

Wpływ stromości uderów napięciowych na propagację przepięć w transformatorach

Streszczenie. Wartości szczytowe przepięć pojawiających się na zaciskach transformatorów są ograniczane przez stosowanie bezskiernikowych ograniczników przepięć do wartości wynikających z koordynacji izolacji. Wartości przepięć docierających do zacisków transformatora są jednak większe od wartości maksymalnych napięć roboczych. Przepięcia są przenoszone przez uzwojenia transformatorów i propagują się wzdłuż linii zasilających. Zjawiska przejściowe w uzwojeniach i liniach mają wpływ na przebiegi i wartości maksymalne przepięć. W artykule przedstawiono analizę przepięć przenoszonych przez transformator i propagujących się w układzie doświadczalnym modelującym typowy fragment sieci rozdzielczej. Wyznaczono wartości maksymalne oraz częstotliwości rezonansowe przepięć generowanych przez uder napięciowy prostokątny o stromym czole i sygnał sinusoidalny w szerokim zakresie częstotliwości.

Abstract. The crest values of overvoltages appearing at the transformer terminals are limited by surge arresters to the level determined by the insulation coordination. Those values are much higher than maximum nominal voltage. Overvoltages are transferred through transformers and propagate along supplying lines. Transient phenomena in transformers and lines have influence on shapes and maximal values of overvoltages. Analysis of overvoltages transferred through transformers and propagated in experimental system modeling typical part of electrical distribution network are presented in the paper. Values maximal and resonant frequency overvoltages generated by surge voltage with short time to the crest nad sinusoidal signal in wide frequency have been determined (*Influence of steepness for voltage strokes on propagation of overvoltages in transformers*).

Słowa kluczowe: przepięcia, transformatory, rdzeń amorficzny, wpływ stromości.

Keywords: overvoltages, power transformers, amorphous core, impact of steepness.

Wstęp

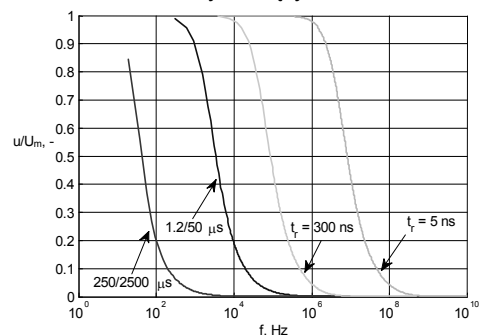
Układy izolacyjne transformatorów i urządzeń pracujących w sieciach elektroenergetycznych są narażone na przepięcia występujące podczas ich normalnej pracy. Przepięcia posiadają różnorodne kształty i wartości maksymalne wynikające z mechanizmu powstawania przepięć. Zdarzenia skutkujące w ich powstaniu to głównie wyładowania atmosferyczne pobliskie lub bezpośrednie, operacje łączeniowe, powstawanie i eliminacja niektórych stanów awaryjnych oraz zjawisko rezonansu i ferorezonansu [1,2].

Przepięcia powstające we fragmencie systemu elektroenergetycznego propagują się wzdłuż linii zasilających i są przenoszone przez transformatory do fragmentów sieci pracujących przy innym napięciu w wyniku sprzężeń elektromagnetycznych pomiędzy uzwojeniami [3]. Przepięcia przenoszone wyróżniają przebiegi odmienne od przebiegów przepięć wymuszających, spowodowane zjawiskami przejściowymi w transformatorach zależnymi od rozwiązań konstrukcyjnych i właściwości użytych materiałów [4-6]. Duży wpływ na zjawiska przejściowe w transformatorach mają właściwości materiałów użytych do budowy rdzeni. Obecnie coraz szersze zastosowanie znajdują transformatory z rdzeniami wykonanymi z materiałów amorficznych o właściwościach różniących się znacznie od właściwości stali krzemowych używanych dotychczas powszechnie w konstrukcjach transformatorów. Materiały amorficzne wyróżnia wąska pętla histerezy $B(H)$ oraz straty energii mniejsze około trzykrotnie od strat energii w stali żelazowej [7,8]. Duży wpływ na przebiegi przepięć przenoszonych mają również urządzenia połączone z transformatorami [1,3,9].

Do ochrony przepięciowej transformatorów w układach elektroenergetycznych stosowane są bezskiernikowe ograniczniki przepięć. Zmniejszają one wartości maksymalne przepięć, ale nie zmniejszają ich stromości. Dodatkowo ograniczniki bezskiernikowe nie zmieniają przebiegów przepięć o wartościach mniejszych od poziomu ochrony ograniczników [1,2,10].

Skutki oddziaływania przepięć na wysokonapięciowe układy izolacyjne zależne są od wartości maksymalnych oraz stromości przepięć [4,11,12]. Analiza wpływu

stromości przepięć generowanych w układach elektroenergetycznych na przepięcia przenoszone przez transformatory propagujące się w układach elektroenergetycznych narażające układy izolacyjne urządzeń, ma duże znaczenie praktyczne. Zmiana czasu narastania uderów napięciowych powoduje zmianę widma częstotliwości pobudzanych przez udary. Potwierdzają to charakterystyki częstotliwościowe, przedstawione na rysunku 1, wyznaczone dla znormalizowanego uderu napięciowego piorunowego i łączeniowego oraz uderów o przebiegu prostokątnym i czasach narastania t_r wynoszących 300 ns i 5 ns



Rys. 1. Charakterystyki częstotliwościowe znormalizowanego uderu napięciowego piorunowego i łączeniowego oraz uderów o przebiegu prostokątnym o czasach narastania $t_r = 300$ ns i 5 ns

Z analizy charakterystyk częstotliwościowych wybranych uderów napięciowych zamieszczonych na rysunku 1 wynika, że ze skracaniem czasu narastania uderu wzrastają zakresy częstotliwości składowych uderów. Na przykład udary o czasach narastania mniejszych od 300 ns zawierają składowe o częstotliwościach w zakresie powyżej 1 MHz. Udary o małych czasach trwania powodują generowanie przepięć o szerokim spektrum częstotliwości [3,6]. Jeżeli częstotliwość przepięcia powstającego w układzie będzie zgodna z częstotliwością rezonansową transformatora lub układu transformator-linia, to przepięcia przenoszone przez transformator mogą ulec wzmocnieniu [5,6,11].

W artykule przedstawiono analizę wpływu stromości uderów wymuszających przepięcia propagujące się w modelowym fragmencie sieci rozdzielczej średniego

napięcia na wartości szczytowe i częstotliwości rezonansowe. Analizę przeprowadzono dla różnych konfiguracji połączeń modelowego układu oraz z uwzględnieniem transformatorów o różnych parametrach z rdzeniami wykonanymi ze stali krzemowej zimnowalcowanej i materiału amorficznego. Wyniki badań, stanowiące podstawę analizy, mają postać przebiegów prądów w różnych punktach układu, wymuszonych udarem prostokątnym o czasie narastania t_r wynoszącym 5 ns oraz charakterystyk częstotliwościowych prądów.

Układ doświadczalny i program badań

Badania propagacji prądów wykonano w stanowisku doświadczalnym modelującym typowy fragment sieci rozdzielczej średniego napięcia (rys. 2).

W skład stanowiska badań wchodzi:

- transformator zasilający T_z (Tabela 1),
- transformator rozdzielczy T_r , będący obiektem badań - użyto transformator z rdzeniem ze stali krzemowej oraz z rdzeniem z materiału amorficznego,
- linia kablowa l_c o długości 90 m (Tabela 2),
- bezskierunkowe ograniczniki prądów sa_1, sa_2, sa_3 [10],
- bateria kondensatorów $C_b = 20 \mu F$.



Rys. 2. Widok układu doświadczalnego, stosowanego do rejestracji prądów i wyznaczania częstotliwości rezonansowych prądów propagujących się w typowych układach sieci elektroenergetycznej średniego napięcia

Tabela 1: Parametry znamionowe transformatorów T_z i T_r

parametr	jednostka	Wartość		
		T_z	T_r	
S_n	kVA	250	20	33
U_n	kV	15,75/0,4	6/0,4	11/0,23
U_z	%	4,5	4,29	-
ΔP_{Fe}	kW	0,486	0,02	-
ΔP_{Cu}	kW	3,509	0,22	-
I_0	%	1,0	0,54	-
typ rdzenia		ze stali krzemowej		amorficzny

Tabela 2: Parametry znamionowe kabla l_c

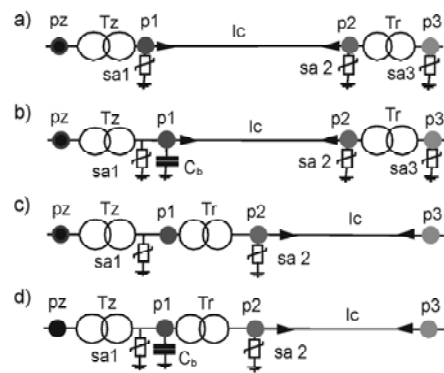
parametr	długość	Z	C	L	R
jednostka	m	Ω	$\mu F m^{-1}$	$\mu H m^{-1}$	Ωkm^{-1}
wartość	90	50	101,06	0,25	5,61

Badania wykonano w dwóch konfiguracjach połączeń transformatorów,

- system I: transformator T_z i T_r połączone są za pomocą kabla l_c (rys. 3a,b),
 - system II: transformator T_r połączony jest bezpośrednio z transformatorem zasilającym T_z , linia kablowa l_c dołączona jest do zacisków dolnego napięcia transformatora T_r (Rys. 3c,d).
- Rejestracje prądów wykonano w dwóch układach połączeń, a mianowicie w układzie bez baterii kondensatorów C_b (Rys. 3b,d) oraz z baterią C_b , włączoną w punkcie p_1 (Rys. 3a,c).

Program badań obejmował:

- rejestracje przebiegów prądów fazowych w wybranych punktach (p_1, p_2, p_3 - Rys. 3) układu doświadczalnego,
- rejestracje charakterystyk częstotliwościowych prądów.



Rys. 3. Schematy połączeń układu doświadczalnego, stosowanego w badaniach prądów przenoszonych przez transformatory i propagujących się w modelowej sieci średniego napięcia: a,b - system I, c,d - system II, T_z - transformator zasilający, T_r - transformator z rdzeniem ze stali krzemowej lub rdzeniem amorficznym, l_c - linia kablowa, sa - ograniczniki prądów, C_b - bateria kondensatorów, p_2 - punkt działania udaru napięciowego, generującego prąd w układzie, p_1, p_2, p_3 - punkty pomiarowe

Badania wykonano przy zastosowaniu udarów napięciowych o przebiegu prostokątnym, odzwierciedlających przebiegi napięć na ogranicznikach prądów podczas oddziaływania prądów o wartościach większych od napięć obniżonych ograniczników. Ze względu na szerokie spektrum pobudzanych częstotliwości zastosowano udary napięciowe o czasie narastania t_r wynoszącym 5 ns (Rys. 1). Wyznaczono także zależności częstotliwościowe prądów w zakresie od 100 Hz do 2 MHz [9]. Charakterystyki częstotliwościowe umożliwiają analizę wpływu częstotliwości składowych przejściowych prądów, powstających w układach elektroenergetycznych w warunkach eksploatacji, na wartości prądów propagujących się przez transformatory.

Celem badań była ocena wpływu konfiguracji typowego fragmentu układu elektroenergetycznego średnich napięć i stromości prądów na:

- przebiegi i wartości maksymalne prądów przenoszonych przez transformatory i propagujących się w typowych układach średnich napięć,
- częstotliwości składowych przebiegów prądów przenoszonych.

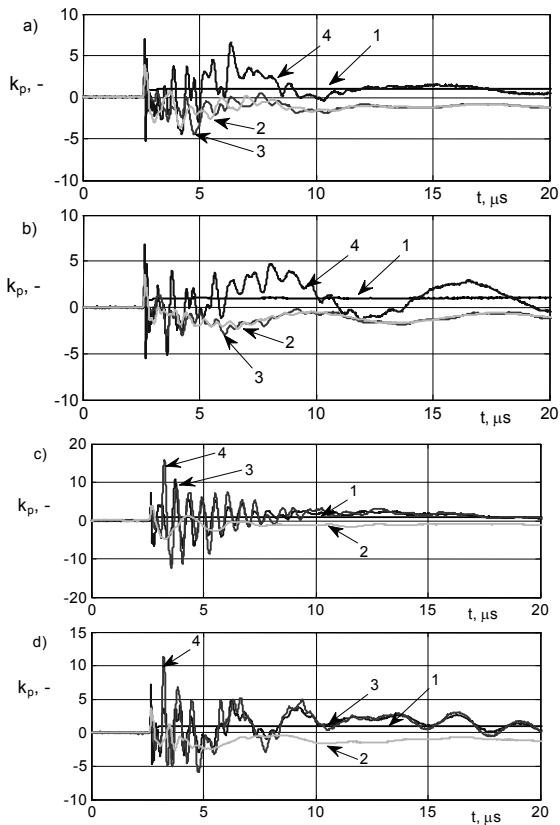
Analiza prądów przenoszonych przez transformatory z rdzeniami ze stali krzemowej i amorficznym

Przebiegi i charakterystyki częstotliwościowe prądów przedstawiono na rysunkach 4-7. Wyniki rejestracji wyrażono w jednostkach względnych, w stosunku do wartości znamionowych na danym poziomie napięcia w sieci, wynikających z aktualnej przekładni transformatorów T_z i T_r - korzystając z następującego wzoru:

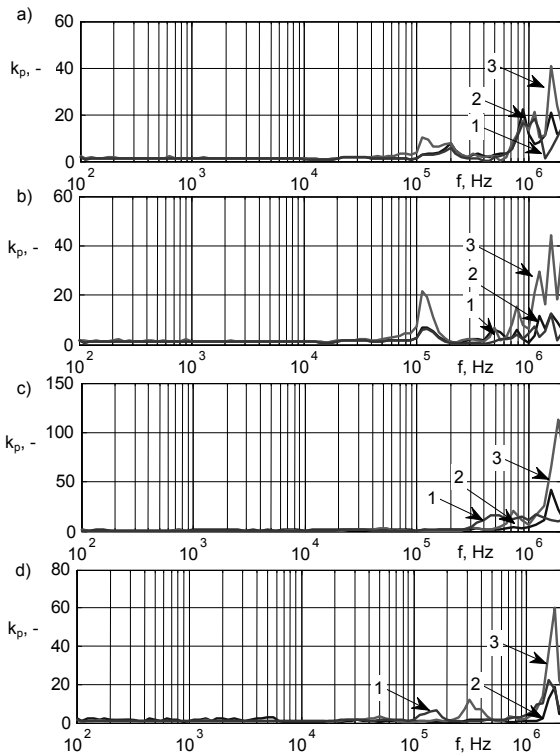
$$(1) \quad k_p = \frac{u_{pmax}}{u_{pzmax}} g$$

gdzie: k_p - współczynnik prądów, u_{pmax} - wartość maksymalna prądu, u_{pzmax} - wartość maksymalna udaru wymuszającego prąd w punkcie p_z , g - sumaryczna przekładnia w danym punkcie układu.

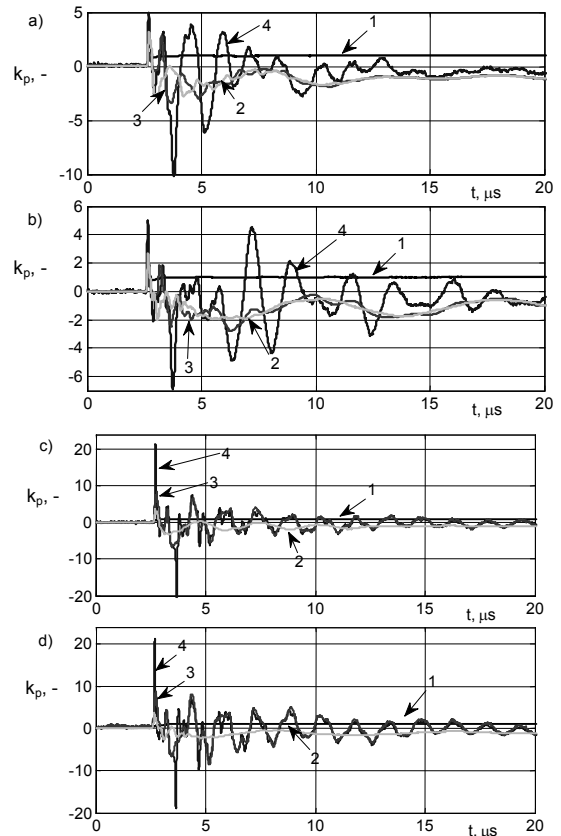
Na podstawie analizy wyników badań można stwierdzić, że prądów przenoszonych przez transformatory są źródłem prądów o dużych wartościach maksymalnych w układzie elektrycznym. Materiał zastosowany do budowy rdzenia ma duży wpływ na prądów przenoszonych przez transformatory. Widoczny jest wpływ układu połączeń na wartości maksymalne prądów i częstotliwości rezonansowe.



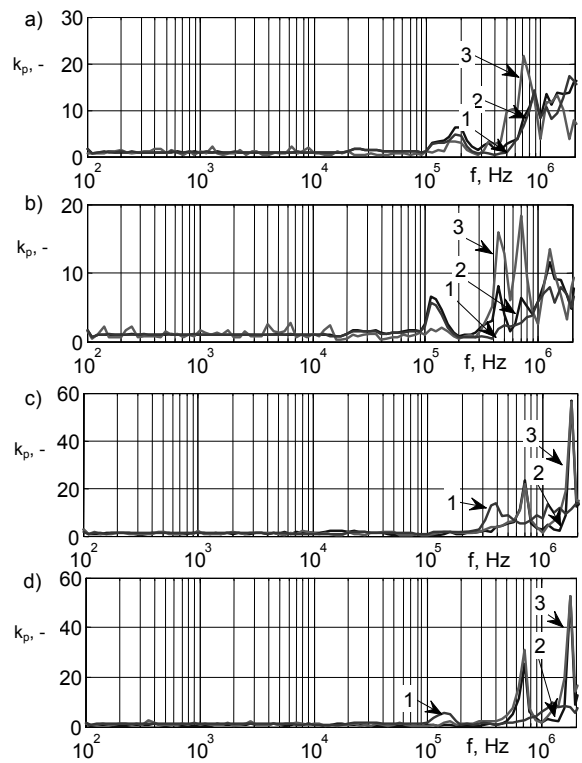
Rys. 4. Przebiegi prądów doziemnych przenoszonych przez transformator Tr z rdzeniem ze stali krzemowej, zarejestrowane w punktach: 1 - p_z , 2 - p_1 , 3 - p_2 , 4 - p_3 fazy C układów z rysunku 3, podczas działania udaru napięciowego prostokątnego o czasie narastania 5 ns



Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe prądów doziemnych przenoszonych przez transformator Tr z rdzeniem ze stali krzemowej, wyznaczone w punktach: 1 - p_1 , 2 - p_2 , 3 - p_3 fazy C układów z rysunku 3, podczas działania wymuszenia napięciowego pomiędzy fazami AC w punkcie p_z



Rys. 6. Przebiegi prądów doziemnych przenoszonych przez transformator Tr z rdzeniem amorficznym, zarejestrowane w punktach: 1 - p_z , 2 - p_1 , 3 - p_2 , 4 - p_3 fazy C układów z rysunku 3, podczas działania udaru napięciowego prostokątnego o czasie narastania 5 ns



Rys. 7. Charakterystyki częstotliwościowe prądów doziemnych przenoszonych przez transformator Tr z rdzeniem amorficznym, wyznaczone w punktach: 1 - p_1 , 2 - p_2 , 3 - p_3 fazy C układów z rysunku 3, podczas działania wymuszenia napięciowego pomiędzy fazami AC w punkcie p_z

Jeżeli częstotliwość składowych przebiegów przenoszonych jest zgodna z częstotliwością rezonansową układu, to wartości maksymalne przebiegów przekraczają około 20-krotnie wartość napięcia nominalnego sieci.

Na podstawie wyników badań przebiegów przedstawionych na rysunkach 4 - 7 wyznaczono współczynniki przebiegów i częstotliwości składowych przebiegów (Tabela 3 i 4). Na podstawie analizy wartości zamieszczonych w Tabelach 3 i 4 można stwierdzić, że włączenie baterii kondensatorów C_b w punkcie p_1 układu powoduje zmniejszenie wartości maksymalnych przebiegów. Połączenie bezpośrednie transformatorów T_z i T_r (układ II) skutkuje wzrostem przebiegów z powodu braku tłumienia fali wymuszającej w kablu l_c (system I) w wyniku czego przebiegią przenoszone pobudzane są z większą energią. Wartości współczynnika przebiegów wyznaczone na podstawie charakterystyk częstotliwościowych są większe od wartości maksymalnych przebiegów powstających w warunkach działania udaru napięciowego o przebiegu prostokątnym ze względu na ciągle pobudzanie danej częstotliwości sygnałem sinusoidalnym o jednakowej amplitudzie w całym zakresie.

Tabela 3: Wartości współczynników przebiegów k_p i dominujących częstotliwości rezonansowych f_r , wyznaczonych w punktach p_1 , p_2 , p_3 układu z transformatorem z rdzeniem ze stali krzemowej

rodzaj narażenia	punkt pomiaru		p_1	p_2	p_3	
udar prostokątny o czasie narastania 5 ns w punkcie p_2	rys. 4a	k_p	pu	3,8	4,5	6,9
		f_r	MHz	0,9	0,8	1,58
	rys. 4b	k_p	pu	3,51	3,11	6,77
		f_r	MHz	1,67	1,67	1,67
	rys. 4c	k_p	pu	5	10,73	15,8
		f_r	MHz	0,49	1,65	1,72
	rys. 4d	k_p	pu	3,56	7,15	11,3
		f_r	MHz	1,45	1,64	1,64
napięcie sinusoidalne o zmiennej częstotliwości 100 Hz - 2 MHz	rys. 5a	k_p	pu	18,2	22	40
		f_r	MHz	1,12	0,89	1,58
	rys. 5b	k_p	pu	12,5	12,7	44
		f_r	MHz	1,58	1,58	1,58
	rys. 5c	k_p	pu	17	42	112
		f_r	MHz	1,17	1,585	1,85
	rys. 5d	k_p	pu	22	18,7	60
		f_r	MHz	1,58	1,77	1,78

Tabela 4: Wartości współczynników przebiegów k_p i dominujących częstotliwości rezonansowych f_r , wyznaczonych w punktach p_1 , p_2 , p_3 z transformatorem z rdzeniem z materiału amorficznego

rodzaj narażenia	punkt pomiaru		p_1	p_2	p_3	
udar prostokątny o czasie narastania 5 ns w punkcie p_2	rys. 6a	k_p	pu	3,23	3,43	10,1
		f_r	MHz	0,83	0,84	0,72
	rys. 6b	k_p	pu	2,69	2,8	6,86
		f_r	MHz	0,6	0,6	0,6
	rys. 6c	k_p	pu	3,36	8,4	21,4
		f_r	MHz	0,35	0,67	0,67
	rys. 6d	k_p	pu	3,67	8,68	21,3
		f_r	MHz	0,16	0,67	0,67
napięcie sinusoidalne o zmiennej częstotliwości 100 Hz - 2 MHz	rys. 7a	k_p	pu	14,5	15,4	25,34
		f_r	MHz	0,89	0,89	0,71
	rys. 7b	k_p	pu	8,7	12,3	19,29
		f_r	MHz	1,26	1,26	0,71
	rys. 7c	k_p	pu	13,6	51	51
		f_r	MHz	0,39	1,78	1,78
	rys. 7d	k_p	pu	5	46,9	70
		f_r	MHz	1,58	1,78	1,78

Podsumowanie

Na podstawie analizy przebiegów przenoszonych przez transformatory w układzie doświadczalnym modelującym typowy fragment sieci rozdzielczej średniego napięcia można stwierdzić, że wartości szczytowe oraz kształty przebiegów przenoszonych przez transformatory zależą od zjawisk występujących wewnątrz transformatorów, wynikających z konstrukcji transformatorów i właściwości zastosowanych materiałów. W wyniku propagacji przebiegów przenoszonych wzdłuż linii w sieci ulegają zmianie przebiegi przebiegów, ich wartości maksymalne i częstotliwości składowe. Zmiany są efektem interakcji transformatorów zależnej od parametrów transformatorów, linii i urządzeń sieci. Efektem tych zjawisk może być silne wzmocnienie przebiegów przenoszonych przez transformatory, narażających układy izolacyjne urządzeń pracujących na różnych poziomach napięć.

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, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków e-mail: furgal@agh.edu.pl, mgr inż. Paweł Kłys, ABB Distribution Transformers, ul. Aleksandrowska 67/93, 91-205 Łódź, e-mail: pawel.klys@pl.abb.com, dr inż. Maciej Kuniewski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków e-mail: maciej.kuniewski@agh.edu.pl, dr inż. Piotr Pająk, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków e-mail: ppajak@agh.edu.pl

LITERATURA

- [1] Electrical transient interaction between transformers and the power system, Part 1 - Expertise", CIGRE Brochure 577A, JWG A2/C4.39, April 2014
- [2] Florkowski M., Furgał J.: High frequency methods for condition assessment of transformers and electrical machines, Publishing House AGH, Kraków, ISBN 978-83-7464-614-7, 2013
- [3] Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M.: Analiza przebiegów przenoszonych przez transformatory rozdzielcze do sieci niskiego napięcia, Prz. Elektro. R.91, Nr 11, 2015, str. 225-228
- [4] Popov M., van der Sluis L., Smeets R. P.: Evaluation of surge-transferred overvoltages in distribution transformers, Elec. Pow. Syst. Research, Vol. 78, No. 3, March 2008, pp. 441 - 449
- [5] Hori M., Nishioka M., Ikeda Y., Naguchi K., Kajimura K., Motoyama H., Kawamura T.: Internal winding failure due to resonance overvoltages in distribution transformer caused by winter lightning, IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 21, 3, 2006, pp. 1600 - 1606
- [6] Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M.: Propagation of overvoltages in distribution transformers with silicon steel and amorphous cores, IET Gen., Trans. & Distr., Vol. 9, No. 16, 2015, pp. 2736 - 2742
- [7] Soltanzadeh K., Tavakoli A., Arbab P. B.: Effects of amorphous core distribution transformers in improvement the functioning of the electricity distribution system, Proc. of 17th Conf. on Electr. Pow. Distr. Netw. (EPDC), 2-3 May 2012, pp. 1 - 7
- [8] Loizos G., Souflaris T., Lagache P., Gokcen I., Sacotte M.: Amorphous metal-based distribution transformers: evaluation of the current technology situation and a proposed design for short-circuit withstand, CIGRE, paper No. A2-202, 2012
- [9] Florkowski M., Furgał J.: Application of transfer function to recognition of resonance overvoltages in transformer windings, Measur. Scien. and Techn., Vol. 21, No. 12, 2010, pp. 1 - 9
- [10] EN 60099-5 Surge arresters. Recommendation for selection and application.
- [11] Florkowski M., Furgał J., Pająk P.: Analysis of transient voltage distributions in transformer windings at different insulation conditions, IEEE TDEIS, Vol. 19, Issue 6, 2012, pp. 1991 - 1998
- [12] Florkowski M., Furgał J., Kuniewski M., Pająk P.: Narażenia napięciowe układów izolacyjnych transformatorów rozdzielczych, Przegl. Elektrot., R. 92, Nr 3, 2016, str. 169 - 172