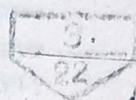


Tadeusz Skubis  
Instytut Metrologii Elektrycznej  
i Elektronicznej Politechniki Śląskiej

*pes. pyc, aurel*

*obq*



*noibce*

*peg*

POMIARY BŁĘDÓW INDUKCYJNYCH DZIELNIKÓW NAPIĘCIA

**Streszczenie.** Przedstawiono metodę pośrednią pomiaru błędów wielodekadowych indukcyjnych dzielników napięcia opracowaną w Instytucie Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej Politechniki Śląskiej. Opisano układ pomiarowy o błędzie  $\pm 5 \cdot 10^{-8}$  i metodykę pomiarów oraz podano równania do obliczania błędów dzielnika dla każdego nastawienia.

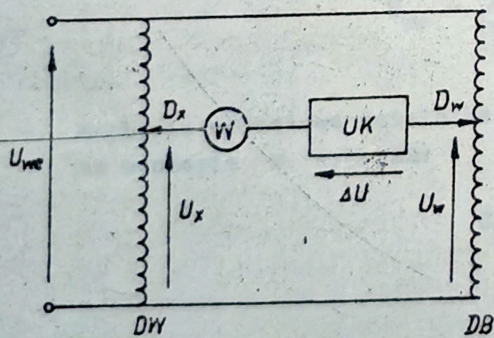
1. Metody pomiaru błędów dzielników jednodokadowych

Błąd modułu i błąd kątowy indukcyjnych dzielników napięcia zdefiniowane w pracy [6] można mierzyć dwiema metodami:

- równoczesnego bezpośredniego porównania badanego IDN z dzielnikiem wzorcowym [1, 3, 7, 8];
- pośrednią, przez porównanie napięć na sekcjach dzielnika badanego ze stabilnym napięciem odniesienia [2, 4].

Zasada działania układu realizującego metodę równoczesnego bezpośredniego porównania przedstawiona jest na rys. 1.

Dzielnik badany DB i wzorcowy DW nastawia się tak, by napięcia  $U_x$  i  $U_w$  były nominalnie równe. Następnie w układzie napięcia kompensującego UK nastawia się napięcie  $\Delta U$  tak, aby w obwodzie wystąpił stan kompensacji i odczytuje się wartości obu składowych napięcia  $\Delta U$ . Błędy modułu  $\delta$  i kątowy  $\gamma$  oblicza się ze wzorów [6]:



$$\delta \approx \frac{\text{Re } \Delta U}{U_{we}} \quad (1)$$

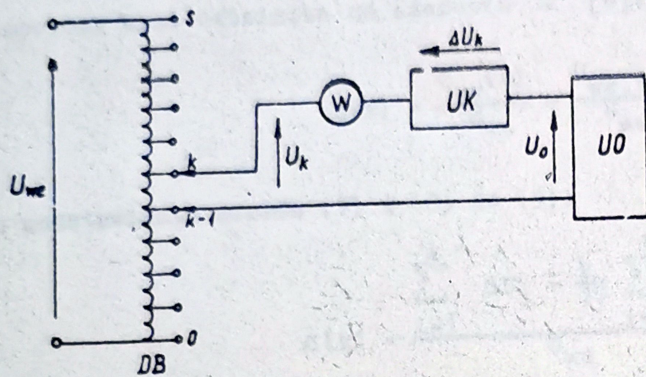
$$\gamma \approx \frac{\text{Im } \Delta U}{D_n U_{we}} \quad (2)$$

Rys. 1. Układ ideowy pomiaru błędów IDN przez porównanie z wzorcem stosunku napięć.

Do pomiaru błędów IDN metodą równoczesnego bezpośredniego porównania potrzebny jest dzielnik wzorcowy o pomijalnie małych błędach. Błąd bezwzględny pomiaru może być wtedy mniejszy od  $\pm 2 \cdot 10^{-7}$  [8]. Metoda równoczesnego bezpośredniego porównania jest najbardziej odpowied-

nią do sprawdzania wielodekadowych IDN produkowanych seryjnie ze względu na możliwość szybkiego wykonania pomiarów.

W układach pomiarowych realizujących metodę pośrednią (rys. 2) mogą być mierzone w zasadzie błędy dzielników jednodekadowych. W celu wyznaczenia



Rys. 2. Układ ideowy pomiaru błędów IDN metodą pośrednią

składowych  $\Delta U_k$ . Dalej przedstawiony jest sposób obliczeń błędów  $\delta$  i  $\gamma$  stosowany w IMEiE Politechniki Śląskiej.

W stanie kompensacji napięcie 1-tej sekcji drne jest zależnością:

$$U_1 = U_0 + \Delta U_1. \quad (3)$$

Napięcie na wszystkich sekcjach uzwojenia multirilarnego:

$$U_{we} = \sum_{i=1}^{10} U_i = 10U_0 + \sum_{i=1}^{10} \Delta U_i \quad (4)$$

Napięcia wyjściowe dzielnika, nominalne  $U_{wy,n}(k)$  i rzeczywiste  $U_{wy}(k)$ , na odczepie k wynoszą:

$$U_{wy,n}(k) = \frac{k}{10} U_{we}. \quad (5)$$

$$U_{wy}(k) = \sum_{i=1}^k U_i. \quad (6)$$

Po podstawieniu wyrażenia (4) do (5) i (3) do (6):

$$U_{wy,n}(k) = kU_0 + \frac{k}{10} \sum_{i=1}^{10} \Delta U_i. \quad (7)$$

błędów na dowolnym odczepie DB należy kolejno porównać napięcia  $U_k$  wszystkich sekcji ze stabilnym napięciem odniesienia  $U_0$ . Częstotliwość napięć  $U_k$  oraz  $U_0$  muszą być jednakowe, natomiast fazy i amplitudy powinny być zbliżone. W układzie napięcia kompensującego UK nastawia się dla każdej sekcji napięcie  $\Delta U_k$  tak, by w obwodzie wystąpił stan kompensacji i odczytuje się wartości obu

Rozm

Zespo

Po p

B

czyw

błęd

D

dziel

miar

wiedr

2. P

de

cedur

wyżar

nion

błęd

a) P

W

poni

(rys.

być p

gą b

rzone

kole

cji

dla

kady

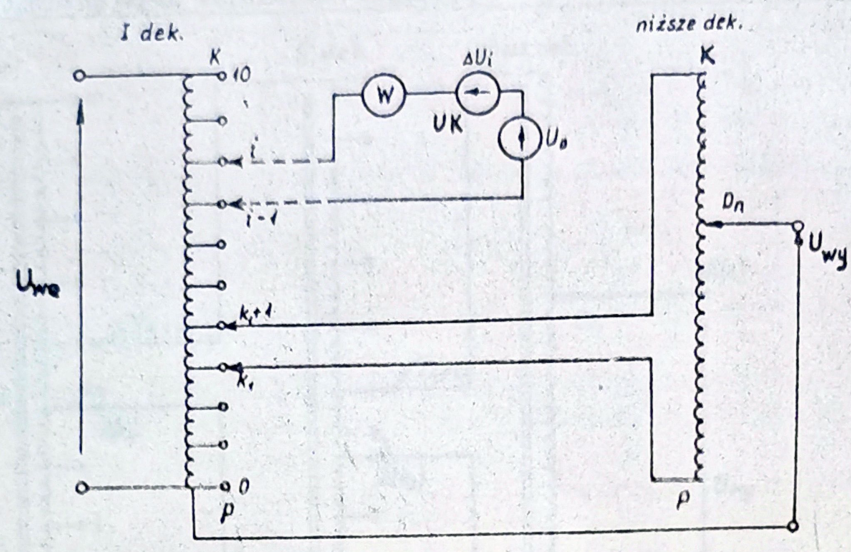
- dla

uzw

- dla

uzw





Rys. 3. Układ ideowy pomiaru błędów dekady IDN obciążonej dekadą 1 i niższymi

Obliczenie błędów na pozostałych odczepach na podstawie tej serii pomiarów nie jest potrzebne, ponieważ po przekączeniu drugiej dekady zmienia się rozpięwo prądu stanu jałowego w dzielniku. Wywołuje to zmianę wartości spadków napięć i błędów na wszystkich odczepach. Z tego powodu procedurę pomiarową należy powtórzyć, obciążając niższymi dekadami kolejno wszystkie sekcje dekady pierwszej i wykonując dla każdego nastawienia serię pomiarów.

b) Pomiar błędów wzorcowania drugiej dekady IDN na wszystkich odczepach. Procedura pomiarowa jest taka sama jak dla dekady pierwszej. W czasie pomiaru może być zasilana bezpośrednio dekada druga. W takim przypadku do wzoru (10) należy podstawić wartość napięcia  $U_{we}$ , która jest dziesięciokrotnie większa od napięcia wejściowego dekady drugiej.

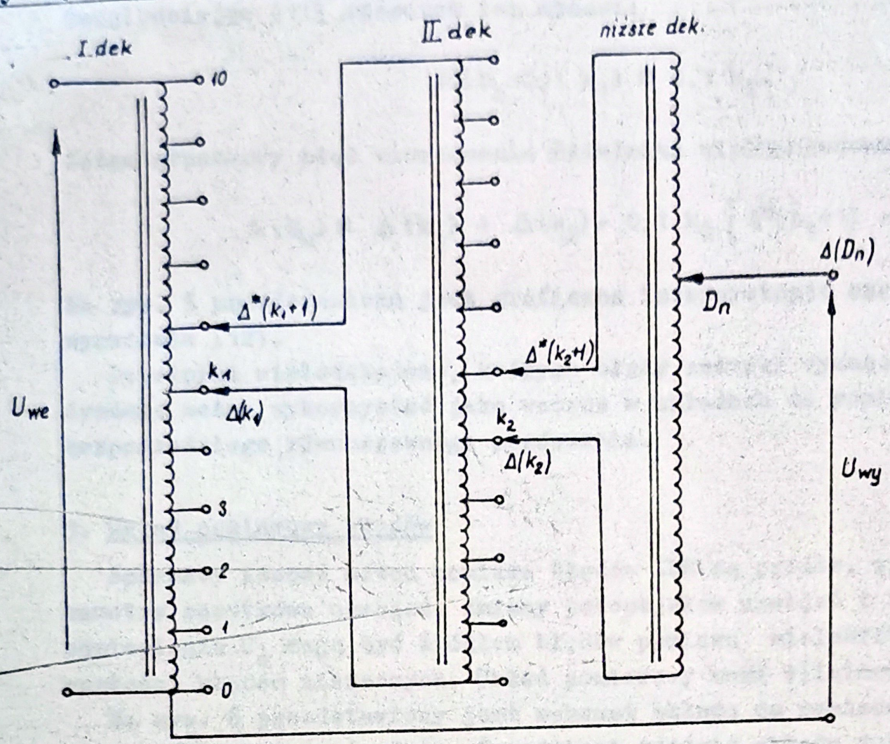
c) Obliczenie błędów dzielnika wielodekadowego. Błędy nieobciążonego wielodekadowego IDN zależą od nastawionego stosunku napięć  $D_n$ . Ponieważ w obliczeniach uwzględnia się tylko błędy dwu najwyższych dekad, więc można przyjąć przybliżenie:

$$D_n = \sum_{i=1}^M k_i \cdot 10^{-i} \approx 0,1 k_1 + 0,01 k_2. \quad (11)$$

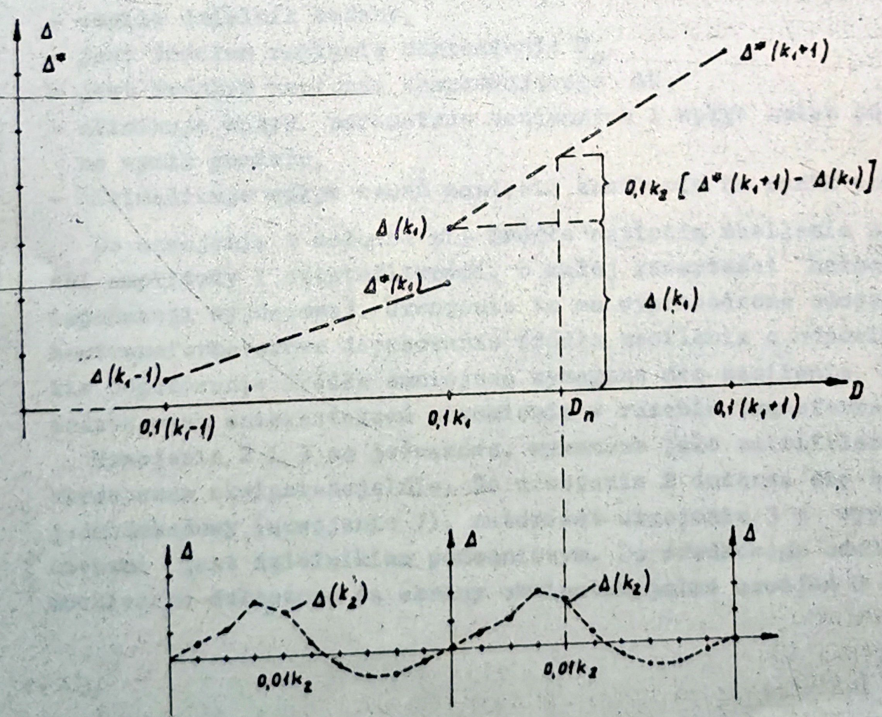
Błąd dzielnika  $\Delta(D_n)$  składa się z następujących głównych składników (rys. 4):

- błędu pierwszej dekady na odczepie  $k_1$ ;  $\Delta(k_1)$ ;
- błędu drugiej dekady na odczepie  $k_2$ ;  $\Delta(k_2)$ ;

Rys.



Rys. 4. Oznaczenie składników błędu na odczepach  $k_1, k_1 + 1, k_2, k_2 + 1$



Rys. 5. Graficzna interpretacja wyrażenia (15).

- części błędu  $\Delta^*(k_1+1) - \Delta(k_1)$ , proporcjonalnej do stosunku nastawionego na dekadzie drugiej i niższych.

Uwzględniając (11) stosunek ten wynosi:

$$10(D_n - 0,1 k_1) \approx 0,1 k_2.$$

Zatem wypadkowy błąd wzorcowania dzielnika wielodekadowego:

$$\Delta(D_n) \approx \Delta(k_1) + \Delta(k_2) + 0,1 k_2 [\Delta^*(k_1+1) - \Delta(k_1)]. \quad (12)$$

Na rys. 5 przedstawiona jest graficzna interpretacja części rzeczywistej wyrażenia (12).

Dzielniki wielodekadowe, których błędy zostały wyznaczone metodą pośrednią można wykorzystać jako wzorce w układach do pomiaru błędów metodą bezpośredniego równoczesnego porównania.

### 3. Układ pomiarowy błędów

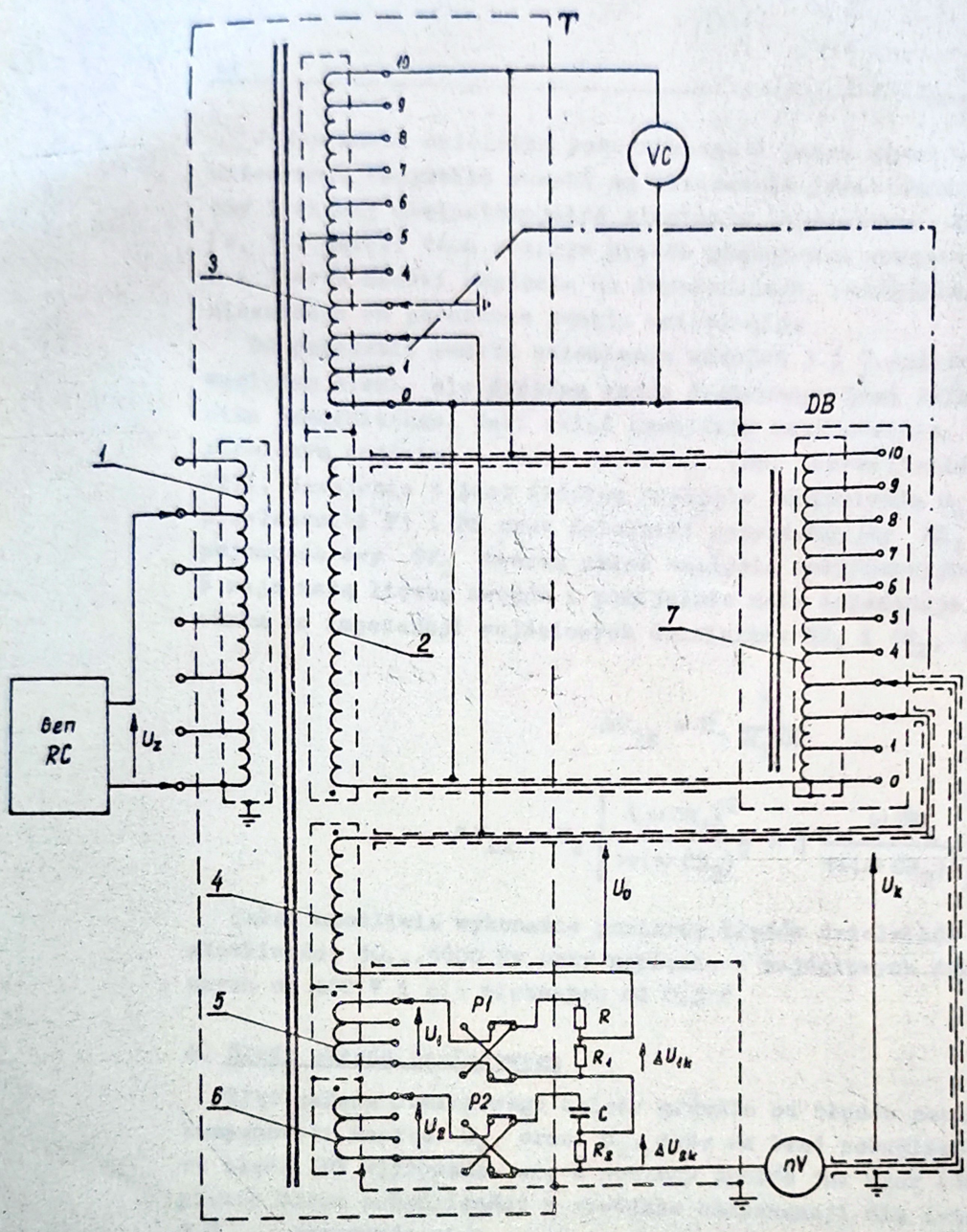
Schematy ideowe metod pomiaru błędów IDN są proste, ale w praktyce parametry resztkowe uzwojeń, zmiany potencjałów uzwojeń i zmiany napięcia odniesienia  $U_0$  mogą być źródłem błędów pomiaru wielokrotnie większych od wartości błędów mierzonych. Układ pomiarowy musi eliminować te wpływy.

Na rys. 6 przedstawiony jest schemat układu do pomiaru błędów wzorcowania IDN metodą pośrednią. Zasadniczą częścią układu jest transformator T zawierający sześć uzwojeń i układ ekranów ekwipotencjalnych. Spełnia on następujące funkcje:

- zasila dzielnik badany,
- jest źródłem napięcia odniesienia  $U_0$ ,
- jest źródłem napięcia kompensującego  $\Delta U$ ,
- eliminuje wpływ parametrów doziemnych i wpływ zmian potencjału uzwojeń na wynik pomiaru,
- minimalizuje wpływ wahań napięcia zasilania na wynik pomiaru.

Do uzwojenia 1 dołącza się źródło napięcia zasilania o dużej stabilności amplitudy i częstotliwości, o małej zawartości harmonicznych i małej impedancji wyjściowej. Uzwojenie to ma wyprowadzone odczepy umożliwiające beztransformatorowe dopasowanie źródła zasilania o odpowiedniej mocy. Takie dopasowanie źródła zmniejsza wymaganą moc zasilania i nie wprowadza dodatkowych zniekształceń strumienia w rdzeniu transformatora T.

Uzwojenia 2 i 3 są jednakowe, wykonane jako multifilarne i oddzielnie ekranowane ekwipotencjalnie. Do uzwojenia 2 dołącza się badany dzielnik jednodekadowy (uzwojenie 7), natomiast uzwojenie 3 z wyprowadzonymi odczepami jest dzielnikiem pomocniczym. Do środkowego odczepu dzielnika pomocniczego dołączone są ekrany ekwipotencjalne uzwojeń 2 i 3.



Rys. 6. Schemat układu pomiarowego błędów IDN

Jeden suwak dzielnika pomocniczego i jeden suwak dzielnika badanego są uziemione. Wszystkie suwaki są przesuwane jednocześnie. Dzielnik pomocniczy i ekrany ekwipotencjalne eliminują sprzężenia doziemne uzwojenia 2 [4, 5]. Dzięki temu rozpięty prąd obciążenia wewnętrznego w uzwojeniach 2 i 7 oraz spadki napięcia na impedancjach wewnętrznych tych uzwojeń są niezależne od położenia punktu uziemienia.

Od położenia punktu uziemienia uzwojeń 3 i 7 zależą potencjały ekranów względem ziemi, ale źródłem prądu doziemnego jest tylko uzwojenie 3 dzielnika pomocniczego. Taki układ umożliwia zastosowanie wskaźnika zera z uziemionym wejściem o dużej oszczędności (np. nanowoltomierz selektywny typ 227). Uzwojenie 4 jest źródłem napięcia odniesienia  $U_0$ . Uzwojenia 5 i 6, przełączniki P1 i P2 oraz dzielniki rezystancyjny  $RR_1$  i rezystancyjno-pojemnościowy  $CR_2$  tworzą układ napięcia kompensacyjnego. Uzwojenia 5 i 6 mają małą liczbę zwojów i pomijalnie małe impedancje rozproszenia w stosunku do impedancji wejściowych dzielników  $RR_1$  i  $CR_2$ , czyli:

$$\Delta U_{1k} = U_1 \frac{R_1}{R_1 + R} \quad (13)$$

$$\Delta U_{2k} = U_2 \left[ \frac{(\omega CR_2)^2}{1 + (\omega CR_2)^2} + j \frac{\omega CR_2}{1 + (\omega CR_2)^2} \right] \quad (14)$$

Układ umożliwia wykonanie pomiarów błędów dzielników w zakresie częstotliwości 50...5000 Hz przy napięciach wejściowych dzielników nie większych od 400 V i nie większych od 0,3 f.

#### 4. Błędy układu pomiarowego

Błąd układu pomiarowego zależy głównie od błędów pobudliwości obwodów kompensacji napięć  $U_0$  oraz  $U_k$ . Wzór na błąd pobudliwości  $\Delta_p(k)$  pomiaru błędu IDN wyprowadza się w podobny sposób jak wzór (10). Oznaczając napięcie błędu pobudliwości w obwodzie kompensacji dla  $i$ -tej sekcji przez  $\Delta U_{p,i}$  otrzymuje się:

$$\Delta_p(k) = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta U_{p,i} - \frac{k}{10} \sum_{i=1}^{10} \Delta U_{p,i}}{U_{we}} \quad (15)$$

Dokładne obliczenie błędu pobudliwości wg wzoru (15) nie jest możliwe, ponieważ wartości napięć  $\Delta U_{p,i}$  nie są znane. Można jednak oszacować wartość graniczną  $\Delta_{p,gr}$  przyjmując, że stany kompensacji zostały zmierzane z błędem równym progowi pobudliwości  $\Delta U_p$ . W najbardziej niekorzystnym przypadku napięcia błędu pobudliwości dla sekcji  $k \leq 5$  będą miały przeciwne fazy niż dla sekcji  $k > 5$ . Wtedy  $\Delta_{p,gr}$  wystąpi na odczepie  $k = 5$  i wyniesie:

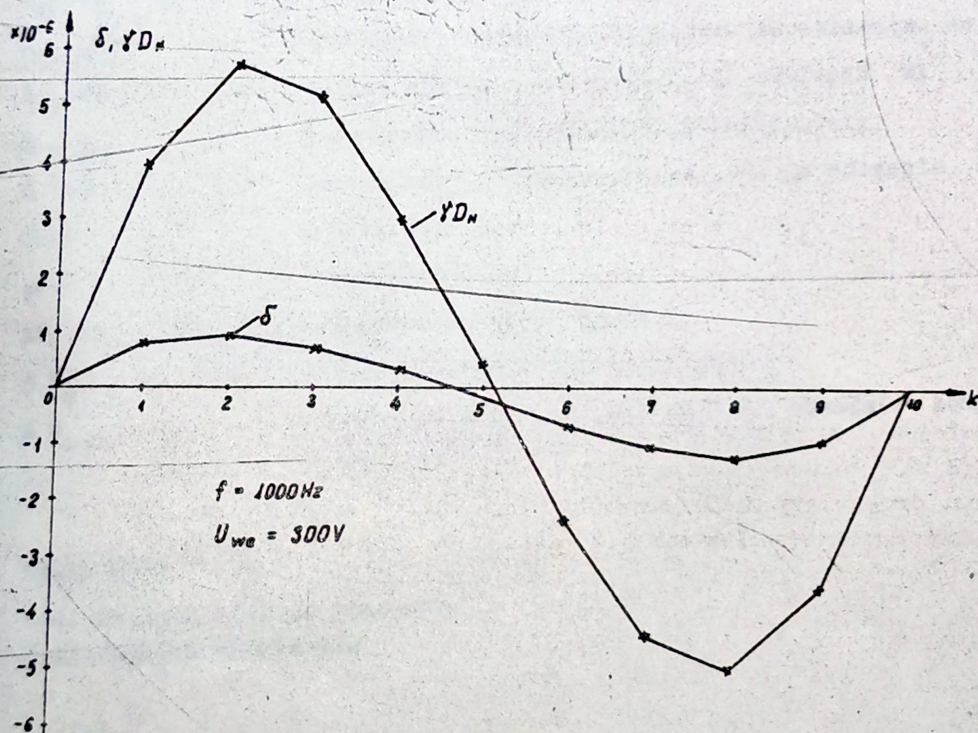


$$\Delta_{p,gr} = 5 \frac{\Delta U}{U_{we}} R_c \quad (16)$$

Błąd układu pomiarowego oszacowany wg wzoru (16) wynosi  $\pm 5 \cdot 10^{-8}$  przy częstotliwości 1000 Hz i przy napięciu zasilania dzielnika badanego równym 200 V.

Innym źródłem błędów układu pomiarowego są niedokładności dzielników  $RR_1$  i  $CR_1$  oraz impedancje rozproszenia uzwojeń 5 i 6. Dla kilku badanych dzielników w zakresie częstotliwości 50 ... 5000 Hz oszacowano, że błędy te są prawie o rząd mniejsze od błędu pobudliwości obliczonego wg wzoru (16).

Na rys. 7 przedstawiono przykładowo wyniki pomiarów błędów jednej dekadę IDN przy częstotliwości  $f = 1000$  Hz i napięciu wejściowym 300 V.



Rys. 7. Przykładowe wyniki pomiarów błędów jednodekadowego IDN

Poprawną pracę tego układu uzyskano m.in. dzięki starannemu ekranowaniu wszystkich elementów i uzyskaniu małych impedancji rozproszeń wszystkich uzwojeń. Jest prawdopodobne, że błędy układu pomiarowego będą mniejsze, jeśli dzielniki  $RR_1$  i  $CR_2$  będą zastąpione przez dzielniki indukcyjne.

Ważniejsze oznaczenia

$D_n$	- nominalna wartość nastawionego stosunku;
$i$	- wskaźnik;
$k$	- numer odczepu uzwojenia dzielnika jednodekadowego;
$k_1$	- numer odczepu uzwojenia dekady 1-tej;
$U_k$	- napięcie na uzwojeniu k-tej sekcji dzielnika badanego;
$U_o$	- napięcie odniesienia;
$U_{we}$	- napięcie wejściowe dzielnika badanego;
$U_{wy}(k)$	- rzeczywiste napięcie wyjściowe na odczepie $k$ ;
$U_{wy,n}(k)$	- nominalne napięcie wyjściowe na odczepie $k$ ;
$\Delta_p(k)$	- błąd pobudliwości pomiaru na odczepie $k$ ;
$\Delta_{p,gr}$	- graniczna wartość błędu pobudliwości;
$\Delta(k)$	- zespolony bezwzględny błąd IDN na odczepie $k$ ;
$\delta(k)$	- błąd modułu;
$\gamma(k)$	- błąd kątowy;
$\Delta U, \Delta U_{1k}, \Delta U_{2k}, \Delta U_k$	- napięcia kompensujące;
$\Delta U_p$	- napięcie progu pobudliwości;
$\Delta U_{p,1}$	- napięcie błędu pobudliwości w obwodzie kompensacji dla sekcji 1-tej.

## RECENZENT:

doc. dr hab. Ryszard Gotszalk  
Politechnika Wrocławska

## LITERATURA

- [1] Cutkosky R.D., Shields J.Q.: The Precision Measurement of Transformer Ratios. IRE Trans. on Instr., Sept. 1960, vol. 1-9, nr 2.
- [2] Hill J.J., Deacon T.A.: Theory, design and measurement of inductive voltage dividers. Proc. of the IEE, vol. 115, nr 5, May 1968.
- [3] Lisle R.V., Zapf T.L.: Comparison Calibration of Inductive Voltage Dividers. ISA Trans., vol. 3, nr 3, 1964.
- [4] Skubis T.: Opracowanie konstrukcji i technologii wzorcowych wielodekadowych indukcyjnych dzielników napięcia. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice, 1975.

- [5] Skubis T.: Prąd obciążenia wewnętrznego jako źródło błędów w indukcyjnych dzielnikach napięcia. Materiały IX Międzyucz. Narady Metrologów, Gliwice 1974.
- [6] Skubis T.: Źródła błędów indukcyjnych dzielników napięcia. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka z. 55 Gliwice 1976.
- [7] Sze W.C., Dunn A.F., Zapf T.L.: An International Comparison of Inductive Voltage Dividers Calibration at 400 and 1000 Hz. IEEE Trans. on Instr. and Meas., Sept 1965, vol IM-14, nr 3.
- [8] Zapf T.L.: The Calibration of Inductive Voltage Dividers and Analysis of Their Operational Characteristics. ISA Trans., July 1963, vol. 2.

## ИЗМЕРЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНДУКТИВНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

## Резюме

Представлен промежуточный метод измерения погрешностей многодекадных индуктивных делителей напряжения, разработанных на Кафедре электрической и электронной метрологии. Описана измерительная схема с погрешностью  $5 \cdot 10^{-8}$  и методика измерений. Приведены уравнения для вычисления погрешностей делителя для довольной наводки.

## THE MEASUREMENTS OF ERRORS OF INDUCTIVE VOLTAGE DIVIDERS

## Summary

This paper presents the indirect measurement method for determining the errors of multidecade inductive voltage dividers. The measurement arrangement with the accuracy of  $\pm 5 \cdot 10^{-8}$  and the measurement procedure have been described. The equations for calculating the divider errors have been given.