

Grzegorz Kamiński, Paweł Góralski
Instytut Maszyn Elektrycznych, Politechnika Warszawska

OBLICZENIA ELEKTROMAGNETYCZNE PRZETWORNIKA O RUCHU ZŁOŻONYM OPARTEGO NA WSPÓLNYM OBWODZIE MAGNETYCZNYM

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki postępu prac nad elektromechanicznym przetwornikiem położenia o wspólnym obwodzie magnetycznym, znanym tym, że umożliwia wykonywanie niezależnego ruchu liniowo-obrotowego wałka wykonawczego. Przekładnik oprócz mechanizmu liniowo-obrotowego składa się z dwóch wirników napędzających wspomniany mechanizm oraz wspólnego wzbudnika stanowiącego wspólny obwód magnetyczny. Zastosowanie takiego rozwiązania, umożliwia zmniejszenie objętości maszyny, czyniąc ją łatwiejszą w zastosowaniu. W pracy przywołano założenia konstrukcyjne i możliwe struktury wykonania urządzenia. Omówiono zjawisko niekorzystnego wpływu wspólnego obwodu magnetycznego na poprawną pracę przetwornika. Wskazano wykorzystanie pojęcia błędu względnego jako sposobu oceny stopnia oddziaływania wymienionego zjawiska na moment obrotowy wirników. Zaprezentowano przestrzenne przebiegi wyznaczonych błędów względnych, dla wszystkich możliwych przypadków. Zdefiniowano ponadto pojęcie średniego błędu względnego i wskazano jego zastosowanie jako ilościowego sposobu oceny stopnia oddziaływania wspólnego obwodu. Zdefiniowano pojęcie współczynnika tętnienia błędu momentu i wskazano jego zastosowanie. Omówiono wyznaczenie indukcyjności uzwojeń w darmowym programie do obliczeń polowych i jej wpływu na projektowanie układu zasilania sterownika oraz strategii sterowania.

Abstract: This document contains results of research on complex motion common magnetic circuit electromagnetic converter characteristic that allows making independent axial and rotary shaft motion. The converter in addition to linear-rotary mechanism consists of two drive rotors and one common magnetic circuit excitor. Such a solution allows to reduce volume of the machine and makes it easier to use. The paper cites design intent and possible structure of the device. Phenomenon of common magnetic circuit adverse effect on correct operation of device is discussed. The concept of using relative error as a way to evaluate the influence of that phenomenon in the torques is discussed. Waveforms of determined relative errors for all possible cases is presented. Furthermore the concept of average relative error is defined and its use as a quantitative method of assessing the degree of common circuit impact is indicated. Definition of relative error ripple factor is given, and its usage is shown. Winding inductance calculation based on free FEM application is shown and its influence on control strategy and power system.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, wspólny obwód magnetyczny, błąd względny momentu.*

Keywords: *electrical machines, common magnetic circuit, torque relative error.*

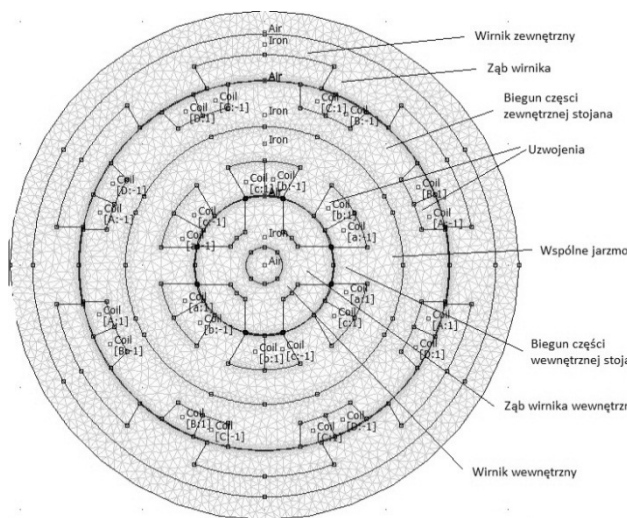
1. Wstęp

W niniejszym artykule przedstawiono opis prac nad elektromechanicznym przetwornikiem położenia o wspólnym obwodzie magnetycznym umożliwiającym wytworzenie niezależnego względem siebie ruchu osiowego i obrotowego. Elementem wykonawczym przetwornika jest mechanizm liniowo-obrotowy. Jest to rozwiązanie znane i dostępne w nielicznych komercyjnych rozwiązaniach. Do napędu mechanizmu potrzebne są dwa źródła momentu obrotowego. Pierwsze dla potrzeb ruchu obrotowego, drugie natomiast potrzebne do ruchu osiowego. Dotychczas znane były rozwiązania wykorzystujące dwa zespoły stojan-wirnik. Celem prowadzonych prac jest opracowanie konstrukcji złożonej z dwóch wirników i jednego wspólnego stojana. Zaproponowano dwie koncepcje.

Pierwsza o promieniowym przepływie strumienia magnetycznego (konstrukcja radialna), druga o osiowym przepływie strumienia (konstrukcja tarczowa).

Opisywany fragment zagadnienia dotyczy wyłącznie konstrukcji radialnej. Skupiono się w nim na indukcyjnościach uzwojeń, momentach obrotowych oraz co najważniejsze w konstrukcji ze wspólnym obwodem magnetycznym, na oddziaływaniu na siebie oddzielnych części. Prace nad budową modelu obliczeniowego oparto na filozofii silnika reluktancyjnego przełączalnego. W jego budowie (rys. 1) można wyróżnić część zewnętrzną i wewnętrzną. Część zewnętrzna składa się z wirnika z sześcioma zębami oraz zewnętrznej części stojana z ośmioma zębami. Na zębach stojana znajdują się cewki

uzwojenia, skojarzone w cztery pasma (A, B, C, D). Każde pasmo stworzone jest z dwóch przeciwległe umieszczonych cewek. Część wewnętrzna zbudowana jest wewnętrznej części stojana z sześcioma zębami. Na zębach znajdują się trzy analogiczne pasma fazowe. Wewnątrz stojana znajduje się wirnik wewnętrzny z czterema zębami. Obie części są połączone wspólnym jarzmem, przez który zamykają się strumienie wzniecone przez zasilone cewki. Wspólne jarzmo pozwala zaoszczędzić materiał. Może być jednak źródłem oddziaływania obu części na siebie.



Rys. 1 Model napędu przetwornika, zbudowany w Preprocesorze programu Femm 4.2.

2. Wyznaczanie indukcyjności uzwojeń

Model napędu przetwornika, został wykonany przy użyciu programów MATLAB i Femm 4.2. Skrypt sterujący obliczeniami, tworzeniem modelu w programie Femm 4.2 został napisany w programie MATLAB, natomiast same obliczenia wykonano metodą elementu skończonego w programie Femm 4.2.

Indukcyjność uzwojeń jest jednym z najważniejszych parametrów potrzebnych do właściwego zaprojektowania układu zasilania i opracowania strategii sterowania. Tym bardziej pomocne są przebiegi zmian indukcyjności uzwojeń w funkcji położenia wirnika.

W omawianym przypadku, indukcyjność uzwojeń otrzymano ze strumienia skojarzonego z uzwojeniem, którą uzyskano z Postprocesora programu Femm 4.2. Następnie po użyciu równań (1) i (2) otrzymano prze-

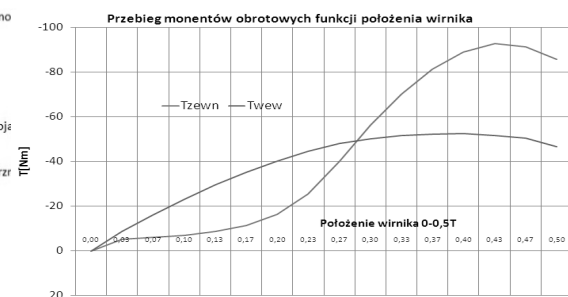
biegi indukcyjności uzwojeń w funkcji kąta obrotu wirnika.

$$\forall \alpha_{wew} \in (0, \frac{\pi_{wew}}{2}), L_{wew} = z_{wew} \frac{\Phi_{wew}(\alpha_{wew}, \alpha_{zew})}{I_{wew}} \quad (1)$$

$$\forall \alpha_{zew} \in (0, \frac{\pi_{zew}}{2}), L_{zew} = z_{zew} \frac{\Phi_{zew}(\alpha_{zew}, \alpha_{wew})}{I_{zew}} \quad (2)$$

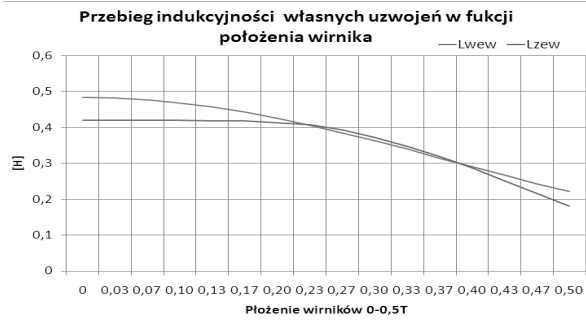
gdzie z_{wew} i z_{zew} oznaczają ilość zwoi.

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi indukcyjności uzwojeń w funkcji położenia wirnika. Analizując przebieg zmian indukcyjności pasma uzwojenia należącego do części zewnętrznej można zaobserwować, że przez prawie 25% obrotu, indukcyjność praktycznie się nie zmienia. Jest to konsekwencją nieoptymalnego stosunku wysokości do szerokości zębów i ma odbicie w przebiegu oraz wartości momentu obrotowego rys.2.



Rys. 2. Przebieg momentów statycznych wyznaczonych dla wirnika zewnętrznego i wewnętrznego.

Porównując oba przebiegi, krzywa momentu części wewnętrznej ma się znacznie łagodniejszy przebieg, wartość średnią niewiele mniejszą od wartości maksymalnej. Znacznie gorzej prezentuje się krzywa momentu części zewnętrznej, gdzie wartość średnia jest zbliżona do wartości uzyskanej w części wewnętrznej, a wartość maksymalna jest od niej prawie trzy razy większa. Poprawa konstrukcji będzie przedmiotem rozważań w kolejnej części prac. Będą rozpatrzone inne liczby zębów stojana i wirnika, tak by możliwie wykorzystać materiał, uzyskać najmniejsze tętnienie momentu przy zachowaniu narzuconych ograniczeń na średnicę zewnętrzną, mając jednocześnie na uwadze ilość przełączeń uzwojeń na obrót.

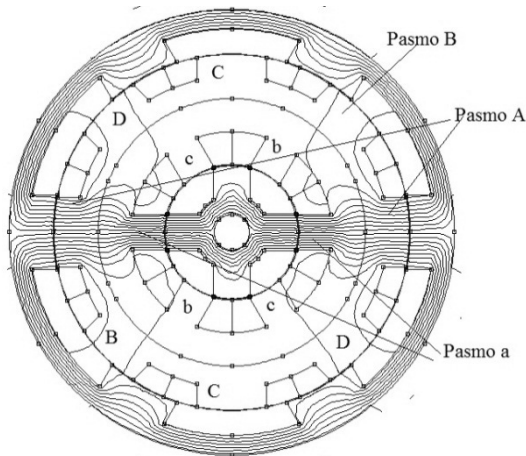


Rys. 3. Przebieg indukcyjności własnych uzwojeń w funkcji położenia wirnika

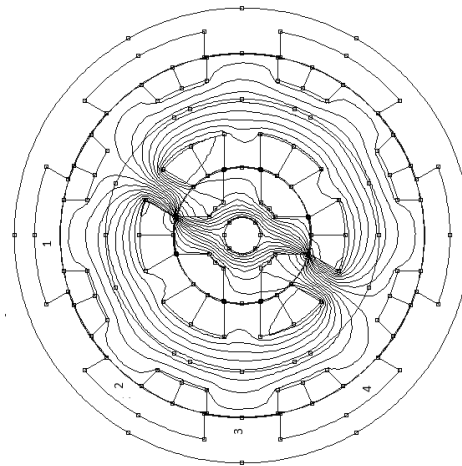
3. Badanie wpływu wspólnego obwodu magnetycznego na moment obrotowy.

Na rysunku nr 4 można zaobserwować drogi zamykania się strumieni we wspólnym jarzmie, w momencie zasilania obu części stojana. Odciągają one od tych, którymi zamykają się, gdy zasilane są pojedyncze części. W związku z powyższym zachodzi podejrzenie, iż wspólna droga zamykania się strumieni może mieć negatywny wpływ na pracę napędu. Przeprowadzono badanie, które miało pokazać rozmiar problemu. Podzielono je następujące etapy.

Etap 1. Dla każdej niepowtarzalnej możliwości zasilania pasm (w czasie normalnej pracy), tj. w konfiguracjach a+A, a+B, a+C, a+D, sprawdzono możliwe konfiguracje położenia wirników znajdujących się w zakresie $0-\tau/2$ i zanotowano wartości momentów.



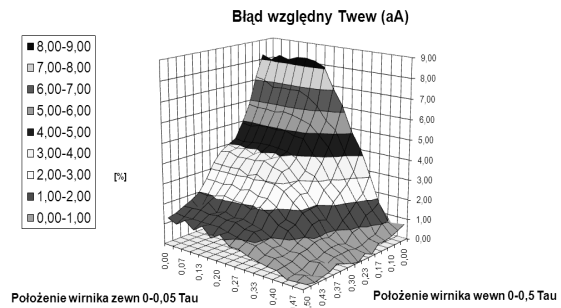
Rys.4 Rozpływ strumieni magnetycznych przy zasilonych pasmach a i A.



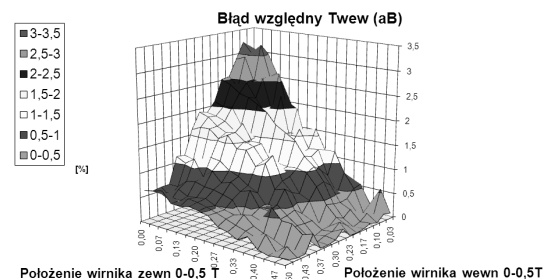
Rys.5. Rozpływ strumienia przy zasilonym pojedynczym pasmie.

Etap 2. Wyznaczenie średnich wartości momentów we wszystkich położeniach, dla czterech możliwości wystąpienia zasilania.

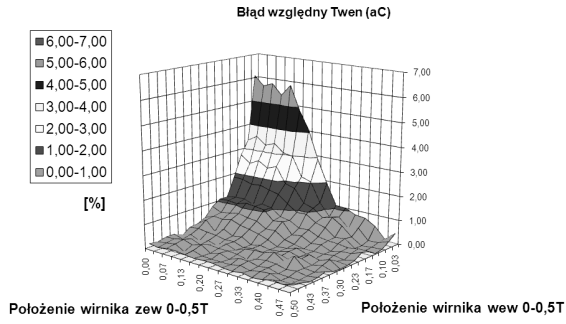
Etap 3. Dla każdej niepowtarzalnej możliwości zasilania pasm oraz każdej konfiguracji położenia wirnika wyznaczono błąd względny momentu w odniesieniu do obliczonej w etapie 2 wartości średniej. Wyniki przedstawiono na rysunkach 5-12.



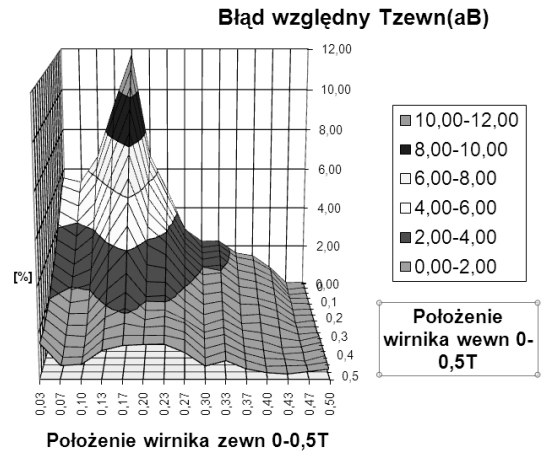
Rys.6. Błąd względny momentu wirnika wewnętrznego przy zasilonych pasmach a i A.



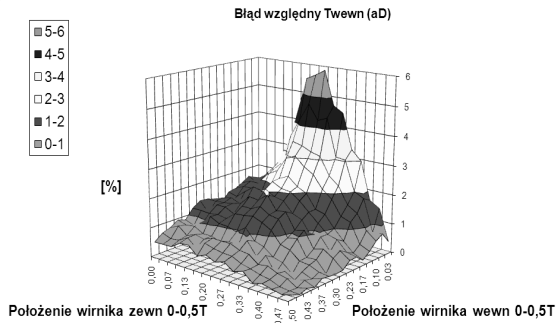
Rys.7. Błąd względny momentu wirnika wewnętrznego przy zasilonych pasmach a i B.



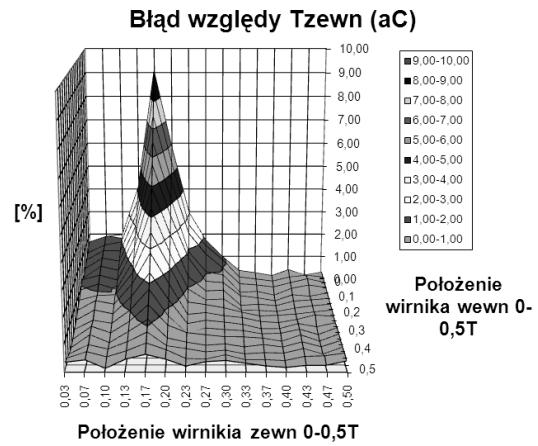
Rys.8. Błąd względny momentu wirnika we-wewnętrzny przy zasilonych pasmach a i C.



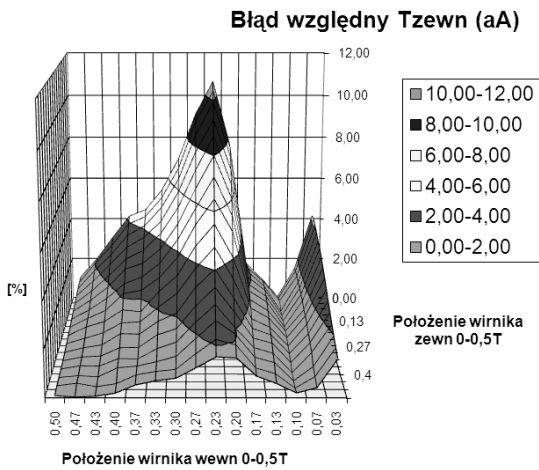
Rys.11. Błąd względny wirnika zewnętrznego przy zasilonych pasmach a i B.



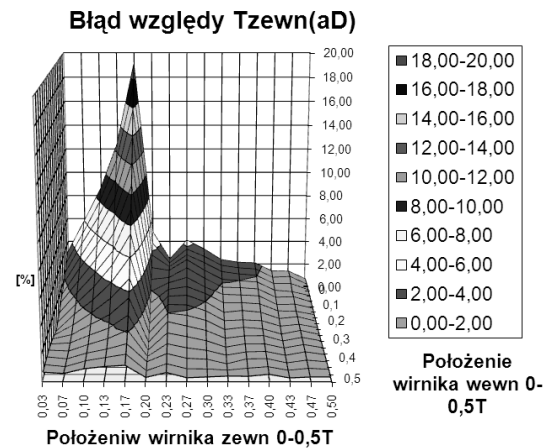
Rys. 9. Błąd względny momentu wirnika we-wewnętrzny przy zasilonych pasmach a i D.



Rys. 12. Błąd względny wirnika zewnętrznego przy zasilonych pasmach a i C.



Rys. 10. Błąd względny wirnika zewnętrznego przy zasilonych pasmach a i A.



Rys. 13. Błąd względny wirnika zewnętrznego przy zasilonych pasmach a i D.

Etap 4. Dla każdej niepowtarzalnej możliwości zasilania pasm obliczono średnią wartość błędów oraz znaleziono wartości maksymalne błędów w każdym przypadku. Wyniki przedstawiono w tabeli 1. Zestawienie wartości maksymalnej i wartości średniej błędów w postaci ilorazu można zdefiniować jako współczynnik tętnienia błędu momentu.

Na podstawie wykonanych czynności udało się w sposób ilościowy porównać każdy z przypadków. Ze względu na bardzo małe wartości momentów w położeniu startowym wirnika dla rozpatrywanego przypadku (np. $T_{wew}(\alpha_{zew}=0)$, lub $T_{zew}(\alpha_{zew}=0)$) oraz bardzo duże wartości błędów w tych miejscach, nie brano ich pod uwagę do oceny.

Lp.	Przypadek	Wartość maksymalna błędu	Wartość średnia błędu	Wsp. tętnienia błędu
1	dTiaA	8,39	2,40	3,50
2	dTiaB	3,23	0,94	3,44
3	dTiaC	6,08	0,66	9,19
4	dTiaD	5,90	1,31	4,50
5	dToaA	10,64	2,44	4,36
6	dToaB	11,73	0,94	12,48
7	dToaC	9,10	0,94	9,68
8	dToaD	19,13	2,20	8,69

Tabela 1. Wyniki otrzymanych obliczeń.

Analizując wartości zamieszczone w tabeli 1, można zauważyć, że najmniej korzystnym jest przypadek zasilania pasm znajdujących się najbliżej siebie. Można zaobserwować ogólny wzrost momentu obrotowego, co potwierdza zachowanie się strumienia, który zamiast zamykać się w jarzmie, zamyka się poprzez wirnik. Ponadto niemal na każdym przypadku, największy błąd występuje dla rozpatrywanego momentu, gdy ząb wirnika przeciwnego znajduje się w położeniu współosiowym z zębem zasilanego zęba stojana.

4. Wnioski

Opisane wyżej prace stanowią element przygotowań do sformułowania zadania optymaliza-

cyjnego. Na ich podstawie można stwierdzić, że jednym z najważniejszych kryteriów oceny będzie współczynnik tętnień. Współczynnik tętnień rozumiany raz jako stosunek wartości maksymalnej do wartości średniej momentu obrotowego. Stosowany do oceny dynamiki napędu. W drugim przypadku współczynnik tętnień, jako stosunek maksymalnego błędu względnego momentu, do średniej wartości błędu względnego momentu. Wówczas współczynnik ten jest stosowany do oceny stopnia oddziaływania na siebie obu części wspólnego obwodu magnetycznego.

Bardzo istotnym parametrem, przy projektowaniu obwodu elektrycznego jest indukcyjność uzwojenia. Będzie głównym kryterium dla ustalenia strategii sterowania silnikiem i przy doborze liczby zwojów.

Na podstawie otrzymanych obliczeń błędów względnych momentów można potwierdzić występowanie niekorzystnego oddziaływania na siebie części zewnętrznej i wewnętrznej. Rozmiar zjawiska okazał być się na akceptowalnym poziomie. Prowadzone będą jednak dalsze prace, by wpływ zjawiska zniwelować, poprzez dodanie przekładek, bądź przez zmianę grubości jarzma.

5. Literatura

Kamiński G., Góralski P. *Opis prac badawczych nad konstrukcją przetwornika położenia o ruchu złożonym o wspólnym obwodzie magnetycznym*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Nr 66 Politechniki Wrocławskiej Nr 66, Studia i Materiały nr 32 2012

Kamiński G, Szczypior J., Koziej J. *Model matematyczny silnika reluktancyjnego przelączalnego z wirnikiem zewnętrznym* Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka, 1998, z. 102. str. 65-78.

Sochocki R. *Mikromaszyny Elektryczne* Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.

Kamiński G., Góralski P. *Przetwornik elektromechaniczny o ruchu złożonym*.

Zgłoszenie do Urzędu Patentowego PR, nr P-398483

Autorzy

Grzegorz Kamiński,
G.Kaminski@ime.pw.edu.pl
Paweł Góralski
Pawel.goralski@ee.pw.edu.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Roman Nadolski

