

**Robert Rossa**

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

## NAPĘD ELEKTRYCZNY eKIT – KSZTAŁTOWANIE CHARAKTERYSTYK ELEKTROMECHANICZNYCH WYBRANYMI ZABIEGAMI KONSTRUKCYJNYMI

### eKIT ELECTRIC DRIVE – THE SHAPING OF ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS WITH SELECTED CONSTRUCTION PROCEDURES

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wybrane zabiegi konstrukcyjne, które mogą być wykorzystane do kształtowania charakterystyk elektromechanicznych elektrycznego napędu trakcyjnego z silnikiem PMSM. Uwzględniono m.in. wpływ na te charakterystyki takich czynników jak: liczba zwojów szeregowych w fazie uzwojenia, rodzaj materiału magnetycznego zastosowanego w magnesach trwałych, sposób rozmieszczenia magnesów trwałych w wirniku. Wykazano, że nawet na późnym etapie projektowania napędu trakcyjnego z silnikiem PMSM, można jeszcze w pewnym stopniu kształtować charakterystyki elektromechaniczne napędu w celu ich jak najlepszego dopasowania do wymagań konkretnego zastosowania – pojazdu. Rozważania oparto na projekcie napędu elektrycznego eKIT, przeznaczonego dla pojazdów o masie do 3.5 t.

**Abstract:** The article presents selected design procedures that can be used to shape the electromechanical characteristics of an electric traction drive with a PMSM motor. They include, among others, influence on these characteristics of such factors as: the number of series turns in the winding phase, the type of magnetic material used in the permanent magnets, the arrangement of the permanent magnets in the rotor. It has been shown that even at a late stage of designing a traction drive with a PMSM motor, it is possible to shape the electromechanical characteristics of the drive to some extent in order to best match them to the requirements of a specific application - vehicle. The considerations were based on the eKIT electric drive design, intended for vehicles weighing up to 3.5 tons.

**Słowa kluczowe:** silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, napęd elektryczny, pojazd elektryczny

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor, electric drive, electric vehicle

### 1. Wstęp

W roku 2020 rozpoczęto realizację projektu POIR, pt. „Uniwersalny elektryczny zestaw napędowy do pojazdów elektrycznych z modułowym zasobnikiem baterii (eKIT)”. Celem projektu jest opracowanie i wdrożenie do produkcji nowoczesnego, wysokosprawnego napędu elektrycznego eKIT, przeznaczonego dla elektrycznie napędzanych pojazdów dostawczych, użytkowych i maszyn specjalnych o masie do 3.5 t. W artykule przedstawiono główne założenia dotyczące opracowywanego napędu eKIT w zakresie falownika i silnika elektrycznego, przedstawiono w skrócie konstrukcję modelowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (ang. skrót PMSM) opracowaną dla potrzeb realizacji projektu oraz omówiono wybrane aspekty techniczne i konstrukcyjne dotyczące napędu wpływające na kształt jego charakterystyk elektromechanicznych (trakcyjnych).

### 2. Założenia techniczne dla napędu eKIT

W zakresie wymagań dotyczących charakterystyk elektromechanicznych - trakcyjnych napędu eKIT, przyjęto następujące założenia:

- moment maksymalny na wale  $T_{\max} \geq 350 \text{ Nm}$ ;
  - prędkość obrotowa maksymalna silnika  $n_{\max} \geq 7000 \text{ obr/min}$  (optymalnie 10000 obr/min);
  - moc maksymalna chwilowa silnika  $\geq 120 \text{ kW}$ ;
  - moc znamionowa ciągła silnika  $\geq 75 \text{ kW}$ .
- Ponadto przyjęto następujące ogólne założenia techniczne i konstrukcyjne dla napędu eKIT:
- silnik PMSM z magnesami zagłębionymi w wirniku, co wynika z zalet tych silników przedstawionych w [1];
  - silnik o wirniku wewnętrznym;
  - silnik i falownik energoelektroniczny chłodzone cieczą;
  - zakres napięcia baterii trakcyjnej  $350 \div 400 \text{ VDC}$ , znamionowo 375 VDC;

- częstotliwość podstawowa napięć i prądów w tworniku silnika nie przekraczająca 800 Hz (m.in. w celu zapewnienia stabilnej pracy falownika z tranzystorami IGBT w głównym zakresie prędkości obrotowych silnika).

### 3. Dobór falownika energoelektronicznego

Kryteria dla doboru falownika energoelektronicznego napędu eKIT są następujące:

- falownik przeznaczony typowo dla pojazdów elektrycznych;
- moc falownika przy napięciu baterii 400 VDC większa od mocy maksymalnej silnika;
- szyna stałoprądowa falownika dopasowana pod względem napięcia roboczego do zakresu napięć baterii trakcyjnej;
- wytrzymałość napięciowa stopnia wyjściowego AC falownika wyższa od napięcia generowanego w uzwojeniu twornika silnika PMSM przez wirujące magnesy trwałe, przy maksymalnej dopuszczalnej prędkości wirnika;
- obciążalność prądowa stopnia wyjściowego AC falownika dopasowana do parametrów uzwojenia twornika i gwarantująca osiągnięcie wymaganych charakterystyk trakcyjnych;
- dostępne oprogramowanie do parametryzacji oprogramowania wewnętrznego falownika w celu jego optymalnego dopasowania do wymagań napędu eKIT. Możliwość implementacji w oprogramowaniu falownika różnych metod sterowania silnikiem PMSM: maksimum momentu do prądu (ang. skrót MTPA), praca z osłabianiem strumienia (ang. flux weakening), maksimum momentu do napięcia (ang. skrót MTPV).

Po rozeznaniu rynku uznano, że komercyjnie dostępnym falownikiem energoelektronicznym przeznaczonym dla pojazdów elektrycznych (EV) jest falownik firmy SEMIKRON typ SKAI 45A2 GD12-WQL. Podstawowe parametry techniczne tego falownika są następujące:

- maksymalne napięcie robocze szyny stałoprądowej: 800 VDC;
- prąd znamionowy po stronie AC: 300 A
- prąd maksymalny po stronie AC (60 s): ok. 420 A
- mierzalne napięcie na szynie stałoprądowej: 1000 VDC.

Przy napięciu baterii trakcyjnej 400 VDC, moc znamionowa (ciągła) dobranego falownika wynosi ok. 140 kW. Jest to moc w przybliżeniu o 5 % większa od mocy maksymalnej finalnie przyjętego rozwiązania modelowego silnika PMSM dla napędu eKIT.

Maksymalne napięcie międzyfazowe indukowane w uzwojeniu twornika modelowego silnika PMSM napędu eKIT, przy prędkości wirnika 10000 obr/min i temperaturze otoczenia 20 °C, wynosi ok. 790 V (wartość szczytowa), co gwarantuje ochronę falownika przed ewentualnym zniszczeniem w przypadku awarii napędu rozprędnzonego do prędkości maksymalnej.

### 4. Obwód elektromagnetyczny silnika PMSM dla modelowego napędu eKIT

Biorąc pod uwagę powyższe założenia techniczne i wymagania odnośnie charakterystyk elektromechanicznych napędu eKIT, zaprojektowano obwód elektromagnetyczny silnika PMSM o następujących danych podstawowych:

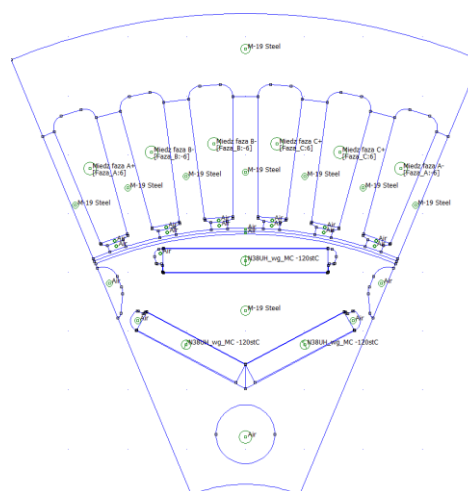
- wielkość mechaniczna silnika (wznios osi wału),  $H = 132$  mm;
- liczba biegunów magnetycznych,  $2p = 8$ ;
- średnica zewnętrzna rdzenia twornika,  $D_1 = 208$  mm;
- średnica wewnętrzna rdzenia twornika,  $D = 135$  mm;
- długość czynna rdzenia magnetycznego,  $L_{Fe} = 170$  mm;
- liczba żłobków stojana,  $Z_1 = 48$ ;
- liczba zwojów szeregowych na fazę,  $z_1 = 24$ ;
- klasa temperaturowa układu izolacyjnego uzwojenia twornika 200 °C;
- wysokość szczeliny powietrznej,  $\delta = 1$  mm;
- w wirniku magnesy typu NdFeB, klasa temperaturowa 200 °C.

Dobrana liczba biegunów magnetycznych skutkuje częstotliwością  $f_{max} = 666$  Hz przy  $n_{max} = 10000$  obr/min. Jest to częstotliwość gwarantująca stabilną pracę falownika energoelektronicznego. Zwiększenie liczby biegunów do  $2p = 10$ , przy tej samej prędkości obrotowej skutkuje już częstotliwością 833 Hz i potencjalnie koniecznością obniżenia  $n_{max}$  do ok. 9000 do 9500 obr/min w celu utrzymania stabilnej pracy falownika. Z uwagi na wysokie częstotliwości napięć i prądów w tworniku, w celu ograniczenia strat w żelazie rdzenia  $dP_{Fe}$ , rdzeń magnetyczny silnika (stojan i wirnik) wykonano z wykorzystaniem blach ele-

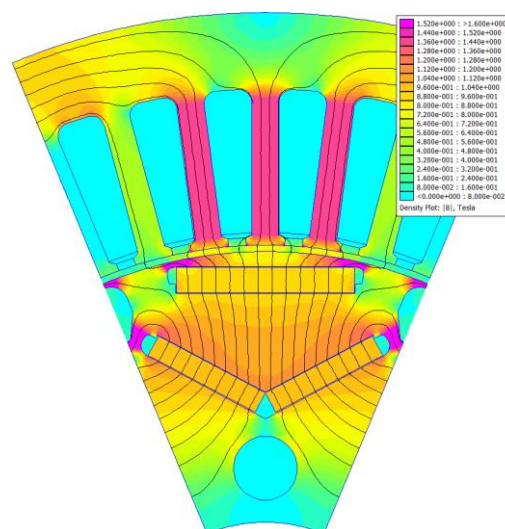
ktrotechnicznych prądnicowych typu NO27, o grubości blachy 0.27 mm.

Obecnie w silnikach PMSM dla pojazdów EV i HEV stosowane są różne typy uzwojenia twornika: klasyczne uzwojenia rozłożone quasi-sinusoidalnie o cewkach nawijanych typowym drutem nawojowym emaliowanym okrągłym, uzwojenia z cewkami skupionymi nawijanymi drutem okrągłym lub profilowym, uzwojenia rozłożone quasi-sinusoidalnie typu Hairpin, ze specjalnie wykonywanymi cewkami z drutem profilowym [2]. W przypadku napędów pojazdów EV o wysokich maksymalnych prędkościach obrotowych wirnika, stosowane są z reguły uzwojenia rozłożone quasi-sinusoidalnie, klasyczne lub typu Hairpin. Uzwojenia Hairpin są korzystne w przypadku przewidywanej masowej produkcji silników, z uwagi na możliwość wysokiego poziomu automatyzacji procesu wytwarzania tych uzwojeń, co jednak wymaga znacznych nakładów inwestycyjnych w oprzyrządowanie produkcyjne. Ponadto zaletą zastosowania uzwojenia Hairpin jest możliwość osiągnięcia stosunkowo wysokich współczynników wypełnienia żłobka twornika miedzią, co przekłada się korzystnie na wydajność odprowadzania strat ciepłych z uzwojenia [2], natomiast negatywną cechą tych uzwojeń jest nierównomierny rozkład gęstości prądu w drutach profilowych, zwłaszcza przy wysokich częstotliwościach prądów, co skutkuje zwiększeniem strat AC w uzwojeniu (strat związanych z efektem naskórkowości i efektem zbliżenia) [3]. Dla celów produkcji małoseryjnej korzystniejsze finansowo jest stosowanie klasycznych uzwojeń rozłożonych quasi-sinusoidalnie z cewkami nawijanymi drutem okrągłym i taki typ uzwojenia zastosowano w silnikach PMSM dla modelowego napędu eKIT. Zakładając, że napięcie baterii trakcyjnej w pojeździe EV jest z góry narzucone, a wymiary gabarytowe obwodu elektromagnetycznego, kształty rozkrojów blach prądnicowych stojana i wirnika, parametry magnetyczne i objętość magnesów trwałych w wirniku oraz układ chłodzenia silnika są dobrane prawidłowo dla zapewnienia momentu maksymalnego i znamionowego, istotnym parametrem wpływającym na kształt charakterystyk elektromechanicznych napędu trakcyjnego jest dobór liczby zwojów szeregowych  $z_1$  w fazie uzwojenia twornika. Dobór liczby zwojów  $z_1$  musi być realizowany z jednoczesnym uwzględnieniem parametrów napięciowych baterii trakcyjnej

i parametrów prądowych strony AC falownika energoelektronicznego zastosowanego w napędzie trakcyjnym.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny obwodu elektromagnetycznego modelowego silnika dla napędu eKIT (pokazano jeden biegun magnetyczny z uwagi na symetrię magnetyczną). W wirniku zastosowano rozmieszczenie magnesów w kształcie odwróconej litery  $\Delta$



Rys. 2. Rozkład linii strumienia magnetycznego i indukcja magnetyczna w silniku napędu eKIT w stanie bezprądowym (wymuszeniem jest tu jedynie wzbudzenie magnesami trwałymi), przy temperaturze magnesów  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ponadto, parametr  $z_1$  jest dobierany na drodze kompromisu pomiędzy kształtem charakterystyk elektromechanicznych napędu przy niskich i wysokich prędkościach obrotowych.

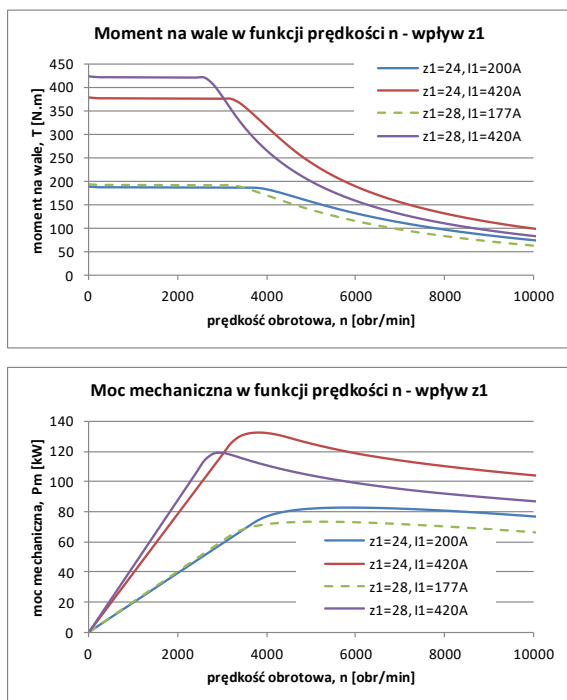
Pierwszym z kryteriów dla doboru liczby zwojów szeregowych  $z_1$  jest wymagana wartość momentu maksymalnego i znamionowego na wale silnika. Moment na wale silnika wzrasta

liniowo lub nieliniowo, zależnie od stanu nasycenia w obwodzie magnetycznym silnika, wraz ze wzrostem iloczynu liczby zwojów  $z_1$  i prądu obciążenia silnika  $I_1$ , czyli wraz ze wzrostem siły magnetomotorycznej wytwarzanej przez uzwojenie twornika (dotyczy to pierwszej strefy regulacji prędkości obrotowej – tzw. strefy ze stałym momentem, w której sterowanie silnikiem jest realizowane z zachowaniem warunku maximum momentu do prądu [4 ÷ 8]). Zatem dla spełnienia kryterium wymaganego momentu na wale, jednocześnie z doбором parametru  $z_1$  należy uwzględnić dopuszczalne obciążalności prądowe długotrwałą i chwilową stopnia AC falownika. W przypadku np. gdy parametr  $z_1$  wraz z wydajnością prądową falownika nie zapewnia osiągnięcia wymaganego momentu maksymalnego na wale silnika, można próbować zwiększyć liczbę zwojów szeregowych  $z_1$ . Zwiększenie  $z_1$  (bez zwiększenia przekroju przewodu i żłobków, a w efekcie objętości twornika) skutkuje jednak zwiększeniem strat cieplnych w uzwojeniu (oraz zmianą innych parametrów, jak prędkość bazowa  $n_{\text{baz}}$  wspomniana niżej), dlatego jak najwyższa wydajność prądowa falownika jest z reguły bardzo pożądana w napędach trakcyjnych.

Drugim z kryteriów doboru liczby zwojów szeregowych  $z_1$  jest wymagana wartość tzw. prędkości obrotowej bazowej  $n_{\text{baz}}$  napędu i wymagana szerokość tzw. strefy regulacji prędkości obrotowej z osłabianiem strumienia, z zapewnieniem odpowiedniej mocy przy prędkości maksymalnej. Dla spełnienia tego kryterium, przy doborze parametru  $z_1$  należy jednocześnie uwzględnić wartość napięcia baterii trakcyjnej. Prędkość bazowa  $n_{\text{baz}}$  jest graniczną prędkością obrotową wirnika, oddzielającą dwie strefy regulacji prędkości na charakterystykach elektromechanicznych napędu: strefę stałego momentu i strefę z osłabianiem strumienia magnetycznego [4 ÷ 8]. Granica między tymi strefami regulacji prędkości jest także określana jako punkt bazowy charakterystyki trakcyjnej. W strefie stałego momentu, tj. dla prędkości niższych od  $n_{\text{baz}}$ , liniowo ze zwiększaniem  $z_1$  wzrasta strumień główny w silniku i tym samym napięcie przemienne na zaciskach silnika. Gdy napięcie to osiągnie maksymalną dopuszczalną wartość, wynikającą m.in. z napięcia DC baterii trakcyjnej i zastosowanej techniki impulsowej modulacji fali napięcia na wyjściu AC falownika (w napędzie eKIT zastosowano technikę SV-PWM, od Space Vector - Pulse Width

Modulation), dalsze zwiększanie prędkości obrotowej napędu jest możliwe tylko przy osłabieniu strumienia głównego w silniku, tak by napięcie przemienne pomiędzy falownikiem, a silnikiem utrzymać stale na wartości dopuszczalnej [4 ÷ 8]. Przy zadanym napięciu DC baterii trakcyjnej, zwiększenie parametru  $z_1$  powoduje zatem przesunięcie punktu bazowego charakterystyk elektromechanicznych napędu w kierunku niższych prędkości i konieczność wcześniejszego aktywowania strefy regulacji prędkości z osłabianiem strumienia. Ponadto, zwiększanie  $z_1$  skutkuje koniecznością silniejszego osłabiania strumienia głównego w silniku w celu utrzymania dopuszczalnej wartości napięcia na jego zaciskach, z powodu zwiększenia napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika przez wirujące magnesy trwałe oraz z powodu większego przyrostu napięcia na reaktancji poprzecznej silnika  $X_q$  w stosunku do przyrostu napięcia na reaktancji podłużnej  $X_d$  (w silniku PMSM napędu eKIT i podobnych silnikach trakcyjnych, zazwyczaj obowiązuje zależność:  $X_q > X_d$ , silna reakcja poprzeczna twornika skutkuje zwiększeniem napięcia na zaciskach silnika). Zbyt wysoki parametr  $z_1$  skutkuje szybkim opadaniem charakterystyk elektromechanicznych momentu i mocy powyżej prędkości bazowej, zmniejszeniem mocy na wale osiąganey przy wysokich prędkościach i w efekcie może skutkować zwężeniem strefy regulacji prędkości z osłabianiem strumienia, tj. zmniejszeniem prędkości obrotowej maksymalnej napędu. Dla modelowego napędu eKIT liczbę zwojów szeregowych  $z_1$  dobrano tak, by prędkość bazowa mieściła się w granicach 3200 – 3800 obr/min, zależnie od prądu obciążenia silnika (zwiększanie prądu obciążenia silnika skutkuje zmniejszeniem prędkości bazowej, z uwagi na większe spadki napięć na reaktancjach synchronicznych w osi podłużnej  $X_d$  i poprzecznej  $X_q$ ). Na rysunku 3 pokazano charakterystyki elektromechaniczne silnika napędu eKIT o konstrukcji obwodu elektromagnetycznego jak na rysunku 1 obliczone dla wariantów doboru liczby zwojów szeregowych twornika:  $z_1 = 24$  oraz  $z_1 = 28$ . Obliczone charakterystyki potwierdzają powyższe spostrzeżenia dotyczące wpływu zmiany parametru  $z_1$  na charakterystyki elektromechaniczne napędu trakcyjnego z silnikiem PMSM. Analizując charakterystyki z rysunku 3 należy mieć na uwadze, że po zwiększeniu liczby zwojów z  $z_1 = 24$  na  $z_1 = 28$ , znamionowy moment na wale

silnika i te same warunki cieplne pracy silnika są uzyskiwane przy mniejszym znamionowym prądzie obciążenia  $I_1$ , który jest odwrotnie proporcjonalny do liczby zwojów  $z_1$  (w silniku jest utrzymana taka sama siła magnetomotoryczna uzwojenia twornika).

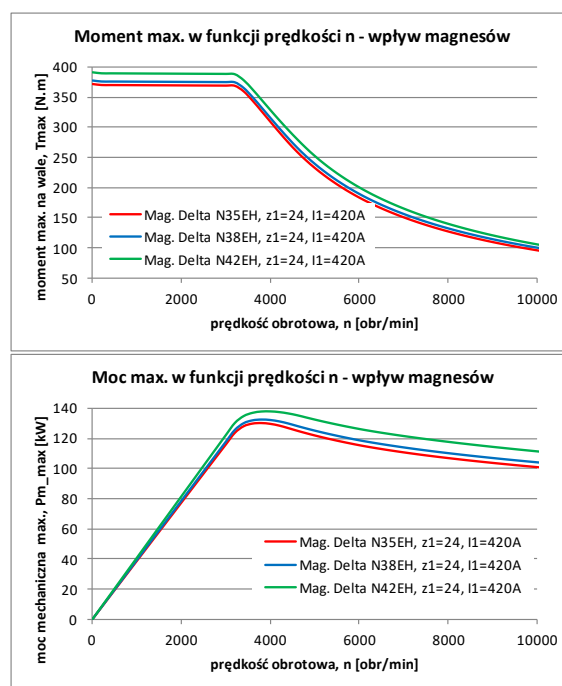


Rys. 3. Wpływ doboru liczby zwojów szeregowych  $z_1$  uzwojenia twornika w silniku jak na rysunku 1 na charakterystyki elektromechaniczne napędu eKIT

Jednakże jak wspomniano wyżej, pomimo zachowania tej samej wartości momentu znamionowego przy mniejszym prądzie  $I_1$ , zwiększenie parametru  $z_1$  skutkuje obniżeniem prędkości bazowej napędu. Maksymalna wartość prądu obciążenia silnika jest zwykle determinowana maksymalną chwilową obciążalnością prądową falownika, a nie ograniczeniami cieplnymi silnika PMSM, dlatego zwiększenie parametru  $z_1$  skutkuje podniesieniem momentu maksymalnego napędu. Oprócz wymienionych wyżej parametrów technicznych napędu trakcyjnego z silnikiem PMSM związanych z jego układem zasilania (obciążalność prądowa falownika, napięcie baterii trakcyjnej) i konstrukcją twornika (liczba zwojów szeregowych  $z_1$ ), na kształt charakterystyk elektromechanicznych napędu bardzo istotny wpływ ma konstrukcja obwodu elektromagnetycznego wirnika.

## 5. Wpływ konstrukcji obwodu elektromagnetycznego wirnika na charakterystyki elektromechaniczne napędu eKIT

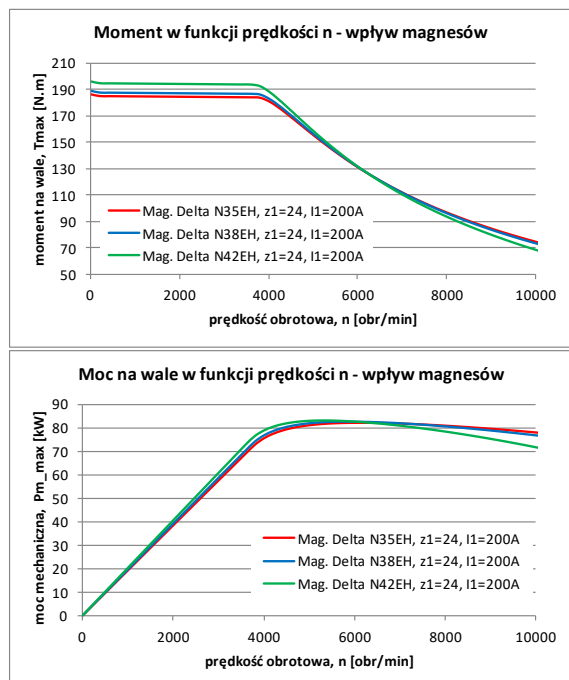
W silniku PMSM dla napędu eKIT zastosowano wirnik o konstrukcji z magnesami zagłębionymi, w którym magnesy współtworzące jeden biegun magnetyczny są ułożone w kształcie odwróconej litery  $\Delta$  (rys. 1). Zastosowanie wirnika z magnesami zagłębionymi skutkuje tym, że generowany w silniku moment elektromagnetyczny synchroniczny ma dwie składowe: składową związaną z siłą magnetomotoryczną wzbudzenia od magnesów trwałych  $T_{pm}$  oraz składową reluktancyjną  $T_{rel}$  [1]. Dzięki występowaniu znacznej składowej reluktancyjnej momentu, wymagany moment na wale silnika może być uzyskany z zastosowaniem mniejszej objętości coraz droższych magnesów trwałych NdFeB. Charakterystyki elektromechaniczne napędu trakcyjnego z silnikiem PMSM w znacznym stopniu zależą od konstrukcji obwodu elektromagnetycznego wirnika.



Rys. 4. Charakterystyki elektromechaniczne napędu eKIT o konstrukcji wirnika jak na rys. 1, obliczone przy założeniu zastosowania magnesów trwałych o trzech różnych materiałach magnetycznych dla przypadku pełnego przeciążenia silnika

Czynnikami wpływającymi na te charakterystyki są tu przede wszystkim zastosowana aranżacja rozmieszczenia magnesów trwałych w wirniku (wraz z doбором odpowiednich mos-

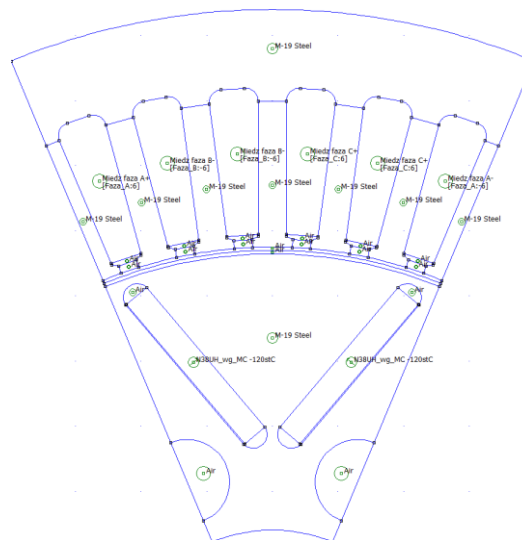
tków magnetycznych zmniejszających rozproszenie strumienia wzbudzenia od magnesów trwałych – wpływ rozkroju blach wirnika) oraz dobór parametrów magnetycznych magnesów trwałych.



Rys. 5. Charakterystyki elektromechaniczne napędu eKIT o konstrukcji wirnika jak na rys. 1, obliczone przy założeniu zastosowania magnesów trwałych w trzech różnych materiałach magnetycznych dla przypadku obciążenia silnika zbliżonego do znamionowego

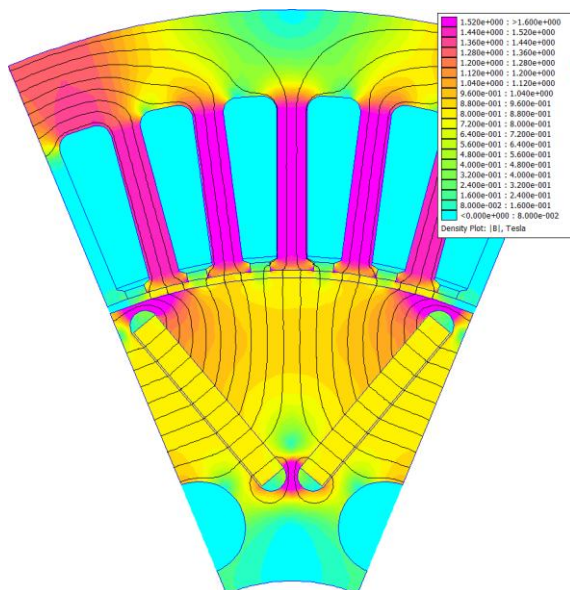
Na rysunkach 4 i 5 pokazano charakterystyki elektromechaniczne modelowego napędu eKIT o konstrukcji z rysunku 1 (układ magnesów odwrócone  $\Delta$ ), obliczone dla trzech wariantów zastosowanych magnesów trwałych, N35EH, N38EH oraz N42EH, przy maksymalnym przeciążeniu silnika i przy obciążeniu zbliżonym do znamionowego. Liczby występujące w nazwie magnesu reprezentują parametr BH<sub>max</sub> magnesu, tzn. maksymalną energię magnetyczną jaką jest w stanie dostarczyć dany magnes. Główny wniosek z analizy charakterystyk pokazanych na rysunkach 4 i 5 jest taki, że stosując w silniku napędu eKIT magnesy trwałe o większej energii magnetycznej, można zwiększyć moment osiąganym na wale silnika w pierwszej strefie regulacji prędkości, czyli do prędkości bazowej  $n_{\text{baz}}$ . Jednocześnie obliczone charakterystyki elektromechaniczne momentu i mocy na wale napędu w strefie regulacji prędkości z osłabianiem strumienia magnetycznego

uległy poprawie w przypadku dużego przeciążenia silnika, a niewielkiemu pogorszeniu w przypadku obciążeń zbliżonych do znamionowego. Decyzja o wyborze typu magnesów trwałych do zastosowania w silniku PMSM zależy zatem od tego, w jakim obszarze charakterystyk trakcyjnych napęd pojazdu będzie pracował najczęściej. Na rysunkach 6 i 7 zaprezentowano jeden z analizowanych wariantów obwodu elektro-magnetycznego silnika napędu eKIT, w którym magnesy trwałe współtworzące pojedynczy biegun magnetyczny wirnika są rozmieszczone w kształcie litery V. Zastosowano tu magnesy N38EH. Objętość magnesów współtworzących jeden biegun wirnika jest nieco mniejsza dla obwodu elektromagnetycznego z rysunku 6 niż w przypadku konstrukcji z rysunku 1, odpowiednio wynosi ona  $3.81E-5 \text{ m}^3$  i  $4.16E-5 \text{ m}^3$ .



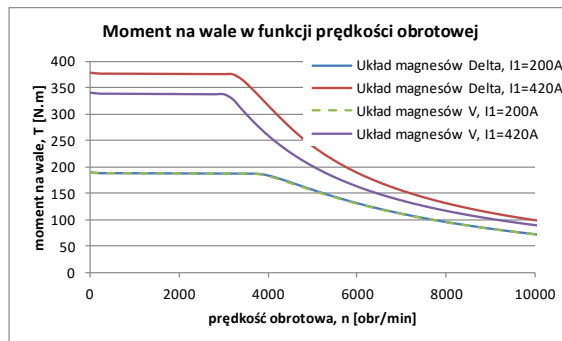
Rys. 6. Przekrój poprzeczny obwodu elektro-magnetycznego jednego z analizowanych wariantów konstrukcyjnych modelowego silnika dla napędu eKIT, z magnesami wirnika zaaranżowanymi w kształcie litery V (reszta danych konstrukcyjnych bez zmian w stosunku do silnika z rysunku 1)

Na rysunkach 8 i 9 porównano charakterystyki elektromechaniczne napędu eKIT o konstrukcjach obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM jak na rysunkach 1 i 6. Z kształtu tych charakterystyk można wnioskować, że przy niskim i znamionowym obciążeniu silnika, obie konstrukcje wirnika skutkują praktycznie identycznymi charakterystykami momentu na wale i mocy mechanicznej w funkcji prędkości obrotowej.

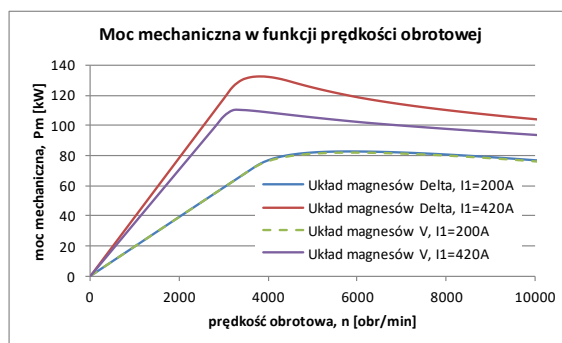


Rys. 7. Rozkład linii strumienia magnetycznego i indukcja magnetyczna obliczone dla wariantu konstrukcyjnego silnika napędu eKIT z rozmieszczeniem magnesów typu V w stanie bezprądowym, przy temperaturze magnesów 120 °C

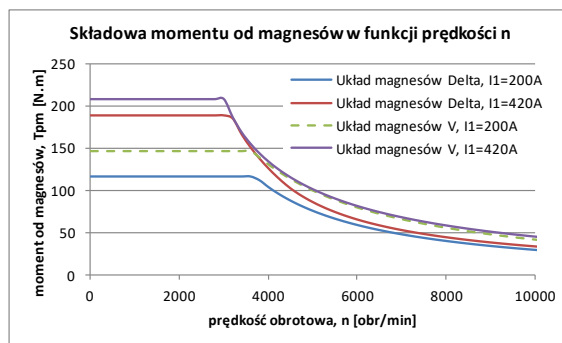
Przewaga rozwiązania wirnika z rozmieszczeniem magnesów w kształcie odwróconej litery Δ ujawnia się przy wysokich przeciążeniach silnika. Silnik jak na rysunku 1 charakteryzuje się w całym zakresie obciążeń i prędkości wyższą składową reluktancyjną momentu  $T_{rel}$  i niższą składową momentu od magnesów trwałych  $T_{pm}$  w stosunku do silnika z rozmieszczeniem magnesów w wirniku typu V (rys. 10 i 11). Ponadto, w silniku jak na rysunku 1, przy wysokich obciążeniach składowa reluktancyjna  $T_{rel}$  przeważa nad składową od magnesów trwałych  $T_{pm}$  w całym zakresie prędkości obrotowych, przy czym w górnym zakresie prędkości udział składowej  $T_{rel}$  w wypadkowym momencie na wale jest wyraźnie dominujący (rys. 12). W efekcie silnik z rysunku 1, z magnesami typu odwrócone Δ jest zdecydowanie bardziej podatny na osłabianie strumienia, co przekłada się na wyraźnie korzystniejsze charakterystyki elektromechaniczne w górnym zakresie prędkości obrotowych napędu eKIT.



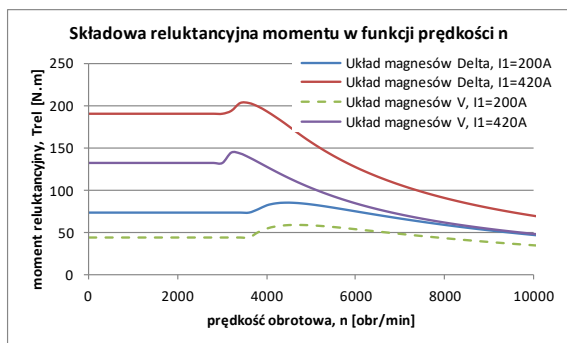
Rys. 8. Porównanie charakterystyk elektromechanicznych napędu eKIT o konstrukcji obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM jak na rysunkach 1 i 6 –  $T = f(n)$



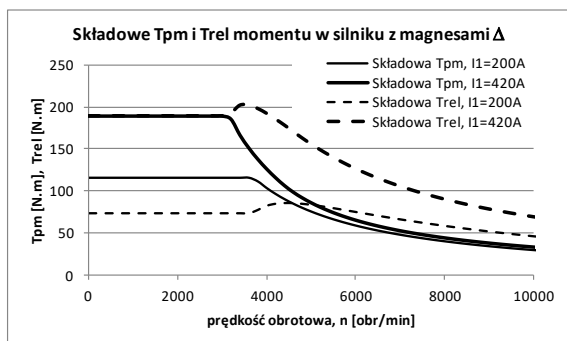
Rys. 9. Porównanie charakterystyk elektromechanicznych napędu eKIT o konstrukcji obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM jak na rysunkach 1 i 6 –  $P_m = f(n)$



Rys. 10. Składowa momentu od wzbudzenia magnesami trwałymi  $T_{pm}$  w funkcji prędkości  $n$ , dla wariantów konstrukcyjnych wirnika z rys. 1 i 6, przy obciążeniu zbliżonym do znamionowego i przy pełnym przeciążeniu



Rys. 11. Składowa reluktancyjna momentu  $T_{rel}$  w funkcji prędkości  $n$ , dla wariantów konstrukcyjnych wirnika z rys. 1 i 6, przy obciążeniu zbliżonym do znamionowego i przy pełnym przeciążeniu



Rys. 12. Składowe  $T_{pm}$  i  $T_{rel}$  w funkcji prędkości  $n$ , obliczone dla wariantu wirnika jak na rys. 1 (układ magnesów odwrócone  $\Delta$ ), przy obciążeniu zbliżonym do znamionowego i przy pełnym przeciążeniu

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono kilka zabiegów konstrukcyjnych, które mogą być wykorzystane do kształtowania charakterystyk elektromechanicznych elektrycznego napędu trakcyjnego z silnikiem PMSM. Rozważania oparto na projekcie modelowego napędu eKIT, opracowywanego w Łukasiewicz-KOMEL w ramach projektu POIR realizowanego wspólnie z NYSA Zakład Pojazdów S.A.

Celem artykułu z jednej strony było wykazanie, że projektowanie trakcyjnego napędu elektrycznego z silnikiem PMSM przeznaczonego dla pojazdów EV, o narzuconych wymaganiach względem charakterystyk elektromechanicznych napędu, jest procesem złożonym, w którym należy wziąć pod uwagę wiele czynników konstrukcyjnych wpływających na kształt tychże charakterystyk. Z drugiej strony celem było wykazanie, że nawet na późnym etapie projektowania napędu, gdy dobrane są już np. wymiary gabarytowe silnika, typ uzwojenia

twornika, a nawet rozkroje blach stojana i wirnika, poprzez drobne zmiany konstrukcyjne w obrębie danych nawojowych, danych materiałowych wirnika (materiał magnetyczny magnesów trwałych) lub poprzez zmianę konstrukcji wirnika, nadal istnieje możliwość dość znaczącego modyfikowania charakterystyk trakcyjnych napędu. Stwarza to w pewnym zakresie możliwość unifikacji rozwiązań konstrukcyjnych napędów trakcyjnych dla różnych pojazdów EV, o zbliżonych, jednak nieco odmiennych wymaganiach względem charakterystyk trakcyjnych. Obwód elektromagnetyczny silnika PMSM opracowywanego na potrzeby napędu eKIT może być np. zmodyfikowany w celu dopasowania go do pojazdów wymagających nieco wyższego momentu maksymalnego na wale, a jednocześnie o mniejszych wymaganiach względem prędkości maksymalnej napędu (i odwrotnie). Można tego dokonać przez zmianę liczby zwojów szeregowych w fazie uzwojenia twornika lub przez zmiany konstrukcyjne w wirniku, bez korygowania konstrukcji twornika. Konieczne zmiany w konstrukcji wirnika mogą czasem polegać jedynie na samej zmianie materiału magnetycznego magnesów trwałych, na materiał o większej lub mniejszej energii magnetycznej, w efekcie której to zmiany kształtowane są istotnie (podnoszone lub obniżane) charakterystyki elektromechaniczne napędu w górnym i dolnym zakresie prędkości obrotowych.

## Literatura

- [1]. E. Król, T. Wolnik T., „Nowatorski napęd elektryczny autobusu miejskiego”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2019, str. 131-136, ISSN 0239-3646.
- [2]. N. Bianchi and G. Berardi, “Analytical Approach to Design Hairpin Windings in High Performance Electric Vehicle Motors”, 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2018, pp. 4398-4405, doi: 10.1109/ECCE.2018.8558383.
- [3]. M. Popescu and D. G. Dorrell, “Skin effect and proximity losses in high speed brushless permanent magnet motors”, 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013, pp. 3520-3527, doi: 10.1109/ECCE.2013.6647164.
- [4]. Jahns T.M., Kliman G.B., Neumann T.W., “Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives”, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 22, No. 4, pp. 738-747, July/Aug. 1986.
- [5]. Morimoto S., Hatanaka K., Tong Y., Takeda Y., Hirasa T., “Servo Drive System and Control Characteristics of Salient Pole Permanent Magnet Syn-



chronous Motor”, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 29, No. 2, pp. 338-343, Mar./Apr. 1993.

[6]. Morimoto S., Sanada M., Takeda Y., Taniguchi K., “Optimum Machine Parameters and Design of Inverter-Driven Synchronous Motors for Wide Constant Power Operation”, Ind. Appl. Society Annual Meeting, 1994, Conference Record of the 1994 IEEE, pp. 177-182.

[7]. Morimoto S., Sanada M., Takeda Y., “Wide-Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-Performance Current Regulator”, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 30, No. 4, pp. 920-926, July/Aug. 1994.

[8]. Schiferl R.F., Lipo T.A., “Power Capability of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motors in Variable Speed Drive Applications”, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 26, No. 1, pp. 115-123, Jan./Feb. 1990.

### Autor

dr inż. Robert Rossa

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL  
40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188

### Informacje dodatkowe

Projekt „*Uniwersalny elektryczny zestaw napędowy do pojazdów elektrycznych z modułowym zasobnikiem baterii (eKIT)*”, współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, na podstawie Umowy o dofinansowanie z dnia 16-07-2020 nr POIR.01.01.01-00-1245/19.



Narodowe Centrum  
Badań i Rozwoju

Unia Europejska  
Europejski Fundusz  
Rozwoju Regionalnego

