

# Model matematyczny i symulacyjny bezłożyskowego silnika z magnesami trwałymi

Krzysztof Falkowski, Maciej Henzel, Paulina Mazurek

Wojskowa Akademia Techniczna

**Streszczenie:** Wyposażenie pokładowe współczesnych statków powietrznych konstruowane jest w technologii „More Electric Aircraft”. Technologia ta zakłada stosowanie większej liczby systemów wykorzystujących układy elektryczne, w celu redukcji masy instalacji pokładowych oraz zwiększenia podatności obsługowej i niezawodności. W odpowiedzi na te tendencje opracowano w Zakładzie Awioniki i Uzbrojenia Lotniczego Wojskowej Akademii Technicznej lotniczy układ wykonawczy z bezłożyskowym silnikiem elektrycznym z magnesami trwałymi. W artykule przedstawiony zostanie model matematyczny silnika i wyniki badań symulacyjnych metodą elementów skończonych.

**Słowa kluczowe:** silnik elektryczny, aktywne zawieszenie magnetyczne, more electric aircraft

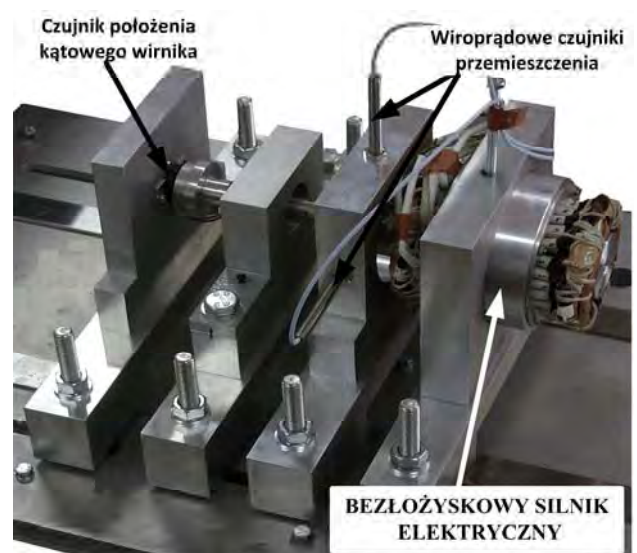
## 1. Wprowadzenie

Obecnie, w dziedzinie lotniczych napędów elektrycznych obserwuje się dynamiczny rozwój, który jest wynikiem pojawienia się nowych technologii i materiałów. Zmiany te są również związane z realizacją koncepcji „More Electric Aircraft” (MEA), która zakłada wykorzystanie w systemach pokładowych większej liczby urządzeń elektrycznych. Koncepcja ta zaowocowała opracowaniem zupełnie nowych urządzeń i systemów wyposażenia pokładowego. Pierwsze wzmianki na ten temat pojawiły się w latach 70. XX wieku pod nazwą „All-Electric Aircraft” (AEA) [1]. Koncepcja ta zakładała zastąpienie wszystkich systemów pokładowych statku powietrznego układami elektrycznymi. Rozważano w niej m.in. możliwości zastąpienia silników odrzutowych silnikami elektrycznymi, rozszerzenie funkcji prądnicorozrusznika do obsługi aktywnych łożysk magnetycznych. Koncepcja ta oferowała ogromne możliwości w zakresie rekonfiguracji silnika i płatowca oraz poprawienie warunków ich użytkowania wynikających ze zmniejszenia masy, rosnącej niezawodności urządzeń, łatwiejszej konserwacji, zmniejszenia kosztów użytkowania, a przez to i wzrostu bezpieczeństwa lotu. Jednak tak daleko idące zmiany w zakresie wyposażenia trudno było wówczas zrealizować. W związku z tym założono, że tylko część systemów będzie korzystała z energii elektrycznej, a zmodyfikowaną koncepcję nazywano „More Electric Aircraft”.

W artykule przedstawiona zostanie konstrukcja, wyniki analizy matematycznej oraz badania symulacyjne metodą elementów skończonych (MES) bezłożyskowego silnika elektrycznego z magnesami trwałymi.

Silnikiem bezłożyskowym określamy maszynę elektryczną, w której pole magnetyczne wytwarza oprócz momentu obrotowego siłę lewitacji magnetycznej. W silniku takim klasyczne łożyska kulkowe zastąpione zostały aktywnym zawieszeniem magnetycznym. Tym samym, wyeliminowane zostały siły tarcia między wirnikiem, a statorem silnika. Dzięki temu usunięto negatywne cechy eksploatacyjne takiego układu, tj. nagrzewanie i zużywanie się elementów trących, smarowanie, wydzielanie ciepła i hałasu. Dodatkowo, ze względu na zbieżność konstrukcji silników elektrycznych z łożyskami magnetycznymi w proponowanym rozwiązaniu połączono cechy obu układów, otrzymując bezłożyskowy silnik elektryczny. Jedynym ograniczeniem, które może w takim układzie wystąpić, jest wysoka temperatura, która ma wpływ na właściwości magnetyczne materiałów. Obecnie dostępne są materiały magnetyczne, które zachowują swoje właściwości do temperatury około 400 °C.

Na rys. 1 przedstawiono stanowisko laboratoryjne z silnikiem bezłożyskowym. Składa się on z płyty montażowej, czujników pomiarowych oraz bezłożyskowego silnika elektrycznego. W przedstawionym rozwiązaniu zastosowano konstrukcję modułową, która ułatwia wykonywanie badań silnika. Do pomiaru parametrów ruchu wirnika wykorzystano wiroprowadowe czujniki położenia oraz czujnik położenia kąowego.

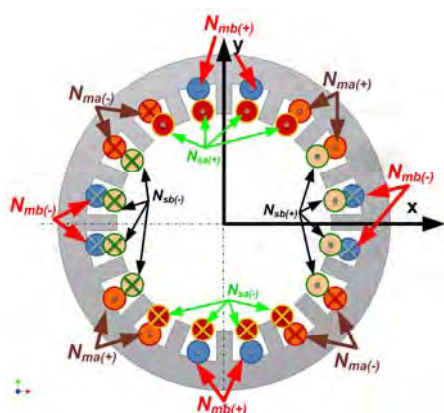


**Rys. 1.** Stanowisko do badania silnika bezłożyskowego z magnesami trwałymi

**Fig. 1.** The lab-stand of the bearingless motor with permanent magnets

Zasadniczym elementem stanowiska jest bezłożyskowy silnik elektryczny z magnesami trwałymi, który składa się ze statora (rys. 2) oraz wirnika (rys. 3).

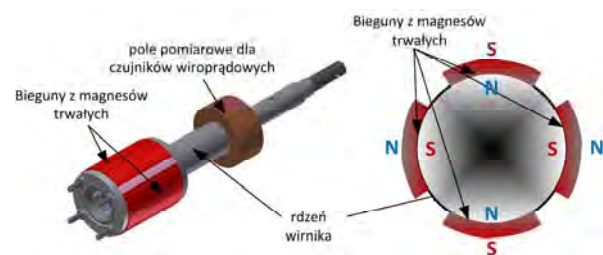
Na rys. 2 przedstawiono widok statora silnika dwufazowego, w którego konstrukcji można wyróżnić dwie grupy uzwojeń. Pierwsza grupa to uzwojenia odpowiedzialne za uzyskanie lewitacji wirnika, które oznaczono  $N_{sa}$  i  $N_{sb}$ . Drugą grupę uzwojeń stanowią uzwojenia silnikowe ( $N_{ma}$  i  $N_{mb}$ ), których zadaniem jest wywołanie ruchu obrotowego wirnika (momentu obrotowego).



**Rys. 2.** Stator silnika bezłożyskowego z zaznaczonymi uzwojeniami roboczymi

**Fig. 2.** The stator of the bearingless motor with the windings

Natomiast na rys. 3 przedstawiono widok wirnika silnika, który składa się z czterech biegunów z magnesami trwałymi oraz bieżni pomiarowej czujników wiroprowadowych. Magnesy trwałe rozmieszczone są na obwodzie wirnika w taki sposób, aby uzyskać odpowiedni rozkład biegunów na jego powierzchni, co zapewnia uzyskanie dwóch par biegunów.



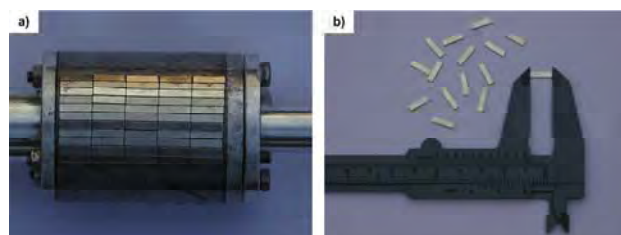
**Rys. 3.** Konstrukcja wirnika silnika na magnesach trwałych [3]

**Fig. 3.** The construction of the rotor with permanent magnets [3]

Magnesy trwałe wytwarzają pole magnetyczne, w wyniku którego powstaje siła przyciągania między wirnikiem, a státorem silnika. Jeżeli wirnik silnika znajduje się w położeniu centralnym to szczeliny 1 i 3 (rys. 5) są równe. W szczelinach powietrznych Strumienie magnetyczne generowane przez magnesy są równe co do wartości, ale o przeciwnych znakach (rys. 9b). Generowane siły magnetyczne mają dokładnie tę samą wartość (rys. 9a). Natomiast, jeżeli wirnik nie będzie znajdował się w położeniu centralnym wówczas siły wypadkowe działające na niego będą różne od zera.

Układ sterowania zmieniając wartość prądu w uzwojeniu  $N_{sa}$  powoduje zwiększenie strumienia w jednej szczelinie, a zmniejszanie w drugiej. Tym samym każdy z nabiegunków generuje inną wartość siły i przez to siła wypadkowa jest różna od zera.

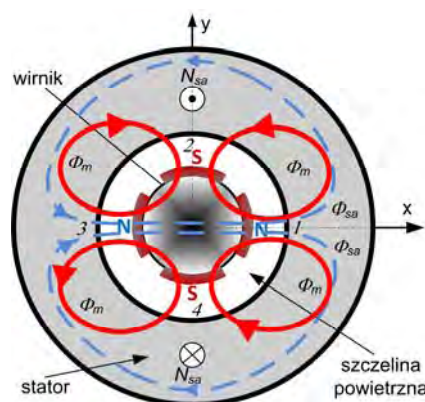
Na rys. 4 przedstawiono widok magnesów trwałych naklejonych na powierzchni wirnika oraz pojedynczych magnesów. Pojedynczy biegun wirnika składa się z 65 sztuk magnesów neodymowych o wymiarach  $10 \times 2,5 \times 1$  mm z kierunkiem magnesowania wzdłuż wymiaru 1.



**Rys. 4.** Pojedynczy biegun wirnika (a) i magnesy trwałe (b)

**Fig. 4.** The magnetic pole on the rotor surface (a) and the permanent magnets (b)

W analizowanym silniku bezłożyskowym wektor siły przyciągania między wirnikiem, a státorem generowany jest przez dany biegun. Zjawisko to może mieć zarówno pozytywny, jak i negatywny skutek. Jeżeli wirnik przemieści z położenia środkowego, wówczas powstaje niezrównoważenie sił promieniowych, a wypadkowa siła magnetyczna będzie różna od zera. Wektor siły będzie wirował razem z wirnikiem. W klasycznym silniku siła ta jest źródłem drgań i hałasu oraz powoduje uszkodzenia łożysk. Dlatego wykorzystanie lewitacji magnetycznej znacząco poprawi niezawodność silnika.



**Rys. 5.** Zasada generowania siły magnetycznej w bezłożyskowym silniku elektrycznym [3]

**Fig. 5.** The rule of the generation of the magnetic force in the bearingless motor [3]

Na rys. 5 przedstawiono rozplyw strumieni magnetycznych w bezłożyskowym silniku elektrycznym z magnesami trwałymi. W układzie tym występują strumienie od uzwojeń statora  $\Phi_{sa}$ ,  $\Phi_{ma}$  oraz strumień od magnesów trwałych  $\Phi_m$ . Położenie katowe wirnika  $\alpha$  wynosi  $0^\circ$ . Strumienie magnetyczne w szczelinie powietrznej w osi x w punkcie „3” odejmują się, natomiast w punkcie „1” – dodają. Tym samym wartość siły magnetycznej, która jest

proporcjonalna do wartości strumieni w tych miejscach szczeliny odpowiednio się zwiększa lub zmniejsza. Tak więc, dokonując pomiaru położenia wirnika względem nabiegunków silnika można tak zmieniać wartość prądu w cewce  $N_{2a}$ , w taki sposób, aby wirnik zawsze zajmował stałe położenie. Strumień od magnesów trwałych  $\Phi_m$  wiruje synchronicznie z wirnikiem, natomiast strumień  $\Phi_s$  wiruje dwa razy szybciej niż wirnik. Ruch ten nie jest synchroniczny z obrotem wirnika.

## 2. Model matematyczny silnika

Ze względu na połączenie funkcji zawieszenia magnetycznego i silnika elektrycznego w jednym urządzeniu, silnik bezłożyskowy można rozpatrywać jako podporę lub napęd elektryczny. Ruch wirnika w płaszczyźnie silnika opisany jest przez równanie równowagi sił i momentów:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= F_{ex} + G_x \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} &= F_{ey} + G_y \\ J \frac{d\omega_z}{dt} &= M_z - M_0 \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie:

- $x, y$  – przemieszczenie wirnika w kierunku osi  $Ox$  i  $Oy$ ;
- $\omega$  – prędkość kątowa wirnika;
- $F_{ex}, F_{ey}$ , –siła elektromagnetyczna działająca w kierunku osi  $Ox$  i  $Oy$ ;
- $M_z$  – moment siły elektromagnetycznej;
- $m$  – masa wirnika;
- $J$  – moment bezwładności działający w kierunku osi  $Oz$ ;
- $G_x, G_y$  – siła zewnętrzna działająca na wirnik odpowiednio w kierunku osi  $Ox$  i  $Oy$ ;
- $M_0$  –moment obciążający silnik elektryczny.

Siły wytrącające wirnik z położenia nominalnego obejmują składowe deterministyczne (radialne siły obciążające wirnik, siły grawitacji itp.) oraz składowe stochastyczne sił zewnętrznych przyłożonych do wirnika w płaszczyźnie silnika elektrycznego.

Wartość siły magnetycznej zostanie wyznaczona jako pochodna energii magnetycznej  $E$  względem wielkości przemieszczenia wirnika wzdłuż osi  $Ox$  i  $Oy$ :

$$\begin{aligned} F_{ex} &= \frac{\partial E}{\partial x} \\ F_{ey} &= \frac{\partial E}{\partial y} \end{aligned} \tag{2}$$

Natomiast moment siły elektromagnetycznej  $M_z$  jest równy pochodnej mocy  $P$  względem prędkości kątowej wirnika  $\omega$ :

$$M_z = \frac{\partial P}{\partial \omega_z} \tag{3}$$

Energia magnetyczna  $E$  oraz moc obwodu magnetycznego  $P$  opisane są równaniami (4).

$$E = i^T L i$$

$$P = u \cdot i \tag{4}$$

gdzie:  $i$  – wektor prądu ( $1 \times 4$ ),  
 $L$  – macierz indukcyjności ( $4 \times 4$ ).

Uwzględniając zależności prądu  $i$  oraz indukcyjności własnej  $L$  i wzajemnej  $M$  uzwojeń dla dwufazowego silnika bezłożyskowego równania (4) opisane są następującymi zależnościami [2]:

$$E = i^T \begin{bmatrix} L_{ma} & M_{mamb} & M_{masa} & M_{masb} \\ M_{mamab} & L_{mb} & M_{mbsa} & M_{mbsb} \\ M_{masa} & M_{mbma} & L_{sa} & M_{sasb} \\ M_{masb} & M_{mbsb} & M_{sasb} & L_{sb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{4a} \\ i_{4b} \\ i_{2a} \\ i_{2b} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$P = \begin{bmatrix} u_{ma} & u_{mb} & u_{sa} & u_{sb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix}$$

Uzwojenia cewek statora silnika dwufazowego przedstawione zostały na rys. 2. Napięcie prądu elektrycznego przyłożone do cewek silnika  $N_{sa}, N_{sb}, N_{ma}$  i  $N_{mb}$  jest sumą spadków napięcia na impedancji cewki oraz siły elektromotorycznej związanej z ruchem wirnika w polu magnetycznym oraz zmianą wartości i kierunku w uzwojeniach cewki silnika. Uwzględniając zależności na impedancję cewek napięcie to opisuje zależność (6).

$$u_r = R \cdot i + j\omega\psi \tag{6}$$

Ponieważ iloczyn indukcyjności  $L$  oraz prądu  $i$  określa wartość generowanego strumienia magnetycznego  $\psi$  skojarzonego przez cewkę o  $N$  zwojach, wartość spadku napięcia na impedancji cewek silnika elektrycznego wynosi:

$$u_r = \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \tag{7}$$

Oprócz spadku napięcia na impedancji cewki, generowana jest siła elektromotoryczna wywołana ruchem w polu magnetycznym. Wirnik lewitujący magnetycznie wykonuje ruch obrotowy wokół osi  $Oz$  oraz postępowy w kierunku osi  $Ox$  i  $Oy$ . Siła elektromotoryczna  $u_{ind}$  indukowana w cewkach silnika elektrycznego jest równa:

$$u_{ind} = -\frac{d\psi}{dt} = -\left(\frac{dL}{dt} i + L \frac{di}{dt}\right) \tag{8}$$

natomiast strumień magnetyczny  $\psi$  jest równy:

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_{ma} \\ \psi_{mb} \\ \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ma} & M_{mamb} & M_{masa} & M_{masb} \\ M_{mamab} & L_{mb} & M_{mbsa} & M_{mbsb} \\ M_{masa} & M_{mbma} & L_{sa} & M_{sasb} \\ M_{masb} & M_{mbsb} & M_{sasb} & L_{sb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \tag{9}$$

Uwzględniając macierz indukcyjności w wyrażeniu na siłę elektromotoryczną  $u_{ind}$  oraz fakt, że w macierzy indukcyjności występują wyrażenia określające przemieszczenia  $x$  i  $y$  w kierunku osi  $Ox$  i  $Oy$ . Ze względu na to, że wirnik silnika bezłożyskowego zmienia swoje położenie, to wyrażenia macierzy indukcyjności nie są stałe. Dlatego iloczyn pochodnej po czasie macierzy indukcyjności  $L$  i wektora prądu opisany jest równaniem:

$$\frac{dL}{dt} i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & M \frac{dx}{dt} & -M \frac{dy}{dt} \\ 0 & 0 & M \frac{dy}{dt} & M \frac{dx}{dt} \\ M \frac{dx}{dt} & M \frac{dy}{dt} & 0 & 0 \\ -M \frac{dy}{dt} & M \frac{dx}{dt} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad (10)$$

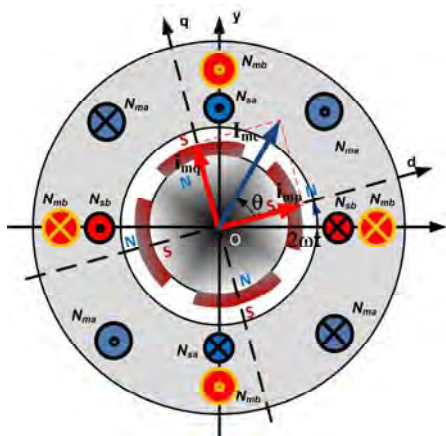
gdzie:  $M$  – stała indukcyjna.

Dokonyując przekształceń i podstawień równań (6)–(10) uzyskujemy ostateczną postać równania opisującego napięcie prądu elektrycznego dla poszczególnych cewek silnika bezłożyskowego:

$$u = \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} +$$

$$-M \begin{bmatrix} i_{sa} & -i_{sb} \\ i_{sb} & i_{sa} \\ i_{ma} & i_{mb} \\ i_{mb} & -i_{ma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} + \quad (11)$$

$$- \begin{bmatrix} L_{ma} & 0 & Mx & -My \\ 0 & L_{mb} & My & Mx \\ Mx & My & L_{sa} & 0 \\ -My & Mx & 0 & L_{sb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{ma}}{dt} \\ \frac{di_{mb}}{dt} \\ \frac{di_{sa}}{dt} \\ \frac{di_{sb}}{dt} \end{bmatrix}$$



**Rys. 6.** Wzajemne położenie układów współrzędnych w silniku bezłożyskowym [3]

**Fig. 6.** The reciprocal position of the sets of co-ordinates in the bearing less engine [3]

W silniku bezłożyskowym występują dwa układy współrzędnych: układ nieruchomy związany ze statorem silnika  $Oxy$  oraz ruchomy związany z wirnikiem silnika  $Oqd$ . Do dalszej analizy przyjęto, że ruch wirnika w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara oznacza dodatnią wartość przemieszczenia kąтового. Wzajemne położenie układów współrzędnych oraz uzwojenia silnika przedstawiono na rys.6.

Prądy przepływające przez uzwojenia silnikowe  $N_{ma}$  i  $N_{mb}$ , wytwarzające siłę magnetyczną, opisane są równaniami (12), gdzie  $\omega$  oznacza mechaniczną prędkość kątową,  $\theta/2$  oznacza kąt obrotu w ruchomym układzie współrzędnych, a  $I_{me}$  amplitudę prądu wypadkowego powstałego w uzwojeniach silnika [2].

$$\begin{aligned} i_{mae} &= I_{me} \cos 2(\omega t + \theta / 2) \\ i_{mbe} &= I_{me} \sin 2(\omega t + \theta / 2) \end{aligned} \quad (12)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} I_{me} &= \sqrt{I_{mp}^2 + I_{mq}^2} \\ \theta &= \tan^{-1} \left( \frac{I_{mq}}{I_{mp}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Natomiast przepływający przez uzwojenia stator  $N_{sa}$  i  $N_{sb}$  prąd oznaczono odpowiednio  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ , odpowiednio.

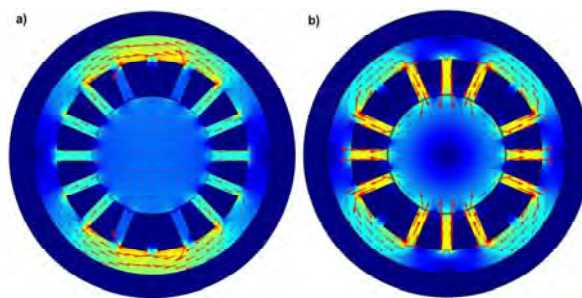
Uwzględniając zależności (12) i (13) model silnika opisany równaniem (1) w postaci macierzowej przyjmie następującą postać:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{ma} \\ i_{mb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ -M_o \end{bmatrix} \quad (14)$$

gdzie:

$$A = \begin{bmatrix} MI_{me} \cos(2\omega t + \theta) & MI_{me} \sin(2\omega t + \theta) & 0 & 0 \\ MI_{me} \sin(2\omega t + \theta) & -MI_{me} \cos(2\omega t + \theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\psi_m \sin(2\omega t) & \psi_m \cos(2\omega t) \end{bmatrix}$$

### 3. Wyniki symulacji



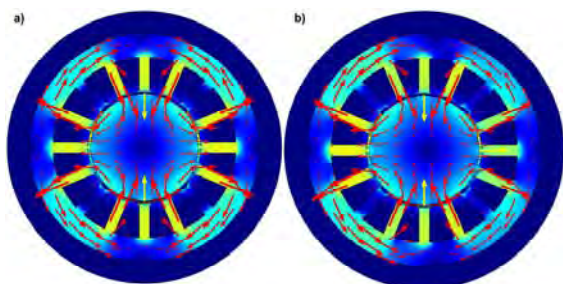
**Rys. 7.** Pole generowane przez uzwojenia zawieszenia magnetycznego: a) uzwojenie  $N_{sa}$ , b) uzwojenie  $N_{ma}$

**Fig. 7.** The field generated by wings of the active magnetic bearing: a) the winding  $N_{sa}$ , b) the winding  $N_{ma}$

W ramach badań symulacyjnych wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej w obwodzie magnetycznym silnika. Analizę przeprowadzono oddzielnie dla każdej grupy cewek. Na rys. 7 przedstawiony jest rozkład indukcji magne-

tycznej, 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.

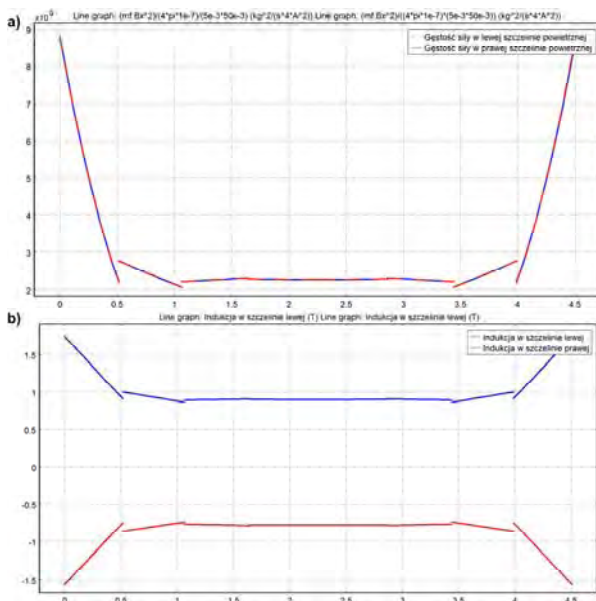
W następnym etapie przeprowadzono badania rozkładu pola magnetycznego w funkcji szczeliny powietrznej dla różnych wartości prądów sterujących. Badania przeprowadzono dla prądu sterującego lewitacją wirnika o wartości 0 A (rys. 8a) i 5 A (rys. 8b). Dla pierwszego przypadku źródłem strumienia magnetycznego są tylko magnesy. W następnym przypadku dodatkowo, zmieniono siłę wypadkową przez wygenerowanie dodatkowej składowej prądu o wartości 5 A.



**Rys. 8.** Moduł indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej dla  $x=0$  mm: a) prąd  $i_{sa}=0$  A, b) prąd  $i_{sa}=5$  A

**Fig. 8.** The module of the magnetic induction in the air-gap:  $x=0$  mm: a) the current  $i_{sa}=0$  A, b) the current  $i_{sa}=5$  A.

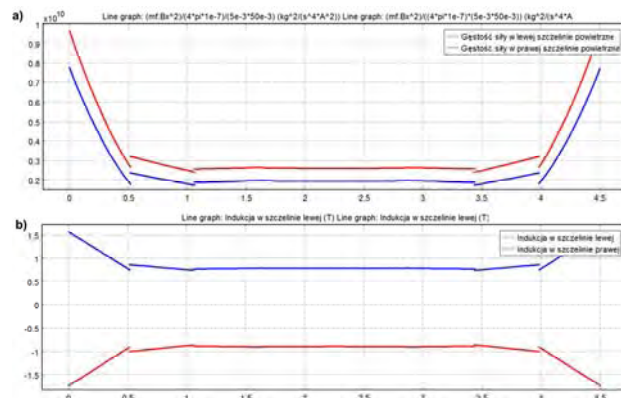
W dalszej części przeprowadzono analizę rozkładu indukcji magnetycznej na przeciwległych nabiegownikach. Dla powierzchni zęba wyznaczono gęstość siły magnetycznej oraz wartość indukcji magnetycznej. Pomiar ten wykonano dla dwu przeciwległych położzeń, podobnie jak we wcześniejszym rozdziale, analizę wykonano w szczelinie 1 i 3 (rys. 5).



**Rys. 9.** Charakterystyka gęstości siły i indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej dla:  $x=0$  mm,  $i_{sa}=0$  A

**Fig. 9.** The characteristic of the density force and the magnetic induction in the air-gap for  $x=0$  mm and  $i_{sa}=0$  A

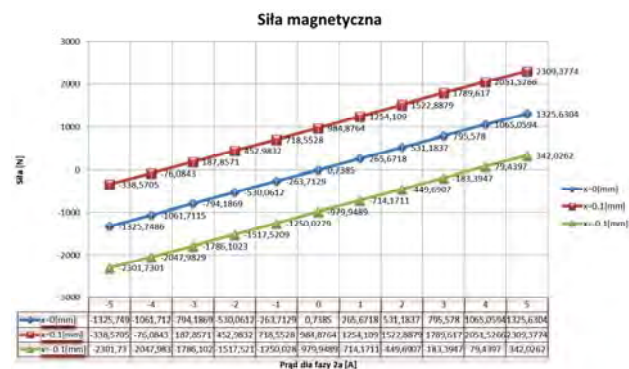
Dla nominalnego położenia wirnika przy zerowym prądzie  $i_{sa}$  składowe indukcji magnetycznej mają tę samą wartość, ale przeciwne zwroty (rys. 9b). Gęstość siły magnetycznej na nabiegownikach posiada tę samą wartość, stąd siła wypadkowa jest równa zero (rys. 9a). Jeżeli w uzwojeniu  $N_{sa}$  popłynie prąd, to kierunek indukcji magnetycznej nie zmienia się, zmianie ulegnie tylko jej wartość (rys. 10b), a tym samym rozkład gęstości siły magnetycznej. Ponieważ jedna siła wzrośnie, a druga zmaleje, to wystąpi siła wypadkowa, która przesuwnie wirnik (rys. 10a).



**Rys. 10.** Charakterystyka gęstości siły i indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej dla  $x=0$  mm i  $i_{sa}=5$  A.

**Fig. 10.** The characteristic of the density force and the magnetic induction in the air-gap for  $x=0$  mm,  $i_{sa}=5$  A.

Wykonując kolejne analizy dla różnych wartości prądu sterującego i dla różnych szczelin powietrznych można wyznaczyć charakterystykę statyczną bezłożyskowego silnika elektrycznego (rys. 11). Z charakterystyki statycznej zostały odczytane dopuszczalne wartości siły nośnej, sztywność prądowa i przemieszczeniowa silnika bezłożyskowego.



**Rys. 11.** Wykres siły magnetycznej

**Fig. 11.** The characteristic of the magnetic force

## 4. Podsumowanie

Prowadzone obecnie w Wojskowej Akademii Technicznej prace badawcze stanowią odpowiedź na tendencje panujące w rozwoju lotniczych napędów elektrycznych.

Nowa konstrukcja silnika elektrycznego ukierunkowana jest na eliminację elementów ograniczających szybkość działania takich układów, jak również poprawę ich parametrów

pracy oraz warunków eksploatacji (eliminacja sił tarcia, chłodzenie, uproszczenie konstrukcji itp.). Poprawę szybkości działania uzyskuje się poprzez rozszerzenie jego pasma przenoszenia. Dodatkowo przedstawione rozwiązania eliminują lub ograniczają wpływ elementów nieliniowych takich, jak strefa nieczułości, histereza.

Oprócz poprawy parametrów technicznych zastosowanie nowych rozwiązań poprawia bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji lotniczych.

### Uwaga

Zawarte w artykule wyniki są efektem realizacji pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2009–2012 jako projekt badawczy własny nr O N509 032736.

### Bibliografia

1. Botten S.L., Whitley CH.R., King A.D.: *Flight control actuation Technology for Next-Generation All-Electric Aircraft*, Technology Review Journal, Millennium Issue, 2000.
2. 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.
3. Henzel M.: *The robust controller for the bearingless electric motor with permanent magnets*, The 7<sup>th</sup> International Conference "Mechatronic Systems and Materials", Kowno, Lithuania, 2011.

### The mathematical and simulation model of the bearingless motor with permanent magnets

**Abstract:** The airborne systems of the newest aircrafts are designed in the more electric aircraft (MEA) technology. This technology make an assumption of the use more electrical elements in onboard systems to reduce weight, easier maintainability and more dependability. The MEA technology is implemented in aircraft control and actuation systems, too. In the Military University of Technology was designed the new construction of the motor with permanent magnets. The paper are presented the mathematical model of the motor and the simulation results.

**Keywords:** electric motor, active magnetic bearing, more electric aircraft

### dr inż. Krzysztof Falkowski

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej. W 1999 r. uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych. W swojej pracy naukowej, zajmuje się problematyką zawiesznień i łożysk magnetycznych oraz bezłożyskowych silników elektrycznych. Jest autorem i współautorem monografii i wielu artykułów poświęconych problematyce technicznego wykorzystania zjawiska lewitacji magnetycznej. Zajmuje się organizacją pracowni zawiesznień magnetycznych w Laboratorium silników lotniczych WAT.

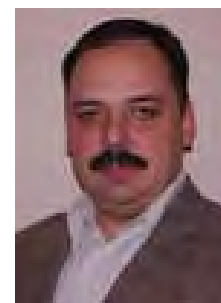
e-mail: [krzysztof.falkowski@wat.edu.pl](mailto:krzysztof.falkowski@wat.edu.pl)



### dr inż. Maciej Henzel

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1997), od 1998 r. pracownik naukowo-dydaktyczny, doktor nauk technicznych (2004) w dyscyplinie: mechanika i specjalności: systemy sterowania. Zajmuje się zagadnieniami teorii sterowania oraz lotniczych systemów sterowania, układów wykonawczych oraz systemów pomiarowych.

e-mail: [Maciej.Henzel@wat.edu.pl](mailto:Maciej.Henzel@wat.edu.pl)



### mgr inż. Paulina Mazurek

Absolwentka WAT (2011) specjalności awionika, obecnie asystent naukowo-dydaktyczny. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z nowymi metodami sterowania oraz problematyką lotniczych układów wykonawczych.

e-mail: [Paulina.Mazurek@wat.edu.pl](mailto:Paulina.Mazurek@wat.edu.pl)

