

Seria: Elektryka z.53

Karol SIEROŃ

Uniwersytet Śląski Katowice

PIEZOMAGNETYCZNE WŁAŚCIWOŚCI
MATERIAŁÓW FERROMAGNETYCZNYCH

Streszczenie. W artykule omówiono wpływ naprężeń mechanicznych na właściwości magnetostrykcyjnych materiałów ferromagnetycznych. Podano równania piezomagnetyczne oraz określono czułości piezomagnetyczne dla odpowiednich mierzonych parametrów magnetycznych. Przeanalizowano i uzasadniono wyniki badań eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi teoretycznie.

1. Wstęp

Do pomiarów wielkości mechanicznych (sił, naprężeń, momentów skręcających, odkształceń sprężystych) wykorzystuje się znane od dawna zjawiska fizyczne, polegające na zmianie właściwości magnetycznych ferromagnetyków pod wpływem naprężeń mechanicznych.

Zjawiska znane obecnie pod nazwą magnetosprężystości zaobserwowali Matteuci i Villary (1865 r.). Ich badania zostały poprzedzone odkryciami dokonanymi przez Joule'a, Guillemina i Wiedemanna.

Joule (1842 r.) stwierdził, że magnesowany wzdłużenie pręt żelazny zmienia swą długość. W r. 1846 Guillemin zauważył, że zgięty sprężyste pręt prostuje się, gdy jest on magnesowany wzdłużnie. Wiedemann w r. 1858 zaobserwował skręcanie się pręta żelaznego w polu magnetycznym podłużnym i poprzecznym.

Zjawiska te znane pod nazwą magnetostrykcji - polegają na zmianie rozmiarów i kształtu ferromagnetyka oraz właściwości mechanicznych pod wpływem działania na ferromagnetyk pola magnetycznego. Obydwa zjawiska magnetostrykcję i magnetosprężystość - określa się wspólną nazwą zjawisk piezomagnetycznych. Występują one nierozdzielnie i są zjawiskami termodynamicznie odwrotnymi.

2. Związki opisujące właściwości piezomagnetyczne ferromagnetyków

Ogólną zależność między magnetostrykcją a magnetosprężystością dla jednoosiowego stanu naprężeń mechanicznych i magnetostrykcji jednowymiarowej określa równanie:

$$\frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial H} = \frac{\partial B}{\partial \sigma},$$

(1)

przy czym: l - długość początkowa ferromagnetyka przy $H=0$

$\frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial H} = b$ - współczynnik piezomagnetyczny magnetostrykcyjny wyznaczony przy $\sigma = 0$, określający względną zmianę długości l , spowodowaną zmianą natężenia pola magnetycznego H ;

$\frac{\partial B}{\partial \sigma} = b$ - współczynnik piezomagnetyczny (magnetosprężysty) wyznaczony przez $H=0$, określający zmianę indukcji magnetycznej B spowodowaną zmianą naprężenia σ .

Związki między wielkościami magnetycznymi a mechanicznymi określają ogólnie zależności funkcyjne

$$B_{H,\sigma} = f(H, \sigma) \quad (2)$$

$$\epsilon_{\sigma,H} = f(\sigma, H) \quad (3)$$

$$dB_{H,\sigma} = \frac{\partial B}{\partial H} dH + \frac{\partial B}{\partial \sigma} d\sigma = \mu dH + b d\sigma \quad (2a)$$

$$d\epsilon_{\sigma,H} = \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial \epsilon}{\partial H} dH = \frac{1}{E} d\sigma + b dH, \quad (3a)$$

przy czym:

$\frac{\partial B}{\partial H} = \mu$ - przenikalność bezwzględna ferromagnetyka przy $\sigma = 0$,

$\frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} = \frac{1}{E}$ - odwrotność współczynnika sprężystości podłużnej przy $H = 0$

Całkując równania (2a) i (3a) otrzymuje się układ równań opisujących związki między wielkościami mechanicznymi i magnetycznymi,

$$B_{H,\sigma} = \int_0^H \mu dH + \int_0^\sigma b d\sigma = \mu H + b\sigma = B + \Delta B_\sigma \quad (4)$$

$$\epsilon_{\sigma,H} = \int_0^\sigma \frac{1}{E} d\sigma + \int_0^H b dH = \frac{\sigma}{E} + bH = \epsilon + \Delta \epsilon_H \quad (5)$$

przy czym:

$B = \mu H$ - indukcja w ferromagnetyku przy $\sigma = 0$ (6)

$\Delta B_\sigma = b\sigma$ - przyrost indukcji w ferromagnetyku spowodowany naprężeniem mechanicznym σ , (7)

$\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ - wydłużenie względne ferromagnetyka przy $H = 0$, (8)

$\Delta \epsilon_H = \lambda = \frac{d\lambda}{1}$ - względne wydłużenie magnetostrykcyjne przy $H = \text{const.}$ (9)

Przyrost indukcji ΔB_σ (równanie 7) zależy od znaku i wartości współczynnika piezomagnetycznego b oraz znaku i wartości naprężenia σ . Jeżeli współczynnik $b > 0$ (funkcja $\lambda(H)$ jest rosnąca w przedziale zmian H),

i naprężenie $\sigma > 0$ (rozciągające), to według równania (7) przyrost $\Delta B_G > 0$, a przy $\sigma < 0$ (ściskanie), $\Delta B_G < 0$. Z równania (5) wynika, że rozciągany ferromagnetyk magesowy wydłuża się dodatkowo, gdy $b > 0$ oraz skraca się, gdy $b < 0$, przy czym zarówno wydłużenie jak i skrócenie magnetostrykcyjne nie zależy od znaku pola H .

3. Piezomagnetyczne właściwości materiałów ferromagnetycznych

Piezomagnetyzm jest nierozzerwalnie złączony z magnetostrykcją λ . Odkształcenia mechaniczne λ materiałów ferromagnetycznych pod wpływem pola magnetycznego są zazwyczaj kwadratową funkcją B . Według Aizuowa [1,2] magnetostrykcja polikrystalicznych ferromagnetyków izotropowych w polach magnetycznych odpowiadających procesom obrotów domen określa równanie

$$\lambda = \lambda_s \frac{B^2}{B_s^2}, \quad (10)$$

przy czym: λ_s - magnetostrykcja w stanie nasycenia ($B = B_s$)

B - indukcja, przy której magnetostrykcja wynosi λ .

Równanie jest słuszne w zakresie zmian indukcji od 0 do B_s , jeżeli materiał ma wyróżnione kierunki łatwego magnesowania (np: stal zinnowalcowana) i kierunek pomiaru magnetostrykcji jest zgodny z kierunkiem walcowania. Magnesowanie takiego ferromagnetyka odbywa się przez obroty domen. Jeżeli izotropowy ferromagnetyk jest poddany takim naprężeniom, że energia magnetosprężysta przypadająca na jednostkę objętości ferromagnetyka

$$E_G = \sigma \cdot \lambda \quad (11)$$

jest dużo większa od energii anizotropii wewnętrznej E_k , związanej ze stanem naprężeń wewnętrznych, czyli $E_G \gg E_k$, wtedy magnetostrykcję określa równanie.

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s \frac{B^2}{B_s^2} \quad (12)$$

Naprężenia zewnętrzne orientują wektory namagnesowania domen. Proces namagnesowania odbywa się przez obrót domen w kierunku działania pola magnetycznego (1).

Namagnesowanie dla procesu obrotów domen określa zależność

$$B = B_s \cos \theta, \quad (13)$$

gdzie: θ - kąt pomiędzy kierunkiem działania pola magnetycznego a wektorem B_s .

Dzieląc równanie (10) przez równanie (12) uzyskuje się magnetostrykcyjny współczynnik przeliczeniowy a_λ . Współczynnik ten, zależny od technologii wykonania materiału ferromagnetycznego, stanu naprężeń wewnętrznych oraz od wartości naprężeń zewnętrznych, wynosi

$$a_\lambda = 0,67 \div 1,0 \quad (14)$$

4. Czułość piezomagnetyczna

Czułość piezomagnetyczna określa bezwzględną zmianę parametrów magnetycznych B, μ, H na jednostkę naprężenia mechanicznego σ . Wobec tego można rozróżnić:

- 1) czułość odniesioną do zmiany indukcji B , przypadającą na jednostkę naprężenia mechanicznego

$$S_B = \frac{\Delta B_\sigma}{\sigma}, \quad (15)$$

- 2) czułość odniesioną do zmiany pola magnetycznego H , przypadającego na jednostkę naprężenia mechanicznego,

$$S_H = \frac{\Delta H_\sigma}{\sigma}, \quad (16)$$

- 3) czułość odniesioną do zmiany przenikalności magnetycznej μ , przypadającej na jednostkę naprężenia mechanicznego,

$$S_\mu = \frac{\Delta \mu_\sigma}{\sigma}, \quad (17)$$

Wartość bezwzględnych przyrostów parametrów B, μ, H , można obliczyć, mnożąc równanie (4) przez dH , a równanie (5) przez $d\sigma$ oraz uwzględniając, że $\Delta \epsilon_H = \lambda$.

$$B_{H,\sigma} dH = BdH + \Delta B_\sigma dH \quad (18)$$

$$\epsilon_{\sigma,H} d\sigma = \epsilon d\sigma + \lambda d\sigma \quad (19)$$

Po scałkowaniu równań (18) i (19) otrzymuje się równania energii sprężystości i energii magnetycznej, przypadające na jednostkę objętości materiału ferromagnetycznego jednocześnie magnesowanego i naprężonego

$$E_{H,\sigma} = \int_0^H BdH + \int_0^H \Delta B_\sigma dH = E_H + \Delta E_\sigma \quad (20)$$

$$E_{\sigma,H} = \int_0^\sigma \epsilon d\sigma + \int_0^\sigma \lambda d\sigma = E_\epsilon + \Delta E_\lambda \quad (21)$$

przy czym:

- $E_{H,\sigma}$ - energia magnetyczna materiału ferromagnetycznego przy $\sigma = \text{const.}$,
 E_H = energia magnetyczna materiału ferromagnetycznego przy $\sigma = 0$.
 ΔE_σ - przyrost energii magnetycznej spowodowany naprężeniem mechanicznym (energia magnetosprężysta),
 $E_{\sigma,H}$ - energia sprężystości materiału namagnesowanego; $H > 0$,
 E_ϵ - energia sprężystości materiału nienamagnesowanego; $H = 0$,
 ΔE_λ - przyrost energii sprężystości spowodowany wydłużeniem magnetostrykcyjnym λ .

Przyrosty energii ΔE_σ i ΔE_λ są równe, gdyż współczynniki piezomagnetyczne równań (4) i (5) są sobie równe (co wynika z równania (1))

$$\Delta E_\sigma = \Delta E_\lambda = \Delta B_\sigma \quad H = \sigma \lambda \quad (22)$$

Określenie magnetostrykcji dla procesu przesuwania domen jest skomplikowane. Zależność $\lambda(H)$ można wyznaczyć eksperymentalnie. Jeżeli punkt pracy przetwornika znajduje się na nieliniowej części charakterystyki namagnesowania, której odpowiadają procesy obrotów domen, przyrost energii magnetosprężystej można obliczyć z równania (20),

$$\Delta E_\sigma = E_{H,\sigma} - E_H = \sigma \lambda \quad (23)$$

Podstawiając równanie (12) do (23) i różniczkując względem H , oblicza się

$$\frac{d}{dH} \left(\int_0^H B_{H,\sigma} dH - \int_0^H B dH \right) = \frac{d}{dH} \left(\frac{3}{2} \lambda_s \frac{B^2}{B_s^2} \right) \sigma, \quad (24)$$

czyli

$$\Delta B_\sigma = B_{H,\sigma} - B = \frac{3 \lambda_s B}{B_s^2} \cdot \frac{dB}{dH} \sigma \quad (25)$$

Dzieląc równanie (25) przez σ , otrzymuje się wyrażenie na czułość S_B ,

$$S_B = \frac{3 \lambda_s B}{B_s^2} \cdot \frac{dB}{dH} \quad (26)$$

Maksymalną wartość S_B uzyskuje się w punkcie charakterystyki $B(H)$, dla którego iloczyn $B \frac{dB}{dH}$ osiąga wartość maksymalną.

W podobny sposób można określić czułość S_H .

Różnica energii rdzenia namagnesowanego i obciążonego mechanicznie $E_{H\sigma}$ i energii magnetycznej rdzenia nieobciążonego E_H jest równa energii magnetosprężystej

$$\frac{d}{dB} \left(\int_0^B H_G dB - \int_0^B H dB \right) = \frac{d}{dB} \left(\frac{3}{2} \lambda_s \frac{B^2}{B_s^2} \right) G, \quad (27)$$

czyli

$$\Delta H_G = H_G - H = \frac{3\lambda_s B}{B_s^2} \frac{B}{B_s} G, \quad (28)$$

przy czym:

H_G - pole magnetyczne materiału obciążonego, $G > 0$

H - pole magnetyczne materiału nieobciążonego ($G = 0$) - wyznaczone przy $B = \text{const}$.

Dzieląc równanie (28) przez G , otrzymuje się wyrażenie na S_H

$$S_H = \frac{3\lambda_s B}{B_s^2} \quad (29)$$

Czułości piezomagnetyczne opisane wzorami (26) i (29) odnoszą się do ferromagnetycznych rdzeni przetworników, dla których spełnione są zależności (11) i (12).

Podstawiając równanie (25) do (4) oraz uwzględniając równanie (14), otrzymuje się

$$B_{H,G} = B + \Delta B_G = B + \frac{3\lambda_s B}{B_s^2} \frac{dB}{dH} G s_\lambda \quad (30)$$

oraz analogicznie

$$H_G = H + \Delta H_G = H + \frac{3\lambda_s B}{B_s^2} G s_\lambda \quad (31)$$

Równania (30) i (31) określają właściwości piezomagnetyczne magnetostrycyjnych materiałów ferromagnetycznych.

Z równań tych wynika, że chcąc uzyskać duże przyrosty ΔB_G i ΔH_G przy $G = \text{const}$, należy stosować na rdzenie przetworników materiały ferromagnetyczne o dużej magnetostrykcji λ , indukcji nasycenia B_s i przenikalności μ .

Dobrymi właściwościami piezomagnetycznymi charakteryzują się materiały magnetyczne:

- a) żelazo i stopy żelaza z krzemem - ze względu na dużą indukcję nasycenia,
- b) nikiel - ze względu na magnetostrykcję,

- c) stopy żelazo-niklowe - ze względu na dużą przenikalność magnetyczną i magnetostrykcję,
 d) stopy żelazo-kobaltowe.

ad a). Właściwości piezomagnetyczne zależą od technologii wykonania i rodzaju naprężeń mechanicznych. Stal zimnowalcowana (orientowana) charakteryzuje się dużą magnetostrycją w kierunku walcowania. Duże zmiany indukcji pod wpływem naprężeń uzyskuje się dla naprężeń ściskających, działających zgodnie z kierunkiem walcowania.

Stal gorącowa walcowana w odróżnieniu od zimnowalcowanej charakteryzuje się mniejszą magnetostrycją i większą izotropowością.

ad b). Nikiel odznacza się jednakową czułością na naprężenia ściskające i rozciągające, dlatego może być stosowany w przetwornikach sił i naprężeń, gdzie zachodzi konieczność rozróżniania znaku działających naprężeń.

ad c). Nie wszystkie stopy żelazo-niklowe odznaczają się dużą czułością piezomagnetyczną. Magnetostrykcja tych materiałów zależy w dużej mierze od procentowej zawartości żelaza i niklu. Najlepsze właściwości ma stop o zawartości 65% Ni i 35% Fe.

ad d). Stopy żelazo-kobaltowe odznaczają się magnetostrycją kilkakrotnie wyższą od wyżej wymienionych materiałów.

Szeroki wybór materiałów piezomagnetycznych na rdzenie przetworników pomiarowych wymaga od projektanta znajomości właściwości piezomagnetycznych materiałów ferromagnetycznych.

5. Badania i pomiary

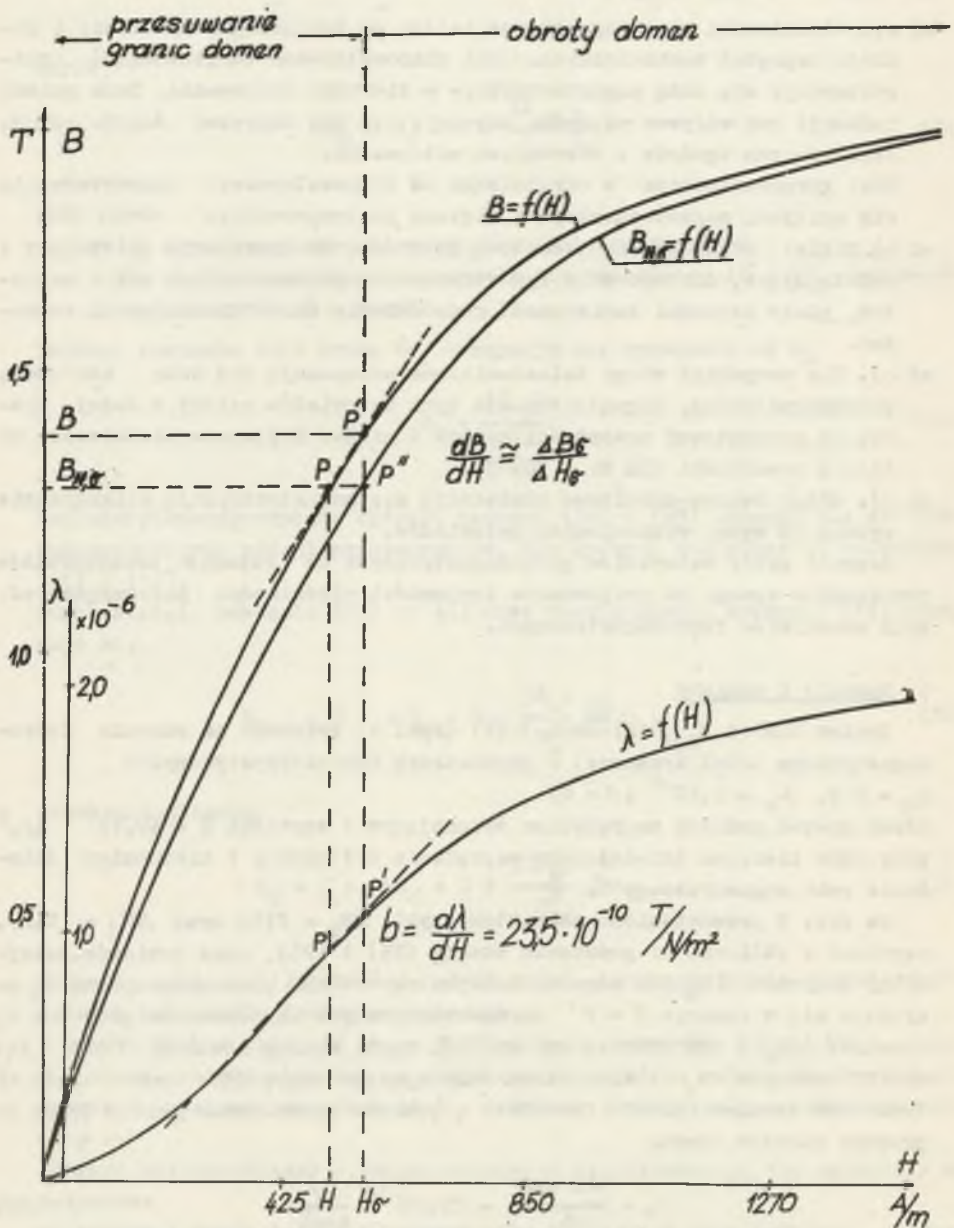
Pomiar $B(H)$ i $B_{H,\sigma}(H)$ oraz $\lambda(H)$ (rys. 1) wykonano na rdzeniu ferromagnetycznym (stal krzemowa) o parametrach charakterystycznych:

$$B_s = 2 \text{ T}, \quad \lambda_s = 2 \cdot 10^{-6} \quad (\sigma = 0)$$

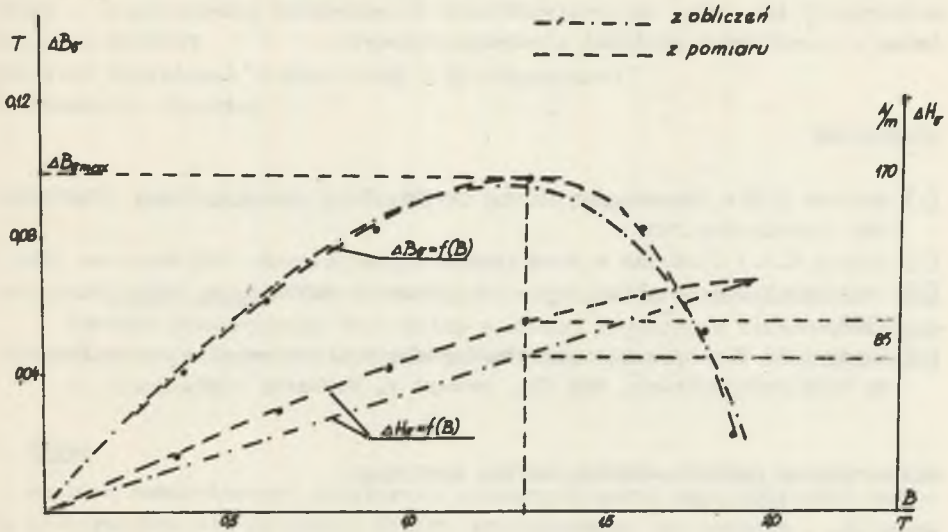
Rdzeń został poddany naprężeniom ściskającym o wartości $\sigma = 40 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ przy czym kierunek działającego naprężenia był zgodny z kierunkiem działania pola magnetycznego H .

Na rys. 2 przedstawiono charakterystyki $\Delta B_G = f(B)$ oraz $\Delta H_G = f(B)$, uzyskane z obliczeń na podstawie wzorów (25) i (28), oraz pomiarów. Maksymalny przyrost ΔB_G , a zarazem maksymalną czułość piezomagnetyczną S_B uzyskuje się w punkcie $P' = P''$ na charakterystyce magnesowania przy $H = H_G$. Stosunek B/B_s w tym punkcie wynosi 0,7, czyli według równania (13) kąt między wektorem B_s a kierunkiem działającego naprężenia wynosi około 45° . Punkt ten zarazem określa przejście z procesu przesuwania granic domen do procesu obrotów domen,

$$S_B = \frac{\Delta B_{\max}}{\sigma} = 25 \cdot 10^{-10} \frac{\text{T}}{\text{N/m}^2} \quad (32)$$



Rys. 1. Charakterystyki magnesowania rdzenia ferromagnetycznego $B(H)$ i $B_{M,G}(H)$ oraz charakterystyka magnetostrykcyjna $\lambda(H)$



Rys. 2. Charakterystyki bezwzględnych przyrostów $\Delta B_G(B)$ i $\Delta H_G(B)$, wyznaczone z obliczeń i z pomiarów przy $\sigma = 40 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$

Odpowiedni współczynnik piezomagnetyczny wyznaczony na charakterystyce $\lambda(H)$ wynosi

$$b = \frac{d\lambda}{dH} = 23,5 \cdot 10^{-10} \frac{\text{T}}{\text{N/m}^2} \quad (33)$$

Jak widać z przedstawionych charakterystyk, wyniki uzyskane doświadczalnie i obliczeniowo są zgodne. Przebieg charakterystyki $\Delta B_G = f(B)$ i $\Delta H_G = f(B)$ jest uzależniony od przebiegu charakterystyk magnetostrykcyjnych $\lambda(H)$. Określenie punktu P' , dla którego $\Delta B_G = \max$, na charakterystyce $B(H)$ jest interesujące, gdyż praca przetwornika ze względu na maksymalną czułość S_B powinna odbywać się w tym punkcie. Czułość S_B nie jest wielkością stałą i zależy od parametrów charakterystycznych materiału ferromagnetycznego, przy czym maksymalną wartość osiąga w punkcie, dla którego iloczyn $B \frac{dB}{dH} = \max$. Dlatego też czułość przetwornika określona równaniem

$$S_p = \frac{d(\Delta B_G)}{d\sigma} \quad (34)$$

powinna być określona w danym punkcie pracy na charakterystyce magnesowania. Stwierdzono, że dla punktu P' czułość przetwornika określona równaniem (34) jest stała w zakresie zmian σ od 0 do $40 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$.

W zależności od parametru mierzonego ΔB_G (np: w przetwornikach transformatorowych) lub ΔH_G (w przetwornikach dławikowych) interesująca jest jedna z określonych czułości piezomagnetycznych.

LITERATURA

- [1] Bozorth R.M.: Ferromagnetism D. Van Nostrand Company, Inc. Toronto-New York-London 1951.
- [2] Bielew K.P.: Zjawiska w materiałach magnetycznych, PWN, Warszawa 1962.
- [3] Gumaniuk M.N.: Czujniki magnetosprężyste w automatyce, WNT, Warszawa 1967.
- [4] Kączkowski Z.: Równania magnetostrykcyjne i ich współczynniki, Rozprawy Elektrotechniczne, tom VII, zeszyt 2, Warszawa 1961.

ПЕЗОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р е з ю м е

В статье показано влияние механических напряженностей на свойства ферромагнитных материалов. Приведены пезомагнитные уравнения и выведена пезомагнитная чувствительность некоторых измеряемых магнитных параметров. Проанализированы и сопоставлены эффекты экспериментов с теоретическими результатами.

PIEZOMAGNETIC PROPERTIES OF FERROMAGNETIC SUBSTANCES

S u m m a r y

In the article the influence of mechanical tensions on the properties the magnetostrictive ferromagnetic substances is discussed. There are piezomagnetic equations and sensitivities presented corresponding to the measured magnetic parameters. The experimental results are analyzed and compared with the results of theoretical calculations.