

TADEUSZ J. SOLAREK*

WPŁYW PARAMETRÓW URZĄDZEŃ PRZEJMUJĄCYCH NADMIAROWĄ ENERGIĘ REKUPERACJI NA EFEKTY ENERGETYCZNE HAMOWANIA ODZYSKOWEGO

IMPACT OF PARAMETERS OF DEVICES ABSORBING SURPLUS RECUPERATION ENERGY ON ENERGY EFFICIENCY OF RECUPERATIVE BRAKING

Streszczenie

Jednym z sposobów zwiększenia efektywności energetycznej hamowania z odzyskiem energii jest instalacja wirujących zasobników energii na podstacjach trakcyjnych. Prowadzi to do pytania: jakie powinny być podstawowe parametry takich zasobników, tzn. pojemność energetyczna i moc silnika napędowego? W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla trzech istniejących rejonów zasilania trakcji tramwajowej w Łodzi, które można uznać za typowe przykłady rejonu śródmiejskiego, rejonu miejskiego znajdującego się poza centrum i rejonu podmiejskiego. Przeprowadzone w wielu wariantach symulacje pozwalają określić, jakich oszczędności energii można się spodziewać dzięki zastosowaniu hamowania rekuperacyjnego, w zależności od natężenia ruchu i parametrów zastosowanych zasobników.

Wyniki symulacji można zastosować do przeprowadzenia analizy technicznej i ekonomicznej poprzedzającej możliwą decyzję o zainstalowaniu zasobników energii na podstacji.

Słowa kluczowe: hamowanie, rekuperacja, tramwaje, zasobniki energii

Abstract

One of the possible solutions to increase energy efficiency of recuperative braking is installation of rotating energy storage devices at traction substations. This brings up the question of what should be the basic parameters of these storage devices, namely energy capacity and power of a propulsion engine. The paper presents results of simulation research for three existing supply areas of tramway traction in Łódź, which can be regarded as typical representatives of city-centre areas, areas outside the city centre, and suburban areas. The results of the simulations which were carried out in a number of variants allow to determine what energy savings could be expected from recuperative braking, depending on traffic intensity and parameters of the storage devices used.

The simulation results could be used for the purposes of a technical and economic analysis preceding a possible decision to install an energy storage device at a substation.

Keywords: braking, recuperation, tramways, energy storage devices

* Dr inż. Tadeusz J. Solarek, Instytut Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki, Automatyki, Politechnika Łódzka.

1. Wstęp

W polskich miastach w coraz to większym stopniu wprowadzane są do eksploatacji tramwaje wyposażone bądź to w czopery i silniki trakcyjne prądu stałego, bądź to napędzane silnikami asynchronicznymi zasilanymi z pokładowego falownika. Jedne i drugie mają możliwość hamowania z odzyskiem energii. Jednocześnie zmniejsza się procentowy udział energochłonnego taboru starego typu z rozruchem oporowym i nie hamującego odzyskowo. Wobec zwiększania udziału tramwajów hamujących rekuperacyjnie i równoczesnego zmniejszania ilości energii pobieranej z sieci maleją szanse, że hamujący odzyskowo tramwaj znajdzie odbiorcę. Badania symulacyjne [4] wykazały, że przy teoretycznie możliwych oszczędnościach energetycznych płynących z rekuperacji w trakcji tramwajowej rzędu 35%, w zależności od rozległości rejonu zasilania, natężenia ruchu i parametrów układu elektroenergetycznego, wskutek braku odbiorców na oddawaną do sieci energię, oszczędności te zmniejszą realnie od około 5 do 20%.

Remedium na niewykorzystanie pełnych możliwości hamowania odzyskowego może być umieszczenie w układzie zasilania, najczęściej na podstacjach, odbiorników energii hamowania w postaci falowników lub wirujących zasobników, przy czym te ostatnie wykazują pewne zalety w stosunku do falowników, z których najistotniejsze to:

- brak zakłóceń emitowanych do sieci prądu przemiennego,
- bezproblemowa regulacja napięcia wejściowego/wyjściowego,
- stabilizacja w pewnych granicach obciążenia podstacji, zmniejszanie pików obciążenia.

Nowoczesne zasobniki, wykonywane z wytrzymałych kompozytów węglowych [1], pracują z dużymi prędkościami obrotowymi rzędu 40 tys. obr/min, dzięki czemu ich gabaryty są niewielkie w porównaniu ze stalowymi, wolnoobrotowymi zasobnikami o takiej samej pojemności energetycznej.

Najistotniejsze parametry zasobnika, wpływające z jednej strony na jego cenę, a z drugiej na efektywność działania, to moc silnika i pojemność energetyczna. W artykule przedstawione zostaną wyniki symulacji, które pomogą ocenić, w jakim stopniu parametry te wpływają na zwiększenie efektywności energetycznej hamowania z odzyskiem energii dla trzech różniących się istotnie rejonów zasilania w trakcji tramwajowej.

2. Założenia, warianty symulacji

Badaniami objęto trzy rejonu zasilania znajdujące się w aglomeracji łódzkiej:

- rozległy i mocno obciążony rejon śródmiejski,
- rejon podstacji „Zgierska”, znajdujący się poza śródmieściem,
- rejon podstacji „Emilia”, zasilającej fragment linii podmiejskiej Łódź–Ozorków.

Więcej danych o parametrach badanych rejonów zasilania oraz o spodziewanych zyskach energetycznych, wynikających ze stosowania rekuperacji w różnych wariantach (z falownikami, z zasobnikami energii i bez dodatkowych urządzeń na podstacjach) można znaleźć w [4]. Przedstawione w [4] wyniki symulacji, zakładających stosowanie wirujących zasobników energii, otrzymano jednak przy założeniu, że pojemność energetyczna zasobnika jest nieograniczona, traktując maksymalną chwilową wartość energii skumulowaną w zasobniku jako jeden z wyników symulacji. Obecnie badania rozszerzono o wpływ po-

jemności energetycznej zasobnika i mocy silnika na efekty rekuperacji. Ich wyniki przedstawione są właśnie w niniejszym artykule. Do badań przyjęto następujące założenia:

- ruch prowadzony jest wyłącznie zmodernizowanym taborom 805Na, wszystkie tramwaje próbują hamować odzyskowo, o ile napięcie na ich odbierakach nie przekracza dopuszczalnej wartości napięcia równej 800 V;
- w symulacjach uwzględnia się obecny rozkład jazdy z programowo uwzględnioną pewną nieregularnością ruchu;
- zakłada się obecne parametry układu elektroenergetycznego, z wyjątkiem rejonu „Emilia”, co będzie dalej nieco szerzej uzasadnione;
- dla każdego rejonu zasilania badania będą dotyczyć ruchu w szczycie i poza szczytem;
- symulacje obejmują okres 1 godziny, przeprowadzane są z krokiem czasu 0,2 s.

Dla każdego z badanych rejonów przeprowadzono przede wszystkim symulacje w wariancie bez stosowania hamowania odzyskowego, ale z użyciem taboru z rozruchem bezoporowym. Porównanie wyników tych symulacji (średnich mocy podstacji za okres symulacji, mierzonych na szynach prądu stałego, przyjętych jako miernik zużycia energii) z wynikami symulacji z taborom hamującym odzyskowo pozwala określić oszczędności energii płynące wyłącznie ze stosowania rekuperacji.

Przeprowadzenie wielu próbnych symulacji z zasobnikami zainstalowanymi na podstacjach pozwoliło stwierdzić, że energia zgromadzona w zasobniku nigdy nie przekracza w badanych rejonach 2,5 kWh, w związku z czym w dalszych symulacjach nie badano zasobników o możliwości kumulowania większych energii niż 2 kWh.

Można sobie wyobrazić wiele sposobów sterowania pracą zasobnika. W wyniku wielu prób przyjęto następujący prosty sposób, choć trudno przesądzić, że optymalny:

- zasobnik zawsze kumuluje energię, gdy napięcie na szynach podstacji przekracza napięcie jej stanu jałowego, ograniczeniem jest moc silnika zasobnika oraz jego maksymalna pojemność energetyczna;
- aby zasobnik nie tylko zwiększał efektywność energetyczną hamowania odzyskowego, lecz również w miarę skutecznie wyrównywał obciążenia podstacji, przyjęto, że zasobnik oddaje energię dopiero wtedy, gdy obciążenie podstacji przekracza dwukrotnie jej moc średnią, przy czym nie rozładowuje się całkowicie, lecz zachowuje 10-procentową rezerwę, która może zostać wykorzystana w momencie, gdy jej obciążenie chwilowe przekroczy wartość szczytu 15-sekundowego. Wartość szczytowych i średnich obciążeń podstacji wyznaczono na podstawie wyników symulacji w wariantach bez stosowania rekuperacji.

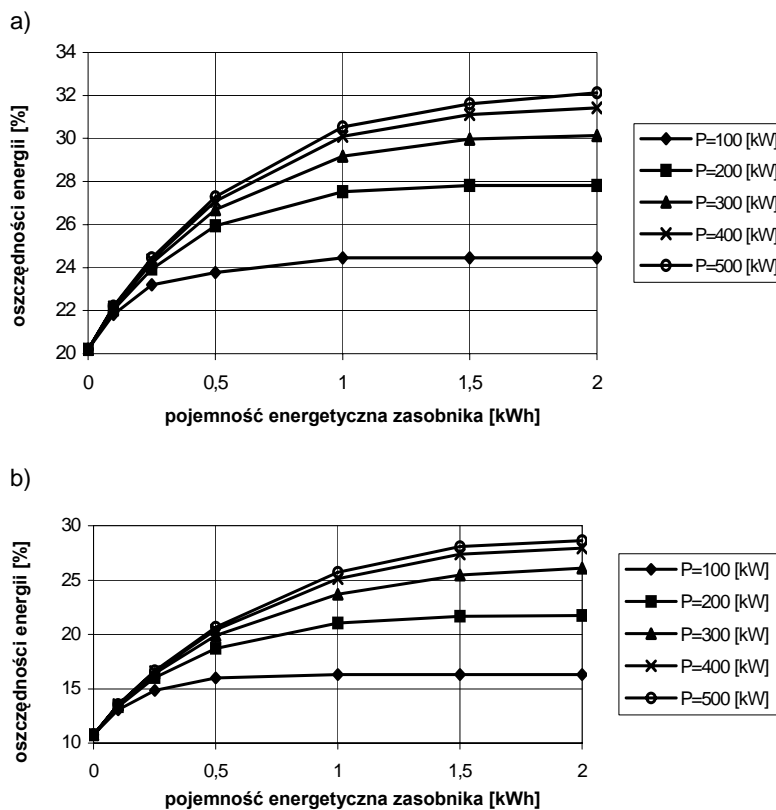
Dla każdego z badanych rejonów przeprowadzono symulacje, zmieniając pojemność energetyczną zasobnika od 0 do 2,5 kWh oraz moc silnika zasobnika od 100 kW do 500 kW

3. Badania dla rejonu śródmiejskiego

Rejon ten składa się z 6 sekcji zasilania znajdujących się na dwóch krzyżujących się liniach tramwajowych. Wszystkie skrzyżowania w rejonie wyposażone są w sygnalizację świetlną. Natężenie ruchu tramwajów w szczycie jest tak duże, że zwiększenie go o 30% powodowałoby powstawanie zatorów. Wyniki symulacji przedstawiono w tabelicy 1 oraz w formie wykresów na ryc. 1 i 2. Wyznaczone procentowe oszczędności energii odnoszą się do zużycia energii w wariancie bez stosowania rekuperacji.

Oszczędności energii w [%] dla śródmiejskiego rejonu zasilania

P [kW] \ A [kWh]	Szczytowe natężenie ruchu					Ruch pozaszczytowy				
	100	200	300	400	500	100	200	300	400	500
0	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8
0,1	21,8	22,1	22,1	22,2	22,2	13,1	13,3	13,5	13,5	13,5
0,25	23,2	23,9	24,2	24,4	24,5	14,8	16,0	16,4	16,6	16,7
0,5	23,8	26,0	26,7	27,1	27,3	16,0	18,7	19,9	20,4	20,7
1,0	24,5	27,5	29,2	30,1	30,6	16,3	21,0	23,7	25,1	25,7
1,5	24,5	27,8	30,0	31,1	31,6	16,3	21,7	25,5	27,4	28,1
2,0	24,5	27,8	30,1	31,4	32,1	16,3	21,8	26,1	28,0	28,6



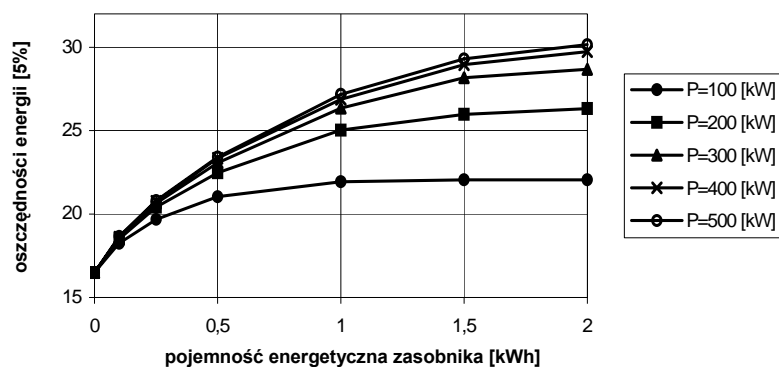
Ryc. 1. Oszczędności dla rejonu śródmiejskiego: a) szczyt, b) po szczycie

Fig. 1. Energy savings for the city centre area: a) peak time, b) after peak time

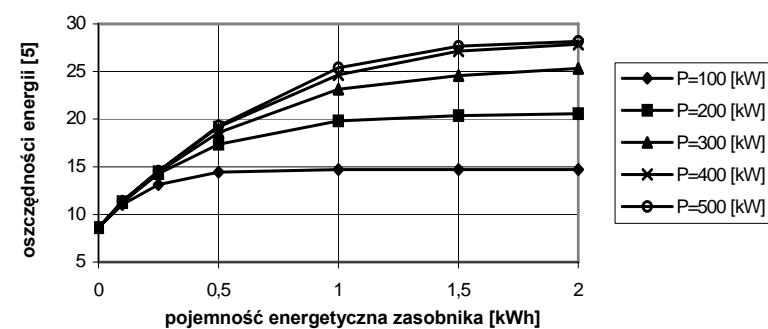
Oszczędności energii w [%] dla rejonu zasilania podstacji „Zgierska”

P [kW] \ A [kWh]	Szczytowe natężenie ruchu					Ruch pozaszczytowy				
	100	200	300	400	500	100	200	300	400	500
0	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
0,1	18,3	18,5	18,6	18,6	18,7	11,0	11,2	11,3	11,4	11,4
0,25	19,7	20,4	20,7	20,8	20,8	13,1	14,3	14,4	14,5	14,5
0,5	21,1	22,5	23,1	23,3	23,4	14,4	17,4	18,6	19,2	19,3
1,0	22,0	25,0	26,3	26,9	27,2	14,7	18,8	23,2	24,6	25,4
1,5	22,1	26,0	28,2	29,0	29,3	14,7	20,4	24,6	27,1	27,7
2,0	22,1	26,3	28,7	29,7	30,2	14,7	20,6	25,3	27,9	28,2

a)



b)



Ryc. 2. Oszczędności energii dla podstacji „Zgierska”: a) szczyt, b) po szczycie

Fig. 2. Energy savings for the "Zgierska" substation: a) peak time, b) after peak time

4. Rejon podstacji „Zgierska”

Podstacja „Zgierska” zasilą cztery sekcje na linii bez skrzyżowań z innymi liniami tramwajowymi. Natężenie ruchu tramwajów jest nieco mniejsze niż w rejonie śródmiejskim. Średnia moc tej podstacji jest o 30% mniejsza niż podstacji zasilającej rejon podmiejski.

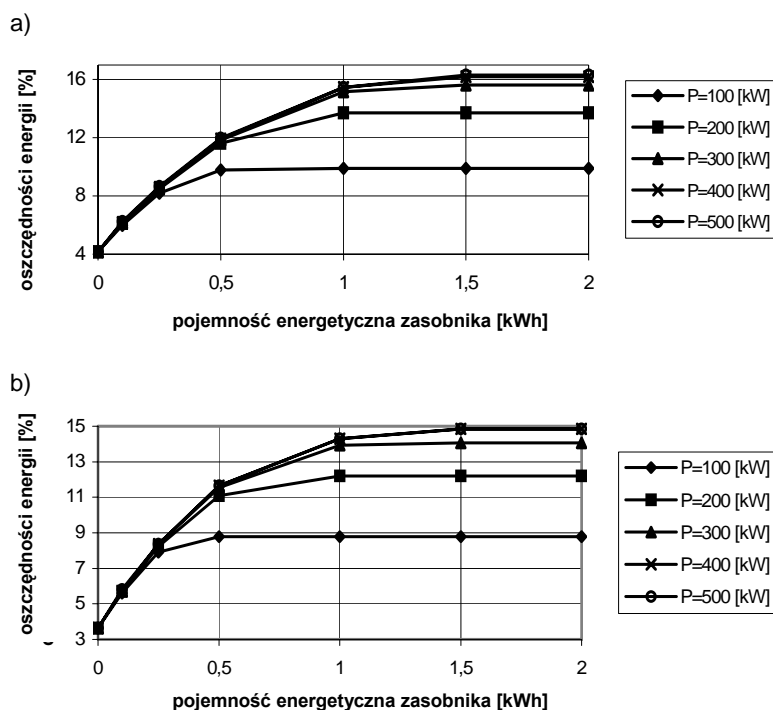
5. Rejon zasilania podstacji „Emilia”

Podstacja zasilą trzy sekcje na jednotorowej linii podmiejskiej. Natężenie ruchu jest bardzo małe, z tego powodu efekty energetyczne stosowania rekuperacji i bez dodatkowych urządzeń w rodzaju falowników lub zasobników na podstacji są prawie zerowe. Jednak nawet przy zastosowaniu takich urządzeń efektywność rekuperacji niewiele wzrasta (do ok. 8%). Przyczyną są duże spadki napięć przy obecnych parametrach układu elektroenergetycznego. Dlatego dalsze badania przeprowadzono, wzmacniając układ zasilania – dodano jeden kabel powrotny i zastosowano przewód wzmacniający sieć trakcyjną. Wyniki symulacji po zmianach zamieszczono w tabl. 3 i na ryc. 3.

Tablica 3

Oszczędności energii w [%] dla rejonu zasilania podstacji „Emilia”

P [kW] A [kWh]	Szczytowe natężenie ruchu					Ruch pozaszczytowy				
	100	200	300	400	500	100	200	300	400	500
0	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
0,1	6,0	6,1	6,1	6,2	6,2	5,6	5,7	5,7	5,7	5,8
0,25	8,2	8,5	8,5	8,6	8,7	7,9	8,2	8,4	8,4	8,4
0,5	9,8	11,6	11,9	11,9	12,0	8,8	11,1	11,5	11,7	11,7
1,0	9,9	13,7	15,2	15,5	15,5	8,8	12,2	13,9	14,3	14,3
1,5	9,9	13,7	15,6	16,2	16,3	8,8	12,2	14,1	14,8	14,9
2,0	9,9	13,7	15,6	16,2	16,3	8,8	12,2	14,1	14,8	14,9



Ryc. 3. Oszczędności energii dla podstacji „Emilia”: a) szczyt, b) po szczycie

Fig. 3. Energy savings for the "Emilia" substation: a) peak time, b) after peak time

6. Wnioski

Przeprowadzone symulacje dla trzech rejonów zasilania różniących się charakterem i natężeniem ruchu oraz rozmiarami w sensie topograficznym, a które można potraktować jako w miarę typowych przedstawicieli rejonów śródmiejskich, rejonów położonych poza centrum i rejonów podmiejskich, dają odpowiedź na pytanie, jak parametry zasobnika wpływają na jego efektywność działania w rejonie danego typu. Wyniki symulacji mogą być przydatne podczas analizy techniczno-ekonomicznej poprzedzającej ewentualną decyzję o instalacji zasobnika energii na podstacji.

Już z pobieżnej analizy wyników widać, że optymalna wartość pojemności energetycznej zasobnika zawierać się będzie prawdopodobnie w granicach 0,5–1,5 kWh. Wyraźnie widać również, że aby osiągnąć zadowalające efekty, pojemność energetyczna zasobnika i moc jego silnika muszą być odpowiednio skorelowane.

Wzmocnienie układu zasilania rejonu podmiejskiego podniosło znacząco uzyski energii płynące ze stosowania rekuperacji. Są one jednak nadal znacznie mniejsze niż dla rejonów miejskich, co wynika to prawdopodobnie z faktu, że wobec znacznych odległości między przystankami na linii podmiejskiej udział energii hamowania w ogólnym zużyciu energii na

tej linii jest również znacznie mniejszy. Uwzględniając ponadto, że podstacje na linii podmiejskiej są słabo obciążone, sądzić można, że są one ostatnimi, na których opłaca się instalować odbiorniki nadmiarowej energii rekuperacji.

Literatura

- [1] „Kola zamachowe”, *Technika Transportu Szynowego*, 7–8/2001.
- [2] Pawełczyk M., *Akumulacja energii w transporcie szynowym – ocena korzyści*, *Technika Transportu Szynowego*, 5–6/2002.
- [3] Solarek T., *Efektywność energetyczna hamowania z odzyskiem energii w ruchu tramwajowym*, *Technika Transportu Szynowego*, 11/2004.
- [4] Solarek T., *Badania efektów energetycznych hamowania rekuperacyjnego w trakcji tramwajowej*, *Technika Transportu Szynowego*, 3/2006.