

KONCEPCJA BEZŁOŻYSKOWYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH W NAPĘDACH LOTNICZYCH

MACIEJ HENZEL, KRZYSZTOF FALKOWSKI, MARIUSZ WAŻNY

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa, Warszawa

e-mail: maciej.henzel@wat.edu.pl; krzysztof.falkowski@wat.edu.pl; mariusz.wazny@wat.edu.pl

W artykule przedstawiono technologie związane z lewitacją magnetyczną, takie jak aktywne łożyska magnetyczne (AMB) oraz urządzenia bezłożyskowe. Artykuł zawiera model matematyczny oraz symulacyjny heteropolarnego promieniowego aktywnego łożyska magnetycznego i silnika bezłożyskowego pod kątem ich zastowania w nowych elektrycznych silnikach lotniczych.

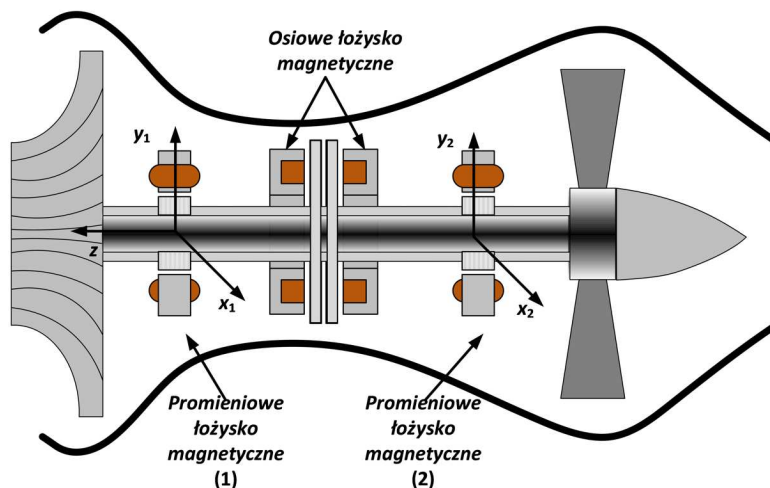
1. Wstęp

Obecnie opracowywane są nowe technologie lotnicze mające na celu poprawę efektywności, niezawodności i wrażliwości operacyjnej samolotów i systemów pokładowych. Nowe technologie silników odrzutowych rozwijane są w celu opracowania najnowocześniejszych silników elektrycznych, które mają zastąpić konstrukcje klasyczne. Koncepcje te uwzględniają m.in. możliwość wykorzystania bezłożyskowych maszyn elektrycznych jako rozruszników i generatorów oraz układów zawieszenia magnetycznego wałów turbin silników lotniczych. Ewolucja ta jest związana z koncepcją „All Electric Aircraft”, której głównym celem jest zredukowanie systemów pokładowych do systemów elektrycznych, zastąpienie tradycyjnych systemów mechanicznych, hydraulicznych i pneumatycznych oraz poprawa konserwacji samolotów i elastyczności operacyjnej. Te nowe jednostki i urządzenia mogą być używane w trudnych warunkach, m.in. niska i wysoka temperatura, próżnia i wysoka wilgotność powietrza [1], [2].

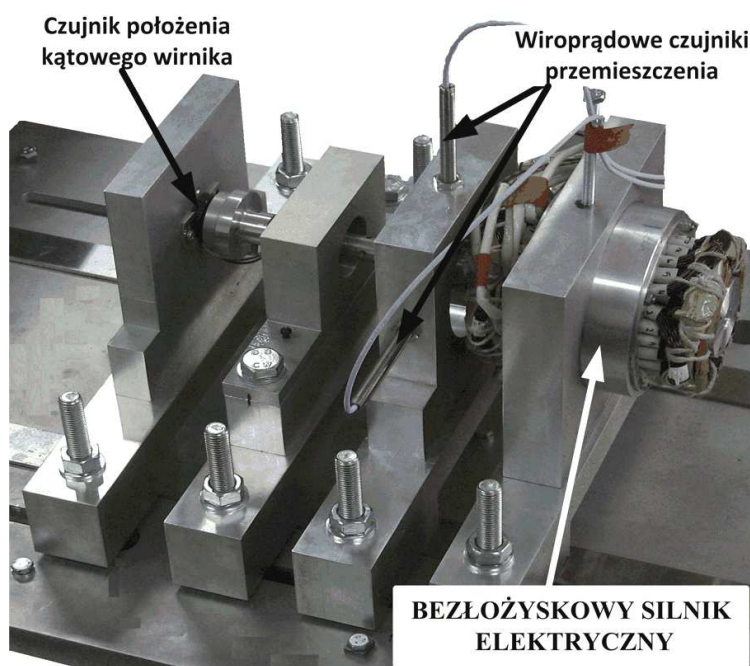
Technologie te czerpią korzyści z rozwoju technologii elektronicznych układów zasilania cywilnych samolotów transportowych, a ich badania i rozwój ukierunkowane są na systemy pokładowe mogące przynieść korzyści dla samolotów w zakresie obsługi, elastyczności eksploatacyjnej oraz wzrostu potencjału technologicznego bez wprowadzania zagrożeń oraz zwiększania masy tych systemów. Ograniczenia te dotyczą w szczególności samolotów o niewielkich rozmiarach i poruszających się na krótkich trasach (np. samoloty klasy general aviation) [2], [4].

W artykule przedstawiona została nowa grupa maszyn wykorzystująca zjawiska lewitacji magnetycznej nazywanych bezłożyskowymi maszynami elektrycznymi. W maszynach takich pole magnetyczne wytwarza oprócz momentu obrotowego wirnika również siły lewitacji magnetycznej. Maszyny takie łączą w sobie cechy klasycznych maszyn elektrycznych oraz aktywnego zawieszenia magnetycznego. Dzięki takiemu połączeniu, maszyny elektryczne uzyskują nowe właściwości, tj. brak kontaktu mechanicznego pomiędzy wirnikiem i statorem maszyny, zwiększenie ich właściwości eksploatacyjnych, możliwość samocentrowania się wirników podczas pracy, możliwość adaptacyjnej zmiany sztywności zawieszenia wałów wirników [3].

Lotnicze technologie zawiesznień magnetycznych mogą zostać zaimplementowane m.in. w napędach lotniczych jako siłowniki zawieszenia magnetycznego dla wału turbiny silnika (rys. 1.), jak również wykorzystane w maszynach bezłożyskowych, w silnikach elektrycznych, rozrusznikach, prądniach elektrycznych czy też prądnic-rozrusznikach (rys. 2).



Rys. 1. Aktywne łożyska magnetyczne w układzie podparcia wału turbiny silnika lotniczego



Rys. 2. Bezłożyskowy silnik elektryczny

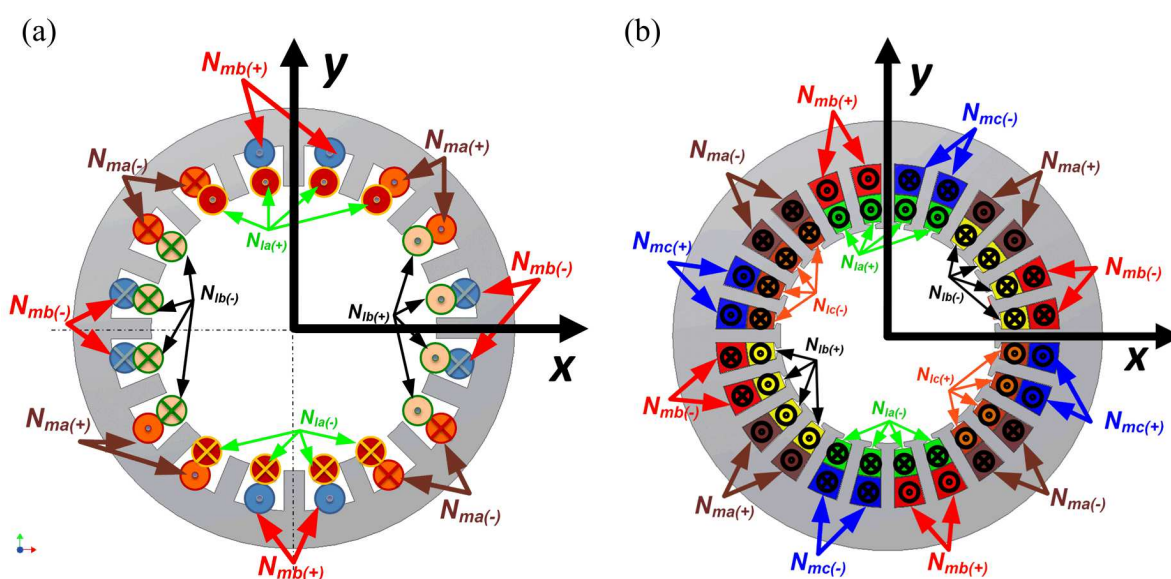
2. Zasada działania maszyny bezłożyskowej

Jako przykład zastosowania technologii magnetycznej w maszynach elektrycznych w artykule opisany został bezłożyskowy silnik elektryczny. Właściwym podejściem do konstrukcji maszyn bezłożyskowych jest integracja kilku maszyn elektrycznych w jedną funkcjonalną i konstrukcyjną całość. W literaturze można spotkać różne definicje formułujące pojęcie bezłożyskowych maszyn elektrycznych [1]. Bezłożyskową maszyną elektryczną jest zintegrowana elektromagnetycznie i konstrukcyjnie maszyna elektryczna z lewitującym zespołem wirnikowym, realizująca zadanie klasycznej maszyny elektrycznej (rys. 1). Tak więc bezłożyskowa maszyna elektryczna to złożony system mechatroniczny integrujący w swojej konstrukcji ww. dziedziny nauki i techniki. Układ taki stanowi synergiczną integrację elementów opisywanych przez mechanikę, elektronikę, sterowanie i regulację, informatykę, diagnostykę techniczną oraz sztuczną inteligencję. Przez

synergii rozumie się skuteczniejsze współdziałanie, kooperację wielu czynników, której efekt jest większy niż suma ich oddzielnych działań.

Maszyny bezłożyskowe łączą w swojej konstrukcji cechy funkcjonalne danego rodzaju maszyny elektrycznej, silnika lub/i prądnicy oraz cechy aktywnego zawieszenia magnetycznego. W jednym obwodzie magnetycznym sumują się strumienie magnetyczne generowane przez uzwojenia odpowiedzialne za zjawisko lewitacji magnetycznej oraz strumienie związane z funkcjonalnością maszyny elektrycznej. Strumienie te mogą na przykład pochodzić od uzwojeń generujących momenty obrotowe w silnikach elektrycznych, od magnesów trwałych zamontowanych w statorze lub wirniku maszyny.

Na rysunku 3 przedstawiono stator maszyny bezłożyskowej z nawiniętymi uzwojeniami odpowiadającymi za lewitację magnetyczną N_l oraz uzwojeniami funkcyjnymi N_m . Przez uzwojenie funkcyjne należy rozumieć uzwojenie maszyny elektrycznej związane z jej rodzajem i spełnianą funkcją, tj. silnikiem lub prądnicą. Kolejne fazy maszyny w części funkcjonalnej oznaczono indeksami a, b, c , a symbole „+” i „-” oznaczają odpowiednio początki i końce uzwojeń.



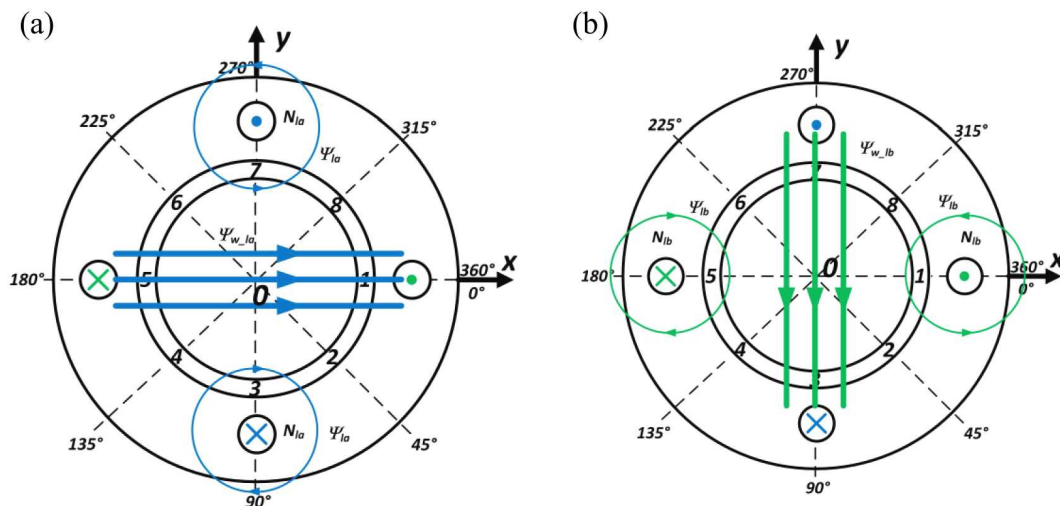
Rys. 3. Rozmieszczenie uzwojeń w statorze maszyny bezłożyskowej: (a) dwufazowej, (b) trójfazowej

Za stabilizację ruchu wirnika w kierunku promieniowym odpowiedzialne jest jedno z rodzajów uzwojeń nawiniętych na statorze silnika zgodnie z zasadą liczby par biegunów $p \pm 1$. Zasada ta w tego rodzaju maszynach jest koniecznością, ponieważ w ich konstrukcji napięcia zasilające uzwojenia łożyskowe muszą być modulowane w odniesieniu do napięć zasilających uzwojenie funkcyjne z dwa razy mniejszą częstotliwością. Nie ma reguły mówiącej, które z uzwojeń wykorzystane zostanie jako czterobiegunowe bądź dwubiegunowe, zasadą jest tylko konieczność utrzymania odpowiedniej liczby par biegunów.

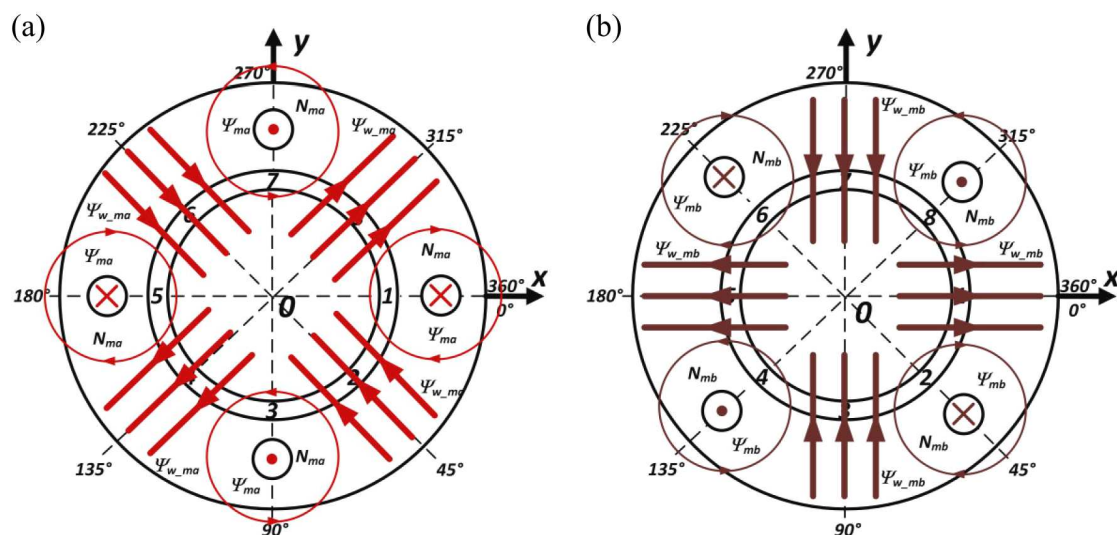
W opisywanym rozwiązaniu uzwojenie czterobiegunowe N_m związane jest z funkcją maszyny bezłożyskowej, natomiast uzwojenie dwubiegunowe N_l odpowiedzialne jest za lewitację magnetyczną wirnika. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi strumieni magnetycznych w szczelinach 1-8 maszyny bezłożyskowej. Punkty charakterystyczne rozmieszczone są na obwodzie statora co 45° zgodnie z przyjętym ruchem obrotowym wirnika, tj. zgodnie z ruchem wskazówek zegara.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono strumienie generowane przez uzwojenia funkcyjne N_m maszyny bezłożyskowej dla maszyny dwufazowej (rys. 5) i trójfazowej (rys. 6).

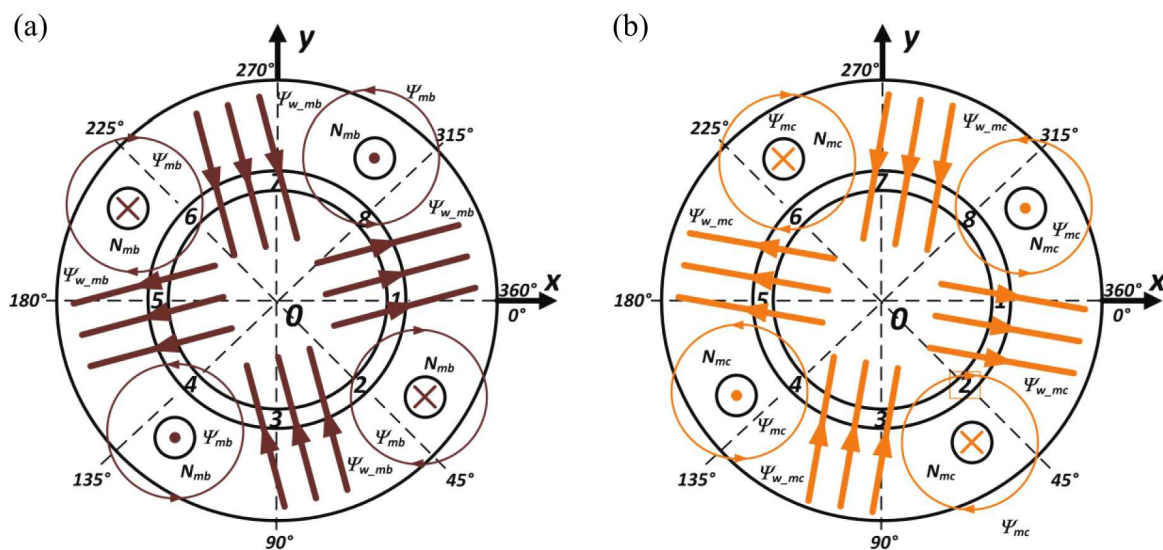
Ponieważ w maszynie dwufazowej uzwojenia funkcyjne są przesunięte względem siebie o 45° , to w wyniku przepływu prądu w uzwojeniach statora powstaną strumienie magnetyczne Ψ_{ma} i Ψ_{mb} przesunięte względem siebie również o 45° . Będą one się wzmacniać w szczelinach



Rys. 4. Strumienie magnetyczne generowane przez uzwojenia lewitacyjne



Rys. 5. Strumienie magnetyczne generowane przez uzwojenia funkcjonalne dwufazowej maszyny bezłożyskowej



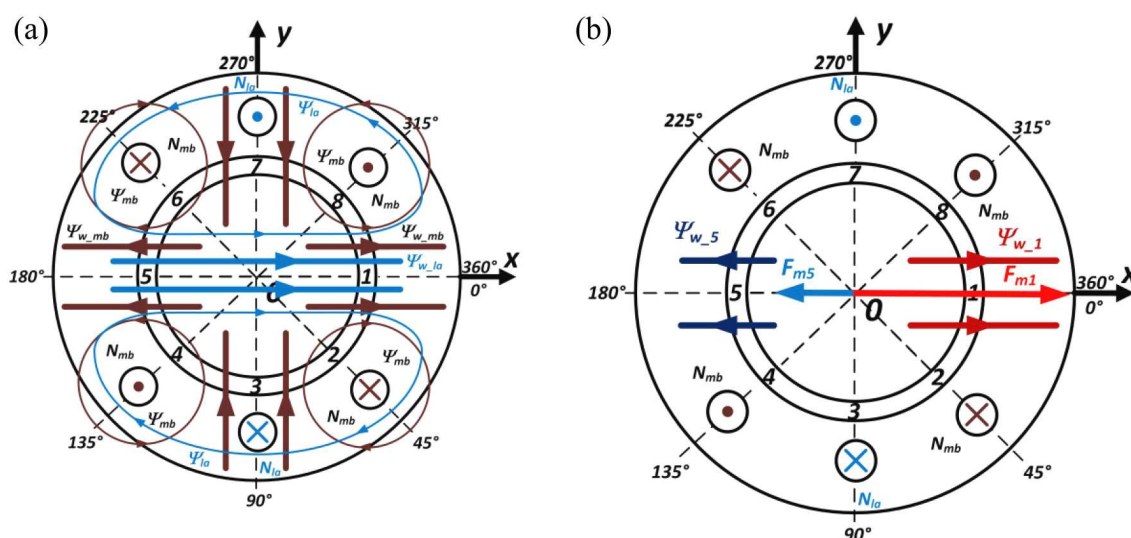
Rys. 6. Strumienie magnetyczne generowane przez uzwojenia funkcjonalne trójfazowej maszyny bezłożyskowej

2, 4, 6 i 8 dla uzwojeń N_{ma} fazy A (strumień wypadkowy Ψ_{w_ma}) oraz w szczelinach 1, 3, 5 i 7 dla uzwojeń N_{mb} fazy B (strumień wypadkowy Ψ_{w_mb}) zgodnie z zależnością (2.1). W przypadku maszyny trójfazowej przesunięcie pomiędzy fazami będzie wynosiło 30°

$$\Psi_{w_ma} = \sum_{i=1}^n \Psi_{ma} \quad \Psi_{w_mb} = \sum_{i=1}^n \Psi_{mb} \quad \Psi_{w_mc} = \sum_{i=1}^n \Psi_{mc} \quad (2.1)$$

gdzie: Ψ_{ma} – strumień magnetyczny wytworzony przez uzwojenie funkcyjne a , Ψ_{mb} – strumień magnetyczny wytworzony przez uzwojenie funkcyjne b , Ψ_{mc} – strumień magnetyczny wytworzony przez uzwojenie funkcyjne c .

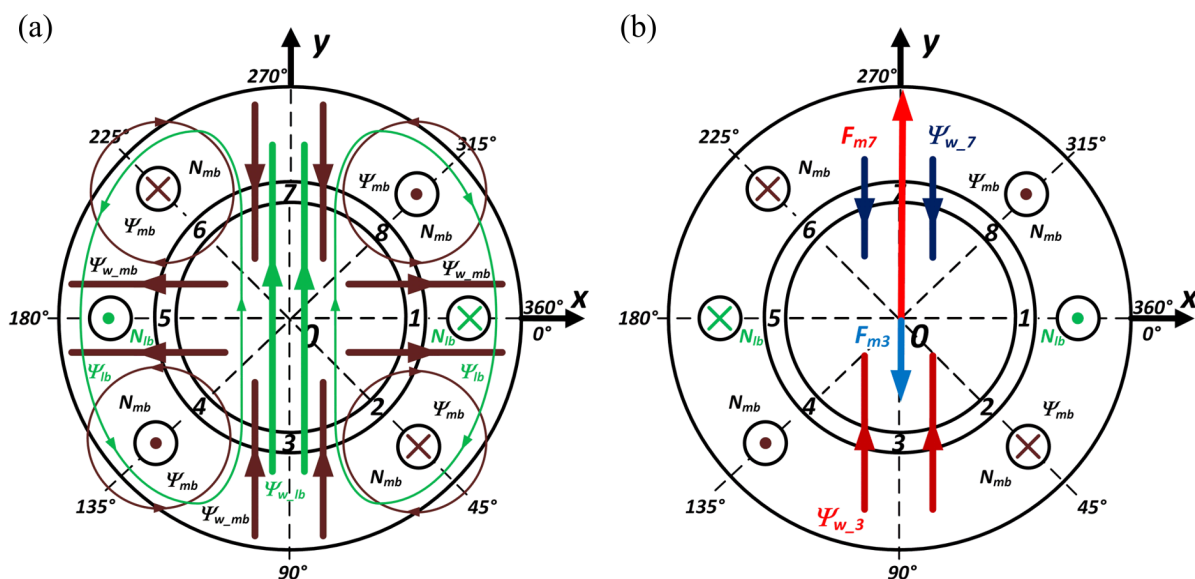
Opisane przebiegi strumieni magnetycznych w zintegrowanej maszynie bezłożyskowej dotyczyły sytuacji, kiedy poszczególne uzwojenia zasilane są oddzielnie. Podczas pracy maszyny bezłożyskowej wszystkie uzwojenia będą zasilane jednocześnie z zachowaniem odpowiedniej kolejności włączania ich do pracy (modulacji). Oznacza to, że powstałe strumienie magnetyczne będą strumieniami wypadkowymi oddziaływania uzwojeń lewitacyjnych i funkcjonalnych maszyny. Rozkład strumieni dla takich warunków został przedstawiony na rysunkach 7 i 8. Zgodnie z przyjętymi oznaczeniami strumienie magnetyczne w szczelinach 1, 3, 5 i 7 generowane przez uzwojenia lewitacyjne N_l będą sumowały się ze strumieniami generowanymi przez uzwojenia funkcjonalne N_m . Dzięki temu możliwe jest sterowanie ruchem promieniowym i obrotowym wirnika. Sterowanie ruchem wirnika w osi $0x$ przedstawione jest na rysunku 7, a w osi Oy na rysunku 8.



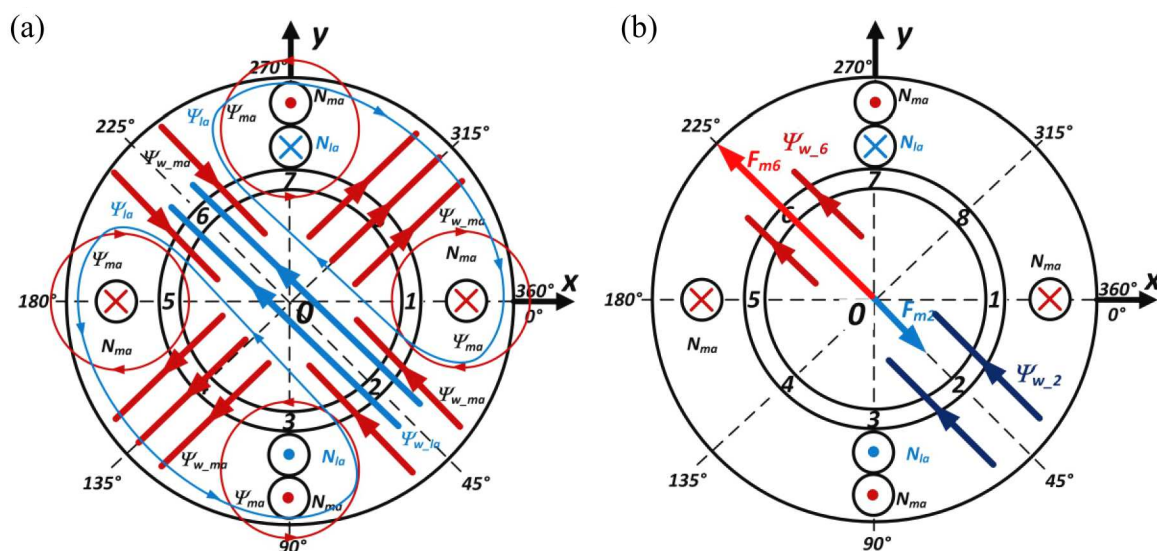
Rys. 7. Wygenerowanie siły magnetycznej przeciwdziałającej ruchowi wirnika maszyny bezłożyskowej w kierunku szczeliny powietrznej 5: (a) rozkład strumieni magnetycznych, (b) układ sił magnetycznych

Przedstawiona analiza dotyczy sytuacji, kiedy zasilanym uzwojeniem funkcyjnym jest uzwojenie N_{mb} . Dzięki temu, współdziałając z uzwojeniami lewitacyjnymi N_l w maszynie, można wytworzyć siłę przemieszczającą jej wirnik odpowiednio wzdłuż osi $0x$ i $0y$. Jeżeli dodatkowo zacznie się kolejno załączać uzwojenia funkcyjne N_{ma} i N_{mc} wirnik będzie przemieszczał się wzdłuż linii wyznaczonych przez szczeliny 2-6 i 4-8. Przykładowy rozkład strumieni dla takiego przypadku został pokazany na rysunku 9.

Jak pokazała powyższa analiza działania zintegrowanej maszyny bezłożyskowej, uzwojenia lewitacyjne i funkcjonalne muszą być w odpowiedni sposób modulowane, aby uzyskać zarówno efekt lewitacji magnetycznej wirnika maszyny, jak również jego obrót wokół osi $0z$. Sposób zasilania uzwojeń funkcjonalnych będzie uzależniony od rodzaju maszyny bezłożyskowej, tzn. inaczej będzie dla silników, a inaczej w przypadku prądnic. Na przykład, w przypadku silników,



Rys. 8. Wygenerowanie siły magnetycznej przeciwdziałającej ruchowi wirnika maszyny bezłóżyskowej w kierunku szczeliny powietrznej 3: (a) rozkład strumieni magnetycznych, (b) układ sił magnetycznych



Rys. 9. Wygenerowanie siły magnetycznej przeciwdziałającej ruchowi wirnika maszyny bezłóżyskowej w kierunku szczeliny powietrznej 1: (a) rozkład strumieni magnetycznych, (b) układ sił magnetycznych

jeżeli przez uzwojenia funkcjonalne N_m popłynie prąd przemienny, to wytworzy się wówczas moment obrotowy.

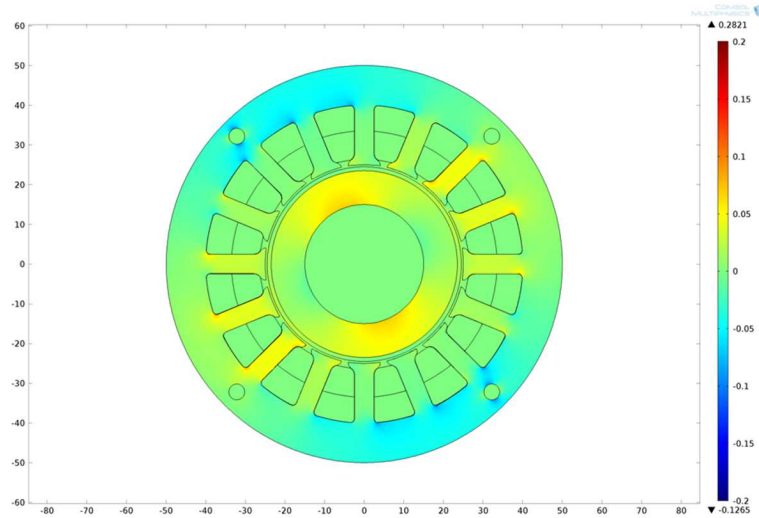
3. Analiza numeryczna

Analizę numeryczną wykonano dla modelu dwufazowego silnika elektrycznego. Stator posiada 16 zębów. W modelu można wyróżnić obszary wykonane ze stali magnetycznie miękkiej, miedzi i obszary wypełnione powietrzem.

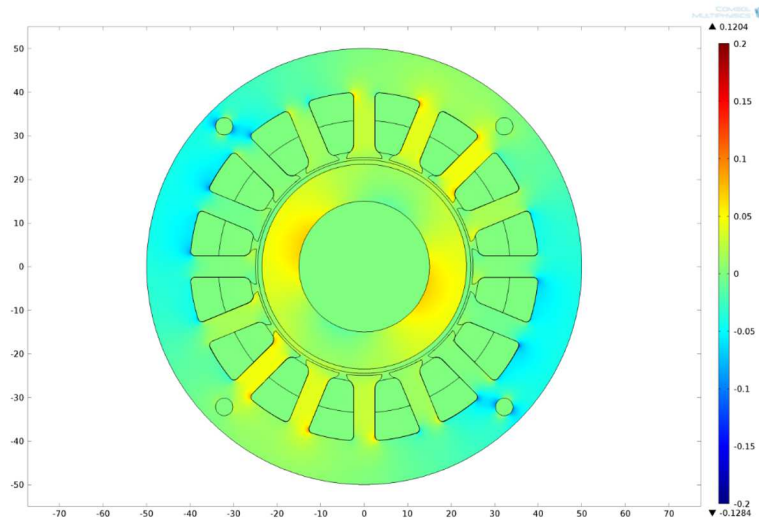
Ze stali magnetycznie miękkiej wykonany został stator i wirnik. W tym zakresie badań wykonano analizy dla wirnika stalowego bez magnesów trwałych o średnicy 47 mm. Badania powyższe umożliwią ocenę rozkładu pola magnetycznego w statorze. W żłobkach umieszczono

16 uzwojeń silnikowych i lewitacyjnych wykonanych z drutu miedzianego o średnicy 0,7 mm. Liczba zwojów odpowiednio wynosi $N_l = 40$ i $N_m = 70$.

Przedstawione na rysunkach 10 i 11 przebiegi indukcji magnetycznej w statorze w kierunku osi Ox przy prądzie zasilania 1 A potwierdzają analizę indukcji magnetycznej przedstawionej w rozdziale 2. Na rysunku 12 przedstawiono rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż osi Ox , natomiast na rysunku 13 przedstawiono przepływ pola magnetycznego przez ząb nr 1.

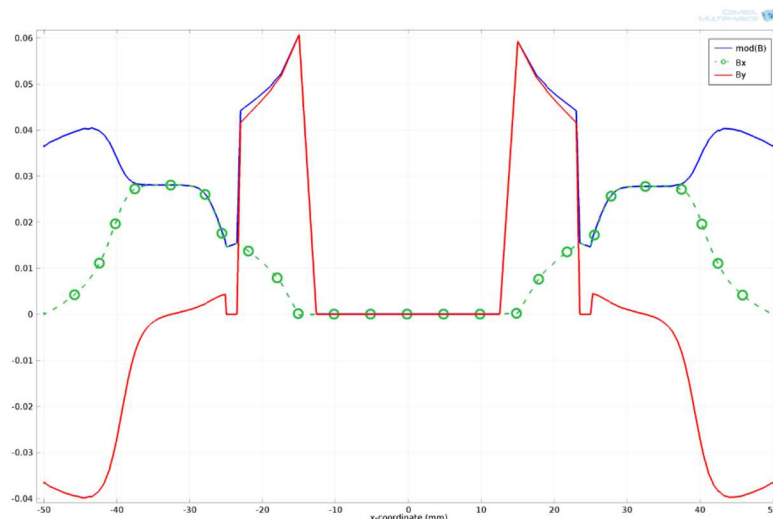
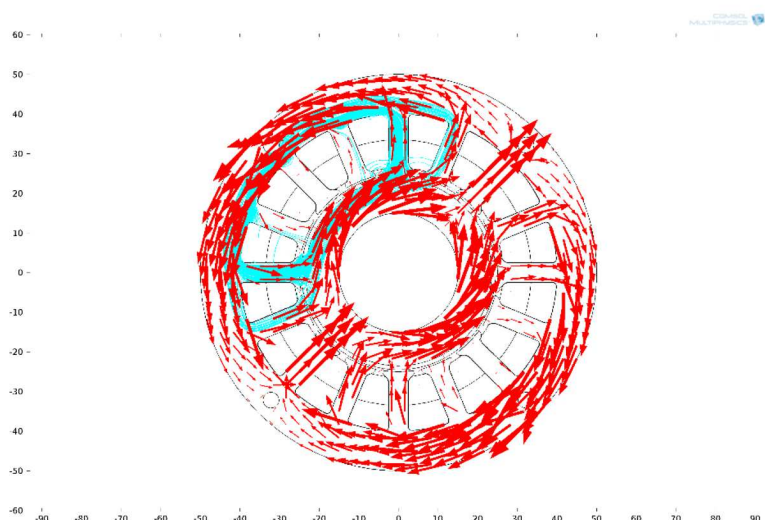


Rys. 10. Rozkład indukcji magnetycznej w statorze w kierunku osi Ox (składowa B_x) przy włączeniu prądu o wartości 1 A w cewkach N_{la}



Rys. 11. Rozkład indukcji magnetycznej w statorze w kierunku osi Ox (składowa B_x) przy włączeniu prądu o wartości 1 A w cewkach N_{lb}

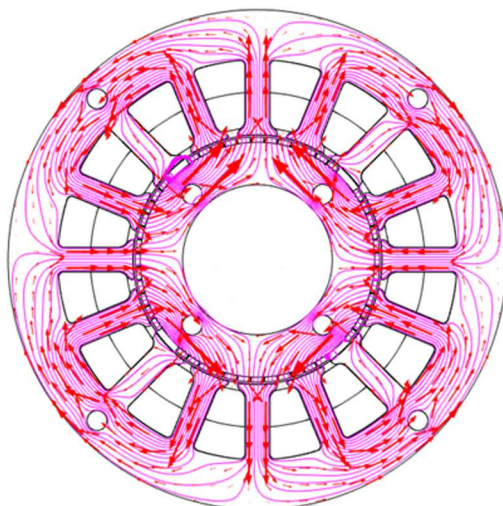
Na rysunku 14 przedstawiony jest rozkład strumienia magnetycznego w silniku bezłożyskowym z magnesami trwałymi. W silniku bezłożyskowym magnesy rozmieszczone są na wirniku. Strumienie magnetyczne generowane przez magnesy w szczelinie 1 i 3 wpływają do wirnika, natomiast strumień generowany przez magnesy w szczelinie 2 i 4 wypływa z wirnika. Wirnik zajmuje centralne położenie, tzn. wszystkie szczeliny powietrzne są równe. Dla położenia nominalnego strumień magnetyczny od magnesów pokrywa się ze strumieniem generowanym przez uzwojenia silnikowe fazy N_{ma} . Takie rozmieszczenie występuje tylko dla położenia zerowego wir-

Rys. 12. Rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż osi Ox 

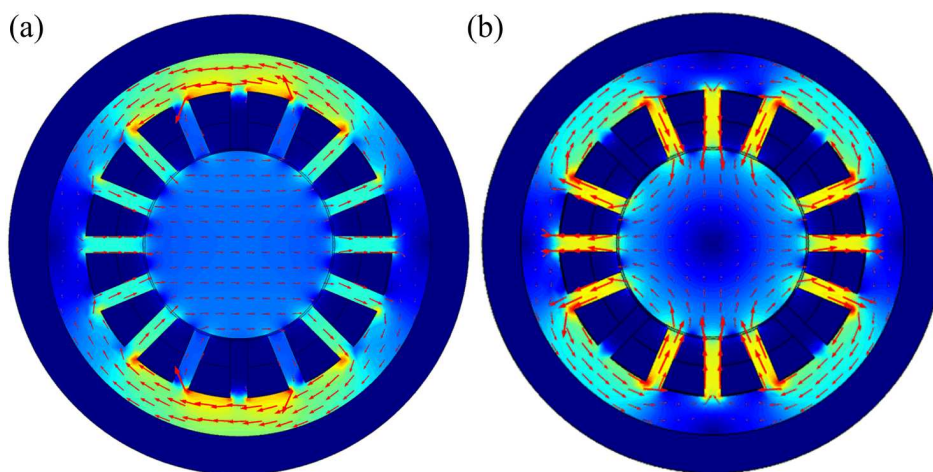
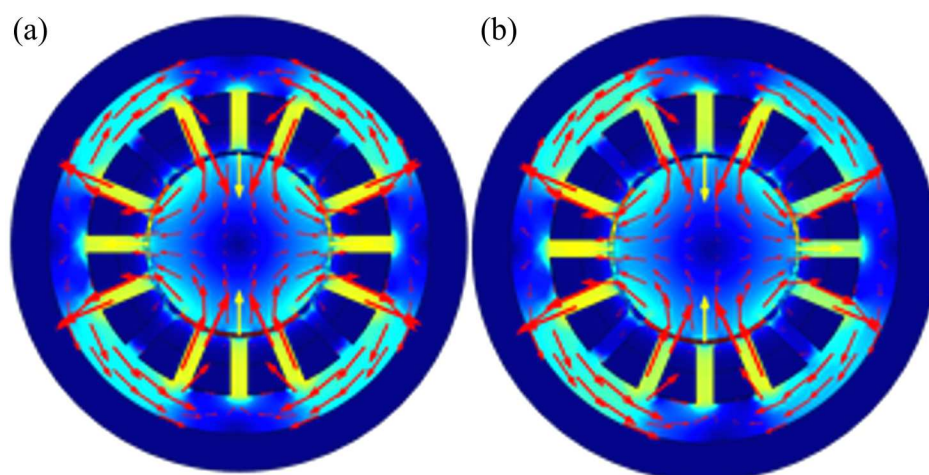
Rys. 13. Przepływ pola magnetycznego przez ząb nr 1 z zaznaczonym kierunkiem indukcji magnetycznej

nika. Ruchomy układ współrzędnych związany z wirnikiem pokrywa się z układem nieruchomym związanym ze statorem. W układzie z wirnikiem obracającym się z prędkością kątową ω stałe są tylko składowe strumienia w układzie związanym z wirnikiem. Sterowanie w takim układzie odbywa się tylko w układzie związanym ze statorem, jednak zmiana położenia kąowego wirnika prowadzi do zmiany strumienia magnetycznego [1].

Na rysunku 15 przedstawiony jest rozkład indukcji magnetycznej, której źródłem są uzwojenia odpowiadające za lewitację N_{sa} oraz uzwojenia silnikowe N_{ma} . Korzystając z przeprowadzonej analizy, oszacowano miejsca karbów magnetycznych oraz zakresy dopuszczalnych wartości indukcji magnetycznej. W następnym etapie przeprowadzono badania rozkładu pola magnetycznego w funkcji szczeliny powietrznej dla różnych wartości prądów sterujących. Badania przeprowadzono dla prądu sterującego lewitacją wirnika o wartości 0 A (rys. 16a) i 5 A (rys. 16b). Dla pierwszego przypadku źródłem strumienia magnetycznego są tylko magnesy. W następnym przypadku dodatkowo zmieniono siłę wypadkową przez wygenerowanie dodatkowej składowej prądu o wartości 5 A.



Rys. 14. Strumień magnetyczny generowany przez magnesy trwałe

Rys. 15. Pole generowane przez uzwojenia zawieszenia magnetycznego: (a) uzwojenie N_{sa} ,
(b) uzwojenie N_{ma} Rys. 16. Moduł indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej dla $x = 0$ mm: (a) prąd $i_{sa} = 0$ A,
(b) prąd $i_{sa} = 5$ A

4. Podsumowanie

Współczesne statki powietrzne projektowane są zgodnie z koncepcją „more electric aircraft”, która zakłada większe wykorzystanie energii elektrycznej w systemach pokładowych. Przedstawiony w artykule bezłożyskowy silnik elektryczny opracowany w Instytucie Techniki Lotniczej Wojskowej Akademii Technicznej odznacza się szerokim pasmem przenoszenia, dobrymi właściwościami diagnostycznymi, wysoką niezawodnością. Sterowanie w takim silniku można podzielić funkcjonalnie na sterowanie lewitacją magnetyczną wirnika silnika oraz sterowanie zakresem pracy silnikowej. W takim układzie sterowania jako sygnał synchronizujący podawany jest sygnał pochodzący z czujnika fazy, który odpowiedzialny jest za synchronizację prądów płynących w tych dwóch rodzajach uzwojeń. Kierunek strumienia sprzężonego jest określany poprzez sygnał z czujnika fazy. Amplituda i zwrot strumienia sprzężonego są niezależnie wytwarzane. Amplituda prądu i jego faza są odpowiednio modulowane w ten sposób, że strumień sprzężony w szczelinie powietrznej odpowiada sygnałom wypracowywanym przez blok modulacji.

Jednym z możliwych kierunków rozwoju maszyn elektrycznych jest eliminacja elementów ograniczających szybkość działania takich układów, jak również poprawy warunków ich pracy oraz eksploatacji (eliminacja sił tarcia, chłodzenie, uproszczenie konstrukcji, itp.), poprawy szybkości działania poprzez rozszerzenie jego pasma przenoszenia. Dodatkowo przedstawione rozwiązanie eliminuje lub ogranicza wpływ elementów nieliniowych, takich jak strefa nieczułości, histereza.

Podsumowując, zastosowanie technologii zawiesznień magnetycznych w maszynach elektrycznych oraz napędach lotniczych może w znaczącym zakresie poprawić parametry techniczne takich rozwiązań, a jednocześnie przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji lotniczych.

Bibliografia

1. CHIBA A., FUKAO T., ICHIKAWA O., OSHIMA M., TAKEMOTO M., DORRELL D., *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*, Elsevier's Science Technology Rights Department in Oxford, UK, 2005
2. HENZEL M., *Mathematical Analysis and Investigation Results of the Bearingless Electric Motor with Permanent Magnets*, Solid State Phenomena, vol. Mechatronic Systems and Materials IV, ISBN-13: 978-3-03785-637-6, p. 354, 2013
3. HENZEL M., FALKOWSKI K., ŻOKOWSKI M., The analysis of the control system for the bearingless induction electric motor, *Journal of Vibroengineering*, **14**, 1, 1392-8716, 2012
4. MOIR I., SEABRIDGE A., *Aircraft Systems – Mechanical, Electrical and Avionics Subsystem Integration*, John Wiley & Sons, p. 227-238, 2008

Concept of bearingless electric machines for jet engines

Nowadays, new aviation technologies are developed to improve effectiveness, reliability and operating sensibility of an aircraft and its onboard systems. The paper concerns the construction of the aircraft, avionic systems and engines. New designs eliminate disadvantages of conventional systems, e.g. overall efficiency, friction forces, heat emission, and improve static and dynamic parameters, service properties and reliability.

The paper presents a new technology regarding magnetic levitation such as active magnetic bearings (AMB) and bearingless devices. Theoretical and simulation features of heteropolar radial active magnetic bearings and bearingless devices in new electric aircraft engines are discussed.