

dr inż. PIOTR KARKOSZKA

Przemysłowy Instytut Automatyki
i Pomiarów MERA-PIAP

Warszawa

BISTABILNE MATERIAŁY MAGNETYCZNE W TECHNICIE POMIAROWEJ

Artykuł stanowi próbę monograficznego ujęcia tematyki związanej z badaniem i zastosowaniem zjawiska Wieganda, Matteucciego i Barkhausena w technice pomiarowej wielkości mechanicznych i niektórych wielkości elektrycznych.

1. Fizyczne podstawy zjawisk Barkhausena, Matteucciego, Wieganda

1.1. Wstęp

W pomiarach wielkości mechanicznych i niektórych wielkości elektrycznych coraz większą rolę odgrywają przetworniki pomiarowe, których działanie oparte jest na zjawiskach związanych z szeroko pojętą magnetostrykcją materiałów magnetycznych, to jest na zjawiskach związanych z oddziaływaniem między wielkościami magnetycznymi a wielkościami mechanicznymi (naprężeniami i odkształceniami spowodowanymi działaniem sił i momentów) [1]. Do zjawisk tych należą między innymi omawiane w niniejszym artykule zjawiska: Barkhausena, Matteucciego, Wieganda.

Przyczyną występowania wymienionych zjawisk są niejednorodności struktur domenowych materiałów magnetycznych. Powodują one, że magnesowanie tych materiałów przebiega w miarę zwiększania wartości natężenia pola magnetycznego H w trzech etapach (rys. 1)¹⁾.

W zakresie małych wartości H ($0 < H < k_1 H_C$; zwykle $k_1 \approx 0,4$; H_C — natężenie koercji) następują odwracalne przesunięcia 180° ścian domenszerokich²⁾ (rys. 2, 3). Po zaniku zewnętrznego pola magnetycznego domeny przyjmują z powrotem położenie początkowe.

W zakresie średnich wartości H ($k_1 H_C < H < k_2 H_C$; zwykle $k_2 = 2 \dots 10$) następują nieodwracalne przesunięcia ścian 180° domen szerokich (rys. 2, 3). Po zaniku zewnętrznego pola magnetycznego domeny nie wracają do położenia początkowego.

W zakresie dużych wartości H ($H > k_2 H_C$) następuje magnesowanie obszarów wąskich domen przez obroty magnetyzacji spontanicznej tych domen i przesunięcia ścianek w domenach zamykających (rys. 4). W miarę dalszego zwiększania H , gdy materiał magnetyczny osiąga stan jednorodnego namagnesowania (nasylenia), obserwowane są już tylko obroty mikroskopowe odzwierciedlające mikroskopowe niejednorodności struktury [2].

Zjawiska Barkhausena, Matteucciego, Wieganda występują podczas magnesowania magnetostrykcyjnych materiałów magnetycznych polem o natężeniu H zmieniającym się w zakresie $< k_1 H_C; k_2 H_C >$.

1) Rysunki zamieszczone na końcu artykułu (przyp. red.).

2) Termin „przesunięcie 180° ścian domen szerokich” używany w literaturze oznacza przesunięcie domen w kierunku osi łatwego magnesowania.

Ich występowanie jest związane, jak już wspomniano, z niejednorodnością struktury domenowej. W przypadku materiałów krystalicznych niejednorodności tej struktury są spowodowane przez:

- domieszkowanie cząsteczkami materiałów niemagnetycznych,
- niejednorodność składu stopu magnetycznego,
- szcążkowe naprężenia mechaniczne,
- naprężenia termiczne,
- naprężenia spowodowane oddziaływaniem sił zewnętrznych,
- naruszenia spójności materiału.

W przypadku materiałów amorficznych, zwanych także szkłami metalicznymi, niejednorodność struktury domenowej jest spowodowana między innymi przez specjalną obróbkę technologiczną, kształtującą poprzez rozkład naprężeń w strukturze materiału strukturę domenową oraz kształt geometryczny domen. Za pomocą odpowiedniej obróbki magnetostrykcyjnych materiałów magnetycznych można tak ukształtować strukturę domenową, że wymienione zjawiska będą dominować w procesie magnesowania (rys. 1b) i przemagnesowywania (rys. 5). Odpowiadająca magnesowaniu tych materiałów pętla histerezy przybierze kształt prostokątny.

Właściwości takie uzyskuje się między innymi przez wykształcenie w strukturze materiału ferromagnetycznego domen cylindrycznych, jak w przypadku drutów Wieganda, bądź domen szerokich w obszarach naprężeń rozciągających i domen wąskich w obszarach naprężeń ściskających, jak w przypadku magnetyków amorficznych o dodatniej magnetostrykcji (lub odwrotnie, jak w magnetykach amorficznych o ujemnej magnetostrykcji) (rys. 4), oraz przez wprowadzenie takich naprężeń mechanicznych, aby przemagnesowanie materiału magnetycznego pod wpływem zewnętrznego zmiennego pola następowało głównie podczas jednego skoku Barkhausena.

Inaczej mówiąc, obróbka technologiczna powinna wyeksponować w całym procesie magnesowania proces, w trakcie którego następuje nieodwracalne przemieszczenie 180° ścian domen szerokich, a więc powinna wytworzyć w materiale silną anizotropię jednokierunkową lub przynajmniej taką strukturę domenową, w której anizotropia jednokierunkowa powstaje w wyniku przyłożenia z zewnątrz niewielkiej siły.

1.2. Opis zjawiska Barkhausena, Matteucciego i Wieganda w bistabilnych materiałach magnetycznych

1.2.1. Zjawisko Barkhausena

Fenomenologicznie zjawisko Barkhausena tłumaczy się tym [3], że podczas przemagnesowywania ferromagnetyków ścianki Blocha, stanowiące granicę domen, przemieszczające się w sposób ciągły pod wpływem pola zewnętrznego o zwiększającym się natężeniu H , napotykają przeszkodę, która powstrzymuje ich ruch. Jeśli natężenie H przekroczy pewną wartość krytyczną, w wyniku której ścianka Blocha przewycięży opór przeszkody, jej dalszy ruch może odbywać się bez dalszego zwiększania natężenia H do chwili napotkania kolejnej przeszkody lub do chwili całkowitej reorientacji magnetycznej domeny.

W materiałach magnetycznych o prostokątnej pętli histerezy przemieszczanie się domen zachodzi w jednym skoku Barkhausena, po czym materiały te praktycznie osiągną stan nasycenia magnetycznego. Zjawisko to jest wyróżniane jako silny efekt Barkhausena (Large Barkhausen effect lub LB-effect).

Z uwagi na to, że podczas przemagnesowywania tych materiałów nie obserwuje się pośrednich stanów namagnesowania, materiały te są zaliczane do grupy ferromagnetyków bistabilnych, dogodnych do

wykorzystania między innymi w technice cyfrowej i impulsowej jako elementy przełączników dwustanowych itp.

Szybkość przemieszczania się 180° ścian domen szerokich v_m (szybkość fali przemagnesowania) ferromagnetyków z prostokątną pętlą histerezy o jednokierunkowej anizotropii można określić za pomocą eksperymentu Sixtusa—Tonksa [3, 5] (rys. 6).

Badaną próbkę umieszcza się wewnątrz solenoidu A wytwarzającego jednorodne pole magnetyczne o natężeniu H_1 . Próbkę z materiału o magnetostrykcji dodatniej rozciągana z siłą powodującą wystąpienie anizotropii jednokierunkowej wzdłuż osi x jest namagnesowana do stanu nasycenia. Do zapoczątkowania przemagnesowania służy krótki solenoid B wytwarzający pole o natężeniu H_2 . Jeśli na odcinku objętym solenoidem A i B natężenie $H = H_2 - H_1$ przekroczy pewną wartość H_s w strukturze próbki powstanie zarodek przemagnesowania, to jest obszar o orientacji magnetycznej przeciwnej do orientacji reszty próbki. Przemagnesowywanie próbki rozpocznie się w chwili, gdy solenoid A wytworzy pole przeciwnie skierowane do pola o natężeniu H_1 , którego natężenie H_3 będzie większe od wartości H_0 , to znaczy takiej wartości, przy której prędkość fali przemagnesowania v_m dąży do zera.

Wartość H_0 nie jest stała na całej długości próbki. Zależy ona od niejednorodności struktury domenowej próbki. Z tego powodu prędkość fali przemagnesowania v_m określana ze wzoru:

$$v_m = \frac{l_{CD}}{t_{1 \rightarrow 2}} \quad (1)$$

jako zależna od różnicy wartości $H_3 - H_0$, jest prędkością średnią.

We wzorze (1) oznaczono przez:

l_{CD} — odległość między cewkami kontrolnymi C i D, w których podczas przejścia fali przemagnesowania indukują się impulsy napięcia, odpowiednio e_1 i e_2 ,

$t_{1 \rightarrow 2}$ — czas upływający od chwili pojawienia się impulsu e_1 do chwili pojawienia się impulsu e_2 .

Liczne eksperymenty z użyciem różnych próbek wykazały, że:

— w przypadku większości materiałów magnetycznie twardych:

$$v_m \sim (H_3 - H_0) \quad (2)$$

— w przypadku większości materiałów magnetycznie miękkich:

$$v_m \sim (H_3 - H_0)^2 \quad (3)$$

Prędkość v_m jest ograniczana przez prądy wirowe towarzyszące fali przemagnesowania i relaksację spinów. Jednym ze sposobów jej zwiększania jest zatem zwiększanie rezystywności właściwej materiałów magnetycznych.

Przetworniki pomiarowe, których działanie oparte jest na zjawiskach Barkhausena, Matteucciego lub Wieganda, zawierają elementy z materiałów magnetycznie twardych, dlatego w ich przypadku prędkość v_m określa się wzorem (4) [6, 8]:

$$v_m = A(H_3 - H_0) \quad (4)$$

gdzie współczynnik A jest określony wzorem:

$$A = 2 M_s / \beta \quad (5)$$

We wzorze (5) oznaczono przez:

M_s — magnetyzację nasycenia w A/m lub w Oe,

β — współczynnik tłumienia ruchu domen (fali przemagnesowania) przez prądy wirowe i relaksację spinów.

Wartość współczynnika A zależy w pewnym stopniu od natężenia H_3 pola przemagnesowującego. Zwiększanie H_3 powoduje wzmocnienie prądów wirowych wskutek wzrostu v_m , a przez to zwiększenie wartości współczynnika β .

Stwierdzone doświadczalnie wartości współczynnika A różnych magnetyków amorficznych mieszczą się w zakresie 700 ... 1800 m/s Oe (0,8 ... 2,25 m²/s A) [5, 8, 9] i są większe co najmniej dwukrotnie niż wartości charakterystyczne dla bistabilnych magnetyków krystalicznych.

Amplituda impulsu napięciowego e indukującego się w cewce nawiniętej na badaną próbkę materiału magnetycznego jest określana wzorem (6) [5]:

$$e = z S N_w B_s \cos \theta M_s \beta^{-1} (H - H_0) \quad (6)$$

gdzie:

z — liczba zwojów cewki,

S — powierzchnia przekroju poprzecznego próbki,

N_w — liczba domen przemieszczających się w obszarze objętym cewką,

M_s — magnetyzacja nasycenia,

B_s — indukcja nasycenia,

θ — średnia wartość kąta między wektorem magnetyzacji M a osią x próbki,

H_0 — natężenie pola przemagnesowującego, przy którym prędkość fali przemagnesowywania $v_m \rightarrow 0$,

H — natężenie pola przemagnesowującego ($H > H_s$ — wartości minimalnej powodującej wytworzenie zarodka przemagnesowania),

β — współczynnik tłumienia ruchu domen.

Amplituda impulsu napięciowego zależy dodatkowo od częstotliwości przemagnesowania f. Ponadto zwiększanie natężenia H przyczynia się do zwiększenia liczby domen przemieszczających się wewnątrz cewki. Wpływ ten uwidacznia się tym silniej, im dłuższa jest cewka (rys. 7). W przypadku długości cewki l_c porównywalnej z wymiarami domen, wpływ H i l_c na amplitudę e impulsów napięciowych zanika. W rezultacie tego wartość e zmienia się minimalnie ze zwiększaniem częstotliwości przemagnesowywania f (rys. 7).

1.2.2. Zjawisko Matteucciego

Z opisu zjawiska Matteucciego [5 — 9], wynika, że jest ono ściśle związane ze zjawiskiem Barkhausena, a w szczególności z silnym efektem Barkhausena. Tym niemniej o ile do wywołania silnego efektu Barkhausena wystarczy na przykład taśmę amorficzną obciążyć siłą wywołującą naprężenia rzędu 40 ... 50 kG/mm² (rozciągające w przypadku dodatniego współczynnika magnetostrykcji λ_s , ściskają-

ce w przypadku ujemnego λ_s), to do wywołania zjawiska Matteucciego potrzebne jest trwałe odkształcenie taśmy skręconej w spiralę, a więc wywołanie naprężeń rzędu 150 ... 320 kG/mm².

Zjawisko Matteucciego uwydatnia się najsilniej w materiałach o wybitnej sprężystości, silnej magnetostrykcji, dużej magnetyzacji, dużej rezystywności właściwej i dużej jednorodności struktury domenowej w poszczególnych jej warstwach. Właściwości te uzyskuje się na drodze dosyć złożonej obróbki technologicznej taśm amorficznych [8, 9] (lub drutu amorficznego [5]) o składzie ogólnym Fe70...80, B10...20, Si1...5, Co1...5 + domieszki. Na obróbkę tę składa się, oprócz samego wytwarzania materiałów amorficznych, wyżarzanie, skręcanie, rozciąganie, dzięki któremu w strukturze materiału powstają warstwy trwale odkształcone.

Zjawisko Matteucciego jest objaśnione na przykładzie modelu domenowego taśmy amorficznej (rys. 8).

Pod wpływem rozciągnięcia skręconej w spiralę taśmy amorficznej z odpowiednią siłą, w jej strukturze pojawiają się naprężenia o rozkładzie przedstawionym na rys. 8a, b. W warstwach zewnętrznych są to naprężenia rozciągające, w warstwach wewnętrznych natomiast ściskające. W przekroju poprzecznym taśmy można wyróżnić pięć warstw (rys. 8a):

- warstwę a – b odkształconą trwale wskutek naprężeń ściskających,
- warstwę b – c odkształconą odwracalnie wskutek naprężeń ściskających,
- warstwę c obojętną,
- warstwę c – d odkształconą odwracalnie wskutek naprężeń rozciągających,
- warstwę d – e odkształconą trwale wskutek naprężeń rozciągających.

Warstwy a – b, d – e utrzymują spiralę w stanie odkształconym.

W rezultacie rozciągnięcia spirali w warstwach a – b i d – e wytwarzają się dwie osie łatwego magnesowania skierowane pod kątem θ (w warstwie d – e) i $\pi/2 + \theta$ (w warstwie a – b) względem osi x, przy czym:

$$\theta = \arccos p/\pi D \quad (7)$$

Pod wpływem wprowadzonych naprężeń w warstwach odkształconych trwale powstaje struktura domenowa złożona między innymi z domen szerokich.

Podczas przemagnesowywania taśmy dwie 180° ściany domenowe (oznaczone na rys. 8c odpowiednio linią kropkowaną dla warstwy a – b i ciągłą dla warstwy d – e) przesuują się jednocześnie z prędkością v_m :

$$v_m = dx/dt \quad (8)$$

Z zależności:

$$\text{rot } E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (9)$$

lub z zależności:

$$\oint E_x dx = - \iint_S B_y dS \quad (10)$$

można obliczyć napięcie e-indukujące się w skręconej taśmie. W przypadku rozciągnięcia taśmy

w taki sposób, że kąt $\theta = 45^\circ$ a kąt $-\theta = -45^\circ$ napięcie to wyraża się wzorem:

$$e = \sqrt{2} H N_w L B_s v_m \quad (11)$$

gdzie:

- h — grubość taśmy,
- N_w — liczba 180° ścian domen szerokich na jednostkę długości, zależna od liczby zwojów skręconej w spiralę taśmy na jednostce długości określanej symbolem z_{tw} ,
- L — długość taśmy przed skręceniem jej w spiralę,
- B_s — indukcja nasycenia,
- v_m — prędkość przesuwania się domen równa prędkości fali przemagnesowania (lub lokalnych fal przemagnesowania w spirali).

Drogę całkowania w wyrażeniu (10) przedstawiono na rys. 8c.

Dodatkowo amplituda napięcia e indukującego się w spirali zależy od częstotliwości przemagnesowania f (rys. 9) oraz od parametru $\sqrt{\lambda_s \sigma}$ (lub proporcjonalnego do niego parametru $\sqrt{\lambda_s z_{tw}}$), gdzie:

- h_s — współczynnik magnetostrykcji,
- σ — naprężenie w warstwach $a - b, d - e$,
- z_{tw} — liczba zwojów spirali na jednostce długości wpływająca na wartość kąta θ

W przypadku skręconego drutu amorficznego napięcie e jest wywoływane składową okrężną magnetyzacji M . Uwzględniając wzór (9) lub (10), można to napięcie wyrazić wzorem:

$$e = 2 D L N_w B_s \sin \theta M_s (H - H_0) \beta^{-1} \quad (12)$$

gdzie:

- D — średnica drutu,
- L — długość drutu,
- N_w — liczba domen na jednostkę długości zależna od z_{tw} ,
- B_s — indukcja nasycenia,
- $B_s \sin \theta$ — średnia wartość składowej B_s prostopadłej do płaszczyzny wyznaczonej przez oś x drutu i promień drutu,
- θ — średni kąt wektora B_s względem osi x drutu,
- H — natężenie pola przemagnesowującego ($H > H_s$ — wartości natężenia H , przy której zostanie wygenerowany zarodek przemagnesowania),
- H_0 — natężenie pola przemagnesowującego, przy którym prędkość $v_m \rightarrow 0$,
- β — współczynnik tłumienia ruchu domen.

Kąt θ jest wyznaczany ze wzoru:

$$\theta = \arccos B_r/B_s \quad (13)$$

gdzie:

- B_r — indukcja remanencji.

Rozkład naprężeń w drucie amorficznym jest nieco inny niż w skręconej w spiralę i rozciągniętej taśmie amorficznej. W przekroju drutu można wyróżnić warstwę zewnętrzną odkształconą trwale i warstwę wewnętrzną odkształconą sprężysto. Naprężenia rozciągające, skierowane pod kątem θ do osi x , i ściskające, skierowane pod kątem $-\theta$ do osi x (rys. 10) są wytwarzane w drucie przez jego skręcenie i rozciągnięcie z odpowiednią siłą. Pod takimi kątami wytwarzane są osie łatwego magnesowania na powierzchni drutu.

Drogę całkowania wyznacza się w taki sam sposób, jak w przypadku taśmy amorficznej.

1.2.3. Zjawisko Wieganda

Zjawisko Wieganda, ściśle związane ze zjawiskiem Barkhausena, występuje w drutach ferromagnetycznych o niezerowym (zwykle dodatnim) współczynniku magnetostrykcji, mających strukturę krystaliczną. W drutach tych, wytwarzanych zwykle ze stopu Fe40...50 Ni50...60 lub ze stopu Vicalloy o składzie Fe38V10Co52, wskutek wprowadzenia naprężeń mechanicznych o odpowiednim rozkładzie za pomocą rozciągania i jednoczesnego naprzemiennego, wielokrotnego skręcania w prawo i w lewo względem ich osi, są wytwarzane dwa obszary o różnych właściwościach magnetycznych:

- obszar zewnętrzny (otoczka) magnetycznie twardy, odkształcony trwale, odznaczający się stosunkowo dużą koercją, w którym kierunki łatwego magnesowania są zgodne z kierunkami linii największych naprężeń rozciągających (45° względem osi drutu) i ściskających (-45° względem osi drutu),
- obszar wewnętrzny (rdzeń) magnetycznie miękki, odkształcony sprężysto, odznaczający się stosunkowo małą koercją.

Obszary te oddziela warstwa graniczna (przejściowa) złożona ze ścian wewnętrznych domen cylindrycznych otoczki.

W trakcie wytwarzania drutów Wieganda należy zwrócić uwagę na to, aby powierzchnie przekrojów poprzecznych otoczki i rdzenia były sobie równe. Dzięki temu zjawisko Wieganda uwydatnia się najsilniej. Sprawdzenia równości przekrojów można dokonać w zasadzie tylko za pomocą metody wytrawiania powierzchni drutu. Trawienie wykonuje się do chwili zaniku zjawiska Wieganda, to znaczy do chwili całkowitego zniszczenia warstwy zewnętrznej i warstwy przejściowej.

Zjawisko Wieganda wyjaśnia się na podstawie modelu domenowego przedstawionego na rys. 11 oraz na podstawie rys. 12 ilustrującego przemagnesowywanie drutów Wieganda w modułach niesymetrycznych i rys. 13 ilustrującego przemagnesowywanie drutów Wieganda w modułach symetrycznych. W modułach niesymetrycznych impulsy napięcia są wywoływane tylko dzięki przemagnesowywaniu rdzenia, w modułach symetrycznych natomiast dzięki przemagnesowywaniu rdzenia i otoczki.

Przebieg wytwarzania impulsów napięcia jest wyjaśniony od stanu A (rys. 12a), w którym otoczka i rdzeń drutu są namagnesowane w tym samym kierunku χ . W stanie tym strumień magnetyczny wytwarzany przez otoczkę zamyka się przez powietrze (strumień wytwarzany przez miękki magnetycznie rdzeń można pominąć). Zatem strumień Φ objęty powierzchnią drutu wynosi:

$$\Phi = \Phi_{ZA} \quad (14)$$

a natężenie pola magnetycznego w całym przekroju drutu, z uwagi na ciągłość składowej stycznej wektora H na granicy rdzenia i otoczki, wynosi H_A .

Jeśli moduł zostanie poddany oddziaływaniu zewnętrznego pola przemagnesowującego o natężeniu H_1 na tyle dużym, żeby przemagnesować rdzeń, ale na tyle małym, aby nie przemagnesować

otoczki, wtedy strumień Φ_z wytwarzany przez otoczkę zamknie się przez rdzeń (strumień rozproszenia Φ_r przy równych przekrojach rdzenia i otoczki można pominąć). Strumień objęty powierzchnią drutu zmniejszy się zatem do zera:

$$\Phi = \Phi_{zB} - \Phi_{wB} = 0; \quad \Phi_r = 0 \quad (15)$$

a natężenie pola magnetycznego w rdzeniu zmieni kierunek na przeciwny i zwiększy się do wartości H_B z uwagi na kilkukrotne zmniejszenie się reluktancji całkowitej drogi strumienia Φ_z wytwarzanego przez otoczkę.

W celu przemagnesowania rdzenia ze stanu B do A należy wytworzyć zewnętrzne pole przemagnesowujące przeciwnie skierowane niż poprzednio o natężeniu $H_2 > H_1$. W wyniku przemagnesowania rdzenia strumień Φ_z zostanie wyparty z rdzenia i zamknie się przez powietrze, a zatem strumień Φ objęty powierzchnią drutu zwiększy się od zera do wartości Φ_{zA} .

Jeśli na drut zostanie nawinięta cewka, to podczas przemagnesowywania rdzenia zaindukują się w niej impulsy napięcia proporcjonalne do pochodnej strumienia Φ po czasie.

Rdzeń jest przemagnesowywany ze stanu A do stanu B polem o natężeniu rzędu 18...20 Oe (1400...1600 A/m), ze stanu B do stanu A natomiast polem o natężeniu rzędu 100...150 Oe (8000...12000 A/m).

Impulsy napięcia $e_{A \rightarrow B}$ są kilkukrotnie słabsze, niż impulsy $e_{B \rightarrow A}$. Tłumaczy się to silną zależnością prędkości fali przemagnesowania v_m od natężenia H pola przemagnesowującego (dla materiałów magnetycznie miękkich obowiązuje zwykle zależność (3)). Ponieważ przy przemagnesowaniu $A \rightarrow B$ rdzenia pole wytwarzane przez otoczkę wspomaga niejako zewnętrzne pole przemagnesowujące, to prędkość v_m z powodu małej wartości H_1 jest stosunkowo mała. Przy przemagnesowaniu $B \rightarrow A$ pole przemagnesowujące musi przewyciężyć wewnętrzne pole rdzenia o natężeniu $H_B > H_A$, a zatem jego natężenie musi być większe. Po wygenerowaniu zarodka (lub zarodków) przemagnesowania w rdzeniu następuje szybkie wypieranie strumienia Φ_z wytwarzanego przez otoczkę z rdzenia, a więc szybka zmiana natężenia pola w rdzeniu od wartości H_B do wartości H_A i zmiana jego kierunku, sprzyjająca zwiększeniu się szybkości v_m . Podczas przemagnesowywania $B \rightarrow A$ prędkość v_m zmienia się według pewnej ogólnej zależności:

$$v_{mB \rightarrow A} \sim \left[H_2 - H_0 - H_{B \rightarrow A} \left(\frac{i_f}{l} \int_0^{t_0} v_m(t) dt \right) \right]^2 H_{B \rightarrow A} \rightarrow H_A \quad (16)$$

gdzie:

- H_2 — natężenie pola przemagnesowującego ($H_2 > H_s$),
- H_0 — natężenie pola, przy którym $v_m \rightarrow 0$,
- $H_{B \rightarrow A}$ — natężenie pola w przemagnesowywanym rdzeniu jako funkcja sumarycznej długości przemagnesowanych odcinków rdzenia (wyrażenie w nawiasach okrągłych),
- i — liczba wygenerowanych zarodków przemagnesowania,
- t_0 — czas przemagnesowywania rdzenia,
- l — długość rdzenia.

Wyrażenie w nawiasach okrągłych wyraża stosunek $\Delta l/l$ długości drutu, na której nastąpiło przemagnesowanie rdzenia, do całkowitej długości drutu w module.

W trakcie przemagnesowania $B \rightarrow A$ rdzenia prędkość $v_{mB \rightarrow A}$ będzie zatem rosła, przekraczając kilkakrotnie wartość prędkości $v_{mA \rightarrow B}$ podczas przemagnesowania $A \rightarrow B$. Jest to zasadnicza przyczyna faktu, że impulsy napięcia generowane podczas przemagnesowania $B \rightarrow A$ są silniejsze od impulsów generowanych podczas przemagnesowywania $A \rightarrow B$.

W przypadku przemagnesowywania rdzeni drutów w modułach niesymetrycznych polem zmiennym o natężeniu $H = H_1 = H_2$ dla obu kierunków przemagnesowywania, silniejszy sygnał zostanie wytworzony podczas przemagnesowywania ze stanu A do stanu B. Zwykle jednak moduły niesymetryczne pracują w zestawie zawierającym dwa magnesy trwałe:

- jeden mały do przemagnesowania $A \rightarrow B$ rdzenia,
- jeden duży (silniejszy) do przemagnesowania $B \rightarrow A$ rdzenia.

W praktyce wykorzystuje się impulsy generowane podczas przemagnesowania $B \rightarrow A$ rdzeni. Przemagnesowanie $A \rightarrow B$ spełnia rolę pomocniczą, przygotowującą niejako moduł do wygenerowania silnego impulsu napięciowego.

Moduły symetryczne wymagają zastosowania pola przemagnesowującego o natężeniu H umożliwiającym przemagnesowanie zarówno rdzenia jak i otoczki. W takim przypadku silne impulsy napięcia są wytwarzane podczas przemagnesowywania rdzenia, słabsze natomiast podczas przemagnesowywania otoczki. Przemagnesowywanie otoczki ma charakter pomocniczy.

Podczas przemagnesowywania drutu Wieganda w modułach symetrycznych stany B i D (rys. 13) nie są stanami stabilnymi.

Przebieg generowania impulsów w module symetrycznym jest opisany od stanu A (rys. 13), w którym otoczka i rdzeń są namagnesowane w tym samym kierunku x . W stanie tym strumień wytwarzany przez otoczkę zamyka się przez powietrze (strumień wytwarzany przez miękką magnetycznie rdzeń, tak jak poprzednio, można pominąć). Strumień Φ objęty powierzchnią drutu jest równy strumieniowi Φ_{zA} , a natężenie pola w całym przekroju drutu wynosi H_A .

Jeśli moduł zostanie poddany oddziaływaniu pola przemagnesowującego o natężeniu H , rozpocznie się przemagnesowanie rdzenia i otoczki, przy czym rdzeń zostanie przemagnesowany szybciej. Po wygenerowaniu zarodków magnetyzacji wzdłuż rdzenia i otoczki przemieszczają się dwie (lub więcej) fale przemagnesowania z prędkościami odpowiednio v_{mw} i v_{mz} przy czym:

$$v_{mw} \sim (H - H_0)^2 \quad A \rightarrow B, C \quad (17)$$

$$v_{mz} \sim (H - H_0) \quad A \rightarrow C \quad (18)$$

Z tego powodu:

$$v_{mw} > v_{mz} \quad (19)$$

Po przemagnesowaniu rdzenia strumień Φ , objęty powierzchnią drutu, zmaleje do wartości Φ_A w części, przez której otoczkę fala przemagnesowania jeszcze nie przeszła. Po całkowitym przemagnesowaniu otoczki strumień Φ zmieni kierunek na przeciwny i zwiększy się od zera do wartości $\Phi_C = \Phi_A$. Podczas przemagnesowania $A \rightarrow B \rightarrow C$ modułu symetrycznego indukują się w cewce dwa impulsy napięcia: $e_{A \rightarrow B}$ i $e_{B \rightarrow C}$, z których pierwszy jest silniejszy (z uwagi na relację (19)). Przemagnesowanie $C \rightarrow D \rightarrow A$ przebiega w takiej samej kolejności, lecz pod wpływem pola zewnętrznego przeciwnie skierowanego. Podczas tego przemagnesowania w cewce wyindukują się dwa impulsy o przeciwnej polaryzacji, ale równe co do wartości odpowiednio:

$$e_C \rightarrow D = e_A \rightarrow B$$

(20)

$$e_D \rightarrow A = e_B \rightarrow C$$

Efekt Wieganda, występujący w drutach ferromagnetycznych o strukturze krystalicznej, można uzyskać również w drutach amorficznych o dodatnim współczynniku magnetostrykcji stosując identyczną technologię obróbki. Z dostępnej literatury nie wynika jednak, czy takie próby zostały podjęte.

2. Właściwości bistabilnych materiałów magnetycznych

Magnetostrykcyjne magnetyki amorficzne używane do budowy różnych przetworników pomiarowych odznaczają się bardzo dobrymi właściwościami fizycznymi. Mogą pracować w temperaturze od -100°C do wartości nieco niższej niż temperatura Curie T_c . Są odporne na trudne warunki eksploatacyjne ze względu na wybitną plastyczność idącą w parze z dużą wytrzymałością mechaniczną na ścinanie, rozciąganie, zginanie, ściskanie itp. Charakteryzują się wybitną stabilnością właściwości magnetycznych i mechanicznych. Podczas dwuletniej eksploatacji przetworników prędkości kątowej z drutami amorficznymi firmy UNITIKA nie stwierdzono żadnych zmian parametrów wytwarzanych impulsów napięcia [5, 7, 8].

Porównywalnymi właściwościami użytkowymi odznaczają się moduły Wieganda. Według [13] moduły te pracują niezawodnie w temperaturze $-196...175^{\circ}\text{C}$, wykazując jedynie 10% spadek amplitudy impulsów napięciowych przy skrajnych wartościach podanego zakresu temperatury.

Przetworniki zbudowane z ferromagnetyków bistabilnych wytwarzają impulsy napięciowe o amplitudzie tylko w niewielkim stopniu zależnej od częstotliwości przemagnesowywania. Impulsy te w praktyce nie wymagają przetwarzania, a w przypadku modułów Wieganda nie muszą być wzmacniane.

Liczne doświadczenia z bistabilnymi magnetykami pozwalają stwierdzić, że amplituda i kształt impulsów oraz częstotliwość maksymalna z jaką te impulsy mogą być wytwarzane, zależy głównie od prędkości v_m fali przemagnesowania (ruchu domen). Z kolei prędkość ta zależy od:

- właściwości struktury domenowej,
- rozkładu naprężeń wewnętrznych, mających zasadniczy wpływ na kształt struktury domenowej,
- rozmiarów elementu bistabilnego,
- właściwości fizycznych materiału ferromagnetycznego,
- rezystywności właściwej mającej wpływ na wartość współczynnika tłumienia ruchu domen β ,
- natężenia pola przemagnesowującego H .

Wymienione czynniki, oprócz ostatniego, można kształtować za pomocą odpowiedniej obróbki technologicznej materiałów ferromagnetycznych, w skład której wchodzi między innymi:

- procesy wytwarzania stopów ferromagnetycznych,
- procesy szybkiego schładzania stopów w odpowiedniej atmosferze celem uzyskania struktury amorficznej materiału ferromagnetycznego w postaci taśmy lub drutu o żądanych właściwościach fizycznych i chemicznych,
- proces wyżarzania i odpuszczania cieplnego,
- proces wprowadzania naprężeń mechanicznych do struktury materiału celem uzyskania odpowiedniej struktury domenowej.

W trakcie wspomnianej obróbki dąży się do uzyskania:

- maksymalnej wartości H_S (natężenia, przy którym zachodzi wytwarzanie zarodków przemagnesowania),
- minimalnej wartości H_0 (natężenia, przy którym prędkość fali przemagnesowania (ruchu domen) v_m dąży do zera),
- maksymalnej rezystywności właściwej ρ ,
- jak najprostszej struktury domenowej (najkorzystniej dwuwarstwowej).

Porównanie niektórych właściwości impulsów generowanych przez przetworniki położenia i prędkości liniowej i kątowej z różnymi elementami bistabilnymi (tabl. 1.) pozwala stwierdzić, że przetworniki z drutami amorficznymi firmy UNITIKA gwarantują największą precyzję pomiarów, w dodatku w największym zakresie częstotliwości przemagnesowywania. Jest to rezultat uzyskania w tych drutach (tabl. 2.) ostrej granicy między wartościami natężenia pola przemagnesowującego, przy których przemagnesowanie nie nastąpi, a wartością minimalną natężenia, przy którym przemagnesowanie drutu nastąpi ze stuprocentową pewnością. Natężenie $H = 0,079$ Oe (6,32 A/m) nie powoduje przemagnesowania drutu amorficznego, natężenie $H = 0,08$ Oe (6,4 A/m) natomiast powoduje przemagnesowanie w jednym skoku Barkhausena. W przypadku znanych taśm amorficznych granica ta jest szersza, a w przypadku modułów Wieganda różnica między wymienionymi (wartościami natężenia pola przemagnesowującego) dochodzi do kilku Oe (kilkuset A/m).

Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono kształty pętli histerezy drutu amorficznego oraz niesymetrycznego i symetrycznego modułu Wieganda. Porównując obydwa rysunki można wywnioskować, że przetworniki z drutami amorficznymi są przdestynowane do szczególnie dokładnych pomiarów położenia liniowego i kątowego czy przesunięć liniowych i kątowych. Stwierdzenia te są potwierdzone charakterystykami powtarzalności wytwarzania impulsów napięcia na rys. 16, zdefiniowanymi jako zależność między wielkością Δ a natężeniem pola przemagnesowującego H . Wielkość Δ definiuje się wzorem [7]:

$$\Delta = \frac{\tau' - \tau}{\tau} \cdot 100\% \quad (21)$$

gdzie:

- τ' – szerokość obrazu 50 nałożonych na siebie przebiegów impulsów napięcia,
- τ – szerokość pojedynczego impulsu.

Na rysunku 17 porównano dodatkowo kształty impulsów napięciowych generowanych przez przetworniki z elementami bistabilnymi wykonanymi z drutu amorficznego, z taśmy amorficznej i symetrycznego modułu Wieganda.

Istotny wpływ na właściwości niektórych materiałów magnetycznych wywiera rozkład naprężeń mechanicznych w ich strukturze oraz wartości tych naprężeń. Na rys. 18 przedstawiono zależność natężenia H_S (minimalną, przy której następuje przemagnesowanie) od liczby skręceń z_{tw} na jednostce długości elementu dla różnych taśm amorficznych i drutu amorficznego.

Z kolei na rys. 19 porównano charakterystyki magnesowania wybranej taśmy amorficznej i drutu Wieganda. Porównanie pozwala stwierdzić, że taśmy amorficzne są znacznie lepszymi elementami bistabilnymi niż druty Wieganda i mogą mieć szerokie zastosowanie nie tylko w technice pomiarowej, lecz także w elektronice przy budowie zasilaczy stabilizowanych, transformatorów impulsowych, stabilizowanych źródeł napięcia zmiennego i prądu zmiennego itp.

3. Zastosowanie bistabilnych materiałów magnetycznych w technice pomiarowej

3.1. Informacje wstępne

Bistabilne materiały magnetyczne, w których występują zjawiska Barkhausena, Matteucciego i Wieganda, są stosowane w coraz szerszym zakresie w technice pomiarowej. Wykorzystuje się je do budowy między innymi przetworników:

- położenia liniowego i kąтового,
- przesunięć liniowych i przemieszczeń kątowych elementów wirujących,
- prędkości liniowej i kątowej,
- przyspieszeń liniowych i kątowych,
- siły,
- ciśnienia,
- naprężeń mechanicznych,
- momentu zginającego,
- statycznego momentu skręcającego,
- momentu obrotowego,
- prądu i napięcia,
- częstotliwości sygnałów elektrycznych.

W niniejszym punkcie omówiono zastosowania bistabilnych materiałów magnetycznych w przetwornikach niektórych tylko spośród wymienionych wielkości pomiarowych.

3.2. Pomiary wielkości charakteryzujących położenie i ruch elementów mechanicznych

Cechą charakterystyczną wszystkich przetworników z bistabilnymi elementami magnetycznymi mierzących położenie, przesunięcie, prędkość i przyspieszenie liniowe lub kątowe elementów mechanicznych wykonujących ruch postępowy lub obrotowy jest to, że generują one sygnały napięciowe jedynie podczas przemagnesowywania bistabilnych elementów magnetycznych za pomocą pola magnetycznego wytwarzanego bądź przez cewkę, przez którą przepływa prąd zmienny, bądź przez pary magnesów o odwróconych wzajemnie biegunach, bądź przez wirujący magnes. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych tych przetworników przedstawiono na rys. 20 — 28³⁾.

Pomiary wielkości charakteryzujących położenie i ruch kontrolowanych elementów oparte są na prostych zależnościach zestawionych w tablicy 3 i 4. W tych samych tablicach zawarte są uwagi o rozdzielczości, dokładności i zakresach pomiarowych.

Do pomiaru prędkości kątowej elementów wirujących niektórych urządzeń, w których przepływ czynnika roboczego ma charakter pulsacyjny o częstotliwości pulsacji proporcjonalnej do prędkości kątowej, można wykorzystać bezpośrednio detektor zmian naprężeń mechanicznych w formie taśmy amorficznej o silnej magnetostrykcji, nawiniętej na przewody z czynnikiem roboczym. Wzrost ciśnienia czynnika, powodując rozszerzenie przewodu, a tym samym rozciągnięcie taśmy, wywołuje wygenerowanie w materiale taśmy osi łatwego magnesowania (silnej anizotropii jednokierunkowej) i skokową zmianę reluktancji magnetycznej. Zmianę tę wykrywa się za pomocą cewki otaczającej taśmę lub nawiniętej bezpośrednio na nią samą i zasilanej prądem zmiennym.

Przemieszczenia liniowe kontrolowanych elementów można mierzyć również w sposób analogowy za pomocą przetworników używanych do pomiaru siły (omówionych w p. 3.3.). Charakterystykę przetwarzania tych przetworników, stanowiącą zależność między amplitudą wytwarzanych impulsów a długością rozciąganej spirali z taśmy amorficznej, przedstawiono na rys. 29

3) Zasadę działania poszczególnych przetworników objaśniono przy rysunkach 20-28.

3.3. Pomiary siły i momentu obrotowego

Do pomiaru siły można wykorzystać spiralnie skręconą taśmę amorficzną, w której występuje silny efekt Barkhausena i efekt Matteucciego. Model domenowy taśmy przedstawiono na rys. 8. Taśmę tę można nawinąć na izolowany przewód, przez który przepływa w kierunku z prąd zmienny o częstotliwości f , wytwarzający pole kołowe o natężeniu H_{ϕ} , lub na pręt z materiału izolacyjnego. Taśmę, która rozciągana lub ściskana wydłuża się lub skraca wzdłuż osi z , przemagnesowuje się albo polem zewnętrznym o natężeniu H_z zgodnym z kierunkiem z , albo polem kołowym o natężeniu H_{ϕ} . Podczas przemagnesowywania na końcach taśmy pojawiają się impulsy napięcia, których amplitudę można obliczyć ze wzoru (10), przy czym wartość H należy obliczyć ze wzoru:

- w przypadku przemagnesowywania polem o natężeniu H_z [6, 9]:

$$H = \frac{p}{\sqrt{2} \pi D} H_z \quad (22)$$

- w przypadku przemagnesowywania polem o natężeniu H_{ϕ} [6, 9]:

$$H = \sqrt{[1 - (p/\pi D)^2] / 2} H_{\phi} \quad (23)$$

We wzorach tych oznaczono przez:

- p — skok zwojowy spirali,
- D — średnicę spirali.

Na rysunku 30 przedstawiono charakterystykę zależności naprężeń σ w taśmie spiralnej o składzie stopu Fe80B20 od względnego wydłużenia taśmy δ natomiast na rys. 31 przedstawiono charakterystykę amplitudy generowanych impulsów napięcia e w funkcji wydłużenia bezwzględnego l taśmy. Uwzględniając te charakterystyki oraz wymiary taśmy użytej w przetworniku siły, można otrzymać charakterystykę przetwarzania odwzorowującą zależność między siłą a amplitudą impulsów. Na przebieg charakterystyki przetwornika siły wpływa:

- częstotliwość f i natężenie H pola przemagnesowującego,
- częstotliwość f_1 i natężenie I prądu w przewodzie izolowanym, od którego zależy natężenie okrężnego pola przemagnesowującego H_{ϕ} ,
- natężenie składowej stałej prądu I w przewodzie izolowanym, która powoduje, że amplituda impulsów o przeciwnej polaryzacji nie jest jednakowa,
- częstotliwość f_c prądu zmiennego przepuszczanego przez samą taśmę, której zwiększanie w zakresie 1...10 kHz powoduje znaczne (nawet dwukrotne) zwiększenie wytwarzanych impulsów napięcia.

Przetworniki momentu obrotowego z bistabilnymi elementami magnetycznymi mierzą bezpośrednio wartość kąta φ skręcenia dwóch wyodrębnionych przekrojów poprzecznych wału względem siebie, lub pośrednio kąta α określającego skręcenie linii prostych tworzących powierzchnię wału (równoległych do osi wału, gdy ten nie jest obciążony momentem obrotowym) względem osi wału. W zakresie liniowych odkształceń sprężystych między momentem obrotowym M a kątami φ i α zachodzą zależności:

$$\varphi = \text{const} \cdot M \quad (24)$$

$$\alpha = \arccos \frac{1}{l} \sqrt{l^2 - r^2 \varphi^2}; \varphi - z \quad (24)$$

gdzie:

- l — długość wału lub odległość między wyodrębnionymi przekrojami wału,
- r — promień wału.

Zależność (24) jest liniowa, natomiast zależność (25) jest nieliniowa.

Przetwornik momentu obrotowego opisany w [16] (rys. 32), którego działanie oparte jest na zależności (24), zawiera dwa moduły Wieganda przemagnesowywane za pomocą odpowiadających im dwóch par magnesów trwałych przeciwnie zorientowanych lub tarcz z materiałów magnetycznych namagnesowanych w taki sposób, że bieguny N — S są równomiernie rozmieszczone na obwodzie tarcz i wzajemnie odwrócone.

Podczas obrotów wału oba moduły generują ciągi impulsów napięcia e_1 i e_2 , które:

- występują jednocześnie, gdy moment obrotowy $M = 0$,
- występują niejednocześnie, gdy $M \neq 0$.

Impulsy te są przetwarzane na impulsy prostokątne o stałej amplitudzie U_{1m} i U_{2m} oraz podawane na wejścia przerzutnika RSQ. Na wyjściu Q, przerzutnika pojawiają się impulsy o stałej amplitudzie U_{0m} i o szerokości równej czasowi t_0 upływającemu między chwilą pojawienia się impulsu e_1 a chwilą pojawienia się impulsu e_2 .

Kąt φ oblicza się z zależności:

$$\varphi = \frac{t_0}{T} 2\pi = \frac{t_0}{T} \cdot \frac{2\pi}{m} \quad (26)$$

gdzie:

- T — okres obrotu wału lub okres powtarzania impulsów e_1 i e_2 ,
- m — liczba par biegunów magnetycznych jednakowo zorientowanych.

Znając charakterystykę zależności (24) dla konkretnego wału można określić wartość momentu obrotowego M.

Dokładność pomiaru momentu obrotowego za pomocą tej metody zależy od:

- odległości l rozmieszczenia modułów Wieganda,
- dokładności i równomierności rozmieszczenia magnesów lub par biegunów,
- powtarzalności generowania impulsów e_1 i e_2 ,
- dokładności pomiaru czasu t_0 .

W przetworniku momentu obrotowego opisanym w [17, 18] wykorzystuje się jeden element Wieganda (rys. 33) umieszczony na wale w taki sposób, żeby jego oś główna była równoległa do osi wału. Element ten jest przemagnesowywany za pomocą dwóch magnesów trwałych przeciwnie zorientowanych względem siebie.

Zasadę działania przetwornika ilustruje rys. 34. Pod wpływem przyłożonego momentu obrotowego M następuje skrócenie wału o kąt φ na odcinku l (długości elementu Wieganda) i przekręcenie osi elementu Wieganda względem osi wału o kąt α (po linii śrubowej). Jeśli element Wieganda zacznie przemieszczać się w polu o natężeniu H wytwarzanym przez magnes dolny, ulegnie on przemagnesowaniu i w cewce umieszczonej obok tego magnesu zaindukuje się napięcie e o kształcie jak na rys. 34b.

Impuls o kształcie 1 powstaje podczas obrotów wału nieobciążonego, impuls o kształcie 2 natomiast

powstaje podczas obrotów wału obciążonego momentem obrotowym. Impuls 1 jest w porównaniu z impulsem 2 węższy i ma większą amplitudę. Wynika to z zależności prędkości fali przemagnesowania v_m od różnicy wartości natężenia pola przemagnesowującego H i wartości H_0 (przy której $v_m \rightarrow 0$). Jeśli wał zostanie skręcony o kąt φ , element Wieganda obróci się o kąt α względem swojego położenia spoczynkowego, a zatem będzie się przemagnesowywać pod wpływem pola o mniejszym natężeniu równym $H \cos \alpha$.

Zmniejszenie się prędkości v_m ($v_m = f(H \cos \alpha - H_0)$) spowoduje w rezultacie zmniejszenie amplitudy impulsu napięciowego i jego rozszerzenie, z uwagi na dłuższy czas przemagnesowywania elementu Wieganda.

W przetworniku tym wykorzystuje się pomiar szerokości impulsów na wysokości odpowiadającej napięciu odniesienia U_w i określanej czasem t_0 .

Jeśli znana jest zależność:

$$t_0 = f(\alpha) \quad (27)$$

oraz dla konkretnego wału zależność:

$$M = f(t_0/T) \quad (28)$$

gdzie:

T — okres obrotu wału,

to za pomocą pomiaru czasu t_0 da się określić wartość momentu obrotowego M .

Charakterystyka przetwarzania przetwornika jest nieliniowa z uwagi na:

- nieliniowość zależności (25),
- nieliniowość zależności (27),
- nieliniowość zależności (28).

W przetworniku opisanym w [17, 18] przewidziano układ linearyzujący.

Dokładność pomiarów zależy między innymi od:

- dokładności, z jaką jest określona charakterystyka (27) i (28),
- dokładności pomiaru czasu t_0 i okresu T ,
- dokładności wykrywania wartości progowej napięcia U_w ,
- powtarzalności wytwarzanych impulsów napięciowych.

Ogólnie trzeba stwierdzić, że dokładność ta będzie mniejsza, niż w przypadku przetwornika opisanego w [16].

3.4. Pomiary prądu i częstotliwości

Do pomiaru natężenia prądu zmiennego można wykorzystać spiralę z taśmy amorficznej, w której występuje zjawisko Matteucciego. Spiralę taką należy nawinąć na izolowany przewód z prądem (rys. 35). Przy pomiarze trzeba uwzględnić dwa przypadki istotne z punktu widzenia działania przetwornika:

- gdy prąd w przewodzie wytwarza słabe pole kołowe, które nie powoduje przemagnesowania spirali,
- gdy prąd wytwarza pole kołowe przemagnesowujące spiralę.

W pierwszym przypadku do przemagnesowania spirali niezbędne jest zewnętrzne pole przemagnesowujące o natężeniu H_z . Przemagnesowanie następuje pod wpływem pola wypadkowego o natężeniu H równym:

$$H = \frac{p}{\sqrt{2} \pi D} H_z + \sqrt{|1 - (p/\pi D)^2|} / 2 H_\varphi; \quad H > H_s \quad (29)$$

gdzie:

p — skok zwojowy spirali z taśmy amorficznej,

D — średnica spirali.

Amplituda impulsów wytwarzanych w spirali zależy nieliniowo od natężenia pola kołowego H_φ , przy czym między H_φ a prądem I w przewodzie zachodzi doświadczalnie stwierdzona zależność [9]:

$$H = I/250d \quad (30)$$

gdzie

d — średnica przewodu z prądem.

Czułość przetwornika można zwiększyć, zasilając taśmę prądem zmiennym o częstotliwości f_c rzędu 1...10 kHz, podobnie zresztą jak w przypadku przetwornika siły i przemieszczenia liniowego opisanego w p. 3.3. W drugim przypadku pole zewnętrzne nie jest potrzebne. Przemagnesowywanie taśmy następuje pod wpływem zmian kołowego pola o natężeniu H_φ .

Charakterystykę przetwarzania dla tego przypadku przedstawiono na rys. 35b. Przetwornik taki można wykorzystać jednocześnie do pomiaru częstotliwości prądu zmiennego, pod warunkiem, że prąd ten jest na tyle duży, aby przemagnesowywać spiralę. Elementy magnetyczne bistabilne mogą być wykorzystane do pomiaru częstotliwości prądu lub napięcia w układach zawierających cewki toroidalne, solenoidy, obwody magnetyczne itp., na zasadzie detekcji zmian strumienia magnetycznego.

4. Zakończenie

Zastosowanie bistabilnych elementów magnetycznych w przetwornikach wielkości mechanicznych i niektórych wielkości elektrycznych otwiera nowe możliwości rozwoju techniki pomiarowej. Przetworniki takie są prostsze w budowie od dotychczas stosowanych i mogą pracować w znacznie trudniejszych warunkach eksploatacyjnych. W przypadku pomiaru niektórych parametrów ruchu, takich jak liniowe i kątowne położenie, przesunięcie, liniowa i kątowna prędkość, z uwagi na charakter wytwarzanych impulsów napięciowych, w tym dużą powtarzalność oraz małą zależność amplitudy i kształtu od częstotliwości generowania, przetworniki takie są predystynowane do pracy w mikroprocesorowych systemach pomiarowych. Sygnały wytwarzane przez te przetworniki nie wymagają dodatkowego przetwarzania, są stosunkowo silne i wyraźnie odróżniają się od tła szumów i zakłóceń. Również przetworniki momentu obrotowego zasługują na uwagę z powodu szczególnej prostoty działania (nie wymagają zasilania energią elektryczną) i łatwości wykonywania pomiaru, zwłaszcza przetwornik zaproponowany w [16], który umożliwia jednoczesne zmierzenie momentu obrotowego, prędkości kątownej, mocy i natychmiastową identyfikację kierunku obrotu wału.

Przetworniki prądu zmiennego mogą być wykorzystane w urządzeniach technicznych zasilanych energią elektryczną jako elementy układów zabezpieczających przed przeciążeniami i układów regulacyjnych.

Literatura







- [1] Kaczkowski Z.: Właściwości piezomagnetyczne magnetostrykcyjnych szkieł metalicznych. Elektronika 4/1984.
- [2] Lisowski B.: Właściwości magnetyczne metalicznych szkieł amorficznych. Magnetyki amorficzne. Instytut Fizyki PAN 1983.
- [3] Encyklopedia fizyki. Warszawa WNT 1972.
- [4] Szczeniowski S.: Fizyka doświadczalna. Warszawa PWN 1972.
- [5] Large Barkhausen effect and Matteucci effect in amorphous magnetostrictive wires for pulse generator elements. IEEE Transactions on Magnetics. vol MAG-21 5/1985. [aut.: Mohri K., Humphrey F.B., Kawasaki J., Kinoshita F.].
- [6] Kwiatkowski W., Konopa J., Tumański S.: Zastosowanie metalicznych taśm amorficznych w przetwornikach wielkości nieelektrycznych. Elektronika 4/1984.
- [7] Jitter-less pulse generator elements using amorphous bistable wires. IEEE Transactions on Magnetics. vol MAG-21 5/1985. [aut.: Mohri K., Humphrey F.B., Yamasaki J., Okamura K.].
- [8] Mohri K., Takeuchi S.: Sensitive bistable magnetic sensor using twisted amorphous magnetostrictive ribbons due to Matteucci effect. Journal Applications of Physics. 11/1982.
- [9] Mohri K., Shirotsugi T.: Pulse-output type magnetic sensor using plastically helical amorphous ribbons. INTERMAG 1983.
- [10] Wiegand J.R.: Bistable magnetic device. US Patent nr 3.820.090.
- [11] Sinko J.M.: Simple sensor that need no power. Machine Design 26 April 1979.
- [12] Marks J.D., Sinko J.M.: The Wiegand effect and its automotive applications. SAE 780208.
- [13] Wiegand effect: a new pulse generating option. Automotive Engineering 2/1978.
- [14] Normann N. von , Kuers G.: Neue inkrementale Linear- und Drehgeber mit Wiegand-Sensoren. VDI-Bericht nr 509/1984.
- [15] Wiegand-effect encoded system (sensor engineering co. an Echlin company). Technical Bulletin nr 102 March/1979.
- [16] Nakane T., Mohri K.: Torque sensor assembly. US Patent nr 4.453.420.
- [17] Barkhoudarian S.: Method and apparatus for measuring torque. US Patent nr 4.416.161.
- [18] Barkhoudarian S.: Lightweight torque meter and torque-measuring method. US Patent nr 4.523.482.
- [19] Forkel W.: Device for detecting the speed of rotation and/or angle of rotation of a shaft. GB Patent nr 2157002A.

Właściwości wybranych elementów bistabilnych

Materiał		Źródło	Wartość A $\frac{m/s \cdot O_e}{(m^2/s \cdot A)}$	Zakres v_m m/s	Wartość H_s Oe (A/m)	Wartość ρ $\mu\Omega m$	Temperatura Curie °C	Indukcja nasycenia T
Nazwa	Skład							
Taśma amorficzna	Fe ₈₀ B ₂₀	[8]	720 (9)	do 350	0,9 (72) przy $z_{tw} = 0,4$	134		3,1
Drut amorficzny	Fe ₈₁ Si ₄ B ₁₄ C ₁	[7]		do 350	0,08 (64) przy $z_{tw} = 0,4$	120	485	
Drut amorficzny	Fe _{77,5} S _{7,5} Bi ₅	[5]	1800 (22,5)	do 350	0,08 (64) przy $z_{tw} = 0,4$	120	485	
Moduł Wieganda	Fe ₃₈ V ₁₀ Co ₅₂	[13]						1,4 ... 3,2
Taśma amorficzna	Fe ₈₁ B _{13,5} Si _{3,5} C ₂	[1]				130	370	1,6 ... 1,7

Tablica 2

Niektóre właściwości użytkowe elementów bistabilnych

Element	Skład stopu	Źródło	Kształt impulsu	Rząd amplitudy impulsu	Zakres częstotliwości pracy	Powtarzalność Δ
Taśma amorficzna	Fe ₈₀ B ₂₀	[8]		$10 \cdot 10^{-3}$	0 ... 20 kHz	średnia
Taśma amorficzna	Fe ₈₁ B _{13,5} Si _{3,5} C ₂	[1]		$10 \cdot 10^{-3}$	0 ... 20	średnia
Drut amorficzny	Fe ₈₁ Si ₄ B ₁₄ C ₁	[7]		$10 \cdot 10^{-3}$	0 ... 50	dobra
Drut amorficzny	Fe _{77,5} S _{7,5} B ₁₅	[5]		$10 \cdot 10^{-3}$	0 ... 50	dobra
Moduł Wieganda	niesymetryczny stop Vicalloy	[13] [7]		1	do 10	słaba
	symetryczny stop Vicalloy	[13] [7]		1	do 5	słaba

Zestawienie zależności wykorzystywanych w pomiarach położenia i ruchu elementów mechanicznych przemieszczających się liniowo

Wielkość mierzona		Zależność	Objaśnienia	Uwagi
Nazwa	Oznaczenie			
1	2	3	4	5
Położenie liniowe względem wyszczególnionego punktu odniesienia	l	$l = i \cdot \Delta_l$ $i = 0, 1, \dots, m$ $l \leq L$ $L = m \Delta_l$	Δ_l — determinuje rozdzielczość pomiaru; dokładność pomiaru zależy od: dokładności rozmieszczenia elementów podziałki, powtarzalności generowanych impulsów, dokładności i powtarzalności wykonania elementów podziałki.	Δ_l — odstęp między kolejnymi elementami podziałki (otworów, występów, magnesów, bistabilnych elementów magnetycznych itp.), i — liczba zliczonych impulsów m — liczba elementów podziałki L — zakres pomiarowy.
Przesunięcie liniowe względem dowolnego punktu	l	$l = i \Delta_l$ $i \leq L$ $i \leq m$ $l = \Delta_l (i_k - i_p)$ $k, p \leq m$	Pomiar bezwzględnej wartości przesunięcia. Uwagi o rozdzielczości i dokładności jak wyżej. Pomiar wartości przesunięcia z określeniem kierunku (możliwy do wykonania, gdy sygnały z bistabilnych elementów magnetycznych podziałki są dostarczane do różnych wejść pomiarowych systemu pomiarowego, lub są identyfikowane w inny sposób.). Uwagi o rozdzielczości i dokładności jak wyżej.	k, p — liczby porządkowe wyróżnionych elementów podziałki (impulsów) wyznaczających początek i koniec przesunięcia

Tablica 3. Ciąg dalszy

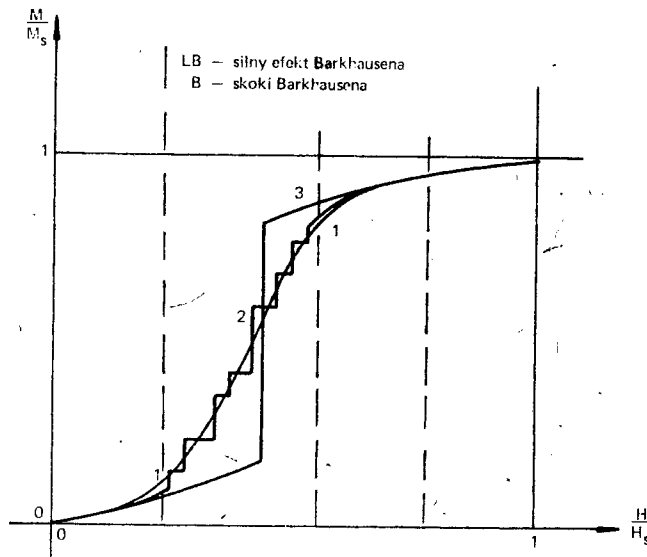
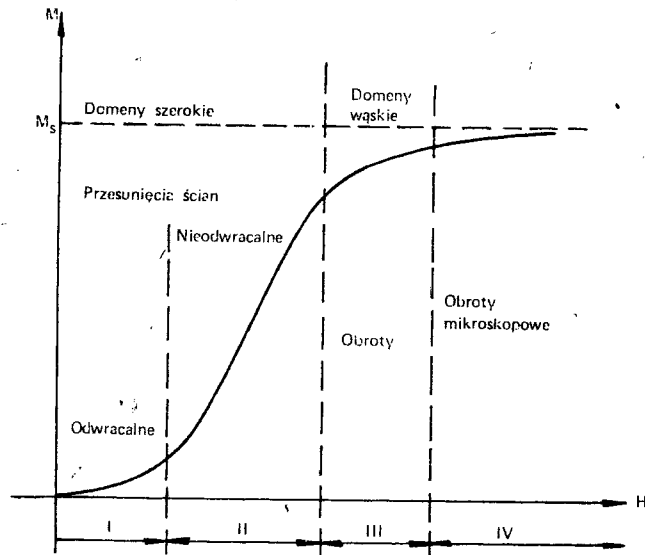
1	2	3	4	5
Prędkość liniowa,	v	$v = \Delta l \cdot f$ $v = \Delta l / T$ $v \leq v_{\max}$ $v_{\max} = \Delta l \cdot f_g$ $T_g = f_g^{-1}$	<p>Dokładność pomiaru zależy od czynników wymienionych wyżej i od dokładności pomiaru czasu T lub częstotliwości f oraz od gęstości rozmieszczenia elementów podziałki.</p> <p>Zakres pomiaru zależy od częstotliwości f_g i gęstości rozmieszczenia elementów podziałki.</p>	<p>f — częstotliwość generowanych impulsów,</p> <p>T — okres generowanych impulsów,</p> <p>f_g — maksymalna częstotliwość prze magnesowywania bistabilnych elementów magnetycznych.</p>
Przyspieszenie liniowe	a	$a \approx \Delta v / \Delta t$ $a \approx \frac{\Delta l / T_i - \Delta l / T_{i-1}}{T_i}$ $T_i = t_i - t_{i-1}$ $T_{i-1} = t_{i-1} - t_{i-2}$ Warunki wykonania pomiaru: $T_i, T_{i-1} \geq T_g$	<p>Dokładność pomiaru zależy od czynników wymienionych wyżej. Zakres pomiaru zależy od rozdzielczości i założonej dokładności pomiaru i jest implikowany częstotliwością f_g.</p>	<p>i, i-1, i-2 — liczby porządkowe kolejnych trzech impulsów.</p>

Zestawienie zależności wykorzystywanych w pomiarach położenia i ruchu elementów wirujących

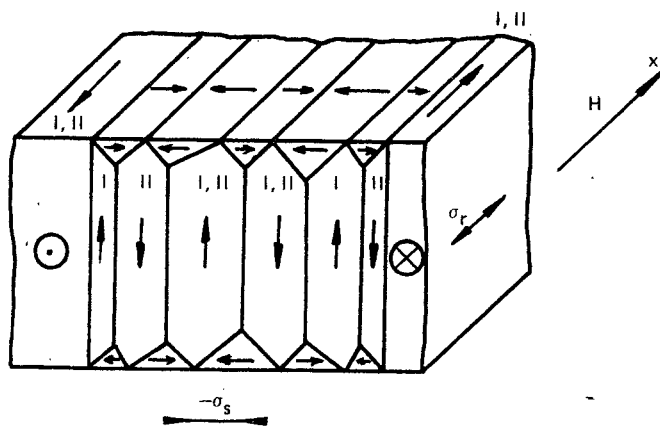
Wielkość mierzona		Zależność	Objaśnienia	Uwagi
Nazwa	Oznaczenie			
1	2	3	4	5
Położenie katowe względem wyszczególnionego położenia odniesienia	Ω	$\Omega = \Delta_k \cdot i$ $2\pi = \Delta_k \cdot m$ Zakres pomiaru nieograniczony	Δ_k — determinuje rozdzielczość pomiaru. Dokładność pomiaru jest zdeterminowana przez dokładność rozmieszczenia elementów podziałości, powtarzalność generowanych impulsów i powtarzalność wykonania elementów podziałości oraz gęstość ich rozmieszczenia.	Δ_k — odstęp katowy między kolejnymi elementami podziałości (otworami, występami, magnesami itp.), m — liczba zliczonych podziałości na obwodzie elementu wirującego.
Przemieszczenie katowe obrót względem dowolnego położenia	$\Delta\Omega$	$\Delta\Omega = i \cdot \Delta_k$ Zakres pomiaru nieograniczony	Pomiar bezwzględnej wartości kąta obrotu. Uwagi o rozdzielczości i dokładności jak wyżej.	k, p — liczby porządkowe wyróżnionych elementów podziałości (impulsów) wyznaczających początek i koniec przesunięcia.
		$\Delta\Omega = \Delta_k (l_k - l_p)$ $k, p \leq m$ Zakres pomiaru nieograniczony	Pomiar kąta z określeniem kierunku obrotu (możliwy do wykonania przy spełnieniu takich samych warunków jak w przypadku pomiaru Δl w tabl. 3.). Uwagi o rozdzielczości i dokładności jak wyżej.	

Tablica 4. Ciąg dalszy

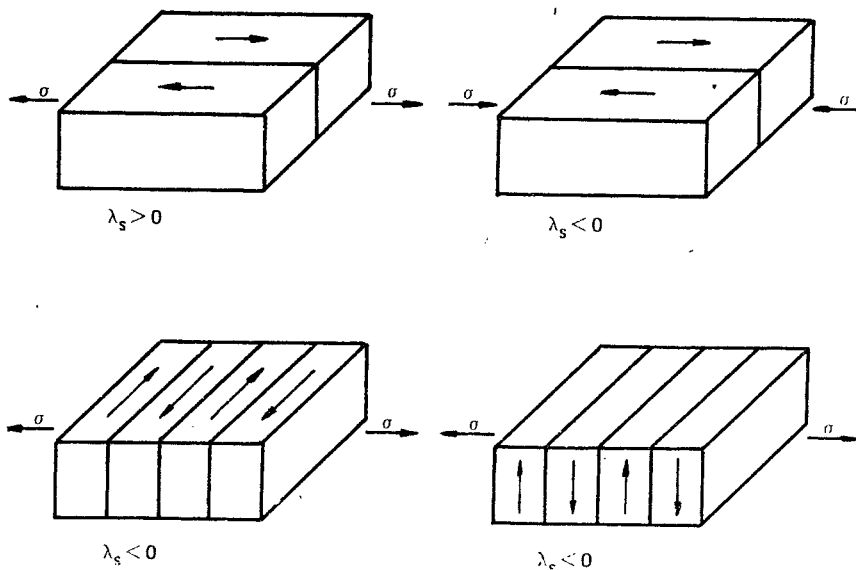
1	2	3	4	5
Prędkość kątowna	ω	$\omega = 2\pi f/m$ $\omega = 2\pi/mT$ $\omega \leq \omega_{\max}$ $\omega_{\max} = 2\pi f_g/m$ $\omega_{\max} = 2\pi/mT_g$ $T_g = f_g^{-1}$	Dokładność pomiaru zależy od czynników wymienionych wyżej i od dokładności pomiaru czasu T lub częstotliwości f oraz od gęstości rozmieszczenia elementów podziałki. Zakres pomiaru zależy od gęstości rozmieszczenia elementów podziałki i od częstotliwości f_g .	f – częstotliwość generowanych impulsów, T – okres generowanych impulsów, f_g – maksymalna częstotliwość przemagnesowywania elementów bistabilnych.
Przyspieszenie kątowne		$\epsilon \approx \Delta\omega/\Delta t$ $\epsilon \approx \frac{\Delta k}{T_i - T_{i-1}}$ $\epsilon \approx \frac{T_i}{T_i}$ $T_i = t_i - t_{i-1}$ $T_{i-1} = t_{i-1} - t_{i-2}$ <p>Warunki wykonania pomiaru: $T_i, T_{i-1} \gg T_g$</p>	Dokładność pomiaru zależy od czynników wymienionych wcześniej. Zakres pomiaru zależy od rozdzielczości i od założonej dokładności pomiaru oraz jest implikowany częstotliwością f_g .	i, i-1, i-2 – liczby porządkowe kolejnych impulsów.



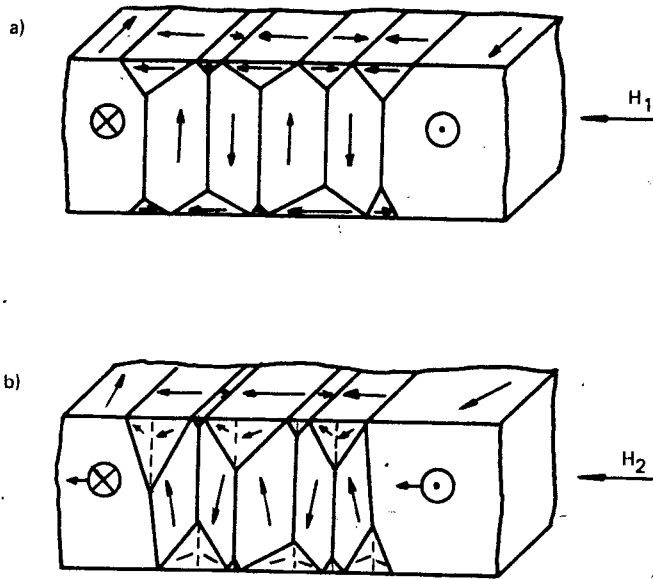
Rys. 1. a) Pierwotna krzywa magnesowania materiałów ferromagnetycznych, b) pierwotne krzywe magnesowania magnetostrykcyjnych materiałów ferromagnetycznych; 1 – krzywa charakterystyczna dla materiałów o znikomej magnetostrykcji; 2 – krzywa charakterystyczna dla materiałów magnetostrykcyjnych, których magnesowanie w obszarze II przebiega skokami Barkhausena; 3 – krzywa charakterystyczna dla magnetycznych materiałów bistabilnych, których magnesowanie w II obszarze zachodzi podczas jednego skoku Barkhausena, po czym materiał jest już praktycznie namagnesowany do nasycenia; B_s – indukcja nasycenia; H_s – natężenie pola magnetycznego powodującego nasycenie materiału magnetycznego.



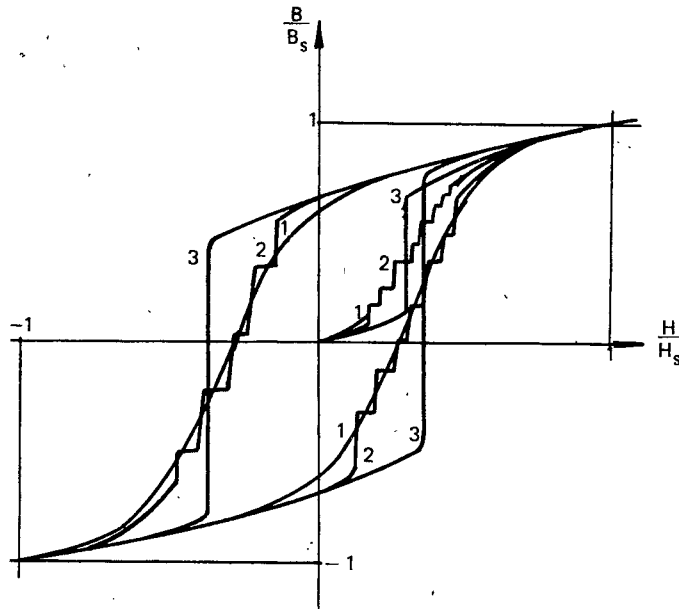
Rys. 2. Struktura domeńowa ferromagnetycznych taśm amorficznych o magnetostrykcji dodatniej [2]: x – oś taśmy; σ_r – naprężenia rozciągające; σ_s – naprężenia ściskające. Strzałkami oznaczono kierunki magnetyzacji domen.



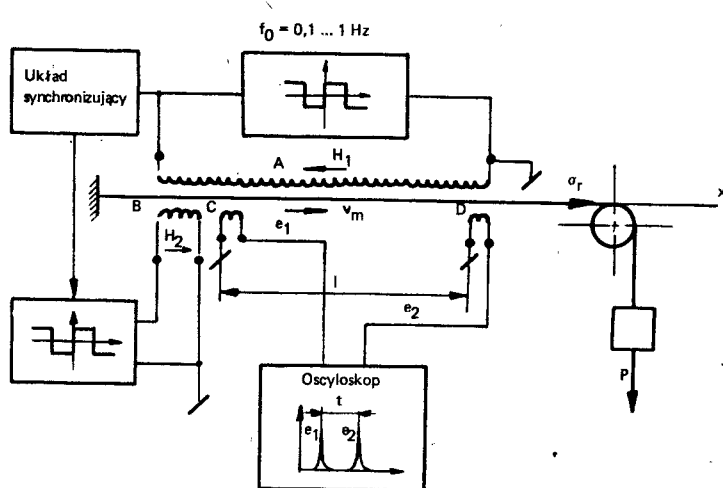
Rys. 3. Kierunki magnetyzacji spontanicznej w ferromagnetycznych taśmach amorficznych [2]: λ_s – współczynnik magnetostrykcji; σ – naprężenia. Strzałkami oznaczono kierunki magnetyzacji domen.



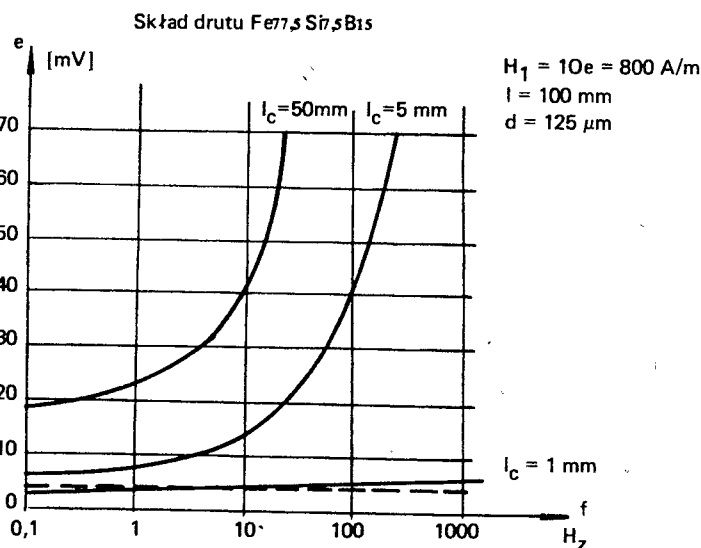
Rys. 4. Proces magnesowania wąskich domen [2]. H – natężenie pola magnesującego, $H_1 < H_2$.



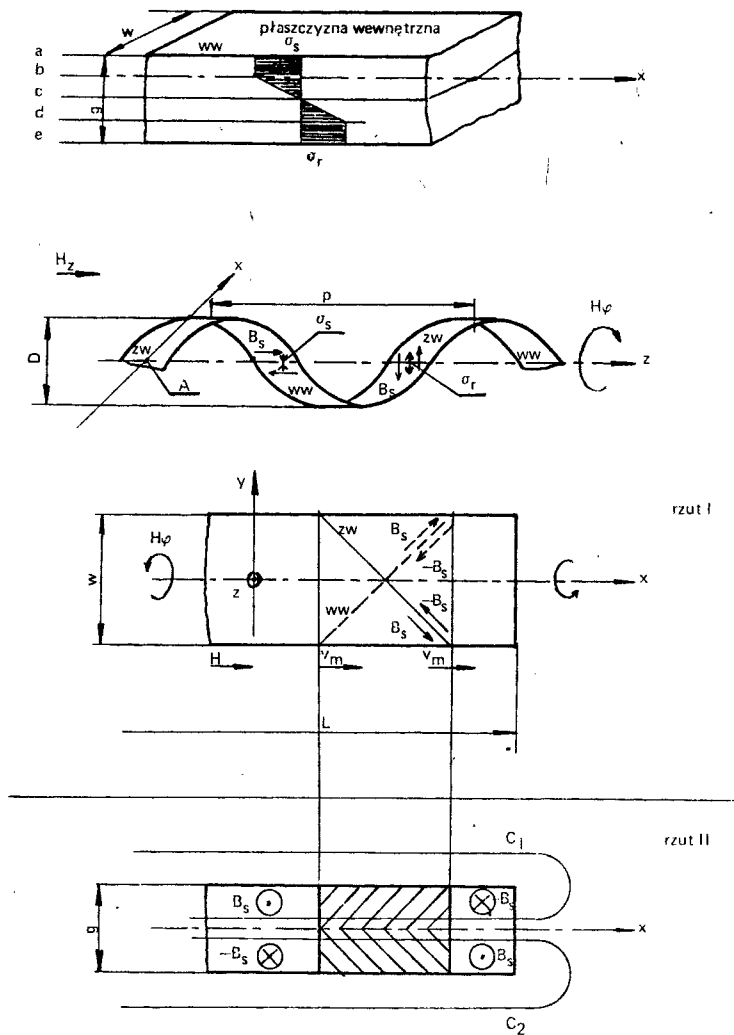
Rys. 5. Pętle histerezy ferromagnetycznych materiałów magnetostrykcyjnych: B – indukcja magnetyczna; B_s – indukcja magnetyczna nasycenia; H – natężenie pola magnetycznego; H_s – natężenie pola magnetycznego powodującego nasycenie materiału; 1 – materiał o znikomej magnetostrykcji; 2 – materiał o dużej magnetostrykcji; 3 – bistabilny materiał ferromagnetyczny.



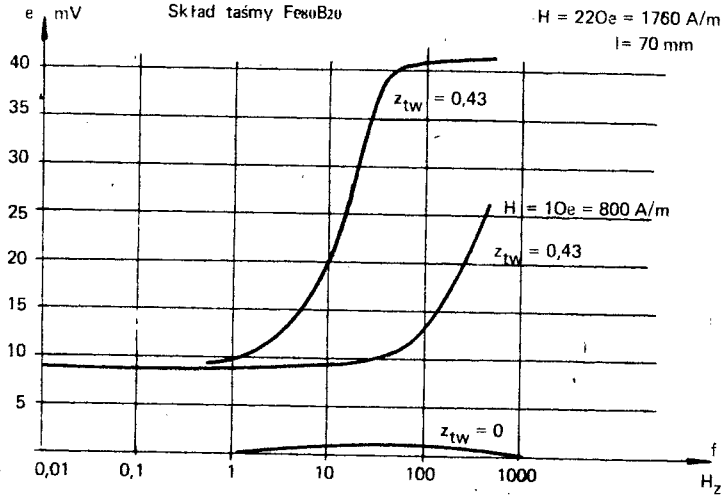
Rys. 6. Schemat układu do badania przebiegu magnesowania ferromagnetyków o anizotropii jednokierunkowej wykorzystywanego w doświadczeniu Sixtusa-Tonksa [3, 5]: A – solenoid wytwarzający pole przemagnesowujące; B – solenoid wytwarzający zarodek przemagnesowania; C, D – solenoidy służące do pomiaru czasu przejścia fali przemagnesowania z punktu C do punktu D; H_1 – natężenie pola wytwarzanego przez solenoid A; H_2 – natężenie pola wytwarzanego przez solenoid B; v_m – prędkość fali przemagnesowania; e_1, e_2 – impulsy napięcia wytwarzane podczas przejścia fali przemagnesowania przez odcinki drutu objęte cewkami odpowiednio C i D; f_0 – częstotliwość przemagnesowywania zmian kierunku wektora H_1 ; P – siła rozciągająca badany drut; σ_r – naprężenie rozciągające.



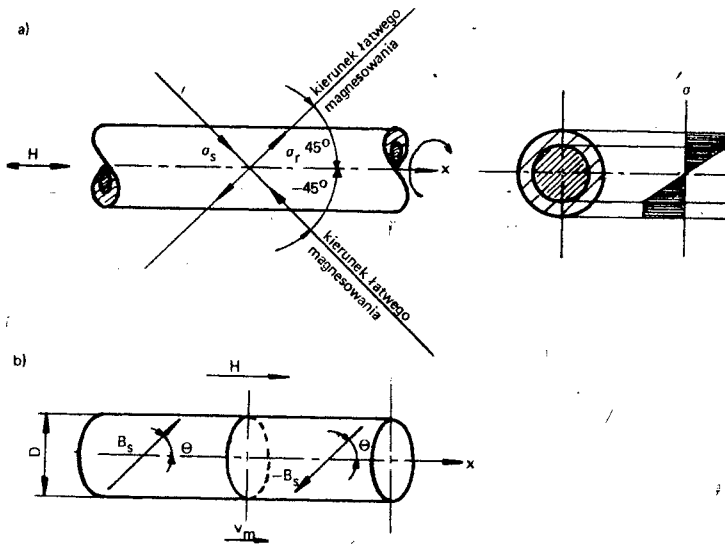
Rys. 7. Wpływ długości cewki l_c i częstotliwości f przemagnesowywania na amplitudę napięcia indukującego się w cewce nawiniętej na rozciągnięty drut amorficzny [5]; H_1 – natężenie pola przemagnesowującego; l – długość drutu amorficznego; d – średnica drutu amorficznego.



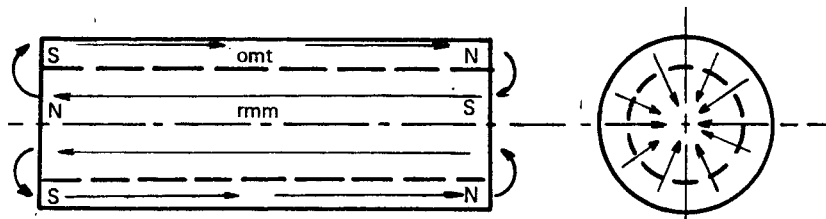
Rys. 8. Model domenowy skręconej i rozciągniętej taśmy amorficznej [8]: a) rozkład naprężeń w przekroju poprzecznym taśmy; b) rozkład naprężeń na powierzchniach taśmy; c) model domenowy taśmy użyty do objaśnienia zjawiska Matteucciego; 1 – kierunki łatwego magnesowania; 2 – drogi całkowania; σ_s – naprężenie ściskające; σ_r – naprężenie rozciągające; ZW – zewnętrzna powierzchnia skręconej taśmy; WW – wewnętrzna powierzchnia skręconej taśmy; B_s – indukcja nasycenia; x – oś taśmy, z – oś skrętki; A – punkt styczności osi x z powierzchnią zewnętrzną taśmy; g – grubość taśmy; w – szerokość taśmy; L – długość taśmy; v_m – prędkość propagacji domen wzdłuż bieżącej osi x ; H – natężenie pola magnetycznego w kierunku osi x ; H_φ – natężenie składowej okrężnej pola magnetycznego; C_1, C_2 – ścieżki całkowania.



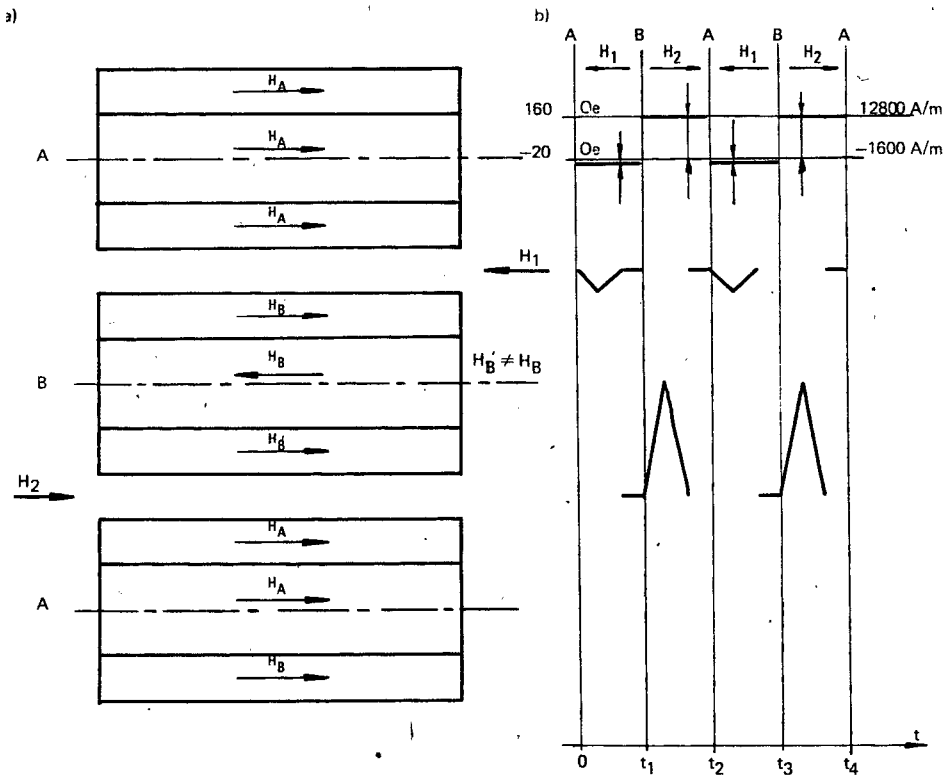
Rys. 9. Wpływ częstotliwości f przemagnesowywania skręconej taśmy amorficznej na amplitudę napięcia indukującego się na jej końcach $[e]$; z_{TW} – liczba zwojów skręconej taśmy przypadająca na 10 mm jej długości; L – długość skrętki; H – natężenie pola przemagnesowującego.



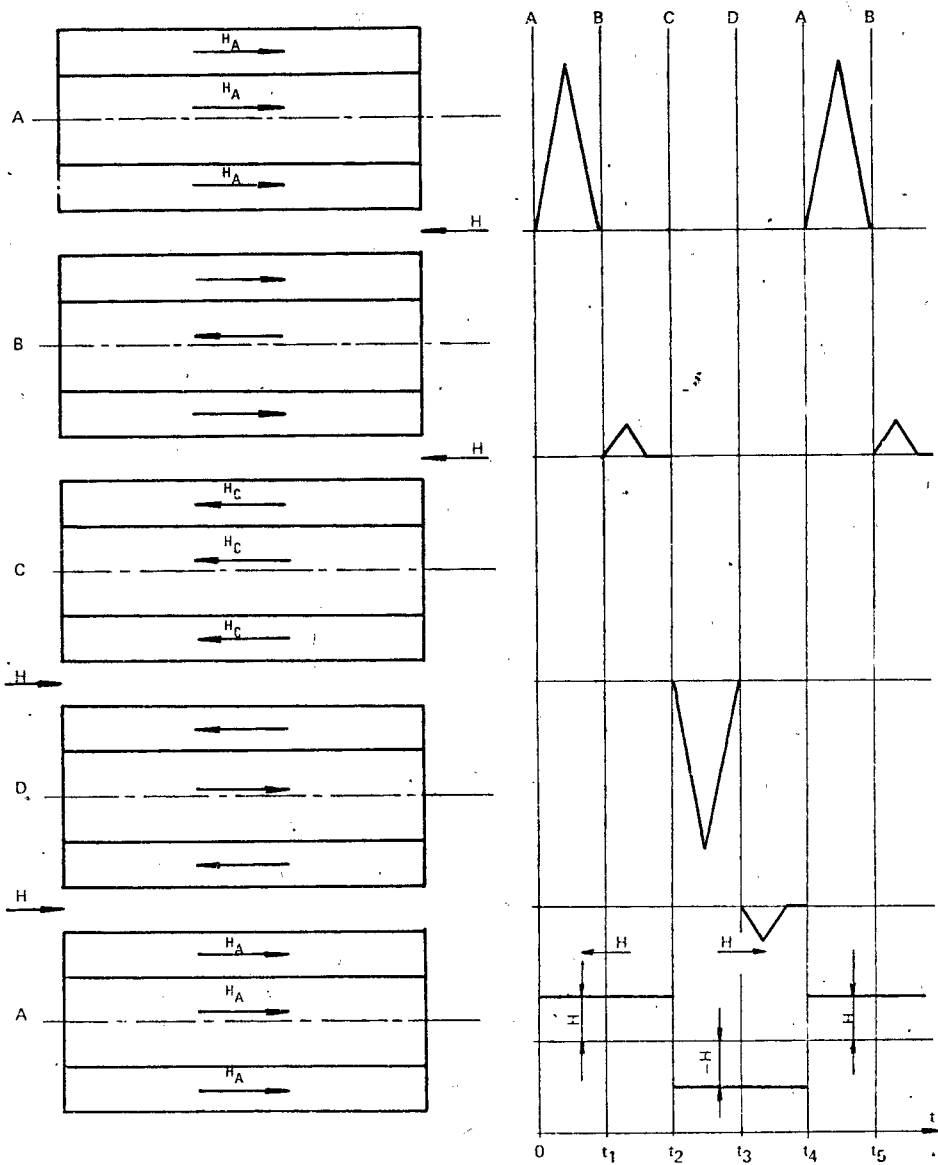
Rys. 10. Zjawisko Barkhausena i Matteucciego w drucie amorficznym [7]: a) rozkład naprężeń mechanicznych; b) model domenowy; θ – kąt między wektorem B_s a osią x drutu amorficznego; B_s – indukcja nasycenia; v_m – prędkość fali przemagnesowania; H – natężenie pola magnetycznego; σ_s – naprężenie ściskające; σ_r – naprężenie rozciągające.



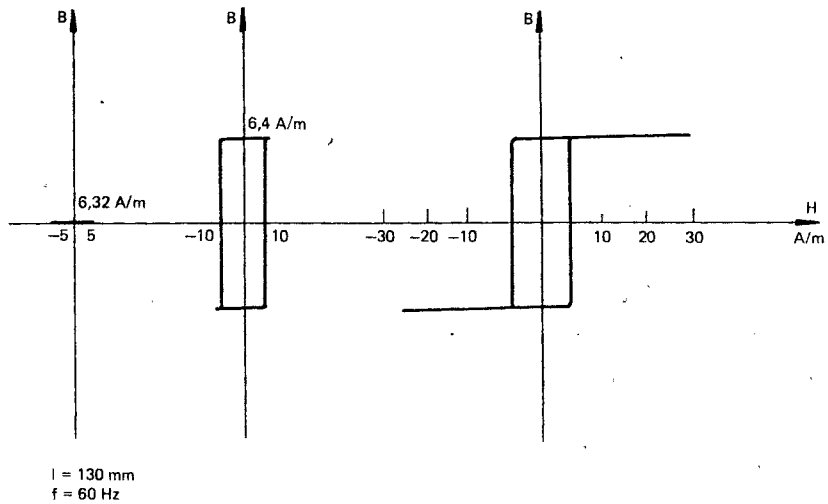
Rys. 11. Model domenowy drutu ferromagnetycznego w module Wieganda [10]: a) model domenowy; b) rozkład naprężeń; omt – otoczka magnetycznie twarda; rmm – rdzeń magnetycznie miękki.
 - - - - granica obszarów magnetycznych otoczki i rdzenia.



Rys. 12. Przebieg generowania impulsów napięcia przez niesymetryczne moduły Wieganda [10, 11]: a) przemagnesowywanie modułu niesymetrycznego; b) generowane impulsy.



Rys. 13. Przebieg generowania impulsów napięcia przez symetryczne moduły Wieganda [10, 11]: a) przemagnesowywanie modułu symetrycznego; b) generowane impulsy.



Rys. 14. Pętla histerezy drutu amorficznego o składzie stopu $\text{Fe}_{81}\text{Si}_{4}\text{B}_{14}\text{C}_1$ przy częstotliwości pola przemagnesowującego 60 Hz [7].

średnica drutu D

natężenie koercji H_C

napężenie maksymalne \max

rezystywność właściwa

temperatura Curie T_C

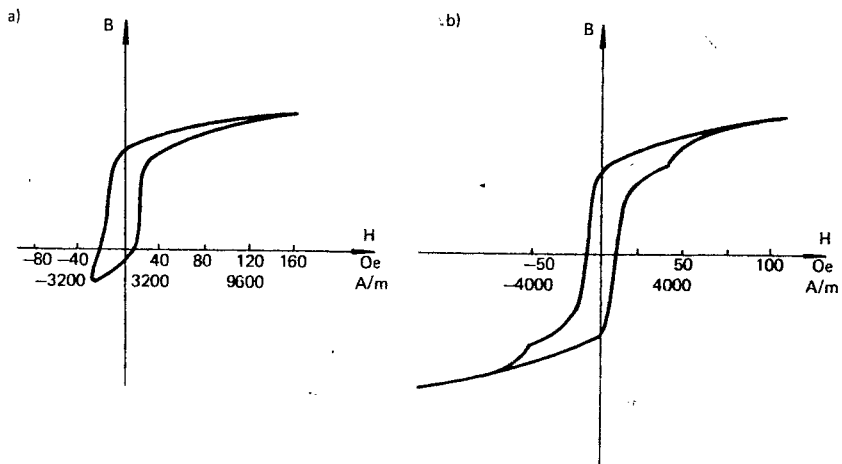
– 128 [μm],

– 16,7 [A/m],

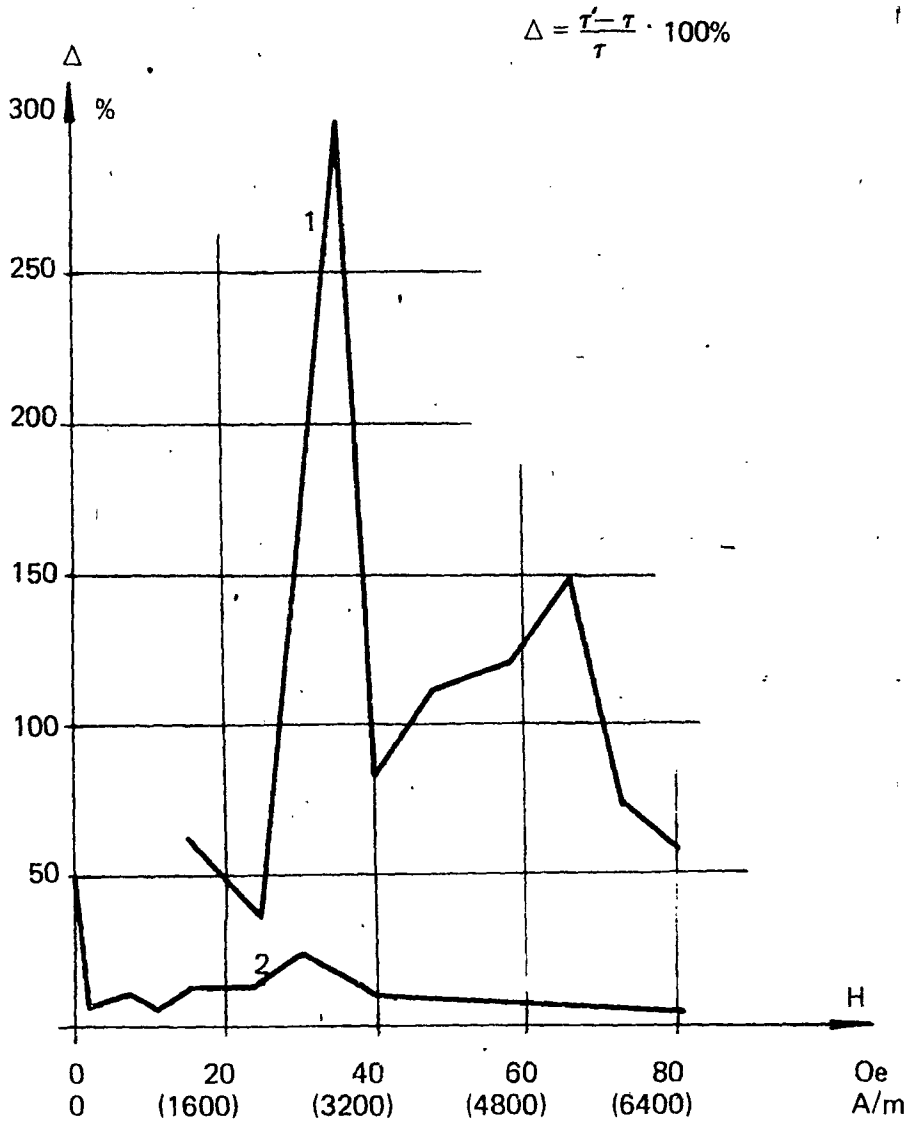
– 310 [kg/mm^2],

– 120 [$\mu\Omega/\text{cm}$],

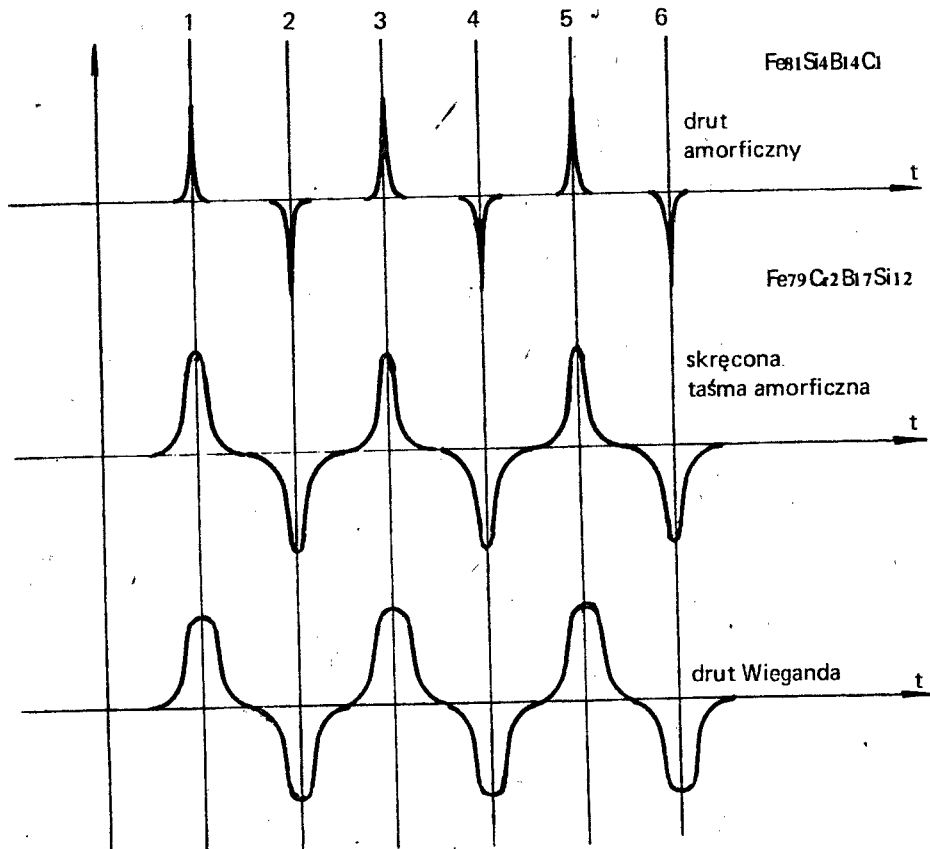
– 485 [$^{\circ}\text{C}$].



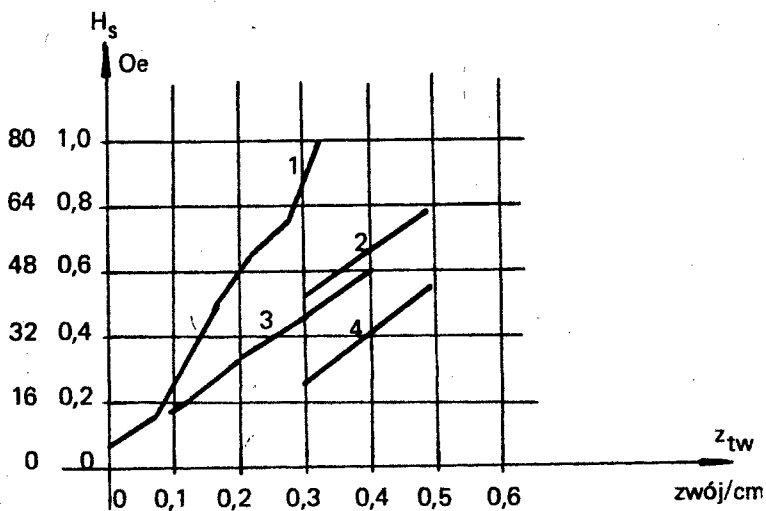
Rys. 15. Kształt pętli histerezy modułów Wieganda [12]: a) moduł niesymetryczny; b) moduł symetryczny.



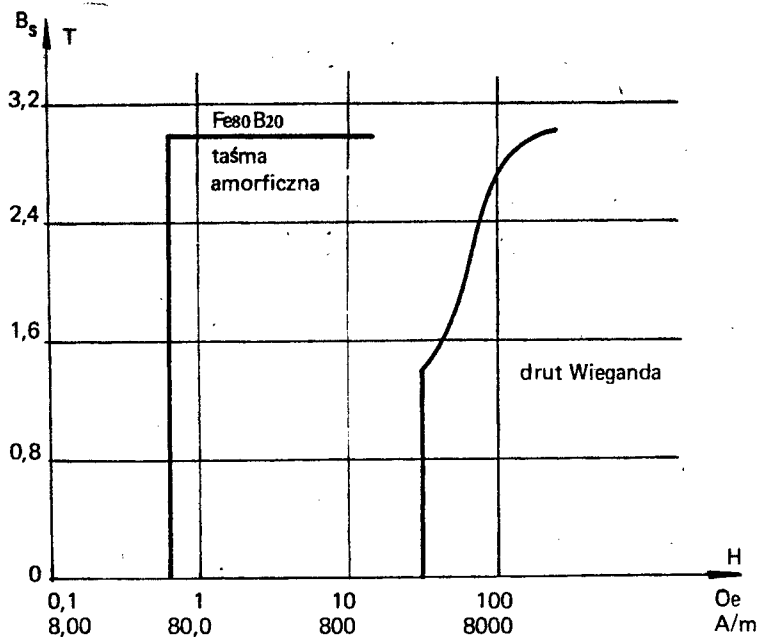
Rys. 16. Porównanie powtarzalności impulsów generowanych przez moduł Wieganda i drut amorficzny ze stopu o składzie $Fe_{81}Si_{4}B_{14}C_1$ [7]: 1 – charakterystyka modułu Wieganda; 2 – charakterystyka drutu amorficznego.



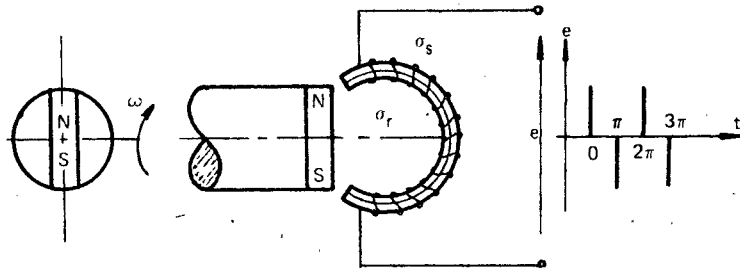
Rys. 17. Porównanie kształtów impulsów generowanych przez przetwornik z drutem amorficznym, skręconą taśmą amorficzną i modułem Wieganda przy częstotliwości przemagnesowywania 2 kHz [7].



Rys. 18. Charakterystyka wpływu liczby skręceń z_{tw} na wartość H_s [7]: 1 – drut amorficzny; 2 – taśma ze stopu o składzie $Fe_{78}Mo_2B_{20}$; 3 – taśma ze stopu $Fe_{75}Cr_7B_{17}Si_2$; 4 – taśma ze stopu o składzie $Fe_{79}Mo_2B_{17}Si_2$.



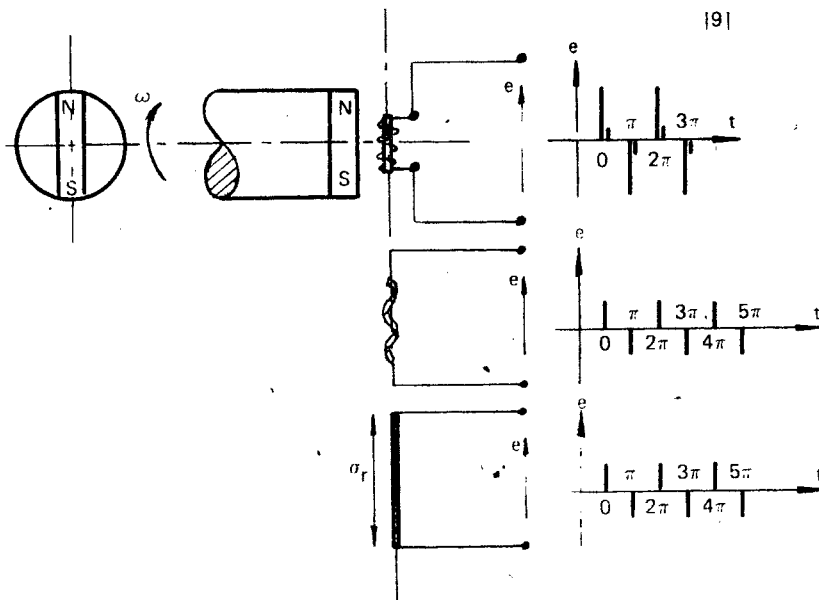
Rys. 19. Charakterystyki magnesowania taśmy amorficznej ze stopu o składzie $Fe_{80}B_{20}$ i modułu Wieganda ze stopu Vicalloy [8].



16

Rys. 20. Przetwornik prędkości kątowej z elementem wykonanym ze sklejonych taśm amorficznych i rozciągniętym w celu wprowadzenia pola naprężeń [6]: σ_s – naprężenia ściskające; σ_r – naprężenia rozciągające.

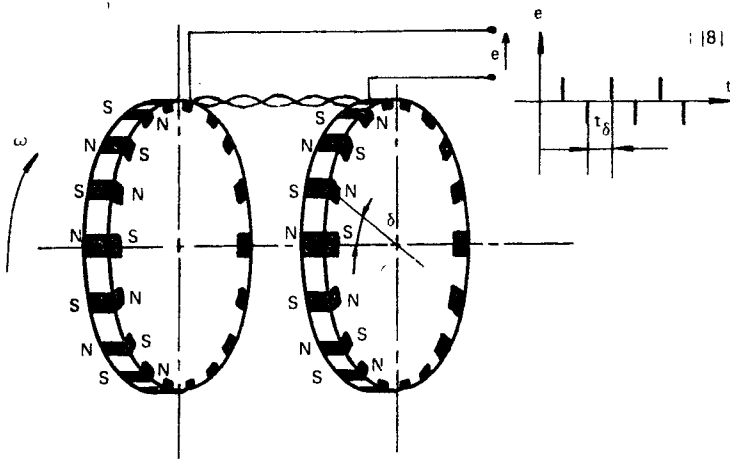
● ● ● Przemagnesowanie bistabilnego elementu magnetycznego przetwornika jest wywoływane przez obracający się magnes, który przymocowano do końca wału. Impulsy napięcia indukują się w cewce nawiniętej na elemencie bistabilnym wskutek przemieszczania się domen w warstwach ściśniętych i rozciągniętych. Dominującym zjawiskiem podczas przemagnesowywania tego elementu jest silny efekt Barkhausena.



191

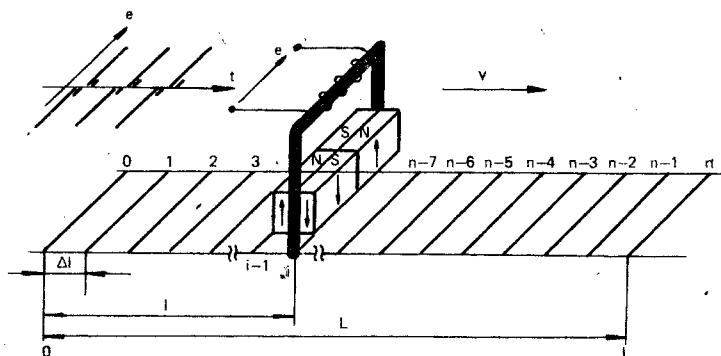
Rys. 21. Przetwornik prędkości kątowej z symetrycznym modułem Wieganda, ze spiralnie skreconą taśmą amorficzną, z drutem amorficznym [6].

● ● ● Przemagnesowywanie bistabilnych elementów magnetycznych przetwornika jest spowodowane przez obracający się magnes, który przymocowano do końca wału. Impulsy napięcia indukują się w cewce nawiniętej na drut Wieganda wskutek przemagnesowywania rdzenia i otoczki (moduł symetryczny), lub w samej taśmie amorficznej skreconej w spiralę i rozciągniętej, bądź w samym drucie amorficznym skreconym. Dominującymi zjawiskami podczas przemagnesowywania elementów bistabilnych są: w przypadku drutu Wieganda zjawisko Barkhausena, w przypadku taśmy i drutu amorficznego zjawisko Matteucciego mające ścisły związek ze zjawiskiem Barkhausena.



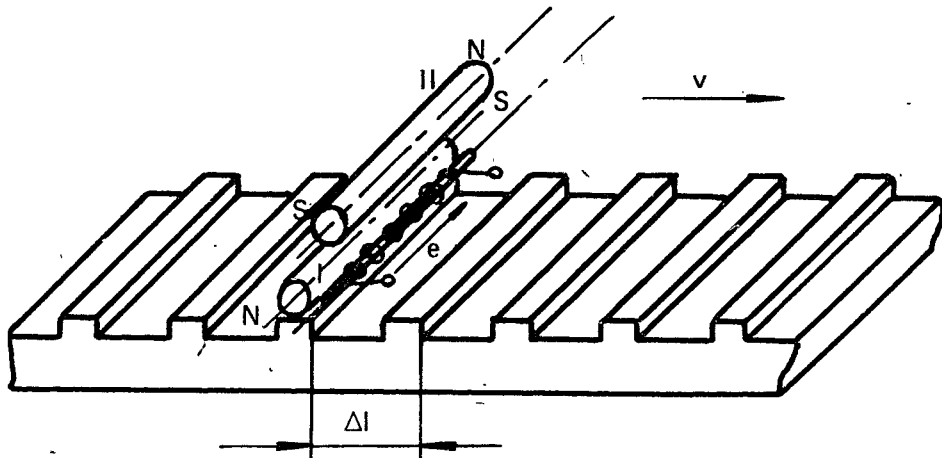
Rys. 22. Przetwornik prędkości kątowej i położenia kątowego ze skróconą spiralnie taśmą amorficzną [8]: ω – prędkość kątowa tarcz; ρ – kąt między kolejnymi magnesami (lub namagnesowanymi obszarami) na obwodzie tarcz; t_δ – czas między kolejnymi impulsami napięcia odpowiadający obrotowi tarcz o kąt δ .

● ● ● Przemagnesowywanie taśmy amorficznej jest dokonywane za pomocą dwóch tarcz sprzężonych mechanicznie, na obwodzie których naniesiono magnesy trwałe (bądź wytworzono obszary namagnesowane) w taki sposób, aby pary biegunów sąsiednich magnesów były odwrotnie zorientowane względem siebie. Dominującym zjawiskiem podczas przemagnesowywania taśmy jest zjawisko Matteucciego. Impulsy napięcia pobiera się z końców taśmy.



Rys. 23. Przetwornik położenia liniowego, przesunięcia liniowego, prędkości liniowej [14]. Symbole użyte na rysunku objaśniono w tablicy 3.

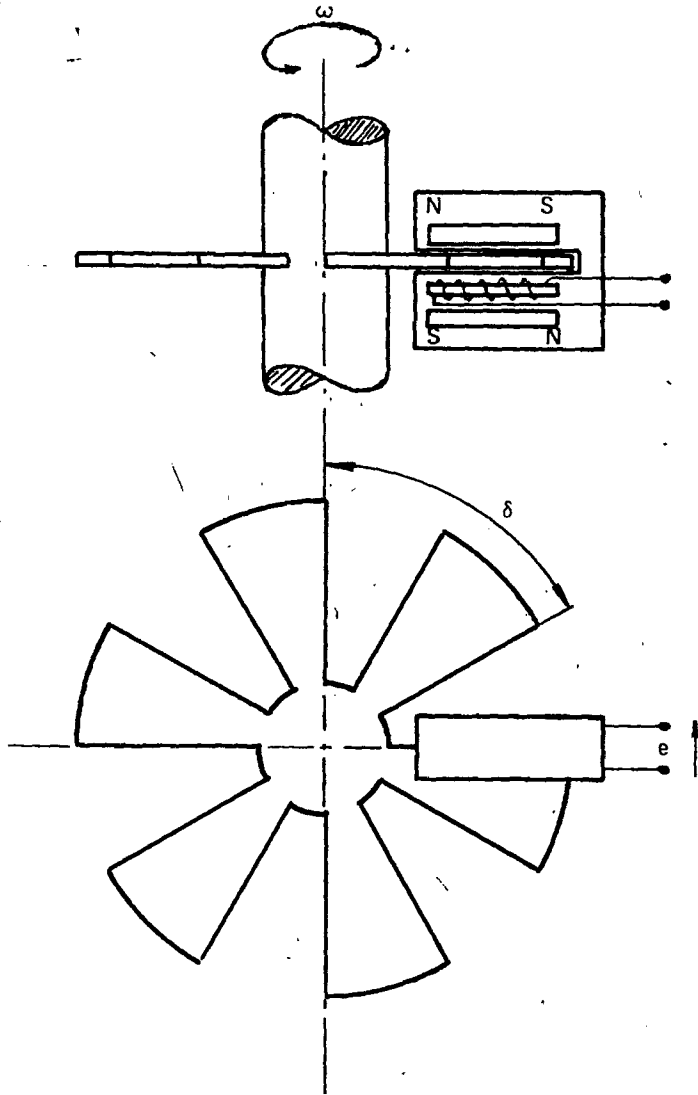
● ● ● Przetwornik składa się z czterech magnesów trwałych ułożonych w pakiet, który jest obejmowany zworą wykonaną z materiału ferromagnetycznego. Środkowa część zwory jest owinięta cewką wykrywającą zmiany strumienia magnetycznego. Końce zwory są umieszczone na poziomej płaszczyźnie, w której rozmieszczono w równych odstępach Δl pojedyncze druty Wieganda. Druty te przemagnesowuje się za pomocą pakietu magnesów trwałych. Podczas ich przemagnesowywania następuje szybkie odwracanie strumienia magnetycznego przepływającego przez zworę i indukowanie się w cewce impulsów napięciowych.



Rys. 24. Przetwornik położenia liniowego, przesunięcia liniowego i prędkości liniowej [15].

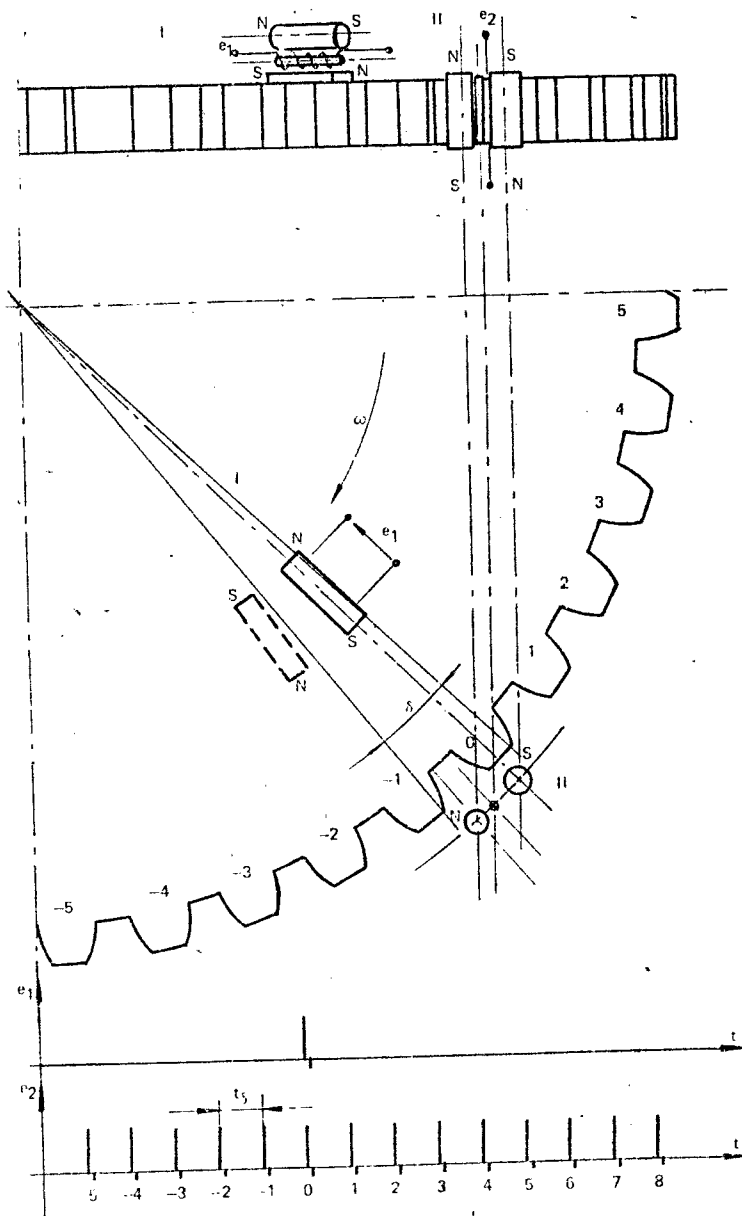
● ● ● Przetwornik składa się z niesymetrycznego modułu Wieganda i dwóch magnesów trwałych o wzajemnie odwróconych biegunach. Przetwornik współpracuje z szyną z materiału magnetycznego, na której powierzchni są naniesione zęby prostokątne. Poszczególne elementy przetwornika są rozmieszczone względem siebie oraz względem szyny z prostokątnymi zębami w taki sposób, aby przemagnesowanie modułu Wieganda następowało wskutek lokalnych zmian rozptywu strumieni magnetycznych wytwarzanych przez magnesy, spowodowanych ruchem przetwornika względem powierzchni listwy, lub ruchem listwy względem przetwornika.

Objaśnienie tego zjawiska jest następujące. Moduł Wieganda jest magnesowany polem wypadkowym wytwarzanym przez obydwa magnesy trwałe. Jeśli magnes dolny, położony bliżej listwy, znajdzie się nad zębem, strumień prądu wytwarzany zacznie przenikać przez materiał zęba i listwy, a zatem składowa natężenia pola w drucie Wieganda wnoszona przez ten magnes zmniejszy się. W rezultacie tego pole magnesujące drut zmieni kierunek na przeciwny, zgodny z kierunkiem pola wytwarzanego przez magnes górny (słabszy od dolnego). Nastąpi przemagnesowanie rdzenia i wygenerowanie słabego impulsu napięciowego (p. 1.2.3.). Kiedy natomiast magnes dolny znajdzie się nad wnęką między zębami listwy, to na skutek zwiększenia się reluktancji drogi magnetycznej magnes – szczeliny powietrzne – materiał listwy, strumień magnetyczny wytwarzany przez ten magnes zacznie wypierać strumień wytwarzany przez górny magnes z drutu Wieganda. Natężenie wypadkowe pola, w którym znajduje się drut Wieganda, zmieni kierunek na przeciwny i zwiększy się, powodując przemagnesowanie rdzenia tego drutu do poprzedniego stanu. W module zostanie wygenerowany silny impuls Wieganda.



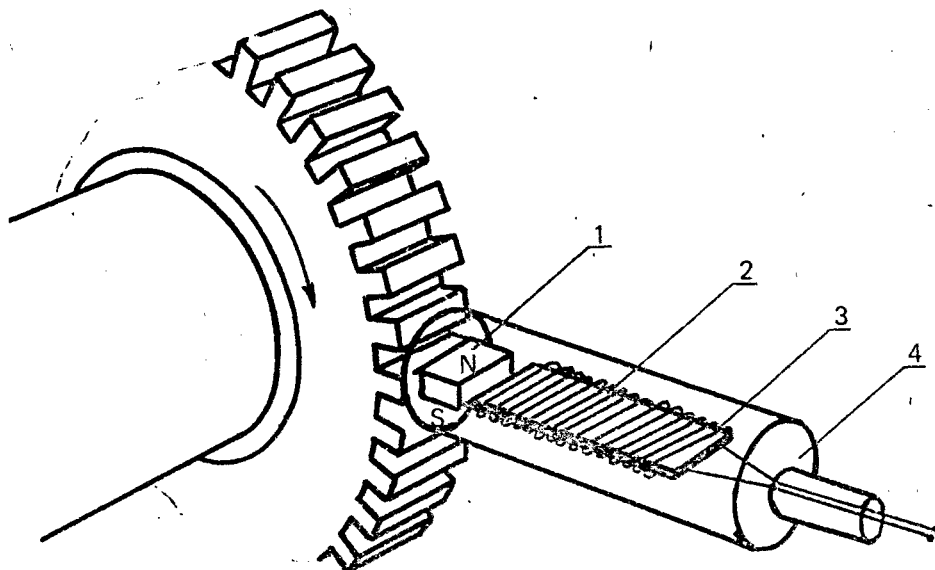
Rys. 25. Przetwornik położenia kątowego i prędkości kątowej wiatka aparatu zapłonowego przeznaczony dla silnika czterosuwowego o sześciu cylindrach [15].

● ● ● Przetwornik składa się z niesymetrycznego modułu Wieganda i dwóch magnesów trwałych: słabego umieszczonego przy module i silnego, oddzielonego od modułu i magnesu słabego tarczą z materiału magnetycznego z wycięciami. Zasada przemagnesowywania modułu jest identyczna jak w przetworniku z rys. 24. Słaby impuls napięciowy powstaje w chwili przejścia między modułem a silnym magnesem występu tarczy, który zwiera strumień magnetyczny wytwarzany przez silny magnes, silny impuls natomiast powstaje w chwili przejścia wycięcia tarczy.



Rys. 26. Przetwornik położenia łątwowego i prędkości kątownej koła zamachowego z niesymetrycznymi modułami Wieganda. I – czujnik charakterystycznego położenia koła zamachowego; II – czujnik położenia kątownego i prędkości kątownej koła zamachowego.

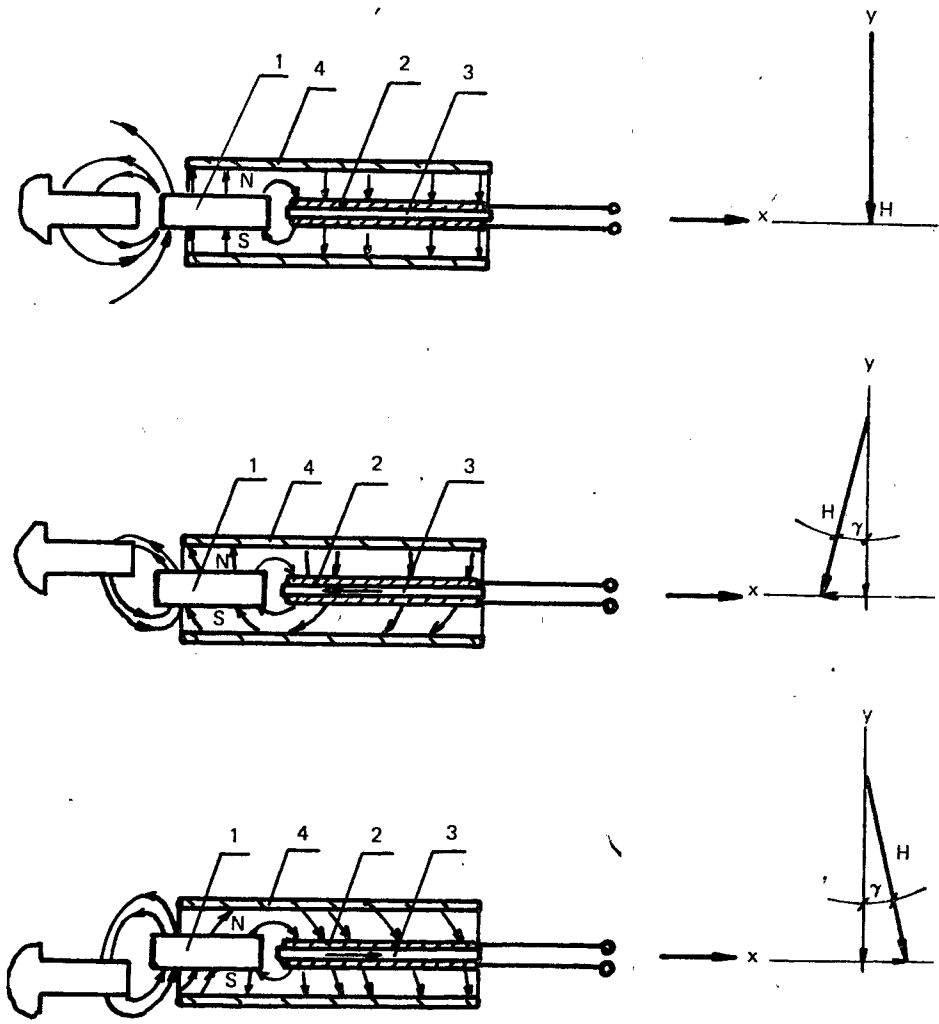
● ● ● Przetwornik działa według identycznej zasady jak przetwornik z rys. 24



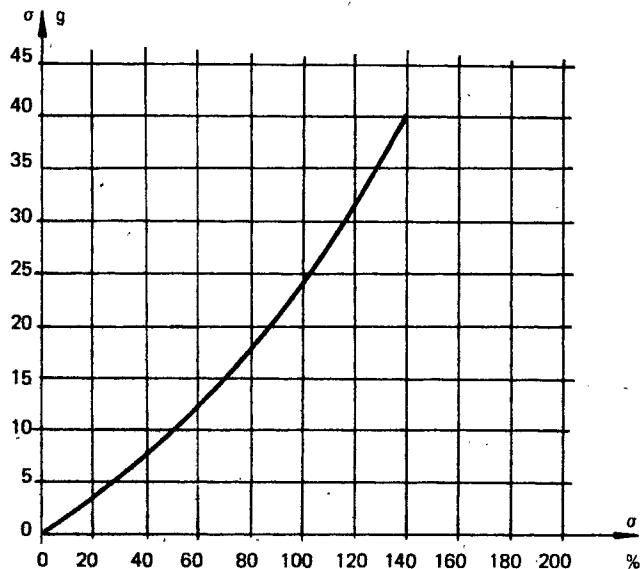
Rys. 27. Przetwornik położenia kąтового i prędkości kątovej koła zamachowego z płaską taśmą amorficzną, wykorzystujący zjawisko Barkhausena (LB-effect) [19]. 1 – magnes trwały; 2 – cewka; 3 – płaska taśma amorficzna; 4 – tuleja z materiału magnetycznego.

● ● ● (opis dotyczy rys. 27 i 28)

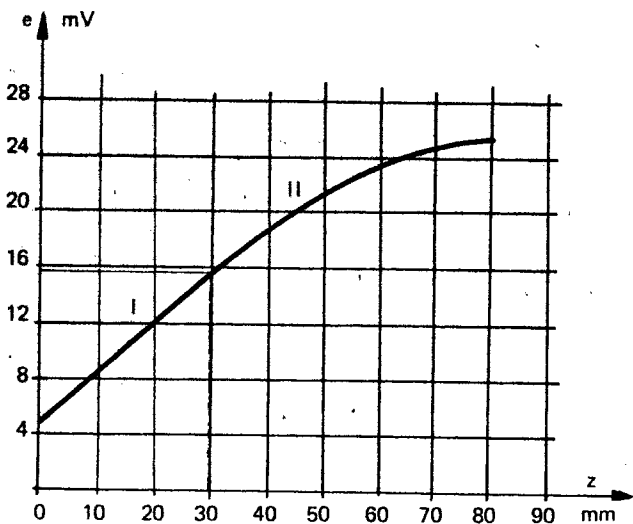
Na obu rys. przetwornik jest zbudowany z następujących elementów: taśmy amorficznej, na którą nawinięto płaską cewkę wykrywającą przemagnesowanie tej taśmy; magnesu trwałego; tulei z materiału magnetycznego obejmującej wymienione wyżej dwa elementy. Przemieszczanie się zębów wieńca zębatego w pobliżu magnesu trwałego powoduje zmianę rozkładu geometrycznego pola magnetycznego przenikającego taśmą amorficzną, jak to pokazano na rys. 28. Wskutek tego składowa H_x natężenia pola magnetycznego zmienia zarówno wartość jak i kierunek, przemagnesowując taśmę. W przetworniku tym należy użyć bardzo silnego magnesu trwałego, który zapewni spełnienie relacji $H_x > H_s$, ponieważ kąt γ między wektorem H a osią y (rys. 28) zmienia się w niewielkim zakresie wokół wartości 0° . W omawianym przetworniku zastosowano magnes samarowo-kobaltowy odznaczający się wybitną gęstością energii magnetycznej (około 4-krotnie większą, niż energia dobrych magnesów z ferrytu strontowego [20]). Dominującym zjawiskiem podczas przemagnesowywania taśmy amorficznej jest zjawisko Barkhausena.



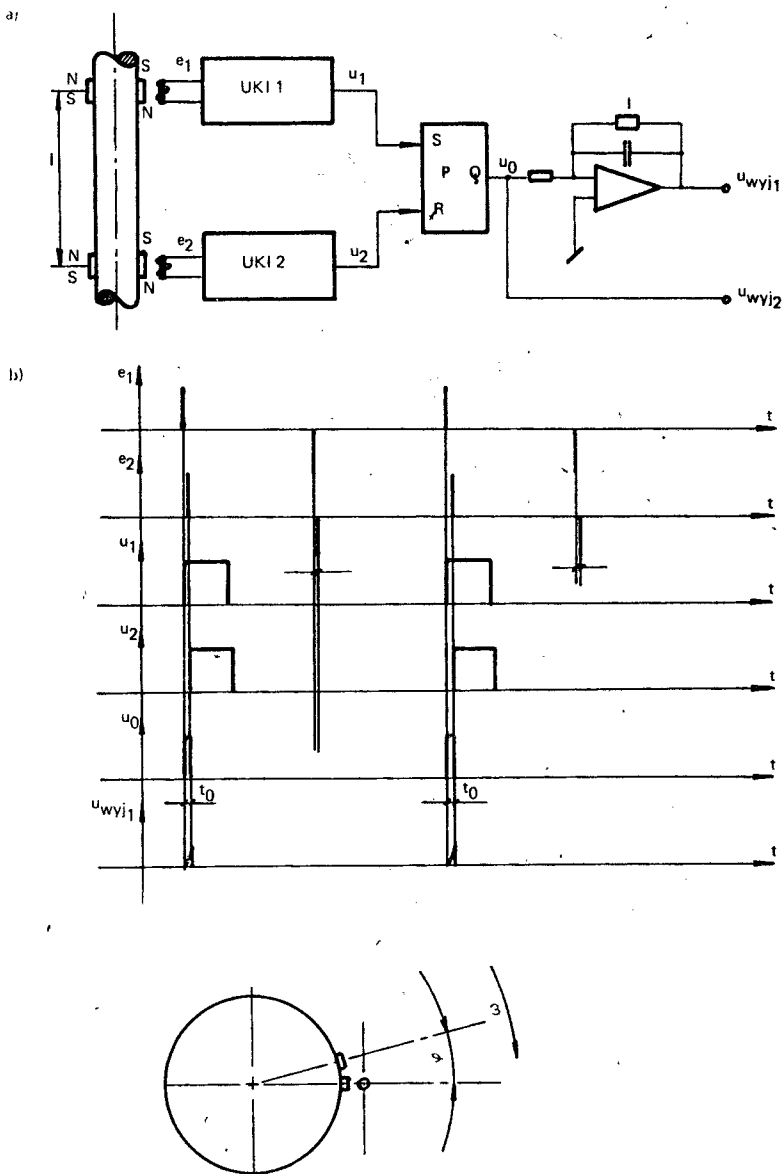
Rys. 28. Zasada działania przetwornika z płaską taśmą amorficzną [19].



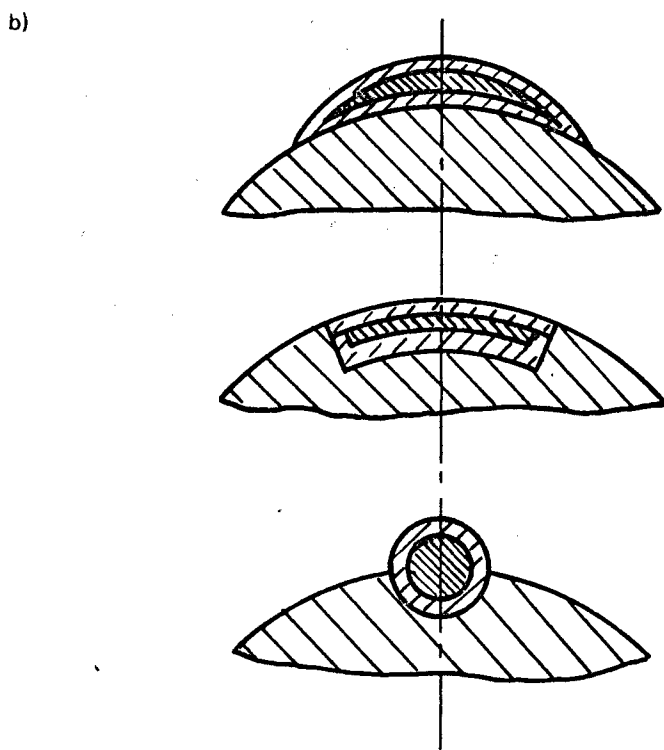
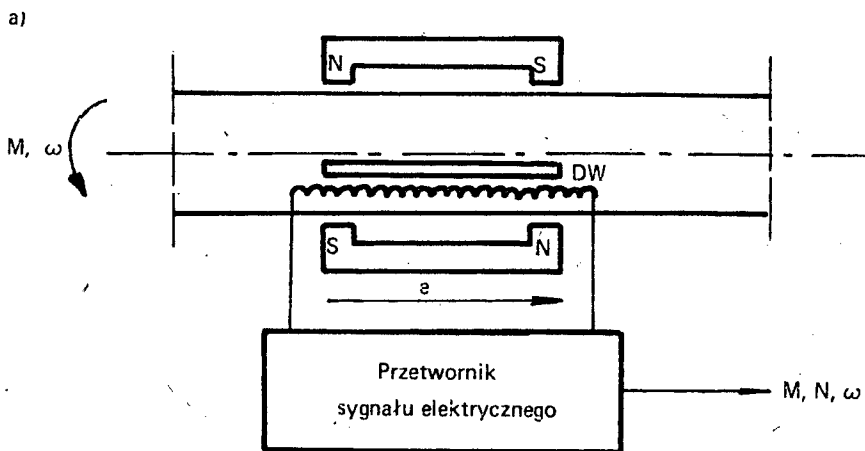
Rys. 29. Charakterystyka sprężystości spirali z taśmy amorficznej [9]; σ – siła w G; δ – względne wydłużenie taśmy, w %; $l_0 = 57$ mm (długość spoczynkowa); $D = 1,5$ mm (średnica); $p = 1,2$ mm (poskok).



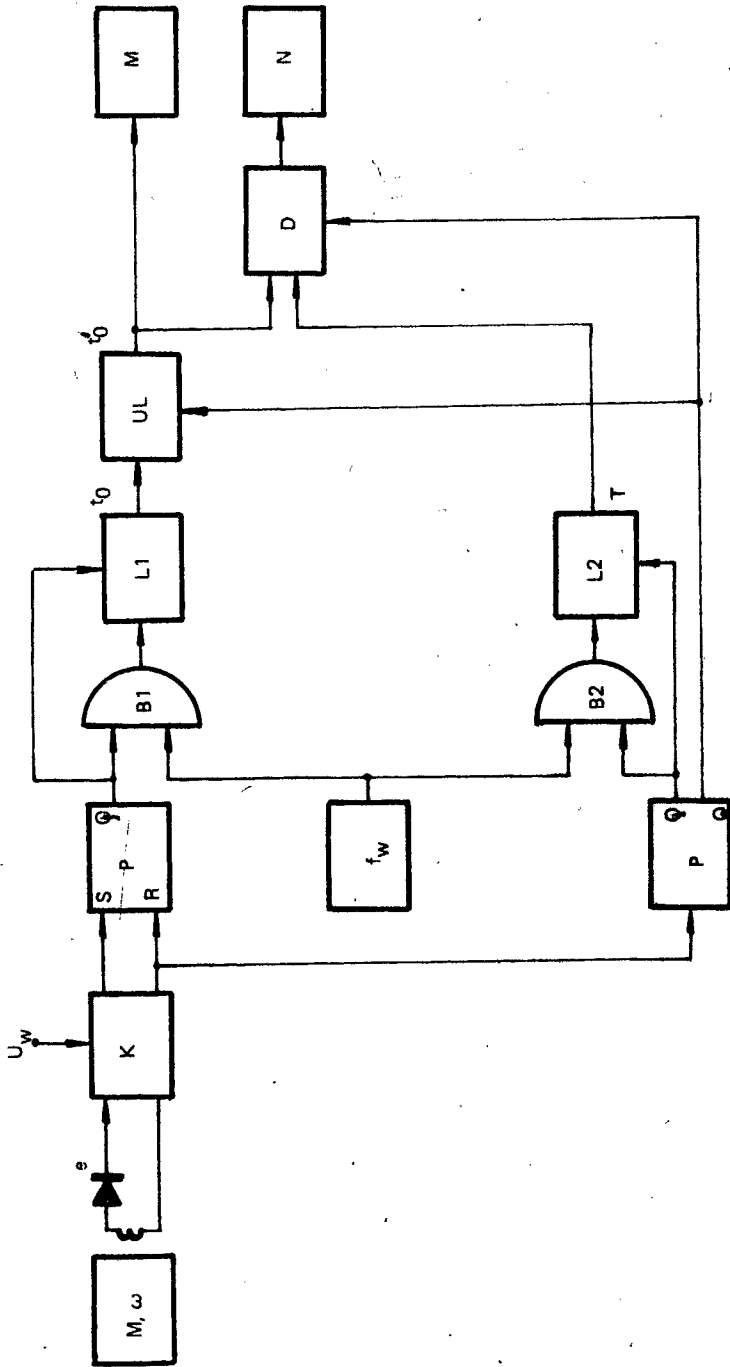
Rys. 30. Charakterystyka zależności napięcia e indukującego się na końcach taśmy amorficznej od wydłużenia bezwzględnego z [9]; $f_c = 10$ kHz – częstotliwość prądu w przewodzie; $H_m = 20$ Oe (1600 A/m) – amplituda natężenia H_z pola przemagnesowującego; $f = 60$ Hz – częstotliwość przemagnesowywania taśmy; I – część liniowa charakterystyki; II – część nieliniowa charakterystyki.



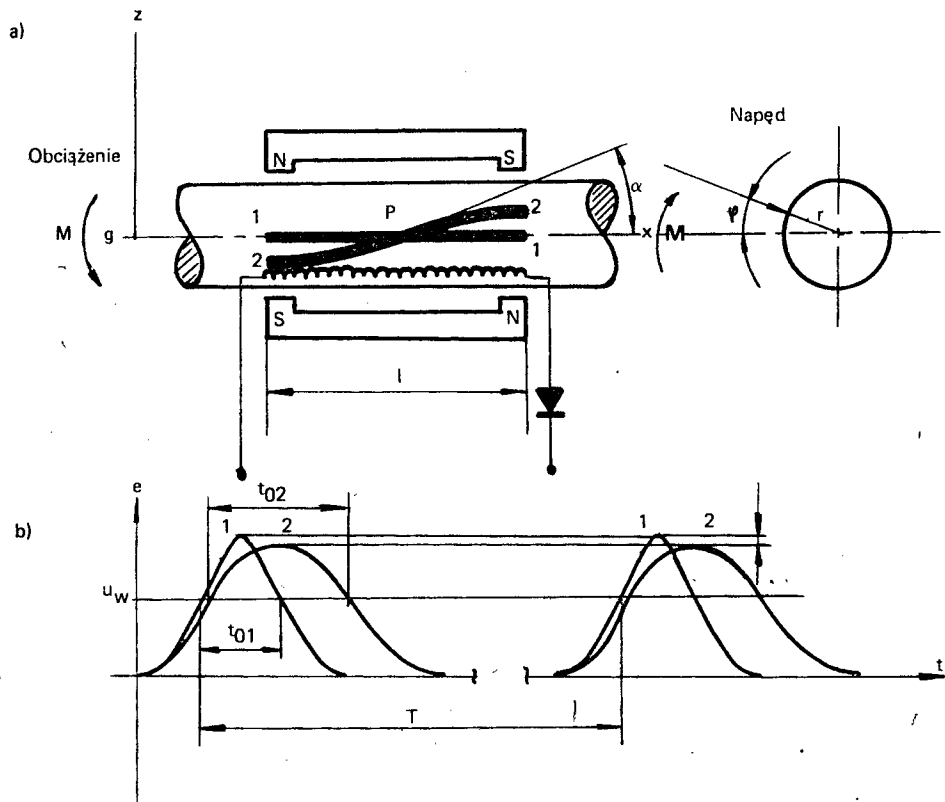
Rys. 31. Przetwornik momentu obrotowego z symetrycznymi modułami Wieganda [16]: a) schemat przetwornika; b) przebiegi napięć; e_1 – napięcie generowane przez pierwszy moduł Wieganda; e_2 – napięcie generowane przez drugi moduł Wieganda; u_1 – napięcie na wyjściu pierwszego układu kształtowania impulsów UK11; u_2 – napięcie na wyjściu drugiego układu kształtowania impulsów UK12; u_0 – napięcie na wyjściu przerzutnika RSQ; u_{wyi1} – napięcie na wyjściu układu całkującego; $u_{wyi2} = u_0$; t_0 – czas upływający od chwili pojawienia się impulsu e_1 do chwili pojawienia się impulsu e_2 ; ω – prędkość kątowa wału; l – układ całkujący; φ – kąt skreślenia wału na odcinku o długości l .



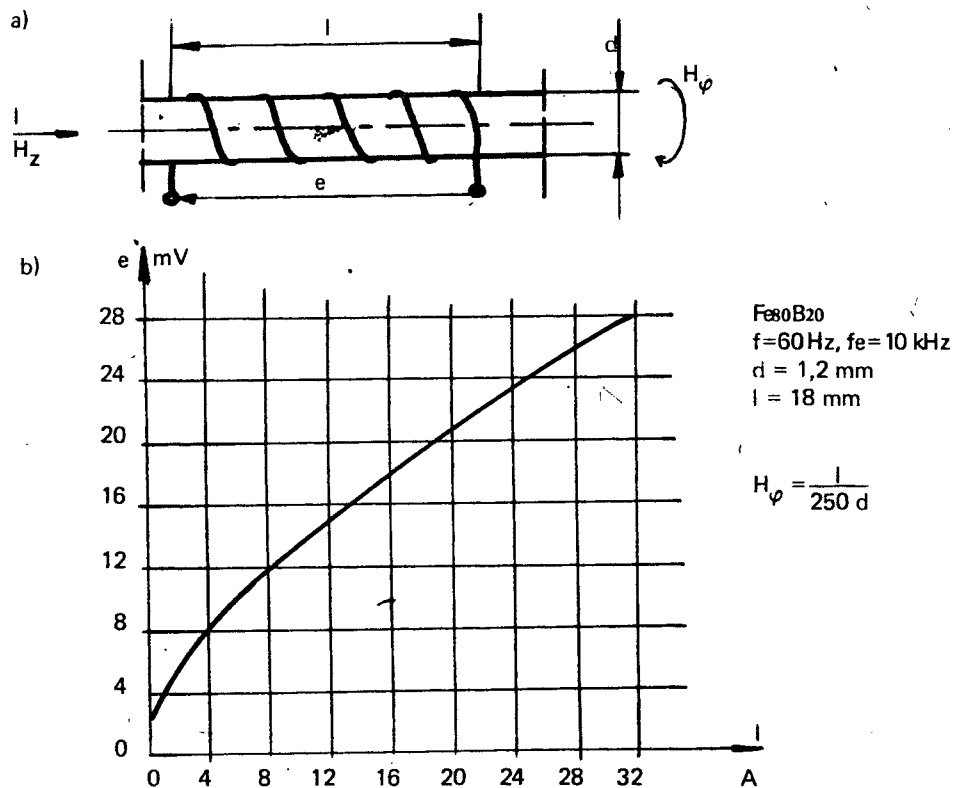
Rys. 32. Przetwornik momentu obrotowego z elementem Wieganda [17, 18] : a) schemat przetwornika; b) przekroje stosowanych elementów Wieganda; DW – element Wieganda.



Rys. 33. Zasada działania przetwornika momentu obrotowego z elementem Wieganda zamontowanym na wale [17, 18]: a) ilustracja zasady działania przetwornika; b) przebiegi sygnałów napięciowych; M – moment obrotowy; U_w – napięcie progowe wytworzone przez cewkę L jest większe od napięcia U_w ; T – okres jednego obrotu wału; 1 – indeks wielkości mierzonych przy $M \neq 0$; 2 – indeks wielkości mierzonych przy $M = 0$; α – kąt między elementem Wieganda a osią wału, który jest obciążony momentem skręcającym izut na płaszczyźnie x-y rysunku; ψ – kąt skręcenia wału na odcinku o długości $l/2$; l – długość elementu Wieganda.



Rys. 34. Schemat układu elektronicznego przetwornika momentu obrotowego z elementem Wieganda zamontowanym na wale [17]. D – dzielnik cyfrowy; K – komparator; B1 – bramka logiczna nr 1; B2 – bramka logiczna nr 2; f_w – generator częstotliwości wzorcowej $f_w = 1 \dots 10$ MHz; L1 – licznik binarny nr 1; L2 – licznik binarny nr 2; M – przetwornik wielkości t_0 w wielkość M; N – przetwornik ilorazu t_0/T w wielkość N; UL – układ linearyzujący. M – moment obrotowy; N – moc; T – okres obrotu wału korbowego; t_0 – czas, w którym napięcie impulsu jest większe od wartości U_w ; t'_0 – skorygowana wartość t_0 ; e – napięcie indukujące się w cewce; U_w – napięcie wzorcowe odniesienia.



Rys. 35. Przetwornik prądu zmiennego [9]: a) schemat przetwornika; b) charakterystyka przetwarzania przetwornika mierzącego prąd o częstotliwości 60 Hz.