

Robert Rossa, Paweł Pistelok  
BOBRME „Komel”, Katowice

## ALGORYTM DO OBLICZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI O CEWKACH SKUPIONYCH

### THE ALGORITHM FOR THE ELECTROMAGNETIC CALCULATIONS OF THE CONCENTRATED WINDING PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

**Streszczenie:** W artykule omówiono algorytm do obliczeń elektromagnetycznych silników synchronicznych z magnesami trwałymi o cewkach skupionych dla stanu pracy synchronicznej ustalonej. Algorytm bazuje na obliczeniu przebiegów czasowych strumieni skojarzonych z poszczególnymi fazami uzwojenia i napięć indukowanych w uzwojeniach oraz przebiegu czasowego momentu elektromagnetycznego w szczeliny powietrznej silnika. W tym celu wykorzystywana jest magnetostaticzna, dwuwymiarowa analiza rozkładu pola elektromagnetycznego w silniku metodą elementów skończonych (MES). W modelu MES silnika pozycja kątowna wirnika względem stojana ulega krokowej zmianie i dla każdej z pozycji siatka elementów skończonych jest odpowiednio modyfikowana. W artykule zaprezentowano przykładowe wyniki obliczeń dla 6-biegunowego silnika o cewkach skupionych i liczbie żłobków na biegun i fazę  $q=0.5$ . Uzyskane z pomocą nowego algorytmu wyniki obliczeń porównano z wynikami otrzymanymi z zastosowaniem oprogramowania komercyjnego, w którym wykorzystano tzw. analizę MES dla stanów przejściowych. Opracowany autorski algorytm obliczeniowy jest wykorzystywany do obliczania charakterystyk elektromechanicznych silników PMSM i CW-PMSM.

**Abstract:** The paper deals with the algorithm for electromagnetic calculations of concentrated winding permanent magnet synchronous motors (CW-PMSM) operating synchronously at steady state. The algorithm is based on the calculation of the time waveforms of magnetic fluxes linked with individual winding phases, the calculation of voltages induced in the winding phases and the calculation of a time waveform of electromagnetic torque in a motor air-gap. For this purpose a magnetostatic, two-dimensional finite element analysis (FEA) of electromagnetic field distribution in the motor is used. In a motor model for FEA the angular position of rotor vs. stator is increased in steps by constant angle and for each of rotor positions the finite element mesh is modified. In a paper the results of electromagnetic calculations of a 6-pole CW-PMSM with a number of slots per pole per phase  $q=0.5$  are shown. The calculation results obtained with the use of a new algorithm are compared to the results obtained from a commercial software equipped with a transient FEA solver. Proposed calculation algorithm is used to predict the electromechanical characteristic curves of PMSMs and CW-PMSMs.

**Słowa kluczowe:** silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o cewkach skupionych, algorytmy obliczeniowe, metoda elementów skończonych

**Keywords:** permanent magnet synchronous motors, concentrated winding permanent magnet synchronous motors, calculation algorithms, finite element method

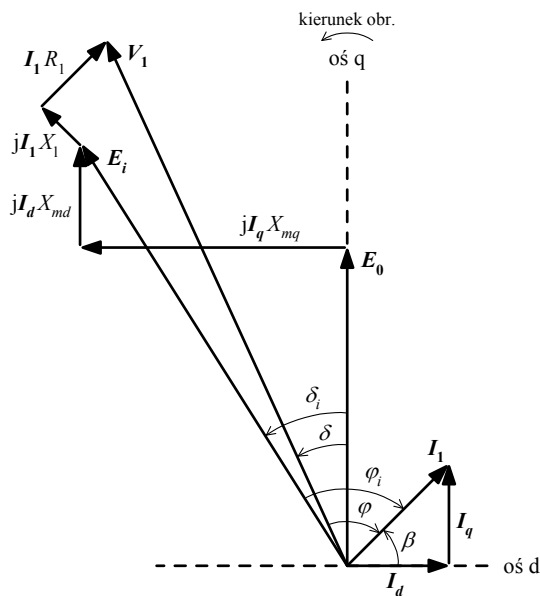
### 1. Wstęp

W ostatnich kilkunastu latach w Instytucie Komel zaprojektowano wiele maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi, silników (ang. skrót PMSM od Permanent Magnet Synchronous Motor) i generatorów (PMSG). Do projektowania obwodów elektromagnetycznych wspomnianych maszyn, w Instytucie opracowano szereg algorytmów i programów do obliczeń elektromagnetycznych dla stanu pracy synchronicznej ustalonej. Algorytmy te, zarówno dla silników jak i generatorów, bazują na

tz. metodzie polowo-obwodowej obciążeniowej [1 ÷ 5].

W metodzie obciążeniowej napięcie na zaciskach silnika PMSM, przy zadanych warunkach jego obciążenia, jest obliczane przez przeprowadzenie analizy harmonicznej przestrzennego rozkładu potencjału magnetycznego  $A_z$  w szczeliny powietrznej, obliczanego poprzez zastosowanie dwuwymiarowej, magnetostaticznej analizy metodą elementów skończonych (MES) rozkładu pola elektromagnetycznego na przekroju poprzecznym maszyny. Po przeprowa-

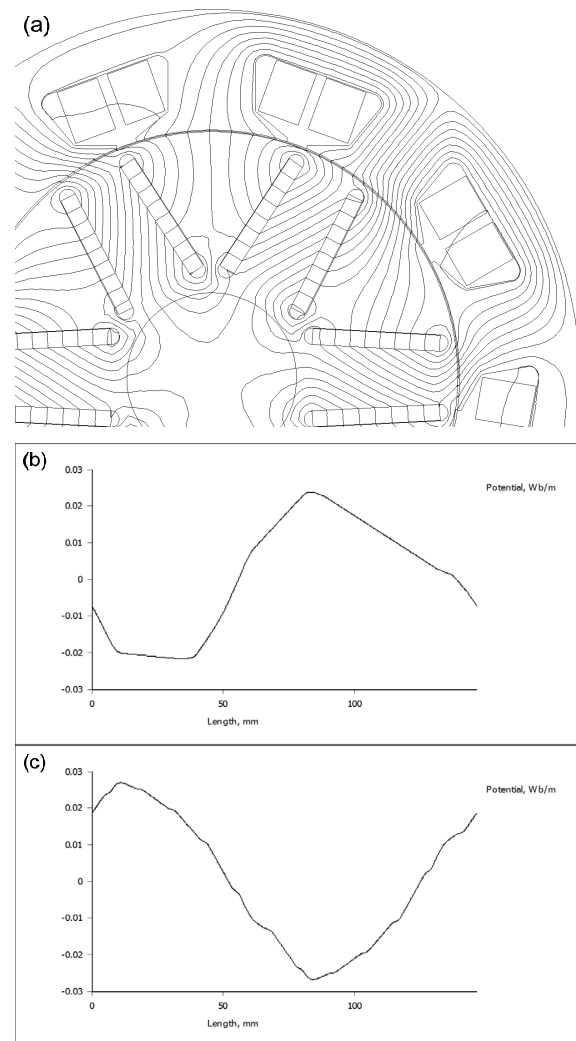
dzeniu analizy harmonicznej rozkładu potencjału magnetycznego  $A_z$ , w oparciu o zależności podane w [4], w metodzie polowo-obwodowej obciążeniowej obliczane są kolejno: strumień magnetyczny główny  $\Phi$ , napięcie szczelinowe  $E_i$  oraz wewnętrzny kąt mocy  $\delta_i$ . Następnie, po uwzględnieniu rezystancji stojana  $R_1$  i reaktancji rozproszenia stojana  $X_1$ , można obliczyć wartość skuteczną napięcia na zaciskach silnika  $V_1$  w danych warunkach obciążenia, bazując na równaniach wynikających z wykresu wskazowego z rys. 1.



Rys. 1. Wykres wskazowy silnika PMSM dla metody polowo-obwodowej obciążeniowej

Metoda polowo-obwodowa obciążeniowa ma szereg zalet. Pozwala ona na dokładne obliczenie parametrów elektromagnetycznych silnika PMSM oraz jego charakterystyk elektromechanicznych, przy czym wymagany nakład obliczeniowy jest niewielki z uwagi na niewielką liczbę koniecznych do przeprowadzenia analiz MES rozkładu pola w maszynie. Do obliczenia wszystkich parametrów występujących na wykresie wskazowym z rys. 1, odpowiadających konkretnemu punktowi pracy silnika (uwzględnienie wpływu zmiany nasycenia w obwodzie magnetycznym przy zmianie obciążenia silnika na parametry skupione schematu zastępczego), wymagane są jedynie dwie analizy magneto- statyczne rozkładu pola elektromagnetycznego. Warunkiem możliwości zastosowania metody polowo-obwodowej obciążeniowej do obliczeń elektromagnetycznych silników PMSM jest to, by obliczony rozkład przestrzenny potencjału magnetycznego  $A_z$  w szczelinie powietrznej

odpowiadający jednej podziałce biegunowej silnika był osiowo-symetryczny względem osi odciętych przecinającej się z osią rzędną w punkcie  $A_z = 0$  i przesunięty o  $180^\circ$  el w stosunku do rozkładu  $A_z$  obliczanego dla sąsiedniego bieguna (rys. 2. c). Wymaganie to wynika ze wspomnianej wcześniej konieczności przeprowadzenia w metodzie polowo-obwodowej obciążeniowej analizy harmonicznej rozkładu potencjału  $A_z$  obliczanego dla jednej podziałki biegunowej maszyny.



Rys. 2. Przykładowy rozkład przestrzenny potencjału magnetycznego  $A_z$  (b) w szczelinie powietrznej 6-biegunowego silnika CW-PMSM (a) oraz rozkład  $A_z$  podobnego silnika PMSM (c) przy pracy pod obciążeniem. Rozkłady potencjałów  $A_z$  odpowiadają jednej parze biegunów. W przypadku silnika CW-PMSM wyraźny jest brak symetrii rozkładu  $A_z$  obliczanego dla sąsiednich biegunów magnetycznych względem osi odciętych przechodzącej przez punkt  $A_z = 0$  (z przesunięciem o  $180^\circ$  el)

Powyższy warunek dotyczący symetrii osiowej rozkładu przestrzennego potencjału magnetycznego  $A_z$  w szczelinie powietrznej jest spełniony w przypadku silników PMSM (i generatorów PMSG) z uzwojeniem stojana wykonanym klasycznie z zastosowaniem cewek rozłożonych quasi-sinusoidalnie. Jednakże warunek ten nie jest spełniony w przypadku silników PMSM, w których uzwojenie stojana jest wykonane z zastosowaniem cewek skupionych (ang. skrót CW-PMSM, Concentrated Winding PMSM). W przypadku takich silników rozkłady przestrzenne potencjału magnetycznego  $A_z$  w szczelinie powietrznej obliczane dla kolejnych podziałek biegunowych różnią się od siebie (rys. 2. b), ale różne mogą być także rozkłady  $A_z$  obliczane dla całych sąsiednich par biegunów.

W związku z powyższym, w Instytucie Komel, w ramach projektu badawczego nr N N510 512440, podjęto prace nad opracowaniem nowego algorytmu i programu do obliczeń elektromagnetycznych silników CW-PMSM. Konieczność prac wynika z potrzeby opanowania projektowania w kraju tego typu maszyn, dedykowanych m.in. do zastosowania w nowoczesnych, wysokosprawnych napędach elektrycznych pojazdów zasilanych bateryjnie.

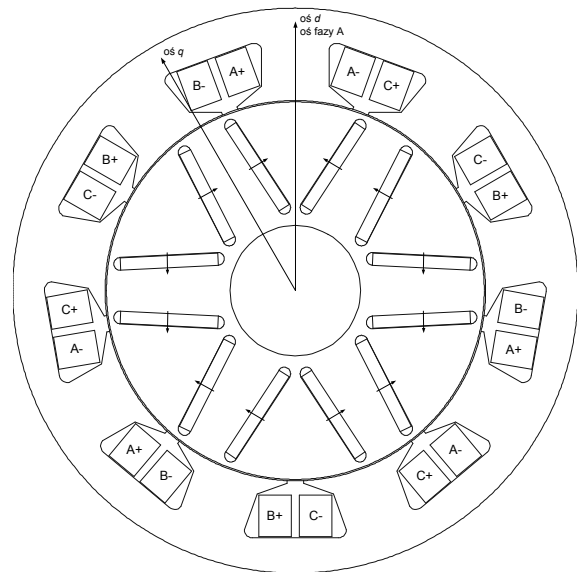
## 2. Algorytm do obliczeń elektromagnetycznych silników CW-PMSM

Algorytm i oprogramowanie do obliczeń elektromagnetycznych silników CW-PMSM opracowano jako własna implementacja tzw. metody strumienia skojarzonego. Schemat blokowy opracowanego algorytmu pokazano na rys. 4. Algorytm ten służy do analizy parametrów elektromagnetycznych i obliczania charakterystyk elektromechanicznych silników CW-PMSM oraz klasycznych PMSM przy pracy synchronicznej ustalonej.

W opracowanej implementacji metody strumienia skojarzonego, dla każdego rozpatrywanego punktu pracy silnika CW-PMSM (ale także PMSM) konieczne jest wykonanie serii magnetostaticznych analiz MES rozkładu pola magnetycznego na przekroju poprzecznym maszyny. W kolejnych analizach MES, pozycja kątowa wirnika względem stojana jest zmieniana z przyrostem o zadany stały kąt  $\Delta\theta_w$ , i jednocześnie modyfikowane są wymuszenia prądowe w poszczególnych bokach cewek uzwojenia stojana, tak aby dla każdej z pozycji wirnika utrzymywać w modelu MES maszyny

te same warunki elektromagnetyczne odpowiadające wybranemu punktowi pracy silnika (stałemu obciążeniu). Dla kolejnych pozycji wirnika utrzymywana jest stała wartość modułu prądu fazowego  $I_1$  oraz utrzymywany jest stały kąt fazowy  $\beta$  przesunięcia pomiędzy wskazem prądu stojana  $I_1$  i osią podłużną  $d$  wirnika (rys. 1 i 5), co odpowiada utrzymaniu stałego przesunięcia fazowego pomiędzy siłami magnetomotorycznymi stojana i wirnika. Kolejne analizy MES rozkładu pola w maszynie odpowiadają zatem różnym, jednakowo oddalonym chwilom czasowym pracy silnika w obrębie jednego półokresu (lub okresu) elektrycznego.

Dla uproszczenia prawidłowego ustawiania w modelu MES pozycji kątowej wirnika względem stojana, tak by dla każdej analizowanej chwili czasowej zachować wymagany kąt fazowy pomiędzy siłami magnetomotorycznymi stojana i wirnika, w opracowanym algorytmie obliczeniowym przyjęto, że dla chwili  $t=0$  oś magnetyczna  $d$  wirnika pokrywa się z osią fazy A uzwojenia stojana, rys. 3 (faza A przyjęta jako faza odniesienia).

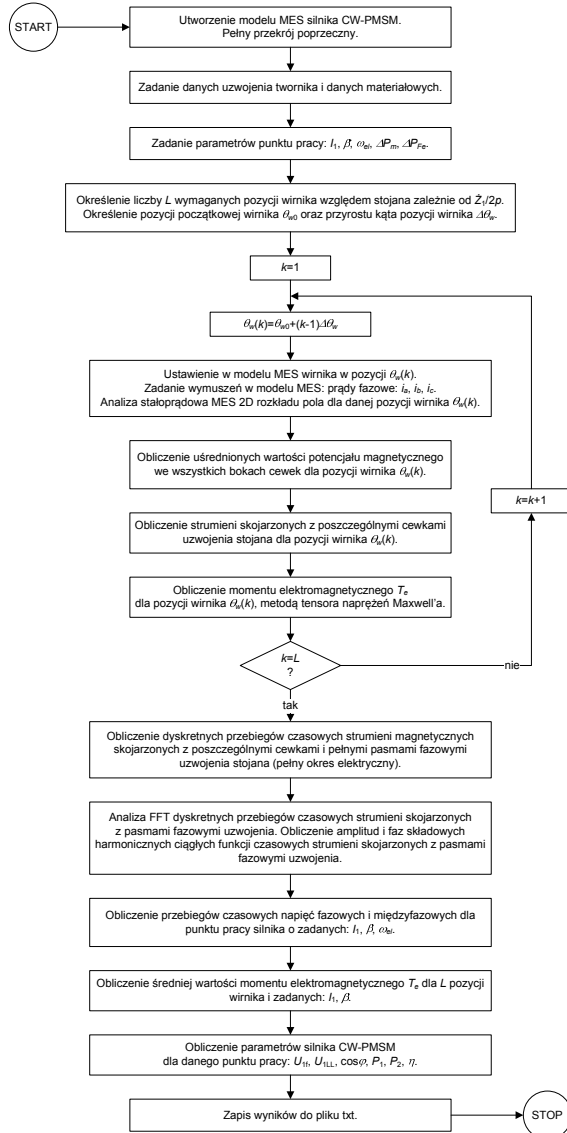


Rys. 3. Model połowy silnika CW-PMSM z cewkami skupionymi przygotowany wg wymagań opracowanego algorytmu. Liczba zębów stojana  $Z_1=9$ , liczba biegunów  $2p=6$ , liczba zębów na biegun i fazę  $q=0.5$

Założeniem algorytmu jest, że fazy uzwojenia stojana silnika CW-PMSM zasilane są prądami sinusoidalnie zmiennymi. Wielkościami zadanymi do przeprowadzenia obliczeń, określającymi punkt pracy silnika CW-PMSM są:

- moduł  $I_1$  wskaz prądu stojana  $I_1$ , wyrażony wartością skuteczną prądu;

- kąt fazowy  $\beta$  wskazu prądu stojana  $I_1$ , wyrażony w stopniach elektrycznych;
- prędkość kątowna elektryczna  $\omega_{el}$ ;
- straty mocy mechaniczne  $\Delta P_m$ ;
- straty mocy w pakiecie blach  $\Delta P_{Fe}$  (obliczone metodami analitycznymi).



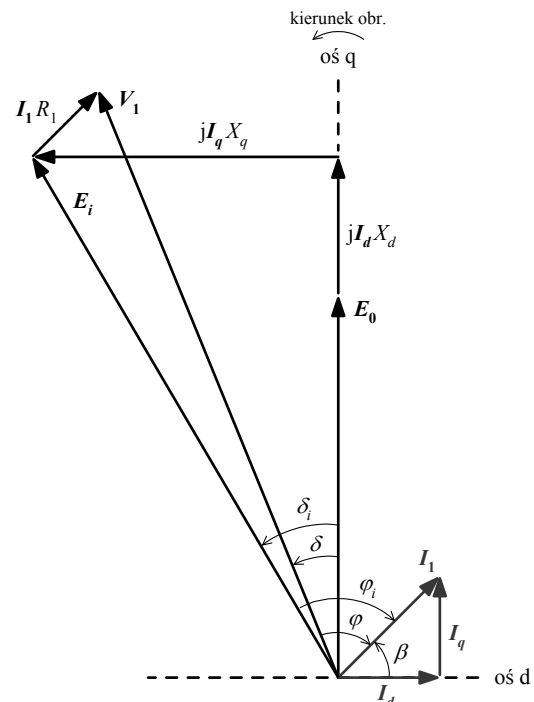
Rys. 4. Schemat algorytmu do obliczeń elektromagnetycznych silników CW-PMSM i PMSM, opartego na metodzie strumienia skojarzonego

W metodzie strumienia skojarzonego napięcie na zaciskach silnika przy zadanych warunkach obciążenia jest liczone zupełnie odmiennie w stosunku do opisanej wcześniej metody połowo-obwodowej obciążeniowej. Dla każdej z pozycji kątowych wirnika uwzględnianych w modelu MES, odpowiadających różnym dyskretnym chwilom czasowym pracy silnika przy danym obciążeniu, obliczane są strumienie magnetyczne skojarzone z poszczególnymi

fazami uzwojenia. Wykorzystuje się tu wartości średnie wektorowego potencjału magnetycznego  $A_z$  w obszarach modelu MES reprezentujących poszczególne boki cewek przynależnych do wybranej fazy uzwojenia stojana. W wyniku przeprowadzenia analiz MES rozkładu pola dla odpowiedniej ilości pozycji kątowych wirnika względem stojana, obliczane są dyskretne przebiegi czasowe strumieni skojarzonych z kolejnymi fazami uzwojenia, obejmujące jeden pełny okres elektryczny. Dyskretne przebiegi czasowe strumieni skojarzonych poddawane są analizie FFT i następnie zapisywane w postaci szeregów Fouriera jako funkcje ciągłe czasu. Znając funkcję ciągłą opisującą okresowy przebieg czasowy wartości chwilowych strumienia skojarzonego z daną fazą, przebieg czasowy wartości chwilowych napięcia fazowego na zaciskach silnika  $u_1(t)$  dla danego punktu pracy obliczany jest z zależności:

$$u_1(t) = \frac{d\Psi_1(t)}{dt} + i_1(t) \cdot R_1 + L_{c1} \frac{di_1(t)}{dt} \quad (1)$$

gdzie:  $\Psi_1$  – wypadkowy strumień magnetyczny skojarzony z jedną fazą uzwojenia stojana,  $L_{c1}$  – indukcyjność połączeń czołowych uzwojenia stojana,  $R_1$  – rezystancja fazowa stojana,  $i_1$  – prąd w uzwojeniu stojana.



Rys. 5. Wykres wskazowy silnika PMSM oraz CW-PMSM wykorzystywany w opracowanej implementacji metody strumienia skojarzonego

Przy wyżej opisanym sposobie obliczania przebiegu czasowego strumienia skojarzonego z fazą uzwojenia stojana  $\Psi_1(t)$ , uwzględniony jest już wpływ rozproszenia żłobkowego i szczelinowego. Jedyne rozproszenie połączeń czołowych uzwojenia nie jest uwzględnione w  $\Psi_1(t)$  i dlatego jest ono w zależności (1) uwzględniane za pomocą indukcyjności  $L_{c1}$ .

Znając przebieg czasowy wartości chwilowych napięcia fazowego, łatwo można obliczyć wartość skuteczną napięcia zasilania silnika dla danego punktu jego pracy. Przebiegi czasowe wartości chwilowych prądów fazowych silnika są w algorytmie funkcjami zadanymi, zatem można też obliczyć kąt fazowy  $\varphi$  pomiędzy wskazem napięcia i prądu, współczynnik mocy  $\cos\varphi$  oraz kąt mocy  $\delta$ . Wykorzystuje się w tym celu nieco inny wykres wskazowy maszyny PMSM (CW-PMSM), pokazany na rys. 5.

### 3. Przykładowe wyniki obliczeń silnika CW-PMSM

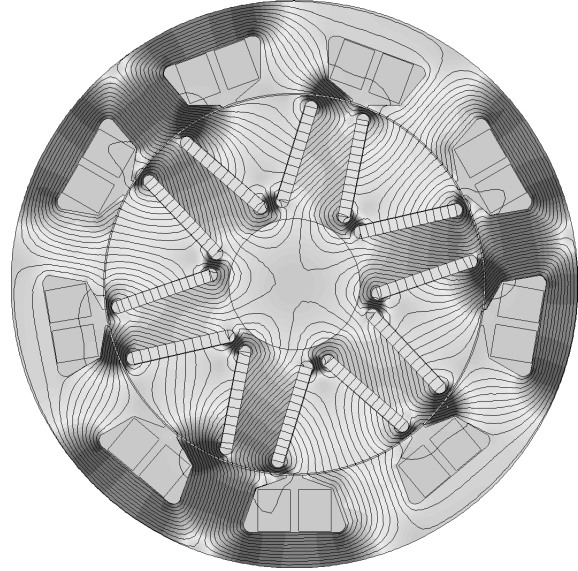
W celu sprawdzenia poprawności nowo opracowanego algorytmu i programu obliczeniowego, przeprowadzono szereg obliczeń elektromagnetycznych dla kilku wariantów silników CW-PMSM oraz PMSM. Poniżej zamieszczono przykładowe wyniki obliczeń dla silnika CW-PMSM o następujących danych konstrukcyjnych:

- liczba biegunów magnetycznych  $2p = 6$ ;
- średnica zewnętrzna pakietu blach stojana 208 mm (wznios osi wału  $H = 132$  mm);
- średnica wewnętrzna stojana 140 mm;
- długość pakietu blach  $L_{Fe} = 130$  mm;
- liczba żłobków stojana  $Z_1 = 9$ ;
- liczba zwojów szeregowych w fazie  $z_1 = 18$ ;
- uzwojenie stojana dwuwarstwowe (cewka skupiona nawinięta na każdym z zębów);
- liczba żłobków na biegun i fazę  $q = 0.5$ ;
- układ magnesów w wirniku: w kształcie litery "V" dla każdego bieguna;
- magnesy typu NdFeB.

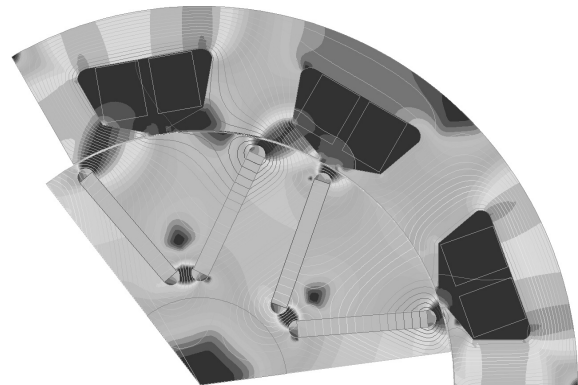
Obliczenia przeprowadzono dla założonej prędkości obrotowej znamionowej  $n_N = 2000$   $\text{min}^{-1}$ . Obliczano m.in. przebiegi czasowe napięć fazowych i międzyfazowych oraz wartości momentu elektromagnetycznego w szczelinie powietrznej silnika CW-PMSM przy zadanych wartościach skutecznych prądów obciążenia  $I_1$ .

Dla każdego z zadanych prądów  $I_1$  obliczenia przeprowadzono dla pewnego przedziału wartości kąta fazowego  $\beta$  wskazu prądu  $I_1$ , w celu

znalezienia optymalnego punktu pracy silnika, tzn. takiej wartości kąta  $\beta = \beta_{opt}$  przy której, dla danej wartości skutecznej prądu  $I_1$ , silnik osiąga największą wartość momentu elektromagnetycznego [8 ÷ 12].



Rys. 6. Przykładowe wyniki obliczeń elektromagnetycznych uzyskane nowym algorytmem. Rozkład linii ekwipotencjalnych pola oraz rozkład indukcji magnetycznej na przekroju poprzecznym silnika CW-PMSM przy pracy z prądem znamionowym  $I_1=182$  A i optymalnym kątem fazowym wskazu prądu  $\beta=125^\circ \text{el}$

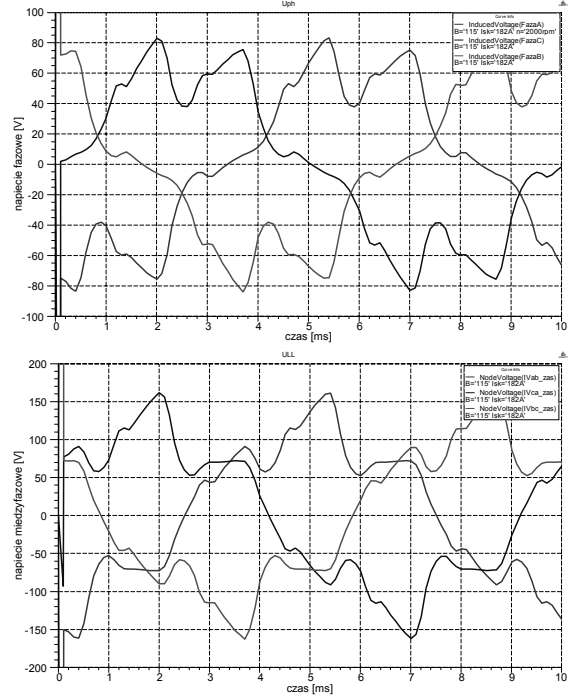
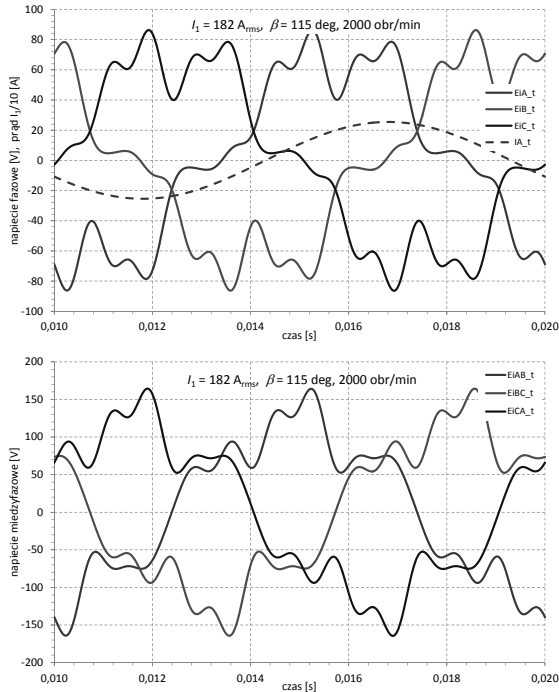


Rys. 7. Wyniki obliczeń elektromagnetycznych otrzymane programem komercyjnym. Rozkład linii ekwipotencjalnych pola oraz rozkład indukcji magnetycznej na przekroju poprzecznym modelowego silnika CW-PMSM dla punktu pracy  $I_1=182$  A,  $\beta=125^\circ \text{el}$

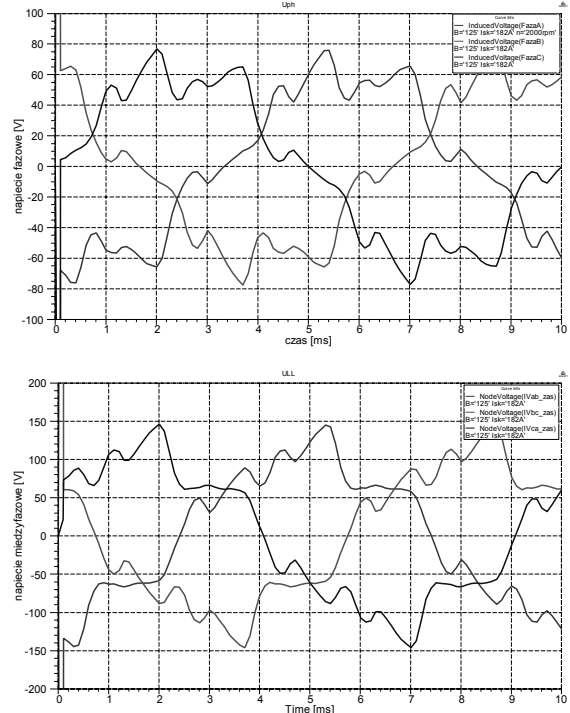
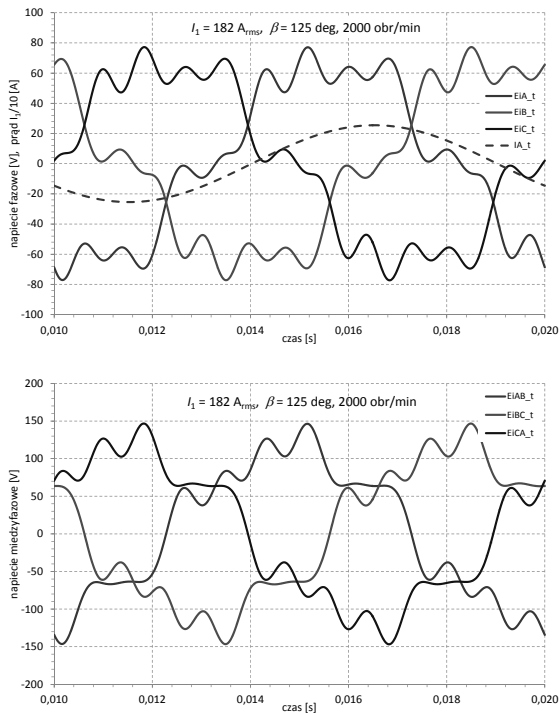
Te same obliczenia elektromagnetyczne silnika CW-PMSM o powyższych danych konstrukcyjnych przeprowadzono z wykorzystaniem jednego z komercyjnych programów do obliczeń rozkładu pól elektromagnetycznych metodą elementów skończonych. W programie

tym do przeprowadzenia obliczeń elektromagnetycznych zastosowano tzw. analizę MES dla stanów przejściowych [6, 7]. Wybrane wyniki obliczeń elektromagnetycznych uzyskane no-

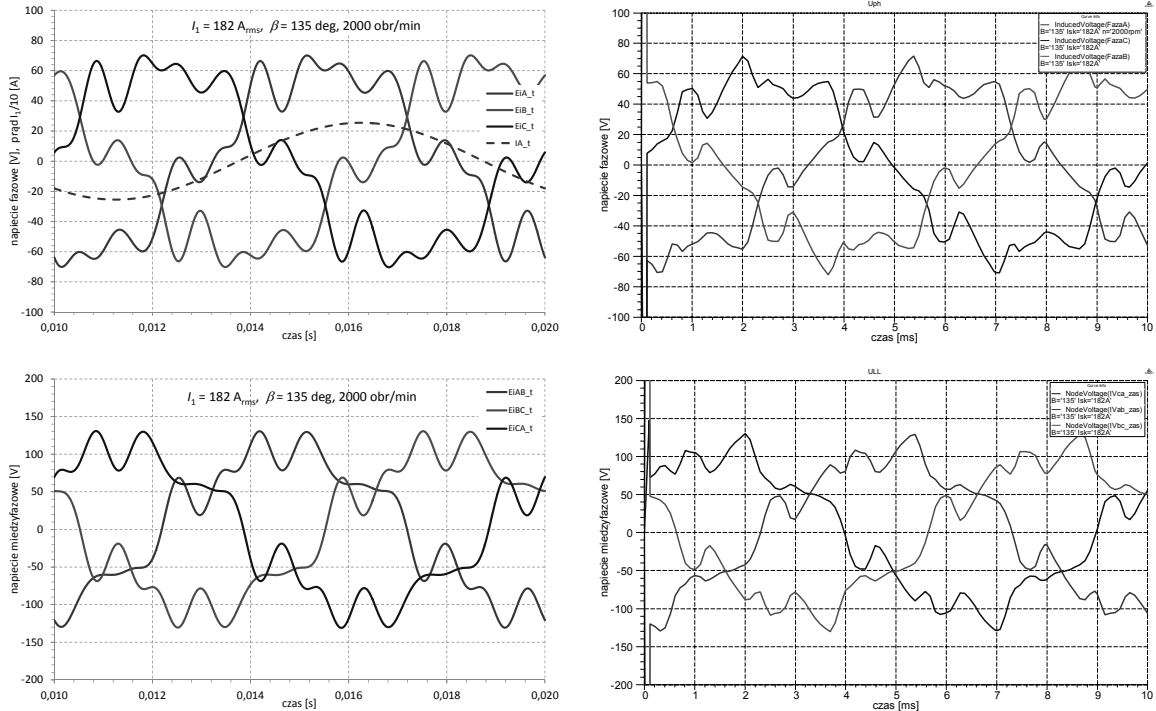
wym algorytmem obliczeniowym i ich porównanie z wynikami uzyskanymi programem komercyjnym pokazano na rysunkach 6 ÷ 12 oraz w tabelach 1 i 2.



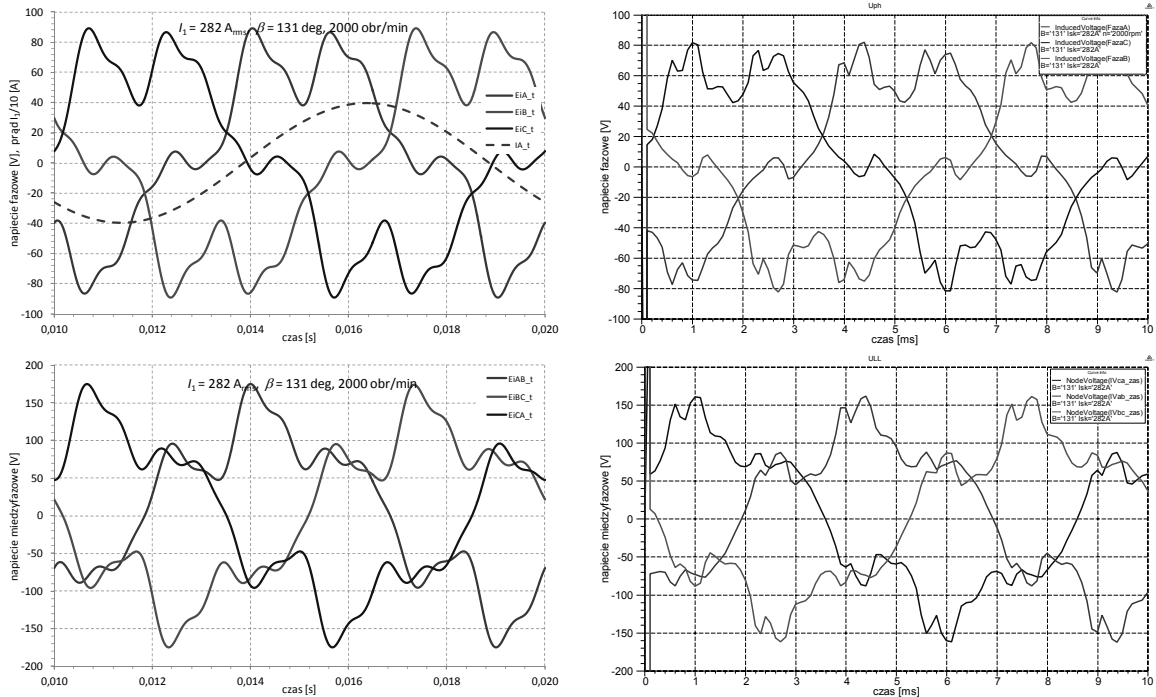
Rys. 8. Przebiegi czasowe napięć fazowych i międzyfazowych silnika CW-PMSM obliczone opracowanym oprogramowaniem dla  $I_1=182$  A,  $\beta=115^\circ$ el. (prąd znamionowy, zbyt słabe osłabianie strumienia magnetycznego) i te same przebiegi obliczone oprogramowaniem komercyjnym



Rys. 9. Przebiegi czasowe napięć fazowych i międzyfazowych silnika CW-PMSM obliczone opracowanym oprogramowaniem dla  $I_1=182$  A,  $\beta=125^\circ$ el. (obciążenie znamionowe, praca przy optimum momentu do prądu) i te same przebiegi obliczone oprogramowaniem komercyjnym



Rys. 10. Przebiegi czasowe napięć fazowych i międzyfazowych silnika CW-PMSM obliczone opracowanym oprogramowaniem dla  $I_1=182\text{ A}$ ,  $\beta=135^\circ$ el. (prąd znamionowy, nadmierne osłabianie strumienia magnetycznego) i te same przebiegi obliczone oprogramowaniem komercyjnym



Rys. 11. Przebiegi czasowe napięć fazowych i międzyfazowych silnika CW-PMSM obliczone nowo opracowanym oprogramowaniem dla  $I_1=282\text{ A}$ ,  $\beta=131^\circ$ el. (duże przeciążenie momentem przy optimum momentu do prądu) i te same przebiegi obliczone oprogramowaniem komercyjnym

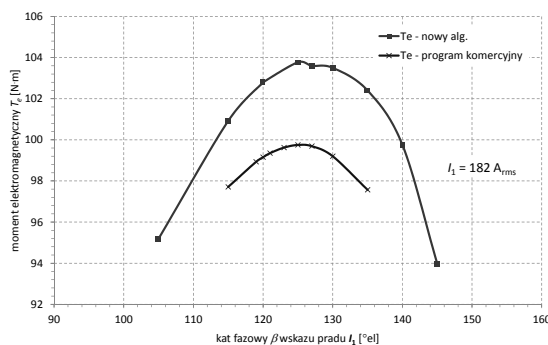
Tabela 1. Praca z  $I_1=182\text{A}$  (punkt znamionowy)

	$I_1$ A	$\beta_{opt}$ °el	$T_e$ N·m	$U_1$ $V_{rms}$	$\cos \varphi$ ---
nowy algorytm	182	125	103.6	84.1	0.86
program komercyjny	182	125	99.8	80.7	0.86

Tabela 2. Praca z  $I_1=282\text{A}$  (przeciążenie)

	$I_1$ A	$\beta_{opt}$ °el	$T_e$ N·m	$U_1$ $V_{rms}$	$\cos \varphi$ ---
nowy algorytm	282	131	142.1	89.6	0.73
program komercyjny	282	131	135.3	87.1	0.72

Wg danych z tabel 1 i 2, wartości skuteczne napięć międzyfazowych  $U_1$  na zaciskach silnika CW-PMSM wyliczane wg nowego algorytmu i wybranego oprogramowania komercyjnego przy identycznych wartościach prądu  $I_1$  i kąta  $\beta$  różnią się o nie więcej niż 4%. Obliczone wartości momentu elektromagnetycznego  $T_e$  różnią się o nie więcej niż 5%. Optymalny kąt fazowy  $\beta_{opt}$  wskazu prądu  $I_1$  obliczony wg nowego algorytmu dla prądu znamionowego  $I_1 = 182\text{ A}$  wyniósł  $125^\circ\text{el}$ , a dla prądu chwilowego przeciążenia  $I_1 = 282\text{ A}$  kąt ten wyniósł  $131^\circ\text{el}$ . Takie same wartości optymalnych kątów fazowych  $\beta_{opt}$  wskazu prądu obliczono przy pomocy oprogramowania komercyjnego (rys. 12).



Rys. 12. Zależność momentu elektromagnetycznego  $T_e$  od kąta fazowego  $\beta$  wskazu prądu  $I_1$ , obliczona dla modelowego silnika CW-PMSM wg nowego algorytmu i programem komercyjnym. Obliczenia dla wartości skutecznej prądu  $I_1=182\text{ A}$

Pokazane na rys. 8÷11 porównanie przebiegów czasowych napięć fazowych i międzyfazowych silnika CW-PMSM obliczonych wg nowego algorytmu i programem komercyjnym z wykorzystaniem analizy MES dla stanów przejściowych, wskazuje na poprawność nowego

algorytmu. Niezależnie od tego, dla jakiej wartości skutecznej prądu  $I_1$  i jakiej wartości kąta fazowego  $\beta$  wskazu prądu były liczone przebiegi czasowe napięć, kształty odpowiednich przebiegów obliczonych różnymi metodami są bardzo zbliżone do siebie. Zbieżność obliczanych dwiema metodami przebiegów czasowych napięć można jeszcze poprawić, jeżeli w obliczeniach z wykorzystaniem nowego algorytmu obliczeniowego zastosuje się mniejszy przyrost kąta obrotu wirnika, tak by w obliczeniach uwzględnić większą ilość pozycji wirnika względem stojana przypadających na jedną podziałkę żłobkową stojana. Pokazane na rys. 8 ÷ 11 przebiegi czasowe napięć obliczone wg nowego algorytmu otrzymano przy 10 pozycjach wirnika względem stojana na podziałkę żłobkową, co odpowiada przyrostowi kąta obrotu wirnika o  $12^\circ\text{el}$ .

#### 4. Podsumowanie

Różnice w wartościach napięcia  $U_1$  i momentu elektromagnetycznego  $T_e$  obliczanych wg nowo opracowanego algorytmu i przy pomocy programu komercyjnego wynikają m.in. z nieznacznie różnych charakterystyk magnesowania blachy prądnicowej wykorzystanych w modelach polowych silnika CW-PMSM, pomimo iż w obu tych modelach założono zastosowanie tego samego gatunku blachy prądnicowej. W przypadku nowego algorytmu obliczeniowego wykorzystano charakterystykę magnesowania dostępną w oprogramowaniu FEMM, a w przypadku programu komercyjnego wykorzystano charakterystykę tej samej blachy dostarczaną przez producenta oprogramowania. Wg tej drugiej charakterystyki przyjęta blacha prądnicowa nieco wcześniej ulega nasyceniu, co skutkuje m.in. niższym napięciem  $U_1$  oraz niższym momentem  $T_e$ .

Nowo opracowany algorytm i bazujące na nim oprogramowanie umożliwiają obliczanie charakterystyk elektromechanicznych silników CW-PMSM stosowanych w napędach elektrycznych o dwustrefowo regulowanej prędkości obrotowej, w których w pierwszej strefie regulacji prędkości silnik jest sterowany wg kryterium optimum momentu do prądu, a w drugiej strefie regulacji stosowane jest osłabianie strumienia magnetycznego głównego w silniku w celu umożliwienia pracy napędu z wyższymi prędkościami obrotowymi, przy ograniczonym od góry napięciu zasilania silnika [8 ÷ 12]. Dwustrefowa regulacja prędkości



obrotowej jest m.in. stosowana w nowoczesnych pojazdach elektrycznych drogowych i szynowych.

Wiarygodność i dokładność przedstawionego w artykule algorytmu i oprogramowania do obliczeń elektromagnetycznych silników CW-PMSM, opracowanego w ramach projektu badawczego N N510 512440, została potwierdzona wynikami obliczeń wykonanych w innych, zaawansowanych, komercyjnych programach obliczeniowych jak i wynikami badań laboratoryjnych na wykonanym modelowym silniku CW-PMSM.

### Literatura

- [1]. M.A. Rahman, P. Zhou, *Determination of Saturated Parameters of PM Motors Using Loading Magnetic Fields*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-27, No. 5, pp. 3947-3950, Sep. 1991.
- [2]. M.A. Rahman, P. Zhou, *Field-Based Analysis for Permanent Magnet Motors*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-30, No. 5, pp. 3664-3667, Sep. 1994.
- [3]. P. Zhou, M.A. Rahman, M.A. Jabbar, *Field Circuit Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-30, No. 4, pp. 1350-1359, July 1994.
- [4]. R. Rossa, *Poprawa charakterystyk elektromechanicznych silników SynRM poprzez wprowadzenie magnesów trwałych do wirnika*, Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne”, BOBRME Komel, nr 77/2007, str. 257-261.
- [5]. Rossa R., Król E., *Metoda obwodowo-polowa obliczania charakterystyk zewnętrznych prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi pracujących samotnie na odbiorniki typu R lub RL*, Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne”, nr 80/2008, str. 175-179, BOBRME KOMEL.
- [6]. Preston T.W., Reece A.B.J., Sangha P.S., *Induction motor analysis by time-stepping techniques*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-24, No. 1, pp. 471-474, Jan. 1988.
- [7]. Williamson S., Lim L.H., Smith A.C.: *Transient analysis of cage-induction motors using finite elements*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-26, No. 2, pp. 941-944, March 1990.
- [8]. 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.
- [9]. 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.
- [10]. 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.
- [11]. Rossa R., Król E., *Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne”, BOBRME Komel, nr 81/2009.
- [12]. Rossa R., Król E., *Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „E-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych*, Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne”, BOBRME Komel, nr 97/2012.

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. Paweł Pistelok  
Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „KOMEL”  
40-203 Katowice,  
al. Roździeńskiego 188.

### Recenzenci

prof. dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski  
dr inż. Michał Michna

