

Zrobotyzowane stanowisko do badania pola magnetycznego

Adam Piłat

Badanie rozkładu pola magnetycznego w otoczeniu jego źródła wymaga zastosowania zintegrowanego stanowiska pomiarowego automatyki. Zadanie precyzyjnego prowadzenia głowicy pomiarowej jest powierzone robotowi, zaś pomiar, akwizycja i analiza danych – dedykowanemu oprogramowaniu. Cały system zorganizowano w oryginalne autonomiczne komputerowe stanowisko badawcze. Podano przykłady badań eksperymentalnych.

Nowoczesne modelowanie elektromechanicznych elementów automatyki wymaga podejścia interdyscyplinarnego i wykorzystania zaawansowanego oprogramowania do obliczeń numerycznych. Możliwość uwzględnienia kształtu elementu wraz z właściwościami materiałowymi przy obecności sygnału sterującego pozwala na kompleksowe modelowanie elementów wykonawczych automatyki [1]. Procedura modelowania i symulacji powinna wiernie oddawać właściwości obiektu rzeczywistego. Wiadomym jest, iż ze względu na uproszczenia, przyjęte założenia bądź niezbadane jeszcze wzajemne zależności, opracowane modele numeryczne mogą różnić się od obiektów rzeczywistych. Dlatego procedurę modelowania należy uzupełnić weryfikacją metodami eksperymentalnymi, których użycie wymaga zastosowania specjalistycznej aparatury. Niejednokrotnie aparatura ta jest wytwarzana indywidualnie ze względu na specyficzne wymagania dotyczące konkretnego zastosowania.

Motyacją do skonstruowania takiego stanowiska były prowadzone od kilku lat badania nad aktywnymi systemami magnetycznej lewitacji (zawieszania i łożyskami) [2]. W tych urządzeniach źródłem pola magnetycznego jest jeden lub wiele siłowników elektromagnetycznych o konfiguracji rdzenia typu C lub E. Dla prawidłowego działania ww. systemów istotna jest znajomość wytwarzanej przez nie siły, tę zaś można identyfikować bądź mierzyć bezpośrednio. Zastosowanie czujnika siły w celu zapewnienia sztywnego połączenia z obiektem nie zawsze jest możliwe ze względów konstrukcyjnych. Wykorzystanie pomiaru indukcji magnetycznej pozwala na zbadanie rozkładu wartości indukcji pola magnetycznego.

Poszerzenie wiedzy o rozkład indukcji magnetycznej w otoczeniu jej źródła, a w szczególności w otoczeniu sterowanego siłownika elektromagnetycznego, stanowi ważny element w procedurze modelowania i sterowania tych bezkontaktowych elementów wykonawczych automatyki. Poznanie rozkładu warto-

ści indukcji pola magnetycznego dla konkretnej konstrukcji pozwala również na opracowanie efektywnej strategii sterowania.

Opracowany robot skanujący stanowi przykład rozwiązania dedykowanego, umożliwiającego wyznaczenie parametrów pola magnetycznego. Zrobotyzowane stanowisko badawcze wykonano częściowo podczas realizacji prac inżynierskich [3, 4]. Do prowadzenia badań wyposażono je w sprzęt zakupiony podczas realizacji projektu POL-POSTDOC.

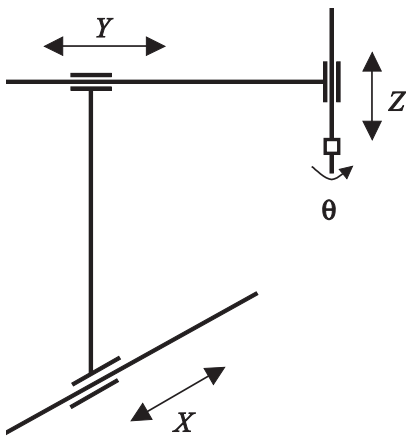
Konstrukcję robota można zaliczyć do kategorii skanerów bezstykowych. Określenie „skaner” dotyczy zazwyczaj urządzeń służących do pomiaru geometrii za pomocą różnych technik, w tym laserowych, wizyjnych czy ultradźwiękowych. Zadaniem skanera jest dostarczenie „chmury” punktów opisujących właściwości geometryczne badanego obiektu. W przypadku omawianego zastosowania zadanie sprowadza się do otrzymania rozkładu wartości indukcji pola magnetycznego w badanej przestrzeni otaczającej jego źródło.

Aby dane pomiarowe były przydatne w późniejszej analizie, robot musi spełniać wymagania dotyczące dużej precyzji pozycjonowania i powtarzalności ruchów. Dlatego też zastosowano silniki krokowe pracujące w trybie 1/8 kroku sterowane impulsem taktującym i kierunkowym. Wykonany robot umożliwia przemieszczanie się głowicy pomiarowej z dokładnością 10 μm w każdej z osi XYZ oraz wykonywanie obrotu głowicy skanującej z rozdzielczością 0,06°. Przy sterowaniu robotem z częstotliwością 1 kHz otrzymano prędkość posuwu 2 mm/s dla przemieszczeń liniowych oraz 0,03°/s dla ruchu obrotowego.

W założeniach konstrukcyjnych robot miał być na tyle uniwersalny, aby można go było zastosować do skanowania obszarów prostopadłościennych i cylindrycznych. Konstrukcję robota wykonano z materiałów niewnoszących zniekształceń w badanym polu magnetycznym. Skonstruowany robot (rys. 2) ze względu na strukturę kinematyczną zalicza się do robotów stacjonarnych o układzie szeregowym (rys. 1).

Wszystkie wykonywane komponenty robota były trasowane z dokładnością 0,01 mm. W celu realizacji przemieszczeń liniowych zastosowano prowadnice szynowe z wózkami o napędzie śrubowym (rys. 2).

dr inż. Adam Piłat – Katedra Automatyki,
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków



Rys. 1. Schemat kinematyczny robota skanującego

Wózek osi X sprzęgnięto ze śrubą za pomocą elementu zawierającego podwójną nakrętkę. Końce śruby zamocowano w silniku krokowym oraz układzie łożyskowania. Bliźniaczą konstrukcję ma oś Y . Do zrealizowania układu transportowego w osi Z wykorzystano łożyska liniowe umieszczone w elemencie sprzęgającym i suwające się po hartowanych i polerowanych prętach. Człon ten jest napędzany śrubą umieszczoną centralnie pomiędzy prętami. Ostatni element konstrukcji stanowi człon umożliwiający obrót głowicy skanującej o kąt θ . Umieszczono go na końcu osi pionowej zapewniając obrót końcówki o dowolny kąt w zakresie 360° (rys. 1).

Podstawowym elementem w konstrukcji robota są układy napędowe. Do precyzyjnego pozycjonowania wykorzystano silniki krokowe działające w pętli otwartej. W związku z tym koniecznym było zagwarantowanie powtarzalności ruchu silników. Cel ten osiągnięto poprzez: precyzyjne wykonanie elementów mechanicznych, zastosowanie zintegrowanego sprzętowego sterownika silników krokowych oraz



Rys. 2. Zrobotyzowane stanowisko badawcze pola magnetycznego

generowanie sygnału taktującego w czasie rzeczywistym na podstawie opracowanego algorytmu, uruchomionego w zintegrowanym środowisku kontrolno-pomiarowym (rys. 3).

Komputerowy system kontrolno-pomiarowy

Jednostką sterującą robotem jest komputer klasy PC wyposażony w kartę kontrolno-pomiarową PCI-6259 firmy National Instruments. Realizacja zadanej trajektorii ruchu pozostaje pod kontrolą oprogramowania MATLAB/Simulink/RTW/RTWT wykonującego kod modelu oraz dedykowanej s-funkcji w czasie rzeczywistym z częstotliwością $1,0$ kHz. Opracowany automat skanujący zrealizowany w postaci s-funkcji umożliwia sterowanie robotem poprzez równoległe wysterowanie silników krokowych, według zadanej trajektorii. Ta zaś jest generowana przed przystąpieniem do pomiaru na podstawie parametrów określających przestrzeń/płaszczyznę skanowania, rozdzielczość oraz liczbę pomiarów indukcji pola w punkcie wstrzymania ruchu skanera.

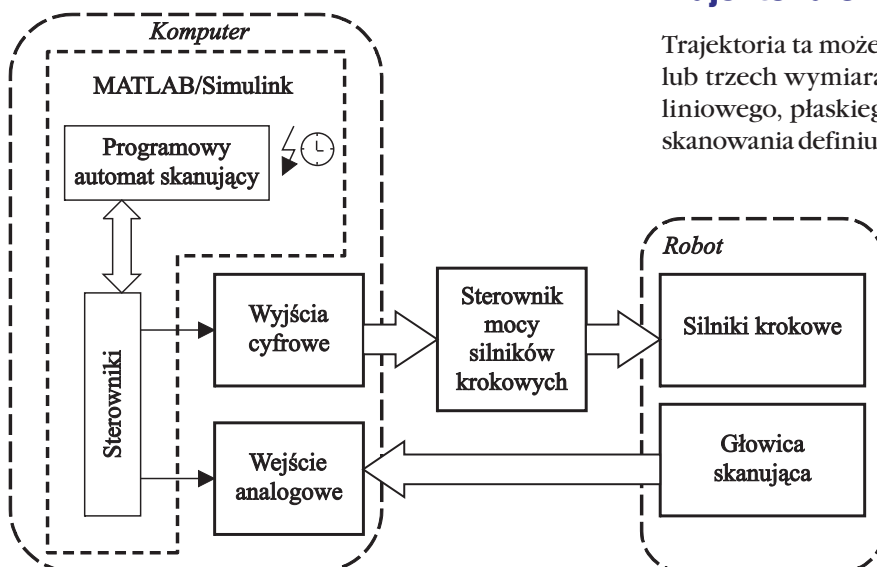
Sonda pomiarowa

Głównym elementem zrobotyzowanego skanera jest czujnik indukcji magnetycznej. Przy wykorzystaniu komory „ZeroTesla” możliwa jest precyzyjna kalibracja urządzenia poprzez wyzerowanie napięcia wyjściowego. Pomiar wartości indukcji magnetycznej jest możliwy w następujących zakresach: $0,01$ mT – 20 mT, $0,1$ mT – 200 mT oraz $1,00$ mT – 2000 mT. Bipolarne napięcie wyjściowe w zakresie ± 10 V pozwala na sprzęg czujnika z zestawem komputerowym, dając możliwość wykorzystania pełnego zakresu przetwarzania analogowo-cyfrowego.

Trajektoria skanowania

Trajektoria ta może zostać określona w jednym, dwóch lub trzech wymiarach, co pozwala na uzyskanie skanu liniowego, płaskiego bądź przestrzennego. Trajektorię skanowania definiuje się w sposób programowy poprzez określenie wielkości obszaru, odległości między przesunięciami i rozdzielczości wykonania pomiaru.

Na trajektorii ruchu określone są punkty, w których ma zostać dokonany pomiar indukcji magnetycznej. Rozkład punktów pomiarowych oraz liczba wykonań przetwarzania analogowo-cyfrowego w każdym z nich jest ustalana przez operatora i limitowana jedynie czasem skanowania.



Rys. 3. Schemat ideowy zrobotyzowanego stanowiska do badań pola magnetycznego

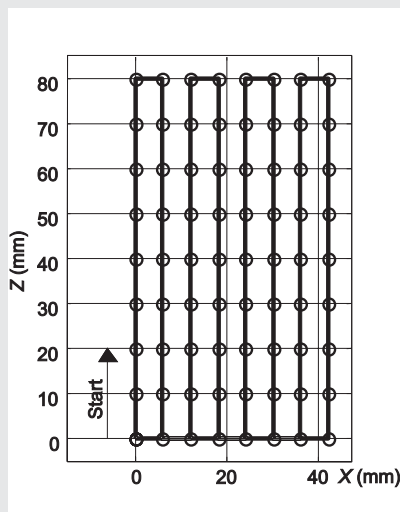
Sterowanie

Każdy sterownik silnika krokowego ma dwa wejścia cyfrowe: kierunkowe i sterujące. Odpowiedni stan logiczny na wejściu kierunkowym determinuje kierunek obrotów, zaś zmiana stanu na wejściu sterującym powoduje wykonanie elementarnego obrotu silnika krokowego. Zagwarantowanie stabilności częstotliwości impulsów sterujących zostało uzyskane dzięki zastosowaniu

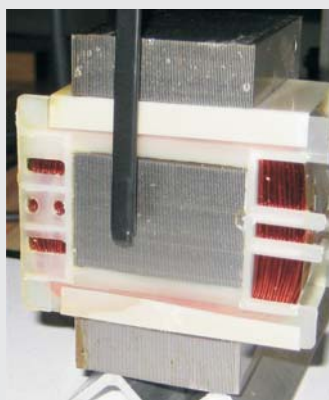
systemu czasu rzeczywistego. Wspomniana s-funkcja na podstawie wejściowych wektorów opisujących trajektorię ruchu ma zaimplementowaną maszynę stanową, która realizuje sterowania elementarne silnikami.

Algorytm sterowania i pomiaru jest tak skonstruowany, że ruch robota jest wstrzymywany na czas przeprowadzenia pomiaru. Określona liczba pomiarów jest wykonywana ze zdefiniowaną częstotliwością próbkowania kanałów analogowych.

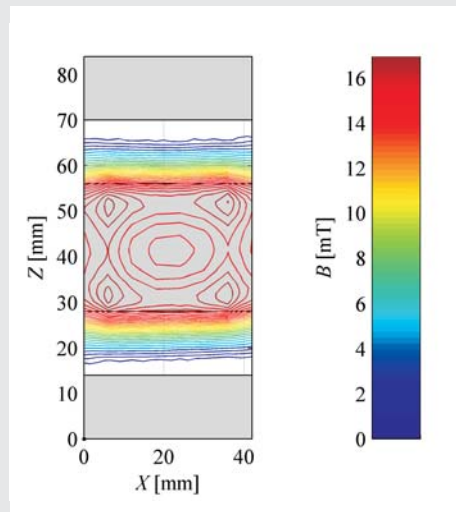
Przykłady



Rys. 4. Zaprojektowana trajektoria skanowania



Rys. 5. Skanowanie pola siłownika EM-E-84-42-AP01



Rys. 6. Obraz składowej Z indukcji pola magnetycznego w płaszczyźnie równoległej do czoła siłownika EM-E-84-42-AP01

Celem zilustrowania pracy robota przeprowadzono badania pola magnetycznego dwóch siłowników elektromagnetycznych.

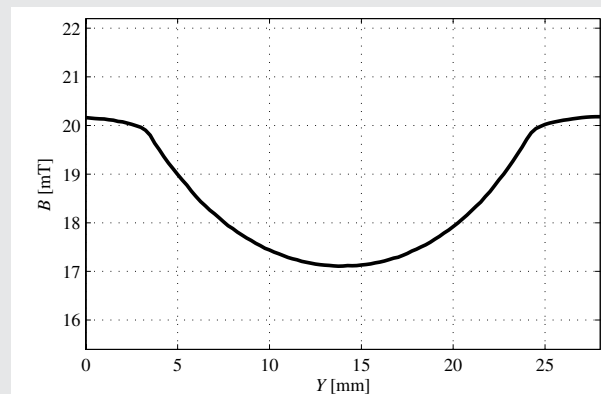
Na rys. 4 przedstawiono przykładową trajektorię dla skanowania płaskiego w płaszczyźnie oddalonej o 3 mm od czoła siłownika EM-E-84-42-AP01 (rys. 5). Zaznaczono punkt startu oraz trajektorie ruchu wraz z punktami zatrzymania celem przeprowadzenia pomiaru indukcji magnetycznej. Po zakończeniu procedury skanowania końcówka powraca do pozycji początkowej. Tamże zaznaczono punkty, w których dokonywany jest pomiar (rys. 4).

W wyniku analizy danych pomiarowych otrzymuje się obraz indukcji pola magnetycznego na zadanej trajektorii skanowania. Odpowiednia ilustracja graficzna pozwala na przedstawienie linii indukcji według zmierzonych wartości (rys. 6).

Drugi eksperyment polegał na zbadaniu rozkładu pola magnetycznego w szczelinie siłownika elektromagnetycznego EM-C-90-1200-AP04 zasilanego prądem stałym o natężeniu 3 A. Rys. 7 ilustruje stanowisko badawcze podczas pomiarów. Wynik badań przedstawia rys. 8, ilustrując niejednorodny rozkład pola magnetycznego w szczelinie elektromagnesu.



Rys. 7. Skanowanie pola siłownika EM-C-90-1200-AP04



Rys. 8. Wykres indukcji magnetycznej w szczelinie siłownika EM-C-90-1200-AP04

Podsumowanie

Opracowane stanowisko badawcze pozwala na pomiar wektora indukcji pola magnetycznego w zakresie do 2000 mT. Programowa nastawa trajektorii ruchu głowicy skanującej wraz z programowalną konfiguracją akwizycji danych pomiarowych pozwala na dostosowanie stanowiska do określonego kształtu siłownika i wymagań metrologicznych. Otwarta architektura programowo-sprzętowa pozwala na prowadzenie różnych badań, umożliwiających wykonywanie pomiarów zarówno płaskich jak i przestrzennych. Zastosowanie środowiska czasu rzeczywistego gwarantuje powtarzalność pomiarów oraz stabilność generowania impulsów sterujących determinując precyzję ruchów robota. Wykorzystanie możliwości graficznych pakietu MATLAB pozwala na stosowną wizualizację przetwarzanych danych. Trwające prace są ukierunkowane na pomiary przestrzenne wraz z automatyczną analizą danych oraz weryfikacją modeli numerycznych siłowników elektromagnetycznych.

Podsumowując należy stwierdzić, iż opracowane zintegrowane stanowisko badawcze może realizować następujące zadania:

- pomiar indukcji pola magnetycznego w otoczeniu elementów będących jego źródłem, w tym elementów sterowanych
- skanowanie geometrii obiektów – po wymianie głowicy na bezkontaktowy laserowy czujnik odległości
- precyzyjny montaż poprzez zastąpienie głowicy skanującej elementem wykonawczym np. chwytakiem
- precyzyjne centrum skrawające poprzez zastosowanie głowicy np. frezującej.

Praca powstała częściowo w ramach badań statutowych AGH oraz podczas realizacji projektu POL-POSTDOC II, PBZ/MEiN/01/2006/48.

Bibliografia

1. Piłat A.: *Active magnetic suspension and bearing. Modelling and simulation*, InTech Education and Publishing, Vienna, s. 453–470, 2008.
2. Strona internetowa pracownika, <http://home.agh.edu.pl/~ap>.
3. Hojda R., Kosek T.: *Robot skanujący pole magnetyczne obiektu*, praca inżynierska, AGH WEAIiE, K. Aut., promotor Adam Piłat, 2008.
4. Folatko, L., Dobosz J.: *Robot transportowy z bezkontaktowym chwytakiem*, praca inżynierska, AGH 2008, promotor Adam Piłat, 2008.
5. EM-E-84-42-AP01 (2003): *Dokumentacja siłownika elektromagnetycznego EM-E-84-42-AP01*, InTeCo, Kraków.
6. EM-C-90-1200-AP04 (2009): *Dokumentacja siłownika elektromagnetycznego EM-C-90-1200-AP04*, InTeCo, Kraków. ■