

UPROSZCZONA METODA OCENY POTENCJAŁU REKUPERACJI ENERGII W TRAKCJI MIEJSKIEJ

Mikołaj BARTŁOMIEJCZYK

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347 14 16 e-mail: mikolaj.bartlomiejczyk@pg.gda.pl

Streszczenie: Zasobniki energii elektrycznej umożliwiające zwiększenie wykorzystania energii hamowania odzyskowego w trakcji elektrycznej są coraz częściej stosowane. Skuteczność ich działania zależy od struktury układu zasilania komunikacji miejskiej i charakterystyki ruchu, dlatego wprowadzenie ich do użytku powinno być poprzedzone analizą techniczną. Analiza taka może być wykonana w oparciu o symulację układu zasilania. Jednak taka procedura jest bardzo pracochłonna. W artykule przedstawiono uproszczoną metodę oceny potencjału rekuperacji w trakcji miejskiej opartą na łatwych do realizacji pomiarach.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, trakcja miejska, zasobniki energii elektrycznej, superkondensatory.

1. REKUPERACJA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Każda maszyna elektryczna może być scharakteryzowana zdolnością do dwukierunkowego przepływu energii. W przypadku silników trakcyjnych oznacza to zdolność do rekuperacji energii hamowania, czyli zamiany energii kinetycznej pojazdu w elektryczną, podczas której wytwarzany jest moment hamujący [2].

W klasycznym układzie zasilania rekuperowana energia może być zużyta tylko przez inny pojazd znajdujący się w obszarze zasilania podstacji [8]. Jednak w licznych sytuacjach w obszarze zasilania podstacji nie ma innego pojazdu mogącego przyjąć tę energię. Wówczas rozpraszana jest ona w rezystorach hamowania pojazdu. Następstwem jest brak możliwości odzyskania energii hamowania. W celu uniknięcia takiej sytuacji mogą być zainstalowane układy zasobnikowe gromadzące energię. Jednak instalacja takich systemów wiąże się ze znacznymi nakładami finansowymi i koniecznością wykonania analizy stopnia wykorzystania energii rekuperacji. Może być ona zrealizowana za pomocą symulacji pracy układu zasilania, jednak, ze względu na wpływ wielu czynników zewnętrznych o charakterze losowym, taka symulacja jest złożona [1]. Alternatywą jest pomiar wartości energii rozpraszanej w rezystorach hamowania w pojazdach, co wiąże się z przeprowadzeniem skomplikowanych pomiarów [3]. Zaproponowana metoda oparta jest na łatwych do wykonania pomiarach prądu obciążenia podstacji trakcyjnych.

Pierwsza część analizy przeprowadzono w Przedsiębiorstwie Komunikacji Trolejbusowej w Gdyni w oparciu o dwie podstacje trakcyjne gdyńskiej sieci trolejbusowej, PT Grabówek i PT Sopot. PT Grabówek zasilą fragment sieci trolejbusowej o znacznej intensywności ruchu (interwał 3

minuty), natomiast PT Sopot zasilą linie podmiejską o niewielkim ruchu (interwał 30 minut). W dalszej części artykułu została zaprezentowana walidacja metody w oparciu o wszystkie podstacje trakcyjne znajdujące się w gdyńskiej sieci trolejbusowej.

Ruch pojazdów w komunikacji miejskiej charakteryzuje się dużym wpływem czynników zewnętrznych o losowym charakterze. Szczególnie dotyczy to trolejbusów, które poruszają się po wspólnych pasach ruchu innymi pojazdami drogowymi. Efektem tego obciążenie układu zasilania komunikacji miejskiej jest procesem stochastycznym. W związku z tym, do analizy pracy układu elektrotrakcyjnego predestynowane są metody statystyczne.

2. STATYSTYCZNA ANALIZA OBCIĄŻENIA PODSTACJI TRAKCYJNEJ

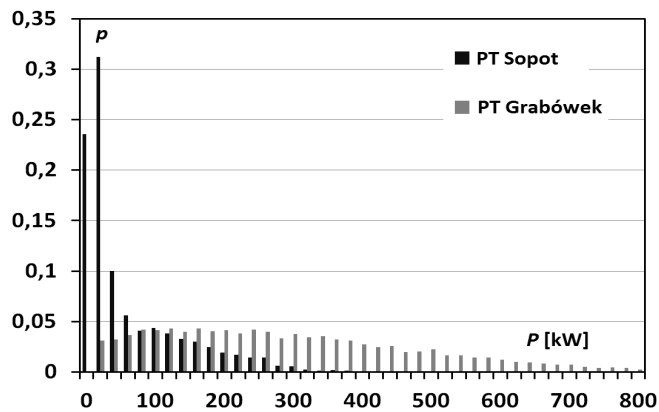
Aby możliwy był odzysk energii hamowania konieczne jest zapewnienie odbiorników dla generowanej energii [4, 8]. Klasyczny układ zasilania transportu miejskiego charakteryzuje się jednostronnym zasilaniem sieci trakcyjnej i brakiem zasobników energii. Przy pominięciu strat przesyłowych oznacza to, iż aby możliwe było pełne wykorzystanie energii rekuperacji moc chwilowa P_{PT} obciążenia podstacji trakcyjnej musi być większa od mocy chwilowej P_{rek} generowanej przez rekuperujące pojazdy znajdujące się w obszarze zasilania danej podstacji. Można to wyrazić relacją:

$$P_{PT} \geq P_{rek} \quad (1)$$

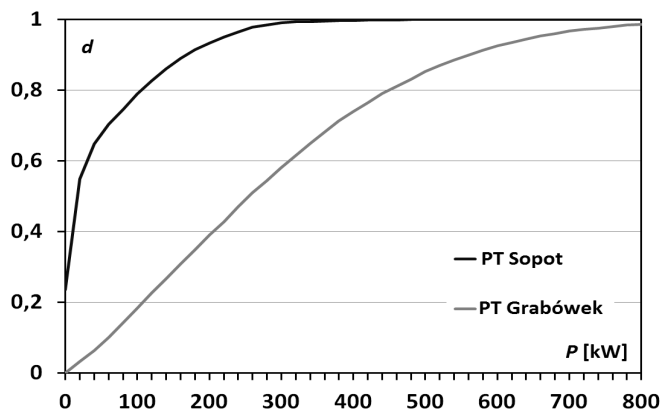
Na rysunku 1 zaprezentowano histogram obciążenia PT Grabówek i PT Sopot, który sporządzono na podstawie pomiarów. Różny charakter ruchu ma odzwierciedlenie w kształcie histogramów. W przypadku PT Sopot niewielkie natężenie ruchu skutkuje niewielkim obciążeniem podstacji i skupieniem wartości histogramu po jego lewej stronie, natomiast dla znacznie obciążonej PT Grabówek wartości są skupione po prawej stronie.

Spełnienie warunku (1) może być analizowane na podstawie przebiegu dystrybuanty obciążenia podstacji trakcyjnej (rys. 2). Wartość d dystrybuanty, odpowiadająca mocy P oznacza, iż obciążenie podstacji będzie mniejsze niż wartość P z prawdopodobieństwem d . Na podstawie warunku (1) można stwierdzić, że przekazanie rekuperowanej mocy o wartości chwilowej P do układu zasilania będzie możliwe z prawdopodobieństwem d . Średnia moc hamowania odzy-

skowego jest na poziomie 100 kW, więc w przypadku PT Grabówek będzie możliwe wykorzystanie 80% energii hamowania, a w PT Sopot będzie to 20%.



Rys. 1. Histogram obciążenia P podstacji PT Sopot i PT Grabówek, p - prawdopodobieństwo wystąpienia danej wartości obciążenia



Rys. 2. Dystrybuanta d obciążenia P podstacji PT Sopot i PT Grabówek

Jeśli warunek (1) nie jest spełniony, jedynie część generowanej mocy o wartości chwilowej równej aktualnemu obciążeniu podstacji P_{PT} będzie wykorzystana. Pozostała część mocy zostanie wytracona w rezystorach hamowania. Potencjał wykorzystania energii rekuperacji można określić na podstawie przebiegu $P_{PT}(t)$ obciążenia podstacji trakcyjnej. Zdefiniowana zostanie funkcja $e(P_{rek})$, która wyraża stosunek energii rekuperacji E_{ogr} możliwej absorpcji przy ograniczonej mocy chwilowej P_{PT} obciążenia podstacji do całkowitej energii E_{rek} możliwej do wygenerowania przez źródło o mocy P_{rek} :

$$e(P_{rek}) = \frac{E_{ogr}}{E_{rek}} \quad (2)$$

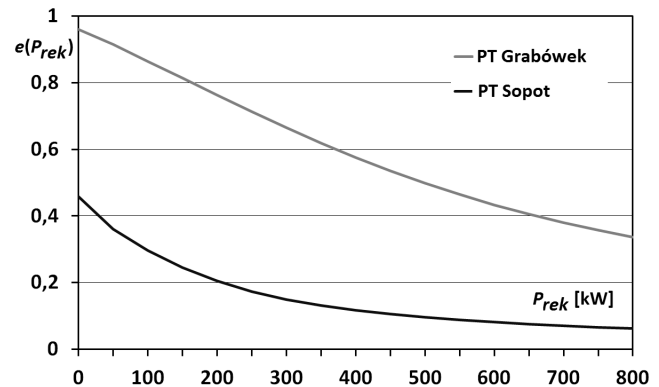
gdzie E_{rek} i E_{ogr} oznaczają energię możliwą do absorpcji i całkowitą energię do wytworzenia w czasie T .

$$e(P_{rek}) = \frac{\int_0^T P_{ogr}(P_{rek}, t) dt}{P_{rek} \cdot T} \quad (3)$$

gdzie $P_{ogr}(P_{rek}, t)$ wyraża ograniczenie absorpcji generowanej energii do poziomu mocy P_{PT} obciążenia podstacji:

$$P_{ogr} = \begin{cases} P_{rek} < P_{PT} \rightarrow P_{Ch} = P_{rek} \\ P_{rek} \geq P_{PT} \rightarrow P_{Ch} = P_{PT} \end{cases} \quad (4)$$

Rysunek 3 przedstawia wykres stopnia wykorzystania rekuperowanej energii w funkcji mocy rekuperacji. Przy założeniu mocy rekuperacji 100 kW w przypadku PT Grabówek może zostać wykorzystane 80 – 90% energii rekuperacji. Dla PT Sopot, ze względu na znacznie mniejszą intensywność ruchu, wykorzystanie rekuperacji jest na poziomie 20 – 30%.



Rys. 3. Porównanie funkcji $e(P_{gen})$ dla PT Grabówek i PT Sopot

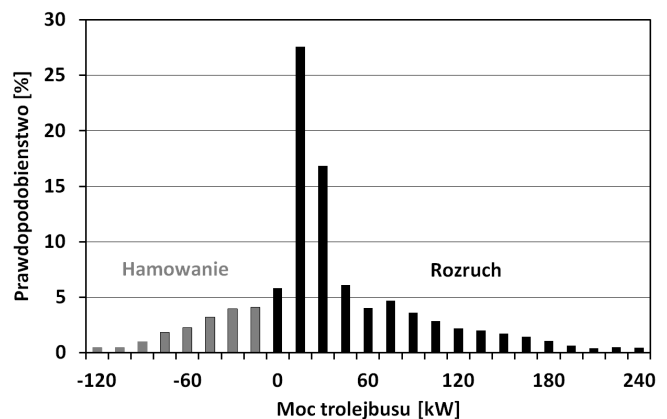
3. WYZNACZANIE POTENCJAŁU REKUPERACJI

W prezentowanej metodzie funkcja $e(P_{gen})$ stanowi podstawę wyznaczania potencjału rekuperacji. Wyznacza się ją na podstawie rejestracji prądu obciążenia podstacji trakcyjnej, pomiar taki jest stosunkowo łatwy do przeprowadzenia.

Stopień wykorzystania rekuperacji można wyznaczyć na dwa sposoby:

- wariant I: przy przyjęciu mocy rekuperacji pojazdu na stałym poziomie, równym średniej mocy generowanej podczas hamowania,
- wariant II: przy uwzględnieniu losowego charakteru hamowania odzyskowego.

W wariacie I konieczne jest określenie średniej mocy P_{rek_sr} rekuperacji w pojeździe. Stopień wykorzystania odzysku jest równy wartości funkcji $e(P_{rek_sr})$. Moc P_{rek_sr} może być wyznaczona na podstawie parametrów znamionowych układu napędowego.



Rys. 4. Histogram poboru mocy przez trolejbus

W wariancie II rezygnuje się z tego uproszczenia i uwzględnia się losowy charakter przebiegu hamowania. W rzeczywistym układzie moc generowana podczas hamowania odzyskowego nie ma stałej wartości, zależy ona od warunków zewnętrznych. Podobnie jak moc obciążenia podstacji, moc hamowania ma losowy charakter. Rysunek 4 przedstawia histogram mocy trolejbusu z zaznaczonym obszarem rozruchu i hamowania.

Przy uwzględnieniu, że wartość mocy rekuperacji jest opisana zmienną losową o rozkładzie gęstości $p_{rek}(P_{rek})$, gdzie P_{rek} oznacza moc rekuperacji, to stopień wykorzystania potencjału energii rekuperacji może być wyznaczony po opisaniu rozkładu $p_{rek}(P_{rek})$ na funkcji $e(P_{rek})$:

$$e_{PT} = \int_0^{P_{rek_max}} p_{rek}(P_{rek}) \cdot \left(\frac{\int_0^T P_{Ch}(P_{rek}, t) dt}{P_{rek} \cdot T} \right) dP_{rek} \quad (5)$$

gdzie P_{rek_max} oznacza maksymalną moc rekuperacji. Funkcja e_{PT} oznacza stopień wykorzystania potencjału rekuperacji dla danej podstacji obliczony na podstawie przebiegu obciążenia $P_{TS}(t)$. Można także zdefiniować stopień niewykorzystania potencjału rekuperacji e'_{PT} , zdefiniowany jako:

$$e'_{PT} = 1 - e_{PT} \quad (6)$$

Niesie on informację jaka część energii zwracanej przez układy napędowe jest wytracana w rezystorach hamowania, a zatem w jakim stopniu może wzrosnąć wykorzystanie rekuperacji po instalacji zasobników energii.

W obliczeniach przyjęto założenie, że w danym momencie hamuje odzyskowo tylko jeden pojazd. Jednak możliwa 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 jest równa:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^{N-1} A\right) = \sum_{i=1}^{N-1} (-1)^{i+1} \binom{N-1}{i} P\left(\bigcap_{k=j}^i A\right) \quad (7)$$

W Tabelcy 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 trolejbusowych i określonej na ich podstawie funkcji $e(P_{rek})$. 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 spo-

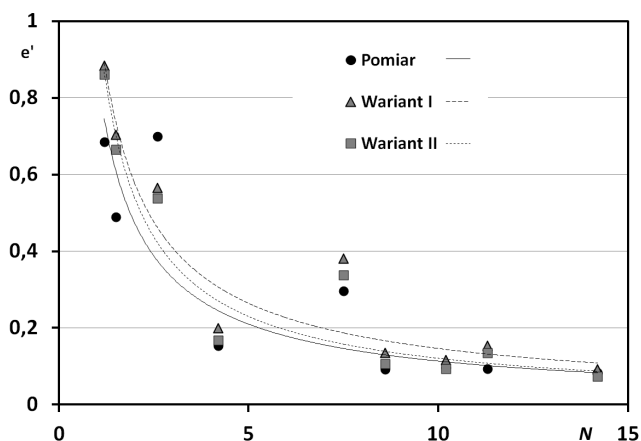
wodowany jest niewielki. W odniesieniu do całkowitego poziomu generowanej energii odzysku nie przekracza on 5%. W przypadku mniejszych podstacji, zarówno prawdopodobieństwo wystąpienia równoczesnego hamowania jak i błąd tym spowodowany są minimalne.

Tablica 1. Prawdopodobieństwo p_h wystąpienia równoczesnego hamowania wielu pojazdów i błąd Δe

Srednia liczba pojazdów	Prawdopodobieństwo p_h	Błąd bezwzględny Δe
1,2	0,04	0,0023
1,5	0,07	0,0036
2,6	0,10	0,0093
4,2	0,14	0,0089
7,5	0,17	0,0227
8,6	0,20	0,0231
10,2	0,23	0,0184
11,3	0,25	0,0358
14,2	0,28	0,0240

4. WALIDACJA METODY

Badania walidacyjne przeprowadzono w gdyńskiej sieci trolejbusowej. W trakcie nich przeprowadzono pomiary ilości energii wytracanej w rezystorach hamowania w pojazdach. Wyniki odniesiono do obszarów zasilania poszczególnych podstacji trakcyjnych. Przeprowadzono także pomiary prądów obciążenia podstacji trakcyjnych. Pozwoliło to na wyznaczenie stopnia niewykorzystania potencjału rekuperacji e'_{PT} w obszarach zasilania poszczególnych podstacji. Przeprowadzono także uproszczone obliczenia stopnia niewykorzystania potencjału rekuperacji e'_{PT} , w których przyjęto stałą wartość mocy rekuperacji pojazdu zamiast opisanej rozkładem prawdopodobieństwa $p_{rek}(P)$. Wyniki przedstawiono na rysunku 5, gdzie pokazane są poszczególne wartości w funkcji intensywności ruchu wyrażonej średnią liczbą pojazdów znajdujących się w obszarze zasilania danej podstacji, dla wariantów I i II obliczeń.



Rys. 5. Stopień niewykorzystania potencjału rekuperacji wyznaczony na podstawie pomiarów, obliczeń oraz uproszczonych obliczeń, N - średnia liczba pojazdów

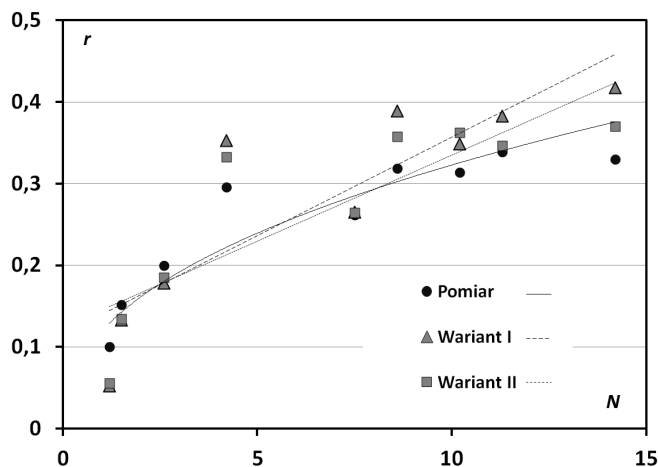
W Tabelcy 2 przedstawiono porównanie wartości błędów bezwzględnego wyznaczania potencjału niewykorzystania rekuperacji dla metody pełnej i uproszczonej. Na rysunku 6 przedstawiona jest wartość odzysku energii (stosunek energii rekuperowanej do energii pobranej przez pojazdy) w funkcji intensywności ruchu. Obliczenia wykonano przy założeniu stopnia rekuperacji 0,45 w idealnych warunkach [1].



Tablica 2. Porównanie błędów bezwzględnych wyznaczenia

Średnia liczba pojazdów	Błąd metody wariant I	Błąd metody wariant II
1,2	0,18	0,20
1,5	0,17	0,21
2,6	0,16	0,14
4,2	0,01	0,04
7,5	0,04	0,08
8,6	0,01	0,04
10,2	0,00	0,02
11,3	0,04	0,06
14,2	0,01	0,01

Wzrost liczby pojazdów powoduje wzrost prawdopodobieństwa znalezienia odbiorcy dla energii rekuperacji. Efektywność wykorzystania odzysku energii rośnie więc wraz z intensywnością ruchu. Z tego powodu instalacja zasobników energii nie jest uzasadniona w podstacjach trakcyjnych zasilających rozległe obszary zasilania. W takich przypadkach wystarczająca jest rekuperacja pomiędzy pojazdami.



Rys. 6. Stopień odzysku r energii hamowania wyznaczony na podstawie pomiarów, obliczeń oraz uproszczonych obliczeń, N - średnia liczba pojazdów

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiona metoda umożliwia prostą analizę układu zasilania z punktu widzenia zwiększenia efektywności hamowania odzyskowego. Jest ona łatwa w stosowaniu, wymagany jest głównie pomiar prądu obciążenia podstacji trakcyjnej, który jest łatwy do zrealizowania. Co więcej, znaczna liczba współczesnych podstacji trakcyjnych fabrycznie wyposażona jest w rejestratory prądów obciążenia. Dla zwiększenia dokładności obliczenia mogą być też oparte o charakterystykę mocy hamowania odzyskowego pojazdu

(wariant II). Maksymalny błąd metody jest rzędu 15 - 20%, co jest wystarczające dla wstępnej oceny instalacji zasobników energii [5-7]. Opracowana metoda przeznaczona jest do zastosowania w przedsiębiorstwach komunikacji tramwajowej i trolejbusowej, które rozważają podjęcie kroków w celu zmniejszenia zużycia energii.

Podziękowania

Przedstawione badania pomiarowe zostały wykonane przy wsparciu projektu ELIPTIC finansowanego z programu Horizon 2020, umowa o grant nr 636012, realizowanego przez PKT Gdynia.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Hamacek, S., Bartłomiejczyk, M., Hrbac, R. Misak, S. Styskała, V.: Energy recovery effectiveness in trolleybus transport. *Electric Power Systems Research* 112, 1–11 (2014)
2. Jarzbowicz L.: Indirect measurement of motor current derivatives in PMSM sensorless drives. *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 20, no 7, pp. 23–26 (2014)
3. Bartłomiejczyk, M., Połom, M.: Spatial Aspects of Tram and Trolleybus Supply System. In: 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA), 2015, Technical Univ Kosice. pp. 223-227 (2015)
4. Judek, S., Skibicki, J.: Wyznaczanie parametrów elektrycznych trakcyjnego układu zasilania dla złożonych warunków ruchu przy wykorzystaniu programu pspice. *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 12, pp. 270-273 (2009)
5. Bartłomiejczyk, M., Połom, M., Styskała, V.: Benchmark of the traffic congestion in electrical transport by means of multi criteria decision analysis. *Przegląd Elektrotechniczny*. no 11, pp.248-252 (2013)
6. Korenčiak, D., Gutten, M.: Opportunities for integration of modern systems into control processes in intelligent buildings. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 88, no. 2 (2012).
7. Figlus, T.: The application of a continuous wavelet transform for diagnosing damage to the timing chain tensioner in a motorcycle engine. *Journal of Vibroengineering*. Volume: 17 Issue: 3 Pages: 1286-1294 (2015)
8. Czucha J., Karwowski K., Mizan M., Pazdro P.: Efektywność odzysku energii hamowania elektrodynamicznego w komunikacji miejskiej. *Przegląd Elektrotechniczny* 2004, Vol. 80, no. 10, pp. 1016-1019

SIMPLIFIED METHOD FOR ASSESSING THE POTENTIAL OF ENERGY RECOVERY IN ELECTRIC TRACTION

Electrical energy storage enable more efficient use of recuperation braking in electric traction are increasingly becoming more popular. Their effectiveness depends on the structure of the supply transport and traffic characteristics, thus putting them to use should be preceded by technical analysis. Such an analysis can be made based on the simulation of supply system. However, this procedure is very time-consuming. The article presents a simplified method of evaluating the potential recovery in urban traction based on easy to implement measurements.

Keywords: electric energy storage systems, supercapacitors, electric traction.