

Robert Rossa, Tomasz Wolnik  
BOBRME „Komel”, Katowice

## PORÓWNANIE DWÓCH KONSTRUKCJI SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI DO POJAZDU TERENOWEGO TYPU QUAD Z NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM

### COMPARISON OF TWO CONSTRUCTIONS OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS DEDICATED TO ALL-TERRAIN ELECTRIC VEHICLE TYPE QUAD

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono i porównano dwa rozwiązania konstrukcyjne silników synchronicznych z magnesami trwałymi dedykowanych do napędu pojazdu rekreacyjnego typu Quad o napędzie elektrycznym. Obie konstrukcje są maszynami 6-biegunowymi, mają tę samą średnicę zewnętrzną pakietów blach stojana, tę samą długość pakietów blach oraz tę samą topologię rozmieszczenia magnesów trwałych w wirnikach, (w kształcie litery V, ta sama objętość magnesów). Głównym elementem odróżniającym obie konstrukcje silnika jest sposób wykonania stojanów uzwojonych. W pierwszym rozwiązaniu zastosowano klasyczne 1-warstwowe uzwojenie rozłożone quasi-sinusoidalnie, o liczbie żłobków na biegun i fazę  $q = 2$ . W drugim rozwiązaniu zastosowano uzwojenie stojana z cewkami skupionymi i liczbą żłobków na biegun i fazę  $q = 0.5$ . W artykule porównano uzyskane obliczeniowo parametry elektromechaniczne obu rozwiązań konstrukcyjnych silników dla różnych stanów pracy (obciążenie znamionowe i duże przeciążenie momentem) oraz omówiono wpływ zastosowania uzwojenia o cewkach skupionych na osiągi silnika, jego gabaryty mechaniczne i masę.

**Abstract:** The paper deals with two different constructions of permanent magnet synchronous motors dedicated to a pure electric drive of all-terrain vehicle type Quad. Both constructions are a 6-pole machines, they have the same outer diameter and length of stator core and the same V-shaped arrangement of permanent magnet distribution in a rotor (the same volume of permanent magnet material). The main difference between two presented motor constructions lies in the design of wound stator. In the first solution a common 1-layer quasi-sinusoidal distributed winding is used with number of slots per pole per phase  $q = 2$ . In the second solution a concentrated coils are used in the stator winding and the number of slots per pole per phase is  $q = 0.5$ . In the paper the electromechanical parameters of these two motor constructions calculated for different operating conditions (nominal load and large torque overload) are described. The impact of using of winding with concentrated coils on motor performance, dimensions and mass is described.

**Słowa kluczowe:** silniki synchroniczne, magnesy trwałe, uzwojenia z cewkami skupionymi, pojazdy elektryczne

**Keywords:** synchronous motors, permanent magnets, concentrated coil windings, electric vehicles

### 1. Wstęp

W ostatnich latach w Instytucie Komel prowadzone są liczne prace dotyczące elektromobilności. Zelektryfikowano lub jest elektryfikowanych kilka pojazdów o różnym przeznaczeniu, m.in. małe samochody osobowe, samochody dostawcze o masie całkowitej do 3.5 t oraz pojazdy sportowo-rekreacyjne, w tym pojazdy terenowe typu Quad (określane także jako ATV od ang. All Terrain Vehicle). W elektryfikowanych w Instytucie pojazdach stosowane są silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (ang. Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) o promieniowym rozplywie strumienia magnetycznego, z uzwojeniem stojana wykonanym klasycznie z uży-

ciem pasm fazowych rozłożonych quasi-sinusoidalnie. Zastosowanie silników PMSM wynika z zalet tego typu maszyn elektrycznych: najwyższej sprawności spośród wszystkich typów silników elektrycznych, utrzymywaniem wysokiej sprawności w szerokim zakresie prędkości obrotowych, wysokich wartości momentu znamionowego i momentu maksymalnego osiągniętych z jednostki masy lub objętości silnika, wysokiej chwilowej przeciążalności momentem, wysokiej dynamiki i precyzji regulacji parametrów napędu.

W niniejszym artykule przedstawiono i porównano dwa rozwiązania konstrukcyjne silników PMSM dedykowanych do napędu pojazdu rekreacyjnego typu Quad o napędzie w pełni

elektrycznym, bateryjnym. Obie konstrukcje są maszynami 6-biegowymi, mają tę samą średnicę zewnętrzną pakietów blach stojana, tę samą długość pakietów blach, tę samą topologię rozmieszczenia magnesów trwałych w wirniku (w kształcie litery V) oraz tę samą objętość magnesów. Głównym elementem odróżniającym obie konstrukcje silnika jest sposób wykonania stojanów uzwojonych. W pierwszym rozwiązaniu zastosowano klasyczne 1-warstwowe uzwojenie rozłożone, o liczbie żłobków na biegun i fazę  $q=2$ . W drugim rozwiązaniu zastosowano uzwojenie stojana z cewkami skupionymi i liczbą żłobków na biegun i fazę  $q=0.5$ .



Rys.1. Elektryfikowany pojazd terenowy Quad. Pod siedzeniem kierowcy widoczny jest silnik PMSM.

## 2. Wymagania techniczne napędu elektrycznego dla pojazdu Quad

Głównymi podzespołami nowoczesnego napędu pojazdu w pełni elektrycznego są silnik elektryczny i falownik (przekształtnik energoelektroniczny) zasilający tenże silnik, z zaimplementowanym odpowiednim algorytmem sterowania momentem i prędkością.

Przy projektowaniu napędu elektrycznego pojazdu Quad, pokazanego na rys. 1, zastosowano silnik typu PMSM. Dla potrzeb elektryfikacji pojazdu przyjęto i zaprojektowano odmianę silnika PMSM z magnesami trwałymi mocowanymi wewnątrz rdzenia magnetycznego wirnika (ang. skrót Interior PMSM, IPMSM) [1]. Wirniki silników IPMSM mają dwie osie symetrii magnetycznej: oś podłużną  $d$  i poprzeczną  $q$  [2]. Dzięki różnicy wartości permeancji w obu osiach magnetycznych wirnika, użyteczny moment synchroniczny silnika IPMSM ma dwie składowe: składową od magnesów trwałych i składową reluktancyjną [2]. Skutkuje to dużymi wartościami momentu

znamionowego i maksymalnego przy założonej objętości i masie silnika.

W celu zminimalizowania kosztów konwersji napędu ze spalinowego na elektryczny przyjęto, że zastosowana w elektryfikowanym pojeździe Quad skrzynia biegów zostanie zachowana bez zmian. Charakterystyki elektromechaniczne silnika elektrycznego PMSM muszą być dostosowane do parametrów skrzyni biegów.

Moc silnika stosowanego w pojeździe typu Quad nie może być większa niż 15 kW. To ograniczenie wynika z przepisów ministerialnych dotyczących warunków technicznych jakie muszą spełniać pojazdy o mocy większej niż 15 kW (pojazdy Quad nie spełniają tych warunków). Przyjęto, że moc znamionowa silnika PMSM wynosi  $P_N = 14.9$  kW.

Kolejnym założeniem projektu jest przyjęcie maksymalnej siły uciągu pojazdu Quad z napędem elektrycznym na zbliżonym poziomie jak dla pojazdu spalinowego. Ponieważ skrzynię biegów pozostawiono bez zmian (te same współczynniki przełożenia), to silnik PMSM musi zapewnić zbliżoną wartość momentu maksymalnego na wale do osiągniętej przez silnik spalinowy. Wartość ta wynosi  $T_{max} = 80$  N·m.

Przyjęto także założenia dotyczące sposobu sterowania silnikiem i kształtu jego charakterystyk elektromechanicznych. Przyjęto m.in., że prędkość silnika PMSM będzie regulowana dwustrefowo  $[3 \div 7]$ , z wykorzystaniem techniki osłabiania strumienia magnetycznego głównego w drugiej strefie regulacji.

Część energoelektroniczną napędu elektrycznego pojazdu Quad zaprojektowano w oparciu o falowniki typu SKAI firmy Semikron, ze stopniem mocy zbudowanym na tranzystorach MOSFET 200 V.

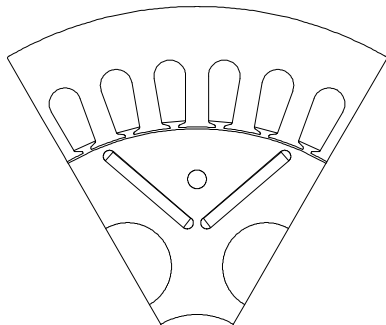
W elektryfikowanym pojeździe Quad zastosowano baterię litowo-polimerową o parametrach: pojemność 7 kWh, znamionowe napięcie 133 V<sub>DC</sub>, znamionowy prąd ciągły 200 A, dopuszczalny prąd chwilowy > 300 A.

## 3. Silnik PMSM z cewkami rozłożonymi

Dla przyjętych założeń technicznych napędu elektrycznego pojazdu terenowego Quad, zaprojektowano silnik PMSM o promieniowym rozplywie strumienia magnetycznego, z uzwojeniem stojana wykonanym klasycznie z użyciem pasm fazowych o cewkach rozłożonych quasi-sinusoidalnie (rys. 2). Silnik ten posiada następujące parametry podstawowe:

- moc znamionowa  $P_N = 14.9$  kW;
- moment znamionowy  $T_N = 39.5$  N·m;
- prędkość znamionowa  $n_N = 3600$  min<sup>-1</sup>;
- liczba biegunów magnetycznych  $2p = 6$ ;
- średnica zewnętrzna pakietu blach stojana 261 mm (wznios osi wału  $H = 160$  mm);
- długość pakietu blach  $L_{Fe} = 50$  mm;
- układ magnesów w wirniku: w kształcie litery "V" dla każdego biegunu;
- magnesy typu NdFeB;
- chłodzenie wodne;
- napięcie znamionowe baterii 133 V<sub>DC</sub>;
- zakładane maksymalne napięcie międzyfazowe na zaciskach silnika 73 V<sub>RMS</sub>.

Silnik PMSM z cewkami rozłożonymi wykonano i przebadano laboratoryjnie. Wyniki badań w pełni potwierdziły poprawność parametrów otrzymanych obliczeniowo.

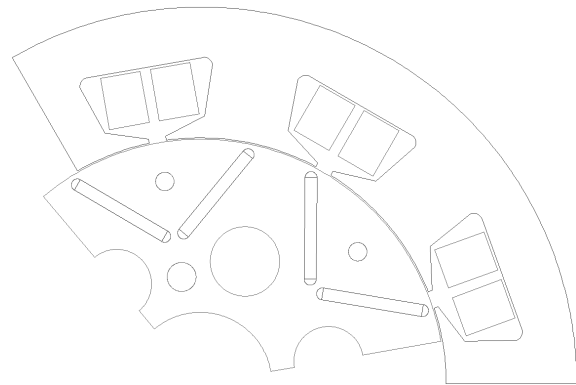


Rys.2. Fragment przekroju poprzecznego silnika PMSM z cewkami rozłożonymi quasi-sinusoidalnie, do elektryfikowanego pojazdu Quad. Liczba żłobków stojana  $Z_1=36$ , liczba biegunów  $2p=6$ , liczba żłobków na biegun i fazę  $q=2$

Masa elektryfikowanego pojazdu Quad z zaprojektowanym napędem elektrycznym wykorzystującym silnik PMSM oraz baterię litowo-polimerową o wymaganej pojemności przekracza nieznacznie masę zakładaną pierwotnie w projekcie. Ograniczenie masy dopuszczalnej pojazdu Quad wynika z warunków homologacji. Podjęte próby zmniejszenia masy całego napędu elektrycznego i samego silnika, polegające m.in. na powiększeniu kanałów powietrznych w pakiecie blach wirnika i "odchudzeniu" kadłuba nie były zadowalające. Postanowiono zaprojektować drugi silnik PMSM, z zastosowaniem tzw. cewek skupionych w pasmach fazowych uzwojenia stojana (ang. skrót CW-PMSM od Concentrated Winding PMSM).

#### 4. Silnik PMSM z cewkami skupionymi

W projekcie silnika PMSM z cewkami skupionymi do pojazdu terenowego Quad przyjęto, że średnica zewnętrzna pakietu blach stojana, długość pakietów blach stojana i wirnika oraz liczba biegunów magnetycznych pozostają bez zmian. Bez zmian pozostały też wymiary, ilość i parametry magnetyczne stosowanych magnesów trwałych. Magnesy w wirniku rozmieszczono w kształcie litery "V" dla każdego z sześciu biegunów magnetycznych. Zmianie uległa jednak średnica podziałowa pakietów blach stojana i wirnika. Całkowicie zmieniono konstrukcję pakietu blach stojana (rozkroju blach i sposobu ich montażu) oraz sposób wykonania uzwojenia stojana (twornika). Uzwojenie nowej wersji silnika CW-PMSM wykonano z zastosowaniem cewek skupionych, jako uzwojenie o ułamkowej liczbie żłobków na biegun i fazę  $q = 0.5$ .



Rys.3. Fragment przekroju poprzecznego silnika CW-PMSM z cewkami skupionymi, do elektryfikowanego pojazdu Quad. Liczba żłobków stojana  $Z_1=9$ , liczba biegunów  $2p=6$ , liczba żłobków na biegun i fazę  $q=0.5$

Zaprojektowany dla pojazdu Quad silnik CW-PMSM nie był do tej pory wykonany i przebadany. Wiarygodność i dokładność oprogramowania (opracowanego w ramach projektu badawczego N N510 512440) zastosowanego do obliczeń elektromagnetycznych tego silnika została potwierdzona wcześniej na innym wykonanym i przebadanym silniku typu CW-PMSM. Dodatkowo obliczenia sprawdzające silnika typu CW-PMSM do pojazdu Quad wykonano również za pomocą oprogramowania Maxwell 2D/3D (obecnie firmy Ansys).

## 5. Porównanie silników PMSM oraz CW-PMSM

Silnik PMSM osiąga moc znamionową  $P_2 = P_N = 14.9$  kW przy prądzie  $I_1 = I_{1N} = 155$  A. Maksymalny dopuszczalny chwilowo prąd  $I_{1max}$  wynosi 345 A, a ograniczenie to wynika z konstrukcji zastosowanego falownika. Dla tych samych wartości prądów  $I_{1N}$  i  $I_{1max}$  przeprowadzono obliczenia porównawcze dla silnika typu CW-PMSM, a wyniki zestawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Wyniki obliczeń porównywanych silników CW-PMSM i PMSM dla obciążenia znamionowego,  $I_1=155$ A

	$I_1$ A	$\beta_{opt}$ °el	$T_e$ Nm	$U_1$ V <sub>rms</sub>
IPMSM	155	126	39.4	64.6
CW-IPMSM	155	122	41.6	71.48

Tabela 1-cd.

	$P_2$ W	$\Delta P_{Cu}$ W	$\Delta P_{Fe}$ W	$\Sigma \Delta P$ W	$\eta$ ---
IPMSM	14852	305.6	220.3	525.9	0.966
CW-IPMSM	15682	252.3	272	524.3	0.968

Tabela 2. Wyniki obliczeń porównywanych silników CW-PMSM i PMSM dla pracy z chwilowym przeciążeniem,  $I_1=345$ A

	$I_1$ A	$\beta$ °el	$T_e$ Nm	$U_1$ V <sub>rms</sub>
IPMSM	345	138	82.8	75.3
CW-IPMSM	345	133	75.8	83.3

Tabela 2-cd.

	$P_2$ W	$\Delta P_{Cu}$ W	$\Delta P_{Fe}$ W	$\Sigma \Delta P$ W	$\eta$ ---
IPMSM	31213	1514	318.4	1832.4	0.945
CW-IPMSM	28574	1249.8	428	1677.8	0.944

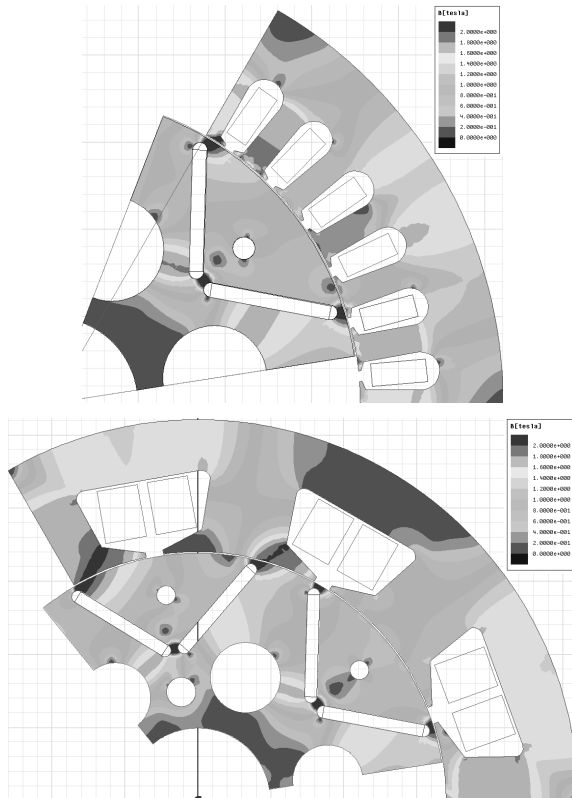
Obliczenia wykonano dla tej samej prędkości obrotowej wirnika  $n_N = 3600$  min<sup>-1</sup>. Przy tej prędkości obrotowej nie jest konieczne stosowanie osłabiania strumienia magnetycznego głównego [3 ÷ 7]. Założono, że oba silniki są sterowane wg takiego algorytmu, by uzyskać maksymalną możliwą wartość momentu elektromagnetycznego  $T_e$  przy danym prądzie stojana  $I_1$ , czyli wg strategii optimum  $T_e/I_1$ . Ten optymalny stan pracy oba silniki osiągają przy nieco różnych kątach fazowych  $\beta = \beta_{opt}$  wskazu prądu  $I_1$  względem osi  $d$  w dwufazowym układzie odniesienia  $dq0$  [7].

Z tabeli 1 wynika, że przy prądzie  $I_1 = 155$  A silnik CW-PMSM jest w stanie osiągnąć nieznacznie większy moment elektromagnetyczny  $T_e$ . Suma strat w miedzi  $\Delta P_{Cu}$  i rdzeniu  $\Delta P_{Fe}$  przy  $I_1 = 155$  A jest dla obu silników praktycznie taka sama. Również straty mechaniczne  $\Delta P_m$  obu silników są sobie równe (w tabelach 1 i 2 starty te pominięto gdyż oba silniki są chłodzone wodą a nie powietrzem).

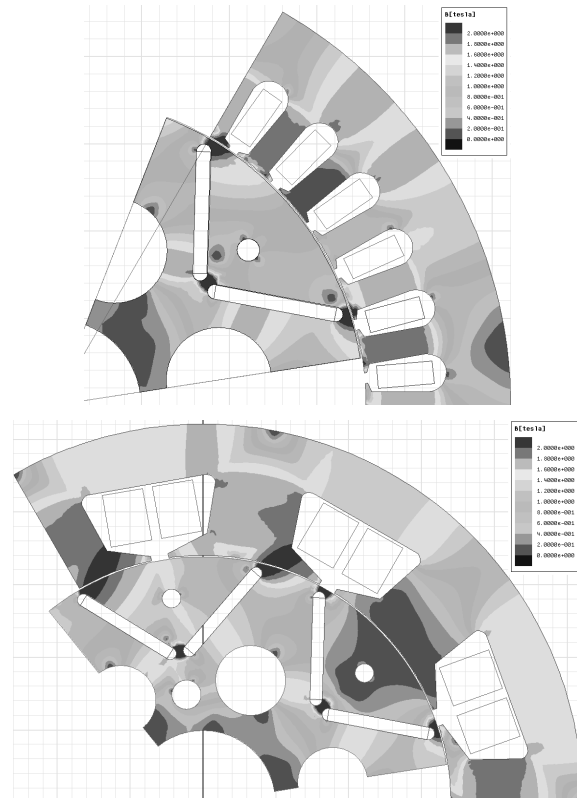
Ze względu na odprowadzanie strat mocy z silnika, korzystniej kształtuje się rozkład strat w silniku CW-PMSM. W stosunku do silnika PMSM, w silniku CW-PMSM większy jest udział strat  $\Delta P_{Fe}$ , a mniejszy udział strat  $\Delta P_{Cu}$ . Ciepło wytwarzane w wyniku występowania strat  $\Delta P_{Fe}$  można łatwo odprowadzić z silnika, gdyż w silnikach PMSM i CW-PMSM straty te występują prawie w całości w rdzeniu stojana, który ma bezpośredni kontakt z chłodzonym kadłubem. Trudniej jest odprowadzić z silnika ciepło związane ze stratami  $\Delta P_{Cu}$ , zwłaszcza tą jego część, która jest wytwarzana w połączeniach czołowych uzwojeń, a różnica pomiędzy długością połączeń czołowych analizowanych silników jest znacząca na korzyść silnika CW-PMSM (91 mm zamiast 152 mm jednostronnie).

Uwzględniając powyższe uwagi dotyczące rozwijanego momentu i strat mocy można stwierdzić, że analizowany silnik CW-PMSM będzie mieć nieco większą moc znamionową  $P_N = 15.7$  kW w stosunku do silnika PMSM (14.9 kW). Wynika to z nieco większej wartości momentu elektromagnetycznego przy tym samym prądzie i z lepszych warunków chłodzenia.

Z tabeli 2 wynika, że parametry pracy silnika CW-PMSM przy chwilowym przeciążeniu maksymalnym dopuszczalnym prądem  $I_{1max} = 345$  A będą nieco gorsze w stosunku do silnika PMSM. Przyczyną jest szybsze nasycenie się obwodu magnetycznego silnika CW-PMSM przy wzroście obciążenia, co można wywnioskować analizując rys. 4 i rys. 5. Z uwagi na większe nasycenie obwodu magnetycznego, silnik CW-PMSM rozwija mniejszy moment maksymalny przy tym samym prądzie przeciążenia  $I_{1max}$ . Jednocześnie jednak, podczas chwilowego przeciążenia suma strat mocy jest także mniejsza w silniku CW-PMSM, w wyniku czego sprawność w tym stanie pracy jest taka sama dla obu silników.



Rys.4. Rozkład indukcji magnetycznej w silnikach PMSM i CW-PMSM przy pracy znamionowej z prądem  $I_{IN}=155$  A



Rys.5. Rozkład indukcji magnetycznej w silnikach PMSM i CW-PMSM przy przeciążeniu chwilowym prądem  $I_{1max}=345$  A

W tabelach 3 i 4 zestawiono wybrane długości i masy obliczone dla silnika PMSM z cewkami rozłożonymi quasi-sinusoidalnie i silnika CW-PMSM, zaprojektowanych dla elektryfikowanego pojazdu Quad. Zgodnie z danymi z tabeli 3, jednostronny wysięg czoł uzwojenia stojana  $L_{cw}$  zmniejsza się w przypadku zastosowania uzwojenia z cewkami skupionymi z 40 mm do 25 mm, czyli maleje on aż o ok. 37 %. Jednocześnie długość uzwojonego pakietu stojana  $L_{su}$  maleje ze 130 mm do 100 mm, czyli o 23 %. Znacząco zmniejsza się także średnia długość połączeń czołowych  $L_c$  dla silnika CW-PMSM, ze 152 mm na 91 mm, czyli aż o ok. 40 %.

Tabela 3. Wybrane wymiary konstrukcyjne silników PMSM i CW-PMSM dla pojazdu Quad

	$L_{Fe}$ mm	$L_{cw}$ mm	$L_{su}$ mm	$L_c$ mm
IPMSM	50	40	130	152
CW-IPMSM	50	25	100	91

Tabela 4. Zestawienie mas miedzi i pakietów blach (rdzeni) silników PMSM i CW-PMSM

	masa miedzi kg	masa pakietu blach kg	suma mas kg
IPMSM	6.2	7.6	13.8
CW-IPMSM	4.6	8.1	12.7

Masa stojana uzwojonego silnika CW-PMSM jest mniejsza o ok. 1.1 kg w stosunku do silnika PMSM. Zmniejszenie masy całego silnika CW-PMSM będzie jeszcze większe, jeżeli uwzględni się mniejszą masę kadłuba krótszego o ok. 20 mm. Istotna jest znacząca różnica na korzyść silnika CW-PMSM w masach miedzi koniecznej do wykonania silników, przy czym zmniejszenie masy miedzi wynika głównie ze skrócenia połączeń czołowych, czyli skrócenia nieaktywnej elektromagnetycznej części uzwojenia.

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzone obliczenia wskazują, że dzięki zastosowaniu silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o cewkach skupionych CW-PMSM w miejsce silnika Interior PMSM, można zmniejszyć masę stojana uzwojonego o ok. 1.1 kg. Pozwoli to spełnić wymagania homologacyjne pojazdu typu Quad.

Mimo zmniejszenia masy silnika, obliczone parametry pracy przy mocy znamionowej  $P_N = 14.9$  kW uległy poprawie. Zakładana moc znamionowa silnika jest osiągnięta przy mniejszym prądzie stojana  $I_1$  niż w silniku PMSM

z cewkami rozłożonymi quasi-sinusoidalnie. Poprawione zostały również warunki chłodzenia silnika ze względu na korzystniejszy podział strat mocy pomiędzy straty w miedzi  $\Delta P_{Cu}$  i w rdzeniu magnetycznym  $\Delta P_{Fe}$ . Przy zakładanej mocy  $P_N$ , silnik CW-PMSM ma mniejsze sumaryczne straty mocy i większą sprawność.

Silnik CW-PMSM jest rozwiązaniem znacznie oszczędniejszym ze względu na zużycie miedzi, której masa zmniejszy się aż o 26 %. Wynika to głównie ze znacznego zmniejszenia długości połączeń czołowych cewek uzwojenia.

### Literatura

- [1] 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.
- [2] Rossa R., *Obliczanie charakterystyk elektromechanicznych silnika reluktancyjnego dowzbudzanego magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne”, nr 75/2006, str. 59-69, BOBRME „Komel”.
- [3] Morimoto S., Hatanaka K., Tong Y., Takeda Y., Hirasa T., *Servo Drive System and Control Characteristics of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motor*, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 29, No. 2, pp. 338-343, Mar./Apr. 1993.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Rossa R., Król E., *Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „E-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych*, Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne”, nr 4/2012 (97), BOBRME „Komel”.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w latach 2011 ÷ 2013 jako projekt badawczy własny nr N N510 512440.

### Autorzy

dr inż. Robert Rossa  
mgr inż. Tomasz Wolnik  
Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy  
Maszyn Elektrycznych „KOMEL”  
40-203 Katowice,  
al. Roździeńskiego 188.

### Recenzent

prof. dr hab. inż. Jan Zawilak