

System pomiarowy do badania równomierności pola magnetycznego

Streszczenie. W artykule opisano system pomiarowy, który opiera się na skanowaniu pola magnetycznego z wykorzystaniem plotera CNC. Przeprowadzone zostały kompleksowe badania różnych materiałów, które potwierdzają skuteczność i precyzję systemu w analizie równomierności pola magnetycznego. Zaprezentowane wyniki stanowią podstawę kontynuacji prac nad doskonaleniem właściwości materiałów oraz ich dalszej klasyfikacji, odpowiednio dopasowując je do konkretnych zastosowań.

Słowa kluczowe: skaner CNC, skaner magnetyczny, mapa pola magnetycznego, jednorodność pola magnetycznego.

Wstęp

Pomiary magnetyczne odgrywają kluczową rolę w wielu dziedzinach, takich jak przemysł, nauka czy medycyna. Precyzyjne i dokładne pomiary stałej indukcji magnetycznej na powierzchni różnych materiałów są istotne dla zrozumienia ich właściwości magnetycznych oraz oceny jakości i charakterystyk materiałów. W celu zwiększenia precyzji i efektywności pomiarów magnetycznych, rozwijane i wykorzystywane są nowe technologie i metody.

Koncepcja prezentowanego systemu pomiarowego opiera się na wykorzystaniu technologii CNC (Computer Numerical Control) do precyzyjnego i automatycznego sterowania skanerem magnetycznym. Skaner ten został specjalnie zaprojektowany i zbudowany, aby umożliwić dokładny pomiar stałej indukcji magnetycznej na powierzchni różnych materiałów paramagnetycznych i ferromagnetycznych. Do tego celu została wykorzystana sonda hallotronowa, która jest czuła na zmiany pola magnetycznego. Technologia CNC, wykorzystywana do sterowania maszynami i narzędziami przy użyciu komputerów i oprogramowania, ma szerokie zastosowania w przemyśle, a także ma duży potencjał zastosowań w dziedzinie pomiarów..

Skaner może realizować serie pomiarów w wyznaczonych punktach na powierzchni materiału z zadaną rozdzielczością, umożliwiając uzyskanie dokładnych wartości stałej indukcji magnetycznej w tych punktach. Taki system pomiarowy zapewnia precyzyjne i wiarygodne dane, które znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, przemysłu i inżynierii. Błędy precyzji nastawiania punktów pomiarowych i pomiarów indukcji magnetycznej w tych punktach w wielu przypadkach są pomijalnie małe, ponieważ są zdominowane przez rozrzut indukcji magnetycznej w różnych punktach materiału. Z tego powodu dane uzyskane za pomocą opracowanego systemu pomiarowego mogą być wykorzystywane np. do klasyfikacji materiałów. Poprzez analizę otrzymanych wyników pomiarów i obliczenie wskaźników statystycznych z powtarzalnych pomiarów wielokrotnych w poszczególnych punktach można przyporządkować materiały do określonych grup o różnych właściwościach magnetycznych.

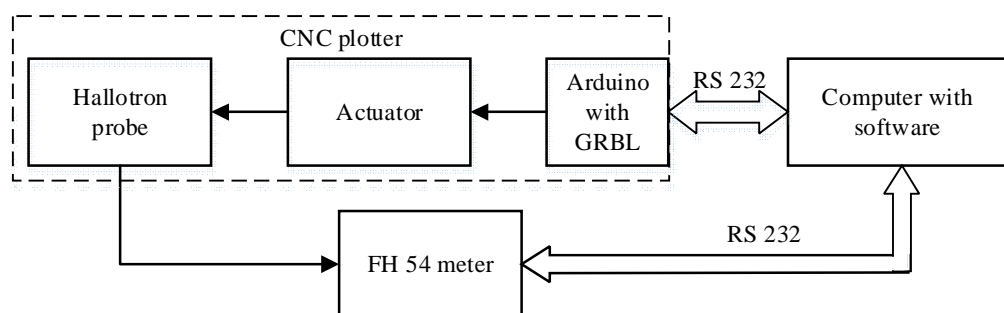
System pomiarowy wyposażony w skaner magnetyczny jest więc nie tylko narzędziem do precyzyjnych pomiarów stałej indukcji magnetycznej, ale także narzędziem do analizy i klasyfikacji materiałów na podstawie ich właściwości magnetycznych. Przedstawienie metody klasyfikacji materiałów na podstawie danych

z pomiarów otwiera nowe możliwości w dziedzinie analizy materiałowej. Pozwala to na szybkie i efektywne określanie właściwości magnetycznych materiałów oraz selekcję odpowiednich materiałów do konkretnych zastosowań. W rezultacie, technologia CNC w połączeniu ze skanerem magnetycznym przyczynia się do rozwoju inżynierii materiałowej, gdzie precyzyjne pomiary magnetyczne mają kluczowe znaczenie dla projektowania i produkcji nowoczesnych komponentów i urządzeń.

Skanowanie powierzchni w systemie pomiarowym

Skanowanie CNC jest to zaawansowana technika sterowania ruchem narzędzia pomiarowego za pomocą komputerowego systemu sterowania. Jest to niezwykle precyzyjna metoda, która pozwala na wykonywanie skomplikowanych operacji pomiarowych z dużą dokładnością i powtarzalnością.

Schemat systemu pomiarowego został przedstawiony na rys. 1.



Rys.1. Schemat blokowy układu pomiarowego

System pomiarowy składa się z trzech głównych komponentów: plotera CNC z sondą hallotronową, miernika pola i nadrzędnej jednostki sterującej, którą tworzy komputer wraz z autorskim oprogramowaniem. Skaner CNC jest odpowiedzialny za kontrolę ruchu głowicy pomiarowej, która porusza się po zdefiniowanej trajektorii w badanym obszarze. Sonda hallotronowa zamocowana jest na ruchomej głowicy plotera CNC

o powierzchni roboczej (200x200x100) mm. Napęd urządzenia został zrealizowany przy wykorzystaniu pasków zębatych oraz prowadnic 8 mm dla osi X i Y. Do przeniesienia napędu osi Z wykorzystano śrubę trapezową. Głowica porusza się po zdefiniowanej trajektorii, która obejmuje obszar, w którym mają być dokonane pomiary pola magnetycznego. Skanowanie CNC umożliwia pomiary pola magnetycznego w różnych punktach na powierzchni, co pozwala na uzyskanie trójwymiarowej mapy rozkładu pola magnetycznego wokół określonego obiektu.

Silniki krokowe sterowane są za pomocą modułu sterującego zbudowanego z ARDUINO UNO z programem GRBL, który jest oparty na znormalizowanym zapisie poleceń dla urządzeń CNC (G code) oraz sterowników silników krokowych. Podczas skanowania, miernik pola magnetycznego FH-54 firmy Magnet-Physik rejestruje dane pomiarowe z sondy, które są następnie przetwarzane przez system komputerowy. W wyniku tego przetwarzania otrzymuje się informacje dotyczące indukcji pola magnetycznego w badanym obszarze. System umożliwia również generowanie mapy pola magnetycznego, która może być wizualnie przedstawiona jako grafika trójwymiarowa.

Akwizycja i interpretacja danych pomiarowych

Akwizycja danych pomiarowych obejmuje zarówno współrzędne pomiaru XYZ, jak i odpowiadające im wartości indukcji magnetycznej. System skanowania CNC z sondą hallotronową pozwala na precyzyjne określenie pozycji punktów pomiarowych w trzech

wymiarach (X, Y, Z) i wykonywanie pomiarów seryjnych. Pojedyncza seria pomiarowa obejmuje skanowanie zadanej powierzchni w płaszczyźnie XY na określonej wysokości Z sondy pomiarowej. Komunikacja między skanerem CNC, miernikiem pola a komputerem odbywa się za pomocą interfejsu RS232, zapewniając szybką i niezawodną transmisję danych.

W celu akwizycji i interpretacji danych został napisany w języku C# specjalistyczny program. Program zbiera i zapisuje dane w bazie SQLite umożliwiając efektywne gromadzenie danych pomiarowych, a jednocześnie zapewniając skalowalność i niezawodność procesu. Zapisane dane są następnie wykorzystywane do generowania arkusza w programie Excel, który zawiera szczegółową mapę pola magnetycznego wokół badanych obiektów oraz wskaźniki liczbowe umożliwiające selekcję materiałów do konkretnych zastosowań.

Istotnych informacji metrologicznych na temat rozkładu badanego pola dostarczają średnie oraz odchylenia standardowe wyznaczane dla poszczególnych punktów oraz dla serii pomiarów w każdym punkcie. Wprowadzenie odpowiednich równań matematycznych do praktycznych zastosowań w formie numerycznej często stanowi wyzwanie. Jednakże, dzięki podejściu skoncentrowanemu na bezpośredniej implementacji tych równań w aplikacji, udało się znacznie uprościć ten proces. Poniżej przedstawiony jest zapis wszystkich równań w formie numerycznej. Aplikacja wyznacza trzy średnie: średnią $a(i)$ z pomiarów i -tej serii, wykonanej dla wszystkich punktów pomiarowych membrany (1), średnią $p(j,t)$ w punktach o współrzędnych j, t liczoną z pomiarów wielokrotnych uzyskanych w n seriach oraz średnią m liczoną ze wszystkich średnich $p(j,t)$.

Średnia z pomiarów i -tej serii:

$$a(i) = \frac{1}{wk} \sum_{j=1, t=1}^{w,k} x(i, j, t) \quad (1)$$

gdzie: i – numer bieżącej serii pomiarów, j – numer bieżącej wiersza tablicy wyników, t – numer bieżącej kolumny tablicy wyników, n – liczba serii pomiarów, k – liczba wierszy tablicy pomiarów, w – liczba kolumn tablicy pomiarów.

Średnia z pomiarów wielokrotnych z n serii:

$$p(j, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i, j, t) \quad (2)$$

Średnia ze wszystkich średnich:

$$m = \frac{1}{nwk} \sum_{i=1, j=1, t=1}^{n, w, k} x(i, j, t) \quad (3)$$

Wskaźniki liczbowe są aktualizowane po każdym skanowaniu badanej płaszczyzny. Przykładowo aktualizacja średniej m dla n serii (ozn. m_n) do średniej (ozn. m_{n+1}), po dodaniu kolejnej serii, o numerze $n+1$ wygląda następująco:

$$m_{n+1} = \frac{1}{n+1} \left[nm_n + \sum_{j=1, t=1}^{w, k} x(n+1, j, t) \right] \quad (4)$$

W aplikacji wyznaczone są również następujące oszacowania odchyłeń standardowych:

Oszacowanie odchylenia standardowego $s_x(i)$ nieobciążonego, pojedynczego wyniku w i -tej serii:

$$s_x(i) = \frac{1}{\sqrt{wk-1}} \sqrt{\sum_{j=1,t=1}^{w,k} [x(i,j,t) - a(i)]^2} \quad (5)$$

Oszacowanie odchylenia standardowego s_p , nieobciążonego, pojedynczej średniej $p(j, t)$. Oszacowanie to jest obliczane z pomiarów $p(j, t)$ i charakteryzuje rozrzut wartości średnich $p(j, t)$ na całej powierzchni badanego obiektu:

$$s_p = \frac{1}{\sqrt{wk-1}} \sqrt{\sum_{j=1,t=1}^{w,k} [p(j,t) - m]^2} \quad (6)$$

Oszacowanie odchylenia standardowego, nieobciążonego s_m , średniej średnich $p(j,t)$ charakteryzuje rozrzut przy powtarzaniu pomiaru w tym samym punkcie membrany, zależy głównie od niejednorodności namagnesowania badanego materiału:

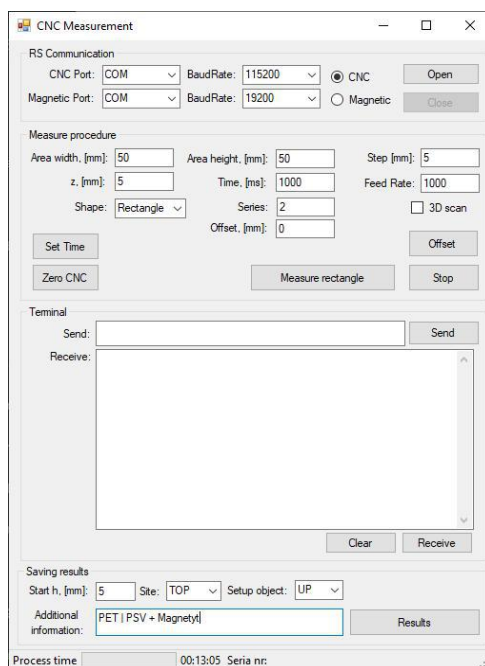
$$s_m = \frac{1}{\sqrt{wk(wk-1)}} \sqrt{\sum_{j=1,t=1}^{w,k} [p(j,t) - m]^2} \quad (7)$$

Interpretacja przedstawionych wzorów dla kształtu różnego od kwadratu wymaga uzależnienia indeksów w i k od funkcji kształtu obwiedni badanego obiektu zarówno w granicach sumowania jak i współczynnikach przed pierwiastkiem.

Interfejs aplikacji

Projekt interfejsu aplikacji zapewnia użytkownikom możliwość zadawania odpowiednich parametrów procedury pomiarowej. Interfejs umożliwia wybór kształtu powierzchni skanowania, precyzyjne określenie kroku pomiaru, rozmiaru powierzchni oraz wielu innych istotnych parametrów.

Jednym z głównych założeń projektu było stworzenie skalowalnej aplikacji, która może być rozwijana i dostosowywana do różnych potrzeb użytkowników. Opracowany interfejs może być łatwo dostosowany do różnej specyfiki pomiarów, jest prosty w obsłudze nawet dla użytkowników bez technicznego doświadczenia (rys. 2).



Rys.2. Okno główne aplikacji

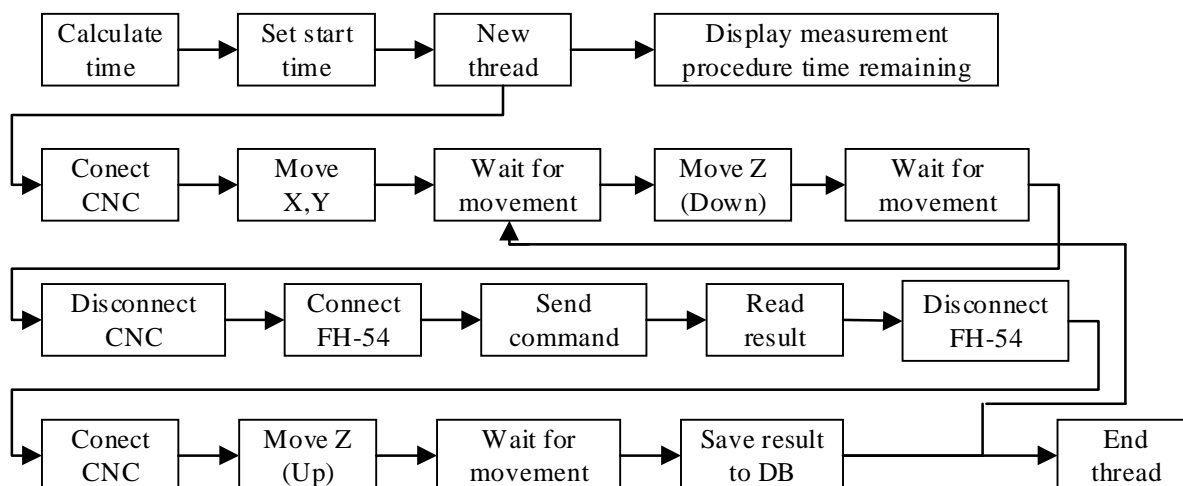
W programie można skalibrować położenie sondy pomiarowej względem badanego obiektu (opcje *Zero CNC* oraz *Offset*), możliwa jest również realizacja procedury skanowania przestrzennego w dwuwymiarowej płaszczyźnie XY z różnymi poziomami wysokości Z (opcja *3D scan*).

Zebrane dane z pomiarów oraz dodatkowe informacje dotyczące procedury są rejestrowane i przechowywane w bazie danych SQLite (opcja *Results*), zapewniając szybki dostęp i skuteczne zarządzanie.

Niewątpliwą zaletą opracowanego programu jest możliwość generowania plików wynikowych w formacie Excel, które są odpowiednio sformatowane, aby zapewnić czytelność i przejrzystość prezentowanych danych. Tablice w tych plikach są starannie ustrukturyzowane, posiadają ramki oraz wyróżnione nagłówki o innym kolorze, co ułatwia odczyt i analizę zgromadzonych informacji. Pod każdą tabelą znajdują się odpowiednie parametry statystyczne opisane w poprzednim rozdziale.

Algorytm

Schemat blokowy algorytmu został przedstawiony na rys. 3. Działanie programu opiera się na wykorzystaniu wątków do realizacji procedury pomiarowej dzięki czemu interfejs użytkownika dostępny jest przez cały czas trwania pomiarów.



Rys.3. Schemat blokowy algorytmu

W wątku głównym aktualizowany jest pozostały czas na realizację skanowania oraz wyświetlane na bieżąco wyniki pomiarów (okno Receive). W wątku bocznym realizowane jest naprzemienne łączenie z poszczególnym urządzeniem przez port szeregowy i realizowane wysyłanie komendy sterującej danym urządzeniem i odbieranie danych. Wykorzystano standardową klasę *SerialPort* z biblioteki .NET Framework która umożliwia zarządzanie połączeniem i operacjami wejścia/wyjścia. Takie rozwiązanie cechuje się dużą niezawodnością i precyzyjną synchronizacją czasu pracy poszczególnych urządzeń, co pozytywnie wpływa również na dokładne oszacowanie czasu trwania całej procedury.

Wizualizacja i analiza wyników badań

Przebadane materiały stanowią zróżnicowaną kolekcję substancji magnetycznych i paramagnetycznych, które dodatkowo różnią się kształtem, twardością oraz fakturą (rys. 4).



Rys.4. Badane próbki materiałów

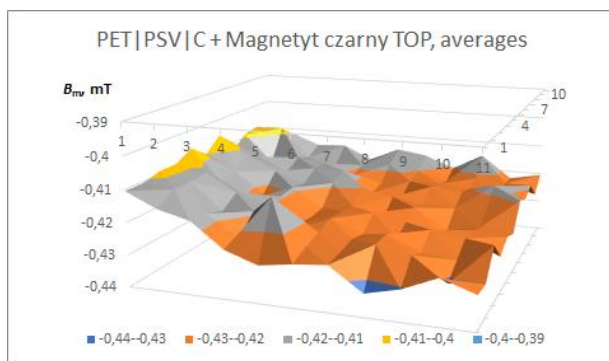
Aby zapewnić kompleksową analizę, każda próbka została starannie umiejscowiona w odniesieniu do punktu centralnego powierzchni roboczej skanera i poddana dwustronnej ocenie (opcja **Stie**: Góra/Dół).

Uzyskane wyniki rejestrowane są w bazie danych, umożliwiając użytkownikowi wybór określonej procedury oraz zapisanie wyników w formie tabel w pliku Excel (rys. 5). Ta elastyczna funkcjonalność pozwala na pełne wykorzystanie zgromadzonych danych, umożliwiając użytkownikowi analizę i prezentację wyników w czytelnej i praktycznej formie. Dzięki temu, możliwe jest dalsze przetwarzanie i udostępnianie wyników pomiarów w wygodny sposób, dostosowany do indywidualnych potrzeb i preferencji użytkownika.

Averages $p(j,t)$ from multiple measurements at points (j,t) included in $n=2$ measurement series.												
$\downarrow j$	$t \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		-0,4105	-0,415	-0,4175	-0,425	-0,4285	-0,427	-0,426	-0,433	-0,4305	-0,426	-0,4295
2		-0,4105	-0,4115	-0,418	-0,4245	-0,411	-0,425	-0,4255	-0,422	-0,424	-0,431	-0,43
3		-0,409	-0,4115	-0,42	-0,419	-0,4245	-0,4235	-0,4245	-0,422	-0,4265	-0,4275	-0,422
4		-0,409	-0,411	-0,4165	-0,42	-0,4245	-0,422	-0,426	-0,4265	-0,4225	-0,424	-0,4285
5		-0,406	-0,416	-0,421	-0,4195	-0,4255	-0,4225	-0,422	-0,424	-0,4265	-0,4245	-0,4255
6		-0,41	-0,415	-0,422	-0,419	-0,425	-0,4235	-0,4265	-0,422	-0,4285	-0,4265	-0,4275
7		-0,4055	-0,4115	-0,4165	-0,42	-0,419	-0,42	-0,422	-0,4235	-0,424	-0,4225	-0,4195
8		-0,413	-0,4145	-0,419	-0,417	-0,417	-0,424	-0,425	-0,42	-0,421	-0,418	-0,4215
9		-0,409	-0,4185	-0,416	-0,4175	-0,421	-0,423	-0,4215	-0,4215	-0,4225	-0,4225	-0,4195
10		-0,408	-0,408	-0,418	-0,421	-0,4195	-0,4185	-0,42	-0,423	-0,421	-0,422	-0,425
11		-0,415	-0,414	-0,4155	-0,415	-0,4195	-0,415	-0,4165	-0,4205	-0,415	-0,4225	-0,4205
m	(3)	-0,42033	mean of measurements from all points									
sp	(7)	0,005727	standard deviation of a single mean									
sm	(8)	0,000521	standard deviation of the mean of means									

Rys.5. Zapis danych w formie tabelarycznej w programie Excel

Dane zgromadzone w tym systemie umożliwiają tworzenie wykresów przestrzennych, które niezwykle ułatwiają analizę właściwości materiałów oraz ich klasyfikację w kontekście konkretnych zastosowań. Dzięki tym wykresom, można w bardziej przejrzysty sposób zobaczyć wzorce, zależności i tendencje zmian indukcji pola magnetycznego, co pozwala lepiej zrozumieć i ocenić potencjalne zastosowania różnych materiałów.



Rys.6. Wykres przestrzenny mapy pola magnetycznego

Wnioski

Jednym z głównych atutów systemu pomiarowego opartego na skanowaniu CNC jest możliwość automatyzacji procesu pomiarowego. Wyniki takich pomiarów odznaczają się wysoką powtarzalnością, co zwiększa efektywność i precyzję pomiarów, a jednocześnie skraca czas potrzebny na przeprowadzenie kompleksowych analiz pola magnetycznego.

Stworzony system pomiarowy umożliwia badanie różnorodnych materiałów o zróżnicowanym kształcie i fakturze w wielu seriach pomiarowych. Dzięki temu wyniki z różnych serii mogą być porównywane, co pozwala na identyfikację ewentualnych trendów, zmienności pola w czasie, czy innych charakterystycznych właściwości materiału. Dane prezentowane w postaci tabel są łatwe w interpretacji, a ich analizę można dodatkowo wizualizować za pomocą wykresów przestrzennych.

LITERATURA

[1] Desouky M.A.A., Abdelkhalik O, A Recursive Approach for Magnetic Field Estimation in Spacecraft Magnetic Attitude Control, *Aerospace*, (2022), No. 9, 833-860

- [2] Mohd Mokhtar N.A., Beh H.G., Lee K.C., The Potential Application of MnZn Ferrite Nanofluids for Wettability Alteration and Oil-Water Interfacial Tension Reduction, *Crystals*, (2019), No. 9, 626-637
- [3] Llandro J., Palfreyman J.J., Ionescu A., et al., Magnetic biosensor technologies for medical applications: a review, *Med Biol Eng Comput*, (2010) No. 48, 977–998
- [4] Pruchnicki M., Badanie wpływu impulsowego pola magnetycznego na wartość napięć indukowanych w krótkich odcinkach kabli, *Przegląd Elektrotechniczny* (2003), nr 11, 811-815
- [5] Zhao Z., Ding D., Fu Y., et al., A hybrid approach for measurement thickness of complex structural parts using ultrasonic inspection and on-machine probing, *Int J Adv Manuf Technol*, (2019), No. 103, 4777–4785
- [6] Kawalec A., Magdziak M., Cena I., Measurement of free-form surfaces on CNC milling machine considering tool wear and small changes of its working length and offset radius, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 35 (2011), No. 1, 25-40
- [7] CNC Application <https://www.rapiddirect.com/knowledge-base/application/>