

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Pomiar strumienia elektromagnetycznego w aktywnym łożysku magnetycznym z wykorzystaniem elastycznych czujników Halla

ANDRZEJ KIERDELEWICZ

**KATEDRA AUTOMATYKI I ROBOTYKI, WYDZIAŁ MECHANICZNY, POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA,
BIAŁYSTOK**

Słowa kluczowe: strumień elektromagnetyczny, czujniki Halla, łożysko magnetyczne

STRESZCZENIE:

Artykuł opisuje metodę pomiaru strumienia elektromagnetycznego w aktywnym łożysku magnetycznym z wykorzystaniem elastycznych czujników Halla zbudowanych na bazie ultracienkiej folii poliimidowej. W pracy opisano poszczególne elementy układu: aktywne łożysko magnetyczne, zaprojektowany wzmacniacz sygnału oraz wykorzystane czujniki Halla. Przeprowadzono badania układu pomiarowego strumienia elektromagnetycznego w aktywnym łożysku magnetycznym dla stałej i zmiennej szerokości szczeliny powietrznej. Dla przyjętych konfiguracji otrzymano wartości indukcji magnetycznej zgadzające się z parametrami badanego łożyska magnetycznego. Podgląd oraz zapis danych mierzonych zrealizowano przy pomocy procesora sygnałowego dSpace oraz oprogramowania ControlDesk 5.4. Wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają poprawność zaprojektowanego i wykonanego układu pomiarowego. Dokładność metody znajduje się w 5-procentowym marginesie błędów w porównaniu do innych metod (cewka oraz przyrząd całkujący, estymacja na podstawie przemieszczenia oraz prądu zasilającego cewkę).

Measurement of electromagnetic flux in active magnetic bearing with use of flexible Hall sensors

Keywords: electromagnetic flux, kapton-foil Hall sensors, active magnetic bearing

ABSTRACT:

This paper describes the method of measuring electromagnetic flux in an active magnetic bearing using flexible kapton-foil Hall sensors. The measurement system includes active magnetic bearing, authorial performed signal amplifiers and Hall sensors. The electromagnetic flux measurements were performed for the active magnetic bearing with different values of the air-gap. Obtained values of magnetic induction were related to the parameters of the tested magnetic bearing. The data acquisition system consists of the dSpace signal processor with ControlDesk 5.4 software. The experimental results confirm the correctness of the proposed flux measurement system. The accuracy of the method is in the 5% margin of error, compared to other methods (coil and integral device, estimation based on the displacement and current supplying the coil).

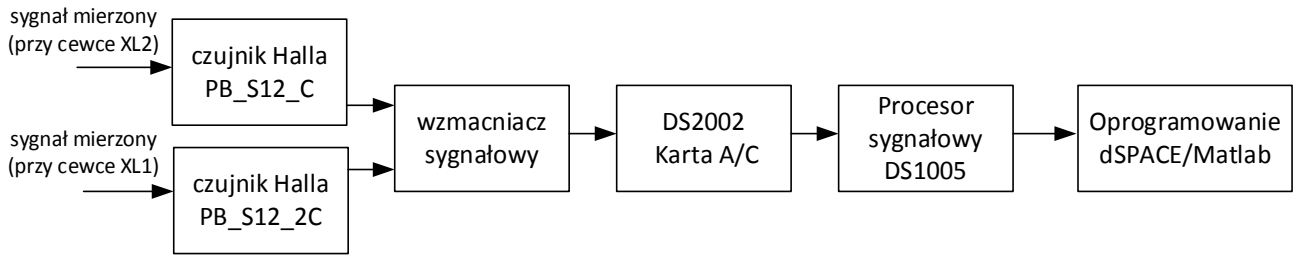
1. WSTĘP

Aktywne łożysko magnetyczne (AŁM) jest urządzeniem mechatronicznym, łączącym w sobie elementy z dziedzin: mechaniki, automatyki i elektroniki. Działanie AŁM opiera się na wykorzystaniu zjawiska lewitacji magnetycznej, polegającej na bezkontaktowym unoszeniu się obiektu ferromagnetycznego w polu elektromagnetycznym. Łożyska magnetyczne mają wiele cech odróżniających je od klasycznych rozwiązań oraz pozwalają na niestandardowe zastosowania. Głównymi zaletami łożysk magnetycznych są: możliwość pracy przy wysokich prędkościach obrotowych, możliwość pracy w różnych środowiskach (np. próżnia), większa sprawność, brak zużycia mechanicznego, eliminacja strat energii związanych z tarciem, brak smarowania oraz elementów uszczelniających, zwiększenie czystości urządzenia, mniejsza awaryjność w porównaniu ze standardowymi rozwiązaniami, praca w szerokim zakresie temperatur, niskie koszty konserwacji, automatyczne osiowanie wirnika, aktywnie sterowane tłumienie drgań, autodiagnostyka maszyny wirnikowej oraz mniejszy hałas [12, 4]. Parametry dynamiczne pracy maszyny wirnikowej łożyskowanej magnetycznie mogą być kształtowane poprzez zastosowanie różnych praw sterowania. Najpopularniejszym rozwiązaniem jest sterowanie w sprzężeniu zwrotnym przy wykorzystaniu informacji o przemieszczeniu wirnika [9, 13]. Coraz częściej pojawiają się algorytmy sterowania oparte o pomiar strumienia elektromagnetycz-

nego w szczelinie powietrznej AŁM [12, 6, 10]. W układach tych mamy możliwość bezpośredniego sterowania siłą elektromagnetyczną, co pozwala na zminimalizowanie kosztów oraz rozprzęgnięcie układu sterowania na układ lokalny sterowania strumieniem elektromagnetycznym i układ globalny sterowania przemieszczeniem wirnika. Co więcej, układ globalny może być w tym przypadku zaprojektowany jako liniowy. Ponadto ultracienkie czujniki Halla zbudowane na bazie elastycznej folii poliimidowej mogą być implementowane bezpośrednio w szczelinie powietrznej AŁM. Takie rozwiązanie nie wymaga modyfikacji konstrukcji maszyny wirnikowej oraz pozwala na zmniejszenie jej wymiarów [10, 12]. Należy również zaznaczyć, że zastosowanie czujników opartych o zjawisko Halla pozwala na obniżenie zużycia energii elektrycznej w porównaniu do innych czujników (np. wiroprądowych). Proponowany układ pomiarowy został opracowany w Katedrze Automatyki i Robotyki Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej.

2. OPIS ELEMENTÓW UKŁADU POMIAROWEGO

W badaniach zaprezentowano prototyp elastycznych czujników Halla o grubości 130 μm , wykonanych na bazie folii poliimidowej. Propozycja układu pomiarowego (Rys. 1) została opracowana dla jednej osi horyzontalnej aktywnego łożyska magnetycznego. Strumień elektromagnetyczny jako sygnał mierzony jest wzmacniany przy pomocy specjalnie zaprojektowanego i wykonanego



Rysunek 1 Schemat zaprojektowanego układu pomiarowego

wzmacniacza wykorzystującego wzmacniacze operacyjne. Akwizycję danych mierzonych oraz ich podgląd i zapis zrealizowano przy pomocy procesora sygnałowego dSpace zarządzanego przez oprogramowanie ControlDesk.

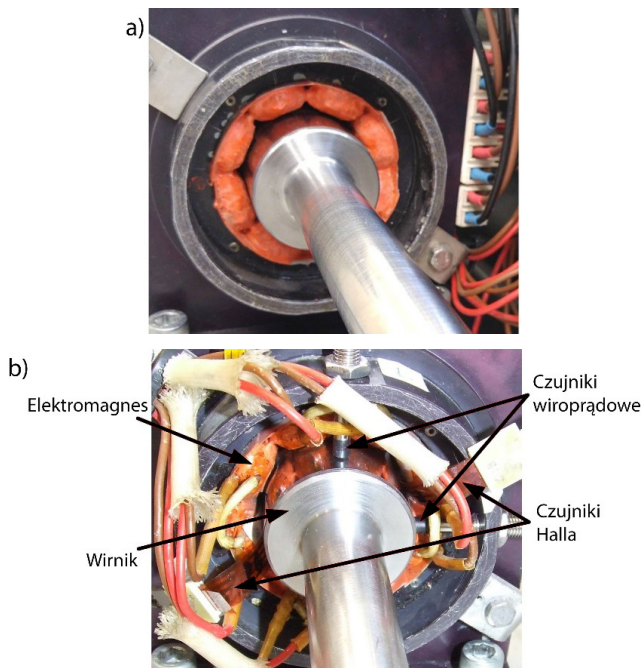
2.1 Aktywne łożysko magnetyczne

Do badań wykorzystano aktywne łożysko heteropolarne (Rys. 2a), zbudowane z ośmiu cewek elektromagnetycznych połączonych szeregowo w cztery pary. Cewki elektromagnetyczne nawinięto na stator składający się z pakietu blach transformatorowych o grubości 0,00035 m. Cewki elektromagnetyczne zostały nawinięte izolowanym drutem DNE180 (wytrzymującym temperaturę do 180°C) o średnicy 0,00118 m. AŁM wyposażone jest w pierścieniu do mocowania czujników wiroprowdowych wykorzystywanych do pomiaru położenia promieniowego wirnika w szczelinie powietrznej w osiach x-y z dokładnością do 1 μm.

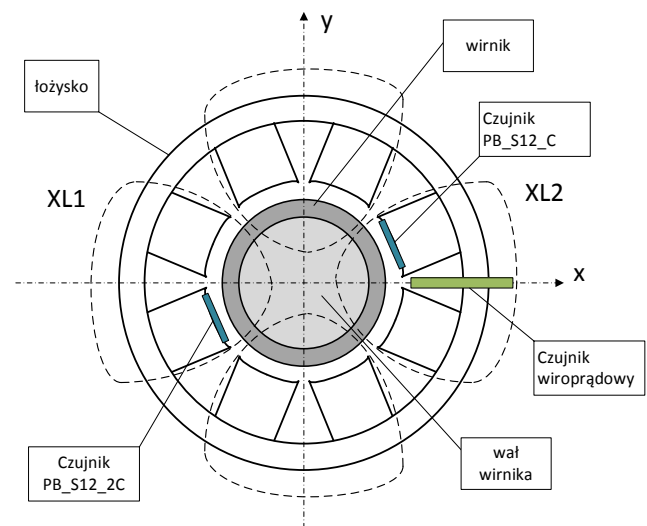
Wyżej wymienione pierścienie zostały wykonane ze stali 40HM, dla której czujniki wiroprowdowe charakteryzują się liniową charakterystyką statyczną, będącą zależnością pomiędzy przemieszczeniem promieniowym wirnika a napięciem wyjściowym czujnika. AŁM składa się z części zewnętrznej cewek elektromagnetycznych statora i części wewnętrznej pakietu blach osadzonego na wirniku. Stator łożyska magnetycznego jest wykonany z blach transformatorowych o tej samej grubości co bieźnie, osadzone na wirniku. Powierzchnie bieźni zostały wyszlifowane z dużą dokładnością [9].

Dla każdej osi x-y AŁM wykorzystano dwie pary cewek, które są sterowane przez dwa kanały wzmacniaczy zarządzanych z poziomu programu ControlDesk. Ultracienkie czujniki elastyczne zamontowano bezpośrednio w szczelinie powietrznej łożyska magnetycznego w osi XL2 (Rys. 2b i Rys. 3).

Parametry techniczne AŁM zawarto w Tabeli 1.



Rysunek 2 a) Badane łożysko heteropolarne, b) Rozmieszczenie czujników w AŁM [7]



Rysunek 3 Schematyczne połączenie par cewek z położeniem czujników Halla

Tabela 1 Parametry techniczne badanego łożyska magnetycznego

Opis	Oznaczenie
Liczba biegunów	$N_p = 8$
Kąt między biegunami	$\alpha_p = 22,5^\circ$
Pole przekroju nabiegownika	$A_p = 0,000360 \text{ m}^2$
Liczba zwojów jednej pary cewek	$N = 60$
Szerokość szczeliny powietrznej	$X_0 = 0,0004 \text{ m}$
Średnica wewnętrzna statora	$d_s = 0,048 \text{ m}$
Średnica zewnętrzna statora	$D_s = 0,09 \text{ m}$
Stała łożyska	$K_f = 0,000003912 \text{ Nm}^2/\text{A}^2$
Prąd maksymalny	$i_{max} = 5 \text{ A}$ (10 A dla wzmacniaczy impulsowych)
Prąd punktu pracy	$i_0 = 2,5 \text{ A}$ (5 A dla wzmacniaczy impulsowych)
Maksymalna siła	$F_{max} = 244 \text{ N}$ (dla $i_{max} = 10 \text{ A}$)
Szttywność prądowa	$k_i = 13,62 \text{ N/A}$
Szttywność przemieszczeniowa	$k_s = 97656 \text{ N/m}$
Rezystancja	$R = 0,26 \Omega$
Indukcyjność	$L = 0,0021 \text{ H}$

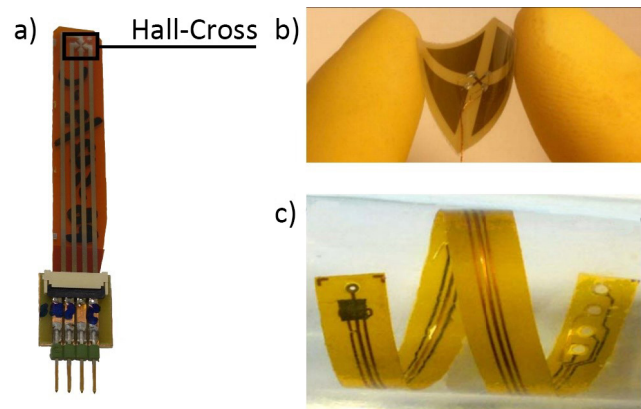
2.2 Czujniki Halla

Czujnik służący do pomiaru strumienia elektromagnetycznego wykorzystuje zjawisko Halla. Znajdujący się w polu elektromagnetycznym cienki przewodnik jest prostopadły do pola magnetycznego, co powoduje działanie siły skierowanej prostopadle do powierzchni przewodnika. Siła ta działa na elektrony, które poruszają się z prędkością v wzdłuż przewodnika. Prowadzi to do akumulacji ładunków dodatnich i ujemnych na obu stronach przewodnika i wystąpienia potencjału U_b . Napięcie U_b jest nazywane napięciem Halla i jest proporcjonalne do indukcji magnetycznej B oraz natężenia prądu i [7]:

$$U_b = k_h Bi \quad (1)$$

Wielkość składowej k_h zależy od geometrii i materiału przewodnika. Podczas pomiaru czujniki Halla zasilane są ze źródła prądu stałego.

Użyte czujniki Halla o oznaczeniu PB_S12_C oraz PB_S12_2C są prototypami zaprojektowanymi i wyprodukowanymi przez Leibniz Institute for Solid State and Materials Research w Dreźnie [14].



Rysunek 4 a) Czujnik Halla PB_S12_C, b) Zmiana promienia wygięcia [8], c) Przykładowe odkształcenie czujnika [1]

Użyte czujniki są obecnie jednymi z najcieńszych czujników tego typu. Ich wymiar, wynoszący $130 \mu\text{m}$, pozwala na bezpośrednie implementowanie w szczelinie powietrznej AŁM bez istotnych jej zmian. Należy zaznaczyć, że elementem aktywnym czujnika nie jest cała powierzchnia, a wyłącznie tzw. obszar Hall-Cross, znajdujący się w górnej części czujnika (Rys. 4a). Zgodnie ze specyfikacją podaną w Tabeli 2 obszar Hall-Cross ma wymiar $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$. Różnice występujące pomiędzy użytymi czujnikami zawierają się w granicach rozdzielczości pomiarowej. Elastyczność czujników zapewniona jest przez materiał wykonania.

Folia poliimidowa jest materiałem giętkim (Rys. 4c), przydatnym przy wykonywaniu izolacji elektrycznej przeznaczonej do pracy w wysokich temperaturach. Temperatura pracy ciągłej wynosi do +230°C. Umożliwia to zastosowanie folii w warunkach pracy AŁM, gdzie temperaturę pracy przyjmuje się w zakresie od -40 do 80°C. Czujniki zbudowane na bazie folii poliimidowej nie wykazują znaczących różnic w pomiarze przy zmianie promienia wygięcia czujnika (Rys. 4b) w zakresie 0÷22 mm, przy czym zachowana zostaje liniowość charakterystyki [8, 1]. Najważniejsze dane techniczne użytych czujników Halla zebrano w Tabeli 2.

2.3 Wzmacniacz pomiarowy strumienia elektromagnetycznego

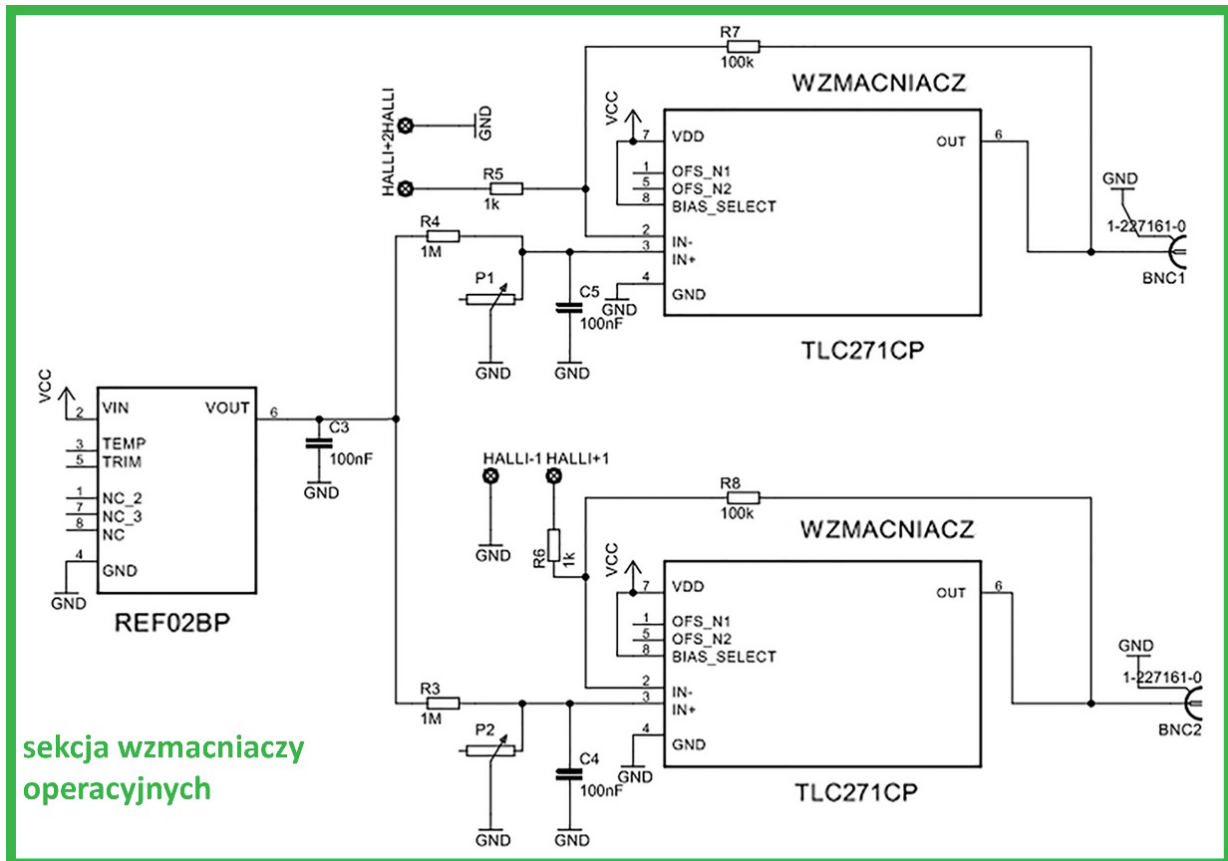
Z powodu braku dedykowanych wzmacniaczy dla elastycznych czujników Halla zaprojektowano i wykonano dedykowany układ wzmacniacza (Rys. 5). Specjalistyczny układ wzmacniacza jest niezbędny z uwagi na niską wartość sygnału wyjściowego czujnika, wynoszącą od 200 do 300 μV . Wartości te uniemożliwiają rejestrację przebiegów sygnału wyjściowego czujnika z powodu ograniczenia rozdzielczości karty pomiarowej DS2002 procesora dSpace. Wzmacniacz wykonano w oparciu o jednokanałowe wzmacniacze operacyjne o sprzężeniach bezpośrednich, które charakteryzują się bardzo dużym wzmocnieniem,

wejściem różnicowym (symetrycznym) i wyjściem asymetrycznym. Wzmacniacz operacyjny wraz z odpowiednią pętlą sprzężenia zwrotnego pozwala również na przeprowadzanie działań matematycznych, tj. dodawania, mnożenia lub logarytmowania [5]. Idealny wzmacniacz operacyjny charakteryzuje się nieskończone dużym wzmocnieniem przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, szerokim pasmem przenoszenia, dużą impedancją wejściową, impedancją wyjściową równą zero oraz brakiem poboru prądu elektrycznego przez wejścia wzmacniacza [2, 15].

Zaprojektowany układ wzmacniacza jest dwukanałowy i pozwala na jednoczesne podłączenie dwóch czujników. Zgodnie ze schematem (Rys. 5), para kanałów jest zasilana z portu USB. Każdy z portów USB dostarcza zasilanie do przetworników AM1S-0512SZ, które zasilają czujniki Halla oraz dalsze układy scalone wzmacniacza. Sygnał wyjściowy z czujników Halla podawany jest na wejście wzmacniacza operacyjnego TLC271CP. Wyjściowe napięcie ze wzmacniacza może wynosić do 20 V. Wzmocnienie zależy od wartości rezystancji rezystorów użytych w układzie: R7 i R8 (Rys. 5). Regulacja wzmocnienia możliwa jest poprzez użycie potencjometru, przy czym wartość wzmocnienia wyprowadza się obliczeniowo [15]. Należy pamiętać, że nie jest możliwe uzyskanie napięcia wyższego niż napięcie zasilania układu scalonego, które wynosi znamionowo 12 V.

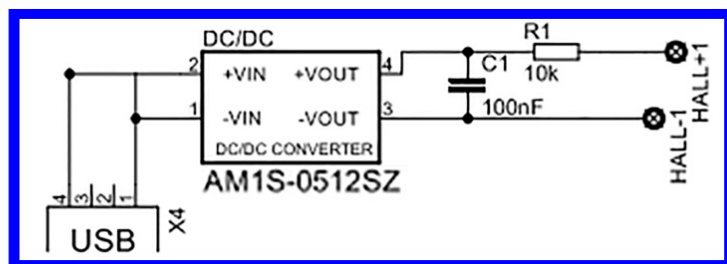
Tabela 2 Specyfikacja czujników Halla

Model	PB_S12_C/ PB_S12_2C
Materiał	folia poliimidowa (ang. <i>kapton-foil</i>)
Grubość materiału	130 μm
Znamionowa rozdzielczość czujnika	500 mV/AT
Pomiarowa rozdzielczość czujnika	661 mV/AT (dla PB_S12_C) 900 mV/AT (dla PB_S12_2C)
Oznaczenie układu	Q_2014_1a
Warstwa zabezpieczająca	brak
Obróbka cieplna	brak
Obszar Hall-Cross	400 μm x 400 μm
Pomiarowe natężenie prądu	1 mA
Maksymalne natężenie prądu	10 mA
Mocowanie	mechaniczne



sekcja wzmacniaczy operacyjnych

sekcja zasilania



Rysunek 5 Schemat wzmacniacza sygnału

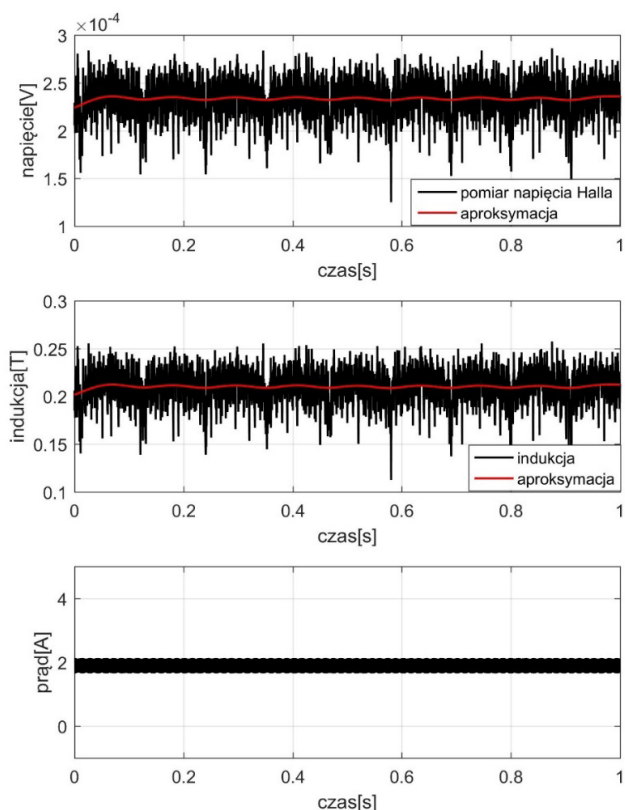
3. WYNIKI I DISKUSJA

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w jednakowych warunkach, dla których wykreślono charakterystyki wzorcowe czujnika wiropądowego oraz czujników Halla. Użycie czujników wiropądowych pozwoliło na określenie zmiany wartości napięcia Halla w zależności od zmiany przemieszczenia wirnika w AłM. Badania wykonano z próbkowaniem 10 kHz dla stałej i zmiennej szerokości szczeliny powietrznej AłM (dla położenia statycznego i dynamicznie zmiennego położenia wirnika w osi x łożyska). Dobrane wzmocnienie sygnału wynosi $k = 1500$.

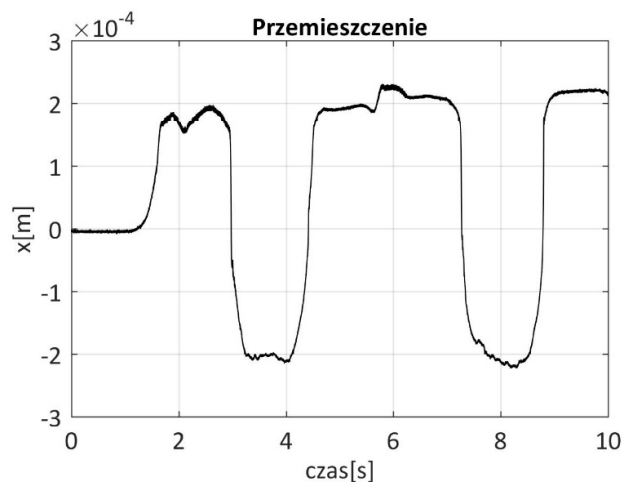
Prądowe sygnały sterujące siłownikami elektromagnetycznymi AłM zadawano z poziomu oprogramowania ControlDesk dołączonego do procesora sygnałowego dSpace. Podczas badań eksperymentalnych uzyskano następujące wyniki:

- dla zasilania cewki XL1 równego 2 A, dla czujnika PB_S12_2C bez zmiany przemieszczenia wirnika (Rys. 6),
- dla zasilania cewki XL1 i XL2 równego 2 A, dla czujnika PB_S12_2C ze zmianą przemieszczenia wirnika (Rys. 7).

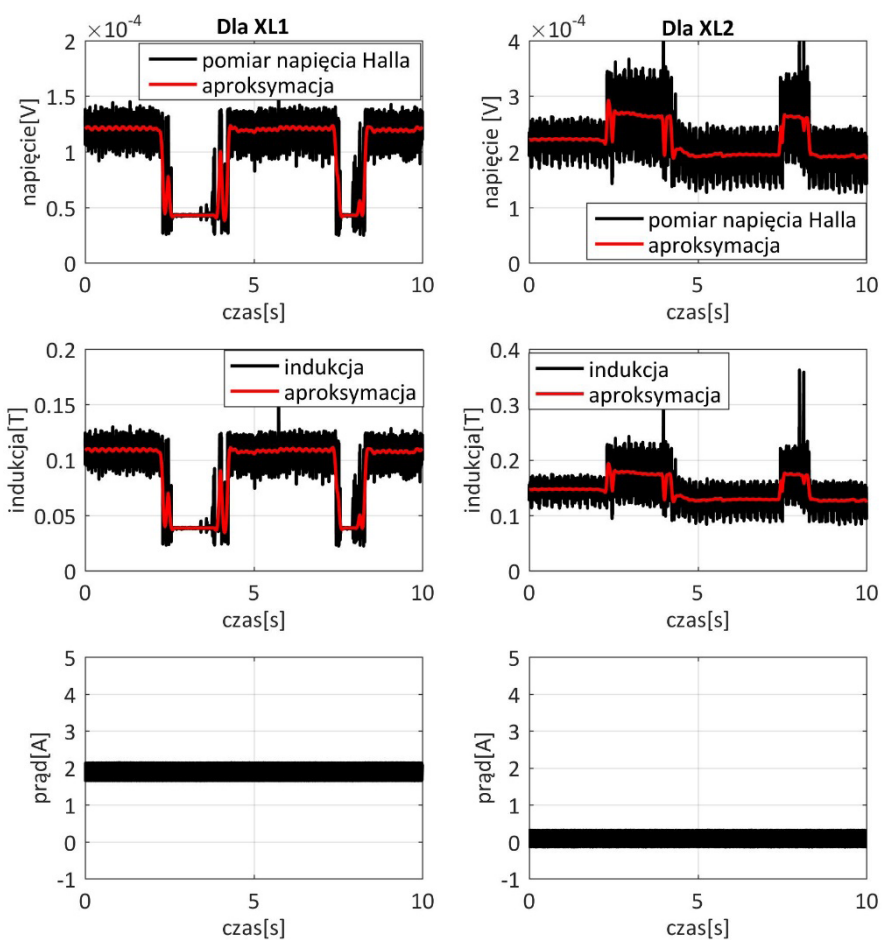
W tym przypadku wirnik był dynamicznie przemieszczany według zarejestrowanego przebiegu przedstawionego na Rysunku 7. Przesunięcie wirnika zawiera się w przedziale od -0,0002 m do 0,0002 m, co odpowiada nominalnej szerokości szczeliny powietrznej w AłM. Położenie zerowe odpowiada geometrycznemu środkowi położenia wirnika w AłM i jest osiągnięte w początku układu współrzędnych, zgodnie z Rysunkiem 3. Przy przemieszczeniu wirnika (przedstawionego na Rysunku 7) otrzymano wyniki (Rys. 8).



Rysunek 6 Pomiar napięcia Halla i indukcji w osi XL1 A&M dla prądu zasilającego 2 A, bez przemieszczenia wirnika



Rysunek 7 Przebieg zadanych zmian przemieszczenia wirnika w osi x



Rysunek 8 Pomiar napięcia Halla i indukcji w A&M dla prądu zasilającego odpowiednio 0 A i 2 A, podczas zmian przemieszczenia wirnika

Na podstawie przebiegów w stanie ustalonym (Rys. 6) i dla zmiennej szerokości szczeliny powietrznej (Rys. 8) należy stwierdzić, że przebiegi zmian mierzonego napięcia wyjściowego czujnika Halla oraz indukcji są zakłócone przez częstotliwość nośną sygnału prądowego wzmacniacza AŁM zrealizowanego w technice PWM, równą 18 kHz. W porównaniu z pomiarami dla osi XL2 na wyniki pomiarów realizowane przez czujnik siłownika XL1 wpływ ma znacznie więcej zewnętrznych sygnałów zakłóceń, które są powtarzalne, jednak trudniejsze w identyfikacji. Mogą one pochodzić od sprzężeń pola elektromagnetycznego generowanego przez pozostałe siłowniki elektromagnetyczne AŁM. Dodatkowym źródłem zakłóceń mogą być także zakłócenia zewnętrzne działające na nieekranowane elementy toru pomiarowego, takie jak konektory, złącza itd. Na podstawie przebiegów zarejestrowanych dla zmiennej szerokości szczeliny powietrznej (Rys. 8) można stwierdzić poprawne działanie układu pomiarowego, tzn. spadek indukcji magnetycznej wraz ze wzrostem szerokości szczeliny powietrznej. Otrzymane wyniki potwierdzają zależność [7]:

$$B = \frac{\mu_0 N i}{2 x_0}, \quad (2)$$

gdzie: B – indukcja magnetyczna, N – ilość zwojów cewki elektromagnetycznej, i – prąd płynący przez cewkę, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, x_0 – szczelina powietrzna.

Zgodnie z równaniem (2) przy wzroście szerokości szczeliny powietrznej zwiększa się wartość mianownika równania (2), co prowadzi do zmniejszenia wartości indukcji magnetycznej B i odwrotnie. Ponadto indukcja magnetyczna zmienia się proporcjonalnie do wartości prądu i . Wyniki badań (Rys. 8) potwierdzają, że przy zasilaniu cewki XL2 wartością prądu elektrycznego wyższą od zasilania cewki XL1 (kolejno 2 A oraz 0 A) napięcie Halla oraz wartość indukcji są wyższe dla czujnika w osi XL2 niż w osi XL1.

Przed wykorzystaniem sygnału mierzonego strumienia elektromagnetycznego do sterowania położeniem wirnika należy dobrać odpowiedni filtr dolnoprzepustowy, tak by zniwelować zakłócenia, a wraz z tym zapewnić dobrą jakość regulacji. Należy podkreślić, że proponowane rozwiązanie jest praktykowanym sposobem pomiaru strumienia elektromagnetycznego w łożysku magnetycznym bez ingerencji w budowę mechaniczną [8, 1, 3].

4. PODSUMOWANIE

W pracy opisano sposób pomiaru strumienia elektromagnetycznego w aktywnym łożysku magnetycznym. Zaprojektowano układ pomiarowy i przeprowadzono badania dla różnych konfiguracji zasilania siłowników elektromagnetycznych AŁM, uwzględniając przemieszczenie wirnika. Pomiar strumienia magnetycznego w aktywnym łożysku magnetycznym jest problematyczny, głównie ze względu na aspekty techniczne: wymiar szczeliny powietrznej (0,4 mm), zakłócenia od zasilania aparatury badawczej (np. oscyloskopu). Eliminuje to większość dostępnych na rynku czujników indukcji magnetycznej. Proponowany układ wykorzystuje elastyczne, ultracienkie (o grubości 130 μm) czujniki Halla, pozwalające na bezpośrednie umieszczenie w szczelinie powietrznej AŁM. Ponadto ze względu na brak dedykowanych wzmacniaczy i niską wartość amplitudy sygnału pomiarowego (rzędu 200-300 μV) opracowano wzmacniacz sygnału mierzonego oparty na wzmacniaczach operacyjnych. Należy podkreślić, że przeznaczenie proponowanego wzmacniacza jest uniwersalne i nie ogranicza się tylko do czujników Halla. Zaprojektowany układ oraz wykorzystane czujniki gwarantują powtarzalność oraz stabilność pomiarów, co jest niezwykle ważne w zastosowaniach do układu sterującego. Otrzymane wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają poprawność działania zaprojektowanego układu pomiarowego. Porównując proponowaną metodę do innych (estymacja na podstawie przemieszczenia i prądu, cewka i przyrząd całkujący), należy stwierdzić, że jest to metoda bezpośrednia, w której otrzymuje się napięcie Halla, zachowujące liniową zależność w stosunku do strumienia elektromagnetycznego. Różnica pomiędzy wartościami modelowymi (teoretycznymi) a rzeczywistymi nie przekracza 5% amplitudy sygnału, co jest równe ok. 0,005T. Należy podkreślić, że błąd może zawierać się zarówno w uproszczeniach teoretycznych, jak również w błędzie samej metody, na który składają się m.in. zakłócenia losowe, różnice w wykonaniu elementów lub ich zużycie.

Innym sposobem pomiaru strumienia jest wykorzystanie cewki oraz układu całkującego. Niestety wykorzystanie tej metody często daje wyniki o rozbieżności do 15% względem wyników teoretycznych. Głównym powodem jest pośredni pomiar, gdzie błędy nakładają się na siebie. Podob-

nie jest przy estymowaniu wartości strumienia na podstawie przemieszczenia oraz prądu zasilającego cewkę. Zakłócenia pochodzące z dwóch torów pomiarowych (przemieszczenia i prądu) nakładają się na siebie, przez co konieczne są filtry dolnoprzepustowe, wprowadzane najczęściej

kosztem opóźnienia układu i zniekształcenia sygnału. Należy podkreślić, że proponowany układ pomiarowy nie ma filtrów, jednak może być o nie rozszerzony, co pozwoliłoby na lepszą jakość dynamiczną mierzonego sygnału.

LITERATURA

- [1] Bahr F., Melzer M., Karnaushenko D., Makarov D., Cañón Bermúdez G. S., Schmidt O. G., Hofmann W., Permanent Magnet Bias AMB Using Integrated Hall Sensor Based Air Gap Flux Density Feedback, Proceedings of the 1st Brazilian Workshop on Magnetic Bearings, Rio de Janeiro 2013.
- [2] Doliński J., Współczesne układy cyfrowe, BTC, 2009.
- [3] Ernst D., Melzer M., Makarov D., Bahr F., Hofmann W., Schmidt O. G., Zerna T., Packaging technologies for (Ultra-)thin sensor applications in active magnetic bearings, Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2014, 125-129.
- [4] Gosiewski Z., Falkowski K., Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2003.
- [5] Górecki P., Wzmacniacze operacyjne – podstawy, aplikacje, zastosowania, BTC, 2004.
- [6] Grega W., Piłat A., Comparison of Linear Control Methods for an AMB System, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2005, vol. 15, no. 2, 245-255.
- [7] Maslen E., Schweitzer G., Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery, Springer-Verlag, Berlin 2009.
- [8] Mönch I. J., Bahr F., Melzer M., Karnaushenko D., Makarov D., Hofmann W., Schmidt O. G., Flexible Hall Sensorics for Flux-Based Control of Magnetic Levitation, IEEE Transactions On Magnetics, 2015, vol. 51, no. 11.
- [9] Mystkowski A., Sterowanie odporne drganiem wirnika łożyskowanego magnetycznie, rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział IMiR, Kraków 2007.
- [10] Mystkowski A., Kaparin V., Kotta Ü., Pawłuszewicz E., Tönso M., Feedback linearization of an active magnetic bearing system operated with a zero-bias flux, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2017, vol. 27, no. 3, 539-548.
- [11] Mystkowski A., Kierdelewicz A., Flux Measurement and Monitoring System of Active Magnetic Bearing Using Ultra-thin and Flexible Hall Sensors, 12th International Conference Mechatronic Systems and Materials, Białystok 2016.
- [12] Mystkowski A., Pawłuszewicz E., Dragašius E., Robust nonlinear position-flux zero-bias control for uncertain AMB system, International Journal of Control, 2015, vol. 88, 1619-1629.
- [13] Nan-Chyuan Tsai, Chien-Hsien Kuo, Rong-Mao Lee, Regulation on radial position deviation for vertical AMB systems, Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, vol. 21, no. 7, 2777-2793.
- [14] <https://www.ifw-dresden.de/institutes/institute-for-integrative-nanosciences-iin/> (dostęp 23.11.2017).
- [15] <http://home.agh.edu.pl/~maziarz/LabPE/wzmacniacz.html> (dostęp 23.11.2017).

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Electromagnetic flux measurement in active magnetic bearing with use of flexible Hall sensors

ANDRZEJ KIERDELEWICZ

**AUTOMATICS AND ROBOTICS DIVISION, FACULTY OF MECHANICS,
BIAŁYSTOK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

Key words: electromagnetic stream, Kapton-foil Hall sensors, magnetic bearing

SUMMARY:

This paper discusses a method of measuring an electromagnetic flux in an active magnetic bearing with use of flexible polyimide Kapton-foil Hall sensors. Specific elements of the system such as an active magnetic bearing, a signal amplifier developed by author as well as Hall sensors are described. A measurement system consisting of an active magnetic bearing was used to examine an electromagnetic flux for a fixed and variable air gap. The configurations used resulted in magnetic induction values corresponding with the parameters of the magnetic bearing. DSpace signal processor and ControlDesk 5.4 software made it possible to monitor and record the measured data. The experimental results validate the correctness of the measurement system proposed. In comparison with other methods (a measurement system comprising a coil and an integrator or estimation based on the displacement and the coil feed current), the accuracy achieved is within a 5% error margin.

1. INTRODUCTION

An active magnetic bearing (AMB) is a mechatronic device combining elements of mechanics, automatics and electronics. It makes use of magnetic levitation, which means contactless floating of a ferromagnetic object in an electromagnetic field. Magnetic bearings have various features differentiating them from more classic solutions and allowing for non-standard applications. The superior features of magnetic bearings are as follows: a possibility of operating within high rotation speeds, a possibility of operation in varied environments (e.g. vacuum), higher coefficient of performance, lack of mechanical wearing, elimination of a loss of energy related to friction, lack of lubrication as well as sealing components, an increase in reduction of contamination, lower failure frequency in comparison with standard solutions, a wide range of working temperature, low maintenance costs, self-alignment of rotation axis, active vibration dumping, self-diagnostics of rotating machinery and a lower noise level [12, 4]. Dynamic working parameters of rotating machinery in magnetic bearing can be influenced by using a variety of controlling laws. The most common solution is control with loopback with use of rotor displacement data [9, 13]. Control algorithms based on measurements of electromagnetic flux in the AMB air gap are becoming more and more common [12, 6, 10]. Such systems allow for direct control of electromagnetic force, which in turn allows for cost reduction and decoupling of control system into a local electromagnetic flux control block and a global rotor displacement control unit. Moreover, the global system can be designed as linear. Also, polyimide Kapton-foil Hall sensors can be placed directly in the AMB air gap. This solution does not require the rotor machinery to be modified and it also allows for a reduction in its size [10, 12]. It should also be noted that the use of Hall sensors allows for a reduction in electric energy consumption

in comparison with other sensors (e.g. eddy current ones). The proposed measurement system was developed in the Division of Automatics and Robotics of the Faculty of Mechanics in Białystok University of Technology.

2. DESCRIPTION OF THE ELEMENTS OF THE MEASUREMENT SYSTEM

A prototype of flexible polyimide Kapton-foil Hall sensors of 130 μm thickness was used. The proposed measurement system (Fig. 1) was developed for one horizontal axis of an active magnetic bearing. An electromagnetic flux, treated as a measured signal, was amplified with use of a specially designed and produced amplifying device consisting of operational amplifiers. The data were acquired, monitored and recorded with dSpace signal processor managed by ControlDesk software.

2.1 An active magnetic bearing

An active heteropolar bearing was used in the study (Fig. 2a). It comprised eight electromagnetic coils in 4 series connections. The electromagnetic coils were wound around a stator consisting of a packet of transformer sheets of 0,00035 m thickness. The electromagnetic coils were wrapped with insulated wire DNE180 (able to withstand temperature up to 180°C) with a diameter of 0,00118 m. AMB is equipped with rings used for mounting eddy current sensors that are utilized to measure the radial position of the rotor in the air gap along x-y axes with precision up to 1 μm .

The above mentioned rings were made of 40HM steel, for which eddy current sensors are of static linear characteristics, which is the relation between the radial rotor displacement and the sensor output voltage. AMB consists of the outer part (stator electromagnetic coils) and the inner part (a packet of steel sheets mounted on the rotor). The stator of the electromagnetic bearing is

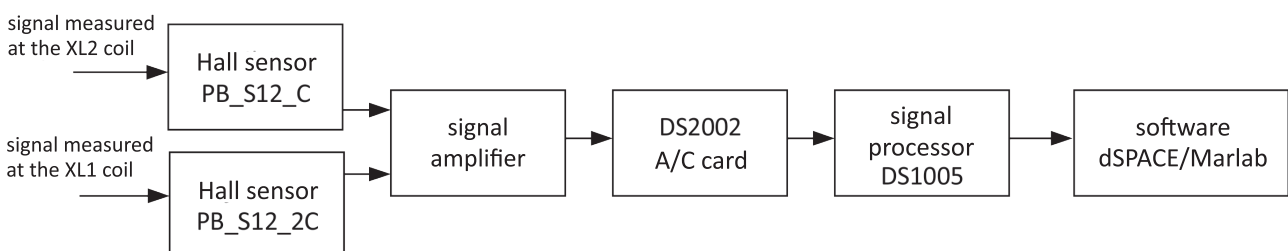


Figure 1 The proposed system diagram

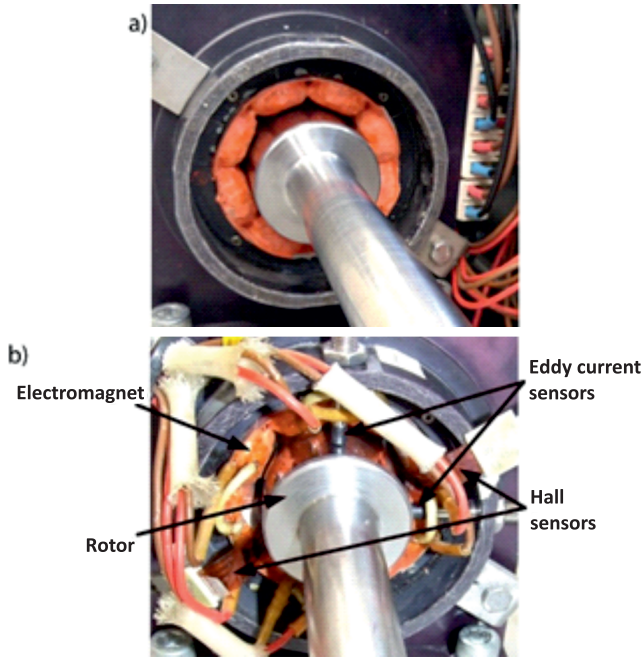


Figure 2 a) Analyzed heteropolar bearing, b) Sensor positions in AMB[7]

made of transformer sheets of the same thickness as bearing raceways mounted on the rotor. The bearing raceways' surfaces were polished up with high precision [9].

Two coil pairs were used for each AMB axis x-y. The coils are controlled through two channels of the amplifier managed from the level of Control-Desk software. The flexible Kapton-foil sensors were placed in the air gap of the magnetic bearing along XL2 axis (Fig. 2b and Fig. 3). The technical parameters of AMB are presented in Table 1.

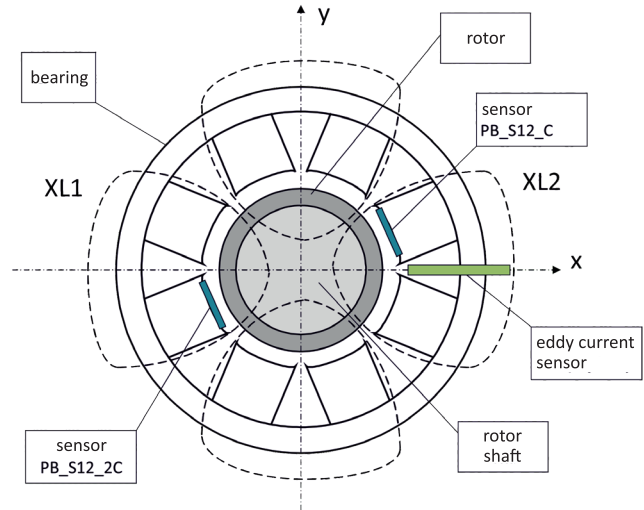


Figure 3 Diagrammatic connection of coil pairs along with Hall sensors position

Table 1 Technical parameters of the analyzed magnetic bearing

Description	Symbol
Number of poles	$N_p = 8$
Angle between the poles	$\alpha_p = 22.5^\circ$
Pole shoe cross-section area	$A_p = 0.000360 \text{ m}^2$
Number of loops in a one coil pair	$N = 60$
Air gap width	$X_0 = 0.0004 \text{ m}$
Inner stator diameter	$d_s = 0.048 \text{ m}$
Outer stator diameter	$D_s = 0.09 \text{ m}$
Bearing constant	$K_f = 0.000003912 \text{ Nm}^2/\text{A}^2$
Maximum current	$i_{max} = 5 \text{ A}$ (10 A for pulse amplifiers)
Operating point current	$i_0 = 2.5 \text{ A}$ (5 A for pulse amplifiers)
Maximum force	$F_{max} = 244 \text{ N}$ (dla $i_{max} = 10 \text{ A}$)
Electricity rigidity	$k_i = 13.62 \text{ N/A}$
Displacement rigidity	$k_s = 97656 \text{ N/m}$
Resistance	$R = 0.26 \Omega$
Inductance	$L = 0.0021 \text{ H}$

2.2 Hall sensors

The sensor used to measure the electromagnetic flux utilizes the Hall phenomenon. The thin conductor placed in the electromagnetic field is perpendicular to the magnetic field, which induces a force perpendicular to the conductor's surface. The force interacts with electrons travelling with v speed along the conductor. This results in accumulation of positive and negative charges on both sides of the conductor and creates the potential difference U_b . U_b is called the Hall voltage and proportional to the magnetic induction B and current i [7]:

$$U_b = k_h Bi \quad (1)$$

The value of component k_h depends on the conductor geometry and material. During the measurement Hall sensors are powered by direct current.

The Hall sensors used marked PB_S12_C and PB_S12_2C are prototypes designed and produced by Leibniz Institute for Solid State and Materials Research in Dresden [14].

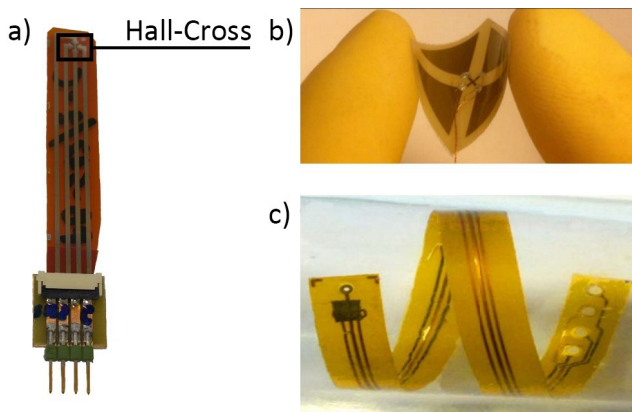


Figure 4 a) PB_S12_C Hall sensor, b) Change in bend radius [8], c) Sample sensor deformation [1]

The sensors used are currently ones of the thinnest sensors of the type. Their size of $130 \mu\text{m}$ allows for their direct placement in the AMB air gap without affecting its size. It should be noted that an active part of the sensor is not the whole surface but only so-called Hall-Cross area, which is located in the sensor's upper section (Fig. 4a). According to the specification presented in Table 2, Hall-Cross area is of $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ size. The observed differences between the sensors used are within measurement resolution. The material used guarantees flexibility of the sensors. Polyimide foil is a flexible material (Fig. 4c), used in electric insulation designed for high

temperature conditions. Temperature of continuous work is up to 230°C . This enables foil usage in AMB working conditions, where the assumed working temperature is in the temperature range from -40 to 80°C . Polyimide foil sensors do not show significant measurement differences when the sensor bending radius changes (Fig. 4b) within $0 \div 22 \text{ mm}$, while the linearity of the characteristics is preserved [8, 1]. The most important technical parameters of the Hall sensors used are shown in Table 2.

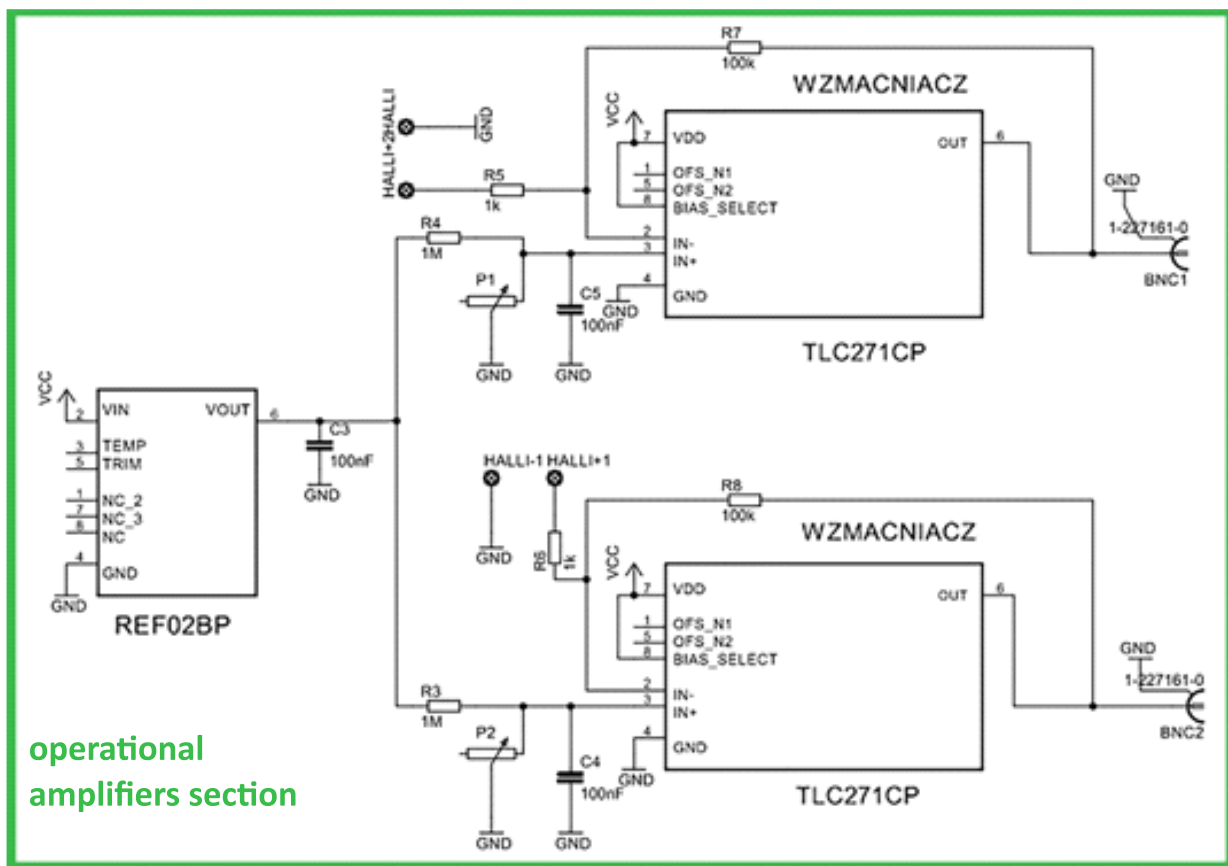
2.3 Measuring amplifier of an electromagnetic flux

Due to a lack of amplifiers dedicated for flexible Hall sensors, a dedicated amplifying system was designed and produced (Fig. 5). The specialized amplifying system is essential in view of a low value of the sensor output signal, amounting to 200 to $300 \mu\text{V}$. These values render it impossible to record the sensor output signal courses due to the physical resolution of the readings of the DS2002 sampling board of dSpace processor. The amplifying system was based on single-channel operational amplifiers with loopback, whose characteristics is high amplification, differential input (symmetrical) and asymmetrical output. An operational amplifier together with an appropriate loopback enables mathematical operations, which are addition, multiplication or finding logarithm [5]. An ideal operational amplifier is characterized by an infinite amplification combined with an open feedback loop, wide carrier bandwidth, high input impedance, output impedance equal to zero as well as no power loss at the input of the amplifier [2, 15].

The designed amplifying system is double channel and enables simultaneous use of two sensors. According to the diagram (Fig. 5), channels are powered from USB ports. Each of the USB ports supplies power to AM1S-0512SZ converters, which in turn power Hall sensors as well as other integrated circuits in the amplifier. Hall sensors output signal is fed to the input of the TLC271CP operational amplifier. The amplifier output voltage can amount to 20 V. The amplification depends on the resistance value of the resistors used in the R7 and R8 system (Fig. 5). Gain adjustment is possible with the use of potentiometer, where its value is calculated numerically [15]. One should remember that it is impossible to obtain voltage higher than 12V which is equivalent to the powering voltage of the microchip.

Tabela 2 Hall sensor specification

Model	PB_S12_C/ PB_S12_2C
Material	<i>kapton-foil</i>
Material thickness	130 μm
Nominal sensor resolution	500 mV/AT
Measured sensor resolution	661 mV/AT (for PB_S12_C) 900 mV/AT (for PB_S12_2C)
System symbol	Q_2014_1a
Protective layer	none
Heat treatment	none
Hall-Cross area	400 μm x 400 μm
Measured current	1 mA
Maximum current	10 mA
Mounting	mechanical



power supply section

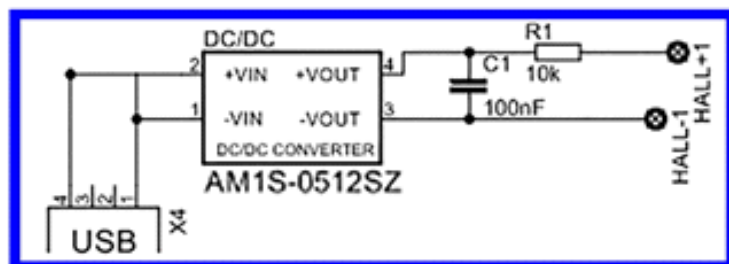


Figure 5 Signal amplifier diagram

3. RESULTS AND THEIR DISCUSSION

The experiments were carried out in identical conditions, whose reference characteristics were determined both for an eddy current sensor as well as Hall sensors. Use of eddy current sensors enabled determination of the change in the Hall voltage value relative of the change in the rotor displacement in AMB. The experiments were carried out with a sampling rate of 10 kHz, both for

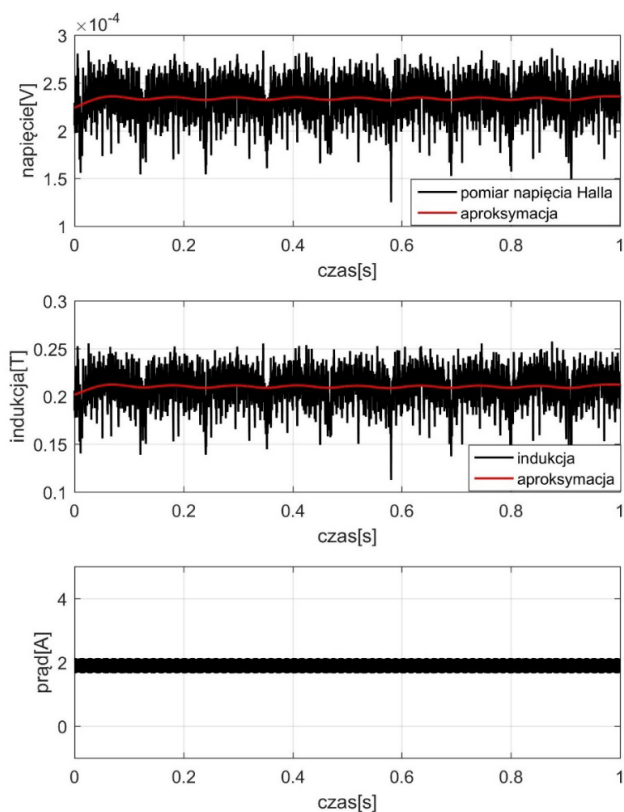


Figure 6 Measurement of Hall voltage as well as induction along XL1 AMB axis for the current feed of 2 A, with no rotor displacement

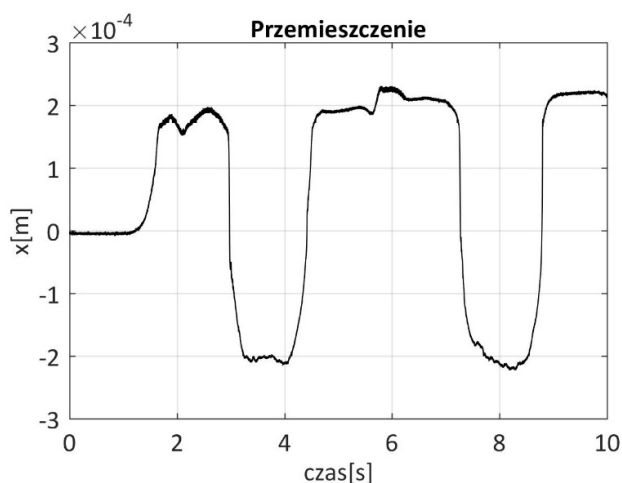


Figure 7 Course of given rotor along x axis

a constant and variable width of the air gap in AMB (both for the static and dynamically variable position of the rotor along the x axis of the bearing). The chosen level of amplification is $k = 1500$. Electric signals controlling electromagnetic AMB actuators were set from in the ControlDesk software provided with a dSpace signal processor. The following results were obtained in the course of the experiments: for XL1 coil current equal to 2 A, and PB_S12_2C sensor without a change in rotor displacement (Fig. 6), for XL1 and XL2 coil currents equal to 2 A, and PB_S12_2C sensor with a change in rotor displacement (Fig. 7).

In this case, the rotor was dynamically displaced as a recorded course in Fig. 7 shows. The displacement is within a range of 0.0002 m to 0.0002 m, which corresponds to a nominal width of the air gap in AMB. The initial position is the geometric center of the rotor in AMB and is the origin of coordinates, as in Fig. 3. For the rotor displacement (shown in Fig. 7) the following results were obtained (Fig. 8).

Taking into account the courses of signal for steady state (Fig. 6) and for a variable width of the air gap (Fig. 8) it should be stated that the courses of change in the recorded output voltage in a Hall sensor as well as induction are distorted by an 18 kHz carrier frequency of the current of the AMB amplifier produced with use of PWM technique. In comparison with the results for the XL2 axis, the results achieved with use of the XL1 actuator sensor are influenced by many more external interferences which are repeated but more difficult to identify. Their source can be electromagnetic coupling generated by the remaining electromagnetic AMB actuators. An extra source of noise can be external disturbances affecting the unshielded elements of measurement system, such as connectors. Taking into account the courses of signal recorded for a variable width of the air gap (Fig. 8) it can be stated that the measurement system works correctly, which means there is a decrease in magnetic induction along the increase in the width of the air gap. The obtained results confirm the correlation [7]:

$$B = \frac{\mu_0 N i}{2 x_0}, \quad (2)$$

where: B – magnetic induction, N – the number of loops in the electromagnetic coil, i – current flowing through the coil, μ_0 – magnetic permeability of free space, x_0 – air gap.

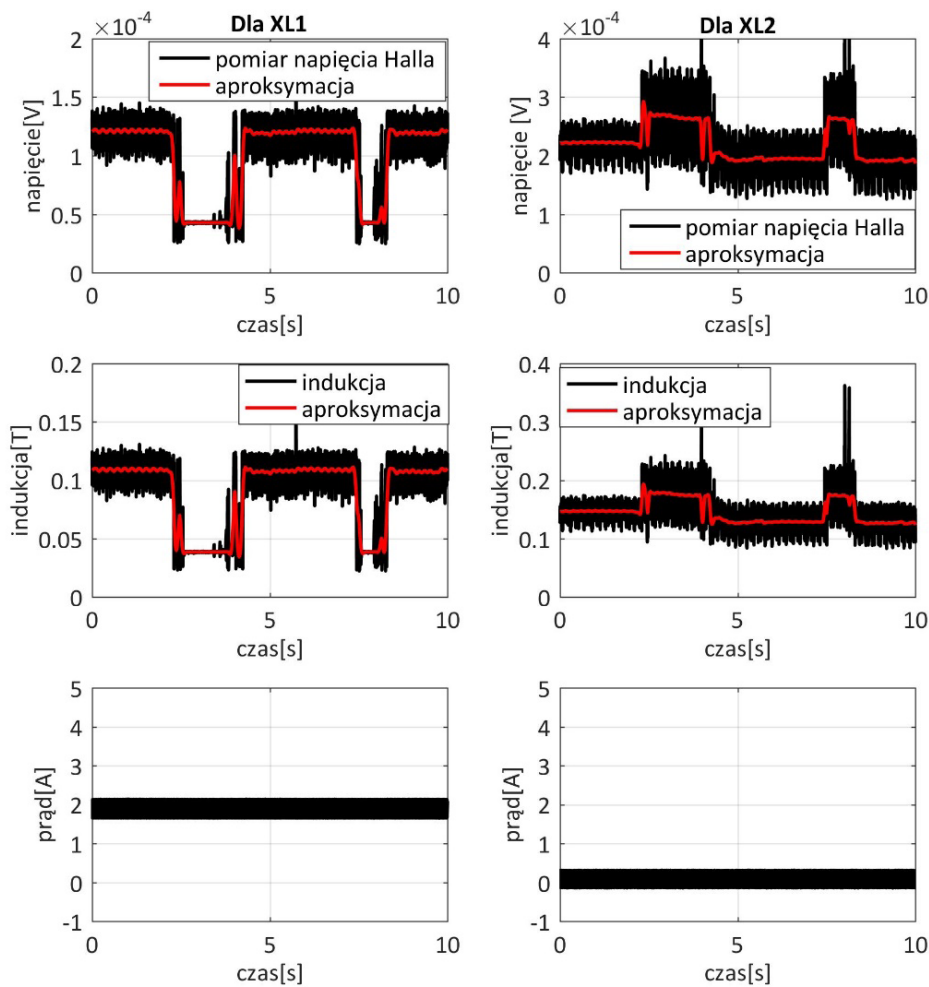


Figure 8 Measurement of Hall voltage as well as induction in AMB for the feed current respectively of 0 A and 2 A, during rotor displacement

In accordance with the equation (2) the value of the denominator of the equation (2) increases along with an increase in the width of the air gap, which leads to a decrease in the value of magnetic induction B , and vice versa. Moreover, the value of magnetic induction changes proportionally to the value of current i . The experimental results (Fig. 8) confirm that the XL2 coil feed current higher than the XL1 coil feed current (the former 2 A and the latter 0 A) results in the Hall voltage and the induction value higher for the sensor along XL2 axis than the XL1 one.

An appropriate low-pass filter needs to be chosen in order to both compensate for the interference and enable a good quality of adjustment before utilising the signal of the measured electromagnetic flux to control the rotor position. It should be noted that the proposed solution is a common practice during measurement of electromagnetic flux in a magnetic bearing without interfering in its mechanical structure [8, 1, 3].

4. SUMMARY

The study describes a way of measuring an electromagnetic flux in an active magnetic bearing. A measurement system was developed in order to study various configurations of feeding electromagnetic AMB actuators, taking into consideration the rotor position. Taking measurements of an electromagnetic flux in an active magnetic bearing is problematic, mainly due to technical aspects, such as the size of the air gap (0.4 mm), interferences originating in the scientific equipment power supply (e.g. oscilloscope). This disqualifies most of the magnetic induction sensors available on the market. The proposed system makes use of flexible Kapton-foil (130 μm thick) Hall sensors, possible to be directly placed in the AMB air gap. Moreover, in view of a lack of dedicated amplifiers and a low value of the analyzed signal amplitude (of the magnitude of 200-300 μV) a signal amplifier making use of operational am-

plifiers was developed. It should be noted that the proposed amplifier can be used universally as it is not limited to Hall sensors only. The proposed system and the sensors used guarantee repeatability and stability of measurements, which is of utmost importance in control system applications. Experimental results validate the behaviour in working conditions of the proposed measurement system. Comparing the proposed method to others (such as a measurement system comprising a coil and an integrator, estimation based on the displacement and the coil feed current), it should be noted that this method is direct, and the one allowing for Hall voltage maintaining a linear relationship with the electromagnetic flux. The difference between the model values (theoretical ones) and the real values does not exceed 5% of the signal amplitude (equaling to approx. 0,005T). It should be emphasized that the uncertainty can result from theoretical simplifications as well as a possible error in the method it-

self, for instance related to random interferences, minimal difference in the product quality of the elements used or their wear and tear level. Another way of measuring the electromagnetic flux is using a coil and an integrator. Unfortunately, this method often yields results with convergence of up to 15% in comparison with the theoretical results. The main reason is the indirect method of measurement, where errors accumulate. Similarly, estimating the value of the electromagnetic flux considering the displacement and the coil feed current. Interferences resulting from two measurement channels (displacement and feed current) overlap, which necessitates use of low-pass filters, whose inherent feature is system latency and signal distortion. It should be noted that the proposed system does not contain any filters; yet, it can be extended to include some, as this would allow for a better dynamic quality of the measured signal.

LITERATURE

- [1] Bahr F., Melzer M., Karnaushenko D., Makarov D., Cañón Bermúdez G. S., Schmidt O. G., Hofmann W., Permanent Magnet Bias AMB Using Integrated Hall Sensor Based Air Gap Flux Density Feedback, Proceedings of the 1st Brazilian Workshop on Magnetic Bearings, Rio de Janeiro 2013.
- [2] Doliński J., Współczesne układy cyfrowe, BTC, 2009.
- [3] Ernst D., Melzer M., Makarov D., Bahr F., Hofmann W., Schmidt O. G., Zerna T., Packaging technologies for (Ultra-)thin sensor applications in active magnetic bearings, Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2014, 125-129.
- [4] Gosiewski Z., Falkowski K., Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2003.
- [5] Górecki P., Wzmacniacze operacyjne – podstawy, aplikacje, zastosowania, BTC, 2004.
- [6] Grega W., Piłat A., Comparison of Linear Control Methods for an AMB System, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2005, vol. 15, no. 2, 245-255.
- [7] Maslen E., Schweitzer G., Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery, Springer-Verlag, Berlin 2009.
- [8] Mönch I. J., Bahr F., Melzer M., Karnaushenko D., Makarov D., Hofmann W., Schmidt O. G., Flexible Hall Sensorics for Flux-Based Control of Magnetic Levitation, IEEE Transactions On Magnetics, 2015, vol. 51, no. 11.
- [9] Mystkowski A., Sterowanie odporne drganiem wirnika łożyskowanego magnetycznie, rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział IMiR, Kraków 2007.
- [10] Mystkowski A., Kaparin V., Kotta Ü., Pawluszewicz E., Tönso M., Feedback linearization of an active magnetic bearing system operated with a zero-bias flux, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2017, vol. 27, no. 3, 539-548.

- [11] Mystkowski A., Kierdelewicz A., Flux Measurement and Monitoring System of Active Magnetic Bearing Using Ultra-thin and Flexible Hall Sensors, 12th International Conference Mechatronic Systems and Materials, Białystok 2016.
- [12] Mystkowski A., Pawłuszewicz E., Dragašius E., Robust nonlinear position-flux zero-bias control for uncertain AMB system, *International Journal of Control*, 2015, vol. 88, 1619-1629.
- [13] Nan-Chyuan Tsai, Chien-Hsien Kuo, Rong-Mao Lee, Regulation on radial position deviation for vertical AMB systems, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, vol. 21, no. 7, 2777-2793.
- [14] <https://www.ifw-dresden.de/institutes/institute-for-integrative-nanosciences-iin/> (dostęp 23.11.2017).
- [15] <http://home.agh.edu.pl/~maziarz/LabPE/wzmacniacz.html> (dostęp 23.11.2017).