

Leszek Mierzejewski, Adam Szelań, Paweł Jankowski

Układy zasilania linii międzyregionalnych (IR) dla prędkości maksymalnych 140–160 km/h

Program modernizacji linii magistralnych PKP obejmuje około 5500 km linii dwutorowych. Celem jest doprowadzenie do stanu, w którym osiągnęte prędkości maksymalne jazdy pociągów pasażerskich wynoszą 160 km/h, a na Centralnej Magistrali Kolejowej – 200–250 km/h. Linie te są ujęte w europejskiej sieci szybkich linii kolejowych, wchodzi w skład korytarzy transportowych oraz są objęte umowami AGC i AGCT. Modernizacja tych linii jest współfinansowana ze środków UE. Ze względu na wielkość obszaru Polski oraz uwarunkowania ekonomiczno-społeczne skrócenie czasów przejazdu jest uzasadnione także dla linii o charakterze międzyregionalnym, a wynika ono z potrzeby dojazdów do pracy między takimi aglomeracjami jak Warszawa – Łódź, Warszawa – Radom, Warszawa – Lublin oraz innymi.

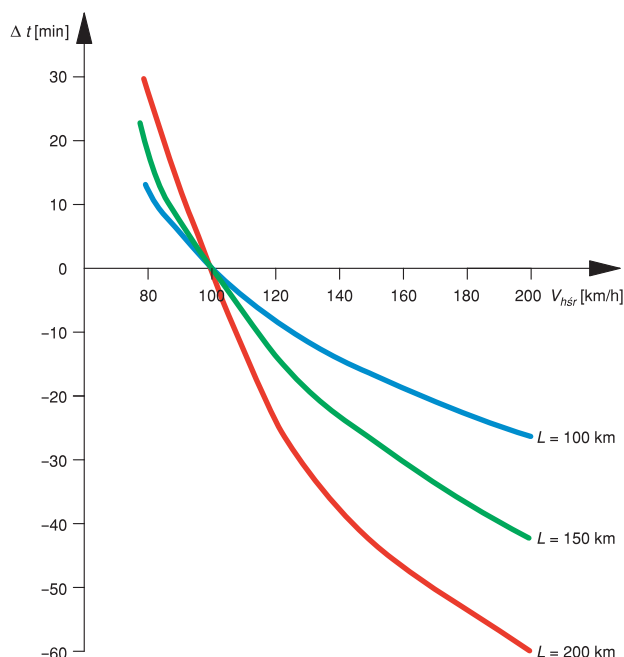
Odległości na tych trasach wynoszą 100–150 km i pożądane czasy przejazdu powinny mieścić się w granicach 60–80 min. Gęstość ruchu na tych liniach jest znacznie mniejsza niż na liniach magistralnych, a przewidywane zapotrzebowanie na szybkie połączenia szacowane jest zasadniczo na 4–8 par pociągów na dobę. Podjęcie przedsięwzięć modernizacyjnych wiąże się z przeprowadzeniem analiz – finansowej i ekonomicznej [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], na podstawie których można podjąć decyzje o wyborze do

realizacji rozwiązania technicznego. Ze względu na wielkość przewozów, a także i przewidywane wpływy, uzyskanie akceptowalnych wartości wskaźników finansowych i ekonomicznych wymaga szukania rozwiązań niskonakładowych, charakteryzujących się niskimi kosztami eksploatacyjnymi. W odniesieniu do układów zasilania należy zatem stosować rozwiązania, które będą efektywne kosztowo i technicznie, przy wprowadzeniu pewnych ograniczeń dotyczących poboru mocy maksymalnych z układu zasilania przy założonych prędkościach maksymalnych jazdy, co przekłada się na ograniczenie mas szybkich pociągów pasażerskich i towarowych. Czas przejazdu, jako czas o pewnej społecznie uzasadnionej wartości wyrażonej w pieniądzu, jest tu elementem uwzględnianym w analizach ekonomicznych inwestycji i modernizacji w transporcie. Skrócenie czasu przejazdu ma zatem określoną wartość, która jest jedną z korzyści wdrożenia projektu, czemu towarzyszy zwiększenie średniej prędkości handlowej na linii.

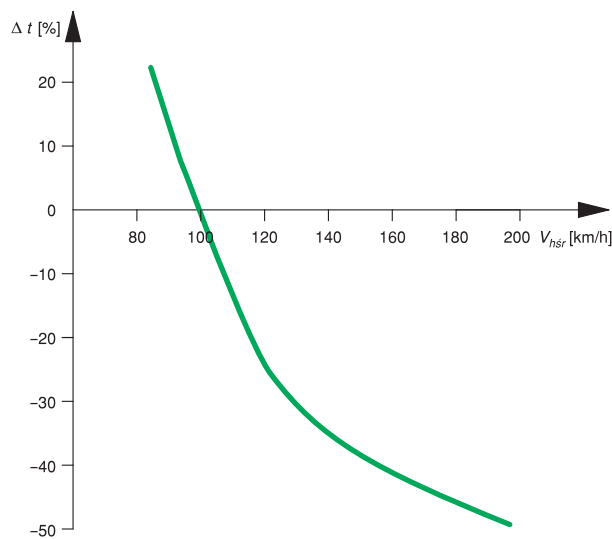
Na rysunku 1 zamieszczono wykresy przyrostu czasu przejazdu w funkcji prędkości średniej – wartości bezwzględne, oraz na rysunku 2 – wartości względne. Między wartościami prędkości handlowej i średniej technicznej zachodzi zależność uwarunkowana liczbą i czasem zatrzymań pociągu. Stosunek prędkości średniej technicznej i maksymalnej technicznej zależy od profilu prędkości linii i dynamiki jazdy. Profil prędkości linii można zilustrować graficznie w postaci wykresu $V_{dop(S)}$ (rys. 3).

Charakterystycznymi dla linii są prędkości:

- dopuszczalna V_{max} [km/h], z którą może przemieszczać się pociąg, wynikająca z konstrukcji drogi kolejowej i sieci trakcyjnej;



Rys. 1. Przyrost czasu przejazdu w zależności od prędkości średniej handlowej dla odcinków długości 100 km, 150 km i 200 km



Rys. 2. Względny przyrost czasu przejazdu w zależności od prędkości średniej handlowej

- techniczna V_t [km/h] obliczona jako średnia dla odcinka między sąsiednimi planowymi postojami na podstawie przebytej drogi i czasu trwania przejazdu lub między stacjami docelowymi, z pominięciem czasu postojów na stacjach pośrednich;
- handlowa V_h [km/h] obliczana jako średnia dla przejazdu pomiędzy stacjami docelowymi (lub dla wybranego odcinka linii) z wliczaniem do czasu przejazdu czasami postojów na stacjach pośrednich.

Przedstawione na rysunku 3 prędkości:

- techniczna na odcinku $a-b$ (analogicznie $c-d$, $e-f$):

$$V_t = \frac{1}{(t_b - t_a)} \int_{t_a}^{t_b} v(t) dt \quad (1)$$

- prędkość techniczna na odcinku $a-f$:

$$V_t = \frac{1}{(t_b - t_a) + (t_d - t_c) + (t_f - t_e)} \left[\int_{t_a}^{t_b} v(t) dt + \int_{t_c}^{t_d} v(t) dt + \int_{t_e}^{t_f} v(t) dt \right] \quad (2)$$

- prędkość handlowa na odcinku $a-f$:

$$V_h = \frac{1}{(t_f - t_a)} \left[\int_{t_a}^{t_b} v(t) dt + \int_{t_c}^{t_d} v(t) dt + \int_{t_e}^{t_f} v(t) dt \right] \quad (3)$$

Rozważania dotyczące skrócenia czasu przejazdu przez ograniczenie liczby zatrzymań i czasów postoju wykracza poza ramy niniejszego artykułu. Elementami istotnymi do zapewnienia pożądanych czasów przejazdu są:

- masy pociągów i moce lokomotyw;
- profil poziomy i pionowy linii;
- profil prędkości linii;
- dynamika jazdy pociągu;
- efektywność zasilania elektroenergetycznego (możliwość dostawy wymaganej mocy i poziomy napięć w sieci trakcyjnej).

Miarodajnym wskaźnikiem oceny energochłonności przewozów jest zużycie energii na danej trasie przez pociągi określonych kategorii, dlatego jako parametry stałe na określonej trasie można przyjąć:

- masę pociągu;
- profil pionowy i poziomy linii.

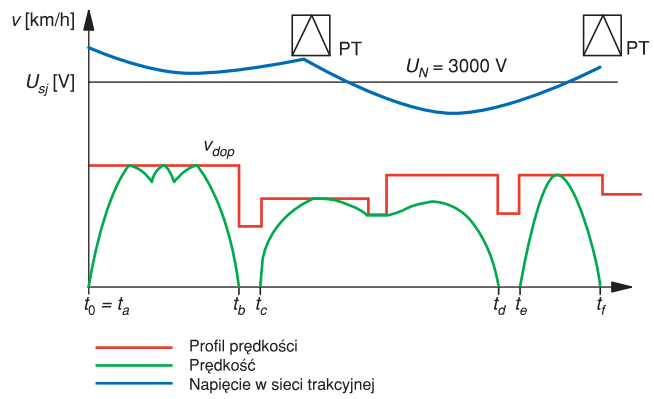
Przy tych założeniach czynnikami wpływającymi na czas przejazdu będą:

- moc lokomotywy i dynamika jazdy;
- profil prędkości;
- efektywność zasilania.

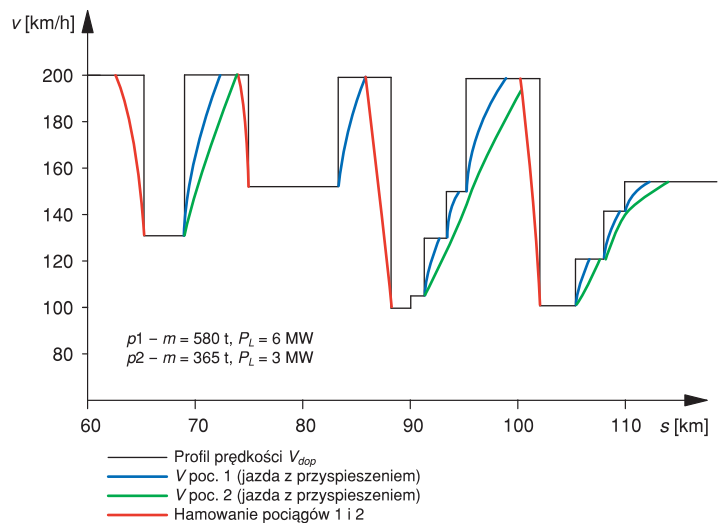
Moc lokomotywy powinna być skorelowana z masą pociągu i z założoną prędkością maksymalną (rys. 3 i 4). Niedobór mocy powoduje niedostateczny przyrost siły przyspieszającej i niskie wartości przyspieszeń (pociąg nr 2, rys. 4), co wydłuża czas dochodzenia do prędkości maksymalnej (mała dynamika jazdy). Wzrastają czasy poboru dużych prądów oraz straty energii w sieci zasilającej.

Profil prędkości, charakteryzujący się dużą zmiennością prędkości dopuszczalnych w funkcji drogi, dla uzyskania minimalnych czasów przejazdu wymusza jazdę forsowną dynamiczną, z dużym poborem energii i dużymi stratami prądu. Efektywność wykorzystania prędkości maksymalnych zależy od nadmiaru mocy lokomotywy (rys. 3 i 4).

Mała efektywność zasilania nie pozwala na pobór mocy niezbędnych do jazdy z prędkościami maksymalnymi i z maksymal-



Rys. 3. Przykładowy profil prędkości (szkic)



Rys. 4. Ilustracja do przejazdu odcinka trasy

nym przyspieszeniem (rys. 4), powoduje to zwiększenie strat prądu.

Z punktu widzenia racjonalnego poboru energii należy dążyć do zapewnienia następujących warunków:

- moc lokomotywy powinna zapewnić jazdę o dynamice nie powodującej nadmiernego wzrostu czasów dochodzenia do prędkości dopuszczalnych $a_{lok} \leq a_{dop}$ (a_{dop} – dopuszczalna wartość przyspieszenia dla danej kategorii pociągów);
- profil prędkości linii powinien być płynny (bez odcinków o dużych różnicach prędkości dopuszczalnych);
- układ zasilania powinien zapewnić poziom napięcia w sieci odpowiadający zapotrzebowaniu na moc pobieraną przez pociągi.

Z punktu widzenia racjonalizacji zużycia energii, nakładów inwestycyjnych i efektywności finansowej korzystny jest układ o prędkości dopuszczalnej na linii (maksymalnej) zbliżonej do wartości założonej prędkości technicznej. Na linii o dużych wartościach prędkości maksymalnych na krótkich odcinkach przeplatanych odcinkami o prędkościach znacznie mniejszych od prędkości maksymalnych, przy minimalizacji czasu przejazdu (jazda forsowna) zużycie energii będzie znacznie większe od analogicznego zużycia w przypadku linii o płynnym profilu prędkości. Duże prędkości maksymalne wymagają kosztownego układu torowego i układu zasilania dostosowanego do przesyłu dużych mocy. Tor kolejowy jest pod względem prędkości skonstruowany jednolicie dla całej linii, a ograniczenia prędkości wynikają najczęściej

z profilu poziomego i stanu technicznego budowli inżynierskich (mosty, wiadukty, stacje itp.).

Przykład prognozy przewozowej dla linii międzyregionalnej

Przykładowa prognozowana oferta przewozowa dla linii międzyregionalnych obejmuje w ruchu mieszanym pasażersko-towarowym następujące rodzaje pociągów:

- lekkie pociągi dalekobieżne ekspresowe o prędkości $V_{max} = 160$ km/h i masie do 350 t,
- lekkie pociągi dalekobieżne pospieszne o prędkości $V_{max} = 160$ km/h i masie do 350 t (większa liczba zatrzymań w stosunku do a),
- pociągi aglomeracyjne o prędkości $V_{max} = 130-140$ km/h i masie do 270 t,
- pociągi towarowe ekspresowe o prędkości $V_{max} = 120$ km/h i masie 1200 t,
- pociągi towarowe o prędkości $V_{max} = 80$ km/h i masie do 2000 t,
- pociągi towarowe o prędkości $V_{max} = 60$ km/h i masie do 3000 t (opcjonalnie).

Struktura i parametry układu zasilania dla linii o tak zróżnicowanych założeniach przewozowych jest wypadkową wymagań efektywnego zasilania dla pociągów pasażerskich szybkich i ciężkich pociągów towarowych. Jako nadrzędne należy jednakże traktować kryteria jakości zasilania dla pociągów pasażerskich (przykładowe typy podano w tabl. 1). Dlatego też nie przyjmuje się do analiz obciążeń energetycznych założenia o jednoczesnej jeździe (po jednym torze) pociągu szybkiego pasażerskiego i ciężkiego pociągu towarowego (po drugim torze). Z uwagi na niewielką liczbę pociągów ekspresowych pasażerskich i ciężkich pociągów towarowych, na liniach tego typu zakłada się zwykle wydzielone strefy czasowe dla kursowania każdej z tych kategorii pociągów, co w znaczącym stopniu wpływa na zmniejszenie kosztu inwestycyjnego układu zasilania. Wielkości mocy zainstalowanych na liniach międzyregionalnych o prędkości jazdy 160 km/h i liniach magistralnych przy takim założeniu kształtują się następująco:

- okłady mocy zainstalowanych dla linii:
 - magistralnych 160 km/h: 700–900 kW/km,
 - regionalnych 140–160 km/h: 460–500 kW/km,
- masa szybkich pociągów pasażerskich dla linii:
 - magistralnych: 600–900 t
 - międzyregionalnych: 300–350 t.

W tabelicy 3 zestawiono parametry przejazdów lekkich szybkich pociągów pasażerskich w dwóch wariantach:

- pociąg lokomotywowo z lokomotywą EP09 (moc 3 MW jest wystarczająca dla pociągów lekkich do prowadzenia ruchu z prędkością 160 km/h),
- pociąg zespolony (Pendolino – 6 wagonów, moc 4 MW).

Tablica 1

Zestawienie typów pociągów pasażerskich dla linii międzyregionalnej

Typ pociągu	Oznaczenie	Masa [t]	V_{max} [km/h]
EP09	I	270	160
Pendolino	II	340	160
Desiro -Siemens	III	200	140
EN-57	IV	320	110

Na rysunku 5 zamieszczono wykresy prądów, napięć i prędkości lekkich szybkich pociągów pasażerskich dla odcinka linii zawartego między trzema podstacjami A, B, C (odległości odpowiednio 21,585 i 19,781 km), sieć trakcyjna 320 mm² Cu. Przyjęto warianty z wjazdem pociągu na odcinek z prędkością $V_0 = 150$ km/h lub z rozruchem na odcinku od $V_0 = 0$ km/h, zaś ograniczenia prędkości wynoszą dla odcinka AB: $V_{maxAB} = 160$ km/h i odpowiednio dla odcinka BC: $V_{maxBC} = 130-140$ km/h (rys. 4). Sekwencje ruchowe zestawiono w tabelicy 2, symulacje przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu TTADAS [9].

Tablica 2

Sekwencje ruchu zastosowane w symulacji

Sekwencja ruchu	Opis
a	I lub II na 1 torze; 2 tor pusty
b	I lub II na 1 torze; III, IV na 2 torze
c	I lub II na 1 torze; I lub II na 2 torze

Układ zasilania dla linii międzyregionalnej

Na podstawie przyjętego założenia co do prognozy ruchowej w szczycie po dokonaniu analiz symulacyjnych ruchu i obciążeń układu zasilania [5, 6, 7, 9] można stwierdzić, że układy zasilania linii międzyregionalnych dla prędkości 160 km/h mogą być wyposażone „skromniej” od układów zasilania linii magistralnych dla tej samej prędkości. Wybór struktury układu zasilania linii międzyregionalnej sprowadza się w wielu przypadkach do podjęcia decyzji: czy podstacje trakcyjne o sztywnych charakterystykach będą rozmieszczone rzadko (typowo 20 – 24 km), a sieć trakcyjna będzie miała przekrój rzędu 440 mm² Cu, lub alternatywnie podstacje o charakterystykach mniej sztywnych rozmieszczone gęsto (10–12 km) i sieć trakcyjna o przekroju 320 mm² Cu. Uzyskanie efektywności finansowej inwestycji w układzie zasilania zależeć będzie od wykorzystania istniejącej infrastruktury energetycznej i uwzględnienia specyfiki lokalnej zarówno w przypadku modernizacji, jak też i dla nowych inwestycji (dostęp do sieci SN i WN). Poniżej zestawiono przykładowe rozwiązania struktury układu zasilania dla różnych opcji (budowa nowego układu zasilania, rozbudowa istniejącego układu zasilania, modernizacja), podano też przykładowe wielkości nakładów.

Warianty układów zasilania dla linii regionalnych

Opcja 1

- odległość między podstacjami: 20–22 km;
- sieć trakcyjna: 440 mm² (550 tys. zł/km – budowa);
- podstacje trakcyjne: 2×PD-16 (6000 tys. zł – modernizacja – dla mocy zwarciovych SN-Szw > 120 MVA w podstacji trakcyjnej);
- kabiny (600 tys. zł – modernizacja).

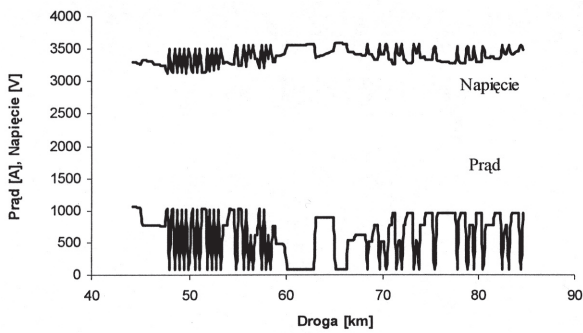
Opcja 2

- odległość między podstacjami: 20–22 km;
- sieć trakcyjna: 440 mm² (550 tys. zł/km – budowa);
- podstacje trakcyjne: 2×PD-17 (11 000 tys. zł – budowa);
- kabiny (600 tys. zł – modernizacja).

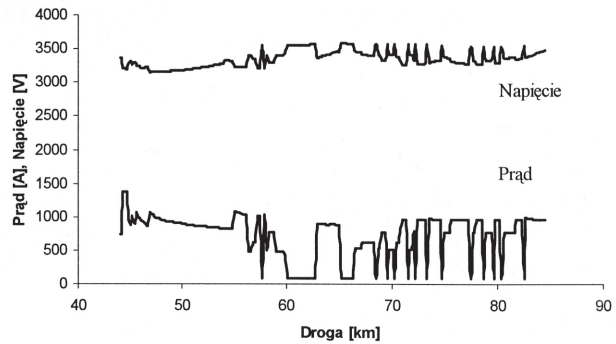
Opcja 3

- odległość między podstacjami: 10–11 km;
- sieć trakcyjna: 320 mm² (450 tys. zł/km – budowa, 300 tys. zł/km – modernizacja,)

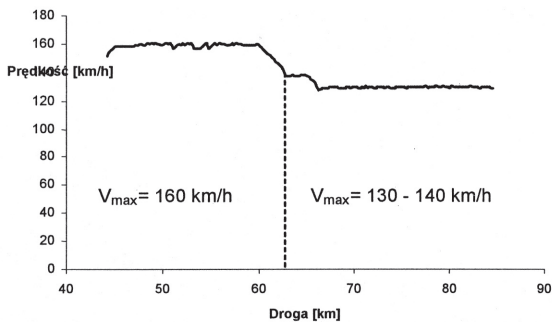
Prąd i napięcie w funkcji drogi dla pociągu z lokomotywą EP09 ($v_0 = 150$ km/h)



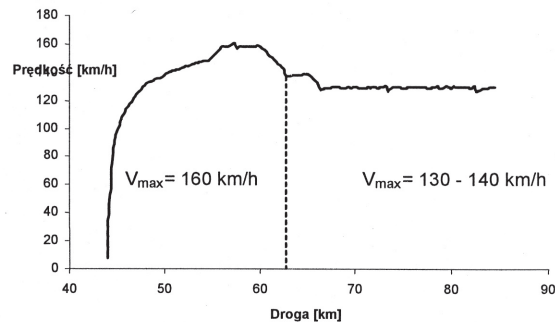
Prąd i napięcie w funkcji drogi dla pociągu z lokomotywą EP09 ($v_0 = 0$ km/h)



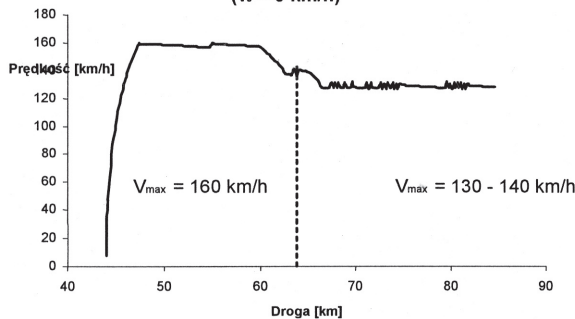
Prędkość w funkcji drogi dla pociągu z lokomotywą EP09 ($v_0 = 150$ km/h)



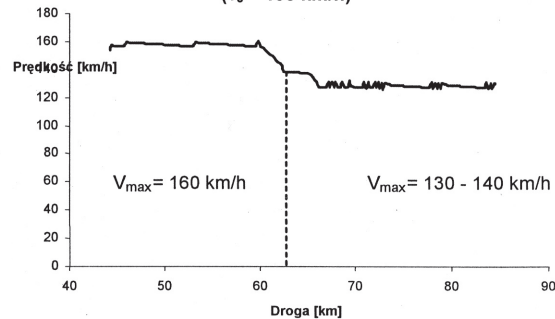
Prędkość w funkcji drogi dla pociągu z lokomotywą EP09 ($v_0 = 0$ km/h)



Prędkość w funkcji drogi dla pociągu Pendolino ($v_0 = 0$ km/h)



Prędkość w funkcji drogi dla pociągu Pendolino ($v_0 = 150$ km/h)



Rys. 5. Wyniki symulacji

- podstacje trakcyjne: 2×PD-I6 (6000 tys. zł – modernizacja), 1×PD-I6 (5000 tys. zł – budowa).

Opcja 4

- odległość między podstacjami: 10–11 km;
- sieć trakcyjna: 320 mm² (450 tys. zł/km – budowa, 300 tys. zł/km – modernizacja),
- podstacje trakcyjne: 2×PD-I2 (5000 tys. zł – modernizacja), 1×PD-I7 (7000 tys. zł – budowa).

Koszt odcinka 22 km (przykładowy średni)

- opcja 1 – sieć trakcyjna 12 100 tys. zł, podstacje trakcyjne 6000 tys. zł, kabina 600 tys. zł, łącznie 18 700 tys. zł;
- opcja 2 – sieć trakcyjna 12 100 tys. zł, podstacje trakcyjne 11 000 tys. zł, kabina 600 tys. zł, łącznie 23 700 tys. zł;

- opcja 3 – sieć trakcyjna 9900 tys. zł (budowa)/6600 tys. zł (modernizacja), podstacje trakcyjne 11 000 tys. zł, łącznie 20 900 tys. zł (budowa)/17 600 tys. (modernizacja);
- opcja 4 – sieć trakcyjna 9900 tys. zł (budowa)/6600 tys. zł (modernizacja), podstacje trakcyjne 12 000 tys. zł, łącznie 21 900 tys. zł (budowa)/18 600 tys. zł (modernizacja).

Między rozwiązaniem najdroższym (23 700 tys. zł – opcja 2) a najtańszym (17 600 tys. zł – opcja 3 z modernizowaną siecią trakcyjną) różnica wynosi 6100 tys. zł, a więc 35% kosztu rozwiązania najtańszego. Duży udział w nakładach stanowi sieć trakcyjna zarówno nowo budowana, jak i modernizowana. Koszt najtańszego rozwiązania z nowo budowaną siecią trakcyjną wynosi 18 700 tys. zł dla sieci 440 mm² i układem zasilania dwustronnym z kabiną (średnie napięcie AC) – opcja 1 oraz dla sieci 320 mm² z układem zasilania dwustronnym z podstacją dodatkową (zasilanie średnim napięciem AC) 20 900 tys. zł – opcja 3.

Podsumowanie

- Wybór efektywnego rozwiązania układu zasilania elektrotrakcyjnego jest uzależniony od lokalnych warunków zasilania w energię elektryczną z sieci publicznej (SN lub WN) oraz od technicznego stanu sieci trakcyjnej, a głównie konstrukcji wsporczych.
- Wzajemne niedopasowanie mocy lokomotywy, masy pociągu, profilu prędkości i efektywności zasilania przy forsowaniu skrócenia czasów przejazdów (dla określonej prędkości maksymalnej) pociąga zwiększenie zużycia energii nawet o 50%.
- Dla obciążeń układu zasilania, podobnie jak i z marketingowego punktu widzenia, korzystniejsze jest uruchomienie większej liczby lżejszych pociągów (do 400 t) od rzadziej kursujących pociągów cięższych (ok. 600 t). Wpływa to w znaczący sposób na wielkość nakładów i kosztów eksploatacyjnych układu zasilania, a ponadto poprawia atrakcyjność oferty przewozowej.
- Można uznać za dyskusyjną potrzebę zwiększania prędkości na liniach międzyregionalnych do 160 km/h, gdy odległość aglomeracja – aglomeracja wynosi 100–150 km, udział odcinków z prędkością 160 km/h nie przekracza 75% trasy, a występują częste ograniczenia prędkości. Zwiększenie prędkości ze 140 do 160 km/h wymusza istotne zwiększenie nakładów w układzie zasilania, co zmniejsza efektywność inwestycji, a skrócenie czasu przejazdu może być uzyskane poprzez likwidację ograniczeń, a nie zwiększania maksymalnej prędkości.
- Można przyjąć, że układ zasilania linii międzyregionalnych dla prędkości 160 km/h nie musi spełniać wymagań stawianych dla linii magistralnych. Szacunkowo wystarczający jest wtedy okład mocy zainstalowanej wynoszący ok. 60% okładu dla linii magistralnych i przy odpowiednio dobranych charakterystykach podstacji trakcyjnych (zasilanie WN) możliwe jest utrzymanie przekroju sieci trakcyjnej 320 mm² Cu, gdy odległości między podstacjami wynoszą 20–24 km.

Literatura

- Feasibility study and conceptual design for the remote control of fixed installations for electric traction system on Slovenian railways*. Holland Railconsult, Austroconsult, Omega Consult – Słowenia, Kolprojekt-Polska, 2003.
- Herman M., Korobłowski P.: *Analiza i ocena nowych projektów inwestycyjnych* (cz. I i II). Technika Transportu Szynowego 11-12/2002, 1-2/2003.
- Kotowska-Jelonek M., Mężyk A.: *Założenia metodyczne analizy i oceny efektywności modernizacji linii kolejowej Warszawa-Radom do prędkości 160 km/h*. Technika Transportu Szynowego 7-8/2002.
- Dyr T., Kotowska-Jelonek M., Kozubek P.: *Analiza efektywności finansowej modernizacji linii kolejowej Warszawa – Łódź*. Technika Transportu Szynowego 10/2002
- Mierzejewski L., Szelağ A., Jankowski P.: *Electrical energy quality studies in 3 kV dc electric traction systems for different schemes of connection traction substation to power utility system*. Elektro'04 Int. Conference Žilina, Slovakia, V 2004.
- Mierzejewski L., Szelağ A.: *Infrastruktura elektroenergetyczna układów zasilania systemu 3 kV DC linii magistralnych o znaczeniu międzynarodowym – projektowanie efektywnego układu zasilania zlk*. Technika Transportu Szynowego 3/2004, 6/2004.
- Studium wykonalności modernizacji linii kolejowej Warszawa – Radom – Kielce*. Kolprojekt 2003.
- Studium wykonalności modernizacji linii kolejowej Warszawa – Łódź*. Kolprojekt 2003.
- Studium wykonalności modernizacji linii kolejowej Warszawa – Gdańsk – Gdynia*. Parsons Brinckerhoff, Gdańsk 2003/2004.
- Szelağ A.: *Instrukcja do programu TTADAS'04*. Opracowanie wewnętrzne Zakładu Trakcji Elektrycznej IME PW, Warszawa 2004.

Tablica 3

Zestawienie wyników przejazdu teoretycznego [9]

Typ pociągu	Odcinek A-B				Odcinek B-C				Uwagi (sekwencja ruchu)
	I_{sr} [A]	T_j/T_p	V_{sr} [km/h]	Δ_{uz} [%]	I_{sr} [A]	T_j/T_p	V_{sr} [km/h]	Δ_{uz} [%]	
EP09	519	1,50	154,64	91,27	575	1,25	129,48	92,40	$V_o = 150$ km/h (a)
EP09	704	1,15	130,23	90,54	617	1,20	129,48	91,78	$V_o = 0$ km/h (a)
Pendolino	319	1,18	153,05	93,66	435	1,27	129,48	92,82	$V_o = 150$ km/h (a)
Pendolino	484	1,17	138,74	90,67	449	1,32	128,31	91,21	$V_o = 0$ km/h (a)
EP09	704	1,15	130,23	89,87	617	1,20	129,48	91,01	$V_o = 0$ km/h (b)
Pendolino	488	1,17	138,74	89,81	453	1,46	128,03	90,40	$V_o = 0$ km/h (b)
EP09	704	1,15	130,23	90,11	617	1,20	129,48	91,24	$V_o = 0$ km/h (c)
EP09	519	1,50	154,64	90,82	575	1,25	129,48	91,80	$V_o = 150$ km/h (c)
Pendolino	485	1,17	138,74	90,25	446	1,42	128,31	90,50	$V_o = 0$ km/h (c)
Pendolino	367	1,30	153,05	91,56	455	1,48	129,48	91,28	$V_o = 150$ km/h (c)

I_{sr} – prąd średni pociągu, V_{sr} – prędkość średnia na odcinku, T_j/T_p – czas jazdy/czas poboru energii, Δ_{uz} – średnia sprawności przesyłu energii.

Autorzy

dr inż. Leszek Mierzejewski

dr hab. inż. Adam Szelağ

mgr inż. Paweł Jankowski

Zakład Trakcji Elektrycznej IME PW