

*indukcyjny dzielnik napięcia,  
dwurdzeniowe dzielniki napięcia,  
układy do sprawdzania dzielników*

Daniel DUSZA\*  
Zdzisław NAWROCKI\*

## **DWURDZNIOWY INDUKCYJNY DZIELNIK NA NAPIĘCIE 300 V**

Przedstawiono analizę metrologiczną jednordzeniowego i dwurdzeniowego indukcyjnego dzielnika napięcia. Opisano konstrukcję opracowanego i wykonanego dwurdzeniowego indukcyjnego dzielnika na napięcie 300 V o przekładni 1000:1. Omówiono układ kompensacyjno-różnicowy do wyznaczania błędów dzielnika. Wykonany dwurdzeniowy dzielnik napięcia spełnia wymagania stawiane przekładnikom kl. 0,005.

### **1. WSTĘP**

Indukcyjne dzielniki napięcia były budowane i optymalizowane w latach 60. i 70. ubiegłego stulecia. W tych latach konstruowano dzielniki indukcyjne na napięcie nie przekraczające 50 V i stosowano je w klasycznych niskonapięciowych układach pomiarowych znacząco poprawiając ich właściwości metrologiczne. Bardzo dobre właściwości metrologiczne indukcyjnych dzielników napięcia wynikały z zastosowania w nich magnetowodów permalojowych o bardzo dużej przenikalności magnetycznej i nawinięciu uzwojenia nawojem multifilarnym zapewniającym prawie jednakowe sprzężenie magnetyczne między poszczególnymi zwojami [1], [4]. Tak skonstruowane dzielniki indukcyjne zapewniały podział napięcia nawet na poziomie  $1 \cdot 10^{-8}$  [3], [5]. Bardzo dobre właściwości metrologiczne niskonapięciowych dzielników indukcyjnych skłoniły pomiarowców do budowy dzielników na wyższe napięcia rzędu 350 V [8], a nawet rzędu 7,5 kV [9]. Były one stosowane jako dzielniki napięcia, a także pełniły funkcje wzorcowych przekładników napięciowych. Niestety w dzielnikach tych nie można było zastosować konstrukcji wprowadzonych w dzielnikach niskona-

---

\* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów I Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: daniel.dusza@pwr.wroc.pl, zdzislaw.nawrocki@pwr.wroc.pl

pięciowych ze względu na duże różnice napięć między zwojami uzwojenia multifilarnego i na małą wytrzymałość elektryczną na przebicie lakierów izolacyjnych pokrywających druty nawojowe.

Problem ten próbowano rozwiązać stosując w dekadowych indukcyjnych dzielnikach napięć dwadzieścia sekcji uzwojeń nawiniętych nawojem unifilarnym i łącząc tak pary sekcji aby uzyskać zbliżone wartości ich rezystancji i reaktancji rozproszeń uzwojeń [6], [8], [9].

Podana wyżej bariera technologiczna wynikająca z niewystarczającej wartości wytrzymałości elektrycznej na przebicia lakierów izolacyjnych, została pokonana przez zastosowanie w nawoju multifilarnym drutów z izolacją w teflonie [7]. Dzielnik taki został zbudowany w Australijskim Biurze Pomiarów na napięciu 1 kV [7] i charakteryzuje się błędem podziału napięcia na poziomie  $1 \cdot 10^{-6}$ . Opracowany dzielnik był wykorzystywany w układach do pomiaru mocy i energii oraz w układach komparacyjnych AC/DC [2].

W Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych podjęto próbę zbudowania dwurdzeniowego indukcyjnego dzielnika napięcia i wyznaczenia jego błędów.

## 2. PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNYCH JEDNORDZENIOWYCH I DWURDZENIOWYCH DZIELNIKÓW NAPIĘCIA

Indukcyjne dzielniki napięcia (IDN) są stosowane jako jednordzeniowe i dwurdzeniowe. Niżej przeprowadzono analizę metrologiczną IDN jednordzeniowych i dwurdzeniowych, przy czym analizę dwurdzeniowych wykonano w dwóch wariantach dla symetrycznych i niesymetrycznych parametrów uzwojenia magnesującego. W celu uniknięcia bardzo złożonych obliczeń błędy dzielników wyznaczono dla dzielnika o przekładni równej dwa.

### 2.1. JEDNORDZENIOWY INDUKCYJNY DZIELNIK NAPIĘCIA

Jednordzeniowy IDN przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku 1a pokazano układ połączeń uzwojeń, a na rysunku 1b schemat zastępczy dzielnika.

W dalszych rozważaniach, dla lepszego przybliżenia właściwości IDN, przyjęto że znamionowe napięcia uzwojeń IDN wynoszą

$$U_{sn} = \frac{1}{2} U_{pn} \quad (1)$$

czyli, że napięcie wtórne jest dwa razy mniejsze od napięcia pierwotnego. Założono również że IDN nie jest obciążony.

Błąd napięciowy jednordzeniowego IDN określa wzór

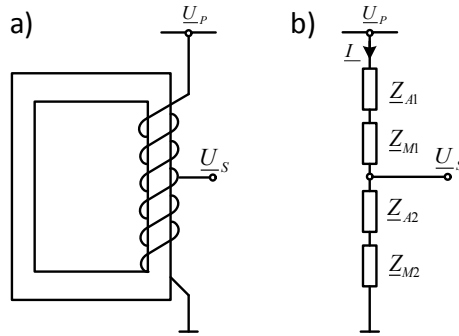
$$\delta \underline{U}_j = \frac{2\underline{U}_s - \underline{U}_p}{\underline{U}_p} \quad (2)$$

Prąd  $I$  płynący przez IDN

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_p}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2}} \quad (3)$$

Napięcie wtórne dzielnika

$$\underline{U}_s = \underline{I}(\underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M2}) = \underline{U}_p \frac{\underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M2}}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2}} \quad (4)$$



Rys. 1. Jednordzeniowy indukcyjny dzielnik napięcia: a) układ połączeń uzwojeń, b) schemat zastępczy gdzie:  $\underline{Z}_{A1}, \underline{Z}_{A2}$  – impedancje uzwojeń (rezystancje i reaktancje rozproszeń),  $\underline{Z}_{M1}, \underline{Z}_{M2}$  – impedancje zastępcze obwodów magnetycznych

Fig. 1. Single-core inductive voltage divider a) winding connection scheme, b) equivalent circuit where:  $\underline{Z}_{A1}, \underline{Z}_{A2}$  – winding impedances (resistances and reactances dissipations),  $\underline{Z}_{M1}, \underline{Z}_{M2}$  – equivalent impedances of magnetic circuits

Po podstawieniu powyższej zależności do wzoru (2) definiującego błąd jednordzeniowego IDN

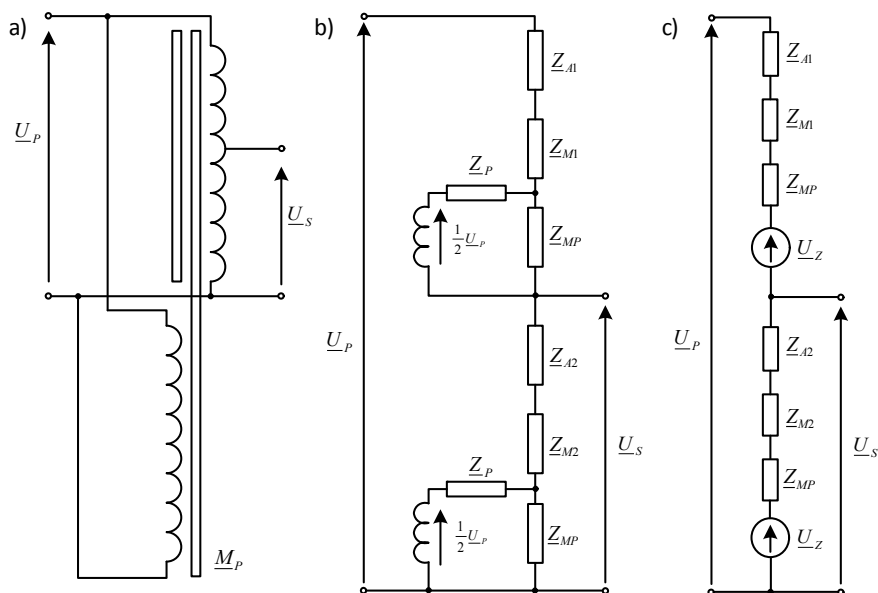
$$\delta \underline{U}_j = \frac{(\underline{Z}_{A2} - \underline{Z}_{A1}) + (\underline{Z}_{M2} - \underline{Z}_{M1})}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2}} \quad (5)$$

Wyrażenie to wskazuje, że należy tak skonstruować IDN aby impedancje zastępcze obwodu magnesującego były jak największe i możliwie mało się różniły, podobnie impedancje zastępcze uzwojeń też powinny mało się różnić. Takie właściwości uzyskuje się nawijając uzwojenia IDN nawojem multifilarnym na magnetowodzie o bardzo dużej przenikalności (permaloj, taśmy amorficzne). IDN wykonane według powy-

żej wskazanych zasad realizują podział napięć z błędem nawet na poziomie  $1 \cdot 10^{-7}$ . Jak zostanie wykazane znacznie lepszymi właściwościami metrologicznymi charakteryzują się dwurdzeniowe IDN.

## 2.2. DWURDZENIOWY INDUKCYJNY DZIELNIK NAPIĘCIA O SYMETRYCZNYCH OBWODACH MAGNESUJĄCYCH

Dwurdzeniowy IDN przedstawiono na rysunku 2. Na rysunku 2a pokazano magnetowody i układ połączeń uzwojeń, na rysunku 2b schemat zastępczy dzielnika z uzwojeniami magnesującymi, a na rysunku 2c pokazano schemat zastępczy, w którym napięcia występujące w uzwojeniach magnesujących i impedancje bezpośrednio powiązane z tymi napięciami zastąpiono dwójnikami składającymi się ze źródła napięcia i impedancji.



Rys. 2. Dwurdzeniowy indukcyjny dzielnik napięcia:

- a) układ połączeń, b) schemat zastępczy z uzwojeniami magnesującymi,  
c) schemat zastępczy ze zredukowanymi źródłami napięć

Fig. 2. Dual-core inductive voltage divider.

- a) connection scheme, b) equivalent scheme with magnetizing windings,  
c) equivalent scheme with reduced voltage sources

Rozważania dotyczące wyznaczania błędów uproszczono i założono że napięcia na uzwojeniach magnesujących są równe  $(0,5\underline{U}_p)$  i są odpowiednio równe impedancje  $\underline{Z}_p$  i  $\underline{Z}_{MP}$ .

Przy tych założeniach napięcie zastępcze

$$\underline{U}_Z = \frac{1}{2} \underline{U}_p \frac{\underline{Z}_{MP}}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_{MP}} \quad (6)$$

a impedancja źródła napięcia zastępczego

$$\underline{Z}_Z = \frac{\underline{Z}_p \underline{Z}_{MP}}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_{MP}}. \quad (7)$$

Prąd  $\underline{I}$  płynący przez nieobciążony dwurdzeniowy IDN

$$\underline{I} = \underline{U}_p \frac{\underline{Z}_p}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_{MP}} \frac{1}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2} + 2\underline{Z}_Z}. \quad (8)$$

Napięcie wtórne wynosi

$$\underline{U}_s = \underline{U}_p \frac{\underline{Z}_p}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_{MP}} \frac{\underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_Z}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2} + 2\underline{Z}_Z} + \frac{1}{2} \underline{U}_p \frac{\underline{Z}_{MP}}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_{MP}}. \quad (9)$$

Po podstawieniu tej zależności do wzoru (2) otrzymano wyrażenie określające błąd dwurdzeniowego indukcyjnego dzielnika napięcia

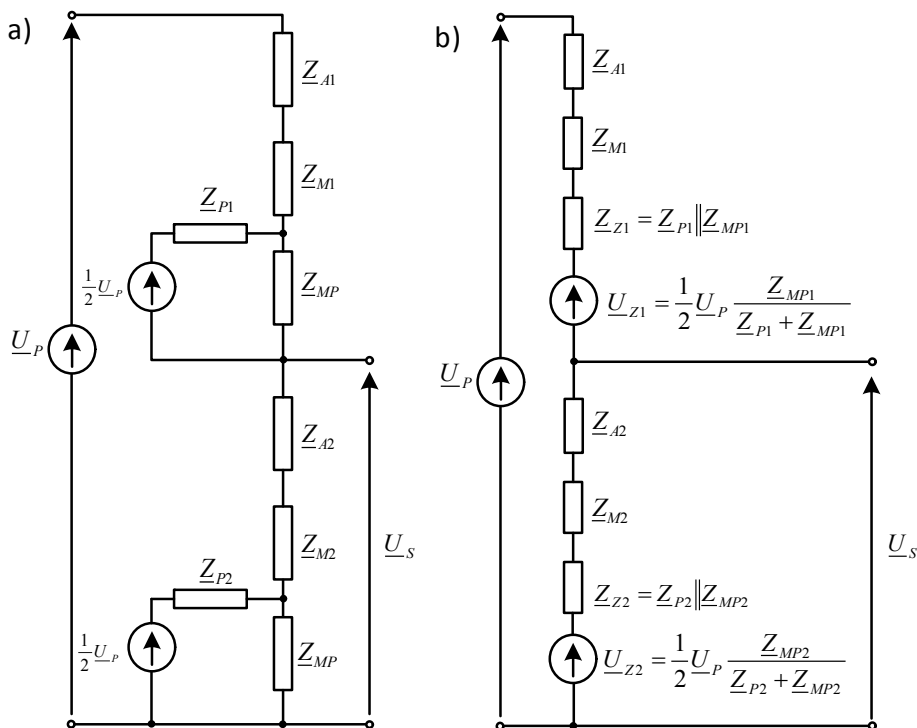
$$\delta \underline{U}_D = \frac{\underline{Z}_p}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_{MP}} \frac{(\underline{Z}_{A2} - \underline{Z}_{A1}) + (\underline{Z}_{M2} - \underline{Z}_{M1})}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2} + 2\underline{Z}_Z}. \quad (10)$$

Z porównania wzorów (10) i (5) wynika, że dwurdzeniowy indukcyjny dzielnik napięcia będzie miał znacznie mniejsze błędy niż jednordzeniowy indukcyjny dzielnik napięcia.

### 2.3. DWURDZENIOWY INDUKCYJNY DZIELNIK NAPIĘCIA O NIESYMETRYCZNYCH OBWODACH MAGNESUJĄCYCH

W dotychczas prowadzonych rozważaniach przyjęto, że pomiarowe obwody IDN mogą różnić się parametrami, a w obwodach magnesujących nie występują różnice parametrów. Różnice w obwodach magnesujących mogą być spowodowane niejednorodnymi właściwościami obwodów magnetycznych, różnicami się strumieniami rozproszenia wzdłuż obwodu magnetowodu i niesymetrią nawoju uzwojenia.

Schemat zastępczy IDN o niesymetrycznych obwodach magnesujących zilustrowano na rysunku 3. Na rysunku 3a przedstawiono układ zastępczy dwurdzeniowego IDN, a na rysunku 3b pokazano zredukowany układ zastępczy.



Rys. 3. Dwurdzeniowy indukcyjny dzielnik napięcia o niesymetrycznych parametrach obwodu magnesującego. a) układ zastępczy, b) zredukowany układ zastępczy  
 Fig. 3. Dual-core inductive voltage divider with asymmetric magnetizing circuit parameters. a) equivalent scheme, b) reduced equivalent scheme

Obwody magnesujące przekształcone zgodnie z twierdzeniem Thevenina charakteryzują źródła napięć

$$\underline{U}_{Z1} = \frac{1}{2} \underline{U}_p \frac{\underline{Z}_{MP1}}{\underline{Z}_{p1} + \underline{Z}_{MP1}}, \quad (11)$$

$$\underline{U}_{Z2} = \frac{1}{2} \underline{U}_p \frac{\underline{Z}_{MP2}}{\underline{Z}_{p2} + \underline{Z}_{MP2}}, \quad (12)$$

o impedancjach wewnętrznych

$$\underline{Z}_{Z1} = \underline{Z}_{p1} \parallel \underline{Z}_{MP1}; \quad \underline{Z}_{Z2} = \underline{Z}_{p2} \parallel \underline{Z}_{MP2}. \quad (13)$$

Napięcie wtórne  $\underline{U}_s$  określono z zasady superpozycji

$$\underline{U}_s = f(\underline{U}_p, \underline{U}_{Z1}, \underline{U}_{Z2}) = f(\underline{U}_p) + f(\underline{U}_{Z1}) + f(\underline{U}_{Z2}) = \underline{U}'_s + \underline{U}''_s + \underline{U}'''_s. \quad (14)$$

Składowa napięcia wtórnego wywołana napięciem  $\underline{U}_p$

$$\underline{U}'_s = \underline{U}_p \frac{\underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_{Z2}}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_{Z1} + \underline{Z}_{Z2}}, \quad (15)$$

składowe napięć wtórnych wywołanych napięciami  $\underline{U}_{Z1}$  i  $\underline{U}_{Z2}$

$$\underline{U}''_s = \frac{1}{2} \underline{U}_p \frac{\underline{Z}_{MP1}}{\underline{Z}_{p1} + \underline{Z}_{MP1}} \frac{\underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_{Z2}}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_{Z1} + \underline{Z}_{Z2}}, \quad (16)$$

$$\underline{U}'''_s = \frac{1}{2} \underline{U}_p \frac{\underline{Z}_{MP2}}{\underline{Z}_{p2} + \underline{Z}_{MP2}} \frac{\underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_{Z2}}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_{Z1} + \underline{Z}_{Z2}} \quad (17)$$

Błąd dwurdzeniowego IDN o niesymetrycznych obwodach magnesujących wyznacza się ze wzoru (2), który zapisano w postaci

$$\underline{U}_{DN} = 2 \frac{\underline{U}'_s + \underline{U}''_s + \underline{U}'''_s}{\underline{U}_p} - 1, \quad (18)$$

a po podstawieniu napięć  $\underline{U}'_s, \underline{U}''_s, \underline{U}'''_s$  wynosi

$$\delta \underline{U}_{DN} = \frac{(\underline{Z}_{Z1} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_{Z1}) \frac{2\underline{Z}_{p1} + \underline{Z}_{MP1}}{\underline{Z}_{p1} + \underline{Z}_{MP1}} + (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{Z1}) \frac{\underline{Z}_{MP2}}{\underline{Z}_{p2} + \underline{Z}_{MP2}}}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_{Z1} + \underline{Z}_{Z2}} - 1. \quad (19)$$

Ostatecznie po przekształceniach otrzymano błąd dwurdzeniowego IDN o niesymetrycznych obwodach magnesujących

$$\delta \underline{U}_{DN} = \frac{\{(\underline{Z}_{A2} - \underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{M2} - \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{Z2} - \underline{Z}_{Z1}) \cdot \underline{Z}_{p1} \cdot \underline{Z}_{p2} + (\underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_{Z2}) \underline{Z}_{MP2} \underline{Z}_{p1} - (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{Z1}) \underline{Z}_{MP1} \underline{Z}_{p2}\}}{(\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2} + \underline{Z}_{Z1} + \underline{Z}_{Z2})(\underline{Z}_{p1} + \underline{Z}_{MP1})(\underline{Z}_{p2} + \underline{Z}_{MP2})}. \quad (20)$$

Otrzymany wzór wskazuje, że błędy dwurdzeniowego IDN o niesymetrycznych obwodach magnesujących zostaną zminimalizowane gdy zostaną wybrane magnetywody o jednorodnych właściwościach i zostaną bardzo starannie nawinięte uzwojenia dzielnika o możliwie takich samych sprzężeniach magnetycznych.

Należy zatem dążyć do zmniejszenia rezystancji uzwojenia magnesującego dobierając drut nawojowy o odpowiednio dużym przekroju oraz należy zwiększyć impedancję  $\underline{Z}_{MP}$  charakteryzującą obwód magnesujący stosując magnetowód o dużej indukcji nasycenia i dużej przenikalności. Zwiększenie impedancji  $\underline{Z}_{MP}$  prowadzi do zmniejszenia reaktancji rozproszenia wchodzącej w skład impedancji  $\underline{Z}_p$ . Należy podkreślić że uzwojenie magnesujące jest dołączone do źródła napięcia  $\underline{U}_p$  i strumień

wytworzony w magnetowodzie magnesującym jest proporcjonalny do napięcia  $\underline{U}_p$  pomniejszonego o spadek napięcia na impedancji  $\underline{Z}_p$ , wynika stąd, że tylko niewielka część strumienia płynie w magnetowodzie pomiarowym. Zatem punkt pracy magnetowodu pomiarowego leży w obszarze przenikalności początkowych. Stąd magnetowód pomiarowy powinien być wykonany z materiału magnetycznego o bardzo dużej przenikalności początkowej.

Należy zauważyć, że jeżeli do wzoru (20) podstawimy zgodnie z rozważaniami w rozdziale 2.2. zależność  $\underline{Z}_{p1} = \underline{Z}_{p2} = \underline{Z}_p$  to  $\underline{Z}_{MP1} = \underline{Z}_{MP2} = \underline{Z}_{MP}$  to otrzymamy wyrażenie (10).

### 3. KONSTRUKCJA DWURDZENIOWEGO DZIELNIKA NAPIĘCIA

W dwurdzeniowym IDN rdzeń magnesujący, toroid jest wykonany z blachy transformatorowej ET 110-23 o grubości 0,23 mm o wymiarach  $\varnothing 160 \times \varnothing 80 \times 60$  mm, maksymalnej przenikalności względnej  $40 \cdot 10^3$  i indukcji nasycenia 1,6 T. Magnetowód pomiarowy jest wykonany z blachy superpermalojowej P-80M o grubości 0,1 mm o wymiarach  $\varnothing 160 \times \varnothing 80 \times 15$  mm, względnej maksymalnej przenikalności początkowej  $60 \cdot 10^3$ . Na rdzeniu magnesującym nawinięto uzwojenie 1000 zwojów drutem DNE 0,45 mm o podwójnej izolacji. Po zaizolowaniu uzwojenia magnesującego i założeniu ekranu elektrostatycznego złożono magnetowody, owinięto je taśmą izolacyjną PCV i założono ekran elektrostatyczny dolny. Następnie nawinięto uzwojenie multifilarne o liczbie zwojów 100 wykonane z 10 drutów miedzianych posrebrzonych o średnicy  $\varnothing 0,25$  mm w izolacji teflonowej o średnicy  $\varnothing 0,55$  mm. Na jednym z przewodów wykonano odczepy po 1 i po 10 zwojach. Analogicznie nawinięto pozostałe uzwojenia pomiarowe IDN i otrzymano;

- $10 \times 100$  zwojów z odczepami 10 zwojów i 1 zwój,
- $10 \times 10$  zwojów,
- $10 \times 1$  zwój

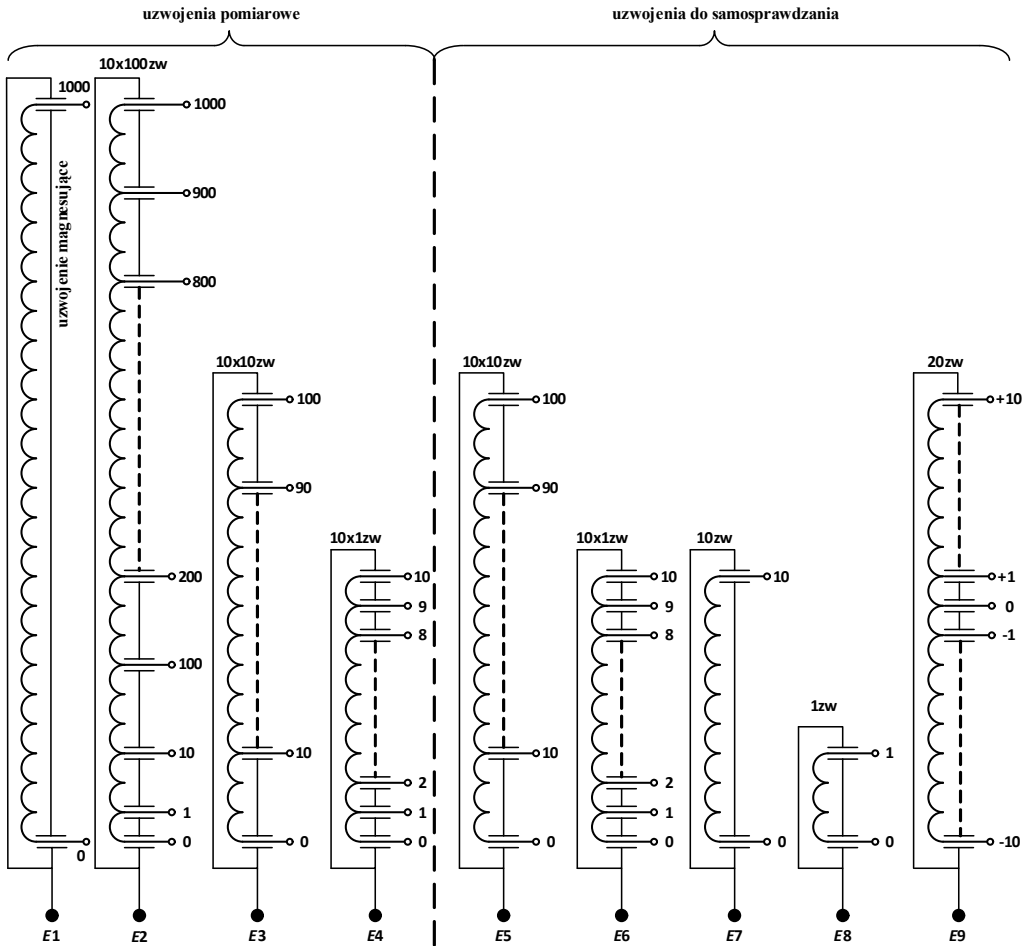
Następnie założono ekran elektrostatyczny górny, oba ekrany połączono linką i wprowadzono ją na zewnątrz.

W dalszej kolejności, według podanych wyżej zasad, nawinięto uzwojenia do samosprawdzania IDN.

Uzwojenia do samosprawdzania mają następujące liczby zwojów:

- $10 \times 10$  zwojów ,
- $10 \times 1$  zwój,
- 10 zwojów,
- 1 zwój.





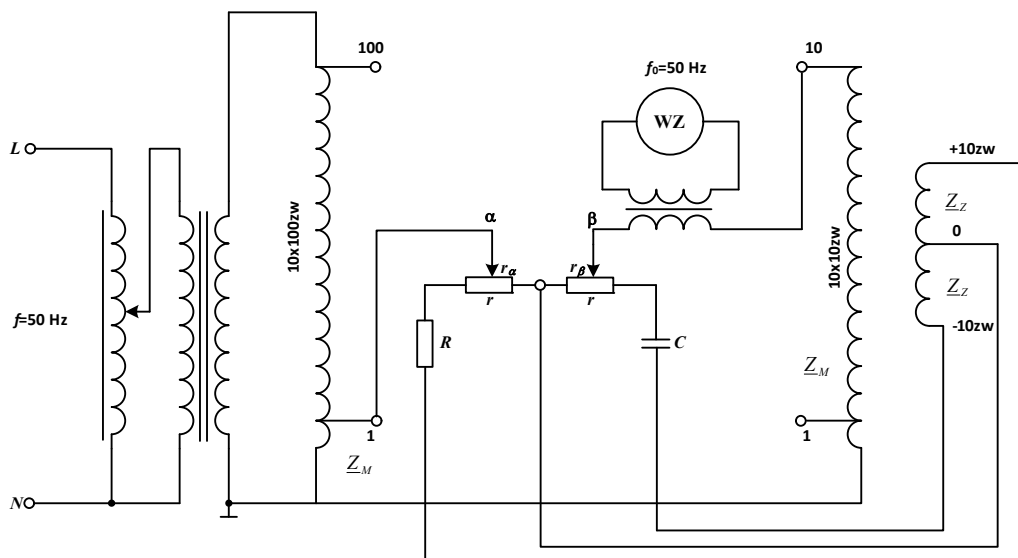
Rys. 4. Uzwojenia pomiarowe i uzwojenia do samosprawdzania indukcyjnego dzielnika napięcia  
 Fig. 4. The measuring windings and self-testing windings of inductive voltage divider

Na samym końcu umieszczono uzwojenie układu kompensacyjno-różnicowego umożliwiającego wyznaczenie różnic względnych napięć (błędów) porównywanych uzwojeń. Uzwojenie to zawiera 20 zwojów oznaczonych : +10 zw., +1 zw., 0, -1 zw., -10 zw., gdzie 0 oznacza odczep środkowy uzwojenia. Znak „+” oznacza fazę zgodną, a znak „-” fazę przeciwną napięcia w tym uzwojeniu w porównaniu z fazami napięć w pozostałych uzwojeniach.

Na rysunku 4 pokazano uzwojenie IDN pomiarowe i uzwojenie do samosprawdzania w ekranach i podano liczby zwojów tych uzwojeń.

#### 4. UKŁAD DO WYZNACZANIA WZGLĘDNYCH RÓŻNIC NAPIĘĆ PORÓWNYWANYCH UZWOJEŃ

Schemat układu do wyznaczania względnych różnic napięć uzwojeń zilustrowano na rysunku 5. Działa on zgodnie z metodą kompensacyjno-różnicową.

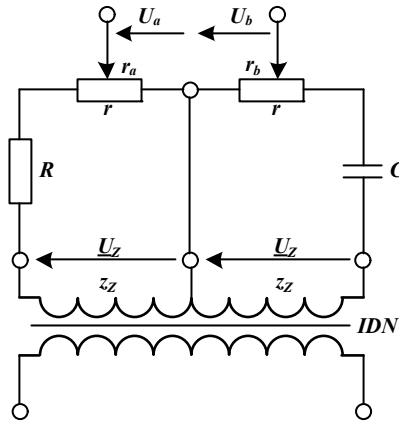


Rys. 5. Układ kompensacyjno-różnicowy do wyznaczania względnej różnicy porównywanych napięć  
Fig. 5. Compensating-differential circuit for determining the relative difference of the compared voltages

W przedstawionym układzie porównywane są napięcia występujące na 100 zwojach uzwojenia pomiarowego i uzwojenia do samosprawdzenia. Różnica napięć tych uzwojeń jest równoważona za pomocą kompensatora pracującego w układzie współrzędnych prostokątnych, składającego się z rezystora  $R$ , kondensatora  $C$  i potencjometrów wielobrotowych o rezystancji  $r$  wyposażonych w liczniki obrotów. Napięcie występujące na rezystorze  $r_\alpha$  umożliwia zrównoważenie składowej czynnej błędu, a na rezystorze  $r_\beta$  składowej biernej błędu. Kompensator jest zasilany z uzwojeń o liczbie zwojów +10 zw., 0–10 zw. Na rysunku 6 pokazano układ kompensatora o współrzędnych prostokątnych.

Na zaciski wejściowe kompensatora są podawane napięcia  $\underline{U}_Z$  z IDN. Na zaciskach wyjściowych kompensatora mamy napięcie

$$\Delta \underline{U} = U_\alpha + jU_\beta = \underline{U}_Z \frac{r_\alpha}{R+r} + \underline{U}_Z \frac{r_\beta}{\frac{1}{j\omega C} + r}. \quad (21)$$



Rys. 6. Kompensator o współrzędnych prostokątnych  
Fig. 6. Compensator of rectangular coordinates

Ponieważ  $R, \frac{1}{\omega C} \gg r$ , to powyższe równanie ma postać

$$\Delta \underline{U} = (Gr_{\alpha} + j\omega Cr_{\beta}) \underline{U}_Z, \quad (22)$$

gdzie:  $G = \frac{1}{R}$ .

Różnica względna porównanych napięć

$$\delta \underline{U} = \frac{\Delta \underline{U}}{\underline{U}_M} = (Gr_{\alpha} + j\omega Cr_{\beta}) \frac{\underline{U}_Z}{\underline{U}_M} \quad (23)$$

gdzie:  $\underline{U}_M$  – napięcie występujące na porównywanych uzwojeniach

Napięcie  $\underline{U}_Z$  i  $\underline{U}_M$  są proporcjonalne do liczby zwojów uzwojeń  $z_Z$  i  $z_M$  stąd

$$\delta \underline{U} = (\alpha' + j\beta') \frac{z_Z}{z_M} \quad (24)$$

gdzie:  $\alpha' = Gr_{\alpha}, \beta' = \omega Cr_{\beta}$ .

Kompensator wywzorcowano tak, że wartości  $\alpha'$  i  $\beta'$  odczytuje się z liczników potencjometrów wieloobrotowych.

Ostatecznie względna różnica napięć – błąd IDN jest określony zależnością

$$\delta \underline{U} = \alpha + j\beta \quad (25)$$

gdzie:

$$\alpha = \alpha' \frac{z_Z}{z_M} - \text{błąd napięciowy,}$$

$$\beta = \beta' \frac{z_Z}{z_M} - \text{błąd kątowy.}$$

## 5. WYZNACZENIE BŁĘDÓW INDUKCYJNEGO DZIELNIKA NAPIĘCIA

Błędy IDN wyznaczono w układach kompensacyjno-różnicowych według procedur pomiarowych podanych przez Tiepnera [9], a również cytowanych w opracowaniu [6]. Porównywano napięcia – wyznaczono błędy – występujące w uzwojeniach o tej samej liczbie zwojów [9]. Bezpośrednio wyznaczono błędy IDN o stosunku zwojów 100/100, 10/10, 1/1, natomiast pośrednio błędy stosunku zwojów 1000/100, 1000/10, i 1000/1.

Wykonane pomiary i standardowe procedury wyznaczania błędów przekładni dwurdzeniowego IDN [2, 5, 6, 9] wykazały, że błędy dla  $U_p = 300 \text{ V}$  i  $f = 50 \text{ Hz}$  przyjmują następujące wartości dla przekładni:

1000/100,	$\alpha = -4,3 \cdot 10^{-6}$ ,	$\beta = -8,1 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$ ,
1000/10,	$\alpha = -16,4 \cdot 10^{-6}$ ,	$\beta = -14,2 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$ ,
1000/1,	$\alpha = -44,1 \cdot 10^{-6}$ ,	$\beta = -37,7 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$ .

Otrzymane wyniki wskazują, że opracowany i wykonany dwurdzeniowy IDN zgodnie z obowiązującymi normami można zaliczyć do klas:

- o przekładni 1000/100, do klasy 0,001,
- o przekładni 1000/10, do klasy 0,002,
- o przekładni 1000/1, do klasy 0,005.

## 6. WNIOSKI

Wyniki pomiarów wskazują, że opracowany i zbudowany dwurdzeniowy IDN o przekładni 1000/1 ma klasę 0,005. Dzielnik ten ma lepsze parametry metrologiczne aniżeli dzielnik jednordzeniowy (kl. 0,02) opracowany w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych w Politechnice Wrocławskiej [6], ale ma większe błędy niż dwurdzeniowy dzielnik indukcyjny (kl. 0,0001) wykonany w Australijskim Biurze Pomiarów [7] i dzielnik jednordzeniowy z sekcjonowanymi uzwojeniami (kl. 0,0005) opracowany w ASMW w Berlinie [9]. Porównanie błędów przekładni dzielników, skonstruowanych w opracowany w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych w Politechnice Wrocławskiej wskazują, że dwurdzeniowy dzielnik

indukcyjny w porównaniu z jednordzeniowym dzielnikiem jest tylko o dwie klasy lepszy. Wyprowadzone wzory opisujące błędy jednordzeniowego i dwurdzeniowego IDN dowodzą, że błąd dwurdzeniowego IDN powinien być znacznie mniejszy, nawet o dwa rzędy. Tak jednak nie jest, ponieważ przy wyprowadzeniach wzorów założono, że magnetowody mają jednorodne właściwości. Wynika stąd, że dalsze zmniejszenie błędów dwurdzeniowego IDN uzyska się stosując ekrany elektromagnetyczne minimalizujące przepływ strumieni rozproszenia magnetowodu magnesującego przez uzwojenia pomiarowe indukcyjnego dzielnika napięcia.

#### LITERATURA

- [1] BARDELL P.R., *Magnetic materials in the electrical industry*, Macdonal &Co. (Publishers) Ltd, London 1955.
- [2] BUDOVSKY I.F., HAGEN T., *Precision AC-DC transfer measurement system based on a 1000 V inductive voltage divider*, IEEE Trans. on Meas., april 2009, Vol. 58, No. 4.
- [3] DUDZIEWICZ J. (koordynator), *Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych*, WKiŁ, Warszawa 1975.
- [4] EMSCHERMANN H.H., FURMAN B., *Low-frequency one-step inductive voltage divider with ratio up to 1:1000*, IEEE Tans. on Meas., Dec. 1975, Vol. IM-24, No. 4, 349–352.
- [5] HILL J.J., *Der entwurf und die anwendungsmöglichkeiten von inductiven spannungsteilern mit einstellbarem übersetzungsverhältniss*, Meßtechnik, 1968, H. 10, 265–270.
- [6] NAWROCKI Z., *Wysokonapięciowy dzielnik indukcyjny o przekładni 1000:1*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 56, 2004, Studia i materiały Nr 24, 425–432.
- [7] SMALL G.W., BUDOVSKY I.F., *Precision three-stage 1000 V / 50 Hz inductive voltage divider*, IEEE Trans. on Meas., april 2005, Vol. 54, No. 2, 600–603.
- [8] SCHLINKE H., *Entwicklung induktiver präzisionswechselfspannungsteiler für 16 bis 500 Hz sowie Fehlerbestimmung*, Meßtechnik, 1970, H. 3, 52–60.
- [9] TIEPNER W., *Inductiver spannungsteiler 1000:1 für 7,5 kV*, Elektrik, 1975, Vol. 29, H. 4, 209–212.

#### DUAL-CORE 300 V INDUCTIVE VOLTAGE DIVIDER

The metrological analysis of single-core and dual-core inductive voltage divider was presented. The structure of designed and constructed dual-core 300 V inductive voltage divider with ratio 1000:1 was described. The compensating differential circuit for the determination of divider errors was discussed. The constructed dual-core voltage divider fulfils the requirements for instrument transformers class 0.005.