

## Komplementarne wykorzystanie metody elektrycznej i akustycznej do analizy modelowych źródeł wyładowań niezupełnych

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano wstępne wyniki badań wykonanych na modelowych źródłach wnz w celu ustalenia czy możliwe jest zwiększenie funkcjonalności metody emisji akustycznej (EA) tak aby uzyskiwać za jej pomocą informację o poziomie ładunku pozornego lub innego parametru mierzonego metodą elektryczną.

**Abstract.** The article presents the preliminary results of tests carried out on the modeled PD sources in order to determine whether it is possible to increase the functionality of the acoustic emission methods (AE) to obtain for its help information about the value of apparent charge or other parameter measured by electric method. (**The complementary use of electric and acoustic method for the analysis of model PD sources**).

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezupełne, ładunek pozorny, metoda elektryczna, metoda emisji akustycznej.

**Keywords:** partial discharges, apparent charge, electric method, acoustic emission method.

doi:10.12915/pe.2014.10.33

### Wprowadzenie

Pomiar wyładowań niezupełnych (wnz) jest uznaną metodą diagnozowania stanu układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych można wykrywać, mierzyć i lokalizować różnymi metodami. Wykorzystuje się w tym celu rozmaite efekty i zjawiska fizyczne towarzyszące wyładowaniom, takie jak:

- impulsy prądowe i związaną z nimi emisję fal elektromagnetycznych (metoda elektryczna),
- chemiczne przemiany materiałów izolacyjnych (metoda chromatografii gazowej),
- udarowe odkształcenia sprężyste i towarzyszącą im emisję fal akustycznych (metoda emisji akustycznej),
- emisja promieniowania świetlnego (metoda spektrofotometrii optycznej),
- lokalny wzrost temperatury w obszarze wyładowania (metoda termowizyjna),
- zmiany ciśnienia gazu w kanale wyładowania (pomiar zmian ciśnienia) [1].

Praktyczne znaczenie mają obecnie trzy pierwsze metody, przy czym metoda chromatografii gazowej może być wykorzystana tylko do diagnozowania układów izolacyjnych zawierających ciecz elektroizolacyjne. Metody: spektrofotometrii optycznej, termowizyjna i pomiaru zmian ciśnienia mają obecnie marginalne znaczenie praktyczne, z powodu bardzo słabych i trudno mierzalnych efektów wnz rejestrowanych tymi metodami. Najbardziej praktycznymi i jednocześnie uniwersalnymi metodami pomiaru wnz (mającymi zastosowanie do różnych typów układów izolacji) są zatem metoda elektryczna i metoda emisji akustycznej (EA). Niestety obie te metody mają pewne wady ograniczające możliwość ich stosowania. Klasyczna metoda elektryczna nie może być w zasadzie stosowana, w warunkach eksploatacyjnych (w miejscu zainstalowania urządzeń elektroenergetycznych) natomiast przy pomocy metody EA nie można określić rodzaju i intensywności wnz oraz wartości ładunku pozornego. Dopuszczalne poziomy wartości ładunku pozornego dla danego układu izolacji są określane w normach i innych zaleceniach, a zatem znajomość tej wartości ma istotne znaczenie dla diagnostów układów izolacyjnych.

Autorzy referatu postanowili sprawdzić, czy jest możliwe zwiększenie funkcjonalności metody EA o możliwość określania w czasie pomiarów poziomu ładunku pozornego (parametru ściśle elektrycznego) lub innego parametru mierzonego zazwyczaj metodą elektryczną. W referacie

zaprezentowano wstępne wyniki badań. Ograniczono się do układu izolacji jednorodnej, w postaci elektrotechnicznego oleju mineralnego, którym wypełniono specjalnie w tym celu przygotowaną kadź. Model źródła wnz stanowiła elektroda wysokonapięciowa w postaci zanurzonego w oleju ostrza, oddalonego na pewną odległość od uziemionej płyty. Fale elektromagnetyczne i akustyczne, generowane przez występujące w takim układzie wyładowania niezupełne, rejestrowano jednocześnie metodą elektryczną i metodą EA.

### Metoda elektryczna pomiaru wyładowań niezupełnych

Metodą elektryczną można mierzyć rozmaite parametry charakteryzujące intensywność wyładowań niezupełnych, a do podstawowych zalicza się ładunek pozorny, związany z poszczególnymi impulsami prądowymi oraz częstość impulsów, związaną z długością okresu przebiegu czasowego napięcia pomiarowego. Do badań stosuje się specjalne, elektroniczne (skomputeryzowane) mierniki wyładowań niezupełnych. Przykładem takiego urządzenia jest detektor, analizator i rejestrator wyładowań niezupełnych typu TE 571. Urządzenie to można zaliczyć do grupy układów z komputerowym wspomaganie badań. TE 571 umożliwia wykonywanie pomiarów intensywności wyładowań niezupełnych, zgodnie z wymaganiami stawianymi w tym zakresie przez IEC [4].

Wykorzystując elektryczne metody detekcji i pomiaru wnz oraz wbudowane algorytmy analizy danych, TE 571 umożliwia uzyskanie rozkładów: fazowych, amplitudowych i amplitudowo-fazowych mierzonych wielkości [3]. TE 571 oferuje pomiar sygnału w zakresie częstotliwości napięcia probierczego od 40 Hz do 420 Hz. Zakres pomiarowy ładunku pozornego mieści się w granicach od 0 do 999 nC, natomiast szerokość pasma pomiarowego zawiera się w granicach 40 - 400 kHz. Po wykonaniu pomiarów uzyskuje się łącznie 23 rozkłady oraz przebiegi czasowe opisujące badany rodzaj wnz. Są to [2]:

- rozkłady fazowe: wartości maksymalnej i średniej ładunku pozornego, liczby wyładowań, sumy ładunków (także w funkcji czasu);
- rozkłady intensywności wyładowań w funkcji wartości ładunku pozornego oraz w funkcji energii wnz;
- wielkości opisujące rozkład parametrów charakterystycznych wnz w dziedzinie czasu, takie jak: wartość maksymalna i średnia ładunku pozornego, wartość chwilowa prądu wyładowań niezupełnych, wartość maksymalna i średnia energii wyładowań, wartość chwilowa mocy wyładowań, wartość chwilowa

napięcia zapłonu i gaśnięcia wyładowań, liczba impulsów wyładowań, wartość chwilowa wskaźnika D;

- rozkłady amplitudowe intensywności i energii wyładowań w funkcji czasu;
- rozkłady amplitudowo-fazowe intensywności wnz: 3–D oraz tzw. „Color”.

Tak szeroki opis wyładowań niepełnych w badanym obiekcie pozwala, w założeniu, na określenie ich rodzaju i charakteru. Jednak każda z wymienionych wielkości zawiera tylko część informacji jakościowej i ilościowej o wnz. Podstawą do identyfikacji wnz występujących w badanym układzie izolacyjnym jest jednoczesna analiza informacji zawartej w poszczególnych rozkładach. Taką możliwość w urządzeniu TE 571 uzyskano poprzez implementację oprogramowania TE 571 DSW (TEAS). Narzędzia statystyczne zawarte w tej aplikacji umożliwiają uzyskanie pokąźnego zbioru parametrów opisujących badany obiekt (układ izolacyjny) [2, 6, 7].

### Metoda emisji akustycznej pomiaru wyładowań niepełnych

Metody EA w badaniach diagnostycznych bazują na osiągnięciach elektroakustyki. Wykorzystuje się tutaj zjawisko polegające na tym, że podczas wyładowań niepełnych i towarzyszących im procesów jonizacyjnych niewielka część energii elektrycznej w kanałach wyładowań zamienia się bardzo dynamicznie w energię mechaniczną, emitując złożony sygnał akustyczny. Zjawisko emisji akustycznej objawia się więc powstawaniem i propagacją fal sprężystych o częstotliwości akustycznej, wygenerowanych w ośrodku materialnym, podczas zachodzących w nim procesów wyładowań. Fale sprężyste rozchodzą się od źródła wyładowań do granic ośrodka i mogą być rejestrowane przez czujniki (przetworniki) pomiarowe jako impulsy akustyczne. Podstawowymi rodzajami szerokopasmowych przetworników mierzących impulsy akustyczne są hydrofony (umieszczane wewnątrz lub na zewnątrz kadzi) oraz przetworniki stykowe rezonansowe i mikrofonowe.

Źródłem informacji o badanym zjawisku są sygnały akustyczne, pochodzące ze źródła wyładowań niepełnych, które dochodzą do przetwornika pomiarowego (razem z nałożonymi na nie zakłóceniami wewnętrznymi). Przetwornik przekształca je na sygnały elektryczne i wraz z zakłóceniami zewnętrznymi przesyła do bloku obróbki sygnałów elektrycznych. Po wzmocnieniu i przefiltrowaniu sygnały dochodzą do analizatora emisji akustycznej lub karty pomiarowej przenośnego komputera. Metoda emisji akustycznej stanowi ważne uzupełnienie metod pomiarowych, stosowanych w diagnostyce układów izolacyjnych. Istotną zaletą tej metody jest możliwość stosowania nawet w bardzo trudnych warunkach eksploatacji. Metoda ta umożliwia detekcję (stwierdzenie występowania) i (co jest bardzo ważne) lokalizację wyładowań niepełnych podczas pracy urządzenia. Problemami w jej stosowaniu są natomiast:

- występowanie na drodze propagacji sygnałów EA wielu warstw materiałowych o różnych współczynnikach tłumienia i odbicia - co utrudnia precyzyjny pomiar intensywności wnz, zwłaszcza w rzeczywistych układach izolacyjnych,
- wysoki poziom zakłóceń akustycznych,
- złożony kształt geometryczny badanych obiektów (np. urządzeń elektroenergetycznych), co utrudnia zamocowanie do ich powierzchni przetworników pomiarowych,
- występowanie dielektryków stałych o małym współczynniku sprężystości i złożonym ukształtowaniu.

Autorzy artykułu uniknęli ww. problemów gdyż, jak wcześniej wspomniano, w czasie pomiarów, których wyniki

zaprezentowano poniżej, propagacja fali akustycznej odbywała się w jednorodnym ośrodku izolacyjnym (oleju), a gładkie ściany kadzi nie sprawiały trudności w montażu przetworników pomiarowych. Nie znaczy to, że w kolejnych etapach badań wyklucza się bardziej złożone układy izolacyjne. Na tym etapie skupiono się jednak na poszukiwaniu jakichkolwiek zależności między parametrami sygnałów elektrycznych i akustycznych.

Do pomiarów EA wnz stosowano aparaturę wykonaną w Katedrze Optoelektroniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej, na podstawie opracowanej tam metody pomiarowej. Zarówno metoda jak i aparatura zostały wielokrotnie zweryfikowane i są wysoko oceniane przez fachowców [2, 5, 6, 7]. Aparaturę stanowi współpracujący z komputerem wielokanałowy analizator EA, w którym każdy tor pomiarowy zawiera: czujnik EA, przedwzmacniacz, wzmacniacz główny i filtr (zależnie od potrzeb pasmowy lub górnoprzepustowy) oraz układy do wyznaczania deskryptorów EA a także układy do rejestracji i dalszej zaawansowanej analizy sygnałów EA. Rejestracja i wstępna „obróbka” sygnałów EA realizowana jest za pośrednictwem kart pomiarowych i odpowiednich programów komputerowych.

Analiza sygnałów EA wykonywana jest w dziedzinach: czasu, progu dyskryminacji, częstotliwości i czasowo-częstotliwościowej. Wynikające z analizy sygnałów EA charakterystyczne właściwości procesu nazywane są deskryptorami EA. W dziedzinie czasu, w analizie amplitudowej sygnałów EA, najczęściej używa się następujących deskryptorów:

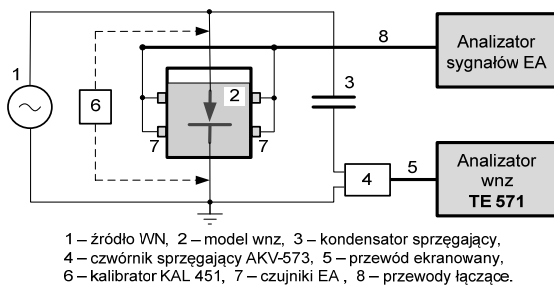
- $U_{\max}$  - chwilowa wartość maksymalna sygnału (*amplituda, wartość szczytowa*),
- $U_{\text{mm}} = U_{\max} - U_{\min}$  - chwilowa wartość międzyszczytowa (*amplituda całkowita, amplituda podwójna*) będąca różnicą chwilowych wartości maksymalnej i minimalnej sygnału,
- $U_{\text{rms}} = \sqrt{T^{-1} \int_0^T U^2(t) dt}$  - wartość skuteczna mocy sygnału,
- $U_{\max}/U_{\text{rms}}$  - współczynnik szczytu.

### Źródło wyładowań niepełnych i metoda analizy parametrów sygnału elektrycznego i akustycznego

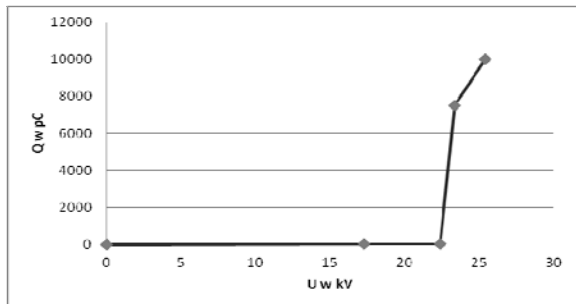
Źródłem modelowym wnz, którego parametry wyznacza no jednocześnie metodą elektryczną i metodą EA, był układ składający się z elektrody wysokonapięciowej w kształcie ostrza oraz oddalonej od niej o 36,5 mm uziemionej płyty. Układ ten zanurzono w wykonanej specjalnie do tego typu badań kadzi - wypełnionej czystym technicznie, mineralnym olejem transformatorowym (rys.1). Pomiaru rozpoczęto od wyznaczenia napięcia zapłonu  $U_z$  - czyli napięcia probierczego, przy którym „zapalały” się wyładowania niepełne (rys.2). Dla opisywanego układu  $U_z = 23$  kV.

W prezentowanej poniżej analizie badano zależności między wielkościami opisującymi sygnał elektryczny, takimi jak:

- wartość napięcia probierczego (determinującego powstanie wnz),
  - wartość średnia ładunku pozornego wnz,
  - liczba impulsów wnz,
- oraz wielkościami opisującymi sygnał akustyczny, takimi jak:
- wartość maksymalna i międzyszczytowa,
  - wartość skuteczna mocy sygnału,
  - współczynnik szczytu.



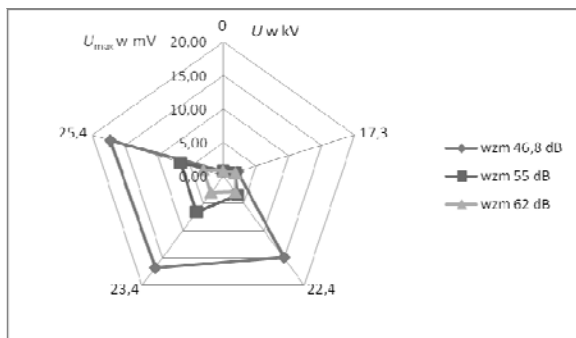
Rys.1. Schemat ideowy układu pomiarowego



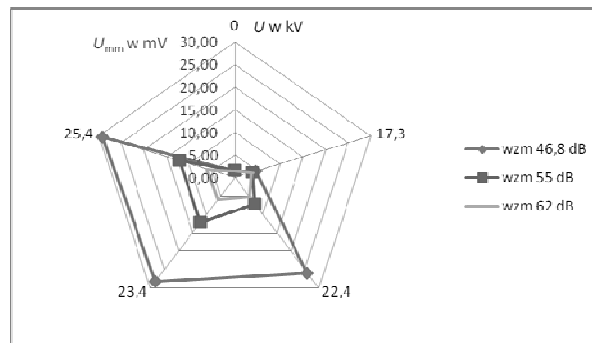
Rys.2. Ładunek pozorny modelowego źródła wnz w funkcji napięcia probierczego

Szukano związku pomiędzy różnymi parami tych parametrów. Szczególnie istotne było znalezienie związku między napięciem probierczym a wybranym deskryptorem, bowiem w następstwie możliwe było przyporządkowanie określonej wartości deskryptora EA do konkretnej wartości wielkości elektrycznej, np. ładunku pozornego.

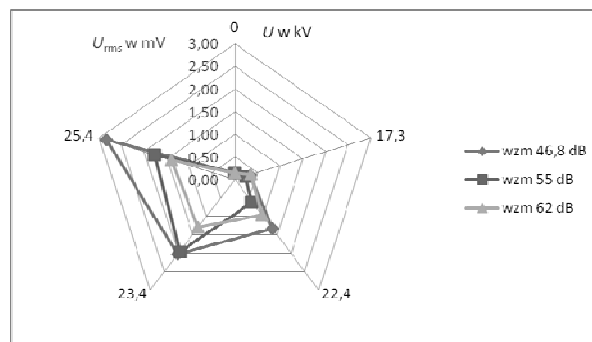
Sprawdzano zatem czy istnieje zależność między wybranymi deskryptorami sygnału akustycznego ( $U_{max}$ ,  $U_{mm}$ ,  $U_{rms}$  i  $U_{max}/U_{rms}$ ) a napięciem probierczym (szczególną uwagę zwracano na wpływ napięcia zapłonu - utrzymują się na mniej więcej stałym poziomie). Najwyraźniej uwidacznia się to dla wartości maksymalnej  $U_{max}$  i międzyszczytowej sygnału akustycznego  $U_{mm}$  (rys.7), najmniej dla współczynnika szczytu  $U_{max}/U_{rms}$ . W dalszej części artykułu przedstawiono nieco szerzej zależność między wyznaczanym w metodzie EA deskryptorem  $U_{mm}$  a najbardziej istotnym dla praktyki diagnostycznej parametrem jakim jest - mierzony metodą elektryczną - ładunek pozorny.



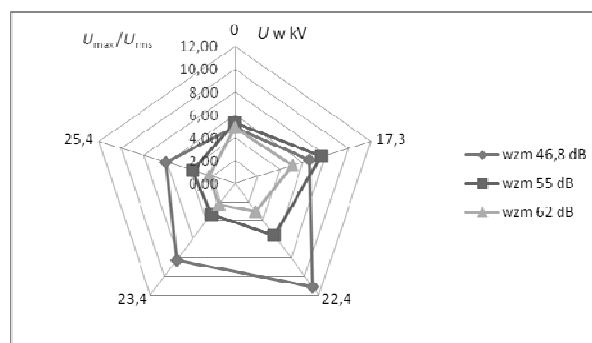
Rys.3. Zależność wartości maksymalnej sygnału akustycznego od napięcia probierczego dla różnych wzmocnień sygnału akustycznego



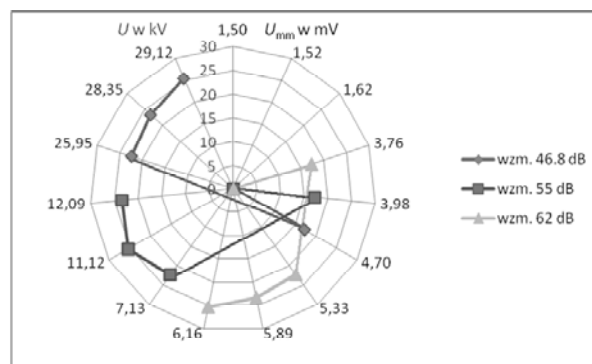
Rys.4. Zależność wartości międzyszczytowej sygnału akustycznego od napięcia probierczego dla różnych wzmocnień sygnału akustycznego



Rys.5. Zależność wartości skutecznej mocy sygnału akustycznego od napięcia probierczego dla różnych wzmocnień sygnału akustycznego



Rys.6. Zależność współczynnika szczytowego sygnału akustycznego od napięcia probierczego dla różnych wzmocnień sygnału akustycznego

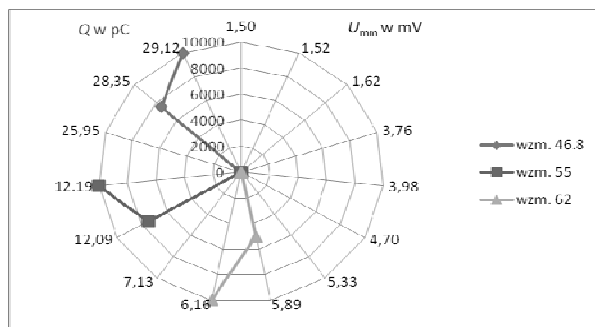


Rys.7. Współzależność między napięciem probierczym a wartością międzyszczytową sygnału akustycznego dla różnych wzmocnień sygnału akustycznego

## Analiza zależności wybranych parametrów wnz od wartości międzyszczytowej sygnału akustycznego

Na rysunku 8 pokazano zależność wartości ładunku pozornego od wartości międzyszczytowej  $U_{mm}$  i wzmocnienia sygnału akustycznego.

Z zaprezentowanych wykresów wynika, że dla jednorodnego dielektryka ciekłego istnieje możliwość szacowania wartości ładunku pozornego na podstawie Analizy deskryptorów sygnału akustycznego. W przedstawionych przykładach widoczne jest np., że zależność między wartością ładunku pozornego a wartością międzyszczytową sygnału EA ma w pewnym zakresie charakter zależności liniowej. A zatem, w czasie pomiaru sygnału akustycznego istnieje możliwość określania wartości ładunku pozornego na podstawie prostej analizy jednego lub kilku z licznych deskryptorów tego sygnału.



Rys.8. Zależność wartości maksymalnego ładunku pozornego - mierzonego metodą elektryczną - od wartości międzyszczytowej sygnału akustycznego - mierzonego metodą EA przy różnych wzmocnieniach

W określonych przedziałach zmian wartości deskryptora EA można to czynić za pomocą zależności liniowych, dopasowanych do wielkości wzmocnienia sygnału. W analizowanym przypadku mogłyby to być następujące przybliżone zależności:

- $Q = 3253,5 \cdot U_{mm} - 84731$  - dla wzmocnienia 46,8 dB,
- $Q = 26042 \cdot U_{mm} - 307448$  - dla wzmocnienia 55 dB,
- $Q = 18450 \cdot U_{mm} - 103646$  - dla wzmocnienia 62 dB,
- gdzie  $Q$  jest w pC a  $U_{mm}$  w mV.

Oczywistym jest, że powyższe zależności są słuszne dopiero po pojawieniu się w oleju wylądowań niepełnych i obowiązują wyłącznie dla oleju mineralnego, podanych wartości wzmocnienia i analizowanego układu. Dla innych źródeł wnz, innych (jednorodnych) układów izolacji (dielektryków stałych) i innych wzmocnień, zależności takie będą miały prawdopodobnie inną postać. Moment rozpoczęcia mierzenia ładunku przy pomocy deskryptorów sygnału akustycznego możliwy jest do wychwycenia na podstawie analizy zmiany wartości tych deskryptorów

w czasie podnoszenia napięcia probierczego podawanego na badany układ.

## Podsumowanie

Intencją autorów niniejszego artykułu nie było zaprezentowanie uniwersalnej metody wyznaczenia wartości parametrów wylądowań niepełnych (głównie ładunku pozornego) na podstawie pomiaru parametrów sygnału akustycznego towarzyszącego takim wylądowaniom. Przedstawiono wstępne wyniki badań wykonanych na modelowych źródłach wnz w celu ustalenia czy możliwość opracowania takiej metody w ogóle istnieje. Dla prostego modelu ostrze – płyta uziemiona zanurzonego w oleju, stwierdzono, że taka możliwość istnieje. W celu stworzenia bardziej uniwersalnej metody, konieczne są jednak badania bardziej złożonych układów modelowych i ich weryfikacja w warunkach rzeczywistych. Autorzy zamierzają podejmować tego typu prace.

## LITERATURA

- [1] Gacek Z., Wysokonapięciowa Technika Izolacyjna, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 2005
- [2] Gacek Z, Szadkowski M., Duda D., Witos W., Poszukiwanie kompleksowej metody pomiaru, identyfikacji i lokalizacji wylądowań niepełnych w wysokonapięciowych układach izolacyjnych. *Przegląd Elektrotechniczny*, R.80 nr 9/2004., 821 – 824
- [3] Witos F., Badanie wylądowań niepełnych metodą emisji akustycznej i metodą elektryczną, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 2008
- [4] Partial Discharge Detector Type TE 571 – Operation Manual, *Tettex Instruments v. 4.0* (2000)
- [5] Witos F., Szrszeń G., Setkiewicz M., Opilski Z., Gacek Z., Urbańczyk M., Komputerowy system pomiarowy sygnałów emisji akustycznej 8EA-WNZ dedykowany do badań wylądowań niepełnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.88 nr 11b/2012, 146-149
- [6] Szadkowski M., Gacek Z., Witos F., Malitowski G., Urbańczyk M., Duda D., Maźniewski K., Diagnostowanie transformatorów WN metodą łączną pomiaru wylądowań niepełnych. *Transformator '11. Międzynarodowa konferencja, Toruń, 01-03.06.2011*. Poznań: Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, 2011, 2.1/1-9
- [7] Gacek Z., Szadkowski M., Witos F., Malitowski G., Maźniewski K., Duda D., Idea zespolonej metody diagnostowania transformatorów energetycznych wysokiego napięcia opartej na pomiarach wnz. *Konferencja Zarządzanie eksploatacją transformatorów*, Wisła-Jawornik 2010, 95-104

**Autorzy:** dr inż. Dominik Duda, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: [dominik.duda@polsl.pl](mailto:dominik.duda@polsl.pl); dr inż. Krzysztof Maźniewski, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: [krzysztof.mazniewski@polsl.pl](mailto:krzysztof.mazniewski@polsl.pl); dr inż. Marek Szadkowski, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: [marek.szadkowski@polsl.pl](mailto:marek.szadkowski@polsl.pl).