



Jakub FURGAŁ

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

Analiza wybranych narażeń przepięciowych układów izolacyjnych transformatorów

Streszczenie: Układy izolacyjne transformatorów są narażone na oddziaływanie przepięć podczas prób udarami napięciowymi oraz w eksploatacji, podczas generowania przepięć w sieciach elektrycznych. Przepięcia narażające układ izolacyjny zewnętrzny oraz wewnętrzny transformatora podczas prób napięciowych porównano z narażeniami powstającymi w warunkach eksploatacji. Podstawą analizy porównawczej były wyniki symulacji komputerowych oraz badań przepięć w transformatorze.

Abstract: (Analysis of selected overvoltage risks of transformer insulation systems). Transformer insulation systems are subjected to influence of supervoltages during voltage tests as well as in operation during, generating overvoltages in electric networks. Overvoltages which endanger external and internal insulation system of transformer during voltage tests were compared to the risks generated in operation. The base of the compare analysis were results of computer simulations and investigations of overvoltages in a transformer.

Słowa kluczowe: transformatory, przepięcia, wysokonapięciowe układy izolacyjne
Keywords: transformers, overvoltages, high voltage insulation systems

Wprowadzenie

Transformatory energetyczne są narażone na oddziaływanie wielu czynników. Wśród nich są również przepięcia. Narażenia przepięciowe układów izolacyjnych transformatorów są zależne od przepięć generowanych w sieciach elektrycznych, skuteczności zastosowanej ochrony przepięciowej oraz zjawisk przejściowych wewnątrz uzwojeń. W ostatnich latach są coraz szerzej wprowadzane do elektroenergetyki beziskiernikowe ograniczniki przepięć zastępujące odgromniki zaworowe. Charakterystyki ochronne ograniczników beziskiernikowych są odmienne od charakterystyk odgromników zaworowych. W odróżnieniu od odgromników, złożonych z szeregowych iskrierników i warystorów wykonanych z węgla krzemu, ograniczniki beziskiernikowe zawierają tylko warystory wykonane z tlenków metali. Zmiana urządzenia ochronnego wiąże się ze zmianą narażeń przepięciowych chronionych układów izolacyjnych. Warystory z tlenków metali wyróżniają silnie nieliniowe charakterystyki napięciowo-prądowe, decydujące o właściwościach ochronnych ograniczników [1,2]. Po zastosowaniu ograniczników tlenkowych uległy zmianie przebiegi przepięć na zaciskach chronionych transformatorów. Konsekwencją tych zmian są także zmiany przepięć wewnątrz uzwojeń [3].

Dla oceny skuteczności działania ochronnego ograniczników beziskiernikowych została przeprowadzona analiza narażeń przepięciowych układów izolacyjnych transformatorów. Jej podstawą były wyniki symulacji komputerowych przepięć powstających w transformatorze przy oddziaływaniu wybranych przepięć generowanych w sieciach elektrycznych. Wykonywano także badania eksperymentalne przepięć. Analizowano narażenia powstające podczas oddziaływania przepięć piorunowych oraz wybranych przepięć łączeniowych. Dla oceny wpływu ograniczników tlenkowych na narażenia przepięciowe izolacji przepięcia generowane w transformatorze w warunkach pracy porównano z przepięciami powstającymi podczas znormalizowanych prób udarem piorunowym.

Narażenia przepięciowe probiercze

Objektem doświadczalnym był transformator olejowy o mocy 20 kVA i napięciu znamionowym 15/0,4 kV (Yzn5). Uzwojenia górnego napięcia są wykonane jako cewkowe, a uzwojenia dolnego napięcia - jako warstwowe. Uzwojenia

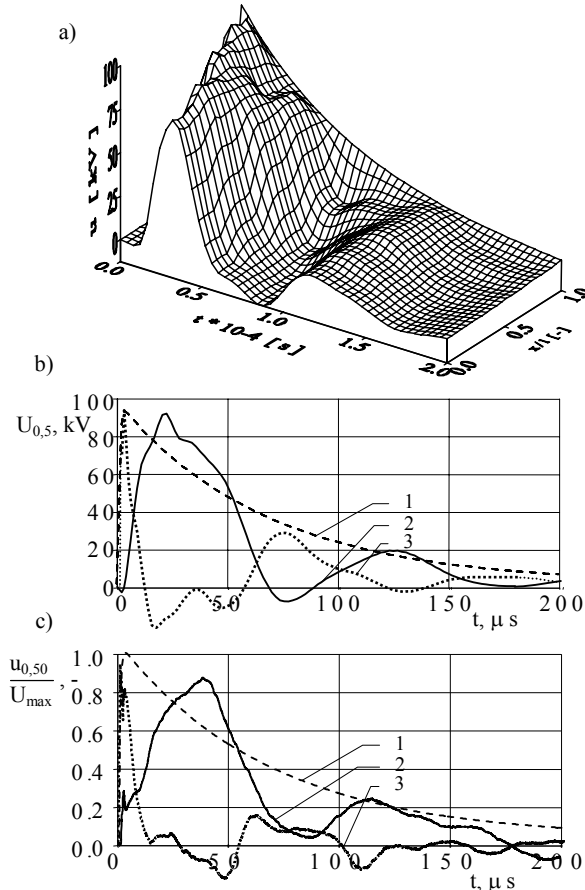
wysokiego napięcia składają się z ośmiu cewek. Izolacja dwu cewek skrajnych jest wykonana jako wzmocniona. Uzwojenia niskiego napięcia są uzwojeniami rurowymi nawiniętymi przewodem o prostokątnym przekroju poprzecznym [3].

Wykonano symulacje komputerowe przepięć narażających układ izolacyjny transformatora podczas badań znormalizowanych udarem piorunowym pełnym. Do obliczeń zastosowano program komputerowy, opracowany przy użyciu modelu matematycznego transformatorów oraz modelu ograniczników przepięć. Do modelowania transformatora zastosowano schemat zastępczy ze stałymi skupionymi uzwojeń przedstawiony w publikacjach [3,4,5]. Elementy schematu odzwierciedlają zjawiska w transformatorach związane z torem prądowym, obwodem magnetycznym oraz układem izolacyjnym. W oparciu o podstawowe wymiary uzwojeń i rdzenia oraz stałych materiałowych zostały wyznaczone parametry elementów schematu a mianowicie: indukcyjności własnych i wzajemnych części uzwojeń, ich rezystancji oraz konduktywności i pojemności fragmentów układu izolacyjnego. W modelu uwzględniono zjawiska w układzie izolacyjnym, uzwojeniach oraz rdzeniu ferromagnetycznym zależne od częstotliwości [6,7,8].

Do modelowania ograniczników przepięć z tlenków metali użyto model, uwzględniający właściwości dynamiczne ograniczników, przedstawiony w publikacjach [9,10]. O przebiegach charakterystyk napięciowo-prądowych modelu decyduje układ zawierający rezystory nieliniowe o różnych zależnościach napięcia od prądu rozdzielone filtrem indukcyjno-rezystancyjnym, którego impedancja jest zależna od stromości udarów prądowych i wpływa przez to na rozptył prądów w warystorach. Wynikiem tego jest uzależnienie napięcia na zaciskach modelu od szybkości zmian prądów wyladowczych. W schemacie uwzględniono także pojemność ograniczników.

Zgodnie z zaleceniami normalizacyjnymi [11,12] maksymalna wartość szczytowa udaru probierczego piorunowego pełnego dla transformatorów pracujących w sieciach 15 kV wynosi 95 kV. Na rysunku 1 przedstawiono teoretyczne przebiegi przepięć doziemnych w uzwojeniu transformatora podczas próby takim udarem oraz wybrane wyniki badań eksperymentalnych. Rysunek 1a zawiera rozkład przebiegów czasowych przepięć

doziemnych wzdłuż uzwojenia [3]. Współrzędna X na tym rysunku jest wyznaczona ze wzoru: $X = x/l$ [-], gdzie: x - odległość wybranego punktu w uzwojeniu od punktu neutralnego transformatora, l - długość uzwojenia. Wartość $X = 1$ jest współrzędną zacisku wejściowego, a wartość $X = 0$ - współrzędną punktu gwiazdowego. Na rysunku 1b zamieszczono teoretyczne przebiegi wybranych napięć a mianowicie: udaru napięciowego piorunowego (1), przepięcia doziemnego w połowie uzwojenia ($X = 0,5$) (2) oraz przepięcia między cewkami najbardziej zbliżonymi do zacisku liniowego (3). Na rysunku 1c pokazano natomiast wyniki rejestracji tych przepięć.



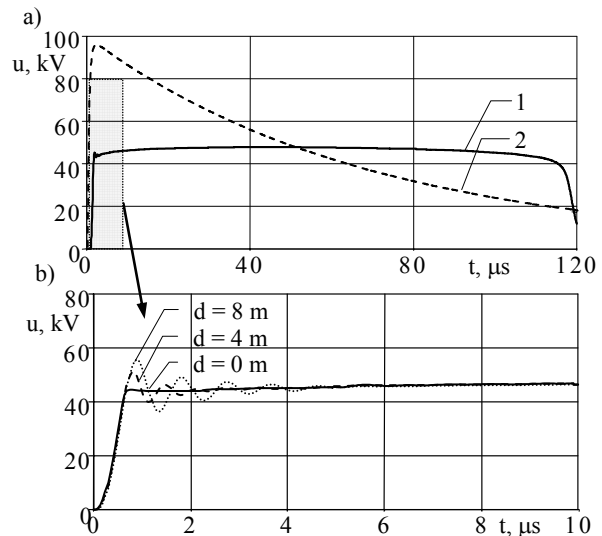
Rys. 1. Przebiegi napięć piorunowych w uzwojeniu wysokiego napięcia transformatora w czasie próby udarem piorunowym: a,) b) wyniki obliczeń c) wyniki badań: 1- przebieg udaru na zaciskach transformatora, 2 - przebieg przepięcia doziemnego w środku uzwojenia ($X=0,5$), 3 - przebieg przepięcia między cewkami położonymi bezpośrednio przy zacisku liniowym

Narażenia od przepięć piorunowych w warunkach eksploatacji

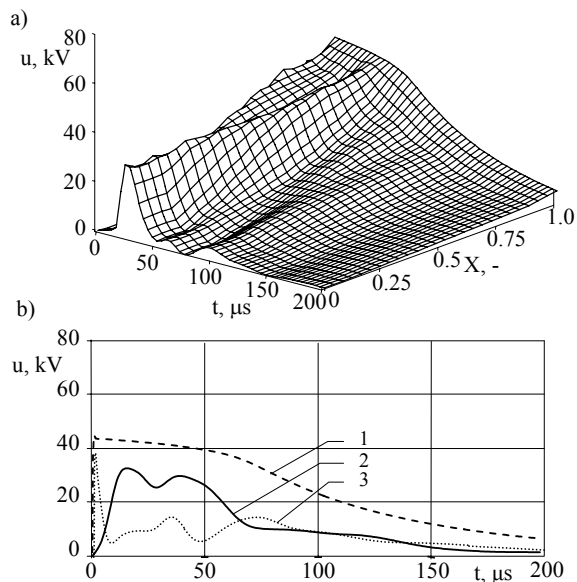
W celu porównania przepięć narażających układ izolacyjny transformatora podczas prób udarem piorunowym pełnym z narażeniami przepięciowymi powstającymi w eksploatacji wykonano symulacje komputerowe przepięć w transformatorze chronionym ogranicznikami beziskiernikowymi. Do badań teoretycznych zastosowano ogranicznik przepięć o napięciu pracy ciągłej $U_c = 18$ kV, i napięciu znamionowym $U_r = 22$ kV. Ograniczniki o takich napięciach znamionowych są stosowane do ochrony transformatorów w sieciach rozdzielczych 15 kV pracujących z izolowanym punktem neutralnym [13].

Obliczono przepięcia powstające w czasie oddziaływania znormalizowanego udaru napięciowego piorunowego 95 kV, oraz podczas załączania linii kablowej zasilającej transformator. Wyniki obliczeń przepięć narażających układ

izolacyjny zewnętrzny transformatora przedstawiono na rysunku 2. Oprócz długotrwałych przebiegów czasowych przepięcia doziemnego (w czasie 120 μ s) na transformatorze chronionym ogranicznikami połączonymi bezpośrednio z zaciskami ($d = 0$ m) zamieszczono tam także krzywe przepięć doziemnych na transformatorze chronionym ogranicznikami włączonymi w odległości d od transformatora wynoszącej 4 m oraz 8 m.



Rys. 2. Przebiegi czasowe przepięć doziemnych na zacisku wejściowym ($X=1$) transformatora podczas oddziaływania przepięcia piorunowego 95 kV: a) przebieg przepięcia na ograniczniku włączonym bezpośrednio przy transformatorze ($d = 0$ m) (2) podczas oddziaływania przepięcia piorunowego (1), b) początkowe fragmenty przepięć doziemnych na zacisku transformatora, gdy odległość między ogranicznikami a transformatorem $d = 0$ m; 4 m; 8 m



Rys. 3. Przepięcia narażające układ izolacyjny wewnętrzny transformatora chronionego ogranicznikami tlenkowymi podczas oddziaływania przepięcia piorunowego: a - rozkład przestrzenny przepięć doziemnych wzdłuż uzwojenia, b - 1- przebieg czasowy przepięcia na zacisku liniowym ($X=1$), 2 - przebieg doziemny w środku uzwojenia ($X=0,5$), 3 - przepięcie między cewkami uzwojenia przy zacisku liniowym

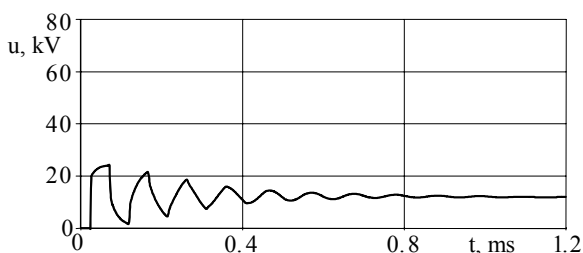
Gdy ogranicznik jest połączony bezpośrednio z zaciskami transformatora napięcie narażające układ izolacyjny

zewnątrzny jest równe napięciu na działającym ograniczniku. Duża nieliniowość charakterystyk ograniczników sprawia, że wartość napięcia na zaciskach transformatora podczas oddziaływania przepięcia piorunowego jest praktycznie stała w długim okresie czasu. Po zwiększeniu odległości między ogranicznikiem a transformatorem występują oscylacje tłumione przepięcia wzrasta wartość maksymalna przepięcia narażającego izolację doziemną zacisku liniowego.

Napięcie na zaciskach wejściowych transformatora, powstające podczas oddziaływania przepięć generowanych w sieciach elektrycznych jest źródłem przepięć wewnątrz uzwojeń. Przebiegi przepięć wewnętrznych są zależne od przebiegu napięcia na zaciskach transformatora oraz zjawisk wewnątrz uzwojeń. Uzwojenia transformatorów są bowiem złożonymi układami elektromagnetycznymi. Rozkład przepięć wzdłuż uzwojenia, narażających układ izolacyjny główny uzwojenia transformatora chronionego ogranicznikami tlenkowymi połączonymi bezpośrednio z zaciskami ($d = 0$ m) podczas działania przepięcia piorunowego pokazano na rysunku 3. Rozkład wartości maksymalnych tych przepięć ma charakter nieliniowy. Przepięcia doziemne wewnątrz uzwojenia nie przekraczają jednak wartości maksymalnej przepięcia na zacisku wejściowym. Narażenia przepięciowe izolacji wzdłużnej w pobliżu zacisku wejściowego transformatora są zbliżone wówczas do narażeń izolacji głównej zacisku.

Narażenia od wybranych przepięć łączeniowych

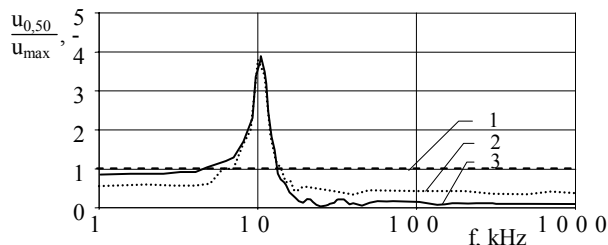
Szczegółowo badano wpływ ograniczników beziskiernikowych na przepięcia łączeniowe o charakterze oscylacyjnym. Przepięcia takie są generowane w sieciach elektrycznych między innymi podczas załączania linii zasilających oraz w czasie niektórych stanów awaryjnych np. zwarć doziemnych [15]. Takim czynnościom łączeniowym oraz zwarciom doziemnym towarzyszą przepięcia o wartościach maksymalnych zwykle nie przekraczających podwójnej wartości maksymalnej napięcia roboczego sieci. Zawierają one jednak składowe oscylacyjne o różnych częstotliwościach, zależnych od konfiguracji sieci i parametrów urządzeń elektrycznych. Typowy przebieg takiego przepięcia przedstawiono na rysunku 4. Pokazano na nim przepięcie doziemne na zaciskach transformatora chronionego ogranicznikami tlenkowymi o napięciach znamionowych: $U_c = 18$ kV, $U_r = 22$ kV po załączeniu linii kablowej zasilającej o długości 4 km. Przebiegi wyznaczono po zamodelowaniu fragmentu sieci elektrycznej 15 kV przy użyciu programu komputerowego EMT-ATP [16].



Rys. 4. Przebieg czasowy przepięcia doziemnego na transformatorze chronionym ogranicznikami tlenkowymi po załączeniu linii zasilającej

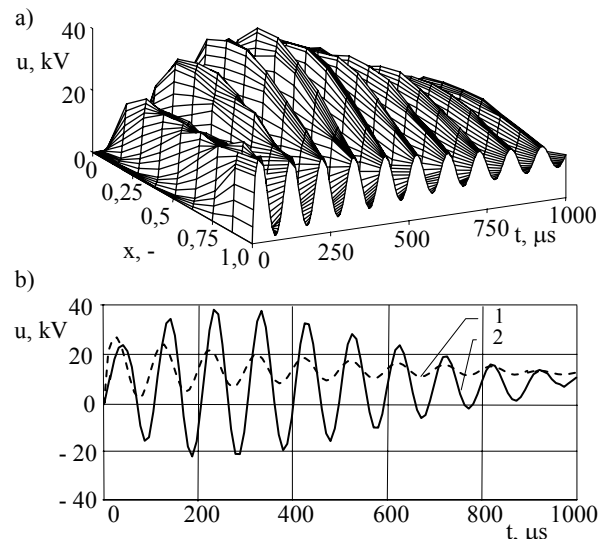
Z tego wykresu widać, że przebieg przepięcia na transformatorze nie jest zniekształcony przez ograniczniki tenkowe. Ze względu na małą wartość przepięcia ograniczniki pracują bowiem na początkowych, praktycznie liniowych częściach charakterystyk napięciowo-prądowych. Ograniczniki tlenkowe nie chronią więc transformatorów przed przepięciami łączeniowymi o takich wartościach.

Przepięcia takie oddziałują bezpośrednio na uzwojenia. Wytrzymałość elektryczna układów izolacyjnych jest wystarczająca dla zapewnienia właściwej pracy transformatorów w warunkach oddziaływania takich przepięć. Przepięcia te nie stanowią więc dla transformatorów zagrożenia. Jeżeli jednak istnieją odpowiednie warunki to wówczas przepięcia zawierające składową oscylacyjną o niewielkich wartościach mogą stać się źródłem dużych przepięć wewnątrz uzwojeń pomimo ochrony ogranicznikami zewnętrznymi.



Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe przepięć doziemnych w połowie uzwojenia: 1 - napięcie doziemne na zaciskach uzwojenia ($X=1$), 2,3 - charakterystyki przepięć w środku uzwojenia ($X=0,5$) (2 - wyniki obliczeń, 3 - wyniki badań eksperymentalnych)

Specyfiką zjawisk w uzwojeniach jest silna zależność ich przebiegów od częstotliwości, której efektem jest zróżnicowanie reakcji transformatorów zależne od przebiegów przepięć zewnętrznych [17,18]. Charakter tej reakcji uwidaczniają charakterystyki częstotliwościowe przepięć w połowie uzwojenia ($X=0,5$) pokazane na rysunku 5, będące efektem symulacji numerycznych oraz badań eksperymentalnych. Ich przebiegi wyznaczają charakterystyczne częstotliwości własne (rezonansowe) transformatorów, przy których powstają największe przepięcia.



Rys. 6. Przebiegi przepięć doziemnych w transformatorze w czasie oddziaływania na zaciski wejściowe przepięcia łączeniowego o charakterze oscylacyjnym o częstotliwości 10 kHz przedstawionego na rysunku 3: a) rozkład wzdłuż uzwojenia przepięć narażających układ izolacyjny wewnętrzny, b) przebieg czasowy przepięcia na zacisku transformatora ($X=1$) (1) i w połowie uzwojenia ($X=0,5$) (2)

Do obliczania tych częstotliwości transformatorów została zaproponowana przez autorów publikacji [19] następująca zależność empiryczna:

$$(1) \quad f = \frac{220 S_f^{0,36}}{U_f^{0,95}} [kHz]$$

gdzie: S_f - moc jednej fazy transformatora, MVA,
 U_f - napięcie na uzwojeniu, kV.

Z charakterystyk przedstawionych na rysunku 6 wynika, że przy oddziaływaniu przepięć zawierających składową oscylacyjną o częstotliwości 10 kHz napięcia wewnątrz uzwojenia transformatora doświadczalne są najbardziej wzmacniane. Potwierdzają to obliczenia rozkładów przebiegów czasowych przepięć wzdłuż uzwojenia, pojawiających się przy oddziaływaniu na zaciskach transformatora przepięć zawierających taką składową. Przepięciem wymuszającym na zaciskach uzwojenia było przepięcie o przebiegu sinusoidalnym tłumionym o częstotliwości 10 kHz, odwzorowujące przebieg pokazany na rysunku 3. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rysunku 5. Jak widać z wykresów przepięcia rezonansowe rozwijają się wewnątrz uzwojeń. Najważniejszymi warunkami powstania dużych przepięć w transformatorach jest zgodność częstotliwości składowej okresowej przepięć generowanych w sieciach z częstotliwością własną transformatora i długi czas trwania przepięć. Prawdopodobieństwa jednoczesnego spełnienia warunków generowania przepięć o charakterze oscylacyjnym o dużych wartościach maksymalnych w uzwojeniach jest małe. Zagrożenie układów izolacyjnych transformatorów od takich przepięć jest więc niewielkie, ale realne. Zdarzały się bowiem awarie transformatorów energetycznych, które spełniły wymagania próby napięciem udarowym i były chronione ogranicznikami przepięć, spowodowane przepięciami o takim charakterze [20,21].

Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę porównawczą narażeń przepięciowych układu izolacyjnego transformatora w warunkach prób udarem piorunowym oraz wybranych narażeń przepięciowych występujących w warunkach eksploatacji. Podstawą analizy były głównie symulacje komputerowe przepięć w transformatorze podczas prób udarowych oraz w warunkach oddziaływania przepięć piorunowych i przepięć łączeniowych o charakterze oscylacyjnym oddziaływujących na transformator chroniony ogranicznikami tlenkowymi.

Wyznaczono rozkłady przepięć narażających zarówno układ izolacyjny zewnętrzny jak i wewnętrzny transformatora. Wykonane obliczenia przepięć potwierdzają istotny wpływ lokalizacji ograniczników przepięć, przebiegu czasowego i wartości szczytowych przepięć na przebiegi i wartości przepięć narażających układy izolacyjne transformatorów. Uwidaczniają także zróżnicowane narażenia przepięciowe w warunkach eksploatacji, zależne od reakcji chronionego transformatora na oddziaływujące przepięcia. Pokazują również charakter przepięć rezonansowych w uzwojeniach chronionych ogranicznikami tlenkowymi mogących stanowić zagrożenie dla transformatorów spełniających warunki prób napięciowych.

LITERATURA

- [1] Working Group 33.06 (CIGRE): Metal-oxide Surge Arresters in AC Systems. *Electra*, January, 1990, No. 128, pp. 101-113
- [2] Kosztaluk R., Flisowski Z.: Ekspansja tlenkowych ograniczników przepięć w sieciach elektrycznych. *VIII Symp.:*

- [3] Furgał J.: Analiza narażeń przepięciowych izolacji transformatora chronionego iskiernikowymi i beziskiernikowymi ogranicznikami przepięć. *Ucz. Wyd. Nauk.-Dyd. AGH*, Kraków, 2003
- [4] Bjertkan E., Hoidden H. K.: High frequency FEM-based Power Transformer Modelling Investigation of Internal Stresses due to Network – Initiated Overvoltages, *Int. Conf. on Power Systems Transients (IPST'05) Montreal*, 19-23 June 2005, paper No. IPST05-106
- [5] Vakilian M., Degeneff R.C., Kupferschmid M.: Computing the Internal Transient Voltage Response of a Transformer with a Nonlinear Core Using Gear's Method. Part 1: Theory. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 10, No. 4, Oct. 1995, pp. 1836-1842
- [6] Wilcox D. J., Hurley W. G., Conlon M.: Calculation of Self and Mutual Impedances Between Sections of Transformer Windings. *IEE Proc.*, Vol. 136, Pt. C, No. 5, Sept. 1989, pp. 308-314
- [7] Mombello E. E., Ratta G., Rivera J. F.: Study of Internal Stresses in Transformer Windings Due to Lightning Transient Phenomena. *Electric Power System Research*, No. 21, 1991, pp. 161-172
- [8] de León F., Semlyen A.: Time Domain Modeling of Eddy Currents Effects for Transformer Transients. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, January 1993, pp. 271-280
- [9] IEEE Working Group 3.4.11.: Modeling of Metal Oxide Surge Arresters. *IEEE Trans. on Pow. Delivery*, Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 302-309
- [10] Pinceti P., Giannettoni M.: A Simplified Model for Zinc Oxide Surge Arresters. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April 1999, pp. 393-398
- [11] PN - EN 60071-1 Koordynacja izolacji, Definicje, zasady i reguły
- [17] PN - EN 60071-2 Koordynacja izolacji. Przewodnik stosowania
- [13] PN - IEC 60099-4 Ograniczniki przepięć. Beziskiernikowe zaworowe ograniczniki przepięć z tlenków metali do sieci prądu przemiennego
- [14] Kosztaluk R., Flisowski Z.: Dobór odgromników do pracy w sieciach elektrycznych. *Przegląd Elektrotechniczny*. R. LXXIV, Nr 5, 1998, str. 118 - 122
- [15] Musil R.J., Preinger G., Schopper E., Wenger S.: The Resonance Effect of Oscillating System Overvoltages on Transformer Windings. *IEEE Trans on PAS*, Vol.- PAS. 101, No. 10, 1982, pp. 3703-3711
- [16] Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program. Rule Book. 1987
- [17] Working Group 12.07 (CIGRE): Resonance Behaviour of High-Voltage Transformers. *CIGRE Session Paris*, 29th August - 6th Sept. 1984, paper 12-14
- [18] Rodrigo H., Dang H. Q. S.: Behaviour of Transformer Windings under Surge Voltages. *11th Intern. Symp. on High Voltage Engineering ISH'99*, 22-27 Aug. 1999, London, paper No. 1.287. P 6
- [19] McNutt W. J., Blalock T. J., Hinton R. A.: Response of Transformer Winding to System Transient Voltages. *IEEE PES Summer Meeting, Vancouver (Canada)*, July 1973, paper 15-20
- [20] Schei A., Alstad K., Sund J. B., Rian W.: Resonant Overvoltages in Power Station Transformers Initiated by Switching Transients in the Connected Cable Network. *CIGRE Session 1984*, 29th Aug. - 6th Sept., paper 12-7
- [21] Morched A.S., Marti L., Brierly R.H., Lackey J. G.: Analysis of Internal Winding Stresses in EHV Generator Set-up Transformer Failures. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 888 894

Autor: dr hab. inż. Jakub Furgał, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, 30 - 059 Kraków, al. Mickiewicza 30, e-mail: furgal@uci.agh.edu.pl