ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria: GÓRNICTWO z. 133 Nr kol. 834

Zygmunt SZYMAŃSKI

Instytut Elektryfikacji i Automatyzacji Kopalń
Politechniki Śląskiej w Gliwicach

MAGNETOSPRĘŻYSTY CZUJNIK DO POMIARU MOMENTU OBCIĄŻENIA SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH STOSOWANYCH W NAPĘDACH ZESPOŁOWYCH MASZYN GÓRNICZYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe własności statyczne oraz wyniki badań laboratoryjnych magnetosprężystego czujnika do pomiaru momentu obciążenia silników elektrycznych stosowanych w napędach zespołowych maszyn górniczych.

1. WSTĘP

Optymalizacja konstrukcji maszyn elektrycznych oraz układów napędowych wymaga znajomości wartości momentów obciążenia na wałach silników napędzających. Zakres zmian wartości momentów obrotowych silników napędzających zależy od rodzaju oraz od specyfiki układu napędowego i waha się w granicach: $(10^{-4} - 10^{4})$Nm. Decydujący wpływ na wybór odpowiedniej metody pomiarowej momentu obciążenia mają: wartość mierzonego momentu oraz górna granica prędkości obrotowej. Analiza stosowanych czujników momentu obciążenia pozwala ustalić granice zastosowań poszczególnych układów pomiarowych [6]:

a) dla mikrosilników i silników małej mocy:

$M \in (10^{-4}-1)$Nm przy $n \leq 40000 \frac{obr}{min}$,

b) dla silników średniej i dużej mocy:

$M \in (0,1-10^{4})$Nm przy $n \leq 3000 \frac{obr}{min}$.

Metody pomiarowe oraz rozwiązania konstrukcyjne czujników momentu są różne dla grup: "a" i "b". Zapotrzebowanie na czujniki pomiarowe dla grupy "b" jest znacznie większe niż dla grupy "a". Najbardziej przydatne do badań silników elektrycznych średniej i dużej mocy, pracujących w normalnych lub ciężkich warunkach eksploatacyjnych, są czujniki momentu oparte na zjawisku magnetosprężystości [2], [4], [5], [6], [7]. Czujniki te działają w oparciu o zasadę zmiany względnej przenikalności magnetycznej materiału ferromagnetycznego w zależności od występujących w nim naprężeń odkształcających. Czujnik mierzy zmiany naprężenia występujące pod kątem

$\frac{\pi}{4}$ do osi wału pomiarowego. Zmiany te są funkcją momentu obciążenia. Natomiast indukowane w cewkach odbiorczych napięcie wyjściowe jest funkcją naprężeń odkształcających oraz prędkości obrotowej wału pomiarowego. Przez odpowiedni dobór konstrukcji czujnika oraz parametrów zasilania czujnika można uzyskać przebieg funkcji prawie liniowy. Przy obciążeniu wału pomiarowego momentem skręcającym powstają w nim naprężenia rozciągające: $+\sigma$ oraz ściskające: $-\sigma$. Naprężenia odkształcające powodują zmianę przenikalności magnetycznej wału. Wzrost przenikalności następuje w osi naprężeń rozciągających, a zmniejszenie w osi naprężeń ściskających.

Pomiar momentu obciążenia w oparciu o zjawisko magnetosprężystości może być przeprowadzony za pomocą czujników typu:

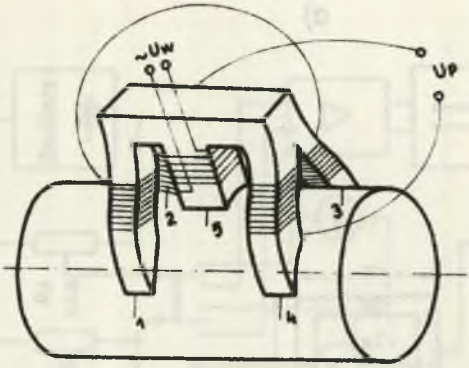
a) krzyżowego,
b) walcowego,
c) tulejowego,
d) transformatorowego.

Czujnik typu krzyżowego ma szereg wad natury technicznej, jak: duża wrażliwość na bicie wirującego wału oraz na symetryczne ustawienia czujnika względem osi wału i nie znalazł szerszego zastosowania.

Czujniki typu walcowego oraz tulejowego mają stosunkowo dobre parametry techniczne, ale cechuje je skomplikowana technologicznie konstrukcja. Najlepszym rozwiązaniem konstrukcyjnym czujnika dla normalnych i trudnych warunków eksploatacyjnych jest czujnik typu transformatorowego. Do podstawowych zalet tego czujnika należą: prosta konstrukcja, mała wrażliwość na bicie wirującego wału oraz na niedokładności ustawienia głowicy czujnika względem wału pomiarowego.

2. ZASADA DZIAŁANIA CZUJNIKA

Czujnik magnetostrykcyjny typu transformatorowego (rys. 1) składa się z 5 biegunów (kolumn). Na kolumnie środkowej "5" jest umieszczone uzwojenie pierwotne. Uzwojenie to jest zasilane prądem przemiennym. Strumień magnetyczny płynący w kolumnie środkowej przenika przez szczelinę powietrzną do wału pomiarowego, gdzie rozpływa się pod kątem $\frac{\pi}{4}$ do osi wału. Z wału strumień przenika przez szczeliny powietrzne do kolumn skrajnych: "1" - "4" (rys. 1). Na kolumnach skrajnych są umieszczone uzwojenia odbiorcze. Cewki tych uzwojeń są połączone parami szeregowo, a obie pary cewek są połączone przeciwsobnie, przy czym do każdej pary cewek są zaliczane cewki odpowiadające jednemu rodzajowi naprężeń (ściskanie lub rozciąganie). Gdy moment skręcający $M_s \approx 0$, to przy symetrii elektrycznej uzwojeń oraz magnetycznej kolumn skrajnych napięcie wyjściowe $U_p \approx 0$ w zależności od stopnia jednorodności wału. Gdy $M_s \neq 0$, wtedy strumień magnetyczny przenikający przez jedną parę kolumn jest większy



Rys. 1. Magnetosprężysty czujnik momentu typu transformatorowego

od strumienia przenikającego drugą parę. Różnica napięć indukowanych w poszczególnych grupach cewek jest funkcją momentu skręcającego.

3. OPIS BUDOWY CZUJNIKA

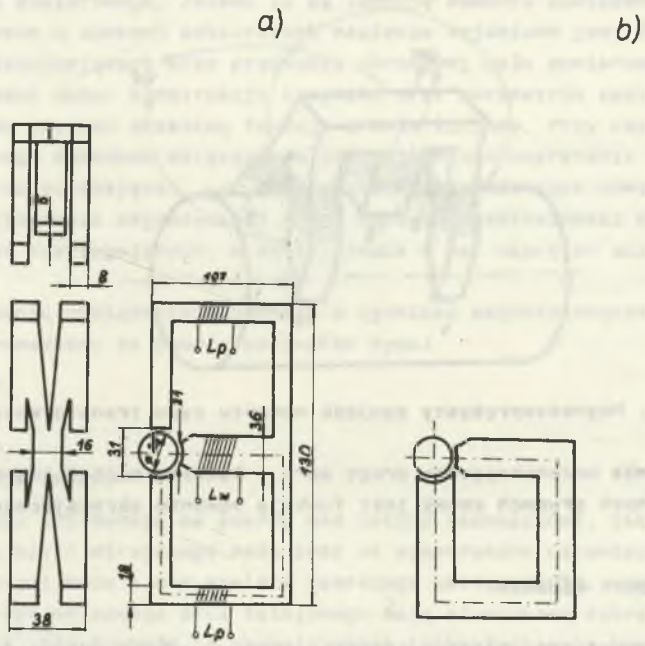
Obwód magnetyczny głowicy czujnika stanowi pakiet odpowiednio ukształtowanych blach transformatorowych typu EI. Końcowe powierzchnie kolumn głowicy są odpowiednio wyprofilowane. Szczelina powietrzna między kolumnami a wałem pomiarowym ma wartość stałą, minimalną ze względów technologicznych. Pakiet blach tworzący kolumny boczne oraz jarzmo jest o połowę cieńszy od pakietu blach kolumny środkowej. Kolumny boczne są oddalone od siebie o odległość nieco mniejszą od średnicy badanego wału. Do budowy głowicy czujnika zastosowano blachy transformatorowe, elektrolityczne o zawartości 3% Si i grubości d = 0,35 mm, izolowane papierem. Obwód magnetyczny czujnika stanowią 4 pieńki biegunów pomiarowych o wymiarach: (8 x 18)mm oraz jeden pieniek bieguna wzbudzającego o wymiarach: (16x21) mm. Przekrój głowicy czujnika przedstawiono na rys. 2.

Obwód elektryczny czujnika tworzą: uzwojenie wzbudzania umieszczone na pieńku wzbudzającym oraz cewki pomiarowe umieszczone na kolumnach pomiarowych. Wielkościami wyjściowymi przy doborze liczby zwojów poszczególnych uzwojeń głowicy pomiarowej czujnika są: maksymalna wartość napięcia zasilania, częstotliwość zasilania oraz maksymalna wartość napięcia indukowana w cewce pomiarowej. Dla modelu czujnika przyjęto: U_{smax} = 400 V przy f_s = 50 Hz oraz U_{pmax} = 2 V. Na podstawie [1], [3], [9] obliczono liczbę zwojów poszczególnych cewek głowicy:

uzwojenie wzbudzenia: z_w = 4200, DNE 0,4 mm,

uzwojenie pomiarowe: z_p = 2000, DNE 0,15 mm.

Aby uzyskać optymalne warunki pracy czujnika, z każdej cewki poszczególnych uzwojeń wyprowadzono odczepy.

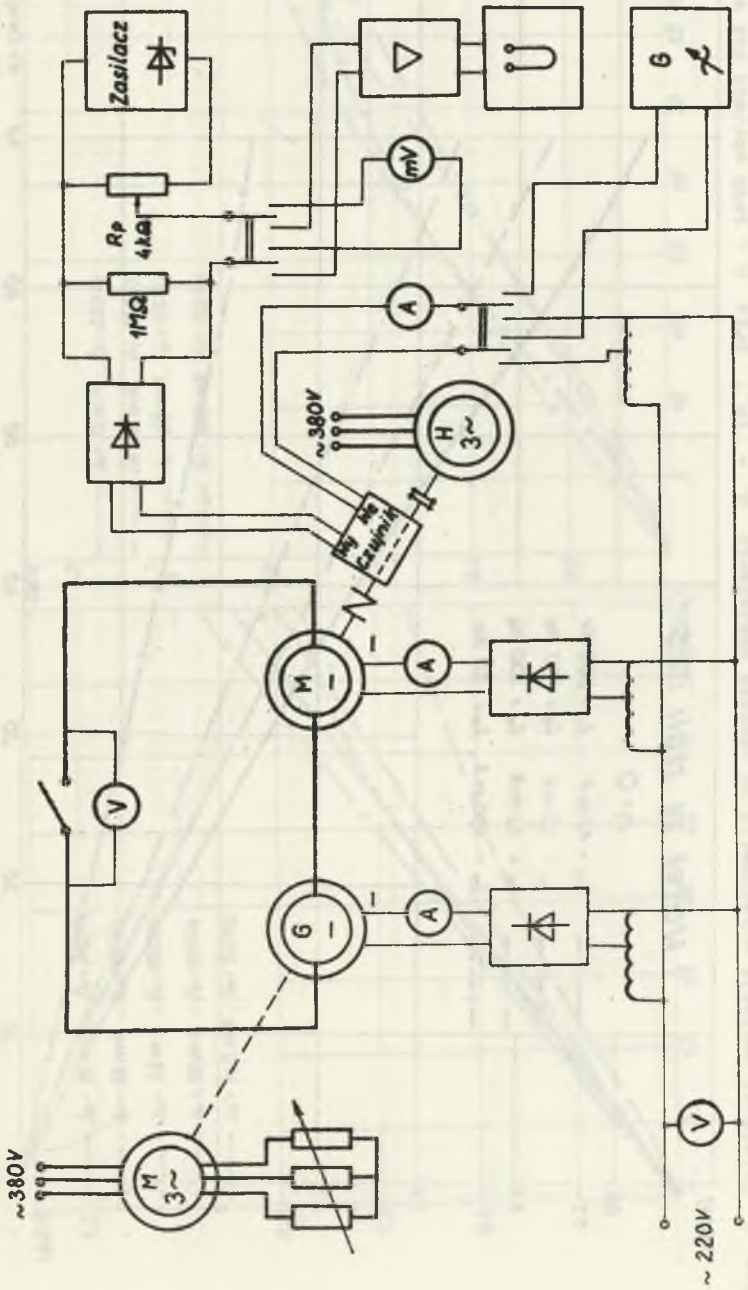


Rys. 2. Obwód magnetyczny głowicy pomiarowej czujnika

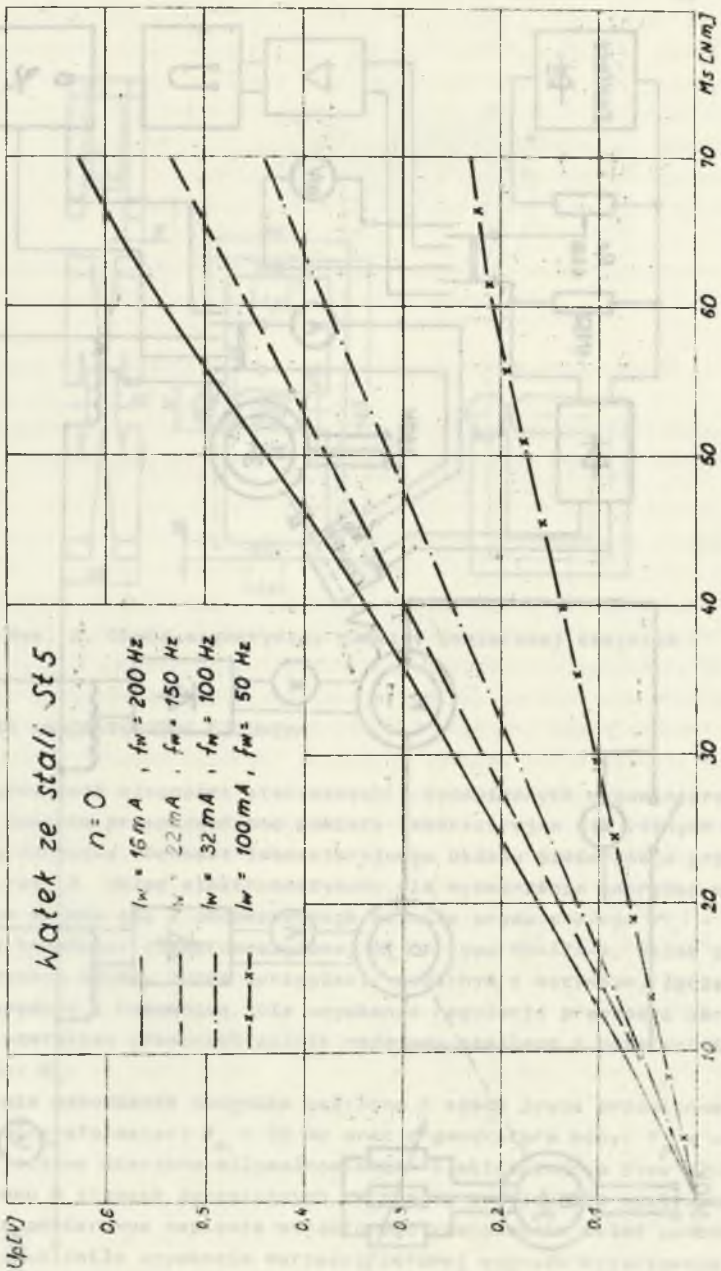
4. BADANIA LABORATORYJNE CZUJNIKA

Dla określenia własności statycznych i dynamicznych magnetosprężystego czujnika momentu przeprowadzono pomiary laboratoryjne dla różnych warunków pracy czujnika. Schemat laboratoryjnego układu pomiarowego przedstawiono na rys. 3. Układ elektromaszynowy dla wytwarzania naprężeń w wale pomiarowym składa się z obcowzbudnego silnika prądu stałego ($M_{_}$) - typu PCMb54a i hamownicy elektromaszynowej ($H_{_}$) - typu KS-37A-4. Wałek pomiarowy umieszczono między dwoma sprzęgłami: podatnym i sztywnym, łączącymi silnik napędowy z hamownicą. Dla uzyskania regulacji prędkości obrotowej układu w szerokich granicach silnik napędowy zasilono z przetwornicy prądu stałego: $G_{_}$.

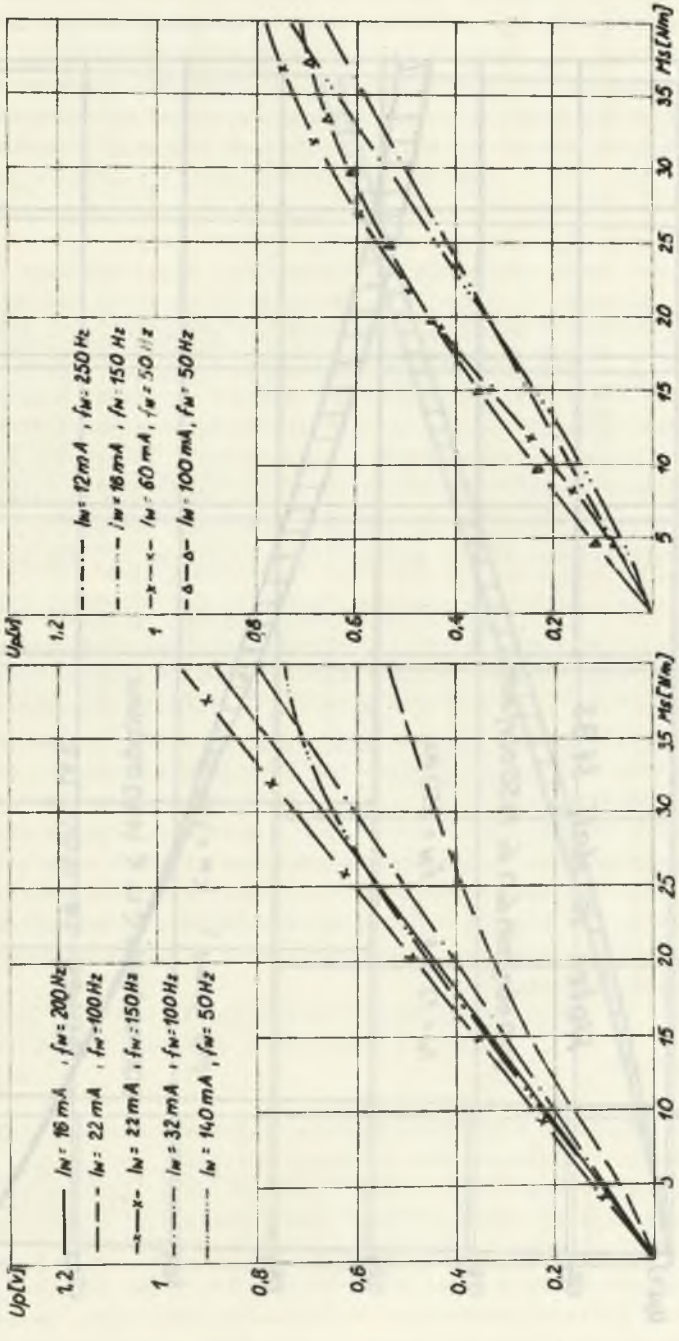
Uzwojenie wzbudzenia czujnika zasilono z sieci prądu przemiennego przez autotransformator: f_s = 50 Hz oraz z generatora mocy: f_s = var. Napięcie wyjściowe mierzono miliwoltomierzem elektronicznym typu U722A oraz rejestrowano w stanach dynamicznych za pomocą oscylografu pętlicowego. W układzie pomiarowym napięcia wyjściowego zastosowano układ kompensacji zera, co umożliwiło uzyskanie wartości zerowej sygnału wyjściowego przy momencie obciążenia $M_s \approx 0$.



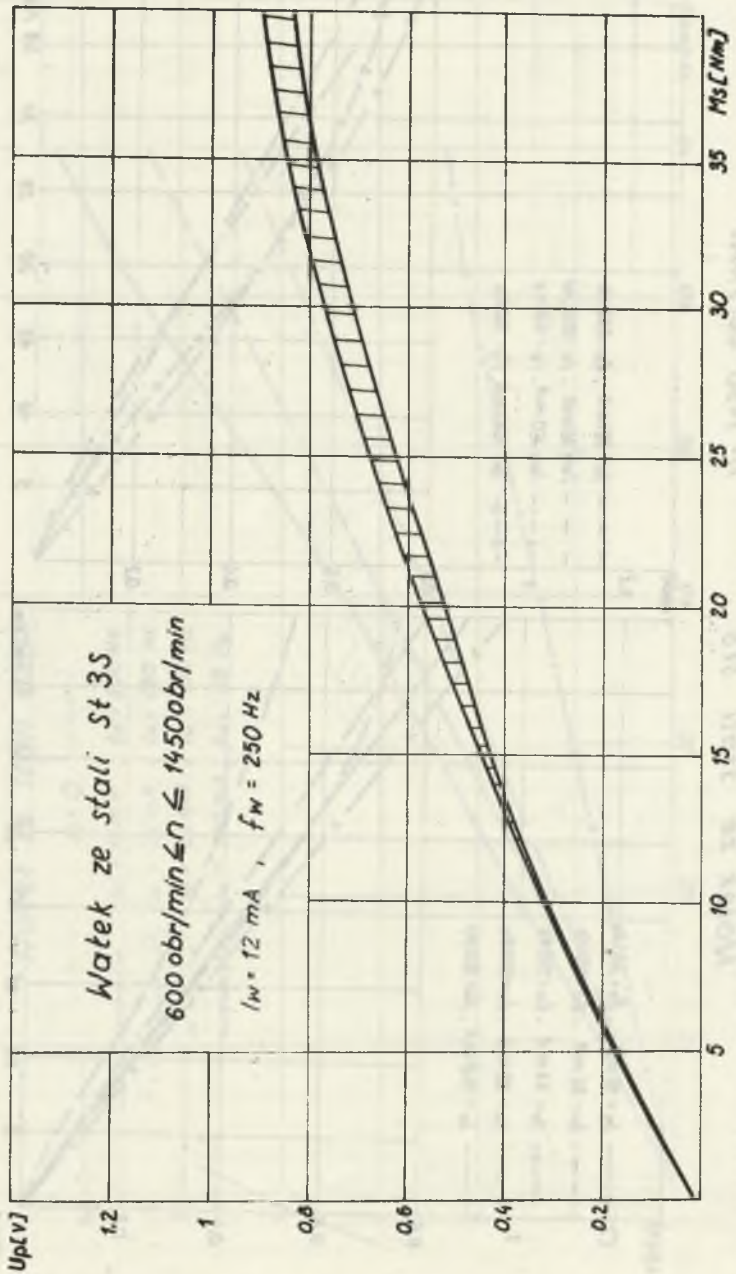
Rys. 3. Schemat laboratoryjnego układu pomiarowego czujnika



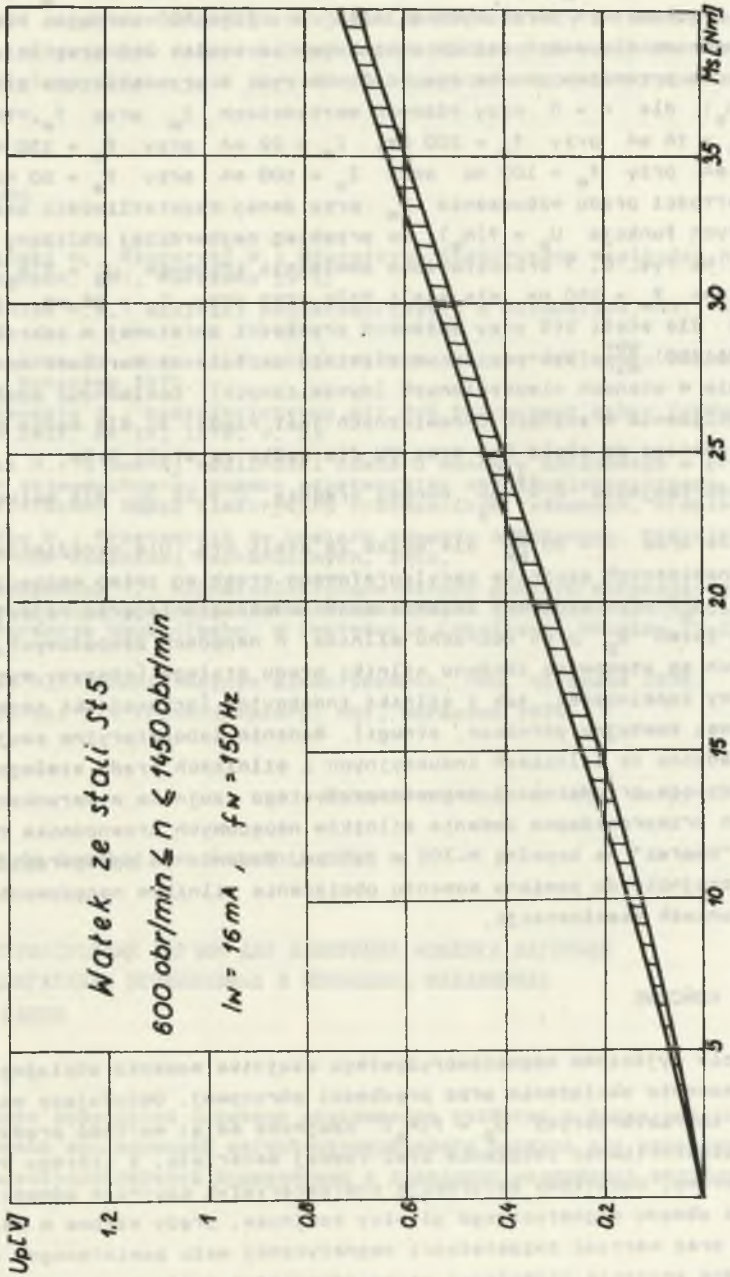
Rys. 4. Zależność napięcia wyjściowego U_p od momentu obciążenia $U_p = f(M_s)$ przy n = 0 dla wałka St 5



Rys. 5. Zależność napięcia wyjściowego od momentu obciążenia $U_p = f(M_s)$ przy n = 1450 obr/min dla wałka St 5



Rys. 6. Charakterystyka $U_p = f(M_s)$ dla $I_w = 12$ mA, $f_w = 250$ Hz



Rys. 7. Charakterystyka $U_p = f(M_s)$ dla I_w = 12 mA, f_w = 150 Hz

Dla określenia własności statycznych czujnika przeprowadzono pomiary: napięcia wyjściowego U_p w funkcji momentu obciążenia M_s dla: różnych prądów wzbudzenia I_w, różnych częstotliwościach zasilania f_w oraz przy różnych prędkościach obrotowych silnika $n \in (0 \div 1450)$ obr/min. Pomiary przeprowadzono dla dwóch wałków wykonanych ze stali: St5 oraz St3s. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 4-7. Na rys. 4 przedstawiono zależność $U_p = f(M_s)$ dla $n = 0$ przy różnych wartościach I_w oraz f_w. Przy czym: $I_w = 16$ mA przy $f_w = 200$ Hz, $I_w = 22$ mA przy $f_w = 150$ Hz; $I_w = 32$ mA przy $f_w = 100$ Hz oraz $I_w = 100$ mA przy $f_w = 50$ Hz; określają wartości prądu wzbudzenia I_w przy danej częstotliwości zasilania, dla których funkcja $U_p = f(M_s)$ ma przebieg najbardziej zbliżony do liniowego. Na rys. 6, 7 przedstawiono obwiednie krzywych $U_p = f(M_s)$ przy $I_w = 12$ mA; $f_w = 250$ Hz dla stali St3s oraz przy $I_w = 16$ mA, $f_w = 150$ Hz dla stali St5 przy zmianach prędkości obrotowej w zakresie: $n \in (600 \div 1450)\ \frac{obr}{min}$. Wykresy te umożliwiają określenie wartości momentu obciążenia w stanach nieustalonych (dynamicznych). Dokładność odczytu momentu obciążenia w stanach dynamicznych jest rzędu: 3% dla wałka pomiarowego wykonanego ze stali St5 oraz 8% dla wałka ze stali St3s.

Czułość czujnika $C \stackrel{df}{=} \frac{U_p}{M_s}$ wynosi średnio $C = 23\ \frac{mV}{Nm}$ dla wałka ze stali St3s oraz $C = 20\ \frac{mV}{Nm}$ dla wałka ze stali St5. Dla określenia własności dynamicznych czujnika oscylografowano przebieg zmian napięcia wyjściowego U_p przy skokowej zmianie momentu obciążenia oraz rejestrowano przebieg zmian U_p przy rozruchu silnika. W napędach zespołowych maszyn górniczych są stosowane zarówno silniki prądu stałego (maszyny wyciągowe, lokomotywy kopalniane), jak i silniki indukcyjne (przenośniki taśmowe, zgrzebłowe; kombajny górnicze, strugi). Badania laboratoryjne czujnika przeprowadzono na silnikach indukcyjnych i silnikach prądu stałego. W celu sprawdzenia przydatności magnetosprężystego czujnika w warunkach przemysłowych przeprowadzono badania silników napędowych przenośnika taśmowego typu "Gwarek" na kopalni M-300 w Zabrzu. Badania te potwierdziły przydatność czujnika do pomiaru momentu obciążenia silników napędowych w różnych warunkach eksploatacji.

5. UWAGI KOŃCOWE

Napięcie wyjściowe magnetosprężystego czujnika momentu obciążenia jest funkcją momentu obciążenia oraz prędkości obrotowej. Decydujący wpływ na przebieg charakterystyki $U_p = f(M_s)$ czujnika mają: wartość prądu wzbudzenia, częstotliwość zasilania oraz rodzaj materiału, z którego wykonano wał pomiarowy. Dodatkowe deformacje charakterystyk czujnika powodują: histereza obwodu magnetycznego głowicy czujnika, prądy wirowe w wale pomiarowym oraz wartość pozostałości magnetycznej wału pomiarowego. Czynniki te można znacznie ograniczyć przez odpowiedni dobór wartości prądu

wzbudzenia, częstotliwości zasilania oraz zastosowanie odpowiedniego materiału do budowy wału pomiarowego.

Czułość magnetosprężystego czujnika momentu zależy od dokładności wykonania, właściwości magnetycznych materiału oraz od warunków cieplnych pracy, dlatego celowe jest określenie parametrów czujnika razem z wałem pomiarowym.

LITERATURA

[1] Łapiński M., Włodarski W.: Miernictwo elektryczne wielkości nieelektrycznych. WNT, Warszawa 1971.

[2] Gumaniuk M.N.: Czujniki magnetosprężyste w automatyce. WNT, Warszawa 1967.

[3] Missalowa J., Missala T.: Elektryczne pomiary wielkości mechanicznych. PWN, Warszawa 1971.

[4] Drakenskjo I.: Messeinrichtung mit dem Drenmoment geber Torductor. ASEA Zeit. Nr 15, 1970, V. 2.

[5] Mońka H.: O pewnej możliwości pomiaru momentu obrotowego w przenośnikach taśmowych przy pomocy przetwornika magnetoelektrycznego. Konf. Nauk.-Techn. Napęd Elektryczny Przenośników Taśmowych. Wrocław 1967.

[6] Puczko M.: Przetwornik do pomiaru momentu obrotowego. Miernictwo Dynamicznych Wielkości Mechanicznych. 1981.

[7] Słuszkiewicz T.: Magnetoelastyczne metody pomiaru skręcającego momentu mechanicznego. Miernictwo Dynamicznych Wielkości Mechanicznych. Konferencja Nauk.-Techn. w Instytucie Lotnictwa, Wrocław 21-23.05. 1964.

[8] Latek W.: Badanie maszyn elektrycznych. PWN, Warszawa 1976.

[9] Jezierski E.: Transformatory. WNT, Warszawa 1975.

Recenzent: Doc. dr inż. Jerzy HICKIEWICZ

Wpłynęło do Redakcji we wrześniu 1984 r.

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОМЕНТА НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМАХ ШАХТНЫХ МАШИН

Р е з ю м е

В работе приводятся основные статические свойства а также результаты лабораторных исследований магнитострикционного датчика для измерения нагрузки электродвигателей применяемых в приводных механизмах шахтных машин.

THE MAGNETOELASTIC SENSOR FOR MEASURING THE LOAD TORQUE OF ELECTRIC MOTORS USED IN POWER UNITS OF MINING MACHINES

S u m m a r y

In the paper are presented the basic static properties as well as laboratory test results of a magnetoelastic sensor for measuring the load torque of electric motors used in power units of mining machines.