

Andrzej Dębowski<sup>\*</sup>, Paweł Stankiewicz<sup>\*\*</sup>, Marek Marczak<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J i J. Śniadeckich w Bydgoszczy

<sup>\*\*</sup>RAFAKO S.A., Racibórz

## EEFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA NAPĘDU TRAKCYJNEGO Z SILNIKIEM PMSM NA PRZYKŁADZIE AUTOBUSU ELEKTRYCZNEGO

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

**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 podane 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 takiego pojazdu, polegającego na przejeździe zadanego odcinka drogi w sposób zgodny z wymaganiami standardu SORT.

**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.

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

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

#### 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 S.A. 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 zleciodawcy 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 pozwala nie tylko 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 dostępną możliwością analizowania jego pracy jeszcze przed zakończeniem procesu konstruowania samego silnika i zasilających go falowników. Możliwe jest także, co zostało przykładowo pokazane w tym referacie, przeanalizowanie efektywności energetycznej takiego napędu jeszcze przed zainstalowaniem go w autobusie (Rys. 1).



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

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 MATLABa). 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 ob-

robki 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, mogących być sterowanych elektrycznie i mechanicznie w pełni niezależnie od siebie, są następujące [8], [10]:

⇒ Podstawową zaletą w porównaniu z klasycznym „pojedynczym” uzwojeniem 3-fazowym jest pojawianie się mniejszej wartości szkodliwego momentu hamującego oraz obniżenie wartości prądów pasożytniczych występujących w przypadku rozmaitych zwarć w takich uzwojeniach (doziemnych, międzyuzwojenowych lub międzyzwojowych), co pozwala na kontynuowanie pracy napędu w przypadkach pojedynczych uszkodzeń dotyczących jednego kompletu uzwojeń takiego silnika, które może po wykryciu takiego uszkodzenia może zostać czasowo wyłączone 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 pozwala tym samym 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 KOMELu, rozważanym w tym artykule, mamy do czynienia z dwoma kompletami takich uzwojeń, o dziesięciu parach biegunów każde. Dyskretyzacja kątowna 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 strumieniami magnetycznymi oraz momentów wewnętrznych (elektrodagnetycznych). Za wielkości wypadkowe: mo-

ment 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 U1, V1, W1, 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-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 stojaniu 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 spotykanymi w maszynach PMSM, najwygodniej jest podawać w wirującym układzie współrzędnych  $\theta$ - $d$ - $q$ , sztywno związanym z wektorem strumienia wzbudzenia  $\Psi_f$ , 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

$$\begin{aligned}
 U_d &= R_s I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - p\Omega_m \Psi_q \\
 U_q &= R_s I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + p\Omega_m \Psi_d \\
 \frac{d\Omega_m}{dt} &= \frac{1}{J} \left\{ \frac{3}{2} p [\Psi_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] - M_{op} \right\} \\
 \frac{d\theta}{dt} &= \Omega_m
 \end{aligned} \quad (2)$$

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

W maszynach o budowie symetrycznej, indukcyjność związana 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  $L_d = L_q$ .

#### 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(fi) =	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

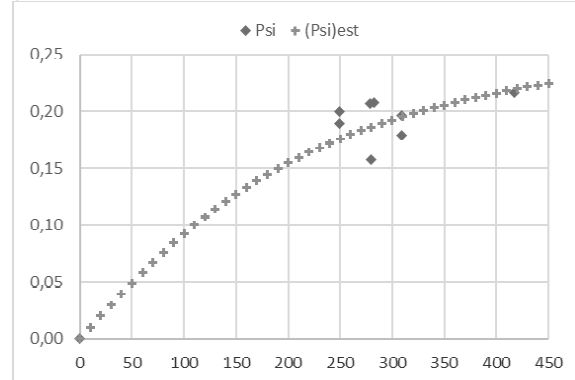
Wynik analizy danych	Pominięto ten przypadek							
	Znam.	Lp-1	Lp-2	Lp-3	Lp-4	Lp-5a	Lp-5b	
Ld =	7,35E-04	7,44E-04	5,17E-04	5,63E-04	3,88E-04	8,01E-04	5,80E-04	H
Lq =	7,35E-04	7,44E-04	5,17E-04	5,63E-04	3,88E-04	7,59E-04	6,37E-04	H
dPmech=	2 402	2 402	3 216	3 585	4 758	4 462	5 810	W
(Ifm)=	282,8	278,4	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

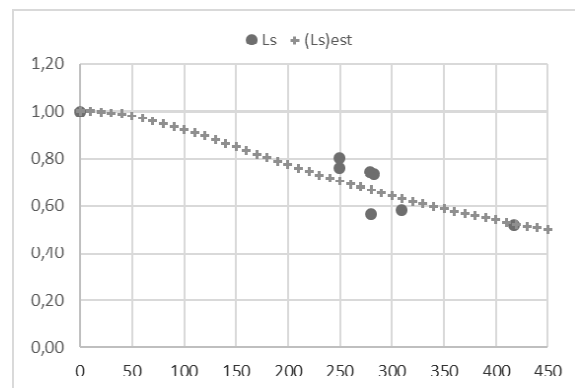
Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli na rys. 3, poszukiwanie nieznanymi wartościami parametrów modelu silnika, prowadzonych numerycznie w arkuszu Excel z użyciem wbudowanego narzędzia optymalizacyjnego Solver, doprowadziło do wniosku, że zastępcze indukcyjności związane z uzwojeniami stojana należy w tym silniku przyjmować jako jednokowe. 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.

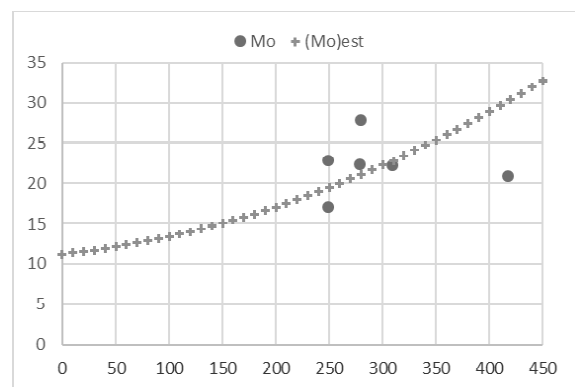
a)



b)



c)



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

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 pokazanych wyżej wykresach 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.

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	$p = 10$
$(U_p)_{sk} =$	$P_{sid} = 0,159$	$P_{sis} =$	
346,3	$P_{siq} = 0,208$	0,262	$k_e = 1,590$
	$P_{sif} = 0,159$		$k_t = 2,385$
	$n_m = 1\ 025$	$(I_p)_{sk} = (I_f)_{sk} =$	
	$O_{mm} = 107,3$		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

W tabeli przedstawionej 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

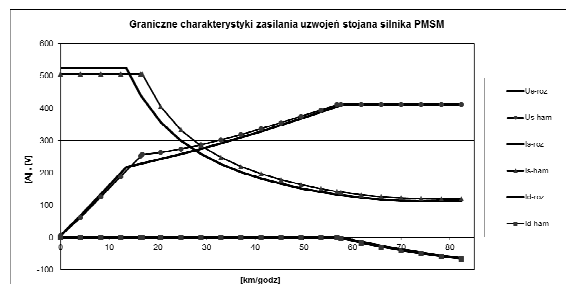
Podstawą budowy modelu zastępczego dla rozważanego tu autobusu elektrycznego jest II zasada dynamiki Newtona, opisująca prostoliniowy ruch bryły sztywnej. Poza masą poruszanego na kołach pojazdu (bryły sztywnej), konieczna jest znajomość wszystkich sił działających

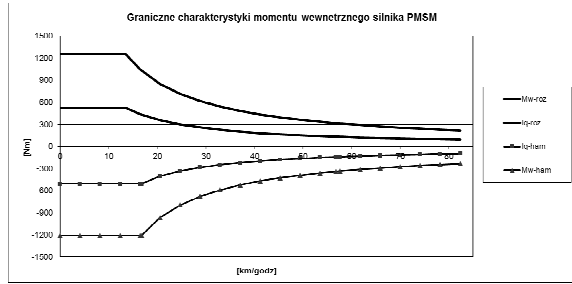
na to ciało. Moment obrotowy, stanowiący wielkość sterującą ruchem tego pojazdu, występujący na wale silnika elektrycznego użytego w charakterze jego napędu, niezależnie czy ten pojazd właśnie rozpędza – pracując rzeczywiście jako silnik, czy też hamuje – pracując jako prądnica, należy uzupełnić w tym bilansie o inne siły działające na ten pojazd, sprowadzone do wału silnika (z uwzględnieniem przełożenia przekładni mostu napędowego i jej sprawności).

Droga prosta, pozioma, asfaltowa, sucha, brak wiatru	
<b>Pojazd</b>	
$m = 16\ 500$	masa pojazdu [kg]
$R = 19,5$	rozmiar koła ["]
$L_{obw} = 2,644$	obwód toczenia się koła [m]
$R_d = 0,401$	dynamiczny promień koła [m]
$i = 5,78$	przełożenie mostu napędowego
$\eta_{tai} = 0,94$	sprawność przekładni napędowej
$A = 6,6$	powierzchnia czołowa [m <sup>2</sup> ]
$u = 0,01$	współczynnik oporu toczenia
$C_x = 0,8$	współczynnik oporu kształtu
$k_{wir} = 6,5$	współczynnik korekcyjny mas wirujących [%]
$P_{agr} = 30$	moc agregatów załączonych na pojeździe [kW]
$g = 9,81$	przyspieszenie ziemskie
$\rho = 1,293$	gęstość powietrza [kg/m <sup>3</sup> ] (w war. norm.: O oC, 1013,25 hPa)
<b>Bateria</b>	
$U_d = 710$	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
<b>Opory ruchu pojazdu:</b>	
$F_{tocz} = 1619$	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]
	$F_{dyn} = k_{Fdyn} \cdot a$
$R_d = 0,401$	dynamiczny promień koła [m]
$i = 5,780$	przełożenie mostu napędowego
$(\eta_{tai}) = 0,940$	sprawność przekładni napędowej
	$M_{obc} = (F_{dyn} + F_x + F_{tocz}) \cdot R_d / i \cdot \eta_{tai} / 2$ jeśli $(F_{dyn} + F_x + F_{tocz}) > 0$
	$M_{obc} = (F_{dyn} + F_x + F_{tocz}) \cdot R_d / i \cdot \eta_{tai} / 2$ 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 !

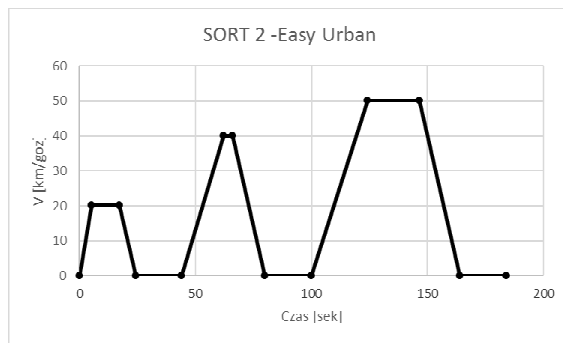
Rys. 6. Przyjęte założenia dotyczące badań przykładowego autobusu napędzanego silnikiem PMSM KOMEL, przeprowadzanych na drodze symulacji komputerowej

Na 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.





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

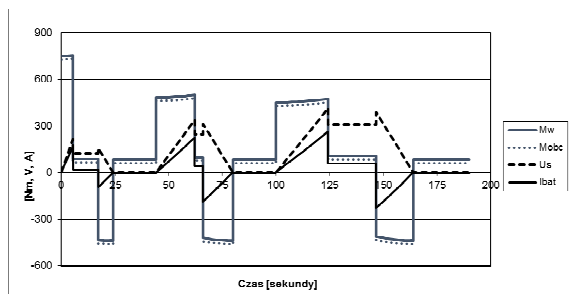


Rys. 8. Przyjęty w badaniach symulacyjnych harmonogram przejazdu testowego autobusu między przystankami

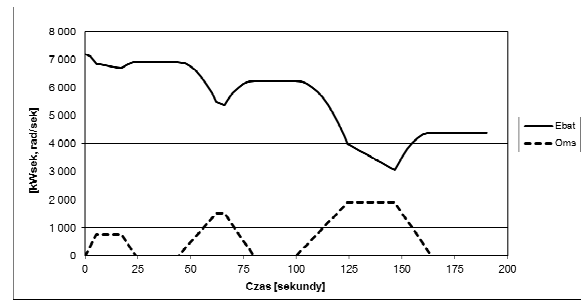
### 3. Wyniki badań modelu przykładowego autobusu elektrycznego

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. 9a) i b).

a)



b)



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 szczelinie powietrznej silnika

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

### 5. Literatura

- [1]. M. Biernacki, P. Majewski „Analiza pracy źródła zasilania elektrycznego autobusu miejskiego”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, INiME KOMEL, Katowice, nr 2(118), 2018, s.23-28.
- [2]. A. Dębowski „Automatyka-napęd elektryczny”, Wyd. WNT (Copyright PWN), Warszawa, 2017.
- [3]. A. Dębowski „Elektryczny napęd trakcyjny”, Wyd. WNT (Copyright PWN), Warszawa, 2019.
- [4]. INiME KOMEL, Lab. Maszyn Elektrycznych - Sprawozdanie Nr TL/020//O/18, Sosnowiec, 2018.
- [5]. M. Miszewski, M. Marczak „Hamowanie odzyskowe miejskich autobusów elektrycznych”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, BOBRME KOMEL, Katowice, Nr 78/2007, s.109-114.
- [6]. E. Mese, M. Tezcan, M. Ayaz, Y. Yasa, K. Yilmaz „Design Considerations For Dual Winding Permanent Magnet Synchronous Machines”, IEEE Energy

Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012, pp. 1894-1901.

[7]. A. R. Munoz, T. A. Lipo "Dual Stator Winding Induction Machine Drive", IEEE Trans. on IA, Vol.36, No.5, 2000, pp. 1369-1379.

[8]. A. Satake, Y. Okamoto, S. Kato „Design of Coupling Cancellation Control for a Double-winding PMSM” IEEJ Journal IA, Vol.6 No.1, 2017, pp.29-35.

[9]. P. Sekerak, V. Hrabovcova, J. Pyrhonen, L. Kalamen, P. Rafajdus, M. Onufer „Ferrites and Different Winding Types in Permanent Magnet Synchronous Motor”, Journal of Electrical Engineering, Vol.63, No.3. 2012, pp.163-170.

[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]. K.Zawirski "Sterowanie silnikiem o magnesach trwałych" Kom. Elektrotechniki PAN - Postępy Napędu Elektrycznego z.45, Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań, 2005.

### **Autorzy**

dr hab. inż. Andrzej Dębowski  
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
im. J i J. Śniadeckich w Bydgoszczy,  
Instytut Inżynierii Elektrycznej  
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz  
e-mail: Andrzej.Debowski@utp.edu.pl

mgr inż. Paweł Stankiewicz  
inż. Marek Marczak  
RAFAKO S.A.,  
Dział Projekt E-mobility  
ul. Łąkowa 33, 47-400 Racibórz  
e-mail: Pawel.Stankiewicz@rafako.com.pl  
e-mail: Marek.Marczak@rafako.com.pl