

# 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).

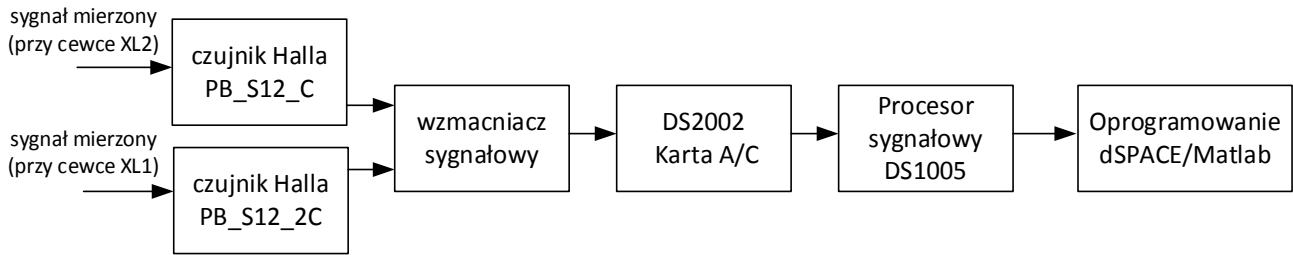
## 1. WSTĘP

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 rozprężnięcie 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  $\mu\text{m}$ , 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.

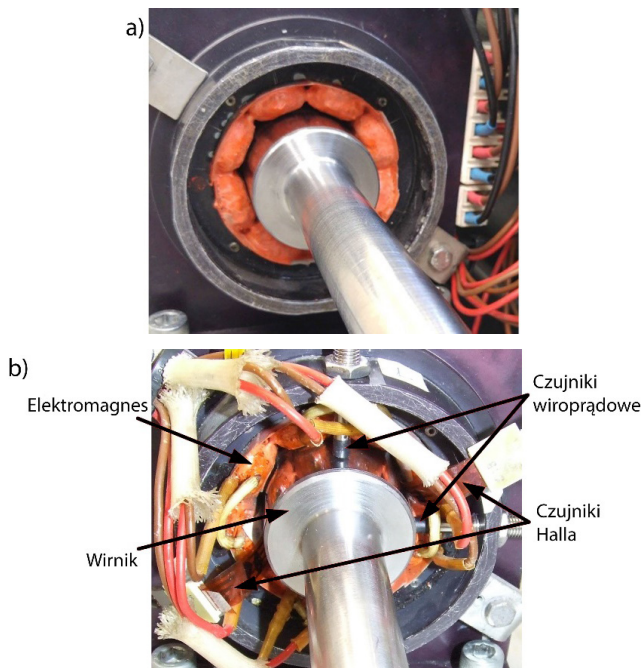
### 2.1 Aktywne łożysko magnetyczne

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 wiroprowodowych wykorzystywanych do pomiaru położenia promieniowego wirnika w szczelinie powietrznej w osiach x-y z dokładnością do 1 μm.

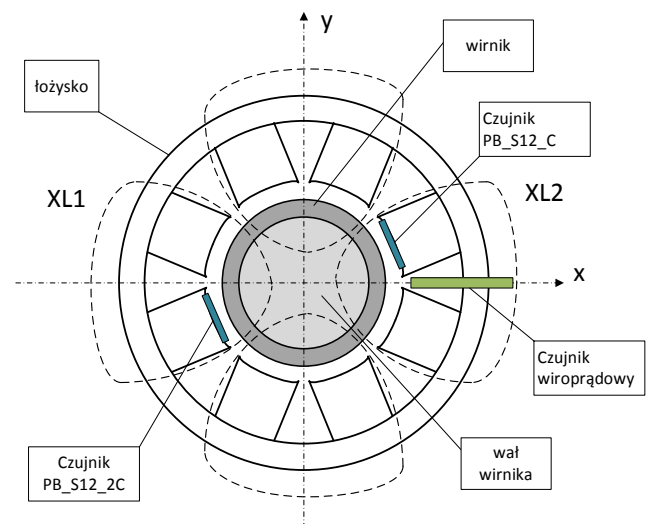
Wyżej wymienione pierścienie zostały wykonane ze stali 40HM, dla której czujniki wiroprowodowe charakteryzują się liniową charakterystyką statyczną, będącą zależnością pomiędzy przemieszczeniem promieniowym wirnika a napięciem wyjściowym czujnika. AŁM składa się z części zewnętrznej cewek elektromagnetycznych 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 nabiegunnika	$A_p = 0,000360 \text{ m}^2$
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 $i_{max} = 10 \text{ A}$ )
Sztywność prądowa	$k_i = 13,62 \text{ N/A}$
Sztywność przemieszczeniowa	$k_s = 97656 \text{ N/m}$
Rezystancja	$R = 0,26 \Omega$
Indukcyjność	$L = 0,0021 \text{ H}$

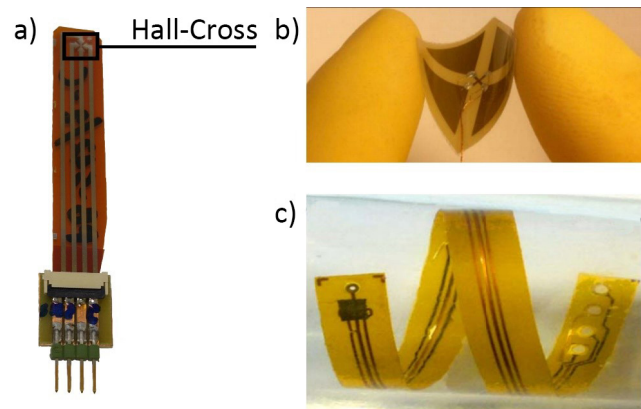
## 2.2 Czujniki Halla

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

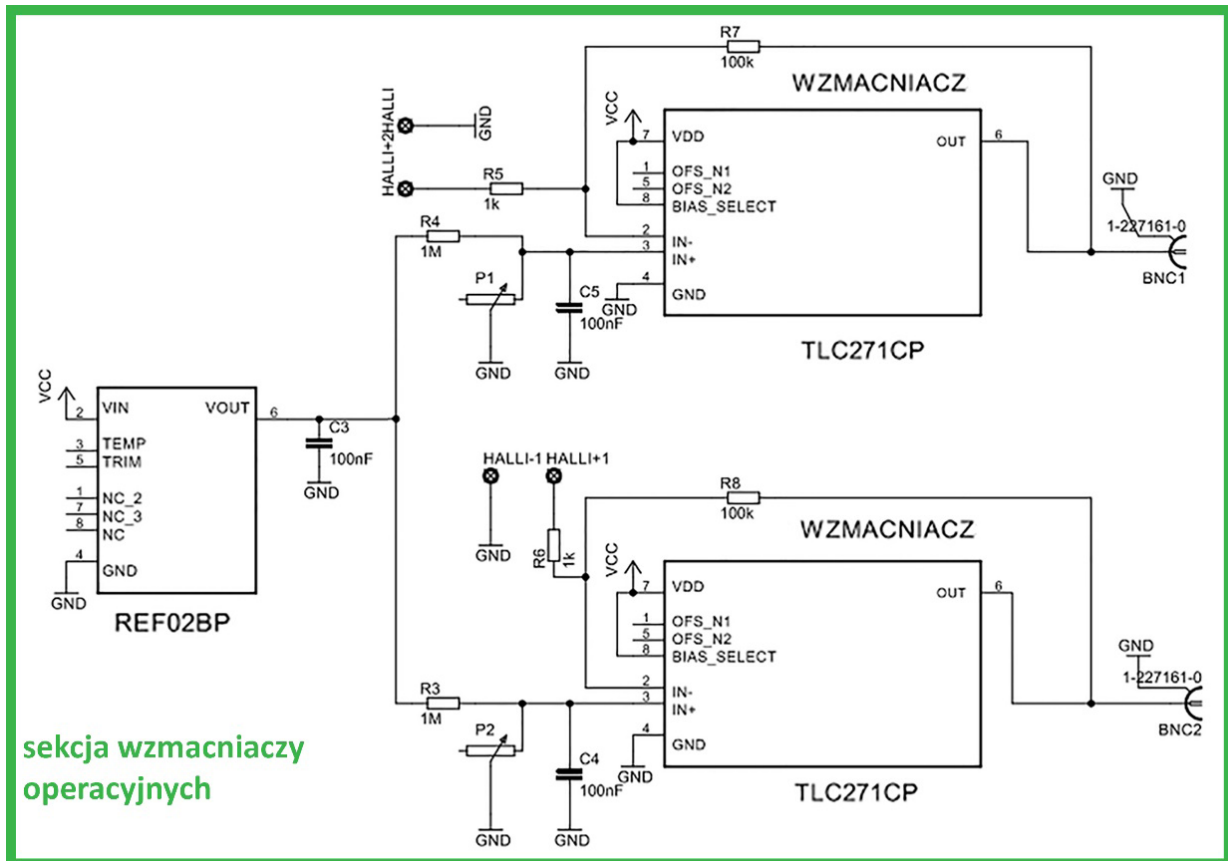
Z powodu braku dedykowanych wzmacniaczy dla elastycznych czujników Halla zaprojektowano i wykonano dedykowany układ wzmacniacza (Rys. 5). Specjalistyczny układ wzmacniacza jest niezbędny z uwagi na niską wartość sygnału wyjściowego czujnika, wynoszącą od 200 do 300  $\mu\text{V}$ . Wartości te uniemożliwiają 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].

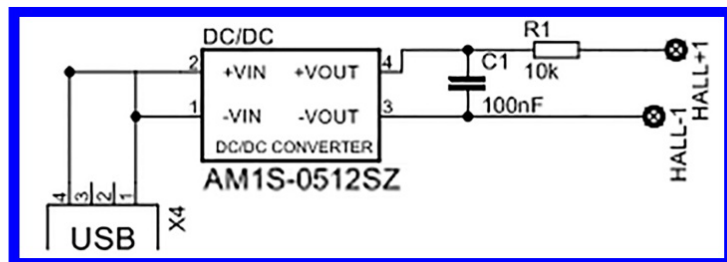
Zaprojektowany układ wzmacniacza jest dwukanałowy i pozwala na jednoczesne podłączenie dwóch czujników. Zgodnie ze schematem (Rys. 5), para kanałów jest zasilana z portu USB. Każdy z portów USB dostarcza zasilanie do przetworników AM1S-0512SZ, które zasilają czujniki Halla oraz dalsze układy scalone 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 $\mu\text{m}$
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 $\mu\text{m}$ x 400 $\mu\text{m}$
Pomiarowe natężenie prądu	1 mA
Maksymalne natężenie prądu	10 mA
Mocowanie	mechaniczne



sekcja zasilania



Rysunek 5 Schemat wzmacniacza sygnału

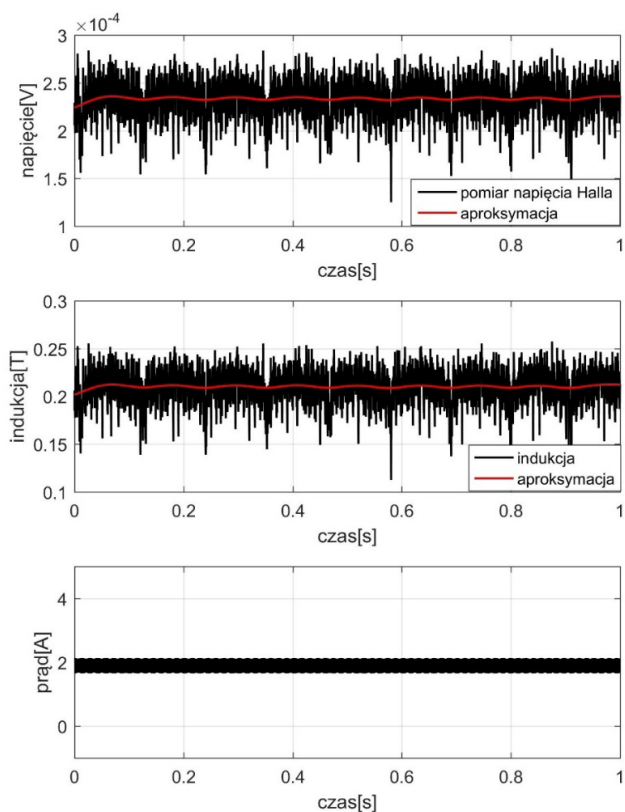
### 3. WYNIKI I Dyskusja

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  $k = 1500$ .

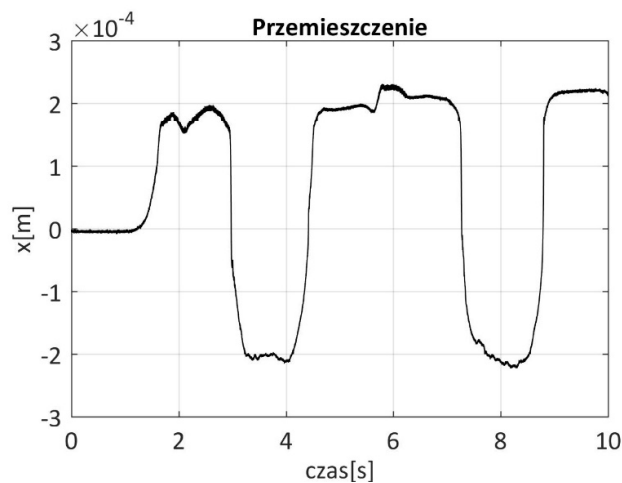
Prądowe sygnały sterujące siłownikami elektromagnetycznymi AłM zadawano z poziomu oprogramowania ControlDesk dołączonego do procesora sygnałowego dSpace. Podczas badań eksperymentalnych uzyskano następujące wyniki:

- 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).

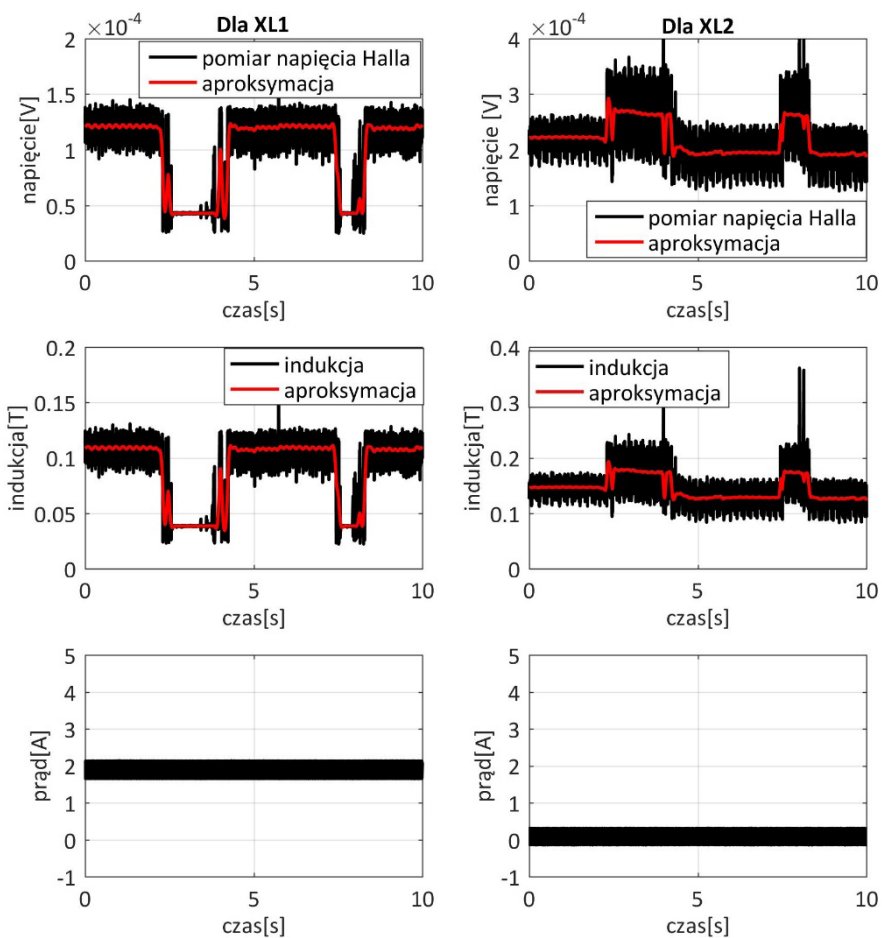
W tym przypadku wirnik był dynamicznie przemieszczany według zarejestrowanego przebiegu przedstawionego na Rysunku 7. Przemieszczenie wirnika zawiera się w przedziale od -0,0002 m do 0,0002 m, co odpowiada nominalnej szerokości szczeliny powietrznej w AłM. Położenie zerowe odpowiada geometrycznemu środkowi 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 AłM 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 AłM 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,  $\mu_0$  – 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  $\mu\text{m}$ ) 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  $\mu\text{V}$ ) 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).