

Symulacje przebiegów przenoszonych przez transformatory energetyczne

Streszczenie. Przebiegi przenoszone przez uzwojenia transformatorów energetycznych stanowią narażenia układów izolacyjnych transformatorów oraz urządzeń zasilanych. Przebiegi są przenoszone przez transformatory w wyniku zjawisk przejściowych w uzwojeniach stanowiących złożone układy nieliniowe pomiędzy którymi istnieją silne sprzężenia elektromagnetyczne. Symulacje przebiegów przenoszonych przez transformatory wymagają stosowania modeli transformatorów, odzwierciedlających zjawiska występujące w warunkach propagacji przebiegów między uzwojeniami. W artykule przedstawiono wyniki symulacji przebiegów przenoszonych przez uzwojenia transformatora wykonane przy zastosowaniu modeli transformatorów istniejących w programie EMTP/ATPDraw oraz opracowanego modelu wysokoczęstotliwościowego transformatora. Symulacje porównano z wynikami badań.

Abstract. Overvoltages transferred through power transformer windings affects on insulation of power transformers and equipment connected to its terminals. Overvoltages are transferred through transformers due to transient phenomena existing between windings, which are complex non-linear systems with electromagnetic couplings. Simulations of overvoltages transferred through windings are possible with usage of transformer models, which take into account phenomena occurring during propagation of overvoltages between windings. This paper presents simulations results of overvoltages transferred through transformer windings, performed with transformer models implemented in EMTP/ATPDraw software and designed high-frequency model. Simulation results were compared to measurements. (*Simulations of overvoltages transferred through power transformers*).

Słowa kluczowe: przebiegi przenoszone, symulacje komputerowe, modele transformatorów

Keywords: transferred overvoltages, computer simulations, models of transformers

doi:10.12915/pe.2014.10.34

Wstęp

W układach elektroenergetycznych w warunkach eksploatacji powstają przebiegi o zróżnicowanych przebiegach i wartościach maksymalnych. Przebiegi narażają układy izolacyjne uzwojeń do których docierają oraz są przenoszone do uzwojeń pracujących przy innych napięciach. Przebiegi przenoszone narażają także układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych zasilanych. Przebiegi przenoszone przez transformatory są zależne od reakcji transformatorów, stanowiących złożone układy nieliniowe RLC o parametrach zależnych od częstotliwości i napięcia, na przebiegi powstające w układach elektroenergetycznych docierających do transformatorów pomimo zastosowanych ograniczników przebiegów z tlenków metali [1-4]. Reakcja transformatorów jest zależna od wartości przebiegów oraz częstotliwości składowych napięć przejściowych. Składowe przejściowe napięcia o częstotliwościach równych częstotliwości własnej transformatora mogą być wzmacniane wewnątrz uzwojeń w wyniku zjawiska rezonansu. Przebiegi przenoszone są także źródłem przebiegów narażających układy izolacyjne urządzeń zasilanych przez transformatory.

Niezbędna jest, więc szczegółowa analiza narażeń układów izolacyjnych wszystkich uzwojeń od przebiegów docierających do zacisków transformatora, obejmująca także narażenia od przebiegów przenoszonych przez transformatory oddziaływujących na układy izolacyjne uzwojeń sprzężonych z uzwojeniami poddanymi działaniu przebiegów powstających w sieciach elektrycznych [4 -10]. Wartości maksymalne przebiegów przenoszonych przez transformatory można obliczyć za pomocą wzorów zamieszczonych w normie [7].

Przy zastosowaniu metody znormalizowana nie możliwe jest jednak wyznaczenie przebiegów przebiegów szczególnie w warunkach występowania zjawisk rezonansowych w transformatorach. Dodatkowo wzory zawierają współczynniki, których wartości są zawarte w szerokich granicach, co ma duży wpływ na zmniejszenie dokładności obliczeń.

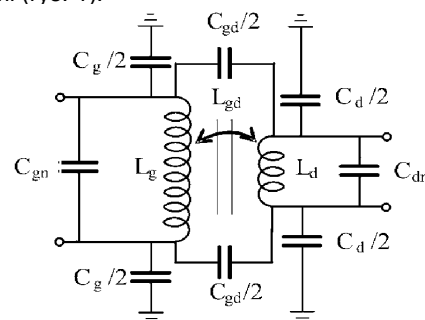
Możliwości badań eksperymentalnych przebiegów przenoszonych przez transformatory w układach wysokonapięciowych są ograniczone z powodu

przypadkowego charakteru występujących zjawisk oraz wysokimi, koniecznością wykonywania pomiarów przebiegów szybkozmiennych o bardzo dużych wartościach maksymalnych. Te względy powodują, że podstawą analizy przebiegów przenoszonych przez transformatory są głównie wyniki symulacji komputerowych. Wymagają one jednak stosowania modeli transformatorów uwzględniających zjawiska przejściowe w uzwojeniach zależne między innymi od napięcia, obciążenia transformatora i częstotliwości.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji przebiegów przenoszonych przez uzwojenia transformatora wykonanych przy zastosowaniu modeli transformatorów istniejących w programie komputerowym *Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP)* oraz opracowanego modelu wysokoczęstotliwościowego transformatora. Symulacje porównano z wynikami badań.

Mechanizm przenoszenia przebiegów przez transformatory

Przebiegi są przenoszone przez transformatory w wyniku sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych między uzwojeniami (rys. 1).



Rys.1. Schemat zastępczy uzwojeń jednej fazy transformatora C_{gn} , C_{dn} - pojemności wejściowe odpowiednio uzwojenia górnego napięcia (gn) i uzwojenia dolnego napięcia (dn), C_g , C_d - pojemności doziemne odpowiednio uzwojenia górnego napięcia i uzwojenia dolnego napięcia, C_{gd} - pojemność między uzwojeniami uzwojenia górnego napięcia i dolnego napięcia, L_g , L_d , L_{gd} - indukcyjności własne odpowiednio uzwojenia górnego napięcia i uzwojenia dolnego napięcia oraz indukcyjność wzajemna między uzwojeniami.

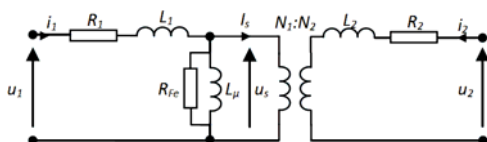
Schemat zastępczy uzwojeń jednej fazy transformatora przedstawiono na rysunku 1. Przepięcie na zaciskach wejściowych jednego uzwojenia transformatora jest przenoszone do innych uzwojeń. Zasadnicze znaczenie dla propagacji przepięć przez uzwojenia transformatorów mają sprzężenia pojemnościowe oraz sprzężenia indukcyjne między uzwojeniami silnie zależne od częstotliwości. Duży wpływ na przebiegi zjawisk przejściowych w warunkach oddziaływania przepięć na transformatory mają zjawiska generujące straty w uzwojeniach, układach izolacyjnych oraz obwodach magnetycznych. Przebiegi przepięć przenoszonych i ich wartości są zależne przebiegów napięć przejściowych docierających do zacisków transformatora oraz zjawisk przejściowych wewnętrznych zależnych od sprzężeń elektromagnetycznych między uzwojeniami. Efektem tych zjawisk mogą być nieliniowe rozkłady przepięć przenoszonych wewnątrz uzwojeń. Dodatkowy wpływ na przepięcia przenoszone mogą mieć zjawiska rezonansowe wewnątrz transformatorów.

Charakterystyka wybranych modeli transformatorów

Wykonano analizę porównawczą wyników symulacji przepięć przenoszonych przez transformatory energetyczne wykonane przy użyciu trzech różnych modeli transformatorów. Do analizy zastosowano dwa modele zaimplementowane w programie komputerowym *Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP)* [8], stosowanym szeroko do symulacji stanów przejściowych w układach elektroenergetycznych, tj. model BCTRAN i model hybrydowy. Wyniki symulacji wykonane przy zastosowaniu porównano z obliczeniami przepięć wykonanymi przy użyciu modelu wysokoczęstotliwościowego transformatorów opracowanego przy zastosowaniu wyników rejestracji funkcji przenoszenia.

Model BCTRAN

Schemat transformatora jednofazowego dwuuzwojeniowego realizowany w programie EMTP-ATP z zastosowaniem modelu BCTRAN przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Schemat zastępczy transformatora jednofazowego w modelu BCTRAN: R_1 , R_2 - rezystancja uzwojenia 1 i 2, L_1 , L_2 - indukcyjność rozproszenia uzwojenia 1 i 2, R_{Fe} - rezystancja reprezentująca straty w materiale rdzenia, L_{μ} - indukcyjność magnesująca rdzeń, U_1 , U_2 - napięcie między zaciskami uzwojenia 1 i 2, i_1 , i_2 - prąd w uzwojeniach 1 i 2, N_1 , N_2 - liczba zwojów uzwojenia 1 i 2

Parametry elementów modelu są wyznaczane na podstawie danych znamionowych transformatora. Rdzeń modelowany jest poprzez gałąź poprzeczną reprezentującą krzywą magnesowania rdzenia włączaną między zaciskami wejściowymi oraz straty występujące w rdzeniu [8]. Model BCTRAN uwzględnia zjawiska występujące dla niskich częstotliwości napięcia zasilającego, nie uwzględnia sprzężeń pojemnościowych pomiędzy uzwojeniami, które są jednym ze zjawisk determinujących przepięcia przenoszone. W przypadku korzystania z modelu BCTRAN do w celach symulacji przepięć przenoszonych zaleca się zamodelowanie sprzężeń pojemnościowych występujących w transformatorze za pomocą modeli pojemności dołączonych do jego zacisków.

Model Hybrydowy

W modelu hybrydowym transformatorów korzysta się z zasady dwoistości obwodów magnetycznych i elektrycznych [9]. Model uwzględnia zjawisko naskórkowości oraz sprzężenia pojemnościowe między uzwojeniami oraz pojemności doziemne uzwojeń.

Parametry modelu są wyznaczane na podstawie wyników pomiarów, parametrów konstrukcyjnych transformatora lub przy wykorzystaniu zbioru wartości parametrów, zawartych w bibliotece programu typowych dla transformatorów zależnych od parametrów znamionowych. Dane pomiarowe obejmują wyniki pomiarów wykonanych w stanie biegu jałowego i zwarcia oraz pojemności. Parametry konstrukcyjne zawierają wymiary uzwojeń oraz stałe materiałowe.

Model wysokoczęstotliwościowy transformatorów

Podstawą wysokoczęstotliwościowego modelu transformatorów energetycznych są zależności napięciowo-prądowe, które w wybranym zakresie częstotliwości realizują sprzężenia indukcyjno-pojemnościowe w transformatorach. W przypadku transformatora trójfazowego dwuuzwojeniowego równania napięciowo-prądowe zawierają macierze admitancyjną, impedancyjną lub łańcuchową, których podmacierze (o wymiarach 3x3) zawierają elementy reprezentujące zależności napięciowo-prądowe we wszystkich fazach transformatora [10]. Zależność napięciowo-prądowa ogólna, zawierająca macierz admitancyjną ma następującą postać:

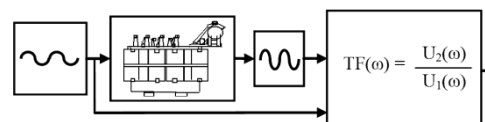
$$(1) \quad \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{j1} & Y_{j2} & \dots & Y_{ji} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \end{bmatrix}$$

gdzie: Y_{ii} - suma admitancji uzwojeń dołączonych do węzła ii , Y_{ij} - admitancja między węzłami i i j ze znakiem ujemnym.

Konstruowanie modelu wysokoczęstotliwościowego transformatorów obejmuje następujące etapy:

- wyznaczanie doświadczalnych charakterystyk częstotliwościowych transmitancji transformatora,
- zastąpienie doświadczalnych charakterystyk amplitudowo-fazowych funkcjami wymiernymi w dziedzinie operatorowej,
- określenie struktury oraz parametrów elementów układu zastępczego RLC, realizującego funkcje przenoszenia transformatora [11].

Charakterystyki amplitudowo-fazowe elementów macierzy z równania (1) można wyznaczać różnymi metodami. Jedną z nich polega na zasilaniu uzwojenia napięciem sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości i rejestracji przebiegu napięcia zasilania i odpowiedniego sygnału odpowiedzi (SFRA – ang. *Sweep Frequency Response Analysis*) (rys. 3) [11].



Rys.3. Schemat blokowy metody wyznaczania zależności $TF(f)$ dla transformatorów przy zastosowaniu wymuszenia sinusoidalnego (SFRA)

W celu dopasowania zależności teoretycznych do doświadczalnych charakterystyk transformatora zmierzone charakterystyki amplitudowo-fazowe są zastępowane

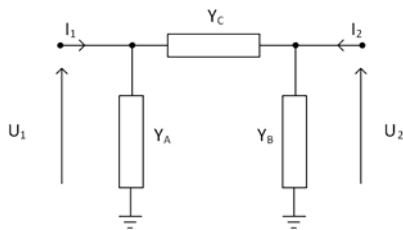
funkcją wymierną w dziedzinie operatora Laplace'a [12,13]. Podstawą metody jest takie dopasowanie współczynników wielomianów funkcji wymiernej, aby realizowała była charakterystyka doświadczalna obiektu. W praktyce przybliżenie funkcji wymiernej może być realizowane jako stosunek dwóch wielomianów skończonego rzędu:

$$(2) \quad f(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_n s^n}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_m s^m} = \frac{(s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_n)}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n)}$$

gdzie: a_n - współczynniki wielomianu licznika, b_n - współczynniki wielomianu mianownika, z_n - zera, p_n - bieguny.

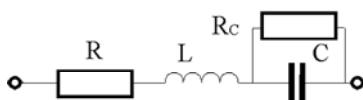
Aproksymacja polega na wyznaczeniu takich wartości biegunów funkcji $TF(f)$ aby różnica między funkcją zarejestrowaną a funkcją aproksymującą była jak najmniejsza. Do aproksymacji funkcji stosowano algorytm *VectorFitting* [10,12].

Schemat zastępczy wysokoczęstotliwościowego modelu transformatora ma postać układu elektrycznego *RLC*, którego charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia odwzorowują charakterystyki doświadczalne transformatora modelowanego. W przypadku opisu matematycznego w postaci zależności (2), schemat przyjmuje postać czwornika typu π (rys. 4).



Rys.4. Schemat czwornika typu π , modelującego transformator: U_1, U_2 - napięcie strony 1 i 2 czwornika, I_1, I_2 - prąd płynący po stronie 1 i 2 czwornika, Y_A, Y_B, Y_C - admitancja gałęzi poprzecznych i podłużnej czwornika.

Każdy z elementów czwornika reprezentującego sprzężenia pomiędzy fazami transformatora (rys. 4) powinien odwzorowywać odpowiednie charakterystyki częstotliwościowe admitancji. Przykładowy element realizujący sprzężoną parę zer i biegunów admitancji przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Schemat przykładowego układu stanowiącego fragment modelu transformatora, realizujący sprzężoną parę zer i biegunów admitancji (3)

Admitancja dwunika, przedstawionego na rysunku 6, jest wyrażona wzorem:

$$(3) \quad Y(s) = \frac{a_1s + a_0}{s^2 + b_1s + b_0} = \frac{CR_Cs + 1}{CLR_Cs^2 + (L + CRR_C)s + R_C + R}$$

gdzie: R, R_C, L, C - parametry układu, którego schemat przedstawiono na rysunku 5.

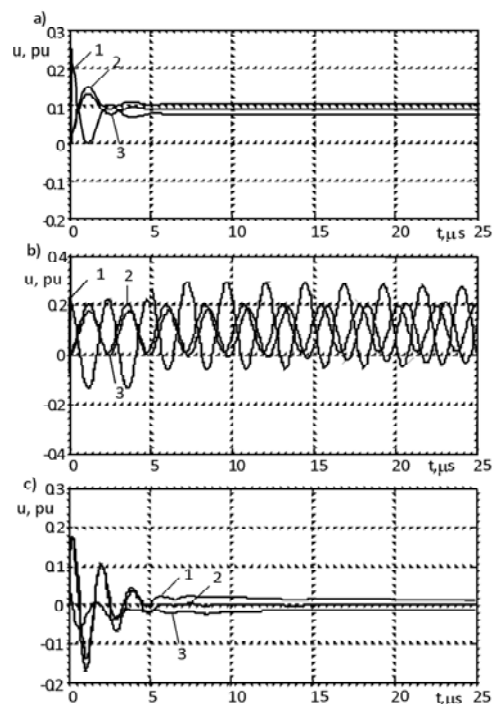
Wyniki symulacji przebiegów przenoszonych przez transformator

Obiektem doświadczalnym był transformator typu *TNOSCT-250/15.75PNS* o mocy znamionowej 250 kVA i napięciu znamionowym 15,75/0,4 kV. Dane znamionowe transformatora doświadczalnego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1: Dane znamionowe transformatora doświadczalnego

parametr	S_n	U_n	U_z	ΔP_{fe}	ΔP_{cu}	I_0
jednostka	kVA	kV	%	kW	kW	%
wartość	250	15,75/0,4	4,5	0,486	3,509	1

Wykonano symulacje przebiegów przenoszonych doziemnych w uzwojeniach 0,4 kV transformatora 250 kVA (tab. 1), powstających podczas oddziaływania uderu napięciowego między zaciskami faz A i B uzwojenia górnego napięcia transformatora doświadczalnego. Obliczenia wykonano przy zastosowaniu modeli *BCTRAN* z dołączonymi pojemnościami uzwojeń i *HYBRID* z uwzględnieniem pojemności uzwojeń wyznaczonych w programie na podstawie parametrów konstrukcyjnych uzwojeń, zaimplementowanych w programie *EMTP/ATP* oraz przy użyciu modelu wysokoczęstotliwościowego, opracowanego na podstawie wyników rejestracji charakterystyk częstotliwościowych admitancji. Wyniki symulacji zamieszczono na rysunku 6, wartości napięć przedstawiono w jednostkach względnych w odniesieniu do napięcia zasilającego.



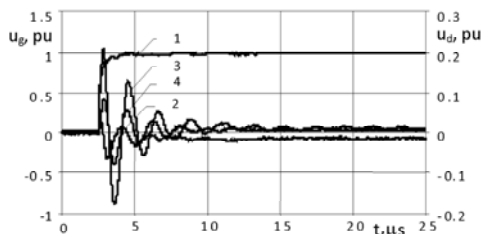
Rys.6. Wyniki symulacji przebiegów napięć doziemnych na zaciskach uzwojenia 0,4 kV transformatora doświadczalnego (tabela 1) podczas działania uderu prostokątnego między zaciskami faz A i B uzwojeniach 15 kV, wykonane przy użyciu różnych modeli transformatorów: a - model *BCTRAN*, b - model *Hybrydowy*, c - model wysoko-częstotliwościowy

Na podstawie analizy porównawczej przedstawionych wyników symulacji przebiegów napięć można stwierdzić, że wyniki symulacji przebiegów przenoszonych przez transformator uzyskane z zastosowaniem przedstawionych modeli są odmienne. Przebiegi napięć przenoszonych otrzymane po zastosowaniu modelu *BCTRAN* (rys. 6a) zawierają składowe oscylacyjne tłumione o częstotliwości około 500 kHz i wartości maksymalnej równej 17 pu w odniesieniu do przekładni znamionowej. Wynikiem symulacji napięć przenoszonych przez transformator wykonanych przy użyciu modelu *HYBRID* (rys. 6b) są przebiegi napięć o charakterze oscylacji nietłumionych o wartościach maksymalnych sięgających 71 pu i częstotliwości około 600 kHz. Przebiegi napięć przenoszonych symulowanych z zastosowaniem modelu

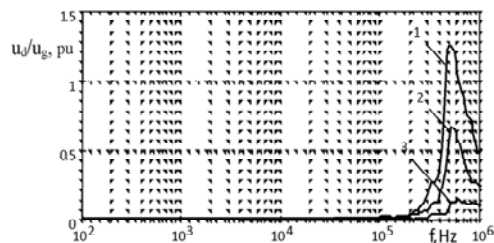
wysokoczęstotliwościowego (rys. 6c) zawierają składową oscylacyjną tłumioną o częstotliwości około 500 kHz. Przepięcia osiągają wartość maksymalną wynoszącą około 13 pu.

Wyniki badań przepięć przenoszonych

Wykonano badania przepięć przenoszonych przez transformator. Badania obejmowały rejestrację przebiegów przepięć przenoszonych w uzwojeniu 0,4 kV podczas oddziaływania udaru prostokątnego między zaciskami faz B i C uzwojeń 15 kV (rys. 7) oraz wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych przepięć przenoszonych (rys. 8).



Rys. 7. Przebiegi napięć przejściowych przenoszonych przez transformator 250 kVA, 15,75/0,4 kV powstających w uzwojeniach 0,4 kV podczas oddziaływania udaru napięciowego między zaciskami faz B i C: 1 - udar napięciowy wymuszający przepięcia przenoszone w transformatorze (skala po lewej stronie), 2 - faza A, 3 - faza C, 4 - faza B (skala po prawej stronie)



Rys. 8. Doświadczalna zależność częstotliwościowa funkcji przenoszenia przepięć do uzwojeń 0,4 kV podczas wymuszeniu w zaciskach AB uzwojeń 15 kV, transformatora 250 kVA, 15/0,4 kV (tabela 1): 1 - faza A, 2 - faza B, 3 - faza C

Analiza wyników symulacji przepięć przenoszonych przez transformator 250 kVA wykonanych z zastosowaniem różnych modeli oraz wyników badań potwierdza, że przebiegi przepięć przenoszonych uzyskane w wyniku symulacji wykonanych z zastosowaniem modelu wysokoczęstotliwościowego są zbliżone do wyników badań. Charakterystyki częstotliwościowe doświadczalne potwierdzają także, częstotliwości własne transformatora widoczne w przebiegach przepięć uzyskanych w wyniku obliczeń za pomocą modelu wysokoczęstotliwościowego (rys. 6c) i uzyskane doświadczalnie (rys. 7) wynoszące około 500 kHz.

Na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji i wyników badań można stwierdzić, że opracowany model wysokoczęstotliwościowy może być stosowany do symulacji przepięć przenoszonych przez transformatory. Odzwierciedla on zjawiska w transformatorach decydujące o przebiegach i wartościach maksymalnych przepięć przenoszonych przez transformatory.

Podsumowanie

Przepięcia powstające w układach elektroenergetycznych są przenoszone przez transformatory w wyniku sprzężeń elektromagnetycznych między uzwojeniami. Wartości maksymalne przepięć zależą od kształtu napięć przejściowych docierających do zacisków transformatorów pomimo ochrony przepięciowej. Przepięcia przenoszone mogą być wyznaczone na podstawie symulacji z zastosowaniem modeli uwzględniających zjawiska przejściowe w transformatorach. Przeprowadzone symulacje potwierdzają, że wyniki obliczeń przepięć przenoszonych przez transformatory, wykonanych z zastosowaniem modelu wysokoczęstotliwościowego transformatorów, opracowanego na podstawie wyników rejestracji charakterystyk częstotliwościowych admittancji transformatorów, są zbliżone do wyników badań eksperymentalnych przepięć przenoszonych.

LITERATURA

- [1] Shibuya Y., Fujita S., Shimomura T.: Effects of Very Fast Transient Overvoltages on Transformer, *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 146, No. 4, July 1999, 459 - 464
- [2] Shibuya Y., Fujita S., Hosokawa N.: Analysis of very fast transient overvoltages in transformer winding. *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.* Vol.144, No. 5, Sept. 1997, 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] CIGRE Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System, Part 1- Expertise, *CIGRE Brochure 577A, JWG A2/C4.39*, April 2014,
- [5] De Conti A., Visacro S.: Evaluation of lightning surges transferred from medium voltage to low - voltage networks, *IEE Proc. Gen. Trans. Distrib.*, Vol. 152, Issue 3, 2005, 351 - 356
- [6] Samuła J., Szpor S.: *Ochrona odgromowa*, Tom 1, WNT, Warszawa, 1983
- [7] EN 60071-2: *Insulation coordination. Part. 2: Application guide*
- [8] Dommel H. and et. al.: *Electromagnetic Transients Program - Theory Book*, Portland, prepared for BPA, 1986
- [9] Høidalen H. K., Bruce A. M., Gonzalez F., Ishchenko D., Chiesa N.: Implementation and verification of the hybrid transformer model in ATPDraw, *Conf. on Pow. Syst. Trans. (IPST'07)* Lyon, France, June 4-7, 2007,
- [10] Gustavsen B.: Application of vector fitting to high frequency transformer modeling, *The Int. Conf. on Pow. Syst. Trans. (IPST' 03)*, New Orleans (USA), 1 - 5
- [11] Furgał J., Kuniewski M., Pająk P.: Badania i symulacje przepięć łączeniowych przenoszonych przez uzwojenia transformatorów, *Przeegl. Elektrot.*, R. 88, Nr 11b, 2012, 130 - 133
- [12] Gustavsen B., Semelyen A.: Rational approximation of frequency domain response by vector fitting, *IEEE Trans. Pow. Deliv.*, Vol. 14, No. 3, July 1999, pp. 1052 - 1059
- [13] Gustavsen B.: Wide band modeling of power transformers, *IEEE Trans. on Pow. Deliv.*, Vol. 19, No. 1, Jan. 2004, 414 - 422

Autorzy: dr hab. inż. Marek Florkowski, Centrum Badawcze ABB, ul. Starowiślna 13a, Kraków, E-mail: marek.florkowski@pl.abb.com; dr hab. inż. Jakub Furgał prof. n, 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.