

Adam Szelaq

Energetyczne aspekty modernizacji taboru i zwiększania prędkości ruchu pociągów elektrycznych

Na zużycie energii elektrycznej w transporcie kolejowym wpływa wiele czynników. Jest ono zdeterminowane jakością stosowanych rozwiązań technicznych i organizacyjnych, które przekładają się na określone koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Stąd też w obszarze zagadnień związanych z racjonalizacją zużycia energii elektrycznej mieszczą się zarówno analizy techniczne, jak też finansowe i ekonomiczne. Oceny globalne powinny uwzględniać wszystkie uwarunkowania, ponieważ tylko w takim przypadku będą one kompleksowe i wiarygodne.

Problem racjonalizacji zużycia energii w zelektryfikowanym transporcie kolejowym ma charakter wielowymiarowy i obejmuje nie tylko czynniki kształtujące poziom zużycia energii na cele trakcyjne, lecz także dobór środków technicznych zapewniających efektywne zasilanie pojazdów z uwzględnieniem uzasadnionych finansowo wielkości nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych układów zasilania zelektryfikowanych linii kolejowych, taboru, organizacji ruchu i przewozów.

Racjonalizacja zużycia energii elektrycznej nie zawsze jest tożsama, choć jest to niejednokrotnie tak pojmowane, z minimalizacją zużycia energii, gdyż istnieje wiele uwarunkowań uzasadnionych ofertą przewozową i *a priori* zakładających zwiększenie zużycia energii. Dotyczy to szczególnie zwiększenia prędkości jazdy i komfortu podróży w przewozach pasażerskich, a także zmniejszenia mas i zwiększenia prędkości w wybranych kategoriach przewozów towarowych [1, 4, 5, 6, 15, 18].

Minimalizacja zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym traktowana jako niezależne i nadrzędne zadanie optymalizacyjne prowadzić może do konieczności zapewnienia warunków technicznych, wymagających wysokich nakładów, nieuzasadnionych ani finansowo ani ekonomicznie.

Poszukiwanie rozwiązania racjonalnego wymaga kompromisu pomiędzy zużyciem i kosztami energii, kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi a wpływami.

Podobnie przyjęcie jako kryterium nadrzędnego kryterium minimalizacji strat energii prowadzi do sformułowania wymagań dla wariantu „idealnego” – z wykorzystaniem najnowszej techniki i technologii, ale przy wysokich kosztach inwestycyjnych.

Racjonalizacja zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym obejmuje zarówno bezwzględne wskaźniki odnoszące się do energochłonności przewozów, jak i relacje korzyści i kosztów wynikające z realizacji tych przewozów przy określonym poziomie energii.

Uwarunkowania wewnętrzne systemu mające charakter sprzężeń interakcyjnych określają wpływ poszczególnych elementów każdego z podsystemów zelektryfikowanej linii kolejowej na wiel-

kości zużycia energii i jej koszt oraz wielkości niezbędnych dla realizacji przewozów inwestycji.

Energochłonność przewozów na zelektryfikowanych liniach kolejowych PKP jest w porównaniu do analogicznych wskaźników energochłonności wielu kolei europejskich wyższa o ok. 15–30%. W ocenie racjonalności zużycia energii energochłonność przewozów należy odnosić do wykonywanych przewozów netto, ponieważ tylko takie wskaźniki w sposób obiektywny pozwalają ocenić przyczyny istniejącego stanu rzeczy.

Każda z linii kolejowych charakteryzuje się pewną specyfiką, określoną przez specjalizację przewozów, poziom rozwoju infrastruktury, intensywność przewozów, przepustowość, charakterystykę drogi kolejowej. Stąd też nie jest możliwa jednoznaczna ocena globalna całej sieci kolejowej w ujęciu innym niż statystyczne. W analizach racjonalizacji zużycia energii elektrycznej opartych na badaniach wzajemnych interakcji pomiędzy podsystemami linii kolejowej zagadnienie to można rozpatrywać globalnie dla określonych linii lub ich części i wybranych zagadnień o charakterze lokalnym. Istotą badań jest określenie wzajemnych zależności pomiędzy podsystemami dystrybucji (zasilanie elektroenergetyczne) i odbioru energii (trakcja) a podsystemami sterującymi, mającymi wpływ na wielkość zużycia energii (organizacja ruchu i przewozów, droga kolejowa, systemy sterowania i sygnalizacji).

W pracach i publikacjach [2, 14] racjonalizację zużycia energii traktowano jako pojęcie obejmujące: wielkości zużycia energii i poboru mocy, koszty energii, koszty eksploatacyjne i inwestycyjne związane z dostawą energii do odbiorców. Należy wyróżnić następujące obszary struktury linii kolejowej podlegające analizie racjonalizacji zużycia energii:

- analiza eksploatacyjna linii do celów bieżącej lub doraźnej oceny wskaźników energochłonności,
- analiza przedsięwzięć modernizacyjnych i inwestycyjnych z uwzględnieniem aspektu racjonalizacji zużycia energii.

Procentowy udział kosztów energii w budżecie kolei zarówno operatorów, jak i infrastruktury, ma zatem trend rosnący przy zmniejszeniu zużycia na skutek zmniejszenia przewozów. Trend ten będzie utrzymywany w najbliższych latach w związku z wprowadzeniem większych prędkości jazdy oraz wzrostem cen energii. Stąd też działania zmierzające do racjonalizacji zużycia energii są jak najbardziej uzasadnione w ramach działań zmierzających do minimalizacji kosztów własnych kolei. W polityce transportowej UE i UIC problem ten stał się niezwykle istotny [17].

Problem racjonalizacji zużycia energii przy projektowaniu nowych linii, jak i modernizowaniu istniejących oraz zakupie nowego taboru należy uwzględnić już na etapie prognozowania przewozów i organizacji ruchu. Zwykle jest to prognoza na 25–30 lat, co powoduje, że jest bardzo trudno uzyskać dużą zgodność zało-

żeń z rzeczywistości występującymi w przyszłości warunkami. Przyjęcie określonych założeń ruchowych i przewidywana ich realizacja w postaci strumieni określonych pociągów (masy, prędkości, ciągniki) powoduje określone zapotrzebowanie na moc i energię. Teoretycznie łatwiej jest sprecyzować wymagania, co do taboru, który może być dedykowany do określonej trasy i przewozów. Niedoinwestowanie układu zasilania, gdy wprowadzany jest nowy tabor może powodować ograniczenia w możliwości prowadzenia założonego ruchu lub nieefektywne wykorzystanie nowego taboru, a w najlepszym przypadku tylko nieefektywne gospodarowanie energią (straty, nierównomierność obciążeń podstacji, wyższe moce zamawiane i koszty, mniejszą niezawodność zasilania). Dlatego już na etapie przygotowań inwestycji (zakupów taboru) należy określić kategorię linii (typ) i wymagania (standardy) techniczne dotyczące tak infrastruktury jak i taboru. Dla linii o najwyższych kategoriach (np. liniach szybkich czy magistralnych) powinny być spełnione najwyższe standardy, co oznacza największe nakłady inwestycyjne, ale jednocześnie zapewnia spełnienie wymagań efektywnego wyposażenia infrastruktury i racjonalność zużycia energii dzięki odpowiedniemu przygotowaniu trasy, małym stratom przesyłowym i dużej niezawodności. Zwykle też rozwiązanie takie realizowane jest etapowo w zależności o przewidywanego zwiększenia ruchu oraz jest otwarte na wypadek zwiększenia zapotrzebowania na moc i energię. O wyborze konkretnego rozwiązania technicznego spośród efektywnych rozwiązań technicznych spełniających zadane kryteria powinny decydować ich realizowalność i wyniki analizy CBA.

W przypadku linii o mniejszym natężeniu ruchu i niższej kategorii należy przyjąć warianty efektywne technicznie dla przewidywanego ruchu, ale ocenę ich racjonalności z punktu widzenia zużycia energii należy ocenić poprzez zastosowanie analizy CBA dla danego wariantu. Nie jest bowiem uzasadnione ani technicznie, ani tym bardziej ekonomicznie dążenie do uzyskania wysokiej sprawności dostawy energii do pojazdów, jeśli gęstość ruchu nie zapewni wymaganego poziomu wpływów i uzyskania odpowiednich oszczędności, czyli znaczącego zmniejszenia zużywanej energii dzięki inwestycjom w układzie zasilania. Dlatego należy dążyć do wygenerowania rozwiązań kompromisowych, w których kryterium racjonalności zużycia energii, jako pojęcie bardzo szerokie, obejmujące tak dążenie do minimalizacji zużycia energii jak i ponoszonych kosztów, stanowi jedno z kryteriów, ale nie jedyne uzasadnienie wyboru wariantu projektu. Powinno się bowiem uwzględniać także uwarunkowania lokalne, terenowe, aktualne możliwości finansowania inwestycji oraz nadrzędne cele stawiane inwestorowi przez czynniki zewnętrzne (polityka państwa wobec zadań transportu kolejowego) jak i finanse przedsiębiorstwa oraz uwarunkowania innych sektorów kolei i wymagania techniczne.

Czynniki wpływające na zużycie energii

Wielkość zużywanej energii elektrycznej w realizacji przewozów i koszt energii w dużym stopniu zależą od uwarunkowań eksploatacyjno-organizacyjnych.

Organizacja ruchu i przewozów

W warunkach eksploatacyjnych kolei zużycie energii przez pociąg, szczytowe moce pobierane z podstacji trakcyjnych oraz maksymalne straty mocy i energii w układach zasilania są głównie uwarunkowane zakłóceniami lub zmianami ruchu na liniach. Są

też racjonalne prognozowanie wartości mocy szczytowych, zamawianych dla przyłączy podstacji trakcyjnych, jako istotnego składnika kosztu zakupu energii elektrycznej nie jest praktycznie możliwe. Zasadniczo wielkość mocy zamawianej określona jest nie na podstawie analiz energochłonności linii (jak być powinno), lecz danych statystycznych z okresów poprzednich (taka jest obecnie praktyka). Skutkiem takiego stanu są wysokie wartości mocy zamówionej, wykorzystywanej sporadycznie, większe przesyłowe straty energii i większe – od uzasadnionych przez założenia ruchowe dla linii (rozkład jazdy) – koszty zakupu energii elektrycznej.

Wielkości pobieranych mocy szczytowych, wykorzystanie mocy szczytowych zamawianych oraz minimalizacja przesyłowych strat energii są uwarunkowane głównie charakterystycznymi dla poszczególnych pociągów lub kategorii pociągów wielkościami mocy średnich i maksymalnych, ponadto maksymalną liczbą pociągów (w dobie, miesiącu) o największych mocach oraz minimalnymi odstępami czasowymi między „nitkami” rozkładu jazdy.

Ze względu na wykorzystanie mocy szczytowych zamawianych, a także wielkości strat energii, liczba pociągów o największych mocach nie powinna stanowić małego znaczącego udziału w ogólnej liczbie pociągów. Opłaty za moc zamawianą stanowią 20–40% opłat za energię. Wielkość obciążeń maksymalnych i czasy następstw pociągów w rozkładzie jazdy powinny być skoordynowane z graniczną zdolnością efektywnego zasilania podstacji trakcyjnych i sieci jezdnej danej linii, tak, aby wykorzystać moc zamawianą.

Spełnienie zasad racjonalnego zużycia energii elektrycznej nakłada następujące wymagania w obszarze organizacji ruchu i przewozów:

- a) eliminacja przypadków eksploatacji na liniach pociągów o największych mocach i niewielkim udziale w przewozach przez odpowiedni dobór masy lub prędkości i typu lokomotyw w celu zmniejszenia mocy szczytowych i lepszego wykorzystania mocy zamówionych oraz zmniejszenia kosztów energii;
- b) w przypadkach niemożności spełnienia wymagań zawartych w p. a) należy zwiększenie kosztu energii uwzględnić w opłacie taryfowej za przewóz, ponieważ wpłynie to na zmniejszenie rentowności wszystkich pozostałych przewozów (np. operator, który wprowadza do ruchu pociąg dominujący pod względem pobieranej mocy powinien ponosić udział w zwiększonych kosztach opłat za zwiększenie mocy zamawianej);
- c) największy wpływ na zużycie energii i mocy ma prędkość jazdy, dlatego też ze względu na rentowność w stawkach taryfowych dla pociągów szybkich powinny być uwzględnione większe koszty energii;
- d) należy dążyć do tworzenia rozkładów jazdy z minimalnym odstępem czasowym, uzasadnionym wielkością zamówionej mocy szczytowej, daje to maksymalne jej wykorzystanie i maksymalizację zdolności przewozowej;
- e) zalecane jest przenoszenie przewozów towarowych do stref czasowych o niższych stawkach taryfowych opłat za energię;
- f) eliminacja nieplanowych zatrzymań oraz opóźnień pociągów poprzez większe zdyscyplinowanie ruchu oraz poprawę niezawodności wszystkich elementów związanych z przewozami (zasilanie, droga kolejowa, sterowanie i zabezpieczanie ruchu kolejowego) tak, aby utrzymać zakładaną dla każdej linii płynność ruchu i rozkład jazdy;

g) opracowanie procedur rozładowywania spiętrzeń ruchowych przy zapewnieniu minimalizacji strat energii.

Droga kolejowa

Powodem zmian prędkości pociągu niemających uzasadnienia w racjonalnej realizacji przejazdu są ograniczenia prędkości na linii. Konieczność wprowadzenia ograniczeń prędkości wynika z konstrukcji drogi kolejowej (szczególnie ograniczeń na mostach), a także z braku środków i długoletnich zaniedbań w utrzymaniu nawierzchni. W wielu przypadkach koszty energii traconej na wyhamowanie pociągu i ponowne przyspieszenie do prędkości rozkładowej są pod względem wielkości większe od kosztów usunięcia przyczyną ograniczeń. Ponadto powiększający się poziom degradacji technicznej drogi jest przyczyną zakłóceń ruchowych (opóźnień), co dodatkowo wpływa na zwiększenie energochłonności i kosztów przewozów. Szczególnie duży wpływ na poziom zużycia energii wywierają ograniczenia prędkości na liniach o gęstym ruchu, a więc na liniach magistralnych, dla których w pierwszej kolejności należy podjąć działania zmierzające do zmniejszenia liczby ograniczeń prędkości. Podobnie nie jest uzasadnione dostosowanie odcinka trasy rzędu kilkunastu kilometrów do maksymalnych dla danej linii prędkości, jeśli przed i za odcinkiem występują jej znaczne ograniczenia. Wykorzystanie tak przygotowanej trasy będzie znikome, ze względu na możliwość trakcyjno-ruchowe osiągnięcia maksymalnej prędkości i czas jej utrzymywania. Zwiększa się także znacząco zużycie energii, a skrócenie czasu jazdy jest niezauważalne. Odrębnym zagadnieniem jest stopniowanie przyrostów prędkości maksymalnych na odcinkach linii i minimalna długość odcinków między ograniczeniami prędkości. Analizując te rozwiązania należy uwzględnić dynamikę jazdy oraz wydatek energii i korzyści czasowe wynikające z podnoszenia prędkości na bardzo krótkich (odpowiadających drodze rozruchu) odcinkach o zmiennej prędkości maksymalnej. Straty energii uwarunkowane ograniczeniem prędkości osiągają 10–15% zużywanej energii. Są to straty w dużej części wynikające nie z celowego wykonania drogi, a z braku środków na właściwe jej utrzymanie. Liczba nowych ograniczeń prędkości na PKP ma trend silnie rosnący.

Jako przykład nieefektywności zwiększania prędkości na krótkich fragmentach linii przedstawiono wyniki analiz dla odcinka długości 14,3 km i prędkości maksymalnej 160 km/h (oraz 150 i 140 km/h), przed i za którym występują znaczące ograniczenia prędkości (do 60 km/h). Przyjęto trzy typy pociągów: z lokomotywą EP09 o masach odpowiednio 400 i 700 t oraz pociąg zespolony o mocy 4 MW.

Wyniki (zużycie energii na odcinku i czasy przejazdu) zestawiono w tabelicy 1. Można zatem postawić pytanie, czy w rozpatrywanym przypadku uzasadnione jest podnoszenie prędkości na odcinku linii, gdy osiągnięcie tej prędkości jest możliwe tylko dla określonej kategorii pociągów, a efekty skrócenia czasu jazdy okupione są znacznym zwiększeniem zużycia energii (dla EP09 z pociągiem 400 t skrócenie czasu jazdy o 4%, przy $v_{\max} = 160$ km/h w stosunku do przypadku, gdy $v_{\max} = 140$ km/h, wymusza zwiększenie zużycia energii o 10%, zaś dla składu zespolonego 6-wagonowego skrócenie czasu jazdy o 5% powoduje zwiększenie zużycia energii o 14%). Pociąg z lokomotywą EP09 o masie 700 t nie jest w stanie przekroczyć na tak krótkim odcinku prędkości 140 km/h, stąd zwiększanie prędkości maksymalnej nie ma wpływu na czas przejazdu.

Tabela 1

Wyniki przejazdów odcinka różnymi pociągami

Typ pociągu	Ograniczenie prędkości	Zużycie energii na odcinku	Czas jazdy/% w stosunku do najdłuższego dla danego pociągu
	[km/h]	[%]	[s]/[%]
Lokomotywa EP09 400 t	160	100	600/96
	150	93	610/97,6
	140	90	625/100
Lok. EP-09 700 t	160	100	655/100
	150	100	655/100
	140	100	655/100
Pociąg zespolony 6-wag. 4 MW	160	100	575/95
	150	92	585/96,7
	140	86	605/100

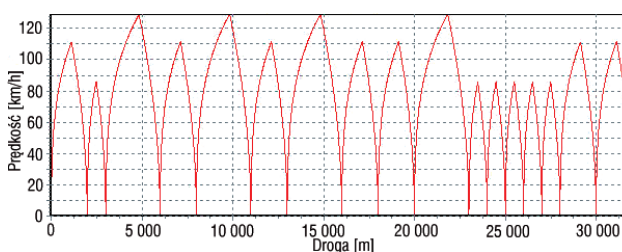
Wpływ taboru trakcyjnego na zużycie energii

1. Ruch pojazdu

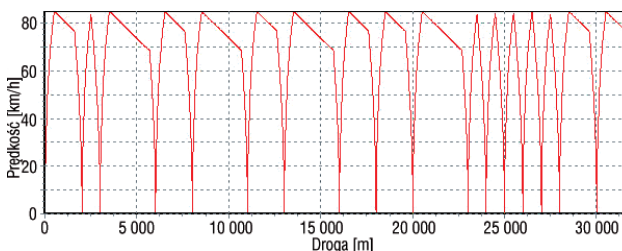
Zmniejszenie zużycia energii przez pojazdy trakcyjne może zostać uzyskane dzięki optymalizacji faz jazdy, korzystne jest tu:

- duże przyspieszenie rozruchowe (ale zwiększa to obciążenie układu zasilania!);
- jazda z prędkością ustaloną;
- wykorzystanie uzyskanej energii kinetycznej (eliminacja ograniczeń prędkości, jazda wybiegiem);
- wykorzystanie podhamowania i hamowania odzyskowego (niezbędny odpowiedni układ zasilania i inny odbiornik w strefie zasilania albo zasobnik lub falownik w podstacji);
- dopasowanie cyklu jazdy do zadanego rozkładu.

Przykład jazdy forsownej przedstawiony jest na rysunku 1, natomiast jazdy oszczędnej – na rysunku 2.



Rys. 1. Przykład jazdy forsownej



Rys. 2. Przykład jazdy energooszczędnej

Optymalizacja jazdy jest co prawda możliwa i przy eksploatacji klasycznego taboru, ale większe możliwości (automatyka sterowania i płynność jazdy) zapewnia tabor nowoczesny.

2. Konstrukcja taboru

Operatorzy na liniach kolejowych w Polsce ciągle jeszcze eksploatują tabor w większości przestarzały pod względem konstrukcyj-

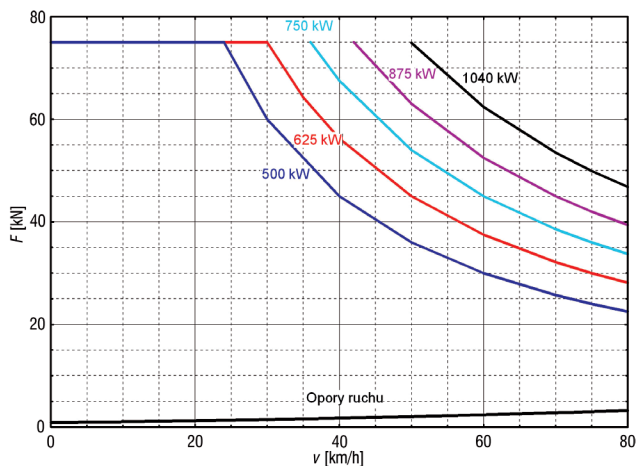
nym, charakteryzujący się tradycyjnymi rozwiązaniami technicznymi:

- silniki szeregowe prądu stałego,
- rozruch rezystorowy,
- regulacja prędkości przez przełączanie grup silników i rezystorowe bocznikowanie obwodów wzbudzenia,
- hamowanie mechaniczne,
- duża masa i opory ruchu.

Od kilku lat co prawda zwiększają się zamówienia na nowoczesny tabor lub poddaje się go modernizacji. Są to jednak nadal działania niewystarczające.

Ważnym czynnikiem, wpływającym na zużycie energii, jest odpowiedni dobór ciągnika do trasy i masy, w szczególności wymagania co do maksymalnych przyspieszeń rozruchowych. Determinuje to wymagania wobec charakterystyki trakcyjnej (duże siły rozruchowe i hamowania) oraz moce napędu. Uzyskiwanie dużych mocy i sił trakcyjnych przez pojazdy trakcyjne ograniczone jest często sprzecznymi wymaganiami. Z jednej strony masa taboru powinna być jak najmniejsza, to z kolei ogranicza możliwości uzyskiwania dużego momentu przez koła napędne. Prowadzić to może do konieczności wykonywania większej liczby osi jako napędnych (np. układ osi BoBo22BoBo z silnikami o mniejszej mocy, zamiast Bo2222Bo).

Przykład wpływu charakterystyki trakcyjnej na wymaganą moc układu napędowego do jednostki do ruchu aglomeracyjnego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność mocy napędu od wymaganej charakterystyki trakcyjnej jednostki trakcyjnej

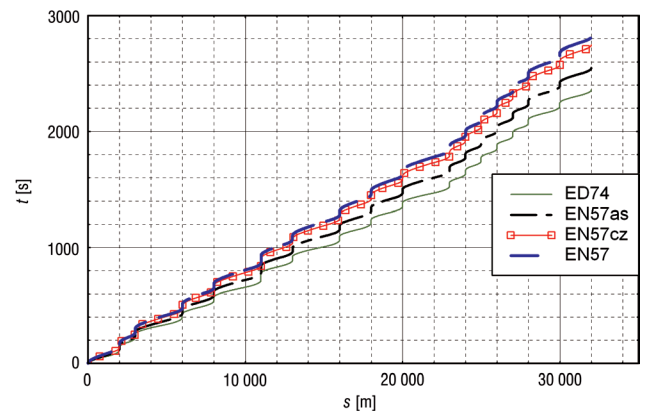
3. Porównanie zużycia energii przez tabor nowy i modernizowany

W ostatnim okresie pojawiło się kilka wersji zmodernizowanych zespołów serii EN57. Porównano wyniki symulacji ruchu na odcinku Warszawa – Otwock klasycznej jednostki EN57 z rozruchem rezystorowym z jej zmodernizowanymi wersjami z silnikami prądu stałego przy zastosowaniu rozruchu czoperowego (oznaczenie – EN57cz) oraz dla jednostki z silnikami asynchronicznymi (EN57as). Rozpatrzono także ruch jednostek ED74. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg czasu w funkcji drogi, a na rysunku 5 – prędkości w funkcji czasu dla wymienionych czterech jednostek przy symulacji jazdy forsownej.

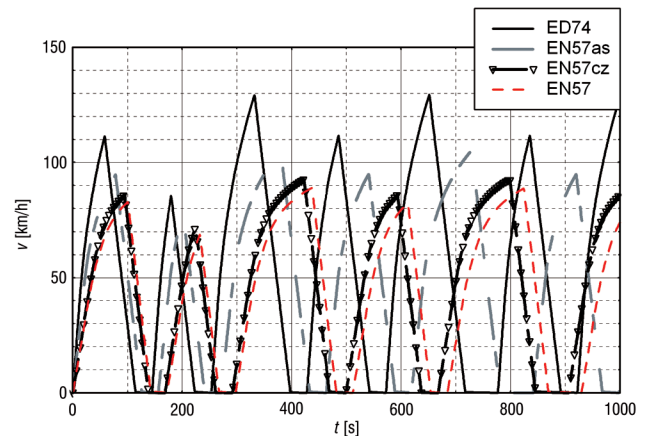
Wyniki symulacji (bez uwzględnienia hamowania odzyskowego) zużytej energii E , jednostkowego zużycia energii jze , czasu jazdy t i prędkości średniej v_{sr} dla jazdy forsownej zestawiono

w tabeli 2, zaś dla jazdy oszczędnej w tabeli 3. Porównując wyniki przejazdów można zauważyć znaczące różnice w zużyciu energii w zależności od sposobu jazdy (forsowny/oszczędny) oraz dla różnych typów jednostek. Szacunkowo, przyjmując przebieg każdej z jednostek na poziomie 150 000 km/rok oraz 0,25 zł/kWh, roczne oszczędności w opłacie za energię (bez uwzględnienia rekuperacji, a według [9] energia odzyskiwana w trakcie ruchu jednostek ED74 na trasie Warszawa – Łódź wyniosła średnio 15% energii pobranej) poszczególnych jednostek w stosunku do klasycznej jednostki EN57 wyniosą:

- EN57cz 36 tys. zł,
- EN57as 30 tys. zł,
- ED74 142 tys. zł.



Rys. 4. Odcinek Warszawa – Otwock – wykres $t = f(s)$ w zależności od typu pociągu



Rys. 5. Odcinek Warszawa – Otwock – wykres $v = f(t)$ dla różnych pociągów

Tabela 2

Wyniki przejazdu forsownego na odcinku Warszawa – Otwock

	E [kWh]	jze [Wh/btkm]	t [min]	v_{sr} [km/h]
ED74	522,0	95,0	39,4	48,7
EN57	378,0	66,7	47,0	40,8
EN57cz	387,7	68,4	45,8	41,9
EN57as	443,0	78,0	42,5	45,0

Tabela 3

Wyniki przejazdu oszczędniego na odcinku Warszawa – Otwock

	E [kWh]	jze [Wh/btkm]	t [min]	v_{sr} [km/h]
ED74	243,0	44,2	45,1	42,5
EN57	364,0	64,2	50,4	38,1
EN57cz	333,2	58,8	48,8	39,3
EN57as	337,6	59,5	45,2	42,5

Przy zakładanej eksploatacji taboru nowego na poziomie 30 lat, oszczędności dla jednej jednostki, w zależności od rozwiązania, mogą zatem sięgnąć powyżej 4 mln zł!

Wydaje się zatem celowe, aby przez zamawiającego wobec oferenta taboru było wymagane określenie – podczas procedury przetargowej zakupu nowego lub modernizacji taboru:

- sprawności przetwarzania energii w pojazdach oraz zużycia energii dla pojazdu (obliczenia dostarczane przez producenta) dla zadanych warunków ruchu zarówno bez uwzględnienia, jak i z uwzględnieniem rekuperacji (przy założeniu 100% wykorzystania hamowania odzyskowego); należy podkreślić, że wyposażenie pojazdów w możliwość rekuperacji, gdy na pojeździe lub w podstacji nie ma możliwości odbioru energii hamowania oznacza tylko, że istnieje potencjalna możliwość odzyskania energii hamowania, a rzeczywista efektywność odzysku zależy będzie od ruchu na odcinku i parametrów układu zasilania;
- systemu zarządzania (sterowania) zużyciem energii na potrzeby nietrakcyjne, mające coraz większy udział w globalnym poborze energii.

Zużycie energii przy zwiększeniu prędkości jazdy pociągów

Zwiększenie prędkości jazdy, ze względu na silną zależność oporów ruchu od kwadratu prędkości, oznacza, że wystąpi zwiększenie zużycia energii (w literaturze podawane jest, że zwiększenie prędkości od 280 km/h do 350 km/h powoduje zwiększenie zużycia energii o ok. 60%). Dlatego zaskakujące na pierwszy rzut oka mogą okazać się wyniki analiz podane w [15] dla linii kolejowych szybkich w Hiszpanii. Porównano zużycie energii przez pociąg o masie 300 t i mocy lokomotywy 5,6 MW, zasilanej z sieci 3 kV DC na odcinku 442 km (średnia prędkość 151 km/h) i szybki pociąg HST (masa 400 t) o mocy 8 MW (prędkość średnia 232 km/h), 3 postoje, dały na pierwszy rzut oka dość zaskakujące wyniki: pociąg lokomotywowożył 9,41 MWh ($jze = 70,96$ Wh/tkm), natomiast pociąg szybki – 7,93 MWh ($jze = 44,85$ Wh/tkm, o ok. 15% mniej energii pobranej z podstacji trakcyjnej).

Po głębszej analizie prezentowanych w [15] wyników okazało się, że:

- zużycie energii na pokonanie oporów od zestawów kołowych HST było o 160 kWh mniejsze, a na opory aerodynamiczne HST o 1638 kWh większe, mimo lepszego współczynnika kształtu (decydowała tu prędkość);
- straty energii na hamowanie mechaniczne HST było o 1929 kWh mniejsze;
- straty w układzie zasilania HST były o 1405 kWh mniejsze (sprawność globalna w systemie zasilania 25 kV 50 Hz – 87%) w porównaniu do pociągu lokomotywowego (sprawność globalna w systemie zasilania 3 kV DC – 74%);

- odzysk energii podczas hamowania obu pociągów był porównywalny, ale stanowił ok. 10% pobranej energii pociągu lokomotywowego i 12,6% – pociągu HST;
- zużycie energii HST na potrzeby nietrakcyjne było mniejsze o 348 kWh (decydował tu krótszy czas przejazdu).

W celach porównawczych przeprowadzono symulacje ruchu (bez zatrzymywania się) następujących pociągów na odcinku linii CMK (następstwa co 15 min):

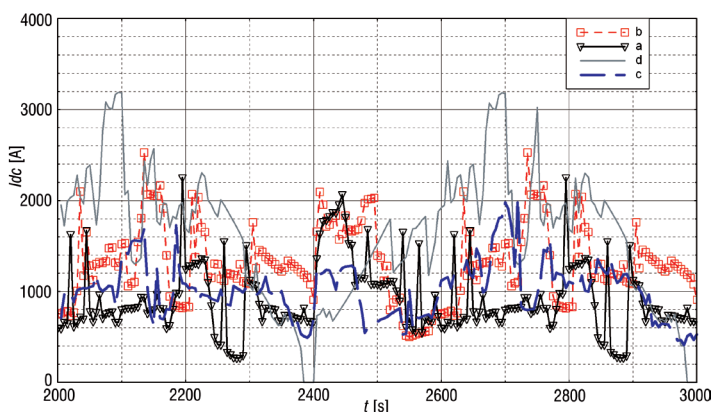
- a) pociąg z lokomotywą o mocy 6 MW, masa 350 t, prędkość maksymalna 160 km/h;
- b) pociąg z lokomotywą o mocy 6 MW, masa 350 t, prędkość maksymalna 200 km/h;
- c) pociąg zespolony o mocy 4 MW i masie 300 t, prędkość maksymalna 220 km/h;
- d) pociąg zespolony o mocy 6 MW i masie 475 t, prędkość maksymalna 250 km/h.

Uzyskane jednostkowe zużycie energii zestawiono w tabeli 4, a przykładowy przebieg prądu pobieranego z podstacji na rysunku 6. Jak można zauważyć, pociągi zespolone charakteryzują się, mimo większych prędkości, mniejszym jednostkowym zużyciem energii niż pociągi lokomotywowo!

Tabela 4

Wyniki symulacji ruchu na odcinku linii o prędkości do 250 km/h

Rodzaj	Parametry: moc; prędkość maksymalna; masa	Jednostkowe zużycie energii [Wh/btkm]
Pociąg z lokomotywą	6 MW; 160 km/h; 350 t	47,1
Pociąg z lokomotywą	6 MW; 200 km/h; 350 t	65,1
Pociąg zespolony	4 MW; 220 km/h; 300 t	54,5
Pociąg zespolony	6 MW; 250 km/h; 500 t	56,5



Rys. 6. Przebieg prądu obciążenia podstacji trakcyjnej 3 kV DC dla różnych typów pociągów (maksymalne prędkości od 160 do 250 km/h, opis tab. 4)

Należy także podkreślić, że w systemie 25 kV 50 Hz, ze względu na dłuższe odcinki zasilania przy tej samej gęstości ruchu, moc szczytowa podstacji będzie niższa niż suma mocy szczytowych podstacji w systemie 3 kV DC, co przy oddzielnym zamawianiu mocy dla podstacji prostownikowych generuje większe koszty oraz wymaga innego wymiarowania przeciążalności urządzeń. Przykładowe wyniki symulacji obciążeń podstacji trakcyjnych linii do 250 km/h dla dwóch wariantów zasilania: 3 kV DC i 25 kV 50 Hz zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5

Porównanie mocy grupy podstacji 3 kV DC i odpowiednio podstacji systemu 25 kV 50 Hz, zasilających (alternatywa) ten sam odcinek linii

Podstacje 3 kV DC	Moc maksymalna	Moc 15-min.	Moc szczytowa/moc 15-min.
1	10,0	1,03	9,70
2	9,8	1,22	8,00
3	5,6	2,74	2,10
4	6,6	1,43	4,60
5	5,3	1,57	3,40
6	10,3	1,75	5,90
7	5,0	1,62	3,09
Razem dla 3 kV DC	52,6	11,36	4,63
Podstacja 25 kV AC	30,0	9,56	3,14

Podsumowanie

Postęp technologiczny i zastosowanie nowych rozwiązań pozwala na wykorzystywanie energooszczędnych technologii, których wdrożenie jednak wymaga dużych nakładów i będzie na kolei wprowadzone stopniowo, przede wszystkim w nowym taborze, ale również przy modernizacji taboru czy linii. Efekty w postaci zmniejszenia zużycia energii będą obserwowalne w dłuższym okresie eksploatacji. Dlatego istotne jest, aby uwzględniać efekt oszczędności energii przy obliczaniu kosztów LCC taboru. Wymaga to jednak jednoznacznego sprecyzowania metodyki obliczeń (np. poprzez podanie wzorcowego cyklu ruchu pojazdu). Ponadto wydaje się za uzasadnione, aby wymagać od oferentów taboru podawania zużycia energii dla trasy, na której będzie wykonywał zadania przewozowe tak bez, jak i z uwzględnieniem możliwości wykorzystania hamowania odzyskowego. oszczędność energii. Bardzo istotne są także zagadnienia dotyczące zmniejszania zużycia energii przez dotychczas eksploatowany, zwykle bardzo energochłonny tabor tak, aby w trakcie modernizacji wprowadzić działania orientowane na oszczędność energii. Okazuje się bowiem, że działania organizacyjne czy modernizacyjne przynoszące niezbyt wysokie oszczędności jednostkowe, ale niewymagające dużych nakładów, lecz zastosowane w dużej skali (np. szkolenia maszynistów, likwidacja ograniczeń prędkości, organizacja ruchu, zmiany w układzie zasilania by lepiej wykorzystać odzysk energii) mogą dać globalnie istotne doraźne oszczędności i obniżyć koszty. Ponadto wprowadzanie nowych technologii i konstrukcji, jakie wymusza zwiększanie prędkości jazdy, przede wszystkim superszybkich pociągów, nie musi oznaczać tak dużego zwiększenia zużycia energii, jak to było prognozowane w latach wcześniejszych.



Literatura

- [1] Ahrens J.: *EVENT and EVENTComTool – Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Railways – results and perspectives*. 2nd UIC Railway Energy Efficiency Conference (UIC-REEC) – Paris, 4–5 February 2004.

- [2] *Analiza zużycia i opracowanie algorytmu rozdziału energii elektrycznej trakcyjnej na poszczególnych odbiorców*. Praca ZTE IME PW dla Dyrekcji Elektroenergetyki Kolejowej PKP, Warszawa 2000–2001.
- [3] Coquery G., Parent P., Jeunesse A., Chabas J.: *Electrical energy saving for urban and suburban railway transport systems*. Analysis and means for an improved energy management. UIC-REEC – Paris, 4–5 February 2004.
- [4] *Energy efficiency strategies for rolling stock and train operation*. UIC Report.
- [5] Fayet P., Clere G., Auriol P.: *Sensitivity studies and energy calculation on railway networks*. MET 2007.
- [6] Halder M.: *Harmonisation of test cycles for energy consumption of rolling stock*. Feasibility study. DB, Railway Environmental Center, 2004.
- [7] Krocak M.: *Symulacja komputerowa zelektryfikowanej linii kolejowej o złożonej strukturze zasilania*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, 2008.
- [8] Laurencin Ch., Le Moal E., Henry P.: *Energy consumption and energy efficiency of SNCF state-of-the-art electric motive power units*. UIC-REEC – Paris, 4–5 February 2004.
- [9] Lipiński L., Miszewski M.: *Zużycie energii trakcyjnej przez pojazdy trakcyjne produkowane przez PESA S.A.* Rekuperacja 2009, Konferencja zorganizowana przez IPS „Tabor” i PP.
- [10] Mayer M., Mentz S., Keller T.: *Specification and verification of energy efficient rolling stock*. UIC-REEC – Paris, 4–5 February 2004.
- [11] Meerman E.: *Increased recuperation efficiency above the substation's no-load voltage in a 1500V DC catenary system*. UIC-REEC – Paris, 4–5 February 2004.
- [12] Mierzejewski L., A. Szela A.: *Racjonalizacja zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym – aktualne trendy*. Semtrak '2004.
- [13] Mierzejewski L., Szela A.: *Aktualne trendy w zakresie oszczędności zużycia energii elektrycznej w transporcie kolejowym*. Technika Transportu Szynowego 7/2004.
- [14] *Racjonalizacja zużycia energii w transporcie kolejowym*. Projekt zamawiany KBN PBZ 28-07.1996–1998. Wykonawcy: Zakład Trakcji Elektrycznej IME PW, CNTK, Kolprojekt.
- [15] *RENFE. High Speed Trans and Energy Efficiency*. (prezentacja), 2007.
- [16] Szela A.: *Efektywność energetyczna transportu szynowego*. SEM-TRAK '2008.
- [17] *UIC 330 leaflet. Railway specific environmental performance indicators*. 2008.
- [18] Szela A.: *Zwiększanie efektywności energetycznej transportu szynowego*. Technika Transportu Szynowego 12/2008.
- [19] Szela A.: *Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji*. OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.

Autor

dr hab. inż. Adam Szela, prof. PW
 Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych
 e-mail: adam.szela@ee.pw.edu.pl