

BADANIA PRZEPIĘĆ W UZWOJENIACH TRANSFORMATORÓW ENERGETYCZNYCH

Jakub FURGAŁ¹, Piotr PAJĄK²

1. Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel: (12) 617 37 61 fax: (12) 634 57 21 e-mail: furgal@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel: (12) 617 44 16 fax: (12) 634 57 21 e-mail: ppajak@agh.edu.pl

Streszczenie: Transformatory energetyczne są poddawane działaniu przepięć o zróżnicowanych przebiegach podczas badań oraz w warunkach eksploatacji. Przepięcia te mogą być źródłami przepięć o dużych wartościach szczytowych w uzwojeniach transformatorów.

W artykule przedstawiono wyniki badań rozkładów przepięć w uzwojeniach o zróżnicowanych konstrukcjach poddanych działaniu uderzeń napięciowych o różnych przebiegach.

Słowa kluczowe: transformatory, przepięcia w uzwojeniach

1. WPROWADZENIE

Układy izolacyjne transformatorów energetycznych są narażone na działanie przepięć podczas badań oraz w warunkach eksploatacji. Przebiegi tych przepięć są zróżnicowane. Podczas badań wytrzymałości układów izolacyjnych stosowane są znormalizowane udary napięciowe piorunowe. W warunkach pracy transformatorów w układach elektroenergetycznych generowane są przepięcia o zróżnicowanych przebiegach i wartościach szczytowych. Przepięcia powstają w układach elektroenergetycznych głównie podczas czynności łączeniowych w niektórych stanach awaryjnych oraz w czasie wyładowań piorunowych. Przepięcia generowane w warunkach eksploatacji są źródłem przepięć wewnętrznych w transformatorach energetycznych, narażających układy izolacyjne uzwojeń pomimo stosowanej ochrony przepięciowej.

Transformatory chronione są od przepięć głównie przy zastosowaniu beziskiernikowych ograniczników z tlenków metali. Metoda ta wyróżnia się dużą skutecznością, ze względu na dobre charakterystyki ochronne ograniczników tlenkowych i niezawodność ich działania. Zastosowanie ograniczników z tlenków metali nie rozwiązało jednak całkowicie problemów związanych z ochroną przepięciową. W wyniku oddziaływania przepięć powstających w układach elektroenergetycznych wewnątrz uzwojeń są generowane bowiem przepięcia narażające układ izolacyjny transformatorów, pomimo stosowanej ochrony przepięciowej. Wartości maksymalne napięć obniżonych ograniczników przepięć są około trzykrotnie większe od napięć znamionowych chronionych transformatorów. Przebiegi napięć przejściowych pojawiających się na ogranicznikach przepięć podczas działania przepięć są zbliżone do przebiegu prostokątnego.

Wartości przepięć generowanych w uzwojeniach transformatorów są zależne nie tylko od wartości maksymalnych przepięć na zaciskach wejściowych, ale również od ich przebiegów. Szczególnie niektóre przepięcia łączeniowe o charakterze oscylacyjnym mogą być źródłem przepięć wewnętrznych o znacznych wartościach maksymalnych pomimo stosowanych ograniczników przepięć. Przepięcia o wartościach szczytowych mniejszych od poziomu ochrony ograniczników nie ulegają bowiem zmniejszeniu na zaciskach chronionego transformatora. Mimo zastosowanych ograniczników narażenia przepięciowe transformatorów w niektórych stanach przejściowych w sieciach mogą stanowić znaczne narażenia układów izolacyjnych. Są to stany związane z czynnościami łączeniowymi oraz niektórymi awariami (np. zwarciami), podczas których generowane są przepięcia o charakterze oscylacyjnym i wartościach mniejszych od poziomu ochrony ograniczników. Przepięcia takie docierają do transformatorów praktycznie bez zmiany kształtu i wartości i stanowią źródło przepięć o dużych wartościach szczytowych wewnątrz uzwojeń [1-5]. Reakcja transformatora na przepięcia jest efektem zjawisk przejściowych wewnątrz uzwojeń, będących złożonym układem elektromagnetycznym. Niektóre przepięcia docierające do zacisków liniowych transformatorów mogą być silnie wzmacniane wewnątrz uzwojeń w wyniku zjawisk rezonansowych [6,7].

W artykule przedstawiono wyniki badań przepięć w uzwojeniach transformatorów o zróżnicowanych konstrukcjach i parametrach. Badania obejmowały rejestracje przebiegów przepięć wewnętrznych generowanych podczas działania przepięć aperiodycznych i oscylacyjnych odzwierciedlających przebiegi przepięć powstających na zaciskach transformatorów podczas prób napięciowych oraz w warunkach eksploatacji.

2. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW DOŚWIADCZALNYCH

Obiektami doświadczalnymi był transformator mocy 25 MVA, 115/16,5 kV oraz dwa transformatory rozdzielcze: 250 kVA, 15,75/0,4 kV i 20 kVA, 15,75 kV/0,4 kV (rys. 1).

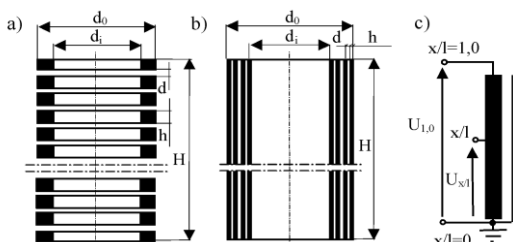


Rys. 1. Widok uzwojeń transformatorów doświadczalnych: a - uzwojenie górnego napięcia transformatora 25 MVA, b - uzwojenie górnego napięcia transformatora 25 MVA, c - uzwojenia transformatora 250 kVA, d - widok transformatora 20 kVA

Podstawowe parametry elektryczne transformatorów doświadczalnych zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe parametry elektryczne transformatorów doświadczalnych

S_n , kVA	25 000	250	20
U_n , kV	115/16,5	15,75/0,4	15,75/0,4
U_z , %	11	4,5	4,2
ΔP_{Fe} , kW	7,2	0,486	0,114
ΔP_{Cu} , kW	155	3,509	0,525
I_0 , %	0,5	1,0	2,8



Rys. 2. Przekroje uproszczone uzwojenia cewkowego i warstwowego: a - uzwojenie cewkowe, b - uzwojenie warstwowo, c - oznaczenia zacisków uzwojeń

Tabela 2: Podstawowe parametry mechaniczne uzwojeń doświadczalnych

moc znam. transformatora, kVA	25000		250	20
napięcie znam. uzwojenia, kV	115	16,5	15,75	15,75
typ uzwojenia	c*	w*	w*	c*
liczba zwojów w cewce (warstwie),	20	40	191	650
liczba cewek (warstw), -	50	4	14	4
wysokość uzwojenia H, mm	700	670	366	250
średnica wewnętrzna d_o , mm	765	560	0,201/0,233	157
średnica zewnętrzna d_i , mm	893	700	0,255/0,303	205
szerokość cewki (warstwy) h, mm	10,3	10	366	25
szerokość szczeliny pomiędzy cewkami (warstwami) d, mm	3,3	6	2	5

c - uzwojenie cewkowe, w - uzwojenie warstwowo

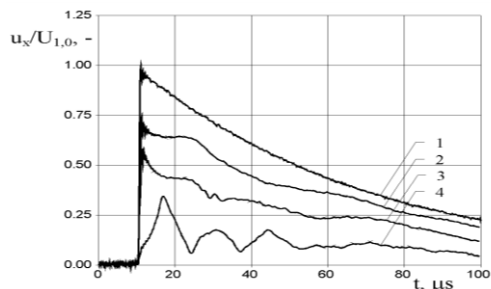
Wykonano badania przepięć w uzwojeniu górnego i dolnego napięcia transformatora 25 MVA i uzwojeniach górnego napięcia transformatorów rozdzielczych 250 kVA i 20 kVA. Konstrukcje i parametry uzwojeń transformatorów doświadczalnych są zróżnicowane. Uzwojenie górnego napięcia transformatora 25 MVA jest uzwojeniem cewkowym, a uzwojenie dolnego napięcia jest wykonane jako

warstwowe. Uzwojenie górnego napięcia transformatora 250 kVA jest wykonane jako warstwowe. Uzwojenie górnego napięcia transformatora 20 kVA ma natomiast konstrukcję cewkową. Uproszczone przekroje uzwojenia cewkowego i warstwowego przedstawiono na rysunku 2, a podstawowe wymiary uzwojeń doświadczalnych zamieszczono w tabeli 2. Badania obejmowały rejestrację przepięć wewnętrznych w uzwojeniach generowanych podczas działania udarów piorunowych pełnych oraz udarów prostokątnych. Udar napięciowy piorunowy są stosowane podczas prób napięciowych transformatorów. Udar prostokątny odzwierciedla napięcie przejściowe generowane na zaciskach transformatorów podczas działania ograniczników przepięć [4]. Badania obejmowały także wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych napięć wewnątrz uzwojeń. Zależności częstotliwościowe napięć umożliwiają analizę reakcji transformatora na składowe oscylacyjne, o różnych częstotliwościach, przepięć generowanych głównie podczas czynności łączeniowych w układach elektroenergetycznych [5].

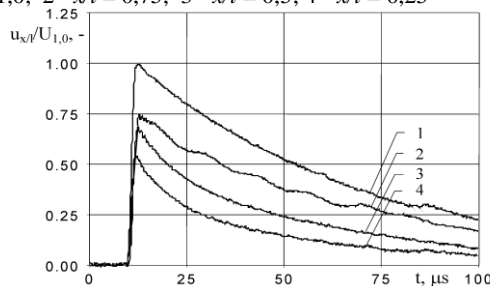
3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Badania przepięć piorunowych

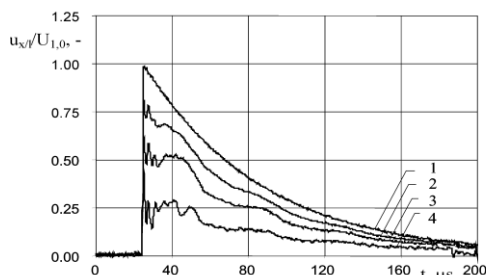
Wyniki badań mają postać przebiegów przepięć doziemnych w wybranych punktach uzwojeń o współrzędnych $x/l = 0,25; 0,5$ i $0,75$ (rys. 2). Zarejestrowane przebiegi przepięć w uzwojeniach transformatorów generowanych podczas działania udarów piorunowych, na zaciskach o współrzędnych $x/l = 1,0$ i $x/l = 0$ (rys. 2), przedstawiono na rysunkach 3, 4, 5 i 6. Wyniki badań przedstawiono w jednostkach względnych w odniesieniu do wartości maksymalnej udaru napięciowego wynoszącej 1 kV. Wartości maksymalne udarów napięciowych stosowanych w badaniach przepięć w uzwojeniach ma niewielki wpływ na wyniki badań, gdyż dla przebiegów napięciowych szybkozmiennych uzwojenia stanowią obiekty o charakterze liniowym.



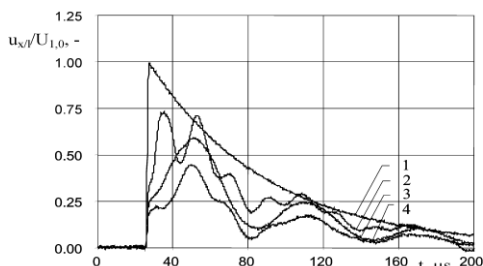
Rys. 3. Przebiegi przepięć doziemnych w wybranych punktach x/l (rys. 2) uzwojenia górnego napięcia transformatora 25 MVA, podczas oddziaływania udaru napięciowego piorunowego: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$



Rys. 4. Przebiegi przepięć doziemnych w wybranych punktach x/l (rys. 2) uzwojenia górnego napięcia transformatora 25 MVA, podczas oddziaływania udaru napięciowego piorunowego: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$



Rys. 5. Przebiegi prądów doziemnych w wybranych punktach x/l (rys. 2) uzwojenia górnego napięcia transformatora 250 kVA, podczas oddziaływania udaru napięciowego piorunowego: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$

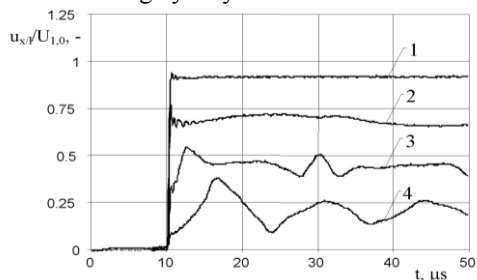


Rys. 6. Przebiegi prądów doziemnych w wybranych punktach x/l (rys. 2) uzwojenia górnego napięcia transformatora 20 kVA, podczas oddziaływania udaru napięciowego piorunowego: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$

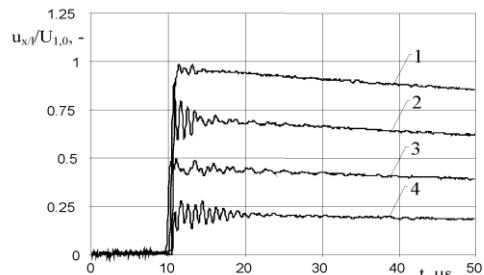
Z wyników badań prądów, przedstawionych na rysunkach 3 - 6, widać, że przebiegi prądów przejściowych wewnątrz uzwojeń są odmienne od przebiegu prądu udarowego na zaciskach transformatora. Prądy zawierają składowe oscylacyjne tłumione o różnych częstotliwościach ze względu na różne konstrukcje i parametry elektryczne uzwojeń determinujące przebiegi zjawisk przejściowych. Są to częstotliwości drgań własnych, charakterystyczne dla transformatorów.

3.2. Badania prądów generowanych przy uderzeniach prostokątnych

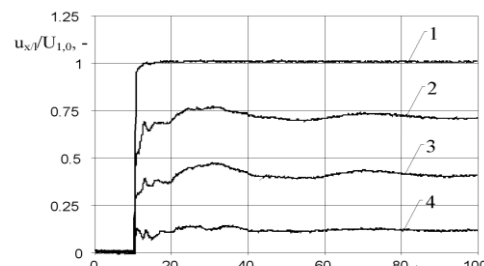
Przebiegi doświadczalne prądów generowanych w uzwojeniach podczas oddziaływania uderzeń prostokątnych przedstawiono na rysunkach 7, 8, 9 i 10. Wartości maksymalne uderzeń wynosiły 20 V. Uderzenia napięciowe o przebiegu prostokątnym modelują przebiegi prądów generowanych między zaciskami wejściowymi uzwojeń podczas działania ograniczników prądów z tlenków metali chroniących transformatory przed bezpośrednim oddziaływaniem prądów powstających w układach elektroenergetycznych.



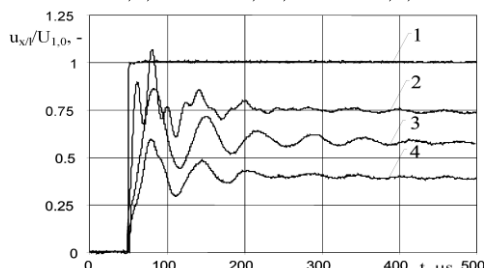
Rys. 7. Przebiegi prądów doziemnych generowanych w wybranych punktach x/l (rys. 2) uzwojenia g. n. transformatora 25 MVA podczas działania uderzenia prostokątnego: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$



Rys. 8. Przebiegi prądów doziemnych generowanych w wybranych punktach x/l (rys. 2) uzwojenia górnego napięcia transformatora 25 MVA: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$



Rys. 9. Wyniki rejestracji prądów doziemnych w wybranych punktach uzwojenia górnego napięcia x/l (rys.2) transformatora 250 kVA: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$



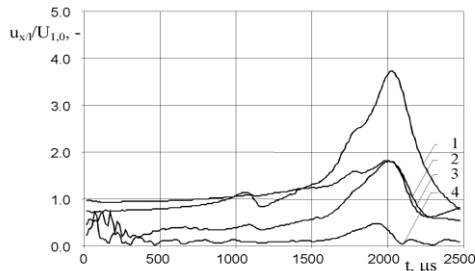
Rys. 10. Przebiegi prądów doziemnych generowanych w wybranych punktach uzwojenia górnego napięcia x/l (rys. 2) transformatora 20 kVA: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$

Przebiegi prądów doziemnych powstających wewnątrz uzwojeń podczas działania uderzenia napięciowego prostokątnego pomiędzy zaciskami wejściowymi transformatora są odmienne od przebiegu uderzenia wymuszającego. Podobnie jak w przypadku prądów powstających podczas działania uderzenia piorunowego prądów wewnątrz uzwojeń zawierają składowe oscylacyjne o różnych częstotliwościach zależnych od przebiegu zjawisk przejściowych wynikających z konstrukcji uzwojenia i jego parametrów. Ze szczegółowej analizy przebiegów prądów wynika, że częstotliwości własne uzwojenia 110 kV i 15 kV transformatora 25 MVA wynoszą odpowiednio ok. 2 MHz i 1,1 MHz. Częstotliwość składowej oscylacyjnej wewnątrz uzwojenia transformatora 250 kVA wynosi ok. 25 kHz, a częstotliwość drgań prądów wewnątrz transformatora 20 kVA wynosi 20 kHz. Wartości maksymalne prądów w transformatorach doświadczalnych są zróżnicowane. Wartości te w transformatorze 20 kVA przekraczają wartości maksymalne prądów przejściowych na zaciskach transformatorów (rys. 10).

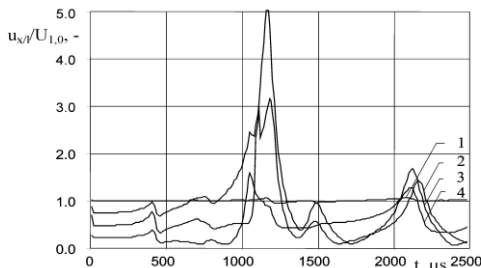
3.3. Charakterystyki częstotliwościowe prądów

W celu wyznaczenia reakcji uzwojeń transformatorów o różnych konstrukcjach na składowe oscylacyjne prądów generowanych w układach elektroenergetycznych wyznaczono zależności częstotliwościowe prądów wewnątrz uzwojeń doświadczalnych (rys. 11, 12, 13 i 14). Podstawą charakterystyk są wyniki rejestracji przebiegów prądów generowanych

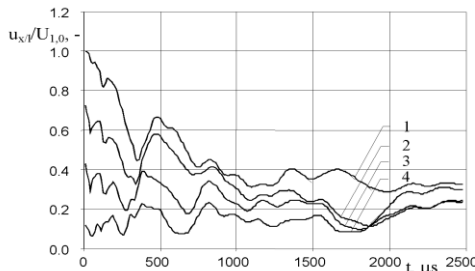
wewnątrz uzwojeń w wyniku działania napięcia sinusoidalnego o amplitudzie 20 V i częstotliwościach w zakresie 0,02 - 250 kHz.



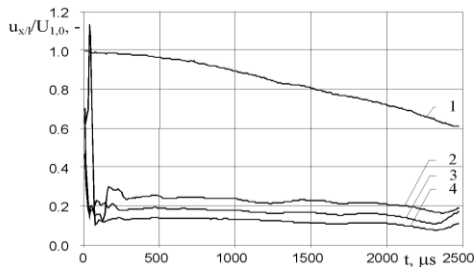
Rys. 11. Zależności częstotliwościowe prępień doziemnych w wybranych punktach x/l (rys.2) uzwojenia g. n. transformatora 25 MVA: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$



Rys. 12. Zależności częstotliwościowe prępień doziemnych w wybranych punktach x/l (rys.2) uzwojenia g. n. transformatora 25 MVA: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$



Rys. 13. Zależności częstotliwościowe prępień doziemnych w wybranych punktach x/l (rys. 2) uzwojenia g. n. transformatora 250 kVA: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$



Rys. 14. Zależności częstotliwościowe prępień doziemnych w wybranych punktach x/l (rys. 2) uzwojenia g. n. transformatora 20 kVA: 1 - $x/l = 1,0$; 2 - $x/l = 0,75$; 3 - $x/l = 0,5$; 4 - $x/l = 0,25$

Z analizy zależności $u_{x/l}/U_{1,0} = g(f)$ (rys. 11, 12, 13 i 14) wynika, że napięcia sinusoidalne o niektórych częstotliwościach są silnie wzmacniane wewnątrz uzwojeń. Częstotliwości te są zgodne z częstotliwościami własnymi transformatorów (rys. 3, 4, 5 i 6) (rys. 7, 8, 9 i 10). Badania potwierdzają, że wartości maksymalne prępień wewnętrznych, generowanych przez składowe oscylacyjne prępień, których częstotliwości są równe częstotliwości

własnej transformatora, mogą być przyczyną powstawania prępień o dużych wartościach maksymalnych wewnątrz transformatorów. Na przykład współczynnik prępień powstających w uzwojeniu górnego napięcia transformatora 25 MVA przy częstotliwości 2 MHz wynosi około 3,8 (rys. 11).

4. PODSUMOWANIE

Uzwojenia transformatorów są narażone na oddziaływanie udarów napięciowych o różnych przebiegach, generowanych podczas badań oraz w warunkach eksploatacji. Udary te są źródłem prępień wewnętrznych narażających układy izolacyjne transformatorów. Przebiegi tych prępień oraz ich wartości maksymalne są zależne nie tylko od przebiegów udarów na zaciskach wejściowych, ale także od zjawisk przejściowych w uzwojeniach. Na podstawie badań można stwierdzić, że w uzwojeniach o różnych konstrukcjach udary napięciowe o tych samych przebiegach generują prępień wewnętrzne o różnych przebiegach i wartościach maksymalnych. Prępień 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. Analiza narażeń układów izolacyjnych transformatorów wymaga więc szczegółowych badań eksperymentalnych lub symulacji komputerowych prępień w uzwojeniach.

LITERATURA

- [1] Henriksen E. E.: Study of Very Fast Transients Overvoltages in Transformers. *Electra*, No. 179, Aug. 1998, pp. 13 - 23
- [2] Rodrigo H., Dang H. Q. S.: Behaviour of Transformer Windings under Surge Voltages. *High Volt. Engin. Symp.*, 22 - 27 Aug. 1999, paper No. 1.287. P 6
- [3] Henriksen E. E.: Study of Very Fast Transients Overvoltages in Transformers. *Electra*, No. 179, Aug. 1998, pp. 13 - 23
- [4] Furgał J.: Analysis of Overvoltages in Windings of Power Transformers Protected by Use of Metal Oxide Surge Arresters. *Europ. Trans. on Electr. Pow. Engin.*, No 19, 2009, pp. 400 - 410
- [5] Florkowski M., Furgał J., Pająk P.: Narażenia transformatorów od prępień łączeniowych w układach elektroenergetycznych. *Przegl. Elektrot.*, R.86, Nr 5/2010, str. 245 - 248
- [6] Hori M., Nishioka M., Ikeda Y., Noguchi K., Kajimura K., Motoyama H., Kawamura T.: Internal Winding Failure Due to Resonance Overvoltage in Distribution Transformer Caused by Winter Lightning. *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 21, No. 3, July 2003, pp. 1600 - 1606
- [7] Florkowski M., Furgał J.: Transfer Function Based Recognition of Resonance Overvoltages in Transformer Windings. *High Volt. Engin.*, Vol. 34, No. 12, Dec. 2008, pp. 2558 - 2563

INVESTIGATIONS OF OVERVOLTAGES IN WINDINGS OF POWER TRANSFORMERS

Keywords: transformers, overvoltages in windings

Power transformers are subjected to action overvoltages with different courses during tests and exploitation. These overvoltages can be as a sources of internal overvoltages with large maximal values in transformer windings. The results of investigations for overvoltage distributions in windings with different constructions subjected the action of voltage strokes with different courses are presented in the paper.