



Marceli KAŹMIERSKI<sup>1</sup>, Robert ŁAWSKI<sup>1</sup>, Krzysztof BUGAJNY<sup>1</sup>, Ryszard SOBOCKI<sup>2</sup>

Instytut Energetyki Oddział Transformatorów w Łodzi (1),  
Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. Departament Infrastruktury Sieciowej (2)

## Zastosowanie akustycznej metody pomiaru wylądowań niezupełnych do oceny stanu izolacji przekładników prądowych

**Streszczenie:** Dokonano porównania wyników badań wnz w przekładnikach prądowych instalowanych w sieciach 110, 220 i 400kV przeprowadzonych metodą akustyczną i elektryczną. Zaprezentowano metodykę pomiarów akustycznych w przekładnikach 110, 220 i 400 kV w terenie oraz sposób interpretacji wyników. Podano zależności korelacyjne między ładunkiem pozornym wnz i parametrami fali akustycznej generowanej podczas ich występowania. Przedstawiono wnioski o przydatności pomiarów wnz metodą akustyczną na terenie stacji elektroenergetycznych do oceny stanu izolacji przekładników prądowych.

**Abstract:** (Application of acoustic method of PD measurements for current transformers insulation assesment). Comparison of results of partial discharge measurement carried out with acoustic and electric method on current transformers rated 110, 220 and 400 kV is presented. A procedure for in field measurement as well as recommendations regarding interpretation of the results are described. Simple formula that correlates PD apparent charge with parameters of acoustic emission is developed. Conclusions about suitability the acoustic method of PD measurement to estimation of insulation condition of current transformers are discussed.

**Słowa kluczowe:** przekładnik prądowy, wylądowania niezupełne, metoda akustyczna, ładunek pozorny.

**Keywords:** current transformer, partial discharges, acoustic method, apparent charge.

### Wstęp

Znane metody elektrycznych pomiarów wylądowań niezupełnych (wnz) umożliwiają bezpośredni pomiar ładunku pozornego. Ich stosowanie do pomiarów w trakcie eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych napotyka na szereg poważnych problemów natury metrologicznej, a często w ogóle nie jest możliwe. Z kolei wadą metod akustycznych, łatwo stosowanych w warunkach silnych zakłóceń elektromagnetycznych, jest fakt, iż mierzone parametry emisji akustycznej (AE), generowanej przez wnz, nie są bezpośrednio skorelowane z ładunkiem pozornym wnz. Korelacja ta zależy od szeregu czynników, jak np. własności materiałowe ośrodka, w którym transmitowany jest sygnał akustyczny, rozmiary i geometria badanego obiektu. W ramach pracy [8] określono ją w drodze porównania pomiarów metodą elektryczną i akustyczną na tych samych obiektach, którymi były przekładniki prądowe na napięcie 110, 220 i 400kV. Praca ta finansowana przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. była wykonywana pod auspicjami EPRI. Jej wyniki były prezentowane na konferencji EPRI w San Antonio w lutym, 2002 [9].

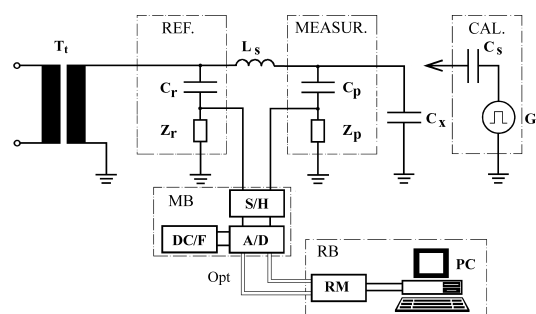
### Pomiar metodą elektryczną

Pomiary metodą elektryczną realizowano przy wykorzystaniu systemu pomiarowego opracowanego i wykonanego w IEn – OT [1,2,3] (rys. 1).

Ideą systemu jest pomiar dwukanałowy, który umożliwia rejestrację wylądowań niezupełnych również na poziomie niższym od poziomu zakłóceń. W części wysokonapięciowej systemu znajduje się tor referencyjny i pomiarowy, połączone ze sobą indukcyjnością separacyjną. Blok pomiarowy (MB), zasilany ze źródła prądu stałego, umieszczony jest na wysokim potencjale. Jest on połączony z blokiem rejestracji (RB) za pośrednictwem połączeń światłowodowych, które - oprócz przesyłania sygnałów służących do komunikacji i sterowania systemem - stanowią element separacji dielektrycznej obydwu bloków. W skład bloku rejestracji wchodzi komputer służący do sterowania pracą systemu, do rejestracji wyników oraz do programowej eliminacji zakłóceń. Blok pomiarowy mierzy w 250

mikrosekundowych przedziałach czasowych ładunki wszystkich przychodzących impulsów i przekształca je w sygnał cyfrowy w taki sposób, aby był on proporcjonalny do największego ładunku pozornego impulsu wnz, zarejestrowanego w danym przedziale czasowym.

Jak wynika ze schematu ładunki wylądowań, których źródłem nie jest badany obiekt będą wytwarzać w elementach detekcyjnych gałęzi referencyjnej większe sygnały niż w gałęzi pomiarowej. Różnica między wartościami tych sygnałów jest tym większa, im większa jest indukcyjność separacyjna obu gałęzi. Fakt ten wykorzystywany jest w analizie komputerowej pozwalającej eliminować zakłócenia wielokrotnie przekraczające wartość sygnału pomiarowego.



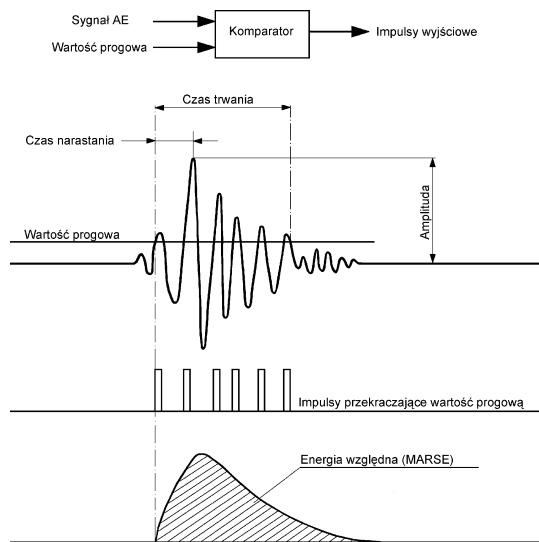
Rys.1. Schemat systemu do pomiarów wylądowań niezupełnych  
T<sub>t</sub> – transformator probierczy, REF – tor referencyjny, MEASUR – tor pomiarowy, C<sub>r</sub>, C<sub>p</sub> – pojemności sprzęgające toru referencyjnego i toru pomiarowego, Z<sub>r</sub>, Z<sub>p</sub> – impedancje detekcyjne toru referencyjnego i toru pomiarowego, L<sub>s</sub> – indukcyjność separacyjna toru pomiarowego i referencyjnego, C<sub>x</sub> – obiekt badany, MB – blok pomiarowy układu, DC/F – zasilacz prądu stałego, S/H – moduł detektorów szczytu typu „Sample – Hold”, A/D – przetwornik analogowo – cyfrowy, RB – blok rejestracji, RM – moduł rejestracji, PC – komputer klasy Pentium 500 MHz, 64 MB RAM, CAL – układ skalowania systemu, G<sub>s</sub> – generator impulsów skalujących o stromym czole, C<sub>s</sub> – kondensator układu skalowania, Opt – połączenia światłowodowe.

### Pomiar metodą akustyczną

Pomiary metodą akustyczną realizowano przy wykorzystaniu systemu DiSP – 80 firmy Physical Accoustic Corp. Urządzenie to jest zintegrowanym z komputerem 12 kanałowym miernikiem sygnałów akustycznych wyposażonym w 16 bitowe 10 MHz przetworniki A/C o zakresie dynamicznym większym od 82 dB i paśmie przenoszenia 10 kHz – 2 MHz. Oprogramowanie dołączone do systemu służy do zbierania sygnałów AE, ich przetwarzania oraz prezentacji wyników pomiarów. Umożliwia również lokalizację źródeł sygnałów: tworzona jest siatka modelująca przestrzeń, w której występuje źródło (wnz), przy czym węzłami siatki są czujniki akustyczne. Lokalizacja źródeł dokonywana jest przy wykorzystaniu metody triangulacji [6].

Ponieważ metodyka pomiarów firmy Physical Accoustic Corp. odbiega od metodyki stosowanej w kraju [4], poniżej przedstawiono jej krótkie omówienie.

Sygnał emisji akustycznej dochodzący z czujnika pomiarowego jest porównywany z wartością progową (rys. 2). Do jego oceny stosuje się najczęściej pięć parametrów [5]: liczbę zdarzeń akustycznych, amplitudę sygnału, czas trwania sygnału, czas narastania oraz pole powierzchni pod obwiednią sygnału wypros-towanego (MARSE).



Rys.2. Mierzone parametry sygnału emisji akustycznej

### Badania przekładników w warunkach terenowych

Pomiary emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne w przekładnikach wykonywano w kilku wybranych stacjach PSE S.A. bez zakłócania ich normalnej pracy, tzn. wtedy, gdy znajdowały się one pod napięciem. Czujniki mocowano za pomocą uchwytów magnetycznych do uzziemionego metalowego korpusu przekładnika. Na okoliczność tą została opracowana instrukcja bezpiecznej pracy, zatwierdzona przez służby bhp PSE S.A. Rysunek 3 przedstawia praktyczny sposób realizacji tej czynności.

Ogółem przebadano 82 przekładniki prądowe na napięcia 110, 220, 400 kV starszych typów, wyprodukowane w latach 1966 - 1979, zainstalowane w stacjach: Piaseczno, Radkowice, Kozienice, Mikułowa, Adamów, Państwów, Miciguzd.

Spośród badanej populacji przekładników wybrano 15 egzemplarzy, które następnie zostały przewiezione do laboratorium IEnOT celem wykonania dalszych, bardziej szczegółowych badań. Z uwagi na uwarunkowania

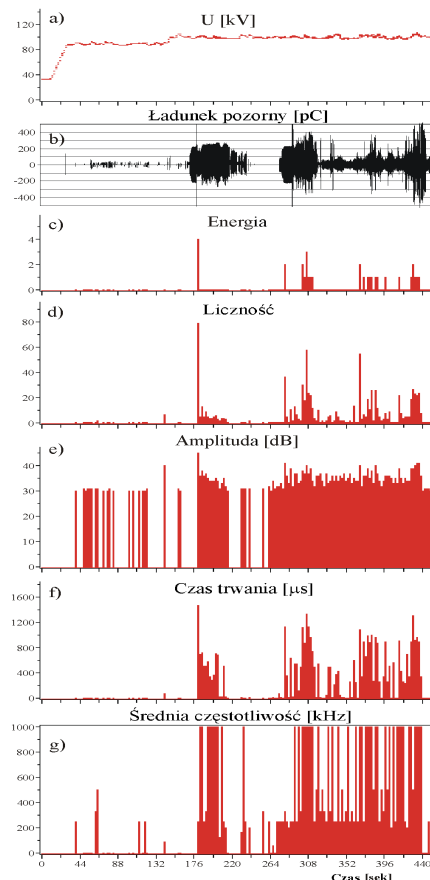
organizacyjne można było zdemontować tylko przekładniki przeznaczone do planowanej wymiany.



Rys.3. Mocowanie czujników na obudowie przekładnika

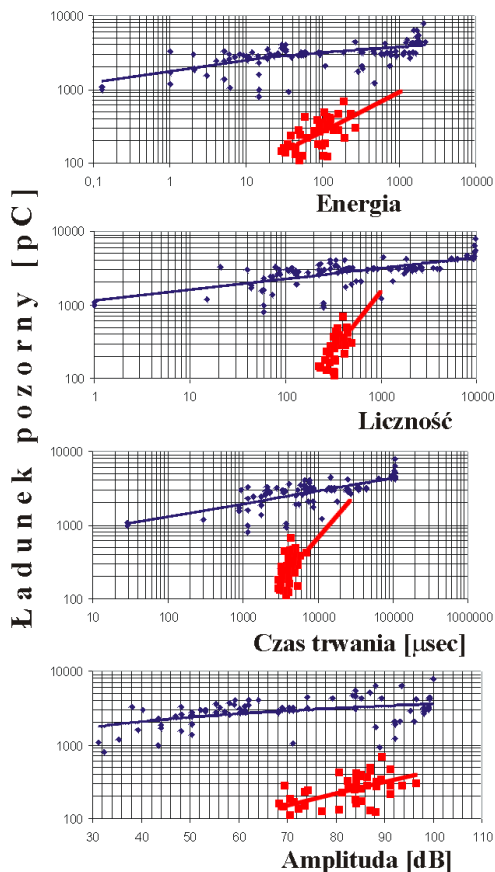
### Porównanie wyników pomiarów wnz metodą akustyczną i elektryczną

W laboratorium IEnOT przeprowadzono jednocześnie pomiary ładunku pozornego wnz oraz parametrów emisji akustycznej generowanej w trakcie ich występowania. Elementem wpływającym na wielkość wnz było napięcie przyłożone do izolacji głównej przekładnika. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów.



Rys.4. Wyniki pomiarów emisji akustycznej w przekładniku o numerze fabrycznym 409051 przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych. a) napięcie podczas próby, b) ładunek pozorny mierzony metodą elektryczną, c) - g) parametry emisji akustycznej mierzone metodą akustyczną

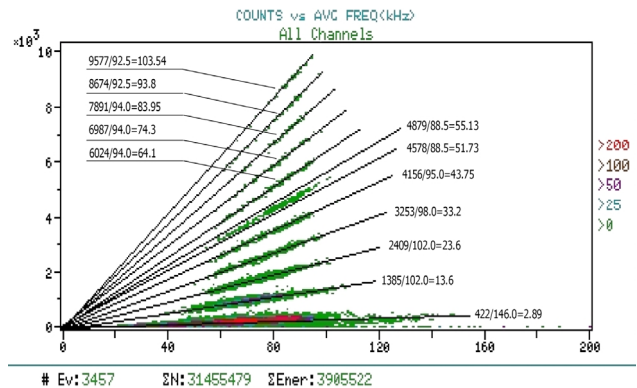
Analiza tych przebiegów prowadzi do wniosku, że dość dobrą relację z ładunkiem pozornym, również przy uwzględnieniu zjawiska zapalania się i gaśnięcia wyładowań, wykazuje liczność, energia, czas trwania oraz, w pewnym sensie, średnia częstotliwość emisji akustycznej. Podobne wnioski wynikały z pomiarów przeprowadzonych na innych przekładnikach. Można było wnioskować z nich ponadto, iż dolny próg czułości metody akustycznej jest rzędu 100 – 200 pC. Niemniej spotkano przypadki, w których metoda akustyczna nie wykrywała wyładowań o ładunku pozornym rzędu 500 pC i więcej. Przyczyn takiego stanu rzeczy należy upatrywać w lokalizacji wyładowań niezupełnych - występowały one wówczas głęboko w izolacji papierowo - olejowej, skutkiem czego fala akustyczna była silnie tłumiona na drodze do czujników pomiarowych. Pomimo wieloletniej pracy badane przekładniki miały izolację na tyle dobrą, że trudno było wywołać w niej dostępnymi metodami wyładowania o ładunku pozornym większym od kilkuset pC, mimo przyłożenia do ich izolacji głównej napięcia znacznie przekraczającego wartość roboczą. Celem zbadania zjawisk występujących przy znacznej amplitudzie ładunku pozornego, zdecydowano się na sztuczne – mechaniczne uszkodzenie izolacji w kilku jednostkach. Na podstawie uzyskanych tą drogą wyników dokonano próby znalezienia bezpośredniej korelacji między mierzonym ładunkiem pozornym a parametrami wywołanej przez wzn emisji akustycznej. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Zależność ładunku pozornego od parametrów emisji akustycznej - energii, liczności, czasu trwania i amplitudy, uzyskana na podstawie pomiarów na przekładnikach J 110 - 3a o numerze fabrycznym 409051 (kolor niebieski) oraz J 110 - 4a o numerze fabrycznym 012997 (kolor czerwony)

Ponieważ rezultat poszukiwań zależności nie był satysfakcjonujący (z przedstawionych wykresów wynika, że w odniesieniu do różnych przekładników występują różne współczynniki korelacji), koniecznym stało się poszukiwanie relacji bardziej złożonych.

Analizując rozkłady częstotliwościowe parametrów akustycznych stwierdzono, że znakomita większość sygnału emisji akustycznej charakteryzuje częstotliwość średnia (average frequency) w zakresie poniżej 200 kHz. Ponadto rozkład liczności w funkcji średniej częstotliwości sygnału charakteryzuje się pewnymi prawidłowościami. Na rysunku 6 widoczne są charakterystyczne grupy punktów, układające się wzdłuż prostych wychodzących z początku układu współrzędnych.



Rys.6. Rozkład częstotliwościowy liczności w paśmie 0 – 200 kHz. Wykres przedstawia zbiorcze wyniki ze wszystkich kanałów pomiarowych. Pomiary wykonano na przekładniku nr 409051. Różnymi kolorami oznaczono gęstość punktów pomiarowych, np. >0 oznacza, że jeden punkt na wykresie reprezentuje 1-25 punktów pomiarowych

Sprawdzono, że grupy te nie są wynikiem różnych charakterystyk częstotliwościowych poszczególnych kanałów, oraz to, że kolejne grupy punktów zaczynają się pojawiać wraz ze wzrostem przyłożonego napięcia. Postawiono hipotezę, że pojawiające się punkty na wykresie liczności w funkcji średniej częstotliwości odpowiadają wyładowaniom niezupełnym o różnych wartościach ładunku pozornego. Wprowadzono sztuczny deskryptor sygnału akustycznego w postaci współczynnika nachylenia prostej, wokół której zgrupowane są punkty pomiarowe. Dokonano próby powiązania tego deskryptora z wielkością ładunku pozornego. Sprawdzono również, że przedstawione niżej zależności nie są przypadkowymi, charakterystycznymi tylko w odniesieniu do badanego przekładnika, ale mają charakter ogólny i dotyczą wszystkich badanych przekładników.

Ostatecznie, po dokonaniu szeregu analiz przyjęto następujące zależności pomiędzy ładunkiem pozornym a mierzoną licznnością i średnią częstotliwością emisji akustycznej:

$$(1) \quad Q_p = \frac{L}{f} \cdot k$$

gdzie:  $Q_p$  - ładunek pozorny,  $L$  - licznność,  $f$  - średnia częstotliwość sygnału akustycznego,  $k$  - współczynnik korelacji.

O wyborze wartości współczynnika  $k$  decyduje wartość wskaźnika  $W_{st}$ , będącego iloczynem tempa zjawisk akustycznych odniesionym do czasu trwania pomiaru, obliczonym na podstawie wskaźników statystycznych,

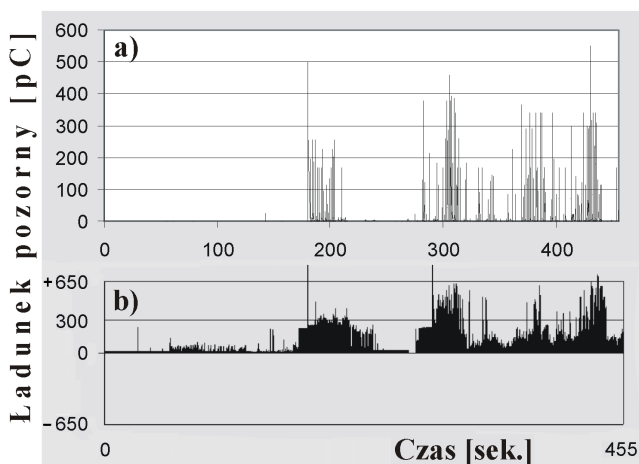
rejestranych przez system DiSP – 80 przy każdym pomiarze:

$$(2) \quad W_{st} = \frac{\frac{Hits}{t} \cdot \frac{Ev}{t} \cdot \frac{\Sigma N}{t} \cdot \frac{\Sigma Ener}{t}}{t}$$

gdzie:  $Hits/t$  – średni przyrost liczby trafień zarejestrowanych w trakcie pomiaru;  $Ev/t$  – średni przyrost liczby zdarzeń zarejestrowanych w trakcie pomiaru;  $\Sigma N/t$  – średni przyrost sumarycznej liczności zarejestrowanej w trakcie pomiaru;  $\Sigma Ener/t$  – średni przyrost sumarycznej energii zliczonej w trakcie pomiaru;  $t$  – czas trwania pomiaru.

dla  $W_{st} > 1000$   $k=68$   
dla  $W_{st} < 1000$   $k=340$ .

Sprawdzono, że znalezione zależności aplikować można również dla wartości chwilowych. Na rysunku 7 przedstawiono zestawienie przebiegów ładunku pozornego pomierzonego metodą elektryczną i obliczonego na podstawie wyników pomiarów akustycznych.



Rys.7. Obliczone (a) z zależności (1) i (2) i pomierzone (b) przebiegi czasowe ładunku pozornego

### Podsumowanie

Metoda akustyczna jest przydatnym narzędziem diagnostycznym do oceny stanu izolacji urządzeń w terenie. Jest prosta oraz bezpieczna w obsłudze. Nie mniej trzeba wyraźnie podkreślić, iż nie jest ona wymienna z metodą elektryczną, co wynika z różnych przesłanek fizycznych obu metod - w metodzie elektrycznej mierzy się bezpośrednio ładunek pozorny wyładowania, w metodzie akustycznej parametry emisji akustycznej będącej efektem tegoż wyładowania. Korelacja wyników pomiarów otrzymywanych z obu metod zależy od szeregu czynników, takich jak rodzaj i miejsce wyładowania, rodzaj badanego obiektu, jego wymiary geometryczne, rodzaj użytych materiałów do jego budowy i inne. W szeregu przypadków, szczególnie gdy wyładowania niepełne występują głęboko w izolacji papierowej, korelacja taka nie występuje.

Metoda akustyczna wykrywa tylko te wyładowania niepełne, które występują w dielektrykach o dużej sprężystości a więc w oleju i na pograniczu izolacji papierowej. Wyładowania występujące wewnątrz izolacji

papierowej, z uwagi na intensywne tłumienie sygnałów emisji akustycznej przez papier, mogą nie być wykrywane.

Czułość metody akustycznej wiąże się przede wszystkim z relacją geometryczną położenia źródła (źródeł) wnz względem czujników pomiarowych [4]. Fala akustyczna dochodzi do czujników zasadniczo dwoma drogami - poprzez układ izolacyjny i olej oraz poprzez metalową ścianę, do której są one mocowane. Doświadczenia zdobyte w trakcie prowadzonych prac wskazują, iż w przypadku badanych przekładników prądowych czułość metody akustycznej można szacować na 100 - 200 pC. Poniżej tej granicy system pomiarowy rejestruje również pojedyncze wyładowania, jednak w większości przypadków są to pomiary przypadkowe, niepowtarzalne.

Za stosunkowo istotne osiągnięcie wynikające z prowadzonych badań uważamy sformułowanie prostych zależności (1) i (2), które korelują licznosc i średnią częstotliwość emisji akustycznej z ładunkiem pozornym. Błąd oszacowania wartości ładunku pozornego na podstawie pomierzonych licznosci i średniej częstotliwość emisji akustycznej, większy w zakresie małych wnz (200 - 500 pC), maleje wraz ze wzrostem ładunku pozornego. W trakcie prowadzonych prac dało się w ten sposób wyznaczać poziom ładunku pozornego z dokładnością nie gorszą niż 10%.

Należy podkreślić, że uzyskane empirycznie zależności (1) i (2) odnoszą się do badanych przekładników prądowych, nie można ich zatem aplikować do innych urządzeń energetycznych.

### LITERATURA

- [1] Kozłowski M., New method and measuring system of improved PD evaluation, including computer - aided elimination of disturbances, *Mat. Ninth International Symposium on High Voltage Engineering*, August 28 - September 1, 1995, Graz, Austria.
- [2] Kozłowski M., Jezierski W., Dałek J., Dymowski S., Arcab M., Wróbel R.: Sposób i układ do pomiaru wyładowań niepełnych, Pat. PL 172269 (G01R 29/24)
- [3] Arcab M., Dałek J., Dymowski S., Jezierski W., Kozłowski M., Wróbel R.: Urządzenie do pomiaru wyładowań niepełnych, Pat. PL 172289 (G01R 29/24).
- [4] Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych, PAN, Inst. Podst. Problemów Techniki, Warszawa 1993.
- [5] Pollock A., A.: Acoustic emission inspection, *Metal Handbook*, Ninth edition, vol. 17, ASM International (1989), pp. 278 - 294
- [6] DiSP - 80 User's Manual, Rev. 0, June 1999, Physical Acoustic Corp.
- [7] Gacek Z., Szadkowski M., Duda D., Witos F., Urbańczyk M., Otręba H.: Nowa koncepcja oceny wyładowań niepełnych w diagnostyce izolacji., *VI Seminarium Techniczne „Materiały i Technologie Elektroizolacyjne”*, Ustroń, kwiecień 2002 r.
- [8] Kaźmierski M., Ławski R., Bugajny K.: Evaluation of Acoustic Detection Technologies for Instrument Transformer Insulation Condition Assessment, EPRI Palo Alto, CA, and Polish Power Grid Company, Warsaw, Poland: 2002. ID 1007582.
- [9] Kaźmierski M., Sobocki R.: Evaluation of PD acoustic detection for instrument transformers insulation assessment, EPRI Substation Equipment Diagnostics Conference X, February 17 -20, 2002, The Westin La Cantera Resort, San Antonio, Texas.

**Autorzy:** dr inż. Marceł Kaźmierski, mgr inż. Robert Ławski, mgr inż. Krzysztof Bugajny, Instytut Energetyki Oddział Transformatorów w Łodzi; dr inż. Ryszard Sobocki, Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Departament Infrastruktury Sieciowej