

Aleksander Jakubowski, Leszek Jarzębowicz, Krzysztof Karwowski, Andrzej Wilk

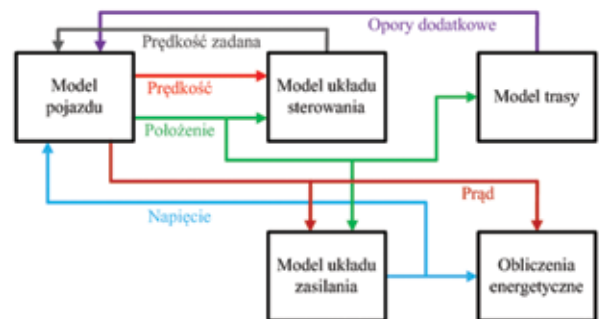
Efektywność energetyczna pojazdu szynowego w różnych warunkach obciążenia

W artykule zaprezentowano wyniki analizy dotyczącej wpływu obciążenia na efektywność energetyczną miejskiego pojazdu szynowego. Obciążenie zależy od liczby pasażerów i od profilu prędkości – wyższa masa, prędkość i przyspieszenie wymagają większej siły pociągowej, a w konsekwencji wzrostu momentu obrotowego na wale silnika. Ponieważ liczba pasażerów zależy od pory dnia, a prędkość zależy od sytuacji online, uwzględniono odpowiednie warunki. Obliczenie biegu pojazdu przeprowadzono za pomocą modelu wbudowanego w Matlab/Simulink. Aby zbadać sprawność napędu, obliczono mapę wydajności silnika i straty falownika trakcyjnego jako współczynnik zmiennej sprawności. Obliczenia przeprowadzono dla różnych profili prędkości i warunków obciążenia, dostarczając informacji o zużyciu energii. Przedstawione wyniki i wnioski są podstawą do dalszych badań.

Słowa kluczowe: efektywność energetyczna, pojazd szynowy.

Zelektryfikowany transport szynowy, w dobie rosnącego zapotrzebowania na przewóz osób i towarów, cieszy się dużą popularnością. Od roku 2015 obserwuje się stały wzrost liczby przewożonych pasażerów oraz ładunku, przy czym przewiduje się, że do roku 2030 praca przewozowa w Polsce może wzrosnąć nawet o 40% w stosunku do stanu obecnego [6, 14]. Silna pozycja kolei na rynku transportowym wynika zarówno ze stosunkowo niskich kosztów w przeliczeniu na tonę ładunku lub pasażera, jak i wysokiej wydajności energetycznej. Wzrastające ceny energii oraz świadomość ekologiczna społeczeństwa skłaniają do poszukiwania rozwiązań prowadzących do oszczędności w tym zakresie.

Wysoka sprawność napędów elektrycznych, będąca jedną z podstaw efektywności energetycznej pojazdów szynowych, jest często utożsamiana z wartościami katalogowymi sprawności poszczególnych podzespołów wynoszącymi obecnie co najmniej 90% [1, 2, 13]. Należy jednak zauważyć, że są one określone dla stanu ustalonego w punkcie pracy znamionowej, czyli wartościach momentu obciążenia oraz prędkości kątowej, przy których osiągnięta jest katalogowa moc napędu. Napędy zainstalowane w pojazdach trakcyjnych pracują przy zmieniającej się w szerokim zakresie prędkości; rozruch i hamowanie odbywają się cyklicznie, a obciążenie momentem zależy zarówno od liczby przewożonych pasażerów (masy ładunku), jak i oporów ruchu wynikających z profilu trasy oraz prędkości przejazdu [3, 4, 7, 8, 10, 15, 17]. Silnik niedociążony będzie charakteryzował się niską sprawnością, ponieważ przy niewielkiej wytwarzanej mocy mechanicznej moc pochłaniana na straty będzie stanowiła istotną część całej mocy dostarczanej maszynie [2, 18]. Podczas analizy efektywności energetycznej elektrycznego pojazdu trakcyjnego nasuwa się więc pytanie, jak zmieniające się warunki pracy, profil prędkości oraz liczba pasażerów, będzie wpływać na zapotrzebowanie pojazdu na energię. Interesujące wydaje się też zagadnienie zmieniającej się sprawności napędu w warunkach zmiennego obciążenia i jej związku z energochłonnością.



Rys. 1. Schemat blokowy transportowego modelu symulacyjnego

Modelowanie systemu transportowego

Obliczenia efektywności energetycznej pojazdu wykonano w oparciu o model symulacyjny zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink. Opracowany program charakteryzuje się budową modułową – poszczególne elementy systemu transportowego pogrupowano w obiektach typu subsystem, co pozwala na swobodną konfigurację jego budowy oraz analizę różnych zagadnień ruchowych. Uproszczony schemat blokowy modelu pokazano na rys. 1.

Trzon programu stanowi model pojazdu trakcyjnego. Odpowiada on za obliczenia wszystkich zmiennych związanych z pociągiem, zarówno wielkości mechanicznych, jak i elektrycznych. Punktem wyjścia dla obliczeń trakcyjnych jest wartość siły pociągowej, jaką może przy danej prędkości wytworzyć napęd pojazdu, dana charakterystyką trakcyjną. Analizowany jest elektryczny zespół trakcyjny (ezt) wyposażony w napęd z silnikami indukcyjnymi zasilanymi przekształtnikowo, które pozwalają na wytwarzanie siły pociągowej o dowolnej (płynnie zmieniającej się) wartości niewykraczającej ponad charakterystykę trakcyjną [1, 11, 16, 18]. Wartość siły pociągowej obliczana jest przez proporcjonalno-całkujący regulator prędkości. Wielkości takie jak prąd, moc oraz energia elektryczna są obliczane na podstawie aktualnych wartości siły pociągowej oraz prędkości, jak również napięcia w sieci trakcyjnej, z uwzględnieniem zmiennej sprawności przemiany energii. Wartość napięcia na odbieraku pojazdu jest obliczana przez model układu zasilania.

Zadawanie prędkości odbywa się poprzez algorytm sterowania, który śledzi położenie pojazdu na trasie, porównując je z informacjami na temat ograniczenia prędkości oraz położenia stacji. Droga hamowania do stacji jest obliczana na bieżąco i porównywana z dystansem do punktu zatrzymania. Hamowanie realizowane jest poprzez zadawanie krzywej prędkości, co pozwala na uzyskanie różnych wartości opóźnienia. Możliwe jest również definiowanie czasu postoju na kolejnych stacjach.

Modelowanie strat w układzie napędowym pojazdu

Obliczenia przeprowadzono dla elektrycznego zespołu trakcyjnego o układzie osi Bo'2'2'2'Bo i mocy 2 MW. Jest to konstrukcja typowa dla pojazdów obsługujących linie szybkich kolei miejskich, np. Stadler Flirt, Alstom Coradia, Newag Impuls [6, 16]. Dane pojazdu przyjęte na potrzeby obliczeń pokazano w tab. 1.

Tab. 1. Parametry analizowanego pojazdu

Parametr	Wartość
Moc pojazdu (na kołach) [kW]	2 000
Przyspieszenie rozruchu (do 40 km/h) [m/s ²]	1,0
Masa pojazdu (służbowa/maksymalna) [Mg]	150/170
Liczba miejsc [-]	400
Moc potrzeb własnych [kW]	50
Liczba silników/przekształtników trakcyjnych [-]	4/2

Napęd pociągu stanowią 4 silniki indukcyjne o mocy 500 kW każdy, zasilane parami za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych wykonanych w technologii IGBT. Opracowano mapę sprawności silnika indukcyjnego stanowiącego źródło napędu omawianego pojazdu, obrazującą wartość tego współczynnika dla poszczególnych punktów pracy (rys. 2).

Wartości sprawności silnika wyznaczono na drodze serii symulacji układu napędowego [2, 5, 8, 13] dla poszczególnych prędkości kątowych oraz momentów obciążenia. Mapę zaimplementowano w głównym modelu jako trójwymiarową tablicę typu lookup table.

Najwyższe wartości współczynnika sprawności są osiągnięte w przedziale prędkości 110–220 rad/s oraz momentu 1 200–2 750 Nm, czyli wtedy, gdy silnik jest obciążony co najmniej 50% momentu znamionowego przy prędkościach kątowych wynoszących pomiędzy 60% a 120% wartości bazowej, co odpowiada prędkości liniowej pojazdu w granicach 30–60 km/h. Przy bardzo niskich prędkościach oraz obciążeniach sprawność spada poniżej 40%.

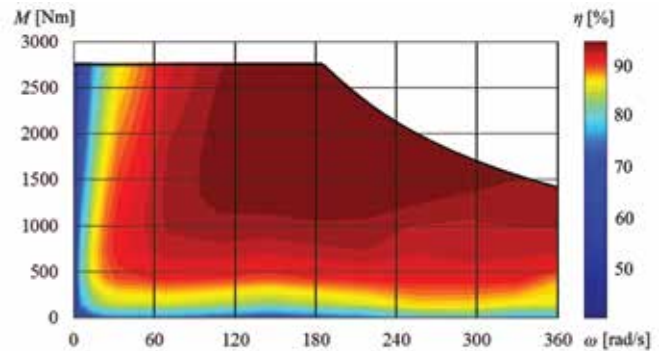
Dodatkowo model pojazdu uwzględnia zmienną sprawność przekształtnika trakcyjnego. Opracowano moduł obliczający straty mocy w łącznikach energoelektronicznych uwzględniający zarówno straty komutacyjne, jak i straty przewodzenia. Łączniki półprzewodnikowe stosowane w trakcji elektrycznej charakteryzują się spadkami napięć w stanie przewodzenia wahającymi się od 1,5 V do 3 V [1, 11], co przy prądach rzędu setek amperów przekłada się na istotną moc strat.

Przyjęte założenia do obliczeń przejazdu teoretycznego

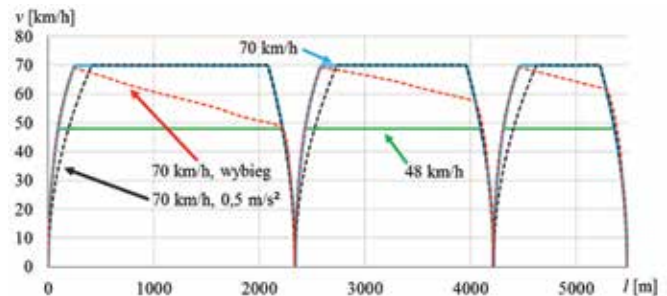
Analizę wykonano dla fragmentu linii kolejowej nr 250, pomiędzy stacjami Gdynia Orłowo oraz Sopot Wyścigi (dystans ok. 5,9 km), z postojami na stacjach Sopot Kamienny Potok oraz Sopot (w kierunku Gdańska). Według rozkładu jazdy Szybkiej Kolei Miejskiej w Trójmieście odcinek ten pokonywany jest w czasie 480 s [21]. Przyjęto więc, że wszystkie symulowane przejazdy muszą zmieścić się w tym przedziale czasowym. Dla uzyskania jednakowego łącznego czasu przejazdu dla różnych profili prędkości, dostosowano czas postoju na stacjach [3, 4, 15, 17]. Dzięki temu wyeliminowano również wpływ potrzeb nietrakcyjnych, charakteryzujących się stałą mocą, na bilans energii. Przyjęto rzeczywisty profil trasy, uwzględniający pochylenie wzdłużne oraz promienie łuków. Analizowany odcinek charakteryzuje się względnie płaskim profilem, różnica wysokości pomiędzy stacją początkową i końcową wynosi 5 m, przy czym nachylenie nie przekracza 2‰. Promienie zakrętów są stosunkowo łagodne – wszystkie mieszczą się powyżej 500 m.

Zdefiniowano kilka profili prędkości (rys. 3), zakładając przy tym pełne obciążenie pojazdu (400 pasażerów, 170 t) oraz pojazd próżny (150 t). Wykonano obliczenia dla prędkości maksymalnych 70 km/h oraz 48 km/h (tylko próżny). Dodatkowo przeprowadzono również symulację przy przyspieszeniu rozruchu obniżonym do 0,5 m/s².

Ponieważ analizie podlega wpływ obciążenia napędu na efektywność energetyczną pojazdu, wykonano obliczenia z punktu widze-



Rys. 2. Mapa sprawności silnika trakcyjnego o mocy 500 kW (sprawność katalogowa 94%)



Rys. 3. Analizowane profile prędkości

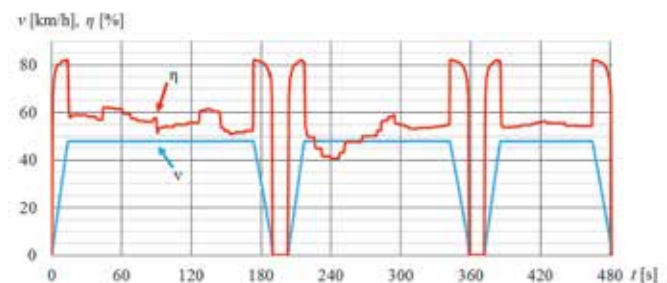
nia pojedynczego pociągu. Założono przy tym, że zwracana do sieci trakcyjnej energia jest w całości konsumowana przez inne odbiory. Jest to prawdopodobne ze względu na duże natężenie ruchu oraz regularny takt kursowania pociągów szybkiej kolei miejskiej [6, 21].

Symulacja przejazdu pociągu

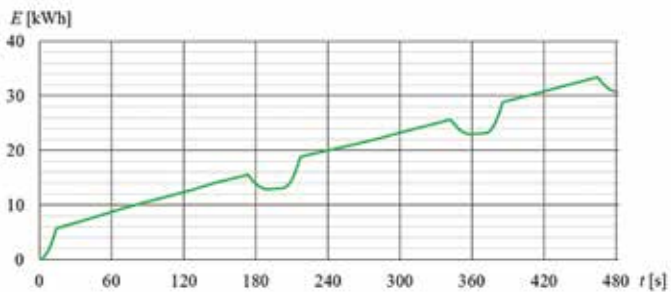
Przejazd pojazdu nieobciążonego

Prezentowane na rys. 4 i 5 wyniki symulacji dotyczą przypadku, gdy pojazd jest nieobciążony – przejazd odbywa się z prędkością maksymalną 48 km/h (minimalna stała prędkość pozwalająca na dotrzymanie rozkładu jazdy), masa pociągu jest równa jego masie służbowej. Przebiegi prędkości oraz sprawności napędu zaprezentowano na rys. 4. Zauważa się, że podczas jazdy ze stałą prędkością sprawność napędu trakcyjnego jest bardzo niska, zwykle poniżej 60%. Dzieje się tak, ponieważ napęd pracuje wówczas jedynie równoważąc opory ruchu, które przy małej liczbie pasażerów oraz niskiej prędkości są niewielkie [2].

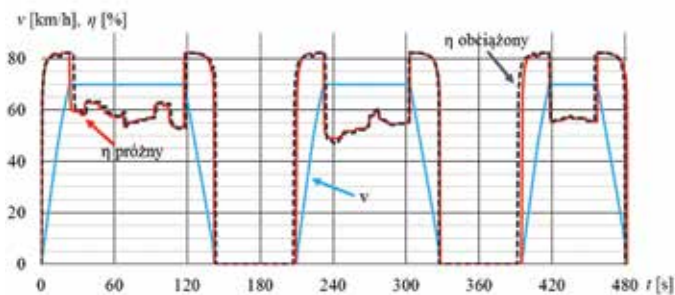
Przebieg energii (rys. 5) pokazuje, że większość energii zużywana jest podczas jazdy ze stałą prędkością, kiedy współczynnik sprawności napędu jest najniższy. Stwierdza się więc, że przy niskim obciążeniu pojazdu jazda ze stałą prędkością jest nieuzasadniona,



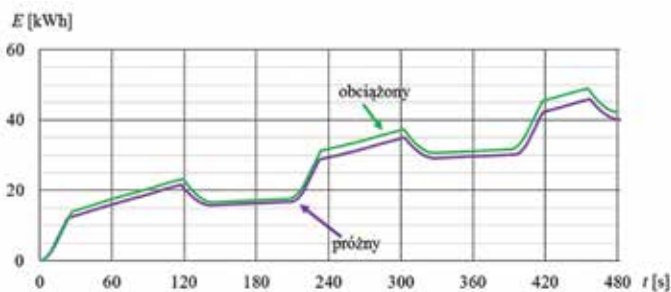
Rys. 4. Przebiegi prędkości i sprawności – pojazd próżny, prędkość maksymalna 48 km/h, przyspieszenie rozruchu 1 m/s²



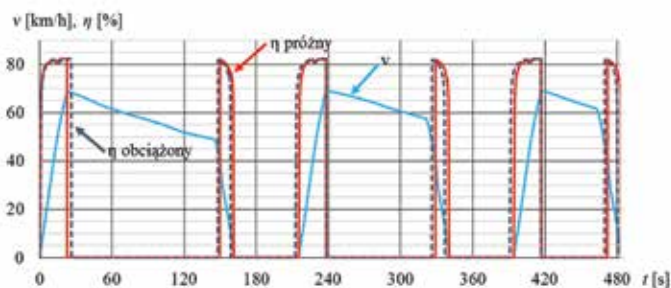
Rys. 5. Przebieg energii – pojazd próżny, prędkość maksymalna 48 km/h, przyspieszenie rozruchu 1 m/s²



Rys. 6. Przebiegi prędkości oraz sprawności pojazdu – pojazd próżny oraz w pełni obciążony, prędkość maksymalna 70 km/h, przyspieszenie rozruchu 1 m/s²



Rys. 7. Przebiegi energii – pojazd próżny oraz w pełni obciążony, prędkość maksymalna 72 km/h, przyspieszenie rozruchu 1 m/s²



Rys. 8. Przebiegi prędkości oraz sprawności pojazdu – pojazd próżny oraz w pełni obciążony, prędkość maksymalna 72 km/h, przyspieszenie rozruchu 1 m/s², jazda z wybiegiem

ponieważ prowadzi do wzrostu strat [3, 17]. Jedyne podczas rozruchu napęd uzyskuje nominalną sprawność (jest wówczas w pełni obciążony, wytwarzając siłę nadającą przyspieszenie).

Przejazd pojazdu dla różnych obciążeń

Kolejnym przypadkiem, jaki rozważono, było porównanie efektywności energetycznej pojazdu przy trapezoidalnym profilu prędkości

o wartości maksymalnej 70 km/h, przy pełnym obciążeniu pojazdu pasażerami oraz przy pojeździe próżnym. Porównano przebiegi sprawności (rys. 6) oraz energii (rys. 7).

Zauważa się minimalnie wyższe wartości współczynnika sprawności podczas przejazdu pojazdu w pełni obciążonego. Napęd jest wówczas lepiej dociążony, jednak podczas jazdy ze stałą prędkością sprawność pojazdu jest bardzo niska i oscyluje wokół 60% – wciąż jednak jest to wynik lepszy niż przy przejeździe z prędkością 48 km/h. Różnica w zapotrzebowaniu na energię także jest niewielka, na poziomie 2 kWh. Na tej podstawie można stwierdzić, że liczba przewożonych pasażerów jest mniej znaczącym z czynników determinujących energochłonność pojazdu. Porównując końcowe wartości energii z rys. 5 oraz rys. 7, dostrzega się większy wpływ profilu prędkości na energochłonność.

Rozważono więc sytuację, w której profil prędkości pozbawiony będzie fazy ruchu z prędkością ustaloną, dla którego sprawność napędu jest najniższa. W ten sposób napęd będzie pracował w stanie pełnego obciążenia momentem (podczas przyspieszania oraz hamowania). Przebiegi prędkości oraz sprawności napędu dla tego przypadku pokazano na rys. 8.

Współczynniki sprawności podczas rozruchu i hamowania dla obu przypadków obciążenia są zbliżone i utrzymują się na poziomie 80%. Zauważa się, że napęd pojazdu przewożącego pełną liczbę pasażerów musi pracować nieco dłużej, by osiągnąć zadaną prędkość. Ponad dwukrotnie, do 4,5 kWh, wzrosła różnica w bilansie energii (rys. 9) – pojazd próżny zużywa mniej energii, aby się rozpędzić, ale ze względu na krótką fazę hamowania odzysk energii hamowania jest porównywalny do pojazdu obciążonego (w przeciwieństwie do poprzedniego przypadku, gdzie efektywność hamowania odzyskowego pojazdu obciążonego była zauważalnie lepsza). W trakcie jazdy wybiegiem część energii kinetycznej jest tracona na pokonanie oporów ruchu, przez co podczas hamowania odzysk energii jest mniejszy. Mimo tego maksymalizacja fazy wybiegu prowadzi do oszczędności energii oraz zapewnia, że napęd nie będzie pracował w obszarze niskiej sprawności przez dłuższy czas.

Ograniczenie dynamiki rozruchu pojazdu

Wielu przewoźników kolejowych wciąż eksploatuje w dużej liczbie tabor starszej generacji, charakteryzujący się gorszymi parametrami ruchowymi w porównaniu z nowoczesnymi pojazdami [10, 18]. W związku z koniecznością opracowania uniwersalnego rozkładu jazdy czas przejazdu pomiędzy stacjami jest dostosowany do możliwości starszych pojazdów. Z tego powodu można spotkać się z sytuacją, gdzie nowoczesny pociąg nie będzie korzystał z maksymalnej siły pociągowej podczas rozruchu. Zasadnym jest więc zweryfikowanie, jaki wpływ na energochłonność będzie miało ograniczenie dynamiki rozruchu (rys. 10). Wykonano porównanie przy przyspieszeniu katalogowym (1 m/s²) oraz ograniczonym (0,5 m/s²).

Przebiegi sprawności (rys. 11) pokazują, że pojazd poruszający się z pełnym przyspieszeniem (1 m/s²) krócej znajduje się w obszarze niskiej sprawności wynikającej z małej prędkości; z drugiej strony dłużej porusza się ze stałą prędkością, gdzie sprawność napędu jest niska z powodu niewielkiego obciążenia. Pomimo że ograniczenie dynamiki zmniejsza obciążenie momentem o połowę, to faza przyspieszenia, gdy sprawność przekracza 80%, trwa dłużej.

Chociaż ograniczenie przyspieszenia rozruchu o połowę wydłuża czas pracy w obszarze wysokiej sprawności napędu, należy pamiętać, że pojazd potrzebuje więcej czasu na pokonanie odległości pomiędzy stacjami. Wszelkie oszczędności energii podczas rozruchu będą więc równoważone przez pobór energii w czasie jazdy (rys. 12).

Tab. 2. Wyniki obliczeń symulacyjnych

Prędkość [km/h]	48			70		
Warunki obciążenia	CL	CL	CO	WL	WO	CLa
E_{Σ} [kWh]	30,77	40,11	42,27	36,37	40,92	40,31
E_{pobrana} [kWh]	39,55	58,85	63,59	41,90	46,87	59,05
E_{oddana} [kWh]	-8,78	-18,74	-21,32	-5,53	-5,95	-18,73
I_{av} [A]	158,30	251,00	271,10	223,60	240,30	226,80
Energochłonność [Wh/paskm]	14,04	18,30	19,28	16,59	18,66	18,39

C – stała prędkość, W – wybieg, L – pojazd próżny, O – obciążony, a – przysp. 0,5 m/s²

Ostatecznie pojazd o ograniczonej dynamice rozruchu wykazał zapotrzebowanie na energię minimalnie większe (o 0,2 kWh) od pociągu korzystającego z pełnej dynamiki napędu. Należy jednak pamiętać, że wynik ten jest efektem przyjętych na potrzeby analizy założeń – gdyby czas postoju na stacjach był jednakowy, pociąg o ograniczonym przyspieszeniu opóźniałby się względem nieograniczonego, okupując to większym zużyciem energii (jest to widoczne na odcinku pomiędzy pierwszą i drugą stacją, na rys. 12). Również profil trasy mógłby znacząco wpłynąć na wyniki, szczególnie na trasach charakteryzujących się stromymi podjazdami lub łukami o niewielkim promieniu.

Zestawienie wyników

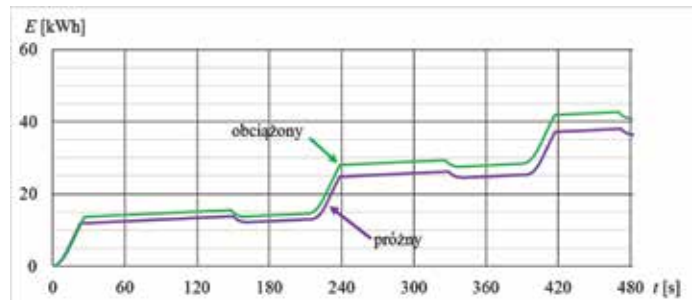
Przeprowadzone symulacje pozwoliły na ocenę efektywności energetycznej zespołu trakcyjnego przy różnych obciążeniach, zależnych od liczby pasażerów oraz profilu prędkości. Oprócz obliczeń dynamiki ruchu pojazdu oraz bilansu energii obliczono również energochłonność w przeliczeniu na liczbę miejsc w pociągu oraz średnią wartość prądu pobieranego przez pociąg z sieci trakcyjnej. Zestawienie wyników przedstawiono w tab. 2.

Jazda z wybiegiem w analizowanym przypadku powoduje zmniejszenie efektywności hamowania odzyskowego, ponieważ hamowanie odbywa się z mniejszej prędkości. W praktyce na dłuższych odcinkach byłyby wskazane ponowne rozpędzenie pojazdu, gdy prędkość obniży się o np. 10 km/h względem ograniczenia. Bilans energii wykazuje w tym względzie niewielką różnicę pomiędzy profilem prędkości z wybiegiem oraz ze stałą prędkością – ponieważ hamowanie z 70 km/h pozwala na odzyskanie większej ilości energii [9, 19].

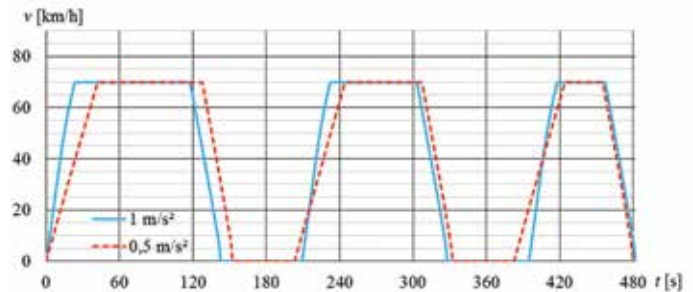
Ilość energii pobranej na jazdę ze stałą prędkością jest znaczna, przy czym należy pamiętać, że istotny jej procent jest zużywany na straty, gdyż niedociążony napęd charakteryzuje się niską sprawnością. Interesujący jest również fakt, że przejazd przy ograniczonej dynamice rozruchu, pomimo porównywalnego zapotrzebowania na energię do przejazdu z pełnym wykorzystaniem parametrów napędu, charakteryzuje się niższym średnim prądem pobieranym z sieci. Dzieje się tak, gdyż mniejsza siła pociągowa implikuje mniejsze zapotrzebowanie na moc, a co za tym idzie niższą wartość pobieranego prądu. Należy również zwrócić uwagę na rolę układu zasilania w zagadnieniu efektywności energetycznej pojazdów – poprawa jego wydajności pozwala na szersze możliwości optymalizacji profilu prędkości oraz rozkładu jazdy (mniej energii hamowania odzyskowego rozpraszanej w sieci trakcyjnej, możliwość pobierania lub zwracania prądu o wyższej wartości, możliwość zwrotu energii do systemu elektroenergetycznego) [6, 20].

Podsumowanie

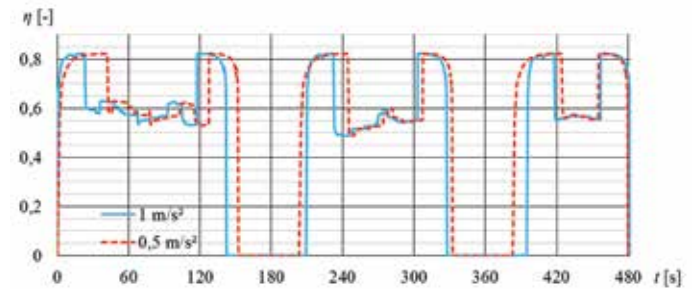
Przeprowadzona analiza wykazała, że największy wpływ na zużycie energii przez pojazd szybkiej kolei miejskiej ma profil prędko-



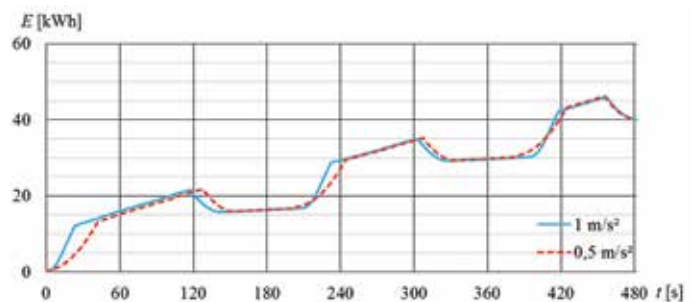
Rys. 9. Przebiegi energii dla pojazdu – pojazd próżny oraz w pełni obciążony, prędkość maksymalna 72 km/h, przyspieszenie rozruchu 1 m/s², jazda z wybiegiem



Rys. 10. Przebiegi prędkości – pojazd próżny, prędkość maksymalna 70 km/h, przyspieszenie rozruchu 1 m/s² lub 0,5 m/s²



Rys. 11. Przebiegi sprawności – pojazd próżny, prędkość maksymalna 70 km/h, przyspieszenie rozruchu 1 m/s² lub 0,5 m/s²



Rys. 12. Przebiegi energii – pojazd próżny, prędkość maksymalna 70 km/h, przyspieszenie rozruchu 1 m/s² lub 0,5 m/s²

ści, czyli technika jazdy. W przypadku przewozów pasażerskich różnica w masie pojazdu próżnego oraz w pełni obciążonego jest rzędu 15%, co nie wpływa w znaczący sposób na zapotrzebowanie na energię. Najbardziej znaczącym czynnikiem w kwestii obciążenia napędu jest więc dynamika jazdy; moc silników ma znaczenie w kwestii nadawania pojazdowi odpowiedniego przyspieszenia.

Napęd trakcyjny charakteryzuje się najgorszą efektywnością, gdy jest niedociążony. Sytuacja ta ma miejsce przede wszystkim podczas jazdy ze stałą prędkością, gdy siła pociągowa ma prze-

ciwdziałać jedynie oporom ruchu, które na odcinku o niewielkim nachyleniu podłużnym, pokonywanym ze stosunkowo niską prędkością, nie stawiają przed napędem poważniejszych wymagań. Odpowiednie obciążenie napędu można uzyskać, wykonując rozruch oraz hamowanie przy pełnej dostępnej sile pociągowej; pozostałe odcinki należy pokonywać wybiegiem. Powolna jazda ze stałą prędkością jest skrajnie nieefektywna, zatem powinno się jej unikać w ruchu liniowym. Ograniczenie dynamiki rozruchu pozwala na dłuższą pracę przy wysokim współczynniku sprawności, jednak konsekwencją jest dłuższy czas przejazdu – straty przeważają więc nad zyskami.

Zastosowanie napędu o niższej mocy pozwoliłoby na nieznaczoną poprawę współczynnika sprawności podczas jazdy z prędkością ustaloną, jednakże niesłoby to za sobą pogorszenie dynamiki ruchu pociągu, co w przypadku szybkiej kolei miejskiej jest niepożądane. Dodatkowo dłuższy czas przejazdu mógłby wpłynąć na zwiększenie zużycia energii (podobnie jak w analizowanym przypadku ograniczenia dynamiki rozruchu) – oszczędność energii ze względu na lepszą sprawność napędu byłaby liczona w ułamkach kilowatogodzin, natomiast wydłużenie czasu jazdy spowodowałoby pobranie energii około kilku kilowatogodzin więcej.

Zwraca się uwagę na złożoność zagadnienia efektywności energetycznej zelektryfikowanego transportu szynowego. Znalezienie rozwiązania optymalnego musi uwzględnić nie tylko czynniki czysto energetyczne, ale również rozkład jazdy, komfort pasażerów oraz sytuację ruchową na trasie. Nie można pominąć przy tym zagadnienia sprawności napędu – na tej podstawie możliwa jest ocena, jaka część pobieranej energii jest tracona. Dodatkowo przyjmowanie stałego współczynnika sprawności (jak zwykle się to czyni w obliczeniach trakcyjnych) będzie prowadziło do zaniżenia zużycia energii przez pojazd, szczególnie gdy istotna część trasy pokonywana jest ze stałą prędkością. Niniejsza analiza stanowi punkt wyjścia do dalszych prac dotyczących efektywności energetycznej zelektryfikowanego transportu szynowego, zmierzających do opracowania algorytmu optymalizacji energetycznej.

Bibliografia:

1. Abad G., *Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications*, Wiley, Chichester 2017.
2. Bartomiejczyk M., Mirchevski S., Jarzębowski L., Karwowski K., *How to choose drive's rated power in electrified urban transport?*, EPE'17 ECCE Europe, Warszawa 2017.
3. Douglas H., Roberts C., Hillmansen S., Schmid F., *An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks*, „Energy Conversion and Management” 2015, nr 106, s. 1149–1165.
4. Durzyński Z., *Podstawy metody wyznaczania parametrów energooszczędnej jazdy pojazdów trakcyjnych na obszarach aglomeracyjnych*, „Pojazdy Szynowe” 2011, nr 3.
5. Jarzębowski L., Judek S., Karwowski K., Lipiński L., Miszewski M., *Kompleksowa analiza symulacyjna układu napędowego zespołu trakcyjnego*, „Czasopismo Techniczne” 2011, Vol. R. 108., nr 13.
6. Karwowski K. (red.), *Energetyka transportu zelektryfikowanego. Poradnik inżyniera*, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018.
7. Kozierkiewicz M., *Wpływ rodzaju układu napędowego na zużycie energii lokomotywy uniwersalnej zasilanej z systemu 3 kV prądu stałego*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2004.
8. Lipiński L., *Praktyczne metody regulacji trakcyjnych silników indukcyjnych optymalne pod względem energetycznym*, Zeszyty Problemowe – „Maszyny Elektryczne” 2007, nr 78.
9. Lu S., Weston P., Hillmansen S., Gooi H. B., Roberts C., *Increasing the Regenerative Braking Energy for Railway Vehicles*, „IEEE Transactions on intelligent transportation systems” 2014, vol. 15, No. 6.
10. Łukaszewicz P., Andersson E., *Green Train energy consumption*, Gröna Tåget research and development program, publication 0901, KTH Railway Group, Stockholm 2009.
11. Matsuoka K., Kondo M., *Energy Saving Technologies for Railway Traction Motors*, „IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering” 2010, nr 5, s. 278–284.
12. Nomura K., Miyatake M., *Scheduling Method for Minimum Energy Consumption Considering Constraints of Time Intervals between Local and Express Trains.*, IEEE 2016.
13. Pellegrino G., Armando E., Mahmoudi A., Soong W. L., *Efficiency Maps of Electrical Machines*, „IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)”, Montreal 2015.
14. *Poprawa efektywności energetycznej transportu w Polsce – analiza dostępnych środków i propozycje działań* (pr. zb.), Ekspertyza na zlecenie Ministerstwa Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, ECORYS, Warszawa 2012.
15. Rawicki S., *Energooszczędne przejazdy tramwajów ze sterowanymi wektorowo silnikami indukcyjnymi w dynamicznym ruchu miejskim*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
16. Ronanki D., Singh S. A., Williamson S. S., *Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems*, „IEEE Transactions on transportation Electrification”, Vol. 3, No. 3, September 2017.
17. Scheepmaker G. M., Goverde R. M. P., Kroon L. G., *Review of energy-efficient train control and timetabling*, „European Journal of Operational Research” 2017, nr 257, s. 355–376.
18. Steimel A., *Electric Traction – Motive Power and Energy Supply*, Oldenbourg Industrieverlag, München 2008.
19. Su-Gil L. and others, *A study of regenerative braking energy on electric multiple unit train*. 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Jeju 2013.
20. Szelaż A., Maciołek T., *Rozwiązania techniczne w układach zasilania poprawiające efektywność energetyczną transportu szynowego*, „Pojazdy Szynowe” 2015, nr 3, Warszawa.
21. *Rozkład jazdy PKP SKM Trójmiasto*: <https://www.skm.pkp.pl/> (dostęp 05.07.2018 r.).

Autorzy:

mgr inż. **Aleksander Jakubowski** – Politechnika Gdańska
dr inż. **Leszek Jarzębowski** – Politechnika Gdańska
dr hab. inż. **Krzysztof Karwowski** – Politechnika Gdańska
dr hab. inż. **Andrzej Wilk** – Politechnika Gdańska

Energy efficiency of rail vehicle under different load conditions

This paper analyses how different traction drive load influences energy efficiency of urban rail vehicle. Load depends on the number of passengers and on the speed profile – heavier mass, higher speed and acceleration demand higher tractive effort, which means higher torque on motor shaft. Since number of passengers depends on time of the day, and velocity is influenced by situation on line, adequate conditions were taken into account. Calculation of train run was done using model built in Matlab/Simulink. To provide look into drive efficiency, motor efficiency map and traction inverter losses were calculated and implemented as variable efficiency factor. Calculations were carried out for different speed profiles and load conditions, providing information about energy consumption. Presented results and conclusions are basis for further research.

Keywords: energy efficiency, rail vehicle.