



Technologia zawieszzeń magnetycznych w aspekcie zastosowania w elektrycznych silnikach odrzutowych

KRZYSZTOF FALKOWSKI, MACIEJ HENZEL,
PAULINA KURNYTA-MAZUREK, MARIUSZ JANCZEWSKI,
MARIUSZ WAŻNY

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, krzysztof.falkowski@wat.edu.pl,
mariusz.wazny@wat.edu.pl

Streszczenie. Ograniczenie emisyjności szkodliwych związków, takich jak CO₂ i NO_x, zostało uznane za priorytetowy cel w Unii Europejskiej. W lotnictwie, które jest jedną z branż o wysokim wskaźniku wytwarzania zanieczyszczeń, ograniczenie emisji zanieczyszczeń można uzyskać przez zastosowanie elektrycznych silników odrzutowych. Silniki takie konstrukcyjnie znacznie różnią się od silników napędzanych naftą lotniczą. Związane jest to przede wszystkim z wykorzystaniem energii elektrycznej jako źródła zasilania. W artykule przedstawiono koncepcję elektrycznego silnika odrzutowego, w którym wirnik łożyskowany jest magnetycznie. Zaprezentowano opracowane w Zakładzie Awioniki Instytutu Techniki Lotniczej WAT demonstratory technologii aktywnych i pasywnych łożysk magnetycznych, jak i bezłożyskowych silników elektrycznych, a także technologię zasilania hybrydowego z wykorzystaniem ogniwi paliwowych.

Słowa kluczowe: inżynieria mechaniczna, silnik odrzutowy, łożyska magnetyczne, bezłożyskowe silniki elektryczne, ogniwa paliwowe

DOI: 10.5604/01.3001.0015.8771

1. Wprowadzenie

Ze względu na systematycznie podnoszone wymagania ekologiczne [3] również lotnictwo staje przed poważnym wyzwaniem, jakim jest zastąpienie silników odrzutowych wykorzystujących naftę lotniczą (np. Jet A-1, Jet A i Jet B) przez silniki

odrzutowe zasilane energią elektryczną. W wyniku braku wydajnych źródeł energii oraz ograniczeń związanych z jej dystrybucją silniki tego typu stosowane są głównie do napędu bezzałogowych statków powietrznych klasy mini. Rozwiązania te wykorzystują silniki bezszczotkowe (BLDC) zasilane z pakietu baterii akumulatorowej umieszczonej na pokładzie bezzałogowego statku powietrznego. Zespół śmigła ze znajdującym się na jego wale silnikiem BLDC, który wytwarza ciąg, stosowany jest do napędu bezzałogowych statków powietrznych w konfiguracji stałopłatu, zmienno-płatu oraz wielowirnikowych platform latających [1].



Rys. 1. Demonstracja elektrycznej taksówki powietrznej opracowanej przez start-up Lilium [13]

Obecnie na pokładzie statku powietrznego napędy elektryczne wykorzystywane są jako układy pomocnicze lub wspomagające pracę silników klasycznych. Firma United Technologies Advanced Project zaprezentowała zmodyfikowany samolot komunikacyjny Bombardier Dash 8-100 z napędem hybrydowo-elektrycznym [11]. Samolot został wyposażony w dodatkowy silnik elektryczny, który wspomaga dwa silniki turbinowe PW 121 podczas startu i wznoszenia. Takie podejście powinno zapewnić 30-procentową oszczędność paliwa podczas jednogodzinnego lotu.

Innym przykładem jest współpraca między firmami Airbus, Siemens i Rolls-Royce, której celem jest zbudowanie hybrydowego samolotu pasażerskiego napędzanego elektrycznym silnikiem turbowentylatorowym [12]. Samolot ma być wyposażony w cztery silniki odrzutowe, z których trzy mają pracować na paliwo lotnicze, a jeden będzie w pełni elektryczny — E-Fan X [14]. Opracowywany silnik ma ograniczyć emisję dwutlenku węgla w lotnictwie oraz zależność lotnictwa od paliwa lotniczego. Samolot ma powstać na podstawie konstrukcji BAE-146 i spełniać wymagania Komisji Europejskiej 2050 dotyczące redukcji CO₂ w lotnictwie o 75%, NO_x o 90% i hałasu o 65% [12].

Ciekawą konstrukcją wykorzystującą napęd elektryczny jest projekt start-upu Liliu [13], którego celem jest skonstruowanie elektrycznej latającej taksówki umożliwiającej pionowy start i przejście do lotu horyzontalnego z prędkością do 100 km/h. Do napędu statku powietrznego wykorzystano 36 elektrycznych silników odrzutowych. Produkcja komercyjna takiego środka transportu planowana jest na rok 2025 (rys. 1) [13].

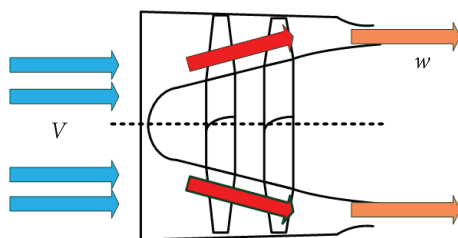
W artykule przedstawiona zostanie koncepcja magnetycznego systemu łożyskowania i napędu elektrycznego wentylatora/sprężarki silnika odrzutowego. W Zakładzie Awioniki ITL WAT od wielu lat rozwijane są technologie aktywnych i pasywnych łożysk magnetycznych oraz elektryczne napędy bezłożyskowe. Natomiast problematyka konstrukcji wlotu, sprężarki, kanałów i dyszy sprowadzona zostanie do koncepcji silnika odrzutowego. Kolejnym obszarem aktywności zespołów badawczych Zakładu Awioniki są pierwotne i wtórne źródła energii elektrycznej oraz metody przetwarzania i dystrybucji energii elektrycznej na pokładzie statku powietrznego. Na podstawie prowadzonych prac przedstawiona zostanie propozycja zasilania elektrycznego silnika odrzutowego z wykorzystaniem ogniw paliwowych.

2. Elektryczny silnik odrzutowy

Działanie silnika odrzutowego polega na wykorzystaniu przyrostu prędkości strumienia powietrznego przepływającego przez płaszczyznę obracającego się wentylatora lub sprężarki, które napędzane są przez silnik turbinowy (rys. 2). Ciąg K dla silnika odrzutowego określony jest zależnością [1]:

$$K = \dot{m}(w - V), \quad (1)$$

gdzie: \dot{m} — masowe natężenie przepływu powietrza,
 w — prędkość wypływu powietrza z dyszy wylotowej,
 V — prędkość lotu (prędkość powietrza we wlocie silnika odrzutowego).



Rys. 2. Idea działania silnika wentylatorowego

W silniku odrzutowym wykorzystującym naftę lotniczą sprężarka napędzana jest przez turbinę, która poprzez wał przekazuje napęd sprężarce [1]. W elektrycznym odrzutowym silniku sprężarka lub wentylator są napędzane przez silnik elektryczny, a prędkość obrotowa sterowana jest przez falownik. Tym samym konstrukcja silnika odrzutowego jest znacząco uproszczona [1].

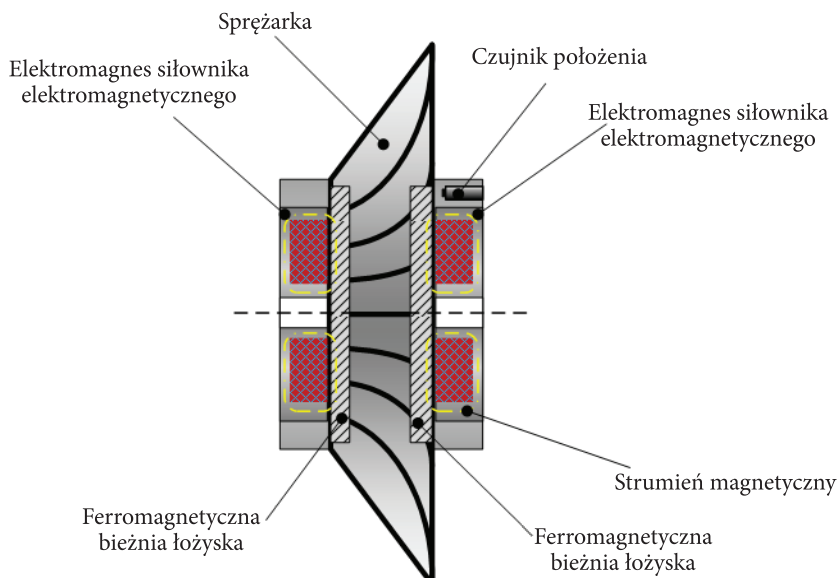
Współpraca między wirującymi elementami (wirnik wraz ze sprężarką oraz twornik napędu elektrycznego) i obudową silnika realizowana jest z wykorzystaniem łożysk — ich zadaniem jest przenoszenie obciążeń między elementami współpracującej pary kinematycznej, redukcja tarcia oraz odprowadzanie ciepła z wirnika. Łożyska muszą przenosić obciążenia promieniowe i osiowe występujące w silniku. Łożyskowanie toczne wymaga zastosowania układu smarowania oraz dodatkowego chłodzenia [2].

Konstrukcja silnika obejmuje wirnik z osadzoną sprężarką lub wentylatorem, wlotem powietrza, kanałami, dyszą wylotową, napędem elektrycznym oraz układem łożyskowania wirnika. Łożyska toczne charakteryzują się ograniczeniami, które obniżają sprawność układu i niezawodność konstrukcji, dlatego w prezentowanym rozwiązaniu do łożyskowania wirnika zostaną wykorzystane łożyska magnetyczne. Układ łożyskowania magnetycznego obejmuje dwa łożyska promieniowe i jedno łożysko osiowe [6]. Taka konfiguracja łożysk ogranicza pięć z sześciu stopni swobody lewitującego wirnika. Zaletą zastosowania zawiesznień magnetycznych jest usunięcie kontaktu mechanicznego między współpracującymi elementami, co eliminuje tarcie, układ smarowania oraz chłodzenia i ogranicza generację hałasu.

Łożyska magnetyczne można podzielić na aktywne, pasywne i silniki bezłożyskowe [5]. Aktywne łożyska magnetyczne wykorzystują układ sprzężenia zwrotnego, który zmienia wartość siły magnetycznej generowanej przez siłowniki elektromagnetyczne [6, 9]. W układzie używa się czujników, które określają położenie ferromagnetycznego wirnika. Informację o położeniu wirnika wykorzystuje układ regulacji, który zmienia wartość prądu w uzwojeniach cewek siłowników elektromagnetycznych. W pasywnych zawieszzeniach magnetycznych nie występuje układ sprzężenia zwrotnego. Natomiast siła lewitacji magnetycznej jest wynikiem oddziaływania między prądami molekularnymi występującymi w uporządkowanych strukturach, jakimi są magnesy, oraz prądami indukowanymi w przewodnikach i nadprzewodnikach [5].

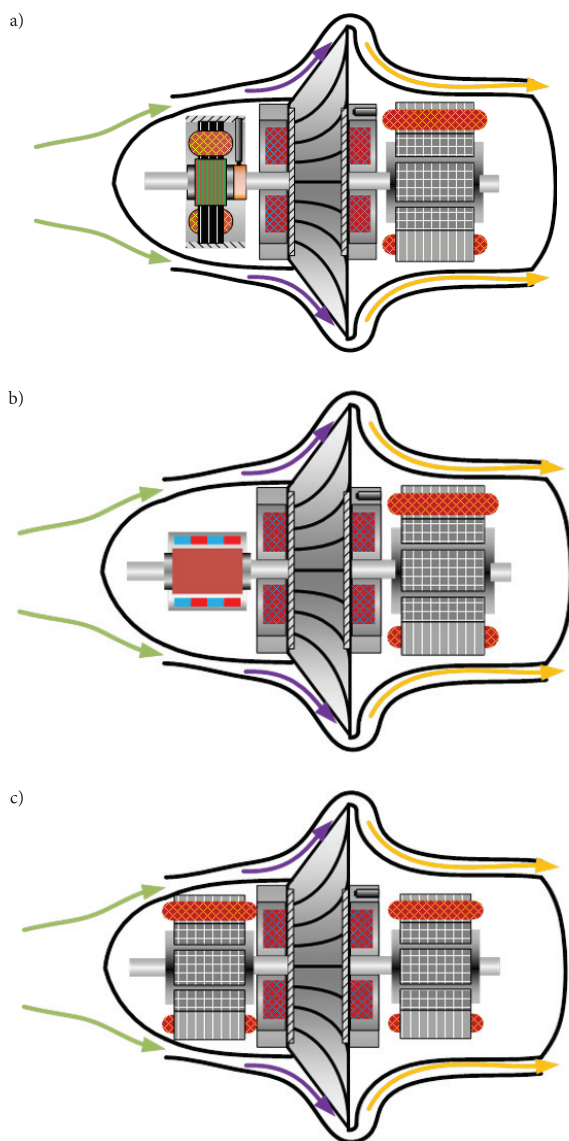
Specyficzną grupą układów wykorzystujących siły lewitacji magnetycznych są elektryczne napędy bezłożyskowe. Konstrukcyjnie silnik bezłożyskowy jest podobny do klasycznego napędu elektrycznego. Efekt lewitacji uzyskuje się przez umieszczenie w napędzie drugiego obwodu magnetycznego odpowiedzialnego za generowanie składowych siły lewitacji magnetycznej [4]. Elektryczne napędy bezłożyskowe mogą spełniać funkcje silnika elektrycznego oraz promieniowego łożyska magnetycznego. Uzupełnieniem układu łożyskowania są łożyska spoczynkowe, które utrzymują wirnik po wyłączeniu silnika oraz zapewniają bezpieczny wybieg wirnika. Dodatkowo czujniki z układu sprzężenia zwrotnego aktywnego łożyska magnetycznego i silnika bezłożyskowego można wykorzystać do monitorowania stanu silnika odrzutowego [8].

Prezentowany układ łożyskowania wirnika odrzutowego silnika elektrycznego obejmuje jedno osiowe i dwa promieniowe łożyska magnetyczne. Do przenoszenia obciążeń osiowych wykorzystane zostanie aktywne łożysko magnetyczne w układzie homopolarnym (rys. 3), które jest bezpośrednio zintegrowane z konstrukcją sprężarki/wentylatora silnika i stanowi podstawową podporę w silniku odrzutowym (rys. 3). Zintegrowanie podpory ze sprężarką zapewnia kompaktową konstrukcję silnika odrzutowego i znacząco skraca wirnik silnika odrzutowego. Sprowadzenie tarcz bieźni łożyska do konstrukcji sprężarki redukuje liczbę tarcz, co ma znaczący wpływ na właściwości dynamiczne wirnika silnika odrzutowego. Konstrukcja aktywnego homopolarnego łożyska magnetycznego została przedstawiona na rysunku 3.

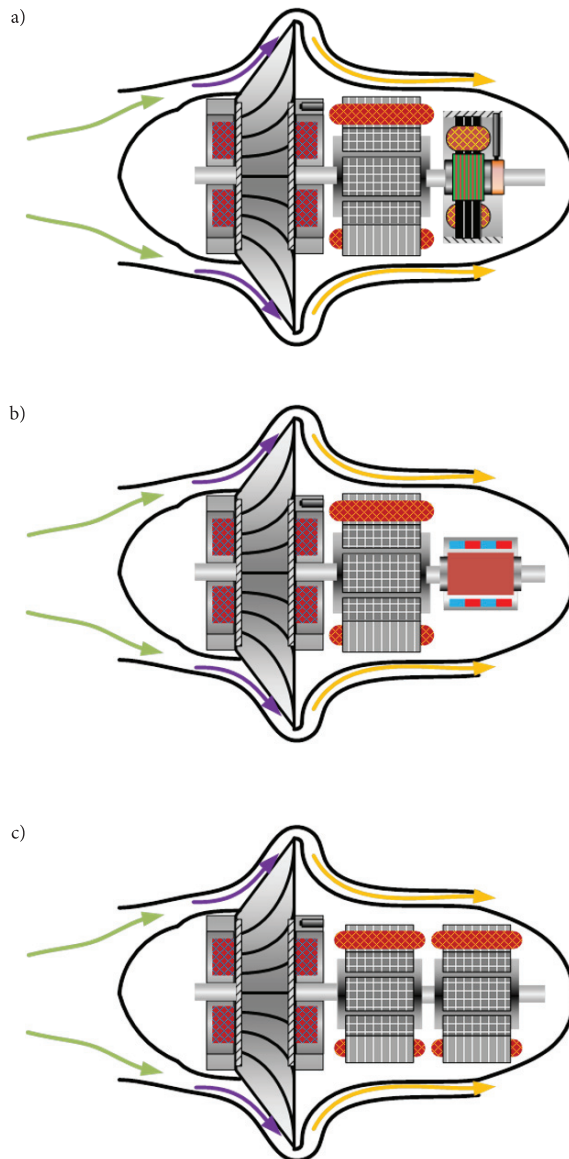


Rys. 3. Homopolarne osiowe aktywne łożysko magnetyczne w silniku odrzutowym

Jako podpory promieniowe można wykorzystać aktywne heteropolarne promieniowe łożyska magnetyczne (rys. 4a i 5a). Innym rozwiązaniem jest zastosowanie elektrodynamicznych promieniowych pasywnych łożysk magnetycznych jako podpór promieniowych (rys. 4b i 5b). Dlatego w silniku odrzutowym przewiduje się umieszczenie jednej podpory promieniowej aktywnej lub pasywnej.



Rys. 4. Konfiguracja silnika z symetrycznym rozmieszczeniem podpór promieniowych: a) z aktywnym łożyskiem magnetycznym, b) z pasywnym łożyskiem magnetycznym, c) z dwoma bezłożyskowymi napędami elektrycznymi



Rys. 5. Konfiguracja silnika odrzutowego z asymetrycznym rozmieszczeniem podpór promieniowych: a) z aktywnym łożyskiem magnetycznym, b) z pasywnym łożyskiem magnetycznym, c) z dwoma bezłożyskowymi napędami elektrycznymi

Jako druga podpora magnetyczna wykorzystany zostanie bezłożyskowy silnik elektryczny, który oprócz przenoszenia obciążeń promieniowych generuje moment obrotowy. Bezłożyskowe silniki elektryczne mogą zostać wykorzystane również do napędu sprężarki oraz podpór promieniowych (rys. 4c i 5c).

Podpory promieniowe (aktywne lub pasywne łożyska magnetyczne oraz bezłożyskowe napędy elektryczne) mogą być rozmieszczone w dwóch podstawowych konfiguracjach. W pierwszej konfiguracji, ze względu na właściwości dynamiczne wirnika, podpory rozmieszczone są symetrycznie względem sprężarki (rys. 4). Dopuszczalna jest również konfiguracja asymetryczna, w której promieniowe łożysko magnetyczne i bezłożyskowy napęd elektryczny umieszczone są za sprężarką silnika odrzutowego (rys. 5).

Istotnym elementem prezentowanego elektrycznego układu napędowego jest zasilanie. Podstawowym źródłem energii elektrycznej będą ogniwa paliwowe, które wraz z akumulatorami zasilą odrzutowy silnik elektryczny.

Obecnie prowadzone przez zespół pracowników ITL WAT prace badawcze ukierunkowane zostały na opracowanie silnika odrzutowego zapewniającego ciąg do 1 kN. Punktem wyjścia jest konstrukcja sprężarki, która stanowi obciążenie napędu elektrycznego i zdecyduje o całkowitym zapotrzebowaniu na moc. Jednocześnie konstrukcja sprężarki, wlotów powietrza i dyszy determinuje wymiary silnika. Opracowywany silnik odrzutowy przeznaczony jest do napędzania bezzałogowych statków powietrznych.

Projektowany napęd to nowatorska konstrukcja, która znacząco odbiega od obecnie stosowanych rozwiązań. Dlatego ostateczna konstrukcja silnika będzie wynikiem dalszych prac badawczych i projektowych.

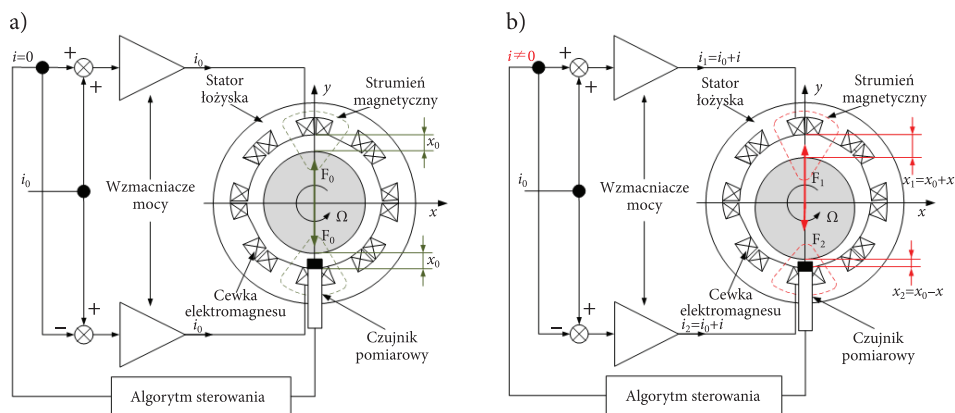
3. Łożyska magnetyczne

Łożysko magnetyczne według normy ISO14839-1 [9] to urządzenie mechaniczne wykorzystujące siły przyciągania lub odpychania w celu zapewnienia stabilnej lewitacji wirnika w otoczeniu punktu pracy. Ze względu na swoje właściwości, w szczególności brak kontaktu mechanicznego między współpracującymi elementami pary kinematycznej, a przez to brak tarcia między tymi elementami, doskonale nadaje się do wykorzystywania jako podpory wałów wirnikowych. Łożyska magnetyczne można podzielić na aktywne i pasywne.

3.1. Aktywne łożyska magnetyczne

Aktywne układy łożyskowania magnetycznego wirników składają się z siłowników elektromechanicznych, czujników określających położenie wirnika w szczelinie powietrznej i układu sterowania, co pokazano na rysunku 6. W przypadku gdy łożyskowany wirnik znajduje się w punkcie pracy, tzn. gdy pomiędzy nabiegunkami a łożyskowanym wirnikiem występuje taka sama szczelina powietrzna x_0 , to w każdym z elektromagnesów płynie prąd punktu pracy i_0 . Przepływ prądu

w elektromagnesach powoduje powstanie sił elektromagnetycznych F_0 mających taką samą wartość, ale przeciwny zwrot (rys. 6a). Z kolei jeżeli zostanie wykryta zmiana zadanego położenia wirnika w szczelinie powietrznej, to układ sterowania zmienia wartość siły magnetycznej generowanej przez siłowniki elektromechaniczne — przez zmianę prądów płynących w uzwojeniach cewek elektromagnesów siłowników. Zmiana prądów sterujących odbywa się zgodnie z prawem sterowania regulatorów, co przedstawiono na rysunku 6b. Tak działający układ przeciwdziała ruchowi masy w szczelinie powietrznej. Wartość siły magnetycznej zmienia się aktywnie i zależy bezpośrednio od położenia wirnika w szczelinie powietrznej [5].



Rys. 6. Aktywne zawieszenie magnetyczne: a) położenie równowagi wirnika, b) wirnik poza położeniem równowagi [5, 6]

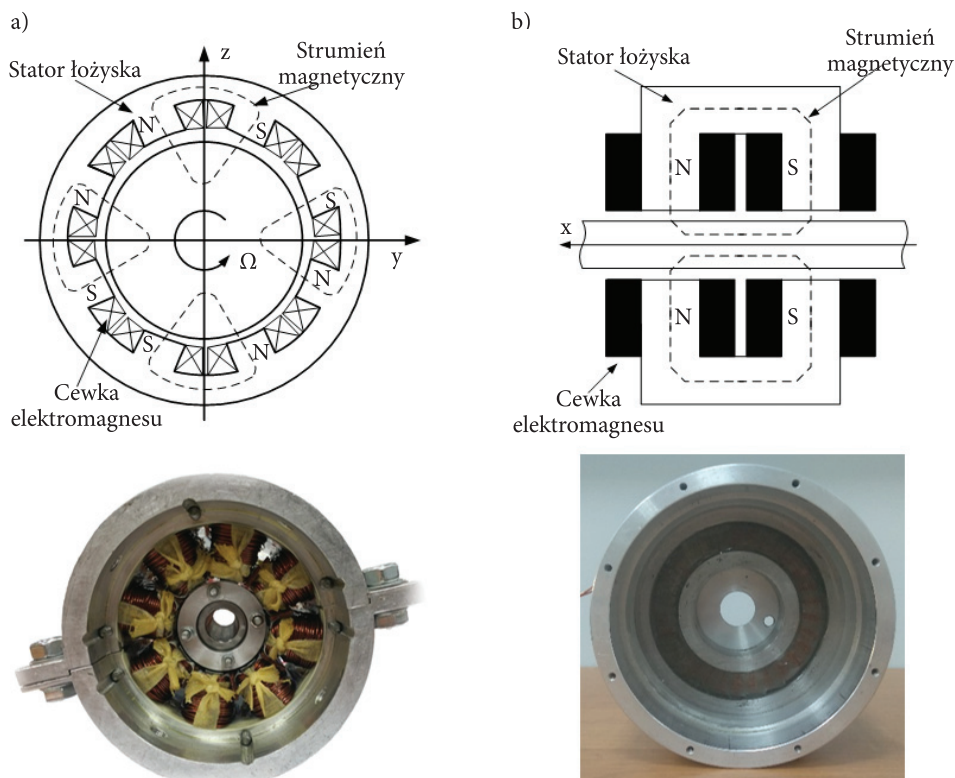
Podstawowym elementem łożyska magnetycznego jest siłownik elektromechaniczny, który generuje siłę sterującą. Łożyska magnetyczne wykorzystują trzy typy siłowników elektromechanicznych [6]:

- heteropolarne siłowniki elektromechaniczne,
- homopolarne siłowniki elektromechaniczne,
- homopolarne siłowniki elektromechaniczne z magnesami trwałymi.

Siłowniki elektromechaniczne są wykonywane w układzie heteropolarnym (rys. 7a) i w układzie homopolarnym (rys. 7b). W pierwszym z nich dowolny punkt na obwodzie wirnika w ciągu jednego pełnego obrotu przechodzi czterokrotnie pod biegunem północnym i biegunem południowym elektromagnesów. Zmiana biegunowości pola magnetycznego powoduje indukowanie się prądów wirowych, dlatego w przypadku siłowników heteropolarnych konieczne jest stosowanie bieżni wykonanej z pakietów blach oddzielonych lakierem. Natomiast w układzie homopolarnym dowolny punkt na obwodzie wirnika przechodzi pod biegunem o tej samej polaryzacji.

Różnica pomiędzy hetero- i homopolarnymi siłownikami magnetycznymi związana jest z orientacją ich pola magnetycznego w stosunku do osi obrotu wirnika. Dlatego siłowniki heteropolarne nazywane są również siłownikami z poprzecznym strumieniem magnetycznym, a siłowniki homopolarne są określane jako siłowniki z podłużnym strumieniem magnetycznym.

Główne problemy występujące podczas procesu projektowania łożysk magnetycznych związane są z wyznaczeniem współczynników sztywności siłownika elektromechanicznego oraz jego pasma przenoszenia. Dodatkowo pojawiają się również zagadnienia oceny wpływu nieliniowego pola magnetycznego na stabilną pracę łożyska magnetycznego. Większość z nich jest związana z procesem linearyzacji nieliniowego modelu w otoczeniu punktu pracy, który jest niezbędny podczas analizy i syntezy układu sterowania łożyska magnetycznego [6].



Rys. 7. Aktywne łożyska magnetyczne opracowane w Zakładzie Awioniki:
a) w układzie heteropolarnym, b) w układzie homopolarnym [6]

Pomimo konieczności stosowania specjalnych układów sterowania, w porównaniu do tradycyjnych metod łożyskowania z wykorzystaniem łożysk tocznych i ślizgowych, łożyskowanie magnetyczne ma następujące zalety:

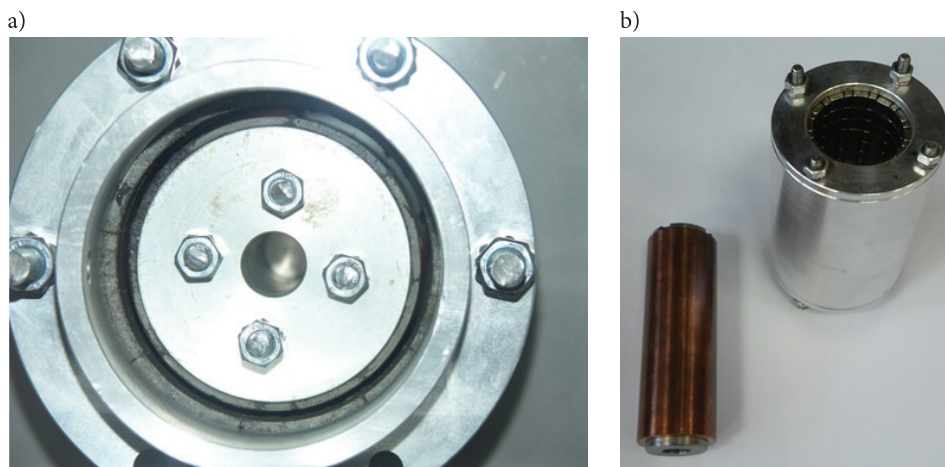
- bezkontaktowe podparcie wału wirnikowego zapewniające wysoką trwałość jego czopów oraz brak zużycia tribologicznego;
- brak konieczności smarowania, co dzięki usunięciu układu smarowania znacznie obniży masę statku powietrznego oraz skróci czas obsługi;
- mniejsza sztywność promieniowa łożyska powodująca zmniejszenie wartości prędkości krytycznych, dzięki czemu występuje większy zakres prędkości eksploatacyjnych, przy których wał wykazuje skłonności do samocentrowania się;
- precyzyjne sterowanie położeniem wirnika dające możliwość dokładnego określenia jego chwilowego położenia oraz monitorowania i identyfikacji parametrów pracy silnika odrzutowego (maszyny wirnikowej) w trybie „diagnostyki on-line”;
- zmniejszenie poziomu hałasu oraz wytwarzanych zanieczyszczeń przez usunięcie układu smarowania, który jest źródłem toksycznych materiałów stanowiących zagrożenie dla środowiska naturalnego oraz personelu obsługi.

Zastosowanie aktywnych łożysk magnetycznych daje możliwość monitorowania na bieżąco pracy układu łożyskowania. Zawieszania magnetyczne cechują się również większą nośnością ruchową i spoczynkową przy dużych prędkościach obrotowych oraz lepszymi parametrami pracy, szczególnie przy nagłych, szybkozmiennych, skokowych obciążeniach dynamicznych.

3.2. Pasywne łożyska magnetyczne

W pasywnych łożyskach magnetycznych nie występuje układ realizujący sprzężenie zwrotne między położeniem wirnika w szczelinie powietrznej a wartością siły magnetycznej. Źródłem siły magnetycznej są prądy molekularne lub indukowane, które występują w materiałach diamagnetycznych, paramagnetycznych i magnesach trwałych. Wyróżnia się dwa podstawowe typy pasywnych łożysk magnetycznych: łożyska z magnesami trwałymi oraz łożyska elektrodynamiczne (rys. 8).

Pasywne łożyska magnetyczne z magnesami trwałymi zbudowane są z magnesów trwałych lub zespołów magnesów ułożonych w odpowiednie tablice (np. tablice Halbacha). W ich konstrukcji wykorzystuje się siły odpychania magnetycznego między dwoma magnesami trwałymi. W zależności od kierunku przenoszonych obciążeń w konstrukcji tych rozwiązań wykorzystuje się magnesy o różnej konfiguracji wektorów magnetyzacji. Ze względu na ograniczenia wynikające z twierdzenia Earnshawa pasywne łożyska magnetyczne do poprawnego działania wymagają zastosowania układów dodatkowych ograniczających stopnie swobody łożyskowanych wirników. Do tego celu można wykorzystać aktywne łożyska magnetyczne lub podpory klasyczne [5].



Rys. 8. Pasywne łożyska magnetyczne: a) z magnesami trwałymi, b) elektrodynamiczne

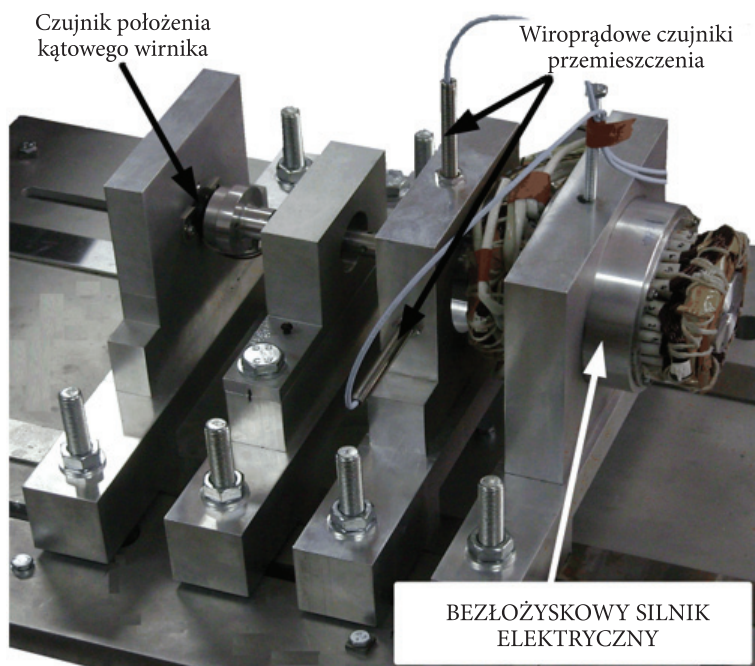
Z kolei w zawieszeniach elektrodynamicznych magnesy trwałe są źródłem zmiennego pola magnetycznego, które powstaje po wprowadzeniu ich w ruch. Drugim elementem pary kinematycznej zawieszenia elektrodynamicznego jest przewodnik, w którym indukowane są prądy. Oddziaływanie między indukowanym prądem i polem magnetycznym generuje siły lewitacji magnetycznej. Najczęściej stosowanymi materiałami, z których wykonywane są wirniki/bieżnie łożysk, są miedź i aluminium. Warunkiem wygenerowania elektromagnetycznej siły lewitacji jest występowanie prędkości względnej między statorem z magnesami trwałymi a wirnikiem. Z tego powodu łożyska elektrodynamiczne nie mogą być wykorzystywane przy zbyt małej prędkości wirnika, zbliżonej do zera. Dla każdego łożyska określana jest minimalna prędkość, przy której wygenerowana siła magnetyczna jest wyższa niż siła ciężkości wirnika i uzyskuje się stan lewitacji magnetycznej. Przy mniejszych prędkościach obrotowych konieczny jest inny typ podparcia [5]. Perspektywnym rozwiązaniem wydaje się opracowanie łożyska hybrydowego złożonego z aktywnego łożyska magnetycznego pełniącego funkcję podpory przy małych prędkościach obrotowych oraz łożyska elektrodynamicznego pracującego na zakresie wysokich prędkości obrotowych.

4. Bezłożyskowe maszyny elektryczne

Główną cechą maszyn bezłożyskowych jest integracja kilku maszyn elektrycznych w jedną funkcjonalną i konstrukcyjną całość. W literaturze można znaleźć różne definicje bezłożyskowych maszyn elektrycznych [4]. Tak więc: „maszyną bezłożyskową nazywamy maszynę elektryczną integrowaną poprzez pole magnetyczne

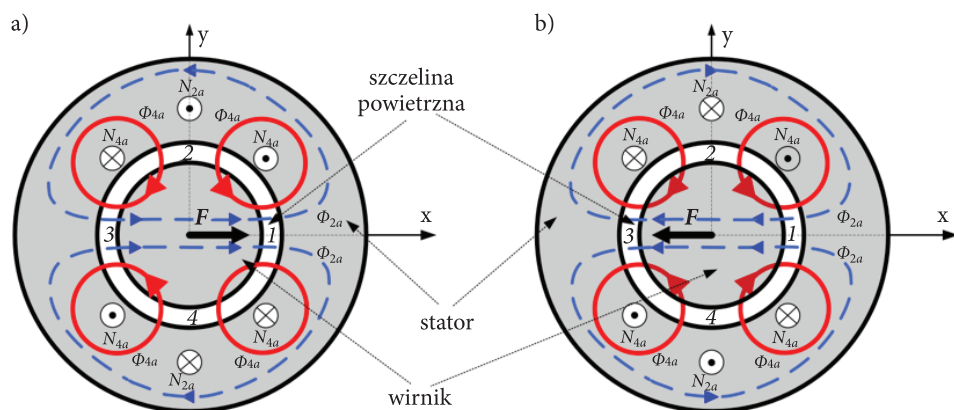
z łożyskami magnetycznymi”. Maszyna taka to złożony system mechatroniczny stanowiący synergiczną integrację zespołów mechanicznych, elektroniki, układów sterowania i regulacji. Maszynę bezłożyskową w odrzutowym silniku lotniczym można wykorzystać m.in. do napędzania sprężarki lub wentylatora.

W prezentowanym rozwiązaniu zastosowany zostanie bezłożyskowy silnik elektryczny, w którym pole magnetyczne wytwarza oprócz momentu obrotowego również siły lewitacji magnetycznej. W silniku takim klasyczne łożyska kulkowe zastępowane są aktywnym zawieszeniem magnetycznym, dzięki czemu eliminuje się siły tarcia między wirnikiem a statorem silnika, które występują w klasycznym mechanicznym układzie łożyskowania. Zaletą takiego rozwiązania jest poprawienie cech eksploatacyjnych silnika elektrycznego, tj. nagrzewania i zużywania się elementów trących, smarowania, wydzielania ciepła i generowania hałasu. Jedynym ograniczeniem, które może w takim układzie wystąpić, jest wysoka temperatura, która ma wpływ na właściwości magnetyczne materiałów wykorzystywanych w konstrukcji silnika. Jednak obecnie dostępne są już materiały magnetyczne niezmieniające swoich właściwości aż do temperatury około 400°C. Model laboratoryjny silnika bezłożyskowego przedstawiono na rysunku 9. Składa się on z podstawy montażowej silnika, modułu z łożyskiem spoczynkowym, modułu czujników pomiarowych, modułu układu samołożyskowania oraz silnika złożonego ze statora i wirnika z magnesami trwałymi.



Rys. 9. Model laboratoryjny bezłożyskowego silnika elektrycznego z magnesami trwałymi

W silnikach bezłożyskowych występują dwie grupy cewek generujących pole magnetyczne. Kierunek przepływu strumienia magnetycznego od tych cewek przedstawiono na rysunku 10a (cewki 2 i 4). Wypadkowe strumienie magnetyczne od tych cewek w szczelinie powietrznej w punkcie 3 sumują się, natomiast w punkcie 1 — odejmują. Tym samym wartość siły magnetycznej, która jest proporcjonalna do wartości strumieni w tych miejscach szczeliny, odpowiednio się zwiększa lub zmniejsza. Powstałe w ten sposób siły skierowane są przeciwnie, tzn. siła wypadkowa jest różnicą sił składowych. Zmiana kierunku prądu płynącego w cewce 2 doprowadza do zmiany kierunku strumieni magnetycznych generowanych przez tę cewkę (rys. 10b). Wówczas wartość strumienia magnetycznego w szczelinie w punkcie 1 zwiększy się, a w punkcie 3 zmniejszy. Zmianie ulegnie również kierunek wypadkowej siły magnetycznej. Tak więc dokonując pomiaru położenia wirnika względem nabiegowników bezłożyskowego silnika, można zmieniać wartość prądu w cewce 2 w taki sposób, aby wirnik zawsze zajmował stałe położenie. Natomiast jeżeli zamiast prądu stałego w cewce 4 popłynie prąd przemienny, to wytworzy się moment obrotowy, podobnie jak w klasycznych silnikach elektrycznych.



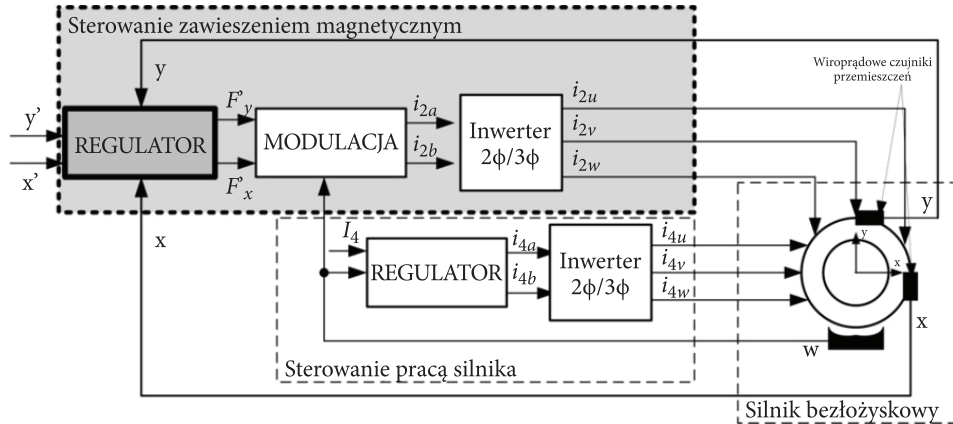
Rys. 10. Zasada generowania siły magnetycznej w bezłożyskowym silniku elektrycznym

Kluczowym zagadnieniem w bezłożyskowych silnikach elektrycznych jest sterowanie położeniem wirnika w szczelinie powietrznej (funkcja lewitacji) oraz sterowanie pracą takiej maszyny (funkcja silnika). Dlatego w układzie sterowania występują dwa obwody sterowania (rys. 11) — obwód sterowania aktywnym zawieszeniem magnetycznym oraz obwód sterowania pracą silnikową [7].

W obwodzie sterowania lewitacją wirnika sygnał o jego położeniu jest dostarczany do regulatora z wiropędowych czujników położenia. Regulator na podstawie sygnałów zadanych x' , y' porównuje je z sygnałami x , y proporcjonalnymi do aktualnego położenia wirnika i wylicza, na podstawie zadanego algorytmu regulacji, sygnał

proporcjonalny do wartości siły F'_x , F'_y . Sygnał ten poddawany jest dalej modulacji, która przetwarza jego wartość na wartość prądu i_{2a} , i_{2b} do zasilania uzwojeń statora.

W drugim obwodzie sterowania sygnał o położeniu wirnika w dostarczany jest do regulatora z czujnika kąta. Sygnał ten jest dodatkowo dostarczany do układu modulacji obwodu sterowania lewitacją wirnika.



Rys. 11. Struktura układu sterowania silnikiem bezłożyskowym

Maszyny bezłożyskowe ukierunkowane są więc przede wszystkim 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 i histereza. Oprócz poprawy parametrów technicznych zastosowanie nowych rozwiązań zwiększa bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji lotniczych.

5. Ogniwa paliwowe

Rozwój technologiczny oraz dbałość o ochronę środowiska przyczyniły się do opracowania technologii określanej jako MEA, tj. *More Electric Aircraft*. Jej głównym założeniem jest ograniczenie do niezbędnego minimum różnych źródeł energii i dążenie do instalowania jak największej liczby elektrycznych układów wykonawczych. Klasyczne podejście do zasilania systemów pokładowych statku powietrznego w energię elektryczną opiera się na wykorzystaniu prądnicy napędzanej przez silniki statku powietrznego. W przypadku zastosowania elektrycznych silników odrzutowych takie rozwiązanie nie może być wykorzystane. Dlatego należy zastanowić się nad innym.

Pierwszym z możliwych podejść jest zastosowanie lotniczych baterii akumulatorowych. Główną zaletą takiego rozwiązania jest zerowa emisyjność. Jednak czas pracy tego typu źródła energii oraz ciężar i objętość powodują, że dla klasycznego lotnictwa, przeznaczonego do transportu ludzi i ładunku, nie znajduje ono zastosowania jako podstawowe źródło zasilania w energię elektryczną. Istotnym problemem w procesie eksploatacji systemów zasilanych z baterii akumulatorowych jest stosunkowo długi czas ich ładowania. Ponadto nie zawsze można zaprojektować układ w taki sposób, aby baterie akumulatorowe były elementami łatwo wymiennymi. Obecnie w lotnictwie baterie akumulatorowe, jako podstawowe źródło energii elektrycznej, powszechnie stosowane są w małych bezzałogowych statkach powietrznych [3].

Dlatego należy zastanowić się nad alternatywnym źródłem energii zastępującym lub wspomagającym baterie akumulatorowe. Jednym z takich źródeł energii jest np. wodór, który w procesie reakcji utleniania przekształca energię chemiczną w energię elektryczną zdolną do zasilania układu.

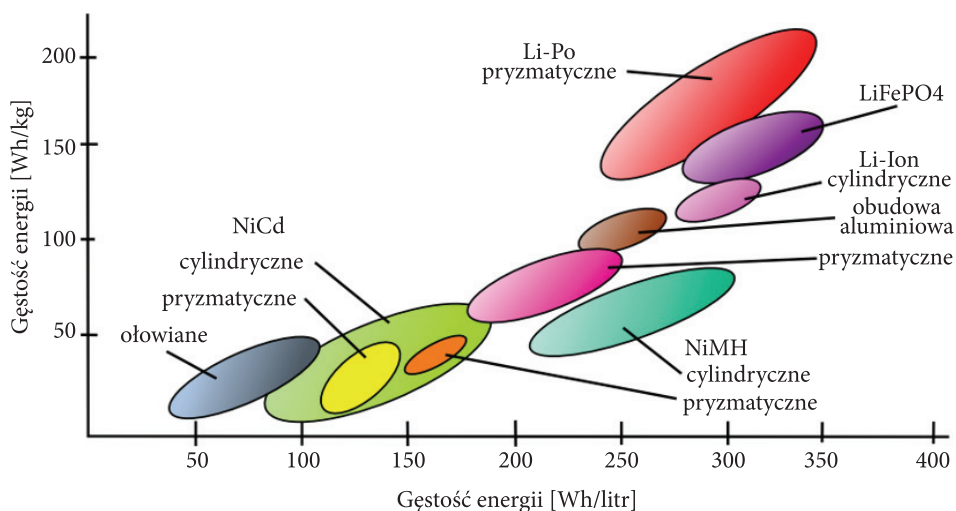
Innym rozwiązaniem są układy zajmujące się konwersją energii chemicznej w energię elektryczną nazywane ogniwami paliwowymi. Systemy te w ostatnich latach stają się coraz popularniejsze. Do głównych przedstawicieli tego typu źródeł zasilania można przede wszystkim zaliczyć ogniwa paliwowe [10]:

- z zestalonym elektrolitem tlenkowym (SOFC),
- ze stopionymi węglanami (MCFC),
- z kwasem fosforowym (PAFC),
- alkaiczne (AFC),
- z membraną polimerową (PEMFC).

Pośród wyżej wymienionych typów najlepsze cechy pod kątem zastosowania w systemach lotniczych mają ogniwa PEMFC. Charakteryzują się niską temperaturą pracy oraz bardzo krótkim czasem rozruchu. Bardzo istotną zaletą charakteryzującą te ogniwa jest również duża gęstość energii. Parametr ten w przypadku techniki lotniczej pozwala na optymalizację masy statku powietrznego.

Zasada działania wszystkich ogniw paliwowych jest podobna, pomimo tego, że wiele typów ogniw charakteryzuje się różnymi parametrami eksploatacyjnymi, w zależności od rodzaju zastosowanego paliwa, elektrolitu i temperatury pracy, np. w przedziale $80 \div 1000^\circ\text{C}$ [10].

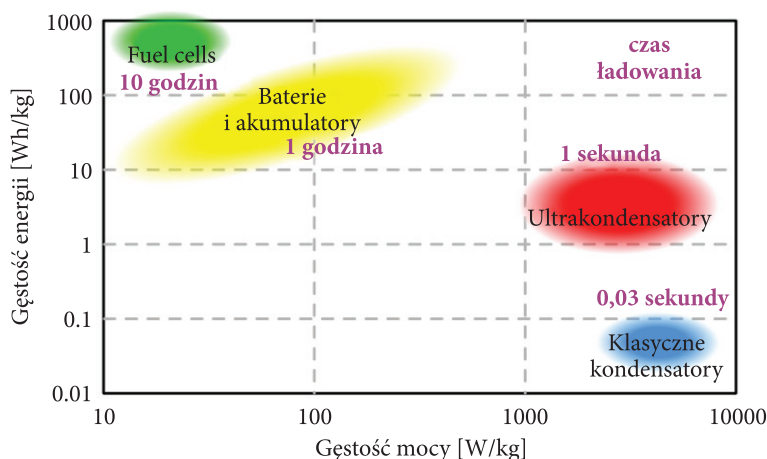
Wykorzystanie ogniw paliwowych do produkcji energii elektrycznej na statku powietrznym w aspekcie obniżenia emisyjności źródeł energii elektrycznej wydaje się bardzo dobrą alternatywą. W celu określenia walorów użytkowych tego typu źródeł energii należy dokonać pewnego ogólnego porównania w odniesieniu do innych źródeł energii. Pierwszym parametrem pozwalającym na porównanie źródeł energii jest gęstość energii. Jeżeli chodzi o baterie akumulatorowe, to mogą one osiągać gęstość energii rzędu nawet 200 Wh/kg , np. baterie litowo-polimerowe (rys. 12).



Rys. 12. Gęstość energii najpopularniejszych grup akumulatorów w Wh/kg na Wh/l [16]

Z kolei ogniwa paliwowe mogą osiągać gęstość nawet pięciokrotnie większą [15]. Dzięki gęstości energii sięgającej 1 kWh/kg (rys. 13) ogniwa paliwowe pod względem pojemności energii w jednostce masy są około pięciokrotnie lepsze od baterii akumulatorowych. Dla inżynierów zajmujących się optymalizacją konstrukcji lotniczych jest to bardzo istotny parametr. Dzięki tak dużej gęstości energii, jaką może zgromadzić w ogniwie paliwowym statek powietrzny, przy tej samej masie całkowitej może pokonać większy dystans lub przewieźć większy ładunek.

Innym istotnym parametrem porównawczym w odniesieniu do źródeł energii elektrycznej jest ich sprawność. Baterie akumulatorowe posiadają sprawność rzędu 95%. Pozostałe około 5% procent energii jest pochłaniane ze względu na niezerową rezystancję wewnętrzną. Ogniwa paliwowe wykorzystujące wodór do produkcji energii elektrycznej (PEMFC) mają sprawność około 50% (tab. 1). Pomimo tak niskiej rzeczywistej sprawności ogniwo paliwowych bilans ilości energii zgromadzonej w źródle do ilości energii przekazanej do układu jest lepszy na korzyść ogniwo paliwowych. Oczywiście należałoby poruszyć kwestie bilansu energetycznego: produkcji, przechowywania oraz transportu nośnika energii dla poszczególnych rozwiązań. Natomiast nie jest to istotny element w procesie eksploatacji źródła energii na statku powietrznym. Ważny jest przede wszystkim stosunek gęstości energii do sprawności układu, który dla prezentowanych rozwiązań jest na korzyść ogniwo paliwowych. Część energii, która jest przekształcana w energię cieplną w procesie reakcji utleniania, może zostać przekazana do wnętrza statku powietrznego w celu utrzymywania stałej temperatury układów elektronicznych.



Rys. 13. Gęstość energii i mocy uzyskiwana w źródłach energii [15]

Kolejnym parametrem istotnym pod względem użyteczności źródła energii jest gęstość mocy układu zasilania. Ogniwa paliwowe PEFMC, których jednym z substratów reakcji utleniania jest wodór, osiągają gęstość mocy rzędu 60 W/kg. Litowo-polimerowe baterie akumulatorowe posiadają gęstość mocy nawet do 900 W/kg. Parametr ten jest istotny dlatego, że silniki elektryczne podczas dużego zapotrzebowania na energię elektryczną potrzebują źródła zasilania, które będzie w stanie zaspokoić chwilowy pobór dużej mocy.

Pomimo tych ograniczeń firmy dominujące na rynku lotniczym, takie jak Boeing czy Airbus, prowadzą bardzo intensywne prace nad zastosowaniem alternatywnych źródeł napędu statku powietrznego oraz zasilania wyposażenia pokładowego. Mają już na tym polu pierwsze sukcesy w postaci m.in. takich statków powietrznych jak Dimona firmy Boeing czy też testy ogniów paliwowych realizowanych przez firmę Airbus na samolocie Piper M350 [12].

Biorąc pod uwagę parametry charakteryzujące ogniwa paliwowe i rozpatrując je pod kątem zastosowania ich jako podstawowe źródło zasilania, pojawia się spostrzeżenie, że idealnym rozwiązaniem dla elektrycznych silników lotniczych jest posiadanie hybrydowego źródła zasilania. Taki system hybrydowy byłby oparty na dwóch źródłach energii elektrycznej: ogniwach paliwowych i bateriach akumulatorowych. Ogniwo paliwowe może produkować energię, która będzie zużywana na bieżąco, a jej nadmiar należałoby przekazywać do baterii akumulatorowej. Z kolei bateria akumulatorowa byłaby w układzie rezerwowym źródłem zasilania. W warunkach lotu, w których zapotrzebowanie na energię elektryczną nie byłoby wystarczająco zaspokojone z samych ogniów paliwowych, system mógłby korzystać z zapasów energii zgromadzonych w bateriach akumulatorowych.

TABELA 1

Podstawowe rodzaje obecnie dostępnych ogniw paliwowych

Typ ogniwa paliwowego	Ogniwo paliwowe z zestalonym elektrolitem tlenkowym (Solid-oxide fuel cell — SOFC)	Ogniwo paliwowe ze stopionymi węglanami (MoNen-carbonate fuel cell — MCFC)	Ogniwo paliwowe z kwasem fosforowym (Phosphoric-acid fuel cell — PAFC)	Alkaliczne ogniwo paliwowe (Alkaline fuel cell — AFC)	Ogniwo z membraną polimerową (Polymer electrolyte membrane fuel cell — PEMFC)
Elektrolit	Nieporowaty stały tlenek metalu, najczęściej cyrkonu (ZrO_2) stabilizowany tlenkiem itru (Y_2O_3)	Mieszanina węglanów alkalicznych (Li, K, Na)	Stężony kwas fosforowy (H_2PO_4)	Roztwór wodorotlenku potasu (KOH)	Membrana polimerowa
Temperatura pracy	1000°C	650°C	160-220°C	80-120°C	80-140°C
Nośnik ładunku	Jony tlenu	Jony węgla	Jony wodoru	Jony wodorotlenku	Jony wodoru
Paliwo	Gaz ziemny, biogaz. Paliwo poddane reformingowi wewnętrznemu lub zewnętrznemu	Gaz ziemny, metanol, biogaz. Paliwo poddane reformingowi wewnętrznemu lub zewnętrznemu	Czysty wodór, gaz ziemny, metanol, biogaz. Paliwo poddane reformingowi zewnętrznemu	Wodór, hydrazyna N_2H_4 , metan	Wodór
Katalizator	Metatynian wapnia	Nikiel	Platyna	Platyna	Platyna
Sprawność	> 60%	> 60%	40÷50%	40÷50%	40÷50%
Moc istniejących instalacji	1÷250 kW	50 kW do 3 MW	do 10 MW	5÷100 kW	do 250 kW
Zastosowanie	Generacja rozproszona. Kogeneracja	Generacja rozproszona. Kogeneracja	Generacja rozproszona. Kogeneracja	Zasilacze przenośne. Transport. Instalacje kosmiczne i wojskowe	Transport. UPS-y. Zasilacze przenośne
Zalety	Wysoka temp. umożliwiająca pracę w kogeneracji	Wysoka temp. umożliwiająca pracę w kogeneracji	Wysoka sprawność w kogeneracji	Duża gęstość energii	Niska temp. pracy. Krótki czas rozruchu. Duża gęstość energii. Brak materiałów korodujących
Wady	Długi czas rozruchu	Stosunkowo szybka degradacja elementów wynikająca z właściwości korodujących elektrolitu. Długi czas rozruchu	Drogi katalizator. Elektrolit o właściwościach silnie korodujących	Drogi katalizator. Wrażliwość na CO i CO ₂	Drogi katalizator

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiona została koncepcja układu łożyskowania wirnika elektrycznego silnika odrzutowego z wykorzystaniem zawiesznień magnetycznych. Zaproponowane rozwiązanie pozwala inaczej spojrzeć na silniki odrzutowe. Wyeliminowanie z silnika turbiny, komory spalania i układu smarowania znacząco zmienia konstrukcję silnika. Ponadto zastosowanie napędu elektrycznego do sterowania prędkością obrotową sprężarki ułatwia sterowanie wartością ciągu silnika oraz dystrybucję energii. Odrzutowy silnik elektryczny jest układem bezemisyjnym, który nie produkuje zanieczyszczeń. Ze względu na łatwą dystrybucję energii elektrycznej w konstrukcji statku powietrznego można użyć większą liczbę odrzutowych silników elektrycznych, które dadzą sumaryczny ciąg. Rozwiązanie takie zastosowano w start-upie Lilium [13]. Tym samym uzyskanie odpowiednio dużej wartości ciągu można połączyć z podwyższeniem manewrowości statku powietrznego. W dużych silnikach lotniczych może wystąpić problem z przekazaniem energii elektrycznej i źródłem energii o odpowiednio dużej gęstości. Dotychczasowe badania koncentrują się na opracowaniu silników turbinowych, które napędzają małe statki powietrzne lub wspomagają pracę silników klasycznych w samolotach średniego zasięgu [11, 12, 14].

Podwyższenie sprawności i niezawodności oraz znaczne uproszczenie konstrukcji można uzyskać przez zastosowanie magnetycznego systemu łożyskowania wirnika. Bezłożyskowy silnik elektryczny napędzający sprężarkę/wentylator zapewnia zamianę energii elektrycznej na mechaniczną i jest jedną z promieniowych podpór wirnika. Zastosowanie pasywnego łożyska promieniowego jako drugiej podpory promieniowej ogranicza pobór energii elektrycznej. Łożyska elektrodynamiczne nadają się szczególnie jako podpory wirników obracających się z bardzo dużymi prędkościami, jednak przy wybiegu i zatrzymaniu niezbędne będą podpory spoczynkowe. Siłę ciągu przenosi magnetyczne homopolarne łożysko osiowe, które po zintegrowaniu ze sprężarką/wentylatorem umożliwi zbudowanie silnika o znacznie zredukowanych wymiarach.

Statek powietrzny wyposażony w elektryczne silniki odrzutowe, zasilane przez ogniwa paliwowe i akumulatory, nie emituje szkodliwych zanieczyszczeń. W wyniku pracy ogniw paliwowych powstaje para wodna, która jest nieszkodliwa dla środowiska. Ponadto do sterowania łożyskami magnetycznymi i bezłożyskowym napędem elektrycznym niezbędne są czujniki określające położenie kątowe wału oraz przemieszczenie wirnika w szczelinie powietrznej. Czujniki te stanowią źródło informacji o stanie technicznym maszyny, a aktywny układ sterowania może kontrolować wyważenie wirnika oraz przeciwdziałać wpadaniu w drgania, co poprawia bezpieczeństwo wykonywania operacji powietrznych.

W Zakładzie Awioniki ITL WAT od wielu lat prowadzone są prace nad konstrukcjami zawiesznień magnetycznych. Przedstawione na rysunkach 7, 8 i 9 łożyska magnetyczne i elektryczny silnik bezłożyskowy zostały opracowane w laboratorium

Zakładu Awioniki. Jednocześnie prowadzone są zaawansowane prace nad wysoko wydajnymi źródłami energii. Dotychczas zdobyte doświadczenie i wiedza w zakresie prezentowanych technologii umożliwiają zbudowanie elektrycznego silnika odrzutowego o ciągu do 1 kN, który można wykorzystać do napędzania bezałogowych statków powietrznych. Zbudowanie takiego silnika odrzutowego wymaga dodatkowo zaangażowania specjalistów, którzy zaprojektują sprężarkę, wlot i dysze silnika.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 13.12.2021 r. Zatwierdzono do publikacji 17.02.2022 r.

Krzysztof Falkowski <https://orcid.org/0000-0002-0279-3791>
Maciej Henzel <https://orcid.org/0000-0001-9519-5952>
Paulina Mazurek <https://orcid.org/0000-0002-0938-0113>
Mariusz Janczewski <https://orcid.org/0000-0001-5557-1618>
Mariusz Ważny <https://orcid.org/0000-0001-8532-073X>

LITERATURA

- [1] BALICKI W., CHACHURSKI R., GODZIMIRSKI J., KOZAKIEWICZ A., SZCZECIŃSKI J. et al., *Lotnicze silniki turbinowe: konstrukcja – eksploatacja – diagnostyka*. cz. I i II, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2012.
- [2] BORODZIK F., KAMIŃSKI H., KRĘŻAŁEK J., *Lotnictwo gospodarcze*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1969.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] FALKOWSKI K., *Pasywne zawieszzenia magnetyczne*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2016.
- [6] FALKOWSKI K., GOSIEWSKI Z., *Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2003.
- [7] HENZEL M., *The robust controller for the bearingless electric motor with permanent magnets*, The 7th International Conference "Mechatronic Systems and Materials", Caunas, Lithuania 2011.
- [8] HENZEL M., OLEJNIK A., ŻOKOWSKI M., *The new construction of actuators for More Electric Aircraft*, The 6th International Conference "Mechatronic Systems and Materials", Opole, Polska, 2010.
- [9] ISO14839-1, *Mechanical vibration – Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings. Part 1: Vocabulary*.
- [10] PASKA J., KŁOS M., *Ogniwa paliwowe przyszłością wytwarzania energii elektrycznej i ciepła?*, Przegląd Elektrotechniczny, Sigma NOT, 8, 2010.
- [11] Strona Agencji Lotniczej Altair, https://www.altair.com.pl/news/view?news_id=27737 [dostęp: 25.11.2021 r.].
- [12] DEREWIENKO E., *Airbus, Siemens i Rolls Royce będą pracować nad samolotem hybrydowym*, Rynek Lotniczy, 29.11.2017, <https://www.rynek-lotniczy.pl/wiadomosci/airbus-siemens-i-rollsroyce-beda-pracowac-nad-samolotem-hybrydowym-2553.html>; [dostęp: 01.12.2021 r.].

- [13] PISKORZ A., *Elektryczny odrzutowiec Liliu wzbił się w powietrze*, Geekweek, 22.10.2019, <https://geekweek.interia.pl/news-elektryczny-odrzutowiec-lilium-wzbil-sie-w-powietrze,nId,3290947> [dostęp: 10.11.2021 r.].
- [14] LOGA-SOWIŃSKI K., *Rolls-Royce produkuje silniki elektryczne*, Pasażer.com, 14.06.2019, <https://www.pasazer.com/news/41571/rolls,royce,projektuje,silniki,elektryczne.html> [dostęp: 27.12.2021 r.].
- [15] *Wybór konstruktora. Akumulatory i nie tylko*, Elektronika Praktyczna, 3, 2015, 58-62, <https://ep.com.pl/files/11012.pdf> [dostęp: 11.11.2021 r.].

K. FALKOWSKI, M. HENZEL, P. KURNYTA-MAZUREK,
M. JANCZEWSKI, M. WAŻNY

Magnetic Suspension Technology for Electric Jet Engines

Abstract. Reducing the emission of harmful compounds such as carbon dioxide and nitrogen oxides has been identified as a priority target in the European Union. Aviation is one of the main sources of pollution. The reduction of pollutant emissions can be achieved by the use of the electric jet engine. This type of a jet engine differs significantly from a kerosene-powered engine. The article presents the concept of an electric jet engine with the rotor that is magnetically suspended. Demonstrators of active and passive magnetic bearing technologies and bearingless electric motors, developed at the Avionics Department, are presented in the paper.

Keywords: mechanical engineering, jet engine, magnetic bearing, bearingless motors, fuel cell
DOI: 10.5604/01.3001.0015.8771