ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: ELEKTRYKA z. 71 Nr kol. 656

Marian MIŁEK,
Józef KWICZAŁA

KONSTRUKCJA I TECHNOLOGIA DETEKTORA STRUMIENIA MAGNETYCZNEGO KOMPARATORA PRĄDÓW STAŁYCH

Streszczenie. Przedstawiono wybrane problemy konstrukcji i technologii przetwornika strumienia stałego na napięcie przemienne, spełniającego funkcję detektora w magnetycznym komparatorze prądów. Opisano praktyczną realizację przetwornika oraz przytoczono wyniki pomiarów właściwości metrologicznych.

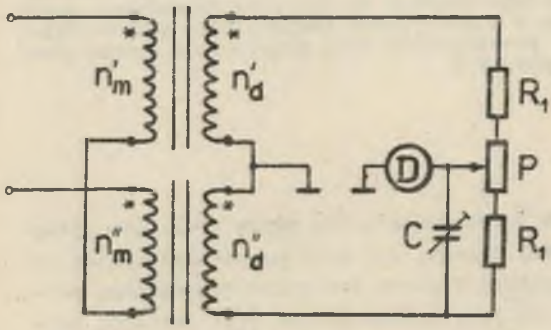
1. Wstęp

W komparatorach prądów stałych porównywane prądy płyną przez dwa sprzężone magnetycznie uzwojenia, w taki sposób, by siły magnetomotoryczne odejmowały się. Realizacja dostatecznie czułego detektora reagującego bezpośrednio na siłę magnetomotoryczną jest bardzo trudna [9]. Znacznie łatwiej można wykonać czuły detektor reagujący na wielkość związaną, za pomocą prostych zależności z siłą magnetomotoryczną - na strumień magnetyczny. Zasadniczym problemem konstrukcji komparatorów jest zapewnienie ścisłej zależności różnicy sił magnetomotorycznych uzwojeń i różnicy strumieni magnetycznych, poddanej detekcji. Sposobem umożliwiającym spełnienie tego warunku jest umieszczenie w uzwojeniach magnetowodów zamykających drogę strumienia magnetycznego. Stąd problem detekcji różnicy sił magnetomotorycznych stałych sprowadza się do detekcji strumieni magnetycznych w magnetowodzie.

Detektorem strumienia stałego są m.in. elementy magnetooporowe, hallotrony, dwurdzeniowe przetworniki strumienia stałego na napięcie przemienne (modulatory parzystych harmonicznych) lub elementy wykorzystujące efekt Josephsona (SQIUD) [10]. Te ostatnie charakteryzują się najlepszymi właściwościami metrologicznymi, jednak zakres ich zastosowań jest ograniczony do komparatorów kriogenicznych [2]. Istnieje możliwość umieszczenia elementów magnetooporowych lub hallotronów w szczelinie magnetowodu, ale przecięcie magnetowodu powoduje wzrost reluktancji i w efekcie pogorszenie współzależności strumieni sił magnetomotorycznych. Dlatego, mimo że np. cienkowarstwowe magnetooporniki posiadają mniejszą wartość błędu pobudliwości, najwłaściwszym rozwiązaniem detektora jest dwurdzeniowy przetwor-

nik strumienia stałego na napięcie przemienne. Rozwiązanie to jest zrealizowane w wykonanych komparatorach prądów [3], [4], [5], [6], [8]. Literatura dotycząca zasady działania i konstrukcji przetwornika strumienia na napięcie przemienne jest bardzo obszerne. Jednak realizacja takiego przetwornika przeznaczonego do detekcji strumienia magnetycznego komparatorów prądów różni się istotnymi szczegółami konstrukcyjnymi, nie omawianymi w literaturze dotyczącej magnetycznych komparatorów prądów.

2. Wpływ parametrów przetwornika strumienia na właściwości metrologiczne komparatorów prądów



Rys. 1. Schemat układu mostkowego detektora strumienia

Podstawowymi elementami przetwornika strumienia są dwa toroidalne magnetowody z rozwiniętymi uzwojeniami detekcyjnymi oraz modulującymi. Schemat układu przetwornika przedstawia rys. 1. Uzwojenia detekcyjne połączono z opornikami R_1 w układ mostkowy, przy czym wprowadzanie magnetowodów do stanu nasycenia odbywa się przy pomocy dodatkowych uzwojeń modulujących (n'_m, n''_m). Kierunek nawinięcia obu uzwojeń modulujących względem siebie jest przeciwny; detekcyjnych - zgodny. Układ mostkowy pozwala na:

- łatwą minimalizację napięcia asymetrii, powstałego wskutek nieidentycznych właściwości obu magnetowodów detektora, poprzez zastosowanie potencjometru P oraz pojemności C,
- zastosowanie elektronicznego detektora napięcia wyjściowego przetwornika o wejściu niesymetrycznym (ponieważ punkt połączenia uzwojeń może być uziemiony),
- ustalenie prądów pojemnościowych uzwojenia detekcyjnego.

Zadaniem przetwornika strumienia jest stwierdzenie zera strumienia i tym samym zera różnicy sił magnetomotorycznych uzwojeń komparatora. Dlatego zasadniczym kryterium określenia parametrów przetwornika są: maksymalna czułość komparatora, błąd pobudliwości komparatora oraz błąd histerezy.

Czułość komparatora prądów jest zdefiniowana, jako iloraz napięcia wyjściowego przetwornika strumienia U_{2b} do różnicy sił magnetomotorycznych uzwojeń Θ_r:

$$S_K = \frac{U_{2h}}{\theta_r} \tag{1}$$

Z zależności opisanych w pracach [1], [6] i in., wyznacza się czułość modulatorów parzystych harmonicznych, jako iloraz napięcia wyjściowego U_{2h} do natężenia pola magnetycznego stałego H_s.

$$S_m = \frac{U_{2h}}{H_s} = 16\ f\ n_d\ s\ \mu_o \mu \tag{2}$$

dla $$H_m/H_{nas} \cong \sqrt{2},$$

gdzie:

n_d - liczba zwojów uzwojenia detekcyjnego,
s - pole przekroju poprzecznego magnetowodu,
H_m - natężenie pola magnetycznego modulującego magnetowody,
H_{nas} - natężenie pola magnetycznego powodujące nasycenie magnetowodów.

Zależność (2) obowiązuje dla przetworników strumienia, w których napięcie wyjściowe jest różnicą napięć indukowanych w uzwojeniu detekcyjnym. W przypadku układu mostkowego czułość jest dwukrotnie mniejsza. Stąd z porównania zależności (1) oraz (2) wynika:

$$S_k = \frac{8}{l}\ f\ n_d\ s\ \mu_o \mu \tag{3}$$

gdzie l - średnia droga strumienia magnetycznego.

Drugą wielkością, charakteryzującą komparator, o wartości której decydują parametry przetwornika strumienia jest bezwzględny błąd pobudliwości. Błąd ten zdefiniowano jako najmniejszy przyrost siły magnetomotorycznej, powodujący zauważalną zmianę napięcia wyjściowego przetwornika strumienia, w stanie równowagi komparatora. Uwzględniając to, że napięcie wyjściowe jest mierzone woltomierzem analogowym - za zauważalną zmianę napięcia przyjęto wartość odpowiadającą zmianie odchylenia wskazówki nie mniej niż o $\Delta\alpha = 0{,}2$ dz. W stanie równowagi komparatora na wyjściu przetwornika strumienia istnieje napięcie spowodowane nieidentycznością parametrów magnetycznych i elektrycznych obu magnetowodów i związanych z nimi uzwojeń. Napięcie to, nazwane napięciem asymetrii, ogranicza od dołu wartość błędu pobudliwości. Jeżeli np. napięcie asymetrii dwóch przetworników strumienia różnią się o rząd to, ponieważ równoważenie w pobliżu stanu równowagi będzie realizowane na różnych zakresach woltomierza, innym wartościom będzie odpowiadało $\Delta\alpha = 0{,}2$ dz. Stąd wynika wniosek, że jedynym sposobem zmniejszenia błędu pobudliwości jest zmniejszenie napięcia asymetrii. Problem tan był szczegółowo omówiony w pracy [7].

Źródłem napięcia asymetrii jest:

- nieidentyczność charakterystyk magnesowania obu magnetowodów,

- zmiana gęstości zwojowej (dn_d/dl) wzdłuż drogi strumienia,
- zmiany wymiarów geometrycznych obu magnetowodów,
- niejednorodność permeancji wzdłuż drogi strumienia [7].

Wymienione wielkości zmieniają się w sposób charakterystyczny dla każdego egzemplarza magnetowodu. Dlatego podstawowym wymogiem technologii przetwornika strumienia jest praktyczny dobór pary magnetowodów o najmniejszym napięciu asymetrii. Dalsze zmniejszenie napięcia asymetrii jest możliwe dzięki zastosowaniu w układzie mostkowym elementów C oraz P, przedstawionych na rys. 1.

Trzecią cechą przetwornika strumienia, charakteryzującą jednocześnie komparator jest graniczna niestałość zera. Główną przyczyną niestałości zera jest histereza magnetyczna. Efektem jej jest zmiana napięcia wyjściowego przetwornika strumienia w stanie, gdy siły magnetomotoryczne uzwojeń są równe zeru, po uprzednim wymuszeniu jednokierunkowego strumienia w magnetowodach. Zjawisko histerezy magnetycznej maleje i następnie prawie zanika, gdy amplituda fali modulującej wzrasta. Dokładnego określenia jej wartości należy dokonać na drodze doświadczalnej. Ogólnie można stwierdzić, że efekt histerezy magnetycznej wyraźnie maleje dla $H_m/H_{nas} > 1$.

3. Technologia przetwornika strumienia

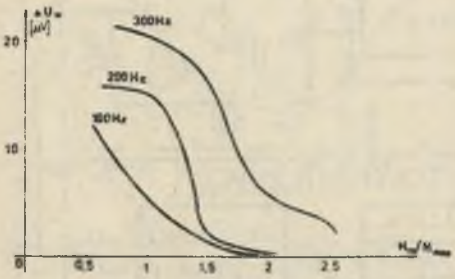
Z zależności (3) wynikają wnioski dotyczące wymiarów geometrycznych magnetowodów: minimalna długość drogi strumienia oraz maksymalne pole przekroju poprzecznego magnetowodu. Wnioski te są w pełni słuszne w przypadku magnetowodów wzmacniaczy magnetycznych lub sond Forstera. W przypadku komparatorów prądowych o wymiarach geometrycznych decyduje technologia uzwojeń pomiarowych, która musi zapewnić ścisły związek pomiędzy siłami magnetomotorycznymi i odpowiadającymi im strumieniami, warunkujący mały błąd komparatora. Z pracy [8] wynika, że magnetowody powinny posiadać średnicę zawartą w przedziale od d = 120...200 mm oraz pole przekroju poprzecznego $S \cong 10^{-4}$ mm^2.

Z zależności (3) wynika, że czułość komparatora jest proporcjonalna do modułu względnej początkowej przenikalności magnetycznej. Dlatego magnetowody wykonane są z taśmy permalojowej P80 o grubości 0,1 mm. Moduł względnej początkowej przenikalności magnetycznej wynosi ok. $35 \cdot 10^3$. Magnetowody umieszczono w karkasach z tekstolitu, które przyjmują nacisk uzwojeń. Nacisk uzwojeń na permaloj, w przypadku nawinięcia uzwojeń bezpośrednio na magnetowody, wskutek zjawiska magnetostrykcji, powoduje kilkunastoprocentowe zmniejszenie modułu względnej przenikalności magnetycznej. Z kolei na karkasach nałożono ekran elektrostatyczny wykonany z folii aluminiowej, do której dołączono przewód uziemiający. Ekran ten ustala pojemności uzwojeń detekcyjnych, nawiniętych w następnej warstwie, o liczbie zwojów n_d = 1410; średnicy przewodu 0,2 mm. Zarówno liczba zwojów jak i

średnica przewodu wynikają z przesłanek technologicznych. Uzwojenie detekcyjne powinno być nawinięte na magnetowodzie jednowarstwowo i równomiernie (warunek minimalizacji napięcia asymetrii), maksymalną liczbą zwojów (zależność 2). Aktualnie praktyczne nawinięcie, za pomocą nawijarki do magnetowodów toroidalnych, uzwojenia przewodem o średnicy mniejszej niż 0,2 mm jest bardzo trudne ze względu na małą wytrzymałość mechaniczną przewodu. Stąd wynika średnica uzwojenia detekcyjnego oraz liczba zwojów obliczona jako iloraz obwodu wewnętrznego magnetowodu i średnicy przewodu.

W kolejnej warstwie oddzielonej drugim ekranem elektrostatycznym nawinięto uzwojenie modulujące o liczbie zwojów $Z_m = 140$. Następnym etapem realizacji komparatora jest parowanie magnetowodów ze względu na minimalną wartość napięcia asymetrii. Z kilkunastu magnetowodów pochodzących z tego samego cyklu produkcyjnego uzyskiwano 1-2 par o napięciu asymetrii mniejszym niż 1 mV, w porównaniu z napięciami uzwojeń detekcyjnych równymi ok. 80 V.

Istotnym problemem jest istnienie histerezy magnetycznej spowodowanej chwilowym podmagnesowaniem siłą magnetomotoryczną o dużej wartości. Dla wybranej pary magnetowodów zbadano zależność napięcia pozostałości magnetycznej ΔU_H, na wyjściu detektora strumienia, w funkcji H_m/H_{nas} (gdzie H_m - natężenie pola magnetycznego modulującego, H_{nas} - natężenie pola magnetycznego powodującego nasycenie magnetowodów), dla częstotliwości f_o=100, 200, 300 Hz. Jak wynika z przebiegu charakterystyk przedstawionych na rys. 2, napięcie histerezy magnetycznej gwałtownie maleje dla $H_m/H_{nas} > 1,2...1,4$.



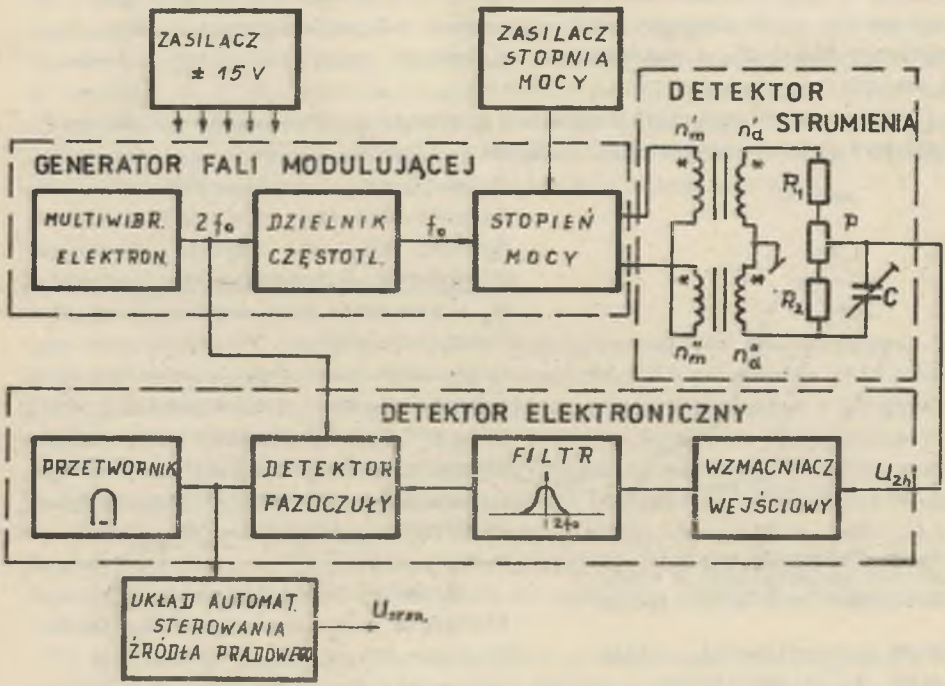
Rys. 2. Zależność napięcia pozostałości magnetycznej w funkcji natężenia pola modulującego

Zależność napięcia spowodowanego histerezą magnetyczną jest podstawą wyboru częstotliwości zasilania przetwornika strumienia. Z zależności (3) wynika, że częstotliwość zasilania powinna być jak największa. Z kolei z charakterystyk przedstawionych na rys. 4 widać, że napięcie spowodowane histerezą maleje szybciej dla niższych częstotliwości, Dodatkowym wymaganiem jest, aby częstotliwość zasilania przetwornika strumienia była różna od częstotliwości harmonicznych sieci.

3. Pomocnicze układy elektroniczne

Istotną rolę w prawidłowej pracy komparatora odgrywają: generator fali modulującej oraz elektroniczny detektor napięcia wyjściowego przetwornika strumienia.

Generator fali modulującej zbudowany jest na bazie multiwibratora Royer'a (o sprzężeniach magnetycznych), synchronizowanego multiwibratorem elektronicznym o częstotliwości własnej 2 f_0. Dzięki temu częstotliwość oraz amplituda generatora nie są zależne od wartości impedancji obciążenia, która zmienia się w funkcji podmagnesowującej magnetowody siły magnetomotorycznej. Detektor elektroniczny (rys. 3) składa się ze wzmacniacza wstępnego o dużej impedancji wejściowej, dwustopniowych filtrów pasmowo-przepustowych o częstotliwości środkowej 2f_0, detektora fazoczułego oraz przetwornika magnetoelektrycznego. Detektor fazoczuły sterowany jest sygnałem o częstotliwości 2f_0 z multiwibratora elektronicznego generatora fali modulującej.



Rys. 3. Schemat blokowy detektora elektronicznego

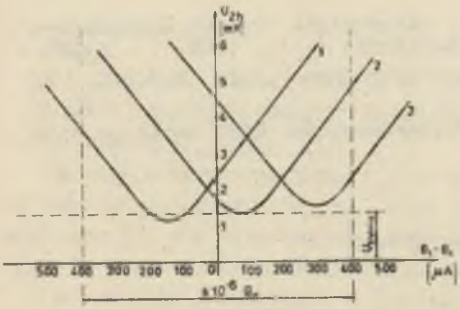
Zastosowanie detektora fazoczułego umożliwia określenia znaku różnicy sił magnetomotorycznych. Sygnał wyjściowy detektora fazoczułego steruje poprzez układ automatyki prąd jednego ze źródeł, sprowadzając różnicę sił magnetomotorycznych do zera. Ze względu na dużą stałą czasową komparatora układ automatyki posiada specjalne układy korekcji dynamicznej.

W przypadku chwilowych silnych przemagnesowań magnetowodów strumieniem uzwojeń porównawczych przetwornik strumienia pobiera z zasilacza znacznie

zwiększoną moc. Aby uniknąć przeciążenia uzwojeń przetwornika strumienia wykonano zabezpieczenie przeciążeniowe. Zabezpieczenie to powoduje gwałtowne obniżenie napięcia wyjściowego generatora w przypadku różnicy sił magnetomotorycznych większych niż 1% siły magnetomotorycznej nominalnej.

4. Pomiar charakterystyki czułości

Określenie charakterystyki czułości przetwornika strumienia $U_{2h}=f(\phi)$ jest z praktycznego punktu widzenia niecelowe. Równorzędną miarą jakości przetwornika strumienia jest charakterystyka $U_{2h} = f(\Theta)$ - charakterystyka czułości komparatora. W celu zbadania przebiegu charakterystyki nawinięto na magnetowodzie dodatkowe uzwojenie wymuszające siłę magnetomotoryczną. Zależność napięcia wyjściowego detektora strumienia w funkcji podmagnesowującej siły magnetomotorycznej przedstawiono na rys. 4. Na rysunku tym, przedstawiono początkowe fragmenty charakterystyk dla różnych stanów histerezy. Widoczny jest obszar niejednoznaczności charakterystyki. Obszar ten powinien być mniejszy od bezwzględnej niedokładności porównania sił magnetomotorycznych. Np. dla przyjętej niedokładności względnej komparatora $\pm 10^{-6}$ obszar niejednoznaczności powinien być mniejszy niż $\pm 10^{-6}\,\Theta_N$, gdzie Θ_N - nominalna siła magnetomotoryczna uzwojeń porównawczych. Z charakterystyki przedstawionej na rys. 4 wyznacza się czułość komparatora $S_K \cong 10$ V/A.



Rys. 4. Zależność napięcia wyjściowego detektora strumienia w funkcji podmagnesowującej siły magnetomotorycznej dla różnych napięć pozostałości magnetycznej

5. Zakończenie

Jak wynika z przedstawionej pracy, przetwornik strumienia jest elementem współdecydującym o właściwościach metrologicznych komparatora prądów stałych. Realizacja dwurdzeniowego przetwornika strumienia na napięcie przemienne wymaga magnetowodów o prawie identycznych charakterystykach. Jest to warunkiem minimalizacji napięcia asymetrii przetwornika strumienia oraz błędu pobudliwości komparatora prądów. Istotną rolę odgrywają parametry fali zasilającej przetwornik strumienia. Zależy od nich obszar niejednoznaczności charakterystyki czułości, spowodowany histerezą magnetyczną.

LITERATURA

[1] Geyger W.A.: Schiemy magnitnych usilitieliej. Gosenergoizdat 1959.

[2] Harvey I.K.: A precise low temperature d.c.ratio transformer. Rev.Sci. Instr.vol. 43. p. 1626, 1972.

[3] Kusters N.L., Mac Martin M.: A direct current comparator bridge for high resistance measurement. IEEE Trans. on Instr. and Meas. No 4, p. 22, 1973.

[4] Kusters N.L., Moore W.J.H.: A current comparator for the precision measurement of the d-c ratios. IEEE trans. on Instr. and Meas. vol. 82, March 1963.

[5] Kusters N.L., Mac Martin M.: A direct current comparator bridge for four terminal resistance measurements. IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. 15, December 1966.

[6] Miłek M.: Analiza i konstrukcja magnetycznego kompensatora przepływu prądu stałego w układzie porównania rezystancji. Praca doktorska, Gliwice 1976.

[7] Miłek M.: Analiza błędu pobudliwości komparatora prądów stałych i sposoby jego minimalizacji. Zesz.Nauk.Pol.Śląskiej, Elektryka z. 55, 1976.

[8] Miłek M., Kwiczała J.: Konstrukcja i technologia uzwojeń komparatora prądów stałych. Zesz.Nauk.Pol.Sl., Elektryka z. 71, 1980.

[9] Słuszkiewicz T.: Kompensacyjny pomiar przepływu prądu Z.N.AGH. Nr 91, Kraków 1965.

[10] Webb W.W.: Superconducting Quantum Magnetometers. IEEE Trans.on Mag. Vol.Mag. 8, Nr 1, 1972.

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ДЕТЕКТОРА МАГНИТНОГО ТОКА КОМПАРАТОРА ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ

Р е з ю м е

В статье даются избранные проблемы конструкции и технологии преобразователя постоянного потока в переменное электрическое напряжение, исполняющего функцию детектора в магнитном компараторе токов. Описывается практическая реализация преобразователя и приводятся результаты измерений метрологических свойств.

CONSTRUCTION AND TECHNOLOGY OF FLUX DETECTOR OF DC MAGNETIC COMPARATOR

S u m m a r y

Some problems of construction and technology of transducer of constant flux to AC voltage are presented. This transducer is used as a detector in magnetic current comparator. Practical realisation of such transducer is described, as well as some results of measurements of metrologic properties are given.