

Tadeusz Solarek

Badania efektów energetycznych hamowania rekuperacyjnego w trakcji tramwajowej

W ostatnich latach w coraz większym stopniu wprowadzane są do eksploatacji tramwaje przystosowane do hamowania z odzyskiem energii. W Łodzi są to tramwaje Cityrunner firmy Bombardier, wyposażone w silniki asynchroniczne, oraz zmodernizowane tramwaje 805Na z napędowym układem energoelektronicznym, zapewniającym rozruch bez strat i możliwość hamowania rekuperacyjnego. Część tych ostatnich napędzana jest silnikami asynchronicznymi, a część tradycyjnymi silnikami szeregowymi prądu stałego.

Ciągle rosnąca liczba taboru przystosowanego do hamowania z odzyskiem energii sprawia, że istotne stają się pytania co do celowości i opłacalności modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej pod kątem zwiększenia efektywności energetycznej hamowania rekuperacyjnego.

Jednym ze sposobów zwiększenia efektów rekuperacji jest zainstalowanie w układzie elektroenergetycznym, najczęściej na podstacjach, falowników lub wirujących zasobników energii, przejmujących nadmiarową energię rekuperacji. W [5] przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla typowego śródmiejskiego rejonu zasilania, pozwalających oszacować efekty energetyczne zainstalowania w układzie zasilania tego rejonu takich urządzeń. W niniejszym opracowaniu przedstawione zostaną wyniki analogicznych symulacji przeprowadzonych dla dwóch innych rejonów aglomeracji łódzkiej – rejon podstacji „Zgierska”, usytuowany poza centrum miasta, i rejon podstacji „Emilia”, zasilającej odcinek linii podmiejskiej.

Aby można było ocenić zyski energetyczne płynące ze stosowania hamowania odzyskowego przy różnych rozwiązaniach zastosowanych w układzie elektroenergetycznym, symulacje przeprowadzone zostały w czterech wariantach: bez stosowania hamowania odzyskowego, z hamowaniem odzyskowym przy obecnym stanie i wyposażeniu układów zasilania, przy zastosowaniu na podstacjach falowników, oraz w ostatnim wariantcie, przy wykorzystaniu zasobników energii. Założono, że ruch prowadzony jest wyłącznie zmodernizowanym taborom 805Na, przy czym w wariantcie bez hamowania odzyskowego tramwaje hamują oporowo, ale wyposażone są w bezstratny układ rozruchowy.

Efektywność rekuperacji w oczywisty sposób zależy od natężenia ruchu, dlatego symulacje przeprowadzone zostały dla natężenia ruchu w okresie szczytu, jak i dla ruchu w okresie poza-szczytowym.

W tabeli 1 podano, wyznaczone w [5], oszczędności w zużyciu energii, w stosunku do zużycia energii bez stosowania rekuperacji, dla śródmiejskiego rejonu zasilania. Moc średnia podstacji zasilającej ten rejon, będąca miernikiem zużycia energii,

wynosiła (w wersji bez stosowania rekuperacji) dla ruchu w szczycie $P = 571,7$ kW, a dla ruchu poza szczytem $P = 321,1$ kW.

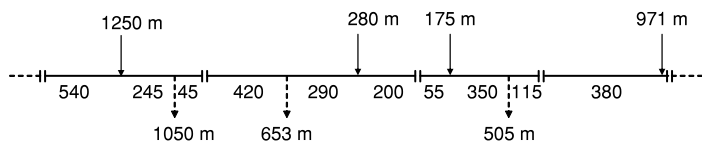
Tabela 1

Oszczędności energii uzyskiwane dzięki rekuperacji dla śródmiejskiego rejonu zasilania

		Bez falowników	Falowniki	Zasobniki
Ruch w szczycie	[%]	21,5	32,9	25,9–32,6
Poza szczytem	[%]	11,0	29,3	19,1–28,6

Rejon podstacji „Zgierska”

Rejon „Zgierska” składa się z czterech sekcji. Schemat rejonu zamieszczono na rysunku 1. Uwidoczniono na nim rozmieszczenie oraz długości zasilaczy i kabli powrotnych. Wszystkie zasilacze i kable powrotne wykonane są przewodem aluminiowym 625 mm². Zasilana linia jest linią dwutorową. Sieć trakcyjna, o zawieszeniu łańcuchowym, składa się z liny nośnej 70 mm² Cu i jednego przewodu jezdnego Djp100. Dla każdego kierunku ruchu występuje pięć przystanków. Tramwaje poruszają się po wydzielonym torowisku. W rejonie znajdują się dwa skrzyżowania regulowane światłami i nie ma innych przeszkód ograniczających prędkość jazdy. Nie występują skrzyżowania z innymi liniami tramwajowymi.



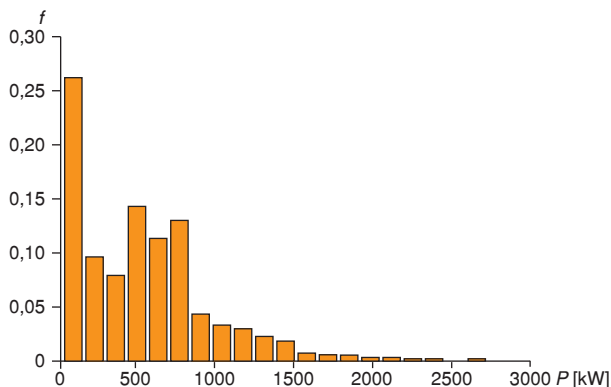
Rys. 1. Schemat rejonu zasilania „Zgierska”

Program użyty do symulacji umożliwia losowe wprowadzanie opóźnień tramwajów wjeżdżających w rejon zasilania w stosunku do rozkładu jazdy. Jako daną wejściową wczytuje się wartość średnią opóźnień, które następnie są losowane według wykładniczego rozkładu prawdopodobieństwa. W wyniku obserwacji ruchu w badanym rejonie zasilania przyjęto wartość średnią opóźnienia równą 20 s, zarówno w szczycie, jak i poza szczytem.

Dopuszczalną, maksymalną wartość napięcia na pantografach przyjęto podobnie jak w [5] równą 800 V. Napięcie stanu jałowego podstacji założono równe 720 V. Przy tej wartości, minimalne napięcie na pantografie jakie zaobserwowano podczas symulacji, w wariantcie bez stosowania rekuperacji i dla szczytowego natężenia ruchu wyniosło 410 V, a średnia wartość napięcia na odbierakach wszystkich tramwajów, za czas poboru prądu, wyniosła 636 V.

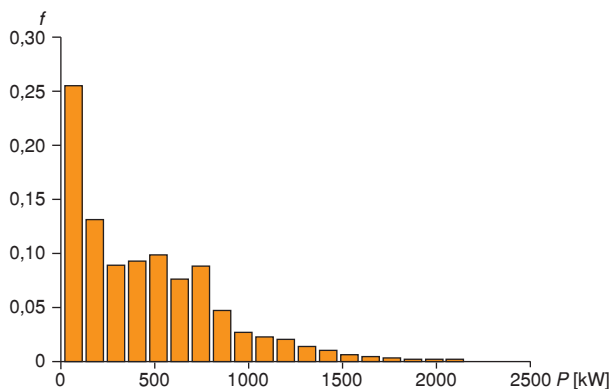
Dla wariantu bez stosowania rekuperacji symulacje dały następujące wyniki: dla szczytowego natężenia ruchu moc średnia podstacji wynosiła 395,6 kW, a dla okresu poza szczytem 204,8 kW. Zmienność obciążenia i jego wartości szczytowe cha-

rakteryzuje histogram prądu obciążenia podstacji przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Histogram obciążenia podstacji, szczyt, bez rekuperacji

Wyniki symulacji przy stosowaniu hamowania odzyskowego, ale bez wyposażania podstacji w dodatkowe urządzenia są następujące: moc średnia podstacji podczas szczytowego ruchu wyniosła 334,9 kW, a poza szczytem 187,1 kW (rys. 3).



Rys. 3. Histogram obciążenia podstacji, szczyt, rekuperacja

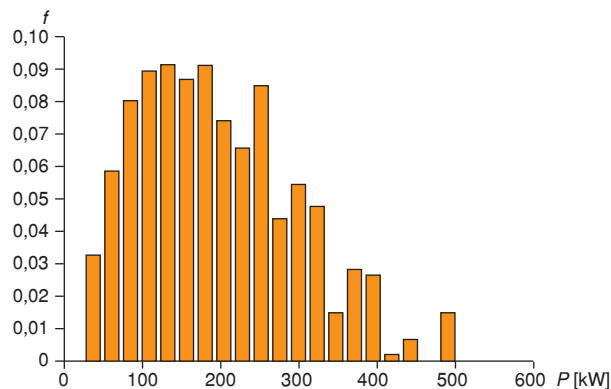
Z porównania histogramów zamieszczonych na rysunku 2 i 3 wynika, że stosowanie rekuperacji w pewnym stopniu zmniejszyło również szczytowe obciążenia podstacji.

W wariancie z zastosowaniem falowników przyjęto, że jedna trzecia z wszystkich zespołów zainstalowanych na podstacji to zespoły prostownikowo-falownikowe i odpowiednio do tego wyznaczono charakterystykę zewnętrzną podstacji podczas pracy falownikowej. Symulacje dały następujące wyniki:

- dla szczytu, średnia moc przy pracy prostownikowej wyniosła 331,6 kW, podczas pracy falownikowej 50,2 kW, zatem wypadkowa moc średnia, mówiąca o zużyciu energii ma wartość 284,1 kW;
- poza szczytem moce te wyniosły odpowiednio 189,4 kW; 37,8 kW i 151,6 kW.

Szczyty obciążeń i histogram obciążenia podstacji za czas jej pracy prostownikowej są prawie identyczne, jak w wariancie poprzednim, bez stosowania falowników. Na rysunku 4 przedstawiono histogram obciążenia falowników.

Porównując średnie i szczytowe obciążenia podstacji podczas pracy prostownikowej i falownikowej (hist. 3 i hist.4) można stwierdzić, że moc zainstalowanych falowników powinna wynosić około 25% całkowitej mocy podstacji.



Rys. 4. Histogram obciążenia podstacji podczas pracy falownikowej, szczyt

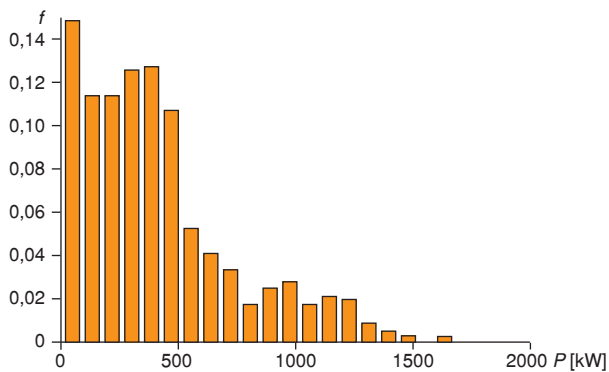
Wirujące zasobniki energii nie tylko mogą magazynować nadmiarową energię rekuperacji, lecz również oddawać ją w okresach mocnego obciążenia podstacji, niwelując w pewnym stopniu krótkotrwałe szczyty obciążenia. Zdolność zasobnika do przejmowania nadmiarowej energii rekuperacji oraz ograniczania szczytowych obciążeń zależy od jego dwóch podstawowych parametrów – pojemności energetycznej, równej różnicy energii kinetycznej bezwładnika przy maksymalnej i minimalnej prędkości obrotowej, oraz od mocy maszyny elektrycznej (silnika – prądnicy) z nim sprzęgniętej. Istotny jest również sposób sterowania zasobnikiem, który powinien zapewniać realizację dwóch częściowo sprzecznych ze sobą celów.

Z jednej strony powinno dążyć się do utrzymywania prędkości wirowania zasobnika na możliwie niskim poziomie, aby w każdej chwili był on zdolny do przejęcia jak największej ilości nadmiarowej energii rekuperacji. Aby to zadanie w pełni realizować, zasobnik powinien oddawać energię, gdy tylko podstacja przechodzi do pracy prostownikowej. Z drugiej strony chcielibyśmy, aby zasobnik niwelował szczytowe obciążenia podstacji, a więc w momencie, gdy one wystąpią posiadał zmagazynowaną energię. Określenie optymalnego sposobu sterowania zasobnikiem nie jest zatem zadaniem prostym, zależy od rodzaju zmian obciążenia podstacji zasilającej dany rejon i od przyjętych preferencji – czy bardziej zależy nam na maksymalnym odzyskiwaniu energii hamowania, czy na niwelowaniu szczytów obciążenia. Po analizie histogramów obciążenia podstacji w wariancie ze stosowaniem rekuperacji i kilkunastu próbnymi symulacjach przyjęto następujący sposób sterowania zasobnikiem – zasobnik oddaje energię, jeżeli chwilowe obciążenie podstacji przekracza pewną moc P_1 , przy czym nie rozładowuje się do końca, zachowując pewien zapas energii, który może zostać naruszony przy obciążeniu podstacji znacznie większą mocą P_2 .

Dla badanego rejonu przyjęto $P_1 = 600$ kW, $P_2 = 1500$ kW, a zapas energii zasobnika, wykorzystywany przy niwelowaniu szczytów, ma wielkość 0,2 kWh.

Symulacje przeprowadzono w pięciu wersjach, dla mocy silnika zasobnika zmienianej od 100 kW do 500 kW. Przyjęto ponadto, że pojemność energetyczna zasobnika jest nieograniczona, traktując następnie maksymalną chwilową wartość energii zgromadzonej w zasobniku jako jeden z wyników symulacji.

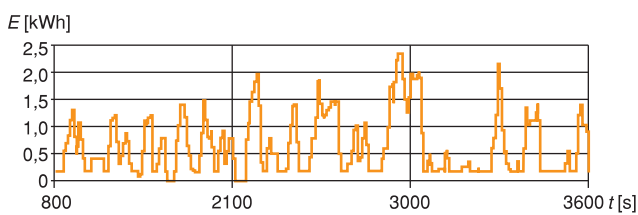
Moc średnia podstacji wyniosła od 275,6 kW do 307,5 kW dla szczytowego ruchu i od 146,8 kW do 170,2 kW dla ruchu poza szczytem, w zależności od założonej mocy silnika zasobnika. Porównując zamieszczony na rysunku 5 histogram (sporządzony przy założonej mocy maszyny zasobnika równej 500 kW)



Rys. 5. Histogram obciążenia podstacji, szczyt, zasobnik

z histogramem z rysunku 3, widać istotne obniżenie krótkotrwałych szczytów obciążeń podstacji z zasobnikiem.

Na rysunku 6 przedstawiono wykres energii skumulowanej w zasobniku w funkcji czasu, w okresie, w którym odnotowano maksimum tej energii, wynoszące 2,3 kWh. Widać z niego, że wartość energii zgromadzonej w zasobniku rzadko przekracza 1,5 kWh i prawdopodobnie zasobnik o takiej pojemności energetycznej byłby dla tego rejonu zasilania optymalny.



Rys. 6. Energia zmagazynowana w zasobniku

Tabela 2

Oszczędności energii uzyskiwane dzięki rekuperacji dla rejonu zasilania „Zgierska”

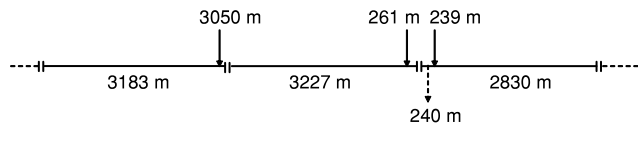
	Bez falowników	Falowniki	Zasobniki
Ruch w szczycie [%]	15,3	29,0	22,3–30,1
Poza szczytem [%]	8,5	27,8	16,9–28,3

Z porównania procentowych oszczędności energii, uzyskiwanych dzięki stosowaniu rekuperacji w rejonie śródmiejskim i rejonie „Zgierska” (tab. 1 i 2), wynika, że różnice między nimi są niewielkie. Jak było do przewidzenia, największe występują w wariantach z hamowaniem odzyskowym bez dodatkowych urządzeń na podstacji.

Rejon zasilania podstacji „Emilia”

Rejon zasilania tej podstacji obejmuje fragment linii podmiejskiej Łódź – Ozorków. Schemat rejonu zamieszczono na rysunku 7. Rejon składa się z trzech sekcji. Wszystkie zasilacze wykonane są z przewodu 625 mm² Al. Jedyne kable powrotne wykonane są dwoma równoległymi przewodami 625 mm² Al. Linia wybudowana została jako jednotorowa, z kilkoma mijankami. Sieć trakcyjna składa się z liny nośnej 70 mm² Cu oraz przewodu jezdni Djp100. Nie zastosowano przewodu wzmacniającego. Napięcie stanu jałowego podstacji przyjęto równe 740 V,

wyższe niż dla podstacji „Zgierska”, ze względu na duże spadki napięcia w obwodzie zasilania jednej z sekcji, długości 3018 m, i zasilanej z zasilacza długości 3050 m. Maksymalną wartość napięcia w sieci przyjęto jak poprzednio równą 800 V. Średnią wartość spóźnienia tramwajów wjeżdżających w rejon założono równą 45 s.



Rys. 7. Schemat rejonu zasilania „Emilia”

W wariantach bez stosowania hamowania z odzyskiem energii, średnia moc podstacji dla szczytowego natężenia ruchu wyniosła 190,8 kW, a dla ruchu poza szczytem – 95,6 kW.

W wariantach ze stosowaniem rekuperacji, bez zainstalowania dodatkowych urządzeń w układzie zasilania, analogiczne moce podstacji wyniosły odpowiednio 181,1 kW i 94,8 kW.

W wersji z falownikami na podstacji wypadkowa moc średnia dla szczytowego ruchu wyniosła 175,5 kW, a dla okresu pozaszczytowego – 86,8 kW.

Symulacja w wariantach z zasobnikiem energii na podstacji dała następujące wyniki: dla szczytu średnia moc podstacji wyniosła od 174,3 kW do 172,4 kW przy mocy silnika zasobnika odpowiednio 100 kW i 500 kW. Poza szczytem moce te wyniosły odpowiednio 87,2 kW i 85,3 kW.

Tabela 3

Oszczędności energii uzyskiwane dzięki rekuperacji dla rejonu zasilania „Emilia”

	Bez falowników	Falowniki	Zasobniki
Ruch w szczycie [%]	5,1	8,0	8,6–9,6
Poza szczytem [%]	0,8	9,2	8,8–10,8

Przyczyną niewielkich efektów stosowania rekuperacji w przypadku rejonu podstacji „Emilia” są przede wszystkim duże spadki napięcia wynikające ze znacznych długości sekcji i zasilaczy oraz niewielka różnica dopuszczalnej wartości napięcia w sieci i napięcia stanu jałowego podstacji. Te czynniki sprawiają, że nawet wyposażenie podstacji w falowniki lub zasobnik nie stanowi remedium na podniesienie sprawności rekuperacji. Bez tych dodatkowych urządzeń efekty rekuperacji są prawie zerowe, ponieważ do trudności z przesyłem rekuperowanej energii dochodzi małe prawdopodobieństwo znalezienia odbioru na energię hamowania, wynikające z małego natężenia ruchu.

Wnioski

Przeprowadzone symulacje wykazały, że dla danego rejonu zasilania, zastosowanie falowników lub zasobników daje bardzo zbliżone efekty energetyczne. Badania, przeprowadzone dla trzech rzeczywistych rejonów zasilania w jednym z miast, nie są z pewnością w pełni reprezentatywne nie tylko dla trakcji tramwajowej w innych aglomeracjach, lecz nawet dla innych rejonów zasilania w tym samym mieście. Tym niemniej pozwalają się zorientować jakich efektów można się spodziewać po wprowadzeniu rekuperacji (i ewentualnie falowników lub zasobników) w zależności od charakteru rejonu zasilania.

Dokończenie na s. 69 ➤

nych upustów dla przewoźników zamawiających nie pojedyncze trasy, ale całe cykle.

Pewną możliwość stworzyłoby przejście inicjatywy przez zarządcę infrastruktury, opracowanie układu cyklicznego tras pociągów w wszystkich kategoriach i zaoferowanie tych tras przewoźnikom kolejowym.



Literatura

- [1] Andrusiewicz A., Massel A.: *Zintegrowany cykliczny rozkład jazdy – nowoczesna forma kolejowego ruchu regionalnego*. Technika Transportu Szynowego 5/2000.
- [2] *Deutsches Kursbuch 1939*.
- [3] Liebchen C.: *Fahrplanoptimierung in Personenverkehr – muss es immer ITF sein?* Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 11/2005, s. 689–702.
- [4] Leuschel I.: *Der Fernverkehrsfahrplan 2003 der Deutschen Bahn AG*. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 7-8/2002, s. 452–464.
- [5] Massel A.: *Zintegrowany cykliczny rozkład jazdy a infrastruktura kolejowa*. Przegląd Kolejowy 7/1995.
- [6] Pacht J.: *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. B.G. Teubner. Stuttgart 1999.
- [7] Pellandini G.: *Taktfahrplan in Finnland*. Eisenbahn-Revue International 7/2002, s. 348–349.
- [8] Regulamin przydzielania tras pociągów i korzystania z przydzielonych tras pociągów przez licencjonowanych przewoźników kolejowych w ramach rj 2006/2007.
- [9] *Reshaping the Intercity network*. Railway Gazette International 6/1990, s. 445.
- [10] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 7 kwietnia 2004 r. w sprawie warunków dostępu i korzystania z infrastruktury kolejowej. Dz.U. nr 83, poz. 768.
- [11] Schulz A., Trettin J.: *Integrale Taktfahrpläne in Deutschland*. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 5/1995, s. 329–338.



Szybka Kolej Miejska w aglomeracji trójmiejskiej od początku cieszyła się bardzo dobrą frekwencją, jednym z czynników decydującym o sukcesie tego przedsięwzięcia była bardzo atrakcyjna częstotliwość i cykliczny rozkład jazdy; na zdjęciu pociąg SKM na przystanku Gdańsk Zaspas, lata 60. XX w.

- [12] Sieciowy Rozkład Jazdy PKP. Lata 1967–2005 (różne roczniki).
- [13] *Some problems of the new Netherlands timetable*. Railway Gazette 19 sierpnia 1938.
- [14] Spillmann H.J.: *160 Kilometer Fahrbahn für Angebotsausbau*. Eisenbahn-Revue International 12/2004, s. 537–548.
- [15] Urzędowy Rozkład Jazdy. Lata 1933–1966 (różne roczniki).
- [16] Ustawa z 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym. Dz.U. nr 86, poz. 789, z późniejszymi zmianami.

Autor

dr inż. Andrzej Massel

Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa

Politechnika Gdańska

➤ Dokończenie ze s. 59

Tabela 4

Dobowe oszczędności energii

Rejon	Rekuperacja	Rekuperacja + falowniki lub zasobniki
Śródmiejski	[kWh] 1389	2366
Zgierska	[kWh] 706	1429
Emilia	[kWh] 94	208

Z danych zestawionych w tabeli 4 wynika, że największy efekt energetyczny dałoby zainstalowanie zasobnika w najmocniej obciążonym rejonie, mimo że w rejonie tym i bez stosowania dodatkowych urządzeń warunki do przejmowania energii hamowania są najlepsze.

Wyniki symulacji dla rejonu podstacji „Emilia” pokazały, że nawet zastosowanie falowników lub zasobników nie da istotnych efektów, jeżeli w układzie zasilania występują nadmierne spadki napięć.

Trochę niespodziewany fakt stwierdzono, porównując wyniki symulacji z zasobnikiem energii w każdym z badanych rejonów. Mimo istotnych różnic w natężeniu ruchu i rozległości tych rejonów, maksymalna energia, do której ładowały się zainstalowane w nich zasobniki, była zbliżona i niewiele przekraczała 2 kWh.



Literatura

- [1] *Koła zamachowe*. Technika Transportu Szynowego 7-8/2001 (Aktualności ze świata).
- [2] Kałuża A.: *Analiza techniczno-ekonomiczna zastosowania zasobnika energii*. Technika Transportu Szynowego 5-6/2002.
- [3] Mierzejewski L., Szelaąg A.: *Wpływ taboru z rekuperacją energii na warunki funkcjonowania systemu elektroenergetyki trakcyjnej prądu stałego*. Materiały konferencyjne MET'2001. Gdańsk 2001.
- [4] Pawełczyk M.: *Akumulacja energii w transporcie szynowym – ocena korzyści*. Technika Transportu Szynowego 5-6/2002.
- [5] Solarek T.: *Efektywność energetyczna hamowania z odzyskiem energii w ruchu tramwajowym*. Technika Transportu Szynowego 11/2004.