XXVIII Seminarium

ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICE 2018

Oddział Gdański PTETiS

doi: 10.32016/1.60.06

ANALIZA ENERGOCHŁONNOŚCI POJAZDU SZYBKIEJ KOLEI MIEJSKIEJ Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIENNEJ SPRAWNOŚCI NAPĘDU TRAKCYJNEGO

Aleksander JAKUBOWSKI[1], Leszek JARZĘBOWICZ[2], Krzysztof KARWOWSKI[3], Andrzej WILK[4]

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, tel.: 58 3472149, e-mail: aleksander.jakubowski@pg.edu.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, tel.: 58 3472149, e-mail: leszek.jarzebowicz@pg.edu.pl
3. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, tel.: 58 3471158, e-mail: krzysztof.karwowski@pg.edu.pl
4. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, tel.: 58 3471087, e-mail: andrzej.wilk@pg.edu.pl

Streszczenie: Wzrost popularności miejskiego szynowego transportu zelektryfikowanego skłania do poszukiwania możliwości zwiększenia jego efektywności energetycznej. W pracy przedstawiono wyniki symulacji jazdy pociągu szybkiej kolei miejskiej (SKM) przy różnych profilach prędkości oraz obciążeniu, dla zmiennej oraz stałej sprawności energetycznej napędu pojazdu. Zmienną sprawność napędu pojazdu uwzględniono na podstawie m.in. sporządzonej mapy sprawności silnika w zależności od jego prędkości kątowej i momentu obciążenia. Mapę zaimplementowano w modelu pojazdu zrealizowanym w środowisku Matlab/Simulink, pozwalającym na wykonanie przejazdu teoretycznego dla różnych strategii prowadzenia pociągu. Zaprezentowano przebiegi zużycia energii zespołu trakcyjnego na przykładowym odcinku linii SKM w Trójmieście. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszych badań efektywności energetycznej pojazdów SKM.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, przejazd teoretyczny, efektywność energetyczna, szybka kolej miejska, silnik indukcyjny.

1. WSTĘP

Analizując efektywność energetyczną pojazdu szynowego należy zwrócić uwagę na warunki pracy jego napędu. W przeciwieństwie do typowych maszyn elektrycznych zainstalowanych w napędach przemysłowych, silniki trakcyjne pracują w warunkach zmieniającej się w szerokim zakresie prędkości kątowej oraz momentu obciążenia. Dodatkowo, ruch kolejowy charakteryzuje się cyklicznością rozruchu oraz hamowania, wynikającą m.in. z postojów na stacjach. Zapotrzebowanie pojazdu na energię zależy od czynników takich jak: profil prędkości, profil trasy, konstrukcja napędu czy technika prowadzenia pojazdu [1–4]. Nie można również pominąć wpływu układu zasilania (w szczególności wartości napięcia na odbieraku) na parametry pracy napędu trakcyjnego [5, 6]. Zwraca się przy tym uwagę, że katalogowe wartości współczynników sprawności są określone w stanie pracy ustalonej, dla silnika obciążonego momentem znamionowym. Istotnym staje się więc pytanie, w jaki sposób będzie zmieniać się sprawność napędu pojazdu w różnych warunkach ruchowych i jaki będzie tego wpływ na zużycie energii.

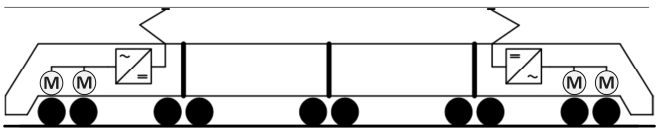
Szczególnym przypadkiem kolejowego systemu transportowego jest szybka kolej miejska – linie obsługiwane są w regularnych odstępach czasowych, przez jednakowe pojazdy (zwykle elektryczne zespoły trakcyjne – ezt). Prędkości nie przekraczają 100 km/h, a odległości pomiędzy stacjami są niewielkie (rzędu 1500 m). Na tej podstawie można przyjąć, że typ napędu trakcyjnego, profil prędkości oraz obciążenie napędu (opory ruchu, masa przewożonych pasażerów) będą mieć kluczowy wpływ na energochłonność pojazdu.

Dostępne obecnie komercyjne uniwersalne programy do obliczeń przejazdów teoretycznych (np. Dynamis, TOM) charakteryzują się standardowymi możliwościami symulacji przejazdów [7, 8]. Ze względu na brak możliwości dokładniejszego modelowania układu napędowego, a zwłaszcza jego sprawności energetycznej, nie są one w rozpatrywanym przypadku wykorzystywane.

2. NAPĘD TRAKCYJNY I JEGO SPRAWNOŚĆ

2.1. Układ napędowy elektrycznego zespołu trakcyjnego

Analizowanym pojazdem jest czteroczłonowy elektryczny zespół trakcyjny o mocy 2 MW. Napęd stanowią cztery silniki indukcyjne o mocy znamionowej 500 kW każdy, zasilane parami z przekształtników tranzystorowych. Poglądowy schemat blokowy układu napędowego przedstawiono na rysunku 1. Pojazd pozwala na przewiezienie do 400 pasażerów, zapewniając adekwatne przyspieszenie rozruchu na poziomie 1 m/s^2 do prędkości 40 km/h. Są to parametry typowe dla pojazdów eksploatowanych w Polsce np. Newag Impuls, Pesa Elf, Stadler Flirt.



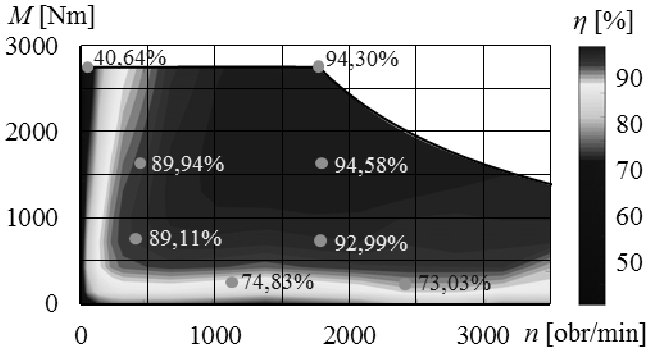
Rys. 1. Schemat blokowy układu napędowego ezt

Katalogowe wartości sprawności indukcyjnych silników trakcyjnych zawierają się zwykle pomiędzy 88% a 95% – w zależności od mocy oraz konstrukcji maszyny. Wyższą sprawnością charakteryzują się nowoczesne silniki synchroniczne z wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi, jednak ze względu na wysoki koszt takiej maszyny oraz konieczność przewymiarowania przekształtnika są one stosowane w ograniczonym zakresie. Wysoką sprawność (rzędu 95%) posiadają również silniki prądu stałego, jednak nie są one stosowane w nowych pojazdach ze względu na koszty obsługi oraz wysoką masę w stosunku do mocy.

Sprawność układu napędowego pojazdu trakcyjnego zależy również od przekształtnika energoelektronicznego. Obecnie stosuje się urządzenia wykorzystujące tranzystory IGBT lub MOSFET, których współczynniki sprawności wynoszą powyżej 98%. Jeszcze wyższe sprawności uzyskuje się dla tranzystorów i diod SiC, których już obecne parametry pozwalają na zastosowanie w napędach trakcyjnych. Podczas pracy przekształtnika energia jest tracona nie tylko w związku z komutacją łączników półprzewodnikowych, ale również podczas przewodzenia, gdyż spadki napięcia na tranzystorach wysokonapięciowych wynoszą od 1,5 V do 3,5 V przy prądach rzędu setek amperów.

2.2. Mapa sprawności silnika trakcyjnego

Celem określenia sposobu, w jaki zmienia się sprawność silnika indukcyjnego zależnie od momentu obciążenia oraz prędkości kątowej, konieczne było sporządzenie mapy sprawności analizowanej maszyny [9, 10]. Podstawę obliczeń stanowił model obwodowy silnika, gdzie wartości poszczególnych elementów wyznaczono na podstawie dokumentacji producenta [2, 11, 12]. Współczynniki sprawności w poszczególnych punktach pracy uzyskano na drodze serii symulacji, poprzez zadawanie określonych momentów obciążenia przy ustalonych prędkościach kątowych maszyny. Wizualizację mapy sprawności, w analizowanym zakresie prędkości oraz momentu obrotowego, zaprezentowano na rysunku 2.

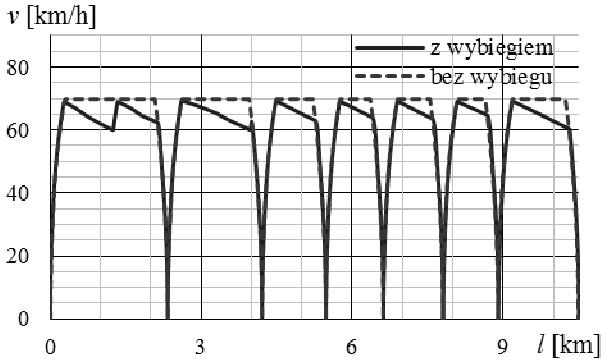


Rys. 2. a sprawności silnika indukcyjnego o mocy 500 kW (sprawność katalogowa 94%)

Najwyższą sprawność silnika odnotowano przy momencie obciążenia wynoszącym 2200 Nm i prędkości około 1400 obr/min – sięgnęła ona wówczas 94,9%. Z rys. 2 wynika, że analizowana maszyna indukcyjna charakteryzuje się najlepszą sprawnością, gdy jest obciążona momentem nie mniejszym niż 50% wartości katalogowej, przy prędkościach kątowych w zakresie 60 – 180% prędkości bazowej. Przy niskich prędkościach kątowych (odpowiadających prędkości liniowej pojazdu ok. 5 km/h) oraz małych obciążeniach sprawność spada do poziomu 40% i mniej – zatem większość pobieranej energii jest tracona. Przy wyższych prędkościach sprawność spada ze względu na rosnący udział strat o charakterze mechanicznym.

3. PRZEJAZD TEORETYCZNY

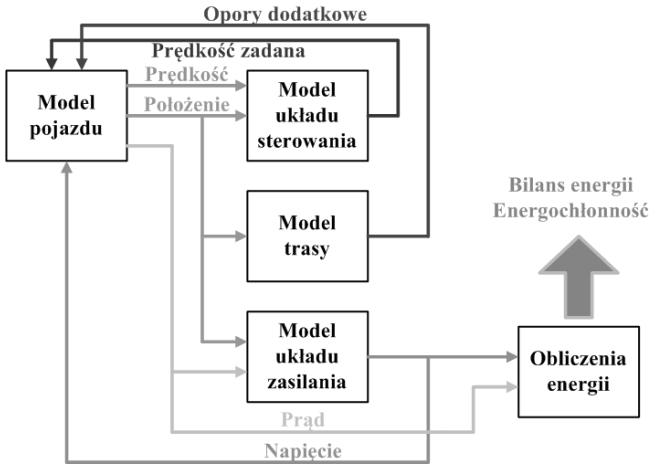
Analizę przeprowadzono dla pociągu Szybkiej Kolei Miejskiej w Trójmieście, na wybranym odcinku linii kolejowej nr 250 pomiędzy stacjami Gdynia Orłowo oraz Gdańsk Zaspa. Ponieważ celem badań było określenie, w jaki sposób zmienny współczynnik sprawności będzie wpływać na zużycie energii przez pojazd, analizie podlegał tylko jeden zespół trakcyjny. Jednocześnie założono, że całość energii hamowania odzyskowego jest zużywana przez inne odbiory. Dopuszczalną prędkość określono na poziomie 70 km/h, przy czym zdefiniowano dwa profile prędkości – bez wybiegu (po rozpędzeniu pociąg porusza się z prędkością ustaloną) oraz z wybiegiem (po rozpędzeniu pociąg porusza się wybiegiem; jeżeli w tym czasie prędkość spadnie do 60 km/h następuje ponowne rozpędzanie). Przyjęte profile prędkości ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Założone profile prędkości pociągu na linii SKM

Obliczenia przejazdu teoretycznego wykonano w oparciu o program zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink. Uproszczony schemat zależności pomiędzy modułami modeli programu przedstawiono na rysunku 4.

Zadawanie profilu prędkości odbywa się za pomocą modelu układu sterowania, obliczającego wartość prędkości zadanej dla regulatora układu napędowego. Tutaj również definiuje się żądaną dynamikę rozruchu/hamowania oraz czas postoju na stacjach. Wartość napięcia na odbieraku pojazdu jest obliczana w oparciu o model układu zasilania, na podstawie wartości pobieranego prądu przez pociąg oraz jego położeniu. Ostatecznie, obliczany jest bilans energii i energochłonność pojazdu, czyli jednostkowe zużycie energii.



Rys. 4. Struktura programu do analizy energochłonności pojazdu

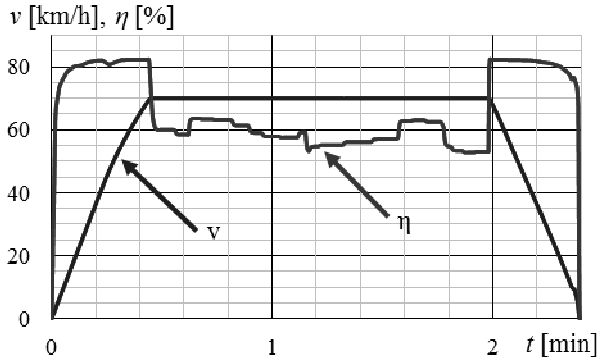
Kluczowym elementem programu jest model pojazdu, gdzie obliczane są wszystkie parametry ruchowe oraz elektryczne pociągu. Za regulację prędkości odpowiedzialne są dwa regulatory typu PI – osobny dla napędu oraz hamulców pneumatycznych; ograniczenie wartości

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

wyjściowych regulatora zaprogramowano posługując się charakterystyką trakcyjną napędu. Następnie obliczany jest prąd pojazdu, zależny od mocy mechanicznej, sprawności (przekładni mechanicznych, silników oraz przekształtników energoelektronicznych), mocy potrzeb nietrakcyjnych oraz napięcia w sieci trakcyjnej. Mapę sprawności maszyny zaimplementowano w postaci trójwymiarowej tablicy interpolacyjnej, gdzie wartości wyjściowe określane są na podstawie wytwarzanego przez silnik momentu oraz prędkości kątowej (przeliczonych z siły pociągowej i prędkości liniowej pojazdu). Uwzględniono również straty energii w przekształtniku trakcyjnym (komutacyjne oraz przewodzenia, z uwzględnieniem architektury układu napędowego). Dla porównania, istnieje możliwość wykonania symulacji także przy stałych współczynnikach sprawności układu napędowego pojazdu.

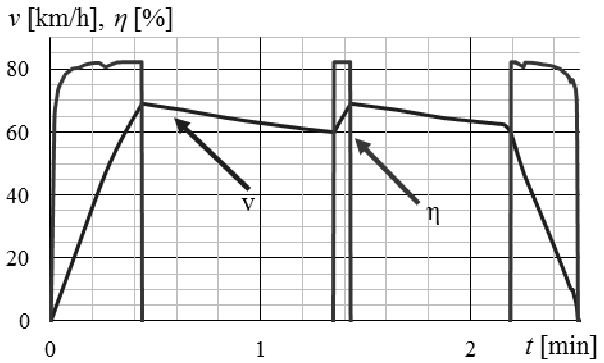
3. WYNIKI SYMULACJI PRZEJAZDU POCIĄGU NA LINII SKM

Badania symulacyjne wykazały duży wpływ techniki jazdy na sprawność energetyczną pojazdu. Podczas jazdy bez wybiegu, ze stałą prędkością o wartości 70 km/h, współczynnik sprawności napędu η pojazdu osiąga wartości rzędu 50 – 80%. Profil prędkości oraz przebieg sprawności przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Przebiegi prędkości oraz sprawności pojazdu na odcinku Gdynia Orłowo – Sopot Kamienny Potok (po rozruchu jazda ze stałą prędkością)

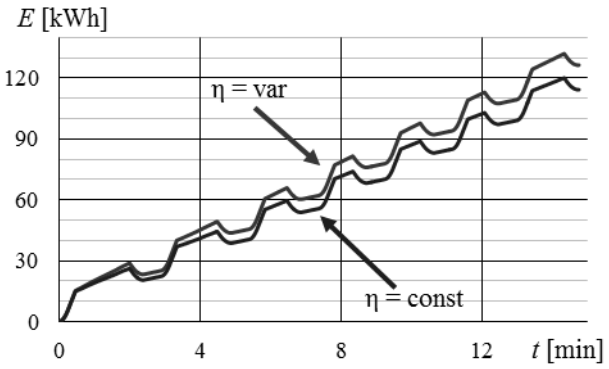
Alternatywny profil prędkości (zakładający jazdę z wybiegiem) pozwala na utrzymanie sprawności na znacznie wyższym poziomie, około 80%, co pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Przebiegi prędkości oraz sprawności pojazdu na odcinku Gdynia Orłowo – Sopot Kamienny Potok (po rozruchu jazda wybiegiem)

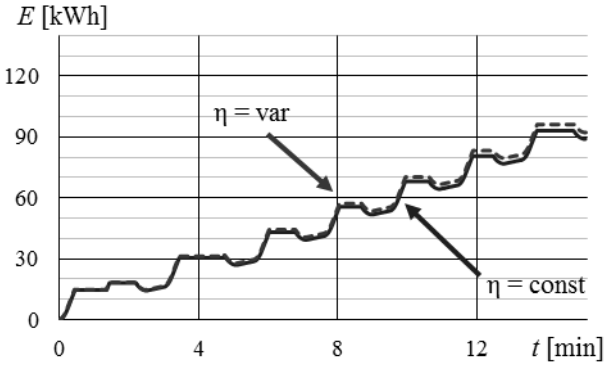
Różnica wynika z faktu, że podczas rozruchu silniki pojazdu są w pełni obciążone momentem – napęd musi wygenerować niezrównoważoną siłę pociągową, by nadać pociągowi przyspieszenie. Podczas jazdy ze stałą prędkością napęd pracuje jedynie na zrównoważenie oporów ruchu, których wartość jest w tym przypadku dość niska (kilka procent maksymalnego momentu silników), pojazd jest więc niedociążony. Zastosowanie pojazdu o mniejszej mocy mogłoby nieznacznie poprawić sprawność przy jeździe ze stałą prędkością, jednak miałoby negatywny wpływ na przyspieszenie pociągu, co w przypadku szybkiej kolei miejskiej ma kluczowe znaczenie [2].

Osiągane niskie wartości współczynnika sprawności (dwukrotnie mniejsze od katalogowych) prowadzi do zwiększonego zużycia energii na cele trakcyjne. Przeprowadzono więc porównawcze symulacje przy stałych oraz zmiennych współczynnikach sprawności. Przebiegi energii pobranej/oddanej do sieci trakcyjnej przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Przebiegi energii pobieranej/oddawanej przez pojazd na odcinku Gdynia Orłowo – Gdańsk Zaspa (po rozruchu jazda ze stałą prędkością)

Zaobserwowano wyraźną różnicę w bilansie energetycznym, wynoszącą 12,2 kWh. Podczas jazdy ze stałą prędkością następuje nieefektywna przemiana energii elektrycznej w mechaniczną – co wyraża stosunkowo mała wartość zmiennego współczynnika sprawności. Mniejszą różnicą charakteryzuje się drugi przypadek, w którym uwzględnia się jazdę z wybiegiem – przebiegi energii przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Przebiegi energii pobieranej/oddawanej przez pojazd na odcinku Gdynia Orłowo – Gdańsk Zaspa (po rozruchu jazda wybiegiem)

Rozbieżności są mniejsze, niż przy jeździe ze stałą prędkością, ponieważ teraz napęd nie pracował w stanie

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

niedociążenia. Różnica w bilansie energii wynika z niskiej sprawności napędu przy małych prędkościach – do 30 km/h. Przyspieszanie oraz hamowanie również odbywa się w sposób mniej efektywny, niż zakłada stały współczynnik. Zestawienie wszystkich wyników przedstawiono w tabeli 1.

Tablica 1. Zestawienie zużycia energii ezt

Wartość	Bez wybiegu		Z wybiegiem	
	$\eta=const$	$\eta=var$	$\eta=const$	$\eta=var$
Zużyta energia $E_{\sum}$ [kWh]	114,3	126,5	89,03	92,21
Energochłonność [Wh/paskm]	24,96	27,61	19,44	20,13

4. PODSUMOWANIE

Przy badaniu energochłonności nowoczesnego taboru, należy uwzględnić fakt zmieniającej się – w zależności od obciążenia i parametrów ruchowych pojazdu – sprawności napędu trakcyjnego. Wyniki przeprowadzonych analiz dowodzą, że zastosowanie stałych współczynników sprawności w obliczeniach efektywności energetycznej pojazdu powoduje zaniżenie bilansu energii nawet do 10%. Największe różnice obserwuje się kiedy napęd pojazdu jest niedociążony, np. jazda z prędkością ustaloną na torze poziomym. Stwierdza się, że w przypadku szybkiej kolei miejskiej jest pożądane odpowiednie profilowanie prędkości tak, aby uzyskać większą efektywność energetyczną przejazdów ezt. Technika jazdy dążąca do maksymalizacji jazdy wybiegiem niesie ze sobą zmniejszenie zużycia energii ponieważ napęd pracuje w obszarze wysokiej sprawności.

Ze względu na możliwość osiągnięcia przez nowoczesne napędy dowolnego punktu pracy w obszarze ograniczonym charakterystyką trakcyjną, koniecznym jest uwzględnienie zmieniającej się sprawności – szczególnie silnika trakcyjnego (przy niskich wartościach prędkości kątowej i/lub momentu obciążenia, wartość sprawności jest znacznie niższa od katalogowej). Stałe współczynniki sprawności można uznać za wystarczające do uśrednionej analizy energochłonności.

Dalsze analizy, zmierzające do optymalizacji energetycznej systemu transportowego szybkiej kolei miejskiej będą więc zawierać mapy sprawności dla silników trakcyjnych. Zwraca się również uwagę na możliwość optymalizacji techniki prowadzenia pociągu pod kątem ograniczenia strat energii w napędzie.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Karwowski K. (red.), Energetyka transportu zelektryfikowanego. Poradnik inżyniera. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018.
2. Bartłomiejczyk M., Mirchevski S., Jarzębowicz L., Karwowski K., How to choose drive's rated power in electrified urban transport? EPE'17 ECCE Europe, Warszawa 2017.
3. Rawicki S., Energooszczędne przejazdy tramwajów ze sterowanymi wektorowo silnikami indukcyjnymi w dynamicznym ruchu miejskim. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013. ISBN 978-83-7775-267-8
4. Durzyński Z., Podstawy metody wyznaczania parametrów energooszczędnej jazdy pojazdów trakcyjnych na obszarach aglomeracyjnych, Pojazdy Szynowe, rok 2011, nr 3, str. 1 – 5.
5. Rojek A., Zasilanie trakcji elektrycznej w systemie prądu stałego 3 kV. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2012.
6. Szeląg A., Wpływ napięcia w sieci trakcyjnej 3 kV DC na parametry energetyczno-trakcyjne zasilanych pojazdów. Instytut Naukowo-Wydawniczy „SPATIUM", Radom 2013. ISBN 978-83-62805-01-3.
7. Dynamis® - Driving Dynamic Calculations of any Train Configuration. IVE - Consulting Company for Traffic and Railway Engineering Ltd. (data dostępu 9.07.2018 r.) http://www.ivembh.de
8. The Train Operations Model (data dostępu 9.07.2018 r.) http://www.railsystemscenter.com/tom.htm
9. Abad G., Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications. Wiley, Chichester 2017.
10. Pellegrino G., Armando E., Mahmoudi A., Soong W. L., Efficiency Maps of Electrical Machines. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal 2015.
11. Jarzębowicz L., Judek S., Karwowski K., Lipiński L., Miszewski M., Kompleksowa analiza symulacyjna układu napędowego zespołu trakcyjnego. Czasopismo Techniczne Vol. R. 108., nr z.13 (2011).
12. Lipiński L., Praktyczne metody regulacji trakcyjnych silników indukcyjnych optymalne pod względem energetycznym. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 78/2007.

ANALYSIS OF URBAN RAIL VEHICLE ENERGY CONSUMPTION WITH VARIABLE EFFICIENCY FACTOR

Increasing popularity of urban rail transport motivates research for its energy efficiency improvements. This paper discusses how variable efficiency factor influences train energy consumption in traction calculations, focusing on urban rail transport. To approximate motor efficiency, which depends on angular velocity and load torque, the efficiency map was created and implemented in rail vehicle model. Model was developed in Matlab/Simulink. Through simulations, energy consumption of the train running on a part of SKM Trójmiasto line was calculated for different velocity profiles, and for constant and variable drive efficiency factor. Presented results are used as a basis for further research.

Keywords: electric traction, train run calculation, energy efficiency, urban rail transport, induction motor.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl