

System rozproszony do optymalizacji konstrukcji i sterowania przełączalnych maszyn reluktancyjnych

Streszczenie. W artykule przedstawiono system rozproszony przeznaczony do optymalizacji przełączalnych maszyn reluktancyjnych. System umożliwia wyznaczanie parametrów magnetostaticznych wykorzystując program FEMM oraz wyznaczanie parametrów napędu w programie symulacyjnym. Do optymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny programu Matlab. Wyniki mogą być prezentowane w formie tabel i wykresów z wykorzystaniem programów skryptowych i programu Gnuplot. System zaprezentowano na przykładzie projektu generatora reluktancyjnego.

Abstract. The paper presents a distributed system designed to optimize switched reluctance machines. The system allows determining magnetostatic parameters using the FEMM program and determining drive parameters in a simulation program. The Matlab genetic algorithm was used for optimization. The results can be presented in the form of tables and graphs using scripts and the Gnuplot program. The system is presented on the example of a switched reluctance generator design. (**Distributed system to optimize the construction and control of switched reluctance generators**).

Słowa kluczowe: obliczenia rozproszone, optymalizacja, maszyny elektryczne, przełączalny generator reluktancyjny.

Keywords: distributed calculations, optimization, electrical machines, switched reluctance generator.

Wstęp

Optymalizacja maszyn elektrycznych pozwala uzyskiwać konstrukcje o oczekiwanych parametrach. Dzięki optymalizacji komputerowej unika się wielokrotnego wykonywania drogich prototypów. Uzyskiwane są wysokosprawne konstrukcje o małych gabarytach.

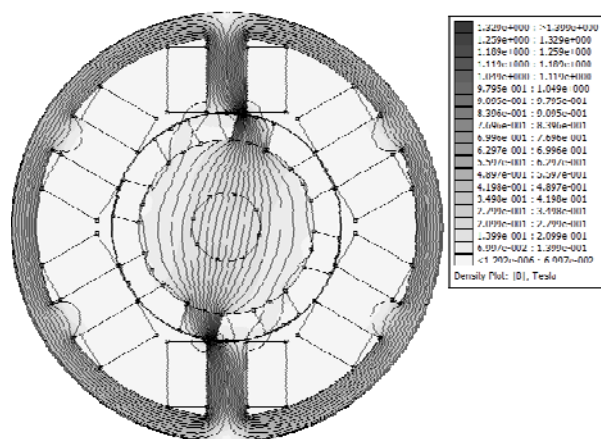
Najczęściej celem optymalizacji jest wyznaczenie kształtu obwodu magnetycznego maszyny [1], który gwarantuje uzyskanie oczekiwanych charakterystyk magnetostaticznych, np. stałej wartości momentu w szerokim zakresie zmian kąta obrotu. Obliczenia takie są wykonywane dla przyjętych stałych gęstości prądu w uzwojeniach. W rzeczywistości podczas pracy maszyny wartość prądu ulega ciągłej zmianie. Jest to spowodowane dużą indukcyjnością uzwojeń. W rezultacie rzeczywiste parametry maszyny podczas pracy znacznie odbiegają od uzyskanych w wyniku optymalizacji.

Możliwe jest jednak uwzględnienie w procesie optymalizacji warunków panujących podczas pracy maszyny w wybranych punktach pracy. Prezentowany w artykule system obliczeniowy umożliwia wykonanie optymalizacji w dwóch etapach. W pierwszym etapie następuje wyznaczenie charakterystyk magnetostaticznych dla różnych kształtów obwodu magnetycznego. W drugim etapie dla każdej z tych konstrukcji wykonuje się ciąg symulacji dla różnych parametrów uzwojeń i warunków komutacji. Na podstawie wyników symulacji oblicza się wartość funkcji celu. Tak zaprojektowana maszyna posiada określone parametry w zadanym lub zadanych punktach pracy, zależnie od przyjętej funkcji celu.

Obliczenia obwodu magnetycznego

Do obliczeń magnetostaticznych w opracowanym środowisku wykorzystano program FEMM przeznaczony do obliczeń 2D metodą elementów skończonych. Program ten umożliwia automatyzację procesu tworzenia siatki oraz obliczeń rozkładu pola magnetycznego dzięki wbudowanemu językowi skryptowemu LUA. W języku tym opracowano autorski program, którego zadaniem jest: tworzenie modelu o zadanych parametrach wejściowych, umożliwiającego obrót wirnika o zadany kąt i generację siatki obliczeniowej, przeprowadzenie obliczeń rozkładu pola magnetycznego dla różnych gęstości prądu w uzwojeniach i różnych wartościach kąta obrotu wirnika, archiwizację wyników w postaci wartości strumienia magnetycznego oraz momentu elektromagnetycznego.

Dane wejściowe oraz wyniki obliczeń zapisywane są do plików tekstowych. Następnie, na podstawie zadanej gęstości prądu oraz przekroju okna na uzwojenia, obliczane są parametry cewek, przy założeniu pełnego wypełnienia okna. Siatkę obliczeniową dla modelu połowego można zadawać w gradacji kroku kąta przemieszczenia wirnika dla różnych wartości prądu w uzwojeniach. W programie zadeklarowane zostały standardowe średnice drutu nawojowego, a obliczenia można wykonywać dla zadanej średnicy lub wybranej grupy drutów. Możliwość określenia zakresu średnic jest istotna ze względu na to, że mają one zasadniczy wpływ na liczbę obliczanych przypadków i czas obliczeń. Jako przykład wykorzystania środowiska pokazano proces optymalizacji przełączalnego generatora reluktancyjnego małej mocy. Na rysunku 1 pokazano rozkład pola magnetycznego w generatorze w trakcie obliczeń w programie FEMM.



Rys.1. Rozkład natężenia pola i strumienia magnetycznego w projektowanym generatorze

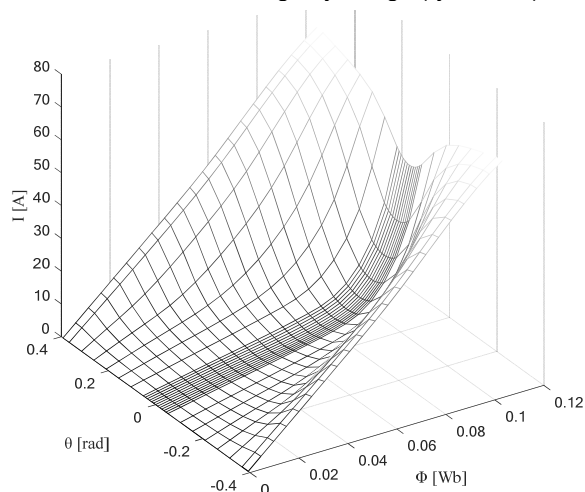
Po zakończeniu serii obliczeń dla zadanej konstrukcji obwodu magnetycznego maszyny uruchamiany jest program skryptowy przygotowujący wyniki do dalszych obliczeń w formacie JSON. Wyniki te są przekształcane a następnie interpolowane w celu wyznaczenia zależności prądu w funkcji strumienia magnetycznego i kąta obrotu wirnika oraz momentu elektromagnetycznego w funkcji prądu i kąta obrotu wirnika. Program ten przygotowuje dane

do obliczeń generatorów dla różnych wariantów uzwojeń, zgodnie z przyjętymi założeniami. Liczba zwojów wyznaczana jest na podstawie przekroju drutu nawojowego oraz przekroju okna w stojanie. Tak przygotowane dane trafiają do opracowanego programu symulacyjnego.

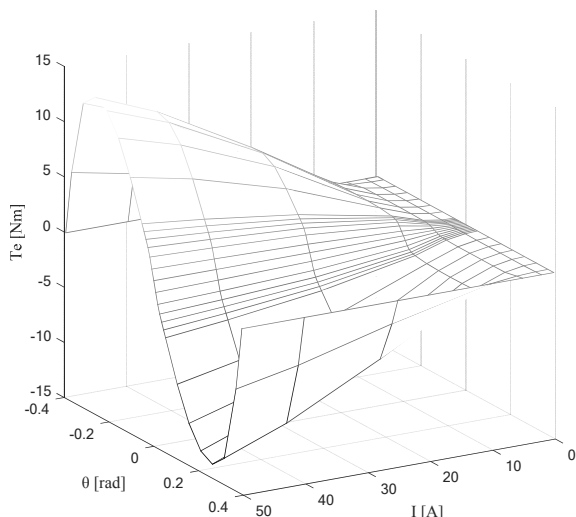
Środowisko umożliwia zakończenie obliczeń na wyznaczeniu charakterystyk magnetostatycznych lub ich kontynuowanie z wykorzystaniem programu symulacyjnego. Możliwe jest również wykorzystanie samego programu symulacyjnego.

Symulacja pracy maszyny

Do wyznaczania parametrów maszyny podczas pracy opracowano program symulacyjny w języku C#, bazujący na modelu polowo-obwodowym pośrednio sprzężonym. Do programu tego, jako parametry wejściowe, doprowadzane są: parametry zasilania i sterowania, takie jak: napięcie źródła, kąty komutacji. Program przystosowany został do obliczeń przy stałej prędkości. Parametry maszyny wyznaczone w programie FEMM, po przekształceniu przekazywane są do programu symulacyjnego w postaci dwóch tablic: tablicy wartości prądów (rysunek 2) i tablicy wartości momentu elektromagnetycznego (rysunek 3).



Rys.2. Zależność prądu pasma od strumienia magnetycznego i kąta obrotu wirnika dla końcowej wersji generatora



Rys.3. Zależność momentu elektromagnetycznego od prądu pasma i kąta obrotu wirnika, dla końcowej wersji generatora

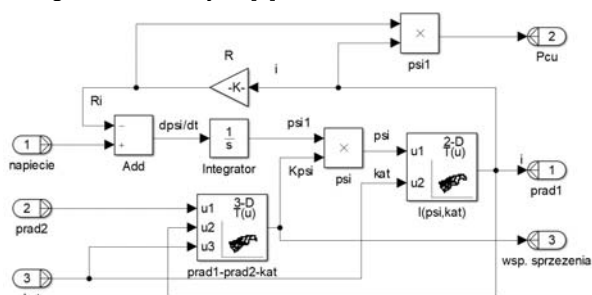
Jako rezultat obliczeń program określa parametry całkowite badanego układu w stanach ustalonych, takie jak: wartości średnie i skuteczne napięć i prądów, moment, moc, sprawność itp. Program został przystosowany do

obliczeń generatorów reluktancyjnych, ale istnieje możliwość jego prostej adaptacji do obliczeń silników.

Środowisko umożliwia zakończenie obliczeń i analizę wyników po zakończeniu symulacji lub przekazanie wyników do programu optymalizującego. W przypadku zakończenia obliczeń na tym etapie możliwe jest uruchomienie programu generującego pliki z wynikami oraz skryptów generujących wyniki w postaci graficznej. Do tworzenia wykresów zastosowano program Gnuplot.

Model pasma generatora przedstawiono na rysunku 4. Układ energoelektroniczny w programie symulacyjnym został opracowany w formie oddzielnego modułu. W związku z tym, istnieje możliwość jego modyfikacji. Domyślnie w programie zaimplementowano typowy układ dla przełączalnych maszyn reluktancyjnych złożony z asymetrycznych półmostków tranzystorowych typu H [2]. W przypadku zmiany układu energoelektronicznego konieczna może być dodatkowo zmiana sposobu sterowania.

Model symulacyjny nie uwzględnia strat związanych z przepływem prądów wirowych i histerezą obwodu magnetycznego oraz strat komutacyjnych w elementach energoelektronicznych [3].



Rys.4. Schemat modelu pojedynczego pasma generatora

Optymalizacja warunków komutacji

Środowisko umożliwia wykonanie optymalizacji kształtu obwodu magnetycznego na podstawie parametrów magnetostatycznych lub dobór parametrów uzwojeń i optymalizację parametrów sterowania dla zadanej geometrii maszyny na podstawie wyników symulacji lub kompleksową optymalizację całego układu. Do optymalizacji zastosowano algorytm genetyczny dostępny w programie Matlab [4]. Podczas testów algorytm ten stosunkowo szybko znajdował rozwiązania w porównaniu z takimi, jak: optymalizacja roju, czy metody gradientowe. Porównania zostały wykonane przy użyciu biblioteki Global Optimization Toolbox w wersji 3.4 dostępnej w programie Matlab.

W zakresie optymalizacji kształtu obwodu magnetycznego zmiennymi mogą być: średnica zewnętrzna stojana, średnica w szczelinie, szerokość szczeliny powietrznej, szerokość oraz liczba zębów stojana i wirnika. W przypadku optymalizacji na podstawie parametrów magnetostatycznych wartość funkcji celu obliczana jest na podstawie wyników uzyskanych w programie FEMM [5]. Natomiast w przypadku optymalizacji uzwojeń i kątów komutacji dla zadanej geometrii maszyny wartość funkcji celu obliczana jest na podstawie wyników symulacji.

W przypadku kompleksowej optymalizacji całego układu złożonego z maszyny, układu energoelektronicznego i układu sterowania, algorytm działa dwuetapowo. W pierwszym etapie wyznaczana jest pula obwodów magnetycznych o różnych kształtach, dla której następnie wykonywane są obliczenia symulacyjne. W drugim etapie wartości kątów komutacji i parametry uzwojeń generowane są ponownie przez algorytm genetyczny dla wszystkich wcześniej wyznaczonych osobników. Na podstawie wyników symulacji obliczane są wartości zdefiniowanej funkcji celu. Po zakończeniu obliczeń dla wszystkich

osobników oraz parametrów ich uzwojeń i kątów, wyniki zwracane są do algorytmu genetycznego generującego parametry geometryczne obwodów magnetycznych. Na ich podstawie obliczana jest funkcja celu dla wszystkich badanych rozwiązań, a następnie tworzona jest kolejna populacja.

Do pierwszego etapu optymalizacji konstrukcji małego generatora reluktancyjnego przyjęto stałą średnicę zewnętrzną obwodu magnetycznego stojana równą 120 mm, liczbę pasm równą 3, długość pakietu 80 mm, liczbę zębów stojana 6, liczbę zębów wirnika 8.

Wielkościami charakteryzującymi kształt obwodu magnetycznego generowanymi przez algorytm genetyczny były: szerokość zębów stojana i wirnika 3 mm – 20 mm, średnica w szczelinie powietrznej 52 mm – 96 mm, szerokość jarzma stojana 7 mm – 13 mm. Oprócz tego program umożliwia dobór liczby zębów stojana i wirnika, długości pakietu, średnicy zewnętrznej stojana.

Algorytm genetyczny może wygenerować zestawy parametrów niemożliwe do wykonania. Dlatego w programie zaimplementowano mechanizmy wykrywające takie przypadki i zwracana jest dla nich stała wartość oddalająca od rozwiązania, co przyspiesza proces optymalizacji. W omawianym przypadku generatora małej mocy w algorytmie genetycznym zdefiniowano populację w liczbie 60 osobników oraz 30 generacji dla obu etapów optymalizacji.

Środowisko umożliwia zdefiniowanie funkcji celu w programie Matlab, jednak istnieje możliwość wyboru jednej z kilku predefiniowanych funkcji. W prezentowanym przykładzie zadano funkcję celu w postaci:

$$(1) \quad f = \begin{cases} P_{gen} + P_{cu} + P_{ee} < 1 & (P_{gen} - P_{pob}) f_c(I_{max}) \\ P_{gen} + P_{cu} + P_{ee} \geq 1 & \frac{P_{gen} - P_{pob}}{P_{gen} + P_{cu} + P_{ee}} f_c(I_{max}) \end{cases}$$

gdzie: P_{gen} - moc oddawana z generatora do akumulatorów, P_{pob} - moc elektryczna pobrana z akumulatora, P_{cu} - moc strat w uzwojeniach generatora, P_{ee} - moc strat w elementach półprzewodnikowych układu energoelektronicznego, F_c - funkcja kary.

Dopuszczalne zakresy wartości prądów ograniczono funkcją kary w postaci:

$$(2) \quad f_c(I_{max}) = \begin{cases} I_{max} < 40 & 1 \\ I_{max} \geq 40, I_{max} < 50 & -0.009(I_{max} - 40)^2 + 1 \\ I_{max} \geq 50 & 0.1 \end{cases}$$

gdzie: I_{max} - maksymalna wartość prądu w paśmie.

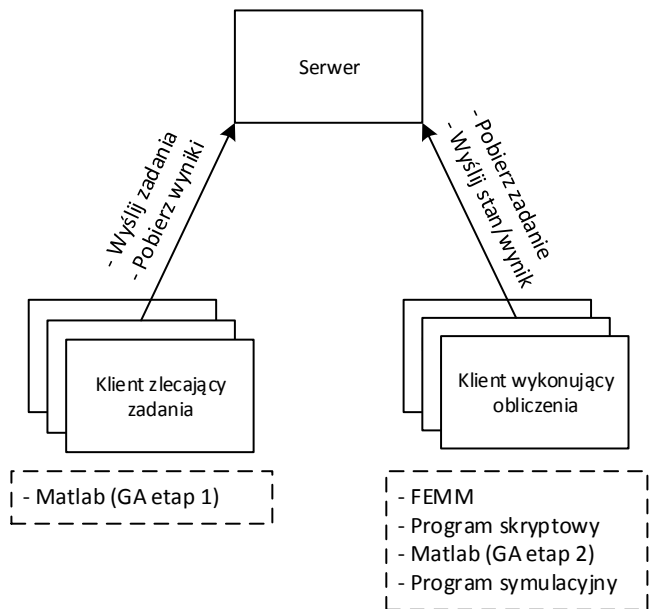
Zrównoleglenie obliczeń

Obliczenie charakterystyk statycznych dla jednej konstrukcji obwodu magnetycznego trwa około 30 min. Symulacja pracy napędu dla jednego zestawu uzwojeń i kątów komutacji trwa ok. 30 sec. Przy kompleksowej optymalizacji układu wyznaczenie wartości funkcji celu dla jednej konstrukcji obwodu magnetycznego trwa od 1 do 2h. Czas obliczeń jednej populacji wzrasta proporcjonalnie do liczby osobników w populacji. Czas trwania całego procesu optymalizacji jest zależny od warunku zakończenia obliczeń, którym jest osiągnięcie zadanej liczby populacji i może przekraczać miesiąc.

W celu skrócenia czasu obliczeń opracowano system do obliczeń rozproszonych. Główną zaletą tego rozwiązania jest łatwa skalowalność i możliwość podpięcia dużej liczby

komputerów. Wymogiem jest jedynie konieczność dostępu do Internetu.

W opracowanym systemie główny serwer został zaimplementowany w chmurze obliczeniowej AZURE [6][7], gwarantującej dostępność na poziomie 99,9% w skali roku. Dzięki temu proces obliczeniowy został zabezpieczony przed awariami i zanikami prądu. Dodatkowo, zostały zaimplementowane mechanizmy wykrywające ewentualne problemy z podłączonymi komputerami tak, aby w razie awarii jednego z nich aktualnie zlecone zadanie zostało przekazane do obliczenia innej maszynie. Rysunek 5 przedstawia strukturę systemu do obliczeń rozproszonych.



Rys.5. Struktura środowiska do obliczeń rozproszonych

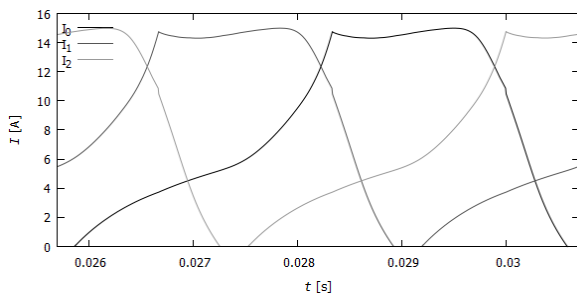
System podzielony został na trzy aplikacje. Pierwszą aplikacją jest część serwerowa, natomiast dwie pozostałe to dwa typy klientów. Część serwerowa została zaimplementowana w języku C#. Jest to serwer przyjmujący zapytania zgodnie z WEB API oraz odpowiadający na zapytania podłączonych komputerów. Jego głównym zadaniem jest odbieranie zadań do wykonania oraz zarządzanie kolejką zadań do wykonania. Dodatkowo została zaimplementowana możliwość podglądu aktualnego stanu kolejki oraz wyników w postaci strony internetowej.

Pierwszym typem aplikacji klienckiej jest instancja, zlecająca zadania do wykonania. W opracowanym systemie jest to komputer, który uruchamia pierwszy etap optymalizacji w programie Matlab. Wygenerowana lista osobników wysyłana jest do serwera, jako lista zadań do wykonania. Komputerów zlecających może być więcej niż jeden. Pozwala to lepiej wykorzystać zasoby systemu obliczeniowego.

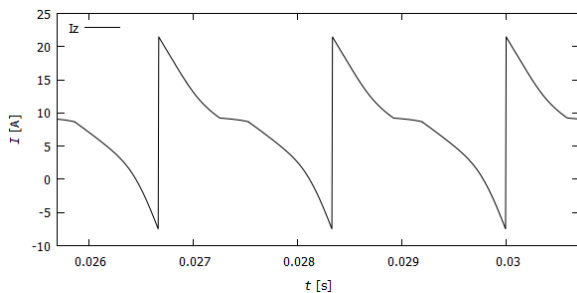
Drugim typem aplikacji klienckiej są instancje odpowiadające za realizację obliczeń. Na jednym komputerze może zostać uruchomionych wiele instancji, tak aby najlepiej wykorzystać zasoby systemu. Aplikacja ta wysyła zapytania do serwera, czy są zadania do wykonania, tak długo, aż serwer prześle dane osobnika. Podczas wykonywania kolejnych kroków obliczeń serwer jest informowany o stanie realizacji zadania. W razie awarii komputera brak takich informacji powoduje, że zadanie wraca do kolejki i zostanie przesłane do innej instancji obliczeniowej.

Wyniki obliczeń

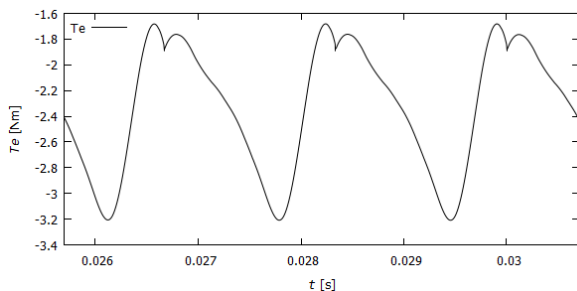
Generator został zaprojektowany do współpracy ze źródłem zasilania 24V. Prędkość znamionowa wynosi 1500 obr./min. Rysunki 6-8 przedstawiają przebiegi prądu pasma, prądu źródła zasilania i momentu.



Rys. 6. Prądy pasm generatora przy optymalnych warunkach komutacji



Rys. 7. Prąd źródła zasilania



Rys. 8. Moment elektromagnetyczny przy prędkości 1500 obr./min.

W tabelach 1-3 zestawiono podstawowe dane uzwojeń, kąty komutacji i parametry wyjściowe generatora o zadanej średnicy zewnętrznej 120 mm. Sprawność generatora podana w tabeli 3 nie uwzględnienia strat w rdzeniu.

Tabela 1. Parametry uzwojenia

Liczba zwojów	56
Średnica drutu nawojowego	2,5 mm

Tabela 2. Parametry sterowania

Optymalna wartość kąta załączania	-14,5
Optymalna wartość kąta wyłączania	+8

Tabela 3. Parametry wyjściowe

Sprawność (bez strat w rdzeniu)	0,859
Moc generowana	197 W
Wymagany moment wejściowy	2,3 Nm
Maksymalna wartość prądu pasma	15 A

Wnioski

W artykule przedstawiono środowisko obliczeniowe do obliczeń konstrukcji, symulacji i optymalizacji przełączalnych maszyn reluktancyjnych. Środowisko umożliwia obliczenia rozkładu pola magnetycznego w rdzeniu maszyny oraz optymalizację jego konstrukcji. Umożliwia również symulację pracy maszyny i wyznaczenie jej parametrów całkowitych oraz przebiegów napięć, prądów i momentu dla zadanych prędkości. Model można wykorzystać do optymalizacji warunków komutacji. Do obliczeń wykorzystano algorytm genetyczny. Optymalizację można również realizować dwuetapowo. Celem optymalizacji jest wówczas ustalenie kształtu obwodu magnetycznego, parametrów uzwojeń oraz warunków komutacji na podstawie parametrów wyznaczonych podczas symulacji pracy maszyny w stanach ustalonych. W celu przyspieszenia optymalizacji obliczenia zrównolegiono.

Możliwości środowiska pokazano na przykładzie optymalizacji generatora reluktancyjnego. Przedstawiono kolejne etapy realizacji projektu, który został w całości zautomatyzowany. Następnie pokazano wyniki obliczeń w postaci parametrów opracowanego generatora oraz przebiegów podstawowych wielkości w układzie. Prezentacja uzyskanych wyników została wykonana w omawianym środowisku w module do obróbki graficznej. Do realizacji algorytmu optymalizacyjnego w prezentowanym środowisku wykorzystano program Matlab, do obliczeń charakterystyk statycznych obwodu magnetycznego program FEMM oraz program Gnuplot do prezentacji wyników. Program symulacyjny i pozostałe programy wraz z oprogramowaniem zrównolegającym obliczenia stanowią rozwiązania autorskie.

Uzyskana konstrukcja spełnia przyjęte założenia. Moc zaprojektowanego generatora wynosi około 200W przy prędkości obrotowej równej 1500 obr./min. Generator został przewidziany do pracy w małej elektrowni wiatrowej z przekładnią mechaniczną. Zależnie od średniej prędkości i rocznego rozkładu prędkości wiatru w danej lokalizacji możliwe jest zaprojektowanie generatora dedykowanego do tych warunków pogodowych. Wymaga to wyłącznie zmiany funkcji celu w procesie optymalizacji.

Autorzy: dr hab. inż. Krzysztof Tomczewski, dr inż. Krzysztof Wróbel, mgr inż. Artur Śliwiński, Politechnika Opolska, Instytut Systemów Napędowych i Robotyki, ul. Prószkowska 76 (budynek 1), 45-758 Opole, E-mail: k.tomczewski@po.edu.pl; k.wrobel@po.edu.pl; artur.sliwinski90@gmail.com.

LITERATURA

- [1] Di Barba P., Mognaschi M. E.: *Industrial design with multiple criteria: shape optimization of a permanent-magnet generator*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 45, no. 3, pp. 1482-1485, (2009)
- [2] Han G., Chen H., Guan G., *Generalised fault diagnostic method for power transistors in asymmetric half-bridge power converter of SRM drive*, IET Electric Power Applications, vol. 13, no. 2, pp. 168-180, 2 2019.
- [3] Powrózek A., Bogusz P., *Stabilizacja napięcia wyjściowego generatora reluktancyjnego przełączalnego*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 3/2014
- [4] Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T., *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm, NSGA-II*, IEEE Transactions On Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, April (2002)
- [5] Piotuch R, Palka R., *FEM based IPMSM optimization*, Problem Issues – Electrical Machines, (2014).
- [6] Naylor L., *Deploying to Azure*, ASP.NET MVC with Entity Framework and CSS, 10.1007/978-1-4842-2137-2_13, (2016)
- [7] Bell C., *Azure IoT Solutions: Cloud Services*, Windows 10 for the Internet of Things, 10.1007/978-1-4842-2108-2_16.