

WIESŁAW JAŁMUŻNY**DANUTA ADAMCZEWSKA****IWONNA BOROWSKA-BANAŚ**

Katedra Elektrotechniki Ogólnej i Przekładników

Politechnika Łódzka

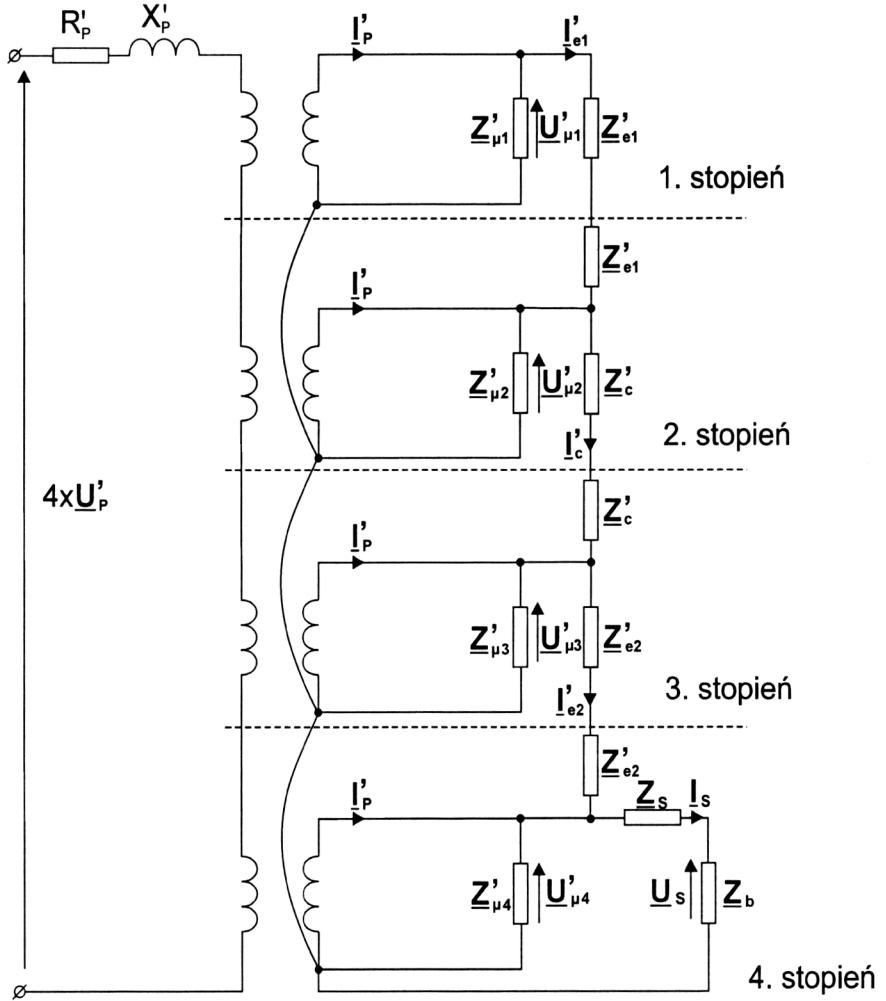
OCENA PORÓWNAWCZA WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNYCH MODELU CYFROWEGO I FIZYCZNEGO DWURDZENIOWEGO PRZEKŁADNIKA NAPIĘCIOWEGO

1. WSTĘP

Autorzy artykułu są twórcami cyfrowego modelu symulacyjnego przekładnika napięciowego opisanego w [1]. Weryfikacja tego modelu w wykonaniu jednordzeniowym potwierdziła słuszność założeń przyjętego modelu symulacyjnego. Dalsze prace poświęcone zostały projektowaniu wielordzeniowych przekładników napięciowych i w pracy [6] porównano kolejne koncepcje modelowania cyfrowego takich konstrukcji. Stworzono w środowisku DELPHI program „PRZEKŁADNIKI NAPIĘCIOWE – PROJEKTOWANIE”. Dla potwierdzenia słuszności przyjętego ostatecznie schematu zastępczego wykonano model fizyczny o parametrach konstrukcyjnych wynikających z projektu przekładnika kaskadowego zbudowanego przy użyciu wyżej wymienionego programu. Następnie przeprowadzono pomiary błędów transformacji modelu fizycznego i porównano je z błędami modelu cyfrowego.

2. MODEL CYFROWY

Stworzono model cyfrowy przekładnika kaskadowego o schemacie zastępczym omówionym w [3] [6] i przedstawionym na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy kaskadowego przekładnika napięciowego indukcyjnego o dwudziennym, czterostopniowym rozwiązaniu konstrukcyjnym

Przedstawiony schemat zastępczy opisano układem równań (1)-(10), których rozwiązanie pozwoliło na stworzenie modelu.

$$\underline{U}'_{\mu 1} + \underline{U}'_{\mu 2} + \underline{U}'_{\mu 3} + \underline{U}'_{\mu 4} + R'_p \underline{I}'_p + jX'_p \underline{I}'_p = 4\underline{U}'_p \quad (1)$$

$$\underline{U}'_{\mu 4} = \underline{U}_s + \underline{Z}_s \underline{I}_s \quad (2)$$

$$\underline{U}_s = \underline{Z}_b \underline{I}_s \quad (3)$$

$$\underline{U}'_{\mu 1} - \underline{U}'_{\mu 2} = 2\underline{Z}'_e \underline{I}'_{e1} \quad (4)$$

$$\underline{U}'_{\mu 2} - \underline{U}'_{\mu 3} = 2\underline{Z}'_c \underline{I}'_c \quad (5)$$

$$\underline{U}'_{\mu 3} - \underline{U}'_{\mu 4} = 2\underline{Z}'_e \underline{I}'_{e2} \quad (6)$$

$$\underline{I}'_p - \underline{I}'_{e1} = \underline{I}'_{\mu 1} \quad (7)$$

$$\underline{I}'_p + \underline{I}'_{e1} - \underline{I}'_c = \underline{I}'_{\mu 2} \quad (8)$$

$$\underline{I}'_p - \underline{I}'_{e2} + \underline{I}'_c = \underline{I}'_{\mu 3} \quad (9)$$

$$\underline{I}'_p + \underline{I}'_{e2} - \underline{I}'_s = \underline{I}'_{\mu 4} \quad (10)$$

Przekształcenie układu równań wielkości symbolicznych doprowadziło do układu trzech równań, które w postaci macierzowej przedstawia równanie (11).

$$\begin{bmatrix} \underline{I}'_{e1} \\ \underline{I}'_c \\ \underline{I}'_{e2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -2(\underline{Z}'_{\mu} + \underline{Z}'_e) & \underline{Z}'_{\mu} & 0 \\ \underline{Z}'_{\mu} & -2(\underline{Z}'_{\mu} + \underline{Z}'_c) & \underline{Z}'_{\mu} \\ 0 & \underline{Z}'_{\mu} & -2(\underline{Z}'_{\mu} + \underline{Z}'_e) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{Z}'_{\mu} \underline{I}'_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

Obliczono odwrotną macierz impedancji o postaci (12)

$$\underline{Z}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{(ab - c^2)}{a(ab - 2c^2)} & \frac{-c}{(ab - 2c^2)} & \frac{c^2}{a(ab - 2c^2)} \\ \frac{-c}{(ab - 2c^2)} & \frac{a}{(ab - 2c^2)} & \frac{-c}{(ab - 2c^2)} \\ \frac{c^2}{a(ab - 2c^2)} & \frac{-c}{(ab - 2c^2)} & \frac{(ab - c^2)}{a(ab - 2c^2)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

gdzie:

$$a = -2(\underline{Z}'_{\mu} + \underline{Z}'_e)$$

$$b = -2(\underline{Z}'_{\mu} + \underline{Z}'_c)$$

$$c = \underline{Z}'_{\mu}$$

Rozwiązanie układu równań (11) pozwoliło obliczyć błąd napięciowy

$$\Delta U = \frac{U_s - U'_p}{U'_p} 100\%$$

i błąd kątowy modelu cyfrowego

$$\delta U = \arg(\underline{U}_s - \underline{U}'_p)$$

Po wprowadzeniu do programu znamionowych danych elektrycznych i konstrukcyjnych projektowanego modelu fizycznego otrzymano dokumentację, która posłużyła do zbudowania modelu.

Na rysunku 2 przedstawiono dane znamionowe i wyniki obliczenia konstrukcji przekładnika modelowego TESTOWY_2

DANE ZNAMIONOWE			
Liczba rdzeni	N	-	2,00
Napięcie pierwotne	U1n	kV	1,00
Napięcie wtórne	U2n	V	100,00
Napięcie wtórne dodatkowe	Udn	V	57,74
Napięcie probiercze	Upp	kV	3,00
Moc znamionowa uzwojenia pomiarowego I	SnI	VA	10,00
Moc znamionowa uzwojenia pomiarowego II	SnII	VA	0,00
Moc znamionowa uzwojenia dodatkowego	Snd	VA	1,00
Klasa dokładności uzw. pom. I	kplI	-	0,50
Klasa dokładności uzw. pom. II	kplII	-	0,00
Klasa dokładności uzw. dodatkowego	kpd	-	1,00
Współczynnik przekroju rdzenia	krdz	-	2,20
Częstotliwość	fn	Hz	50,00
Współczynnik mocy uzwojenia pomiarowego I	cosfiI	-	0,80
Współczynnik mocy uzwojenia pomiarowego II	cosfiII	-	0,00
Liczba schodków przekroju krzyżowego rdzenia	ksch	-	2,00
Gęstość prądu	j	A/mm ²	1,50
Indukcja znamionowa	Bmn	T	0,86
Długość pierwszej warstwy uzw. wyrównawczego	l3	mm	140,00
Długość pierwszej warstwy uzw. pierwotnego	l1	mm	130,00
Grubość blachy rdzenia	grb	mm	0,28
Odstęp izolacyjny między uzwojeniem, a rdzeniem	x	mm	20,00
Odstęp izolacyjny między uzw. pierw., a dodatkowym	y	mm	20,00
Wsp. podziału pola nawijania uzw. wt.	wsp	-	0,00
Odstęp między cewkami uzwojeń wtórnych	odst	mm	0,10
Masa właściwa materiału rdzenia	roFe	kg/m ³	7650,00
Masa właściwa materiału przewodowego	roCu	kg/m ³	8930,00

WYNIKI OBLICZEŃ UZWOJEŃ					
Rodzaj uzw.	liczba zw.	długość	wymiary drutu	średnica wewn. rury	średnica zewn. rury
	-	mm	mm ² lub mm	mm	mm
wyrównawcze	100,00	140,00	1,25	70,12	74,20
pierwotne	1880,00	130,00	0,26	77,00	81,00
wtórne I	188,00	88,00	0,84	85,00	100,00
dodatkowe	109,00	130,00	0,02	105,00	105,10
sprzęgające	61,00	122,00	1,90		

WYNIKI OBLICZEŃ RDZENI TAŚMOWYCH

Liczba rdzeni	N	-	2,00
Szerokość okna rdzenia	A	mm	156,00
Wysokość okna rdzenia	B	mm	71,30
Polożenie szczeliny	E	mm	78,00
Szerokość rdzenia	C	mm	278,00
Wysokość rdzenia	D	mm	193,30
Grubość rdzenia	F	mm	61,00
Grubość pierwszego schodka	G	mm	50,90
Szerokość kolumny rdzenia	J	mm	32,46
Szerokość pierwszego schodka	K	mm	7,14
Masa rdzenia	mFe	kg	16,48
Długość drogi magnetycznej	lFe	m	0,84
Pole przekroju rdzenia	SFe	cm ²	25,71

Rys. 2. Dane znamionowe i wyniki obliczenia konstrukcji przekładnika modelowego TESTOWY_2

3. MODEL FIZYCZNY

Na podstawie wyników otrzymanych z programu „PRZEKŁADNIKI NAPIĘCIOWE – PROJEKTOWANIE” zbudowano model fizyczny przekładnika dwurdzeniowego czterostopniowego o parametrach rdzenia wynikających z parametrów z rysunku 2 oraz o uzwojeniach według dokumentacji przedstawionej poniżej.

Program uzwojania przekładnika modelowego 1000 V/100 V (18 kwietnia 2009 r.)

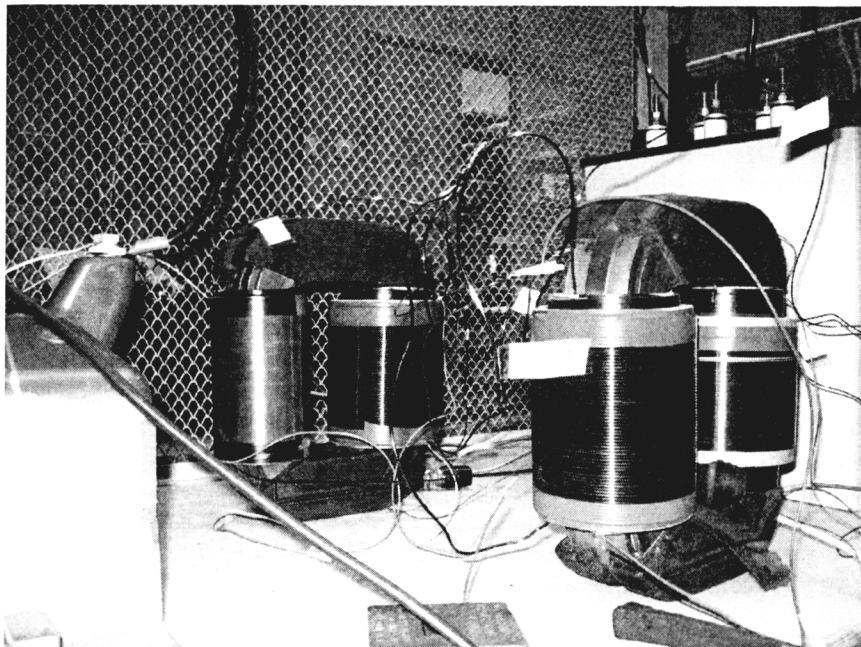
- Uzwojenie **wyrównawcze**
 - Liczba rur: 4 (dostarczone z rdzeniami)
 - Średnice rury: $\Phi 70,12 \times \Phi 74,20$ mm
 - Długość rury: 144 mm
 - Liczba zwojów: 100

	Długość pola nawijania:	140 mm (uskok od brzegu po 2 mm)
	Drut nawojowy:	Φ1,2 mm , z emalią Φ1,25 mm
	Liczba warstw:	1
	Wyprowadzenie:	tym samym drutem
2.	Uzwojenie pierwotne	
	Liczba rur:	4
	Średnice rury:	Φ77 x Φ81 mm
	Długość rury:	140 mm
	Liczba zwojów:	470
	Długość pola nawijania:	130 mm (uskok od brzegu po 5mm)
	Drut nawojowy:	Φ0,22 mm , z emalią Φ0,25 mm
	Liczba warstw:	1
	Wyprowadzenie:	linka Cu 1,5mm ²
3.	Uzwojenie sprzęgające	
	Liczba rur:	2
	Średnice rury:	Φ85 x Φ100 mm
	Długość rury:	130 mm
	Liczba zwojów:	61
	Długość pola nawijania:	122 mm (uskok od brzegu po 4mm)
	Drut nawojowy:	Φ1,8 mm , z emalią Φ1,9 mm
	Liczba warstw:	1
	Wyprowadzenie:	tym samym drutem
4.	Uzwojenie wtórne	
	Liczba rur:	1
	Średnice rury:	Φ85 x Φ100 mm
	Długość rury:	100 mm
	Liczba zwojów:	188
	Długość pola nawijania:	88 mm (uskok od brzegu po 6 mm)
	Drut nawojowy:	Φ0,8 mm , z emalią Φ0,86 mm
	Liczba warstw:	2
	Wyprowadzenie:	linka Cu 1,5 mm ²

Na fotografii 1 pokazano skonstruowany model fizyczny.

4. PORÓWNANIE BŁĘDÓW TRANSFORMACJI

Błędy transformacji modelu cyfrowego otrzymano w programie „PRZEKŁADNIKI NAPIĘCIOWE – PROJEKTOWANIE”.



Fot. 1. Model fizyczny przekładnika kaskadowego

Tabela 1. Błędy transformacji modeli przekładnika kaskadowego

Krotność napięcia	Błędy transformacji	MODEL CYFROWY		MODEL FIZYCZNY	
		S_n	$0,25 S_n$	S_n	$0,25 S_n$
0,8	ΔU [%]	-0,76	-0,37	-0,82	-0,43
	δU [min]	+50,9	+42,5	+48,5	+42,9
1,0	ΔU [%]	-0,77	-0,36	-0,81	-0,41
	δU [min]	+49,7	+41,3	+48,4	+42,5
1,2	ΔU [%]	-0,76	-0,36	-0,80	-0,40
	δU [min]	+48,7	+40,3	+48,5	+42,8

Analiza błędów transformacji obu modeli pozwoliła na obliczenie względnej rozbieżności metrologicznej ε_{Δ} i ε_{δ} obu modeli, opisanych wzorami (13), (14).

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\Delta U_{\text{I}} - \Delta U_{\text{II}}}{\Delta U_{\text{II}}} 100\% \quad (13)$$

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{\delta U_{\text{I}} - \delta U_{\text{II}}}{\delta U_{\text{II}}} 100\% \quad (14)$$

Do obliczeń przyjęto wyniki otrzymane z symulacji modelu cyfrowego i pomiarów modelu fizycznego. Wyniki uzyskane z modelu fizycznego potraktowano jako wyniki wzorcowe. Względna niedokładność pomiarów błędów: napięciowego i kąтового, wykonanych za pomocą automatycznego komparatora (mostka) typu K535 nie przekraczała – zgodnie z danymi mostka – dla całego zakresu przeprowadzonych badań 2%. Rezultaty obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki obliczeń względnych rozbieżności metrologicznych błędów transformacji modeli przekładnika kaskadowego

Krotność napięcia	ε_{Δ} w %		ε_{δ} w %	
	S_n	$0,25 S_n$	S_n	$0,25 S_n$
0,8	-7,32	-13,0	4,95	0,93
1,0	-4,94	-12,2	2,69	-2,82
1,2	-5,00	-10,0	0,41	-5,84

4. UWAGI I WNIOSKI

Wyniki badań uzyskane dla zaprojektowanego za pomocą programu autorskiego modelu fizycznego przekładnika napięciowego kaskadowego uzasadniają sformułowanie następujących uwag i wniosków:

- Pełna weryfikacja wspomaganych komputerem technik obliczeniowych obliczania tak złożonego układu elektromagnetycznego, jaki występuje w kaskadowych przekładnikach napięciowych, wymaga zastosowania różnych metod symulacji komputerowej.

- Wykorzystywane przez autorów modele matematyczne [1-7], rozwijane w miarę doskonalenia metod i technik obliczeniowych, umożliwiły osiągnięcie zadowalającego, zaledwie kilkuprocentowego stopnia rozbieżności w odniesieniu do wyników sprawdzenia dokładności rzeczywistych konstrukcji.
- Porównawcza analiza wyników sprawdzenia dokładności transformacji modelu cyfrowego i modelu fizycznego umożliwiła weryfikację procedur zastosowanych w autorskim programie komputerowym.

LITERATURA

- [1] **Adamczewska D., Borowska-Banaś I., Jałmużny W.:** Projektowanie napięciowych przekładników kaskadowych wspomaganie komputerem. Materiały XI Krajowego Sympozjum Przekładnikowego, Zakościele/Inowłódz, 10-12 czerwca 1996, ss. 23-29.
- [2] **Adamczewska D., Borowska-Banaś I., Jałmużny W.:** Zunifikowany algorytm obliczania rdzenia i uzwojeń wielordzeniowego przekładnika napięciowego, Materiały XIII Krajowego Sympozjum Przekładnikowego, Zakościele/Inowłódz, 8-10 czerwca 1998, ss. 27-33.
- [3] **Adamczewska D., Borowska-Banaś I., Jałmużny W.:** Projektowanie wielordzeniowych przekładników napięciowych z wykorzystaniem współczesnych narzędzi programowania, ZN PŁ Elektryka, nr 112, Łódź 2007, ss. 37-44.
- [4] **Jałmużny W., Adamczewska D., Borowska-Banaś I.:** Komputerowa analiza właściwości metrologicznych napięciowych przekładników kaskadowych, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Przekładnik '96, Inowrocław, 7-8 października 1996.
- [5] **Jałmużny W., Adamczewska D., Borowska-Banaś I.:** Model matematyczny wielordzeniowego kaskadowego przekładnika napięciowego, Materiały IX Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Krynica, 20-24 września 1999, Wydawnictwo Zakładu Metrologii AGH, Kraków 1999, ss. 190-195.
- [6] **Jałmużny W., Adamczewska D., Borowska-Banaś I.:** Metody symulacyjne w procesie projektowania przekładników napięciowych indukcyjnych, XXI Krajowe Sympozjum Przekładnikowe, Tworzyjanki 2006, ZN PŁ nr 988, Elektryka, z. 110, Łódź 2006, ss. 27-38.
- [7] **Jałmużny W.:** Charakterystyka właściwości eksploatacyjnych przekładników napięciowych za pomocą badań symulacyjnych, XVI Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Krynica 17-21 września 2006, PAK, nr 10bis/2006, ss. 108-113.
- [8] Przekładniki napięciowe indukcyjne, PN-EN 60044-2: 2001.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF PHYSICAL DUAL-CORE VOLTAGE TRANSFORMER WITH ITS DIGITAL MODEL

Summary

In the paper, a comparison of real dual-core voltage transformer with its simulation model has been presented. Simulation model has been created on the basis of „Przekładniki napięciowe – projektowanie” DELPHI software. The construction parameters of real model has been received from the simulation model. The real voltage transformer has been performed and its transformation errors has been measured and compared with the errors of simulation model.

Artykuł recenzowany