

Mateusz Litwin
Amanda Kołodyńska
Politechnika Lubelska

SYMULACJA KOMPUTEROWA JAKO NARZĘDZIE OKREŚLANIA ZUŻYCIA ENERGII PRZEZ POJAZDY Z NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM

COMPUTER SIMULATION AS AN INSTRUMENT FOR DETERMINING THE ENERGY CONSUMPTION OF VEHICLES WITH ELECTRIC DRIVE

Abstract: The paper presents the results of measurements and simulation research of a city bus with electric drive. Elaborated model of electric drive uses a submodel of vehicle kinematics, which allows to reproduce the actual conditions of its performance. Computer model help to determine the power consumption of the bus early at the stage of design, thus enabling better fit of the chemical battery and also avoiding oversizing of which. Analysis of the simulation results contributes to decreasing the cost of the bus without compromising on its functionality.

Keywords – PMSM motor, simulation, power consumption, electric bus

Słowa kluczowe – silnik PMSM, symulacja, zużycie energii, autobus elektryczny

1. Wstęp

Przewiduje się, że transport drogowy samochodowo – autobusowy wzrośnie do 2020 roku w stosunku do roku 1990 o 85%. Rozwój motoryzacji stanowi jedną z ważniejszych przyczyn wzrostu konsumpcji energii pochodzącej z ropy naftowej. W związku z tym, wraz ze wzrostem zużycia energii, znaczenia nabiera problem ochrony środowiska [10,11]. Na koncerty samochodowe coraz częściej nakłada się restrykcyjne normy emisji spalin, szczególnie w ostatnich miesiącach w związku z nasileniem się zjawiska smogu. Aby sprostać tym wymaganiom producenci rozszerzają ofertę tzw. "bez-emisyjnych" pojazdów: hybrydowych i elektrycznych [6].

Pojazdy elektryczne są coraz częściej stosowane w komunikacji miejskiej. Rozwój komunikacji miejskiej jest szczególnie ważny ze względu na coraz większe obciążenie centrów miast przez pojazdy samochodowe w szczególności spalinowe [7]. Rozwój elektrycznego transportu miejskiego pozwala na łatwy i szybki dojazd pomiędzy różnymi punktami w mieście co skutkuje, większą liczbą osób, które wybiorą taki środek transportu. Dodatkową zaletą tych pojazdów jest ich cicha praca. W pojazdach tego typu najdroższym z urządzeń jest akumulator litowo-jonowy. Ograniczenie jego pojemności pozwala na znaczne zmniejszenie kosztów zakupu całego autobusu. Jednocześnie nie jest możliwe zbyt

duże zmniejszenie jego pojemności, gdyż skutkowałoby to ograniczeniem zasięgu. Odpowiedni dobór pojemności baterii w tym wypadku jest konieczny, z uwzględnieniem warunków wykorzystania autobusu.

2. Metodologia doboru baterii

Dobór baterii przeprowadza się najczęściej na podstawie tylko kilku parametrów eksploatacyjnych: zasięgu i średniego zużycia energii takich pojazdów, które przyjmuje się na poziomie 1,2-1,5 kWh/km [9]. Przyjęcie takiego założenia upraszczającego często jest przyczyną przewymiarowania baterii. Lepszym rozwiązaniem jest wprowadzenie do diagnostyki zapotrzebowania pojazdu na energię symulacji komputerowej. Pozwala to na precyzyjny dobór odpowiedniej pojemności baterii.

Kolejnym argumentem przemawiającym za stosowaniem prowadzenia testów symulacyjnych jest możliwość wyeliminowania konieczności posiadania toru testowego, który jest wymagany podczas prac badawczych dla ustalenia wpływu ruchu drogowego na zużycie energii zmagazynowanej w baterii pojazdu.

W ostatnim czasie nastąpił rozwój metod symulacyjnych [14,15], które bazują na coraz bardziej zaawansowanych modelach matematycznych, dzięki czemu zapewniają one większą dokładność oraz wierniej odzwierciedlają rzeczywistość. Łączne

zastosowanie kilku metod symulacyjnych w diagnostyce rozpatrywanego problemu pozwala nie tylko na precyzyjne odwzorowanie samej dynamiki pojazdu, ale także jego zachowania w zadanych warunkach środowiska (nawierzchnia, warunki atmosferyczne). Konieczność zapewnienia powtarzalności warunków środowiskowych i drogowych przemawia za szerokim stosowaniem tego typu metod w badaniach porównawczych zużycia energii przed i po zastosowaniu ewentualnych modyfikacji w pojeździe. Zaproponowana przez autorów metoda badań pozwala na określenie wpływu nawet nieznacznych zmian wszystkich podzespołów na wielkość zużycia energii.

3. Krótki opis środowiska modelowania kinematyki pojazdu

W proponowanej metodzie symulacyjnej posłużono się bardzo dokładnym modelem matematycznym programu symulacyjnego ASM [16]. Pakiet ten pozwala nie tylko odwzorować w sposób bardzo dokładny samą dynamikę pojazdu, ale także parametry środowiska zewnętrznego takie jak: temperatura i ciśnienie atmosferyczne, ale także ważne z punktu widzenia doboru baterii ukształtowanie terenu, nawierzchnia drogi, czy przebieg trasy.



Rys 1. Schemat blokowy kompletnego modelu pojazdu elektrycznego [źródło: opracowanie własne]

Każdy z tych parametrów można dowolnie modyfikować i dopasowywać do potrzeb symulacji (Rys 1.). Wszystkie podzespoły takie jak zawieszenie, zostały zamodelowane i możliwa jest swobodna zmiana ich konfiguracji.

Model ASM został opracowany z myślą o symulacji pojazdów spalinowych, lecz możliwa jest również jego aplikacja do badania pojazdów elektrycznych. Swobodny dostęp do modyfikacji parametrów tego modelu pozwolił na dostosowanie go do potrzeb symulacji pojazdu elektrycznego. W modelu pozostawiono takie podzespoły jak: zawieszenie, opony, czy układ kierowniczy. Natomiast elementy typowe dla samochodu spalinowego zastąpione zostały przez elementy występujące w pojazdach elektrycznych.

Model oraz przebieg trasy zostały sparametryzowane tak, aby odpowiadały rzeczywistym parametrom autobusu elektrycznego. W symulacji przyjęto stałą masę autobusu równą 19 ton, wartość ta jest maksymalnym obciążeniem pojazdu.

W ramach dostosowywania modelu do potrzeb symulacji pracy pojazdów z napędem elektrycznym opracowano lub zmodyfikowano:

- układ przeniesienia napędu pojazdu,
- układ transferu energii bateria – napęd, napęd – bateria,
- sposób sterowania pojazdem, praca pedału przyspieszenia,
- układ odpowiadający za hamowanie pojazdu (wprowadzono hamowanie rekuperacyjne [1,3]).

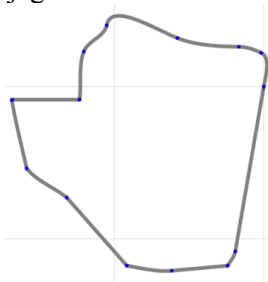
W symulacjach przyjęto sprawność układu napędowego dla pracy silnikowej na poziomie 0,9. Jest to typowa sprawność nowoczesnego układu napędowego samochodu elektrycznego. W procesie rekuperacji sprawność silnika została ustalona na 0,8 ze względu na dodatkowe straty występujące w maszynie. Takie same wartości zostały przyjęte dla baterii akumulatorów li-ion.

Akumulator litowo-jonowy zasilający autobus wykonany został w technologii LiFePO₄, umożliwia badanemu autobusowi pokonanie dystansu około 120km zależnie od warunków drogowych, tj. nachylenia drogi, współczynnika tarcia oraz ilości pasażerów.

4. Przebieg trasy pojazdu

Ukształtowanie terenu, po którym porusza się pojazd ma znaczny wpływ na wartość mocy chwilowej układu napędowego, a co stąd wynika również na wielkość zużycia przez niego energii. Jej precyzyjne określenie przyczyni się do zmniejszenia błędu związanego ze skończoną dokładnością procesu symulacji.

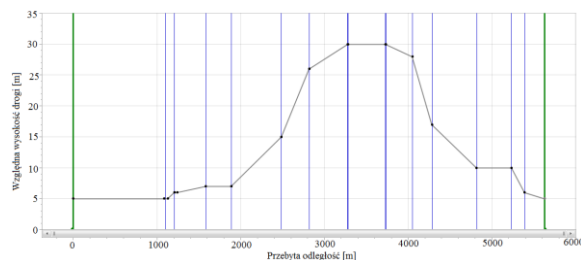
Model ASM umożliwia określenie dokładnej trasy przejazdu pojazdu, jak również zdefiniowanie jego manewrów.



Rys 2. Przebieg trasy pojazdu wygenerowany przy pomocy edytora trasy programu ASM [źródło: opracowanie własne]

Trasę zamodelowano poprzez wprowadzenie elementarnych części drogi w postaci linii prostej, krzywej, łuku okręgu, czy segmentu eliptycznego. Przyjęto założenie, że droga w trakcie pomiarów była sucha. Dla uproszczenia przyjęto również, że autobus poruszał się po jednym pasie ruchu. Przebieg trasy zobrazowany jest na Rys 2.

Do modelu wprowadzono również rzeczywisty profil wysokościowy, który przedstawiono na Rys 3.



Rys 3. Profil wysokościowy trasy przejazdu autobusu [źródło: opracowanie własne]

5. Układ napędowy

Układ ten stanowi połączenie wału napędowego z silnikiem elektrycznym i dzięki przekładni, zwiększa moment obrotowy na kołach w celu przeciwdziałania siłom przeciwnym do ruchu jazdy. Testowany pojazd wykorzystuje jednobiegowy układ przekładni. Producent określa wartość przekładni biegowej na 6,3. Kolejnym elementem układu napędowego jest silnik elektryczny. Aktualnie najczęściej stosowanym w pojazdach elektrycznych jest silnik synchroniczny z magnesami trwałymi PMSM [8]. Silnik ten cechują wysokie osiągi mechaniczne i zadowalająca sprawność, która w połączeniu z wysoką mocą i niezawodnością kontroli nad

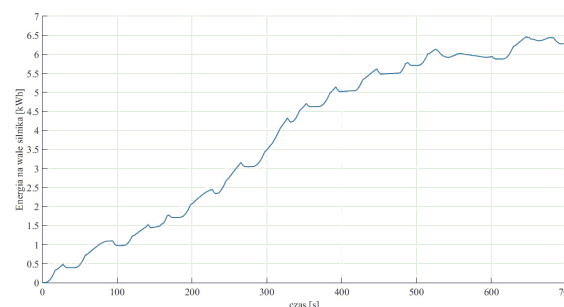
momentem i prędkością sprawia, że jest on najlepszym rozwiązaniem w sektorze elektrycznej mobilności.

W rozpatrywanym pojeździe zastosowano silnik PMSM zasilany baterią akumulatorów li-ion [4,5]. Układ elektroniczny wykorzystuje falownik w celu kontroli prędkości i momentu silnika PMSM [2]. Z uwagi na to, że w obecnych pojazdach elektrycznych dynamika sterowników jest o wiele wyższa od analogicznej ich mechanicznych odpowiedników, można założyć, że natychmiastowo przetwarza on prąd i napięcie.

6. Wyniki przeprowadzonej symulacji modelu ASM

Na podstawie wyników przeprowadzonej symulacji otrzymano wykres zużycia energii przez silnik napędowy w funkcji czasu, Rys. 4.

W rozważaniach przyjęto dodatkową moc 3 kW w celu uwzględnienia zużycia mocy przez dodatkowe odbiory energii elektrycznej w pojeździe, takie jak: sprężarka, wspomaganie kierownicy, czy klimatyzacja.



Rys 4. Wykres energii zużytej przez silnik napędowy w funkcji czasu [źródło: opracowanie własne]

Maksimum energii elektrycznej jest bliskie 6,2kWh. Przy założeniu, że zasięg wynosił 5,648 km, uzyskano w przeliczeniu na jeden kilometr:

$$\Delta E_{sym} = \frac{\Delta E}{l} \approx 1,09 \text{ kWh/km} \quad (1)$$

Po uwzględnieniu sprawności falownika i baterii otrzymano:

$$\Delta E_{sym \text{ km}} = \frac{\Delta E_{sym}}{\eta_{baterii} \cdot \eta_{falownika}} \approx 1,36 \text{ kWh/km} \quad (2)$$

Uzyskana z symulacji komputerowej wartość określa zużycie energii elektrycznej przez silnik autobusu.

Uwzględniając czas przejazdu, wyznaczono ilość energii wymaganej na pokrycie zapotrzebowania pozostałych układów elektrycznych autobusu:

$$E_{dod} = P \cdot t = 1,5 kWh \quad (3)$$

W przeliczeniu na jeden kilometr otrzymano:

$$E_{dod\ km} = \frac{E_{dod}}{l} \approx 0,27 kWh/km \quad (4)$$

Całkowite zużycie energii elektrycznej wynosi:

$$E = E_{dod\ km} + E_{sym\ km} = 1,63 kWh/km \quad (5)$$

7. Weryfikacja eksperymentalna

Pomiary przeprowadzone zostały w trakcie 27 kursów autobusu. Badany pojazd był doładowywany pięciokrotnie szybką ładowarką na przystanku początkowym. Podczas pomiarów zanotowano stan baterii na początku i na końcu przejazdu.

Wykazano, że autobus zużywał średnio 7% z pojemności baterii akumulatorów podczas przejazdu i tą wartość przyjęto do obliczeń (8,4kWh) [12,13]. W przeliczeniu na jeden kilometr, przy założeniu, że zasięg wynosił 5,648 km uzyskano:

$$\Delta E_{rzecz} = \frac{\Delta E}{s} = 1,49 kWh/km \quad (6)$$

Różnicę wartości pomiędzy zużyciem energii uzyskanym w wyniku przeprowadzenia eksperymentu, a analogicznym - z symulacji wytłumaczyć można założeniem przybliżonego zapotrzebowania na energię elementów napędów pomocniczych. W celu zwiększenia zgodności wyników pomiarów i symulacji konieczna jest dokładna analiza pracy pozostałych układów elektrycznych autobusu miejskiego.

8. Podsumowanie

1. Wykazano, że na drodze symulacji komputerowej, wykorzystującej zaawansowane modele kinematyczne pojazdu, możliwe jest pozyskanie istotnych informacji, dotyczących zużycia energii przez pojazd autobusowy.

2. Wykorzystanie zmodyfikowanego modelu matematycznego układu napędowego pozwala zweryfikować wstępne założenia na etapie projektu bez ponoszenia kosztów budowy

prototypu, co daje znaczną przewagę technologiczną użytkownikom tego modelu.

3. Analiza zużycia energii przez pojazd eksploatowany w zdefiniowanych wcześniej warunkach (trasa) umożliwi odpowiedni dobór wielkości baterii chemicznej, co przyczyni się do obniżenia kosztów związanych z przewymiarowaniem baterii, co często ma miejsce przy produkcji pojazdów autobusowych.

4. W symulacji komputerowej nie uwzględniono manewrów wynikających z zachowania pozostałych uczestników ruchu drogowego. Charakteryzuje je stochastyczny rozkład, co utrudnia ich odwzorowanie w programie symulacyjnym.

5. Określony na poziomie <10% błąd jest wynikiem bardzo dobrym i sprawia, że symulacyjne określenie zużycia energii przez przygotowany model matematyczny wydaje się być dobrym narzędziem do oceny parametrów eksploatacyjnych pojazdów z napędem elektrycznym.

6. Aktualnie prowadzone są prace nad możliwością wykorzystania modelu matematycznego przekształtnika energoelektronicznego oraz modelu silnika w symulacjach pracy tego napędu.

9. Literatura

- [1] Abousleiman R. & Rawashdeh O. *Electric vehicle modelling and energy-efficient routing using particle swarm optimization*. IET Intelligent Transport Systems, 2016, Pages 65-72
- [2] Biczek P. *Chapter of Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks Part of the series Power Systems*, Energy Storage Systems, 2008, Pages 269-302
- [3] Clarke P., Muneer T., Cullinane, K. *Cutting vehicle emissions with regenerative braking*. Transportation Research Part D 15, 2010, Pages 160-167
- [4] Cuma M. U. & Koroglu, T. *A comprehensive review on estimation strategies used in hybrid and battery electric vehicles*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 42, February 2015, Pages 517-531
- [5] Gerssen-Gondelach S. J. & Faaij A. *Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term*. Journal of Power Sources, Vol. 212, 15 August 2012, Pages 111-129
- [6] Haddadian G., Khodayar M., Shahidehpour M. *Accelerating the Global Adoption of Electric Vehicles: Barriers and Drivers*. The Electricity Journal, Volume 28, Issue 10, December 2015, Pages 53-68
- [7] Hellgren J. *Life cycle cost analysis of a car, a city bus and an intercity bus powertrain for year*

- 2005 and 2020. Energy Policy, 2007, Pages 39-49
- [8] Lajunen A. *Energy-Optimal Velocity Profiles for Electric City Buses*. 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)
- [9] Lajunen, A. *Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses*. Transportation Research, Part C 38, 2014, Pages 1-15
- [10] Paska J., Biczal P., Klos M. *Hybrid power systems – An effective way of utilising primary energy sources*. Renewable Energy, Volume 34, Issue 11, November 2009, Pages 2414-2421
- [11] Sajadi A., Klos M., Biczal P., Biabani M. *Future perspectives of energy sector and energy market in EU*. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference, Pages 600 – 605
- [12] Siemionek E. & Dziubiński M. *Testing Energy Consumption in the Trolleybus and The Bus on a Chosen Public Transport Line in Lublin*. Advances in Science And Technology-Research Journal, Volume 9, Issue 26, June 2015, Pages 152-156
- [13] Wua X., Freeseb D., Cabrerab A., Kitchb, W. A. *Electric vehicles energy consumption measurement and estimation*. Transportation Research, Part D: Transport and Environment, Volume 34, January 2015, Pages 52-67
- [14] Zielinski D., Jarzyna W., Filipek P. *Method for testing converter network of electricity generating source, involves controlling source by first control bus and processing control signals using analog to digital converter, and transmitting signals to amplifier by control bus*. Patent Number: PL407835-A1, Patent Assignee: POLITECHNIKA LUBELSKA
- [15] Zielinski D., Lipnicki P., Jarzyna W. *Synchronisation of voltage frequency converters with the grid in the presence of notching*. Compel - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.34, Issue 3, Special Issue SI, Pages 657-673, 2015
- [16] https://www.dspace.com/en/inc/home/products/sw/automotive_simulation_models.cfm

Autorzy

Mateusz Litwin – Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska, e-mail: mateusz.litwin@pollub.edu.pl

Amanda Kołodyńska – Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska, e-mail: amanda.kolodynska@pollub.edu.pl