięcia sieci trakcyjnej  $U_{ST}$  oraz spowodowane tym załączenie rezystora hamowania RH świadczą o braku odbioru dla generowanej energii rekuperacji i mogą być użyte jako indykatory oceny stopnia wykorzystania rekuperacji. Im częściej występują przekroczenia napięcia w sieci trakcyjnej i im częściej łączy rezystor hamowania, tym mniej wykorzystana jest energia rekuperacji, czyli tym większy jest niewykorzystany potencjał zwiększenia efektywności energetycznej układu zasilania. Energia ta może zostać wykorzystana za pomocą dodatkowych urządzeń, np. mini stacji falownikowych.

W obliczeniach przyjęto założenie, że w danym momencie hamuje odzyskowo tylko jeden pojazd. Możliwa jednak jest sytuacja równoczesnego hamowania większej liczby pojazdów. Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w sieci trolejbusowej w Gdyni określono poziom prawdopodobieństwa znajdowania się pojazdu w trybie hamowania na 0,19. Prawdopodobieństwo wystąpienia równoczesnego hamowania dwóch pojazdów wynosi więc 0,0361. W przypadku, gdy w obszarze zasilania podstacji znajduje się wiele trolejbusów, należy wyznaczyć sumaryczne prawdopodobieństwo hamowania dwóch pojazdów w tym samym czasie. Niech A oznacza zdarzenie losowe równoczesnego hamowania dwóch pojazdów. Zakładając, że w obszarze zasilania znajduje się N pojazdów i jeden z nich hamuje, równocześnie może hamować każdy z pozostałych pojazdów czyli może wystąpić N-1 zdarzeń A. Należy więc rozpatrzyć prawdopodobieństwo wystąpienia sumy N-1 zdarzeń A. Na podstawie zasady włączeń i wyłączeń, wartość sumy zdarzeń można napisać:

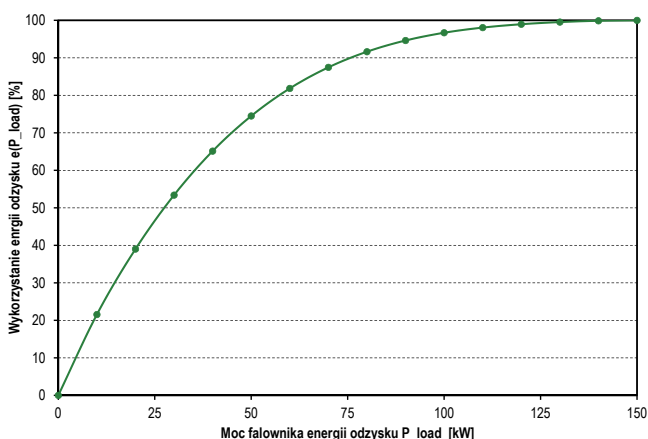
$$P\left(\bigcup_{i=1}^{N-1} A\right) = \sum_{i=1}^{N-1} (-1)^{i+1} \binom{N-1}{i} P\left(\bigcap_{k=j}^i A\right) \quad (1)$$

W tab. 1 zaprezentowano wartości prawdopodobieństwa równoczesnego hamowania kilku pojazdów oraz bezwzględny błąd metody spowodowany przyjęciem założenia o braku wielokrotnych hamowań w przedstawianej metodzie. Dane oparto na pomiarach przeprowadzonych w gdyńskich podstacjach. Należy zauważyć, że o ile w przypadku znacznej liczby pojazdów znajdujących się w obszarze zasilania podstacji prawdopodobieństwo równoczesnego hamowania wielu pojazdów jest znaczne, to błąd tym spowodowany jest niewielki.

Przy założeniu występowania w jednym czasie hamowania wyłącznie jednego pojazdu, energia rekuperacji przezeń generowana musi być skonsumowana przez inne pojazdy lub inny odbiornik (in-



**Rys. 4.** Histogram mocy generowanej przez trolejbus podczas hamowania



**Rys. 5.** Wykres stopnia wykorzystania energii rekuperacji w funkcji mocy obciążenia  $P_{load}$

werter, stacja ładowania pojazdu). Istotą generacji energii odzysku hamowania jest jej losowy charakter (rys. 4). Aby w pełni wykorzystać całkowitą moc rekuperacji pojazdu, należy zapewnić odbiór o mocy rzędu 200 kW. Jednak generacja pełnej mocy podczas hamowania zdarza się stosunkowo rzadko, w 50% przypadków hamowania moc generowana ma wartość poniżej 40 kW. Dlatego zapewnienie odbioru energii hamowania nawet o niepełnej mocy może w znaczny sposób podnieść efektywność odzysku.

Prąd rezystora hamowania można traktować jako potencjalny prąd możliwy do absorpcji przez układ falownikowy bądź stację ładowania pojazdów elektrycznych. Aby możliwy był odzysk energii hamowania, konieczne jest zapewnienie odbiorników dla generowanej energii [11], co można opisać zależnością:

$$P_{inv} \geq P_{rec} \quad (2)$$

gdzie  $P_{rec}$  oznacza moc rekuperowaną, a  $P_{inv}$  obciążenie falownika.

Spełnienie warunku (2) może być analizowane na podstawie przebiegu dystrybucji obciążenia podstacji trakcyjnej. Wartość  $d$  dystrybucji odpowiadająca mocy  $P$  oznacza, iż generacji mocy hamowania będzie mniejsza, niż wartość  $P$  z prawdopodobieństwem  $d$ . Na podstawie warunku (2) można stwierdzić, że rekuperowana moc o wartości  $P$  będzie całkowicie zużyta w układzie zasilania z prawdopodobieństwem  $d$ .

Jeśli warunek (2) nie jest spełniony, jedynie część generowanej mocy o wartości równej  $P_{rec}$  będzie wykorzystana. Pozostała część mocy zostanie wytracona w rezystorach hamowania. Potencjał wykorzystania energii rekuperacji można określić na podstawie przebiegu  $P_{rec}(t)$  generacji mocy rekuperacji. Zdefiniowana zostanie funkcja  $e(P_{rec})$ , która wyraża stopień wykorzystania energii hamowania, generowanej przez źródło o mocy  $P_{load}$  w czasie  $T$ :

$$e(P_{load}) = \frac{E_{ab}}{E_{ren}} \quad (3)$$

gdzie  $E_{ren}$  oznacza energię rekuperacji wygenerowaną w czasie  $T$  przy założeniu pełnej absorpcji generowanej energii,  $E_{ab}$  oznacza energię możliwą do absorpcji przy uwzględnieniu ograniczonej mocy  $P_{load}(t)$  odbioru energii. Zależność tę można przedstawić jako:

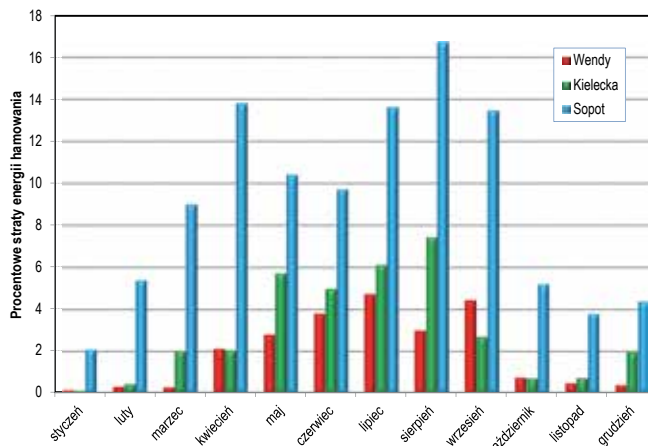
$$e(P_{load}) = \frac{\int_0^T P_{abs}(P_{load}, t) dt}{\int_0^T P_{rec} dt} \quad (4)$$

gdzie  $P_{abs}(P_{load}, t)$  wyraża ograniczenie absorpcji generowanej energii do poziomu mocy  $P_{rec}$  w wyniku ograniczonej wartości mocy odbieranej  $P_{load}$ :

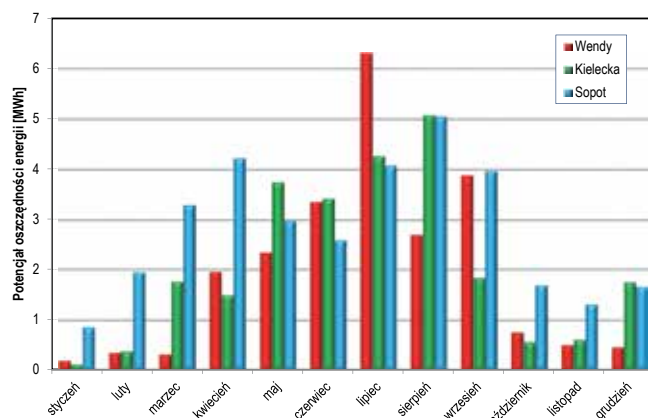
$$P_{abs} = \begin{cases} P_{rec} < P_{load} \rightarrow P_{abs} = P_{rec} \\ P_{rec} \geq P_{load} \rightarrow P_{abs} = P_{load} \end{cases} \quad (5)$$

Na rys. 5 przedstawiono wykres stopnia wykorzystania energii rekuperacji w funkcji mocy obciążenia  $P_{load}$ .

Przy zastosowaniu mini stacji falownikowej zasilającej instalację elektryczną budynku publicznego z energii rekuperacji o mocy 0 kW, możliwa jest absorpcja energii rekuperacji w 74%, co oznacza stopień odzysku energii hamowania na poziomie 30–40%. Odpowiada to wykorzystaniu energii rekuperacji w 90%. A więc



Rys. 6. Względne straty energii hamowania w skali miesięcznej w obszarach zasilania poszczególnych podstacji



Rys. 7. Potencjał oszczędności energii hamowania w skali miesięcznej w obszarach zasilania poszczególnych podstacji

w przypadku trolejbusowego systemu transportowego, optymalna moc mini stacji falownikowej jest na poziomie 50–100 kW.

Na podstawie rejestracji systemu rejestratorów danych pojazdów oraz informacji o zużyciu energii w podstacji oszacowano całkowity potencjał oszczędności energii. W analizie uwzględniono obszar zasilania trzech podstacji: podstacja trakcyjna Wendy, Kielecka i Sopot. Z wyjątkiem strat przesyłowych, które z powodu małej mocy odzysku są pomijalne, odzyskana energia może przepływać w obszarze zasilania podstacji. Zatem, jako potencjał oszczędności energii, przyjęto całkowitą energię utraconą w rezystorach hamujących w obszarze zasilania poszczególnych podstacji. Pierwsze dwie podstacje (Wendy i Kielecka) zasilają centralną część systemu trolejbusowego w Gdyni, podstacja Sopot zasilą linię międzymiastową do kurortu Sopot. Na podstawie pomiaru strat energii w rezystorach hamowania w obszarach zasilania wymienionych podstacji, oszacowano stratę traksji i potencjał oszczędności (rys. 6, 7). Podsumowanie rocznych oszczędności przedstawiono w tab. 2. Dodano także szacunek potencjalnych, przyszłych oszczędności energii. Obecnie tylko 50% wszystkich pojazdów jest wyposażonych w układ odzysku energii. W chwili, gdy wszystkie pojazdy zostaną wyposażone w możliwość rekuperacji, odzysk energii wzrośnie dwukrotnie.

### Podsumowanie

Wdrożenie stacji przekształtnikowych może zmniejszyć zużycie energii w granicach 2–10%. Potencjalnie, wraz ze wzrostem lic-

**Tab. 2. Podsumowanie potencjalnych oszczędności**

	Wendy	Kiełcecka	Sopot
Roczny potencjał oszczędności	23 MWh	25 MWh	34 MWh
Roczny docelowy potencjał oszczędności	46 MWh	50 MWh	68 MWh
Średnia moc zwracana	15 kW	12 kW	12 kW
Docelowa średnia moc zwracana	30 kW	24 kW	24 kW

by urządzeń z uszkodzeniem wycofywania, oszczędność może wynosić od 5 do 10%. Odzyskana energia może zmniejszyć zużycie energii w budynkach użyteczności publicznej lub innych obiektach. Należy podkreślić, że największy odzysk energii następuje w okresie letnim, kiedy używana w budynkach jest klimatyzacja, a proponowany system może obniżyć koszty systemów klimatyzacyjnych.

Skala oszczędności uzależniona jest od charakteru danego systemu, dlatego przedstawione wyniki nie są reprezentatywne dla innych przedsiębiorstw komunikacyjnych. Jednak przedstawione przykłady ilustrują możliwość redukcji zużycia energii za pomocą nowoczesnych metod i elementów sieci inteligentnych Smart Grid. Rozwiązania te mogą być alternatywą dla układów zasobnikowych i stacji falownikowych, które, pomimo ciągłego rozwoju, nadal są mało opłacalne w budowie.

Rozwiązania sieci inteligentnych Smart Grid pozwalają na integrację systemów zasilania różnych środków transportu: tramwajów, trolejbusów czy stacji ładowania pojazdów elektrycznych [2, 3]. Pozwala to na optymalizację zużycia energii oraz osiągnięcie efektu synergii wielu różnych współpracujących ze sobą systemów energetycznych.

### Podziękowania

Publikacja powstała przy wsparciu projektu ELIPTIC „Optimising existing electric infrastructure and rolling stock in order to reduce costs and energy consumption”, finansowanego w ramach programu Horizon 2020, nr umowy 636012.



### Bibliografia:

1. Bartłomiejczyk M., *Smart grid technologies in electric power supply systems of public transport*. 12<sup>th</sup> International Conference: Modern Electrified Transport 2015.
2. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Integracja systemu energetycznego miejskiego transportu szynowego i stacji ładowania autobusów elektrycznych – szansa czy zagrożenie?*, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 7–8.
3. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Uwagi na marginesie artykułu Adama Moleckiego Rozwój autobusów elektrycznych w oparciu o istniejące sieci tramwajowe*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2015, nr 1–2.
4. Gonzalez-Gil A., Palacin R., Batty P., *Sustainable urban rail systems: strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy*, „Energy Conversion Management” 2013, Vol. 75.
5. Jarzabowicz L., Karwowski K., Kulesza W.J., *Sensorless algorithm for sustaining controllability of IPMSM drive in electric vehicle after resolver fault*, „Control Engineering Practice” 2017, No. 58, DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.10.004.

6. Hamacek S., Bartłomiejczyk M., Hrbac R., Misak S., Styskala V., *Energy recovery effectiveness in trolleybus transport*, „Electric Power Systems Research” 2014, No. 112.
7. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery*, „Energy Conversion and Management”, 1 November 2016, Vol. 127.
8. Diez A.E., Diez I.C., Lopera J.A., Bohorquez A., Velandia E., Albaracin A., Restrepo M., *Trolleybuses in Smart Grids as effective strategy to reduce greenhouse emissions*, Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International.
9. Jiang Y., Liu J., Tian W., Shahidehpour M., Krishnamurthy M., *Energy Harvesting for the Electrification of Railway Stations: Getting a charge from the regenerative braking of trains*, „IEEE Electrification Magazine” 2014, Vol. 2, Issue. 3, DOI: 10.1109/MELE.2014.2333561.
10. Nasr S., Iordache M., and Petit M., *Smart micro-grid integration in dc railway systems in Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2014 IEEE PES, Oct 2011.
11. Hrbáč R., Kolář V., Mičák T., *Distributed measurement system with GPS synchronisation and its use in electric traction*, „Elektronika ir elektrotechnika” 2015, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, Vol.21, Issue. 6, DOI: 10.5755/j01.eee.21.6.13750
12. Jarzabowicz L., Judek S., *3D machine vision system for inspection of contact strips in railway vehicle current collectors*, 2014 International Conference on Applied Electronics (AE), Pilsen, Czech Republic. <http://dx.doi.org/10.1109/AE.2014.7011686>.
13. Hrbáč R., Mičák T., Kolář V., *Improving power quality with the use of a new method of serial active power filter (SAPF) control*, „Elektronika ir Elektrotechnika” 2017, Vol. 23, No. 1, DOI: 10.5755/j01.eie.23.1.17578.
14. Latkovskis L., Grigans L., *Estimation of the Untapped Regenerative Braking Energy in Urban Electric Transportation Network*, 13<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2008.
15. Bartłomiejczyk M., Połom M., *The impact of the overhead line's power supply system spatial differentiation on the energy consumption of trolleybus transport: planning and economic aspects*, „Transport” 2017, Vol. 32(1), DOI:10.3846/1648414.2.2015.1101611.

### Autor:

dr inż. **Mikołaj Bartłomiejczyk** – Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska

### Mini smart grid system in traction power supply

*With the increase in the number of trams and trolleybuses equipped with regenerative braking, the popularity of equipment for breaking energy utilization has increased. Mostly they are supercapacitors energy storage systems and inverter stations to return energy to the AC network. However, the high price of these devices and legal and organizational problems constitute a significant barrier to their widespread popularization. The paper presents the concept of a simpler, cheaper and easier to implement implementation: the use of recovery energy for non-traction needs, such as public utilities buildings or non traction transport devices. In this arrangement, the use of recuperative energy can be made inside the enterprise at low voltage level, which significantly simplifies the legal and technical aspects.*

**Key words:** Trolleybus, electric traction, breaking energy recovery, energy savings.