

# Pracownia Zawiesznień Magnetycznych Laboratorium Badań Napędów Lotniczych WAT

Aleksander Olejnik, Krzysztof Falkowski, Maciej Henzel

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

**Streszczenie:** W artykule opisane zostały efekty realizacji projektu POIG.02.02.00-14-022/09 Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, którego głównym celem było utworzenie w Wojskowej Akademii Technicznej Laboratorium Badań Lotniczych. W Laboratorium tym powstała m.in. Pracownia Zawiesznień Magnetycznych, która będzie prowadziła unikalne w skali Kraju i Unii Europejskiej numeryczne oraz doświadczalne badania nad opracowywaniem pasywnych i aktywnych zawiesznień magnetycznych, ich optymalizacją, sterowaniem, zasilaniem, itp. Działalność Laboratorium będzie nakierowana na rozwiązywanie problemów napędów lotniczych i w istotny sposób przyczyni się do rozwiązywania problemów eksploatacyjnych, umożliwi modernizację testowanych konstrukcji, jak również projektowanie nowych.

**Słowa kluczowe:** zawiesznienia magnetyczne, silnik lotniczy

## 1. Wprowadzenie

W Wojskowej Akademii Technicznej i Politechnice Warszawskiej realizowany jest projekt POIG.02.02.00-14-022/09 pt. *Modernizacja i budowa nowej infrastruktury badawczej Wojskowej Akademii Technicznej i Politechniki Warszawskiej na potrzeby wspólnych numeryczno-doświadczalnych badań lotniczych silników turbinowych*.

Bezpośrednim celem projektu jest modernizacja i budowa nowej zintegrowanej infrastruktury badawczej w wiodących uczelniach technicznych kraju z zakresu badań silników lotniczych oraz wzmocnienie potencjału badawczego współpracujących ze sobą Laboratorium Badań Napędów Lotniczych WAT oraz Laboratorium Aerodynamiki Turbin Lotniczych i Spalania Politechniki Warszawskiej.

Głównymi celami prowadzonych prac badawczych w nowo powstałych Laboratoriach to opracowanie nowoczesnych konstrukcji silników lotniczych umożliwiających:

- ograniczenie emisji szkodliwych czynników (spalin, hałasu) zgodnie z zaleceniami Komisji Europejskiej (ACARE Vision 2020);
- obniżenie zużycia paliwa, a przez to poprawa konkurencyjności polskiego przemysłu silników lotniczych;
- transfer najnowocześniejszych światowych technologii, co przyczyni się do realizacji polityki Zrównoważonego Rozwoju.

Działalność Laboratorium Badań Napędów Lotniczych WAT obejmować będzie aerodynamikę przepływów

w silnikach, statykę i dynamikę silników i ich elementów, badanie właściwości cieplnych materiałów oraz budowę i badanie zawiesznień magnetycznych.

W zakresie badań przepływu w turbinowych silnikach odrzutowych prowadzone będą prace naukowo-badawcze dotyczące zagadnień aerodynamiki kanałów przepływowych turbin, a także kanałów międzyłopatkowych wieńców dyszowych i wirnikowych, aerodynamiki oraz aerospężystości pojedynczych łopatek dyszowych i wirnikowych oraz ich palisad z wykorzystaniem charakterystyk otrzymanych z badań wagowych modeli w tunelach aerodynamicznych oraz obliczeń numerycznych. Oprócz wyposażenia i oprogramowania przewidzianego do zakupu do dyspozycji laboratorium będą m.in. zmodernizowane w ramach projektu tunele aerodynamiczne małych i dużych prędkości.

W zakresie statyki i dynamiki lotniczych zespołów napędowych Laboratorium zajmować się będzie modelowaniem numerycznym zespołów wirnikowych i ich elementów, np. badanie zjawiska flatteru łopatek. Wyznaczane będą właściwości dynamiczne konstrukcji na bazie modeli numerycznych, a wyniki porównywane będą z wynikami badań eksperymentalnych. W zakresie pomiarów cieplnych badane będą wielkości gazodynamiczne w układach przepływowych oraz własności cieplne materiałów stosowanych do budowy turbinowych silników lotniczych i energetycznych turbin gazowych. Wyposażenie będzie obejmować przyrządy do pomiaru dyfuzyjności cieplnej, przewodności cieplnej, ciepła właściwego oraz rozszerzalności cieplnej materiałów na potrzeby innych badań prowadzonych w Laboratorium.

W zakresie aktywnych zawiesznień magnetycznych Laboratorium będzie prowadziła unikalne w skali kraju numeryczne oraz doświadczalne badania nad opracowywaniem pasywnych i aktywnych zawiesznień magnetycznych, ich optymalizację, sterowanie nimi, zasilanie, itp. Laboratorium zajmie się ponadto dostosowaniem łożysk magnetycznych oraz ich osprzętu dla konkretnych aplikacji w lotniczych silnikach turbinowych.

Na terenie Politechniki Warszawskiej powstanie *Laboratorium Aerodynamiki Turbin Lotniczych i Spalania*, które będzie prowadziła prace badawcze z zakresu wewnętrznej aerodynamiki silników lotniczych i problemów spalania. Realizacja tego celu wymaga przeprowadzenia gruntownej modernizacji i rozbudowy istniejącej infrastruktury i zakupu nowej aparatury badawczej. W szczególności planuje się budowę dwóch nowych tuneli aerodynamicznych tunelu łopatkowego i tunelu zmiennej turbulencji oraz unowocześnienie następujących stanowisk badawczych:

- tunelu transonicznego;
- stanowiska do badań komór spalania;
- hamowni silnika śmigłowego.

Realizacja powyższych elementów pozwoli na prowadzenie badań na światowym poziomie, które będą obejmowały następujące tematy:

- modelowanie (doświadczalne i numeryczne) przepływów jedno- i wielofazowych ze spalaniem;
- badania warstwy przyściennej, śladów spływowych i przepływów w kanałach międzyłopatkowych;
- prace studyjne i badawcze dotyczące zmniejszenia oporu profilowego łopatek, hałasu turbin, sterowania przepływem, przejściem laminarno-turbulentnym oraz procesem oderwania;
- rozwój metod chłodzenia łopatek turbin;
- rozwijanie metodyki pomiaru i wizualizacji szybkozmiennego ciśnienia i prędkości w jedno-, dwu- i trójwymiarowym przepływie ściśliwym.

W zakresie badań aplikacyjnych przewiduje się realizację następujących tematów:

- badania nowych rodzajów profili łopatek turbinowy ze zwiększonym zakresem przepływu laminarnego i sterownym przejściem laminarno-turbulentnym;
- analiza pracy palisady przy pulsującym ciśnieniu zasilania;
- analiza chłodzenia łopat turbiny przepływem przez porowaty materiał łopaty oraz przez otwory wentylacyjne w ścianach łopaty;
- analiza pracy palisady z łopatkami o krzywoliniowej krawędzi natarcia, łopatkami z kłapkami Gurneya, ze skośnymi łopatkami.

Przewiduje się też program badań dotyczący problematyki spalania w silnikach lotniczych:

1. badanie możliwości redukcji emisji gazów szkodliwych w nowych systemach spalania;
2. badanie gazodynamicznych i akustycznych oddziaływań komory spalania i turbiny oraz ich współpracy w rzeczywistym silniku.

Laboratoria WAT i Politechniki Warszawskiej będą także służyć podnoszeniu kwalifikacji kadry naukowo-badawczej i doktorantów. W laboratoriach przewiduje się również prowadzenie zajęć dydaktycznych oraz dyplomowych prac końcowych na studiach I i II stopnia.

## 2. Pracownia zawiesznień magnetycznych

Jednym z zespołów realizujących główny cel projektu jest utworzona w Laboratorium WAT pracownia zawiesznień magnetycznych. Pracownia ta prowadzi badania naukowe ukierunkowane na wykorzystanie zjawiska aktywnej i pasywnej lewitacji magnetycznej w technice lotniczej, których wyniki publikowane były na wielu konferencjach krajowych i zagranicznych [3], [5], oraz w czasopiśmie naukowych [1], [2], [4]. Obecnie można zaobserwować bardzo dynamiczny rozwój systemów lewitacji magnetycznej i ich systematyczne wykorzystanie w aplikacjach lotniczych i kosmicznych. Systemy łożysk magnetycznych wykorzystywane są w:

- silnikach turbinowych;
- lotniczych układach wykonawczych;
- bezłożyskowych napędach i generatorach;
- systemach startu i lądowania inercyjnego systemu sterowania i stabilizacji położenia w przestrzeni obiektów kosmicznych;
- kinetycznych akumulatorach energii umożliwiających zasilanie pojazdu kosmicznego przy wchodzeniu w cień ziemi;
- aktywnych systemach zawiesznień magnetycznych do tłumienia, monitorowania, diagnozowania i sterowania drganiami;
- bezłożyskowych napędach liniowych i obrotowych (urządzeniach, w których łączy się zjawisko lewitacji magnetycznej i generowanie momentu obrotowego lub siły pociągowej);
- bezłożyskowych prądnico-rozrusznikach dla lotniczych silników turbinowych łączących funkcję łożyska, silnika elektrycznego i prądnicy;;
- ciągach transportu magnetycznego umożliwiającego przenoszenie ładunków w warunkach braku grawitacji;
- wyrzutniach liniowych z lewitacją magnetyczną, dla statków powietrznych i kosmicznych;
- inercjalnych przyrządach pomiarowych – giroskopach i przyspieszeniomierzach dla systemów nawigacyjnych o bardzo dużej precyzji pomiaru parametrów ruchu.

Ze względu na bardzo dobre właściwości funkcjonalne zawiesznień magnetycznych (praca w bardzo niskich temperaturach i wysokiej próżni), rozwiązania tego typu znajdują szerokie zastosowanie w technologiach kosmicznych [5].

Kadra naukowo-dydaktyczna pracowni posiada bogate doświadczenie w zakresie projektowania systemów łożyskowania [2], [4], [5]. Systemy łożyskowania projektowane i wykonywane przez pracowników zespołów można spotkać w urządzeniach wykonywanych przez Politechnikę Gdańską, Politechnikę Białostocką, Akademię Górniczo-Hutniczą i Politechnikę Wrocławską.

Obecnie zespół badawczy prowadzi prace nad zbudowaniem lotniczych układów wykonawczych z bezłożyskowymi napędami elektrycznymi i systemami łożyskowania silników lotniczych oraz pędników pojazdów podwodnych.



**Rys. 1.** Pasywne promieniowe łożysko magnetyczne opracowane i wykonane w WAT [2]

**Fig. 1.** Passive radial magnetic bearing elaborated and executed in Military University of Technology [2]

Na rys. 1–4 przedstawione są przykłady konstrukcji wykonanych w WAT. W zakresie realizowanych projektów zespół badawczy realizuje projekty obejmujące wykonanie siłowników, zasilaczy, systemów sterowania i łożysk pomiarowych. Prowadzone są również prace mające na celu wykonanie bezłożyskowych maszyn i generatorów [5].



**Rys. 2.** Aktywne heteropolarne łożysko magnetyczne opracowane i wykonane w WAT [1]

**Fig. 2.** Active homopolar radial magnetic bearing elaborated and executed in Military University of Technology [1]



**Rys. 3.** Aktywne heteropolarne osiowe łożysko magnetyczne opracowane i wykonane w WAT [3]

**Fig. 3.** Active homopolar axial magnetic bearing elaborated and executed in Military University of Technology [3]



**Rys. 4.** Aktywne heteropolarne promieniowe łożysko magnetyczne opracowane i wykonane w WAT [1]

**Fig. 4.** Active homopolar radial magnetic bearing elaborated and executed in Military University of Technology [1]

### 3. Infrastruktura pracowni

W ramach realizowanego projektu przygotowano wyposażenie i infrastrukturę pracowni do:

- projektowania wysokosprawnych zasilaczy i systemów elektroenergetycznych na potrzeby systemów sterowania aktywnego;
- projektowania zaawansowanych systemów sterowania;
- projektowania obwodów elektromagnetycznych siłowników i układów wykonawczych;
- integracji i testowania systemów zawiesznień magnetycznych.



**Rys. 5.** Stanowisko do pomiaru charakterystyk dynamicznych zawiesznień magnetycznych

**Fig. 5.** The laboratory stand for investigations of dynamic characteristics of magnetic suspensions



**Rys. 6.** Stanowisko do pomiaru charakterystyk statycznych zawiesznień magnetycznych

**Fig. 6.** The laboratory stand for investigations of static characteristics of magnetic suspensions

Pracownia wyposażona jest w stanowiska umożliwiające wyznaczenie charakterystyk statycznych i dynamicznych aktywnych zawiesznień magnetycznych (rys. 5 i 6). Każde stanowisko składa się ze stabilnej ramy dostosowanej do obciążenia o wartości 600 kg. Na ramie można zamontować osprzęt, który pozwala zbudować linię wirnika o długości do 5 m. Poszczególne elementy, takie jak czujniki, napęd, łożyska osiowe i promieniowe mocowane są do uniwersalnych podpór. Dodatkowo przygotowano specjalistyczny osprzęt, który umożliwia pomiar sił osiowych i promieniowych w funkcji położenia wirnika i prądów płynących w uzwojeniach maszyny elektrycznej.

Dokładność ustawienia wirnika wynosi do 1  $\mu\text{m}$ , a ugięcie wirnika 5  $\mu\text{m}$  przy maksymalnym zakresie pomiarowym czujników siły.

Całość stanowisk, dopełniają systemy akwizycji i rejestracji parametrów. W pracowni do rejestracji i archiwizacji wykorzystywane są systemy firmy National Instruments oraz dSpace. Pomiary mogą być realizowane w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem systemu PXI i CRIO. Dodatkowo stanowiska są wyposażone w sprzęt i oprogramowanie umożliwiające szybkie prototypowanie i testowanie cyfrowych układów sterowania pracujących w czasie rzeczywistym.

Pracownia zawiesznień magnetycznych wyposażona jest również w oprogramowanie dedykowane do tego typu zadań. Podstawowe zadania projektowe, testowe i weryfikacyjne wykonywane są w środowisku Matlab-Simulink oraz LabView.

W zakresie komputerowego wspomaganie projektowania pracownia wyposażona jest w oprogramowanie do projektowania elementów mechanicznych, elektrycznych, elektronicznych, elektromagnetycznych i magnetycznych.

Podstawowe programy wykorzystywane w pracowni to: AutoDesk Inventor, Altium Designer, MultiSim, Comsol Multiphysics, ISE Xilinx, Opera, LabView, Matlab-Simulink.

Oprogramowanie umożliwia wymianę danych między poszczególnymi środowiskami i ich integrację w ramach projektowania złożonych systemów mechatronicznych.

Przykładem, takiego podejścia są łożyska magnetyczne, w procesie projektowania których można wyróżnić następujące fazy:

1. Wstępne obliczenia projektowe – najczęściej wykonywane w środowisku programu Matlab z wykorzystaniem języka skryptowego.
2. Wykonanie geometrii 2D i 3D z uwzględnieniem ograniczeń technologicznych w programie AutoDesk Inventor.
3. Wygenerowanie z wykorzystaniem „Live Link for Inventor” modeli niezbędnych do analiz metodą elementów skończonych w środowisku Comsol Multiphysics.
4. Wykonanie analiz statycznych i dynamicznych metodą elementów skończonych.
5. Wygenerowanie w środowisku Comsol Multiphysics z wykorzystaniem „Live Link for Matlab” m-plików, które wykorzystywane są do symulacji dynamicznych w środowisku Matlab-Simulink.
6. Wykorzystanie procedur środowiska Matlab w programie Comsol Multiphysics do automatyzacji i przyspieszenia obliczeń.
7. Szybkie prototypowanie w środowisku Matlab-Simulink i LabView układów i praw sterowania oraz integracja zaawansowanych praw z wykorzystaniem MathScript w LabView.
8. Wsparcie otrzymanych wyników przez analizy w środowisku MultiSim i jego integracja z LabView.
9. Wykonanie prototypów układów elektroenergetycznych i ich testowanie w środowisku MultiSim i Altium Designer.

10. Integracja i wykonanie testów z wykorzystaniem programów MultiSim, LabView, Matlab i Comsol Multiphysics (dołączenie modeli elektrycznych zasilania „modele 1D” do symulacji wykonanych w programie Comsol Multiphysics).

Wybór oprogramowania nie jest przypadkowy i ukierunkowany na głęboką integrację na potrzeby szybkiego projektowania zaawansowanych systemów mechatronicznych.

Pracownia wyposażona jest również w inną aparaturę naukowo-badawczą czołowych producentów obejmującą:

- wysokiej klasy czujniki do pomiaru wielkości mechanicznych (parametry ruchu);
- przyrządy do pomiaru i rejestracji parametrów elektrycznych (mierniki, oscyloskopy, mostki pomiarowe RLC/M);
- pomiar wielkości magnetycznych (dwu-, trójosiowe sondy dla gaussomierza);
- generowanie sygnałów i zasilacze;
- przetwarzanie sygnałów;
- specjalistyczny sprzęt programowalny z wykorzystaniem systemów czasu rzeczywistego i układów FPGA.

Do wykonywania tak złożonych zadań przygotowana została odpowiednia infrastruktura. Na zdjęciach przedstawione są pomieszczenia pracowni wzmacniaczy aktywnych łożysk magnetycznych (rys. 7), optymalizacji obwodów magnetycznych (rys. 8) oraz sterowania i pomiarów (rys. 9).



**Rys. 7.** Pracownia wzmacniaczy aktywnych łożysk magnetycznych

**Fig. 7.** Power systems of active magnetic bearings workroom



**Rys. 8.** Pracownia optymalizacji obwodów magnetycznych

**Fig. 8.** The optimization of magnetic circuit workroom.



**Rys. 9.** Pracownia sterowania i pomiarów  
**Fig. 9.** Control and measurement workroom

## 4. Podsumowanie

Pracownia zawiesznień magnetycznych dedykowana jest do prowadzenia badań mających na celu wdrażanie technologii zawiesznień magnetycznych w technice lotniczej i kosmicznej. Dzięki realizacji projektu POIG.02.02.00-14-022/09 zbudowano odpowiednią infrastrukturę, zakupiono aparaturę naukowo-badawczą i oprogramowanie. Dzięki temu zorganizowano unikatową w Unii Europejskiej placówkę przygotowaną do prowadzenia prac w zakresie aktywnych zawiesznień magnetycznych. Ponadto zespół naukowy posiada umiejętności realizacji zadań i jest gotowy do ich podjęcia. Przejawia się to zainteresowaniem jakie wykazują placówki naukowe z terenu Unii Europejskiej prowadzonymi badaniami w WAT w omawianym zakresie.

Ponadto zespół badawczy w ramach pracowni gotowy jest do podjęcia innych zadań związanych z wyposażeniem awionicznym, automatyką, sterowaniem i mechatroniką lotniczą. O takich możliwościach świadczą realizowane przez zespół badawczy projekty bezpilotowych aparatów latających typu Quadrotor, głowic obserwacyjnych oraz sterowania takimi obiektami.

## Bibliography

1. Gosiewski Z., Falkowski K., *Multifunctional Magnetic Bearings*, Monograph 19 of the Scientific Library of the Aviation Institute, Warsaw, 2003, (in Polish).
2. Falkowski K., Henzel M., *High efficiency radial passive magnetic bearing*, "Solid State Phenomena", Vol. 164 – Mechatronic Systems and Materials: Mechatronic Systems and Robotics, 2010, Trans Tech Publications Ltd, Zurich, 360–365, ISBN/ ISBN-13: 3-908451-84-1 / 978-3-908451-84-6
3. Henzel M., Żokowski M., Olejnik A., *The new construction of actuators for More Electric Aircraft*, [in:] The 6<sup>th</sup> International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM 2010, Opole, Poland.
4. Henzel M., Falkowski K., Żokowski M., *The analysis of the control system for the bearingless induction electric motor*, "Journal of Vibroengineering", ISSN 1392-8716, March 2012. Volume 14, ISSUE 1, ISSN 1392-8716.
5. The research report of scientific research under grant No. O N509 032736, (in Polish). ■

## Magnetic Suspension Workroom of Aircraft Engine Laboratory in Military University of Technology

**Abstract:** In the paper are presented results of realization in Military University of Technology of The Innovative Economy Programme. The main goal of the project is organization of the Aircraft Engines Research Laboratory. There are the Magnetic Suspension Workroom. There are realized the unique in Poland and European Union research investigations under passive and active magnetic suspensions, their optimization, control, supplying, etc. The Engine Laboratory will find solutions of operation problems, reliability of constructions. It makes possible modernization of investigated constructions and designing practical of new applications.

**Keywords:** magnetic suspension, aircraft engine

### prof. dr hab. inż. Aleksander Olejnik

Prof. dr hab. inż. Aleksander Olejnik (ur. 1948 w Łodzi) jest absolwentem Wydziału Mechanicznego WAT, na którym studiował w latach 1968–1973, uzyskując tytuł zawodowy magistra inżyniera. Na tym wydziale uzyskał także stopnie naukowe: doktora (1979) oraz doktora habilitowanego nauk technicznych (1988). Tytułem naukowym profesora został uhonorowany w 1996. Działalność naukowa dotyczy zagadnień aerosprężystości układów powierzchniowych, budowy dyskretnych modeli dynamicznych samolotów i turbinowych silników lotniczych oraz problematyki z obszaru bezpieczeństwa statków powietrznych

*e-mail:* [aleksander.olejnik@wat.edu.pl](mailto:aleksander.olejnik@wat.edu.pl)



### dr inż. Krzysztof Falkowski

Dr inż. Krzysztof Falkowski jest absolwentem Wojskowej Akademii Technicznej. W 1999 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), a od 1998 pracownik naukowo-dydaktyczny, doktor nauk technicznych (2004) w dyscyplinie: mechatyka i specjalności: systemy sterowania. Zajmuje się zagadnieniami teorii sterowania oraz lotniczych systemów sterowania, układów wykonawczych oraz systemów pomiarowych. Zajmuje się organizacją pracowni zawiesznień magnetycznych w Laboratorium silników lotniczych WAT

*e-mail:* [maciej.henzel@wat.edu.pl](mailto:maciej.henzel@wat.edu.pl)

