

Marcin RYBAK Jacek GOŁĘBIEWSKI

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI ELEKTRONIKI INFORMATYKI I AUTOMATYKI POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ (INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI TEORETYCZNEJ METROLOGII I MATERIAŁOZNAWSTWA)

Model przetwornika elektromagnetycznego zastosowanego w krzemowym czujniku drgań mechanicznych

mgr inż. Marcin RYBAK

Studia magisterskie w latach 1998-2003 na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej.
Od 2003 roku jest słuchaczem studium doktoranckiego w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej Metrologii i Materiałoznawstwa PŁ.
Od 2004 roku zatrudniony w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej Metrologii i Materiałoznawstwa PŁ.
Współautor kilkunastu publikacji prezentowanych na konferencjach i w czasopiśmie naukowych.



e-mail: mrybak@p.lodz.pl

Streszczenie

W zastosowanej konstrukcji przetwornika na powierzchni cienkiej belki krzemowej umieszczono uzwojenie w postaci płaskiej. Płynący przez przetwornik prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne, które oddziałuje na umieszczony w pobliżu hallotron. Drgania obiektu wywołują zmianę położenia przetwornika względem hallotronu, co powoduje zmianę sygnału wyjściowego. W pracy przebadano wpływ parametrów konstrukcyjnych przetwornika na wartość indukcji pola magnetycznego w hallotronie. Do analizy rozkładu pola magnetycznego zastosowano metodę elementów skończonych (program ANSYS).

Słowa kluczowe: MEMS, mikrostruktury krzemowe, drgania mechaniczne, czujniki Halla, MES

Modelling of the Electromagnetic Transducer for Silicons Vibrations Sensor

Abstract

The construction of the rectangular silicon beam with mass and the by electromagnetic transducer was described. In the silicon microsystem aluminium electrodes pattern on the beam surface was applied. The current flow by electromagnetic transducer produce magnetic field. Transducer magnetic field influence on Hall sensor. The beam vibrations caused change distance between transducer position by Hall sensor. The analysis of distribution magnetic field was presented. The method of the finite elements was applied to the analysis of the microsystem. The results for the electromagnetic transducer, which were calculated by means of ANSYS programme are presented and discussed.

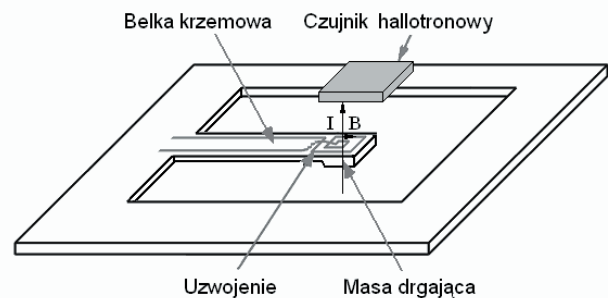
Keywords: MEMS, silicon microstructures, vibration measurement, Hall sensors, FEM

1. Wstęp

Wraz z rozwojem nowoczesnych systemów nadzoru i monitoringu wielkogabarytowych obiektów takich jak mosty, wiadukty, autostrady, wysokościowce itp. występuje potrzeba pomiaru amplitudy drgań mechanicznych w zakresie niskich częstotliwości.

Konstrukcje mikrokrzemowe są wykorzystywane do budowania między innymi czujników drgań mechanicznych. Większość czujników zbudowanych na podłożach krzemowych wykorzystuje przetworniki piezoelektryczne, pojemnościowe lub optyczne. W

przedstawionym opracowaniu analizowano strukturę czujnika z przetwornikiem elektromagnetycznym.



Rys. 1 Widok struktury mikromechanicznego czujnika do pomiaru drgań mechanicznych.

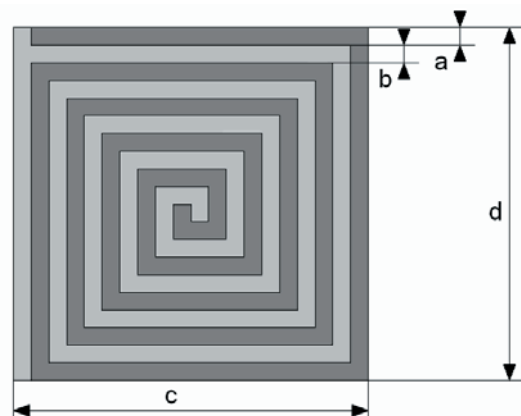
Fig. 1 The micromechanical structures for vibration sensor.

Na rys. 1 przedstawiono konstrukcję czujnika składającą się z czujnika hallotronowego i belki mikrokrzemowej na której umieszczony jest przetwornik elektromagnetyczny.

Wiele urządzeń monitorowanych jest w zakresie częstotliwości od 0,5Hz do 10Hz i w zakresie amplitudy drgań od 0,01mm do 0,5mm. Przedstawiona konstrukcja może znaleźć zastosowanie do pomiaru amplitudy drgań w tym zakresie częstotliwości.

2. Konstrukcja przetwornika elektromagnetycznego

Analizowano kształt spiralny i kwadratowy uzwojenia cewki [2]. Korzystniejsze własności pod względem wykorzystania powierzchni przewodzącej posiada uzwojenie o kształcie kwadratowym. Na rys. 2 pokazano konstrukcję cewki płaskiej przetwornika elektromagnetycznego umieszczonej na powierzchni belki krzemowej.



Rys. 2 Konstrukcja przetwornika elektromagnetycznego umieszczonego na powierzchni belki krzemowej.

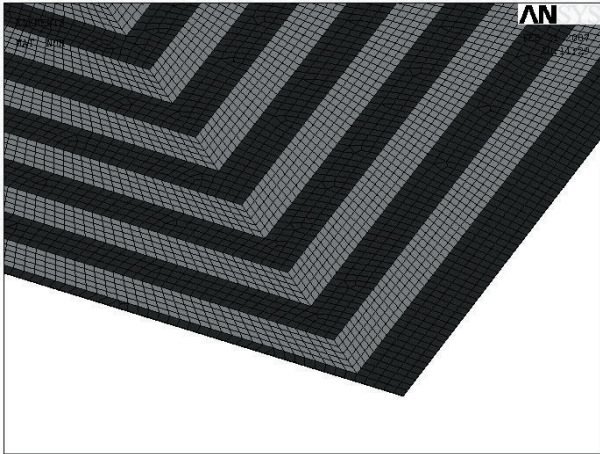
Fig. 2 The electromagnetic transducer construction on the silicon beam.

Przetwornik elektromagnetyczny umieszczony był na powierzchni belki krzemowej zamocowanej jednostronnie (rys. 1). Belka wykonana była z krzemu monokrystalicznego o orientacji $\langle 100 \rangle$. Podstawową, dostępną techniką wykonania

belki było mokre, anizotropowe trawienie krzemu. Ścieżki przetwornika wykonane zostały z aluminium metodą napyłania próżniowego.

3. Model struktury belki mikrokrzemowej

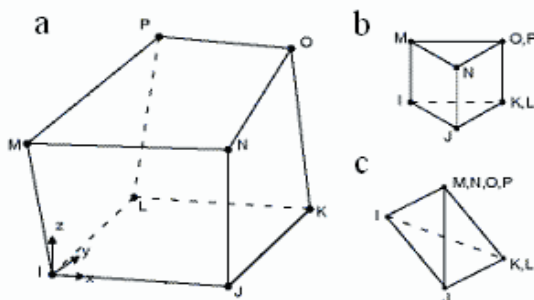
W celu określenia parametrów przetwornika elektromagnetycznego i zoptymalizowania konstrukcji czujnika dla założonego zakresu amplitudy i częstotliwości drgań zaprojektowano model matematyczny. Model matematyczny struktury przetwornika elektromagnetycznego uwzględniał zarówno kształt jak i wymiary geometryczne ścieżek przewodzących.



Rys. 3 Wycinek analizowanej struktury zbudowanej z elementów bryłowych.
Fig. 3 The part of analyzing structures basing on beam elements.

Na rys. 3 pokazano wycinek dwóch warstw analizowanej struktury z naniesioną siatką elementów skończonych. Podłoże stanowi warstwa wykonana z krzemu o orientacji <100>. Na jej powierzchni znajduje się uzwojenie płaskie wykonane z aluminium (kolor jasno szary).

Model MES przetwornika zbudowany był z podstawowych sześciennych elementów bryłowych typu SOLID97. Indukcja pola magnetycznego wyznaczona była w węzłach elementów bryłowych [1] (rys. 4).



Rys. 4 Element skończony typu SOLID97.
Fig. 4 Finite element type SOLID97.

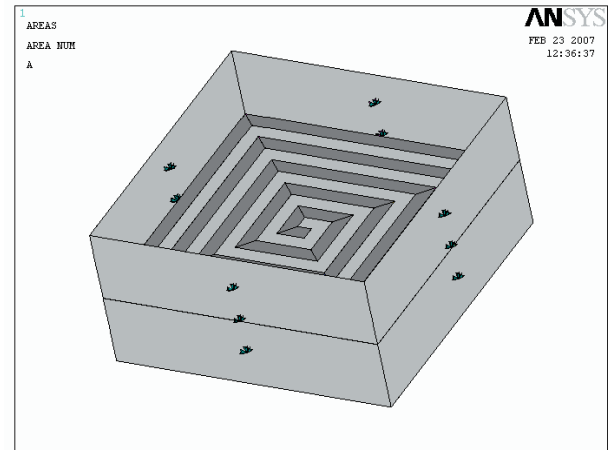
Na rys. 4 przedstawiono podstawową strukturę elementu skończonego (a) oraz jego dwie odmiany: prism (b) i tetrahedral (c). Element sześcienny typu (a) zastosowany był w przypadku regularnych objętości, natomiast elementy typu (b) i (c) były stosowane w przestrzeniach zbudowanych z płaszczyzn między którymi występowały kąty ostre (np. zakończenia ścieżek przewodzących). We wszystkich węzłach elementów obliczana była indukcja B przy zastosowaniu równań Maxwella dla pola stałego [4].

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{0} \quad (2)$$

gdzie: \mathbf{H} – wektor natężenia pola magnetycznego, \mathbf{B} – wektor indukcji pola magnetycznego, \mathbf{J} – wektor gęstości prądu.

Przestrzeń, w której znajduje się przetwornik, była ograniczona powierzchniami ekranującymi pokazanymi na rys. 5.



Rys. 5 Powierzchnie ograniczające przestrzeń w otoczeniu przetwornika.
Fig. 5 Configuration used for the model at the all edges supported structures.

Warunki brzegowe dobrane były w ten sposób, aby linie sił pola magnetycznego mogły swobodnie przenikać jedynie powierzchnie równoległe do płaszczyzny przetwornika. Rozwinięciem równania (1) jest wzór (3), w którym uwzględniono warunki brzegowe (wektor \mathbf{K}).

$$\mathbf{H} = -\nabla \mathbf{N}^T \cdot \mathbf{K} \quad (3)$$

gdzie: \mathbf{N} – funkcja kształtu opisująca ciągłość magnetycznego potencjału wektorowego między dwoma węzłami, \mathbf{K} – węzłowy wektor potencjalny.

Indukcję magnetyczną B wyznaczono wykorzystując wzór $\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H}$. W analizowanym modelu przyjęto przenikalność magnetyczną równą przenikalności powietrza.

4. Analiza modelu i wyniki symulacji

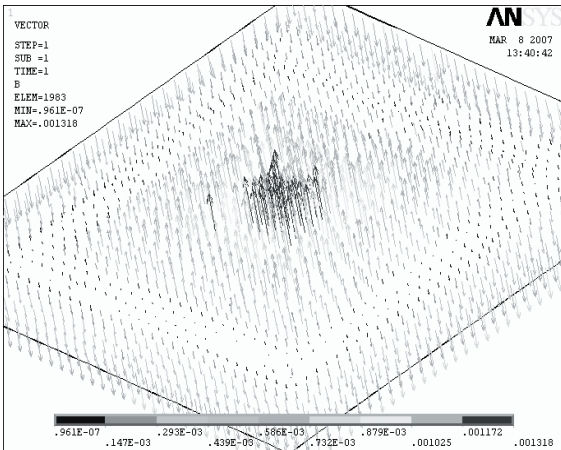
Przy konstruowaniu czujnika drgań mechanicznych (rys. 1) konieczne jest wyznaczenie rozkładu pola magnetycznego przenikającego przez hallotron. W tym celu przeprowadzono analizę elektromagnetyczną modelu MES, wykorzystując program ANSYS.

Dla różnych parametrów konstrukcyjnych (wymiarzy zewnętrzne c i d przetwornika, oraz szerokość ścieżek a i odległość między nimi b , rys. 2) wyznaczono charakterystyki rozkładu indukcji magnetycznej B w funkcji odległości w kierunku osi X , Y i Z .

Ze względu na dostępne technologie i minimalizację wymiarów zewnętrznych czujnika analizowano belki mikrokrzemowe o długości od 2,5mm do 4,5mm i szerokości od 2mm do 4mm [5]. Przebadano struktury o następujących parametrach:

- Długość c i szerokość d przetwornika: od 2mm do 4mm. Długość i szerokość dobrane były ze względu na wymiary belki.
- W przypadku wszystkich analizowanych cewek grubość h wynosiła 1μm.

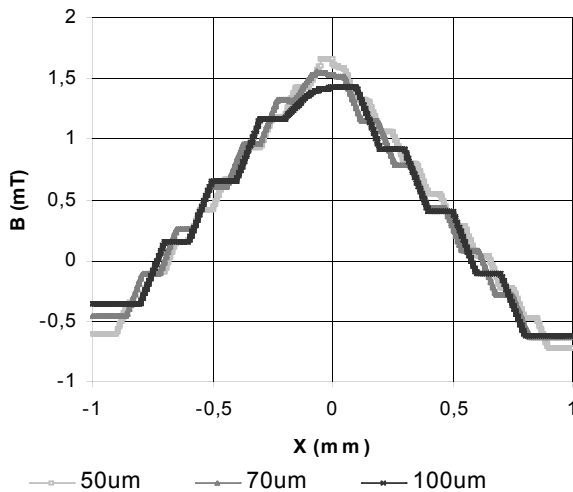
- Szerokość ścieżek zawierała się w przedziale od 50 μ m do 500 μ m. Wartość minimalna wynikała z przyjętej technologii, natomiast wartość maksymalna z minimalnej liczby zwojów możliwej do uzyskania na założonej powierzchni przetwornika.
- Maksymalna dopuszczalna gęstość prądu w ścieżkach wynosiła 3,25A/mm².
- Przenikalność warstwy krzemu μ_{Si} i aluminium μ_{Al} przyjęto równą wartości przenikalności magnetycznej powietrza (oba materiały są paramagnetykami i ich przenikalność niewiele różni się od przenikalności powietrza).



Rys. 6 Rozkład indukcji magnetycznej na powierzchni przetwornika o wymiarach $c=d=2$ mm w kierunku osi Z .

Fig. 6 The magnetic flux density characteristic on the transducer along Z axis of the size $c=d=2$ mm

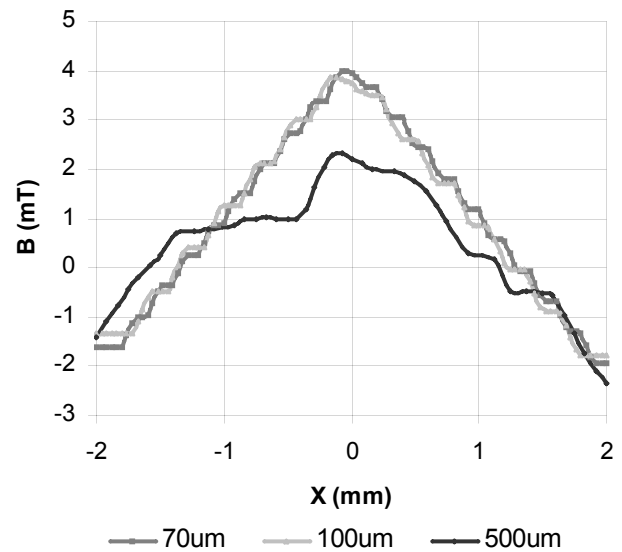
Na rys. 6 pokazano rozkład indukcji magnetycznej B na powierzchni przetwornika dla cewki o wymiarach $c=d=2$ mm. W pokazanym przypadku szerokość ścieżek a i odległość między nimi b wynosiła 100 μ m. Odpowiedni dobór szerokości i długości przetwornika jak również szerokości ścieżek i odległości między nimi, ma bezpośredni wpływ na rozkład indukcji w przestrzeni otaczającej przetwornik. Wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej B dla opracowanego modelu w kierunku osi X . Założono, że środek przetwornika znajduje się w punkcie $X=0$, $Y=0$, $Z=0$. Wyniki obliczeń rozkładu indukcji w kierunku osi X ($Y=0$, $Z=0$), dla przetwornika o wymiarach $c=d=2$ mm przedstawione są na rys. 7.



Rys. 7 Rozkład indukcji magnetycznej B wzdłuż osi X ($Y=0$, $Z=0$) $c=d=2$ mm.

Fig. 7 The magnetic flux density B characteristic along X axis ($Y=0$, $Z=0$) $c=d=2$ mm.

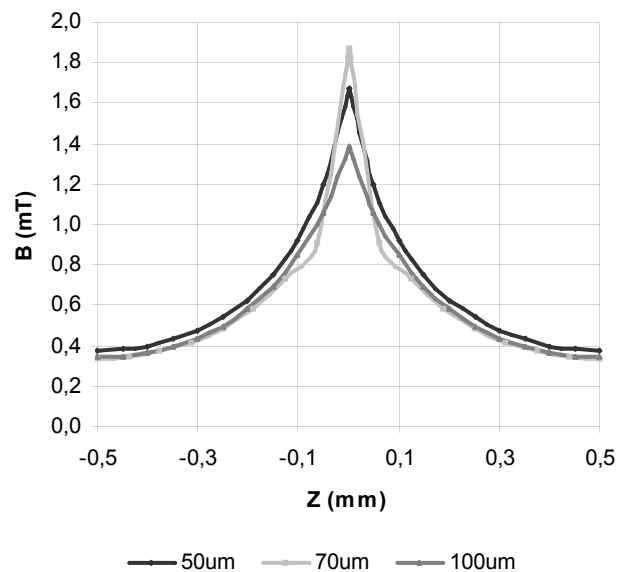
Na rysunku nr 8 przedstawiono rozkład indukcji magnetycznej B w kierunku osi X ($Y=0$, $Z=0$), dla przetwornika o wymiarach 4x4mm.



Rys. 8 Rozkład indukcji magnetycznej B wzdłuż osi X ($Y=0$, $Z=0$) $c=d=4$ mm.

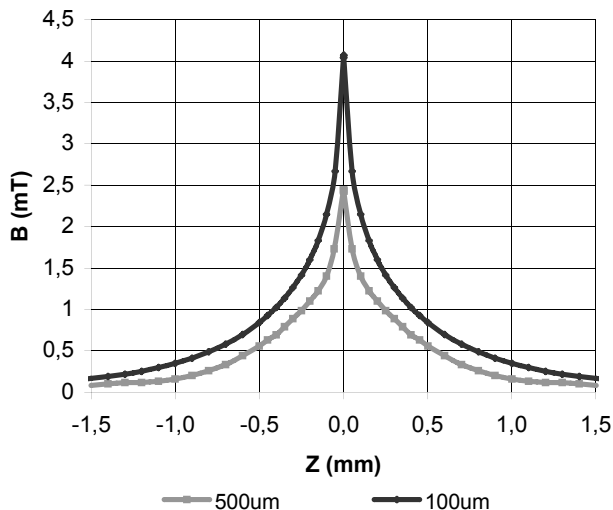
Fig. 8 The magnetic flux density B characteristic along X axis ($Y=0$, $Z=0$) $c=d=4$ mm.

W przetwornikach o uzwojeniu kwadratowym maksymalna indukcja magnetyczna B występuje na powierzchni w środkowej części przetwornika. Dla czterokrotnie większej powierzchni w przypadku cewki o wymiarach $c=d=4$ mm maksymalna indukcja magnetyczna ma ponad dwa razy większą wartość niż w przypadku cewki o wymiarach $c=d=2$ mm. W projektowaniu czujnika drgań mechanicznych ważnym zagadnieniem jest określenie indukcji pola przenikającego przez hallotron (rys. 1). W tym celu wyznaczono charakterystyki indukcji magnetycznej B w funkcji odległości od przetwornika w kierunku osi Z ($X=0$, $Y=0$). Na rys. 9 pokazano wyniki obliczeń dla przetwornika o wymiarach $c=d=2$ mm, a na rys. 10 przedstawiono charakterystyki dla przetwornika o wymiarach $c=d=4$ mm.



Rys. 9 Charakterystyka indukcji magnetycznej B w kierunku osi Z dla przetwornika o wymiarach $c=d=2$ mm ($X=0$, $Y=0$).

Fig. 9 The magnetic flux density B characteristic along Z axis, to size transducer $c=d=2$ mm ($Y=0$, $Z=0$).



Rys. 10 Charakterystyka indukcji magnetycznej B w kierunku osi Z dla przetwornika o wymiarach $c=d=4\text{mm}$ ($X=0$, $Y=0$).

Fig. 10 The magnetic flux density B characteristic along Z axis, to size transducer $c=d=4\text{mm}$ ($Y=0$, $Z=0$).

W celu określenia najkorzystniejszego zakresu amplitudy badano współczynnik czułości $S=\Delta B/\Delta Z$ (stosunek zmiany indukcji magnetycznej względem zmiany odległości w kierunku osi Z).

W tabeli 1 i 2 zamieszczono przykładowe wyniki obliczeń współczynnika czułości S w zakresie zmian amplitudy od 0,1mm do 0,6mm. Dla zakresu 0,5mm amplitudy drgań i założonej rozdzielczości 1% otrzymujemy minimalne zmiany amplitudy odpowiadające 5µm.

Tab. 1 Wyniki obliczeń współczynnika czułości S dla $c=d=2\text{mm}$ (rys.9).

Tab. 1 Sensitive coefficient results for $c=d=2\text{mm}$ (fig. 9).

$a=b$ (µm)	S (mT/5µm)
50	0,0054
70	0,0053
100	0,0050

Tab. 2 Wyniki obliczeń współczynnika czułości S dla $c=d=4\text{mm}$ (rys.10).

Tab. 2 Sensitive coefficient results for $c=d=4\text{mm}$ (fig. 10).

$a=b$ (µm)	S (mT/5µm)
50	0,0144
100	0,0150
500	0,0095

Zbadano wpływ liczby elementów skończonych na uzyskane wyniki (indukcję pola magnetycznego B). Wyniki zamieszczono w tabeli 3.

Tab. 3 Zależność indukcji magnetycznej B od liczby elementów skończonych dla $c=d=2\text{mm}$, $a=b=50\mu\text{m}$.

Tab. 3 The magnetic flux density dependence of number finite elements for $c=d=2\text{mm}$, $a=b=50\mu\text{m}$.

Liczba elem. skończonych (tyś.)	50	100	200	300
B (mT)	1,456	1,532	1,560	1,565

Zwiększenie liczby elementów skończonych powoduje wydłużenie czasu obliczeń, natomiast zbyt mała liczba elementów zwiększa błąd metody. W analizowanym modelu przyjęto liczbę elementów około 200 tyś. typu SOLID97.

Wyznaczono wartości indukcji magnetycznej w maksymalnej odległości 2mm od powierzchni przetwornika. Wynikało to z ograniczonych możliwości obliczeniowych komputera.

Zwiększenie analizowanego zakresu powodowało znaczny wzrost liczby elementów (powyżej 400 tyś.). Ponieważ czujnik hallotronowy umieszczono w odległości 0,5mm od wpływ warunków brzegowych (odległość 2mm) był nieznaczny.

5. Wnioski

W artykule analizowano wpływ wymiarów przetwornika elektromagnetycznego na rozkład i wartość indukcji magnetycznej B . Dla badanych cewek wyznaczono charakterystyki indukcji magnetycznej na powierzchni przetwornika w kierunku osi X , Y oraz wyznaczono charakterystyki indukcji magnetycznej B w funkcji odległości od przetwornika w kierunku osi Z . W wyniku przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że:

- zmiana szerokości ścieżek w zakresie od 50µm do 100µm powoduje nieznaczną zmianę rozkładu indukcji magnetycznej (rys. 7, 8). Jednak zastosowanie ścieżek o zbyt dużej szerokości (500µm) powoduje zmniejszenie maksymalnej wartości indukcji magnetycznej B ($X=0$, $Y=0$, $Z=0$). Dla tak dużej szerokości ścieżek niekorzystnie przedstawia się również rozkład indukcji w kierunku osi X (rys. 8).

- wyznaczenie charakterystyk indukcji magnetycznej B w funkcji odległości od przetwornika w kierunku osi Z umożliwiło określenie wymiarów zewnętrznych przetwornika o charakterystyce najbardziej zbliżonej do charakterystyki liniowej w zakresie zmian amplitudy od 0,1mm do 0,6mm (rys. 10).

Ze względu na uzyskanie rozdzielczości pomiaru w granicach 1%, wybrano czujnik hallotronowy o zakresie działania $\pm 1\text{mT}$ i czułości 2,5mV/0,1mT. Dla przetwornika o wymiarach $c=d=2\text{mm}$ w całym zakresie analizowanych szerokości ścieżek, nie uzyskano zadowalających wyników, ponieważ wartość indukcji magnetycznej B osiągała zbyt małą wartość. Również rozkład indukcji nie był korzystny ze względu na zbyt mały współczynnik czułości $S=0,0054\text{mT}/5\mu\text{m}$ (tab. 1).

Najkorzystniejszą charakterystykę ze względu na liniowość sygnału wyjściowego, uzyskano dla przetwornika o wymiarach $c=d=4\text{mm}$ i $a=b=100\mu\text{m}$. Dla założonego zakresu pomiaru amplitudy drgań średnia wartość współczynnika czułości S , w zakresie zmian amplitudy od 0,1mm do 0,6mm, wynosi około 0,015mT/5µm (tab. 2). Uwzględniając czułość wybranego czujnika hallotronowego, otrzymujemy zmianę napięcia 0,4mV na każde 5µm przesunięcia przetwornika w kierunku osi Z .

6. Literatura

- [1] Hatch M. R.: Matlab nad ANSYS; Chapman & Hall/CRC, 2001.
- [2] Prohuń T., Rybak M., Gołębiowski J.: Analiza parametrów cewki planarnej przetwornika elektromagnetycznego wykorzystywanego do pomiaru indukcji pola magnetycznego, IX Konfer. Czujniki Optoelektroniczne. i Elektroniczne, ss. 143-146, 2006.
- [3] Timoshenko S.P., Goodier J.N.: Theory of Elasticity, New York, McGraw-Hill, 1989.
- [4] Krakowski M.: Elektrotechnika Teoretyczna Pole Elektromagnetyczne, Wydawnictwa Naukowe PWN, 1999.
- [5] Rybak M., Gołębiowski J.: Modelowanie i symulacja mikrokrzemowej struktury elektromagnetycznego przetwornika z wykorzystaniem metody elementów skończonych, Pomiar Automatyka Kontrola nr. 10bis, ss. 20-24, 2006.
- [6] Jyh-Cheng Yu, Chin-Bing Lan.: System modeling of microaccelerometer using piezoelectric thin; Wyd. Elsevier, Sensors and Actuators A 88, ss. 178-186, 2001.
- [7] Gregusova D., Elias P., Oszi Z., Kudela R.: Technology and properties of a vector hall sensor, Microelectronics Journal 37, ss. 1543-1546, 2006.