

NOWA KONCEPCJA NAPĘDU ROZRUCHOWEGO TURBINOWYCH SILNIKÓW ODRZUTOWYCH

ZDZISŁAW GOSIEWSKI

Instytut Lotnictwa

KRZYSZTOF FALKOWSKI, MACIEJ HENZEL, PAULINA MAZUREK

Wojskowa Akademia Techniczna

MARIUSZ ŻOKOWSKI

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

Streszczenie

Systemy pokładowe najnowszych statków powietrznych, takich jak: Boeing 787, Airbus A380, projektowane są według koncepcji „more electric aircraft” (MEA), która zakłada coraz większe wykorzystanie układów elektrycznych. Koncepcja ta zaowocowała opracowaniem systemów pokładowych o nowej strukturze, która zapewnia poprawienie warunków użytkowania systemów wynikających ze zmniejszenia masy, rosnącej niezawodności urządzeń, a przez to zmniejszenia kosztów użytkowania i wzrostu bezpieczeństwa latania.

W artykule przedstawiono koncepcję napędu rozruchowego dla silnika odrzutowego dużego ciągu. Przedstawiono tutaj strukturę i zasadę działania takiego napędu, jego zalety i wady w porównaniu do układów klasycznych oraz wskazano kierunki dalszych badań.

Słowa kluczowe: napęd rozruchowy, samołożyskujący się silnik elektryczny, turbinowy silnik odrzutowy

WSTĘP

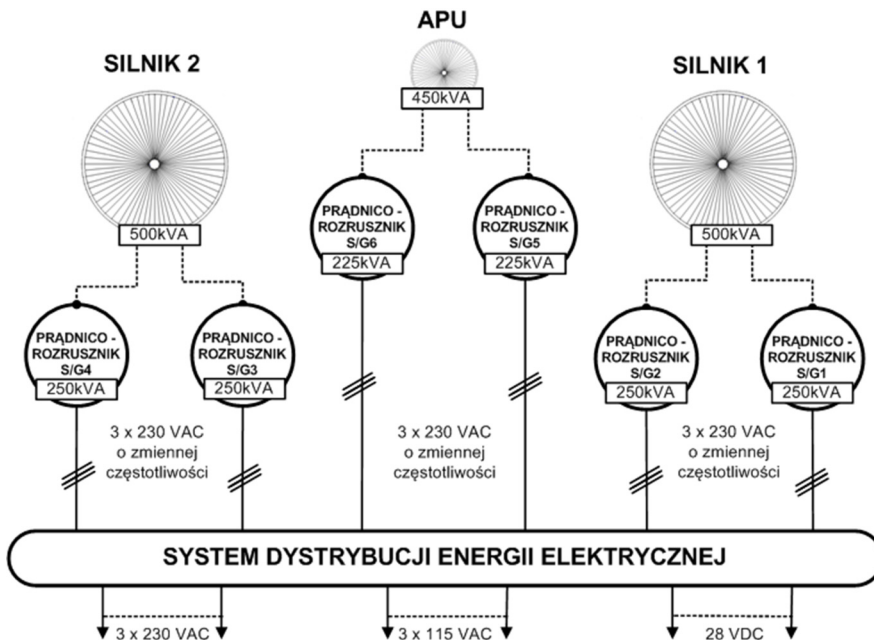
W dziedzinie lotniczych układów elektrycznych w ostatnim czasie nastąpił dynamiczny rozwój, który jest wynikiem pojawienia się nowych technologii i materiałów. Koncepcja zwiększenia liczby systemów i urządzeń elektrycznych nie jest nową koncepcją. Pierwsze wzmianki na ten temat pojawiły się w latach 70-tych XX wieku. Koncepcję tą nazwano „All-Electric Aircraft” i zakładała ona zastąpienie wszystkich systemów pokładowych statku powietrznego układami elektrycznymi. Rozważano w niej możliwości zastąpienia silników turbinowych silnikami elektrycznymi, które napędzałyby cały osprzęt elektryczny począwszy od sieci dystrybucji, a skończywszy na prądnico - rozruszniku osadzonym w kadłubie silnika. Rozszerzenie funkcji prądnico-rozrusznika do obsługi aktywnych łożysk magnetycznych mogłoby doprowadzić do usunięcia z pokładu samolotu instalacji olejowej. Koncepcja ta oferowała ogromne możliwości

rekonfiguracji silnika i płatowca oraz poprawienie warunków użytkowania wynikających ze zmniejszenia masy, rosnącej niezawodności urządzeń, łatwiejszej konserwacji, a przez to zmniejszenia kosztów użytkowania i wzrostu bezpieczeństwa latania.

Jednak tak daleko idące zmiany w zakresie wyposażenia trudno było wówczas zrealizować. Dlatego koncepcja ta przerodziła się w koncepcję „More Electric Aircraft”, która zakładała, że statek powietrzny będzie wyposażony nie tylko w elementy elektryczne. Zmiana koncepcji miała zmniejszyć ryzyko uszkodzenia instalacji pokładowych. Koncepcja ta zaowocowała opracowaniem zupełnie nowych urządzeń i systemów zasilania pokładowego, systemów klimatyzacji, systemu hydraulicznego, elektrycznego silnika (Trent 500). W dziedzinie układów wykonawczych i systemów sterowania zaowocowała m.in. opracowaniem systemów fly-by-wire (FBW) i power-by-wire (PBW).

Technologia FBW obejmuje projektowanie, rozwijanie oraz realizację rozwiązań elektroenergetycznych w systemach sterowania lotem. Zapewnia ona odpowiednią funkcjonalność urządzeń wykonawczych używanych w rozproszonej i scentralizowanej architekturze. Rozdzielony system sterowania zmniejsza ilość operacji przetwarzania danych w komputerach zarządzania lotem i oferuje większą elastyczność podczas rozwijania ich struktury. Technologia ta redukuje również masę systemów poprzez ograniczenie rozmiaru i ilości wykorzystywanych elementów.

Natomiast technologia PBW obejmuje nowatorskie podejścia do projektowania i rozwiązania elektrycznego zasilania urządzeń wykonawczych przy użyciu funkcjonalnej płaszczyzny sterowania lotem. Obejmuje ona eksploatację i adaptację technologii elektrycznych napędów silników, w taki sposób, aby charakteryzowały się one odpowiednią wydajnością, niezawodnością oraz zapewniały bezpieczeństwo lotu i ochronę środowiska. Obecnie, wykorzystanie tej technologii jest opóźnione w stosunku do technologii FBW, a wydajne silniki elektryczne, napędy dużych mocy są jedynie wykorzystywane podczas lotów testowych.



Rys.1. Schemat systemu elektroenergetycznego samolotu Boeing 787

Jednak główne zmiany dotyczą urządzeń i układów zasilania. Na rys.1 przedstawiono schemat systemu elektroenergetycznego samolotu Boeing 787, którego główną cechą jest zastosowanie trójfazowego źródła prądu przemiennego o wartości napięcia 230V. Zastosowanie podwyższonego napięcia fazowego do wartości 230V oraz międzyfazowego do 400V znacząco poprawiło sprawność systemu elektroenergetycznego, ponieważ obniżono przez to straty przesyłu energii oraz zredukowano masę okablowania instalacji elektrycznej.

W systemie tym zastosowano również dwa prądnico-rozruszniki o mocy 250 kVA, stanowiących źródło 500 kVA przypadających na jeden silnik. W tym celu wykorzystano generatory o zmiennej częstotliwości VF (ang. Variable Frequency), które zastąpiły dotychczas wykorzystywane generatory o stałej częstotliwości CF (ang. Constant Frequency). Każdy główny generator zasilają własną magistralę 230 VAC. W układzie istnieje również możliwość przetworzenia napięcia przemiennego 230V na wartość 115V lub 28V prądu stałego.

Jednym z głównych zadań systemu elektroenergetycznego statku powietrznego jest umożliwienie przeprowadzenia procesu rozruchu jego silnika napędowego. W tym celu wykorzystuje się układ pomocniczego zespołu elektroenergetycznego APU (ang. Auxiliary Processing Unit). Na pokładzie samolotu Boeing 787 urządzenie to współpracuje z dwoma prądnico-rozrusznikami, które po uruchomieniu zespołu APU pracują jako normalne generatory.

Proponowana zmiana koncepcji elektrycznego układu rozruchowego polega na zastosowaniu w tym układzie samołożyskującego się silnika elektrycznego. Silnik taki łączy w sobie cechy klasycznego silnika elektrycznego oraz cechy aktywnych zawiesznień magnetycznych. Zastosowanie takiego układu eliminuje tarcie między współpracującymi parami kinematycznymi, umożliwia monitoring i diagnostykę jego stanu technicznego poprzez pomiar poziomu drgań i wartości sił.

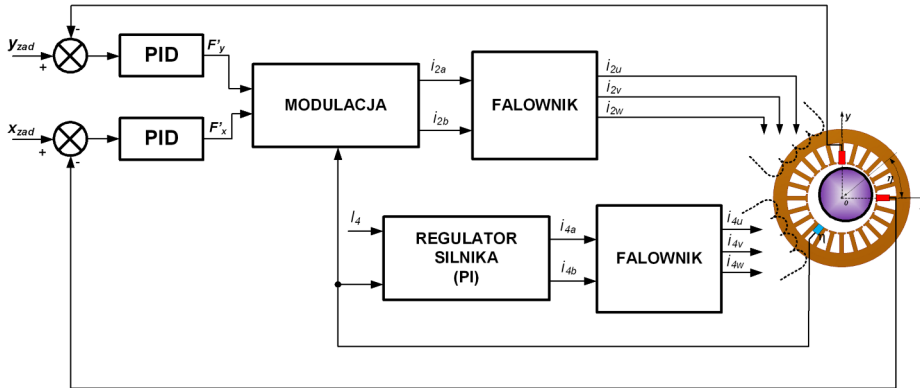
KONCEPCJA SAMOŁOŻYSKUJĄCEGO SIĘ SILNIKA ELEKTRYCZNEGO

Głównym elementem projektowanego napędu rozruchowego jest samołożyskujący się silnik elektryczny, który powinien zapewnić szerokie pasmo przenoszenia, dobre właściwości diagnostyczne, wysoką niezawodność i inne, lepsze cechy eksploatacyjne w porównaniu do tradycyjnych zespołów rozruchowych. Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy układu sterowania takim silnikiem elektrycznym. Sterowanie silnikiem funkcjonalnie można podzielić na dwie części: jedna jest odpowiedzialna za lewitację magnetyczną wirnika silnika, natomiast druga za pracę silnikową.

Silnik samołożyskujący się ma dwa uzwojenia: 4-biegunowe odpowiedzialne za wytwarzanie momentu obrotowego i 2-biegunowe odpowiedzialne za wytwarzanie siły nośnej.

W układzie sterowania jako sygnał synchronizujący podawany jest sygnał pochodzący z czujnika fazy, odpowiedzialny za synchronizację prądów płynących w tych dwóch rodzajach uzwojeń. Indukcyjność wzajemna (M) pomiędzy uzwojeniami 4-biegunowymi i 2-biegunowymi jest wprost proporcjonalna do przemieszczeń wirnika w szczelinie powietrznej.

Kierunek strumienia sprzężonego jest określany poprzez sygnał z czujnika fazy (w). Amplituda i zwrot strumienia sprzężonego jest niezależnie wytwarzana, amplituda prądu i jego faza są odpowiednio modulowane w ten sposób, że strumień sprzężony w szczelinie powietrznej odpowiada sygnałom wypracowywanym przez blok modulacji.

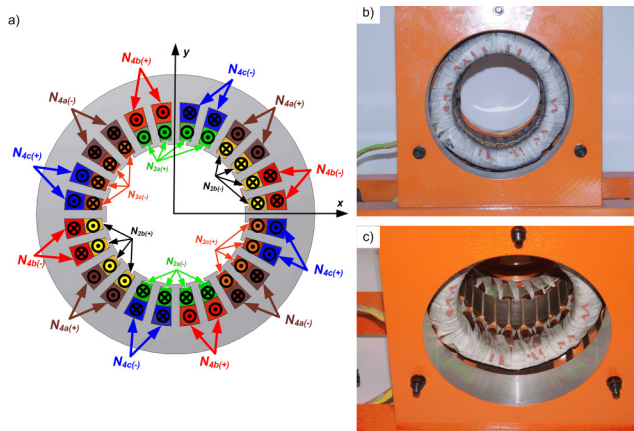


Rys. 2. Schemat blokowy samołóżyskującego się silnika elektrycznego

Silnik samołóżyskujący się łączy w sobie cechy heteropolarnego łożyska magnetycznego i indukcyjnego silnika elektrycznego. Heteropolarne łożysko magnetyczne posiada uzwojenia do generowania siły nośnej, natomiast silnik indukcyjny uzwojenia do wytwarzania momentu obrotowego – samołóżyskujący się silnik elektryczny łączy te dwie cechy układów w jeden zespół, eliminując najbardziej zawodny element z układu silnika – łożyska mechaniczne.

W obwodzie magnetycznym samołóżyskującego się silnika elektrycznego można wyróżnić dwa rodzaje strumieni (Rys. 3a). Pierwszy ze strumieni magnetycznych jest stały i jest nazwany strumieniem magnetycznym punktu pracy (uzwojenia N_{4a} i N_{4b}). Drugi ze strumieni magnetycznych zależy od położenia wirnika w szczeliny powietrznej i jest on zmienny w zależności od wypadkowej wartości tego strumienia w szczeliny powietrznej (uzwojenia N_{2a} i N_{2b}). Siła magnetomotoryczna wytwarzana przez uzwojenia jest siłą proporcjonalną do zmian ruchu wirnika w szczeliny powietrznej [3].

Jeżeli uzwojenia silnikowe samołóżyskującego się silnika elektrycznego zasilili się prądem stałym, samołóżyskujący się silnik elektryczny pracuje jako heteropolarne łożysko magnetyczne. Natomiast przy zasilaniu uzwojeń silnikowych prądem przemiennym, wirnik silnika jest wprawiany w ruch obrotowy. Prądy sterujące w uzwojeniach N_{2a} i N_{2b} są modulowane przez prędkość obrotową wirnika podczas jego obrotów (Rys. 4b).

Rys. 3. Samołóżyskujący się silnik elektryczny:
a) trójfazowy stator, b) i c) stator projektowanego silnika

Rozmieszczenie i rozkład uzwojeń na statorze samołożyskującego się silnika przedstawiono na rys. 3.

W celu stabilizacji położenia wirnika w szczelinie powietrznej w kierunku radialnym (z założoną szczeliną powietrzną) wykorzystuje się dwa rodzaje uzwojeń, które są odpowiednio rozmieszczone na statorze. Jedno z uzwojeń \rightarrow 4-biegunowe jest odpowiedzialne za generowanie momentu obrotowego wirnika, natomiast drugie \rightarrow 2-biegunowe jest odpowiedzialne za wytwarzanie siły nośnej. Uzwojenia silnikowe oznaczono przez N_4 . Chwilowa wartość prądu płynącego w uzwojeniach silnikowych wynosi i , siła magnetomotoryczna przyjmie zatem wartość $F_m = N_4 \times i$. Uzwojenia łożyskowe do wytwarzania siły nośnej oznaczono N_2 . Szczelinę powietrzną w nominalnym, centralnym położeniu wirnika oznaczono przez g_0 .

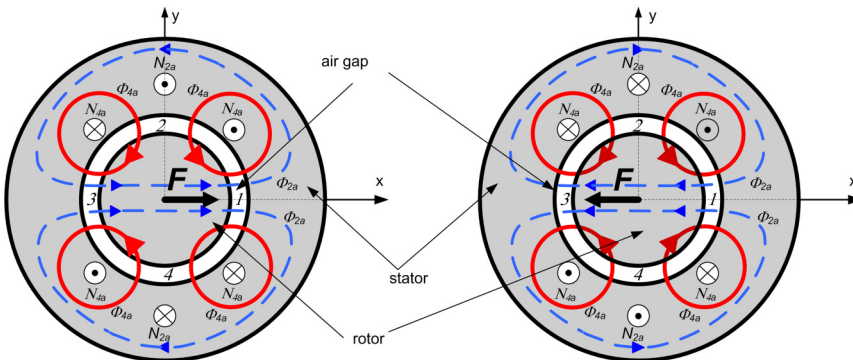
Na rys. 4 przedstawiono powstawanie siły nośnej w samołożyskującym się silniku elektrycznym w kierunku osi $0x$ (powstawanie siły nośnej w kierunku osi $0y$ jest analogiczne). W przypadku symetrycznego rozkładu strumienia gęstość strumienia (punkty 1, 2, 3, 4) ma taką samą wartość w każdym punkcie tej sekcji. W tym przypadku uzwojenia 4-biegunowe generują moment obrotowy.

Uzwojenia łożyskowe (N_{2a}) wytwarzają siłę nośną pomiędzy wirnikiem a statorem. Amplituda tych sił jest taka sama, ale zwrot jest równo rozłożony na obwodzie stojana w ten sposób, że suma sił działających na wirnik wynosi zero.

W celu zrozumienia i łatwiejszej prezentacji modelu takiego silnika założono, że do opisu prezentowany będzie model dwufazowy. Przejście z modelu dwufazowego na model trójfazowy odbywa się poprzez następującą zależność:

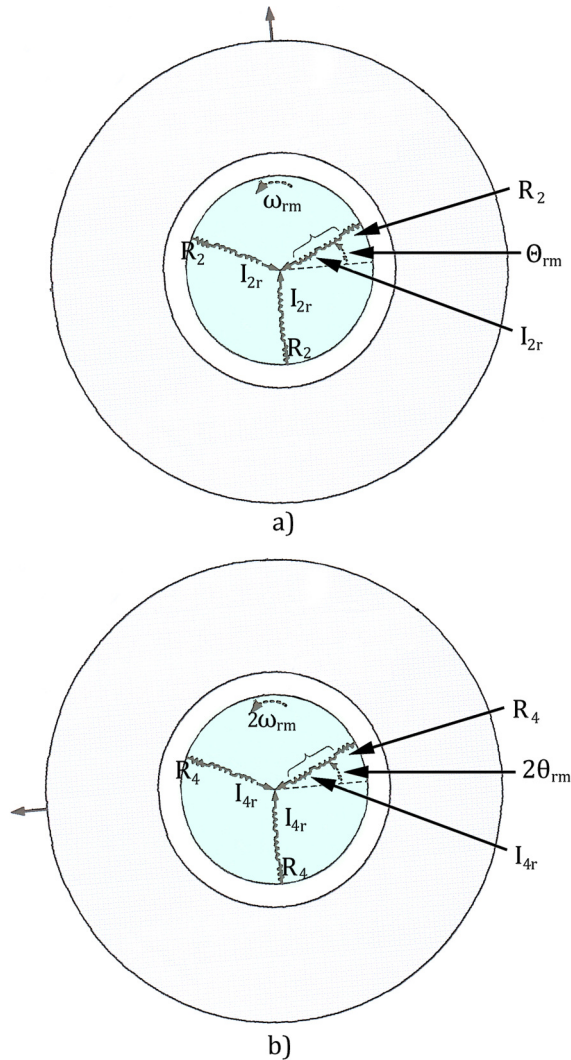
$$\begin{bmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{4a} \\ i_{4b} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2u} \\ i_{2v} \\ i_{2w} \\ i_{4u} \\ i_{4v} \\ i_{4w} \end{bmatrix} \quad (1)$$

W obrotowym układzie współrzędnych siła magnetomotoryczna układu dwufazowego wyrażona została jako funkcja sinusoidalna. Zwrot siły nośnej zależy od biegunowości prądu. Natomiast wartość tej siły jest proporcjonalna do prądu płynącego w uzwojeniach N_{2a} i N_{2b} . Na rysunku 3 przedstawiono tylko jedną fazę układu trójfazowego.



Rys. 4. Powstawanie siły nośnej: a) powstawanie siły nośnej w kierunku osi $0x$, b) powstawanie siły nośnej w kierunku przeciwnym do osi $0x$

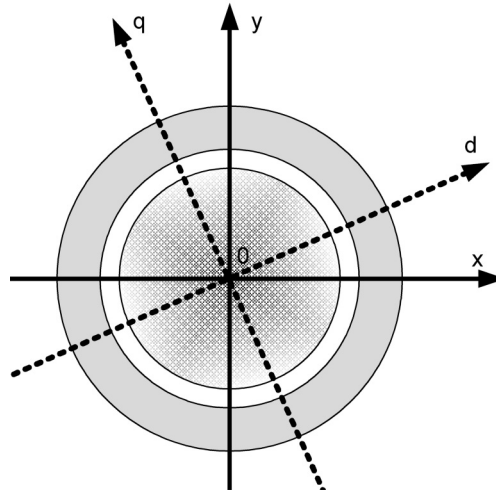
Model silnika samołożyskującego się i jego ekwiwalentny obwód elektryczny związanego z układem współrzędnych wirnika $0d$ przedstawiono na rys. 5. Na rysunku tym zaprezentowano uzwojenia 2-wbiegunowe i 4-rebiegunowe, uzwojenia trójfazowe łożyskowe oznaczono $2_{us}, 2_{vs}, 2_{ws}$, natomiast uzwojenia trójfazowe silnikowe oznaczono $4_{us}, 4_{vs}, 4_{ws}$ (indeks s oznacza stator). W uzwojeniach statora płyną trójfazowe prądy: $i_{2us}, i_{2vs}, i_{2ws}$ i $i_{4us}, i_{4vs}, i_{4ws}$ (2-wbiegunowe i 4-rebiegunowe, odpowiednio). W obwodzie wirnika występują napięcia i prądy, które są podobnie oznaczone jak statora (indeks r). $R_{2s}, R_{2r}, R_{4s}, R_{4r}$ – rezystancje uzwojeń statora i wirnika, $l_{2s}, l_{2r}, l_{4s}, l_{4r}$ – indukcyjności sprzężone pomiędzy wirnikiem a stator, M_{2uvw}, M_{4uvw} – indukcyjności wzajemne oraz $L_{2suvw}, L_{2ruvw}, L_{4suvw}, L_{4ruvw}$ – indukcyjności własne uzwojeń statora i wirnika odpowiednio.



Rys. 5. Obwód ekwiwalentny trójfazowego, samołożyskującego się silnika elektrycznego:
a) uzwojenia 2-biegunowe, b) uzwojenia 4-biegunowe

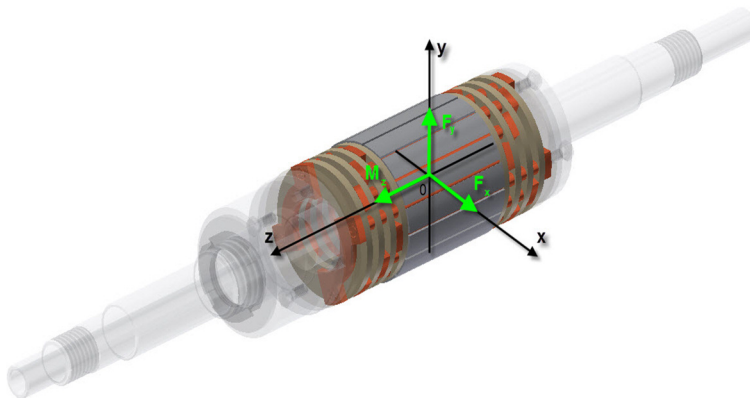
MODEL SYMULACYJNY ZESPOŁU NAPĘDOWEGO

Zespół napędowy do rozruchu silników turbinowych jest zespołem złożonym z indukcyjności. W celu budowy modelu matematycznego należy zapisać równania równowagi złożone z równań mechanicznych i elektrycznych opisujących ten układ. Model tego silnika nie musi w pełni opisywać konstrukcji silnika elektrycznego, jednakże powinien odzwierciedlać zjawiska magnetyczne zachodzące w rzeczywistym silniku. W celu prezentacji modelu dynamicznego takiego układu napędowego należy przedstawić dwa układy współrzędnych – jeden nieruchomy, związany ze statorem i drugi ruchomy, związany z wirnikiem, Rys. 6.



Rys. 6. Układy współrzędnych samołożyskującego się silnika elektrycznego (układ Oxy – związany ze statorem i Odq – związany z wirnikiem)

Model matematyczny zespołu napędowego oparty jest na prawie Newton'a (obliczanie sił działających w każdej osi) i równaniu momentu obrotowego dla silnika. W celu uproszczenia zapisu równań uzwojenia trójfazowe przetransformowano do modelu dwufazowego. Równania ruchu zapisano w postaci macierzowej [6]:

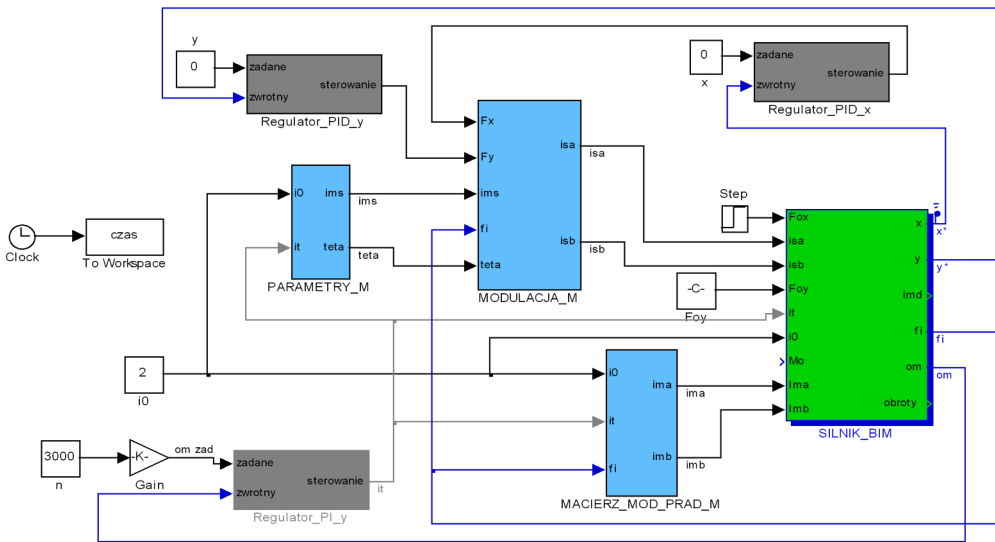


Rys. 7. Model projektowanego wirnika z zaznaczonymi siłami i momentem działającym na wirnik

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ -M_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

- m –masa wirnika;
- J –masowy moment bezwładności wirnika;
- F_x, F_y –siły nośne, działające w kierunku $0x$ i $0y$, odpowiednio;
- M_z –moment elektromagnetyczny;
- M_0 –moment obciążenia;
- G_x, G_y –siły zakłócające.



Rys. 8. Model symulacyjny zespołu napędowego do rozruchu napędowych silników turbinowych samolotu z samołzyskującym się silnikiem elektrycznym.

Siły i moment można zapisać w następującej postaci:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M' I_4 \cos(2\omega t + \Theta) & M' I_4 \sin(2\omega t + \Theta) & 0 & 0 \\ M' I_4 \sin(2\omega t + \Theta) & -M' I_4 \cos(2\omega t + \Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M' & M' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{4d} \\ i_{4q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

- M' –indukcyjność wzajemna – stała wartość opisywana przez dane geometryczne zespołu i liczbę uzwojeń;
- I_4 –prąd pobudzający uzwojeń silnikowych (prąd punktu pracy).

Równania związane z siłami zostały otrzymane na drodze różniczkowania energii pola magnetycznego w stosunku do przemieszczenia wirnika. Równanie związane z momentem obrotowym samołzyskującego się wirnika związane jest z jego częścią mechaniczną.

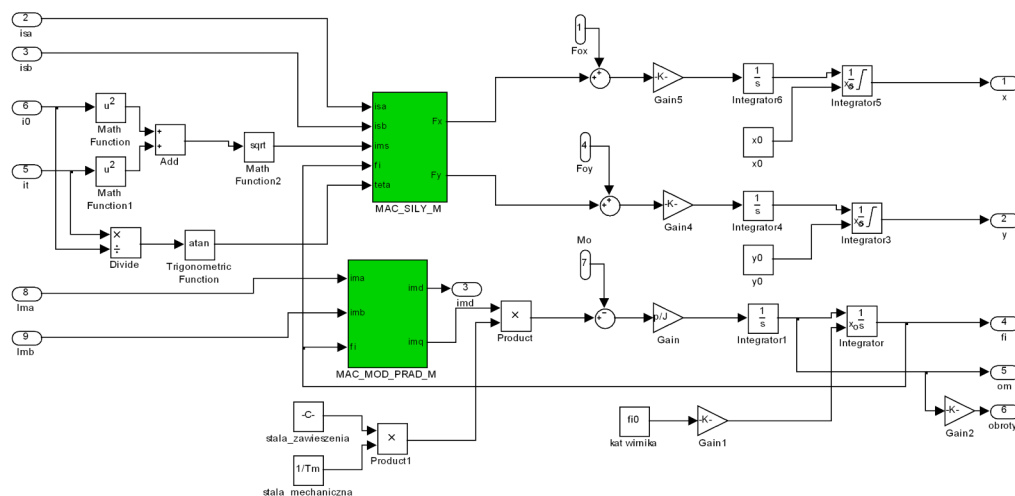
Należy poddać transformacji prąd płynący w uzwojeniach silnika z układu związanego ze statorem 0xy do układu związanego z wirnikiem 0dq poprzez macierz:

$$\begin{bmatrix} i_{4d} \\ i_{4q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\omega t) & \sin(2\omega t) \\ -\sin(2\omega t) & \cos(2\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{4a} \\ i_{4b} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Następnie podstawiając powyższe wyrażenia do równań ruchu opisujących zespół napędowy z samołożyskującym się silnikiem elektrycznym, otrzymuje się:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M'I_4 \cos(2\omega t + \Theta) & M'I_4 \sin(2\omega t + \Theta) & 0 & 0 \\ M'I_4 \sin(2\omega t + \Theta) & -M'I_4 \cos(2\omega t + \Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M' \sin(2\omega t) & M' \cos(2\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{4d} \\ i_{4q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ -M_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Na podstawie tej macierzy można zbudować model symulacyjny napędu rozruchowego z samołożyskującym się silnikiem elektrycznym w pakiecie Matlab-Simulink, który pozwala na wizualizację i identyfikację zjawisk zachodzących w takim układzie. Model napędu przedstawiono poniżej:



Rys. 9. Model symulacyjny samołożyskującego się silnika elektrycznego

WYNIKI SYMULACJI

W tabelicy 1 przedstawiono parametry użyte do przeprowadzenia symulacji zespołu rozruchowego z samołożyskującym się silnikiem elektrycznym w pakiecie Matlab-Simulink. Parametry te zostały wyliczone podczas projektowania stanowiska laboratoryjnego z tego typu silnikiem. Rysunek przedstawia model zespołu z pętlą sterowania. Symulacyjny model blokowy samołożyskującego się silnika elektrycznego przedstawiono na rys. 9.

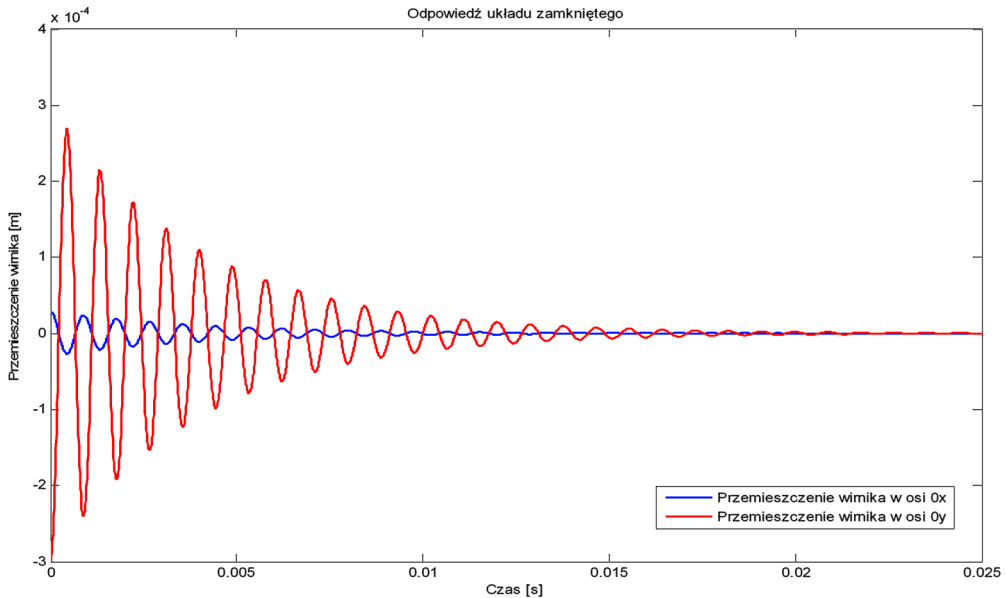
Samołożyskujący się silnik elektryczny ma trzy pętle sprzężenia zwrotnego (niebieskie linie i szary kolor bloków). Dwie pętle sprzężenia zwrotnego odpowiedzialne są za utrzymywanie wirnika w stanie lewitacji magnetycznej. Wyposażone są one w czujniki wiropądowe mierzące przemieszczenia wirnika w kierunku osi 0x i 0y i sygnał z nich podawany jest na regulatory PID w celu wypracowania odpowiednich sił nośnych. Trzecia pętla sprzężenia zwrotnego odpowiedzialna jest za regulację prędkości obrotowej. Użyty do tego celu regulator PI ma sygnał zwrotny z enkodera, który mierzy bieżącą prędkość obrotową.

System regulacji ma także w swojej strukturze bloki modulatoryjne, które są odpowiedzialne za modulowanie sił nośnych w funkcji prędkości obrotowej wirnika.

Tablica 1. Parametry do symulacji zespołu rozruchowego z samołożyskującym się silnikiem elektrycznym

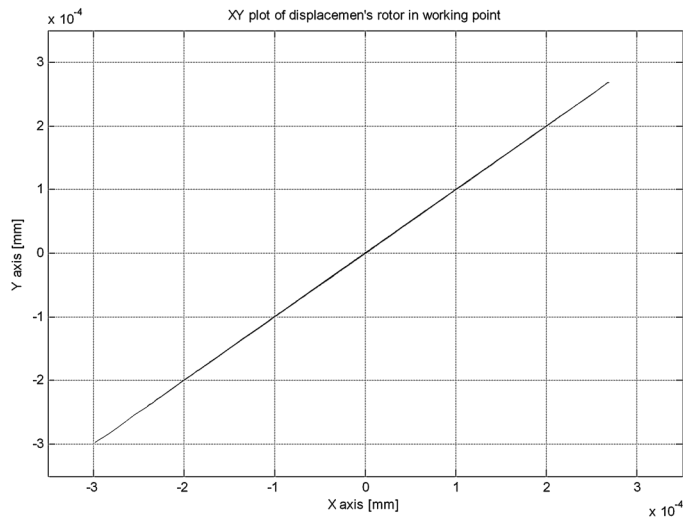
l	Długość osiowa wirnika	0,05 [m]
N_2	Liczba zwojów uzwojenia 2-wubiegunowego	30
N_4	Liczba zwojów uzwojenia 4-robiegunowego	60
r	Promień wirnika	50 [mm]
s	Szczelina powietrzna pomiędzy wirnikiem a statorem	0,3 [mm]
m	Masa wirnika	2 [kg]
i_0	Prąd punktu pracy	2 [A]
T_m	Stała mechaniczna maszyny	1,15
J	Masowy moment bezwładności	0,0025 [kg*m ²]
p	Liczba par biegunów	2

Na rys. 10 przedstawiono przemieszczenia wirnika po załączeniu zasilania napędu. Wirnik podnosi się z pozycji spoczynkowej do punktu pracy. Punkt pracy tego wirnika jest nominalnym położeniem wirnika w szczeliny powietrznej, kiedy to szczelina powietrzna pomiędzy wirnikiem a statorem wynosi 0,3 [mm].



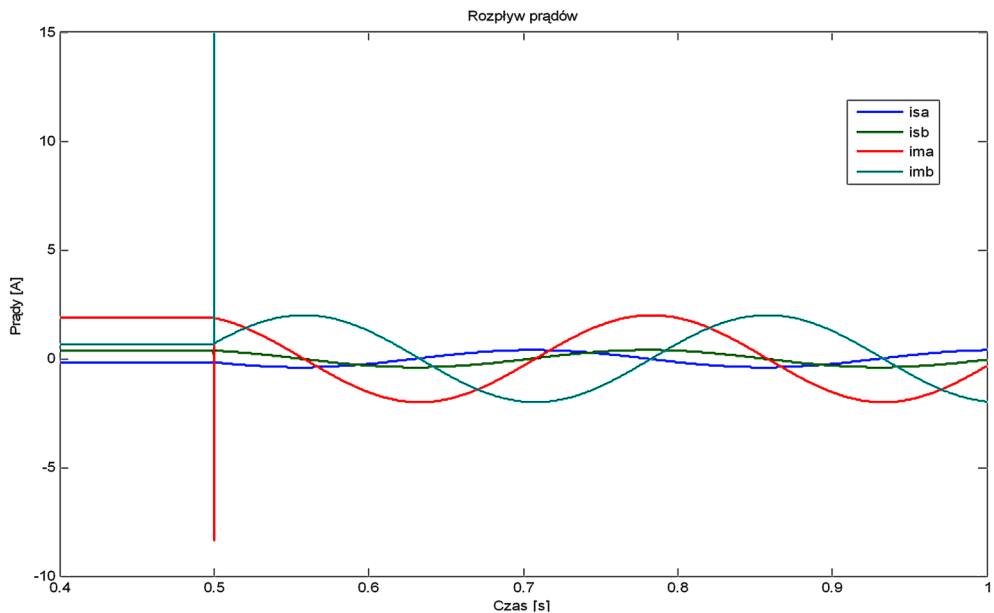
Rys. 10. Przebiegi przemieszczeń wirnika w punkcie pracy

Rys. 11 przedstawia wykres X-Y przemieszczenia wirnika w chwili podania napięcia zasilającego. Wirnik podnosi się z pozycji spoczynkowej.



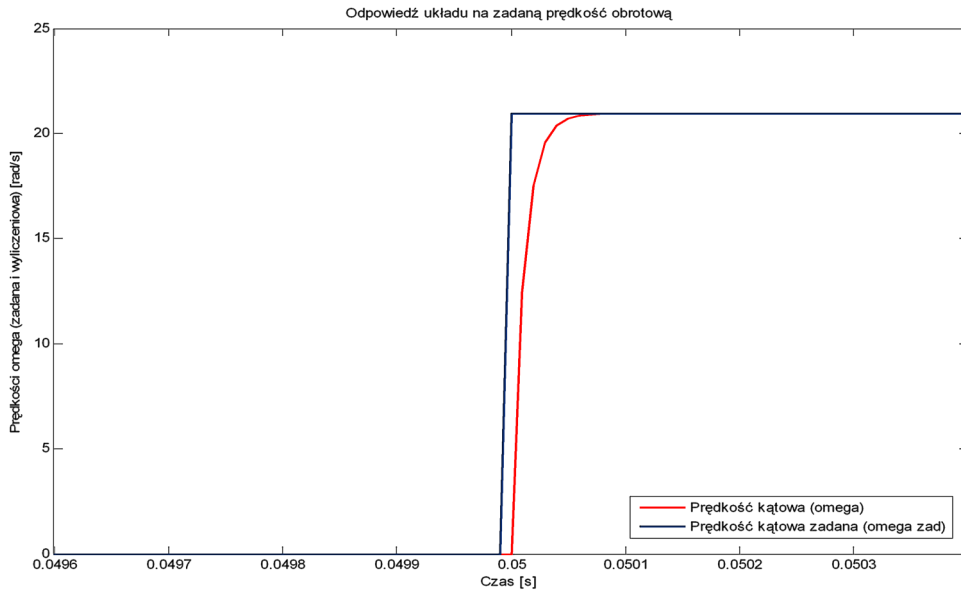
Rys. 11. Wykres X-Y przemieszczeń wirnika w punkcie pracy

Rys. 12 przedstawia rozkład prądów w warunkach zadanej prędkości obrotowej ($\omega=20$ [rad/s]). W uzwojeniach statora zaczynają płynąć sinusoidalnie zmienne prądy, kiedy zadana prędkość zostaje osiągnięta. Prądy związane z silnikiem (i_{sa} , i_{sb}) są modulowane przez prądy łożyskowe (i_{ma} , i_{mb}).



Rys. 12. Rozpływ prądów w uzwojeniach statora przy zadanej prędkości obrotowej $\omega=20$ [rad/s]

Odpowiedź układu na zadaną prędkość obrotową przedstawiono na rys. 13. Niebieskim kolorem oznaczono zadaną prędkość obrotową, natomiast kolorem czerwonym odpowiedź układu.



Rys. 13. Odpowiedź układu na zadaną prędkość obrotową

Wszystkie symulacje przeprowadzono na modelu dwufazowym. W celu przejścia model trójfazowy należy model dwufazowy przetransformować przez macierz (1) do modelu trójfazowego.

WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH PRAC

Nowa koncepcja zespołu napędowego z zaprezentowanym powyżej samolozyskującym się silnikiem elektrycznym pozwoli wyeliminować negatywne cechy takich zespołów, jak: tarcie, nagrzewanie się elementów trących, uszkodzenia łożysk, itp.

Prezentowane podejście jest pomysłem nowatorskim i wymaga ono weryfikacji na stanowisku laboratoryjnym. Dlatego też kolejnym krokiem w naszych badaniach będzie weryfikacja modelu matematycznego i symulacyjnego na budowanym stanowisku laboratoryjnym z tego typu silnikiem.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009 – 2012 jako projekt badawczy z grantu o nr O N509 032736.

BIBLIOGRAFIA

- [1] I. Moir, A. Seabridge (2008) *Aircrafts systems. Mechanical, electrical and avionics subsystems integration. Third Edition*, John Wiley&Sons, Ltd.
- [2] S. L. Botten, CH. R. Whitley, A. D. King (2000) *Flight control actuation Technology for next – generation all – electric Aircraft*, Technology Review Journal, Millennium Issue.
- [3] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Oshima, M. Takemoto, D. Dorrell (2005). *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*, Elsevier's Science Technology Rights Department in Oxford, UK.

-
- [4] Z. Gosiewski, K. Falkowski (2003) *Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne*, Monografia nr 19 Biblioteki Naukowej Instytutu lotnictwa, Warszawa).
 - [5] M. Rahman, A. Chiba, T. Fukao (1995) *Principles and Development of Bearingless AC Motors*, IPEC, Yokohama, pp. 1334÷1339.
 - [6] Falkowski K., Gosiewski Z., Żokowski M (2008) *Introductory Analysis of the Bearingless Induction Motor*, The 4th International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM 2008