Doskonalenie lokalizacji wyładowań niezupełnych metodą triangulacyjną z wykorzystaniem cewki Rogowskiego

Przemysław Witkowski, Tomasz Boczar, Paweł Kurtasz
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

W artykule zostały opisane wybrane metody i sposoby lokalizacji wyładowań niezupełnych (WNZ) występujących w transformatorach elektroenergetycznych, mierzonych zmodyfikowaną metodą emisji akustycznej. Autorzy skupili się na możliwościach udoskonalenia wykorzystywanej podczas pomiarów diagnostycznych metody triangulacyjnej przez wykorzystanie cewki Rogowskiego. Jednocześnie wskazano na możliwość zastosowania analizy czasowo-częstotliwościowej do ustalenia drogi propagacji fali akustycznej generowanej przez WNZ. Porównano charakterystyki czasowe i czasowo-częstotliwościowe sygnałów WNZ pokonujących jednorodne i niejednorodne drogi propagacji fali akustycznej.

Słowa kluczowe: metoda emisji akustycznej, wyładowanie niezupełne, cewka Rogowskiego

Tematyka artykułu dotyczy doskonalenia metody emisji akustycznej (EA) w zastosowaniu do lokalizacji wyładowań niezupełnych (WNZ) wewnątrz izolacyjnych układów papierowo-olejowych transformatorów elektroenergetycznych. W praktyce pomiarowej wykorzystywane są dwie podstawowe metody lokalizacji WNZ, na bazie których powstały liczne modyfikacje.

Pierwszą z nich jest metoda największej głośności (osłuchowa), opierająca się na znalezieniu największych wartości amplitud sygnałów EA w obszarze kadzi transformatorowej. Druga metoda, nazywana metodą triangulacyjną, polega na pomiarze czasów opóźnienia, z jakimi sygnały EA, generowane przez źródła WNZ, dochodzą do przetworników pomiarowych umieszczonych w różnych punktach badanej kadzi transformatorowej [1].

Stosunkowo mało złożone założenia pomiarowe obydwu metod są słuszne, jednak w przypadku pomiarów na rzeczywistych obiektach energetycznych charakteryzujących się niejednorodnym ośrodkiem występują problemy związane z prawidłowym wyznaczeniem długości drogi i czasów propagacji sygnałów EA generowanych przez WNZ.

Przedstawione wyniki pomiarów i rozważania teoretyczne będą dotyczyć doskonalenia aparatu oceny lokalizacji miejsc generacji WNZ przy wykorzystaniu metody triangulacyjnej.

Zakłada się, że wewnątrz transformatora występują WNZ w miejscu oznaczonym współrzędnymi położenia P(x, y, z). Jednocześnie przyjęto, że na zewnętrznej ścianie kadzi (0, y, z) zostanie umieszczony przetwornik pomiarowy o położeniu x_{s1}, y_{s1}, z_{s1} oraz na ściankach o współrzędnych (x, 0, z) i (x, y, 0) zostaną umieszczone dodatkowe przetworniki oznaczone odpowiednio indeksami 2 i 3 (rys. 1).

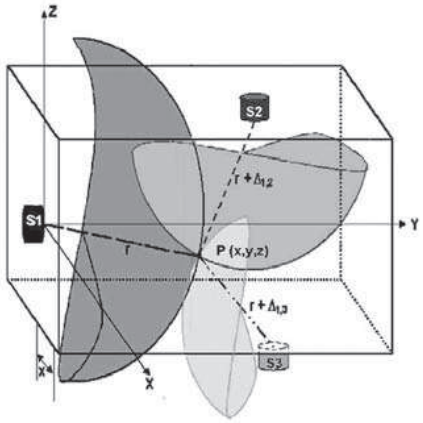
Przyjmując w modelu matematycznym punkty położenia przetworników za środki sfer, ich promienie będą zależne od prędkości propagacji fali akustycznej i czasu potrzebnego na pokonanie drogi od źródła WNZ do przetwornika. Wykonując tę operację w trzech płaszczyznach i wiedząc, że do kolejnych przetworników sygnał EA dotrze z opóźnieniem T, miejsce przecięcia się wyznaczonych sfer będzie położeniem źródła generacji WNZ.

$$(x-x_{s1})^2+(y-y_{s1})^2+(z-z_{s1})^2=(V_s*T)^2 \quad (1)$$

$$(x-x_{s2})^2+(y-y_{s2})^2+(z-z_{s2})^2=[V_s*(t_2+T)]^2 \quad (2)$$

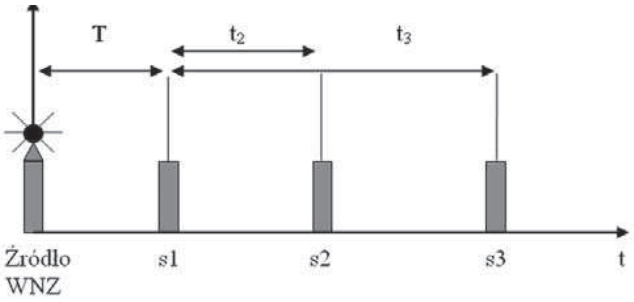
$$(x-x_{s3})^2+(y-y_{s3})^2+(z-z_{s3})^2=[V_s*(t_3+T)]^2 \quad (3)$$

gdzie: x, y, z – położenie źródła WNZ, $x_{s1,2,3}$, $y_{s1,2,3}$, $z_{s1,2,3}$ – położenie przetworników pomiarowych, V_s – prędkość rozchodzenia się fali akustycznej w danym ośrodku, t_2, t_3 – czasy opóźnienia dojścia sygnału do przetworników s_2, s_3.



Rys. 1. Sposób wykorzystania równań metody triangulacyjnej [2]
Fig. 1. Method the employment the equations of triangulation method [2]

O ile z wyznaczeniem t_2 i t_3 nie ma problemu (odczytuje się je bezpośrednio z przebiegów czasowych), istnieje poważny problem z określeniem czasu propagacji T, z jakim sygnał wygenerowany przez WNZ w postaci fali akustycznej pokona drogę od momentu wystąpienia WNZ do chwili zarejestrowania go przez przetwornik rozpoczynający zapis danych pomiarowych (rys. 2).



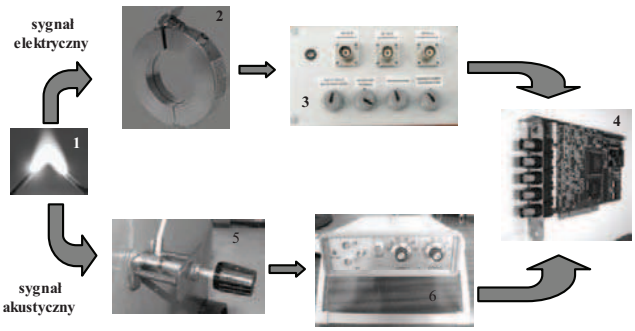
Rys. 2. Zależności czasowe sygnału EA od WNZ dochodzącego do kolejnych przetworników pomiarowych [3]

Fig. 2. The time dependences of signal EA from PD appear at the consecutive measuring converters [3]

Sposób wyznaczenia czasu T

Zaproponowany w artykule sposób wyznaczenia czasu T polega na zastosowaniu cewki Rogowskiego jako urządzenia wyzwalającego trigger karty pomiarowej. Cewka ta zaliczana jest do grupy transformatorów bezrdzeniowych, gdzie w uzwojeniu wtórnym indukuje się napięcie proporcjonalne do pochodnej pradu. Sygnał ten jest całkowany w integratorze tworząc przebieg załączający trigger karty pomiarowej.

Ponieważ sygnały elektryczne są wielokrotnie szybsze niż akustyczne, sygnał pochodzący z cewki Rogowskiego jest traktowany jako sygnał odniesienia do wyznaczenia czasu T. Na rys. 3 przedstawiono zaproponowany dwutorowy układ pomiarowy.

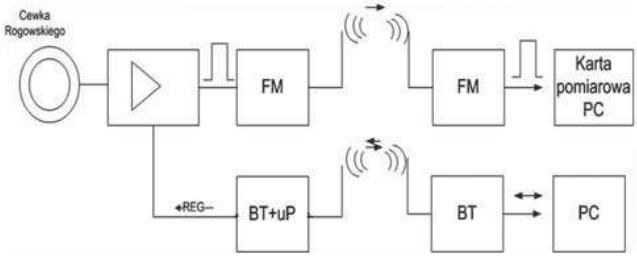


Rys. 3. Tor pomiarowy z wykorzystaniem cewki Rogowskiego: 1 – źródło WNZ, 2 – cewka Rogowskiego, 3 – integrator, 4 – karta pomiarowa, 5 – przetwornik pomiarowy, 6 – wzmacniacz

Fig. 3. Measuring track with use the Rogowski coil: 1 – PD source, 2 – Rogowski coil, 3 – integrator, 4 – measurement card, 5 – piezoelectric transducer, 6 – amplifier

Bezprzewodowy tor pomiarowy

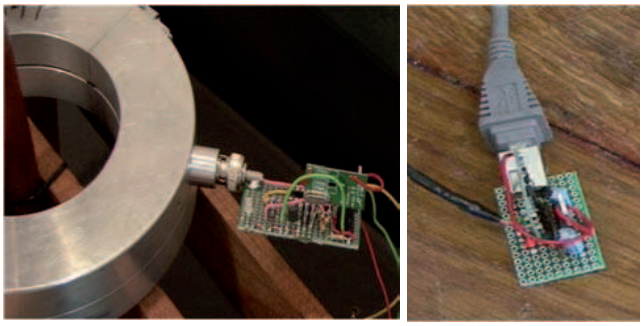
Cewka Rogowskiego mocowana na przewodach lub przepustach urządzeń elektroenergetycznych niejednokrotnie znajduje się pod wysokim napięciem, mogącym uszkodzić cały tor pomiarowy. Wobec tego problemu zaproponowano przesyłanie sygnału zadziałania cewki na trigger karty pomiarowej drogą radiową. Wykonany układ przesyłu bezprzewodowego składa się z dwóch torów transmisji. Pierwszym z nich jest jednokierunkowy nadajnik i odbiornik modulacji FM, służący do przesłania pomiaru zarejestrowanego przez cewkę. Natomiast w skład drugiego toru wchodzi dwukierunkowy nadajnik i odbiornik Bluetooth. Jego zadaniem jest wysterowanie sygnału o poziomie wykrywanym przez cewkę Rogowskiego, przesyłanego torem FM. Omówiony układ transmisji został przedstawiony na schemacie blokowym (rys. 4).



Rys. 4. Schemat blokowy radiowego toru transmisji sygnału rozpoczęcia pomiarów: FM – nadajnik/odbiornik radiowy modulacji FM, BT – moduł transmisji Bluetooth, PC – komputer pomiarowy z oprogramowaniem sterującym

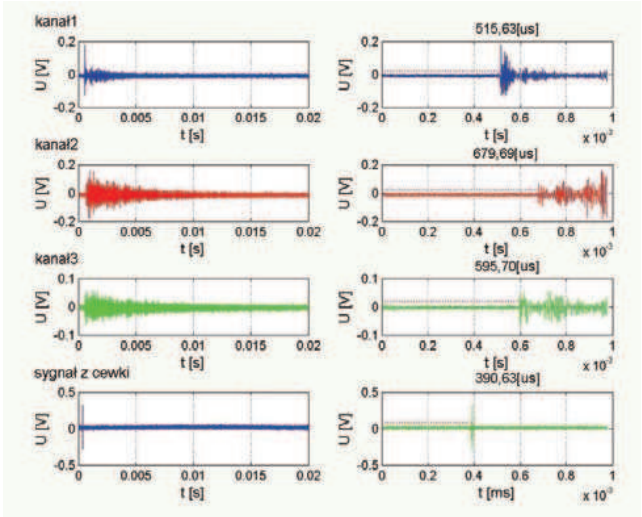
Fig. 4. The block diagram of wireless track of transmission signal beginning of measurements: FM – the transmitter/radioreceiver of modulation FM, BT – the module of transmission Bluetooth, PC – the measuring computer with master software

Na podstawie przedstawionego modelu skonstruowano tor transmisji bezprzewodowej (rys. 5).



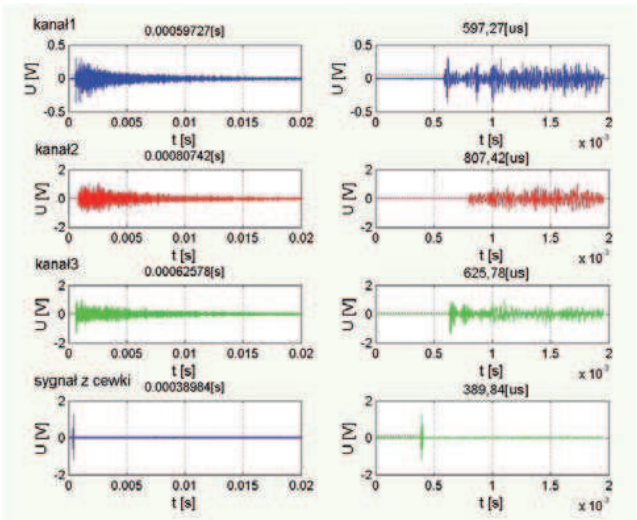
Rys. 5. Nadajnik (po lewej) i odbiornik (po prawej) do bezprzewodowej transmisji sygnałów z cewki Rogowskiego

Fig. 5. The transmitter (on the left side) and the receiver set (on the right side) of wireless transmission of signals from Rogowski coil



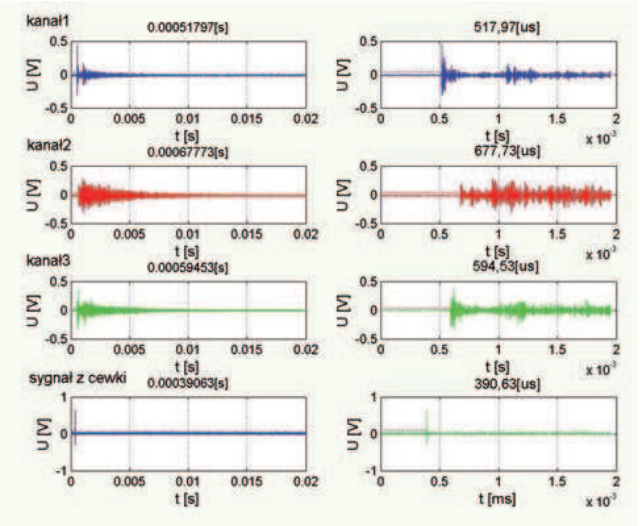
Rys. 6. Charakterystyka czasowa wyników uzyskanych z WNZ dla źródła o współrzędnych: x = 41 cm, y = 28,5 cm, z = 17 cm umieszczonego w samym oleju

Fig. 6. The time characteristic of PD measurement results for source about coordinate x = 41 cm, y = 28,5 cm, z = 17 cm, situated in only oil



Rys. 7. Charakterystyka czasowa wyników uzyskanych z WNZ dla źródła o współrzędnych: x =20,91 cm, y = 32 cm, z = 28 cm umieszczonego w samym oleju

Fig. 7. The time characteristic of PD measurement results for source about coordinate x = 20,91 cm, y = 32 cm, z = 28 cm, situated in only oil



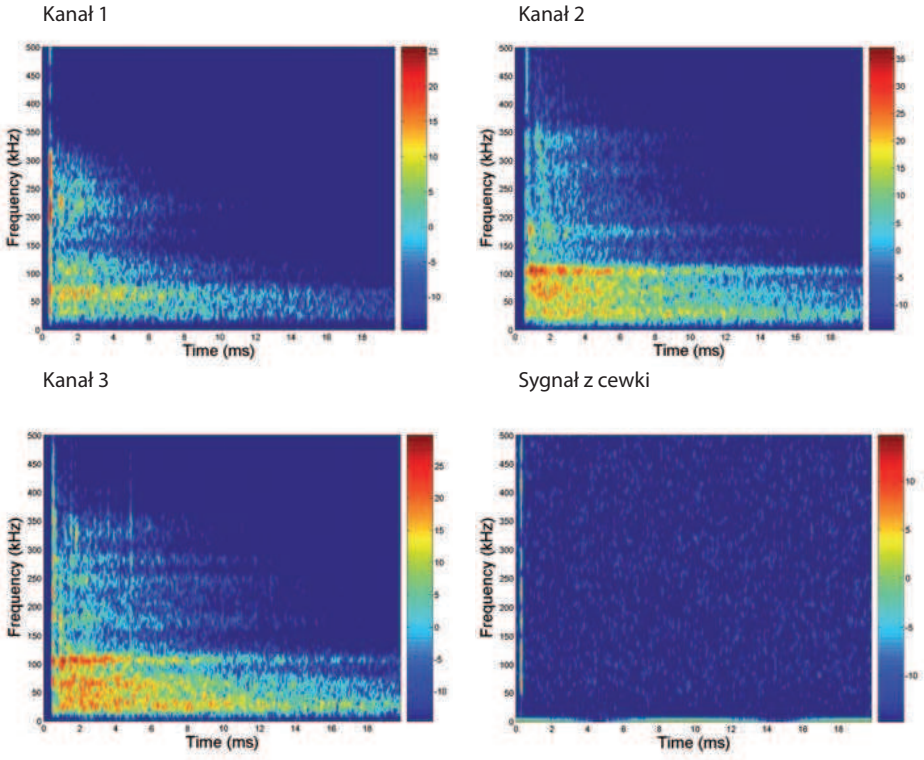
Rys. 8. Charakterystyka czasowa wyników uzyskanych z WNZ dla źródła o współrzędnych: x = 41 cm, y = 28,5 cm, z = 17 cm umieszczonego w oleju z przegrodami

Fig. 8. The time characteristic of PD measurement results for source about coordinate x = 41 cm, y = 28,5 cm, z = 17 cm, situated in oil with barriers

W tak zmodyfikowanym torze pomiarowym, służącym do lokalizacji WNZ w papierowo-olejowych układach izolacji urządzeń elektroenergetycznych, przeprowadzono szereg pomiarów, których część została przedstawiona w artykule.

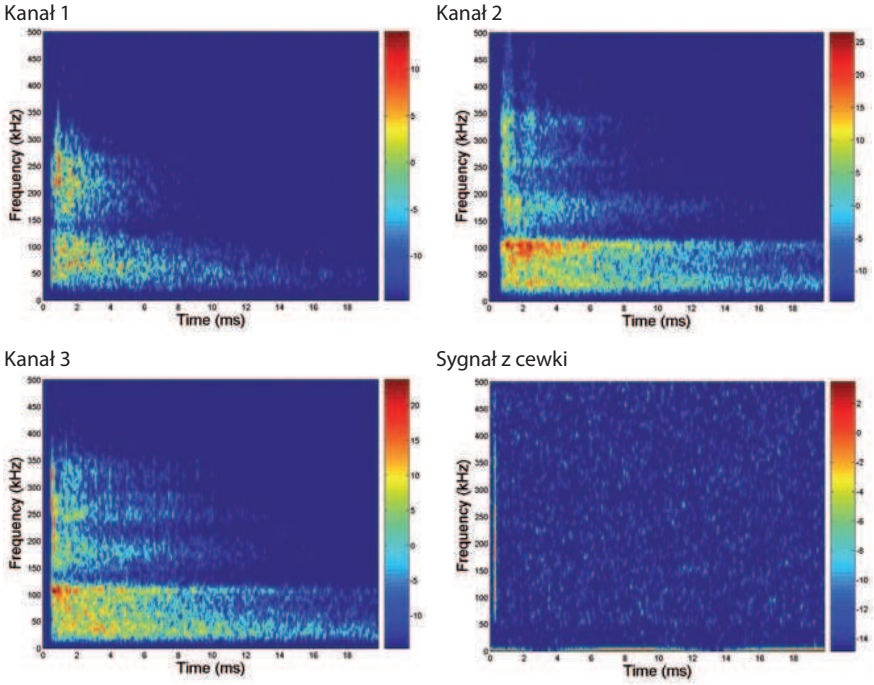
Analiza uzyskanych pomiarów

Aby sprawdzić poprawność działania zaproponowanych modyfikacji metody triangulacyjnej pomiary wykonano w dwóch etapach. W pierwszej kolejności kadź była wypełniona tylko olejem elektroizolacyjnym, następnie w tej samej kadzi umieszczano przegrody z preszpanu, stali, miedzi itp. Na podstawie uzyskanych pomiarów wykonano analizę czasową. Uzyskane wyniki zaprezentowano w trzech grupach: dwa zestawy pomiarów dla kadzi wypełnionej samym olejem, ale o różnym położeniu źródła WNZ, oraz jeden pomiar dla kadzi wypełnionej olejem z układem modelującym wielorodną drogę propagacji (w tym przypadku położenie źródła było tożsame z położeniem w pierwszym pomiarze). Wyniki analizy czasowej są na rys. 6, 7 i 8. W lewej kolumnie jest przedstawio-



Rys. 9. Charakterystyka czasowo-częstotliwościowa wyników uzyskanych z WNZ dla źródła o współrzędnych: x = 41 cm, y = 28,5 cm, z = 17 cm umieszczonego w samym oleju

Fig. 9. The time-frequency characteristic of PD measurement results for source about coordinate x = 41 cm, y = 28,5 cm, z = 17 cm, situated in only oil



Rys. 10. Charakterystyka czasowo-częstotliwościowa wyników uzyskanych z WNZ dla źródła o współrzędnych: x = 20,91 cm, y = 32 cm, z = 28 cm umieszczonego w samym oleju

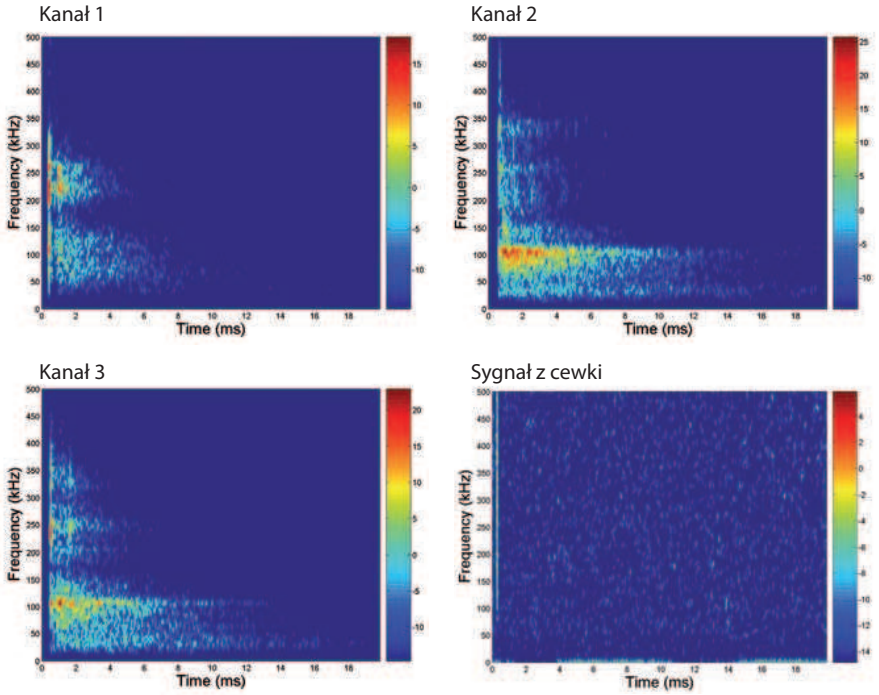
Fig. 10. The time-frequency characteristic of PD measurement results for source about coordinate x = 20,91 cm, y = 32 cm, z = 28 cm, situated in only oil

ny przebieg zarejestrowany w czasie jednego okresu napięcia zasilania, natomiast w prawej kolumnie przebieg po przeskalowaniu ułatwiającym większą precyzję odczytu.

Na podstawie przeprowadzonych analiz czasowych można zauważyć, że czas, w którym sygnały EA docierają od źródła WNZ do przetwornika pomiarowego, zależy w większym stopniu od odległości między nimi niż od drogi propagacji. Może to być spowodowane zbyt małym wpływem dróg niejednorodnych w porównaniu z głównym medium, jakim był olej transformatorowy.

Propagacja fali w ośrodku niejednorodnym

Rozważając rzeczywisty układ propagacji fali akustycznej należy brać pod uwagę nie tylko ośrodek jednorodny, jakim jest olej transformatorowy (w którym fala akustyczna



Rys. 11. Charakterystyka czasowo-częstotliwościowa wyników uzyskanych z WNZ dla źródła o współrzędnych: x = 41 cm, y = 28,5 cm, z = 17 cm umieszczonego w oleju z przegrodami

Fig. 11. The time-frequency characteristic of PD measurement results for source about coordinate x = 41 cm, y = 28,5 cm, z = 17 cm, situated in oil with barriers

rozchodzi się z prędkością Vośr równą ok. 1415 m/s), ale również stalowy rdzeń (Vośr = 5100 m/s), uzwojenia miedziane (Vośr = 3570 m/s) i papier elektroizolacyjny (Vośr = 1500 m/s). Stąd w obliczeniach zmierzających do określenia obszarów generacji WNZ należy uwzględnić prędkość wypadkową propagacji fali akustycznej ośrodka złożonego.

W obliczeniach należy brać pod uwagę wpływ załamania, odbicia i pochłaniania części energii emitowanej przez źródło WNZ w postaci fali akustycznej. Jednakże, o ile w rozpatrywanych przypadkach warstwy propagacji miały niewielki wpływ na wynik analizy czasowej, o tyle w dużym stopniu wpłynęły na wyniki analizy czasowo-częstotliwościowej. W dalszej części zostanie przedstawiona analiza czasowo-częstotliwościowa dla przebiegów z rys. 6, 7 i 8. Na rys. 9 zamieszczono spektrogramy poszczególnych kanałów, uzyskane na podstawie wyników z WNZ dla źródła o współrzędnych: x = 41 cm, y = 28,5 cm, z = 17 cm umieszczonego w samym oleju.

Na rys. 10 przedstawiono spektrogramy poszczególnych kanałów uzyskanych na podstawie wyników z WNZ dla źródła o współrzędnych: x = 20,91 cm, y = 32 cm, z = 28 cm umieszczonego w samym oleju.

Na rys. 11 przedstawiono spektrogramy poszczególnych kanałów uzyskanych na podstawie wyników z WNZ dla źródła o współrzędnych: x = 41 cm, y = 28,5 cm, z = 17 cm umieszczonego w oleju z przegrodami.

Analizując poszczególne grupy spektrogramów można dostrzec wyraźne podobieństwa i różnice w występowaniu poszczególnych pasm częstotliwości. W układach z niejednorodnymi warstwami propagacji można zaobserwować występowanie tłumienia dla wybranych pasm w funkcji czasu.

Wnioski

Należy podkreślić, że istnieje możliwość przybliżonej lokalizacji WNZ wewnątrz urządzeń elektroenergetycznych metodą EA z wykorzystaniem cewki Rogowskiego. W obiekcie rzeczywistym, jakim jest transformator elektroenergetyczny, analiza otrzymanych wyników może okazać się błędna, jeżeli w poprawny sposób nie zostanie uwzględniona zależność różnych dróg propagacji fali akustycznej. W dalszych badaniach autorzy zamierzają powiązać wyniki analiz czasowo-częstotliwościowych z drogami propagacji fali akustycznej. Ponadto zostaną przeprowadzone prace zmierzające do zamodelowania warunków propagacji fal akustycznych w jednorodnych i niejednorodnych ośrodkach z wykorzystaniem oprogramowania COMSOL Multiphysics.

Praca współfinansowana z projektu badawczego własnego nr TBW-3511/B/T02/2009/37

Bibliografia

1. Boczar T.: *Laboratorium techniki wysokich napięć*. Skrypt nr 282, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2008.
2. Markalous S.M.: *Detection and localization of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals*. Stuttgart, 2006.
3. Sikorski W.: *Identyfikacja defektów wybranych układach izolacyjnych na podstawie analizy sygnałów emisji akustycznej*, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 2006, s. 40–41.
4. Szymaniec S.: *Diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych z wykorzystaniem cewek Rogowskiego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 72/2005, s. 167–173.
5. Lundgaard L.E.: *Partial Discharge – Part XIII: Acoustic Partial Discharge Detection – Fundamental Considerations*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 8, No. 4, July/August 1992.

Improvement the location of the partial discharges by the triangulation method with use the Rogowski coil

In this paper, results of a study on acoustic emission (AE) signals, which arise during partial discharges (PDs) generation inside a transformer tank filled with synthetic oil, are described. It was made an effort to use the Rogowski coil to improve the localization of PDs method. Precisely the Rogowski coil is used to determine the propagation time. The signals are registered as a function of time.

Keywords: acoustic emission method, partial discharges Rogowski coil

dr hab. inż. Tomasz Boczar, prof. PO



Prodziekan Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Kierownik Zakładu Wysokich Napięć Politechniki Opolskiej. Autor ponad 160 publikacji z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.

e-mail: t.boczar@po.opole.pl

mgr inż. Przemysław Witkowski



Student studiów doktoranckich w dyscyplinie elektrotechnika prowadzonych na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechniki Opolskiej. Zainteresowania naukowe obejmują fizykalne aspekty zjawisk, występujących w urządzeniach energetycznych, zwłaszcza w zakresach najwyższych napięć.

e-mail: przemo1982@poczta.fm

mgr inż. Paweł Kurtasz



Student studiów doktoranckich w dyscyplinie elektrotechnika prowadzonych na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechniki Opolskiej. Zainteresowania naukowe obejmują fizykalne aspekty zjawisk, występujących w urządzeniach energetycznych, zwłaszcza w zakresach najwyższych napięć.

e-mail: pawelkurtasz@wp.pl