



Mikołaj Bartłomiejczyk

# Rekuperacja energii hamowania w praskim systemie tramwajowym

Fot. 1. Tramwaj Škoda 15T. Fot. M. Beister

Zauważalny w ostatnim dziesięcioleciu wzrost liczby pojazdów elektrycznych komunikacji miejskiej, wyposażonych w zdolność hamowania odzyskowego stanowi szansę zmniejszenia energochłonności trakcji miejskiej. Istotną staje się ocena możliwości ograniczenia zużycia energii za pomocą zwiększenia stopnia rekuperacji. W artykule przedstawiono analizę efektywności hamowania odzyskowego w sieci tramwajowej stolicy Republiki Czeskiej – Pragi.

**Słowa kluczowe:** hamowanie odzyskowe, tramwaje, energetyka trakcyjna.

Układy napędowe wyposażone w możliwość hamowania odzyskowego stały się standardowym wyposażeniem współczesnych pojazdów trakcji elektrycznej. W licznych sieciach tramwajowych i trolejbusowych większość parków taborowych składa się z pojazdów hamujących odzyskowo (rekuperujących). Modernizacja infrastruktury zasilającej nie jest tak dynamiczna jak proces wymiany pojazdów, skutkiem czego układy zasilania systemów transportu miejskiego nie są przystosowane do pełnego wykorzystania energii rekuperowanej przez współczesne pojazdy. Inwestycje w układy zasilania sieci trakcyjnej wiążą się ze znacznymi nakładami finansowymi, a okres ich amortyzacji jest znacznie dłuższy niż w przypadku inwestycji taborowych. Z tego powodu konieczne jest poprzeczenie przebudowy układu zasilania analizą, która wskaże optymalne rozwiązania dla osiągnięcia zamierzonego celu.

## Ocena stopnia wykorzystania rekuperacji

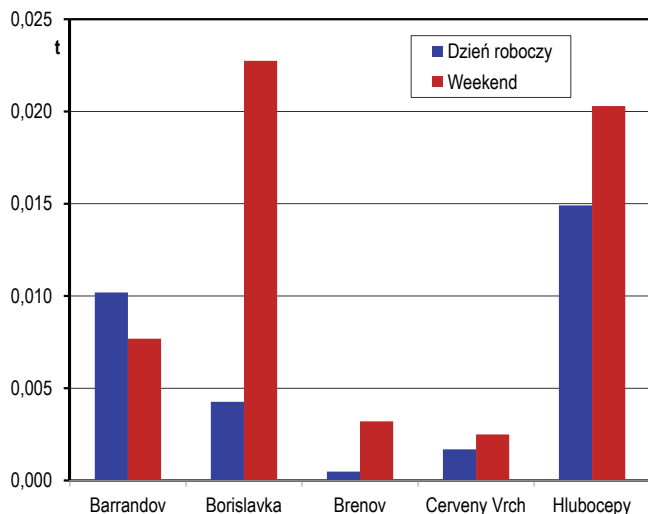
Poziom napięcia szyn zbiorczych w podstacji trakcyjnej jest jednym z indikatorów stopnia wykorzystania hamowania rekuperacyjnego w sieci [2]. Aby możliwe było wykorzystanie energii rekuperacji, konieczne jest spełnienie dwóch warunków:

- 1) napięcie wygenerowane przez pojazd podczas hamowania musi być wyższe od napięcia sieci trakcyjnej w miejscu zwrotu energii;
- 2) musi istnieć odbiorca dla energii wygenerowanej podczas hamowania: na odcinku zasilania, na którym funkcjonuje pojazd hamujący odzyskowo, musi przebywać inny pojazd pobierający energię.

Tab. 1. Park taborowy tramwajów w Pradze

Typ	Liczba członów tramwaju	Długość tramwaju [m]	Liczba sztuk	Praca przewozowa [wzkm]	Rekuperacja hamowania
Tatra T3	1	14	216	781 135	NIE
Tatra T3 RP	1	14	383	1 482 207	TAK
Tatra T6A5	1	14,7	147	493 107	NIE
Tatra KT8N	3	30,3	49	231 807	TAK
Škoda 14T	5	30,25	60	3 101	TAK
Škoda 15T	3	31,4	66	579 684	TAK

Źródło: oprac. własne.



**Rys. 1.** Względny czas przekroczenia progu hamowania rezystorowego w obszarach zasilania przedmiotowych podstacji  
Źródło: oprac. własne.

W momencie rozpoczęcia hamowania pojazdu przekształtnik trakcyjny powoduje przejście silnika trakcyjnego w stan pracy prądnicowej i następuje generacja energii hamowania odzyskowego, co skutkuje wzrostem napięcia układu na odbierakach pojazdu. W przypadku przekroczenia dolnego, progowego napięcia hamowania rezystorowego, co oznacza częściowy lub całkowity brak akumulacji energii hamowania, włączeniu ulega przekształtnik hamowania, który załącza rezystor hamowania, i następuje wytracenie w nim energii. Przy osiągnięciu górnego, progowego napięcia hamowania rezystorowego, co jest równoważne z całkowitym brakiem odbioru energii hamowania, przekształtnik jest zwarty. Wówczas cała energia rekuperacji jest wytracana w rezystorze hamowania. W sieci trakcyjnej o napięciu znamionowym

**Tab. 2.** Park taborowy tramwajów w Pradze – parametry energetyczne

Typ	Średnie zużycie energii [kWh / wzkm]	Stopień rekuperacji
Tatra T3	3,04	–
Tatra T3 RP	1,40	21,70%
Tatra T6A5	2,80	–
Tatra KT8N	3,18	22,80%
Škoda 14T	2,96	22,44%
Škoda 15T	3,18	22,80%

Źródło: oprac. własne.

**Tab. 3.** Parametry ruchowe obszarów zasilania analizowanych podstacji

Podstacja	Średnia liczba składów w ruchu	
	dzień roboczy	sobota i niedziela
Barrandov	2,84	2,68
Bořislavka	2,13	2,01
Břevnov	3,22	1,68
Červený vrch	6,44	3,37
Hlubočepy	6,22	4,67

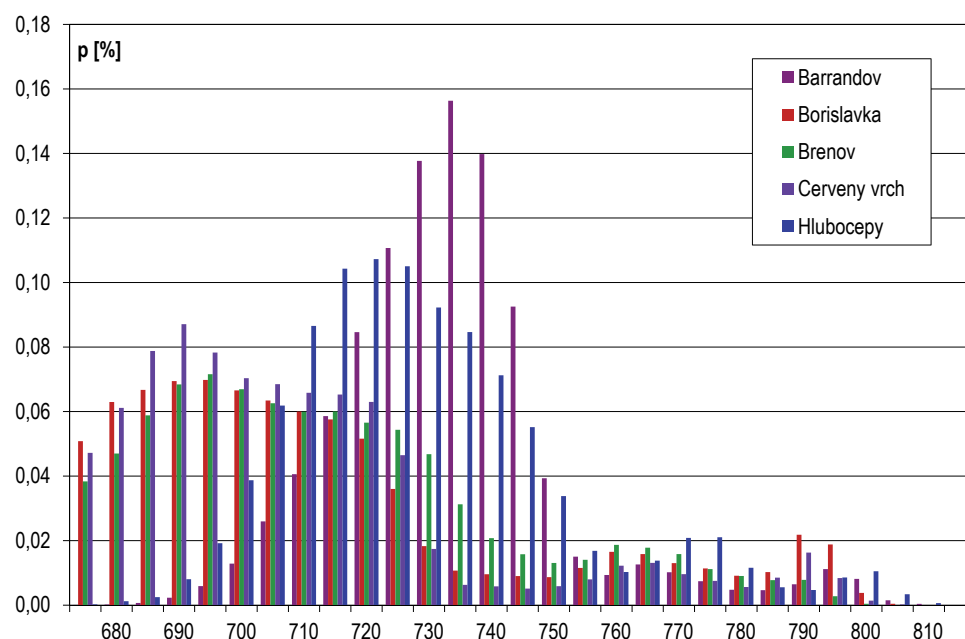
Źródło: oprac. własne.



**Fot. 2.** Tramwaj Škoda 14T. Fot. M. Bartłomiejczyk

600 V dolne i górne napięcie progowe mieści się w zakresie 750–800 V.

W klasycznych układach zasilania (bez zastosowania zasobników) energia rekuperacji może być wyłącznie zużyta przez inne pojazdy znajdujące się w ruchu. W przypadku pełnego wykorzystania hamowania odzyskowego napięcie w sieci trakcyjnej nie przekracza poziomu progowego. Przekroczenie tego poziomu powoduje załączenie rezystora hamowania, świadczy więc o braku możliwości odbioru energii rekuperacji. Poziom napięcia szyn zbiorczych 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 zbiorczych podstacji należy więc traktować jako indikator nasycenia układu zasilania energią rekuperacji.



**Rys. 2.** Histogram napięcia szyn zbiorczych na wybranych podstacjach  
Źródło: oprac. własne.



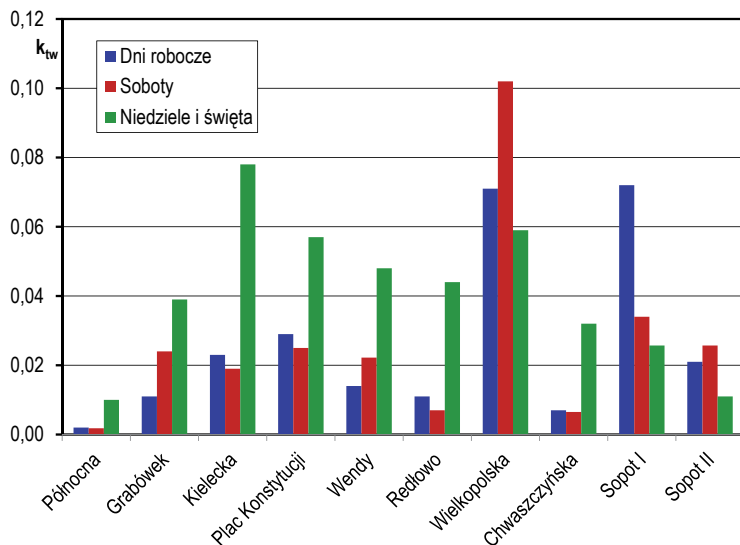
Fot. 3. Tramwaje Škoda 15T. Fot. M. Bartłomiejczyk

## Komunikacja tramwajowa w Pradze

Praga eksploatuje obecnie największą sieć tramwajową na terenie Republiki Czeskiej. Długość tras tramwajowych wynosi ok. 133 km, przy czym znaczna część linii jest poprowadzona po górzystym terenie. Największe pochylenie w sieci tramwajowej wynosi 7%. Park tramwajów praskich składa się z blisko tysiąca pojazdów (tab. 1). Większość, bo 64%, pracy przewozowej wykonywana jest przez pojazdy wyposażone w rekuperację energii hamowania. Fot. 1–4 przedstawiają podstawowe typy tramwajów eksploatowanych w Pradze.

## Ocena stopnia wykorzystania rekuperacji energii hamowania w Pradze

W tab. 2 przedstawiono porównanie zużycia energii poszczególnych typów tramwajów oraz względny poziom rekuperacji.



Rys. 3. Względny czas przekroczenia progu hamowania rezystorowego w obszarach zasilania podstacji trolejbusowych w Gdyni

Źródło: oprac. własne.

Podana energochłonność uwzględnia energię zwróconą do sieci trakcyjnej. Stopień rekuperacji jest określony jako stosunek energii zwróconej do sieci trakcyjnej do energii pobranej. Odzysk energii kształtuje się na poziomie 22%, co należy uznać za bardzo dobry wynik. Sieć tramwajowa w Pradze nie jest wyposażona w zasobniki lub falowniki podstacyjne, odzysk energii odbywa się wyłącznie na drodze pojazd - pojazd.

Sieć tramwajowa jest zasilana z 41 podstacji, w tym 1 przewoźnej. Przeprowadzona została ocena efektywności wykorzystania rekuperacji w 5 podstacjach: **Barrandov**, **Bořislavka**, **Břevnov**, **Červenývrch**, **Hlubočepy**. W tab. 3 podano parametry ruchowe obszarów zasilania poszczególnych podstacji, wyrażone średnią liczbą składów tramwajowych znajdujących się w ruchu w obszarze zasilania poszczególnych podstacji.

W pojazdach praskiej sieci tramwajowej próg załączenia hamowania rezystorowego ustalono na poziomie 800 V. Na rys. 1 przedstawiono porównanie względnych czasów przekroczenia progu hamowania rezystorowego na szynach zbiorczych poszczególnych podstacji. Na rys. 2

przedstawiono histogram napięcia szyn zbiorczych w trakcie dni roboczych na wybranych podstacjach.

W celach porównawczych przedstawiono analogiczne wykresy dla gdyńskiej sieci trolejbusowej. Rys. 3 przedstawia względne czasy przekroczenia progu hamowania oporowego w obszarach zasilania gdyńskich podstacji trolejbusowych; rys. 4 przedstawia histogram napięcia na podstacji trolejbusowej **Wielkopolska**.

Największy względny czas przekroczenia napięcia progu hamowania w dniu roboczym widoczny jest w przypadku **Hlubočepy** (rys. 1). Spowodowane jest to górkim charakterem obszaru zasilania tej podstacji, a co za tym idzie – znaczną rekuperacją podczas hamowania. W przypadku pozostałych podstacji przekroczenia progu hamowania rezystorowego występują znacznie rzadziej. Porównując te wartości względnych czasów przekroczenia napięcia hamowania z analogicznymi wartościami

wyznaczonymi dla gdyńskiej sieci trolejbusowej (rys. 3), można zauważyć, iż do przekroczenia progu hamowania oporowego w praskiej sieci tramwajowej dochodzi znacznie rzadziej niż w gdyńskiej sieci trolejbusowej. W Gdyni największe wartości względnych czasów przekroczenia występują w przypadku podstacji **Wielkopolska** i **Sopot I**; kształtują się one na poziomie 0,04–0,08. Na obszarach zasilania tych podstacji występuje znaczne niewykorzystanie rekuperacji hamowania [2]. W przypadku pozostałych podstacji, gdzie względny czas przekroczenia jest mniejszy niż 0,04, energia hamowania jest wykorzystana w stopniu praktycznie całkowitym [2]. Porównując to z sytuacją praskiej sieci tramwajowej, należy zauważyć, iż wartości względnego czasu przekroczenia progu napięciowego są tam znacznie mniejsze (rys. 5). Można wnioskować, iż w tym przypadku znaczna część energii rekuperacji jest wykorzystana przez inne pojazdy. Potwierdzają to dane przedstawione w tab. 2.

Niekorzystnym elementem – z punktu widzenia wykorzystania energii rekuperacji w Pradze – jest zbyt wysoki poziom napięcia szyn zbiorczych podstacji.

Wynosi ono ok. 750 V przy znamionowym napięciu szyn zbiorczych podstacji 660 V. Dla porównania w gdyńskiej sieci trolejbusowej wynosi ono 680 V. Różnica ta jest widoczna na porównaniu histogramów przedstawionych na rys. 2 i 4. O ile w przypadku gdyńskiej podstacji **Wielkopolska** widoczne jest występowanie na histogramie oddzielnego obszaru odpowiadającego hamowaniu rezystorowemu (rys. 4: zakres napięć 770–800 V), to na histogramach napięć praskich podstacji tramwajowych nie ma widocznego rozgraniczenia między normalnym obszarem pracy podstacji i obszarem hamowania rezystorowego – obydwa obszary „zlewają się”. Świadczy to o zbyt wysokim napięciu szyn zbiorczych podstacji.

### Wnioski

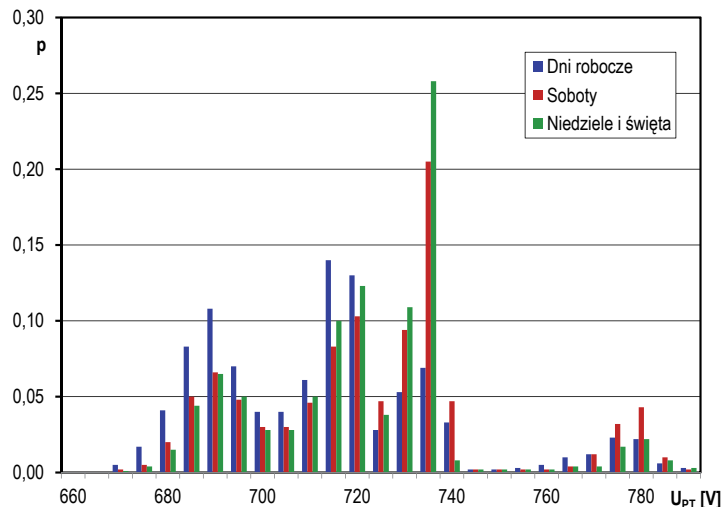
Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, iż stopień wykorzystania rekuperacji energii w praskiej sieci tramwajowej jest wysoki. Średnioroczny odzysk energii kształtuje się na poziomie 22% (tab. 2), a do przekroczeń progu hamowania rezystorowego dochodzi stosunkowo rzadko (rys. 1). Świadczy to o skutecznym wykorzystaniu energii rekuperacji na drodze pojazd - pojazd. Wyniki badań nie uzasadniają konieczności instalacji zasobników superkondensatorowych. Znacznie tańszym sposobem na dalsze zwiększenie wykorzystania energii odzysku poprzez rekonfigurację układu zasilania jest głównie wprowadzenie dwustronnego zasilania sieci trakcyjnej [4]. Konieczne jest także obniżenie napięcia szyn zbiorczych podstacji z obecnego poziomu 750 V do 680 V. Proponowane zmiany nie wymagają znacznych nakładów finansowych, natomiast mogą przynieść ograniczenie zużycia energii.

### Bibliografia:

1. Bartłomiejczyk M., Mirchevski S., *Reducing of energy consumption in public transport – results of experimental exploitation of super capacitor energy bank in Gdynia trolleybus system*, PEMC 2014 Conference, Antalya, 22–24.09.2014.
2. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Napięcie sieci trakcyjnej jako wyznacznik możliwości zwiększenia odzysku energii*, „Technika Transportu Szynowego” 2013, nr 4.



Fot. 4. Przedstawiciele starszej generacji tramwajów w Pradze, od prawej: Tatra T6A5, Tatra T3 i modernizowana Tatra T3R.PLF. Fot. M. Beister



Rys. 4. Histogram napięcia szyn zbiorczych na podstacji trolejbusowej Wielkopolska w Gdyni

Źródło: oprac. własne.

3. Bartłomiejczyk M., Połom M., Staroński K., *Próba eksploatacja zasobnika superkondensatorowego w gdyńskiej sieci trolejbusowej*, „Technika Transportu Szynowego” 2013, nr 6.
4. Bartłomiejczyk M., Połom M., *Wpływ struktury przestrzennej układu zasilania na energochłonność trakcji miejskiej – analiza teoretyczna*, „Technika Transportu Szynowego” 2014.
5. Jandura P., *Simulace rekuperace elektrické energie tramvaje pro danou trať*, VLIII. Sešit Katedry Elektrotechniky, VŠB Ostrava, Ostrava 2014.
6. Kubín J., *Závislost spotřeby tramvajového provozu na vnějších podmínkách*, VLIII. Sešit Katedry Elektrotechniky, VŠB Ostrava, Ostrava 2014.
7. Połom M., Palmowski T., *Rozwój i funkcjonowanie komunikacji trolejbusowej w Gdyni*, Wydawnictwo Bernardinum, Gdynia-Pelplin 2009.
8. Połom M., *Projekt rewitalizacji i rozwoju komunikacji trolejbusowej w Gdyni współfinansowany ze środków unijnych*, „Transport Miejski i Regionalny” 2011, nr 6.
9. Regulski D., *Zwiększenie efektywności rekuperacji na przykładzie Tramwajów Warszawskich*, „Infrastruktura Transportu” 2014, nr 3.

### Autor:

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

### Recuperation of the braking energy in the Prague tram system

Growth in the number of electric vehicles transport equipped with regenerative braking capability is noticeable in the last decade. It opens the possibility of reducing of the energy consumption of urban traction. Important is the assessment of the possibilities to reduce energy consumption by increasing the degree of recovery braking recuperation. The article presents an analysis of the efficiency of regenerative braking on the tram network of capital of the Czech Republic, Prague.

**Keywords:** tramways, recuperation, supply system of electrical traction.