ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: Elektryka z. 55

Tadeusz Skubis Instytut Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej Politechniki Śląskiej

POMIARY BŁĘDÓW INDUKCYJNYCH DZIELNIKÓW NAPIĘCIA

<u>Streszczenie</u>. Przedstawiono metodę pośrednią pomiaru błędów wielodekadowych indukcyjnych dzielników napięcia opracowaną w Instytucie Metrologii Elektrycznej^{*}i Elektronicznej Politechniki Sląskiej. Opisano układ pomiarowy o błędzie [±]5.10⁻⁸ i metodykę pomiarów oraz podano równania do obliczania błędów dzielnika dla każdego nastawienia.

1. Metody pomiaru błędów dzielników jednodekadowych

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 były nominalnie równe. Następnie w układzie napięcia kompensującego UK nastawia się napięcie ΔU tak, aby w obwodzie wystąpił stan kompensacji i odczytuje się wartości obu składowych napięcia ΔU . Błędy modułu δ i kątowy γ oblicza się ze wzorów [6]:

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

$$\mathfrak{J} \approx \frac{\mathrm{Im} \ \Delta U}{\mathrm{D}_{\mathrm{n}} \mathrm{we}}.$$
 (2)

Do pomiaru błędów IDN metodą równoczesnego bezpośredniego porównania potrzebny jest dzielnik wzorcowy o pomijalnie małych błędach. Błąd bezwzględny pomiaru może być wtedy mniejszy od 22.10⁻⁷ [8].

Metoda równoczesnego bezpośredniego porównania jest najbardziej odpowied-

Nr kol. 499

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



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

Rys. 2. Układ ideowy pomiaru błędów IDN metodą pośrednią

składowych ΔU_k. Dalej przedstawiony jest sposób obliczeń błędów δ i γ stosowany w IMEiE Politechniki Śląskiej.

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

$$\mathbf{U}_{i} = \mathbf{U}_{0} + \Delta \mathbf{U}_{i}. \tag{3}$$

Napięcie na wszystkich sekcjach uzwojenia multifilarnego:

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

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

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

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

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

$$U_{wy,n}(k) = kU_{0} + \frac{k}{10} \sum_{i=1}^{10} \Delta U_{i},$$
 (7)

Pomiary błędów indukcyjnych dzielników napięcia

$$U_{wy}(k) = kU_{o} + \sum_{i=1}^{k} \Delta U_{i}.$$
 (8)

Zespolony błąd dzielnika na odczepie k [6]:

$$\Delta(\mathbf{k}) = \frac{\mathbf{U}_{wy}(\mathbf{k})}{\mathbf{U}_{we}} - \frac{\mathbf{U}_{wy,n}(\mathbf{k})}{\mathbf{U}_{we}}.$$
 (9)

Po podstawieniu wzorów (7) i (8) do (9):

$$\Delta(k) = \frac{\sum_{i=1}^{k} \Delta U_{i} - \frac{k}{10} \sum_{i=1}^{10} \Delta U_{i}}{U_{we}}$$
(10)

Błąd $\Delta(k)$ obliczony wg wzoru (10) jest liczbą zespoloną. Część rzeczywista $\Delta(k)$ jest błędem modułu d(k), natomiast część urojona jest błędem kątowym $\gamma(k)$ pomnożonym przez D_n [6].

Do rezlizacji pomiaru błędów IDN metodą pośrednią nie jest potrzebny dzielnik wzorcowy. Jest to bardzo ważna zaleta, umożliwiająca wykonanie pomiarów także w J-boratoriach nie dysponujących wzorcami stosunku o odpowiednio dużej dokładności.

2. Pomiar błędów dzielników wielodekadowych

Metodą pośrednią można także wyznaczyć błędy wielodekadowych IDN. Procedura pomiaru jest znacznie krótsza jeśli uwzględni się tylko błędy najwyższych dekad. W pracy [6] wykazano, że takie postępowanie jest uzasadnione. Uwzględniając błędy tylko pierwszej i drugiej dekady wyznacza się błędy wielodekadowych IDN w trzech etapach:

a) Pomiar błędów pierwszej dekady IDN na wszystkich odczepach.

W czasie pomiaru niższe dekady muszą być połączone z dekadą badaną, ponieważ ich prądy stanu jałowego wpływają na wartości mierzonych błędów (rys. 3). Przy wyznaczaniu błędu $\Delta(k_1)$ na odczepie k_1 dekada druga musi być przyłączona do odczepów k_1 oraz $k_1 + 1$. Nastawy pozostałych dekad mogą być dowolne, ponieważ nie stwierdzono wpływu nastawień na wartości mierzone. Napięcia na uzwojeniach sekcji pierwszej dekady porównuje się po kolei ze stabilnym napięciem odniesienia U₀. Nastawia się stan kompensacji za pomocą UK i odczytuje się wartości obu składowych napięcia ΔU_i dla każdej sekcji. Następnie wg wzoru (10) oblicza się błędy pierwszej dekady tylko dlą dwu odczepów:

- dla odczepu k_1 , do którego w czasie pomiarów dołączony był początek uzwojenia drugiej dekady. Błąd ten oznaczany jest dalej przez $\Delta(k_1)$;
- dla odczepu k. + 1, do którego w czasie pomiarów dołączony był koniec uzwojenia dekady drugiej. Błąd ten oznaczony jest dalej przez Δ (k. + 1).



Rys. 3. Układ ideowy pomiaru błędów dekady IDN obciążonej dekadari niższymi

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

b) Pomiar błędów wzor.;owania 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:

$$P_{n} = \sum_{i=1}^{n} k_{i} \ 10^{-i} \approx 0, 1 \ k_{1} + 0, 01 \ k_{2}.$$
(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 odozepie k_2 ; $\Delta(k_2)$;





39

Rys. 4. Oznaczenie składników błędu na odczepach k₁, k₁ + 1, k₂, k₂ + 1



Rys. 5. Graficzna interpretacja wyrażenia (15).

- części błędu $\Delta^{\#}(k_1+1) - \Delta(k_1)$, proporcjonalnej do stosunku nastawionego na dekadzie drugłej 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:

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

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

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

3. Układ pomiarowy błedów

Schematy ideowe metod pomiaru błędów IDN są proste, ale w praktyce parametry resztkowe uzwojeń, zmiany potencjałów uzwojeń i zmiany napięcia odniesienia U_o 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.,
- jest źródłem napięcia kompensującego ΔU,
- 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 mapięcia 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 zmniejsze 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 uwzojenie 3 z wyprowadzonymi odczepami jest dzielnikiem pomocniczym. Do środkowego odczepu dzielnika pomocniczego dołączone są ekrany ekwipotencjalne uzwojeń 2 i 3.





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 rozpływ prądów obciążenia wewnętrznego w uzwojeniach 2 i 7 oraz spadki napięcia na impedancjach wewnętrznych tych uzwojeń są niezależne od położenia punktu uzicmienia.

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 czułości (np. nanowoltomierz selektywny typ 227). Uzwojenie 4 jest źródłem napięcia odniesienia U_o. Uzwojenia 5 i 6, przełączniki P1 i P2 oraz dzielniki rezystancyjny RR₁ i rezystancyjnopojemnościowy CR₂ tworzą układ napięcia kompensacyjnego. Uzwojenia 5 i 6 mają małą liczbę zwojów i pomijalnie małe impedancje rozproszenia w stosunku do impedancji wejściowych dzielników RR₁ i CR₂, czyli:

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

$$\Delta U_{2k} = U_2 \left[\frac{\left(\omega CR_2 \right)^2}{1 + \left(\omega CR_2 \right)^2} + \frac{1}{2} \frac{\omega CR_2}{1 + \left(\omega CR_2 \right)^2} \right].$$
(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_o oraz U_k. Wzór na błąd pobudliwości $\Delta_p(k)$ pomiaru błędu IDN wyprowadza się w podobny sposób jak wzór (10 .0znaczając napięcie błędu pobudliwości w obwodzie kompensacji dla i-tej sekcji przez Δ U_{p.1} otrzymuje się:

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

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

$$\Delta_{p,gr} = 5 \frac{\Delta U_{p}}{U_{me}}.$$
 (16)

Błąd układu pomiarowego oszacowany wg wzoru (16) wynosi ± 5.10⁻⁸ przy częstotliwości 1000 Hz i przy napięciu zasilania dzielnika badanego równym 200 V.

Innym źródłem błędów układu pomiarowego są niedokładności dzielników RR₁ i CR₁ 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 dekady 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 RR₁ i CR₂ będą zastąpione przez dzielniki indukcyjne.

Weźniejsze oznaczenia	
Dn	- nominalna wartość nastawionego stosunku;
1	- wskaźnik;
k	- numer odczepu uzwojenia dzielnika jednodekadowego;
ki	- numer odczepu uzwojenia dekady i-tej;
U _k	- napięcie na uzwojeniu k-tej sekcji dzielnika badane- go;
υο	- napięcie odniesienia;
Uwe	- napięcie wejściowe dzielnika budanego;
U _{wy} (k)	- rzeczywiste napięcie wyjściowe na odczepie k;
Uwy,n(k)	- nominalne napięcie wyjściowe na odczepie k;
$\Delta_{p}(k)$	- błąd pobudliwości pomiaru na odczepie k;
Δ _{p.gr}	- graniczna wartość błędu pobudliwości;
Δ (k)	- zespolony bezwzględny błąd IDN na odczepie k;
ð(k)	- błąd modułu;
7(k)	- błąd kątowy;
ΔU , ΔU_{1k} , ΔU_{2k} , ΔU_k	- napięcia kompensujące;
ΔUp	- napięcie progu pobudliwości;
Δ U _{p,1}	- napięcie błędu pobudli rości w obwodzie kompensacji dla sekcii i-tej.

RECENZENT:

doc. dr hab. Ryszard Gotszalk Politechnika Wrocławska

LITERATURA

- 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 Sląska, Gliwic: 1975.

- [5] Skubis T.: Prąd obciążenia wewnętrznego jako źródło błędów w indukcyjnych dzielnikach napięcia. Materiały IX Międzyucz. Narady Metrologów. Gliwice 1974.
- [6] Skubis T.: Zródła 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 Mess., Sept 1965, vol IM-14, or 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 имдуктивных делителей напряжения, разработанных на Кафедре электрической и электронной метрологии. Описана измерительная схема с погрешностю 5.10⁻⁶ 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 $\pm 5.10^{-8}$ and the measurement procedure have been described. The equations for calculating the divider errors have been given.