

MODELOWANIE PROPAGACJI IMPULSÓW WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W UZWOJENIACH TRANSFORMATORÓW ENERGETYCZNYCH Z ZASTOSOWANIEM STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Paweł ZYDRON, Michał BONK, Łukasz FUŚNIK
Konrad BĘC, Dominik MANIAK, Franciszek SZAFRAŃSKI

AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
tel.: 12 6172835 e-mail: pzydron@agh.edu.pl

Streszczenie: Transformatory energetyczne są jednymi z podstawowych elementów systemu elektroenergetycznego. Objawem wewnętrznych defektów ich układu izolacyjnego może być powstawanie wyładowań niezupełnych (wnz). Sygnały elektryczne wywołane przez wnz są rejestrowane na doprowadzeniach liniowych, do których docierają propagując wzdłuż uzwojeń, od miejsca ich występowania. W zależności od położenia defektu oraz jednostkowych parametrów elektrycznych uzwojenia zmieniają się parametry czasowo-częstotliwościowe sygnałów obserwowanych w miejscu ich detekcji. W artykule przedstawiono wyniki badań propagacji impulsów wnz na modelu laboratoryjnym uzwojenia transformatora oraz, dla porównania, wyniki symulacji numerycznych w programie Matlab/Simulink. Podczas symulacji stosowano pewne uproszczenia złożonej struktury uzwojenia transformatora analizując wpływ miejsca wyładowania na wybrane właściwości impulsów rejestrowanych na zacisku liniowym.

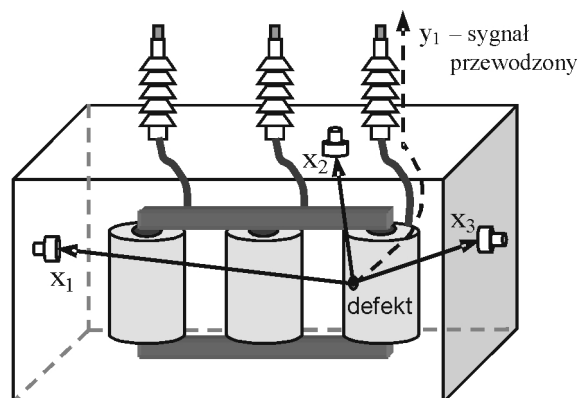
Słowa kluczowe: uzwojenia transformatora, wyładowania niezupełne, lokalizacja, modelowanie numeryczne.

1. WPROWADZENIE

Od początku funkcjonowania elektroenergetyki, której podstawowym celem jest wytworzenie, transmisja i dostarczenie energii elektrycznej do odbiorcy końcowego, transformatory energetyczne są jednymi z podstawowych elementów całego systemu elektroenergetycznego. Dla zapewnienia niezawodności ich działania duże znaczenie ma wszechstronna i wiarygodna diagnostyka. Jednym z objawów obecności wewnętrznych defektów układu izolacyjnego jest powstawanie wyładowań niezupełnych (wnz). W przypadku transformatorów mocy z izolacją papierowo-olejową mogą one występować w różnych miejscach, w uzwojeniach transformatora (np. w izolacji głównej lub międzyuzwojowej) lub w jego przepustach.

Wyładowania niezupełne w inkluzjach gazowych charakteryzują się bardzo krótkimi czasami narastania t_r oraz niewielkimi szerokościami impulsów t_w , mierzonymi na połowie wartości szczytowej (t_r nawet poniżej 1 ns, t_w rzędu $10^{-9} \div 10^{-7}$). Z tego względu ich widmo częstotliwościowe jest bardzo szerokie, dzięki czemu możliwe jest stosowanie różnych elektrycznych i elektromagnetycznych metod detekcji i lokalizacji źródeł [1]. Dla wykrycia i lokalizowania źródeł wnz w transformatorach można używać czujników antenowych różnego typu, rejestrujących sygnały elektromagnetyczne w zakresach częstotliwości VHF/UHF (ang. *Very*

High Frequency / Ultra High Frequency). Ze względu na ekranujące działanie kadzi transformatora czujniki takie muszą być umieszczone w jej wnętrzu lub na oknie dielektrycznym instalowanym w jej pokrywie [2-8]. W tej metodzie lokalizowanie lub przynajmniej zgrubne oszacowanie położenia źródeł wnz może nastąpić poprzez zastosowanie metody triangulacyjnej opartej na pomiarach czasów charakterystycznych dla impulsów elektromagnetycznych rejestrowanych na poszczególnych czujnikach (rys.1).



Rys. 1. Lokalizacja źródeł wnz w transformatorze z zastosowaniem czujników antenowych i metody triangulacyjnej (sygnały x_1 do x_3)

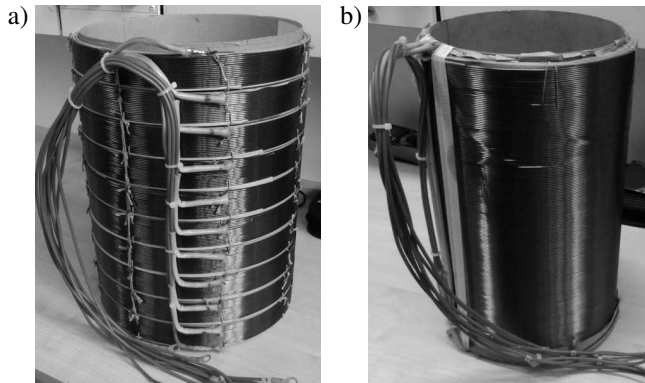
Sygnały elektryczne wnz mogą być również rejestrowane na doprowadzeniach liniowych, do których docierają propagując wzdłuż uzwojeń od swego źródła (rys. 1, sygnał przewodzony y_1). Uzwojenie odwzorowuje się zwykle jako linię długą o określonej liczbie czwórników z elementami skupionymi. W zależności od położenia defektu oraz parametrów elektrycznych uzwojenia, zmianie podlegają parametry czasowe i częstotliwościowe impulsów. Biorąc to pod uwagę, analiza parametrów impulsów rejestrowanych na zaciskach liniowych pozwala na oszacowanie miejsca występowania wyładowań w uzwojeniu [9-19].

W artykule przedstawiono wyniki badań propagacji impulsów napięciowych, o parametrach zbliżonych do parametrów impulsów wnz, w modelu uzwojenia transformatorowego oraz rezultaty symulacji w programie Matlab/Simulink. W modelu numerycznym zastosowano uproszczenia struktury uzwojenia, badając wpływ miejsca wystąpienia wnz na wybrane parametry impulsów rejestrowanych na zacisku liniowym.

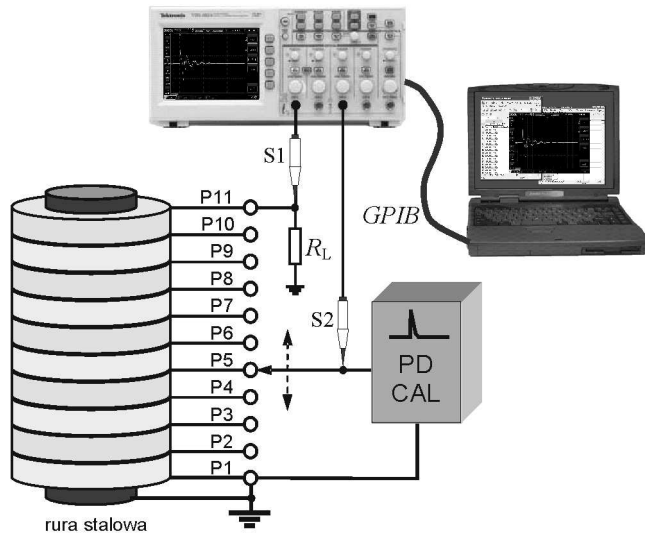
2. LABORATORYJNE STANOWISKO POMIAROWE

W badaniach laboratoryjnych na modelu uzwojenia transformatora (rys. 2) zastosowano stanowisko pomiarowe o konfiguracji przedstawionej na rysunku 3.

Badane uzwojenie 10-dyskowe (rys. 2a) zostało nawinięte na przeszpanowym karkasie, do którego wsunięto rurę stalową, symulującą obecność uziemionego rdzenia. Dostęp do końców uzwojeń każdego z dysków zapewniły wyprowadzone na zewnątrz odczepy, ponumerowane od P1 do P11. Odczep P1 (najniżej położony) połączono ze stalową rurą i uziemiono. Do najwyższej położonej odczepu P11, pełniąc funkcję zacisku liniowego, przyłączono sondę oscyloskopową o niewielkiej pojemności doziemnej (S1).



Rys. 2. Przykłady modelowych uzwojeń transformatorowych: a) uzwojenie dyskowe, b) uzwojenie warstwowe



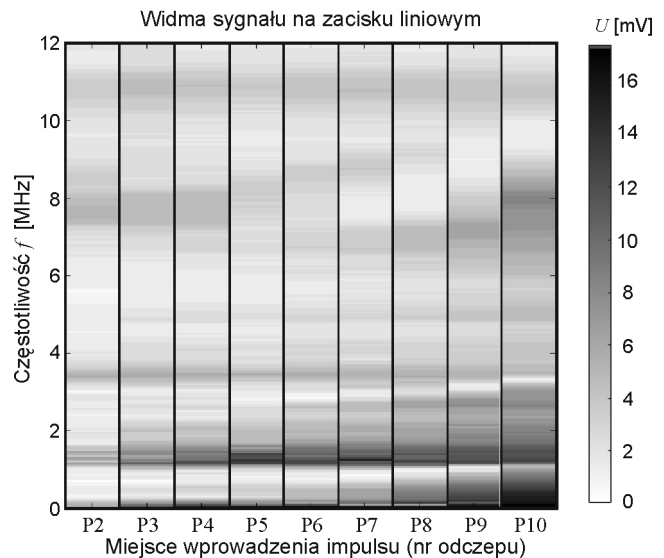
Rys. 3. Schemat blokowy stanowiska do badania wpływu położenia źródła wnz na parametry impulsów rejestrowanych na zacisku liniowym transformatora (PD CAL – kalibrator impulsów wnz, GPIB – interfejs standardu IEEE-488, R_L – rezystor obciążenia, S1, S2 – sondy oscyloskopowe o małej pojemności doziemnej)

Do wytwarzania szybkozmiennych, krótkotrwałych impulsów modelowych, symulujących występowanie wnz, zastosowano źródło impulsów o określonym ładunku, kalibrator CAL1D (Power Diagnostix), używany zwykle do skalowania torów pomiarowych podczas badań wnz w transformatorach. Urządzenie to zawiera generator stromych impulsów napięciowych o regulowanej wartości szczytowej połączony szeregowo z wyjściem przez kondensator sprzęgający o niewielkiej pojemności ($C < 10\text{pF}$). Użycie drugiej pasywnej sondy oscyloskopowej S2 o parametrach identycznych z sondą S1 pozwalało obserwować kształt impulsu w miejscu jego wprowadzenia do uzwojenia.

3. WYNIKI POMIARÓW I SYMULACJI

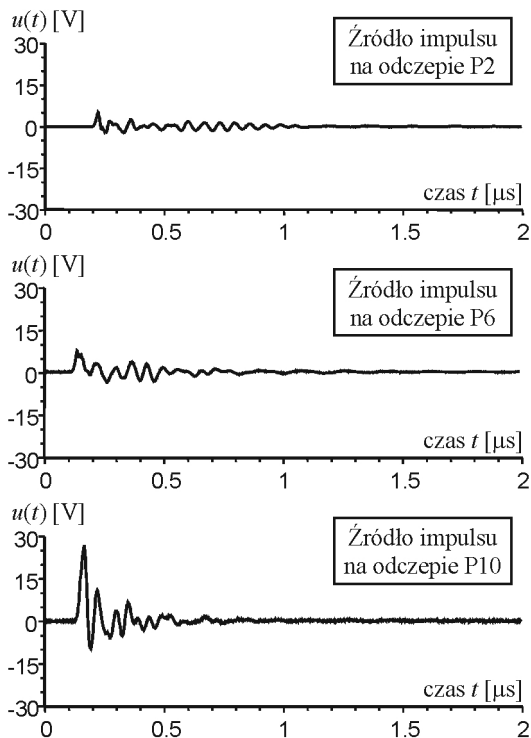
Wykonanie pomiarów miało na celu określenie zależności pomiędzy miejscem wyładowania (punktem wprowadzenia impulsu ładunkowego do uzwojenia), a wybranymi parametrami impulsu napięciowego rejestrowanego na zacisku liniowym modelowego uzwojenia dyskowego. Impulsy z kalibratora były podawane na kolejne odczepy modelu uzwojenia, zaczynając od odczepu P2, aż do P10. Przebiegi napięciowe sygnałów S1 i S2 rejestrowano jednocześnie w dwóch torach pomiarowych oscyloskopu cyfrowego (Tektronix TDS2014 lub RIGOL DS1054), z odpowiednio wysoką częstotliwością próbkowania i z zastosowaniem wbudowanej funkcji uśredniania sygnału – dla eliminacji/ograniczenia wpływu szumu towarzyszącego sygnałom pomiarowym.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki analizy częstotliwościowej sygnałów pomiarowych rejestrowanych na zacisku liniowym, w zależności od miejsca wprowadzenia impulsu ładunkowego z kalibratora. Analiza widm amplitudowych pozwala określić zmiany wartości prążków widma oraz wzajemnych proporcji pomiędzy nimi dla poszczególnych sygnałów. Z tego powodu widmo może być traktowane jako charakterystyczna *sygnatura* miejsca występowania defektu, na podstawie której może być szacowana jego lokalizacja. Podstawowym problemem pozostaje dokładność określenia *funkcji przejścia*, zależnej od wielu parametrów geometrycznych i materiałowych konstrukcji transformatora [15, 17]. Przebiegi napięciowe na zacisku liniowym, wywołane wprowadzeniem impulsu wnz w 3 różne miejsca uzwojenia, przedstawiono na rysunku 5.

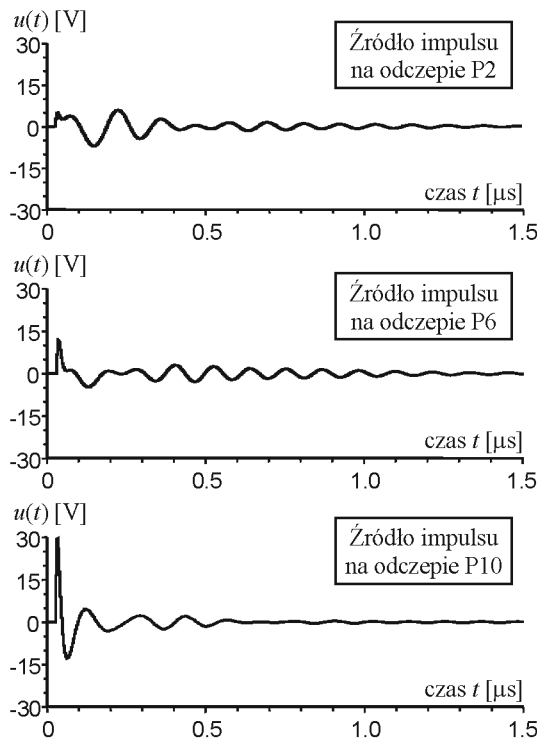


Rys. 4. Widma amplitudowe sygnału rejestrowanego na zacisku liniowym (P11) w zależności od miejsca wprowadzenia impulsu ładunkowego do uzwojenia transformatora (odczepy od P2 do P10)

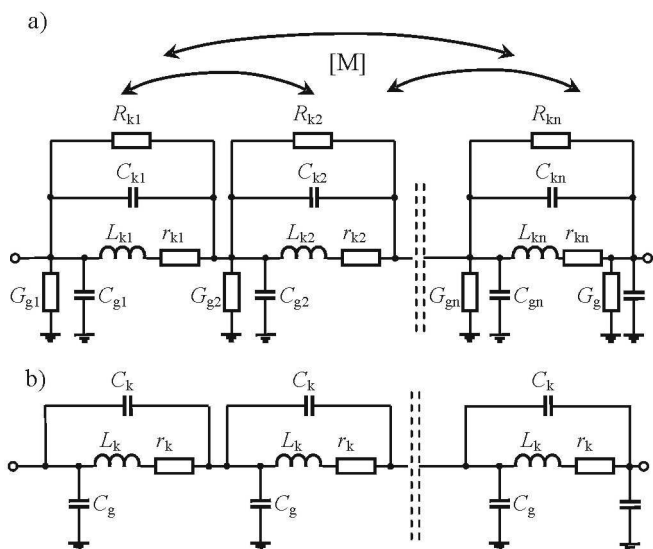
Lokalizowanie defektów jest wspomagane symulacjami numerycznymi propagacji impulsów w uzwojeniach. W tym celu stosowane są modele bazujące na modelach linii długiej n -czwórnikowej z elementami skupionymi RLC (rys. 6), również z modelem wieloprzewodowej linii długiej MTL (ang. *Multiconductor Transmission Line*) [9, 10, 12-15]. Dla opisywanego przypadku przygotowano numeryczny model uzwojenia dyskowego implementując go w programie Matlab/Simulink, zgodnie z założeniami opisanymi w [13, 15]. Podstawą dla numerycznego opisu badanego uzwojenia był model uproszczony (rys. 6b), którego wartości elementów oszacowano na podstawie pomiarów i obliczeń.



Rys. 5. Rejestrowane podczas pomiarów przebiegi napięcia na zacisku liniowym uzyskane dla trzech różnych punktów wprowadzenia impulsu z kalibratora wnz ($R_L = 1 \text{ k}\Omega$)

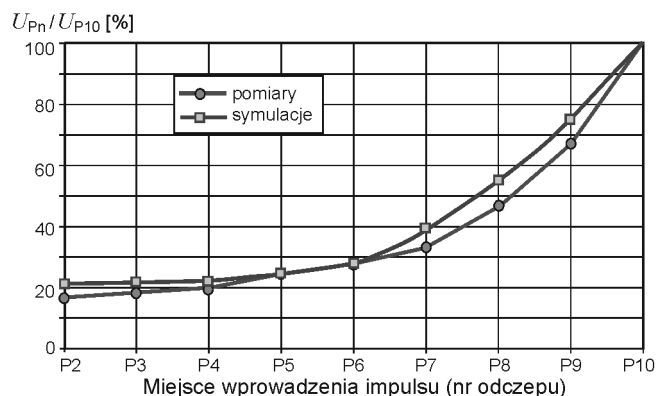


Rys. 7. Symulowane numerycznie przebiegi napięcia na zacisku liniowym uzyskane dla trzech różnych punktów wprowadzenia impulsu z kalibratora wnz ($R_L = 1 \text{ k}\Omega$)



Rys. 6. Wybrane modele uzwojeń transformatora energetycznego: a) model złożony [12], b) model uproszczony [13, 15]. Elementy modelu uzwojenia: C_g – pojemność doziemna, C_k – pojemność wzdużna, L_k – indukcyjność uzwojenia, r_k – rezystancja szeregową uzwojenia, R_k – rezystancja reprezentująca straty, m.in. w rdzeniu, G_g – konduktancja doziemna, $[M]$ – macierz indukcyjności wzajemnych poszczególnych sekcji uzwojenia

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki symulacji przebiegów napięcia na zacisku liniowym wywołanych wprowadzeniem impulsu ładunkowego w 3 różne miejsca uzwojenia. Uproszczenie modelu nie pozwoliło na uzyskanie wiernego odwzorowania kształtu przebiegów rzeczywistych. Symulacja potwierdza jednak silnie nieliniową zależność wartości szczytowej sygnału na zacisku liniowym od miejsca wprowadzenia impulsu ładunkowego (rys. 8). Po oszacowaniu lokalizacji defektu na podstawie sygnatury częstotliwościowej tego typu funkcja skalowania (związana z funkcją przejścia) jest niezbędna dla oszacowania parametrów wnz.



Rys. 8. Zależności względnej wartości szczytowej przebiegu napięciowego na zacisku liniowym od miejsca wystąpienia wnz, dla przebiegów rejestrowanych podczas eksperymentów na modelu uzwojenia (pomiary) oraz symulowanych (symulacje) (przy zachowaniu stałej wartości ładunku wyładowania); U_{Pn} – wartość szczytowa impulsu na zacisku liniowym przy wprowadzeniu impulsu ładunkowego na odczep P_n ($n = 2, 3, \dots, 10$).

4. PODSUMOWANIE

Problematyka detekcji wnz oraz lokalizacji ich źródeł w transformatorach energetycznych pozostaje wciąż aktualnym problemem badawczym, ważnym z punktu widzenia zapewnienia niezawodności działania tych urządzeń. Badania wykonane na modelu uzwojenia wskazują na złożoną strukturę szerokopasmowego widma sygnału rejestrowanego na zacisku liniowym. Dla defektu o określonej lokalizacji może ona stanowić identyfikującą ją indywidualną sygnaturę. Jak wskazano w źródłach literaturowych, oszacowanie lokalizacji defektu jest pierwszym krokiem oceny jego znaczenia dla stanu układu izolacyjnego. Próba oszacowania parametrów wnz wymaga bowiem określenia funkcji skalowania, uwzględniającej położenie defektu. Nie jest to zadanie łatwe, nawet dla nowych jednostek transformatorowych o dobrze znanej geometrii [17].

Wyniki badań potwierdzają, że wartość szczytowa sygnału na zacisku liniowym jest tym większa im bliżej niego występuje wyładowanie, a zastosowany model uzwojenia dobrze odwzorowuje kształt silnie nieliniowej *funkcji skalowania*. Równocześnie, należy zauważyć, że ze względu na rozkład napięcia na uzwojeniu, zarówno podczas normalnej pracy jak i w stanach przejściowych, w górnej jego części występują warunki polowe bardziej sprzyjające powstawaniu wnz. Oznacza to, że obszar o większym prawdopodobieństwie pojawienia się wnz daje równocześnie lepsze warunki dla uzyskania większej wartości stosunku sygnał/szum i wykrywania wyładowań.

Podziękowania

Część stanowiska laboratoryjnego oraz wykonanych badań zostały sfinansowane w ramach Grantu Rektorskiego AGH 2016 dla Studenckiego Koła Naukowego Elektroenergetyków „PIORUN”. Stanowisko to jest obecnie użytkowane zarówno dla prowadzenia prac badawczych jak i dla działalności dydaktycznej.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa, 2001
2. K. Raja, F. Devaux, S. Lelaidier: Recognition of discharge sources using UHF PD signatures, IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 18, no. 5, 2002, 8-14
3. M.D. Judd, L. Yang, I.B.B. Hunter: Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part I: Sensors and signal interpretation, IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 21, no. 2, 2005, pp. 5-14
4. M.D. Judd, L. Yang, I.B.B. Hunter: Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part I: Field experience, IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 21, no. 3, 2005, pp. 5-13
5. S. Coenen, S. Tenbohlen, S. M. Markalous; T. Strehl: Sensitivity of UHF PD measurements in power transformers, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 15, no. 6, 2008, 1553-1558
6. A. Akbari, P. Werle, M. Akbari, H. R. Mirzaei: Challenges in calibration of the measurement of partial discharges at ultra-high frequencies in power transformers, IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 32, no. 2, 2016, pp. 27-34
7. S. Zheng, Ch. Li, Z. Tang, W. Chang, M. He: Location of PDs inside transformer windings using UHF methods, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 21, no. 1, 2014, pp. 386-393
8. S. Coenen, S. Tenbohlen: Location of PD sources in power transformers by UHF and acoustic measurements, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. vol. 19, no. 6, 2012, pp. 1934-1940
9. S. N. Hettiwatte et al.: Simulation of a transformer winding for partial discharge propagation studies, IEEE Power Eng. Society Winter Meeting, 2002, vol. 2, pp. 1394-1399
10. S. D. Mitchell, J. S. Welsh, R. H. Middleton, B. T. Phung: Practical implementation of a narrowband high frequency distributed model for locating partial discharge in a power transformer, Proc. 2007 Electr. Insul. Conf. & Electr. Manuf. Expo, 2007, pp. 127-131
11. M. S. Naderi, T. R. Blackburn, B.T. Phung, M. S. Naderi, A. Nasiri: Application of wavelet analysis to the determination of partial discharge location in multiple- α transformer windings, Electr. Power Systems Research, vol. 78, no. 2, 2008, pp. 202-208
12. R. Mohamed, P.L. Lewin, G. Chen: Partial discharge estimation in a high voltage transformer using multi signal decomposition technique, Proc. 9th ICPADM, Harbin, China, 2009, pp. 425-328
13. V. Jeyabalan, S. Usa: Frequency domain correlation technique for PD location in transformer winding, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 16, no. 4, 2009, pp. 1160-1167
14. Z.-Y. Du et al.: Calculation of distribution parameters for research on propagation characteristic of PD in transformer winding, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009, 1-5
15. M. S. Abd Rahman, P. Rapisarda, P. L. Lewin: Partial discharge propagation inside a high voltage transformer winding: Comparison of measurement and simulation, 2012 IEEE CEIDP Annual Report, pp. 56-59
16. S. Zheng, Ch. Li, M. He: UHF PD signal attenuating characters when passing through transformer windings, 2013 IEEE CEIDP Annual Report, pp. 1205-1208
17. J. Szczechowski, K. Siodła, P. Werle: Lokalizacja wyładowań niezupełnych - pomiar funkcji przejścia na części aktywnej transformatora, Przegląd Elektrotechniczny, R. 90, nr 10, 2014, 157-159
18. N. H. Nik Ali et al.: Classification and localisation of multiple partial discharge sources within a high voltage transformer winding, 2016 IEEE EIC, pp. 519-522
19. Y. Meng, X. Zhao, Y. Cheng: Influence of the complex structure on the characteristics of EM wave from PD in power transformers, 2016 IEEE Int. Conf. on Dielectr. ICD, vol. 1, pp. 573-576

MODELLING PARTIAL DISCHARGE PULSES PROPAGATION IN THE WINDINGS OF POWER TRANSFORMERS USING LABORATORY STAND

Power transformers are one of the basic elements of the power system. The occurrence of partial discharge is a symptom of internal defects of their insulating system. Electrical signals caused by partial discharges are recorded on the line terminals that receive electrical signals propagating along the winding from the source of discharge. Depending on the location of the defect and the characteristic parameters of the electrical windings are changing parameters of the time-frequency signals observed in the place of its detection. The article presents the results of the propagation of pulses PD in models of transformer windings, compared to the results of numerical simulations. During the simulation takes into account the complex, multi-element structure of the windings of the transformer and its impact on the time-frequency characteristics of pulses recorded on a terminal line.

Keywords: transformer windings, partial discharges, localization, numerical modelling.