

Ryszard HAGEL

Marian MIŁEK

Tadeusz SKUBIS

INDUKCYJNE DZIELNIKI NAPIĘĆ I KOMPARATORY PRĄDÓW W UKŁADACH POMIAROWYCH

Streszczenie. W artykule dokonano przeglądu prac prowadzonych w ostatnich latach przez Instytut Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej Politechniki Śląskiej w dziedzinie układów pomiarowych z indukcyjnymi dzielnikami napięć i komparatorami prądów. Przedstawiono uzyskane rezultaty oraz określono kierunki dalszych prac.

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych warunków rozwoju gospodarki narodowej jest postęp w dziedzinie technologii i konstrukcji precyzyjnych narzędzi pomiarowych. Istnieje sprzężenie zwrotne: precyzyjne narzędzia pomiarowe umożliwiają szczegółowe badanie zjawisk, wykorzystywanych następnie w konstrukcji nowych, bardziej precyzyjnych narzędzi pomiarowych. Współczesna technologia procesów produkcyjnych wymaga coraz częściej pomiarów parametrów z najwyższą, możliwą do osiągnięcia precyzją.

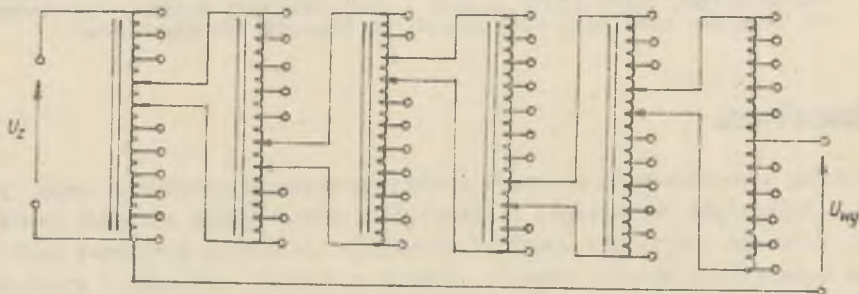
Doceniając znaczenie i rolę precyzyjnych narzędzi pomiarowych, od kilku lat prowadzone są w Instytucie Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej Politechniki Śląskiej prace w zakresie konstrukcji i technologii nowych narzędzi do pomiaru wielkości elektrycznych. Narzędzia pomiarowe, wykorzystujące jako elementy nastawcze impedancje, osiągnęły granicę możliwości technologicznych zwiększenia precyzji. Dalsze zwiększenie precyzji narzędzi pomiarowych jest możliwe w przypadku zastąpienia elementów nastawczych impedancyjnych, indukcyjnymi dzielnikami napięcia (IDN) oraz komparatorami prądowymi (KP). Prace nad IDN oraz KP rozpoczęto w IMEiE w latach 1972-73. Ich efektem było opanowanie technologii siedmiodekadowego IDN w układzie Kelvina-Verleya oraz komparatorów prądów zmiennych i stałych z detekcją strumienia w układzie drugiej harmonicznej. Wyniki prac były tematami opracowań [4], [5], [6], [7], [8], [9].

2. Indukcyjne dzielniki napięcia

Wielodekadowy dzielnik indukcyjny odtwarza stosunek dwu napięć, przy czym dokładność wskazania tej wartości jest około 2...3 rzędy większa niż w dzielnikach rezystancyjnych lub pojemnościowych. Z punktu widzenia dokładności wskazania stosunku napięć przez dzielnik opracowano model matematyczny, który uwzględnia wszystkie istotne źródła błędów i wskazuje warunki ich minimalizacji [8], [9].

W oparciu o ten model wykonano szereg dzielników indukcyjnych, których badania potwierdziły słuszność generalnej koncepcji modelu oraz doprowadziły do jego udoskonalenia.

W wyniku tych prac dokonano wdrożenia sześciodekadowych dzielników indukcyjnych do produkcji w Zakładzie Doświadczalnym Elektrotechniki i Mechaniki precyzyjnej w Gliwicach. Wykonano również stanowiska do pomiarów błędów oraz impedancji wejściowych i wyjściowych dzielników.



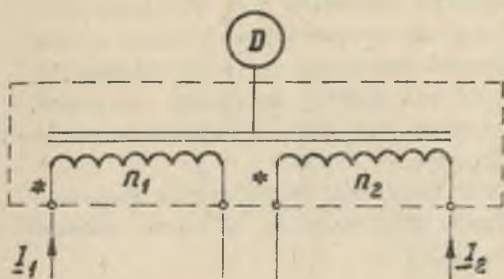
Rys. 1. 6-dekadowy dzielnik indukcyjny w układzie Kelvina-Verleya

Ważniejsze parametry tych dzielników są następujące (rys. 1):

- błąd modułowy $\delta < 1 \cdot 10^{-6}$
- błąd kątowy $\gamma < 2 \mu\text{rad}$,
- impedancja wejściowa $Z_{we} > 50 \text{ k}\Omega$,
- impedancja wyjściowa $Z_{wy} < 6 \Omega$,
- napięcie wejściowe $U_{we} [\text{V}] = 0,2 f [\text{Hz}]$,
- częstotliwość pracy $f = 100 \dots 5000 \text{ Hz}$.

3. Komparatory prądów

Zasada działania komparatorów prądów polega na porównaniu dwóch prądów doprowadzonych do uzwojeń nawiniętych na magnetowodzie, jak to pokazano na rysunku 2. Detektor strumienia, symbolicznie oznaczony na rysunku przez D, wskaże zero, gdy strumienie w magnetowodzie związane z każdym z uswe-



Rys. 2. Ilustracja zasady działania komparatora prądów

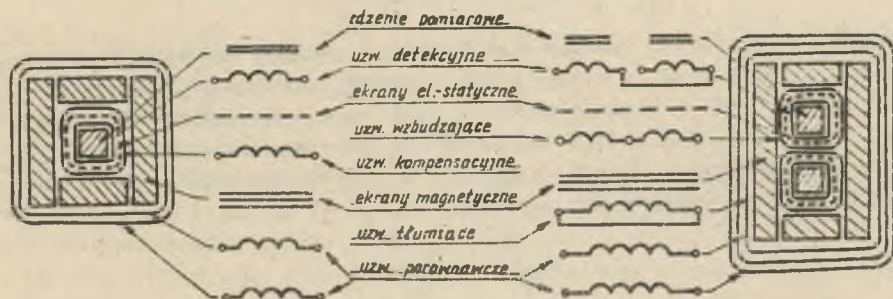
jeń będą równe i przeciwnie skierowane. Jeżeli technologicznie zapewni się ścisłą zależność pomiędzy strumieniem, a siłą magneto-motoryczną każdego z uzwojeń, to

$$\underline{I}_1 n_1 - \underline{I}_2 n_2 = 0, \quad (1)$$

Wynik porównania otrzymuje się dla stanu kompensacji sił magneto-motorycznych $\mathcal{Q}_1 = \mathcal{Q}_2$. Stan kompensacji dla $\mathcal{Q}_1 \neq \mathcal{Q}_2$ można osiągnąć dwoma sposobami:

- zmieniając liczbę zwojów jednego z uzwojeń,
- wymuszając w dodatkowym uzwojeniu kompensacyjnym n_k prąd \underline{I}_k , taki, że $\underline{I}_k n_k = \mathcal{Q}_1 - \mathcal{Q}_2$.

Istotnym elementem w komparatorach są ekrany magnetyczne. Ekrany te zwierają strumień rozproszenia uzwojeń porównawczych, tak, że do detektora przenika tylko strumień roboczy. Jest to warunek konieczny otrzymania małego błędu porównania dwóch prądów. Komparatory prądów stałych różnią się od komparatorów prądów zmiennych sposobem detekcji strumienia. W komparatorach prądów zmiennych w celu stwierdzenia istnienia strumienia wystarczy nawinąć na magnetowodzie uzwojenie detekcyjne. Natomiast w komparatorach prądów stałych detekcję strumienia zrealizowano w układzie tzw. modulatora parzystych harmonicznych [3], [5]. Schemat uzwojeń oraz przekroje poprzeczne komparatorów zmiennie- i stałoprądowych przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schematy oraz przekroje poprzeczne komparatorów zmiennie- i stałoprądowych

W komparatorze prądów stałych dodatkowym elementem jest uzwojenie tłumiące. Uzwojenie to umożliwia bezpieczną dla komparatorów, skokową zmianę prądu w uzwojeniach porównawczych. Ponadto zmniejsza napięcia zmienne indukujące się w uzwojeniach porównawczych pod wpływem zmiennych strumieni detektora. Analiza właściwości komparatorów oraz zjawisk zachodzących w nich, była m.in. przedmiotem prac [4], [5].

Opanowanie technologii KP umożliwiało wykonanie komparatorów stałoprądowych, porównujących dwa prądy, z błędem mniejszym niż 10^{-6} oraz zmiennoprądowych - z błędem mniejszym niż $5 \cdot 10^{-7}$.

4. Zastosowanie KP i IDN

IDN oraz KP umożliwiły opracowanie jakościowo nowych, precyzyjnych narzędzi pomiarowych, służących do pomiaru podstawowych wielkości elektrycznych. Prace nad konstrukcją układów pomiarowych z IDN i KP, prowadzone w IMEiE, koncentrują się w trzech kierunkach:

- mostki do pomiaru pojemności oraz indukcyjności,
- układy do komparacji rezystancji,
- układy do uwierzytelniania precyzyjnych narzędzi pomiarowych.

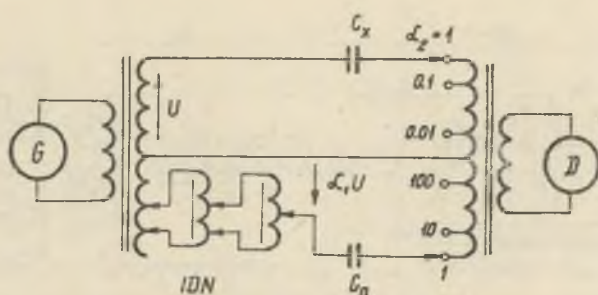
4.1. Mostki do pomiaru pojemności

Podstawowy uproszczony schemat ideowy mostka do pomiarów pojemności przedstawiono na rys. 4. Do równoważenia mostka wykorzystuje się 6-dekadowy dzielnik napięcia o przekładni α_1 , nastawialnej w przedziale $> 0; 1 <$, z rozdzielnością $1 \cdot 10^{-6}$, natomiast do zmiany zakresów służy komparator prądów zmiennych o przekładni $\alpha_2 = 1:1; 1:10; 1:100; 1:0,1; 1:0,01$. W stanie równowagi

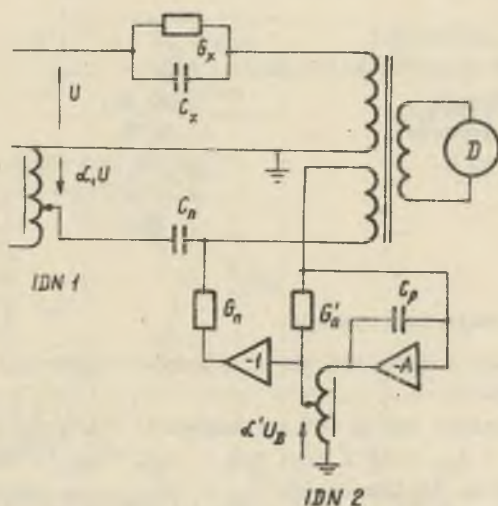
$$C_x = \alpha_1 \alpha_2 C_n \quad (2)$$

Taki sposób równoważenia umożliwia zastosowanie jednego wzorca pojemności o wartości $C_n = 1000$ pF, z którym porównywane są kondensatory o wartościach 1 pF ... $1 \mu\text{F}$, z rozdzielnością $1 \cdot 10^{-6}$. Do równoważenia składowej czynnej prądu, zależnej od $\text{tg } \delta$ kondensatora badanego zastosowano układ przedstawiony na rys. 5. Dla $G_n = G'_n$ oraz $\Lambda \rightarrow \infty$ współczynnik strat kondensatora badanego oblicza się ze wzoru

$$\text{tg } \delta = -\alpha'_1 \frac{G_n}{\omega C_n} \quad (3)$$



Rys. 4. Schemat ideowy mostka do pomiaru pojemności

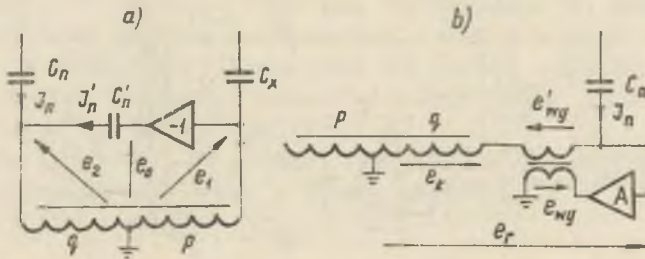
Rys. 5. Schemat ideowy układu do równoważenia $\operatorname{tg} \delta$

Impedancje wpływowe w układzie, takie jak:

- impedancja resztkowa uzwojeń komparatora,
- impedancja źródła napięcia i IDN,
- impedancje doprowadzeń,

kompensowane są za pomocą układów wprowadzających do gałęzi mostka dodatkowe prądy lub napięcia (rys. 6), które minimalizują wpływ tych impedancji na wynik pomiaru.

W celu osiągnięcia dużej dokładności porównania pojemności C_x oraz C_n zastosowano również ekranowanie elektryczne układu, zminimalizowano pętle prądowe oraz opracowano sposób uziemienia obwodów układu. Ważniejsze parametry wykonanego układu są następujące:



Rys. 6. Schematy ideowe układów kompensacji impedancji wpływowych mostka

- zakres mierzonych pojemności	1 pF ... 1 μ F,
- maksymalna wartość napięcia na obiekcie	100,
- częstotliwość zasilania	1000 Hz,
- błąd porównania pojemności	0,001%,
- zakres mierzonych tg δ	+0,01 ... -0,01,
- błąd pomiaru tg δ	$1 \cdot 10^{-5}$
- czułość układu	50 $\frac{mV}{pF}$.

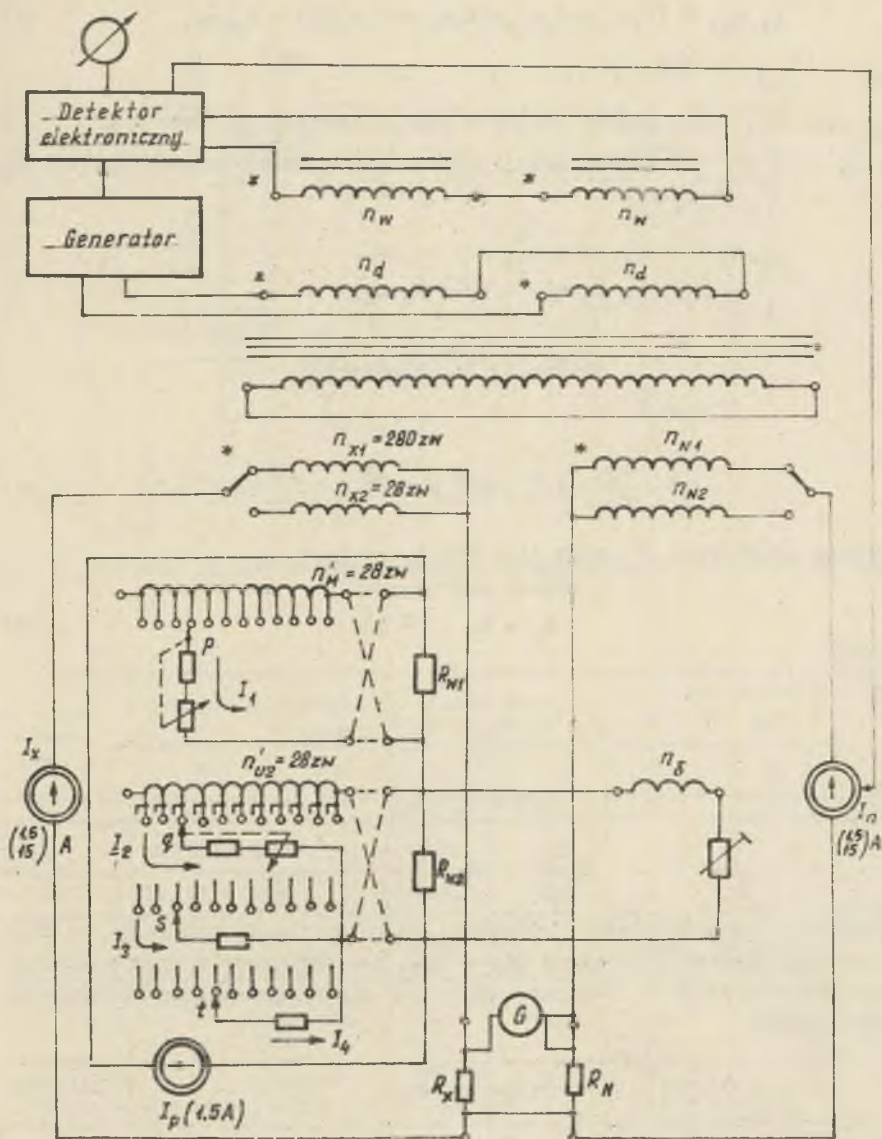
4.2. Układ do komparacji rezystancji

Schemat komparatora prądów stałych w układzie komparacji rezystancji przedstawiono na rys. 7.

Komparator posiada cztery uzwojenia porównawcze: dwa o $n_{X1} = n_{N1}$ i nominalnych prądach $I_{X1} = I_{N1} = 15$ A oraz dwa o $n_{X2} = n_{N2}$ i nominalnych prądach $I_{X2} = I_{N2} = 1,5$ A. Liczba zwojów $n_{X2} = 10 n_{X1}$, co umożliwia porównanie prądów o stosunku natężeń 1:1 oraz 1:10, przy stałej wartości sił magnetomotorycznych uzwojeń. Rozwiązanie takie zapewnia jednakową czułość komparatora, niezależnie od kombinacji uzwojeń porównawczych. Prądy uzwojeń płyną równocześnie przez porównywane rezystancje R_X i R_N ; dla zerowego wskazania galwanometru:

$$R_X = \frac{I_N}{I_X} R_N \quad (4)$$

Stan równowagi osiąga się poprzez zmianę prądu I_N . Źródło prądu I_N jest sterowane sygnałem z detektora elektronicznego, tak że wypadkowy strumień w detektorze strumienia jest równy zero. Zmianę strumienia i tym samym prądu I_N wywołuje zmiana sił magnetomotorycznych uzwojeń n_{U1} oraz n_{U2} . Dla stanu zerowego strumienia komparatora jest:



Rys. 7. Schemat układu komparacji rezystancji z komparatorem prądów

$$I_{X1} n_{X1} \pm (I_1 n'_{U1} p + I_2 n'_{U2} q + I_3 n'_{U2} s + I_4 n'_{U2} t) = I_{N1} n_{N1} \quad (5)$$

gdzie:

n'_{U1} oraz n'_{U2} ... - liczby zwojów w sekcji uzwojeń n_{U1} oraz n_{U2} ,
 p, q, s, t - numery sekcji włączonych w obwody prądów I_1, I_2, I_3, I_4 .

Dla

$$I_1 n'_{U1} = 10^{-3} I_X n_{X1}$$

$$I_2 n'_{U2} = 10^{-4} I_X n_{X1} \text{ itd.}$$

jest

$$\frac{I_N}{I_X} = \frac{n_{X1}}{n_{N1}} \left[1 \pm (10^{-3} p + 10^{-4} q + 10^{-5} s + 10^{-6} t) \right]. \quad (6)$$

Porównując zależności (6) oraz (4), dla $n_{X1} = n_{N1}$:

$$R_X = R_N (1 \pm k) \quad (7)$$

gdzie:

$$k = 10^{-3} p + 10^{-4} q + \dots$$

lub dla

$$n_{X1} = 0,1 n_{N1}$$

$$R_X = 0,1 R_N (1 \pm k). \quad (8)$$

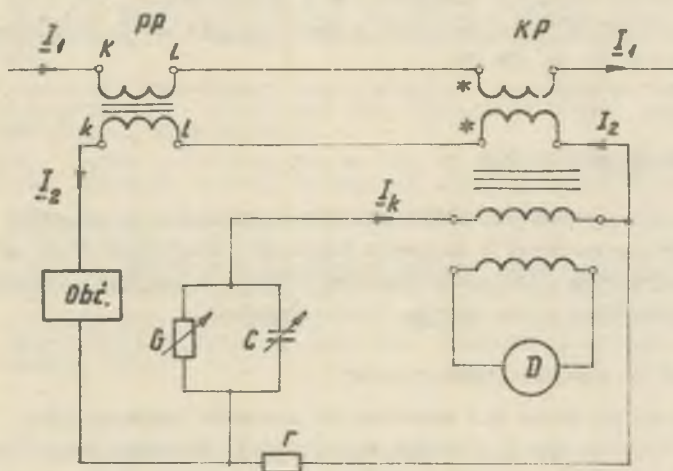
Komparator umożliwia więc porównanie rezystancji R_X oraz R_N o wartościach nominalnych różniących się o rząd lub jednakowych oraz o stosunku wartości rezystancji różniącym się o 1%. Błędy własne komparatora zdefiniowane jako:

$$\delta_G = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1}, \quad (9)$$

są mniejsze niż 10^{-6} dla dowolnej kombinacji uzwojeń. Próg pobudliwości komparatora wynosi $2 \cdot 10^{-8}$.

4.3. Uwierzytelnienie przekładników prądowych za pomocą komparatora prądów zmiennych

Metoda uwierzytelnienia przekładników prądowych za pomocą komparatorów jest znana m.in. z pracy [2]. Schemat układu uwierzytelnienia przekładnika prądowego przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Schemat układu uwierzytelniania przekładników prądowych za pomocą komparatora prądów

Tabela 1

Prze- kład- nia	Uzwojenia porówn.		Liczba zwojów		Przekrój uzwojeń porówn. mm ²		φ _N A
	n ₁	n ₂	n ₁	n ₂	n ₁	n ₂	
1	2	3	4	5	6	7	8
5/5	Multifilarne		4x20	4x20	2,4	2,4	400
20/10/5	Multifilarne		4x20	4x20	2,4	2,4	400
50/5	Sekcjonowane falowe		10x10	10x10	2,4	2,4	500
500/50	Szynowe	Sekcjono- wane fa- lowe	1	10x10	250	2,4	500
1000/500/ /5	Szynowe	Warst- wowe	1+1	100	250+ +250	2,4	500+ 500

Prądy pierwotny i wtórny przekładnika doprowadzono do uzwojeń porównywalnych komparatora. Różnicę sił magnetomotorycznych, będącą miarą błędów przekładnika kompensuje się siłą magnetomotoryczną dodatkowego uzwojenia kompensującego. Błąd badanego przekładnika jest określony zależnością:

$$\delta_I = rG + j\omega rC. \quad (10)$$

Wykonano rodzinę komparatorów o parametrach zestawionych w tabeli 1. Składowe błędów własnych komparatorów o przekładniach 5/5 oraz 20/10/5 były mniejsze niż 10^{-7} , pozostałych - mniejsze niż 10^{-6} , dla zakresu częstotliwości od 40 Hz do 400 Hz.

5. Kierunki dalszych prac

Opanowanie technologii IDN i KP stworzyło realne możliwości opracowania układów pomiarowych o znacznie lepszych właściwościach metrologicznych, w porównaniu z układami impedancyjnymi. W tym też kierunku będą nadal przeprowadzone prace objęte trzema tematami.

5.1. Mostek do pomiaru indukcyjności

Prowadzone są prace nad mostkiem do pomiarów indukcyjności w zakresie $\mu\text{H} \dots 1 \text{ H}$, przy częstotliwości akustycznej. Docelowa dokładność pomiaru ma wynosić $1 \cdot 10^{-4}$, co jest możliwe do osiągnięcia tylko przy zastosowaniu dobrych IDN.

5.2. Modernizacja komparatora prądów

Prace będą koncentrowały się nad realizacją elektronicznego przetwarzania spadku napięcia I_2 r na prądy I_{K1} (składowa współfazowa) oraz I_{K2} (składowa kwadratowa), będące miarą błędu porównania prądów I_1 oraz I_2 . Zastosowanie przetworników napięcie-prąd wyeliminuje wpływ rezystancji i uzwojeń kompensujących, będący źródłem istotnej części błędu komparatora w układzie podanym na rysunku 8.

5.3. Opracowanie metod uwierzytelnienia komparatorów prądów

Ze względu na małą wartość błędu własnego komparatora, uwierzytelnienia można dokonać metodą różnicowo-zerową. Jednak zakres zastosowania tej metody jest ograniczony do komparatorów o prądach znamionowych rzędu amperów, w których uzwojenia porównawcze można wykonać jako sekcjonowane. Dla jednego z porównywanych prądów rzędu kiloamperów uzwojenie komparatora wykonane jest w postaci szyny. Uwierzytelnienia takiego komparatora można dokonać w układzie z komparatorami pośredniczącymi, o znanych błędach, określonych metodą różnicowo-zerową.

LITERATURA

- [1] Jaskulski J., Getszalk R.: Krajowe dwurdzeniowe indukcyjne dzielniki napięcia. PAK, 1976.
- [2] Kusters N., Moore W.: The Current Comparator and Its Applications to the Absolute Calibration of Current Transformers. IEEE, April 1963.

- [3] Kusters N.L.: A direct Current Comparator Bridge for Four Terminal Resistance Measurements. IEEE, December 1966.
- [4] Miłek M.: Analiza błędów pobudliwości komparatora prądów stałych i sposoby jego minimalizacji. Zeszyty Naukowe Pol.Śl., Elektryka z. 55, Gliwice 1976.
- [5] Miłek M.: Analiza i konstrukcja magnetycznego komparatora przepływu prądu stałego, w układzie porównania rezystancji. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1975.
- [6] Puśledzki J., Skubis T.: Precyzyjny mostek do pomiaru pojemności - II Sympozjum n.t. Kierunki rozwoju metrologii elektrycznej, Warszawa 1979.
- [7] Skubis T.: Konstrukcja i błędy indukcyjnych dzielników napięcia. Normalizacja, nr 4, 1979.
- [8] Skubis T.: Źródła błędów autotransformatorowych indukcyjnych dzielników napięcia. Zesz.Nauk.Pol.Śl., Elektryka z.55, Gliwice 1976.
- [9] Skubis T.: Opracowanie konstrukcji i technologii wzorcowych wielodekadowych indukcyjnych dzielników napięcia. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1975.

ИНДУКТИВНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ И МАГНИТНЫЕ КОМПАРАТОРЫ ТОКОВ
В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМАХ

Р е з ю м е

Статья содержит просмотр работ проведённых в последние годы Институтом электрической метрологии и электроники Силезского политехнического института в области измерительных схем с индуктивными делителями напряжения и компараторами токов. Приводятся полученные результаты и определяются направления для следующих работ.

INDUCTIVE VOLTAGE DIVIDERS AND CURRENT COMPARATORS
IN MEASUREMENTS CIRCUITS

S u m m a r y

This article contains a review of the work carried on in the last years in Institute of Electric and Electronic Metrology of Silesian Technical University, in the field of measurement circuits containing inductive voltage dividers and current comparators, Obtained results and direction of future work are presented.