

*samochód elektryczny, napęd bezpośredni
maszyna z magnesami trwałymi,
uzwojenie ułamkowo żłobkowe*

Jan SZCZYPIOR*, Rafał JAKUBOWSKI*

KONSTRUKCJA MASZYNY DO NAPĘDU SAMOCHODU ELEKTRYCZNEGO O SPECJALNYCH WYMAGANIACH

W pracy opisano konstrukcję maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi do bezpośredniego napędu samochodu elektrycznego o specyficznych wymaganiach. Samochód ten jest przeznaczony do ruchu miejskiego z maksymalną prędkością 60 km/h i może być w pełni użytkowany przez osoby niepełnosprawne. Samochód jest napędzany dwoma maszynami umiejscowionymi wewnątrz 15 calowych obręczy kół tylnych. W pracy omówiono szczegóły rozwiązania obwodu magnetycznego, uzwojenia ułamkowo żłobkowego oraz układu łożyskowania i sposobu chłodzenia maszyny. Na podstawie obliczeń polowych 2D wyznaczono kształt napięć indukowanych przy różnej rozpiętości magnesu na biegunie. Przedstawiano sposób określenia rozpiętości kątowej magnesu, przy której występują minimalne pulsacje momentu elektromagnetycznego.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój samochodów napędzanych silnikami elektrycznymi. Obecnie wszystkie liczące się firmy samochodowe mają w swojej ofercie tego typu pojazdy. Ze względu na ograniczoną pojemności, wysoki koszt i znaczną masę obecnie produkowanych akumulatorów najczęściej są to pojazdy małe o niewielkiej prędkości i zasięgu drogi.

Prezentowana w pracy konstrukcja maszyny spełnia wymagania napędowe specyficznego pojazdu miejskiego, używanego między innymi w wydzielonych enklawach, w których z powodów ekologicznych zakazane jest stosowanie pojazdów spalinywych. Zastosowane w pojeździe specjalne rozwiązania konstrukcyjne takie jak ruchome zawieszenie, możliwość wjazdu i dokowania we wnętrzu wózka inwalidzkiego umożliwiają pełne wykorzystanie pojazdu przez osoby niepełnosprawne. Dla spełnienia powyższych funkcjonalności przy dodatkowej konieczności umieszczenia we

* Instytut Maszyn Elektrycznych, Politechnika Warszawska, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa.

wnętrzu pojazdu baterii akumulatorów szczególnie istotnym było przeniesienie maszyn napędowych do niewykorzystywanej przestrzeni wnętrza obręczy kół.

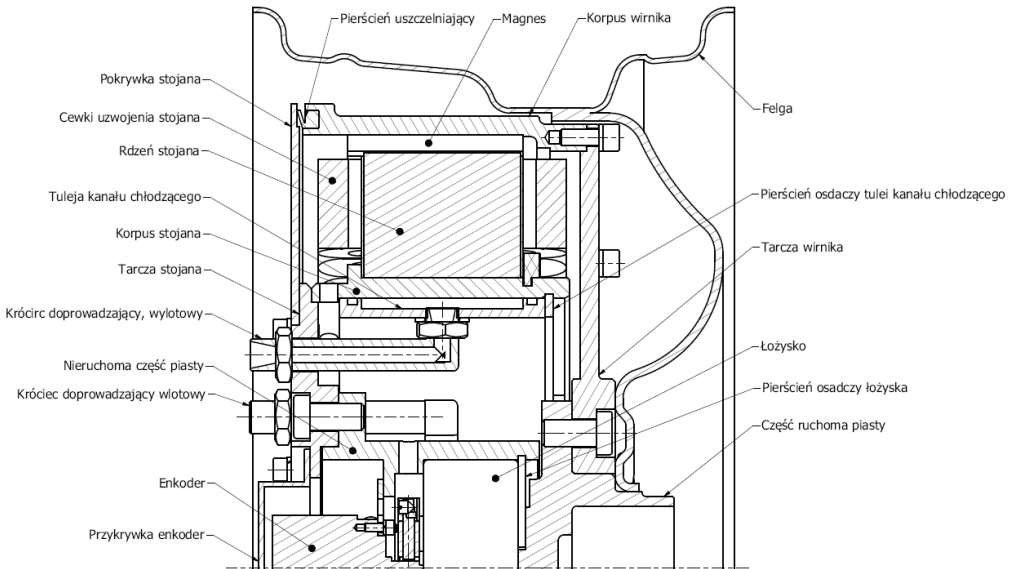
Przyjęto, że pojazd będzie spełniał następujące warunki ruchu: prędkość maksymalna 60 km/h, masa ok. 1000 kg, jazda z prędkością 30 km/h po drodze o nachyleniu 7%, wyjazd z garażu o nachyleniu 25%, przyspieszenie przy ruszaniu 1 m/s^2 , przyspieszenie przy wyprzedzaniu przy prędkości 40 km/h 0.5 m/s^2 . Stosując metodykę przedstawioną w pracy [1] oraz uwzględniając, że samochód jest bezpośrednio napędzany dwoma maszynami umieszczonymi we wnętrzu piętnastocalowych obręczy określono parametry znamionowe maszyny elektrycznej: moc 5 kW i prędkość obrotową 330 obr/min. Dodatkowo maszyna musi zapewnić trzykrotne przeciążenie momentem i 70% zwiększenie prędkości obrotowej.

Z powodu niskiej prędkości obrotowej, ograniczonej przestrzeni przeznaczonej na maszynę oraz uwzględniając rozwiązania konstrukcji maszyn stosowanych w napędach samochodów elektrycznych prezentowanych w literaturze [2]–[4] wybrano maszynę z magnesami trwałymi i zewnętrznym wirnikiem. Z powodu znacznych dopuszczalnych przeciążeń przyjęto, że maszyna będzie chłodzona ciekłym medium omywającym od wewnątrz korpus stojana, na którym osadzony jest rdzeń.

2. OPIS KONSTRUKCJI MASZINY

Prezentowana konstrukcja maszyny jest zintegrowana z układem łożyskowania. Do układu sterowania potrzebny jest enkoder sprzęgnięty z wirnikiem. Z tego powodu trudno było zastosować w układzie łożyskowania gotową piastę. Konstrukcję maszyny pokazano na rysunkach 1 i 2. Maszyna jest przykręcana do układu zawieszenia samochodu od strony tarczy stojana, która łączy się z nieruchomą częścią piasty i korpusem stojana. Do nieruchomej części piasty jest przymocowany enkoder, osłonięty przykrywką od strony zawieszenia. Na zewnętrznej powierzchni korpusu stojana jest osadzony rdzeń stojana. W żłobkach rdzenia znajdują się zezwoje – cewki uzwojenia. We wnętrzu korpusu jest wciśnięta tuleja kanału chłodzącego z króćcami doprowadzającymi płyn chłodzący. Tuleja jest zabezpieczona pierścieniem osadczym. Końce króćców wyprowadzone są na zewnątrz przez otwory w tarczy stojana. Do górnej krawędzi tarczy stojana jest przykręcona pokrywa stojana. Ruchoma część piasty jest połączona z nieruchomą częścią piasty za pomocą łożyska zabezpieczonego od strony części nieruchomej pierścieniem osadczym, od strony części ruchomej nakrętką. Wewnątrz ruchomej części piasty od strony zawieszenia jest osadzony wałek enkodera. Z przeciwnej strony do ruchomej części piasty jest przykręcona tarcza wirnika. W tarczy tej są gwintowane otwory do mocowania obręczy koła. Do górnej krawędzi tarczy wirnika jest przykręcany korpus wirnika, który pełni rolę jarzma w obwodzie magnetycznym maszyny. Na wewnętrznej powierzchni korpusu wirnika są przyklejone magnesy. W korpusie od strony pokrywy stojana znajduje

się rowek, w którym jest osadzony pierścień uszczelniający, stykający się z pokrywą stojana.

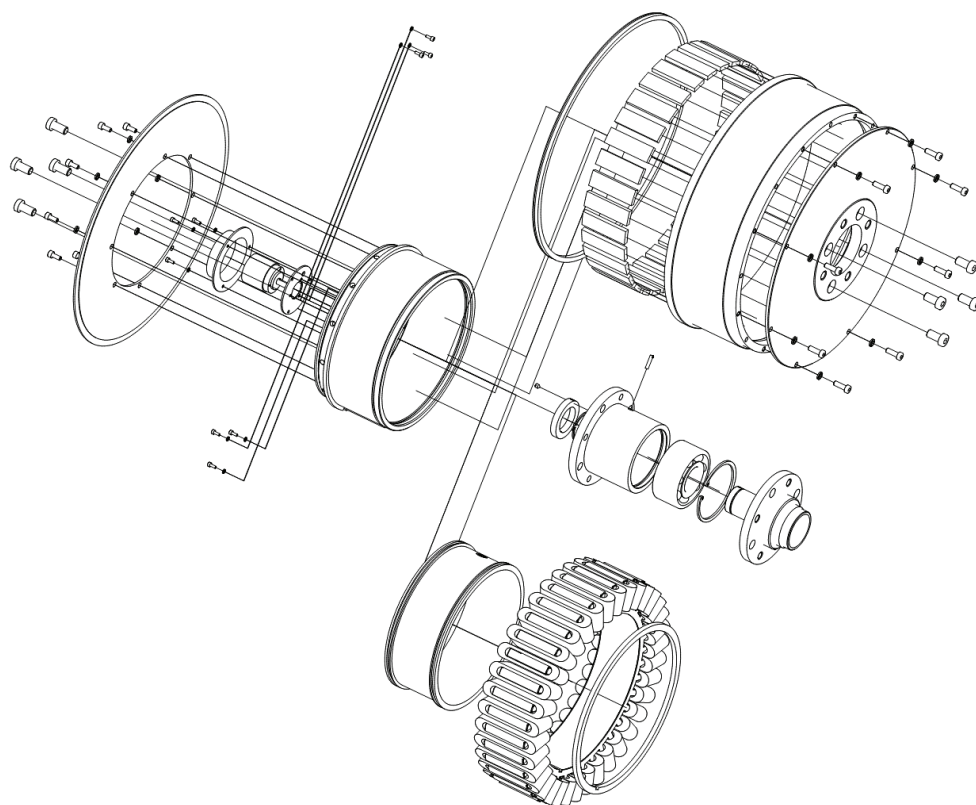


Rys. 1. Przekrój maszyny umieszczonej w kole
Fig. 1. Section of the machine placed in the wheel

W korpusie stojana od strony tarczy stojana są wiercone w kierunku promieniowym otwory do wyprowadzenia końcówek uzwojenia i czujników temperatury. Przewody te wyprowadzone są na zewnątrz maszyny przez dławice umieszczone w otworach tarczy stojana.

3. OBWÓD MAGNETYCZNY I UZWOJENIE

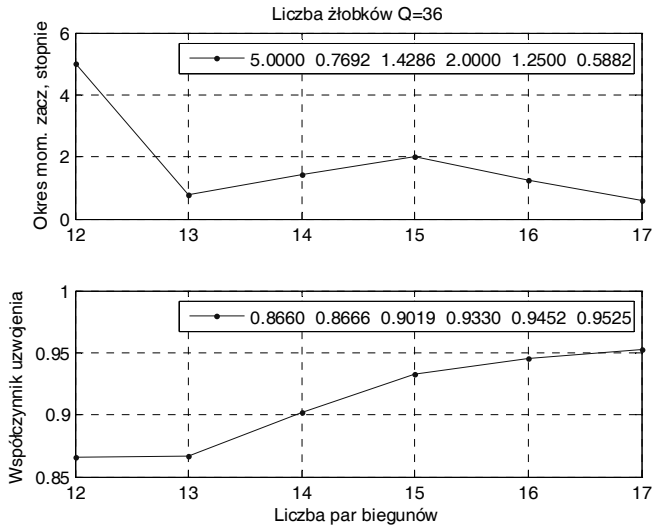
Kształt obwodu magnetycznego zaprojektowano na podstawie obliczeń projektowych sformułowanych w postaci problemu optymalizacji z funkcją kryterialną określającą koszt materiałów czynnych. Obliczenia wykonano dla różnej liczby żłobków 30, 36 i 42. Wybrano parzyste liczby żłobków żeby uniknąć zbyt dużego naciągu magnetycznego, który występuje przy braku symetrii rozkładu pola na obwodzie maszyny. Sytuacja taka występuje, gdy liczba biegunów różni się od liczby żłobków o 1, np. 33 żłobki i 32 bieguny. Dla każdej liczby żłobków rozpatrzono kilka liczb par biegunów, dla których współczynnik uzwojenia jest odpowiednio duży, a okres momentu zaczepowego mały. Przykładowe wartości okresu momentu zaczepowego i współczynnika uzwojenia dla 36 żłobków i kilku liczb par biegunów pokazano na rys. 3.



Rys. 2. Konstrukcja maszyny umieszczonej w kole
 Fig. 2. Design of machine placed in the wheel

Z rysunku 3 wynika, że przy 36 żłobkach i 17 parach biegunów współczynnik uzwojenia jest największy, a okres momentu zaczepowego najmniejszy. Przy tak małym okresie moment zaczepowy jest mniejszy od 0,1 Nm. Jeżeli w rzeczywistym modelu fizycznym wystąpi większa wartość momentu zaczepowego i o innym okresie, to jest to spowodowane niedokładnościami technologicznymi związanymi ze zbyt małą tolerancją wymiarów kątowych magnesu oraz z nierównomiernym ich przyklejeniem. Przy zakładanej sprawności 92% z serii obliczeń projektowych najmniejszą masę maszyny uzyskano przy 36 żłobkach i 34 biegunach.

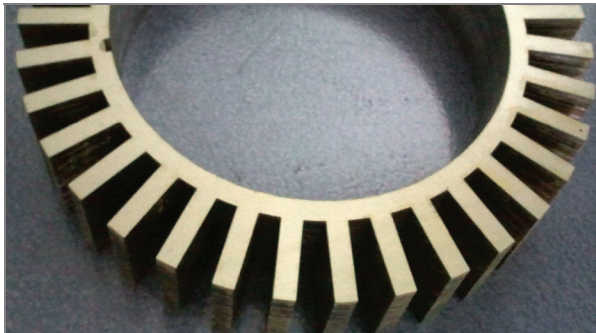
Strumień magnetyczny, wytworzony w obwodzie magnetycznym przez magnesy przechodzi przez szczelinę powietrzną, następnie wnika do zębów rdzenia stojana i zamyka się przez jarzmo stojana. Od strony wirnika strumień magnetyczny zamyka się przez ferromagnetyczny korpus wirnika. Rdzeń stojana zrobiony jest w postaci pakietu blach elektrotechnicznych izotropowych o grubości 0.5 mm i stratności 1.4 W, przy indukcji 1 T.



Rys. 3. Wartości okresu momentu zaczepowego i współczynnika uzwojenia w zależności od liczby par biegunów przy 36 żłobkach

Fig. 3. Values of the cogging torque period and the coefficient of winding, depending on the number of pole pairs at 36 slots

Z wyznaczonych w obliczeniach projektowych liczb żłobków i par biegunów wynika, że projektowane uzwojenie jest uzwojeniem ułamkowo żłobkowym o posłoku równym 1. Z tego powodu zdecydowano, że zęby stojana będą proste – bez koronek. Dzięki temu upraszcza się uzwojenie maszyny. Polega ono na nałożeniu na zaizolowane zęby rdzenia gotowych cewek i wykonaniu odpowiednich połączeń. Cewki o identycznym kształcie mogą być przygotowane na szablonie umożliwiającym ich sklejenie lakierem izolacyjnym termoutwardzalnym. Dzięki temu uzyskuje się duży współczynnik wypełnienia przekroju żłobka miedzią.

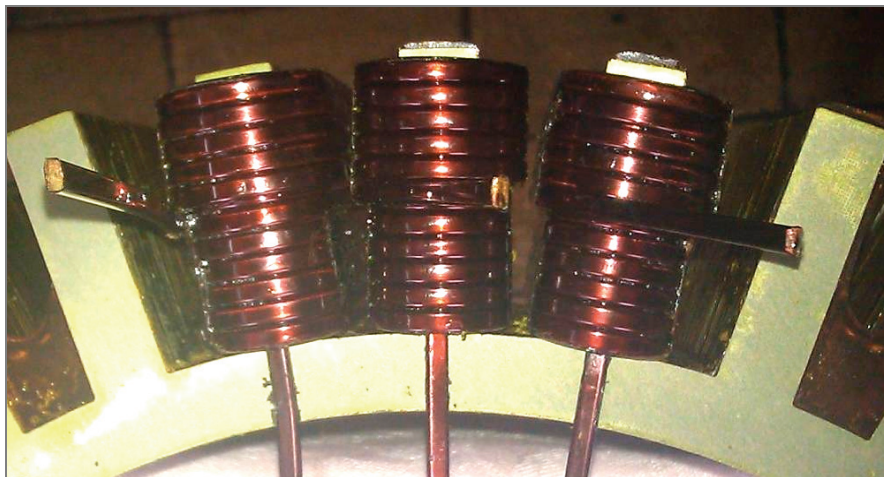


Rys. 4. Sklejony rdzeń stojana

Fig. 4. Glued stator core

Z powodu niskiego jarzma stojana (maszyna wielobiegunowa) trudno jest skutecznie ścisnąć dosyć wysokie zęby pakietu. Ponieważ maszyna będzie zasilana z przekształtnika, to w celu ograniczenia hałasu wywołanego wibracją blach, zostały one sklezione lakierem izolacyjnym i sprasowane w specjalnie przygotowanej formie. Po termicznym utwardzeniu lakieru pakiet jest z pomocą prasy wyjmowany z formy. Sklejony rdzeń pokazano na rys. 4. Przykładowe cewki, osadzone na zębach stojana przedstawia rys. 5.

Ruchomą część obwodu magnetycznego stanowi korpus wirnika z magnesami naklejonymi na jego wewnętrznej powierzchni. Pierwszą fazę klejenia magnesów o takiej samej biegunowości pokazano na rysunku 6.

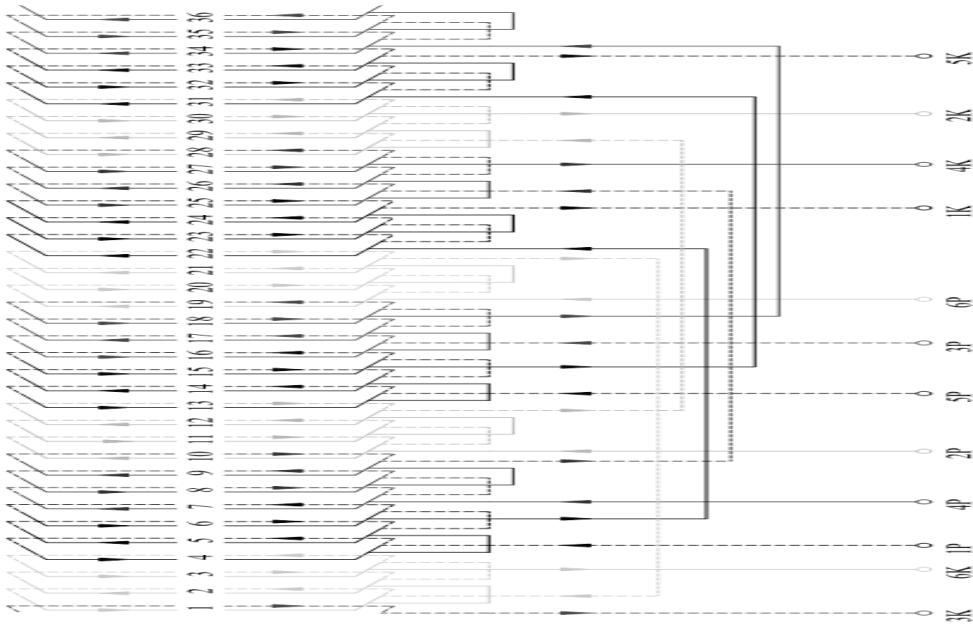


Rys. 5. Cewki uzwojenia osadzone na zębach stojana
Fig. 5. Coils of winding mounted on the stator teeth



Rys. 6. Klejenie magnesów do korpusu wirnika
Fig. 6. Gluing the magnets to the body of the rotor

Pasmo uzwojenia trójfazowego tworzą dwie szeregowo połączone grupy sąsiadujących ze sobą cewek. Każda grupa składa się z 6 cewek. Przy tej liczbie cewek można grupę podzielić na równe części i uzyskać uzwojenie wielofazowe niesymetryczne. Po podziale grupy cewek na dwie części po 3 cewki uzyskuje się uzwojenie sześciopasmowe, składające się z dwóch uzwojeń trójfazowych przesuniętych względem siebie o 30° . Schemat takiego uzwojenia pokazano na rysunku 7.

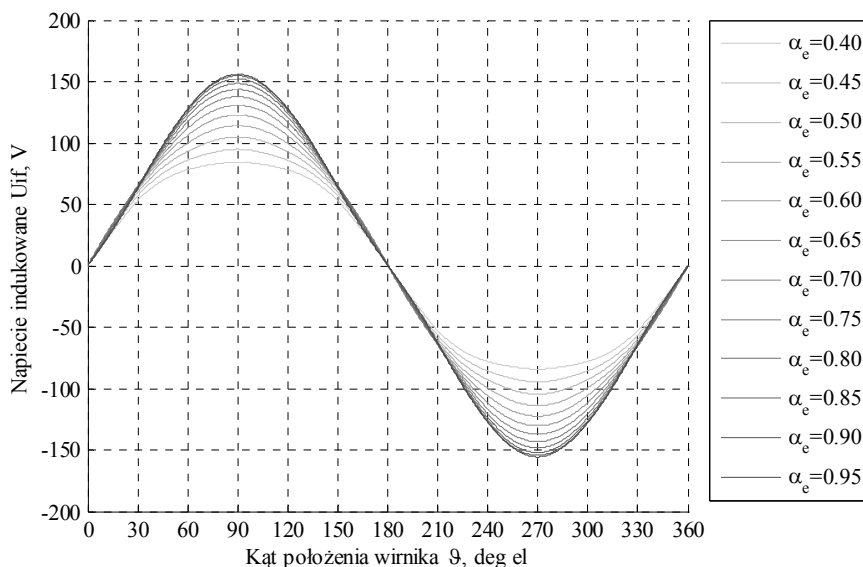


Rys. 7. Schemat połączenia uzwojenia sześciopasmowego
Fig. 7. Six phase winding connection diagram

Uzwojenie takie ma kilka zalet. Bardzo łatwo jest utworzyć jedno uzwojenie trójfazowe, przez połączenie parami początku z końcem faz przesuniętych o 30° . Jeżeli maszyna z takim uzwojeniem sześciopasmowym jest sterowana jak maszyna BLDC, to zwiększa się dwukrotnie liczba przełączeń ale zmniejszają się pulsacje momentu elektromagnetycznego powstające przy przełączaniu pasm. Oczywiście przy sterowaniu takiego uzwojenia musi być dwukrotnie większa liczba kluczy, ale na dwukrotnie mniejsze prądy. Możliwość podzielenia uzwojenia na dwie niezależnie zasilane części zwiększa niezawodność napędu. Po zdiagnozowaniu awarii fragmentu uzwojenia w jednej części, można wyłączyć ją i w przypadku samochodu awaryjnie na nieszkodzonej części uzwojenia dojechać do serwisu. Omawiane uzwojenie można również połączyć, jako uzwojenie dziewięciopasmowe niesymetryczne (trzy uzwojenia trójfazowe przesunięte o 20 stopni).

4. WPŁYW KĄTOWEJ ROZPIĘTOŚCI MAGNESU NA NAPIĘCIE INDUKOWANE

Celem dalszych obliczeń projektowych było dobranie odpowiedniej rozpiętości kątowej magnesu, która dalej będzie określana wartością współczynnika wypełnienia podziałki biegunowej przez magnes, nazywanego w skrócie współczynnikiem α_e . Wiadomo, że rozpiętość kątowa magnesu wpływa na kształt i maksymalną wartość napięcia indukowanego oraz na charakterystykę kątową momentu zaczepowego. W tym przypadku przez dobór liczby żłobków i liczby par biegunów zminimalizowano moment zaczepowy do wartości praktycznie niewyczuwalnych. Interesujące było natomiast, w jaki sposób napięcie indukowane zależy od α_e w przypadku uzwojenia ułamkowo żłobkowego i obwodu magnetycznego z prostymi zębami stojana. Do zbadania tego, zastosowano opracowany parametryczny model połowy trójfazowej maszyny z magnesami trwałymi i zewnętrznym wirnikiem, funkcjonujący w środowisku Matlab, z zastosowaniem profesjonalnego oprogramowania polowego. Zdefiniowano i rozwiązano serię zadań polowych, w których, w stanie bezprądowym zmieniano położenie wirnika i wartość współczynnika α_e od 0.4 do 0.95. Wyniki obliczeń napięć indukowanych w jednym paśmie uzwojenia, przez strumień magnesów, przy różnych wartościach α_e pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Zależność napięcia indukowanego od położenia wirnika przy różnych wartościach współczynnika wypełnienia podziałki biegunowej magnesem
Fig. 8. Back emf depending on the rotor position at different filling factors magnet pole pitch

Przebiegi napięć odnoszą się do znamionowej prędkości obrotowej. Uzyskano je przez różniczkowanie po położeniu zależności strumienia skojarzonego z pasmem, pochodzącego od magnesów i pomnożeniu przez prędkość obrotową. Do wyznaczenia zależności strumienia w przedziale od zera do 360 stopni elektrycznych, dla przyspieszenia czasochłonnych obliczeń połowych, wystarczy wyznaczyć zależności strumieni w trzech pasmach w przedziale od zera do 30 stopni elektrycznych. Następnie wykorzystując przebiegi strumieni z poszczególnych faz (przez odpowiednie składanie) uzyskuje się przebieg strumienia w jednym paśmie w przedziale od zera do 90 stopni. Korzystając z warunków symetrii wyznacza się zależność strumienia od położenia wirnika w przedziale jednej pary biegunów.

Z przebiegów napięć indukowanych pokazanych na rys. 8 wynika, że zmiana kąta magnesu znacznie wpływa na wartość maksymalną napięcia (szczególnie przy małych wartościach α_e), ale nieznacznie wpływa na zmianę jego kształtu. Wszystkie przebiegi napięć są zbliżone do przebiegów sinusoidalnych. Wynika z tego, że projektowana maszyna z uzwojeniem ułamkowo żłobkowym i prostymi zębami stojana jest bardziej preferowana do sterowania jej, jako maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi PMSM, niż maszyny bezszczotkowej BLDC.

5. WYBÓR KĄTOWEJ ROZPIĘTOŚCI MAGNESU

Sentencja poprzedniego punktu stawia nowy problem do rozwiązania. Jakim kryterium ocenić przebiegi napięć indukowanych żeby wybraną za jego pomocą rozpiętość kątową magnesu uznać za najlepszą? Odpowiedź zależy od przyjętej hierarchii wartości. Jeżeli ważny jest idealny przebieg sinusoidalny napięcia, to należy wybrać taką rozpiętość magnesu, przy której napięcie indukowane ma najmniejszą zawartość wyższych harmonicznych (minimum THD). Jeżeli istotna jest tylko wartość napięcia to przy wyborze rozpiętości kątownej magnesu decyduje kompromis pomiędzy przyrostem napięcia i przyrostem kosztu magnesu przy zwiększającej się wartości α_e .

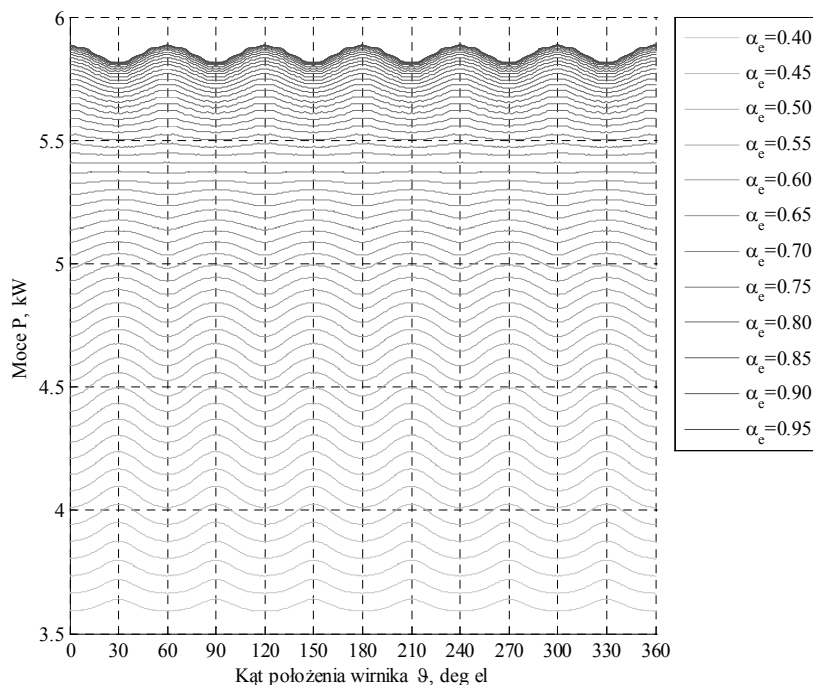
W pracy proponuje się zastosowanie do wyboru kątownej rozpiętości magnesu minimalizacji pulsacje momentu elektromagnetycznego. W celu znalezienia wartości współczynnika α_e , przy której występują minimalne pulsacje momentu obliczono chwilowe wartości mocy idealnych P_i . Pulsacje mocy odpowiadają pulsacjom momentu, ponieważ moc idealna w stanie quasi statycznym jest równa iloczynowi momentu i prędkości kątownej $P_i = T_e \omega$. Moc ta może być również obliczona, jako suma z poszczególnych faz iloczynu chwilowych, fazowych wartości napięć indukowanych i fazowych sinusoidalnych wartości prądów.

$$P_i = \sum_{j=1}^m U_{ifj}(\alpha_e, \vartheta) \sqrt{2} I_f \sin(\vartheta - 2\pi(j-1)/3 - \psi_{ui}) \quad (1)$$

Przy danym zbiorze fazowych przebiegów napięć indukowanych (dla każdej wartości współczynnika α_e , rys. 8) wartości mocy zależą od amplitudy prądów fazowych, określonych wartością skuteczną I_f i przesunięcia fazowego prądu ψ_{ui} względem pierwszej harmonicznej napięcia.

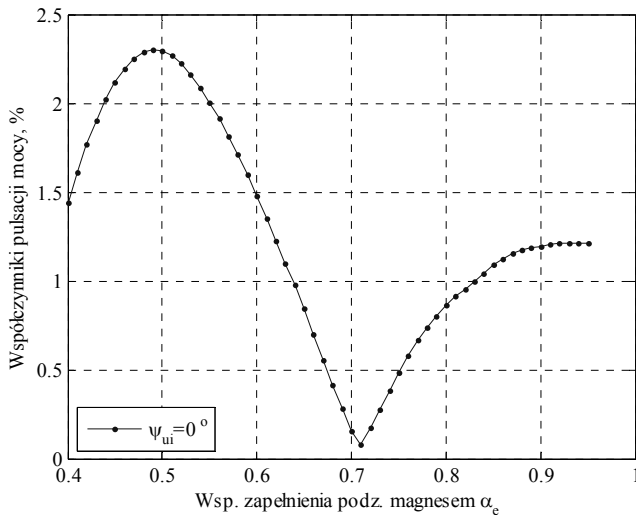
Chwilowe wartości mocy idealnej w zależności od położenia kąтового wirnika, przy wartościach współczynnika α_e zmieniających się od 0.4 do 0.95 co 0.01 oraz przy prądzie fazowym $I_f = 18$ A i przy przesunięciu pomiędzy prądem i napięciem $\psi_{ui} = 0$ pokazano na rys. 9. Z rysunku tego wynika, że istnieje wartość współczynnika α_e , przy której pulsacje mocy praktycznie nie występują. W celu wyboru tej wartości współczynnika zdefiniowano współczynnik pulsacji mocy k_{pP} określony, jako stosunek (wyrażony w procentach) różnicy wartości maksymalnej i minimalnej mocy będącej funkcją położenia wirnika do podwójnej wartości średniej mocy P_{is} , przy danej wartości współczynnika $\alpha_e = \text{const}$.

$$k_{pP}(\alpha_e) = \frac{\max(P_i(\vartheta, \alpha_e)) - \min(P_i(\vartheta, \alpha_e))}{2P_{is}(\alpha_e)} 100 \Big|_{\alpha_e = \text{const}} \quad (2)$$



Rys. 9. Zależność mocy idealnej od położenia wirnika przy różnych wartościach współczynnikach wypełnienia podziałki biegunowej magnesem
Fig. 9. Ideal power dependence of the rotor position at different filling factors magnet pole pitch

Na podstawie macierzy wartości mocy chwilowych pokazanych na rys. 9 obliczono dla każdej wartości współczynnika α_e wartość wyżej zdefiniowanego współczynnika pulsacji mocy. Wyniki obliczeń pokazano na rys. 10. Z rysunku tego wynika, że dla wszystkich wartości współczynnika α_e współczynnik pulsacji nie przekracza 2.5%. Ponadto, gdy $\alpha_e = 0.71$, to współczynnik pulsacji mocy osiąga wartość minimalną poniżej 0.1%. Maksymalne pulsacje mocy występują przy współczynniku α_e równym około 0.5. Z analizy rysunków 9 i 10 wynika, że przy minimalnych pulsacjach mocy, moc idealna maszyny wynosi ok. 5.4 kW i jest o ok. 8% mniejsza od maksymalnej mocy występującej przy współczynniku $\alpha_e = 0.95$. Natomiast masa magnesów jest mniejsza o 25%. Gdy moc jest maksymalna to współczynnik pulsacji wynosi ok. 1.2%. Oznacza to, że przynajmniej w tym przypadku wybór kątowej rozpiętości magnesu przy minimalnych pulsacjach momentu elektromagnetycznego ma również uzasadnienie ekonomiczne.



Rys. 10. Zależność współczynnika pulsacji momentu w współczynnikach zapelnienia podziałki biegunowej magnesem
 Fig. 10. Torque ripple factor dependence of the filling factor magnet pole pitch

5. PODSUMOWANIE

W pracy przestawiono konstrukcję maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi i zewnętrznym wirnikiem do bezpośredniego napędu samochodu elektrycznego. Konstrukcja maszyny jest zintegrowana z układem łożyskowania koła i zawieszeniem samochodu. Maszyna jest chłodzona ciekłym medium. Zastosowane proste zęby sto-

jana uprościły wykonanie uzwojenia składającego się z pojedynczych cewek. Zapewnia to duże upakowanie przewodów w żłobku, co korzystnie wpływa na odprowadzenie ciepła z uzwojenia do rdzenia. Dodatkową zaletą opracowanego uzwojenia jest możliwość jego przełączania w układy wielofazowe o wielokrotności trzech.

Stwierdzono, że przy prostych zębach i zastosowanym uzwojeniu można uzyskać zbliżony do sinusoidalnego przebieg napięcia indukowanego. Z tego powodu prezentowana maszyna powinna być sterowana, jako maszyna synchroniczna z magnesami trwałymi. Przedstawiano sposób określenia rozpiętości kątowej magnesu, przy której występują minimalne pulsacje momentu elektromagnetycznego.

Artykuł współfinansowany z pracy ECO-Mobilność WND-POIG.01.03.01-14-154/09.

Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

LITERATURA

- [1] KOZŁOWSKI M., TOMCZUK K., SZCZYPIOR J., *Methodology of determining basic technical parameters of electric-drive car*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, nr 10, 299–304.
- [2] NANDA G., NARAYAN C.K., *A Survey and Comparison of Characteristics of Motor Drives Used in Electric Vehicles*, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering., Ottawa, May 2006, 811–814.
- [3] NASSER H., BEHZAD A., *Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles*, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, ICEM'08, 2008, ID 1257.
- [4] www.perm-motor.de
- [5] www.proteanelectric.com

DESIGN OF ELECTRICAL MACHINE FOR SPECIAL REQUIREMENTS CAR DRIVE

The design of permanent magnet electrical machine for direct drive of electric car with specific requirements is presented in this paper. This car is designed for city transport with maximum speed 60 km/h and can be fully used by handicapped persons. The car is driven by two machines placed within the 15 inch rim of the back wheels. In the work the solution of magnetic circuit, fractional slot winding, bearing system and the way of cooling of machine is commented in details. Based on the 2D FEM the back emf waveforms versus different pole arc of the magnet is calculated. The way how to determine the magnet pole span, at which there are minimal electromagnetic torque ripple.