

Włodzimierz Jefimowski

Analiza porównawcza zużycia energii przez pociągi dużych prędkości w zależności od stosowanego systemu zasilania

Jakość usług świadczonych przez pasażerski transport kolejowy jest głównym czynnikiem wpływającym na jego konkurencyjność wobec innych środków transportu. Czynniki wpływające na jakość w zasadniczej mierze to czas i komfort podróży. Mają one szczególny wpływ na koszty przygotowania odpowiedniej infrastruktury, zakupu taboru i koszt zużytej energii. Udział kosztów energii w budżecie kolei konwencjonalnej i KDP ma tendencję wzrostową w krajach UE ze względu na zwiększanie prędkości i stały wzrost cen energii elektrycznej [1]. Dlatego problem poprawy racjonalności zużycia energii zajmuje znaczące miejsce w polityce transportowej UE.

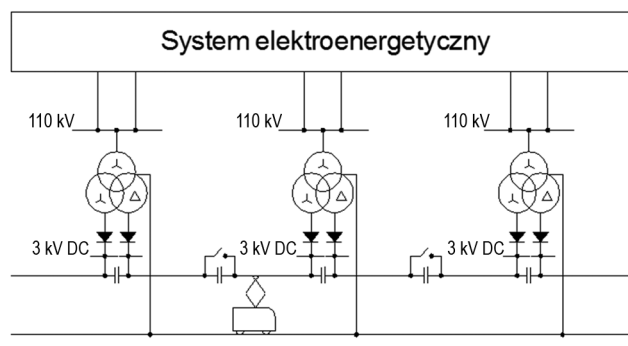
Zużycie energii przez transport kolejowy dużych prędkości jest zdeterminowane przez szereg czynników [2, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Czynniki te można w ogólny sposób podzielić na czynniki wynikające z parametrów linii kolejowej i z parametrów taboru. Obydwie grupy czynników mają wpływ na prędkość jazdy pociągów, od której zużycie energii jest szczególnie zależne. Warto zaznaczyć, że zwiększenie prędkości chwilowej pociągu nie zawsze jest tożsame ze skróceniem całkowitego czasu podróży. Czas przejazdu jest związany z prędkością średnią między stacjami. Istnieją bowiem sytuacje, również na liniach dużych prędkości, w których – na pewnych odcinkach – występują ograniczenia prędkości bądź konieczność postoju. Unikanie ich – oprócz skracania czasów przejazdu – ma na celu również zwiększenie racjonalności wykorzystania energii. Bowiemy w przypadku jazdy pociągu ze zmienną prędkością i z postojami energia jest tracona na wielokrotne cykle przyspieszania-hamowania, zaś przy jeździe z prędkością stałą – wyłącznie na pokonywanie oporów ruchu. Innym czynnikiem związanym z infrastrukturą jest rodzaj systemu elektryfikacji linii oraz jego sprawność i zdolność przesyłowa. Planowane w Polsce (choć plany te odłożono – mają być zrealizowane dopiero po 2020 r.) linie dużych szybkości będą zelektryfikowane w systemie 2×25 kV, gdyż istniejący w Polsce system elektryfikacji 3 kV DC ma swoje graniczne zdolności przesyłowe przy prędkości pociągów na poziomie do 250 km/h [1, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14].

Na zużycie energii ma również wpływ rodzaj zastosowanego taboru. Z tego punktu widzenia tabor może różnić się charakterystykami trakcyjnymi i sprawnościami, jak również mocami potrzeb własnych. W nowoczesnych pociągach pasażerskich zużycie energii na potrzeby własne jest stosunkowo wysokie, co jest

spowodowane działaniem urządzeń mających na celu polepszenia komfortu podróży.

Systemy elektryfikacji linii kolejowych System prądu stałego 3 kV

Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat układu zasilania linii kolejowej w systemie 3 kV DC w wariantcie z transformacją jednostopniową oraz układami prostownikowymi 12-pulsowymi. W systemie tym zelektryfikowane są wszystkie linie PKP. Stosowane jest w nim zasilanie dwustronne. Na liniach obsługujących ruch pociągów o dużej szybkości odległości między podstacjami wynoszą od kilku do kilkunastu kilometrów, co jest spowodowane koniecznością zapewnienia odpowiedniego napięcia na pantografach pojazdów [2, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].



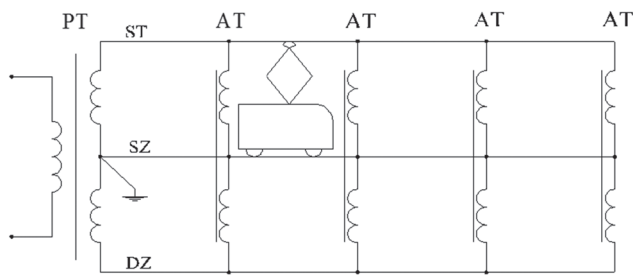
Rys. 1. Ogólny schemat układu zasilania w systemie 3 kV DC

System 2×25 kV 50 Hz

Na rysunku 2 przedstawiono ogólny schemat układu zasilania w systemie 2×25 kV. System ten posiada największe możliwości przesyłowe w stosunku do innych systemów, stąd w krajach zelektryfikowanych w systemach prądu stałego linie o dużym natężeniu ruchu towarowego oraz nowe linie dużych prędkości elektryfikowane są w tym systemie. Stosowany jest w nim centralny, jednostronny układ zasilania. W takim układzie w ogólnym przypadku jedna podstacja zasila kilka odcinków linii (sekcji) z jednej strony. Odcinki te zakończone są kabinami sekcyjnymi, zdolnymi łączyć sekcje między sobą w sytuacjach awaryjnych, kiedy jedna z podstacji ulegnie awarii.

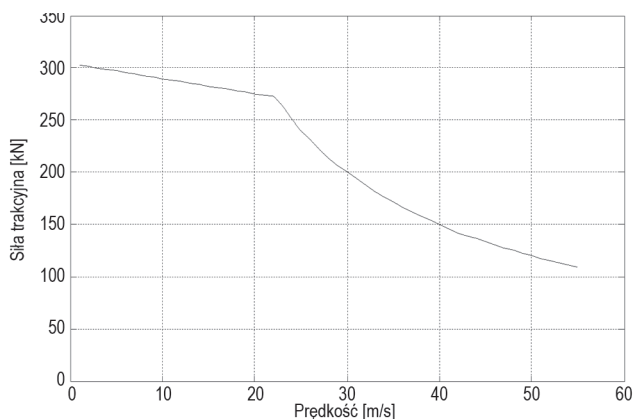
Pojazdy trakcyjne

W badaniach analizie poddano tabor wielosystemowy. Te same pociągi różnią się charakterystykami trakcyjnymi oraz sprawnościami w zależności od tego, w jakim systemie elektryfikacji pra-



Rys. 2. Ogólny schemat układu zasilania w systemie 2×25 kV

cują. Ze względu na ograniczenie w przesyłce mocy systemu 3 kV DC siła trakcyjna w funkcji prędkości jest ograniczona w ten sposób, że nie przekracza się 6–7 MW mocy pociągu. Sprawność pociągu w systemie 25 kV jest niższa niż w systemie prądu stałego ze względu na obecność transformatora obniżającego napięcie na pojeździe trakcyjnym. W celu realizacji przejazdu teoretycznego zaimplementowano charakterystyki trakcyjne i charakterystyki sprawności podane przez producentów taboru kolejowego. Na rysunku 3 przedstawiono przyjętą do analiz przykładową charakterystykę trakcyjną lokomotywy o mocy 6 MW.



Rys. 3. Przykładowa charakterystyka trakcyjna lokomotywy o mocy 6 MW w systemie 3 kV DC

Zależność oporów ruchu od prędkości wyraża się następującym wzorem [3, 9]:

$$W = W_a v^2 + W_b v + W_c \quad (1)$$

Dla pociągów zespolonych przyjęto odpowiednie współczynniki podane przez producentów taboru. Natomiast dla składów wagonowych wykorzystano aproksymacje oporów ruchu przedstawione w [3]. Opory ruchu wagonów:

$$W = (0,64 + 0,00147v) \cdot M + 14,7z + 0,00785(n + 2,5)v^2 \quad (2)$$

gdzie:

- M – masa wagonu,
- z – liczba osi wagonu,
- n – liczba wagonów.

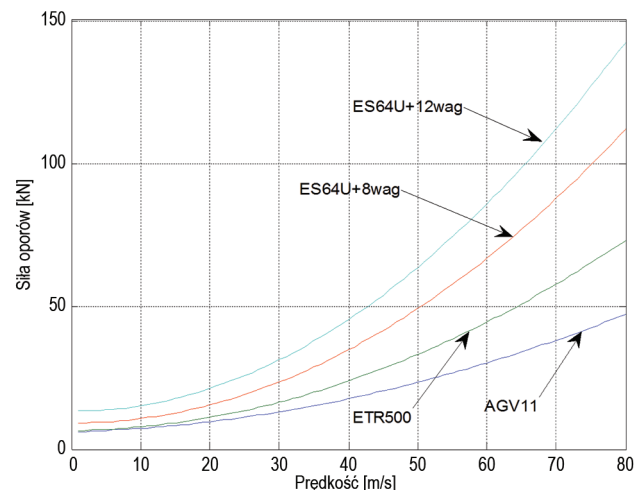
Opory ruchu lokomotywy:

$$W = 0,987 - 0,011968v + 0,0006068v^2 \quad (3)$$

Na rysunku 4 przedstawiono wykres oporów ruchu poszczególnych badanych pociągów w funkcji prędkości (bez uwzględnienia oporów pochodzących od profilu linii).

W opracowaniu przeanalizowano zużycie energii następujących pociągów:

- z lokomotywą o mocy 6MW, wagony: 500 t,
- z lokomotywą o mocy 6 MW, wagony: 350t,
- ETR 500,
- AGV 11.



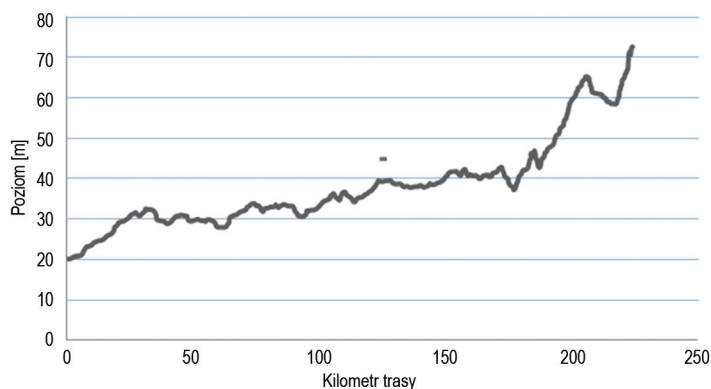
Rys. 4. Aproksymacje oporów ruchu badanych pociągów

Trasa kolejowa

W celu porównania zużycia energii elektrycznej zbadano przejazd pociągów na dwutorowej linii kolejowej o długości 220 km. Rozparzono dwa warianty elektryfikacji linii kolejowej: w systemie 3 kV DC i w systemie 2×25 kV 50 Hz. W wariantcie elektryfikacji 3 kV DC linia kolejowa zasilana jest przez 20 podstacji trakcyjnych, zaś w wariantcie zasilania w systemie 2×25 kV przez 4 podstacje trakcyjne. Na wszystkich podstacjach trakcyjnych prądu stałego przyjęto zespoły prostownikowe 12-pulsowe, na części podstacji założono transformację jednostopniową. W przypadku systemu 2×25 kV założono, że podstacje trakcyjne zasilane są przez linie wysokiego napięcia 220 kV. Moc zwarciova w punktach włączenia wszystkich podstacji do sieci wysokiego napięcia wynosi 4000 MVA, każda podstacja wyposażona jest w transformatory jednofazowe o mocy 40 MVA. W systemie 3 kV założono, że odległości między podstacjami wynoszą do 13 km, a średnia odległość między podstacjami wynosi ok. 10,5 km. Na pięciu najdłuższych odcinkach między podstacjami założono obecność kabiny sekcyjnej. W systemie 2×25 kV założono, że jedna podstacja zasila odcinek o długości od 42 do 62 km. W przypadku systemu 3 kV przyjęto założenie, że przekrój sieci trakcyjnej wynosi 420 mm² Cu, zaś w systemie 2×25 kV – 270 mm² Cu, a przewód dodatkowego zasilacza 400 mm² AFI. Moc wszystkich autotransformatorów w systemie 2×25 kV wynosi 10 MVA.

W przejeździe teoretycznym wzięto pod uwagę opory ruchu związane z profilem pionowym (profil pionowy linii kolejowej przedstawiono na rys. 5). Pominięto wpływ profilu poziomego ze względu na duże promienie łuków występujące na tej linii kolejowej.

W systemie prądu przemiennego 2×25 kV stosowane jest zasilanie jednostronne, więc pociąg jest zasilany przez jedną podstację. W systemie 3 kV prądu stałego stosowane jest zasilanie dwustronne, zatem dany pociąg jest zasilany przez najbliższe dwie podstacje trakcyjne, jak również przez kolejne dalsze pod-



Rys. 5. Profil pionowy rozpatrywanej trasy kolejowej o długości 220 km

stacje. Stopień obciążenia kolejnych podstacji maleje asymptotycznie do zera, więc w symulacjach – przy obliczeniu łącznej mocy oddawanej przez podstacje trakcyjne zasilające pociąg – wzięto pod uwagę moc czterech podstacji na każdą stronę od pociągu.

Założono 6 opcji prędkości na trasie kolejowej:

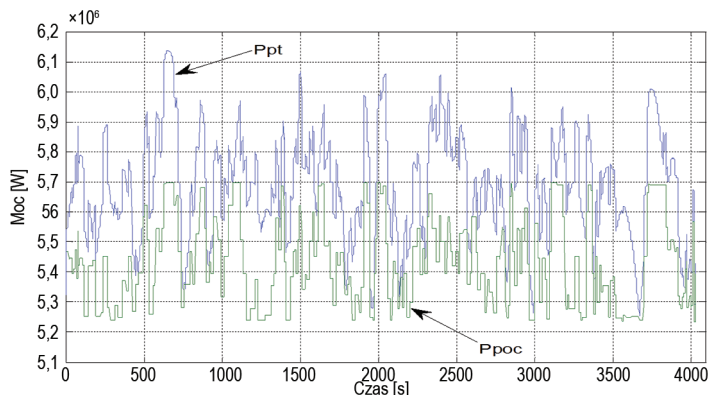
- opcja 1 – 160 km/h,
- opcja 2 – 200 km/h,
- opcja 3 – 220 km/h,
- opcja 4 – 250 km/h,
- opcja 5 – 270 km/h,
- opcja 6 – 300 km/h.

W pierwszych trzech opcjach zbadano ruch pociągów w obydwu systemach (3 kV DC i 2×25 kV), natomiast w ostatnich trzech porównano przejazdy pociągów zespolonych w systemie 2×25 kV. W każdej opcji zbadano wpływ ograniczenia prędkości na odcinku o długości 25 km do 160 km/h, jak również wpływ postojów.

Wyniki symulacji przejazdów

Przebiegi mocy pociągu

W wyniku badań otrzymano przebieg mocy pobieranej przez badany pociąg, jak również mocy na wyjściu podstacji trakcyjnych zasilających pociąg. Dla przykładu: przebieg mocy pociągu i podstacji dla przejazdu pociągu zespolonego na linii zelektryfikowanej w systemie 3 kV przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Przebieg mocy w czasie pociągu zespolonego ze stałą prędkością 200 km/h – Ppoc, mocy oddanej przez podstacje trakcyjne – Ppt, w wariacie elektryfikacji 3 kV DC

Rysunki 7–9 przedstawiają wyniki badań dotyczących zużycia energii. Na rysunku 7 przedstawiono łączne zużycie energii badanych pociągów w funkcji prędkości w dwóch systemach elektryfikacji. Rysunek 8 przedstawia łączne jednostkowe zużycie energii (łącznie ze stratami w sieci trakcyjnej), natomiast rysunek 9 przedstawia straty w sieci trakcyjnej.

Jak przedstawiono na rysunkach 7 i 8, zużycie energii w systemie 3 kV i 2×25 kV dla tych samych pociągów i prędkości jest zbliżone. Zaś straty w sieci trakcyjnej w systemie 3 kV dla odpowiednich pociągów i prędkości są wyraźnie większe niż w systemie 2×25 kV (rys. 9). Wynika z tego, że energia pobrana przez pojazdy trakcyjne w systemie 2×25 kV jest większa niż w systemie 3 kV, ponieważ sprawność taboru w systemie prądu przemiennego jest niższa niż w systemie prądu stałego.

Wyniki wskazują również, że zużycie energii przez pociągi lokomotywowe jest większe niż przez pociągi zespołowe. Wynika to z większych oporów ruchu pociągów lokomotywowych. Jak podaje literatura [3], opory ruchu pociągów lokomotywowych z nowoczesnymi wagonami są o ok. 30% większe niż szybkich pociągów zespołowych. Jednostkowe zużycie energii jest mniejsze dla większego składu pociągu. Najmniejszym jednostkowym zużyciem energii charakteryzuje się pociąg ETR500.

Przejazdy z ograniczeniami prędkości i postojami

Przeprowadzono symulację ruchu pociągu AGV11 z prędkością 300 km/h oraz ograniczeniami prędkości do 160 km/h na trzech odcinkach: 64–76,5 km, 91–96,7 km, 135,5–143,5 km. W tabeli 1 przedstawiono energię pobraną z podstacji trakcyjnej oraz energię pobraną przez pojazd z sieci trakcyjnej. Energia oddana przez podstację wzrosła o 494 kWh (12,5%) przy wprowadzeniu ograniczeń prędkości. Czas przejazdu bez ograniczenia prędkości wynosi 44 min i 48 s, a z ograniczeniami – 50 min i 33 s.

Wykonano również analogiczne badania dla tego samego pociągu, symulując jego postoje. Określono zużycie energii i czas podróży przy różnych liczbach postojów i dla różnych czasów ich trwania. Przy pojedynczym 5-minutowym postoju energia oddana przez podstację wzrosła o 412 kWh (10,4%), czas przejazdu z postojem wyniósł 51 min i 23 s. W tabeli 2 przedstawiono wyniki symulacji, przedstawiające zależność energii oddanej przez podstacje trakcyjne od ilości i czasów postojów; w tabeli 3 zaprezentowano łączne czasy podróży.

Tabela 1

Zużycie energii po wprowadzeniu ograniczenia prędkości na odcinku

	E _{pt} [kWh]	E _{pc} [kWh]
300 km/h ciągle	3943	3822
ograniczenia	4437	4268

Tabela 2

Zużycie energii po wprowadzeniu postoju na odcinku

Czas postoju	Liczba postojów		
	1	2	3
	[kWh]		
1 min	4305	4672	5024
2 min	4310	4682	5039
3 min	4315	4692	5054
4 min	4320	4702	5069

Tabela 3

Łączne czasy przejazdów pociągów

Czas postoju	Liczba postojów		
	1	2	3
1 minuta	47 min 47 s	50 min 46 s	54 min 1 s
2 minuty	48 min 47 s	51 min 46 s	55 min 1 s

Podsumowanie

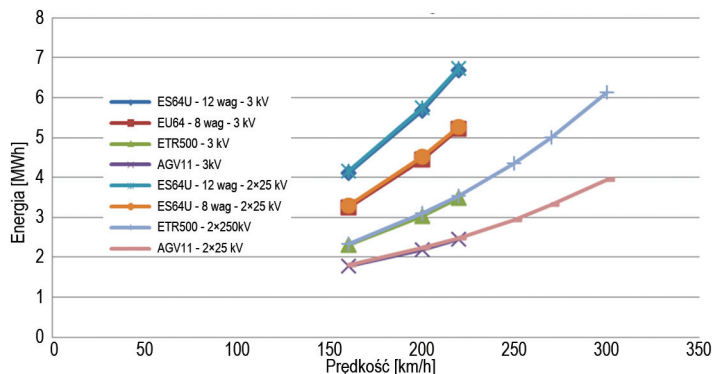
Wyniki przeprowadzonych przykładowych porównawczych analiz wskazują, że w systemie prądu przemiennego, pomimo mniejszych strat w sieci trakcyjnej, łączne zużycie energii jest zbliżone do zużycia w systemie prądu stałego. Wpływ tu ma niższa sprawność lokomotyw zasilanych napięciem przemiennym. Z kolei łączne koszty energii są mniejsze w systemie prądu przemiennego ze względu na mniejsze koszty łącznej zamawianej mocy szczytowej [6].

Zużycie energii jest wyraźnie większe dla pociągów lokomotywowych niż zespolonych. Z rysunku 7 wynika, że zużycie energii przez pociąg lokomotywowy z 12 wagonami przy prędkości 160 km/h jest większe niż dla pociągu zespolonego AGV11 przy prędkości 300 km/h. Świadczy to o konieczności stosowania pociągów zespolonych dla kolei dużych prędkości.

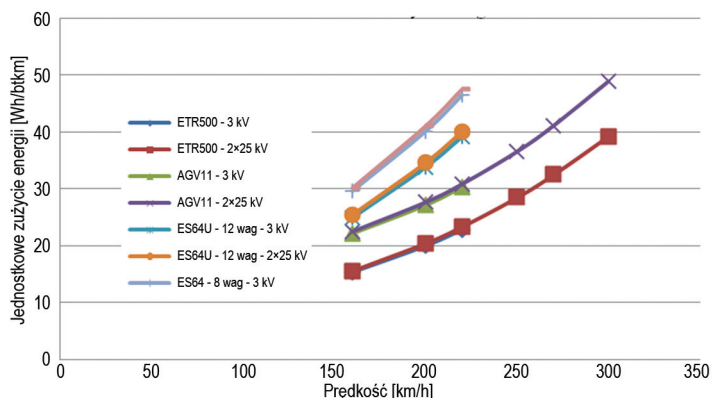
Zauważalne jest, że jednostkowe zużycie energii maleje wraz ze wzrostem wielkości składu pociągu. Z tego punktu widzenia korzystniejszy jest ruch większych pociągów, jeśli poparte jest to zapotrzebowaniem przewozowym.

Duży wpływ na zużycie energii i na czas przejazdów mają wprowadzane na pewnych odcinkach linii kolejowej ograniczenia prędkości. Z tego punktu widzenia korzystne jest stosowanie środków zapobiegających konieczności wprowadzania ograniczeń prędkości, np. dostosowanie geometrii toru do prowadzenia ruchu pociągów z dużą prędkością czy zakup taboru wyposażonego w wychylne pudło.

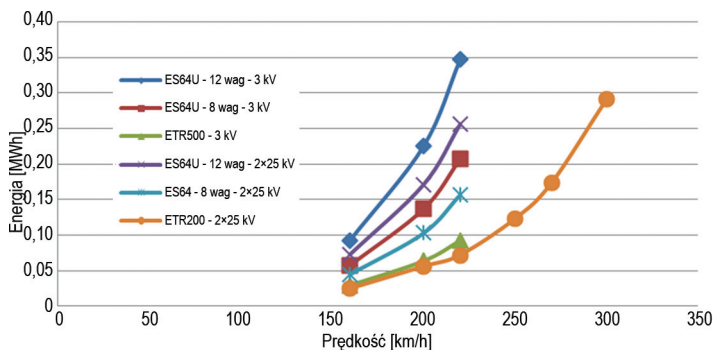
Szczególony wpływ na zużycie energii na kolei dużych prędkości mają postoje. Jak pokazują wyniki, pojedynczy 5-minutowy postój, zrealizowany na linii o długości 220 km, zwiększa łączne zużycie energii aż o 10,4%. Na zużycie energii wpływ ma również łączny czas postojów, od niego zależy bowiem całkowity czas podróży, a zatem także czas poboru energii potrzebnych przez pociąg.



Rys. 7. Łączne zużycie energii w funkcji prędkości przejazdu pociągu



Rys. 8. Jednostkowe zużycie energii w funkcji prędkości przejazdu pociągów



Rys. 9. Straty w sieci trakcyjnej w funkcji prędkości przejazdu pociągów

Literatura

- [1] Burak-Romanowski R., Woźniak K.: *Energetyczne aspekty modernizacji linii kolejowych*. SEMTRAK 2010 XIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa z zakresu Trakcji Elektrycznej i VI Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, 2010.
- [2] Capasso A., Morelli V.: *Elektryfikacja nowych linii kolejowych wysokich prędkości we Włoszech*. Technika Transportu Szynowego 2/1996.
- [3] Durzyński Z.: *Energochłonność wybranych pociągów zespolonych na duże prędkości*. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy projektowania i budowy systemu zasilania sieci trakcyjnej Kolei Dużych Prędkości”, Wrocław – Krzyżowa 2009.
- [4] *High Speed Trains and Energy Efficiency*. RENFE [prezentacja, 13.11.2007 r.].
- [5] Jefimowski W.: *Koncepcja zasilania linii kolejowej dużej prędkości w systemie 2x25 kV*. Praca magisterska, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, 2011 [mps niepubl.].

- [6] Krocak M.: *Symulacja komputerowa zelektryfikowanej linii kolejowej o złożonej strukturze zasilania*. Niepublikowana rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, 2008.
- [7] Kulworawanichpong T.: *Optimising AC electric railway power flows with electronic control*. Niepublikowana rozprawa doktorska, The University of Birmingham 2003.
- [8] Mierzejewski L., Szelağ A., Gatuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.
- [9] Szelağ A., Maciołek T.: *A 3 kV DC electric traction system modernization for increased speed and trains power demand – problems of analysis and synthesis*. Przegląd Elektrotechniczny 2013, R. 89, nr 3a.
- [10] Szelağ A., Mierzejewski L.: *Ground transportation systems*. [w:] The Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering, Supplement I, John Wiley & Sons Inc., New York 1999.

Dokończenie na s. 64 ➤