

## Analiza przebiegów w uzwojeniach transformatorów

**Streszczenie.** Transformatory energetyczne w trakcie eksploatacji są narażone na oddziaływanie napięcia roboczego oraz przebiegów. Przebiegi zawierają zwykle składowe oscylacyjne tłumione, o częstotliwościach zawartych w szerokich granicach i oddziałują na transformatory pomimo powszechnie stosowanej ochrony przebiegiowej. Zjawiska przejściowe w transformatorach, wpływające na przebiegi i wartości maksymalne przebiegów wewnętrznych, są zależne od reakcji uzwojeń na napięcia pojawiające się na zaciskach wejściowych transformatorów. Analiza przebiegów w transformatorach ma duże znaczenie dla oceny warunków pracy układów izolacyjnych i doskonalenia ich konstrukcji. W artykule przedstawiono analizę przebiegów generowanych w uzwojeniu transformatora rozdzielczego przy oddziaływaniu napięć przejściowych o różnych przebiegach. Przedstawiono również metodę identyfikacji częstotliwości, przy których przebiegi mogą być wzmacniane wewnątrz uzwojeń.

**Abstract.** Power transformers are subjected to action working voltage and overvoltages. Usually overvoltages contain oscillative damped components with frequencies of wide ranges. Overvoltages influence on transformers despite of overvoltage protection systems. Transient phenomena in transformers, which have influence on courses and maximal values of internal overvoltages, are dependent on the reaction of windings on transient voltages at input clamps of transformers. Analysis of overvoltages in transformers has important meaning for estimation of work conditions of insulation systems and improvement of their constructions. Analysis of overvoltages generated in distribution transformers under action of transient voltages with different waveforms is presented in the paper. The method of identification of frequencies at which overvoltages inside windings can be amplified is also presented in the article. **(Analysis of overvoltages in transformer windings).**

**Słowa kluczowe:** transformatory, uzwojenia, przebiegi wewnętrzne, admittance uzwojeń

**Keywords:** power transformers, windings, internal overvoltages, admittance of windings

### Wstęp

Transformatory energetyczne są narażone na działanie przebiegów o zróżnicowanych przebiegach i wartościach szczytowych, powstających w układach elektroenergetycznych głównie podczas wyładowań piorunowych, czynności łączeniowych oraz niektórych stanów awaryjnych (np. podczas zwarcia doziemnych). Przebiegi napięć przejściowych na zaciskach wejściowych transformatorów są zależne od wartości maksymalnych oraz przebiegów przebiegów w sieciach elektrycznych oraz charakterystyk ochronnych ograniczników przebiegów. Przebiegi powstające w układach elektroenergetycznych zawierają zwykle składowe oscylacyjne tłumione o zróżnicowanych częstotliwościach. Przebiegi oraz wartości maksymalne przebiegów wewnątrz uzwojeń transformatorów są zależne od reakcji uzwojeń na napięcia przejściowe pojawiające się na zaciskach transformatorów [1-3].

Podczas działania zewnętrznych napięć przejściowych, przebiegi pojawiają się we wszystkich uzwojeniach transformatorów. Niezbędna jest, więc szczegółowa analiza narażeń układów izolacyjnych uzwojeń, obejmująca także narażenia od przebiegów przenoszonych oddziaływujących na układy izolacyjne uzwojeń sprzężonych z uzwojeniami poddanymi bezpośredniemu działaniu przebiegów zewnętrznych [4 -10].

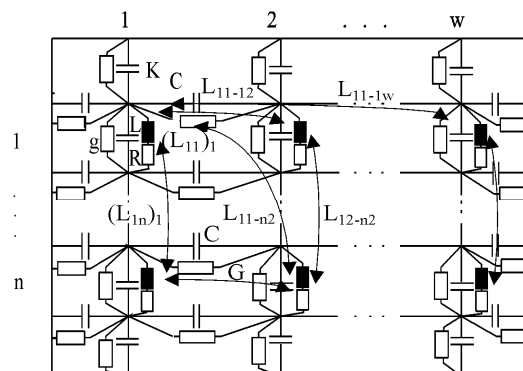
Artykuł obejmuje analizę przebiegów w uzwojeniach i przebiegów przenoszonych przez transformatory. Podstawą analizy są wyniki badań przebiegów w transformatorze rozdzielczym.

### Propagacja przebiegów w uzwojeniach transformatorów

Przebiegi przebiegów na zaciskach transformatorów są zależne od źródła przebiegu, działania ograniczników przebiegów i zjawiska propagacji fal napięciowych w linii łączącej transformator z ogranicznikami. Przebiegi wewnątrz transformatorów są efektem reakcji uzwojeń stanowiących złożone układy elektromagnetyczne (rys. 1) na przebiegi zewnętrzne.

Przebiegi oraz wartości maksymalne przebiegów w uzwojeniach i na zaciskach wejściowych transformatorów różnią się ze względu na propagację fal napięciowych wzdłuż uzwojeń i między uzwojeniami pracującymi przy różnych napięciach. Przebiegi w transformatorach mogą

osiągać szczególnie duże wartości jako efekt wzmacniania przebiegów w wyniku zjawiska rezonansu, jeżeli częstotliwość składowych przejściowych przebiegów zewnętrznych jest równa częstotliwości własnej transformatora. Wyznaczenie częstotliwości własnych transformatorów jest podstawą oceny możliwości pojawienia się przebiegów wewnętrznych o dużych wartościach i stanowi podstawę prac badawczych w zakresie specjalistycznej ochrony przebiegiowej.



Rys.1. Schemat zastępczy uzwojeń transformatorów:  $C, K$  - pojemności szeregowe i doziemne,  $L_{xx}, L_{yy}$  - indukcyjności własne i wzajemne między elementami uzwojeń,  $R$  - rezystancja uzwojeń,  $G$  - konduktancja uzwojeń [11]

### Badania przebiegów w uzwojeniach transformatora

Badania przebiegów obejmowały:

- rejestracje przebiegów przebiegów podczas oddziaływania udarów napięciowych o przebiegu prostokątnym,
- wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych przebiegów,
- wyznaczenie zależności częstotliwościowych admittance uzwojeń.

Badano przebiegi:

- własne w uzwojeniu poddanemu działaniu udaru napięciowego,
- przenoszone przez uzwojenia.

Udary napięciowe o przebiegu prostokątnym odzwierciedlają w przybliżeniu przebiegi napięć przejściowych na działających ogranicznikach przebiegów z

tlenków metali. Zależności częstotliwościowe umożliwiają analizę reakcji uzwojeń transformatorów na składowe oscylacyjne przepięć o zróżnicowanych częstotliwościach powstających w układach elektroenergetycznych. Na podstawie zależności częstotliwościowych admitancji uzwojeń, zaproponowano metodę identyfikacji częstotliwości, przy których przepięcia własne i przenoszone osiągają największe wartości.

Obiektem badań był transformator rozdzielczy o mocy znamionowej 20 kVA i napięciu znamionowym 15/0,4 kV (tabela 1 i 2).

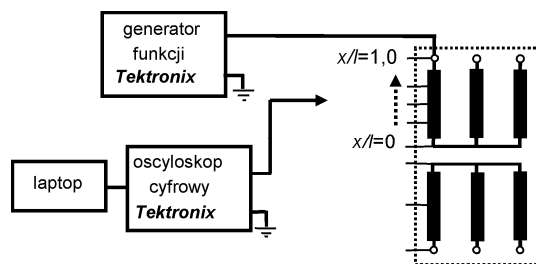
Tabela 1: Parametry znamionowe transformatora doświadczalnego

$S_n$	$U_n$	$U_{zw}$	$P_j$	$P_o$	$I_j$
kVA	kV	%	kW	kW	%
20	15 / 0,4	4,2	0,114	0,525	2,8

Tabela 2: Parametry uzwojeń transformatora doświadczalnego [11]

Parametr	Wartość	
Uzwojenie górnego napięcia		
	Cewki zwykłe	Cewki wzmocnione
liczba cewek, -	4	4
średnica wewnętrzna, m	0,157	0,157
średnica zewnętrzna, m	0,205	0,205
odległość między cewkami, m	0,003	0,005
wysokość cewki, m	0,028	0,025
liczba zwojów w cewce, -	810	650
Uzwojenie dolnego napięcia		
średnica wewnętrzna, m	0,114	
średnica zewnętrzna, m	0,137	
liczba zwojów w uzwojeniu, -	90	
Rdzeń		
średnica zastępcza, m	0,105	
wysokość kolumny, m	0,46	
długość jarzma, m	0,54	
szerokość rdzenia, m	0,095	

Schemat blokowy stanowiska doświadczalnego przedstawiono na rysunku 2. Do wytwarzania udarów napięciowych zastosowano generator funkcji typu AFG310 Tektronix o napięciu 20 V<sub>pp</sub>. Przebiegi przepięć rejestrowano przy użyciu oscyloskopu cyfrowego typu 784D Tektronix współpracującego z komputerem stosowanym do akwizycji i opracowywania wyników pomiarów.

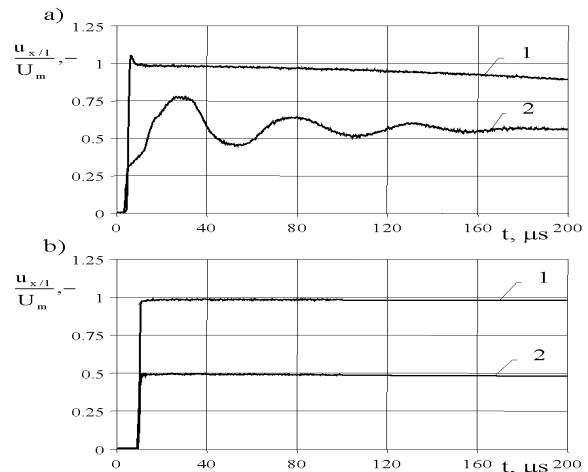


Rys. 2. Schemat układu do badań przepięć:  $x$  – współrzędna punktu pomiarowego w uzwojeniu równa odległości między punktem pomiarowym a początkiem uzwojenia  $x=0$ ,  $l$  – długość uzwojenia

### Przepięcia aperiodyczne

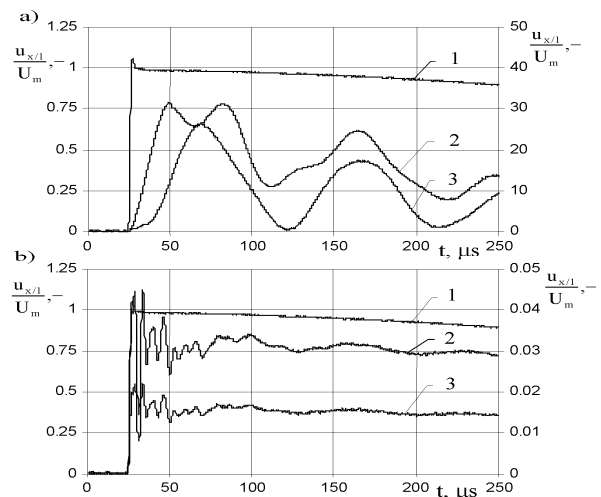
Wyniki rejestracji przepięć doziemnych w połowie wysokości uzwojeń transformatora ( $x/l=0,5$ ), powstających podczas działania napięcia udarowego prostokątnego, przedstawiono na rysunku 3. Przebiegi przepięć w uzwojeniu górnego napięcia zawierają składowe oscylacyjne tłumione o częstotliwości 20 kHz. Współczynnik przepięcia w uzwojeniu górnego napięcia osiąga wartość 1,58 (rys. 3a). W uzwojeniu dolnego napięcia, praktycznie

nie występują przepięcia podczas działania udarów napięciowych prostokątnych (rys. 3b).



Rys.3. Przebiegi przepięć własnych w połowie wysokości uzwojeń transformatora 20 kVA ( $x/l=0,5$ ) przy oddziaływaniu udaru napięciowego prostokątnego: a) uzwojenie górnego napięcia, b) uzwojenie dolnego napięcia: 1 - przepięcie na całym uzwojeniu, 2 - przepięcie doziemne w połowie wysokości uzwojenia

Przebiegi doświadczalne przepięć przenoszonych przez uzwojenia transformatora 20 kVA, powstających w wyniku oddziaływania udarów napięciowych prostokątnych przedstawiono na rysunku 4. Częstotliwość składowej oscylacyjnej przepięcia przenieszonego w uzwojeniu dolnego napięcia wynosi 0,1 MHz, natomiast w uzwojeniu górnego napięcia 11 kHz. Współczynnik przepięć przenoszonych w uzwojeniu dolnego napięcia, podczas oddziaływania udarów napięciowych prostokątnych osiąga wartość 1,6. Współczynniki przepięć w uzwojeniu górnego napięcia nie przekraczają wartości wynikającej z przekładni transformatora.

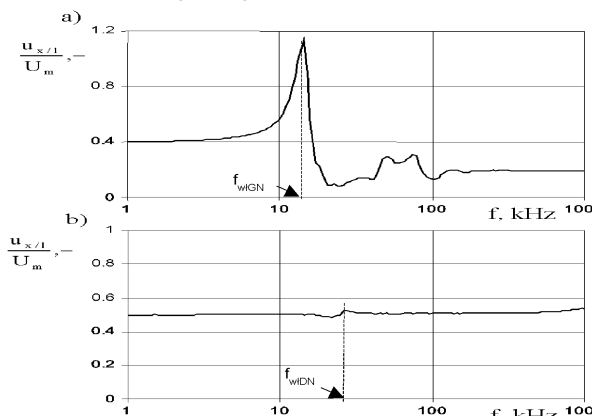


Rys. 4. Przebiegi przepięć przenoszonych w uzwojeniach transformatora 20 kVA podczas oddziaływania udaru napięciowego prostokątnego: a) napięcie przenieszone w uzwojeniu górnego napięcia, b) napięcie przenieszone w uzwojeniu dolnego napięcia: 1 - udar napięciowy prostokątny, stanowiący źródło przepięć przenoszonych (skala po lewej stronie), 2 - przepięcie przenieszone na całym uzwojeniu (skala po prawej stronie), 3 - przepięcie przenieszone w połowie uzwojenia ( $x/l=0,5$ ) (skala po prawej stronie)

### Badania przepięć oscylacyjnych

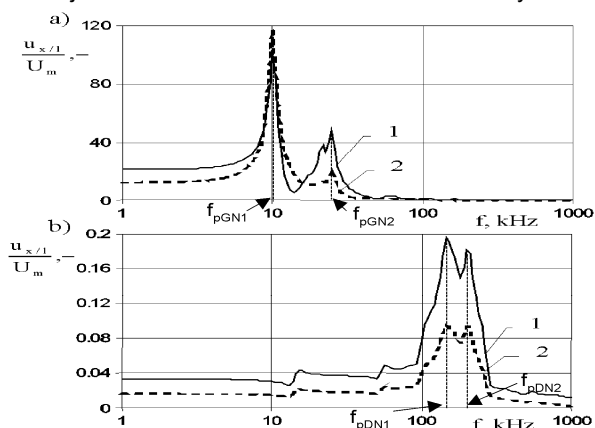
W celu analizy reakcji uzwojeń transformatora 20 kVA na składowe oscylacyjne przepięcia zewnętrznych napięć, wyznaczono charakterystyki częstotliwościowe napięć wewnątrz uzwojeń w zakresie od 50 Hz do 1 MHz (rys. 5).

Przebiegi przedstawiono w jednostkach względnych, w odniesieniu do napięcia  $U_{1,0}$  na zaciskach uzwojenia poddanego działaniu przebiegu zewnętrznego. Z analizy wyników badań widać, że składowe cykliczne przebiegi mogą być źródłem przebiegów wewnętrznych o dużych wartościach maksymalnych.



Rys. 5. Zależności częstotliwościowe przebiegów doziemnych własnych w połowie wysokości uzwojeń ( $x/l=0,5$ ) transformatora 20 kVA: a) uzwojenie górnego napięcia, b) uzwojenie dolnego napięcia

Przebiegi wewnątrz uzwojenia górnego napięcia osiągają największe wartości przy częstotliwości 12 kHz ( $f_{wIGN}$ ), a w uzwojeniu dolnego napięcia przy częstotliwości 21 kHz ( $f_{widN}$ ). Badania potwierdzają, że wartości maksymalne przebiegów wewnętrznych mogą być większe od przebiegów generowanych na zaciskach uzwojeń. Przebiegi własne w połowie wysokości uzwojenia górnego napięcia osiągają wartości trzykrotnie większe od napięcia wymuszającego. Przebiegi własne w uzwojeniu dolnego napięcia nie przekraczają wartości wynikających z przekładni transformatora w analizowanym zakresie częstotliwości. Wyniki rejestracji charakterystyk częstotliwościowych przebiegów przenoszonych w uzwojeniach transformatora zamieszczono na rysunku 6.



Rys. 6. Zależności częstotliwościowe przebiegów przenoszonych przez transformator 20 kVA: a - napięcie przenoszone w uzwojeniu górnego napięcia, b - napięcie przenoszone w uzwojeniu dolnego napięcia: 1 - przebiegi na pełnym uzwojeniu, 2 - przebiegi doziemne w połowie uzwojenia

Z analizy porównawczej wyników badań przebiegów własnych (rys. 5) i przenoszonych (rys. 6) widać, że składowe oscylacyjne przebiegi powstające w układach elektroenergetycznych mogą być źródłem przebiegów przenoszonych o dużych wartościach maksymalnych. Częstotliwości, przy których przebiegi przenoszone osiągają wartości maksymalne różnią się od częstotliwości, przy których są wzmacniane przebiegi własne uzwojeń.

W analizowanym przypadku, przebiegi przenoszone w uzwojeniu górnego napięcia przekraczają ponad trzykrotnie przekładnię znamionową. Przebiegi osiągają największe wartości dla częstotliwości ok. 10 kHz ( $f_{pGN1}$ ) oraz 27 kHz ( $f_{pGN2}$ ). Przebiegi przenoszone w uzwojeniu dolnego napięcia są około czterokrotnie większe od przekładni znamionowej. Częstotliwość rezonansowa przebiegów przenoszonych w uzwojeniu dolnego napięcia wynosi ok. 150 kHz ( $f_{pDN1}$ ) oraz 200 kHz ( $f_{pDN2}$ ). Przebiegi przenoszone w połowie wysokości uzwojenia górnego i dolnego napięcia również osiągają wartości maksymalne większe od przekładni znamionowej.

### Zależności częstotliwościowe admittancej uzwojeń

W celu wyznaczenia częstotliwości, przy których przebiegi wewnętrzne w transformatorze osiągają wartości maksymalne wyznaczono charakterystyki częstotliwościowe admittancej uzwojeń korzystając z następujących zależności:

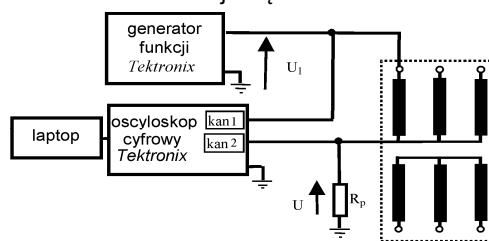
$$(1) \quad \bar{Y}(f) = \frac{\bar{i}_1(f)}{u_1(f)}$$

$$(2) \quad \bar{Y} = G + jB$$

$$(3) \quad \varphi = \arctan\left(\frac{B}{G}\right)$$

gdzie:  $Y(f)$  - admittancej badanego uzwojenia,  $i_1(f)$  - prąd w uzwojeniu,  $u_1(f)$  - napięcie zasilające,  $G$  - konduktancja uzwojenia,  $B$  - susceptancja uzwojenia,  $\varphi$  - kąt przesunięcia fazowego admittancej.

Pomiary wykonano w układzie, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 7. Transformator zasilano napięciem sinusoidalnym o częstotliwości przestrajanej w zakresie od 50 Hz do 1 MHz, za pomocą generatora funkcji typu AFG310 Tektronix o napięciu wyjściowym 20 V<sub>pp</sub>. Przebiegi napięć i prądów rejestrowano za pomocą oscyloskopu cyfrowego typu 2020 Tektronix, połączony z laptopem za pomocą złącza równoległego GPIB. Układ pomiarowy umożliwia wyznaczenie zależności amplitudy i przesunięcia fazowego admittancej uzwojeń transformatorów w funkcji częstotliwości.



Rys. 7. Schemat blokowy stanowiska do rejestracji charakterystyk częstotliwościowych admittancej uzwojeń transformatorów

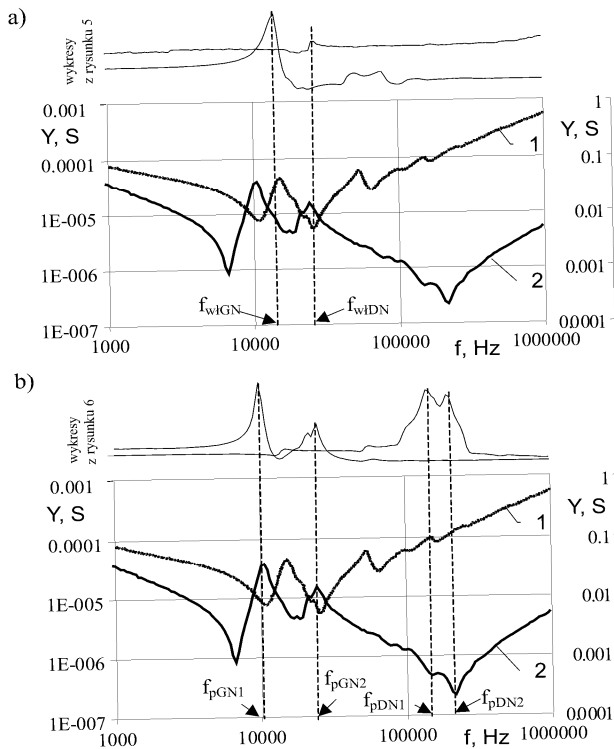
Admittancję w postaci zespolonej, mierzoną w układzie pokazanym na rysunku 7, wyznacza się ze wzoru:

$$(4) \quad \bar{Y}(f) = \frac{\bar{U}(f)}{R_p} \frac{1}{\bar{U}_1(f) - \bar{U}(f)}$$

Rejestrowano charakterystyki częstotliwościowe:

- admittancej uzwojeń górnego napięcia - przy zwartych uzwojeniach dolnego napięcia,
- admittancej uzwojeń dolnego napięcia - przy rozwartych uzwojeniach górnego napięcia.

Na rysunku 8 przedstawiono wykresy modułu admittancej uzwojeń dla częstotliwości w zakresie od 1 kHz do 1 MHz oraz zaznaczono częstotliwości, dla których przebiegi osiągają największe wartości.



Rys. 8. Zależności  $|Y|=g(f)$  uzwojeń transformatora 20 kVA z wyznaczonymi częstotliwościami rezonansowymi prądów własnych (a) i przenoszonych (b): 1 -  $|Y|=g(f)$  dla uzwojenia górnego napięcia (uzwojenie dolnego napięcia zwarte) - skala po lewej stronie, 2 -  $|Y|=g(f)$  dla uzwojenia dolnego napięcia (uzwojenie górnego napięcia rozwarte) - skala po prawej stronie:  $f_{wiGN}$ ,  $f_{wiDN}$  - częstotliwości rezonansowe prądów własnych,  $f_{pGN1}$ ,  $f_{pGN2}$ ,  $f_{pDN1}$ ,  $f_{pDN2}$  - częstotliwości rezonansowe prądów przenoszonych

Na podstawie analizy częstotliwościowych charakterystyk admittancji uzwojenia górnego napięcia, przy zwartym uzwojeniu dolnego napięcia, można stwierdzić, że częstotliwość, dla której admittancja uzwojenia górnego napięcia osiąga lokalne maksimum jest równa częstotliwości ( $f_{wiGN}$ ), dla której prąd prądów własnych uzwojenia górnego napięcia osiąga największe wartości. Minima admittancji uzwojenia górnego napięcia, przy zwartym uzwojeniu dolnego napięcia, występują natomiast dla tych częstotliwości ( $f_{pGN1}$ ,  $f_{pGN2}$ ), dla których prąd prądów przenoszonych w uzwojeniu górnego napięcia osiąga wartości maksymalne.

Częstotliwości, przy których admittancja uzwojenia dolnego napięcia, przy rozwartym uzwojeniu górnego napięcia, osiąga wartości minimalne są równe częstotliwościom  $f_{pDN1}$ ,  $f_{pDN2}$ , przy których prąd prądów przenoszonych w uzwojeniu dolnego napięcia osiąga wartości maksymalne.

Admittancja uzwojenia dolnego napięcia, rejestrowana dla rozwartego uzwojenia górnego napięcia, zawiera lokalne maksima, które występują przy częstotliwościach  $f_{pGN1}$ ,  $f_{pGN2}$ , dla których prąd prądów przenoszonych w uzwojeniu górnego napięcia osiąga wartości maksymalne. Równocześnie, częstotliwość, przy której admittancja uzwojenia dolnego napięcia, przy rozwartym uzwojeniu górnego napięcia osiąga jedno z lokalnych maksimum jest zbliżona do częstotliwości  $f_{wiDN}$ , przy której prąd prądów własnych uzwojenia dolnego napięcia osiąga wartość maksymalną.

### Podsumowanie

Badania prądów wewnątrz uzwojeń transformatora średniego napięcia potwierdzają, że prąd prądów przenoszonych, generowane przez udary aperiodyczne, nie przekraczają kilkudziesięciu procent wartości

maksymalnych prądów oddziaływujących na uzwojenie transformatora. Składowe oscylacyjne, generowane zwykle w warunkach czynności łączeniowych w układach elektroenergetycznych, mogą być źródłem prądów przenoszonych znacznie większych od wartości maksymalnych prądów oddziaływujących na uzwojenia. Prąd prądów przenoszonych doziemne wewnątrz uzwojeń mogą być większe od wartości maksymalnych prądów pomiędzy zaciskami uzwojeń. Badania wykazały, że prąd prądów przenoszonych oscylacyjne są wzmacniane przy częstotliwościach innych niż prąd prądów własnych uzwojeń.

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że podstawą wyznaczania częstotliwości, przy których prąd prądów wewnętrznych w transformatorach są wzmacniane, mogą być wyniki rejestracji charakterystyk częstotliwościowych admittancji uzwojeń transformatorów.

### LITERATURA

- [1] Shibuya Y., Fujita S., Shimomura T.: Effects of very fast transient overvoltages on transformer, IEE Proc.-Gener. Transform. Distrib., Vol. 146, No. 4, July 1999, pp. 459 - 464
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Popov M., van der Sluis L., Smeets R. P. P.: Evaluation of surge-transferred overvoltages in distribution transformers, Elec. Pow. Syst. Research, Vol. 78, Issue 3, March 2008, pp. 441 - 449
- [5] Fujita S., Hosokawa N., Shibuya Y.: Experimental investigations of high frequency oscillation in transformer windings, IEEE Trans. Pow. Deliv., 13, 4, 1998, pp.1201- 1207
- [6] Zamanillo G., Gomez J., Tourn D., Floren E.: Experimental study of the transfer of overvoltage surges through distribution transformers, 18th Int. Conf. on Electr. Distrib., ICGRED 2005, Session No. 2, Turin, 6 - 9 June, 2005, pp. 1 - 6
- [7] Obase P. F., Romero F., Janiszewski J. M., Piantini A., Neto A. S., Carvalho T. O., Araújo Filho A. A.: Lightning surges transferred to the secondary of distribution transformers due to direct strikes on mv lines, considering different lv line configurations, X Int. Symp. on Light. Protection, 9th - 13th Nov., 2009, Curitiba (Brazil), pp. 581 - 586
- [8] Cogo J. R., Dommel H. W.: Voltage surges induced in transformer secondaries with loads characterized by sensitive electronic equipment, X Int. Symp. on Light. Protection, 9th-13th Nov., 2009, Curitiba (Brazil), pp. 1 - 6
- [9] Ueda T., Funabashi T., Sugimoto T., Dube L.: Transformer model for transformer transfer voltage simulation, Int. Conf. on Power Syst. Trans., IPST 1999, 20-24 June, 1999, Budapest (Hungary), pp. 480 - 486
- [10] Borghetti A., Morched A., Napolitano F., Nucci C. A., Paolone M.: Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers, IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 24, No. 1, Jan. 2009, pp. 360 - 372
- [11] Furgał J.: Analiza narażeń prądowych izolacji transformatora chronionego iskierkowymi i beziskierkowymi ogranicznikami prądów, Wydawnictwa AGH, Kraków 2003

### Autorzy:

mgr inż. Bartłomiej Adamczyk, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB w Krakowie, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, e-mail: bartlomiej.adamczyk@pl.abb.com  
 dr hab. inż. Jakub Furgał, prof. n., AGH Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: furgal@agh.edu.pl  
 dr inż. Maciej Kuniewski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: maciek@agh.edu.pl