

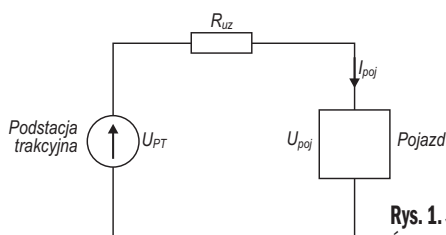
Mikołaj Bartłomiejczyk, Marcin Połom

Wpływ struktury przestrzennej układu zasilania na energochłonność trakcji miejskiej – pomiary strat przesyłowych

W artykule *Wpływ struktury przestrzennej układu zasilania na energochłonność trakcji miejskiej – pomiary rekuperacji* [4] przedstawiono analizę teoretyczną wpływu struktury przestrzennej układu zasilania na efektywność hamowania odzyskowego oraz wielkość strat przesyłowych. Drugą część artykułu była poświęcona analizie wyników badań pomiarowych rekuperacji w gdyńskiej sieci trolejbusowej. Niniejszy artykuł ściśle nawiązuje do obliczeń teoretycznych przedstawionych w pierwszej części, w której metodą symulacyjną określono wartość strat przesyłowych energii trakcyjnej i wpływ struktury układu zasilania na nią.

Zagadnienie strat przesyłowych w sieci trakcyjnej układów zasilania komunikacji miejskiej przez wiele lat było marginalizowane. Głównym kryterium projektowania układów zasilania było uzyskanie jak największej niezawodności; z tego powodu popularne było gęste sekcjonowanie sieci trakcyjnej. Takie podejście wymuszone było wysoką awaryjnością taboru i sieci trakcyjnej. Ponadto stosowane powszechnie klasyczne układy napędowe o sterowaniu rezystorowym cechowały się wysokimi – sięgającymi 40% – stratami w oporach rozruchowych. W stosunku do strat energii powstających w pojazdach straty energii w sieci trakcyjnej były znacznie mniejsze. Dlatego nie koncentrowano na nich uwagi. Rozpowszechnienie się energoelektronicznych układów napędowych spowodowało, że efektywność energetyczna tramwajów i trolejbusów jest obecnie bliska maksimum. W związku z tym zachodzi konieczność poszukiwania metod zwiększenia efektywności energetycznej trakcji miejskiej w innych obszarach, m.in. poprzez zmniejszenie strat przesyłowych.

Istotnym zagadnieniem jest także wzrost dokładności, jak i liczby punktów pomiaru zużycia energii elektrycznej w trakcyjnych systemach energetycznych. Wiele przedsiębiorstw komunikacji miejskiej, wzorem przewoźników autobusowych, wprowadza rozliczanie kierowców i motorniczych z poziomu zużycia energii elektrycznej. Powszechne staje się więc wyposażanie taboru w liczniki zużytej energii prądu stałego. Co więcej, analogicznie jak to ma obecnie miejsce w przypadku transportu kolejowego, w przyszłości należy się spodziewać otwarcia infrastruktury tramwajowej i trolejbusowej w poszczególnych miastach dla wielu przewoźników. Zwiększy to jeszcze bardziej nacisk na zagadnienia związane z rozliczaniem zużycia energii i dokładną analizą strat powstających w poszczególnych elementach elektroenergetycznego systemu trakcyjnego. Dlatego też pomiary i analiza strat



Rys. 1. Schemat blokowy układu
Źródło: oprac. własne.

powstających podczas przesyłu energii elektrycznej do pojazdów trakcyjnych stają się coraz bardziej istotnymi zagadnieniami.

Przedstawiona analiza została wykonana w oparciu o pomiary przeprowadzone w sieci Przedsiębiorstwa Komunikacji Trolejbusowej w Gdyni.

Pomiarowe określenie strat energii w trolejbusowej sieci trakcyjnej

Straty przesyłowe E_{straty} w układzie zasilania podczas dostarczenia energii do pojazdu trakcyjnego powstają w zasilaczach oraz sieci trakcyjnej. Chwilowa ich wartość może być zdefiniowana jako różnica pomiędzy energią E_{poj} pobraną poprzez pojazd z sieci trakcyjnej a energią E_{PT} pobraną z podstacji trakcyjnej:

$$E_{straty} = E_{PT} - E_{poj} \quad (1)$$

Zakładając brak rekuperacji do sieci trakcyjnej, cały prąd pojazdu I_{poj} musi być dostarczony z podstacji trakcyjnej. Dlatego powyższy wzór można przedstawić w oparciu o napięcie U_{poj} na odbierakach pojazdu i napięcie podstacji trakcyjnej U_{PT} :

$$E_{straty} = I_{poj} \cdot (U_{PT} - U_{poj}) \quad (2)$$

Odpowiadający temu schemat zastępczy przedstawiono na rys. 1. Względna wartość e strat przesyłowych może być określona jako:

$$e = I_{poj} \cdot \frac{(U_{PT} - U_{poj})}{U_{poj}} \quad (3)$$

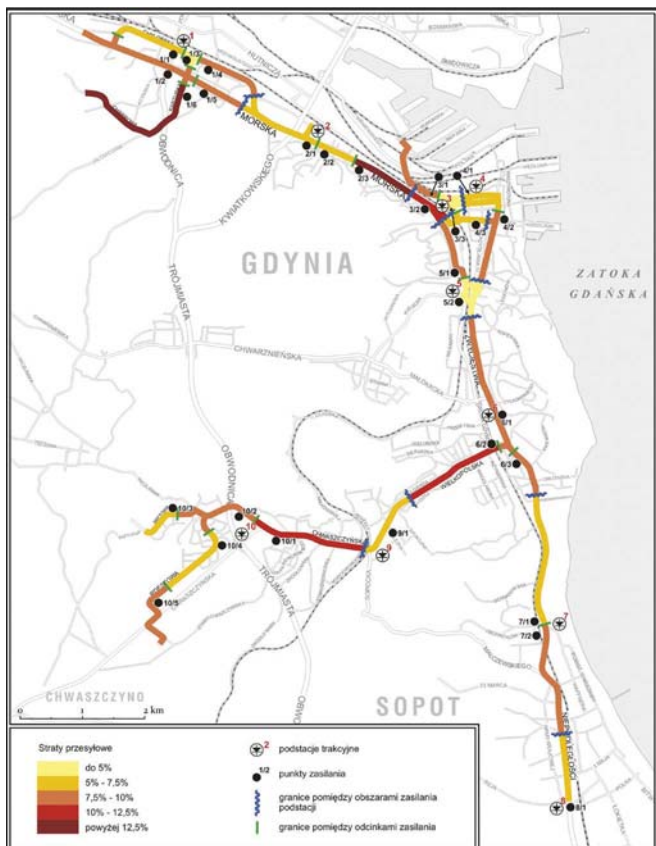
Uśredniając w dziedzinie czasu powyższe wartości, uzyskuje się średnie wartości strat przesyłowych w poszczególnych elementach układu zasilania.

W kwietniu 2012 roku przeprowadzono pomiary w gdyńskim układzie zasilania. Wykonano je na podstacjach trakcyjnych oraz w trolejbusach. W celach pomiarowych wykorzystano pokładowy system rejestracji poboru zużytej energii wraz z zapisem położenia GPS w czasie, w który wyposażone są pojazdy eksploatowane w Gdyni. Pozwala to na określenie precyzyjnego zużycia energii na poszczególnych odcinkach zasilania. Jako wartość napięcia U_{PT} podstacji przyjęto wartość oczekiwaną napięcia szyn zbiorczych rozdzielni prądu stałego [5, 11]. W tab. 1 przedstawiono wartości napięcia U_{PT} dla poszczególnych podstacji zasilających gdyńską sieć trolejbusową w trakcie wy-

Tab. 1. Porównanie parametrów poszczególnych podstacji

Nr PT	Nazwa PT	U_{PT} [V]
1	Północna	685
2	Grabówek	675
3	Dworzec	690
4	Wendy	685
5	Kielecka	684
6	Redłowo	680
7	Sopot I	690
8	Sopot II	704
9	Wielkopolska	690
10	Chwaszczyńska	690

Źródło: oprac. własne.



Rys. 2. Mapa strąt przesyłowych z podziałem na poszczególne odcinki zasilania (oprac. własne)

konywania pomiarów. W tab. 2 zaprezentowano wyniki analizy pomiarowej: straty przesyłowe z podziałem na straty w poszczególnych odcinkach zasilania, obszarach zasilania podstacji trakcyjnych i straty w całym systemie zasilania. Na rys. 2 przedstawiono mapę strąt przesyłowych z podziałem na poszczególne sekcje zasilania. Rys. 3 prezentuje zależność pomiędzy stratami w ramach danych odcinków a uśrednioną wartością R_{uz} układu zasilania wzdłuż danego odcinka zasilania, zdefiniowaną jako:

$$R_{uz} = \frac{R_{MAX} - R_{MIN}}{2} \quad (4)$$

gdzie:

R_{max} - wartość maksymalna rezystancji układu zasilania pomiędzy podstacją trakcyjną i pojazdem (koniec odcinka zasilania);
 R_{min} - wartość minimalna rezystancji układu zasilania pomiędzy podstacją trakcyjną i pojazdem (punkt zasilania odcinka).

Wnioski

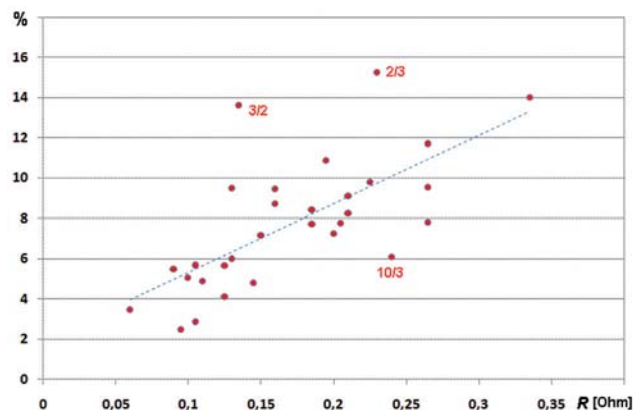
W pierwszej części cyklu artykułów przedstawione były wyniki teoretycznej analizy symulacyjnej [12]. Straty przesyłowe w sieci trolejbusowej określono na poziomie 7–19% (w zależności od konfiguracji układu zasilania), przy czym górna granica strat dotyczy bardzo zcentralizowanego i niewydolnego układu zasilania. Wyniki analizy pomiarowej pokrywają się więc z badaniami symulacyjnymi: średnie pomierzone straty przesyłowe w obszarach poszczególnych podstacji mieszczą się w zakresie 7,0–9,3%. Wyjątkiem jest podstacja Sopot II, dla której straty przesyłu wynoszą jedynie 4,1%. Należy zwrócić uwagę, że jest to nietypowa podstacja, zasilająca pojedynczy odcinek o długości 1 km o bardzo małej intensywności ruchu.

Przeprowadzona w latach 2009–2012 modernizacja układu zasilania sieci trolejbusowej w Gdyni w znaczny sposób poprawiła warunki zasilania komunikacji trolejbusowej. Odzwierciedla się to w sprawności energetycznej układu zasilania. Średnie straty przesyłowe w zasilaczach i sieci trakcyjnej wynoszą 8,5%, co w przypadku trakcji trolejbusowej można uznać za bardzo dobry wynik. W trakcji elektrycznej jako standardowy poziom strat przyjmuje się 10%. W Gdyni ta wartość jest przekroczona w przypadku zaledwie kilku odcinków zasilania.

Wartości średnich strat przesyłowych w ramach obszarów zasilania podstacji trakcyjnych są zbliżone, jednak widoczne są znaczne różnice w wartościach strat pomiędzy poszczególnymi odcinkami zasilania. Spowodowane jest to dużym wpływem struktury przestrzennej i parametrów ruchowych na rozpraszanie energii w układzie zasilania oraz występowaniem znacznych różnic pomiędzy sekcjami zasilania.

Straty ciepłone wywołane przepływem prądu elektrycznego przez przewodnik są wprost proporcjonalne do wartości rezystancji i kwadratu wartości prądu. Ma to odzwierciedlenie w prezentowanych wynikach. Największe straty przesyłowe występują na najbardziej obciążonych odcinkach 2/3 (Mleczarnia) i 3/2 (Dworzec Towarowy) oraz mało obciążonym, ale o znacznej długości, odcinku 1/6 (Pustki). Zależność pomiędzy stratami przesyłu a wartością rezystancji przewodnika i prądu obciążenia jest widoczna na rys. 3. Większość punktów odpowiadających wartościom strat układu się wzdłuż linii prostej, co oddaje liniową zależność pomiędzy rezystancją przewodnika a stratami przesyłu. Odległość od tej linii trendu ilustruje wpływ wartości obciążenia na straty przesyłowe. Punkty odpowiadające odcinkom o gęstości ruchu pojazdów znacznie odbiegającej od średniej są najbardziej obciążonych odcinków 2/3 (Mleczarnia) i 3/2 (Dworzec towarowy) oraz najmniej obciążonego odcinka 10/3 (Miętowa).

Straty przesyłowe są uzależnione od intensywności ruchu pojazdów (obciążenie sieci trakcyjnej) oraz rezystancji układu zasilania. O ile intensywność ruchu pojazdów jest uzależniona od czynników zewnętrznych i służby energetyczne mają ograniczony wpływ na nią, to zwiększenie efektywności układu zasilania może być osiągnięte za pomocą zmniejszenia rezystancji sieci trakcyjnej i zasilaczy. Rezystancja ta zależy w znacznym stopniu od struktury przestrzennej układu zasilania, który determinuje



Rys. 3. Zależność pomiędzy średnimi stratami energii a średnią rezystancją układu zasilania w obszarach poszczególnych zasilaczy. Punkt 2/3 odpowiada odcinkowi Mleczarnia, 3/2 - odcinkowi Dworzec towarowy, a 10/3 - Miętowi

Źródło: oprac. własne.

Tab. 2. Wartości względne strat przesyłowych w poszczególnych elementach układu zasilania

Nr podstacji	Podstacja	Nr odcinka	Nazwa odcinka	Straty przesyłowe [%]	
1	PT Północna	1/1	Cisowa	4,9	9,1
		1/2	Kcyńska	9,8	
		1/3	Poczta	3,4	
		1/4	Gazownia	9,1	
		1/5	Wiejska	7,8	
		1/6	Pustki	14,0	
2	PT Grabówek	2/1	Leszczynki	6,0	8,9
		2/2	Grabówek	5,0	
		2/3	Mleczarnia	15,3	
3	PT Dworzec	3/1	Stocznia	8,2	9,3
		3/2	Dworzec towarowy	13,6	
		3/3	Plac Konstytucji	2,8	
4	PT Wendy	4/1	Plac Kaszubski	5,7	7,0
		4/2	Świętojańska	9,5	
		4/3	10 luty	5,5	
5	PT Kielecka	5/1	Warszawska	8,7	6,0
		5/2	Węzeł	2,5	
		5/3	Wzgórze	4,8	
6	PT Redłowo	6/1	Redłowo	7,7	9,1
		6/2	Kack	11,7	
		6/3	Wielkopolska Klif	7,8	
7	PT Sopot I	7/1	Kolibki	5,7	8,0
		7/2	Sopot	9,5	
8	PT Sopot II	8/1	Sopot II	4,1	4,1
9	PT Wielkopolska	9/1	Wielkopolska	7,2	7,2
10	PT Chwaszczyńska	10/1	Źródło Marii	10,9	9,2
		10/2	Nowowiczlińska	8,4	
		10/3	Miętowa	6,1	
		10/4	Rdestowa	7,2	
		10/5	Chwaszczyńska	9,5	

Źródło: oprac. własne.

schemat zastępczy układu zasilania. Od tego zaś zależy wartość rezystancji całkowitej sieci zasilającej. Najprostszym sposobem zmniejszenia tej rezystancji jest wprowadzenie dwustronnego zasilania pomiędzy sąsiednimi podstacjami bądź w ramach jednej podstacji trakcyjnej. Analiza teoretyczna wpływu zmiany konfiguracji na straty przesyłowe w układzie zasilania została przedstawiona w pierwszej części niniejszego cyklu [12]. Jak wykazano, wprowadzenie dwustronnego zasilania umożliwia zmniejszenie strat przesyłu energii w układzie zasilania o 30% przy minimalnych nakładach finansowych; ponadto w znaczny sposób podnosi efektywność wykorzystania rekuperacji energii elektrycznej.

W ciągu ostatnich 20 lat dokonał się znaczny postęp w zakresie konstrukcji pojazdów i sieci trakcyjnej, czego niezaprzeczalnym efektem jest spadek awaryjności. Przykładowo: w gdyńskiej sieci trolejbusowej liczba awarii sieci trakcyjnej spadła ponad dziesięciokrotnie. Nastąpił także rozwój techniki zabezpieczeniowej, umożliwiający wykrywanie zwarc z bardzo wysoką precyzją. Rozwój systemów rozproszonego sterowania umożliwia zdalne sterowanie odłącznikami na sieci trakcyjnej; w gdyńskiej sieci trolejbusowej wszystkie odłączniki sieciowe są sterowane zdalnie z centrum dyspozycji mocy w sposób półautomatyczny. Elementy te umożliwiają odejście od klasycznego sposobu sekcjonowania sieci trakcyjnej na krótkie odcinki zasilane za po-

mocą długich kabli z podstacji trakcyjnych. Współczesna sieć trakcyjna powinna być podzielona na długie sekcje zasilane z 2 lub 3 podstacji. Współczesna technika zabezpieczeniowa umożliwia skuteczną detekcję uszkodzeń w takich systemach, a zdalnie sterowane odłączniki umożliwiają rozdzielanie odcinków zasilania na mniejsze części w przypadku awarii. Dzięki takiemu podziałowi sieci spada rezystancja zastępcza układu zasilania widziana z pojazdu, a co za tym idzie – spadają straty przesyłowe (rys. 3). Umożliwia to lepszy przepływ energii rekuperacji pomiędzy pojazdami, czego skutkiem jest zwiększenie odzysku energii.

Bibliografia:

- 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.
- Bartłomiejczyk M., Połom M., *Napięcie sieci trakcyjnej jako wyznacznik możliwości zwiększenia odzysku energii*, „Technika Transportu Szynowego” 2013, nr 4.
- Bartłomiejczyk M., Połom M., Staroński K., *Próbna eksploatacja zasobnika superkondensatorowego w gdyńskiej sieci trolejbusowej*, „Technika Transportu Szynowego” 2013, nr 6.
- Bartłomiejczyk M., Połom M., *Wpływ struktury przestrzennej układu zasilania na energochłonność trakcji miejskiej – pomiary rekuperacji*, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 3.
- Chudzik P., Radecki A., Nowak R., *Wyznaczanie parametrów sieci trakcyjnej niezbędnych do minimalizacji strat przesyłowych w pojeździe z zasobnikiem superkondensatorowym*, „Biuletyn Techniczno-Informacyjny Oddziału Łódzkiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich” 2014 nr 1.
- Figlus T., Wilk A., Gawron A., *Analiza stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego dla obszaru miasta*, „Logistyka” 2014, nr 3.
- Jandura P., *Simulace rekuperace elektrické energie tramvaje pro danou trať*, VLIII. Sešit Katedry Elektrotechniky, VŠB Ostrava, Ostrava 2014.
- Kubín J., *Závislost spotřeby tramvajového provozu na vnějších podmínkách*, VLIII. Sešit Katedry Elektrotechniky, VŠB Ostrava, Ostrava 2014.
- Połom M., Palmowski T., *Rozwój i funkcjonowanie komunikacji trolejbusowej w Gdyni*, Wydawnictwo Bernardinum, Gdynia-Pelplin 2009.
- Połom M., *Projekt rewitalizacji i rozwoju komunikacji trolejbusowej w Gdyni współfinansowany ze środków unijnych*, „Transport Miejski i Regionalny” 2011, nr 6.
- Radecki A., Chudzik P., *Algorytm sterowania zasobnikiem superkondensatorowym pojazdu trakcyjnego minimalizujący przesyłowe straty mocy uwzględniający stany pracy sieci trakcyjnej*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2014 (R. 90), nr 6.
- Bartłomiejczyk M., Połom M., *Wpływ struktury przestrzennej układu zasilania na energochłonność trakcji miejskiej – analiza teoretyczna*, „Technika Transportu Szynowego” 2014, nr 11–12.

Autorzy:

dr inż. **Mikołaj Bartłomiejczyk** – Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, e-mail: mbartlom@ely.pg.gda.pl
mgr **Marcin Połom** – Katedra Geografii Rozwoju Regionalnego, Instytut Geografii, Wydział Oceanografii i Geografii, Uniwersytet Gdański, e-mail: marcin.polom@ug.edu.pl

Twelfth International Conference MET'2015 MODERN ELECTRIFIED TRANSPORT

4 - 7 October 2015
Trogir - Croatia



MET' 2015

Honorary Patronage

Polish Academy of Sciences - Committee on Electrical Engineering
Rector of Warsaw University of Technology - Prof. Jan Szmidt

Organisers

University of Zagreb - Faculty of Transport and Traffic Sciences
Warsaw University of Technology - Institute of Electrical Machines - Electric Traction Division
Electric Traction Section of Committee on Electrical Engineering Polish Academy of Sciences

Conference topics

- Modelling and simulation of transport systems
- Electromechanical systems in transport
- Control systems of vehicles and fixed installations
- EMC in transport
- Electrified transport in integrated Europe - technical, ecological and organisational problems

Conference secretary - office for MET'2015

Warsaw University of Technology
Institute of Electrical Machines
Electric Traction Division
Plac Politechniki 1, 00-661 Warsaw, Poland,
Phone.: (+48-22) 2347435; 2347344 fax:(+48-22) 6299817
E-mail: met2015@ee.pw.edu.pl

Media Partner

