

Mariusz Jagieła
Politechnika Opolska, Opole

NOWE POŁOWO-ZORIENTOWANE ŚRODOWISKO KOMPUTEROWE DO OBLICZEŃ KONSTRUKCYJNYCH KLATKOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

NEW FIELD-ORIENTED ENVIRONMENT FOR COMPUTER-ASSISTED DESIGN OF INDUCTION MACHINES

Abstract: This paper describes an environment for computer assisted design of three-phase squirrel cage induction machines. The finite element method is used as a computational technique to appropriately account for detailed geometrical properties, skew, material nonlinearity and deep-bar effect. It enables determination of all electromagnetic quantities that are usually of interest of designers of electrical machines directly from the model. Besides of that it contains module for design optimization. The design of experiment is used as a principal optimization technique. Sample results including measurements and the results of optimization are presented.

1. Wstęp

Trójfazowe klatkowe maszyny indukcyjne są najczęściej stosowanymi rozwiązaniami dla napędów przemysłowych średniej i dużej mocy. Typowe problemy konstrukcyjne tych maszyn są obecnie bardzo szczegółowo poznane, o czym świadczy liczba prac opublikowana na ten temat do tej pory, np. [1-12]. Można jednak w dalszym ciągu mówić o wielu wyzwaniach związanych z projektowaniem tych maszyn. Wyzwania te są dyktowane przez coraz wyższe wymagania stawiane napędom elektrycznym pod względem sprawności, możliwością współpracy z przekształtnikiem lub potrzebą wykonania maszyny o nietypowej budowie. Jednym z aktualnych przykładów takich wyzwań jest projektowanie serii silników wysokosprawnych. W maszynach tych trudno jest spełnić jednocześnie wymagania dotyczące wysokiej sprawności w warunkach pracy nominalnej oraz wysokiej wartości momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu. Czynnikiem, który najbardziej oddziałuje na wartość momentu rozruchowego maszyny, przy stałej - określonej wartości amplitudy siły magnetomotorycznej stojana, jest kształt pręta uzwojenia wirnika. Zadanie projektowania takiego silnika może być zatem sformułowane jako zadanie syntezy kształtu przekroju poprzecznego pręta. Wymaga to bardzo dokładnej znajomości rozkładu gęstości prądu w przekroju poprzecznym pręta.

Programy komputerowe wspomagające projektowanie obwodów magnetycznych maszyn

indukcyjnych, których algorytm obliczeniowy jest oparty na modelach analitycznych oraz modelach obwodowych obwodu magnetycznego są w dalszym ciągu wykorzystywane w przemysłowych biurach konstrukcyjnych. W wielu przypadkach modele takie dają poprawne wyniki, zwłaszcza jeśli projektowany układ należy do serii produkcyjnej, dla której doświadczalnie wyznaczono współczynniki korygujące. Współczynniki te są właściwe dla stosowanego procesu technologicznego oraz są związane ze zjawiskami, które nie mogą być poprawnie uwzględnione w opisie matematycznym, np. prądy indukowane w masywnych częściach przewodzących. W przypadku konstrukcji obwodów magnetycznych odbiegających proporcjami geometrycznymi od układów typowych, modele takie mogą nie dawać poprawnych wyników. Z takiego punktu widzenia wydaje się, że obecna chwila jest właściwym momentem do wprowadzenia metod polowych jako narzędzi wspomagających projektowanie obwodów magnetycznych maszyn indukcyjnych w przemysłowych biurach konstrukcyjnych.

W obecnej chwili istnieje duży dostęp do oprogramowania przeznaczonego do obliczeń polowych. W większości przypadków są to bardzo rozbudowane systemy ogólnego przeznaczenia dedykowane zwłaszcza modelowaniu, a w mniejszym stopniu obliczeniom konstrukcyjnym. Z powodu dużej ogólności, lecz także ze względu na niedostępność wielu funkcji sys-

temy tego rodzaju trudno jest stosować w biurach konstrukcyjnych jako jedno z podstawowych narzędzi projektowania.

W niniejszej pracy prezentowane jest nowe polowo zorientowane środowisko obliczeniowe przeznaczone do wspomagania procesu projektowania klatkowych maszyn indukcyjnych. Oprogramowanie to nie jest środowiskiem ogólnego przeznaczenia ani systemem ekspertowym, lecz narzędziem wspomagającym pracę konstruktora poprzez możliwość wykonania obliczeń charakterystyk eksploatacyjnych analizowanej maszyny z niskim błędem.

Podstawową metodą obliczeniową systemu jest metoda polowo-obwodowa oparta na metodzie elementów skończonych [5-12]. W odróżnieniu do systemów obliczeniowych ogólnego przeznaczenia opracowane środowisko nie posiada narzędzi do przygotowania opisu geometrycznego maszyny, lecz opis ten jest tworzony przez oprogramowanie w sposób samoczynny. Podobnie wszystkie pozostałe parametry modelu, w tym opis uzwojeń, są operacjami w dużym stopniu zautomatyzowanymi, co znacznie skraca czas przygotowania projektu.

Prezentowane oprogramowanie posiada interfejs użytkownika utworzony w języku polskim. W obecnej chwili możliwe jest dokonywanie następujących obliczeń:

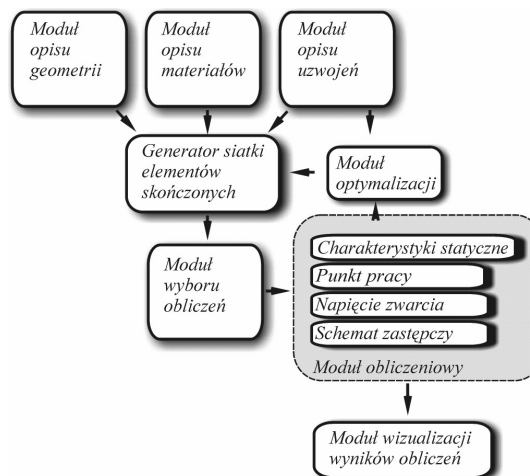
- obliczenia wszystkich charakterystyk eksploatacyjnych, nominalnego punktu pracy i napięcia zwarcia;
- obliczenia strat w uzwojeniach i strat w żelazie;
- obliczenia adiabaticznego przyrostu temperatury uzwojenia stojana oraz wirnika;
- obliczenia wielkości pomocniczych takich jak masy elementów silnika, moment bezwładności, współczynnik zapelnienia żłobka, powierzchnia żłobka, itp.;
- wyznaczanie parametrów schematu zastępczego silnika;
- maksymalizacja momentu rozruchowego silnika i sprawności metodą numerycznej syntezy kształtu żłobka.

2. Struktura systemu

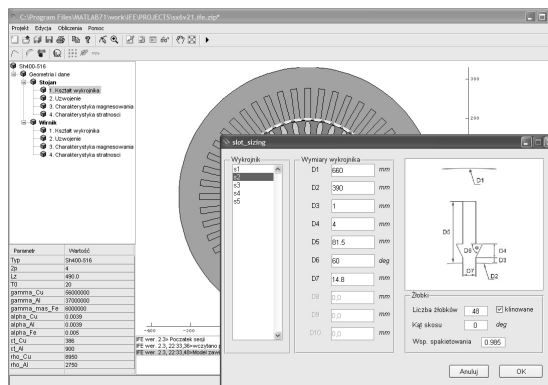
2.1 Główne elementy systemu

Opracowany system obliczeniowy składa się z kilku modułów logicznych (rys.1). Podczas tworzenia projektu użytkownik jest prowadzony przez system, który oczekuje na wprowadzenie niezbędnych informacji. Wszystkie wymagane

parametry modelu są wprowadzane do systemu za pomocą prostego interfejsu użytkownika (rys. 2). Właściwości użytych materiałów, takie jak ich charakterystyki magnesowania, stratności, przewodności elektryczne i ciepłe są zgromadzone w prostej bazie danych. Moduł opisu geometrii pozwala na dokonanie wyboru jednego z predefiniowanych kształtów żłobków, które są zgromadzone w formie biblioteki. Oprogramowanie pozwala wprowadzić dowolny kształt żłobka. Ograniczeniem aktualnej wersji jest możliwość zdefiniowania jednego uzwojenia stojana oraz jednego uzwojenia wirnika, tzn. nie można analizować maszyn o uzwojeniu wirnika dwuklatkowym z dwoma oddzielnymi uzwojeniami.



Rys. 1. Diagram ilustrujący strukturę logiczną systemu.



Rys. 2. Interfejs użytkownika systemu z widocznym oknem wyboru kształtu żłobka stojana

Oprogramowanie przewiduje specjalne kształty żłobków w tym żłobki przeznaczone do klinowania za pomocą klinów magnetycznych. W projektowanych silnikach możliwe jest zastosowanie uzwojenia stojana jedno- lub dwuwarstwowego. Poskok żłobkowy jest obliczany

automatycznie przez program lub może być określony przez użytkownika celem uwzględnienia uzwojeń różnych typów. Możliwe liczby grup równoległych są również obliczane przez program. Użytkownik ma za zadanie wybranie jednej z sugerowanych liczb. W kolejnym etapie określone są pozostałe parametry elektryczne uzwojenia takie jak rodzaj przewodu, liczba przewodów połączonych szeregowo oraz liczba przewodów połączonych równoległe. Na podstawie danych geometrycznych program samoczynnie oblicza impedancję połączeń czołowych. W ostatnim etapie projektowania uzwojenia określa się rodzaj skojarzenia faz. Definiowanie uzwojenia wirnika wymaga użycia znacznie mniejszej liczby parametrów. Użytkownik precyzuje, czy w maszynie występuje uzwojenie odlewane, czy prętowane. Zależnie od wyboru rodzaju uzwojenia, w kolejnym etapie określa się grubość izolacji pręta oraz odległość pierścienia zwierającego od pakietu rdzenia i wymiary pierścienia. Dla zadanych wymiarów program samoczynnie oblicza impedancje zakończeń prętów znajdujących się poza rdzeniem oraz impedancję wycinka pierścienia zwierającego. Etap ten kończy fazę przygotowania modelu. Wprowadzone dane są zapisywane do skompresowanego pliku, co umożliwia ograniczenie ilości użytej przestrzeni dyskowej komputera oraz ułatwia zarządzanie plikami zawierającymi dane projektowe. Procedury podziału obszaru obliczeniowego na elementy skończone są uruchamiane podczas zapisu danych do pliku bez ingerencji użytkownika. System samoczynnie dostosowuje gęstość siatki we wszystkich obszarach modelu. W kolejnym etapie, za pomocą prostego interfejsu następuje wybór rodzaju obliczeń, które system ma za zadanie przeprowadzić. Dla zadanego napięcia zasilającego oraz częstotliwości obliczenia są wykonywane jedno po drugim dla zadanego zakresu poślizgu lub prędkości obrotowej wirnika. Umożliwia to otrzymanie pełnych charakterystyk eksploatacyjnych. Charakterystyki te mogą być prezentowane w funkcji poślizgu, prędkości obrotowej lub mocy mechanicznej. Na żądanie użytkownika, po podaniu mocy nominalnej oraz strat mechanicznych, system oblicza nominalny punkt pracy maszyny. Możliwe jest także obliczenie napięcia zwarcia. Ponieważ system posługuje się metodą połową ze szczegółowym podziałem obwodu magnetycznego maszyny, to dla dowolnego punktu pracy możliwym jest wyznaczenie roz-

kładów linii sił pola oraz indukcji magnetycznej w całym obwodzie magnetycznym maszyny.

2.2 Moduł optymalizacji

W systemie zaimplementowano moduł do maksymalizacji parametrów eksploatacyjnych maszyny, w szczególności sprawności oraz momentu rozruchowego. Jednym z czynników konstrukcyjnych maszyny indukcyjnej posiadających bardzo duży wpływ na wymienione parametry eksploatacyjne maszyny jest kształt przekroju poprzecznego i wymiarów pręta uzwojenia klatkowego wirnika. Prezentowany system obliczeniowy umożliwia optymalizację kształtu przekroju poprzecznego pręta dla kilku różnych funkcji celu. Jako podstawową metodę optymalizacyjną zastosowano metodę projektowanego eksperymentu [13]. Metoda ta polega na obliczeniu skończonej liczby punktów odniesienia w N -wymiarowej przestrzeni liniowej generowanej przez zmienne decyzyjne (wymiary geometryczne). W analizowanym przypadku, zmiennymi tymi są wymiary użyte do parametryzacji kształtu żłobka. W zależności od typu żłobka N wynosi od 4 do 9. Tak utworzona siatka danych jest poddawana aproksymacji. Aproksymowany wynik stanowi tzw. model-surogat dla właściwej metody optymalizacji, którą może być dowolny algorytm minimalizacji funkcji wielu zmiennych, np. metoda najszybszego spadku. Powodem zastosowania tej metody obliczeniowej jest niższy, w porównaniu z innymi algorytmami, koszt obliczeniowy dzięki czemu konstruktor jest w stanie otrzymać wynik w czasie rzędu kilkudziesięciu minut za pomocą współczesnego komputera o przeciętnej wydajności. Moduł optymalizacyjny jest uruchamiany w tym samym środowisku, w którym realizowany jest projekt. Użytkownik ma za zadanie wprowadzenie dolnych i górnych granic zmienności poszczególnych wymiarów geometrycznych żłobka, a następnie liczbę obliczeń (punktów siatki) w każdym z N kierunków. System samoczynnie wykonuje niezbędne obliczenia, a po ich zakończeniu użytkownik ma za zadanie wybór jednej z trzech funkcji celu, dla której obliczane jest ekstremum globalne.

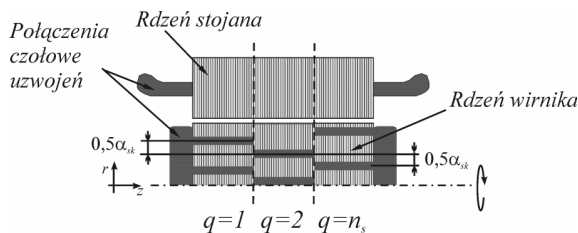
3. Metoda obliczeń

Zastosowana w oprogramowaniu metoda obliczeniowa polega na rozwiązaniu zadania wyznaczenia rozptyłu prądów w uzwojeniach maszyny, przy zadanym sinusoidalnym wymu-

szeniu napięciowym od strony uzwojenia stojana. Zadanie to jest sformułowane jako zadanie polowo-obwodowe o sprzężeniu silnym [5]. Do opisu pola magnetycznego zastosowano metodę magnetycznego zespolonego potencjału wektorowego [5-8]. Trójfazowa maszyna indukcyjna jest zasilana z symetrycznego źródła napięcia. Obwód magnetyczny silnika o budowie cylindrycznej jest symetryczny na płaszczyźnie $r\varphi$. Niesymetria obwodu magnetycznego w płaszczyźnie rz może wynikać jedynie z istnienia skosu żłobków. Celem uwzględnienia skosu zastosowano model quasi-trójwymiarowy skonstruowany poprzez szeregowe połączenie kilku modeli dwuwymiarowych (rys. 3). W każdej z warstw pojedynczy- q -ty model dwuwymiarowy posiada stojan lub wirnik przesunięty o kąt:

$$\alpha_{skq} = \left(\frac{q-1}{n_s-1} - \frac{1}{2} \right) \alpha_{sk} \quad (1)$$

względem modelu sąsiadującego, gdzie n_s jest liczbą wszystkich warstw (podukładów), natomiast α_{sk} jest kątem skosu żłobków, $q=1,2,\dots,n_s$.



Rys. 3. Ilustracja podziału modelu na podukłady w kierunku osiowym w celu uwzględnienia skosu żłobków

Taki model oprócz uwzględnienia lokalnej zmienności przenikalności magnetycznej w przekroju poprzecznym maszyny (płaszczyzna $r\varphi$), umożliwi uwzględnienie zmienności przenikalności magnetycznej w kierunku osiowym (płaszczyzna rz) pod wpływem skosu rdzenia. Liczba modeli składowych w kierunku osiowym wynosi pięć. Zjawisko wypierania prądu w prętach uzwojenia klatkowego jest uwzględnione poprzez zastosowanie opisu wynikającego ze spełnienia równań Maxwella w obszarze przewodu masywnego (pręta) oraz praw Kirchhoffa w obwodach utworzonych przez pręty, zakończenia prętów oraz pierścienie zwierające. Dla uzwojenia stojana rozwiązywane są równania wynikające ze spełnienia praw Kirchhoffa w obwodach utworzonych przez połączone szeregowo lub równolegle grupy cewek, skojarzenie faz oraz do-

prowadzenia do źródła. Zastosowany model uwzględnia nieliniowe charakterystyki magnesowania części obwodu magnetycznego. Podczas tworzenia systemu szczególna uwaga została skierowana na opis charakterystyk magnesowania. Ponieważ zastosowana metoda obliczeniowa wykorzystuje wielkości zespolone, to koniecznym jest wyznaczenie charakterystyki efektywnej tj. przenikalności obliczonej dla sinusoidalnej czasowej zmienności indukcji. Drugi problem wiąże się z potrzebą ekstrapolacji charakterystyk magnesowania dla wartości natężenia pola magnetycznego większych od wartości podanych w katalogach producentów blach. Jest to związane z koniecznością precyzyjnego obliczenia przenikalności magnetycznej w obszarach bardzo dużego nasycenia, np. w sklepieniach żłobków o budowie zamkniętej.

4. Przykłady

4.1. Charakterystyki eksploatacyjne

W celu demonstracji podstawowych możliwości opracowanego oprogramowania przeprowadzono obliczenia dla dwóch silników indukcyjnych średniej mocy. Podstawowe dane techniczne maszyn zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne analizowanych silników

Silnik 1	
Moc znamionowa	355 kW
Napięcie znamionowe	1000 V
Stosunek liczby żłobków stojana do liczby żłobków wirnika	48/38, bez skosu
Uzwojenie wirnika	Spawane, miedziane
Silnik 2	
Moc znamionowa	400 kW
Napięcie znamionowe	6000 V
Stosunek liczby żłobków stojana do liczby żłobków wirnika	48/46, skos
Uzwojenie wirnika	Odlwane, aluminiowe

Po utworzeniu projektu i zapisaniu danych do zbioru plików, użytkownik może wybrać jedną z opcji obliczeniowych systemu.

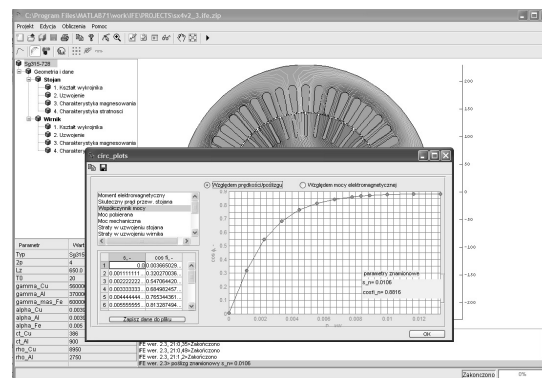
Jedną z funkcji programu jest obliczanie punktu pracy maszyny w zadanych warunkach zasilania. W celu wyznaczenia punktu pracy, użyt-

kownik dla zadanych: napięcia, częstotliwości oraz temperatury pracy uzwojeń, ma za zadanie podanie całkowitej mocy obciążenia oraz strat mechanicznych. Dane te są wprowadzane do systemu poprzez prosty interfejs użytkownika. System oblicza poślizg wirnika odpowiadający zadanemu obciążeniu, a na tej podstawie możliwym jest wyznaczenie pozostałych ważnych parametrów eksploatacyjnych takich, jak prąd znamionowy oraz napięcie zwarcia. Porównanie przykładowych parametrów wyznaczonych przez system z dostępnymi danymi Doświadczalnymi zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie wyników obliczeń z danymi pomiarowymi.

Silnik 1		
	obliczenia	pomiary
Poślizg znamionowy	1,16 %	1,20 %
Prąd znamionowy	246 A	250 A
Znamionowy współczynnik mocy	0,87	0,86
Stosunek momentu rozruchowego do momentu znamionowego	1,8	1,9
Silnik 2		
	obliczenia	pomiary
Poślizg znamionowy	0,73 %	0,8 %
Prąd znamionowy	46,9 A	47,7 A
Znamionowy współczynnik mocy	0,83	0,84
Stosunek momentu rozruchowego do momentu znamionowego	5,8	5,3

Oprócz możliwości wyznaczenia punktu pracy system umożliwia obliczenie 13 charakterystyk eksploatacyjnych. Wszystkie charakterystyki są obliczane w jednym cyklu. Charakterystyki te mogą być prezentowane graficznie względem poślizgu, prędkości obrotowej lub mocy mechanicznej. Do ich prezentacji służy nieskomplikowany interfejs użytkownika (rys. 4).



Rys. 4. Interfejs użytkownika systemu z widocznym oknem modułu do obliczeń charakterystyk statycznych

4.2. Schemat zastępczy

Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej odgrywa ważną rolę nie tylko z punktu widzenia charakterystyk eksploatacyjnych, ale także z punktu widzenia możliwości wyznaczenia charakterystyk dynamicznych oraz z punktu widzenia sterowania [10-12]. Prezentowany system został wyposażony w funkcje przeznaczone do wyznaczenia parametrów schematu zastępczego. Zastosowano podstawowy schemat zastępczy maszyny indukcyjnej o jednej gałęzi dla uzwojenia wirnika. Za pomocą systemu możliwe jest wyznaczenie parametrów schematu zastępczego w każdym punkcie pracy. Dzięki temu uwzględnia się nieliniowość parametrów schematu zastępczego pod wpływem zmiany przenikalności magnetycznej obwodu magnetycznego, a także wypierania prądu w prętach uzwojenia wirnika. Parametry schematu zastępczego są obliczane poprzez naprzemienne użycie modelu połowo-obwodowego o wymuszeniu prądowym oraz o wymuszeniu napięciowym.

4.3. Optymalizacja

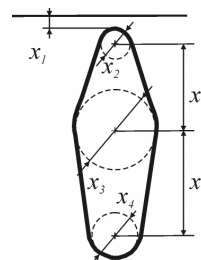
W celu demonstracji użycia modułu optymalizacyjnego przeprowadzono syntezę kształtu żłobka wirnika silnika 2 (tab. 2). Wirnik tej maszyny posiada 46 żłobków o budowie zamkniętej oraz kącie skosu równym jednej podziałce żłobkowej. Zadanie obliczeniowe jest sformułowane jako maksymalizacja momentu rozruchowego oraz maksymalizacja sprawności silnika dla nominalnego punktu pracy.

W opracowanym systemie możliwość optymalizacji elementów konstrukcyjnych maszyny ograniczono do optymalizacji kształtu przekroju poprzecznego żłobka wirnika. Podejście to znajduje uzasadnienie z kilku powodów.

Pierwszym z nich jest fakt, że parametr ten jest jednym z najsilniej oddziałujących na charakterystyki eksploatacyjne maszyny. Kształtując odpowiednio przekrój poprzeczny pręta można osiągnąć realizację wymienionych wyżej celów wykorzystując zjawisko wypierania prądu. Drugi istotny argument jest związany z faktem, że górną graniczną wartość sprawności maszyny, przy spełnieniu wymagań dotyczących momentu rozruchowego, określają straty w uzwojeniu stojana. Te z kolei, można doprowadzić do najmniejszej możliwej wartości tylko przy uwzględnieniu wszystkich ograniczeń wynikających z budowy uzwojenia stojana, izolacji, jak i budowy rdzenia stojana, przy czym decydującymi są czynniki natury mechanicznej, tj. wytrzymałość i drgania. Zagadnienie tego rodzaju najdogodniej jest rozwiązywać metodą prób i błędów, gdyż zadania sformułowane jako jednoczesne poszukiwanie wszystkich wymiarów geometrycznych obwodu magnetycznego zawierają bardzo dużą liczbę zmiennych decyzyjnych i skomplikowane ograniczenia. Rozwiązywanie takich zadań w dalszym ciągu jest przedmiotem badań naukowych i nie opracowano dotychczas dla nich wydajnych algorytmów obliczeniowych. Kształt żłobka rozpatrywanego silnika jest przedstawiony na rys. 5. Jest on jednoznacznie określony przez sześć wymiarów geometrycznych. W procesie optymalizacji wymiary te są zmiennymi decyzyjnymi. Optymalizacja jest realizowana dla funkcji celu postaci:

$$J = \sqrt{w_1(\cos\varphi)^2 + w_2\left(\frac{T_l}{T_{lmax}}\right)^2 + w_3\eta^2} \quad (2)$$

gdzie $\cos\varphi$ jest współczynnikiem mocy, T_l momentem rozruchowym, T_{lmax} największą wartością momentu rozruchowego osiągniętą w pierwszym etapie obliczeń podczas tworzenia modelu-surogatu, η sprawnością silnika. Zastosowano jednostkowe współczynniki wagowe w_1 , w_2 , w_3 . Na podstawie wzoru (2) łatwo jest wyciągnąć wniosek, że funkcja ta wymaga prowadzenia obliczeń zarówno dla poślizgu nominalnego, jak i dla poślizgu równego jedności. W prezentowanym systemie działania te są przeprowadzane samoczynnie na podstawie jednej decyzji użytkownika.



Rys. 5. Kształt żłobka wirnika silnika 2 wraz z oznaczeniem zmiennych decyzyjnych dla modułu optymalizacyjnego

Dla funkcji celu (2) dla analizowanej maszyny indukcyjnej osiągnięto wyniki zestawione w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki optymalizacji kształtu żłobka w silniku 2.

Wymiary żłobka		
Zmienne decyzyjne	Przed optymalizacją	Po optymalizacji
x_1	0,8 mm	0,6 mm
x_2	11,0 mm	11,8 mm
x_3	14,8 mm	15,2 mm
x_4	6,4 mm	8,9 mm
x_5	11,6 mm	13,1 mm
x_6	48,5 mm	36,1 mm
Pole przekroju poprzecznego	723 mm ²	683 mm ²
Parametry eksploatacyjne silnika		
Poślizg znamionowy	0,73 %	0,73 %
Prąd znamionowy	46,9 A	45,9 A
Znamionowy współczynnik mocy	0,83	0,84
Sprawność znamionowa	97 %	97 %
Stosunek momentu rozruchowego do momentu nominalnego	1,1	1,31

Wyniki te są satysfakcjonujące. Jako rezultat otrzymano maszynę o większej wartości momentu rozruchowego i wyższym współczynniku mocy, przy zachowaniu takiej samej sprawności, jak w rozwiązaniu prototypowym. W wyniku optymalizacji pole przekroju poprzecznego pręta uległo zmniejszeniu w stosun-

ku 0,944, co nie pogarsza w sposób istotny warunków pracy silnika na skutek przyrostu temperatury uzwojenia wirnika.

5. Wnioski

W pracy zaprezentowano możliwości nowego oprogramowania do komputerowego wspomaganie projektowania trójfazowych klatkowych maszyn indukcyjnych. Zaprezentowane wyniki obliczeń wykazały adekwatność zastosowanego modelu matematycznego i przyjętych założeń. Moduł przeznaczony do optymalizacji kształtu przekroju poprzecznego pręta uzwojenia klatkowego wirnika umożliwia osiągnięcie lepszych rezultatów od wyników projektowania wstępnego, co poparto przykładem obliczeniowym. Zdaniem Autora, opracowane oprogramowanie może odgrywać istotną rolę jako narzędzie wspomagające pracę inżyniera w przemysłowym biurze konstrukcyjnym.

6. Literatura

- [1]. Dąbrowski M., *Konstrukcja maszyn elektrycznych*, PWN, Warszawa, 1985.
- [2]. Śliwiński T., *Metody obliczania silników indukcyjnych*, Tom 1 – Analiza, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2008.
- [3]. Fitzgerald A.E., Kingsley C, Kusko A., *Electric Machinery*, 3rd edition, New York, McGraw-Hill, 1971.
- [4]. Boldea I., Nasar S.A., *The Induction Machine Handbook*, CRC Press LLC, 2002.
- [5]. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., *Finite Element Method*, 5-th Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000.
- [6]. Takorabet N., Laporte B., Mezani S.: *An approach to compute saturated induction motors in steady state*, Proc of IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf. (IEMDC'03), San Antonio, USA, 1-3 June, 2003, Vol. 2, pp. 1646-1650.
- [7]. Vassent E., Meunier G., Sabonadiere J.C.: *Simulation of induction machine operation using complex magnetodynamic finite elements*, IEEE Trans. Magn., Vol. 25, No. 4, 1989, pp. 3064-3066.
- [8]. Tsukerman I.A., Konrad A., Meunier G., Sabonnadiere J.C.: *Coupled field-circuit problems: trends and accomplishments*, IEEE Trans. Magn., vol. 29, No. 2, 1993, pp.1701-1704.
- [9]. Williamson S., Lim L.H., Smith A.C.: *Transient analysis of cage induction motor using finite elements*, IEEE Trans. Magn., Vol. 26, No. 2, 1990, pp. 941-944.
- [10]. Repo A.-K.; Hinkkanen M.; Arkkio A.: *Parameter estimation for induction motors to study the effects of voltage, frequency and slip*, Proc of European Conf. Power Electr. and Appl., Aalborg, Denmark, 2007, pp 1-10.
- [11]. Repo A.-K.; Hinkkanen M.; Arkkio A.: *Estimating circuit models for a deep-bar induction motor using time harmonic finite element analysis*, Proc. of Int. Conf. on Electrical Machine ICEM'06, Crete, Greece, Sept. 2006, No. 614.
- [12]. Dolinar, D., De Weerd, R., Belmans, R., and Freeman, E.M.: *Calculation of two-axis induction motor model parameters using finite elements*, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 12, No. 2, 1997, pp. 133-142.
- [13]. Erto P., *Design for Computer Experiments: Comparing and Generating Designs in Kriging Models*, Statistics for Innovation, Springer, 2009, pp. 91-102.

Autor

Dr hab. inż. Mariusz Jagieła, Prof. P.O.
 Politechnika Opolska
 Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
 Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej
 45-036 Opole, ul. Luboszycka 7
 e-mail: m.jagiela@po.opole.pl