

Efektywność energetyczna napędu trakcyjnego z silnikiem PMSM na przykładzie autobusu elektrycznego

Andrzej Dębowski, Paweł Stankiewicz, Marek Marczak

1. Wstęp

W artykule przedstawiono wyniki wstępnej identyfikacji parametrów jednego z pierwszych prototypów wielobiegunowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM), o podwójnym trójfazowym uzwojeniu stojana, zasilanym z dwóch odrębnych falowników napięciowych o tradycyjnej topologii. Wybrany do analizy prototyp silnika, noszący oznaczenie SMwsK280M20v2, zaprojektowano w INiME KOMEL na zlecenie firmy RAFAKO SA. Inspiracją dla tej konstrukcji stała się seria kanadyjskich silników trakcyjnych TM4 SUMO, dedykowana do zastosowań w kołowych pojazdach elektrycznych [10]. Kolejne prototypy tego silnika przechodzą obecnie dalsze badania laboratoryjne, związane z końcową fazą jego projektowania. Opracowanie jego zastępczego modelu matematycznego było możliwe dzięki danym technicznym podanym przez producenta w udostępnionych zleciennodawcy sprawozdaniach z przeprowadzonych dotychczas badań laboratoryjnych tych prototypów, m.in. w [4].

Wstępnie oszacowane parametry takiego modelu, o których mowa jest w tym artykule, uzupełniają te dane. Zaproponowany przez autorów model nie tylko pozwala na zaprojektowanie układu sterowania napędem z takim silnikiem tak, by zapewnić wymagane właściwości w stanach statycznych jak i dynamicznych [2, 3], ale między innymi staje się dostępna możliwość analizowania jego pracy jeszcze przed zakończeniem procesu konstruowania samego silnika i zasilających go falowników. Możliwe jest także, co zostało przykładowo pokazane w tym



Rys. 1. Autobus elektryczny wykorzystany jako przykład w badaniach symulacyjnych napędu prototypowego z silnikiem PMSM

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki wstępnej identyfikacji parametrów jednego z pierwszych prototypów wielobiegunowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM) budowanego przez INiME KOMEL. Wartości wstępnie oszacowanych parametrów, uzupełniające dane techniczne silnika podawane przez producenta, pozwalają na zbudowanie zastępczego modelu matematycznego trakcyjnego napędu elektrycznego z takim silnikiem. Dzięki temu modelowi na drodze symulacji komputerowej możliwe jest przeanalizowanie pod względem spodziewanej efektywności energetycznej napędu pewnego przykładowego autobusu elektrycznego, rozumianej jako energia zużywana i/lub akumulowana w czasie trwania późniejszego testu drogowego rzeczywistego pojazdu, polegającego na przejeździe zadanego odcinka drogi w sposób zgodny z wymaganiami standardu SORT.

Słowa kluczowe: elektryczny napęd trakcyjny, silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, efektywność energetyczna.

ENERGY EFFICIENCY OF AN PMSM TRACTION DRIVE ON AN ELECTRIC BUS EXAMPLE

Abstract: The article presents the results of the preliminary parameter identification in one of the first prototypes of a multipolar synchronous motor with permanent magnets (PMSM), currently constructed by INiME KOMEL. The values of these initially estimated parameters, supplementing the motor's technical data provided by the manufacturer, allow to build a substitute mathematical model of an electric traction drive with such a motor. Thanks to this model, on the way of computer simulation it is possible earlier to analyze in terms of expected energy efficiency of the electric bus drive with such an engine, understood as energy consumed and/or accumulated during the subsequent road test of a real vehicle, the course of a later road test of such a vehicle, relies on passing a given road section in a manner consistent with the requirements of the SORT standard.

Keywords: electric traction drive, permanent magnet synchronous motor, energy efficiency.

referacie, przeanalizowanie efektywności energetycznej takiego napędu jeszcze przed zainstalowaniem go w autobusie (rys. 1).

Mając model matematyczny danego napędu elektrycznego, uzupełniony o model napędzanego nim urządzenia, można

tanio i wygodnie przeprowadzać na drodze symulacji komputerowej wstępną analizę jego zachowania się w dowolnych warunkach obciążenia. W tym celu można skorzystać z dowolnego oprogramowania wspomagającego prowadzenie obliczeń naukowych i inżynierskich (np. z programu Scilab – stanowiącego bezpłatną alternatywę dla używanego na polskich uczelniach MATLAB-a). W niniejszym artykule, w celu uproszczenia obliczeń, autorzy zrezygnowali z dokładnego modelowania wektorowego układu sterowania rozważanym silnikiem w stanach dynamicznych, a wstępnego oszacowania efektywności energetycznej rozważanego napędu dokonali, opierając się na analizie przeprowadzonej z użyciem programu MS Excel.

Ocena ilości energii przepływającej przez dowolny napęd (nie tylko elektryczny) zależy bardzo ściśle od zadań wykonywanych przez napędzaną przezeń maszynę roboczą. Dlatego badanie efektywności rozważanego tu napędu autobusu elektrycznego, w którym wzajemnej dwukierunkowej konwersji podlegają energia elektryczna i mechaniczna, zostało omówione na podstawie symulacji komputerowych dotyczących jednego konkretnego testu drogowego. Charakterystyka tego testu została dobrana zgodnie z wymaganiami standardu SORT Cycle 2, opisanego w przepisach, od 2004 roku wydawanych przez Międzynarodową Unię Transportu Publicznego (UITP) [11].

2. Modele symulacyjne przykładowego autobusu z napędem PMSM

W ostatnich latach, dzięki postępom w zakresie stosowania nowych materiałów i metod ich obróbki w procesie produkcji maszyn elektrycznych, odchodzi się od lokowania w korpusach tych maszyn pojedynczego kompletu uzwojeń na rzecz uzwojeń wielofazowych (z ang. *multi-phase*). Dotyczy to szczególnie trójfazowych stojanów silników prądu przemiennego, zarówno tych klasycznych, spotykanych w silnikach, asynchronicznych, jak i tych najnowszych, synchronicznych, z magnesami trwałymi. Poszczególne komplety tych uzwojeń mogą być identyczne pod względem budowy, ale mogą mieć także różną liczbę par biegunów. Jeśli są identyczne, to osie geometryczne ich uzwojeń mogą się ze sobą pokrywać, a mogą być też obrócone względem siebie o pewien kąt. Uzwojenia zasilane są z oddzielnych falowników napięciowych, mogących także pracować niezależnie od siebie [6, 7, 9].

Powody takiego sposobu konstruowania uzwojeń stojanów współczesnych silników, pozwalającego na jednoczesne pojawienie się w jednym silniku kilku (dwóch, trzech lub więcej – zależnie od liczby tych uzwojeń) podsystemów elektromechanicznych, które mogą być sterowane elektrycznie i mechanicznie w pełni niezależnie od siebie, są następujące [8, 10]:

- podstawową zaletą w porównaniu z klasycznym „pojedynczym” uzwojeniem 3-fazowym jest pojawienie się mniejszej wartości szkodliwego momentu hamującego oraz obniżenie wartości prądów pasożytniczych występujących w przypadku rozmaitych zwarć w takich uzwojeniach (doziemnych, międzyuzwojeniowych lub międzyzwojowych), co pozwala na kontynuowanie pracy napędu w przypadkach pojedynczych uszkodzeń dotyczących jednego kompletu uzwojeń takiego

silnika, który po wykryciu takiego uszkodzenia może zostać czasowo wyłączony z normalnej pracy;

- podłączenie do kilku uzwojeń stojana niezależnych od siebie falowników pozwala na użycie w impulsach sterujących ich kluczami IGBT tzw. przeplotu (z ang. *interleave*), co prowadzi do zmniejszenia amplitudy i stromości tętnień prądu (z ang. *current ripples*), występujących w obwodach pośredniczących na wejściach falowników, i tym samym pozwala na znaczące obniżenie wielkości (i co za tym idzie – kosztu) kondensatorów stosowanych w tych przekształtnikach;
- przy takiej konfiguracji uzwojeń stojana nie tylko przewody zasilające poszczególne fazy silnika, ale i przewody używane na nawinięcie samych cewek tych uzwojeń mają mniejsze średnice, a ich przekroje mogą być dopasowane do kształtu żłobków, co obniża zużycie miedzi i ułatwia ich mechaniczne wyginanie i układanie w żłobkach korpusu silnika.

Najczęściej, tak jak na przykład w silnikach TM4 SUMO, stosuje się dwa lub trzy identyczne komplety uzwojeń stojana. Przy okazji poruszania tego tematu warto jednak zauważyć, że sterowanie takimi niezależnymi od siebie falownikami przypisanymi do tych uzwojeń musi być opracowane bardzo starannie, aby nie zdarzyło się, że wytwarzane przez nie składowe wypadkowe momentu elektromagnetycznego wzajemnie sobie przeszkadzają zamiast się odpowiednio uzupełniać.

W prototypowym silniku KOMEL-u, rozważanym w tym artykule, mamy do czynienia z dwoma kompletami takich uzwojeń, o dziesięciu parach biegunów każdy. Dyskretyzacja kątowa obwodu stojana, wynikająca z obecności żłobków, powoduje, że jeśli takie – nawet identycznie zaprojektowane – uzwojenia mają być ułożone w oddzielnych żłobkach, muszą pozostawać nieco względem siebie obrócone. Ma to oczywiście wpływ na wielkość odczuwalnego sprzężenia magnetycznego pomiędzy tymi uzwojeniami. Przy identyfikowaniu parametrów zastępczego modelu rozważanego tu silnika prototypowego PMSM zjawisko to zostało pominięte, ponieważ przyjęto wstępnie, że oba uzwojenia będą wprawdzie zasilane z dwóch odrębnych falowników (przynajmniej w uproszczonej wersji projektowanego napędu), lecz wyzwanych dokładnie tymi samymi impulsami – pochodzącymi z tego samego układu sterującego ich kluczami energoelektronicznymi. Założenie, że będą one współpracować ze sobą w pełni równolegle, wydaje się więc być uzasadnione. Dopiero dalsze testy rzeczywistego napędu, prowadzone pod obciążeniem w warunkach laboratoryjnych lub przy jego eksploatacji po zamontowaniu w pojeździe, pozwolą na pełne zweryfikowanie poprawności tego modelu.

W dalszych rozważaniach pominięto więc wpływ możliwego ujawnienia się efektów sprzężenia magnetycznego na wypadkowe przebiegi zmiennych stanu w modelu tego silnika, związanych z każdym z kompletów uzwojeń, tj. prądów fazowych występujących w poszczególnych uzwojeniach stojana, skojarzonych z nimi strumieni magnetycznych oraz momentów wewnętrznych (elektromagnetycznych). Za wielkości wypadkowe: moment wewnętrzny (elektromagnetyczny) tego silnika, oraz związane z jego pracą moce – elektryczną, mechaniczną oraz moce strat – uznane zostaną pomnożone przez 2 wielkości związane tylko z jednym z tych dwóch uzwojeń – oznaczonym jako U_1 , V_1 , W_1 , wybranym jako uzwojenie odniesienia.

2.1. Model prototypowego silnika PMSM

Podstawą współczesnego modelowania matematycznego wielofazowych (a w szczególności także trójfazowych) maszyn elektrycznych prądu przemiennego jest oparte na transformacji Clarka i Parka pojęcie wektorów przestrzennych, grupujących w sobie napięcia fazowe, prądy fazowe związane z poszczególnymi uzwojeniami danego zestawu uzwojeń oraz strumienie magnetyczne skojarzone z tymi uzwojeniami [2].

W maszynach elektrycznych z wirnikiem, w który wbudowano magnesy trwałe, nawet przy stojanie wyposażonym w uzwojenia rozłożone na jego obwodzie tak, że właściwości magnetyczne nieruchomego korpusu tej maszyny pozostają praktycznie takie same w dowolnym kierunku, w przypadku wirnika trzeba się liczyć z ich zróżnicowaniem: inaczej bowiem kształtuje się zastępcza przenikalność magnetyczna w kierunku pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwałe wirnika (czyli w tzw. kierunku „podłużnym”), a inaczej w kierunku prostopadłym do osi tego pola (czyli w tzw. kierunku „poprzecznym”). Dlatego wskazane jest praktyczną identyfikację parametrów takiej maszyny opierać na przyjęciu sposobu opisu modelu, pozwalającego na uwzględnienie tej asymetrii, np. podawanego w literaturze [11].

Układ równań modelu maszyny z trójfazowymi uzwojeniami stojana, wyrażany zwykle z wykorzystaniem wektorów przestrzennych, w przypadku takiej asymetrii związanej z właściwościami obwodu magnetycznego spotykany w maszynach PMSM, najwygodniej jest podawać w wirującym układzie współrzędnych θ - d - q , sztywno związanym z wektorem strumienia wzbudzenia Ψ_f , pochodzącym od magnesów trwałych wirnika, ale w zapisie jawnym, czyli w postaci algebraicznej:

$$U_s = U_d + jU_q, \quad I_s = I_d + jI_q, \quad \Psi_s = \Psi_d + j\Psi_q \quad (1)$$

Dzięki temu opis modelu silnika AC-PMSM przyjmuje postać rozwiniętą:

$$U_d = R_s I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - p\Omega_m \Psi_q$$

$$U_q = R_s I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - p\Omega_m \Psi_d \quad (2)$$

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left\{ \frac{3}{2} p [\Psi_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] - M_{op} \right\}$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = \Omega_m$$

gdzie: $\Psi_d = L_d I_d + \Psi_f$ oraz $\Psi_q = L_q I_q$.

W maszynach o budowie symetrycznej indukcyjność związaną ze składową wektora prądu stojana wytwarzającą pole magnetyczne w danym kierunku można przyjąć za parametr stały, oznaczany zwykle symbolem L_s . W rozważanym tu przypadku oznacza to, że $L_d = L_q$.

Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli na rys. 3, poszukiwanie nieznanymi wartościami parametrów modelu silnika, prowadzonych numerycznie w arkuszu Excel z użyciem

| Dane techniczne silnika firmy INIME Komel: SMKwsK280M20 | |
|---|--|
| Dane znamionowe silnika (wg karty uzwojeń KUS: CG4072008) | |
| Pn = | 140 kW |
| Un = | 218 V (wartość niewykorzystana) |
| In = 2x | 200 A |
| Imax = 2x | 400 A |
| Tn = | 1304 Nm (wartość niewykorzystana) |
| Tmax = | 2460 Nm |
| nn = | 1025 obr/min |
| nmax = | 3000 obr/min |
| eta = | 97 % (wartość niewykorzystana) |
| Na podstawie dotychczasowych pomiarów przyjęto: | |
| eta = | 95 % |
| cos(f) = | 0,6142 |
| oraz brak osłabiania strumienia, czyli | |
| (Ifm)d = | 0 A |
| p = | 10 liczba par biegunów |
| | wartości parametrów zakładane |
| | wartości parametrów uzyskane z pomiarów |
| | wartości parametrów dobrane metodą optymalizacyjną |
| | wartości parametrów stanowiące wynik przeliczeń |

Rys. 2. Dane techniczne silnika PMSM dostarczone przez producenta

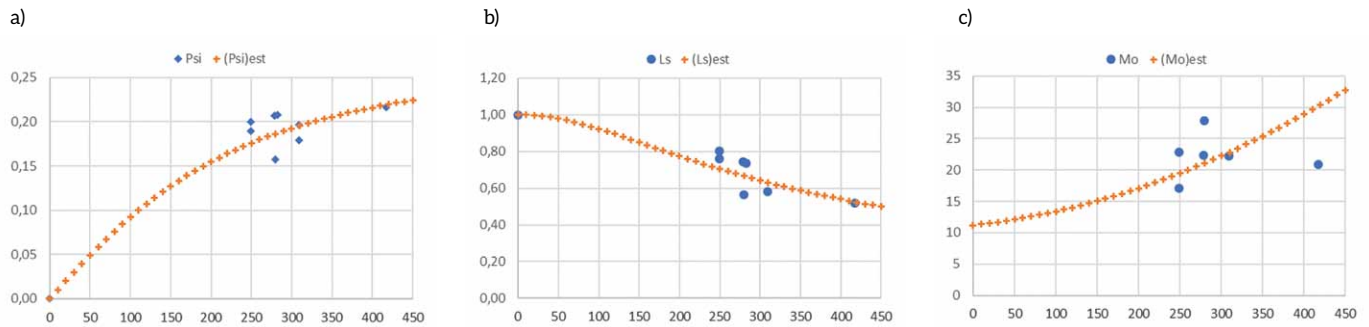
| | Wynik analizy danych | Pominięto ten przypadek | | | | | | |
|---------|----------------------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| | | Znam. | Lp-1 | Lp-2 | Lp-3 | Lp-4 | Lp-5a | |
| Ld = | 7,35E-04 | 7,44E-04 | 5,17E-04 | 5,63E-04 | 3,88E-04 | 8,01E-04 | 5,80E-04 | H |
| Lq = | 7,35E-04 | 7,44E-04 | 5,17E-04 | 5,63E-04 | 3,88E-04 | 7,59E-04 | 6,37E-04 | H |
| dPmech= | 2 402 | 2 402 | 3 216 | 3 585 | 4 758 | 4 462 | 5 810 | W |
| (Ifm) = | 282,8 | 278,4 | 417,7 | 279,7 | 396,4 | 249,2 | 309,0 | A |
| Omm= | 107,3 | 115,1 | 115,2 | 157,2 | 157,2 | 261,7 | 261,7 | rad/sek |
| Ls = | 0,735 | 0,744 | 0,517 | 0,563 | 0,388 | 0,780 | 0,608 | mH |
| Mo = | 22,4 | 20,9 | 27,9 | 22,8 | 30,3 | 17,0 | 22,2 | Nm |

Rys. 3. Wyniki identyfikacji parametrów modelu silnika PMSM w oparciu o dane z badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez producenta

wbudowanego narzędzia optymalizacyjnego Solver, doprowadziło do wniosku, że zastępcze indukcyjności związane z uzwojeniami stojana należy w tym silniku przyjmować jako jednakowe. Dowodzi to, że przenikalność obwodu magnetycznego w tej maszynie wykazuje właściwości symetrii w obu osiach, podobnie jak w przypadku klasycznych maszyn synchronicznych z wirnikami o budowie cylindrycznej.

Na rys. 4 a, b, c przedstawiono propozycję ewentualnego powiązania z aktualnym punktem pracy identyfikowanego silnika wartości parametrów jego modelu różniące się wyraźnie od siebie, dla których jednak opis tego modelu przyjmowany w postaci równań (1), (2) z dużą dokładnością pozwala się dopasować do posiadanych eksperymentalnych danych pomiarowych, co wskazuje, że występujące różnice nie wyglądają na przypadkowe.

Na wykresach (rys. 4) zaproponowano uzależnienie wartości tych parametrów od ustalonej wartości modułu wektora (amplitudy) prądu fazowego stojana. Okazało się przy tym, że ich zależność od prędkości obrotowej wału silnika nie była tak odczuwalna. Ze względu jednak na fakt, że dysponowano danymi pomiarowymi zarejestrowanymi jedynie dla kilku punktów pracy – w dodatku bardzo zbliżonymi do siebie – oraz że nie była znana dokładność, z jaką wykonano poszczególne pomiary, i ich wiarygodność, zrezygnowano z pomysłu, by przy opracowywaniu modelu matematycznego dla rozważanego silnika na razie zrezygnować z próby „uzmiennienia” poszukiwanych parametrów poprzez uzależnienie ich wartości od aktualnego punktu pracy analizowanej maszyny.



Rys. 4. Wstępne propozycje estymacji: a, b – charakterystyk obwodu magnetycznego; c – zależności momentu reprezentującego straty mechaniczne jako funkcji zmiennych stanu silnika PMSM (np. modułu wektora prądu stojana)

W tabeli widocznej na rys. 5 przedstawiono ostateczne wartości parametrów modelu silnika opisanego równaniami (1) i (2), przyjętego jako podstawa modelu matematycznego opisu przykładowego autobusu napędzanego takim silnikiem.

2.2. Model zastępczy pojazdu dla badań związanych ze zużyciem energii

Podstawą budowy modelu zastępczego dla rozważanego tu autobusu elektrycznego jest II zasada dynamiki Newtona, opisująca prostoliniowy ruch bryły sztywnej. Poza masą pojazdu (bryły sztywnej) poruszanego na kołach, konieczna jest znajomość wszystkich sił działających na to ciało. Moment obrotowy, stanowiący wielkość sterującą ruchem tego pojazdu, występujący na wale silnika elektrycznego użytego w charakterze jego napędu, niezależnie czy ten pojazd właśnie rozpędza – pracując rzeczywiście jako silnik, czy też hamuje – pracując jako prądnica, należy uzupełnić w tym bilansie o inne siły działające na ten pojazd, sprowadzone do wału silnika (z uwzględnieniem przełożenia przekładni mostu napędowego i jej sprawności).

Na rysunkach 6, 7 i 8 przedstawiono założenia liczbowe dotyczące przyjętego modelu pojazdu, graniczne wartości charakterystyk napędu autobusowego z silnikiem PMSM oraz wybrany harmonogram przejazdu testowego zgodny ze standardem SORT-2 stowarzyszenia UITP.

3. Wyniki badań modelu przykładowego autobusu elektrycznego

Na drodze obliczeń dokonanych w arkuszu kalkulacyjnym programu Excel, co było możliwe dzięki złożeniu zakładanego harmonogramu przejazdu testowego w postaci linii łamanej (tj. odcinków linii prostych), czyli o stałych wartościach przyspieszeń, otrzymano wyniki pokazane na rys. 9 a i b.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania symulacyjne prototypowego autobusu RAFAKO z nowym silnikiem PMSM firmy KOMEL dowodzą, że napęd ten zapewni wystarczającą nadwyżkę momentu rozwijanego przez ten silnik ponad spodziewane opory ruchu. Z wyznaczonego dla przejazdu testowego przebiegu zużycia energii wynika zaś, że zakładana pojemność baterii autobusu 142 kWh, przy zasilaniu z niej tylko samego silnika, wystarczy

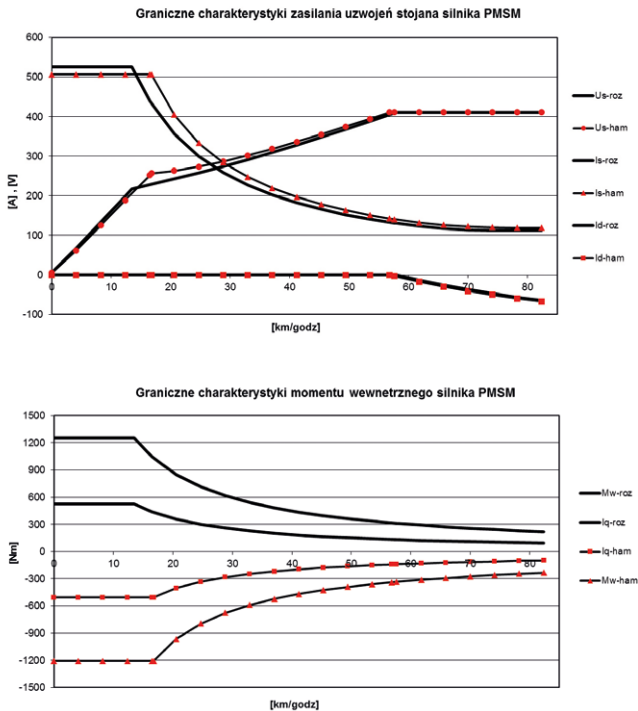
| Dane znamionowe dla pojedynczego uzwojenia | | | |
|--|----------------------|-----------------------------|------------------|
| | $E_{f0m} =$ | $(E_p)_m =$ | $(E_p)_{sk} =$ |
| | 170,7 | 295,6 | 209,0 |
| $(U_f)_m =$ | $U_d = -223,14$ | $(U_f)_m =$ | $R_s = 1,07E-02$ |
| 282,8 | $U_q = 173,67$ | 282,8 | $L_d = 7,35E-04$ |
| $(U_f)_{sk} =$ | $I_d = 0,0$ | $(I_f)_m =$ | $L_q = 7,35E-04$ |
| 199,9 | $I_q = 282,8$ | 282,8 | $p = 10$ |
| $(U_p)_{sk} =$ | $\Psi_{sid} = 0,159$ | $\Psi_{sis} =$ | |
| 346,3 | $\Psi_{siq} = 0,208$ | 0,262 | $k_e = 1,590$ |
| | $\Psi_{sif} = 0,159$ | | $k_t = 2,385$ |
| | $n_m = 1\ 025$ | $(I_p)_{sk} = (I_f)_{sk} =$ | |
| | $O_{mm} = 107,3$ | 200,0 | |
| | $O_{ms} = 1\ 073,38$ | | |
| | $f_s [Hz] = 170,83$ | | |

Rys. 5. Wartości parametrów silnika PMSM KOMEL zastosowanego w napędzie autobusu elektrycznego, przyjęte do opisu jego modelu

| Droga prosta, pozioma, asfaltowa, sucha, brak wiatru | |
|--|---|
| Pojazd | |
| $m = 16\ 500$ | masa pojazdu [kg] |
| $R = 19,5$ | rozmiar koła [m] |
| $Lobw = 2,644$ | obwód toczenia się koła [m] |
| $Rd = 0,401$ | dynamiczny promień koła [m] |
| $i = 5,78$ | przełożenie mostu napędowego |
| $\eta_{tai} = 0,94$ | sprawność przekładni napędowej |
| $A = 6,6$ | powierzchnia czołowa [m ²] |
| $u = 0,01$ | współczynnik oporu toczenia |
| $C_x = 0,8$ | współczynnik oporu kształtu |
| $k_{wir} = 6,5$ | współczynnik korekcyjny mas wirujących [%] |
| $P_{agr} = 30$ | moc agregatów złączonych na pojeździe [kW] |
| $g = 9,81$ | przyspieszenie ziemskie |
| $\rho = 1,293$ | gęstość powietrza [kg/m ³] (w war. norm.: 0 °C, 1013,25 hPa) |
| Bateria | |
| $U_d = 710$ | napięcie baterii [V] |
| $I_{dmax} = 200$ | maksymalny ciągły prąd baterii (ładowanie i rozładowywanie) [A] |
| $I_{dgran} = 400$ | graniczny (< 10 sek) prąd baterii przy rozładowywaniu [A] |
| $P_{bmax} = 142$ | maksymalna ciągła moc przy ładowaniu i rozładowywaniu [kW] |
| $P_{bgran} = 284$ | graniczna chwilowa (< 10 sek) moc przy rozładowywaniu [kW] |
| $E_{bn} = 142$ | nominalna energia magazynowana w baterii [kWh] |
| $\eta_{tab} = 0,94$ | sprawność baterii |
| Opory ruchu pojazdu: | |
| $F_{tocz} = 1619$ | siła oporu toczenia [N] |
| $k_{FX} = 3,4135$ | współczynnik oporu aerodynamicznego [kg/m] |
| | $F_x = k_{FX} \cdot v^2$ |
| $m = 16\ 500$ | masa pojazdu [kg] |
| $k_{Fdyn} = 17\ 573$ | współczynnik bezwładności pojazdu [kg] |
| | $F_{dyn} = k_{Fdyn} \cdot a$ |
| $Rd = 0,401$ | dynamiczny promień koła [m] |
| $i = 5,780$ | przełożenie mostu napędowego |
| $(\eta_{tai}) = 0,940$ | sprawność przekładni napędowej |
| | $M_{obc} = (F_{dyn} + F_x + F_{tocz}) \cdot Rd / i \cdot \eta_{tai} / 2$ jeśli $(F_{dyn} + F_x + F_{tocz}) > 0$ |
| | $M_{obc} = (F_{dyn} + F_x + F_{tocz}) \cdot Rd / i \cdot \eta_{tai} / 2$ jeśli $(F_{dyn} + F_x + F_{tocz}) < 0$ |
| | $M_{w0} = M_{obc} + M_o$ |
| | Uwaga: zawsze $M_o > 0$, gdyż O_{ms} nigdy nie zmienia znaku! |

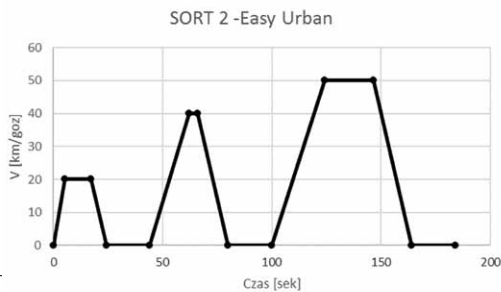
Rys. 6. Przyjęte założenia dotyczące badań przykładowego autobusu napędzanego silnikiem PMSM KOMEL, przeprowadzanych na drodze symulacji komputerowej

na wykonanie ok. 91 takich cykli, czyli zapewni wymagany zasięg przejazdu pojazdu między kolejnymi doładowaniami.



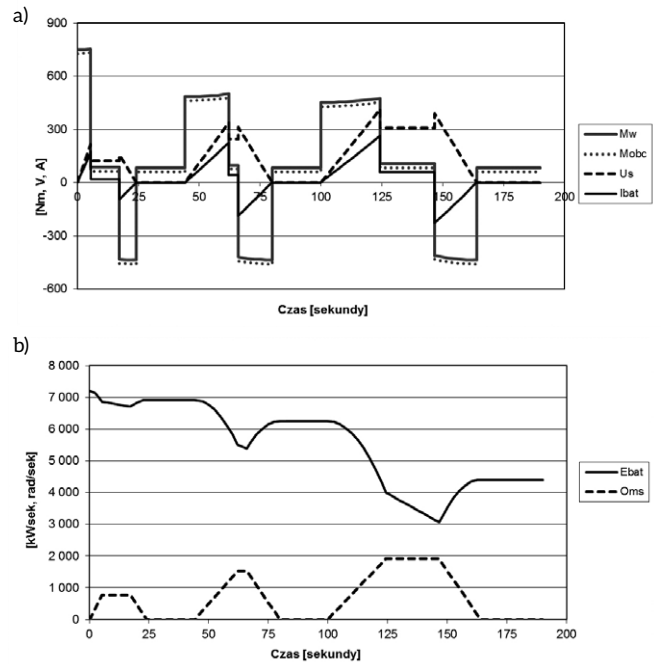
Rys. 7. Graniczne charakterystyki napędu autobusowego z rozważanym silnikiem PMSM, odpowiadające ograniczeniom wprowadzonym przez baterię zastosowaną do akumulacji energii elektrycznej

Rys. 8. Przyjęty w badaniach symulacyjnych harmonogram przejazdu testowego autobusu między przystankami



Literatura

[1] BIERNACKI M., MAJEWSKI P.: *Analiza pracy źródła zasilania elektrycznego autobusu miejskiego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2(118)/2018.
 [2] DĘBOWSKI A.: *Automatyka – napęd elektryczny*. Wyd. WNT (Copyright PWN), Warszawa 2017.
 [3] Dębowski A.: *Elektryczny napęd trakcyjny*. Wyd. WNT (Copyright PWN), Warszawa 2019.
 [4] INiME KOMEL, Lab. Maszyn Elektrycznych – Sprawozdanie Nr TL/020//O/18, Sosnowiec 2018.
 [5] MISZEWSKI M., MARCZAK M.: *Hamowanie odzyskowe miejskich autobusów elektrycznych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 3(119)/2018.
 [6] MESE E., TEZCAN M., AYAZ M., YASA Y., YILMAZ K.: *Design Considerations For Dual Winding Permanent Magnet Synchronous Machines*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012.
 [7] MUNOZ A.R., LIPO T.A.: *Dual Stator Winding Induction Machine Drive*. IEEE Trans. on IA, Vol. 36, No. 5, 2000.



Rys. 9. Przebiegi wybranych wielkości wyznaczone dla modelu przykładowego autobusu przy przyjętym przejeździe testowym: a – momentów obrotowych silnika, modułu wektora (amplitudy) napięcia stojana oraz prądu wymienianego z baterią; b – energii elektrycznej chwilowo zmagazynowanej w baterii, „elektrycznej” prędkości wirowania pola magnetycznego w szczeliny powietrznej silnika

[8] SATAKE A., OKAMOTO Y., KATO S.: *Design of Coupling Cancellation Control for a Double-winding PMSM*. IEEJ Journal IA, Vol. 6, No. 1, 2017.
 [9] SEKERAK P., HRABOVCOVA V., PYRHONEN J., KALAMEN L., RAFAJDUS P., ONUFER M.: *Ferrites and Different Winding Types in Permanent Magnet Synchronous Motor*. „Journal of Electrical Engineering” Vol. 63, No. 3, 2012.
 [10] TM4 Corporate presentation: *Removing the Transmission in Commercial Electric Vehicles*, August 2013.
 [11] UITP Project ‘SORT’ – *Standardised On-Road Test Cycles* (New edition 2014), International Assoc. of Public Transport, 2014.
 [12] ZAWIRSKI K.: *Sterowanie silnikiem o magnesach trwałych*. Kom. Elektrotechniki PAN – Postępy Napędu Elektrycznego z. 45, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.

Niniejszy artykuł zawiera treść referatu przedstawionego przez autorów na XXVIII Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych” zorganizowanej w dniach 22–24 maja 2019 r. w Rytrze k. Nowego Sącza przez Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.

dr hab. inż. Andrzej Dębowski
 Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Instytut Inżynierii Elektrycznej,
 e-mail: Andrzej.Debowski@utp.edu.pl;
 mgr inż. Paweł Stankiewicz, inż. Marek Marczak
 RAFAKO SA, Dział Projekt E-mobility,
 e-mail: Pawel.Stankiewicz@rafako.com.pl,
 e-mail: Marek.Marczak@rafako.com.pl