

Mikołaj Bartłomiejczyk, Marcin Połom

## Napięcie sieci trakcyjnej jako wyznacznik możliwości zwiększenia odzysku energii

**Zauważalne w ostatnim dziesięcioleciu zwiększenie liczby pojazdów elektrycznych komunikacji miejskiej, wyposażonych w zdolność hamowania odzyskowego, otwiera możliwości zmniejszenia energochłonności traktacji miejskiej. Jednakże pomimo nowych szans energooszczędności związanych z hamowaniem odzyskowym ze strony pojazdów, podstacje trakcyjne nie są wyposażone w urządzenia służące do akumulacji energii tego typu hamowania.**

Wykorzystanie „odzyskanej” energii może się odbywać tylko na drodze pojazd hamujący – pojazd ruszający. W związku z tym wiele przedsiębiorstw komunikacyjnych rozważa instalacje zasobników superkondensatorowych na podstacjach trakcyjnych bądź w pojazdach. Wiąże się to jednak z koniecznością wyboru podstacji właściwych do montażu takiego zasobnika z punktu widzenia potencjału oszczędności energii. Co za tym idzie, stwarza to wymaganie wykonania pomiarów i ekspertyzy typującej optymalne podstacje. Głównym czynnikiem wpływającym na efektywność rekuperacji jest intensywność ruchu pojazdów w obszarach zasilania podstacji trakcyjnych. W artykule przedstawiono sposób oceny stopnia wykorzystania energii hamowania odzyskowego w gdyńskiej sieci trolejbusowej na podstawie pomiaru podstawowych parametrów elektrycznych w podstacjach trakcyjnych i taborze. Bazując na tych wynikach wyznaczono podstacje trakcyjne najbardziej odpowiednie do instalacji zasobników superkondensatorowych.

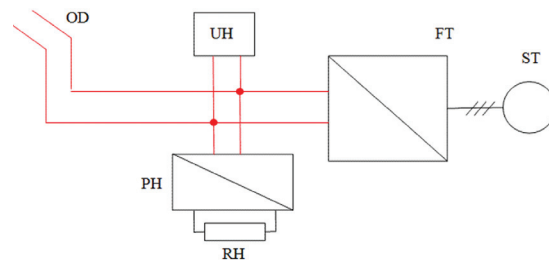
### Rozptyw energii hamowania odzyskowego

Prawie wszystkie produkowane energoelektroniczne układy napędowe umożliwiają pracę prądnicową silnika trakcyjnego podczas hamowania i odzysk energii elektrycznej. Aby możliwe było wykorzystanie energii rekuperacji, konieczne jest spełnienie dwóch warunków:

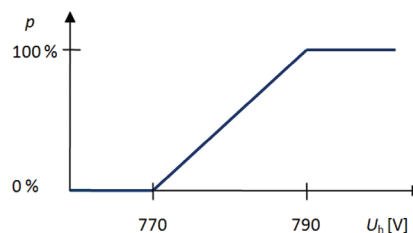
- napięcie wygenerowane przez pojazd podczas hamowania musi być wyższe od napięcia sieci trakcyjnej w miejscu zwrotu energii;
- musi istnieć odbiorca dla energii wygenerowanej podczas hamowania, innymi słowy na obszarze zasilania podstacji, na której funkcjonuje pojazd hamujący odzyskowo musi przebywać inny pojazd pobierający energię.

Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony schemat obwodu głównego trolejbusu. W momencie rozpoczęcia hamowania falownik trakcyjny FT powoduje przejście silnika trakcyjnego ST w stan pracy prądnicowej i następuje generacja energii hamowania odzyskowego, co skutkuje wzrostem napięcia układu napędowego  $U_h$  mierzonym układem UH. W przypadku przekroczenia przez napięcie  $U_h$  wartości 770 V, co oznacza częściowy lub całkowity brak akumulacji energii hamowania, włączeniu ulega przekształtnik hamowania PH, który reguluje prąd rezystora hamo-

wania odzyskowego RH. Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę wypełnienia  $p$  przekształtnika hamowania. Przy napięciu 790 V, co jest równoważne z całkowitym brakiem odbioru energii hamowania, przekształtnik jest zwarty. Wówczas cała energia rekuperacji jest wytracana w rezystorze hamowania.



Rys. 1. Uproszczony schemat obwodu głównego trolejbusu



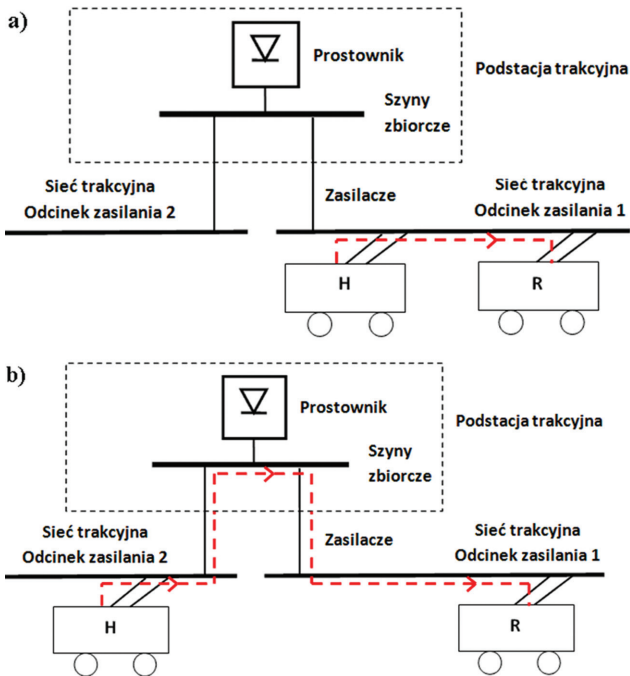
Rys. 2. Stopień wypełnienia  $p$  przekształtnika hamowania w funkcji napięcia  $U_h$  układu napędowego.

W przypadku klasycznych podstacji trakcyjnych, które nie są wyposażone w układy akumulacji energii bądź falowniki, odzysk energii elektrycznej może się odbywać wyłącznie na drodze pojazd hamujący – pojazd ruszający. Możliwe są dwie drogi przepływu energii hamowania:

- 1) na drodze pojazd – sieć trakcyjna – pojazd (rys. 3a), gdy obydwa pojazdy znajdują się na jednym odcinku zasilania; ta droga przepływu jest optymalna z punktu widzenia strat przesyłtu;
- 2) na drodze pojazd – sieć trakcyjna – zasilacz – szyny zbiorcze podstacji trakcyjnej – zasilacz – odcinek zasilania – pojazd (rys. 3b); sytuacja taka ma miejsce, gdy na odcinku zasilania znajduje się wyłącznie pojazd hamujący odzyskowo.

Energia rekuperacji może się także rozptylać jednocześnie drogą 1 i 2, gdy na odcinku zasilania na którym znajduje się pojazd hamujący porusza się także pojazd ruszający, ale nie jest on w stanie zużyć całej dostępnej energii. W przypadku braku odbioru energii rekuperacji ulega ona wytraceniu w rezystorach hamowania.

Przedstawione drogi przepływu energii hamowania odzyskowego dotyczą jedynie sytuacji uproszczonych, gdy na obszarze występuje niewielka liczba pojazdów. W praktyce, przy podstacjach wyposażonych w wiele zasilaczy, jednocześnie w ruchu znajduje się wiele trolejbusów. W jednym momencie może hamować i ruszać kilka trolejbusów, skutkiem czego rozptyw energii ma bardziej złożony charakter. Wychodząc z zasady zachowania



Rys. 3. Drogi przepływu energii hamowania odzyskowego w klasycznych podstacjach trakcyjnych (a, b) i podstacji wyposażonej kolorem czerwonym oznaczono prąd rekuperacji, H – trolejbus hamujący, R – trolejbus pobierający energię

energii można stwierdzić, że w obszarze zasilania podstacji trakcyjnej suma energii elektrycznej  $E_{PT}$  dostarczonej z zespołów prostownikowych do szyn zbiorniczych podstacji oraz suma energii rekuperacji  $E_{RT}$  zwróconej przez układy napędowe trolejbusów znajdujących się w obszarze zasilania musi się równać sumie energii pobranej przez układy napędowe trolejbusów ruszających  $E_{NT}$  oraz energii wytraconej w rezystorach hamowania pojazdów  $E_{RH}$ :

$$E_{PT} + E_{RT} = E_{NT} + E_{RH} \quad (1)$$

Wychodząc z tej zależności, z punktu widzenia poziomu napięcia szyn zbiorniczych podstacji trakcyjnej, w trakcie trwania odzysku energii ( $E_{RT} > 0$ ) układ zasilania może znajdować się w jednym z czterech stanów pracy.

- **Stan I** – wartość energii oddawanej do sieci trakcyjnej w obszarze zasilania podstacji jest mniejsza od wartości energii pobieranej przez wszystkie pojazdy, czyli  $E_{PT} > 0$ ,  $E_{NT} > 0$  i  $E_{RH} = 0$ . Napięcie szyn zbiorniczych podstacji jest wówczas niższe od napięcia biegu jałowego podstacji.
- **Stan II** – wartość energii hamowania odzyskowego jest równa zapotrzebowaniu na energię przez pojazdy:  $E_{PT} = 0$ ,  $E_{NT} = E_{RT} > 0$  i  $E_{RH} = 0$ . Wówczas napięcie szyn zbiorniczych podstacji mieści się między wartością biegu jałowego a górnym progiem rozpoczęcia pracy przez czoper rezystora hamowania odzyskowego.
- **Stan III** – w obszarze zasilania podstacji nie ma wystarczającej liczby odbiorów dla zużytkowania energii hamowania generowanej podczas odzysku:  $E_{PT} = 0$ ,  $0 < E_{NT} < E_{RT}$  i  $E_{RH} > 0$ . Wówczas zaczyna pracę czoper rezystora hamowania odgraniczający napięcie rekuperacji. Napięcie szyn zbiorniczych podstacji mieści się w zakresie modulacji czopera hamowania rezystancyjnego, czyli 770–790 V.

- **Stan IV** – w obszarze sieci trakcyjnej nie ma odbioru dla energii hamowania odzyskowego, czyli  $E_{PT} = 0$ ,  $E_{NT} = 0$  i  $E_{RH} = E_{RT} > 0$ . Wówczas cała energia jest wytracana w rezystorze hamowania, a wartość napięcia w sieci trakcyjnej jest równa górnemu poziomowi ograniczenia napięcia podczas hamowania.

Poszczególne stany pracy przedstawiono schematycznie na rysunku 4. Przyjęto znamionowe napięcie szyn zbiorniczych podstacji jako 660 V.



Rys. 4. Wartość napięcia szyn zbiorniczych podstacji przy różnych stanach pracy układu zasilania podczas hamowania odzyskowego

Poziom napięcia szyn zbiorniczych podstacji trakcyjnej może więc być wyznacznikiem stopnia wykorzystania energii generowanej podczas hamowania w danej chwili oraz gotowości do przyjęcia przez układ zasilania energii odzysku. Napięcie szyn zbiorniczych podstacji należy więc traktować jako indikator nasycenia układu zasilania energią rekuperacji.

## Pomiary stopnia wykorzystania rekuperacji

Przedsiębiorstwo Komunikacji Trolejbusowej w Gdyni (PKT) eksploatuje 85 trolejbusów o standardowej długości 12 m, z czego ok. 50% pojazdów jest wyposażonych w możliwość hamowania odzyskowego. Gdyńska sieć trolejbusowa jest zasilana z 10 podstacji trakcyjnych w układzie zasilania jednostronnego. Poszczególne podstacje trakcyjne znacznie różnią się wielkościami obszarów zasilania, zasilają od 1 do 6 odcinków. W tabeli 1 porównano podstawowe parametry elektryczno-ruchowe poszczególnych podstacji. Kluczowym parametrem z punktu widzenia potencjału dla odzysku energii hamowania jest średnia liczba trolejbusów w ruchu na obszarze zasilania podstacji – czym jest ona większa, tym większe jest prawdopodobieństwo znalezienia odbioru dla pojazdu hamującego, a co za tym idzie, wystąpienie odzysku na drodze pojazd–pojazd. Istotnym odbiorem energii są także pracujące układy potrzeb własnych i ogrzewania trolejbusów znajdujących się na pętlach końcowych, dlatego w tabeli 1 ujęto także liczbę pętli.

Tabela 1

## Porównanie parametrów poszczególnych podstacji

Podstacja	Liczba			Średnia liczba pojazdów w obszarze zasilania	Średni dzienny pobór energii w lecie [MWh]
	zasilaczy	zespołów prostownikowych	pętli trolejbusowych na obszarze zasilania podstacji		
Północna	6	2	3	14,2	4,5
Grabówek	4	2	1	8,6	4,6
Plac Konstytucji	3	1	2	7,5	2,0
Wendy	3	1	1	10,2	3,3
Kielecka	3	2	0	4,2	2,7
Redłowo	3	2	0	8,7	4,5
Wielkopolska	1	1	0	2,6	1,1
Chwaszczyńska	5	2	2	11,3	4,3
Sopot I	2	1	0	1,5	0,7
Sopot II	1	1	1	1,2	0,3

Do celów analizy wykonano pomiary napięć szyn zbiorczych na wszystkich podstacjach trakcyjnych oraz pobrano dane pochodzące z rejestratorów umieszczonych w trolejbusach. Pojazdy zakupione przez PKT po 2009 r. wyposażone są w układ rejestracji parametrów pracy trolejbusu, który zapisuje z sekundową rozdzielczością między innymi wartości prądów i napięcia układu napędowego. Celem analizy jest wytypowanie podstacji trakcyjnych w sieci PKT, które z energetycznego punktu widzenia są

optymalne do instalacji zasobników superkondensatorowych. Porównanie oparto na trzech wskaźnikach pracy układu zasilania:

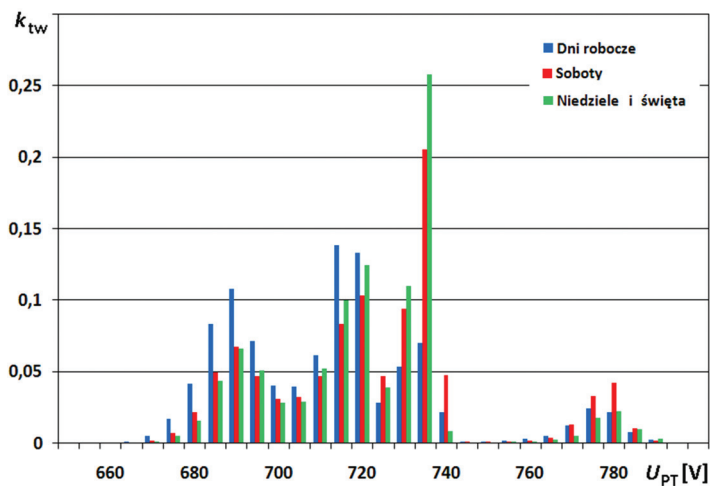
- 1) względny czas przekroczenia napięcia 770 V na szynach zbiorczych podstacji trakcyjnych; przekroczenie tej wartości oznacza stan III lub IV pracy układu zasilania (rys. 5), czyli występowanie braku odbiorów dla generowanej energii rekuperacji;
- 2) względny czas załączenia rezystora hamowania w pojazdach na obszarach zasilania poszczególnych podstacji; analogicznie jak w punkcie 1, sytuacja taka oznacza brak odbiorów dla energii rekuperacji;
- 3) efektywność rekuperacji na obszarach zasilania poszczególnych podstacji, zdefiniowana jako stosunek energii zwróconej do sieci trakcyjnej do całkowitej, pobranej energii.

Parametry 2 i 3 wyznaczono na podstawie zapisów rejestratorów umieszczonych w 40 najnowszych trolejbusach, wybór wskaźników oceny rekuperacji był podyktowany możliwościami pomiarowymi układów rejestrujących.

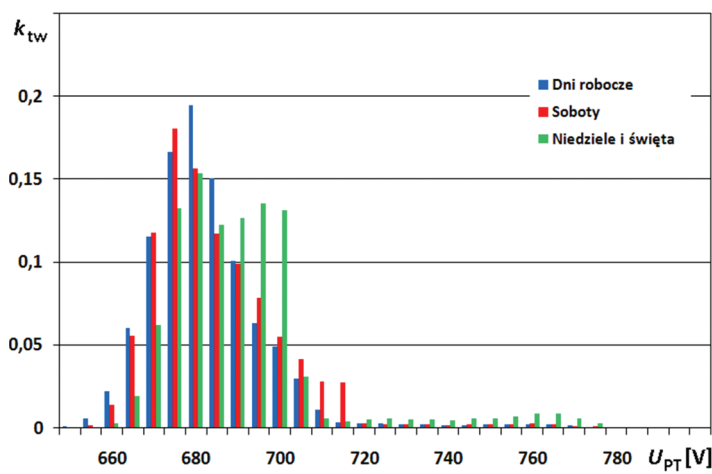
Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono histogramy napięcia szyn zbiorczych podstacji Wielkopolska i Północna. Podstacja Północna jest największą podstacją użytkowaną przez PKT, zasila 6 odcinków zasilania. Podstacja Wielkopolska jest małogabarytową podstacją zasilającą tylko jeden odcinek o znacznym nachyleniu. Różnice między charakterami obszarów zasilania obydwu podstacji są wyraźnie odzwierciedlone na histogramach napięcia szyn zbiorczych. W przypadku podstacji Wielkopolska, ze względu na małą wielkość obszaru zasilania i znaczną intensywność pracy hamowania rekuperacyjnego (górski teren), często dochodzi do przekroczenia napięcia 770 V szyn zbiorczych podstacji, a co za tym idzie, niewykorzystania energii rekuperacji. Rozległy obszar zasilania podstacji Północna stwarza zaś korzystne warunki do odzysku energii hamowania na drodze pojazd–pojazd dzięki znacznej liczbie trolejbusów znajdujących się na obszarze zasilania i dużego prawdopodobieństwa znalezienia odbioru energii. Znajduje to swój wyraz w kształcie histogramu napięcia szyn zbiorczych, na którym piki odpowiadające przekroczeniom napięcia 770 V są znacznie mniejsze niż w przypadku podstacji Wielkopolska. Na rysunku 7 przedstawiono histogram napięcia na odbierakach trolejbusów. Z prawej strony histogramu widoczne jest „podwyższenie” pików odpowiadających stanom hamowania rezystorowego.

Na rysunkach 8, 9 i 10 przedstawiono porównanie względnego czasu przekroczenia napięcia 770 V na szynach zbiorczych podstacji, względnego czasu załączenia rezystora hamowania oraz efektywności rekuperacji w obszarach zasilania poszczególnych podstacji trakcyjnych. Widoczne jest częste występowanie hamowania rezystorowego na obszarach zasilania najmniejszych podstacji: Wielkopolska i Sopot I. Zauważalna jest także znaczna różnica między czasem hamowania oporowego a dniami tygodnia, co wynika z mniejszej intensywności kursowania pojazdów oraz większej liczby pojazdów wyposażonych w rekuperację podczas sobót i niedziel. Efektywność hamowania odzyskowego (rys. 10) jest zdecydowanie najmniejsza w przypadku podstacji Sopot I i Sopot II. Stosunkowo mała w stosunku do potencjalnych możliwości (górzysty charakter trasy) jest także efektywność odzysku w obszarze podstacji Wielkopolska.

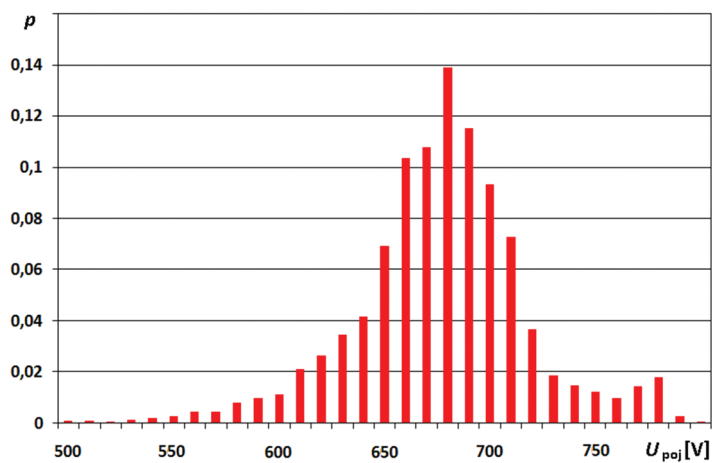
Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono wartość względnego czasu przekroczenia napięcia 770 V na szynach zbiorczych podstacji oraz wartość względnego czasu hamowania oporowego,



Rys. 5. Histogram napięcia szyn zbiorczych podstacji Wielkopolska



Rys. 6. Histogram napięcia szyn zbiorczych podstacji Północna



Rys. 7. Histogram napięcia na odbierakach trolejbusu

a także wartość efektywności hamowania odzyskowego w funkcji średniej liczby pojazdów znajdujących się na obszarze zasilania podstacji. Wyraźnie widoczna jest zależność między intensywnością ruchu (średnią liczbą pojazdów znajdujących się w obszarach zasilania poszczególnych podstacji) a warunkami hamowania odzyskowego. Komentarza wymaga relatywnie duża efektywność rekuperacji w stosunku do intensywności ruchu dla podstacji Sopot II (skrajny lewy punkt na rys. 11 i 12). Spowodowana jest ona lokalizacją pętli trolejbusowej Sopot Reja w obszarze zasilania podstacji Sopot II i długimi czasami postojów trolejbusów na tej pętli, co stwarza korzystne warunki do absorpcji energii hamowania odzyskowego przez układy potrzeb nietrakcyjnych pojazdów.

## Wnioski

Przeprowadzona analiza dowodzi silnej zależności między intensywnością ruchu pojazdów a potencjałem dla odzysku energii hamowania. Należy jednoznacznie stwierdzić, że w przypadku rozległych obszarów zasilania znaczna część energii generowanej podczas hamowania odzyskowego może być zabsorbowana przez inne pojazdy znajdujące się w ruchu. Czyni to bezzasadną instalację zasobników superkondensatorowych w celu ograniczenia zużycia energii. Zasobniki te natomiast mają zastosowanie w przypadku małogabarytowych podstacji zasilających relatywnie niewielkie obszary zasilania, gdzie warunki dla zajścia rekuperacji na drodze pojazd–pojazd są znacznie mniejsze

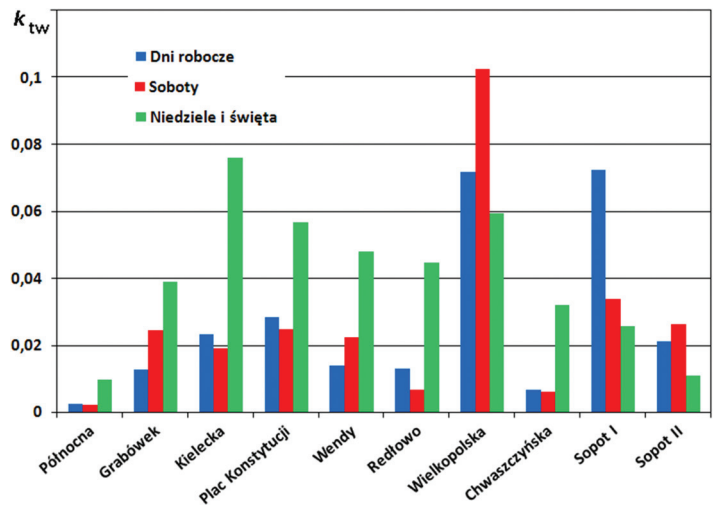
W środowisku osób zajmujących się energetyką trakcji miejskiej często niedoceniana jest możliwość rekuperacji energii elektrycznej na drodze pojazd–pojazd i tym samym przeceniane są możliwości oszczędności energii wynikające z zainstalowania zasobnika. W polskich systemach transportowych, eksploatujących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

Odnosząc się do gdyńskiej sieci trolejbusowej, bezdyskusyjnie najbardziej odpowiednią podstacją dla instalacji zasobnika energii jest podstacja Wielkopolska, na obszarze której często występuje hamowanie oporowe oraz efektywność wykorzystania energii hamowania odzyskowego jest relatywnie mała w stosunku do potencjalnych możliwości wynikających z górzystego charakteru trasy. Rozważyć należy także instalacje zasobników na podstacjach Sopot I i Sopot II, jednak nieznaczne obciążenie tych podstacji niesie za sobą niewielki wolumen energii możliwej do zaoszczędzenia.

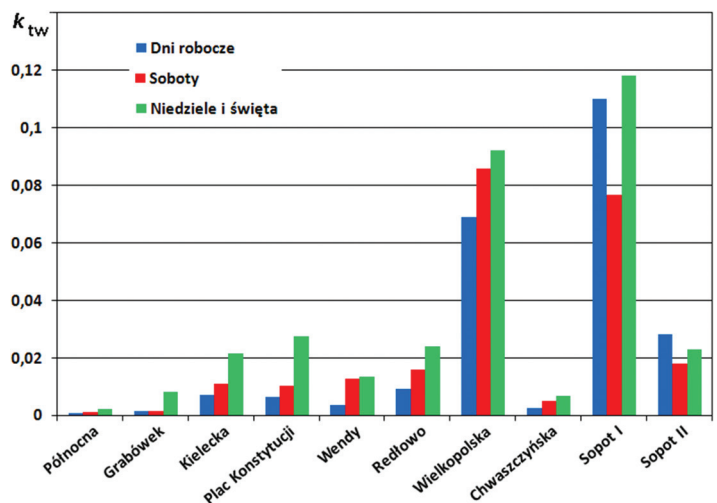


## Literatura

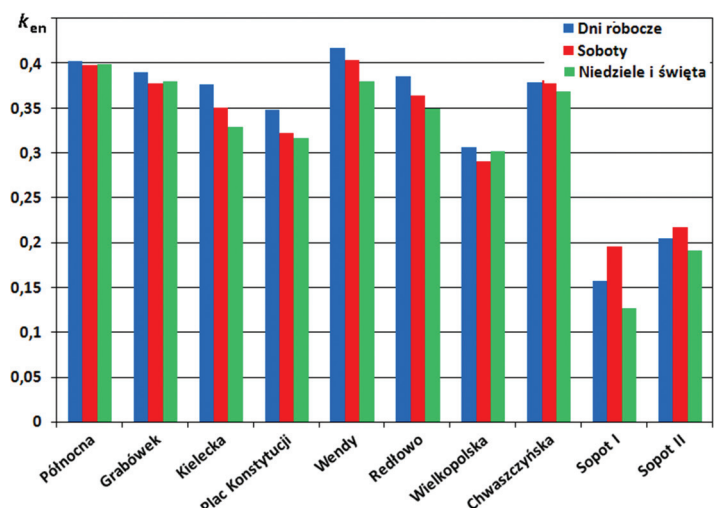
- [1] Bartmiejczyk M.: *Výpočet nap jen trolejbusových systémů metodou Monte Carlo*. XLII. Sešit Katedry Elektrotechniky. VŠB Ostrava. Ostrava 2010.
- [2] Bartmiejczyk M.: *Analyza efektivnosti rekuperacije trolejbusom dopravy metodou Monte Carlo*. XLIII. Sešit Katedry Elektrotechniky. VŠB Ostrava. Ostrava 2010.
- [3] Judek S., Skibicki J.: *Wyznaczanie parametrów elektrycznych trakcyjnego układu zasilania dla złożonych warunków ruchu przy wykorzystaniu programu pspice*. Przegląd Elektrotechniczny 12/2009. 270–273.



Rys. 8. Względny czas przekroczenia napięcia 770 V na sznach zbiorczych poszczególnych podstacji trakcyjnych



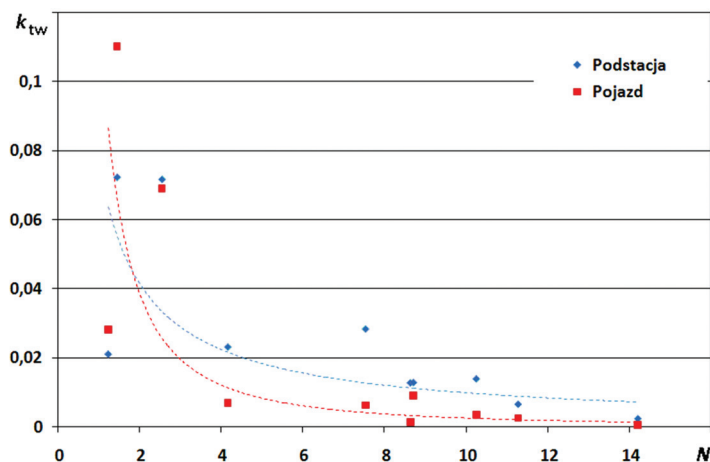
Rys. 9. Względny czas pracy hamowania rezystorowego w pojazdach na obszarach zasilania poszczególnych podstacji



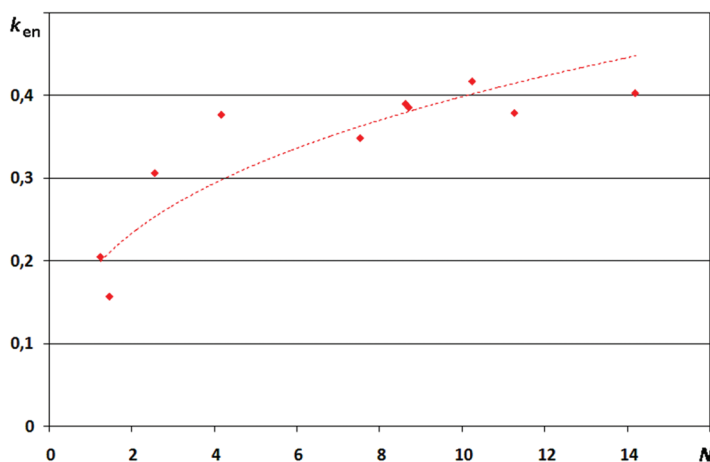
Rys. 10. Efektywność hamowania odzyskowego na obszarach zasilania poszczególnych podstacji

- [4] Gutten M.: *Diagnostic of Distribution Transformers by SFRA Method*. Przegląd Elektrotechniczny 4/2007, Vol. 83, s. 144–146.





Rys. 11. Wartość względnego czasu przekroczenia napięcia 770 V na szynach zbiorczych podstacji („Podstacja”) oraz wartość względnego czasu hamowania oporowego w funkcji średniej liczby pojazdów znajdujących się na obszarze zasilania podstacji („Pojazd”)



Rys. 12. Wartość efektywności hamowania odzyskowego w funkcji średniej liczby pojazdów znajdujących się na obszarze zasilania podstacji

- [5] Kobryń J.: *Kierunki rozwoju transportu w Polsce*. Polityka gospodarcza i społeczna wobec wyzwań współczesności, pod redakcją Czapka M. i Klimas B. Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji w Bytomiu. Bytom 2011, p. 224–231.
- [6] Kolar V., Paleček J., Kocman S., Trung Vo T., Orsag 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

*This paper has been elaborated in the framework of the project Opportunity for young researchers, reg. no. CZ.1.07/2.3.00/30.0016, supported by Operational Programme Education for Competitiveness and co-financed by the European Social Fund and the state budget of the Czech Republic.*

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



MET'2013

## XI Międzynarodowa Konferencja MET'2013 Nowoczesna Trakcja Elektryczna 10–12 października 2013 r.

Konferencja MET'2013 stanowić będzie okazję dla specjalistów zajmujących się zelektryfikowanym transportem do przedstawienia referatów oraz wyników prac omawiających aktualne trendy rozwojowe, osiągnięcia i problemy z zakresu techniki transportu elektrycznego na naszym kontynencie.

Głównym organizatorem Konferencji jest Zakład Trakcji Elektrycznej Politechniki Warszawskiej, a współorganizatorami Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu Politechniki Gdańskiej i Instytut Elektrotechniki.

Informacje o tej oraz poprzednich konferencjach MET dostępne są pod adresem: <http://ztu.ime.pw.edu.pl>

### Adres sekretariatu MET'2013

Instytut Maszyn Elektrycznych  
Zakład Trakcji Elektrycznej  
Plac Politechniki 1; 00-661 Warszawa  
tel.: +48 22 234 74 35, +48 22 234 73 44, fax +48 22 629 98 17  
e-mail: iwona.gryz@ee.pw.edu.pl; mirosław.lewandowski@ee.pw.edu.pl  
<http://ztu.ime.pw.edu.pl>