

Zbigniew H. ŻUREK

PRZETWORNIKI POMIARU SIŁ I NAPRĘŻEŃ W OPARCIU O EFEKT VILLARIEGO

Streszczenie. W artykule omówiono zasady pracy najczęściej stosowanych przetworników do pomiaru sił i naprężeń pracujących w oparciu o efekt magnetomechaniczny Villarego. Następnie zaproponowano odmienny układ pomiarowy zawierający przetwornik parametryczny do pomiaru natężenia pola magnetycznego przy powierzchni obciążanego siłą ferromagnetyka. Przeprowadzono porównania analityczne i symulacyjne nowego układu pomiarowego oraz zamieszczono wyniki badań przeprowadzonych zaprojektowanym układem pomiarowym. Otrzymane wyniki potwierdziły słuszność wyboru układu i metody pomiarowej.

TRANSDUCERS OF FORCES AND STRESSES MEASUREMENT AT THE BASE OF VILARY'S EFFECT

Summary. The paper presents transducers of forces and stresses at the basis of Villary's effect in most use. The measuring system with parameters' transducer of magnetic field measurement has been proposed. Analytical and simulating analysis of measuring system has been carried out and the results of the measuring system have been presented. The results proved usefulness of measuring system and measuring method.

1. WPROWADZENIE

Praktyczne zastosowania odkrytych w połowie XIX wieku przez Joulea i Villariego efektów magnetycznych [1,2,8,9] do budowy magnetosprężystych czujników pomiaru sił i naprężeń w ferromagnetykach datowane są na lata trzydzieste XX wieku. Dalsze badania nad właściwościami magnetomechanicznymi ferromagnetyków zaowocowały powstaniem bezstykowych metod pomiaru sił i naprężeń opartych kolejno na przetwornikach pomiarowych, indukcyjnych, następnie hallotronowych. Budowa magnetosprężystych przetworników pomiarowych oparta jest na własnościach magnetosprężystych ferromagnetyków opisanych zależnością (1). Zależność ta łączy zmiany podatności magnetycznej z działaniem naprężeń.

$$S = \frac{(\Delta\chi) \cdot \frac{1}{\chi}}{(\Delta\sigma) \cdot \frac{1}{\sigma}} \quad \text{lub} \quad S = \frac{\Delta\mu}{\mu \cdot \sigma} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

gdzie:


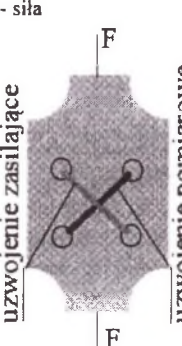

- S – czułość piezomagnetyczna,
- χ – podatność magnetyczna,
- σ – naprężenia mechaniczne,
- μ – przenikalność magnetyczna materiału.

2. PRZETWORNIKI MAGNETOSPREŻYSTE- GENERACYJNE

- Konstrukcja większości przetworników (generacyjnych) magnetosprężystych (tabela 1) oparta jest na trzech podstawowych zasadach pracy [2] z uwzględnieniem efektu Villariego:
- a – zasadzie zmiany indukcji magnetycznej zewnętrznego selenoidu obejmującego badany element ferromagnetyczny, najczęściej rozciągany lub ściskany,
 - b – zasadzie zmiany kąta strumienia magnetycznego uzwojenia zasilanego od naprężeń w materiale ferromagnetycznym i pomiarze napięcia indukowanego w prostopadle usytuowanym uzwojeniu pomiarowym (uzwojenia zasilające i pomiarowe związane są z badanym elementem),
 - c – zasadzie nasycania strumieniem magnetycznym i pomiaru zmian indukcji magnetycznej lub natężenia pola magnetycznego zewnętrznym przetwornikiem pomiarowym usytuowanym w pobliżu badanego ferromagnetyka poddawanego naprężeniom.

Tabela 1

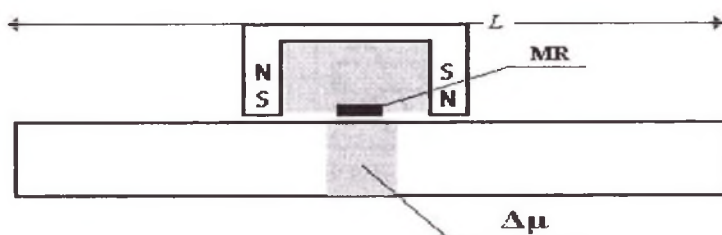
Najczęściej stosowane przetworniki magnetosprężyste

Budowa przetwornika	 <p>F - siła</p>	 <p>F - siła</p>	 <p>Ms – moment skrajający</p>
Zasada pracy	a (zmiana indukcji magnetycznej cewki pomiarowej pod wpływem sił (F) działających na ferromagnetyk)	b (zmiana kierunku strumienia magnetycznego od uzwojenia zasilającego pod działaniem naprężeń)	c (zmiana przenikalności magnetycznej i indukcji magnetycznej od naprężeń w materiale)
Rodzaj naprężeń	rozciągające ściskające	rozciągające ściskające	skręcające złożone
Rozkład strumienia magnetycznego	jednoosiowy	jedno lub dwuosiowy	trójosiowy
Rozkład sił	liniowy	liniowy (w strefie pomiaru)	przestrzenny

Przetworniki zamieszczone w tabeli 1 są przetwornikami indukcyjnymi parametrycznymi wymagającymi zasilania napięciem przemiennym o określonej częstotliwości. Znane i stosowane są także metody pomiaru naprężeń w ferromagnetykach w oparciu o efekt Barkhausena. W opracowaniu zaproponowano bezstykowy pomiar naprężeń przetwornikiem parametrycznym magnetorezystancyjnym i nasycanie badanej próbki strumieniem magnetycznym pochodzącym z magnesów trwałych.

3. POMIARY SIŁ I NAPRĘŻEŃ PRZETWORNIKAMI PARAMETRYCZNYMI

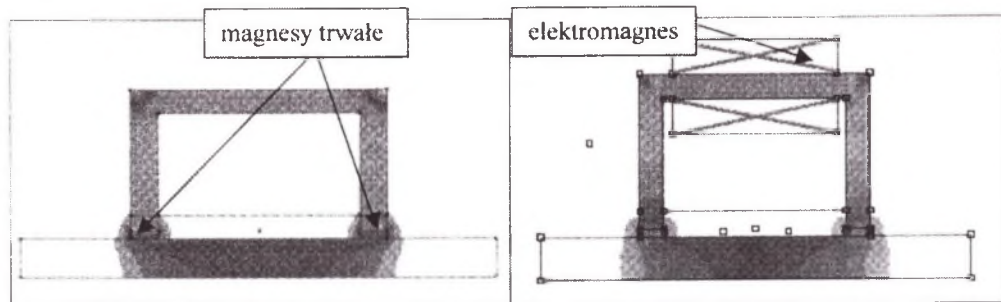
Zasada pracy przetwornika pomiarowego sił i naprężeń z magnesami trwałymi i magnetorezystorem [6,10] przedstawiona została na rysunku 1. Wyboru magnetorezystancyjnego przetwornika pomiarowego dokonano ze względu na jego wysoką czułość. Wybór magnesów trwałych magnesujących badaną próbkę zapewnia minimalizację wymiarów przetwornika magnetosprężystego, utrudnia jednak analityczny opis układu pomiarowego. Na rysunku 2 przedstawiono symulację (przeprowadzoną w programie FEMM) rozkładów indukcji magnetycznej w badanej próbce dla przetwornika z magnesami trwałymi lub elektromagnesem. Konstrukcja przetwornika z elektromagnesem zapewniającą porównywalną gęstość energii, jaką dysponują współczesne magnesy trwałe (od 280000kJ/m^3), wymagałaby ogromnej gęstości prądu w przewodzie cewki w zakresie od kilkudziesięciu do kilkuset amperów na milimetr kwadratowy przekroju uzwojenia.



Rys. 1. Sposób pomiaru magnetorezystorem MR i magnesami trwałymi

Fig. 1. Base of measurement done with searcher

Zastosowanie elektromagnesu zmniejsza zasięg oddziaływania strumienia magnetycznego w odcinku badanej próbki oraz zakłóca pomiar magnetorezystorem oddziaływania elektromagnetycznego pola rozproszenia od cewki elektromagnesu.



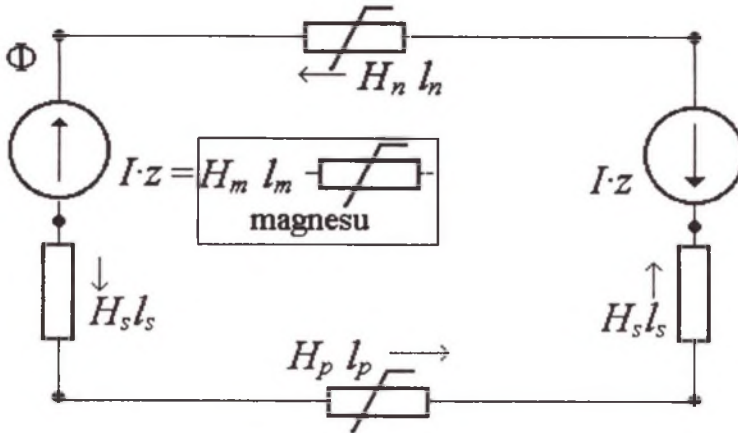
Rys. 2. Rozkład indukcji pola magnetycznego porównywanych obwodów: a) dla sondy z magnesami trwałymi, b) dla odpowiednika wymiarowego sondy z elektromagnesem

Fig. 2. Distribution of magnetic field induction compared circuitry: a) for permanent magnets searcher, b) for dimensional equivalent of the searcher with electromagnet

Analityczne wyznaczanie parametrów metrologicznych układów pomiarowych z magnesami trwałymi zostanie przeanalizowane dwoma sposobami. Trudność analitycznego wyznaczania parametrów metrologicznych układu pomiarowego sprawiła, że dalsze szczegółowe badania układu pomiarowego prowadzono metodami symulacyjnymi.

4. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW METROLOGICZNYCH UKŁADU POMIAROWEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI I MAGNETOREZYSTOREM

Wykonany układ pomiarowy zastąpiono analogiem elektrycznym, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.



$I \cdot z$	napięcie magnetyczne źródła	$H_m l_m$
$H_s l_s$	napięcie magnetyczne na szczelinie	
$H_n l_n$	napięcie magnetyczne na zworze sondy	
$H_p l_p$	napięcie magnetyczne na próbce	

Rys. 3. Model elektryczny sondy
Fig. 3. Electrical model of searcher

Sonda pomiarowa posiada dwa magnesy trwałe o katalogowej gęstości energii w_m . W celu uproszczenia obliczeń magnesy zostaną zastąpione selenoidami o równoważnej energii. Napięciu magnetycznemu magnesów trwałych przypisane zostanie napięcie magnetyczne selenoidu. Katalogi magnesów trwałych podają wymiary i gęstość energii. Energia magnesu opisana jest zależnością:

$$W = \frac{B \cdot H}{2} \cdot V \quad (2)$$

gdzie V jest objętością magnesu trwałego.

Podstawiając we wzorze (2) za natężenie pola magnetycznego i indukcję magnetyczną kolejno:

$$H = \frac{I \cdot z}{l} \quad \text{oraz} \quad B = \mu_0 \cdot \mu_w \cdot H \quad (3)$$

otrzymamy:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_w \cdot (I \cdot z)^2 \cdot \frac{S}{l} \quad (4)$$

Napięcie magnetyczne zamiennego równoważnego magnesom źródła (selenoidu) jest równe:

$$I \cdot z = \sqrt{\frac{2 \cdot W \cdot l}{s \cdot \mu_0 \cdot \mu_w}} = H_m L_m \quad (5)$$

Suma napięć magnetycznych obwodu nierozgałęzionego (jakim jest sonda pomiarowa) wynosi zero:

$$2 \cdot H_m l_m + H_n l_n + 2 \cdot H_s l_s + H_p l_p = 0 \quad (6)$$

Wprowadzając zależność (5) i przekształcając otrzymamy:

$$I \cdot z = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{\text{magnesu}} \cdot l}{s \cdot \mu_0 \cdot \mu_w}} = - \sum_{i=1}^n H_i \cdot l_i = - \left(\frac{H_n l_n}{2} + H_s l_s + \frac{H_p l_p}{2} \right) \quad (7)$$

gdzie: H_i , l_i , -są odpowiednio natężeniem pola magnetycznego i długości poszczególnych składowych obwodu magnetycznego.

W zamkniętym obwodzie magnetycznym przy założeniu zerowego rozproszenia i pracy obwodu w liniowej strefie krzywej magnesowania (bez nasycenia) elementów obwodu magnetycznego, strumień magnetyczny Φ będzie stały w całym obwodzie magnetycznym. Wzór (7) można zapisać:

$$I \cdot z = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{\text{magnesu}} \cdot l}{s \cdot \mu_0 \cdot \mu_w}} = - \phi \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{s_i \cdot \mu_i} = - \phi \left(\frac{l_n}{2 \cdot s_n \cdot \mu_n} + \frac{l_s}{s_s \cdot \mu_s} + \frac{l_p}{2 \cdot s_p \cdot \mu_p} \right) \quad (8)$$

gdzie: l_i , s_i , μ_i są odpowiednio długością, przekrojem i przenikalnością magnetyczną elementów składowych obwodu.

Wyliczona z zależności (8) wartość strumienia magnetycznego posłuży do wyznaczenia pierwszego z istotnych parametrów metrologicznych sondy pomiarowej, jakim jest zależność natężenia pola magnetycznego w próbce od odległości l_s (wielkości szczeliny powietrznej) sondy.

$$\phi = \frac{\mu_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot W_{\text{magnesu}} \cdot l}{s \cdot \mu_0 \cdot \mu_w}}}{\left(\frac{l_n}{2 \cdot s_n \cdot \mu_n} + \frac{l_s}{s_s \cdot \mu_s} + \frac{l_p}{2 \cdot s_p \cdot \mu_p} \right)} \quad (9)$$

Natężenie pola magnetycznego w badanej próbce będzie zależne od l_s i równe:

$$H_{p(l_s)} = \frac{\phi(l_s)}{\mu_p \cdot \mu_0 \cdot s_p} \quad (10)$$

W sondzie pomiarowej odległość magnetorezystora od powierzchni badanej próbki jest równa wielkości szczeliny l_s . Wartość natężenia pola magnetycznego mierzona przez magnetorezystor będzie malała wraz ze wzrostem l_s . Zależność ta jest kolejną cechą metrologiczną sondy pomiarowej. Wartość stykowej natężenia pola magnetycznego H_t dla bardzo małych odległości l_s od ferromagnetyka nasyczonego strumieniem magnetycznym od magnesów

trwałych do natężenia H_p jest w przybliżeniu równa $H_1 = H_p$. W przeprowadzonej analizie nie uwzględniono istotnego wpływu współczynnika odmagnesowania próbki.

Inny sposób wyznaczania pola magnetycznego oparty na metodzie Gaussa stosowany do magnesów stałych zakłada ułożenie próbki w zewnętrznym polu magnetycznym w odległości l_s (szczelina) od źródła pola. Pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego równowaznego energii magnesu trwałego następuje magnesowanie materiału magnetycznego. Zastępujemy moment magnetyczny magnesu trwałego m_m momentem elektromagnetycznym m cewki kołowej:

$$m = z \cdot I \cdot s \quad (11)$$

gdzie: z – ilość zwojów,

I – prąd w uzwojeniu,

s – przekrój objęty uzwojeniem.

Rozważmy przewodniki kołowe w ilości n o promieniu R , przez które płynie prąd elektryczny o natężeniu i . Natężenie pola magnetycznego wzdłuż osi „ z ” leżącej w osi przewodnika kołowego (prostopadle do przewodów kołowych). zgodnie z prawem Biota-Savarta od każdego elementu dl wynosi dH :

$$dH = \frac{I \cdot dl \cdot \sin 90^\circ \cdot n}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (12)$$

Wektor dH rozkładamy na składową styczną i normalną do osi. Składowe normalne dla pełnego okręgu są równe zero. Dla składowej stycznej wzdłuż osi z $dH_z = dH \cdot \cos \alpha$, mamy:

$$dH_z = \frac{I \cdot \cos \alpha \cdot z}{4 \cdot \pi \cdot r^2} dl \quad (13)$$

po podstawieniu za $\cos \alpha$:

$$\cos \alpha = \frac{R}{r} = \frac{R}{\sqrt{(R^2 + z^2)}} \quad (14)$$

otrzymamy kolejno:

$$dH_z = \frac{I \cdot R \cdot z}{4 \cdot \pi \cdot (R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot dl \quad (15)$$

$$H_z = \int dH_z = \frac{i \cdot R \cdot n}{2\pi(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{i \cdot (\pi R^2) n}{2\pi(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{i \cdot s \cdot n}{2\pi(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{m}{2\pi(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (16)$$

dla $z \gg R$ natężenie pola magnetycznego w pierwszym głównym położeniu Gaussa jest równe:

$$H_z = \frac{m}{2\pi \cdot z^3} \quad (17)$$

Moment elektromagnetyczny m jest równy iloczynowi namagnesowania M i objętości V ($m = M \cdot V$) to:

$$H_z = \frac{M \cdot V}{2\pi \cdot z^3}, \text{ a dla dwóch magnesów } H_z \approx \frac{2 \cdot M \cdot V}{2\pi \cdot z^3} \quad (18)$$

Moment elektromagnetyczny można wyrazić poprzez energie i parametry magnesu trwałego:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot w \cdot I \cdot s}{\mu_0 \mu_w}} \quad (19)$$

Dla dwóch elektromagnesów:

$$H_z = \frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot w \cdot l \cdot s}}{2 \cdot \pi \cdot z^2} \mu_0 \mu_w \quad (20)$$

Pod wpływem pola magnetycznego równoważnego źródła następuje magnesowanie materiału do wartości H_w :

$$H_w = H_z - N \cdot M_m = \frac{H_z}{(\mu_w - 1) \cdot N} \quad (21)$$

gdzie: N – współczynnik odmagnesowania,

M_m – magnesowanie materiału

Składowa styczna H_z na zewnętrznej powierzchni próbki jest równa wartości H_w . Składowa styczna pola magnetycznego H_z mierzona przez magnetorezystor MR przy powierzchni materiału badanego zależy od przenikalności magnetycznej materiału. Przenikalność magnetyczna materiału zależy z kolei od namagnesowania M i stanu naprężeń σ .

Związki przenikalności magnetycznej od naprężeń opisane są teoriami magnetomechanicznymi. Według teorii domenowej naprężeń Beckera przenikalność ferromagnetyka poddanego naprężeniom σ opisana jest wzorem.

$$\mu_{wp} = \frac{J_s^2}{\frac{3}{2} \cdot \sigma_0 \lambda_s \cdot \pi \cdot \mu_0} \quad (22)$$

Wartość namagnesowania materiału odczytamy z krzywej zależności namagnesowania materiału w funkcji natężenia pola magnetycznego. Przy ilościowym ujęciu konieczna jest także znajomość współczynnika λ_s dla badanego materiału. Pomiar jest procesem złożonym, jednak po skatalogowaniu materiałów ulegnie uproszczeniu.

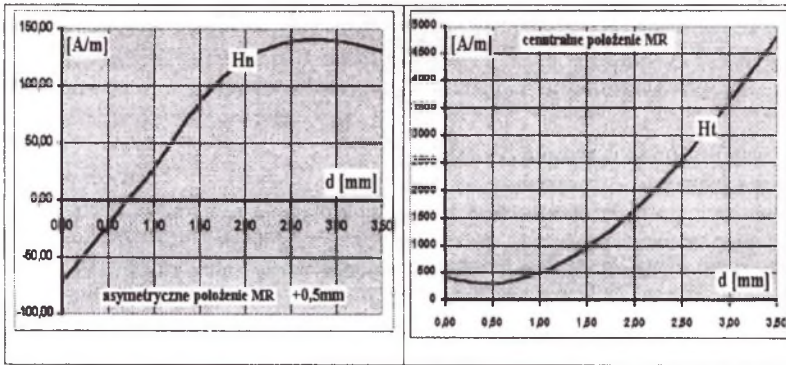
Przeprowadzona analiza parametrów pomiarowych sondy wykazuje, że w każdym z przykładów analitycznych ilość przybliżeń jest tak wysoka, że przyjęcie metody symulacyjnej (też metody przybliżonej) do pomiarów i oceny parametrów metrologicznych sondy pozwala na uzyskanie dokładniejszych wyników w krótszym okresie czasu. Szybkość metod analitycznych umożliwia ocenę większej ilości przypadków i ułatwia dokonanie wyboru.

Układ pomiarowy został ponadto zaprojektowany i zastosowany do badań w diagnostyce maszyn, gdzie wymagana jest ocena jakościowa a nie ilościowa naprężeń w pracującym elemencie maszyny. Ocena jakościowa pracującego elementu (najczęściej wirującego) wraz z obróbką sygnału FFT jest wystarczająca dla oceny aktualnego stanu maszyny.

5. SYMULACYJNA IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW METROLOGICZNYCH UKŁADU POMIAROWEGO

Z punktu widzenia zastosowań ważne są zależności mierzonego natężenia pola magnetycznego w funkcji odległości od powierzchni badanego ferromagnetyka. W pomiarach wykonywanych zbudowanymi sondami pomiarowymi stosowano odległości pomiarowe od 0,1 mm do 1 mm. Odległości mniejszych ze względu na możliwość bicia osiowego mierzonego elementu nie przyjmowano. Ponieważ każdy pomiar zawiera informacje o odległości i cyklicznych zmianach odległości, wpływ ten można w wielu przypadkach dokładnie zinterpretować po dokonaniu cyfrowej obróbki sygnału w FFT (Fast Fourier Transformation). Szywność mocowania sondy pomiarowej jest bardzo istotna. Spadek wartości sygnału mierzonego w funkcji zmian odległości od badanego elementu oceniony zostanie symulacyjnie na przykładzie omawianej sondy z magnesami trwałymi. Lokalizacja przetwornika pomiarowego MR jest także bardzo ważna. Przetwornik pomiarowy zależnie od położenia w stosunku do bada-

nej powierzchni (prostopadle lub równolegle) mierzy składowe normalne H_n lub składowe styczne H_t natężenia pola magnetycznego. Zmiany modułu natężenia pola magnetycznego i jego składowych w funkcji odległości od badanej powierzchni zamieszczono na rysunku 4.

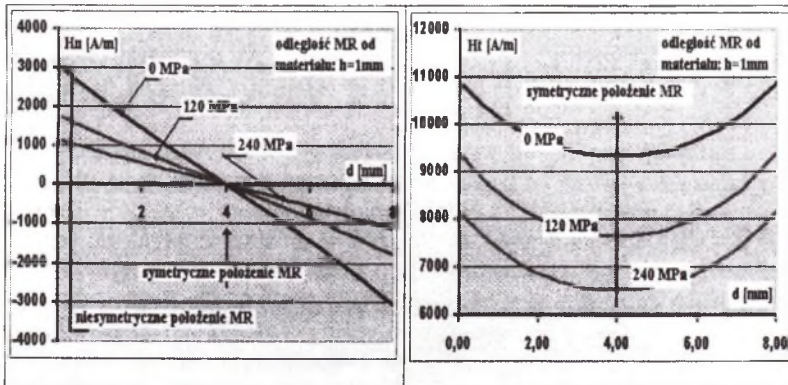


Rys. 4. Wyliczone programem FEMM zmiany natężenia pola magnetycznego w funkcji odległości sondy od powierzchni materiału

Fig. 4. Changes of magnetic field intensity searcher distance to material surface function enumerated with FEMM programme

Na rysunku 5 pokazano zmiany składowej H_n przy powierzchni rozciąganej próbki dla centralnego (symetrycznego) i niesymetrycznego usytuowania magnetorezystora.

Analizowano zmiany natężenia pola magnetycznego w środkowej strefie (8 mm) sondy w układzie pomiarowym (sondzie pomiarowej). Pomiar składowej H_n możliwy jest dla asymetrycznej lokalizacji przetwornika magnetorezystancyjnego. Zapewnia ona regulację progu pomiarowego sondy w przypadku pomiaru składowej H_n natężenia pola magnetycznego jak również umożliwia pomiar składowej H_t . Wartości składowej H_n oraz H_t są zależne od parametrów magnesów trwałych zastosowanych w układzie pomiarowym. Przetworniki pomiarowe magnetorezystancyjne mostkowe produkowane są w zakresach pomiarowych od 0,5kA/m do 7,5kA/m. Do pomiaru składowej H_n powinny być montowane z niewielką asymetrią w stosunku do magnesów trwałych. Inne usytuowanie przetwornika powoduje jego przesterowanie.



Rys. 5. Zmiany natężenia składowych natężenia pola magnetycznego

Fig. 5. Changes of magnetic field intensity composites

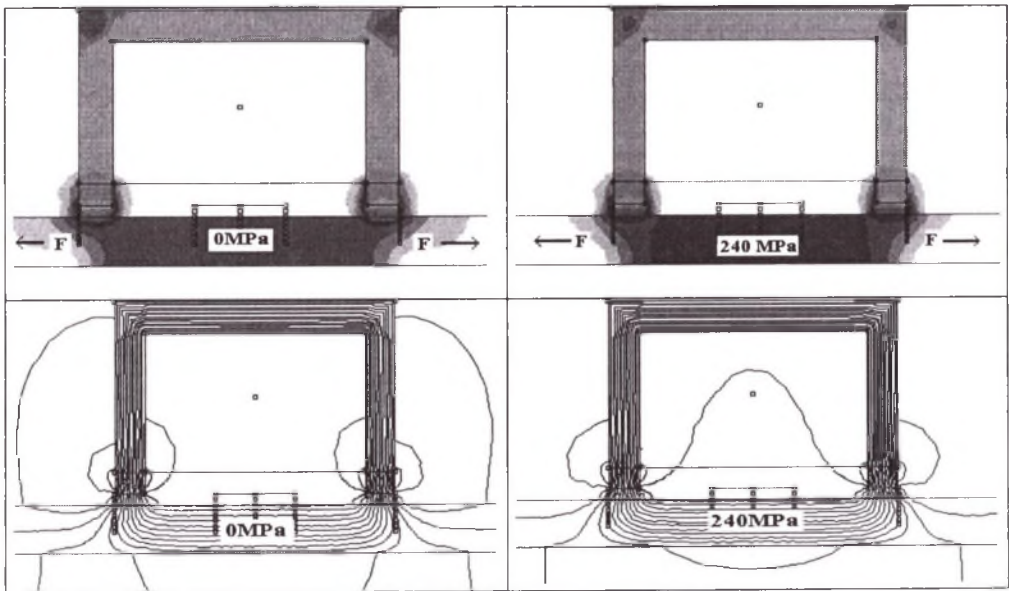
Wraz ze zmianami natężenia pola magnetycznego na powierzchni próbki od naprężeń rozciągających zmieniają się parametry magnetyczne materiału oraz wartość indukcji magnetycznej w próbce. Analizując programem symulacyjnym zmiany indukcji materiału badanej próbki ze stali ST3, przeprowadzono wyliczenia indukcji magnetycznej w odległości 0,5 mm pod badanym wycinkiem powierzchni próbki dla trzech stanów naprężeń. Wyniki symulacji zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2

Zmiany indukcji magnetycznej materiału pod wpływem naprężeń

Wartość indukcji magnetycznej 0,5 mm pod badaną powierzchnią: stal ST3	σ_0 [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]
	0	120	240
Indukcja [T]	0,2622	0,2887	0,3184

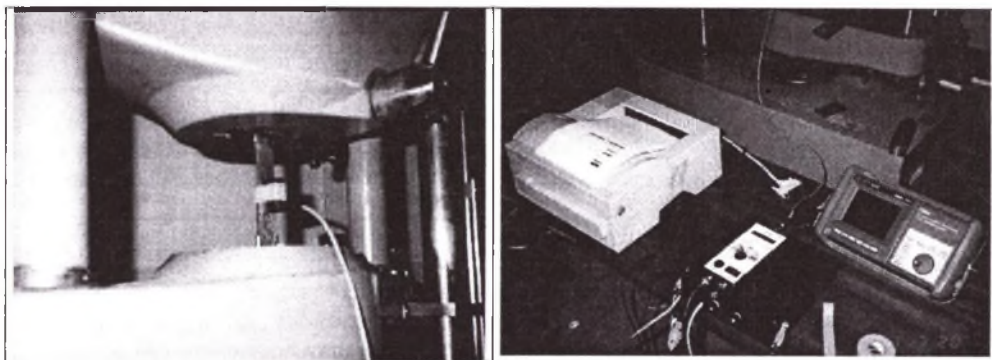
Zmiany magnetyzacji (magnesowania) badanej programem symulacyjnym próbki są dobrze widoczne na przykładzie przebiegu linii sił pola magnetycznego i indukcji. Pod wpływem naprężeń linie sił pola magnetycznego są wciągane w magnesowany obszar próbki. Na obrazie zmian indukcji widoczne jest zaciemnienie obszaru pomiędzy magnesami sondy, związane ze wzrostem indukcji materiału od naprężeń jak na rysunku 6.



Rys.6. Wizualizacja zmian rozkładu strumienia magnetycznego i indukcji magnetycznej od naprężeń
Fig. 6. Visualisation of changes magnetic flux and magnetic induction distribution influenced by stresses

6. ZASTOSOWANIE SONDY POMIAROWEJ Z MAGNETOREZYSTOREM I MAGNESAMI TRWAŁYMI DO POMIARU SIŁ I NAPRĘŻEŃ W STALI ST3

Badania prowadzono na próbkach znormalizowanych przygotowanych do badań wytrzymałościowych [4,5,6].



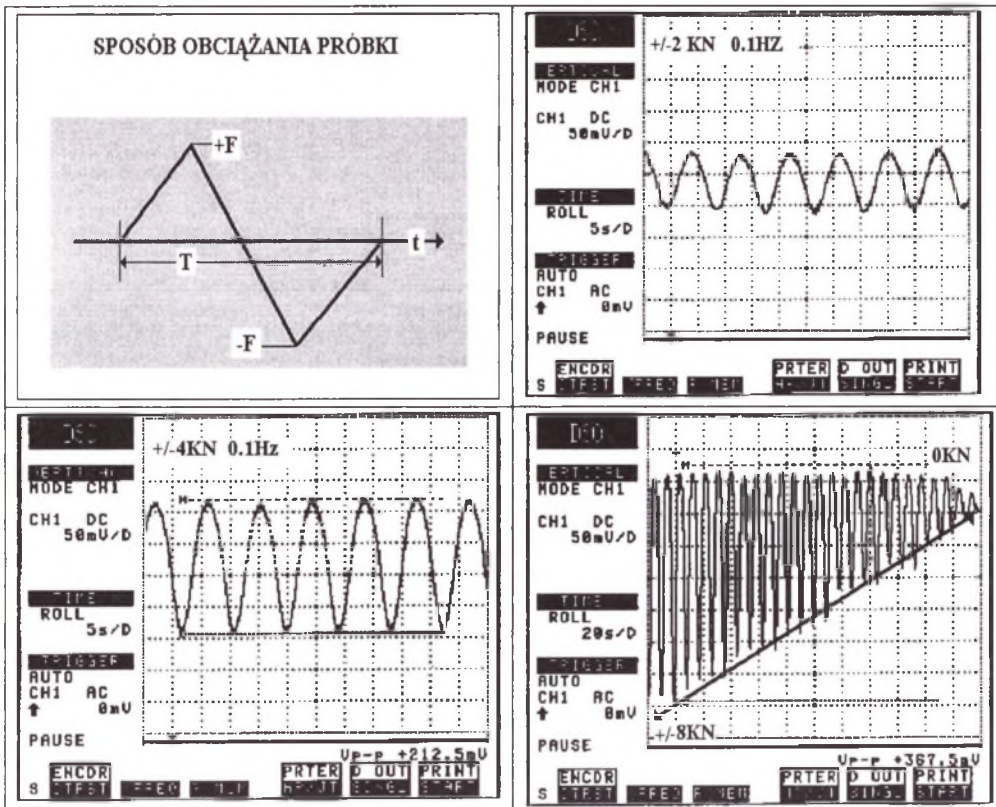
Rys. 7. Widok stanowiska pomiarowego: od góry - zamocowana próbka w maszynie wytrzymałościowej z sondą pomiarową, urządzenia pomiarowo - rejestrujące

Fig. 7. View of measurement post – fixed sample with searcher, measure-recording devices

Badania polegające na pomiarze pola magnetycznego przy powierzchni próbki za pomocą układu pomiarowego omówionego w poprzednim punkcie były potwierdzeniem możliwości ilościowej oceny zmian związków magnetomechanicznych. Badaniom poddano kolejno następujące próbki:

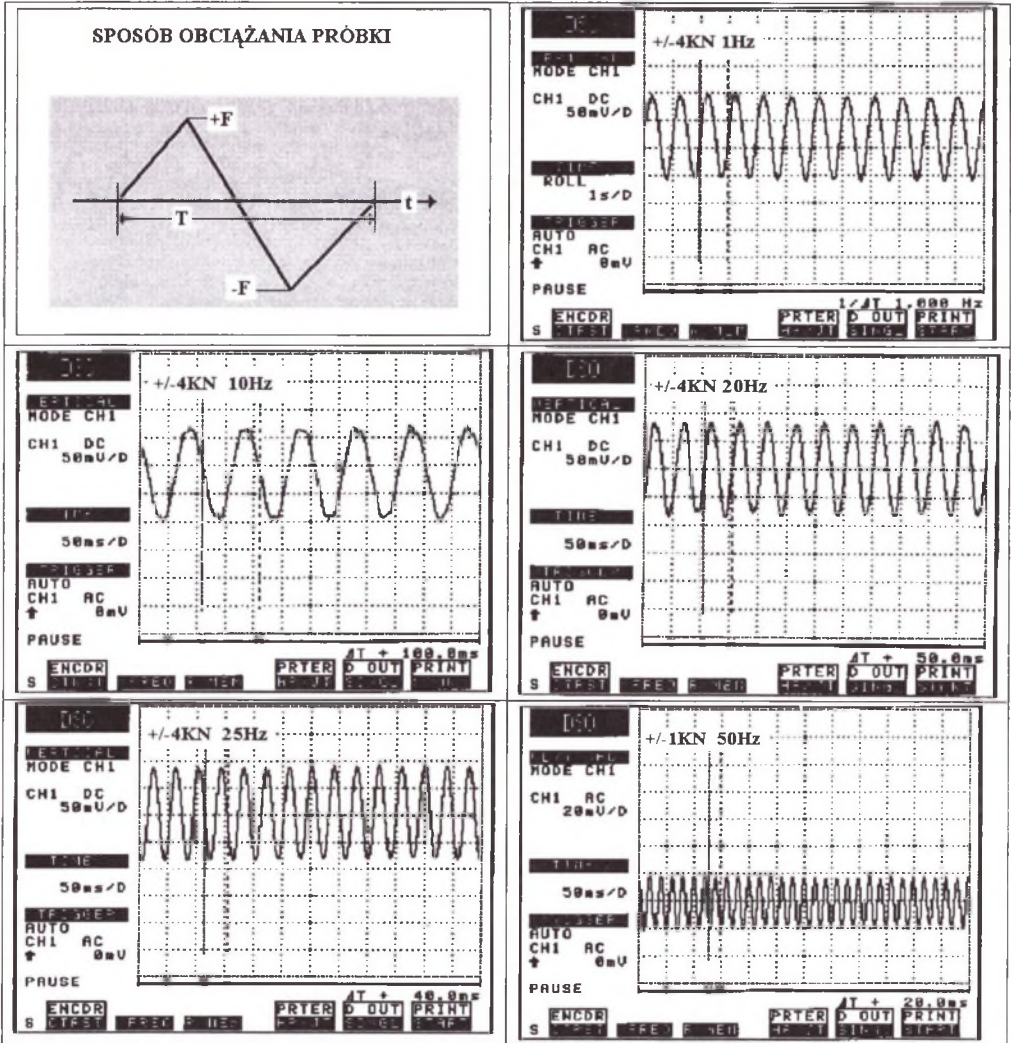
- I - płaska ze stali ST3 o grubości 4 mm i powierzchni przekroju 80 mm²,
- II- płaska ze stali ST3 o grubości 8 mm i powierzchni przekroju 160 mm²,
- III- płaska ze stali o podwyższonej wytrzymałości o grubości 4 mm i powierzchni 72 mm²,
- IV- okrągła ze stali ST3 o średnicy 10 mm i przekroju 78.5 mm².

Stanowisko pomiarowe wraz z oprzyrządowaniem przedstawiono na zdjęciu (rys. 7). Na zamieszczonych fotografiach przedstawiono stanowisko pomiarowe, na którym testowano układ pomiarowy. Zasadnicze badania prowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS sterowanej elektronicznie. Badane próbki obciążano przebiegami wolno zmiennymi od 0,1Hz aż po granicę parametrów technicznych maszyny, to jest do 50 Hz. Wyniki pomiarów układem pomiarowym z magnetorezystorem zamieszczono na rysunkach 8 ÷9.



Rys. 8. Pomiar sondą pomiarową sił cyklicznie naprężających próbkę
 Fig. 8. Measurement of periodical tensile forces

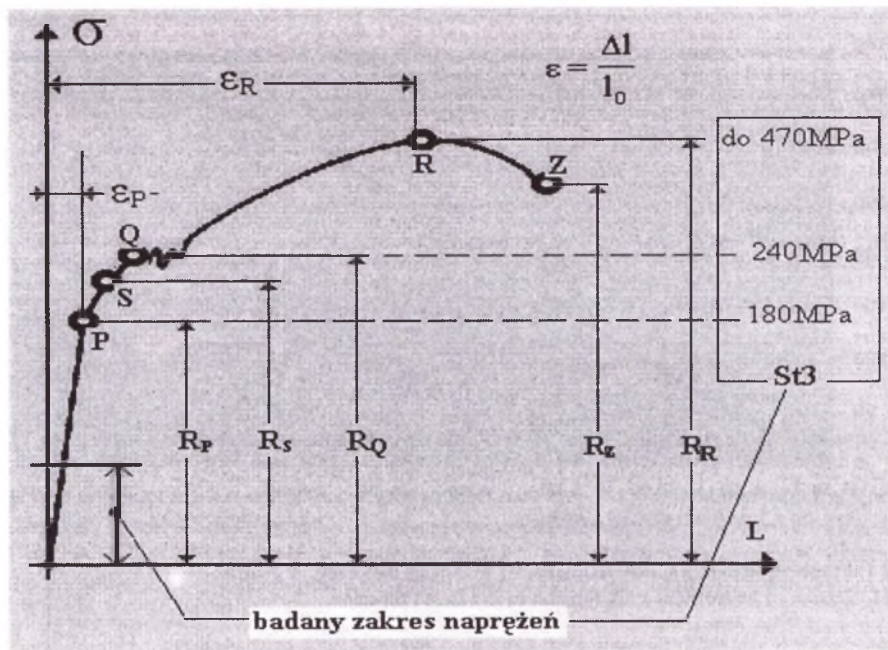
Wyniki pomiarów wykazały, że dla obciążeń nie przekraczających 30% granicy sprężystości R_e (dla stali ST3) występuje liniowa zmiana magnetyzacji od naprężeń. Liniowość ta traci symetrię pomiędzy ściskaniem i rozciąganiem już od siły 5 kN (dla próbki o przekroju 87.5 mm^2)



Rys. 9. Pomiar częstotliwości obciążenia sondą pomiarową
 Fig. 9. Measurement of tension frequency done

Badania potwierdziły możliwość zastosowania układu pomiarowego do pomiaru bezstykowego częstotliwości drgań, a także pomiaru siły (z warunkiem skalowania układu pomiarowego dla konkretnego gatunku stali).

Większość ferromagnetyków cechuje liniowość zmian parametrów magnetycznych w stosunku do naprężeń w dolnych zakresach naprężeń sprężystych. Parametry obciążeń granicznych dla stali St3 zamieszczono na rysunku 10.



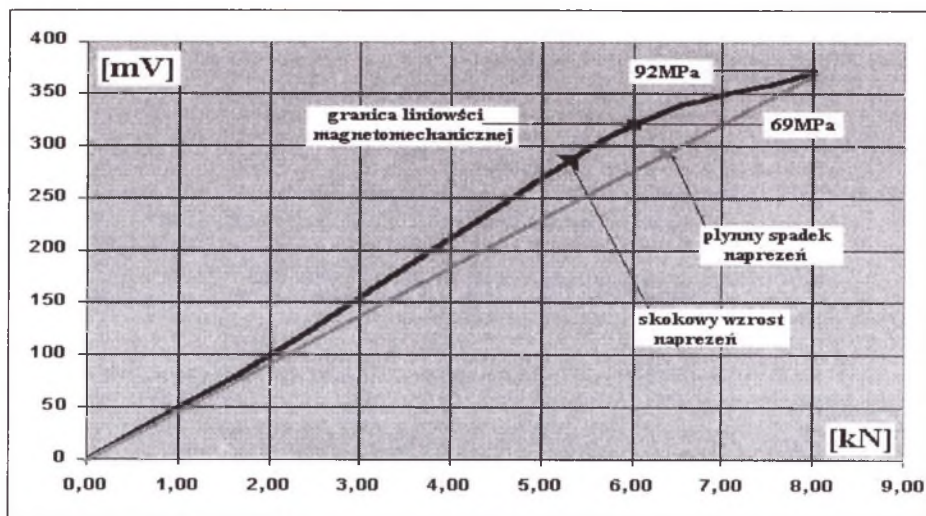
Rys. 10. Krzywa rozciągania

Fig. 10. Stretching curve

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi rozciąganą próbkę są:

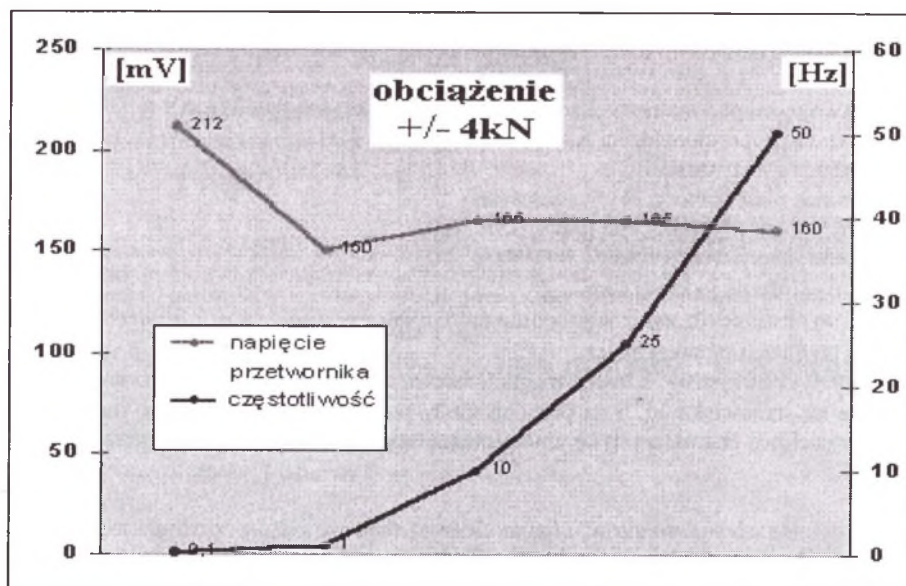
- granica proporcjonalności R_p ,
- granica sprężystości R_s ,
- granica plastyczności R_Q ,
- granica wytrzymałości na rozciąganie R_R ,
- punkt rozerwania próbki Z ,
- ϵ wydłużenie jednostkowe,
- ϵ_p wydłużenie dla zakresu proporcjonalności,
- ϵ_R wydłużenie maksymalne.

Charakterystyki otrzymane z badań magnetomechanicznych dla próbki o przekroju okrągłym wykonane na stanowisku MTS za pomocą sondy pomiarowej zamieszczono na rysunku 11. Częstotliwościową charakterystykę zmian magnetomechanicznych zamieszczono na rysunku 12.



Rys. 11. Przebieg napięcia sondy pomiarowej w funkcji naprężeń

Fig. 11. Course of instrument stalk tension in the stress function



Rys. 12. Wpływ częstotliwości obciążeń na napięcie wyjściowe sondy pomiarowej

Fig. 12. Influence of frequency on characteristics of instrument stalk conversion

7. WNIOSKI

Przedstawione analizy symulacyjne układu pomiarowego z magnesami trwałymi i magneto-rezystorem potwierdzają słuszność wyboru metod elementów skończonych (FEMM) w analizie pola magnetycznego układu pomiarowego. Metody symulacyjne znacznie przyspieszają proces badania i weryfikacji wyników pomiarów stanowiskowych. Zastosowanie przetworników pomiarowych parametrycznych, jakimi są magneto-rezystancyjne mostkowe przetworniki pomiarowe upraszczają układy pomiarowe i sam proces pomiaru. Zamieszczone wyniki badań przeprowadzonych na maszynie wytrzymałościowej potwierdzają użyteczność sondy pomiarowej.

Literatura

1. Etienne du Trémolet de Lacheisserie, Theory and Applications of Magnetoelasticity, CRC PRESS – Boca Raton, Ann Arbor, Boston, London 1992.
2. Hinz G., Voigt H., Sensors.: A comprehensive survey – Magnetoelastic sensors, Vacuum-schmelze GmbH, Edited by VCH Verlagsgesellschaft GmbH FRG 1990, s 99-102, s. 131.
3. ŻUREK Z.H.: Użyteczność wybranych metod i narzędzi pomiarowych w diagnostyce technicznej. XXVII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Politechnika Śląska –Węgierska Górka 2000.
4. ŻUREK Z.H.: Przetworniki magneto-rezystancyjne pola magnetycznego w badaniach stanów naprężeń mechanicznych próbki stalowej. Politechnika Śląska, Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej, VIII Seminarium Naukowe, Katowice 2000.
5. ŻUREK Z.H.: Cienkowarstwowe czujniki magneto-rezystancyjne jako narzędzia pomiarowe w diagnostyce technicznej. Politechnika Wroclawska, XXXVI Międzynarodowe Sympozjum Naukowe Maszyn Elektrycznych, SME' 2000.
6. ŻUREK Z.H.: Pomiary sił i naprężeń w stalach węglowych w oparciu o magnetomechaniczny efekt Villarięgo. Politechnika Śląska, Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej, IX Seminarium Naukowe, Katowice 2001.
7. ŻUREK Z.H.: Efekty magnetyczne użyteczne w diagnostyce technicznej. Politechnika Śląska, XXXVII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME' 2001.
8. TUMAŃSKI S.: Cienkowarstwowe czujniki magneto-rezystancyjne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
9. BOZORTH Richard M.: Ferromagnetism, The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Magnetics Society, Sponsor, Inc., New York 1993.
10. ŻUREK Z.H.: Sonda defektoskopu magnetycznego. Zgłoszenie patentowe P 344 955. Politechnika Śląska, Gliwice 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. Józef Rasek

Abstract

The paper presents the simulation analysis of measuring system with permanent magnet and magneto-resistor. The analysis proved that FEMM Methods (Finite Element Methods) in magnetic field analysis of measuring system should be chosen. The simulation methods hasten and facilitate the process of research and stand measurements results verification. Using of magneto-resistant – bridge - measuring transducers simplifies the measuring systems and the measuring process. The usefulness of measuring probe is confirmed by presented results of the strength machine research.