

Kompensacja zewnętrznego pola magnetycznego w otoczeniu silników indukcyjnych

Streszczenie: W artykule opisano badania metodami numerycznymi układu kompensacji rozproszonego pola magnetycznego, generowanego w otoczeniu trójfazowego silnika indukcyjnego. Analizę rozproszonego pola magnetycznego przeprowadzono dla 4-biegunowego silnika o mocy znamionowej 100 kW, w punkcie pracy znamionowej, przy wyłączonym oraz włączonym układzie kompensacyjnym. Obliczenia rozkładu rozproszonego pola magnetycznego przeprowadzono w programie ANSYS Maxwell 2D z wykorzystaniem dwuwymiarowej analizy rozkładu pola metodą elementów skończonych dla stanów przejściowych. Przeanalizowano wpływ poziomu nasycenia w obwodzie magnetycznym silnika na skuteczność działania układu kompensującego pole rozproszone oraz na parametry eksploatacyjne silnika.

Abstract: The article describes the study using numerical methods of the stray magnetic field compensation system generated around a three-phase induction motor. The analysis of the stray magnetic field was carried out for a 4-pole motor with a rated power of 100 kW, at the rated operating point, with the compensation system turned off and on. Calculations of the scattered magnetic field distribution were performed in the ANSYS Maxwell 2D program using a two-dimensional analysis of the field distribution using the finite element method for transient states. The influence of the saturation level in the motor's magnetic circuit on the effectiveness of the stray field compensation system and on the motor's operating parameters was analyzed (**Compensation of external magnetic field in the environment of induction motors**).

Słowa kluczowe: kompensacja pola magnetycznego, sygnatura magnetyczna, pole magnetyczne, silniki indukcyjne.

Keywords: magnetic field compensation, magnetic signature, magnetic field, electric machines.

Wstęp

Do tej pory wiele prac naukowo-badawczych poświęcono tematyce związanej z pomiarem i analizą zewnętrznego, rozproszonego strumienia magnetycznego maszyn indukcyjnych do celów diagnostycznych [1,2]. Przykładowo, jedna z metod oceny stanu technicznego maszyny indukcyjnej opiera się na pomiarze jej strumienia poosiowego [1]. Pomiar ten pozwala na wykrycie m.in. zwarć zwojowych uzwojenia stojana, uszkodzenia klatki wirnika lub asymetrii spowodowanej niecentrycznym umiejscowieniem wirnika względem stojana. Warto zauważyć, że w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania problematyką odnoszącą się do analizy zewnętrznego pola magnetycznego w otoczeniu silników, ze względu na regulacje dotyczące dopuszczalnego poziomu zakłóceń elektromagnetycznych EMI (z ang. Electromagnetic Interference) oraz kompatybilności elektromagnetycznej EMC (z ang. Electromagnetic Compatibility) [3,4]. Zakłócenia elektromagnetyczne EMI mogą powstać w wyniku emisji elektromagnetycznej pochodzącej z różnych urządzeń lub źródeł zewnętrznych. Zakłócenia te mogą przyczyniać się np. do nieprawidłowej pracy systemów elektronicznych będących na wyposażeniu statków powietrznych lub morskich, takich jak urządzenia nawigacyjne, komunikacyjne, radiolokacyjne, itp. Uwzględnienie kwestii EMC jest konieczne, aby zapewnić bezpieczeństwo funkcjonalne i niezawodność złożonych nowoczesnych systemów, które w coraz większym stopniu opierają się na podsystemach elektronicznych, zapewniających funkcję zasilania, komunikacji, sterowania i monitorowania [4]. Kompatybilność elektromagnetyczna staje się coraz ważniejszym aspektem przy projektowaniu napędów dla elektromobilności, wojska, w zakładach produkcyjnych, elektrowniach czy systemach komunikacji. W kontekście militarnym wymagana jest bezproblemowa współpraca systemów radarowych, nawigacyjnych i innych układów elektronicznych, nawet w trudnych warunkach środowiskowych oraz podczas intensywnych działań bojowych. Z zagadnieniem tym jest ściśle powiązane pojęcie tzw. sygnatury magnetycznej, odnoszące się do wszelkich zakłóceń naturalnego ziemskiego pola magnetycznego w otoczeniu danego obiektu (np. silnika

elektrycznego, okrętu wojennego), wywołanych różnymi zjawiskami fizycznymi [5,6]. Na sygnaturę magnetyczną złożonych technicznie obiektów wpływa zwykle kilka zjawisk fizycznych, z których najistotniejsze są:

- odkształcenia pola ziemskiego wynikające z wykorzystania materiałów ferromagnetycznych w konstrukcji obiektu (np. kadłuba i nadbudówek oraz wszelkiego typu wyposażenia elektromechanicznego okrętu);
- zakłócenia pola wynikające z emisji przez dany obiekt stałych lub zmiennych rozproszonych pól magnetycznych;
- odkształcenia pola związane z indukowaniem prądów wirowych w podzespołach obiektu wykonanych z materiałów elektrycznie przewodzących, gdy podzespoły te znajdują się pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego (np. obrót/zmiana kursu okrętu w ziemskim polu magnetycznym podczas manewrowania);
- zakłócenia pola związane z przepływem prądów wywołanych korozją elektrochemiczną (dotyczy głównie jednostek pływających);
- magnetyzacja ferromagnetycznych elementów konstrukcyjnych wywołana naprężeniami mechanicznymi i zmianami temperatury.

Urządzenia elektryczne instalowane na okrętach marynarki wojennej, takie jak: generatory elektryczne dużej mocy, silniki, elementy systemu dystrybucji energii jak rozdzielnice wyłączniki oraz kable dystrybucyjne, mogą istotnie, negatywnie wpływać na sygnaturę magnetyczną okrętu, gdyż mogą powodować dwa pierwsze z wyżej wymienionych zjawisk skutkujących znaczącym zakłóceniem naturalnego pola magnetycznego. Obecne w konstrukcji urządzeń elektrycznych, zwłaszcza silników i generatorów, materiały ferromagnetyczne, nie zawsze mogą być w pełni zastąpione materiałami amagnetycznymi. Urządzenia elektryczne niewyposażone w pasywne lub aktywne środki ekranowania magnetycznego są ponadto źródłem rozproszonych pól magnetycznych, które zwłaszcza w przypadku maszyn elektrycznych dużej mocy, mogą osiągać znaczne wartości, rzędu kilkuset μT lub nawet kilkudziesięciu mT i zakłócać naturalne pole magnetyczne w znacznej odległości od maszyny, do nawet kilkunastu metrów.

Ze względu na oddziaływanie okrętu w jego bliskim otoczeniu na ziemskie pole magnetyczne, obecność okrętu może być wykryta za pomocą czujników anomalii magnetycznej MAD (z ang. *Magnetic Anomaly Detection*). Są to specjalistyczne magnetometry zaprojektowane do wykrywania subtelných zmian ziemskiego pola magnetycznego. Ich działanie opiera się na pomiarze różnicy pomiędzy ziemskim polem magnetycznym, a polem magnetycznym zakłóconym jednym z wyżej wymienionych zjawisk fizycznych. W takie czujniki wyposażone są m.in. samoloty patrolowe, których celem jest lokalizacja okrętów podwodnych. Z tego powodu, okręty wojenne, typu niszczyciele min, muszą cechować się bardzo niskim śladem magnetycznym. Kadłub takiego okrętu powinien być wykonany w całości ze stali niemagnetycznej. Urządzenia elektryczne instalowane na pokładzie okrętu wojennego, w tym m.in. silniki i generatory elektryczne, muszą być wykonane z materiałów amagnetycznych, wyjątkiem są elementy urządzenia mające kluczowy wpływ na wydajność i poprawne działanie urządzenia. W przypadku silników i generatorów elektrycznych, tylko ich rdzeń magnetyczny jest wykonany z materiałów ferromagnetycznych. Zbyt wysoki poziom rozproszonego pola magnetycznego wytwarzanego w otoczeniu urządzeń i maszyn elektrycznych także stwarza duże zagrożenie detonacji min morskich wyposażonych w czułe magnetometry, dlatego konieczne jest skuteczne tłumienie rozproszonych pól magnetycznych od poszczególnych urządzeń. W przypadku okrętu podwodnego wysoki poziom śladu magnetycznego zwiększa prawdopodobieństwo wykrycia przez bariery podwodne i morskie samoloty patrolowe. Zastosowanie technologii do osiągnięcia tych celów jest nazywane wyciszaniem magnetycznym [7].

Sposoby wyciszania magnetycznego silników elektrycznych

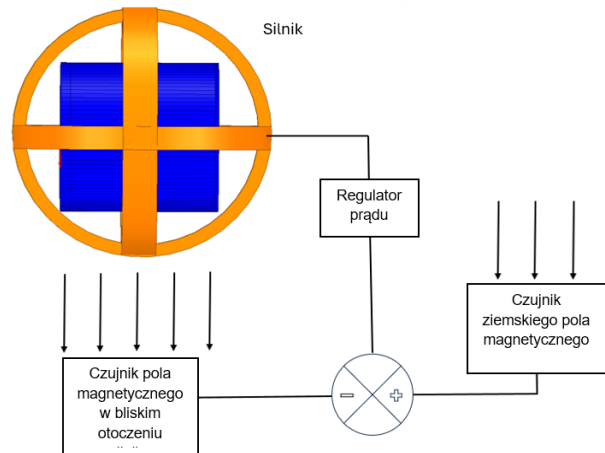
Minimalizacja sygnatury magnetycznej obiektu jest bardzo istotnym zagadnieniem w przypadku zastosowań militarnych, gdzie niska wykrywalność jest kluczowa dla zwiększenia przeżywalności sprzętu wojskowego, m.in. okrętów. Zmniejszenie sygnatury magnetycznej okrętów, jak i urządzeń i maszyn elektrycznych jest realizowane metodami pasywnymi i aktywnymi [8]. Metody pasywne polegają na wyeliminowaniu w jak największym stopniu z konstrukcji obiektu materiałów ferromagnetycznych oraz na zastosowaniu ekranów magnetycznych dla urządzeń emitujących pola magnetyczne statyczne i zmienne [8]. Aktywna minimalizacja sygnatury magnetycznej jest realizowana za pomocą układów kompensacyjnych wyposażonych w odpowiednio rozmieszczone cewki kompensacyjne, które wskutek przepływu regulowanego prądu wytwarzają pole magnetyczne tłumiące pole własne obiektu podlegającego wyciszaniu magnetycznemu.

W przypadku maszyn elektrycznych, pasywna minimalizacja sygnatury magnetycznej polega głównie na ograniczeniu wykorzystania ferromagnetyków, w tym m.in. wykonaniu elementów kadłuba ze stopu aluminium oraz wału ze stali niemagnetycznej. Stosowane są także pasywne ekrany rozproszonych pól magnetycznych. W przypadku pól statycznych i niskoczęstotliwościowych (do ok. 1 kHz) są to ekrany wykonane ze stopów żelazowo-niklowych, jak FeNi80 (tzw. Mumetal), FeNi48. Dla rozproszonych pól wysokoczęstotliwościowych stosowane są przeważnie ekrany wykonane z materiałów o dużej przewodności elektrycznej.

Aktywne wyciszanie magnetyczne maszyn elektrycznych można ogólnie podzielić na dwie metody:

- z układem kompensacyjnym umieszczonym na zewnątrz maszyny elektrycznej, bez ingerencji w jej konstrukcję;
- z układem kompensacyjnym zabudowanym bezpośrednio w obwodzie elektromagnetycznym maszyny.

Na rys. 1. przedstawiono poglądowo zewnętrzny układ kompensacyjny do tłumienia rozproszonego pola magnetycznego wytwarzanego w otoczeniu 3-fazowego silnika indukcyjnego.

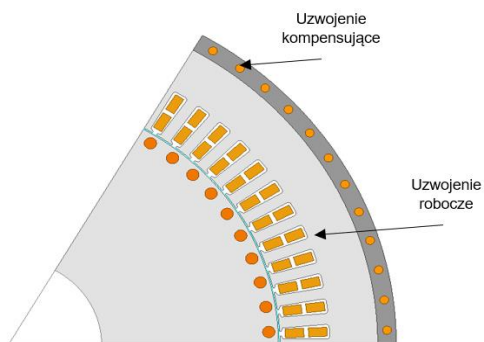


Rys.1. Zewnętrzny układ kompensujący rozproszone pola magnetyczne 3-fazowego silnika indukcyjnego

Aktywna kompensacja rozproszonego pola magnetycznego, realizowana przez zewnętrzny układ kompensacyjny, działa na zasadzie sprzężenia zwrotnego, gdzie jeden z czujników mierzy składowe indukcje magnetycznej (w trzech osiach) w bliskim otoczeniu silnika i zmierzone wartości są odejmowane od wartości referencyjnych mierzonych przez drugi czujnik. Różnica mierzonych wartości indukcji skutkuje wymuszeniem odpowiedniego prądu w cewkach kompensacyjnych. Teoretycznie, w uzwojeniu kompensacyjnym można wymusić prąd o takim natężeniu, że rozproszone pole magnetyczne maszyny zostanie całkowicie wygaszone. Jednakże, z uwagi na udział wyższych harmonicznych w prądach twornika, całkowita kompensacja pola rozproszonego jest niezwykle trudna do osiągnięcia. Zewnętrzne układy kompensacyjne charakteryzują się efektywnością tłumienia rozproszonego pola magnetycznego wokół silników na poziomie 20 do 21 dB [9].

Jedno z rozwiązań układu kompensacji rozproszonego pola magnetycznego zabudowanego bezpośrednio w obwodzie elektromagnetycznym 3-fazowego silnika indukcyjnego pokazano na rys. 2. Rozwiązanie to bazuje na umieszczeniu 3-fazowego uzwojenia kompensacyjnego w płaszczu powyżej jarzma rdzenia magnetycznego stojana. Płaszcz z uzwojeniem zaprojektowano mechanicznie w taki sposób, że można on być obracany kątowno. Obrót płaszczu umożliwia znalezienie optymalnej, pod względem efektywności tłumienia pola rozproszonego, pozycji kątowej cewek uzwojenia kompensacyjnego względem cewek uzwojenia głównego stojana, podczas pracy maszyny w różnych warunkach obciążenia.

Układ kompensujący jest zasilany równolegle z uzwojeniem głównym stojana. W obwodzie uzwojenia kompensującego, w każdej z jego faz, włączono regulowaną rezystancję dodatkową, umożliwiającą zmianę wartości natężenia prądu w tym uzwojeniu. Za pomocą rezystancji dodatkowej można wymusić taką wartość



Rys.2. Jedno z rozwiązań układu kompensacji rozproszonego pola magnetycznego zabudowanego bezpośrednio w obwodzie elektromagnetycznym silnika indukcyjnego

natężenia prądu kompensacyjnego, która będzie skutkować najskuteczniejszym tłumieniem rozproszonego pola magnetycznego w otoczeniu silnika. W zależności od punktu pracy silnika, wymagane są różne nastawy rezystancji dodatkowej. Zarówno uzwojenie główne stojana jak i kompensacyjne, mogą być połączone w gwiazdę lub trójkąt.

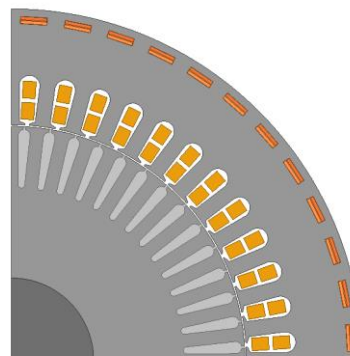
Układ kompensacyjny zabudowany w obwodzie elektromagnetycznym silnika, pokazany na rys. 2., realizuje kompensację „statyczną”, dostosowaną do warunków obciążenia maszyny, poprzez odpowiednie przesunięcie kątowe cewek uzwojenia kompensacyjnego względem cewek uzwojenia głównego stojana oraz regulację wartości rezystancji dodatkowej. Układ ten pozwala uzyskać skuteczność tłumienia rozproszonego pola magnetycznego na poziomie 20 dB, czyli zbliżonym do poziomu tłumienia układów kompensacyjnych montowanych na zewnątrz silników. Silniki (oraz generatory) elektryczne zaprojektowane z uwzględnieniem pasywnej lub aktywnej minimalizacji sygnatury magnetycznej określane są w literaturze jako tzw. silniki (generatory) niskomagnetyczne.

Modele obliczeniowe

W celu określenia skuteczności tłumienia rozproszonego pola magnetycznego przez układy kompensacyjne zabudowane wewnątrz obwodu elektromagnetycznego maszyny elektrycznej, przeprowadzono obliczenia numeryczne pola magnetycznego w otoczeniu 3-fazowego silnika indukcyjnego, klatkowego. Model numeryczny do obliczeń elektromagnetycznych silnika z wewnętrznym układem kompensacyjnym (oraz wariantu bez tego układu) zrealizowano w oprogramowaniu ANSYS Maxwell 2D, z wykorzystaniem dwuwymiarowej (2D) analizy metodą elementów skończonych (MES) dla stanów przejściowych. Z uwagi na zastosowanie analizy MES 2D, analiza ogranicza się do obliczenia rozproszonego pola magnetycznego w płaszczyźnie X-Y. Geometrię modelu numerycznego silnika indukcyjnego o mocy 100 kW i liczbie par biegunów $2p = 4$, zaprezentowano na rys. 3.

Rozpatrywany silnik ma dwa trójfazowe uzwojenia stojana, główne i kompensacyjne. Każde z uzwojeń jest rozmieszczone w oddzielnych żłobkach, po 48 żłobków na uzwojenie. Uzwojenie robocze, odpowiedzialne za wytwarzanie mocy użytecznej na wale, rozmieszczone jest jak w typowych silnikach indukcyjnych, przy wewnętrznej średnicy pakietu blach stojana. Uzwojenie kompensacyjne odpowiedzialne za tłumienie strumienia rozproszonego w otoczeniu silnika, jest rozmieszczone przy zewnętrznej średnicy pakietu blach stojana, jak pokazano na rys. 3. Oba uzwojenia zasilane są równolegle, tym samym napięciem.

Kierunek nawinięcia uzwojenia kompensacyjnego jest przeciwny do kierunku nawinięcia uzwojenia głównego, w celu wytworzenia strumienia w kierunku przeciwnym do strumienia w uzwojeniu głównym. Uzwojenie główne silnika wykonano jako uzwojenie dwuwarstwowe, o poskoku cewek równym 10, uzwojenie kompensujące wykonano w takiej samej konfiguracji. W silniku zastosowano wirnik klatkowy, aluminiowy, o liczbie żłobków równej 56. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe wymiary geometryczne oraz parametry/wielkości znamionowe rozpatrywanego silnika.



Rys.3. Geometria modelu numerycznego do obliczeń elektromagnetycznych rozpatrywanego 3-fazowego silnika indukcyjnego klatkowego

Rozpatrywany silnik ma dwa trójfazowe uzwojenia stojana, główne i kompensacyjne. Każde z uzwojeń jest rozmieszczone w oddzielnych żłobkach, po 48 żłobków na uzwojenie. Uzwojenie robocze, odpowiedzialne za wytwarzanie mocy użytecznej na wale, rozmieszczone jest jak w typowych silnikach indukcyjnych, przy wewnętrznej średnicy pakietu blach stojana. Uzwojenie kompensacyjne odpowiedzialne za tłumienie strumienia rozproszonego w otoczeniu silnika, jest rozmieszczone przy zewnętrznej średnicy pakietu blach stojana, jak pokazano na rys. 3. Oba uzwojenia zasilane są równolegle, tym samym napięciem. Kierunek nawinięcia uzwojenia kompensacyjnego jest przeciwny do kierunku nawinięcia uzwojenia głównego, w celu wytworzenia strumienia w kierunku przeciwnym do strumienia w uzwojeniu głównym. Uzwojenie główne silnika wykonano jako uzwojenie dwuwarstwowe, o poskoku cewek równym 10, uzwojenie kompensujące wykonano w takiej samej konfiguracji. W silniku zastosowano wirnik klatkowy, aluminiowy, o liczbie żłobków równej 56. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe wymiary geometryczne oraz parametry/wielkości znamionowe rozpatrywanego silnika.

Analizy rozkładu pola wewnątrz rozpatrywanego silnika oraz w obszarze otaczającym silnik, o kształcie kołowym, przeprowadzono dla trzech wariantów wykonania maszyny:

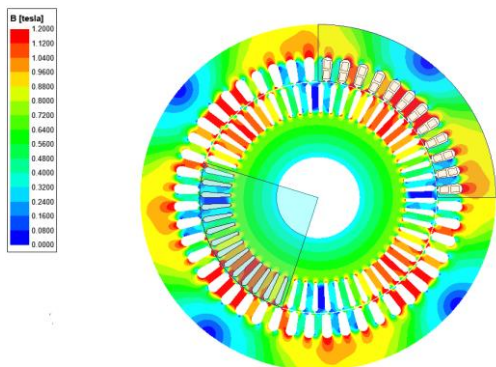
- silnik niewyposażony w wewnętrzny układ kompensacyjny;
- silnik wyposażony w wewnętrzny układ kompensacyjny, lecz uzwojenie kompensacyjne jest rozwarte (brak efektu kompensacji);
- silnik wyposażony w wewnętrzny układ kompensacyjny, uzwojenie kompensacyjne zasilane 3-fazowym prądem kompensacyjnym.

Każdorazowo obliczenia elektromagnetyczne MES 2D realizowano dla znamionowego obciążenia silnika. Obszar powietrzny otaczający silnik zamodelowano jako koło o promieniu 3 m od osi silnika. Promień tego obszaru jest ponad 6-krotnie większy od promienia zewnętrznego rdzenia obwodu elektromagnetycznego stojana. Obliczone wartości modułu indukcji rozproszonego pola magnetycznego odczytywano wzdłuż łuku o promieniu 2 m

od osi silnika. Dla wybranej chwili czasowej wyznaczano rozkład indukcji magnetycznej wewnątrz oraz na zewnątrz silnika (rys. 4,5,8,12,13). Przebieg prądu fazowego zasilania silnika przy obciążeniu znamionowym przedstawiono na rys. 7 dla pięciu okresów elektrycznych. W pierwszej kolejności analizy rozkładu pola magnetycznego wewnątrz i poza silnikiem przeprowadzono dla wariantu bez zabudowanego układu kompensującego. Otrzymane wyniki posłużyły do określenia efektywności tłumienia pola magnetycznego przez układ kompensujący oraz wpływu zastosowania dodatkowego zintegrowanego uzwojenia kompensacyjnego na parametry elektromechaniczne silnika.

Tabela1. Podstawowe wymiary geometryczne oraz parametry znamionowe rozpatrywanego silnika

Parametr	Wartość	Jednostka
Moc znamionowa P_n	100	kW
Napięcie znamionowe U_n	400	V
Prąd znamionowy I_n	170	A
Częstotliwość znamionowa	50	Hz
Prędkość obrotowa znamionowa n_n	1480	obr/min
Moment znamionowy T_n	645	N·m
Rezystancja fazowa R_f	0,027	Ω
Indukcyjność połączeń czołowych L_{cz}	63,6	μH
Liczba par biegunów p	2	-
Grubość szczeliny powietrznej δ_g	1	mm
Średnica zewnętrzna stojana D_{out}	470	mm
Średnica wewnętrzna stojana D_{in}	315	mm
Długość pakietu blach L_{ie}	300	mm

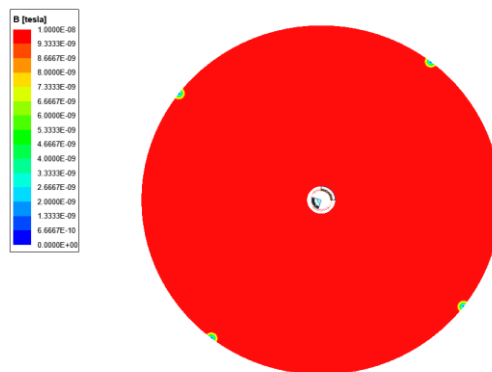


Rys.4. Rozkład modułu indukcji magnetycznej wewnątrz silnika, w wariancie bez zintegrowanego układu kompensacyjnego

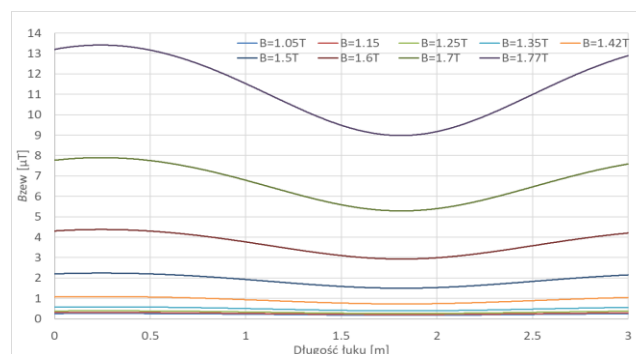
Z uwagi na zastosowanie, silnik zaprojektowano tak, by osiągał wymaganą moc dla pracy ciągłej (S1), przy jednocześnie możliwie niskim poziomie indukcji, nie przekraczającym 1,3 T w żadnym fragmencie obwodu magnetycznego. Niski poziom indukcji przekłada się na zmniejszenie rozproszenia pola magnetycznego w otoczeniu silnika oraz, w połączeniu z innymi zabiegami konstrukcyjnymi, powinien skutkować obniżeniem drgań i hałasu silnika.

Z uwagi na zastosowanie, silnik zaprojektowano tak, by osiągał wymaganą moc dla pracy ciągłej (S1), przy jednocześnie możliwie niskim poziomie indukcji, nie przekraczającym 1,3 T w żadnym fragmencie obwodu magnetycznego. Niski poziom indukcji przekłada się na

zmniejszenie rozproszenia pola magnetycznego w otoczeniu silnika oraz, w połączeniu z innymi zabiegami konstrukcyjnymi, powinien skutkować obniżeniem drgań i hałasu silnika.



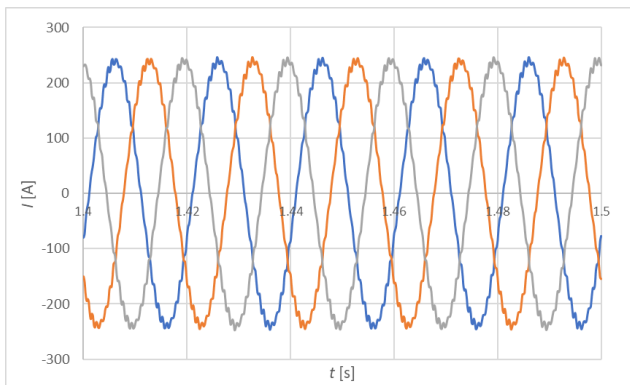
Rys.5. Rozkład indukcji magnetycznej w otoczeniu 3-fazowego silnika indukcyjnego bez układu kompensacyjnego, ale z obniżonym strumieniem głównym i poziomem nasycenia w obwodzie magnetycznym (dla wybranej chwili czasowej)



Rys.6. Obliczone wartości modułu indukcji pola rozproszonego w odległości 2 m od osi wału silnika, w zależności od poziomu nasycenia w jarmie magnetycznym stojana, w przedziale od 1,05 T do 1,77 T

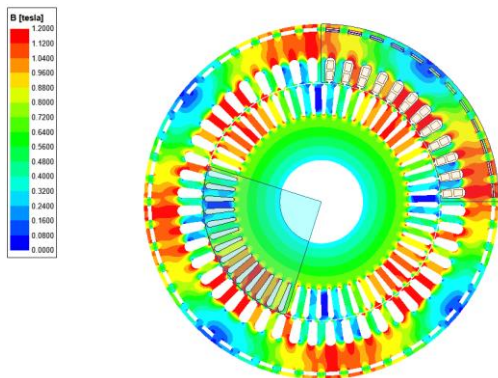
Na rys. 6. przedstawiono obliczone wartości modułu indukcji magnetycznej wzdłuż łuku o promieniu 2 m od osi wału silnika, dla kilku różnych poziomów nasycenia w rdzeniu magnetycznym, w przedziale od 1,05 T do ok. 1,8 T. Przy indukcji w jarmie stojana na poziomie 1,05 T otrzymano obliczeniowo średnią wartość modułu indukcji pola rozproszonego ok. 0,2 μT . Zwiększenie nasycenia w jarmie stojana do poziomu 1,8 T powoduje nawet 50-krotne zwiększenie emisji rozproszonego pola w otoczeniu silnika. Można zauważyć, że poziom rozproszenia pola magnetycznego znacząco wzrasta po przekroczeniu kolana charakterystyki magnesowania blachy. W modelu numerycznym rozpatrywanego silnika zastosowano blachę M400-50A, z bazy materiałowej programu ANSYS Maxwell, dla której zagięcie charakterystyki magnesowania rozpoczyna się przy wartości indukcji ok. 1,4 T.

Dane z rys. 6 wskazują, że przy projektowaniu silników niskomagnetycznych, zwłaszcza do zastosowań militarnych, obwody elektromagnetyczne tych maszyn powinny być projektowane na obniżone poziomy nasycenia magnetycznego, znacznie niższe od stosowanych w typowych rozwiązaniach silników indukcyjnych dla przemysłu. Do dalszych analiz wybrano model silnika z liczbą zwojów szeregowych uzwojenia stojana dobraną tak, że moduł indukcji w połowie wysokości jarmca stojana osiąga wartość ok. 1,05 T.



Rys.7. Przebiegi prądów fazowych uzwojenia głównego stojana, dla silnika z rys. 4

Dla wariantu silnika wyposażonego w wewnętrzny układ kompensacyjny analizy rozkładu pola magnetycznego (w obrębie rdzenia magnetycznego silnika i pola rozproszonego w bliskim jego otoczeniu), przeprowadzono w pierwszej kolejności przy założeniu, że uzwojenie kompensacyjne jest rozwarte. Obliczenia te miały na celu zaobserwowanie wpływu obecności żłobków uzwojenia kompensującego na zwiększenie nasycenia w jarzmie rdzenia magnetycznego stojana oraz na rozkład pola rozproszonego wokół silnika. Na rys. 8 przedstawiono rozkład indukcji wewnątrz rdzenia dla tego wariantu. Dane nawojowe uzwojenia stojana w modelach obliczeniowych silnika z kompensacją wewnętrzną pozostawiono bez zmian w porównaniu do wariantu bez uzwojenia kompensacyjnego.

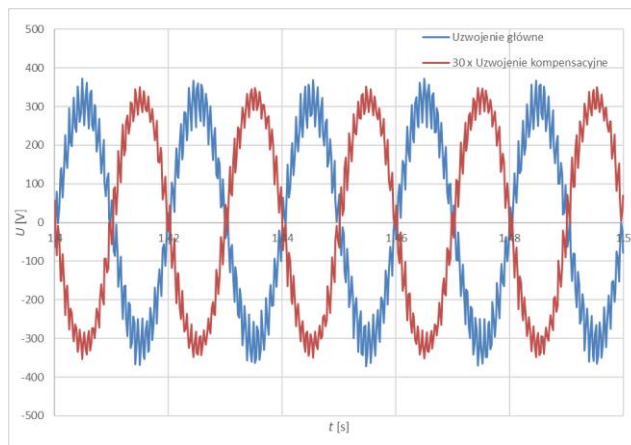


Rys.8. Rozkład modułu indukcji magnetycznej wewnątrz silnika, w wariancie z układem kompensacyjnym

Przeprowadzone obliczenia elektromagnetyczne wykazały, że po zastosowaniu w jarzmie rdzenia stojana dodatkowych żłobków o kształcie prostokątnym (rys. 8), przeznaczonych na uzwojenie kompensacyjne, indukcja magnetyczna w jarzmie zwiększyła się z 1,05 T do ok. 1,15 T. W obszarze powyżej żłobków uzwojenia kompensującego także występują wysokie wartości indukcji magnetycznej, ok. 1,15 T. Taki rozkład pola magnetycznego w jarzmie stojana potwierdza, że układ kompensacji rozproszenia pola magnetycznego jest wyłączony. Wzrost wartości indukcji w jarzmie stojana po dodaniu żłobków uzwojenia kompensacyjnego wynika ze zmniejszenia przekroju jarzma, przy pozostawionym bez zmian strumieniu głównym w silniku (ta sama liczba zwojów szeregowych na fazę w uzwojeniu głównym). Wyniki obliczeń wskazują także, że przy wyłączonym/rozwartym uzwojeniu kompensacyjnym, wprowadzenie do rdzenia

magnetycznego stojana dodatkowych żłobków, jak na rys. 8, skutkuje zwiększeniem rozproszenia pola magnetycznego wokół silnika – obliczony moduł indukcji wzdłuż łuku o promieniu 2 m od osi wału silnika wzrósł do wartości 0,32 μ T.

Przebieg napięcia indukowanego w rozwartym uzwojeniu kompensacyjnym przez strumień magnetyczny uzwojenia głównego jest zbliżony kształtem do przebiegu napięcia indukowanego w uzwojeniu głównym. Przebieg napięcia w uzwojeniu kompensacyjnym jest jednak przesunięty (opóźniony) w fazie o 180° el, a amplituda tego przebiegu jest znacznie mniejsza i wynosi w przypadku rozpatrywanego modelu obliczeniowego silnika ok. 2 V (rys. 9).



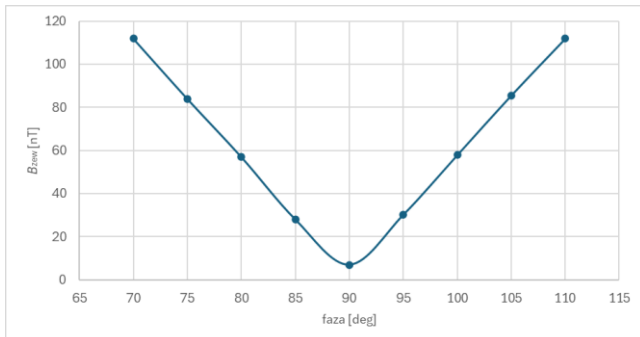
Rys.9. Przebiegi napięć dla uzwojenia głównego oraz kompensującego

Pierwsze analizy dla modelu obliczeniowego silnika niskomagnetycznego z zasilaniem wewnętrznym układem kompensacyjnym były skoncentrowane na określeniu optymalnej pozycji uzwojenia kompensacyjnego względem uzwojenia głównego, w celu uzyskania najkorzystniejszego tłumienia rozproszonego pola magnetycznego w otoczeniu silnika, przy obciążeniu znamionowym. W obliczeniach numerycznych dodawano do wymuszenia napięciowego w uzwojeniu kompensacyjnym stopniowo zwiększany kąt przesunięcia fazowego, zamiast realizować rzeczywisty obrót uzwojenia kompensacyjnego w modelu numerycznym o dany kąt elektryczny. Z przeprowadzonych wielowariantowych symulacji numerycznych wyznaczono najkorzystniejszą wartość przesunięcia fazowego oraz rezystancji dodatkowej włączonej w obwód uzwojenia kompensującego.

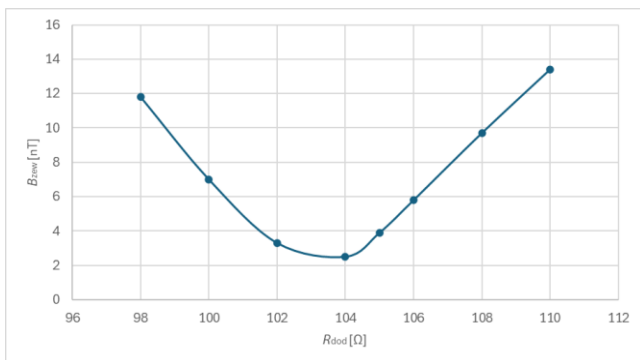
Najkorzystniejsze wyniki pod względem efektywności tłumienia rozproszonego pola magnetycznego przez uzwojenie kompensacyjne uzyskano dla kąta przesunięcia 90° el. Kolejnym krokiem było określenie wartości rezystancji dodatkowej włączonej w obwód uzwojenia kompensacyjnego. Z przeprowadzonych analiz uzyskano wartość optymalnej rezystancji dodatkowej 104 Ω . Wartości modułów indukcji magnetycznej odczytane 2 m od osi wału silnika dla kilku zmian kąta przesunięcia fazowego napięcia przy stałej wartości rezystancji oraz dla kilku wartości rezystancji dodatkowej przy stałym kącie fazowym, przedstawiono na rys. 9 i 10.

Dobór odpowiednich wartości rezystancji oraz kąta przesunięcia fazowego jest niezwykle ważny dla przedstawionego rozwiązania wewnętrznego układu kompensacyjnego. Z przeprowadzonych analiz można wnioskować, że układ kompensacyjny jest bardzo czuły na zmiany rozpatrywanych parametrów. W przypadku zmian

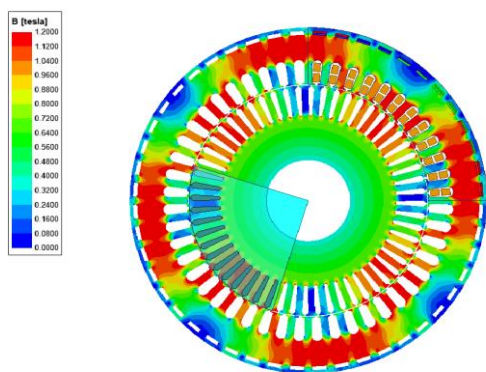
kąta przesunięcia fazowego napięcia w uzwojeniu kompensacyjnym, ekstremum wykresu funkcji wynosi 90° el. Zmiana kąta o 5 stopni zwiększa indukcyjność magnetyczną w odległości 2 metrów od osi silnika aż 4 krotnie. Podobnie jest w przypadku zmian rezystancji dodatkowej. Zmiana wartości rezystancji o około 6Ω w stosunku do wartości optymalnej zwiększa wartość indukcyjności rozproszonego pola magnetycznego ok. 10 krotnie.



Rys.10. Indukcja magnetyczna w odległości 2 metrów od osi wału silnika w funkcji kąta fazowego przy stałej wartości rezystancji dodatkowej (100Ω)



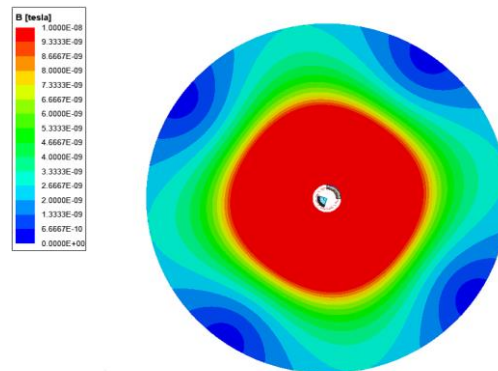
Rys.11. Indukcja magnetyczna w odległości 2 metrów od osi wału silnika w funkcji rezystancji dodatkowej przy stałej wartości kąta fazowego (90°)



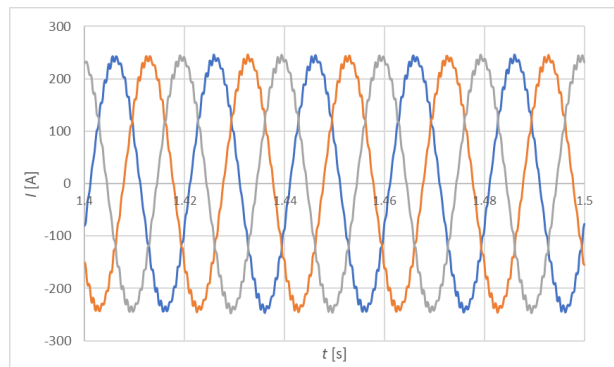
Rys.12. Rozkład modułu indukcji magnetycznej wewnątrz silnika, w wariancie z zasilanym układem kompensacyjnym

Dla zoptymalizowanego układu kompensacyjnego ponownie przeliczono punkt pracy przy obciążeniu znamionowym. Zasilanie uzwojenia kompensacyjnego wpłynęło na rozkład strumienia i indukcyjności magnetycznej w silniku. Nad żłobkami uzwojenia kompensacyjnego strumień magnetyczny jest wygaszony i indukcyjność spada niemal do zera. Wskazuje to na skuteczne działanie uzwojenia kompensacyjnego i wygaszanie rozproszonego pola magnetycznego w otoczeniu maszyny. Poziom rozproszony pole magnetyczne generowanego w otoczeniu silnika, w odległości 2 m od osi wału silnika,

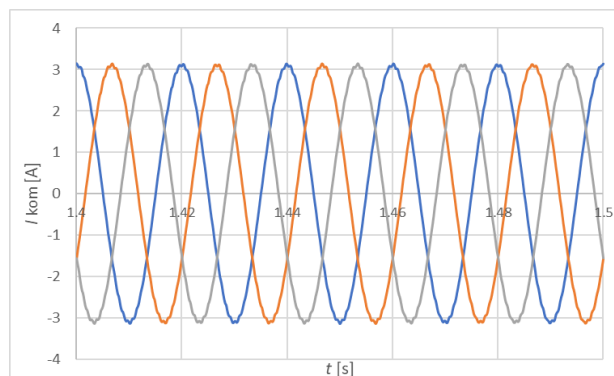
zredukowano do wartości 2 nT. W porównaniu do silnika bez układu kompensacyjnego redukcja rozproszonego pola magnetycznego jest 100 krotna, czyli o 20 dB.



Rys.13. Rozkład indukcji magnetycznej w otoczeniu 3-fazowego silnika indukcyjnego jak na rys.3, z obniżonym strumieniem głównym i wyposażonego w uzwojenie kompensacyjne (dla wybranej chwili czasowej)



Rys.14. Przebiegi prądów fazowych uzwojenia głównego



Rys.15. Przebiegi prądów fazowych uzwojenia kompensacyjnego

Wartość skuteczna prądu w uzwojeniu głównym stojana wynosi 168 A. Zastosowanie wewnętrznego układu kompensacyjnego nie zwiększyło natężenia prądów fazowych w uzwojeniu głównym stojana oraz nie spowodowało odkształcenia ich przebiegów czasowych. W uzwojeniu kompensacyjnym wartość skuteczna natężenia prądu wynosi 2 A. Przebiegi prądów w uzwojeniu kompensacyjnym są niemalże sinusoidalne (brak większego udziału wyższych harmonicznych).

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy numeryczne dotyczyły silnika indukcyjnego wyposażonego w wewnętrzny układ kompensacyjny, zabudowany bezpośrednio w obwodzie elektromagnetycznym stojana. Z analiz tych wynika, że przekroczenie wartości indukcyjności magnetycznej w jarmie

rdzenia magnetycznego stojana powyżej kolana charakterystyki magnesowania blachy elektrotechnicznej znacząco zwiększa emisję rozproszonego pola magnetycznego w otoczeniu silnika. Niewielkie różnice w przesunięciu fazowym napięcia zasilającego uzwojenie kompensacyjne, w porównaniu do wartości optymalnej tego przesunięcia kąтового, oraz nieznaczna zmiana rezystancji dodatkowej wpiętej w obwódzie kompensacyjnym, w porównaniu do jej wartości optymalnej, znacząco pogarszają efektywność tłumienia rozproszonego pola magnetycznego. Optymalna wartość rezystancji dodatkowej w układzie kompensacyjnym ulega zmianie wraz ze zmianą obciążenia silnika. Praca układu kompensacyjnego w warunkach inne niż optymalne zwiększa emisyjność zewnętrznego pola magnetycznego kilkukrotnie (nieodpowiedni dobór rezystancji dodatkowej) lub nawet kilkaset krotnie (nieodpowiednie położenie uzwojenia kompensującego). Dla stałych parametrów układu kompensującego efektywność tłumienia ulegnie pogorszeniu przy stanach dynamicznych silnika. Zastosowanie optymalnych parametrów układu kompensującego w punkcie pracy znamionowej zredukowało zewnętrzne pole magnetyczne wyznaczone w odległości 2 metrów od osi silnika 100 krotnie. Projektując silnik o niskiej emisyjności zewnętrznego pola magnetycznego należy zwrócić szczególną uwagę na wartości indukcji magnetycznej w jarzmie silnika. Ograniczenie wartości indukcji magnetycznej w jarzmie stojana przy zachowaniu stałej wartości mocy na wale może prowadzić do zwiększenia długości czynnej pakietu blach lub całego gabarytu silnika. Zastosowanie układu kompensującego nie wpłynęło znacząco na parametry elektromechaniczne silnika.

Publikacja częściowo wspierana w ramach rektorskiego grantu jakościowego o numerze 05/030/RGJ23/0064.

Autorzy: mgr. inż. Jan Mikoś, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec, E-mail: jan.mikos@git.lukasiewicz.gov.pl; dr inż. Robert Rossa, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec, E-mail: robert.rossa@git.lukasiewicz.gov.pl; dr.

hab. inż. Sebastian Berhausen, prof. Pol. Śl., Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny – Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, E-mail: sebastian.berhausen@polsl.pl; prof. dr hab. inż. Stefan Paszek, Politechnika Śląska, Wydział elektryczny – Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny – Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, E-mail: stefan.paszek@polsl.pl;

LITERATURA

- [1] Mazaheri-Tehrani, E., & Faiz, J.: Airgap and stray magnetic flux monitoring techniques for fault diagnosis of electrical machines: An overview, *IET Electric Power Applications*, (2022) 16(3), 277–299, doi: 10.1049/elp2.12157
- [2] R. Romary, D. Roger, J. -F. Brudny: Analytical computation of an AC machine external magnetic field, *EPJ Appl. Phys.*, (2009), Vol. 47, No. 3, doi: 10.1051/epjap/2009102
- [3] Barzegaran, M. R., Sarikhani, A., & Mohammed, O. A.: An equivalent source model for the study of radiated electromagnetic fields in multi-machine electric drive systems, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, (2011), 442–447, doi: 10.1109/ISEMC.2011.6038352
- [4] E. Napieralska, D. Roger, K. Komez, and C. A. Schulz: EMI of large power systems: Magnetic field calculation by substituting surface quantities for complex sources, *EPJ Applied Physics*, (2007), Vol. 39, No. 2, 149–157, doi: 10.1051/epjap:2007102
- [5] Wołoszyn, M., Tarnawski, J., & Wołoszyn, J.: Decomposition of the induced magnetism degaussing problem for fast determination of currents in demagnetization coils wrapped outside an object under arbitrary external field conditions, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (2023), doi:10.1016/j.jmmm.2023.170898
- [6] Wołoszyn, M., Jakubiuk, K., Flis, M.: Analiza rozkładu pola magnetycznego w kadłubie okrętu z cewkami układu demagnetyzacyjnego, *Poznan University of Technology Academic Journals Electrical Engineering*, 2015, No. 81, Article 81, 49-53
- [7] M. C. Isa, H. Nain, N. H. N. Yusoff, A. R. A. Manap, R. Slamatt, and M. H. Anuar: An overview of ship magnetic signature and silencing technologies, *Def. S T Tech. Bull.*, (2019), Vol. 12, No. 2, 176–192, doi: 10.13140/RG.2.2.14643.58401
- [8] Holmes, J. J.: Reduction of a ship's magnetic field signatures, *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, (2008), 23, 1–76. doi: 10.2200/S00150ED1V01Y200809CE M023
- [9] Cope, D.: Low magnetic signature propulsion system, (1996)