

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

Ośrodek Pomiarów Ruchu i Czasu

074

A

Główny wykonawca mgr inż. Jerzy Justat

Wykonawcy mgr inż. Marian Fabrycy
mgr inż. Maciej Wiernicki

Konsultant

Nr zlecenia RP-104.2

Zadanie 1.1
"Rozpoznanie stanu techniki i opracowanie koncepcji wykorzystania efektu w czujnikach"

"Zbadanie możliwości wykorzystania efektu magnetostrykcji, efektu Wiganda i efektu Mottoucciego oraz budowa i badania modeli czujników wykorzystujących te efekty, przeznaczonych do budowy robotów i ich aplikacji".
Temat: Zbadanie możliwości wykorzystania efektu magnetostrykcji do budowy czujników momentu.

Zleceniodawca Centralny Plan Badawczo-Rozwojowy 7.1.

Pracę rozpoczęto dnia 86.09

zakończono dnia 87.03

Kierownik Pracowni

Z-ca Dyrektora
d/s Pomiarów

wz.kierownika Ośrodka

mgr inż. M. Fabrycy

dr inż. J. Winiecki

mgr inż. E. Suchocki

Praca zawiera:

Rozdzielnik - ilość egz:

stron 39

Egz. 1 BOINTE

rysunków 14

Egz. 2 SN

fotografii

Egz. 3 ORC

tabel. 1

Egz. 4

tablic

Egz. 5

załączników

Egz. 6

Nr rejestr. 5805

Analiza deskrypcyjowa Czujnik momentu: magnetostrykcja :
stan techniki.

Analiza dokumentacyjna Omówiono występujące zjawiska fizyczne i
przedstawiono wybrane konstrukcje czujników
na podstawie studiów literaturowych.

Tytuły poprzednich sprawozdań

UKD

PIAP-252/83-6000

SPIS TREŚCI

1. INFORMACJE OGÓLNE	str.3
1.1. Cel pracy	str.3
1.2. Podstawa wykonania pracy	str.3
1.3. Zakres pracy	str.3
2. WSTĘP	str.3
3. OPIS ZJAWISK FIZYCZNYCH	str.4
3.1. Magnetostrykcja	str.4
3.2. Zjawiska fizyczne zachodzące w wale obciążonym momentem skrecającym	str.6
4. ZASADA DZIAŁANIA MAGNETOSTRYKCYJNEGO CZUJNIKA MOMENTU	str.7
5. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA DOKŁADNOŚĆ POMIARU MOMENTU	str.8
5.1. Wpływ zmian częstotliwości i napięcia zasilającego układ wzbudzający	str.8
5.2. Wpływ histerezy magnetosprężystej	str.8
5.3. Wpływ temperatury	str.9
5.4. Wpływ zewnętrznych pól magnetycznych	str.9
5.5. Wpływ bicia wału na sygnał wyjściowy	str.9
5.6. Wpływ prądów wirowych	str.10
5.7. Wpływ prędkości obrotowej wału	str.10
6. KONSTRUKCJE MAGNETOSTRYKCYJNYCH CZUJNIKÓW MOMENTU	str.10
6.1. Konstrukcje o znanych wynikach badań	str.10
6.1.1. Uwagi wstępne	str.10
6.1.2. Czujnik z rdzeniem, mostkowy	str.11
6.1.3. Czujnik z rdzeniem różnicowy	str.11
6.1.4. Czujnik wielobiegunowy	str.11
6.1.5. Czujnik z warstwą amorficzną	str.11
6.2. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych	str.11
6.2.1. Uwagi wstępne	str.11
6.2.2. Czujnik pierścieniowy wg patentu USA Nr.4364278 z 1981r. str.11	str.11

6.2.3. Czujnik momentu wg patentu USA Nr.4414855 z 1983r	str.1'
6.2.4. Czujnik momentu wg patentu ZSRR Nr.838448 z 1981r.....	str.2
7. WNIOSKI1.....	str.2'
8. LITERATURA	str.2

1. INFORMACJE OGÓLNE.

1.1. Cel pracy.

Celem pracy jest zbadanie możliwości wykorzystania efektu magnetostrykcji do budowy czujników momentu.

W etapie 1.1 przeprowadzono rozpoznanie stanu techniki w oparciu o patenty i artykuły w których opisano budowę czujników momentu.

1.2. Podstawa wykonania pracy.

Praca jest realizowana na zlecenie Nr. RP-104,2 w Centralnym Planie Badawczo-Rozwojowym 7.1. "Roboty Przemysłowe".

1.3. Zakres pracy.

Etap 1.1 pracy obejmuje rozeznanie tematu i opracowanie koncepcji wykorzystania efektu w czujnikach.

W oparciu o etap 1.1 zostanie opracowane i wykonane stanowisko badawcze i modele czujników momentu oraz założenia techniczno-ekonomiczne i model użytkowy.

2. WSTĘP

Zjawisko magnetostrykcji, zbadane w latach trzydziestych naszego stulecia, znalazło zastosowanie w układach pomiarowych różnych wielkości mechanicznych np: naprężeń, siły, ciśnienia, masy, momentu obrotowego.

Podstawowe zalety czujników magnetostrykcyjnych wyróżniające je w stosunku do innych np: tensometrycznych, indukcyjnych, pojemnościowych to prosta konstrukcja, silny sygnał wyjściowy i wysoka niezawodność.

Istnieje kilka metod pomiaru momentu obrotowego. Ich krótką charakterystykę przedstawiono poniżej.

Metoda pomiaru momentu wykorzystująca reakcję ułożyskowania zamocowania silnika charakteryzuje się dużym wpływem zakłóceń sygnału pomiarowego od zmian dynamicznych.

Metoda optyczna polega na pomiarze przesunięć przekrojów osiowych. Wymaga ona precyzyjnego mechanicznego ustawienia detektora przesunięcia, jest wrażliwa na drgania i praktycznie może być stosowana tylko w pomiarach laboratoryjnych.

Metoda wykorzystująca tensometry rezystancyjne jest dobrą metodą laboratoryjną przy pomiarach momentu w warunkach statycznych, lecz wymaga specjalnego układu szczotek przy pomiarach na wale obracającym się.

Obniża to niezawodność i dokładność pomiaru. Niekorzystnym zjawiskiem jest też występowanie dryftu oraz konieczność stosowania drogich analogowych urządzeń przetwarzających.

Podstawowymi zaletami magnetostrykcyjnej metody pomiaru momentu są: pomiar bezstykowy, wartość konstrukcji czujników, możliwość uzyskania liniowej charakterystyki, niski koszt wytwarzania, możliwość szerokiego zastosowania w przemyśle.

Przykładowe zastosowania to badanie i pomiar obciążenia wału silnika okrętowego, wałów turbin energetycznych, kontrola obciążenia napędów pojazdów itp. Najwięcej opracowań konstrukcji przetworników momentu powstało w latach osiemdziesiątych w USA, ZSRR, RFN.

3. OPIS ZJAWISK FIZYCZNYCH.

3.1. Magnetostrykcja.

Zjawisko magnetostrykcji obejmuje wszystkie zjawiska związane z oddziaływaniem między wielkościami magnetycznymi a naprężeniami mechanicznymi i odkształceniami.

W przypadku konstrukcji czujników momentu wykorzystuje się zjawisko Villariego [1] polegające na zmianie właściwości magnetycznych pod wpływem zewnętrznych naprężeń mechanicznych. Zjawisko to dotyczy ciał ferromagnetycznych. Dokładnie opisuje je teoria magnetosprężystości [1]. Wynika z niej, że jeżeli próbkę materiału ferromagnetycznego umieścimy w polu magnetycznym i wywołamy naprężenia poprzez przyłożenie do niej siły, to zmieni się przenikalność magnetyczna badanego materiału. Dla materiałów o magnetostrykcji dodatniej naprężenia ściskające powodują zmniejszenie przenikalności magnetycznej a naprężenia rozciągające jej wzrost.

Z zależności przedstawionych w cytowanej pracy [1] wynika, że względna zmiana przenikalności $\delta\mu = \frac{\Delta\mu}{\mu}$ jest proporcjonalna do przenikalności przed obciążeniem μ oraz naprężeń σ , ponadto jest proporcjonalna do magnetostrykcji nasycenia λ_{∞} , a odwrotnie proporcjonalna do kwadratu indukcji magnetycznej B_{∞}^2 przy nasyceniu

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \gamma\mu = \frac{2\lambda_{\infty}}{B_{\infty}^2} \mu \sigma$$

Ze wzoru wynika, że na czujniki magnetostrykcyjne należy wybierać materiały o dużej przenikalności magnetycznej μ , dużym współczynniku magnetostrykcji nasycenia λ_{∞} , małej indukcji nasycenia B_{∞} .

Parametrem, który najlepiej charakteryzuje ~~z~~ materiał na czujniki magnetostrykcyjne jest czułość magnetosprężysta.

$$S_{\mu} = \frac{\delta\mu}{\sigma} = \frac{2\lambda_{\infty}}{B_{\infty}^2} \mu$$

Wartość współczynnika S_{μ} może wynosić 200 do 300.

Daje to czułość około 100 razy większą [1] od współczynnika czułości dla materiałów stosowanych na tensometry /prawdopodobnie drutowych/. Materiały mające najlepsze parametry magnetostrykcyjne to materiały amorficzne i magnetycznie miękkie.

3.2. Zjawiska fizyczne zachodzące w wale obciążonym momentem skręcającym.

Przy pomiarze momentu skręcającego istotny jest rozkład naprężeń powstający w materiale wału w czasie obciążenia. W przekrojach poprzecznych skręcanego pręta kołowego występują naprężenia styczne /rys.1/, które wyznacza się ze wzoru

$$\tau_{\varrho} = \frac{M_{\alpha} \varrho}{J_0}$$

M_{α} - moment skręcający w danym przekroju pręta

ϱ - odległość biegunowa punktu, w którym wyznaczamy naprężenia

J_0 - biegunowy moment bezwładności pola przekroju poprzecznego względem jego środka

Rozkład naprężeń stycznych wzdłuż promienia przekroju poprzecznego pręta jest liniowy [2], naprężenie styczne w punkcie K przekroju poprzecznego jest prostopadłe do promienia przechodzącego przez ten punkt, a największe naprężenia styczne w danym przekroju poprzecznym występują w punktach położonych na jego obwodzie.

$$\tau_{max} = \frac{M_{\alpha} \varrho_{max}}{J_0}$$

W przekrojach nachylonych pod dowolnym kątem φ do osi podłużnej pręta /rys.2/ występują naprężenia normalne σ_{φ} i styczne τ_{φ} , które wyznacza się ze wzorów:

$$\sigma_{\varphi} = \tau_{\varphi} \sin 2\varphi \qquad \tau_{\varphi} = \tau_{\varphi} \cos 2\varphi$$

Naprężenia normalne w danym punkcie K skręcanego pręta osiągają wartości ekstremalne w tym punkcie, gdy odpowiadające tym naprężeniom dwie wzajemnie prostopadłe płaszczyzny przekrojów nachylone są do osi, pod kątem $\varphi = 45^{\circ}$ i $\varphi = 135^{\circ}$.

Naprężenia główne w danym punkcie K pręta skręcanego równe są do wartości naprężeniom stycznym w punkcie K przekroju poprzecznego.

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{\varphi} = \frac{M_x}{J_0} \rho$$

Naprężenia główne osiągają największe wartości w punktach najdalej odległych od osi pręta /w punktach na powierzchni pręta skręconego/ i wynoszą:

$$\sigma_{\max} = \pm \tau_{\max}$$

Naprężenie główne σ_1 jest naprężeniem rozciągającym a naprężenie σ_2 jest naprężeniem ściskającym.

Naprężenia styczne w przekrojach głównych są równe zeru.

4. ZASADA DZIAŁANIA MAGNETOSTRYKCYJNEGO CZUJNIKA MOMENTU.

Przykładowy układ czujnika magnetostrykcyjnego [3] przedstawiono na rys.3. Nadajnik 1 /obwód magnetyczny z rdzeniem typu U/ zasilany jest napięciem zmiennym z generatora.

W wale z materiału magnetycznego /głównie stале wysokowęglowe/ zostaje wzbudzony wzdłuż jego osi strumień magnetyczny, który zamyka się poprzez powierzchnię wału i końce rdzenia.

W przypadku gdy wał jest izotropowy i jeśli moment skręcający nie występuje, strumień rozdziela się równocześnie po obu

stronach prostej łączącej bieguny rdzenia wzbudzającego P_1 i P_2 . Gdy wał obciążony się momentem skręcającym to strumień zostanie odchylony w kierunku łatwego magnesowania. Kierunek działania naprężeń rozciągających powodujących zmniejszenie reluktancji nachylony jest pod kątem 45° do osi wału. W kierunku działania naprężeń ściskających następuje wzrost reluktancji.

W wyniku tego w uzwojeniu pomiarowym na końcach S_1 S_2 powstaje SEM. Elektrycznym odpowiednikiem tego typu czujnika jest mostek Wheatstone'a, którego rezystancje zastąpione są reluktancjami odcinków wału znajdujących się między biegunami pierwszego i drugiego rdzenia /odcinki $P_1 S_1$, $P_1 S_2$, $P_2 S_1$, $P_2 S_2$ /.

5. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA DOKŁADNOŚĆ POMIARU MOMENTU.

Przedstawiony w punkcie 4 przykładowy układ czujnika do pomiaru momentu zawiera szereg źródeł błędów wpływających na dokładność pomiaru. Poniżej omówiono przyczyny powstania błędów oraz zasygnalizowano sposoby ich eliminacji.

5.1. Wpływ zmian częstotliwości/napięcia zasilającego układ wzbudzający.

Wahania częstotliwości/napięcia powodują zmianę natężenia pola magnetycznego, co powoduje odchylenie przebiegu charakterystyki czujnika, wskutek czego powstają błędy wskazań. W celu zmniejszenia błędów należy wprowadzać stabilizatory napięcia i częstotliwości.

5.2. Wpływ histerezy magnetosprężystej.

Histereza magnetosprężysta powoduje, że charakterystyka czujnika wyznaczona przy zwiększeniu obciążenia różni się

od charakterystyki wyznaczonej przy stopniowym zmniejszaniu obciążenia. W skład histerezy magnetoelastycznej wchodzi sprężysta histereza materiału wału i histereza magnetyczna. Zmniejszenie wpływu histerezy sprężystej można uzyskać poprzez dobór materiału wału tak aby jego granica sprężystości była 6 + 7 razy większa od odkształceń sprężystych powodowanych obciążeniem wału [4] oraz przez formowanie mechaniczne materiału /cykliczne obciążenie wału/.

Wpływ histerezy magnetycznej można zmniejszyć przez dobór materiału o wąskiej pętli histerezy oraz charakteryzującego się małymi stratami na przemagnesowanie.

5.3. Wpływ temperatury.

Wahania temperatury w obszarze działania czujnika powodują zmianę przenikalności magnetycznej materiału rdzenia w czujniku, oraz ~~zmianę~~ zmianę rezystancji uzwojeń cewek pomiarowych. Błąd eliminuje się poprzez zastosowanie układów kompensacyjnych np: pomiar mostkowy, stosowanie boczników.

5.4. Wpływ zewnętrznych pól magnetycznych.

Zewnętrzne pole magnetyczne ma wpływ na pomiar w wypadku pola zakłócającego o dużym natężeniu.

Wpływ pola zakłócającego można wyeliminować poprzez stosowanie ekranów magnetycznych i materiału którego nasycenie magnetyczne następuje w silnych polach magnetycznych.

5.5. Wpływ bicia wału na sygnał wyjściowy.

Bicie wału powoduje zmianę wielkości szczeliny powietrznej między cewkami pomiarowymi, a powierzchnią wału co powoduje zmianę reluktancji i wpływa na zmianę sygnału wyjściowego. Wadę tę eliminuje się poprzez odpowiednią konstrukcję czuj-

11

nika zapewniająca komensację zmian szczeliny powietrznej.

5.6. Wpływ prądów wirowych.

Prądy wirowe są indukowane przez pole elektromagnetyczne. Własne pole magnetyczne prądów wirowych zmniejsza efektywną przenikalność magnetyczną co zmniejsza czułość przetwornika. W celu zmniejszenia wpływu prądów wirowych stosuje się pokrycia wału materiałami o bardzo małej przewodności właściwej i grubości $/2 - 100 \mu m/$.

5.7. Wpływ prędkości obrotowej wału.

W przydku zmiany prędkości obrotowej wału następuje pogorszenie liniowości charakterystyki czujnika, błąd może dochodzić do kilku procent przy dużych prędkościach obwodowych /rzędu kilku metrów na sekundę/.

Przyczyną tego zjawiska jest powstanie poprzecznego pola magnetycznego na powierzchni wału.

Zmniejszenie wpływu tego zjawiska można uzyskać poprzez zwiększenie częstotliwości napięcia wzbudzającego, wprowadzenie układów kompensacyjnych.

6. KONSTRUKCJE MAGNETOSTRYKCYJNYCH CZUJNIKÓW MOMENTU.

6.1. Konstrukcje o znanych wynikach badań.

6.1.1. Uwagi wstępne.

W punkcie 6.1.2. przedstawiono konstrukcję czujników ^{momentu} i wyniki ich badań opublikowane w literaturze zagranicznej w latach osiemdziesiątych.

6.1.2. Czujnik z rdzeniem, mostkowy.

Czujnik, którego zasadę działania opisano w punkcie 4 charakteryzuje się dużą zależnością sygnału od bicia wału. Wykonanie czujnika w ten sposób, że bieguny wzbudzające będą obejmowały wał na średnicy, spowoduje kompensację zmian wymiaru szczeliny to znaczy wzrost jednej szczeliny spowoduje zmniejszenie drugiej szczeliny.

Badania takiego czujnika opisuje Villigen [5].

Rys.3a przedstawia schemat połączeń cewek w czujniku, a rys.3b układ elektroniczny pozwalający na wykrywanie kierunku obrotu wału i przetwarzający sygnał z czujnika na sygnał liniowy proporcjonalny do momentu obrotowego.

Zasada działania jest następująca: Sygnał zmienny pomiarowy U_S proporcjonalny do momentu jest wzmacniany i podawany do prostownika fazoczułego.

W wyniku tego na wyjściu otrzymuje się napięcie U_A stałe dodatnie lub ujemne. Przeprowadzono szereg badań.

Wykres Rys.4 przedstawia zależność sygnału $U_S = f(M)$, $U_A = f(M)$ dla warunków statycznych n /liczba obrotów/ = 0. Z wykresu wynika, że charakterystyka $U_S = f(M)$ jest nieliniowa i sygnał z czujnika dopiero po przetworzeniu w układzie elektronicznym staje się liniowy.

Wyraźnie widoczna jest histereza ΔU_A . Rysunek 5 przedstawia zmianę sygnału U_A w zależności od położenia kąтового czujnika na obwodzie wału. Pomiarów dokonywano na odcinku 200mm co 20mm przy momencie $M = 0$.

Z wykresu widać wyraźny wpływ niejednorodności materiału wału na sygnał wyjściowy U_A . Wahania napięcia wyjściowego przekraczały 100%. Zakłócenia te są spowodowane obróbką technologiczną wałka.

Można je zmniejszyć poprzez wyżarzenie i normalizowanie materiału wału.

Na Rys.6 przedstawiono zależność $U_A = f(M)$ dla $n = \pm 100\text{min}^{-1}$ i $n = \pm 1500\text{min}^{-1}$ $f = 2\text{kHz}$.

Błąd spowodowany zmianą liczby obrotów wynosi około 1,5%.

Wpływ zjawiska można ograniczyć poprzez zwiększenie częstotliwości sygnału wzbudzającego. Można przyjąć, że wpływ prądów wirowych spowodowany obrotami jest znacznie mniejszy niż wpływ prądów wirowych spowodowany zwiększeniem częstotliwości wzbudzającej.

Rysunek 7 przedstawia zależność czułości $S = f(f)$ histerezy $H = f(f)$

Wykres ten potwierdza zależność $S = \frac{M_a}{M} = \frac{\omega \phi_{\text{signal}}}{M}$,

z której wynika, że ze wzrostem częstotliwości rośnie czułość. Histereza maleje ze wzrostem częstotliwości.

Takie same zależności można zaobserwować na wykresie

$H = f(I_p)$ $S = f(I_p)$ rys.8.

Zwiększenie szczeliny powietrznej rys.9 powoduje zmniejszenie czułości. Wpływ temperatury na czułość i histerezę ma niewielki wpływ rys.10.

Z przedstawionych wyników badań wynika, że największy wpływ na dokładność mają magnetyczne i mechaniczne niejednorodności, oraz histereza.

W celu stosowania wpływu naprężeń niejednorodnych własnych dobrze jest wprowadzić moment wstępny. Niejednorodności materiału powodują konieczność uśredniania wyników pomiaru przy całym obrocie wału.

Wpływ histerezy i prędkości obrotowej można obniżyć przez zwiększenie natężenia i częstotliwości prądu wzbudzającego. Parametry konstrukcyjne i metrologiczne przedstawiono w tab.1.

6.1.3. Czujnik z rdzeniem różnicowy.

Interesującym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest czujnik niewrażliwy na bicie wału i ustawienie katowe czujnika względem wału /rys.11/ [4] .

Czujnik ten składa się z pięciu biegunów /kolumn/.

Na kolumnie centralnej nawinięte jest uzwojenie wzbudzające. Strumień magnetyczny powstający pod wpływem przepływającego przez to uzwojenie prądu zmiennego, przechodzi przez szczelinę między kolumną centralną a wałem i rozgałęzia się w czterech kierunkach pod kątem 45° do osi wału, zamykając się przez 4 bieguny odbiorcze.

Wykonując bieguny odbiorcze, tak aby obejmowały znaczną część obwodu wału oraz pewne niedokładności ustawienia czujnika względem wału. Zwiększenie szczeliny między jednym biegunem pary i powierzchnią wału kompensuje się zmianę szczeliny między drugim biegunem, i drugą stroną wału.

W ten sposób następuje skompensowanie różnic szerokości szczelin powietrznych. Cewki biegunów odbiorczych tworzą dwie pary cewek, które są połączone ze sobą przeciwsobnie przy czym do każdej pary wchodzi cewki odpowiadające jednemu rodzajowi napięcia. Czujnik umieszczony jest tak względem wału, że osie przechodzące przez poszczególne pary biegunów nachylone są pod kątem 45° do osi wału.

Przy braku obciążenia i odpowiedniej jednorodności wału, jego powierzchniowe wartości mają jednakowe własności magnetyczne. W cewkach powstają prądy jednakowe co do amplitudy, ale przeciwne w fazie.

Wypadkowy sygnał wyjściowy równy jest zeru. Pod wpływem obciążenia, w wyniku działania naprężeń, zmienia się strumień magnetyczny przechodzący przez pary biegunów.

W wyniku zachowania symetrii układu powstaje napięcie

proporcjonalne do momentu skręcającego. Badania czujnika przeprowadzono dla wałów o ϕ 13,5mm wykonanych z walcowanej na zimno wysoko i nisko węglowej stali.

Czujnik tego samego typu wykonano w firmie AEG-Telefunken [6].

Czujnik zbudowany jest z kubka ferrytowego z rdzeniem w środku. Kubek nacięto w kierunkach wzajemnie prostopadłych. Na utworzone w ten sposób rdzenie nawinięto cewki pomiarowe. Na rdzeń środkowy nawinięto uzwojenie pomiarowe wzbudzające. Tak skonstruowany czujnik jest połączony z układem elektronicznym /rys.12/ pozwalającym na określenie kierunku obrotów. Parametry konstrukcyjne obu czujników są przedstawione w tabelicy 1.

6.1.4. Czujnik wielobiegunowy.

Na rysunku 13 przedstawiono konstrukcję czujnika opracowaną w Ministerstwie Geologii ZSRR [4]. Została ona wdrożona do produkcji. Układ wzbudzający składa się z wielobiegunowego pirścieniowego statora 3 z cewkami 2 połączonymi szeregowo. W skład obwodu pomiarowego wchodzi π - kształtowe rdzenie magnetyczne 4 z nawiniętymi cewkami pomiarowymi. Cewki umieszczone są między biegunami wzbudzającymi i połączone przeciw-sobie.

Przy braku momentu skręcającego i pełnej jednorodności wału wektor ϕ_B jest skierowany pod kątem prostym do osi cewki pomiarowej i dlatego sygnał wyjściowy równy jest zeru. Powstające pod działaniem momentu naprężenia powodują zmianę charakterystyki magnetycznej wału. W wyniku tego następuje odchylenie ϕ_B kąta prostego. Pojawia się wtedy składowa ϕ_H strumienia zamykająca się przez rdzeń 4 i powierzchnię wału.

W wyniku tego powstaje napięcie na końcach uzwojenia pomiarowego. Parametry konstrukcyjne metrologiczne przedstawiono w tab.1.

6.1.5. Czujnik z warstwą amorficzną.

Zespół konstruktorów japońskich opracował konstrukcję przetwornika momentu [7] wykorzystującego własności taśmy amorficznej Fe-Si-B.

Podstawową zaletą przetwornika jest niezależność sygnału wyjściowego od zmiany liczby obrotów, prosta konstrukcja, silny sygnał wyjściowy, wysoka czułość.

Osiągnięcie dobrych parametrów czujnika było możliwe przez zastosowanie materiału amorficznego.

Podstawą zalety materiałów amorficznych to duża przenikalność magnetyczna 50000 dla blachy krzemowej 50000/, duża oporność elektryczna $4,54 \mu\Omega m$ / $70,47 \mu\Omega m$ dla blachy krzemowej / bardzo dobre właściwości magneto-sprężyste dla warstw w grubościach $< 0,1 \text{ mm}$. Schematycznie budowę czujnika przedstawiono na rys.14. Na obwodzie wału przyklejone są dwie taśmy amorficzne ukształtowane wcześniej w postaci tulei.

Tuleje te są poddane wyżarzaniu w celu usunięcia naprężeń powstających w materiale w wyniku kształtowania tulei.

W celu uzyskania odpowiednich właściwości magnetosprężystych wał poddany jest wstępnemu skręcaniu, w tym stanie przyklejona jest tuleja do jego powierzchni /rys.15./.

Tak samo postępuje się z drugą tuleją lecz wał skręca się w przeciwną stronę.

Po usunięciu obciążenia naprężenia przenoszone są do warstwy tulei. W wyniku wprowadzonych naprężeń zmieniają się właściwości i kierunki magnetoelastycznej anizotropii materiału i jednocześnie tworzą się nowe kierunki łatwego i trudnego magnesowania.

Linie tych kierunków są nachylone pod kątem $+45^\circ$ i -45° do osi wału. Schemat układu elektrycznego przedstawiono na rys.16.

Cewka wzbudzająca zasilana jest prądem sinusoidalnym o natężeniu 100mA.

Cewki pomiarowe obejmujące tuleje amorficzne są połączone przeciwnie. Na wyjściu z cewek pomiarowych otrzymywany jest sygnał różnicowy proporcjonalny do momentu skręcającego. Układ prostownika fazoczułego pozwala na określenie zmiany kierunków obrotów.

Na rysunku.17 przedstawiono wykres napięcia $U = f(M)$ dla różnych częstotliwości prądu zasilającego. Można zauważyć, że czułość przetwornika rośnie ze wzrostem częstotliwości. Liniowość w całym zakresie pomiarowym jest zadawalająca. Sygnał wyjściowy przetwornika nie wykazuje zależności od ilości obrotu wału rys.18.

Przeprowadzono także badania czujnika, w którym do powierzchni wału przyklejone są dwie pary prostokątnych pasków materiału amorficznego zgodnie z rys.19 [8].

Paski przed przyklejeniem ukształtowano na walcu o średnicy D rys.20 w celu otrzymania promienia krzywizny równego d - średnica wału/. Następnie paski poddano wyżarzaniu w celu usunięcia naprężeń mechanicznych.

Badane paski miały wymiary 10 x 4mm wykonane z materiału Fe-Si-B $\lambda_s = 24 \times 10^{-6}$. Charakterystyki czujnika przedstawiono na rys.21. Z przebiegu krzywych wynika, że liniowość i czułość zależne są od parametru $m = \frac{D}{d}$.

Dla $m > 2$ przebiegi są liniowe, lecz maleje czułość.

Wyjaśnienie tego zjawiska przedstawiono w artykule [8].

Nie zaobserwowano wpływu prędkości obrotowej w zakresie $0 \div 1800 \text{ min}^{-1}$. Wartość błędów liniowości 0,4% histereza 0,1%.

W obu przypadkach dokonywano pomiarów w układzie z wałkiem wykonanym z materiału niemagnetycznego.

Wyniki mogą ulec zmianie gdy wał zostanie wykonany z materiału magnetycznego.

6.2. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych.

6.2.1. Uwagi wstępne.

W punkcie 6.2.2. przedstawiono interesujące rozwiązania konstrukcyjne czujników opisane w ~~punktach~~ ^{patentach} momentu, z lat osiemdziesiątych dla których brak jest wyników badań.

6.2.2. Czujnik pierścieniowy wg patentu USA Nr. 4364278 z 1981r.

Konstrukcje przedstawione w opisie patentowym [9] umożliwiają kontrolę wartości i kierunku momentu skręcającego, a także pomiar prędkości obrotów wału. Wał może być wykonany z materiału magnetycznego i niemagnetycznego /aluminium, tworzywa sztuczne/. Na rys.22 przedstawiono budowę czujnika.

Czujnik składa się z 3 pierścieni 4a, 4b, 4c.

Na środkowym pierścieniu 4b znajdują się 4 nabiegunniki⁶¹⁻⁶⁴, skierowane promieniowo w stosunku do osi wału, na których nawinięte są cewki wzbudzające 81-84 połączone szeregowo i nawinięte przeciwnie w wyniku czego nabiegunniki 61 i 63 mają przeciwną polaryzację niż nabiegunniki 62, 64.

Na pierścieniach zewnętrznych 4a i 4c znajdują się nabiegunniki 65-68, na których nawinięte są uzwojenia pomiarowe.

Połączenia cewek przedstawiono na rys.23. Na rys.24 abc pokazano możliwości przygotowania powierzchni wału w celu uniezależnienia się od właściwości materiału wału i poprawienia charakterystyki czujnika.

Przy braku specjalnego pokrycia /rys.24_a/ pole magnetyczne wnika głębiej w materiał, przez co maleje gęstość pola a tym samym wartość strumienia magnetycznego. Powoduje to konieczność dostarczenia dużej energii, która wytworzyłaby pole magnetyczne wystarczająco silne, aby jego zmiany przy momencie skręcającym mogły być wykryte przez cewki pomiarowe.

Najlepszymi materiałami na okładzinę są materiały amorficzne, ze względu na swoje właściwości magneto-sprężyste.

Ośłona oddzielona jest od powierzchni wału warstwą izolacyjną np. z tworzywa rys.24 b lub powietrzną 24 c.

Na rys.25 przedstawiono charakterystyki czujnika w funkcji momentu. Wykres a przedstawia krzywą napięcia wyjściowego mierzoną w układzie, w którym wał wykonano z hartowanej stali. Jeśli wał poddany zostanie obróbce cieplnej to czułość przetwornika i sygnał wyjściowy wyraźnie rośnie /wykres b/.

Najlepsze rezultaty osiągnięto przy stosowaniu folii amorficznej z izolacyjną warstwą /wykres c /.

Sygnał z cewek pomiarowych może być przetwarzany w układzie z przetwornikiem /rys.26 a/ lub z modulatorem /26 b/.

W układzie z modulatorem sygnał wyjściowy U_A tworzony jest przez modulowanie fali nośnej U_A rys.27, którą wytwarza generator, falą małej częstotliwości U_A' proporcjonalną do momentu skręcającego. Polaryzacja fali informuje o zmianie kierunku obrotów. Prędkość obrotową wału można mierzyć stosując tuleję ze szczeliną rys.28, układ przetwarzający sygnał pomiarowy rys.29.

Sygnał z czujnika przedstawiono na rys.30a.

Sygnał zawiera impulsy szpilkowe, których częstotliwość pojawiania się zależna jest od częstotliwości obrotów wału.

Podając sygnał U_E na filtr górnoprzepustowy i dolnoprzepustowy otrzymujemy sygnał proporcjonalny do prędkości obrotowej wału /rys.30b/ i sygnał proporcjonalny do zmian momentu skręcającego /rys.30c/. W opisie patentowym przedstawiono także sposób wykorzystania zjawiska Halla do pomiaru momentu /rys.31/.

Cewki wzbudzające nawinięte są na metalicznym rdzeniu 115, który jest ułożony prostopadle do osi wału. Cewki 85, 86 nawinięte są przeciwnie i zasilane są z generatora 20 /rys 23/

Generator Halla służy do wykrywania zmian magnetycznej konduktywności na powierzchni wału.

Generator zawiera rdzeń 55 na którego końcach umieszczone są płytki 50, 50'. Płytki połączone są ze sobą i ze źródłem napięcia stałego 118. Do boków 52, 53 przyłączony jest woltomierz mierzący napięcie wywołane polem magnetycznym indukowanym w rdzeniu elementu 55. W czasie nie występowania momentu cewki generują zmienne pole magnetyczne, którego linie zamykają się poprzez rdzeń 115 i powierzchnię wału. W przypadku symetrii i braku obciążenia sygnał różnicowy jest równy zero.

W chwili obciążenia wału zmienia się jego przenikalność w kierunkach działania naprężeń, co powoduje powstanie różnicy potencjałów mierzonej przez woltomierz.

Na rys. 32 przedstawiono czujnik ustawiony pod kątem 45° do osi wału zawierający rdzeń 155 i pojedynczą cewkę 18 wzbudzającą.

Na końcach rdzenia znajdują się płytki Halla 150, 150'.

Schemat połączeń elektrycznych przedstawiono na rys. 33. Napięcie U_{AA} jest proporcjonalne do zmian strumienia magnetycznego.

Inną wersję czujnika przedstawiono na rys. 34, w którym zastosowano magnes stały, na końcach którego umieszczono płytki Halla.

Czujnik ustawiony jest także pod kątem 45° do osi wału. Czujnik rejestruje zmiany kierunku i wielkości momentu w postaci zmian napięcia Halla.

6.2.3. Czujnik momentu wg patentu USA Nr. 4414855 z 1983r.

Interesującą konstrukcję czujnika przedstawili konstruktorzy japońscy [10]. Charakteryzuje się ona prostotą i ciekawym rozwiązaniem układu elektronicznego, nie ma też oddzielnej cewki wzbudzającej. Konstrukcję czujnika przedstawiono na rys. 35.

Na wale 12 nawinięta jest spiralnie taśma 22 z materiału amorficznego. Zwoje ułożone są pod kątem 45° do osi wału.

Wał może być wykonany ze stali niskowęglowej, aluminium lub tworzywa sztucznego i umocowany jest w łożyskach 14 i 16.

Łożyska umocowane są w podporach 18, 20. Na karkasie ułożonym koncentrycznie względem osi wału nawinięta jest cewka składająca się z dwóch uzwojeń 26a i 26b nawiniętych bifilarnie.

Między karkasem a w^ałkiem jest szczelina powietrzna G.

W przedstawionym układzie poszczególne wymiary były następujące: szerokość taśmy - 3mm, grubość - 5 μ m, nawinięta taśma tworzyła sekcję o długości 15cm, średnica wału - 5cm, liczba zwojów cewki 300, szerokość szczeliny G = 1mm.

Pomiar momentu dokonuje się wykorzystując zjawiska fizyczne opisane we wcześniejszych rozdziałach. Układ elektroniczny /rys.36/ rejestruje zmiany impedancji cewki w wyniku zmiany przenikalności magnetycznej według wzoru $L = \frac{\pi \mu N^2 a^2}{l}$

μ - przenikalność rdzenia, N - liczba zwojów, a - promień rdzenia
L - długość cewki.

Ogólną zasadę pomiaru przedstawiono na rys.37. W chwili $t = 0$ przełącznik S_1 jest zamknięty i prąd płynący w obwodzie można opisać zależnością $i = \frac{V_{cc}}{R} (1 - e^{-\frac{Rt}{L}})$, która jest funkcją wykładniczą o stałej czasu proporcjonalnej do indukcji L.

Układ zawiera generator 52 wytwarzający impulsy prostokątne o częstotliwości 20 + 50 kHz.

Impulsy dostarczane są do przełącznika sterującego 56, który wytwarza sygnały¹ sterujące dla cewki 26a i 26b.

Generator i bazy tranzystorów TR1 i TR2 przełącznika sterującego połączone są za pomocą pary inwerterów I1 i I2 i inwertera I3.

Rezystory R6 i R7 ograniczają prądy płynące do baz tranzystorów.

Kiedy impuls z generatora ma wysoki poziom tranzystor TR1 przewodzi a tranzystor TR2 jest zablokowany, a w stanie niskim odwrotnie

Tranzystory TR1 i TR2 zasilane są poprzez rezystor R8.

W ten sposób utworzony jest układ różnicowy. Kiedy tranzystor T1 lub T2 przewodzą prądy i_1 i i_2 dane są wzorami

$$i_1 = \frac{V_{cc}}{R_8} [1 - e^{-\frac{R_8 t}{L_a}}] \quad i_2 = \frac{V_{cc}}{R_8} [1 - e^{-\frac{R_8 t}{L_b}}]$$

Na rys.38 przedstawiono przebiegi napięć i prądów w funkcji czasu, przy obciążeniu i przy braku obciążenia wału.

Linia ciągła reprezentuje sygnał przy braku momentu, linia $\text{---} \bullet \text{---}$ reprezentuje sygnał przy braku momentu, linia ----- sygnał od naprężeń ściskających.

Wypadkowe napięcie V_1 podawane jest do integratora gdzie zamieniane jest na napięcie stałe proporcjonalne do naprężeń.

Należy zauważyć, że napięcie V_1 od naprężeń ściskających jest zawsze mniejsze od napięciem przy braku naprężeń.

Zastosowanie przesuwnika poziomemu 72 umożliwiło wykrywanie kierunku ruchu. Przy obciążeniu i obrocie wału zgodnie ze wskazówkami zegara taśma jest ściskana i sygnał wyjściowy jest zawsze ujemny, a w kierunku przeciwnym obrotów wału taśma jest rozciągana i sygnał wyjściowy jest zawsze dodatni. Wartość sygnału U_1 można zwiększyć przez pogrubienie pokrycia wału. Ze względu na to, że taśma musi być nawinięta pod kątem 45° do osi wału istnieją duże wolne przestrzenie między zwojami. Zmniejszenie odległości między zwojami można uzyskać stosując 3 taśmy rys.39a lub naklejając paski prostokątne o stosunku długość do szerokości 10:1 rys.39b.

6.2.4. Czujnik momentu wg patentu ZSRR Nr.838448 z 1981r.

W patencie [11] przedstawiono konstrukcję, w której uzyskiwany sygnał nie jest wrażliwy na zmiany kąтового ustawienia czujnika względem wału. Konstrukcja ta odznacza się też dużą czułością.

Czujnik rys.40 składa się z dwu identycznych części, z których każda zawiera uzwojenie wzbudzające I i uzwojenie pomiarowe nawinięte na jednym karkasie i ułożone wewnątrz III kształtowego pierścienia magnetycznego. Pierścień składa się z cylindrycznego fragmentu 4 i

dyskowych fragmentów 5 z otworami na wał, które tworzą bieguny. Pod cewkami na powierzchni wału wykonane są nacięcia pod kątem 45° do osi wału, przyczym kąt między nacięciami obu stref wynosi 90° . Całość umieszczona jest w korpusie 8. W wyniku wykonanych nacięć tworzy się ukierunkowanie zmian przenikalności magnetycznej materiału. W czasie obciążenia wału powierzchnie 9 i 10 podlegają naprężeniom rozciągającym lub ściskającym, co wpływa na zmianę przenikalności magnetycznej.

Głębokość nacięć powinna być większa od efektywnej głębokości przenikania linii sił pola magnetycznego. Układ elektryczny przedstawiono na rys.41. Cewki pomiarowe podłączone są przeciwnie co powoduje, że sygnał wyjściowy przy symetrii układu równy jest zero a sygnały od poszczególnych cewek się dodają.

Układ umożliwia określenie kierunku momentu.

7. WNIOSKI.

Z przeprowadzonego przeglądu rozwiązań wynikają następujące wnioski które powinny być uwzględnione przy konstruowaniu przetwornika.

Z tabeli 1 wynika, że możliwe są do osiągnięcia następujące parametry metrologiczne przetwornika: zakresy pomiarowe

$$0 + \pm 20 \text{ Nm}$$

$$0 + \pm 240 \text{ Nm}$$

$$0 + \pm 7500 \text{ Nm}$$

dokładność $1\% + 5\%$

histereza $0,4\% + 1,5\%$

nieliniowość $0,4\% + 2,5\%$

czułość $20 \frac{\text{mV}}{\text{Nm}} + 140 \frac{\text{mV}}{\text{Nm}}$

niezależność sygnału od prędkości obrotu wału.

Przy projektowaniu czujnika należałoby uwzględnić następujące zalecenia:

1. W celu uzyskania silnego sygnału, wolnego od wpływu niejednorodnych naprężeń własnych materiału wału należy zastosować taśmę amorficzną naklejoną na wał bezpośrednio lub na warstwę izolującą elektrycznie.
2. W celu osiągnięcia dużej czułości ograniczenia histerezy i niezależnienia się od prędkości obrotowej wału zastosować prąd wzbudzający o natężeniu większym od 100mA i częstotliwości większej od 20 kHz.

W celu zbadania i zastosowania zjawiska magnetostrykcji do budowy czujników momentu proponuje się:

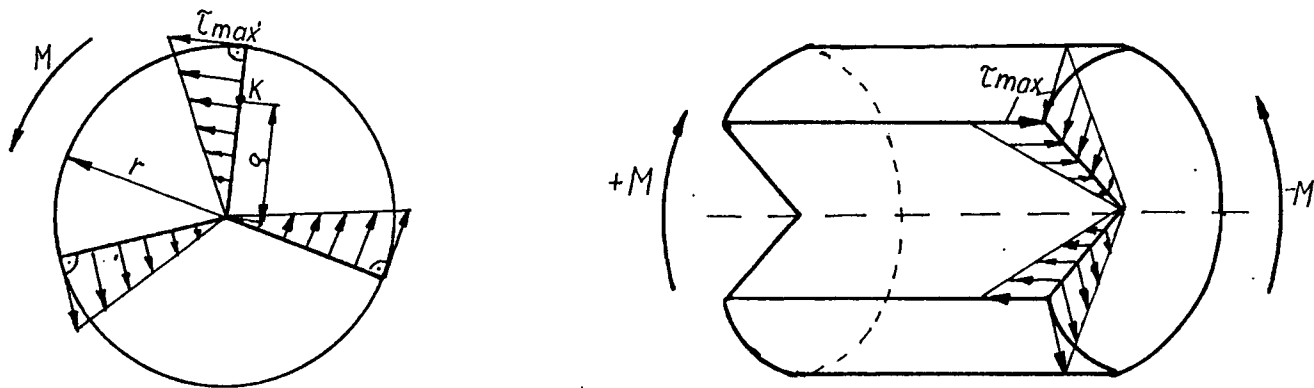
- zbadanie układu czujnika zbliżonego konstrukcyjnie do przedstawionego na rys.3, który byłby przystawiany do powierzchni badanego wału. Podstawową zaletą takiego czujnika jest brak potrzeby demontażu
- zbadanie układu czujnika według własnego rozwiązania mającego zalety czujników z rys.14 i 35.

Dla umożliwienia tych badań w pierwszym rzędzie jest przewidziana budowa stanowiska pomiarowego.

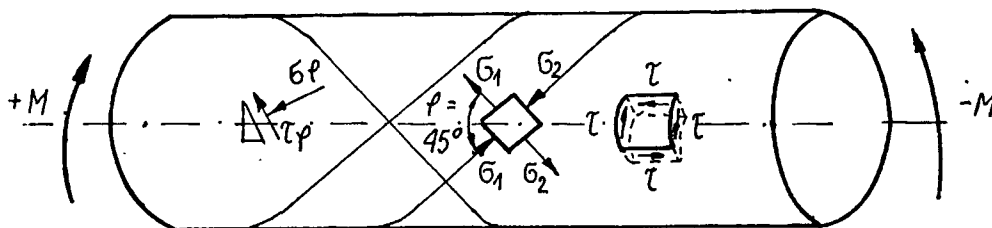
8. LITERATURA

1. Lapiński "Miernictwo elektryczne wielkości nieelektrycznych"
WNT 1968
2. J. Orłowski "Wytrzymałość materiałów" Arkady 1978
3. Gumaniuk "Magnitouprugie daczki w awtomatike"
Izdatielstwo Technika 1972
4. Ginzburg "Magnitouprugie dacziki"
Izdatelstwo "Energia 1970"
5. Von L. Villingen "Drchmomentsensoren auf der Basis des
magnetostriktiven Effektes" VDI - Berichte Nr 503, 1984
6. "Derührungslose Drehmoment - Messung on rotierenden Wellen"
Werkstoff und Betrieb nr 118 /1985/ 11
7. Harada I. Sasada, T Kawajiri, M Inoue
"A new torque transducer using stress sensitive amorphous
ribbons"
IEEE Transaction on Magnetics vol mag 18 nr 6 november 1981
8. I. Sasada, A Hirokie, K Harada
"Torque transducers with stress - sensitive amorphous ribbons
of chevron - pattern"
IEEE Transaction on Magnetics vol mag 20 nr 5 september 1984
9. Patent USA nr 4364278 r 1981
Hans - Dieter Tarter "Assembly for monitoring torsional
loading of a drive shaft"
10. Patent USA nr 4414855 r. 1983
Sinichiro Iwasaki "Torque sensor"
11. Patent ZSRR nr 838448 r. 1981
Cejtlin Szimochin, Magnitouprugij preobrazowatel krutiaszczewo
momenta"

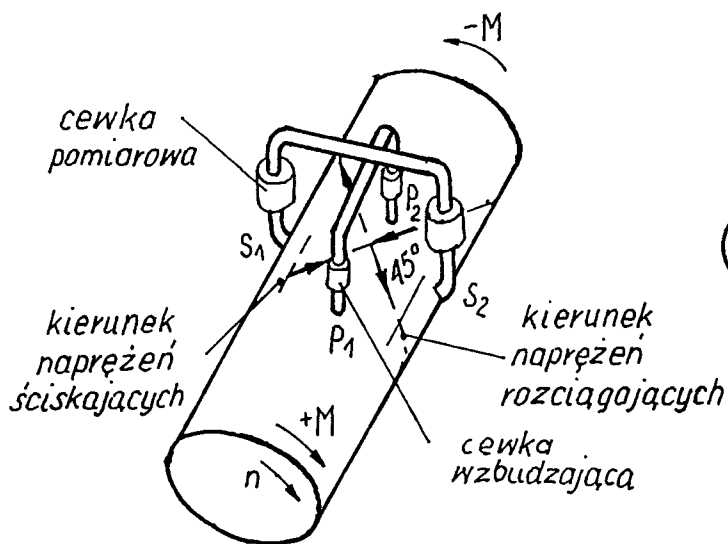
Nazwa typ	Parametry konstrukcyjne	Napięcie częstotliwość prąd, prędkość obrotów	Zakres pomiarowy	Parametry metrologiczne
Czujnik z rdzeniem różnicowy rys 11	wał \varnothing 19,5 mm stal nisko i węgłowa uzwojenie pierwotne 2500 z uzwojenie wtórne po 4 x 5000 z szczelina G = 1,2 mm	I = 13 mA f = 1800 Hz n = 230-660 min ⁻¹	0 ÷ 3,6 kGm	dokładność ± 1%
Czujnik wielobiegunowy rys 13 ZSRR	wał \varnothing 45,75, 90 120 mm stal 38 XMI-0A lub 40X	Uz = 36 V Uwy = 1,5 V	0 ÷ 250, 1750, 3000, 7500 Nm	nieliniowość +2,5%
Czujnik z rdzeniem mostkowym rys. 3 RFN	wał \varnothing 46 mm 9 S Mn Pb 28K uzwojenie pierwotne 500 z uzwojenie wtórne 2 x 500 szczelina G = 0,8-1,2 mm	f = 50 Hz I = 0 ÷ 140 mA f = 0,2-2 kHz n = 1500 min ⁻¹	0 ÷ 240 Nm	histereza 1,5% charakt. liniowa czułość S _{max} 20 mV/Nm
Czujnik transformacyjny / różnicowy/		I = 20 mA Uwy = ± 10V		dokładność i nieliniowość < 5% temp. -15 + 60°
Czujnik z warstwą amortyzującą USA rys. 14	wał \varnothing = 12 mm niemagnetyczny	I = 140 mA f = 20 kHz n = 0 ÷ 1800 min ⁻¹ Uwy = ± 10 V	0 ÷ 20 Nm	nieliniowość 0,4% histereza 0,4% czułość S _{max} 140 mV/Nm



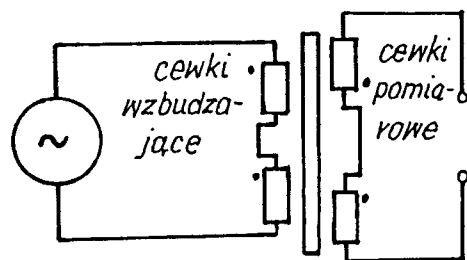
Rys 1 Rozkład naprężeń w skręcanym wału



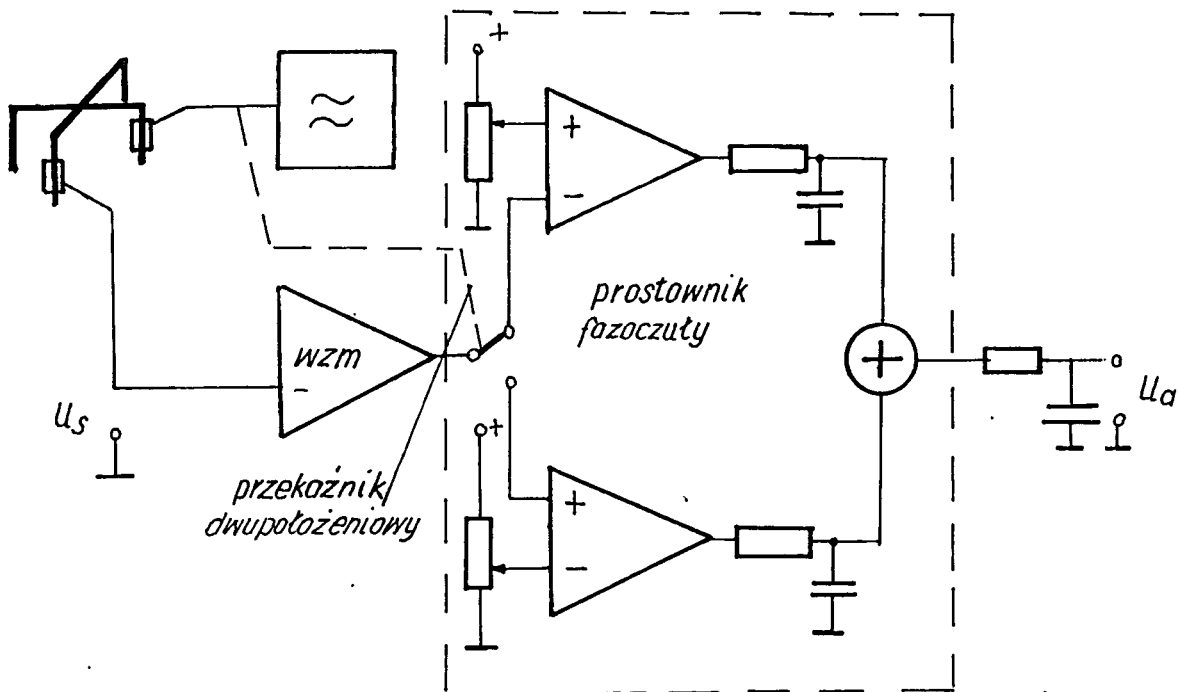
Rys 2 Rozkład naprężeń stycznych i normalnych w przekrojach nachylonych pod kątem ϕ do osi podłużnej wału



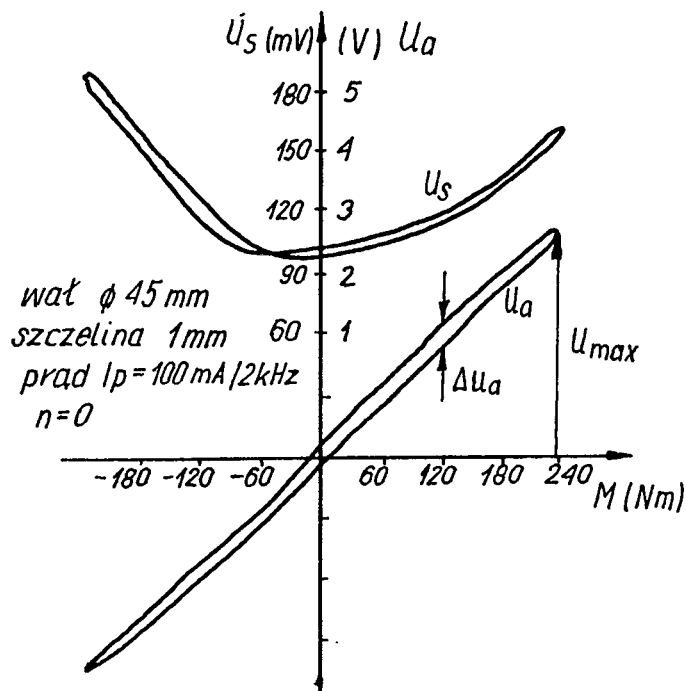
Rys 3 Schemat działania czujnika momentu



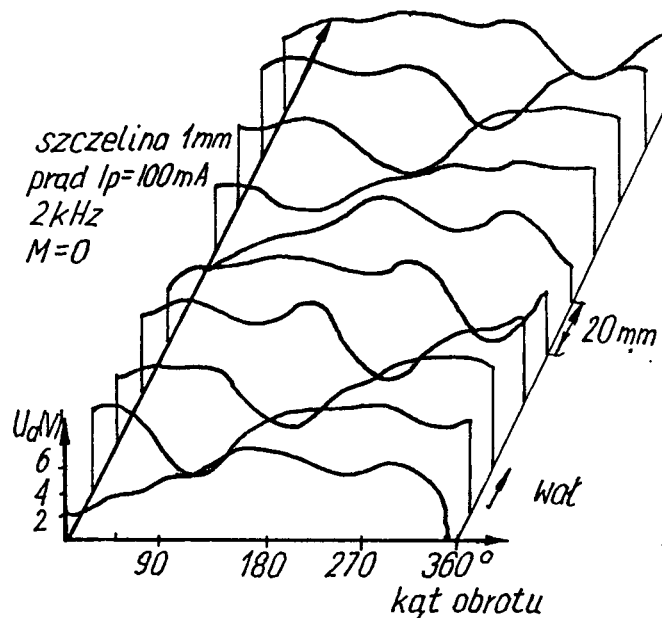
Rys 3a Schemat połączeń cewek wzbudzających i pomiarowych



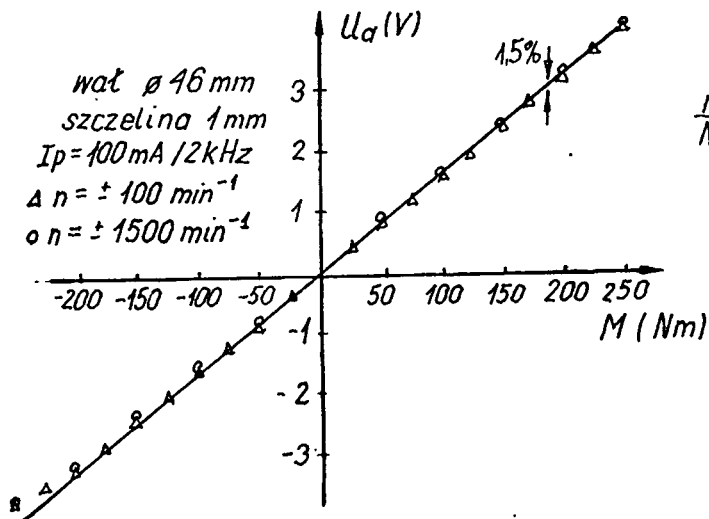
Rys 3b Schemat układu elektronicznego przetwarzającego sygnał z czujnika



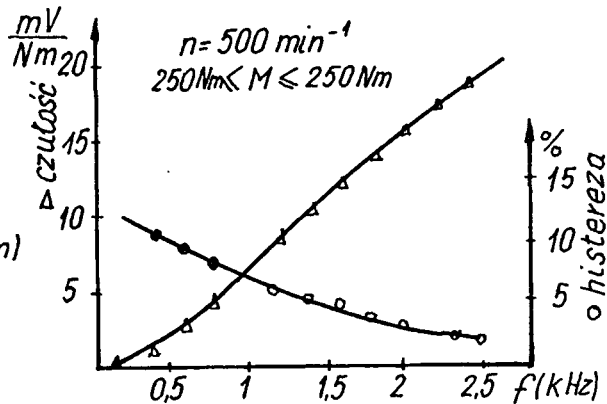
Rys 4 Zależność napięcia wyjściowego U_a od momentu M



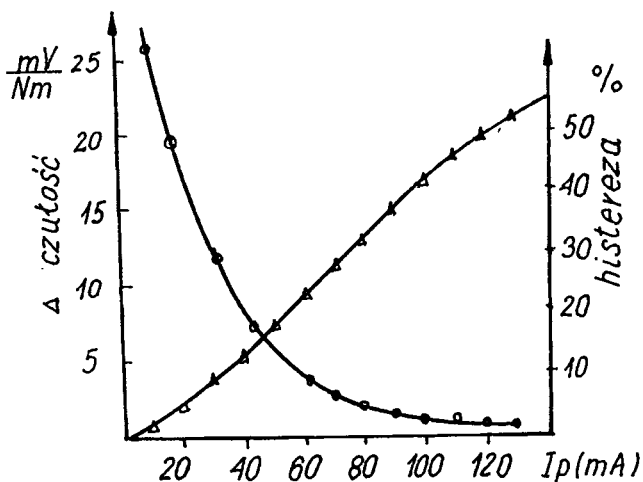
Rys 5 Wykres ilustrujący wpływ magnetycznych niejednorodności materiału wału na sygnał wyjściowy U_a w funkcji kąta obrotu



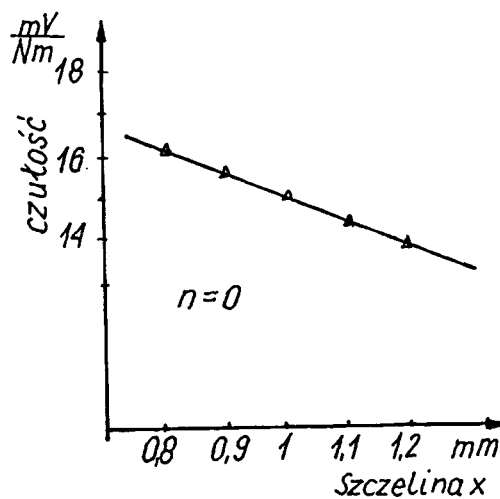
Rys 6 Zależność napięcia U_a od momentu M dla różnych prędkości obrotowych wału



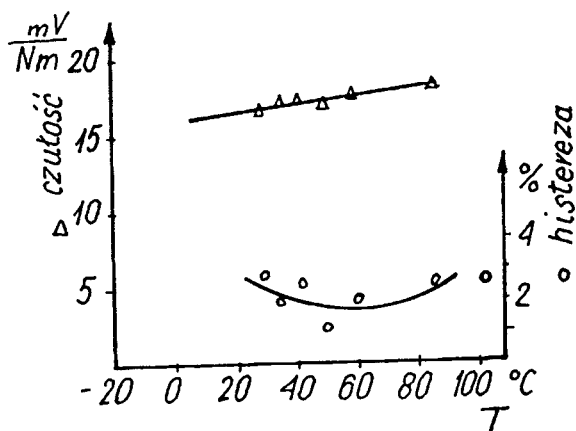
Rys 7 Zależność czułości S i histerezy H od częstotliwości prądu wzbudzającego



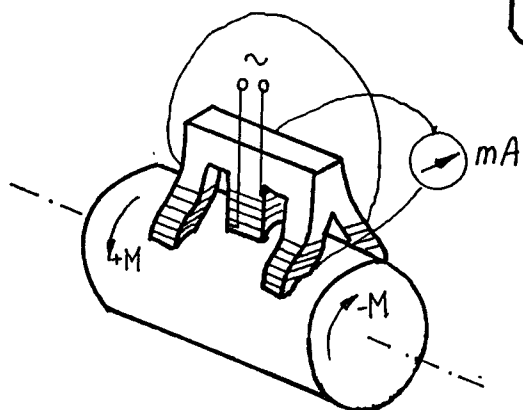
Rys 8 Zależność czułości S i histerezy H od natężenia prądu wzbudzającego I_p



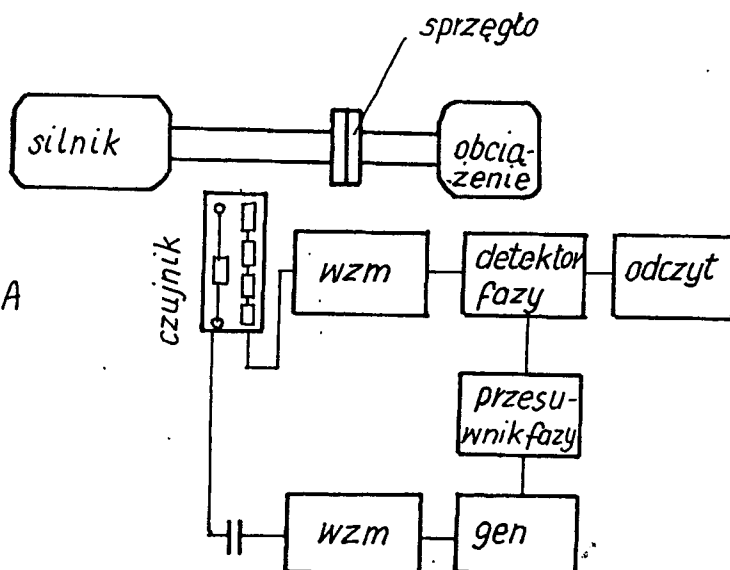
Rys 9 Zależność czułości S od szerokości szczeliny x



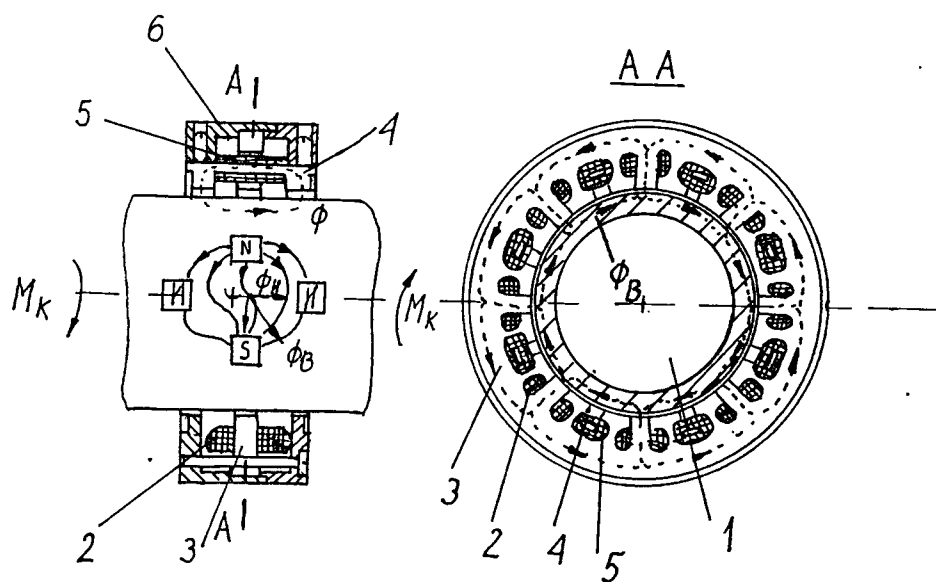
Rys 10 Zależność czułości S i histerezy H od temperatury



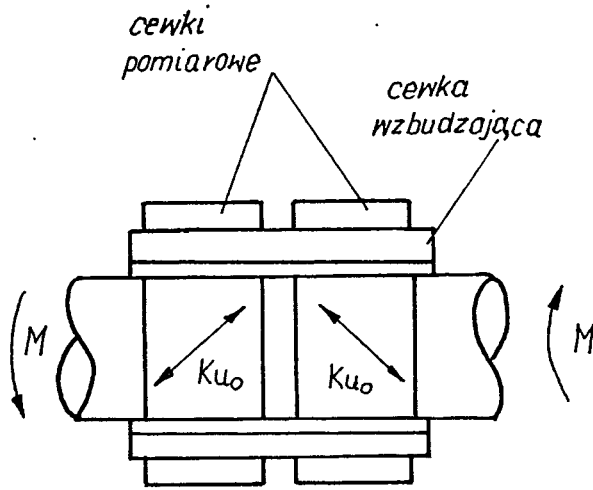
Rys 11 Czujnik z rdzeniem różnicowym



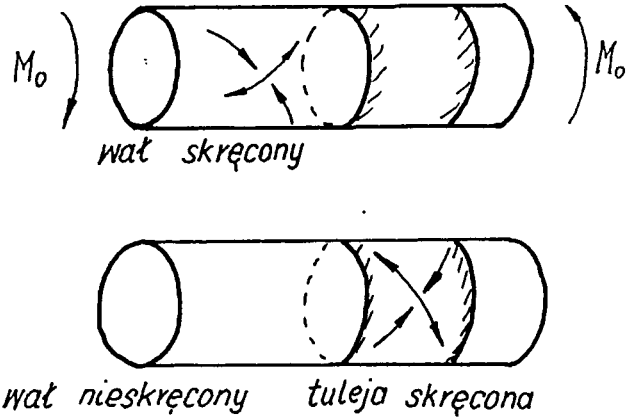
Rys 12 Schemat blokowy układu do pomiaru momentu



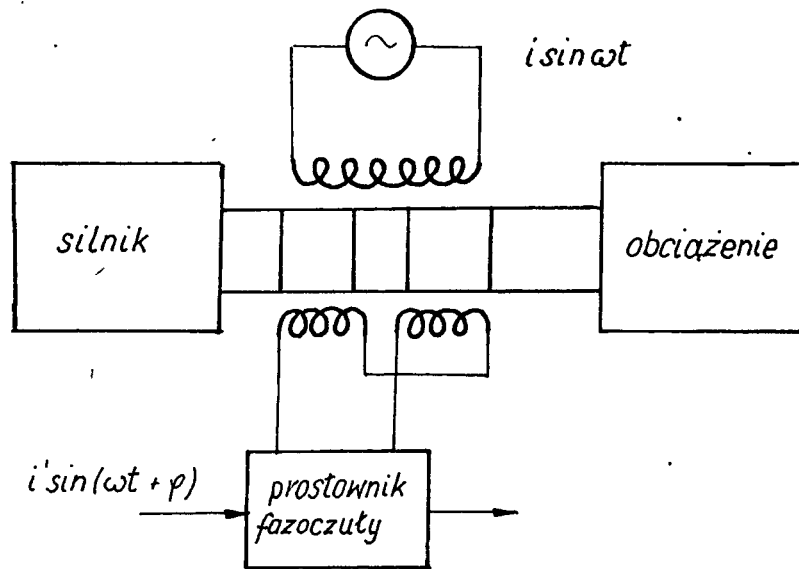
Rys 13 Czujnik wielobiegunowy



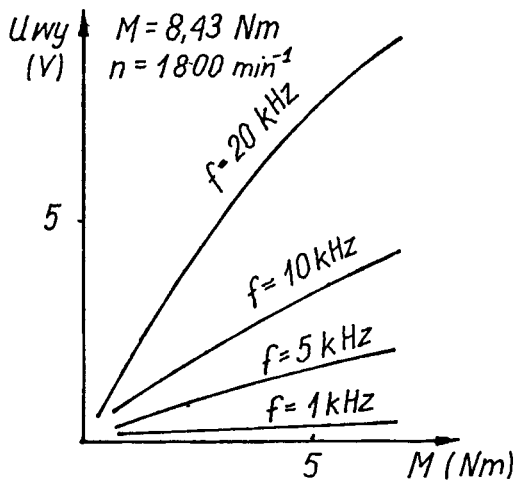
Rys 14 Czujnik z warstwą amorficzną



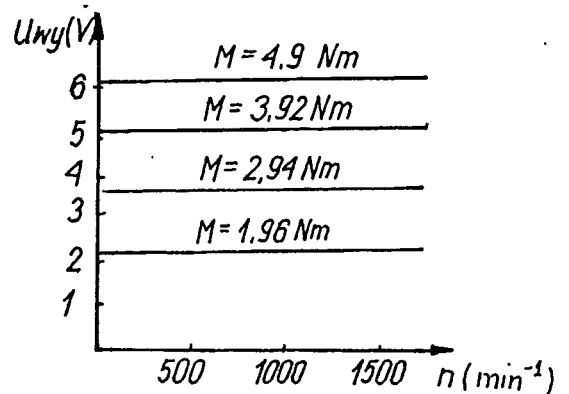
Rys 15 Wprowadzanie naprężeń wstępnych do tulei amorficznej



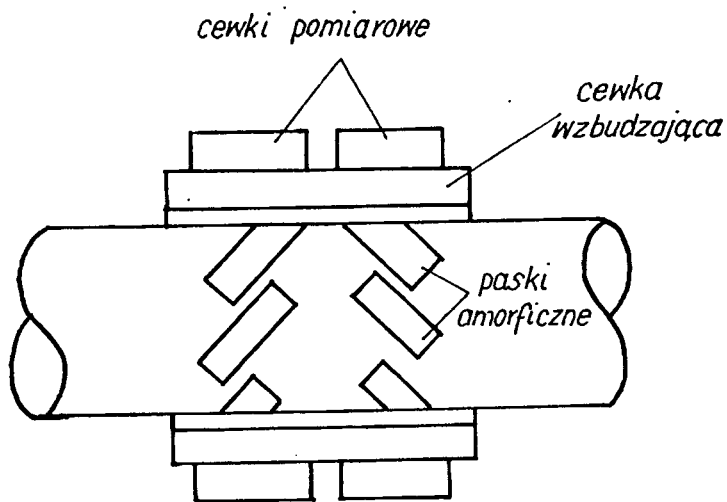
Rys 16 Schemat blokowy układu elektronicznego czujnika momentu



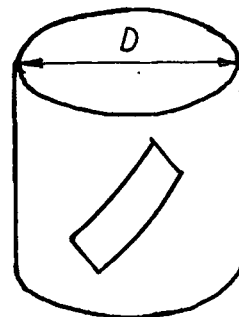
Rys 17 Zależność napięcia wyjściowego U_{wy} od momentu M dla określonej częstotliwości prądu zasilającego



Rys 18 Zależność napięcia wyjściowego U_{wy} od obrotów wału n dla określonego momentu M

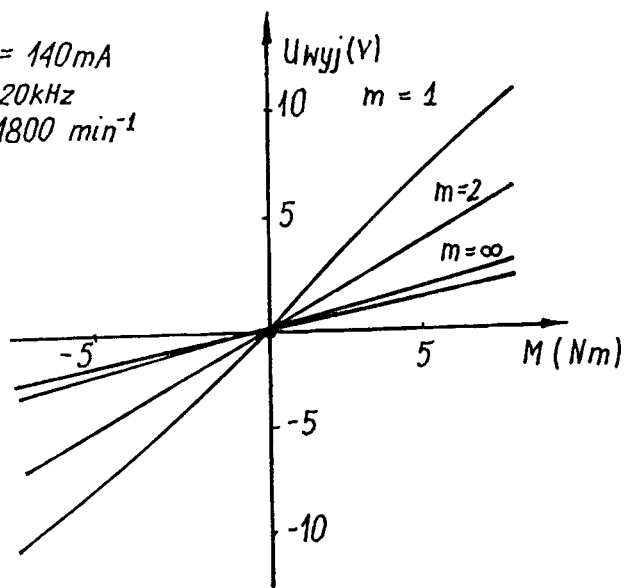


Rys 19 Czujnik momentu z paskami amorficznymi

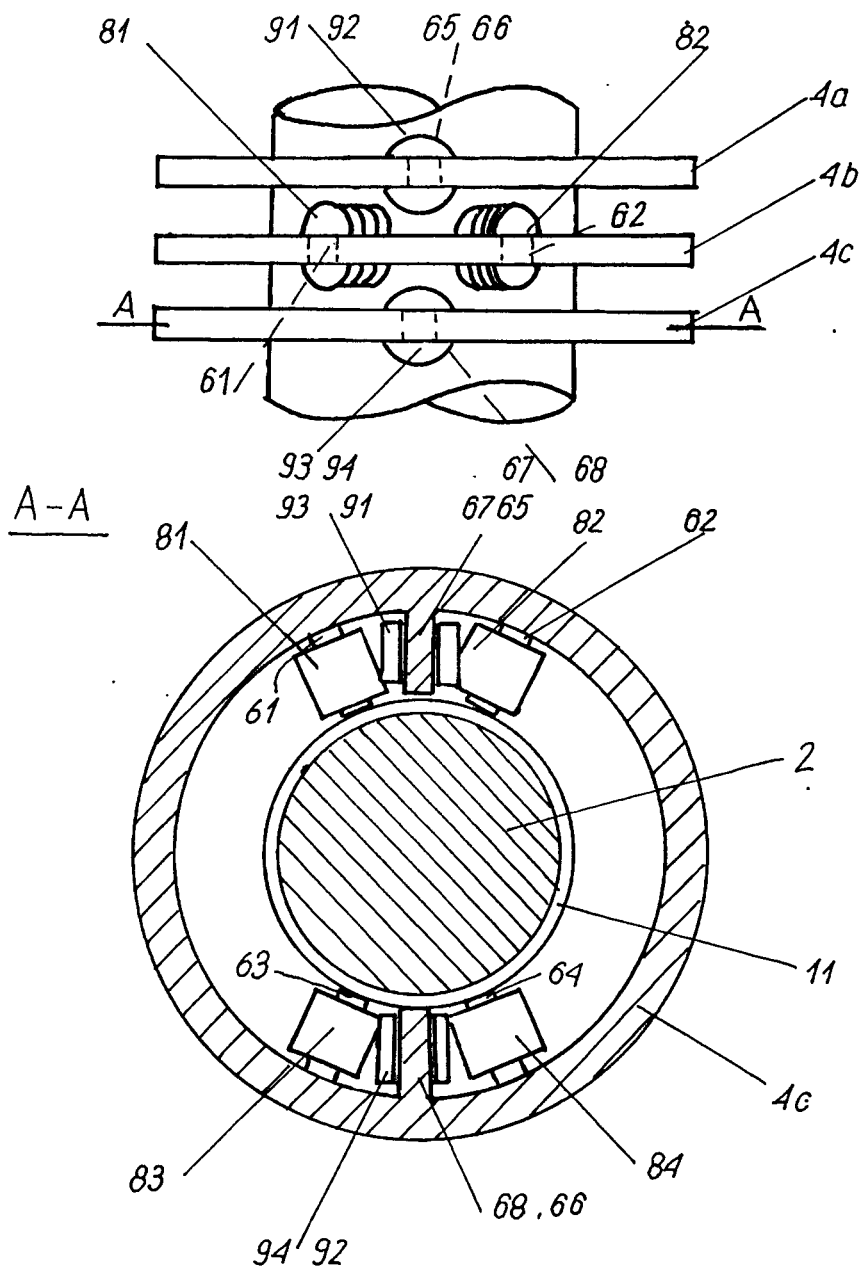


Rys 20 Sposób kształtowania pasków amorficznych

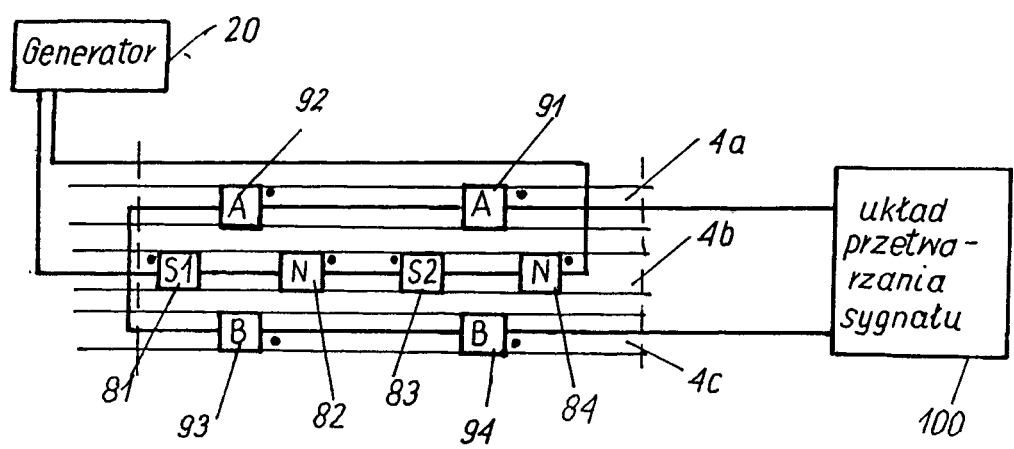
$I_p = 140 \text{ mA}$
 $f = 20 \text{ kHz}$
 $n = 1800 \text{ min}^{-1}$



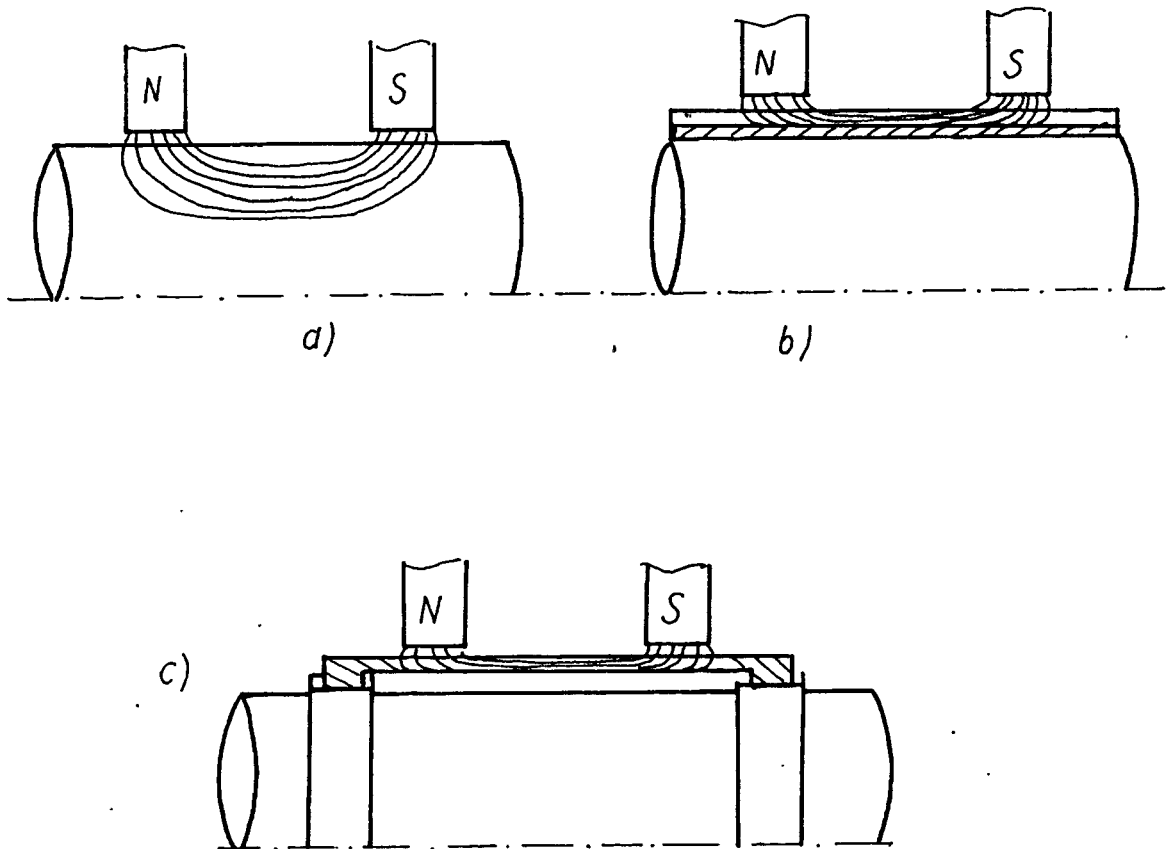
Rys 21 Zależność napięcia wyjściowego od momentu M dla określonego współczynnika m



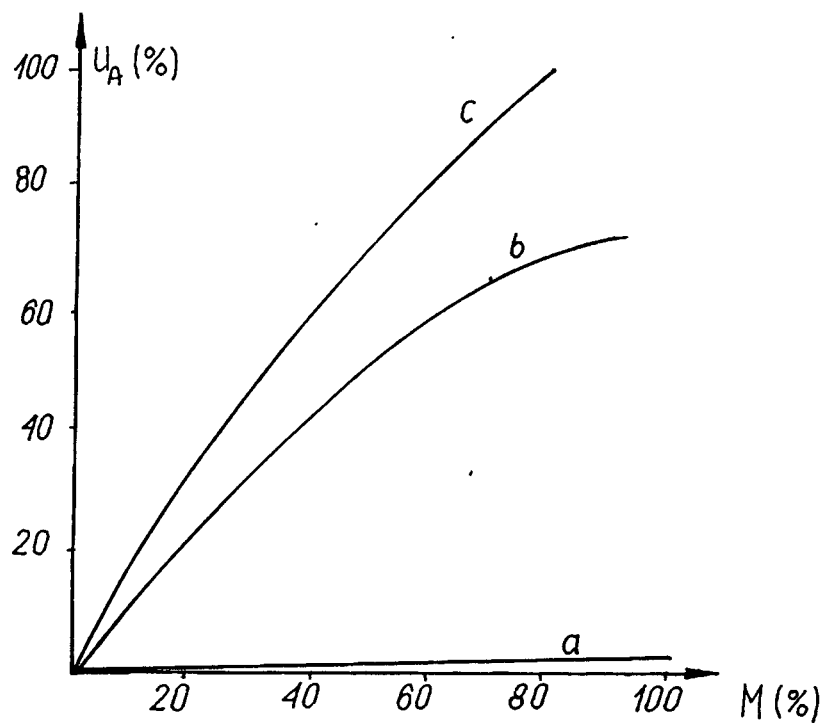
Rys 22 Czujnik momentu , pierścieniowy



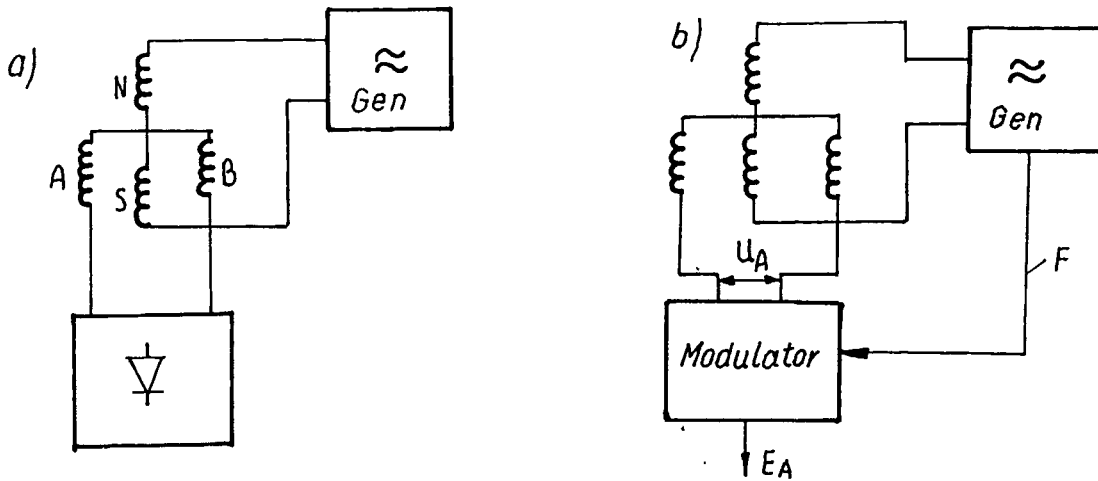
Rys 23 Schemat połączeń cewek w czujniku pierścieniowym



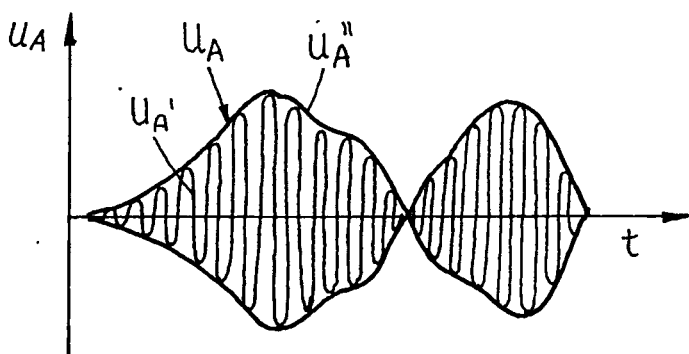
Rys 24 Stosowane pokrycia wału
a) wał bez pokrycia
b) pokrycie - warstwa amorficzna i warstwa izolacyjna
c) pokrycie - warstwa amorficzna i warstwa powietrza



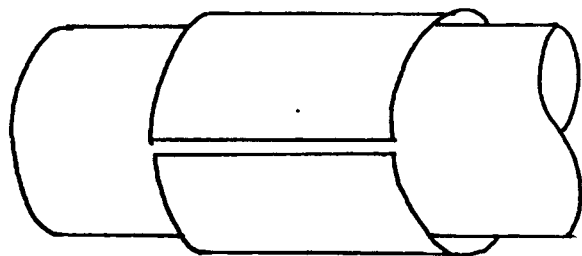
Rys 25 Zależność napięcia U_A od momentu M dla określonego pokrycia powierzchni wału



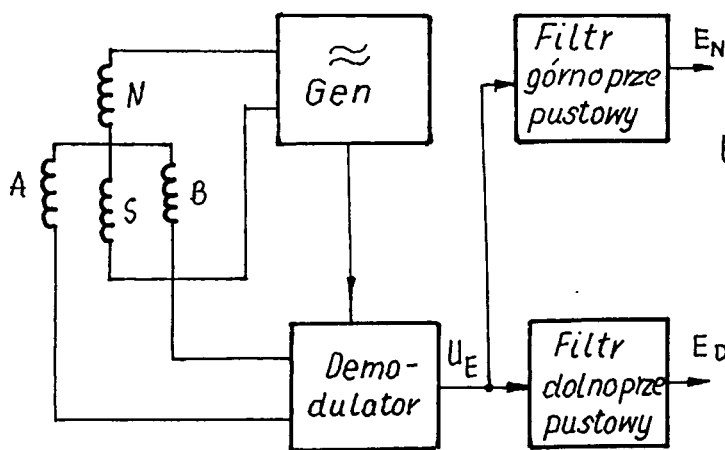
Rys 26 Układ elektroniczny czujnika momentu
 a) z prostownikiem na wyjściu
 b) z modulatorem na wyjściu



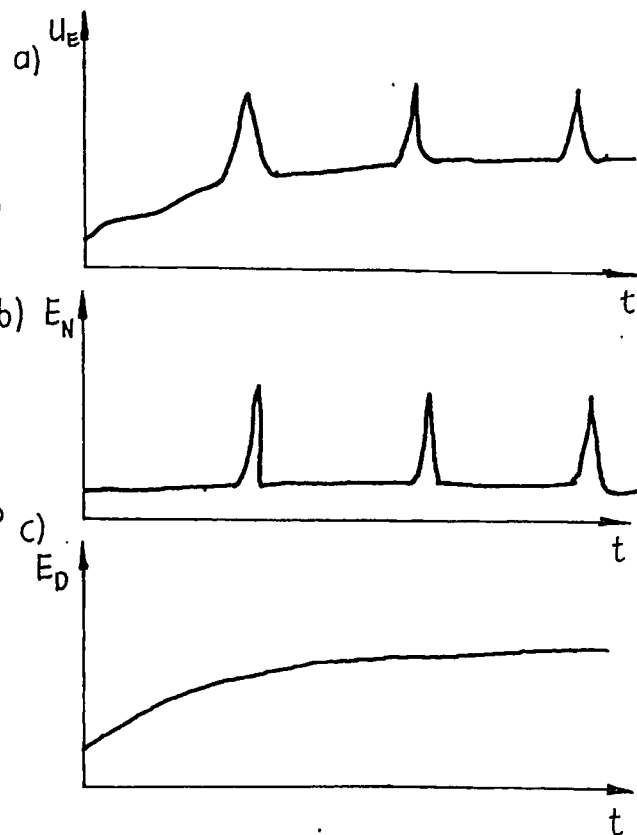
Rys 27 Sygnał wyjściowy z czujnika



Rys 28 Pokrycie powierzchni wału ze szczeliną

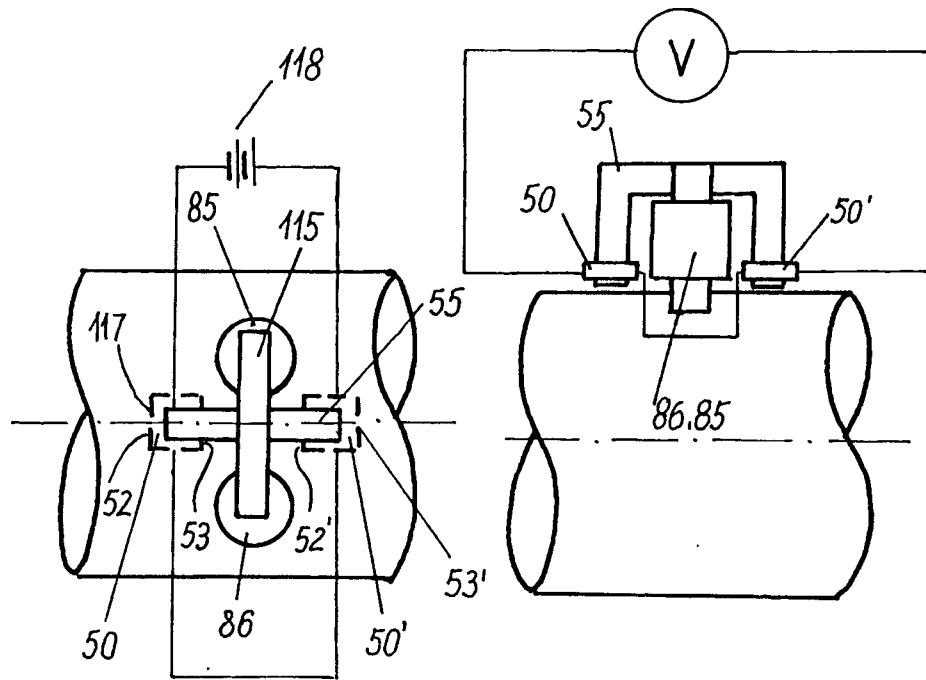


Rys 29 Schemat blokowy układu elektronicznego czujnika

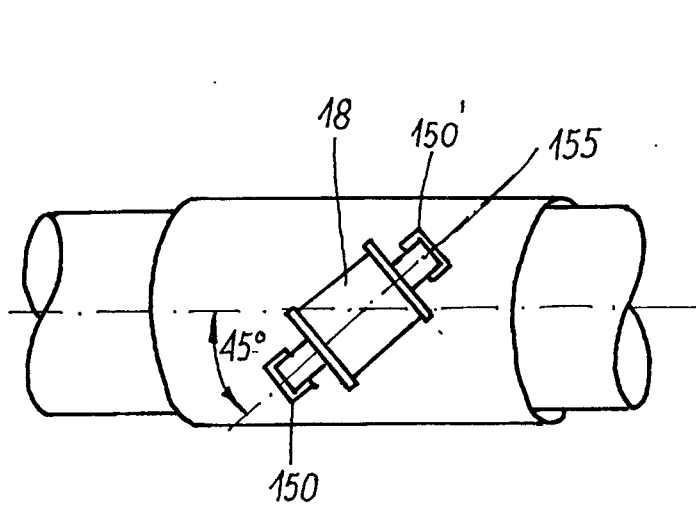


Rys 30 Przebiegi napięć w układzie elektronicznym

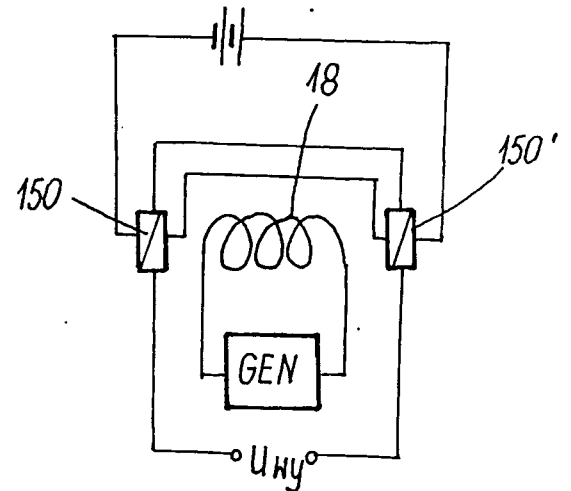
- a) sygnał napięciowy U_E na wyjściu demodulatora
- b) ——— ——— E_N ——— filtru górnoprzepustowego
- c) ——— ——— E_D ——— ——— dolnoprzepustowego



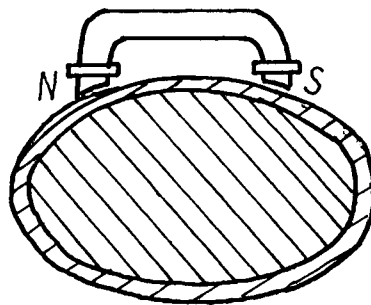
Rys 31 Czujnik momentu z zastosowanym generatorem Halla



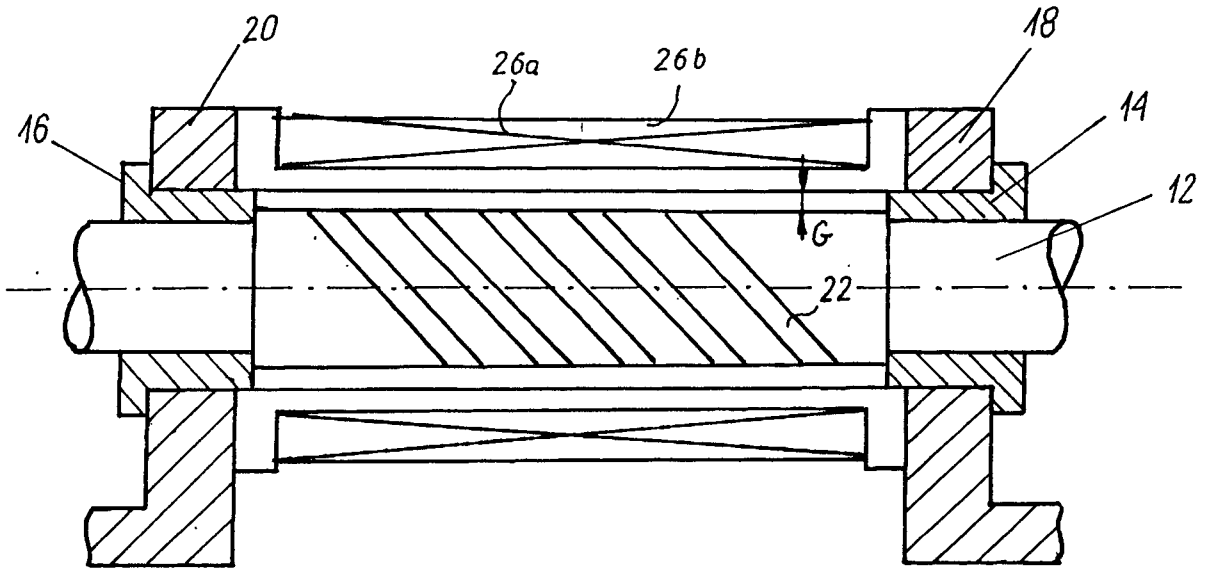
Rys 32 Czujnik momentu z pojedynczym rdzeniem



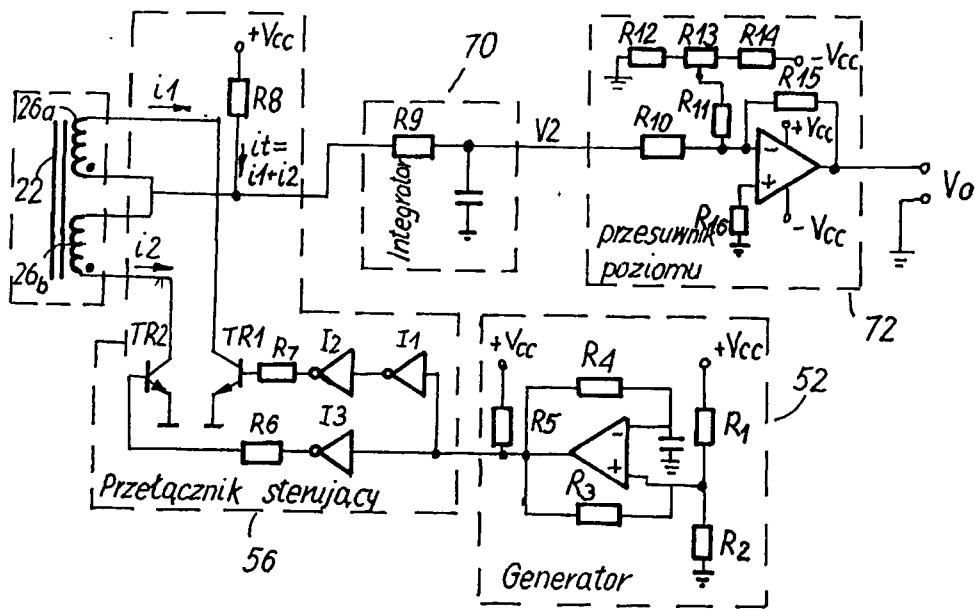
Rys 33 Schemat połączeń w czujniku



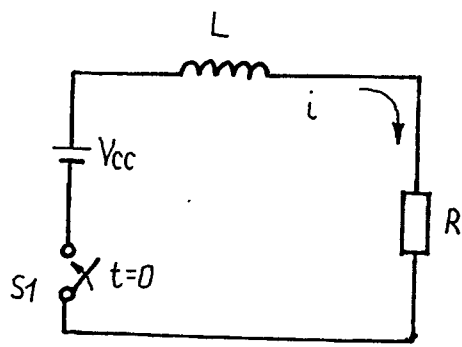
Rys 34 Czujnik momentu z magnesem stałym



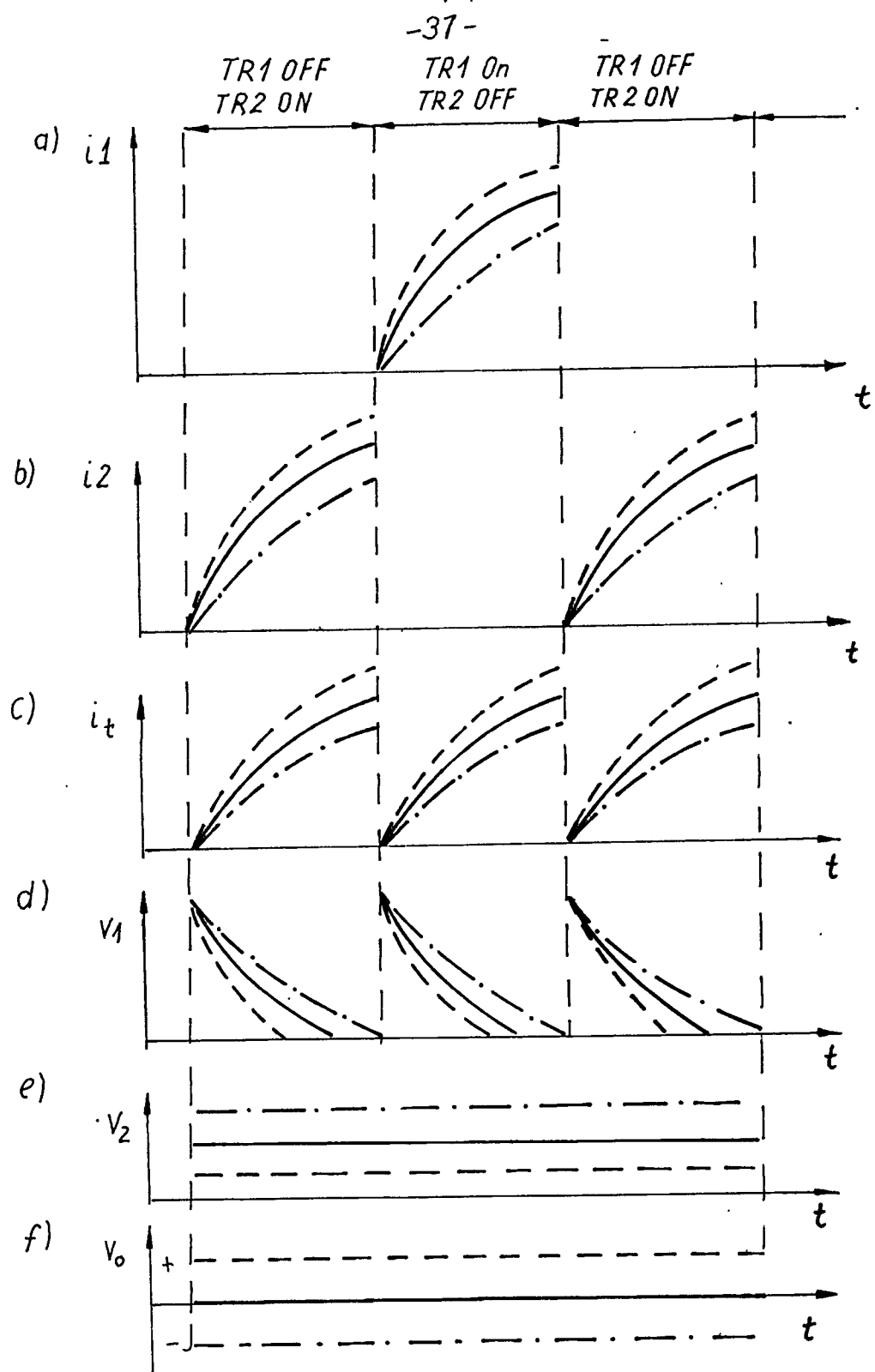
Rys 35 Czujnik momentu



Rys 36 Układ elektroniczny czujnika momentu

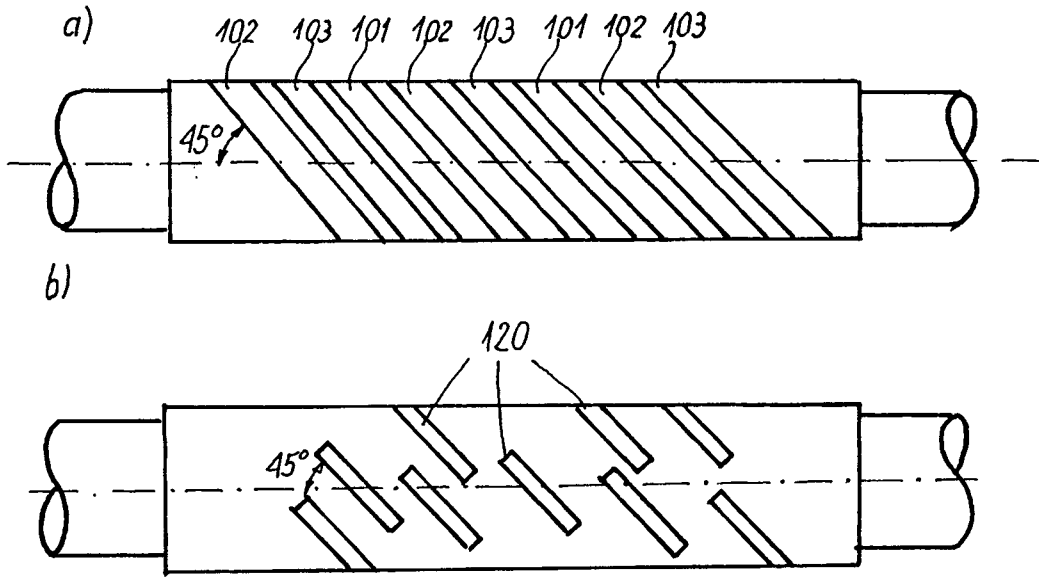


Rys 37 Schemat ilustrujący zasadę działania czujnika



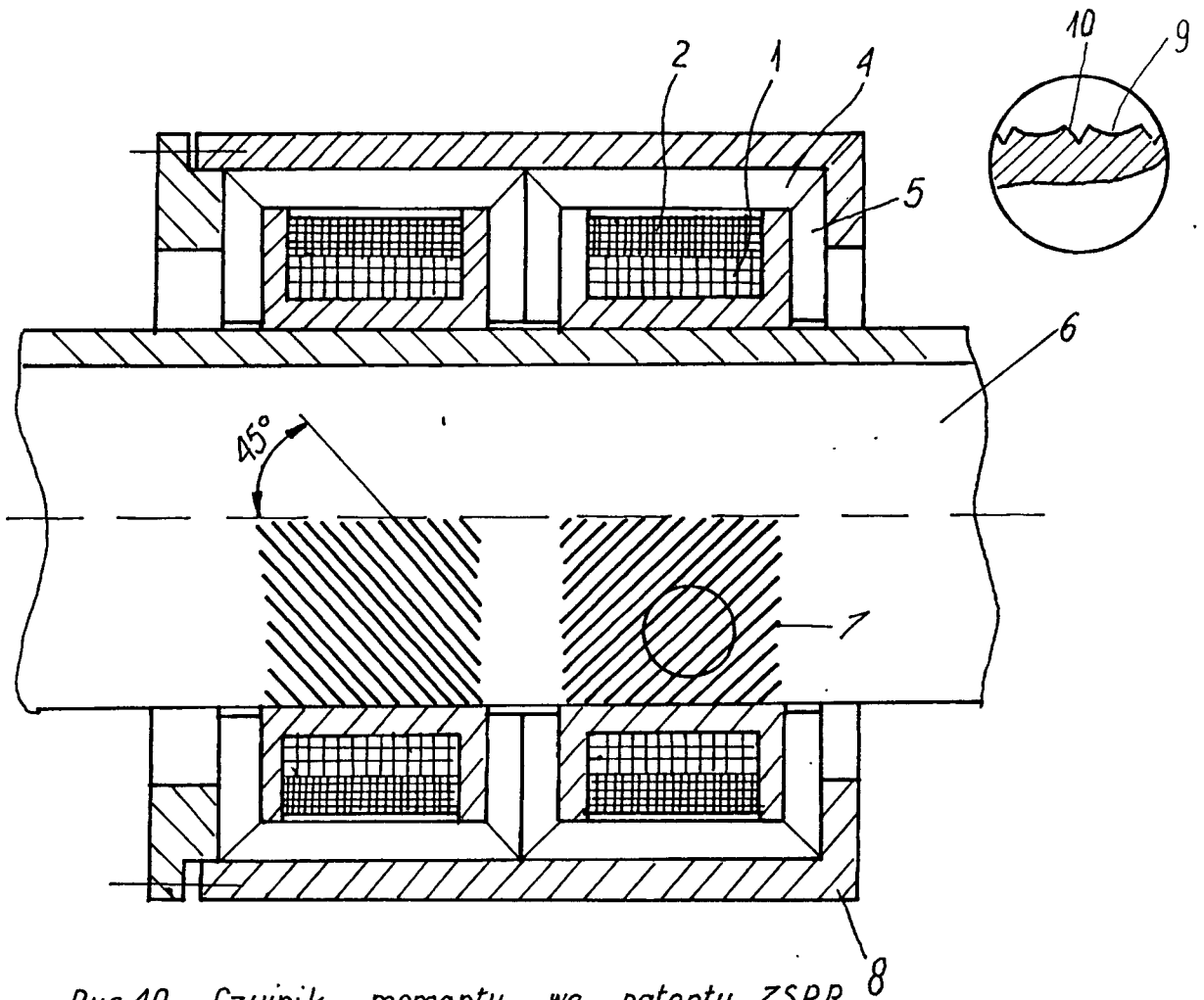
Rys 38 Przebiegi sygnałów napięciowych i prądowych

- a, b) prądy kolektorowe tranzystorów T_1 i T_2
- c) prąd wypadkowy i_t
- d) napięcie na wyjściu z układu cewek
- e) napięcie na wyjściu układu całkującego
- f) napięcie na wyjściu przesuwnika poziomego

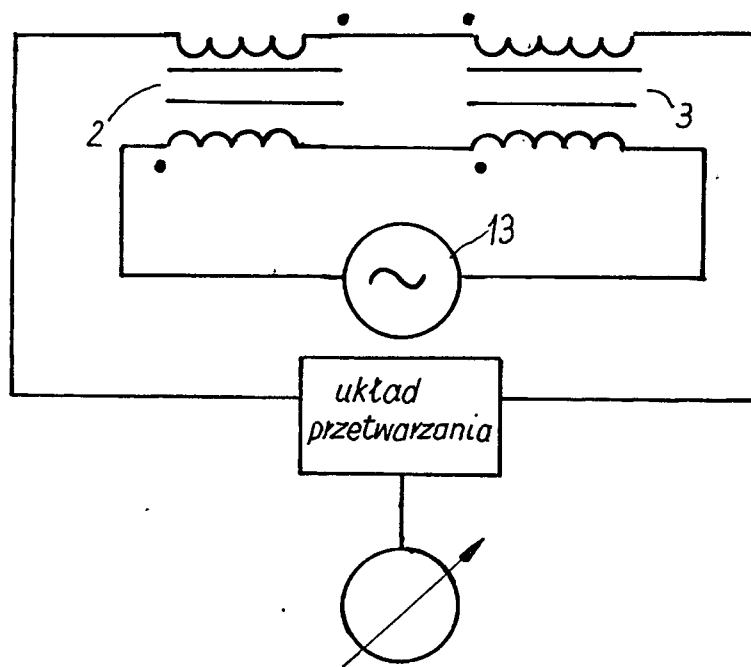


Rys 39 Sposoby naklejania taśmy na powierzchnię wału

- b) zastosowanie wielu pasków
- a) zastosowanie 3 taśm



Rys 40 Czujnik momentu wg patentu ZSRR 8



Rys 41 Schemat połączeń cewek z układem przetwarzającym w czujniku momentu