

PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW
MERA-PIAP
Al. Jerozolimskie 202 02-222 Warszawa Telefon 23-70-81

OŚRODEK POMIARU RUCHU I CZASU

074

A

Główny wykonawca dr inż. Piotr Karkoszka

Wykonawcy

Konsultant

Nr zlecenia RP-104.1

" Zbadanie możliwości wykorzystania efektów Wieganda i Matteucciego do budowy czujników ".

Etap 1. " Rozpoznanie stanu techniki i opracowanie koncepcji wykorzystania poszczególnych efektów do budowy czujników ".

Zlecniodawca Centralny Plan Badawczo-Rozwojowy.

Pracę rozpoczęto dnia 1986 05

Kierownik Pracowni

Z-ca Dyrektora
d/s Pomiarów

zakończono dnia 1987 03

Kierownik Ośrodka

inż. St. Pietrzykowski

dr inż. G. Winiecki

wz.mgr. inż. E. Suchocki

Praca zawiera:

stron 26

rysunków 16

fotografii

tabel

tablic

załączników

Rozdzielnik - ilość egz:

Egz. 1 BOINTE

Egz. 2 ORC

Egz. 3 ORC21

Egz. 4

Egz. 5

Egz. 6

Nr rejestr.

5813

Analiza dokumentacyjna Sprawozdanie zawiera omówienie stanu techniki i koncepcji wykorzystania efektów Wieganda i Matteu-
cdiego do budowy czujników.

Tytuły poprzednich sprawozdań

1. " Koncepcja elektronizacji samochodu w zakresie doboru czujników i przetworników ". nr rejstr. 5304
2. " Czujnik położenia i prędkości wału korbowego dla układu zapłonowego z pamięcią wykonywanego przez OBRMHIR ". Etap 1: " Rozeznanie stanu techniki i opracowanie założeń konstrukcyjnych uzgodnionych z OBRMHIR ". nr rejstr. 5438.

S P I S T R E Ś C I	Str.
1. Wstęp.	1
1.1. Przedmiot opracowania.	1
1.2. Formalne uzasadnienie podjęcia pracy	1
1.3. Merytoryczne uzasadnienie podjęcia pracy	1
1.4. Materiały wykorzystane w opracowaniu	4
2. Stan techniki.	5
2.1. Zjawiska Matteucciego i Wieganda	5
2.2. Wykorzystanie zjawisk Matteucciego i Wieganda w przetwornikach różnych wielkości pomiarowych ...	7
2.2.1. Informacje wstępne	7
2.2.2. Przetworniki wielkości charakteryzujących ruch liniowy i obrotowy	8
2.2.3. Przetworniki przemieszczeń liniowych mierzonych analogowo, siły, ciśnienia, momentu zginającego, statycznego momentu skręcającego, prądu zmienne- go, częstotliwości	13
2.2.4. Przetworniki momentu obrotowego i mocy	15
3. Koncepcja wykorzystania zjawiska Matteucciego i Wieganda w przetwornikach pomiarowych przeznaczo- nych dla robotów i ich aplikacji	18
4. Uwagi końcowe.	24

1. Wstęp.

1.1. Przedmiot opracowania.

Przedmiotem opracowania są przetworniki pomiarowe przeznaczone do pomiarów wielkości mechanicznych charakteryzujących pracę poszczególnych elementów robotów i urządzeń towarzyszących w aplikacjach robotów. W niniejszym opracowaniu rozpatruje się przetworniki wykorzystujące bistabilne materiały magnetyczne, w których występują zjawiska Matteucciego i Wieganda.

1.2. Formalne uzasadnienie podjęcia pracy.

Podstawą opracowania niniejszych założeń jest zlecenie nr RP-104.1 Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego (NP/337/86) z dn. 1986. 05. dotyczące " Zbadania możliwości wykorzystania efektu magnetostrykcji, efektu Wieganda i efektu Matteucciego oraz budowa i badania modeli czujników wykorzystujących te efekty, przeznaczonych do budowy robotów i ich aplikacji ", którego tytuł brzmi: " Zbadanie możliwości wykorzystania efektów Wieganda i Matteucciego do budowy czujników."

Niniejsze opracowanie ma na celu przedstawienie rezultatów rozeznania stanu techniki i ogólnej koncepcji wykorzystania zjawisk Wieganda i Matteucciego do budowy przetworników pomiarowych.

1.3. Merytoryczne uzasadnienie podjęcia pracy.

W robotach produkowanych w ZD-PIAP stosowane są do pomiaru liniowych i kątowych przemieszczeń kontrolowanych zespołów rezolwery (transformatory obrotowe), które wytwarzają analogowy, sinusoidalny sygnał napięciowy. Sygnał ten musi być przetwarzany między innymi za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego, który dzieli cały zakres zmian napięcia wyjściowego rezolwerów na pewną stałą liczbę elementarnych poziomów.

Celem zwiększenia dokładności pomiarów przemieszczeń kątowych kontrolowanych zespołów robotów rezolwery napędza się za pomocą przekładni mechanicznych zwielokrotniających liczbę obrotów rezolwerów w stosunku do liczby obrotów (lub przemieszczenia kątowego) tych zespołów. W rezultacie tego uzyskuje się możliwość rozróżnienia około 15 tys. elementarnych położeń tych zespołów podczas pełnego jednego obrotu.

Do istotnych niedogodności związanych z wykorzystaniem rezolwerów należy zaliczyć:

- dosyć skomplikowaną budowę rezolwerów i znaczny ich koszt jednostkowy,
- konieczność zasilania rezolwerów energią elektryczną,
- konieczność analogowo-cyfrowego przetwarzania sygnałów napięciowych rezolwera,
- konieczność stosowania przekładni mechanicznej w celu zwiększenia dokładności pomiarów przemieszczeń kontrolowanych zespołów robota,
- znaczną podatność metody pomiarów przemieszczeń na zakłócenia zewnętrzne,
- konieczność stosowania ostrych wymagań odnośnie dokładności wykonania i trwałości elementów mechanicznych współpracujących z rezolwerami,
- znaczne niedogodności konstrukcyjne związane z montowaniem rezolwerów w robotach,
- analogowy, napięciowy charakter wytwarzanego sygnału elektrycznego.

Powyższe niedogodności można wyeliminować lub co najmniej ograniczyć, zastępując rezolwery przetwornikami zbudowanymi z bistabilnych materiałów magnetycznych. Do zalet tego rodzaju przetworników zalicza się między innymi:

- przemieszczeń liniowych mierzonych analogowo,
oraz w czujnikach pewnych charakterystycznych położów elementów kontrolowanych.

1.4. Materiały wykorzystane w opracowaniu.

Do opracowania wykorzystano publikacje:

- IEEE Transaction on Magnetism: 1975 + 1986,
 - SAE Transaction, SAE papers, SAE technical papers, Automotive Engineering: 1970 + 1986,
 - VDO-Berichte: 1975 + 1986,
 - I, II, III Konferencji ogólnopolskiej nt. magnetyków amorficznych 1983 + 1985,
 - Patenty USA, Wielkiej Brytanii, Francji, RFN, Japonii: 1978 + 1986,
 - Zeszyty Naukowe AGH: 1981 + 1986,
- oraz informacje ustne uzyskane w:
- Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Miernictwa Politechniki Warszawskiej,
 - Instytucie Fizyki PAN.

- wytwarzanie impulsowych sygnałów napięciowych,
- wytwarzanie impulsów o stałym kształcie, stałej amplitudzie, i szerokości, niezależnych od częstotliwości ich generowania, od zmian amplitudy natężenia pola przemagnesowującego, temperatury otoczenia, warunków fizyczno-chemicznych,
- częstotliwościowy charakter sygnałów w przypadku pomiarów prędkości liniowej i kątowej,
- zdolność do pracy w temperaturze od -200°C do temperatury bliskiej punktowi Curie,
- prostotę konstrukcyjną,
- znaczną rozdzielczość pomiaru położenia dochodzącą w przypadku drutów amorficznych do czterech rozróżnialnych elementarnych położzeń elementu kontrolowanego na odcinku 1 mm,
- pracę bez zasilania energią elektryczną,
- bardzo małą rezystancję wewnętrzną, w przypadku elementów bistabilnych, w których występuje zjawisko Matteucciego, wynoszącą ułamki omów, przy stosunkowo dużej amplitudzie impulsów napięciowych,

Ponadto bistabilne elementy magnetyczne mogą być wykorzystane nie tylko w przetwornikach położzeń liniowych i kątowych, przemieszczeń liniowych i kątowych, prędkości liniowej i kątowej, lecz także w przetwornikach:

- siły,
- ciśnienia,
- naprężeń mechanicznych,
- obrotowego momentu,
- statycznego momentu skręcającego,
- prądu stałego i zmiennego,
- częstotliwości przebiegów elektrycznych,

2. Stan techniki.

2.1. Zjawiska Matteucciego i Wieganda.

Zjawiska Matteucciego i Wieganda występują w materiałach o silnych właściwościach magnetostrykcyjnych, cechujących się sztucznie wytwarzaną strukturą domenową. Struktura taka powstaje wskutek wprowadzenia do materiału magnetycznego odpowiedniego pola naprężeń. W wyniku tego zabiegu w części materiału powstają obszary odkształcone trwale, w których generują się kierunki łatwego magnesowania. Umożliwia to przemagnesowywanie tych materiałów w jednym skoku Barkhausena, a tym samym wystąpienie zjawiska Matteucciego i Wieganda.

Zjawisko Matteucciego występuje w taśmach i w drutach wykonanych z magnetostrykcyjnych materiałów amorficznych. W taśmach amorficznych (rys. 1) strukturę domenową, sprzyjającą występowaniu zjawiska Matteucciego, wytwarza się za pomocą zwijania taśm w spiralę i rozciągnięcia jej z pewną siłą. W rezultacie tego w taśmie powstaje pięć wyróżnionych obszarów o różnych naprężeniach wewnętrznych:

- warstwy wewnętrzne ściskane ww, w tym: warstwa a-b odkształcona trwale, warstwa b-c odkształcona sprężysto, warstwa c obojętna,
- warstwy zewnętrzne rozciągane zw, w tym: warstwa c-d odkształcona sprężysto, warstwa d-e odkształcona trwale (plastycznie).

W warstwach tych generują się kierunki łatwego magnesowania pod kątem $\ominus$ względem osi x taśmy w warstwach rozciąganych, jeśli taśma jest z materiału o magnetostrykcji dodatniej, oraz pod kątem $\frac{\pi}{2} + \ominus$ w warstwach ściskanych.

W warstwach odkształconych trwale powstają domeny szerokie (w postaci ścian zewnętrznych taśmy) o bardzo dużej łatwości przemieszczania się wzdłuż kierunków łatwego magnesowania.

Jeśli spiralę taśmy poddać oddziaływaniu pola magnetycznego o zmiennym natężeniu H , które można rozłożyć na składową H_z (wzdłuż osi spirali) i na składową okrężną H_ϕ (uzyskiwaną np. dzięki przepływowi prądu zmiennego w przewodzie umieszczonym wewnątrz spirali), wtedy wskutek zmian kierunku natężenia H następują przemieszczenia warstw domenowych a-b i d-e względem siebie, a w spirali indukują się impulsy napięciowe. Kształt, amplituda i szerokość tych impulsów są praktycznie stałe. Częstotliwość generowania tych impulsów można zmieniać w zakresie $10^{-2} \dots 10^5$ Hz. Godną podkreślenia zaletą tych taśm jest to, że stanowią one w istocie dogodne źródła prądowe, ponieważ ich rezystancja wewnętrzna jest rzędu ułamków oma.

W drutach amorficznych struktura domenowa (rys. 2) jest uzyskiwana dzięki rozciągnięciu tych drutów i skręceniu. W rezultacie tego w ich strukturze powstają warstwy odkształcone trwale (zewewnętrzne) i warstwy odkształcone sprężysto (wewnętrzne). Kierunki łatwego magnesowania pokrywają się z kierunkami największych naprężeń. Mechanizm generowania impulsów napięciowych jest bardzo podobny do mechanizmu występującego w taśmach. Impulsy napięcia powstają wskutek zmian składowej okrężnej H_ϕ natężenia pola przemagnesowującego.

Zjawisko Wieganda występuje w drutach o silnej magnetostrykcji wykonanych ze stopu Vicalloy ($\text{Fe}_{38}\text{Co}_{52}\text{V}_{10}$). Druty te, których strukturę domenową przedstawiono na rys. 3, są rozciągane z pewną siłą wstępną, a następnie skręcane naprzemian w lewo i w prawo. W rezultacie tego w drutach tych powstają warstwy odkształcone trwale (zewewnętrzne) złożone z domen cylindrycznych, magnetycznie twarde, warstwa przejściowa stanowiąca niejako wewnętrz-

na ścianę domen cylindrycznych i wzdłuż odkształcony sprężystości magnetycznie miękkiej. Na druty te, pocięte na odcinki po kilkanaście, kilkadziesiąt mm nawija się cewki solenoidalne, tworząc w ten sposób tzw. symetryczne i niesymetryczne moduły Wieganda. W modułach niesymetrycznych impulsy napięciowe są generowane podczas przemagnesowywania rdzenia, w modułach symetrycznych natomiast podczas przemagnesowywania rdzenia i otoczki (warstw zewnętrznych).

W modułach niesymetrycznych powstają słabe i silne impulsy napięciowe: słabe podczas przemagnesowywania rdzenia w kierunku przeciwnym niż kierunek namagnesowania otoczki, silne natomiast podczas przywracania rdzeniowi kierunku namagnesowania zgodnego z kierunkiem otoczki.

W modułach symetrycznych powstają pary silnych i słabych impulsów o równych amplitudach lecz o przeciwnej polaryzacji. Impulsy silne towarzyszą szybkiemu przemagnesowywaniu rdzenia, impulsy słabe natomiast wolniej przebiegającemu przemagnesowywaniu otoczki.

2.2. Wykorzystanie zjawisk Matteucciego i Wieganda w przetwornikach różnych wielkości pomiarowych.

2.2.1. Informacje wstępne.

Zjawiska Matteucciego i Wieganda występują w tzw. bistabilnych elementach magnetycznych, które charakteryzują się tym, że podczas ich przemagnesowywania obserwowane są tylko dwa stabilne stany namagnesowania. Stany te różnią się tylko kierunkami namagnesowania, przy czym elementy bistabilne są w tych stanach namagnesowane do nasycenia.

Bistabilne elementy magnetyczne są używane do budowy przetworników mierzących:

- położenie liniowe,

- położenie kątowne w ruchu obrotowym,
- przesunięcie liniowe,
- przemieszczenie kątowne w ruchu obrotowym,
- prędkość liniową,
- prędkość kątową,
- przyspieszenie liniowe jako pochodną prędkości liniowej,
- przyspieszenie kątowne jako pochodną prędkości kątownej,
- przemieszczenie liniowe mierzone analogowo,
- siłę,
- ciśnienie,
- statyczny moment zginający i skręcający,
- moment obrotowy,
- moc,
- prąd stały i zmienny,
- częstotliwość sygnałów elektrycznych.

Spodziewać się należy w najbliższym czasie dalszego rozszerzenia zbioru wielkości mierzonych za pomocą przetworników z bistabilnymi elementami magnetycznymi o wielkości charakteryzujące pola magnetyczne i elektromagnetyczne.

2.2.2. Przetworniki wielkości charakteryzujących ruch liniowy i obrotowy.

Przykłady przetworników do pomiaru położenia, przesunięcia lub obrotu, prędkości i przyspieszenia w ruchu liniowym i obrotowym przedstawiono na rys. 4 - 11.

Rys. 4.

Przetwornik składa się z wirującego magnesu trwałego przymocowanego do czoła wału i z elementu bistabilnego w postaci pierścienia z materiału magnetostrykcyjnego, na którym umieszczono cewkę. Pierścień jest rozcięty i rozgięty w celu wywołania naprężeń w strukturze materiału (ściskających w warstwach zewnętrz-

11

nych, rozciągających w warstwach wewnętrznych) i wygenerowania kierunków łatwego magnesowania. Przemagnesowywanie pierścienia zachodzi w jednym skoku Barkhausena, podczas którego w cewce indukuje się impuls napięcia. Przetwornik pozwala mierzyć prędkość kątową i wykrywać charakterystyczne położenia elementu wirującego.

Rys. 5.

Przetwornik stanowi modyfikację przetwornika na rys. 4. W przetworniku tym bistabilny pierścień magnetyczny zastąpiono modułem Wieganda, spiralą z taśmy amorficznej lub drutem amorficznym, w którym doprowadzono do powstania zjawiska Matteucciego.

Rys. 6. Przetwornik

Przetwornik stanowi modyfikację przetworników z rys. 4 i 5. W przetworniku tym wirujący magnes zastąpiono dwiema tarczami sprzężonymi mechanicznie, na których obwodzie naniesiono magnesy trwałe o wzajemnie odwróconych biegunach. Poszczególne pary magnesów służą do przemagnesowywania elementu bistabilnego.

Przetwornik służy do pomiaru:

- położenia kąowego elementu wirującego,
- przemieszczenia kąowego,
- prędkości kątowej,
- przyspieszenia kątowego.

Pomiary te są możliwe z uwagi na to, że przemagnesowywanie elementu bistabilnego zachodzi wielokrotnie podczas jednego obrotu sprzężonych tarcz.

Rys. 7.

Przetwornik składa się z pakietu 4 magnesów trwałych objętych zworą z materiału magnetycznego, z nawiniętą nań cewką i z drutów Wieganda rozmieszczonych na płaszczyźnie nośnej w równych odstępach. Końce zwory obejmują płaszczyznę nośną z drutami

12

Wieganda. Podczas przemieszczania się pakietu magnesów ze zwoją względem płaszczyzny nośnej następuje dwukrotne przemagnesowanie poszczególnych drutów i wygenerowanie w cewce podwójnych impulsów napięcia o przeciwnej polaryzacji.

Przetwornik mierzy:

- położenie liniowe,
- przesunięcie liniowe,
- prędkość liniową,
- przyspieszenie liniowe.

W przypadku zastąpienia drutów Wieganda elementami, w których występuje zjawisko Matteucciego, można zrezygnować ze zwory i cewki, a sygnały napięciowe pobierać bezpośrednio z tych elementów. Jeśli sygnały te będą dostarczane do różnych wejść pomiarowych, przetwornik będzie określał bezpośrednio i niezawodnie (bez możliwości wystąpienia zakłóceń lub przekłamań) bezwzględne położenie liniowe elementu sterowanego.

Rys. 8.

Przetwornik stanowi modyfikację przetwornika z rys. 7. Składa się z modułu Wieganda, dwóch magnesów trwałych, słabego umieszczonego nad modułem, silnego umieszczonego obok modułu i nad zębami z materiału magnetycznego, oraz z zębatej listwy. Jeśli ząb listwy znajdzie się bezpośrednio pod magnesem silnym, moduł zostanie namagnesowany przez magnes słaby. Jeśli ząb listwy usunie się spod silnego magnesu, strumień tego magnesu zamykający się dotychczas przez materiał zęba, zacznie przenikać przez moduł Wieganda, przemagnesowując go w przeciwnym kierunku. Kolejnym przemagnesowaniom modułu Wieganda towarzyszą impulsy napięciowe.

Moduł Wieganda może być zastąpiony płaską lub spiralną taśmą amorficzną albo drutem amorficznym.

Rys. 9.

Przetwornik stanowi modyfikację przetworników z rys. 7, 8, która umożliwiła jego zastosowanie w aparacie zapłonowym. Składa się z modułu Wieganda, magnesu słabego, magnesu silnego i tarczy z materiału magnetycznego z wycięciami, oddzielającej magnes silny od modułu i magnesu słabego. Tarcza jest umieszczona na wałku aparatu zapłonowego. Jeśli podczas jej wirowania między rozdzielanymi elementami przetwornika znajdzie się występ, strumień magnetyczny silnego magnesu zewrze się przez materiał występu, a moduł zostanie namagnesowany przez słaby magnes. Jeśli występ tarczy usunie się spośród rozdzielanych elementów, moduł zostanie przemagnesowany za pomocą silnego magnesu. W trakcie przemagnesowywania w cewce modułu zostaną wygenerowane impulsy napięcia.

Przetwornik mierzy prędkość kątową i wykrywa pewne charakterystyczne położenia wału korbowego silnika.

Rys. 10.

Przetwornik stanowiący modyfikację przetworników z rys. 8, 9, składa się z przetwornika wykorzystywanego do detekcji charakterystycznego położenia elementu wirującego (tzw. punktu odniesienia) oraz z przetwornika wykorzystywanego do pomiaru położenia, przemieszczenia i prędkości kątowej. Zasada działania przetworników składowych jest taka sama jak w przypadku przetwornika z rys. 8.

Rys. 11.

Przetwornik składa się z płaskiej taśmy amorficznej i nawiniętej nań cewki, magnesu trwałego, tulei z materiału magnetycznego i z wieńca zębatego umieszczonego na elemencie wirującym. Przemagnesowywanie taśmy amorficznej następuje wskutek zniekształcenia pola magnetycznego przenikającego przez jej materiał, powodowa-

14

nego przemieszczaniem się zębów wieńca w sąsiedztwie magnesu trwałego. Przemieszczające się zęby powodują zmianę wartości i kierunku składowej poziomej (równoległej do taśmy) wektora natężenia pola magnetycznego, która przemagnesowuje taśmę. Przemagnesowywaniu taśmy towarzyszą impulsy napięcia generowane w cewce.

Przytoczony, krótki, przegląd przetworników wielkości charakteryzujących ruch liniowy i kątowy kontrolowanych elementów, aczkolwiek nie wyczerpuje wszystkich możliwych rozwiązań konstrukcyjnych, tym niemniej pozwala na sformułowanie pewnych spostrzeżeń:

a) przetworniki muszą zawierać oprócz bistabilnych elementów magnetycznych elementy pozwalające dokonywać przemagnesowań elementów bistabilnych. Przemagnesowywanie może być dokonywane za pomocą:

- wirującego magnesu trwałego,
- dwóch magnesów trwałych o przeciwnie zorientowanych biegunach (lub par tych magnesów),
- jednego magnesu trwałego i dodatkowych elementów magnetycznych powodujących zniekształcenie pola oddziałującego na bistabilny element magnetyczny,
- cewek z prądem zmiennym,
- przewodów prostych z prądem zmiennym.

b) przemagnesowywanie elementów bistabilnych może być spowodowane oddziaływaniem:

- wirującego pola magnetycznego,
- zmiennego pola magnetycznego,
- pola magnetycznego zniekształcanego za pomocą dodatkowych elementów magnetycznych.

W każdym przypadku wskazane jest modelowanie matematyczne kształtu przestrzennego pola magnetycznego w przetworniku dla różnych konfiguracji elementów składowych.

2.2.3. Przetworniki przemieszczeń liniowych mierzonych analogowo, siły, ciśnienia, momentu zginającego, statycznego momentu skręcającego, prądu zmiennego, częstotliwości.

Do pomiaru wymienionych w tytule wielkości można wykorzystać taśmy i druty amorficzne, w których występuje zjawisko Matteucciego. Dogodniejsze w zastosowaniach tego rodzaju są taśmy. Z tego względu w niniejszym punkcie zostaną omówione przetworniki ze spiralnymi taśmami amorficznymi.

Przetworniki wspomnianych wielkości pomiarowych zawierają:

- przynajmniej jedną spiralę z taśmy amorficznej, w której występuje zjawisko Matteucciego,
- przynajmniej jeden element stanowiący źródło zmiennego pola przemagnęsowującego spiralę.

Źródłem zmiennego pola magnetycznego, najdogodniejszym z punktu widzenia tych przetworników, jest solenoidalna cewka obejmująca spiralę, przewód z prądem zmiennym umieszczony wewnątrz spirali lub obydwa elementy równocześnie - w tym przypadku uzyskuje się pole przestrzenne, którego wektor natężenia H jest wypadkową wektora pola cewki, zwykle równoległego do osi spirali, i wektora pola okrężnego wytwarzanego przez prąd w przewodzie.

Podstawą pomiarów rozpatrywanych w tym punkcie wielkości jest zależność między amplitudą generowanych impulsów a kątem Θ definiowanym wzorem:

$$\Theta = \arccos p/\pi D$$

gdzie:

p - poskok zwojowy spirali,

D - średnica zewnętrzna spirali.

Z podanego wzoru wynika, że kąt Θ zależy od rozciągnięcia spiral

Jeśli natężenie pola przemagnesowującego jest stałe, to między amplitudą impulsów a długością spirali zachodzi ściśle określona zależność, której przykładowy wykres przedstawiono na rys. 12 (e - amplituda impulsów, z - wydłużenie spirali). Jest to zarazem charakterystyka przetwarzania przetwornika mierzącego przemieszczenie kontrolowanego elementu w sposób analogowy.

Pomiary siły, ciśnienia, statycznego momentu skręcającego, momentu zginającego opierają się na zależności między amplitudą impulsów napięciowych a naprężeniami występującymi w rozciąganej taśmie. Rzecz jasna naprężenia te są wywoływane działaniem siły rozciągającej (lub ściskającej w przypadku taśmy o ujemnej magnetostrykcji), która powodując zmianę długości i naprężeń w taśmie, przyczynia się do zmiany kąta Θ .

Na rys. 13 przedstawiono charakterystykę zależności naprężeń w taśmie (siły) od względnego wydłużenia taśmy.

Uwzględniając charakterystykę z rys. 12 i długość początkową spirali, można utworzyć charakterystykę zależności amplitudy impulsów od wartości naprężeń (siły).

Generalnie w przetwornikach tego rodzaju wykorzystuje się wpływ zmian długości taśmy na amplitudę impulsów napięciowych.

Inne metody pomiaru siły, ciśnienia, statycznego momentu zginającego i skręcającego, uwzględniające zależności między wielkościami magnetycznymi a mierzonymi wielkościami mechanicznymi w taśmach amorficznych opierają się na zjawisku szeroko pojmowanej magnetostrykcji i z tego względu nie będą omawiane w niniejszym opracowaniu.

W przetwornikach mierzących prąd zmienny wykorzystuje się silną zależność amplitudy impulsów napięciowych od natężenia pola

przemagnesowującego. W przetworniku, którego przykład pokazano na rys. 14, przemagnesowanie taśmy amorficznej nawiniętej spiralnie na przewód z prądem następuje pod wpływem pola okrężnego wytwarzanego przez ten prąd. Poniżej przedstawiono przykładową charakterystykę przetwarzania.

Pomiar częstotliwości prądu zmiennego może być przeprowadzony za pomocą przetwornika prądu zmiennego, ponieważ częstotliwość generowanych w taśmie impulsów jest taka sama jak częstotliwość prądu. W przetwornikach częstotliwości zmiennych sygnałów elektrycznych można wykorzystać także inne elementy bistabilne, z których najdogodniejszym jest niewątpliwie drut amorficzny firmy UNITIKA ulegający przemagnesowaniu pod wpływem pola o natężeniu $6,4 \text{ A/m}$ (co najmniej o rząd mniejszym niż w przypadku taśm amorficznych i co najmniej trzy rzędy wielkości mniejszym niż w przypadku drutów Wieganda).

2.2.4. Przetworniki momentu obrotowego i mocy.

Spośród znanych rozwiązań zostaną w niniejszym punkcie przedstawione dwa przetworniki momentu obrotowego, w których można zastosować dowolne bistabilne elementy magnetyczne.

Pomiar momentu obrotowego w obu przetwornikach opiera się na zależności między momentem obrotowym a kątowym odkształceniem wału skręcanego przez ten moment.

Przetwornik przedstawiony na rys. 15, złożony z dwóch elementów bistabilnych umieszczonych nad powierzchnią wału i dwóch par odwróconych wzajemnie magnesów trwałych przyporządkowanych tym elementom (przy czym magnesy umieszczone są na wale), mierzy bezpośrednio czas upływający między chwilą pojawienia się impulsu w pierwszym elemencie a chwilą pojawienia się impulsu w drugim elemencie. Jeśli znana jest prędkość kątowa wału, łatwo obliczyć kąt φ skręcenia płaszczyzn odpowiadających poszczegól-

nym elementóm bistabilnym względem siebie, oraz wyznaczyć wartość momentu obrotowego przenoszonego przez wał. W zakresie liniowych odkształceń sprężystych między momentem skręcającym a kątem φ zachodzi zależność liniowa.

W przetworniku przedstawionym na rys. 16 wykorzystuje się jeden element bistabilny (element Wieganda) umocowany na powierzchni wału równolegle do osi jego obrotu i dwa wzajemnie odwrócone magnesy umieszczone nad powierzchnią wału. Obok jednego z magnesów ulokowana jest cewka, w której podczas przemagnesowywania elementu Wieganda indukują się impulsy napięcia.

W przetworniku tym wykorzystano zależność szybkości przemagnesowywania elementu Wieganda od natężenia pola przemagnesowującego. Jeśli wał nie jest obciążony, wtedy podczas jego obrotów w cewce zaindukują się impulsy oznaczone " 1 " (rys. 16). Jeśli wał zostanie obciążony momentem obrotowym, ulegnie skręceniu, przy czym element Wieganda przyjmie nowe położenie na powierzchni wału, tworząc linię śrubową pod kątem α względem osi obrotu wału. Wartość natężenia pola przemagnesowującego zmniejszy się od H do $H \cos \alpha$. W cewce pojawią się impulsy " 2 " (rys. 16). W tym konkretnym rozwiązaniu mierzony jest czas t_0 , w którym amplituda impulsu jest większa od pewnego napięcia odniesienia U_w . Charakterystyka przetwarzania postaci $M = f(t_0)$ jest silnie nieliniowa, dlatego przetwornik należy wyposażyć w układ linearyzujący.

Obydwa przetworniki momentu obrotowego mogą być wykorzystane bezpośrednio do pomiaru mocy przekazywanej przez wał, ponieważ oprócz momentu obrotowego mierzą również prędkość kątową wału. Pierwszy z omawianych przetworników pozwala także bezpośrednio określić kierunek wirowania wału, co ma niebagatelne znaczenie w systemach charakteryzujących się dwukierunkowym przepływem mo-

cy i możliwością wirowania wału w obu kierunkach:

3. Koncepcja wykorzystania zjawiska Matteucciego i Wieganda w przetwornikach pomiarowych przeznaczonych dla robotów i ich aplikacji.

Na podstawie omówionego pokrótce rozeznania stanu techniki można stwierdzić, że przetworniki pomiarowe, których działanie jest oparte na zjawisku Matteucciego, Wieganda i ściśle z nimi związane, tzw. silnym zjawisku Barkhausena, wytwarzają sygnały dyskretne w postaci impulsów będących fizycznym (grubym) przybliżeniem impulsów Diraca. W wielu przypadkach sygnały te nie wymagają żadnego przetwarzania, a w przypadku przetworników z taśmami amorficznymi lub drutami amorficznymi, w których występuje zjawisko Matteucciego, bezpośrednie źródła sygnału można traktować jako źródła prądowe. Oznacza to między innymi, że sygnały generowane przez przetworniki tego rodzaju są szczególnie odporne na różne zakłócenia. Mogą być zatem stosowane w środowiskach charakteryzujących się występowaniem różnorodnych pól elektromagnetycznych bez groźby rażących błędów pomiarowych.

Na podstawie omówionego pokrótce rozeznania stanu techniki, a w szczególności na podstawie stwierdzonych właściwości elementów bistabilnych, rozwiązań konstrukcyjnych przetworników różnych wielkości pomiarowych i wreszcie na podstawie zarysowujących się tendencji rozwojowych w technice pomiarów i przetwarzania danych wykorzystujących przetworniki z bistabilnymi elementami magnetycznymi, można sformułować pewną koncepcję wykorzystania zjawisk Matteucciego, Wieganda i ściśle z nimi związanego silnego zjawiska Barkhausena w przetwornikach pomiarowych dla robotów i ich aplikacji.

Otóż warto zauważyć, że elementy bistabilne wraz ze źródłami zmiennego pola magnetycznego służącego do przemagnesowywania

tych elementów (magnesami trwałymi i ruchomymi częściami magnetycznymi zniekształcającymi pole otaczające element bistabilny, z wirującymi magnesami trwałymi, z cewkami, przez które przepływa prąd zmienny lub z przewodami z prądem zmiennym itp.) same w sobie stanowią przetworniki pomiarowe, które mogą podlegać już tylko niewielkim modyfikacjom konstrukcyjnym w zależności od ich przeznaczenia. W przypadku robotów i ich aplikacji należałoby w celu efektywnego wykorzystania tych zjawisk opracować cały system pomiarowy oparty na masowym wykorzystaniu elementów bistabilnych (co najmniej po kilkaset sztuk w pojedynczym robocie), który pozwalałby mierzyć:

- położenie liniowe i kątowe poszczególnych kontrolowanych części robota,
- przesunięcie liniowe i przemieszczenie kątowe (w ruchu obrotowym),
- prędkość liniową i kątową (w ruchu obrotowym),

a ponadto:

- prąd zmienny (elementy mogłyby spełniać także funkcję czujników układów zabezpieczających roboty przed przeciążeniami energetycznymi, zwarciami itp.),
- częstotliwość sygnałów elektrycznych,
- przemieszczenia liniowe mierzone w sposób analogowy,
- przemieszczenia kątowe w ruchu obrotowym mierzone w sposób analogowy.

System tego rodzaju mógłby być uzupełniony przetwornikami do pomiaru siły, ciśnienia, momentów zginających i statycznych momentów skręcających, w zależności, rzecz jasna, od zakresu przewidywanych czynności spełnianych przez roboty w konkretnych ich zastosowaniach.

Z uwagi na sposób wykonywania pomiarów przemieszczeń w robotach produkowanych w PIAP (za pomocą rezolwerów umieszczonych w pięciu newralgicznych punktach robota) budowę takiego systemu należałoby rozpocząć od opracowania przetworników położenia, przemieszczenia i prędkości w ruchu obrotowym.

Przetworniki takie powinny być wykonane w kilku wersjach jako złożone z:

- pojedynczego elementu bistabilnego i dwóch magnesów trwałych, które zestawione w moduł współpracowałyby z tarczą kodową położenia w formie tarczy z naniesionymi na jej powierzchni zębami,
- z pojedynczego elementu bistabilnego i jednego magnesu trwałego, które zestawione w moduł współpracowałyby z tarczą kodową położenia w postaci tarczy z materiału magnetycznego z namagnesowanymi promieniowo obszarami rozmieszczonymi w równych odstępach lub z rozmieszczonymi na jej powierzchni magnesami (w postaci sztabek, warstw, pasków itp),
- z dwóch magnesów trwałych i tarczy kodowej, na której rozmieszczonoby w równych odstępach bistabilne elementy magnetyczne,
- z dwóch tarcz kodowych, z których jedna byłaby wyposażona w magnesy trwałe (lub byłaby selektywnie namagnesowana), przy czym namagnesowane obszary byłyby rozmieszczone w równych odstępach), druga natomiast w bistabilne elementy magnetyczne.

Prawdopodobnie w trakcie dalszych prac nasuną się inne dodatkowe rozwiązania, polegające między innymi na znalezieniu innych metod zakłócania pola magnetycznego w celu przemagnesowywania elementów bistabilnych.

Niewątpliwie wykonanie takich tarcz nastręczy szereg trudności technologicznych związanych z równomiernym rozmieszczeniem mag-

W celu maksymalnego zabezpieczenia się przed skutkami zakłóceń w procesie pomiarowym można by impulsy generowane przez elementy bistabilne dostarczać do osobnych przyporządkowanych im wejść pomiarowych. Dzięki temu można by natychmiast rozróżnić rzeczywiste położenie kontrolowanej części od żądanych, możliwych do osiągnięcia w całym zakresie przemieszczenia tej części. W rozwiązaniu prostszym impulsy dostarczano by do jednego wejścia pomiarowego, a położenie części kontrolowanej byłoby odczytywane z odpowiedniego licznika binarnego. W tym przypadku istnieje ryzyko błędów pomiarowych związane z zakłóceniami w pracy układów cyfrowych. Aby je zmniejszyć do minimum, należałoby tarcze kodowe w wyposażać w dodatkowe znaczniki charakterystycznych położań kontrolowanej części.

Zestawienie pięciu przetworników z bistabilnymi elementami magnetycznymi może z powodzeniem zastąpić zestaw stosowanych obecnie rezolwerów.

Przypuszczalnie koszty wytwarzania takich przetworników będą mniejsze od kosztów wytwarzania rezolwerów, nawet po uwzględnieniu kosztów produkcji bistabilnych elementów magnetycznych, ponieważ przetworniki te są prostsze konstrukcyjnie, a proces ich wytwarzania można praktycznie całkowicie zautomatyzować.

Kolejnym krokiem w rozwoju systemu robota powinno być zastosowanie przetworników wielkości charakteryzujących ruch liniowy, które pozwalałyby określić położenie robota na jego stanowisku pracy. Przetworniki te powinny stanowić jedynie niewielką modyfikację przetworników określających ruch obrotowy, polegającą na zastąpieniu tarcz kodowych odpowiednimi listwami pomiarowymi z zębami, magnesami, obszarami namagnesowanymi lub z elementami bistabilnymi.

nesów, obszarów namagnesowanych lub elementów bistabilnych oraz z uzyskaniem selektywnego pola magnetycznego, które powinno działać na jeden element bistabilny spośród wielu sąsiednich, bądź które powinno przemagnesowywać element bistabilny w module podczas przejścia w jego pobliżu pojedynczego zęba z materiału magnetycznego, magnesu lub obszaru namagnesowanego. Od skuteczności rozwiązania tego problemu zależy w głównej mierze rozdzielczość i dokładność pomiaru wymienionych wielkości charakteryzujących ruch obrotowy kontrolowanego elementu robota.

Teoretycznie można osiągnąć rozdzielczość pomiaru przemieszczenia liniowego:

- w przypadku modułu Wieganda: 1 impuls/1mm,
- w przypadku płaskich taśm amorficznych: 0,5... 1 impuls/1mm,
- w przypadku spiral z taśm amorficznych: 0,1... 0,3 impulsu/1mm,
- w przypadku drutów amorficznych firmy UNITIKA: 4 impulsy/1mm.

Rozdzielczość tę podano dla pojedynczego szeregu elementów bistabilnych lub innych elementów powodujących przemagnesowywanie elementów bistabilnych.

Rozdzielczość ta może być zwiększona przez umieszczenie na tarczach kilku szeregów przesuniętych względem siebie o część odstępu między sąsiednimi elementami, bądź w taki sposób, jaki jest stosowany obecnie w robotach - za pomocą przekładni wielokrotniającej obroty czujnika w stosunku do obrotów kontrolowanej części robota.

Wybór konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego powinien być poprzedzony badaniami porównawczymi mającymi na celu ocenę właściwości metrologicznych poszczególnych modeli.

W modelach zawierających tarcze kodowe z rozmieszczonymi na nich elementami bistabilnymi należałoby dodatkowo uwzględnić metodę pobierania generowanych impulsów.

Uzupełnienie systemu pomiarowego przetwornikami parametrów ruchu liniowego w płaszczyźnie podstawy stanowiska robota pozwoliłoby określić bezwzględne położenie robota w przestrzeni tego stanowiska.

W zależności od potrzeb związanych z konkretną aplikacją robota należałoby przewidzieć w jego systemie pomiarowym możliwość uzupełnienia zestawu przetworników przetwornikami innych wielkości pomiarowych omawianych w p. 2.

4. Uwagi końcowe.

1. Zjawisko Matteucciego i Wieganda może być wykorzystane w różnorodnych przetwornikach wielkości mechanicznych i elektrycznych, jak również wielkości magnetycznych. Ostatnio daje się zaobserwować tendencja do wszechstronnego użytkowania przetworników z bistabilnymi elementami magnetycznymi polegająca na wykorzystywaniu pojedynczych egzemplarzy zarówno do pomiaru wielkości docelowej np. przemieszczenia mierzonego analogowo, jak i do pomiaru wielkości dodatkowych takich jak siła, ciśnienie, kąt obrotu w ograniczonym zakresie obrotu kontrolowanej części, prądu, częstotliwości, bądź do dyskretnego pomiaru parametrów charakteryzujących ruch liniowy i obrotowy. W tym kierunku zmierzają między innymi prace Instytutu Elektrotechniki Teoretycznej i Miernictwa Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. W związku z tym celowe byłoby nawiązanie z tym Instytutem ścisłej współpracy. Instytut ten bowiem ma w swoim dorobku szereg modeli przetworników z bistabilnymi elementami magnetycznymi, szereg urządzeń do badania tych przetworników, a ponadto rezultaty kilkuletnich badań właściwości bistabilnych elementów magnetycznych łącznie z rezultatami badań trwałości i stabilności ich właściwości fizycznych. Niektóre z udostępnionych do wglądu przez Instytut modeli przetworników podczas prac nad I etapem pracy RP 104.1 mogą być po pewnych zabiegach adaptacyjnych zastosowane w robotach. Dotyczy to między innymi:
 - przetwornika kąta obrotu ze skręcaną podczas pomiaru taśmą amorficzną (pomiar oparty na zjawisku Matteucciego), którego sygnalizowana dokładność jest rzędu 1... 10 minut kątowych,
 - przetwornika siły wykorzystującego odkształcenie sprężyste

pierścienia z taśmy amorficznej,

- przetwornika siły i przemieszczenia mierzonego analogowo, wykorzystującego spiralę z taśmy amorficznej,
- przetwornika, tzw. Magnetometru wykorzystywanego między innymi do pomiarów niektórych wielkości magnetycznych, lub do dyskretnego pomiaru wielkości charakteryzujących ruch liniowy lub kątowy.

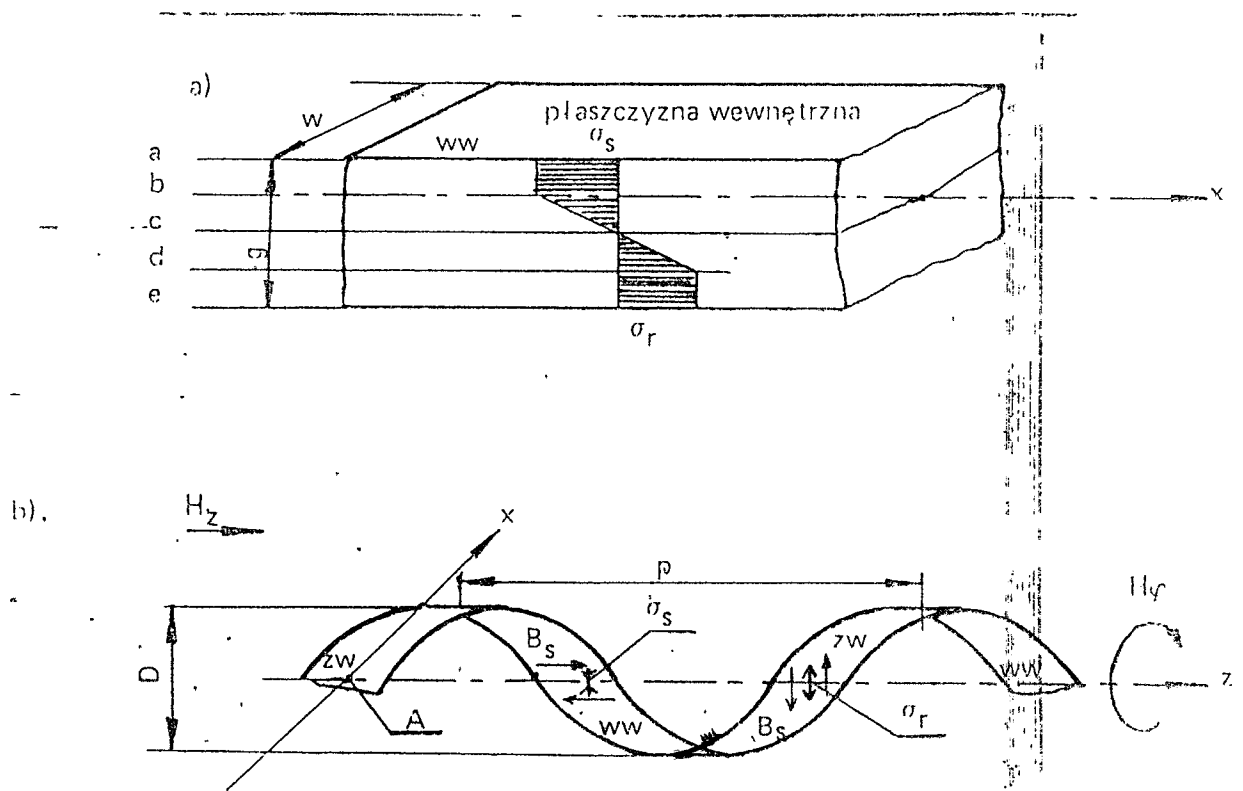
Wydaje się, że współpraca między Przemysłowym Instytutem Automatyki i Pomiarów a Instytutem Elektrotechniki Teoretycznej i Miernictwa Elektrycznego może zaowocować szybko osiągniętymi rezultatami, które będą bardzo użyteczne z punktu widzenia potrzeb proponowanego systemu pomiarowego.

2. Intensywny rozwój przetworników z bistabilnymi elementami magnetycznymi obserwowany od końca lat siedemdziesiątych wymaga nieustannego kontaktu z literaturą zagraniczną. Ze szczególnym uzasadnieniem byłby wyjazd na badania patentowe do Moskwy lub Berlina w celu rozszerzenia dotychczasowych rezultatów rozeznania stanu techniki i dokładniejszego rozeznania obszarów zastosowań bistabilnych materiałów magnetycznych. Badaniami należałoby objąć zbiory patentów z lat 1978 + 1987 pochodzących przede wszystkim z: USA, Japonii, RFN, Wielkiej Brytanii, Francji, a więc z tych krajów, gdzie obserwowany jest największy postęp w dziedzinie wykorzystania bistabilnych materiałów magnetycznych.

3. Wskazane byłoby rozszerzenie zakresu finansowania pracy RP 104.1 i ewentualne przedłużenie czasu wykonania III etapu pracy, którego efektem powinno być wykonanie modeli przetworników. Istnieje bowiem realna szansa zbudowania co najmniej kilku przetworników z bistabilnymi elementami magnetycznymi, niezależnie od tych przetworników, które mogą być uzyskane

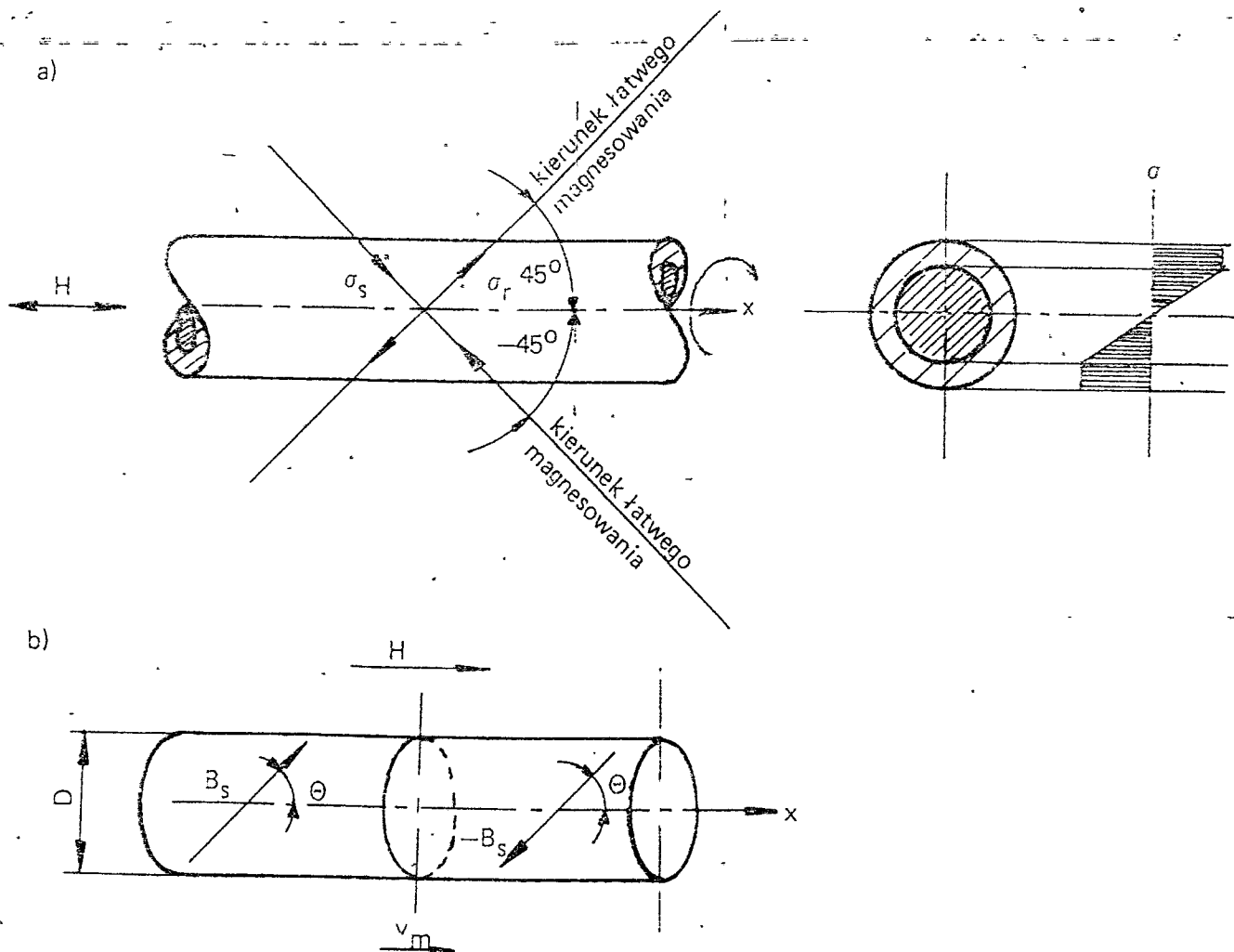
z Instytutu Elektrotechniki Teoretycznej i Miernictwa Elektrycznego w ramach ewentualnie podjętej współpracy.

Ponadto uzasadnione wydaje się sfinansowanie dewizowe zakupu komputera personalnego IBM PC-AT w celu modelowania przetworników, a w szczególności pól magnetycznych w przetwornikach, i oscyloskopu dwustrumieniowego z pamięcią, zdolnego rejestrować co najmniej kilka przebiegów pamięciowych, w celu przeprowadzenia badań modeli.



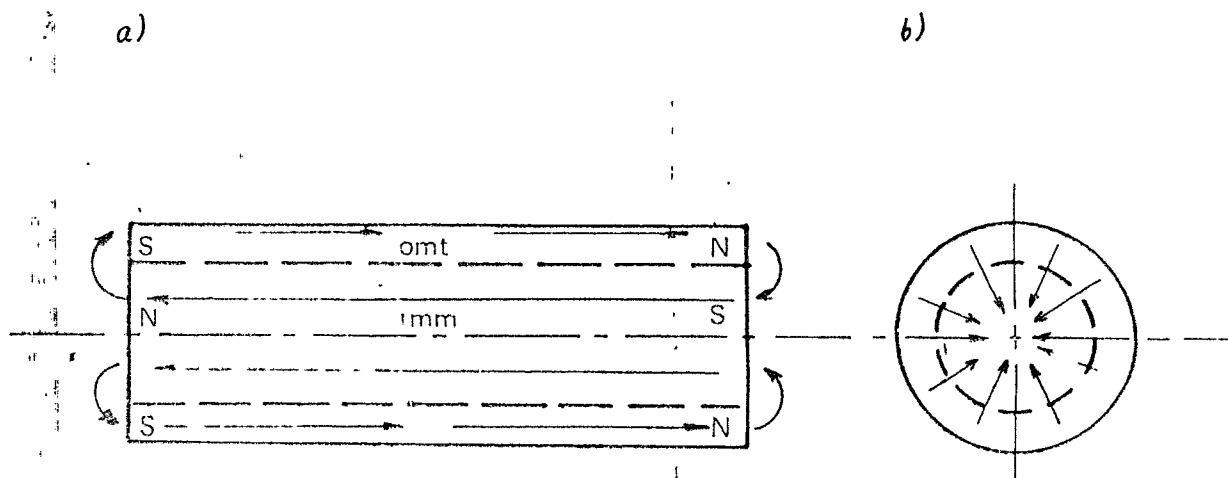
Rys. 4. Model domenowy skręconej i rozciągniętej taśmy amorficznej.

a) rozkład naprężeń w przekroju poprzecznym taśmy, b) rozkład naprężeń na powierzchniach taśmy, σ_s - naprężenia ściskające, σ_r - naprężenia rozciągające, zw - zewnętrzna powierzchnia skręconej taśmy, ww - wewnętrzna powierzchnia skręconej taśmy, B_s - indukcja nasycenia, x - oś taśmy, z - oś spirali z taśmy, A - punkt styczności osi x z powierzchnią zewnętrzną taśmy, g - grubość taśmy, w - szerokość taśmy, D - średnica spirali, H_z - natężenie pola magnetycznego w kierunku osi z taśmy, H_ϕ - natężenie składowej okrężnej pola magnetycznego, p - podziałka zwojowa spirali



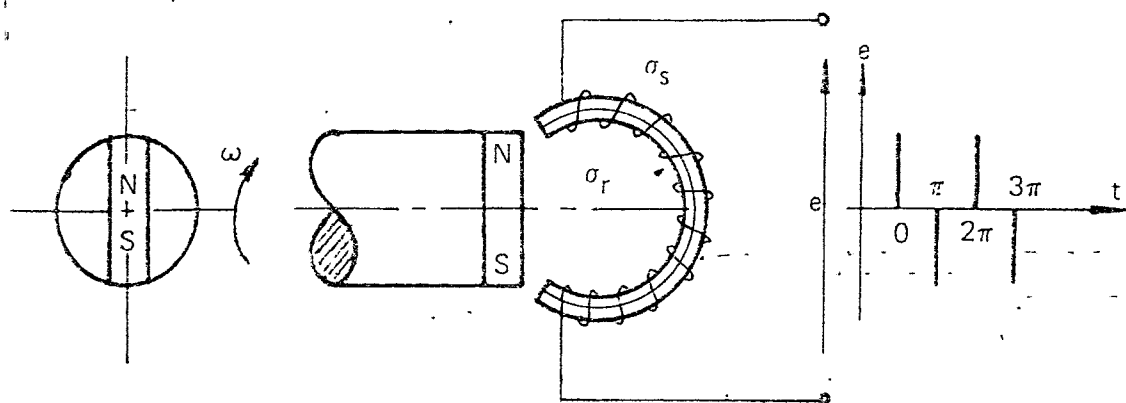
Rys. 2. Zjawisko Barkhausena i Matteucciego w drucie amorficznym.

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 - naprężenia ściskające, σ_r - naprężenia rozciągające.



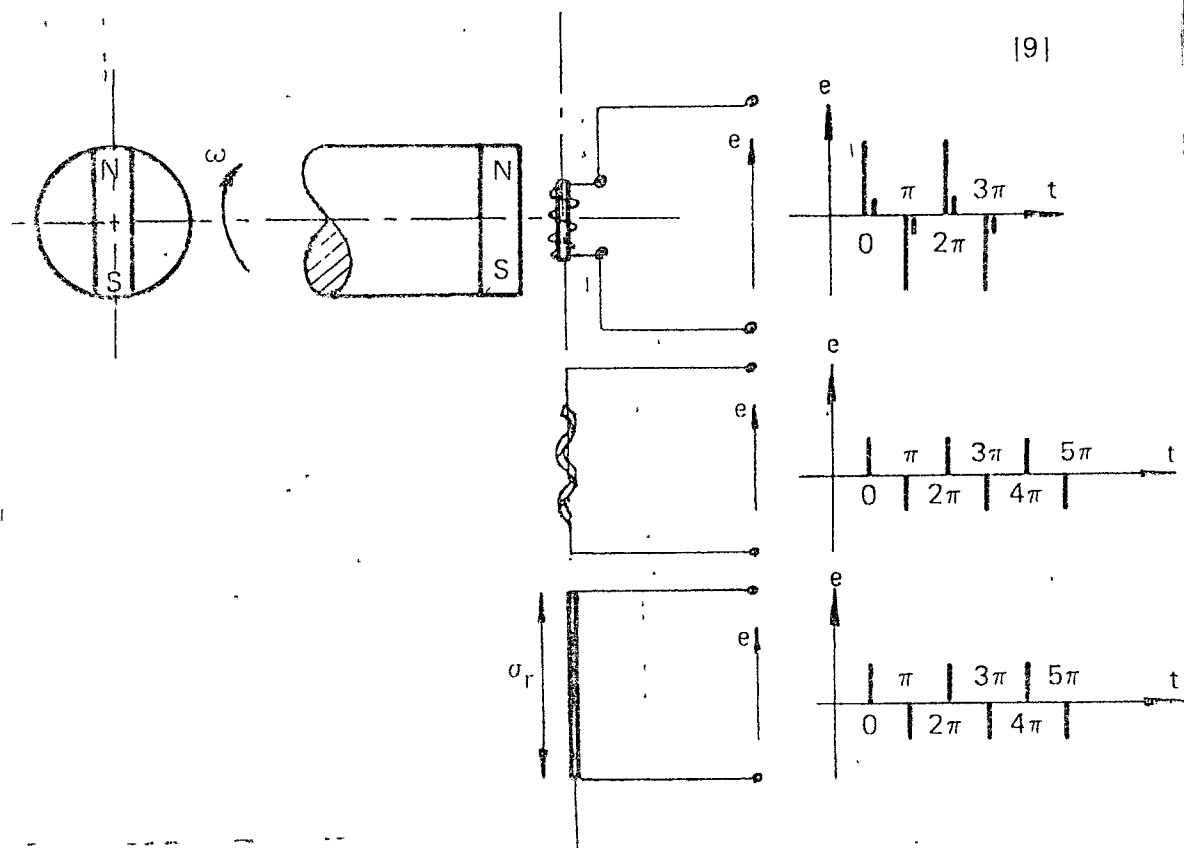
Rys. 3. Model domenowy drutu ferromagnetycznego w module Wieganda.

a) model domenowy, b) rozkład naprężeń, omt - otoczka magnetycznie twarda, rmm - rdzeń magnetycznie miękki, - - - - granica obszarów otoczki i rdzenia.

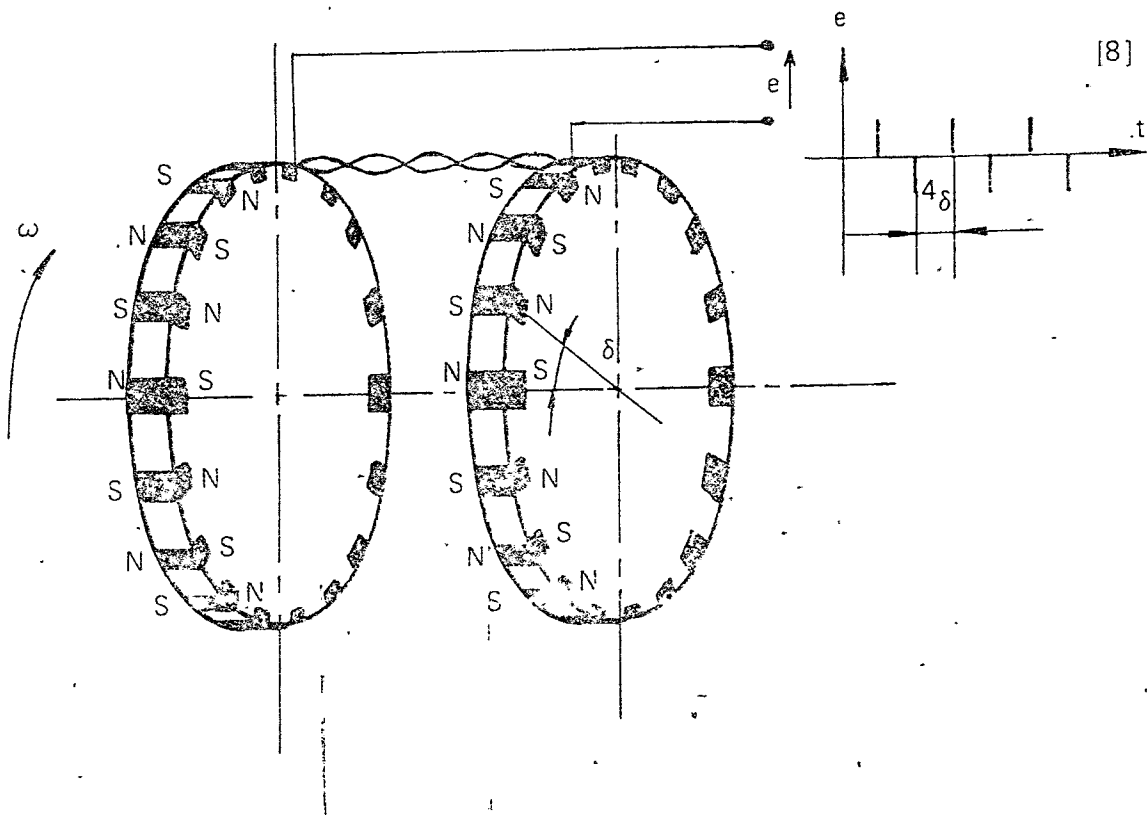


Rys. 4. Przetwornik prędkości kątowej z elementem wykonanym ze sklejonych taśm amorficznych i rozgiętym w celu wprowadzenia pola naprężeń.

σ_s - naprężenia ściskające, σ_r - naprężenia rozciągające.

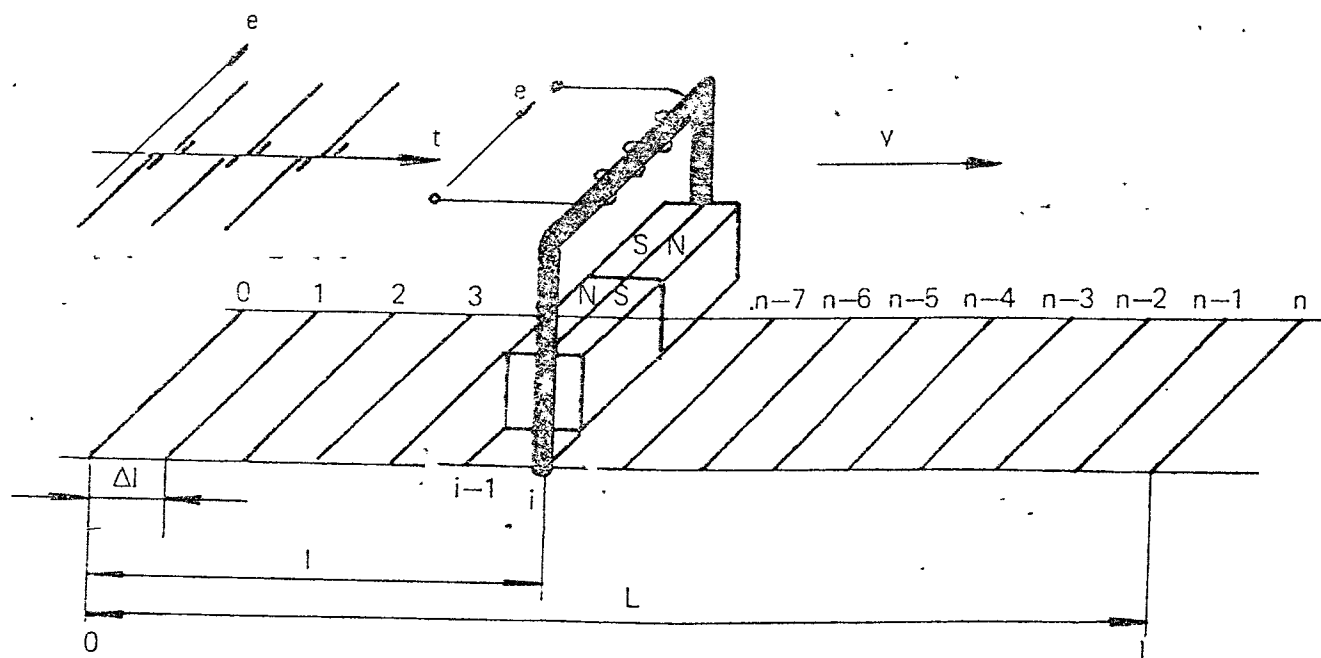


Rys. 5. Przetwornik prędkości kątowej z symetrycznym modułem Wieganda, ze spiralnie skręconą taśmą amorficzną lub z drutem amorficznym.



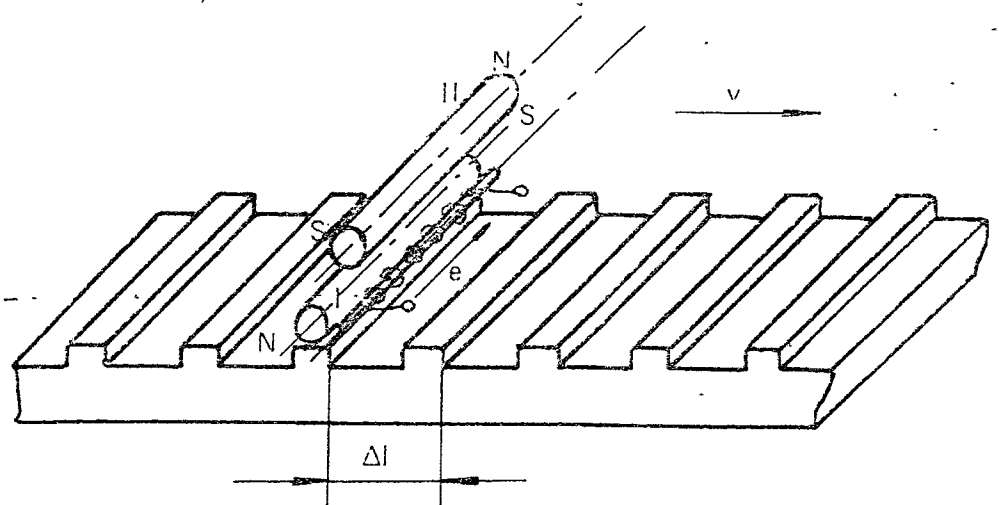
Rys. 6. Przetwornik prędkości i położenia kąowego ze skręconą spiralnie taśmą amorficzną.

ω - prędkość kątowna tarcz z magnesami, δ - kąt między kolejnymi magnesami na obwodzie tarcz, t_g - czas między dwoma kolejnymi impulsami napięcia odpowiadający obrotowi tarcz o kąt δ .



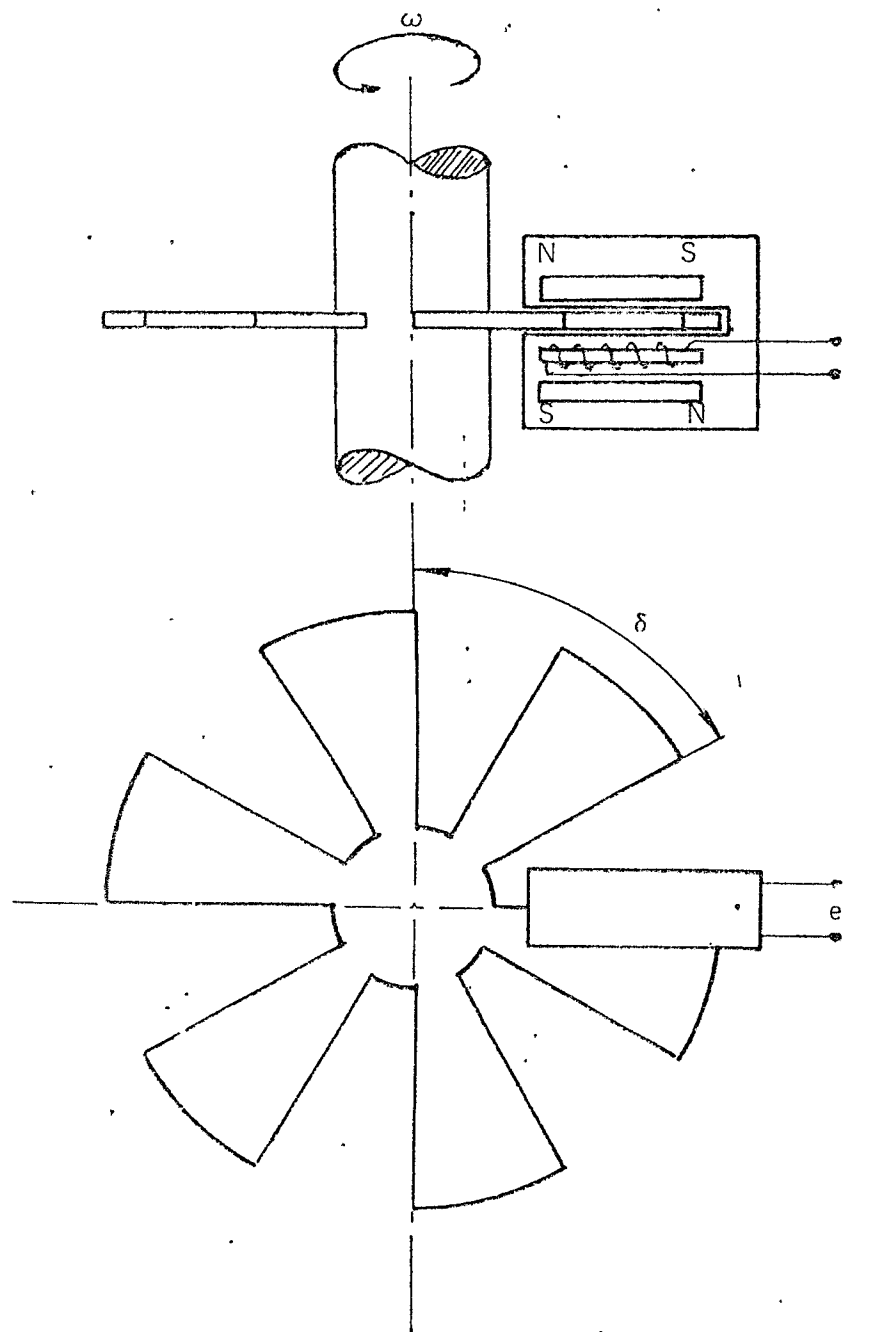
Rys. 7. Przetwornik położenia liniowego, przesunięcia liniowego i prędkości liniowej.

v – prędkość liniowa, l – położenie liniowe, Δl – odstęp między elementami Wieganda, L – długość listwy z elementami Wieganda.

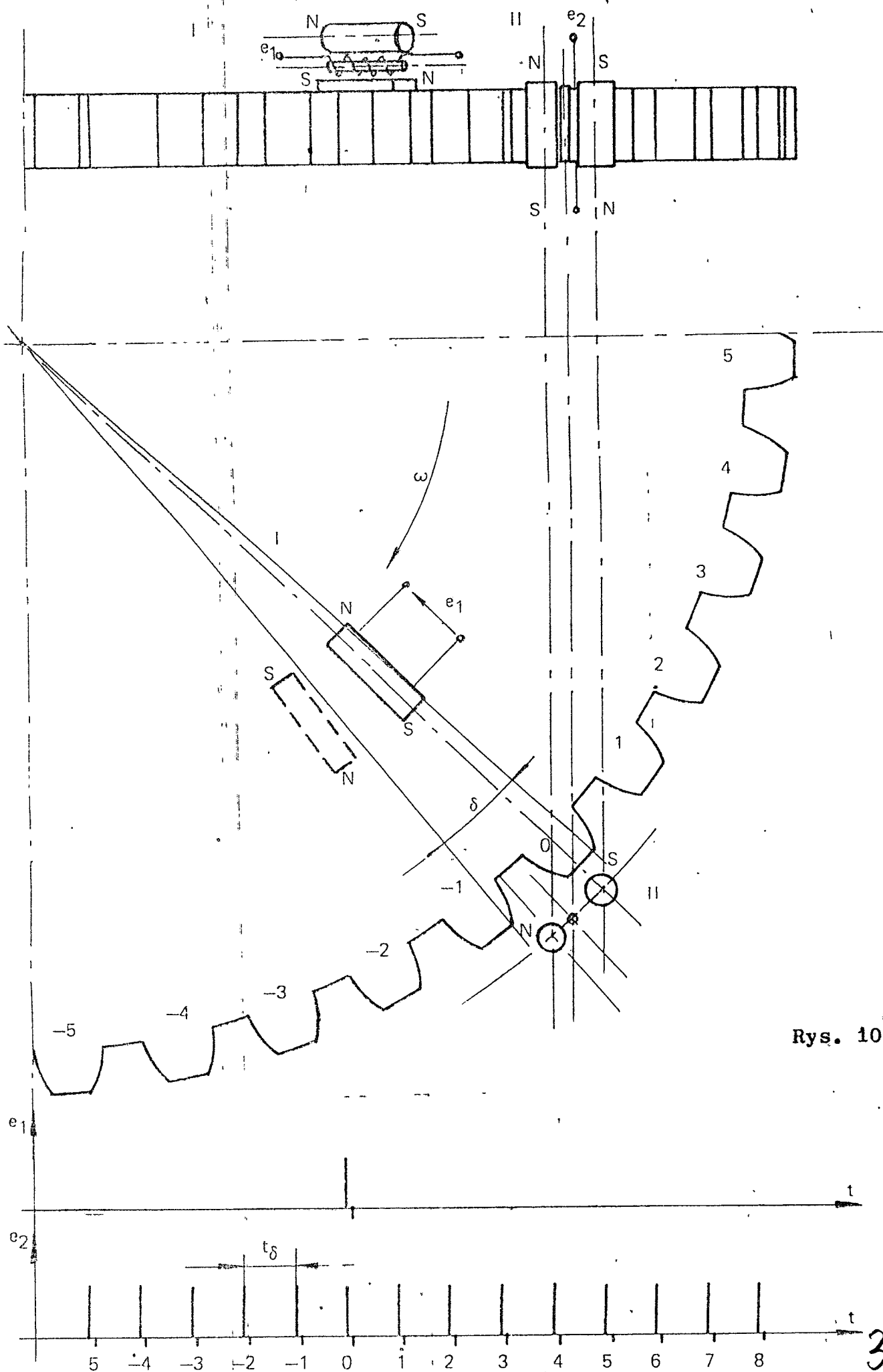


Rys. 8. Przetwornik położenia, przesunięcia i prędkości liniowej.

v - prędkość liniowa, Δl - odstęp między kolejnymi zębami listwy.



Rys. 9. Przetwornik położenia i prędkości kątowej wałka aparatu zapłonowego przeznaczanego dla czterosuwowego silnika o sześciu cylindrach.

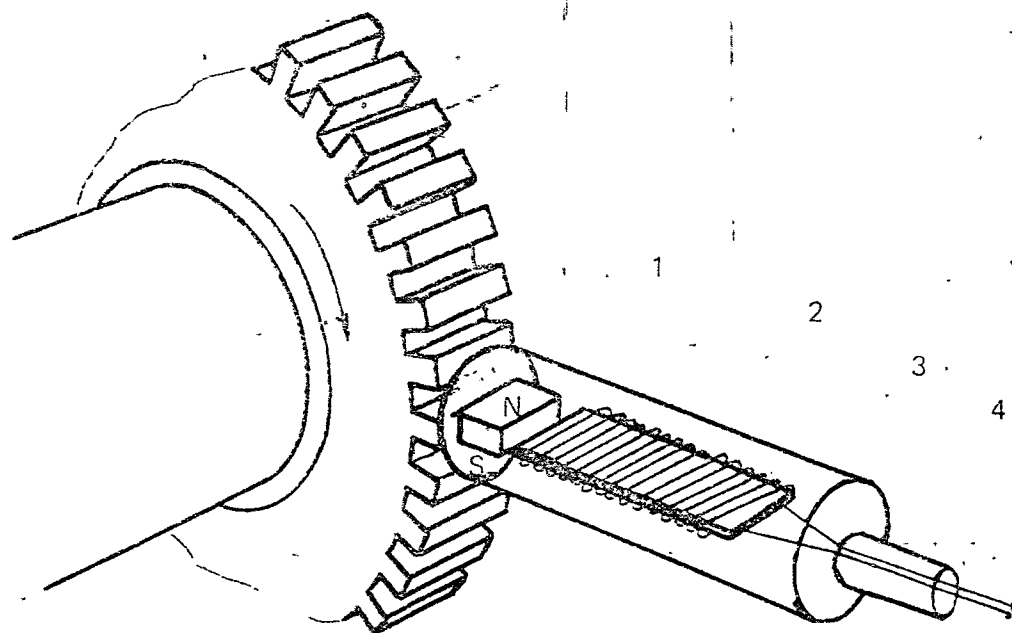


Rys. 10.

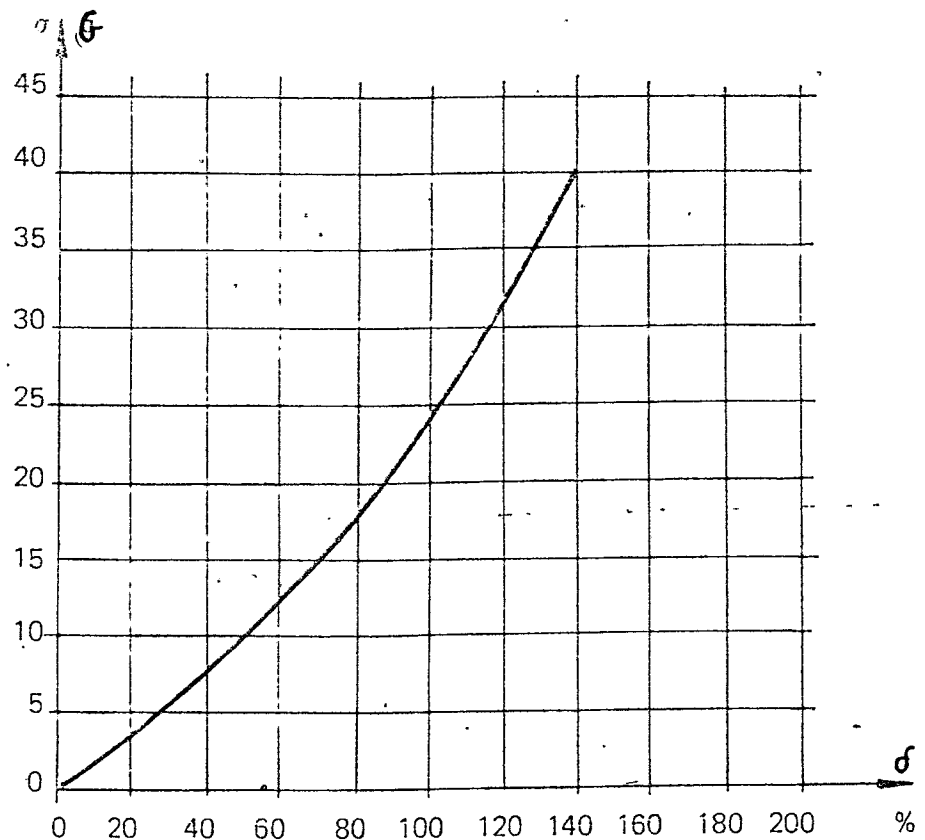
Rys. 10. Przetwornik położenia i prędkości kątowej koła zamachowego z niesymetrycznymi modułami Wieganda.

I - czujnik charakterystycznego położenia koła zamachowego,

II - przetwornik położenia i prędkości kątowej koła zamachowego.

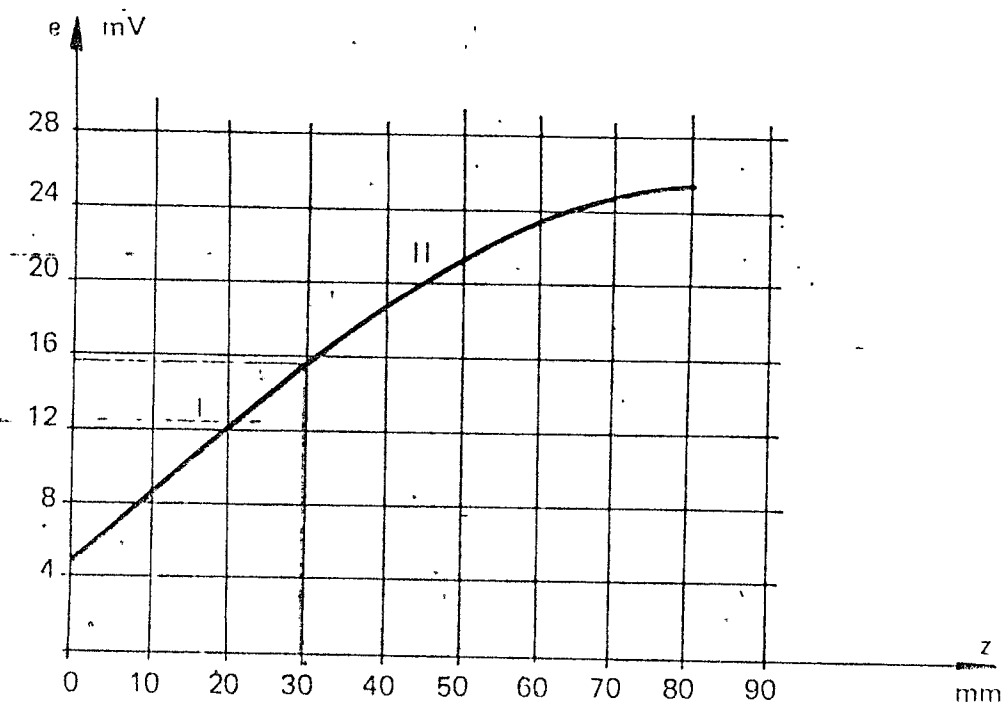


Rys. 11. Przetwornik położenia i prędkości katowej koła magnetycznego z płaską taśmą amortyzującą, wykorzystujący zjawisko Barkhausen.
1 - magnes trwały, 2 - cewka, 3 - płaska taśma amortyzująca, 4 - tuleja z materiału magnetycznego.



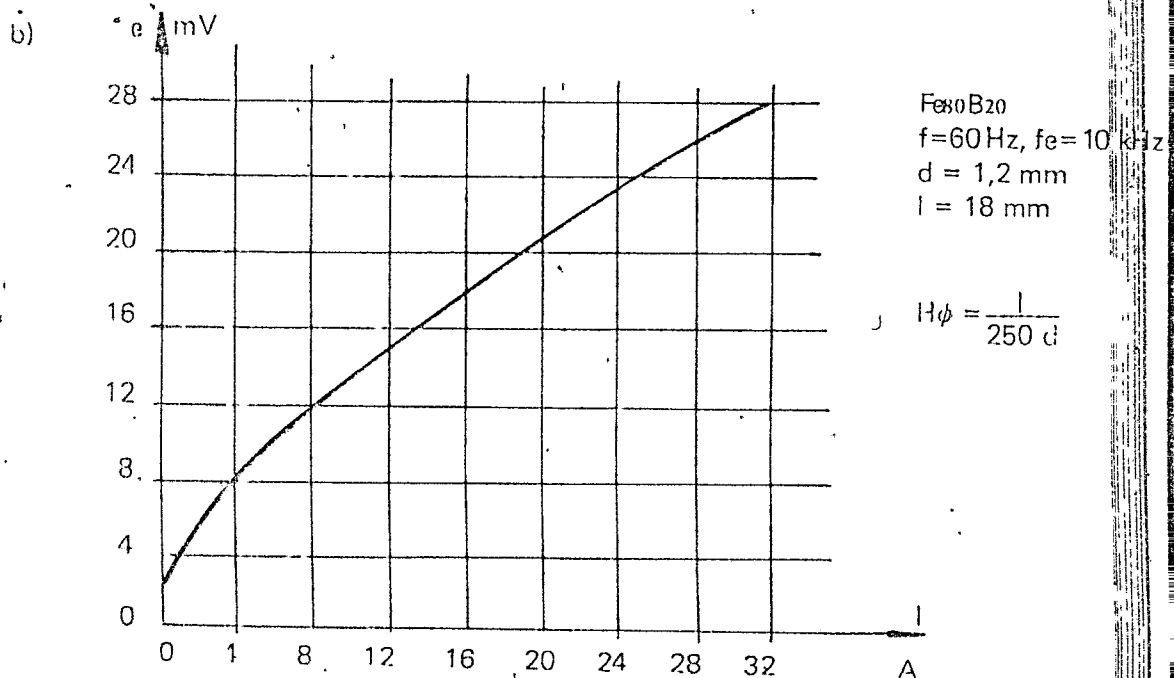
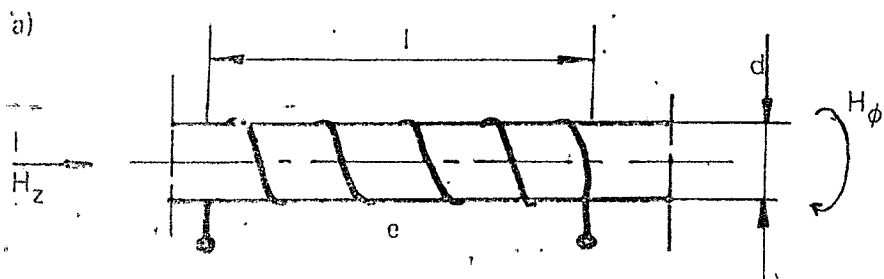
Rys. 12. Charakterystyka sprężystości spirali z taśmy amorficznej.

G - siła w gramach, δ - względne wydłużenie taśmy w %, $l_0 = 57$ mm - długość początkowa taśmy, $D = 1,5$ mm - średnica początkowa spirali, $p = 1,2$ mm - podz. początkowa zwojów spirali.



Rys. 13. Charakterystyka zależności napięcia e indukującego się w taśmie amorficznej od jej wydłużenia ~~względne~~ bezwzględnego z .

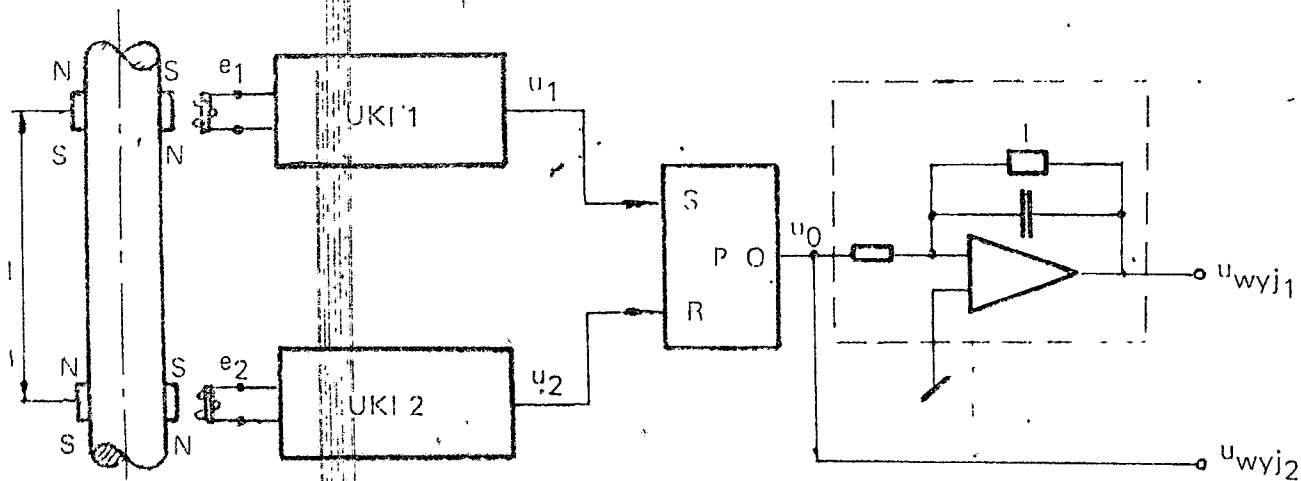
$f_c = 10$ kHz - częstotliwość prądu w przewodzie, $H_m = 20$ Oe - amplituda natężenia H_z pola przemagnesowującego, $f = 60$ Hz - częstotliwość przemagnesowywania taśmy, I - liniowa część charakterystyki, II - nieliniowa część charakterystyki.



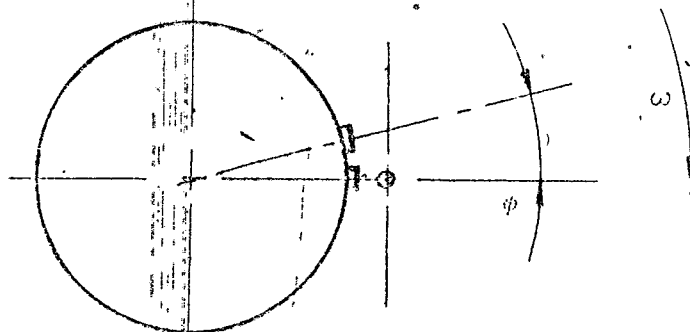
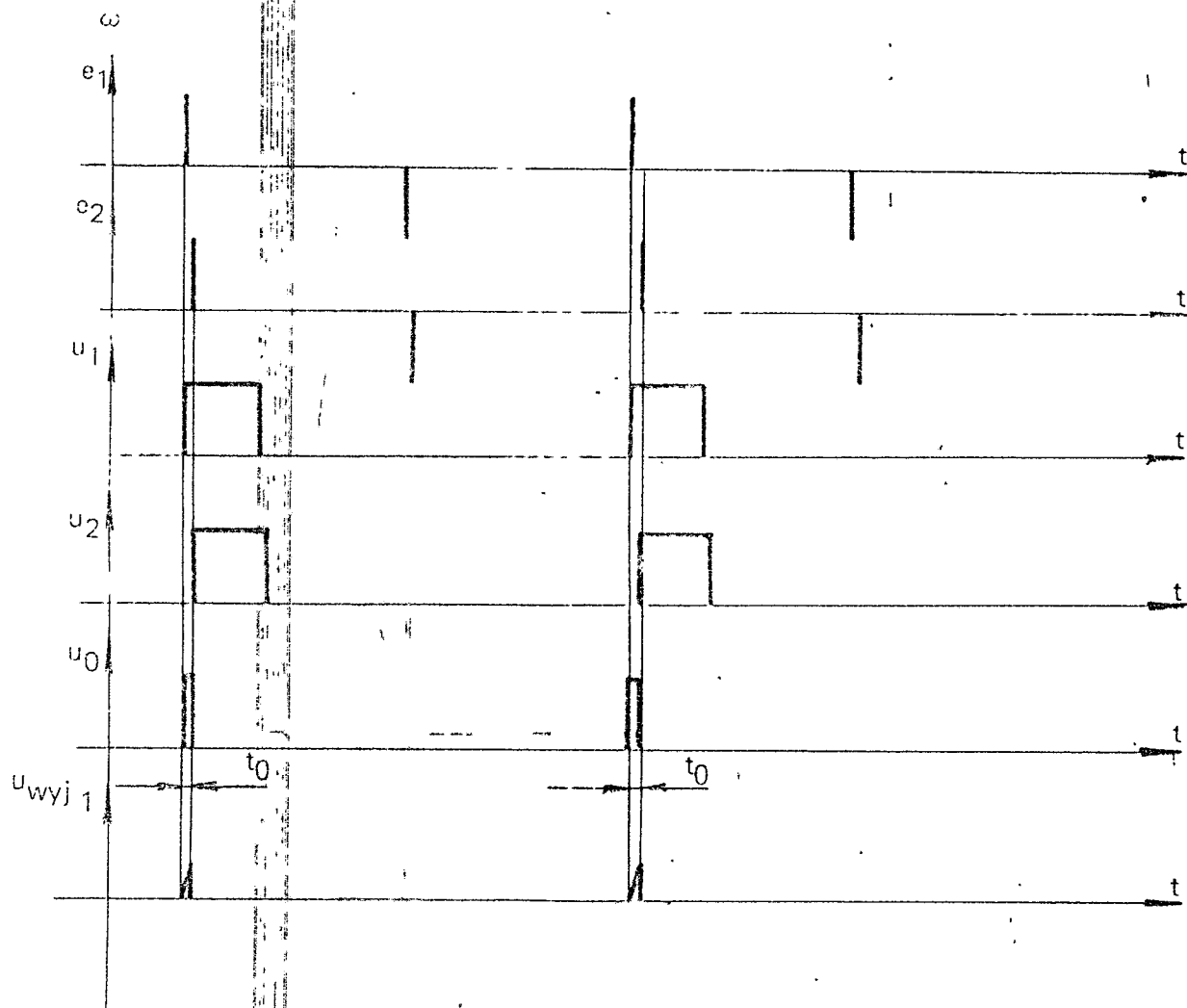
Bys. 14. Przetwornik prądu zmiennego.

a) schemat przetwornika, b) charakterystyka przetwarzania przetwornika mierzącego prąd o częstotliwości 60 Hz.

a) a)



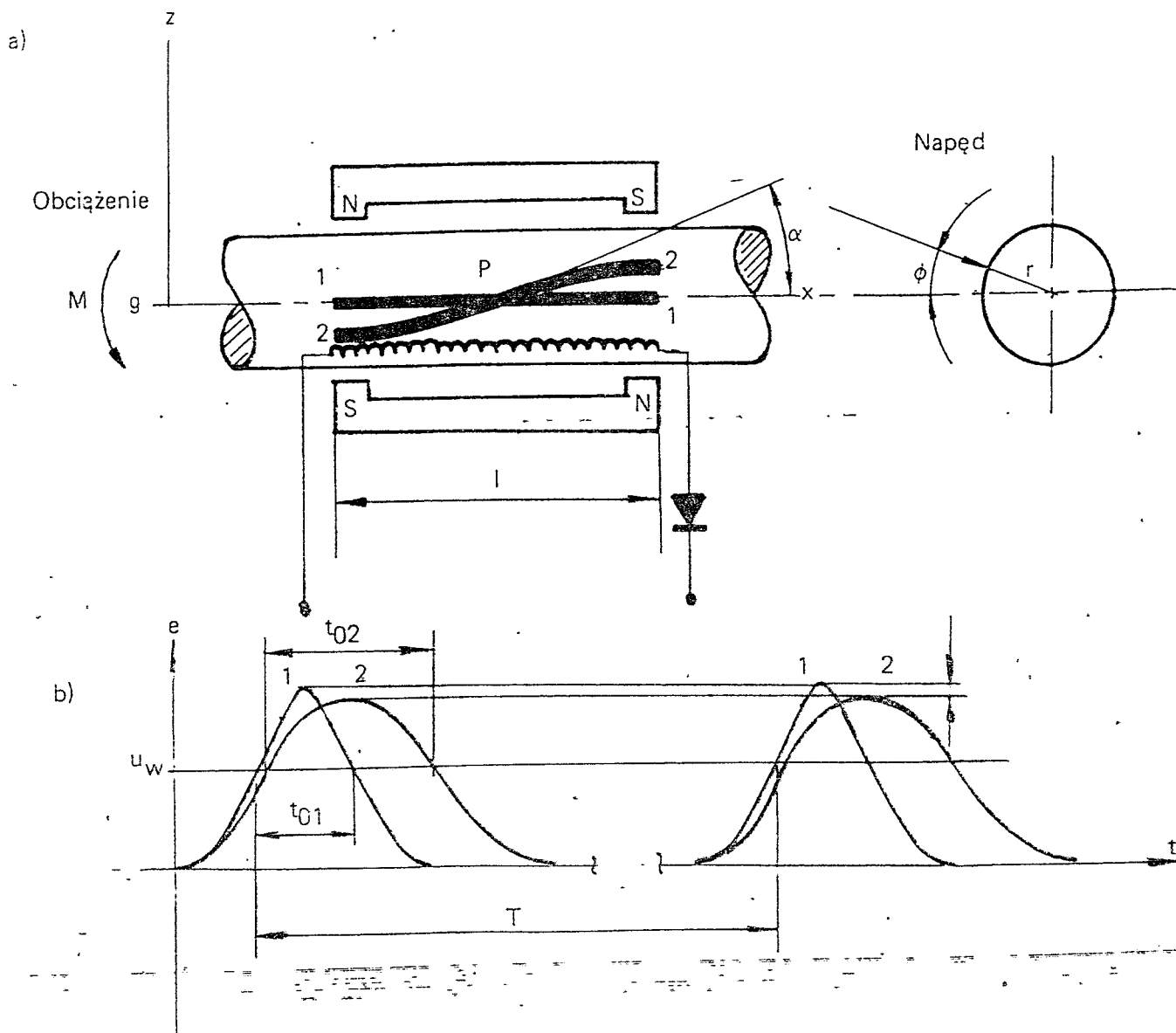
b)



Rys. 15.

Rys. 15. Przetwornik momentu obrotowego z symetrycznymi modułami Wieganda.

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 UKI1, u_2 - napięcie na wyjściu drugiego układu kształtowania impulsów UKI2, u_0 - napięcie na wyjściu przerzutnika RSQ, u_{wyj1} - napięcie na wyjściu układu całkującego, $u_{wyj2} = u_0$, t_0 - czas upływający od chwili pojawienia się impulsu e_1 do chwili pojawienia się impulsu e_2 , ω - prędkość kątowna wału, I - układ całkujący, ϕ - kąt skręcenia wału na odcinku o długości l .



Rys. 16. Przetwornik momentu obrotowego z pojedynczym elementem Wieganda.

a) ilustracja zasady działania przetwornika, b) przebiegi sygnałów napięciowych, M - moment obrotowy, U_w - napięcie odniesienia, t_0 - czas, w którym napięcie impulsu wytwarzanego przez cewkę L jest większe od napięcia U_w , T - okres jednego obrotu wału, 1 - indeks wielkości mierzonych przy $M = 0$, 2 - indeks wielkości mierzonych przy $M \neq 0$, α - kąt skręcenia elementu Wieganda, ϕ - kąt skręcenia wału na odcinku o długości $l/2$, l - długość elementu Wieganda.