

doi:10.15199/48.2016.03.40

Narażenia przepięciowe układów izolacyjnych transformatorów rozdzielczych

Streszczenie: Spośród narażeń eksploatacyjnych transformatorów przepięcia mają decydujący wpływ na optymalizację wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych i zwiększenie niezawodności pracy transformatorów wpływające na ciągłość dostarczania energii elektrycznej.

W artykule przedstawiono analizę narażeń przepięciowych układów izolacyjnych, podczas oddziaływania udarów napięciowych o zróżnicowanych przebiegach, odzwierciedlających przepięcia powstające w warunkach eksploatacji transformatorów rozdzielczych w układach elektroenergetycznych oraz podczas prób napięciowych. Podstawą analizy były wyniki badań przepięć narażających układy izolacyjne transformatorów zawierających uzwojenia o zróżnicowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych i parametrach elektrycznych.

Summary: From among exploitation impacts of transformers the overvoltages have decisive influence on optimization of electric strength of insulation systems and guarantee reliability for work of transformers which have great meaning to improvement of continuity delivery for electrical energy.

Analysis of overvoltage impacts on insulation systems during influence of voltage strokes with different shapes where model overvoltages generated during exploitation conditions of distribution transformers in electrical power systems and during voltage tests is presented in the paper. As a basis of the analysis are results of investigations for overvoltages in insulation systems of transformer windings with different constructions and electrical parameters. **(Overvoltage impacts of insulation systems for distribution transformers).**

Słowa kluczowe: transformatory rozdzielcze, przepięcia łączeniowe i piorunowe, rozkłady przepięć wewnętrznych

Keywords: distribution transformers, switching and lightning overvoltages, distributions of internal overvoltages

1. Wprowadzenie

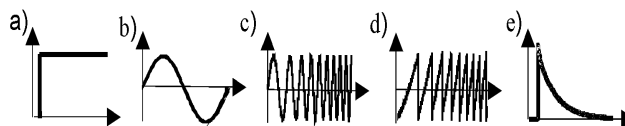
Ciągły wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną oraz ograniczenia techniczne rozwiązań konstrukcyjnych układów izolacyjnych transformatorów powodują, iż problematyka przepięć narażających układy izolacyjne transformatorów ma duże znaczenie praktyczne. Niezbędne są szczegółowe analizy narażeń układów izolacyjnych transformatorów od przepięć oraz analizy skuteczności ochrony przepięciowej transformatorów i koordynacji izolacji. Obecnie, z powodu stosowania w układach elektroenergetycznych urządzeń o parametrach odmiennych od parametrów urządzeń stosowanych dotychczas, takich jak na przykład wyłączniki próżniowe lub szersze stosowanie urządzeń, które dotąd nie pracowały, takich jak na przykład zasilacze impulsowe maszyn elektrycznych, układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych są narażone na oddziaływanie przepięć o przebiegach i wartościach maksymalnych nie występujących dotychczas [1,2]. W wyniku oddziaływania przepięć powstających w układach elektroenergetycznych, wewnątrz uzwojeń powstają przepięcia narażające układ izolacyjny transformatorów, pomimo stosowanej ochrony przepięciowej [3-7]. Przepięcia wewnętrzne w transformatorach zależą od przebiegu przepięć zewnętrznych oraz zjawisk przejściowych wewnątrz uzwojeń. W celu oceny skutków narażeń układów izolacyjnych transformatorów niezbędna jest analiza rozkładów napięć przejściowych wewnątrz uzwojeń przy oddziaływaniu przepięć o zróżnicowanych przebiegach powstających w warunkach eksploatacji oraz podczas prób przy zastosowaniu udarów napięciowych.

W artykule przedstawiono analizę porównawczą przepięć narażających układy izolacyjne wewnętrzne uzwojeń transformatorów rozdzielczych o zróżnicowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych i parametrach elektrycznych, występujących podczas oddziaływania udarów napięciowych, odzwierciedlających przebiegi przepięć powstających w układach elektroenergetycznych oraz podczas prób napięciowych.

Metoda badań przepięć w transformatorach i obiekty doświadczalne

Program badań obejmował rejestracje przebiegów przepięć doziemnych w wybranych punktach uzwojeń,

transformatorów i charakterystyk częstotliwościowych przepięć w uzwojeniach. Badania wykonano z zastosowaniem napięć o przebiegach odzwierciedlających przebiegi przepięć powstających w układach elektroenergetycznych oraz udaru napięciowego stosowanego podczas prób napięciowych transformatorów. Przebiegi przepięć powstających w układach elektroenergetycznych modelowano przez zastosowaniem udaru napięciowego prostokątnego, napięcia sinusoidalnego, napięcia o przebiegu „sweep sinus”, napięcia o przebiegu „sweep ramp”. Udar napięciowy prostokątny odzwierciedla przebiegi napięć przejściowych na zaciskach wejściowych transformatorów podczas działania ograniczników przepięć z tlenków metali [2,8]. Napięcie sinusoidalne o zmieniającej się częstotliwości, umożliwia wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych napięć przedstawiających reakcje uzwojeń na składowe oscylacyjne przepięć o zróżnicowanych częstotliwościach, powstających w układach elektroenergetycznych. Napięcie o przebiegu „sweep sinus” odzwierciedla składowe oscylacyjne przepięć łączeniowych w sieciach elektrycznych [1,2]. Napięcie o przebiegu „sweep ramp” modeluje składowe oscylacyjne powstające na zaciskach transformatora wyłączanego wyłącznikiem próżniowym [9,10]. Do badań przepięć w uzwojeniach podczas działania napięć udarowych probierczych, stosowanych do prób transformatorów, zastosowano napięcie udarowe piorunowe (Rys. 1) [6,11].



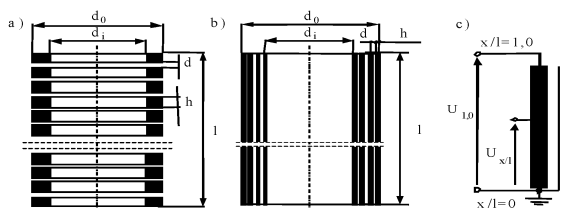
Rys. 1. Wybrane napięcia modelujące przebiegi składowych oscylacyjnych przepięć powstających w układach elektroenergetycznych: a) udar napięciowy prostokątny, b) napięcie sinusoidalne, c) napięcie o przebiegu "sweep sinus", d) napięcie o przebiegu "sweep ramp", e) udar napięciowy piorunowy

Parametry transformatorów doświadczalnych zamieszczono w tabelach 1 i 2, a uproszczone przekroje uzwojeń górnego napięcia transformatorów zamieszczono na rysunku 2.

Rejestracje przebiegów napięć wewnątrz uzwojeń przy działaniu następujących napięć modelowych: udaru napięciowego prostokątnego, napięcia sinusoidalnego, napięcia o przebiegu „sweep sinus”, napięcia o przebiegu „sweep ramp”, prowadzono przy napięciu 20 Vpp, a badania podczas działania, a napięcia udarowego piorunowego 1,2/50 μ s wykonano przy napięciu 300 V. Stanowisko do rejestracji przebiegów napięć podczas oddziaływania udarów napięciowych o przebiegu prostokątnym, napięcia „sweep sinus” i „sweep ramp” (Rys.3a) zawiera generator funkcji firmy *Tektronix* typu *AFG310*, oscyloskop cyfrowy typu *784D* firmy *Tektronix* i komputer.

Tabela 1: Parametry transformatorów doświadczalnych [12,13]

S_n , kVA	250	20
U_n , kV	15/0,4	15/0,4
U_z , %	4,5	4,2
ΔP_{Fe} , kW	0,486	0,114
ΔP_{Cu} , kW	3,509	0,525
I_0 , %	1,0	2,8



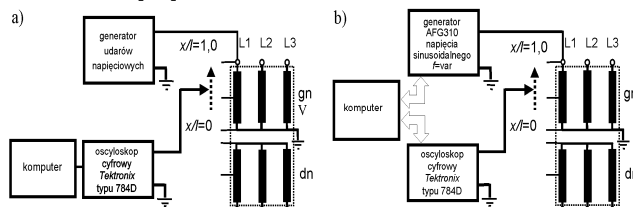
Rys. 2. Uproszczone przekroje uzwojenia cewkowego (a) i warstwowego (b) (c - oznaczenia zacisków uzwojeń)

Tabela 2: Podstawowe parametry uzwojeń transformatorów

S_n , kVA	250	20	
U_n , kV	15	15	
typ uzwojenia (cewek)	w	c(cz)	c(cw)
liczba zwojów w cewce (warstwie), –	191	810	650
liczba cewek (warstw), –	14	4	4
wysokość uzwojenia l , mm	366	280	250
średnica zewnętrzna d_o , mm	201/233	157	157
średnica zewnętrzna d_i , mm	255/303	205	205
szerokość cewki (warstwy) h , mm	366	25	25
szerokość szczeliny między cewkami (warstwami) d , mm	2	3	5

c - uzwojenie cewkowe, w - uzwojenie warstwowo, c(cz) - cewkowe (cewki zwykłe, c(cw) - cewkowe (cewki wzmacnione)

Do pomiarów charakterystyk częstotliwościowych napięć w uzwojeniach przy napięciu sinusoidalnym wykorzystano analizator *FRA* (*Frequency Response Analyzer*) zawierający generator funkcji typu *AFG310* firmy *Tektronix*, oscyloskop cyfrowy typu 2020 firmy *Tektronix* i komputer (Rys. 3b). Generator funkcji oraz oscyloskop połączone są z komputerem za pomocą interfejsu *GPB-PCMCIA*. Dedykowane oprogramowanie do pomiarów charakterystyk częstotliwościowych napięć jest zaimplementowane w środowisku *LabView* firmy *National Instruments* [14].



Rys. 3. Schematy stanowisk do rejestracji przebiegów napięć wewnątrz transformatorów rozdzielczych: a) stanowisko do rejestracji przebiegów napięć podczas oddziaływania udarów napięciowych b) stanowisko do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych napięć

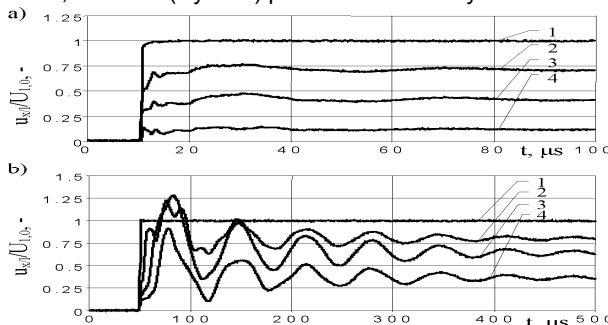
Rejestracje przebiegów napięć w uzwojeniach wykonano przy zastosowaniu generatorów o napięciu wyjściowym

20 Vpp i 300 V. Wartość napięcia, przy którym badano napięcia w uzwojeniach nie ma praktycznie wpływu na wyniki badań napięć wewnętrznych w uzwojeniach. W warunkach oddziaływania napięcia o dużej stromości oraz dużej częstotliwości transformator jest obiektem o charakterze liniowym. Dla częstotliwości napięcia zasilającego większych od kilkudziesięciu kiloherców rdzeń ferromagnetyczny nie ma praktycznie wpływu na indukcyjność uzwojeń. Dlatego dla dużych stromości napięcia wymuszenia oraz dużej częstotliwości, wpływ rdzenia na zjawiska przejściowe w uzwojeniach może być pominięty [15].

Przebiegi podczas działania udaru napięciowego prostokątnego

Wyniki badań napięć narażających układy izolacyjne uzwojeń transformatorów doświadczalnych mają postać przebiegów napięć przejściowych oraz zależności częstotliwościowych napięć doziemnych w wybranych punktach uzwojeń o współrzędnych $x/l = 0,75; 0,5$ i $0,25$ (Rys. 2c). Wyniki badań przedstawiono w jednostkach względnych w odniesieniu do wartości maksymalnej udaru napięciowego U_{max} .

Zarejestrowane przebiegi napięć w uzwojeniach transformatorów, powstających podczas działania udarów napięciowych prostokątnych między zaciskami uzwojenia $x/l = 1,0$ i $x/l = 0$ (Rys. 2c) przedstawiono na rysunku 4.



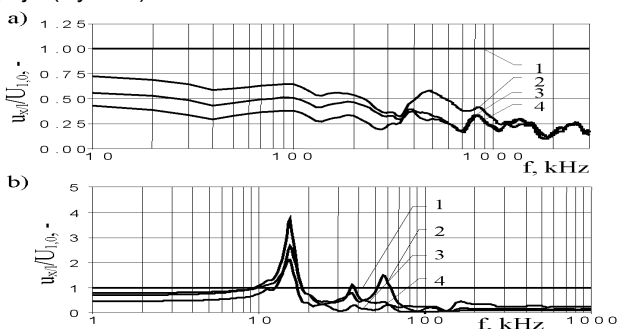
Rys. 4. Przebiegi napięć doziemnych w punktach x/l uzwojeń: a) 15 kV, 250 kVA: 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,75$; 3- $x/l=0,46$; 4- $x/l=0,16$ b) 15 kV, 20 kVA: 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,82$; 3- $x/l=0,67$; 4- $x/l=0,38$

Przebiegi wewnątrz uzwojeń, powstające podczas działania udaru napięciowego prostokątnego, zawierają składowe oscylacyjne o różnych częstotliwościach. Z analizy przebiegów napięć wynika, że częstotliwość składowej oscylacyjnej wewnątrz uzwojenia transformatora 250 kVA wynosi około 25 kHz, a częstotliwość drgań napięć wewnątrz transformatora 20 kVA wynosi 11 kHz. Wartości maksymalne napięć w transformatorach doświadczalnych są zróżnicowane. Na przykład w punkcie $x/l=0,67$ uzwojenia 15 kV transformatora 20 kVA napięcia doziemne osiągają około 1,25 wartości maksymalnej udaru napięciowego pojawiającego się na zaciskach transformatora.

Przebiegi podczas działania napięcia sinusoidalnego - charakterystyki częstotliwościowe napięć

W celu wyznaczenia reakcji uzwojeń transformatorów na składowe oscylacyjne napięcia powstających w układach elektroenergetycznych wyznaczono zależności częstotliwościowe napięć $u_{x/l}/U_{1,0} = g(f)$ wewnątrz uzwojeń. Od charakteru tej reakcji uzależnione są wartości napięć narażających układy izolacyjne transformatorów. Z analizy charakterystyk częstotliwościowych (Rys. 5), wynika, że napięcia sinusoidalne o niektórych częstotliwościach są silnie wzmacniane wewnątrz uzwojeń. Częstotliwości te są zgodne z częstotliwościami składowych przejściowych przebiegów napięć (Rys. 4). Na przykład współczynnik napięć

powstających w uzwojeniu 15 kV transformatora 250 kVA przy częstotliwości 2 kHz wynosi około 0,6 jw (Rys. 5a), a dla transformatora 20 kVA dla częstotliwości około 10 kHz wynosi 3,7 jw (Rys. 5b).



Rys. 5. Zależności częstotliwościowe prądów w punktach x/l (Rys. 2c) uzwojeń:

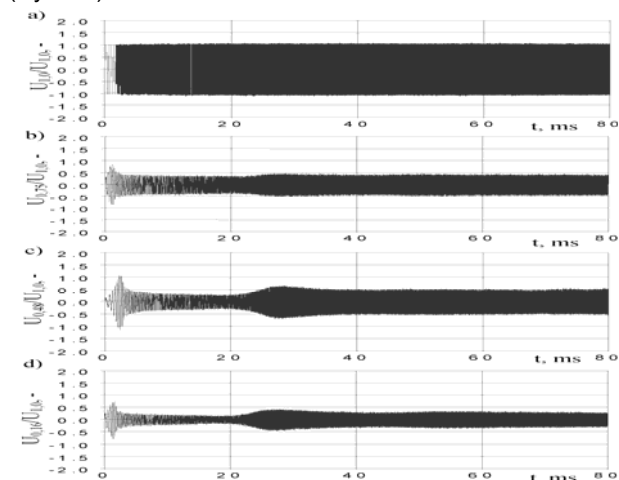
a) 15 kV, 250 kVA: 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,75$; 3- $x/l=0,46$; 4- $x/l=0,16$
 b) 15 kV, 20 kVA: 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,82$; 3- $x/l=0,67$; 4- $x/l=0,38$

Badania wykazały, że reakcja transformatorów na przepięcia powstające w układach elektroenergetycznych jest zależna od konstrukcji i parametrów uzwojeń. Przepięcia zawierające składowe przejściowe o charakterze oscylacyjnym mogą być silnie wzmacniane w transformatorach w wyniku zjawisk rezonansowych, jeśli częstotliwości tych przebiegów są równe częstotliwościom własnym transformatorów.

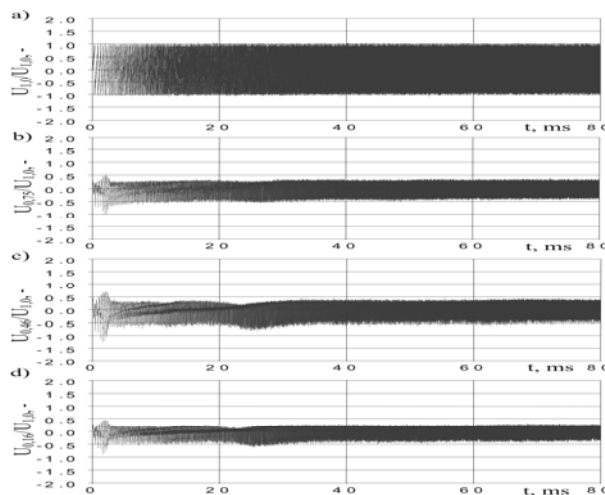
Przepięcia podczas działania napięć „sweep sinus” i „sweep ramp”

Wyniki badań przedstawiono jako przebiegi napięć doziemnych powstających podczas działania napięć „sweep sinus” i „sweep ramp” w zakresie częstotliwości 1–100 kHz w wybranych punktach x/l uzwojeń transformatorów (Rys. 6-9).

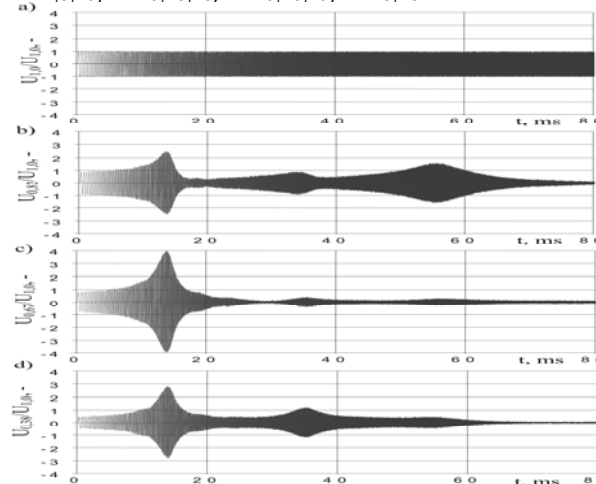
Z badań wynika, że rozkłady prądów w transformatorach podczas oddziaływania funkcji „sweep sinus” i „sweep ramp” nie są liniowe. Dla wybranych częstotliwości, napięcia przejściowe wewnątrz uzwojeń są silnie wzmacniane. Efekty tych zjawisk ujawniają się szczególnie w uzwojeniu górnego napięcia transformatora 20 kVA i mają postać przepięć o dużych wartościach szczytowych. Na przykład podczas oddziaływania przepięcia o przebiegu „sweep sinus”, wartości prądów w punkcie $x/l=0,67$ osiągają około 3,8-krotną wartość napięcia na zaciskach transformatora (Rys 7c), dla przepięcia o przebiegu „sweep ramp”, przepięcia w tym punkcie sięgają 3-krotnej wartości prądu zewnętrznego (Rys. 9c).



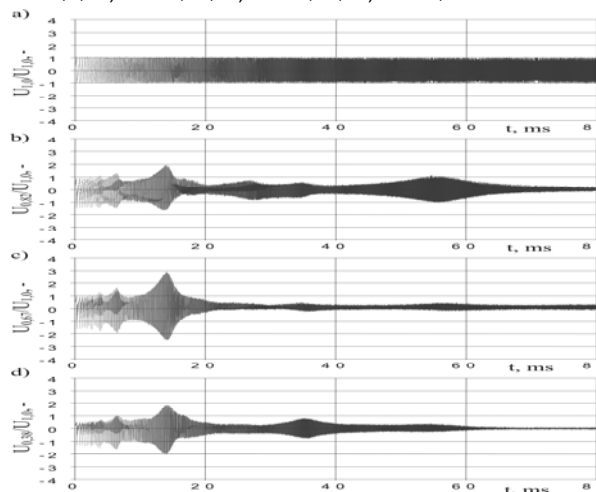
Rys. 6. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych powstających podczas działania napięcia „sweep sinus” w punktach o współrzędnych x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 250 kVA: a) $x/l=1,0$; b) $x/l=0,75$; c) $x/l=0,46$; d) $x/l=0,16$



Rys. 8. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych powstających podczas działania napięcia „sweep ramp” w punktach o współrzędnych x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 250 kVA: a) $x/l=1,0$; b) $x/l=0,75$; c) $x/l=0,46$; d) $x/l=0,16$



Rys. 7. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych powstających podczas działania napięcia „sweep sinus” w punktach o współrzędnych x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 20 kVA: a) $x/l=1,0$; b) $x/l=0,82$; c) $x/l=0,67$; d) $x/l=0,38$

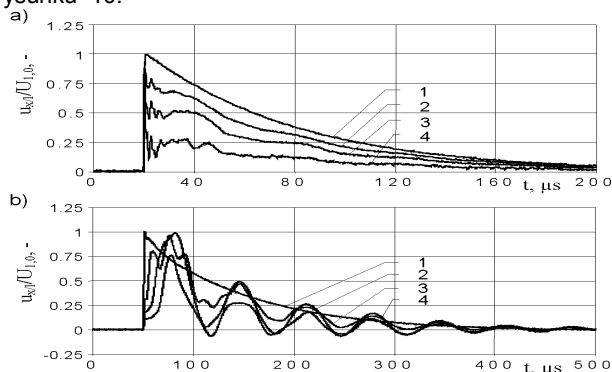


Rys. 9. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych powstających podczas działania napięcia „sweep ramp” w punktach o współrzędnych x/l uzwojenia górnego napięcia transformatora 20 kVA: a) $x/l=1,0$; b) $x/l=0,82$; c) $x/l=0,67$; d) $x/l=0,38$

Przepięcia podczas działania napięć udarowych piorunowych

Przebiegi napięć doziemnych w punktach o współrzędnych x/l uzwojeń, zarejestrowanych podczas

działania napięć udarowych piorunowych o kształcie 1,2/50 μ s i wartości maksymalnej 300 V, przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Przebiegi napięć przejściowych doziemnych powstających w punktach x/l uzwojeń podczas działania udaru napięciowego piorunowego 1,2/50 μ s:

a) 15 kV Tr 250 kVA: 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,75$; 3- $x/l=0,46$; 4- $x/l=0,16$
 b) 15 kV Tr 20 kVA: 1- $x/l=1,0$; 2- $x/l=0,82$; 3- $x/l=0,67$; 4- $x/l=0,38$

Z przeprowadzonych badań wynika, że napięcia przejściowe wewnątrz uzwojeń powstające podczas działania udarów napięciowych piorunowych zawierają składowe oscylacyjne. Wartości przebiegów w transformatorze 20 kVA osiągają wartości większe od wartości maksymalnej udaru napięciowego zewnętrznego. Częstotliwość składowej oscylacyjnej przebiegów w transformatorze 20 kVA wynosi 11 kHz, a w transformatorze 250 kVA oscylacje są niewielkie o częstotliwości około 24 kHz i 250 kHz.

Analiza porównawcza przebiegów

W celu porównania przebiegów wewnętrznych w uzwojeniach transformatorów wyznaczono wartości maksymalne przebiegów, powstających wewnątrz uzwojeń podczas oddziaływania napięć modelowych o różnych przebiegach (Tabela 3).

Tabela 3: Wartości maksymalne napięć doziemnych w wybranych punktach x/l uzwojeń transformatorów doświadczalnych

transformator doświadczalny	x/l	$\frac{u_{x/l}}{U_{max}}$				
		jw				
		udar prostokątny	napięcie sinusoidalne	sweep sinus	sweep ramp	udar 1,2/50 μ s
250 VA 15 kV	1,00	1	1	1	1	1
	0,75	0,77	0,78	0,77	0,72	0,89
	0,46	0,49	0,59	1,03	0,98	0,68
	0,16	0,17	0,27	0,66	0,55	0,57
20 VA 15 kV	1,00	1	1	1	1	1
	0,82	1,23	2,13	2,12	1,8	0,97
	0,67	1,28	3,85	3,81	2,78	0,99
	0,38	0,92	2,6	2,55	2,05	0,76

Na podstawie analizy wartości maksymalnych przebiegów zamieszczonych w tabeli 3 można stwierdzić, że przebiegi narażające układy izolacyjne badanych transformatorów są zróżnicowane, zależnie od udaru napięciowego i parametrów transformatora i konstrukcji uzwojenia. Przebiegi powstające w uzwojeniu 15 kV transformatora 20 kVA przekraczają wartości maksymalne napięć przejściowych zewnętrznych. Największe przebiegi wewnątrz transformatora 20 kVA występują podczas oddziaływania napięcia sinusoidalnego o częstotliwości równej częstotliwości własnej uzwojenia oraz napięcia o przebiegu „sinus sweep” i są w punkcie $x/l=0,67$ większe od 3,8-krotnej wartości maksymalnej napięcia oddziaływującego na uzwojenie.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że przebiegi narażające układy izolacyjne transformatorów rozdzielczych są zróżnicowane, zależnie od charakteru przebiegów powstających w układach elektroenergetycznych, parametrów transformatorów i rozwiązań konstrukcyjnych uzwojeń i są odmienne od narażeń powstających podczas prób z zastosowaniem udarów napięciowych piorunowych. Przebiegi wewnątrz transformatorów w warunkach eksploatacji mogą przekraczać wartości maksymalne przebiegów powstających w układach elektroenergetycznych. Narażenia przebiegiowe układów izolacyjnych transformatorów nie mogą być więc wyznaczone na podstawie znanej wartości maksymalnej napięcia udarowego docierającego do zacisków uzwojenia, ale wymagają analizy indywidualnej dla każdego typu transformatora z uwzględnieniem zastosowanej ochrony przebiegiowej.

Autorzy:

dr hab. inż. Marek Florkowski, Centrum Badawcze ABB, ul. Starowińska 13a, Kraków
 e-mail: marek.florkowski@pl.abb.com
 prof. dr hab. inż. Jakub Furgał, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
 e-mail: furgal@agh.edu.pl
 dr inż. Maciej Kuniewski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
 e-mail: maciej.kuniewski@agh.edu.pl
 dr inż. Piotr Pająk, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
 e-mail: ppajak@agh.edu.pl

LITERATURA

- [1] Joint Working Group A2/C4.39-CIGRE: Electrical transient interaction between transformers and the power system (part 1- Expertise, part 2: Case studies), CIGRE, ISBN: 978-2-85873272-2, April 2014
- [2] Florkowski M., Furgał J.: High frequency methods for condition assessment of transformers and electrical machines, Wydawnictwa AGH, Kraków, ISBN 978-83-7464-614-7, 2013
- [3] Lopez-Roldan J., de Herdt H., Sels T., Van Dommelen D., Popov M., Van der Sluis L., Declercq J.: Analysis, simulation and testing of transformer insulation failures related to switching transients overvoltages, CIGRE Session, 2002, paper 12-116
- [4] Shibuya Y., Fujita S., Hosokawa N.: Analysis of very fast transient overvoltages in transformer winding. IEE Proc.-Gener. Transf. Distr. Vol.144, No. 5, Sept. 1997, pp. 461 - 468
- [5] Popov M., van der Sluis L.: Improved calculations for no-load transformer switching surges. IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol.16, No. 3, July 2001, pp. 401 - 408
- [6] PN-EN 60071-1 Koordynacja izolacji. Definicje, zasady i reguły.
- [7] PN-EN 60099-5 Ograniczniki przebiegów. Zalecenia wyboru i stosowania.
- [8] Ograniczniki przebiegów z tlenków metali typu POLIM - D, ABB Power Distribution (str. Intern.: www.abb.pl)
- [9] Wróblewski Z.: Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych, PAN: Kom. Elektr., Seria Wyd.: Post. Techn. Wys. Napięć, t. 25, Pol. Wrocław, 2005
- [10] Popov M., Acha E.: Overvoltages due to switching off an unloaded transformer with a vacuum circuit breaker, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, Nr 4, October 1999, pp. 317 - 1322
- [11] IEC 60076-3 Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
- [12] Transformatory olejowe, Katalog transformatorów produkcji ABB, Łódź 2004
- [13] Transformator typu T3ZoNe20/20 - karta prób. Mikołowska Fabryka Transformatorów „Mefta” w Mikołowie
- [14] Florkowski M., Furgał J.: Detection of transformers winding deformation based on transfer function - measurement and simulations, Meas., Science and Techn., No. 14, 2003, pp. 1986 - 1992
- [15] Wilcox D. J., Conlon M., Hurley W. G.: Calculation of self and mutual impedances for coils in ferromagnetic cores. IEE Proc., Vol.135, Pt. A, No. 7, Sept. 1988, pp. 470 - 476