

Ultraczułe przetworniki emisji akustycznej zoptymalizowane do monitoringu wyładowań niepełnych w transformatorach

Streszczenie. W artykule omówiono prototypowe przetworniki emisji akustycznej, które zostały zoptymalizowane do detekcji i monitoringu wyładowań niepełnych (wnz) w transformatorach energetycznych. Ich wysoka czułość została potwierdzona w badaniach modelowych wnz, w których dla porównania zastosowano popularne przetworniki komercyjne. Ponadto w artykule omówiono kwestię charakterystycznych częstotliwości sygnałów emisji akustycznej generowanych przez wysokoenergetyczne formy wyładowań niepełnych (ślizgowych, międzyzwojowych, powierzchniowych, w kanale olejowym).

Abstract. The paper presents prototype acoustic emission transducers, which were optimized for detection and monitoring of partial discharges (PDs) in power transformers. Their high sensitivity was proven in PD model research, in which popular commercial transducers were used for comparison. Moreover, the issue of characteristic frequencies of acoustic emission signals generated by high energy forms of partial discharges (creeping, turn-to-turn, surface, in oil-duct) was discussed in the paper. (**Ultra-sensitive acoustic emission transducers for partial discharge monitoring in power transformers**).

Słowa kluczowe: wyładowania niepełne, przetwornik piezoelektryczny, emisja akustyczna, monitoring transformatora energetycznego.

Keywords: partial discharge, piezoelectric transducer, acoustic emission, power transformer online monitoring.

Wstęp

Prace badawczo-rozwojowe w dziedzinie diagnostyki transformatorów prowadzone obecnie przez liczne ośrodki naukowe i przemysłowe koncentrują się głównie na takich aspektach jak: (i) wdrażanie nowych, innowacyjnych technik pomiarowych, (ii) doskonalenie oraz poprawa skuteczności, niezawodności i wiarygodności powszechnie stosowanych, standaryzowanych technik pomiarowych, jak np. analiza gazów rozpuszczonych w oleju (DGA), (iii) zastosowanie nowoczesnych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz (iv) opracowywanie i wdrażanie zaawansowanych technologicznie systemów monitoringu on-line i systemów eksperckich. Analizując opisane w literaturze oraz w komunikatach i raportach spółek energetycznych przypadki awarii transformatorów energetycznych można zauważyć, że wiele z nich wiązało się z przyspieszoną degradacją układu izolacyjnego, której przyczyną lub następstwem była wysoka aktywność wyładowań niepełnych [1-3]. Z tego powodu monitoring intensywności wnz i dynamiki jej zmian w czasie może stanowić ważny wskaźnik informujący o zbliżającej się awarii. Skuteczność detekcji zjawiska wyładowań niepełnych zależy nie tylko od zastosowanej techniki pomiarowej, ale również od czułości torów pomiarowych, a w szczególności czujników wnz. Najwyższą czułość detekcji impulsów wnz można uzyskać stosując układ pomiarowy zgodny z normą PN-EN 60270 (tzw. konwencjonalna metoda elektryczna). Niestety, o ile w idealnych warunkach laboratoryjnych (ekranowana hala wysokich napięć) możliwe jest wykrycie metodą konwencjonalną impulsów nawet o bardzo małym ładunku (0,1 pC), o tyle detekcja wnz w warunkach polowych, ze względu na wysoki poziom zakłóceń elektromagnetycznych (operacje łączeniowe, ulot z linii przesyłowych), jest praktycznie niemożliwa. To głównie z tego powodu dostępne na rynku lub właśnie wdrażane przez ośrodki naukowo-badawcze systemy monitoringu *on-line* oparto praktycznie wyłącznie na niekonwencjonalnych metodach detekcji wnz [4-5]. Najważniejszymi przedstawicielami tej grupy są: metoda DGA (praktycznie wszystkie krajowe transformatory dużej mocy zostały już wyposażone w urządzenie monitorujące poziom gazów rozpuszczonych w oleju), metody elektromagnetyczne (HF, VHF, UHF) oraz metoda emisji akustycznej (EA). Należy jednak podkreślić, że czułość tych metod w dużej mierze zależy od umiejscowienia czujnika na kadzi i jego odległości od

defektu będącego źródłem wyładowań oraz konstrukcji i parametrów samego czujnika.

Przetworniki emisji akustycznej stosowane do detekcji wyładowań niepełnych

W przypadku metody emisji akustycznej do detekcji wyładowań niepełnych stosuje się piezoelektryczne przetworniki stykowe. Najwięksi światowi producenci (Physical Acoustics, Vallen GmbH) mają w swojej ofercie kilkadziesiąt różnych typów przetworników, które pokrywają zapotrzebowanie większości dziedzin i technik diagnostycznych opartych na zjawisku emisji akustycznej. Pomimo tego, wybór właściwego przetwornika do detekcji wyładowań niepełnych w transformatorach energetycznych nie jest zadaniem łatwym. Wynika to z faktu, że brakuje jednoznacznych, spójnych i niebudzących wątpliwości zaleceń, zarówno ze strony samych producentów jak i międzynarodowych stowarzyszeń skupiających specjalistów w dziedzinie EA oraz organizacji ustalających normy i standardy (IEC, IEEE, CIGRE, ASTM etc.). Pierwszą, krótką adnotację w tej kwestii można było przeczytać w opublikowanym w 2000 roku przez IEEE standardzie C57.127-2000 [6], z której wynikało, że polecany jest przetwornik o częstotliwości rezonansowej zawartej w paśmie od 120 do 160 kHz. Nie podano przy tym żadnych wyjaśnień i argumentów tłumaczących ten wybór. W opublikowanej siedem lat później, drugiej, zrewidowanej wersji dokumentu, kwestii doboru właściwego przetwornika poświęcono nieco więcej miejsca [7]. W przewodniku zwrócono uwagę na fakt, że wyładowania wysokoenergetyczne generują sygnały EA w dolnym przedziale częstotliwości (20-100 kHz), co powinno stawiać na uprzywilejowanej pozycji przetworniki o częstotliwości rezonansowej wynoszącej 60 kHz – szczególnie w przypadku pomiarów prowadzonych w warunkach laboratoryjnych (wolnych od zakłóceń). Podobnie jak miało to miejsce w poprzedniej wersji dokumentu, tak i tym razem wybór akurat tej konkretnej częstotliwości rezonansowej nie został poparty żadnymi argumentami. Jednocześnie dokument informuje, że w trakcie pomiarów prowadzonych w warunkach polowych mogą występować silne zakłócenia i z tego też powodu większość użytkowników stosuje przetworniki o częstotliwości rezonansowej 150 kHz. Niestety, wybór ten bynajmniej nie jest podyktowany tym, że wnz generują sygnały o częstotliwości bliskiej 150 kHz, a

faktem, że są to najbardziej uniwersalne i łatwo dostępne na rynku przetworniki emisji akustycznej (m.in. Physical Acoustics R15α i R15D, Vallen VS150, Soundwel SR150, Bangos AES150). Wykonana przez autora analiza wydanych po 2000 roku przez IEEE publikacji podejmujących temat zastosowania metody EA do detekcji wnz w transformatorach energetycznych wykazała, że ponad połowa użytkowników użyła w swych badaniach właśnie tego typu przetwornika.

IEEE to nie jedyna organizacja, która opracowała standard, w którym zawarła zalecenia i wskazówki dla użytkowników metody EA. W 2009 roku CIGRE, w ramach działalności grupy roboczej D1.33, opublikowało broszurę [8] na temat niekonwencjonalnych metod detekcji wyładowań niepełnych, w której informowało, że zjawisko to jest źródłem sygnałów emisji akustycznej o częstotliwościach zawartych w paśmie od 10 do 300 kHz. Jednak w wydanej w 2015r. broszurze [9] opinii ekspertów z grupy roboczej D1.37 odnośnie częstotliwości sygnałów EA pochodzących od wnz były już znacznie mniej precyzyjne, gdyż górna granica zakresu została przez nich podwyższona z 300 kHz do nawet 1 MHz. Zmiana w zapisach mogła być podyktowana faktem, że stosunkowo duża grupa badaczy (w tym również współautorów broszury), zamiast wąskopasmowych przetworników rezonansowych (150 kHz), z powodzeniem stosuje szerokopasmowe przetworniki wielorezonansowe, jak np. bardzo popularny przetwornik typu PAC WD (rys. 1).



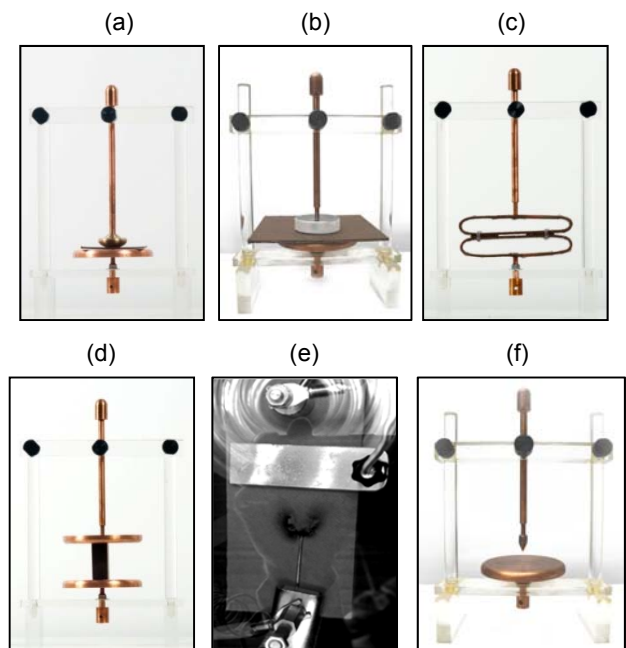
Rys.1. Rodzaje przetworników piezoelektrycznych zastosowanych w badaniach wyładowań niepełnych w izolacji papierowo-olejowej (zestawienie opracowano na podstawie artykułów [10-43] opublikowanych w czasopiśmie i materiałach pokonferencyjnych IEEE w latach 2000-2015)

Wśród wiodących producentów przetworników również nie znajdziemy jednoznacznych wskazówek w kwestii doboru optymalnego przetwornika do detekcji wyładowań niepełnych. Firma Physical Acoustics – lider światowego rynku badań nieniszczących – posiada w swojej ofercie szeroką gamę prawie 100 przetworników EA, spośród których aż 5 modeli (D9241A, R6D, R15D, R30D, R50D) klasyfikuje jako odpowiednie do monitoringu wyładowań niepełnych w transformatorach energetycznych. Tym samym producent zamiast ułatwić użytkownikom wybór przetwornika zoptymalizowanego do detekcji wnz, jeszcze bardziej go skomplikował. Okazuje się bowiem, że sugerowane do monitoringu transformatorów modele przetworników pracują w skrajnie różnych przedziałach częstotliwości (D9241A: 30-100 kHz, R6D: 35-100 kHz, R15D: 50-400 kHz, R30D: 150-400 kHz, R50D: 100-700 kHz). Z kolei firma Vallen – drugi największy na świecie dostawca przetworników emisji akustycznej, sugeruje jedynie, aby w normalnych warunkach pomiarowych (przy niskim poziomie zakłóceń) stosować przetwornik pracujący w dolnym przedziale częstotliwości (od 20 do 100 kHz). Dla trudniejszych warunków pomiarowych zaleca jednak użycie modelu przetwornika pracującego w pośrednim przedziale częstotliwości, tj. od 100 do 400 kHz.

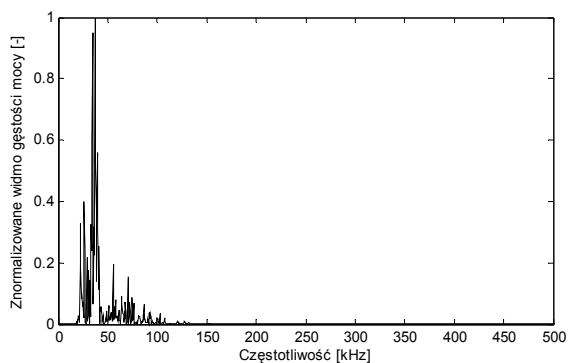
Z uwagi na wyżej opisany, dość zawity stan rzeczy, zdecydowano się na zainicjowanie prac badawczych, w ramach których podjęto próbę opracowania przetwornika EA zoptymalizowanego do skutecznej detekcji wnz w transformatorze energetycznym.

Częstotliwości sygnałów EA generowanych przez wnz

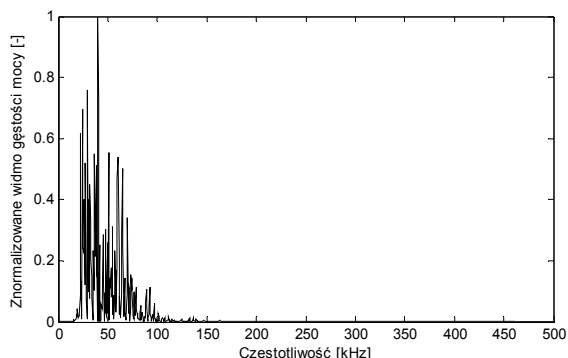
W pierwszej kolejności, przed przystąpieniem do projektowania nowych przetworników piezoelektrycznych, należało rozwiązać wszelkie wątpliwości dotyczące częstotliwości sygnałów emisji akustycznej generowanych przez wyładowania niepełne w układzie izolacyjnym papier-olej. Podobne badania prowadziły już wcześniej zarówno krajowe (m.in. Politechnika Opolska [41], Politechnika Śląska [44], Politechnika Poznańska [45, 46]) jak i zagraniczne ośrodki naukowe. W badaniach tych korzystano najczęściej z popularnych, ogólnodostępnych, wąskopasmowych przetworników rezonansowych (np. PAC R15D, PAC R6, VS150-M) lub szerokopasmowych przetworników wielorezonansowych (np. PAC WD). Należy jednak w tym miejscu stanowczo zaznaczyć, że decydując się na przetwornik rezonansowy tracimy możliwość dokładnego poznania parametrów częstotliwościowych impulsów EA pochodzących od wyładowań niepełnych. Wynika to z faktu, że rejestrowane częstotliwości niemal zawsze będą pokrywały się z charakterystycznymi dla danego typu przetwornika częstotliwościami rezonansowymi. Dlatego w opisanych w dalszej części artykułu badaniach zdecydowano się zastosować głowicę ultradźwiękową Olympus V101-RB. Jest to przetwornik o częstotliwości środkowej 500 kHz i płaskiej, pozbawionej rezonansów charakterystyce przenoszenia. Dodatkowo, w oparciu o doniesienia literaturowe [47, 48] i zebrane doświadczenia eksploatacyjne [45, 46] do badań wytypowano wyłącznie te formy wyładowań, które ze względu na wysoką energię i silnie destrukcyjny charakter stanowią największe zagrożenie dla układu izolacyjnego transformatora. Za takie powszechnie uznaje się wyładowania ślizgowe i międzyzwojowe oraz, w nieco mniejszym stopniu, wyładowania powierzchniowe i wyładowania w kanale olejowym. Zdjęcia układów elektrod, w których generowano wyładowania niepełne przedstawiono na rysunku 2.



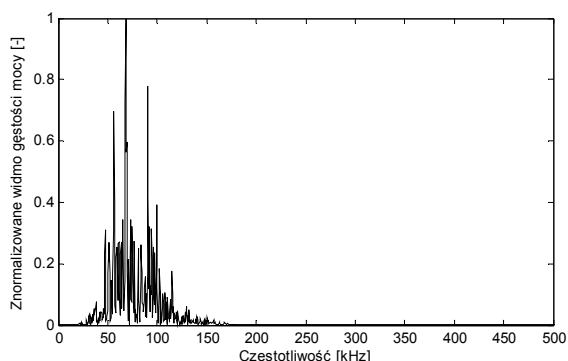
Rys.2. Układy elektrod, w których generowano wnz: ślizgowe (a, b), międzyzwojowe (c), powierzchniowe (d-e), w oleju (f)



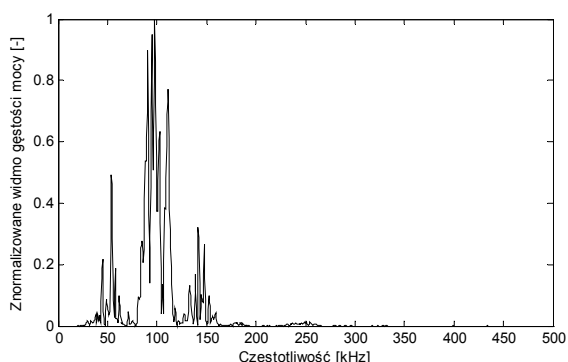
Rys.3. Znormalizowane i uśrednione (z 500 impulsów EA) widmo gęstości mocy uzyskane dla wyładowań ślizgowych



Rys.4. Znormalizowane i uśrednione (z 500 impulsów EA) widmo gęstości mocy uzyskane dla wyładowań międzyzwojowych



Rys.5. Znormalizowane i uśrednione (z 500 impulsów EA) widmo gęstości mocy uzyskane dla wyładowań powierzchniowych

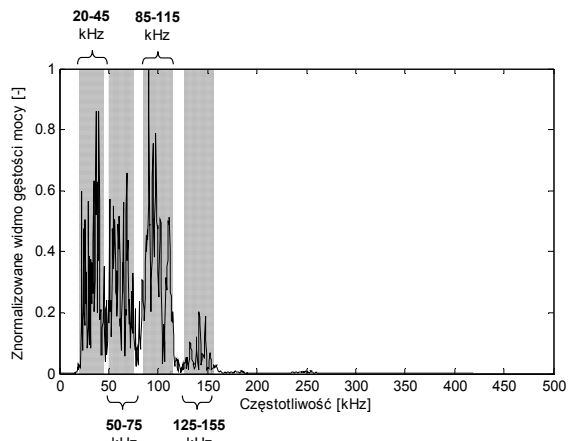


Rys.6. Znormalizowane i uśrednione (z 500 impulsów EA) widmo gęstości mocy uzyskane dla wyładowań w oleju mineralnym

W każdym z tych układów elektrod rejestrowano 500 impulsów, dla których następnie wyznaczano uśrednione i znormalizowane widmo gęstości mocy (rys. 3-6). Analiza widm wykazała, że niemal cała energia sygnałów EA generowanych przez badane wysokoenergetyczne formy

wyładowań niepełnych przenoszona jest w dolnym przedziale częstotliwości (<100 kHz). Potwierdziła się również teoria, że im wyższa energia wyładowań, tym mniejsza jest częstotliwości generowanych przez nie sygnałów EA.

Po zsumowaniu znormalizowanych widm gęstości mocy przedstawionych na rysunkach 3-6 otrzymano charakterystykę wypadkową, w której można wyróżnić cztery charakterystyczne pasma częstotliwości: (I) 20-45 kHz, (II) 50-70 kHz, (III) 85-115 kHz, (IV) 125-155 kHz (rys. 7).



Rys.7. Wyznaczone doświadczalnie pasma diagnostyczne wysokoenergetycznych form wyładowań niepełnych

Projekt i wykonanie przetworników emisji akustycznej zoptymalizowanych do detekcji wyładowań niepełnych w transformatorach

Dysponując już szczegółowymi danymi odnośnie charakterystycznych pasm częstotliwości EA (tzw. pasm diagnostycznych) wybranych form wyładowań niepełnych, można było przystąpić do procesu projektowania nowych przetworników.

Na rysunku 8 przedstawiono schemat ideowy konstrukcji przetwornika. Płyta czołowa, zwana warstwą dopasowującą lub transformatorem akustycznym zbudowana została z ceramiki korundowej o wysokich właściwościach materiałowych (czystość: > 99,5%, gęstość: > 3,90 g/cm³, brak porowatości otwartej, twardość: 23 GPa).



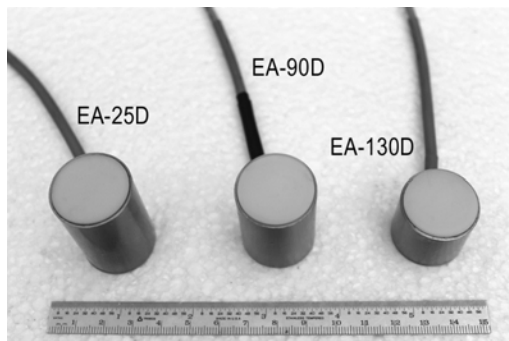
Rys.8. Schemat ideowy piezoelektrycznego przetwornika EA

Piezoelektryczne przetworniki EA stosowane do detekcji wnz w transformatorach (w miejscu ich zainstalowania) mogą być narażone na wpływ silnych zakłóceń elektromagnetycznych, dlatego postanowiono wykonać je w technologii różnicowej. W tym celu zastosowano parę, wykonanych z miękkiej ceramiki PZT, elementów piezoelektrycznych spolaryzowanych w przeciwnych kierunkach. Przetworniki takie do prawidłowej pracy wymagają oczywiście niskoszumnych przedwzmacniaczy różnicowych.

Główne częstotliwości rezonansowe przetwornika uzyskuje się poprzez dobranie odpowiedniego kształtu (rura cylindryczna, walec, płaski dysk itp.), wymiarów i parametrów ceramiki piezoelektrycznej (m.in. jak stała częstotliwościowa dla drgań radialnych i grubościowych). Projektując przetwornik o dużej czułości należało zadbać, aby impedancja akustyczna warstwy dopasowującej była równa średniej geometrycznej ośrodka obciążającego oraz elementu piezoelektrycznego. Optymalna grubość warstwy dopasowującej powinna być równa jednej czwartej długości falowej. Zastosowanie transformatora ćwierćfalowego pozwala zwiększyć sprzężenie przetwornika z ośrodkiem obciążającym i umożliwia zbliżenie sprawności odbierania i promieniowania do sprawności potencjalnej.

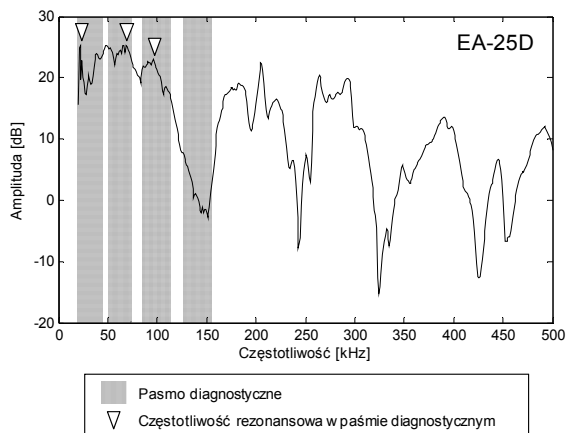
Kolejnym ważnym elementem konstrukcyjnym jest warstwa tłumiąca, która wpływa na szerokość pasma przenoszenia, poziom szumów własnych i czułość przetwornika. Głównym składnikiem warstwy tłumiącej jest specjalnej odmiany żywica epoksydowa zmieszana z kilkoma dodatkami (m.in. nanoproszek wolframu i tlenku ceru) zmieniającymi jej właściwości akustyczne.

Opracowanie ultraczułego przetwornika EA zoptymalizowanego do detekcji wylądowań niepełnych wymagało wykonania i przetestowania kilkunastu prototypów, z których trzy wybrane (rys. 9), najciekawsze w ocenie autora konstrukcje, zostały przedstawione w niniejszym artykule.



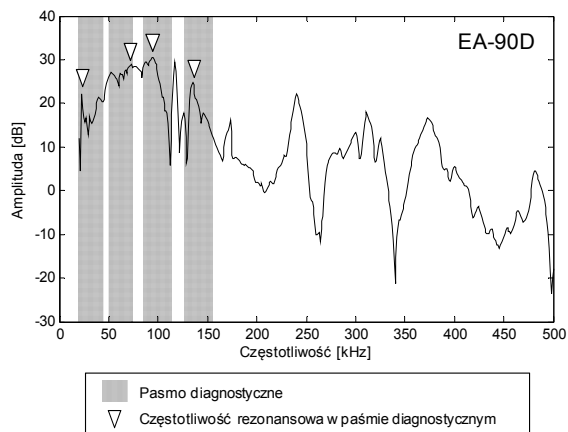
Rys.9. Zdjęcia wybranych modeli (EA-25D, EA-90D, EA-130D) prototypowych przetworników EA zoptymalizowanych do detekcji wylądowań niepełnych

Pierwsza z omawianych konstrukcji to przetwornik EA-25D, który został zoptymalizowany do detekcji wylądowań niepełnych ślizgowych i międzyzwojowych. W jego przypadku udało się uzyskać rezonans w trzech spośród czterech pasm diagnostycznych (rys. 10).



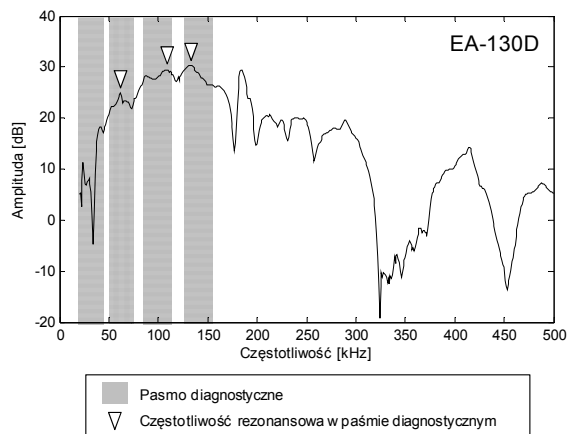
Rys.10. Charakterystyka przenoszenia prototypowego przetwornika emisji akustycznej typu EA-25D wraz z naniesionymi pasmami diagnostycznymi wysokoenergetycznych wylądowań niepełnych

Kolejny z omawianych przetworników (EA-90D) to jedna z bardziej udanych konstrukcji, gdyż w jego przypadku uzyskano rezonanse we wszystkich czterech pasmach diagnostycznych (rys. 11).



Rys.11. Charakterystyka przenoszenia prototypowego przetwornika emisji akustycznej typu EA-90D wraz z naniesionymi pasmami diagnostycznymi wysokoenergetycznych wylądowań niepełnych

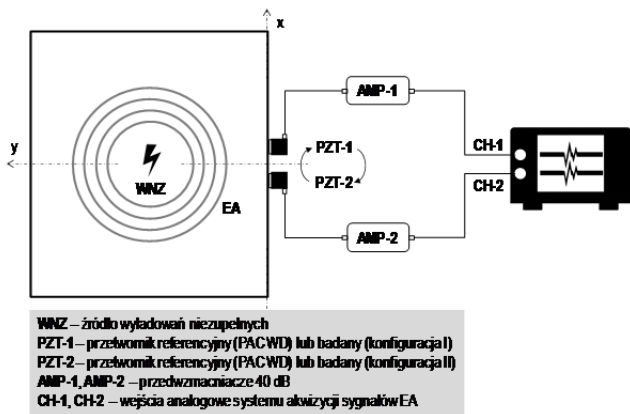
Ostatni z wybranych prototypów (EA-130D) stanowi kompromis między wysoką czułością detekcji wylądowań a odpornością na potencjalne zakłócenia akustyczne, których częstotliwość może w skrajnie trudnych przypadkach dochodzić nawet do 60 kHz (np. wysokoczęstotliwościowy szum Barkhausena). W tym celu zrezygnowano z pierwszego pasma diagnostycznego (20-45 kHz), a całą pracę skoncentrowano na uzyskaniu ekstremalnie wysokiej czułości w trzech pozostałych (rys. 12).



Rys.12. Charakterystyka przenoszenia prototypowego przetwornika emisji akustycznej typu EA-130D wraz z naniesionymi pasmami diagnostycznymi wysokoenergetycznych wylądowań niepełnych

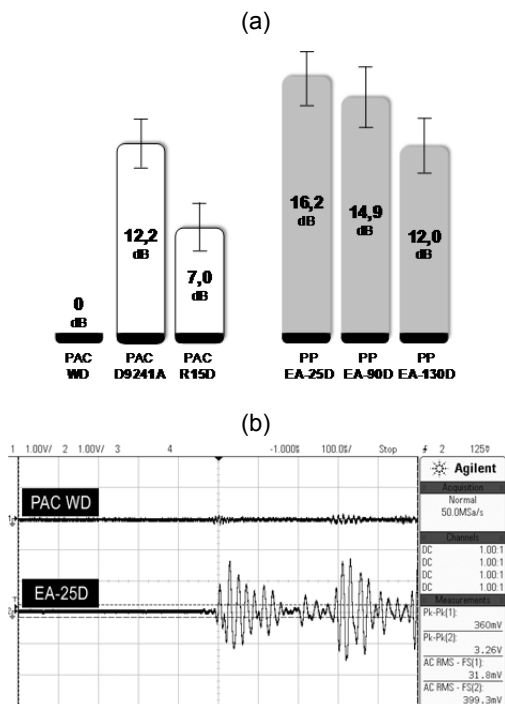
Analiza czułości detekcji wylądowań niepełnych

Na rysunku 13 przedstawiono schemat ideowy układu pomiarowego, który posłużył do oceny skuteczności prototypowych przetworników emisji akustycznej w detekcji wysokoenergetycznych wylądowań niepełnych. Zestaw pomiarowy zbudowany był z: (i) wypełnionej olejem mineralnym kadzi transformatorowej o wymiarach 600x500x500 mm, (ii) źródła wylądowań niepełnych (zastosowano układy elektrod pokazane na rysunku 2, (iii) przetwornika referencyjnego typu PAC WD, (iv) testowanych przetworników (przetworniki komercyjne – PAC D9241A i PAC R15D oraz prototypowe – EA-25D, EA-90D i EA-130D), niskoszumne przedwzmacniacze (wzmocnienie 40 dB) oraz urządzenia do akwizycji sygnałów (system PDtracker Portable i oscyloskop Agilent DSOX-2014A).



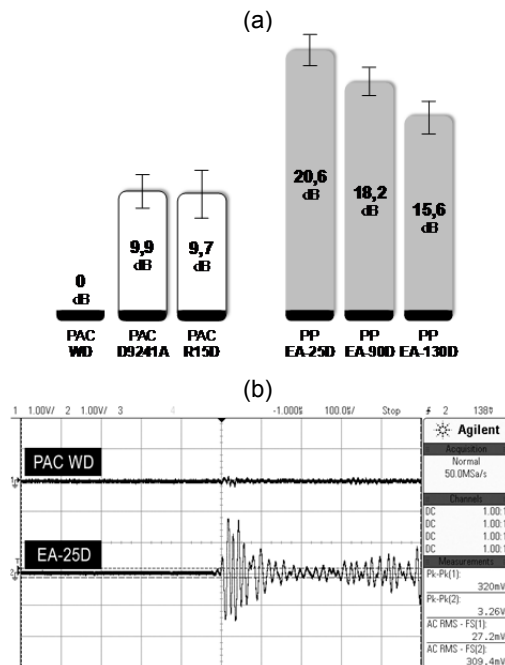
Rys.13. Schemat ideowy układu pomiarowego do badania czułości standardowych i prototypowych przetworników EA w detekcji wyładowań niepełnych generowanych w układzie izolacyjnym papier-olej

Procedura pomiarowa polegała na rejestracji impulsów EA przy użyciu dwóch, oddalonych w tej samej odległości od źródła wnz przetworników: referencyjnego typu PAC WD oraz badanego. W celu zminimalizowania wpływu elementów składowych poszczególnych torów pomiarowych (przewody sygnałowe, elektronika wzmacniaczy etc.) badania przeprowadzono w dwóch konfiguracjach. W pierwszej konfiguracji przetwornik referencyjny włączony był do pierwszego toru pomiarowego, w drugiej zaś zamieniony miejscami z przetwornikiem badanym (rys. 13). W obu konfiguracjach rejestrowano co najmniej 500 impulsów EA generowanych przez daną formę wyładowań niepełnych (ślizgowe, międzyzwojowe, powierzchniowe i w oleju). Następnie dla każdego z badanych przetworników wyznaczono średnią energię sygnału EA (wyrażoną w dB jako różnicę względem przetwornika referencyjnego PAC WD).

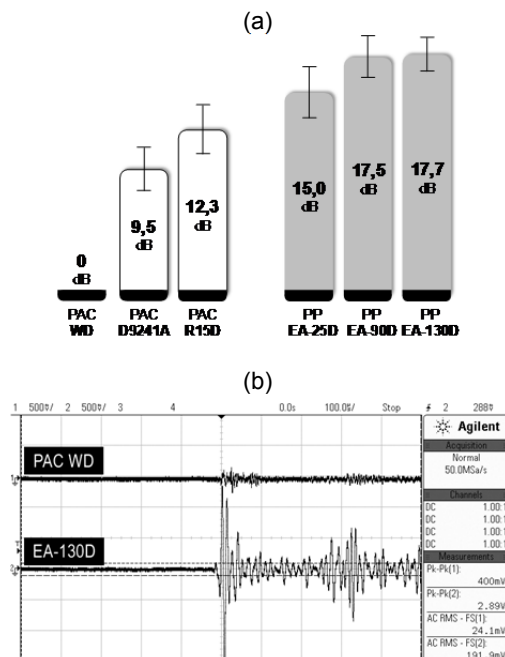


Rys.14. Czułość detekcji wyładowań ślizgowych: a) porównanie średniej energii sygnałów EA rejestrowanych przetwornikami komercyjnymi i prototypowymi, b) typowy obraz przebiegów czasowych wnz zarejestrowanych przetwornikiem referencyjnym (PAC WD) i prototypowym (EA-25D)

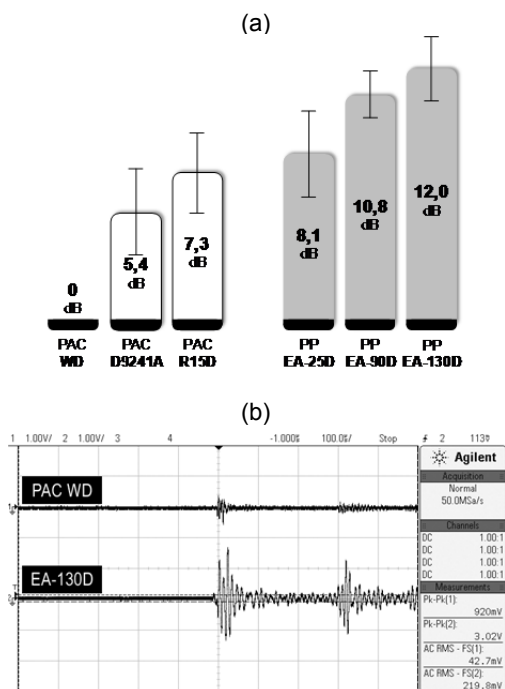
Wyniki badań potwierdziły, że wszystkie prototypowe przetworniki EA charakteryzują się ekstremalnie wysoką czułością detekcji wyładowań typowych dla papierowo-olejowego układu izolacyjnego transformatora. W przypadku najbardziej energetycznych form wyładowań niepełnych (ślizgowych i międzyzwojowych) najwyższą czułością wykazał się przetwornik typu EA-25D (rys. 14-15), zaś w przypadku dwóch pozostałych badanych rodzajów wyładowań, tj. powierzchniowych i w oleju – przetwornik EA-130D (rys. 16-17).



Rys.15. Czułość detekcji wyładowań międzyzwojowych: a) porównanie średniej energii sygnałów EA rejestrowanych przetwornikami komercyjnymi i prototypowymi, b) typowy obraz przebiegów czasowych wnz zarejestrowanych przetwornikiem referencyjnym (PAC WD) i prototypowym (EA-25D)



Rys.16. Czułość detekcji wyładowań powierzchniowych: a) porównanie średniej energii sygnałów EA rejestrowanych przetwornikami komercyjnymi i prototypowymi, b) typowy obraz przebiegów czasowych wnz zarejestrowanych przetwornikiem referencyjnym (PAC WD) i prototypowym (EA-130D)



Rys.17. Czulość detekcji wyladowań w oleju: a) porównanie średniej energii sygnałów EA rejestrowanych przetwornikami komercyjnymi i prototypowymi, b) typowy obraz przebiegów czasowych wnz zarejestrowanych przetwornikiem referencyjnym (PAC WD) i prototypowym (EA-130D)

Podsumowanie

W artykule omówiono prototypowe, ultraczułe przetworniki emisji akustycznej, które zostały specjalnie zoptymalizowane do skutecznej detekcji i monitoringu wyladowań niezupełnych występujących w układzie izolacyjnym transformatora energetycznego. Badania laboratoryjne przeprowadzone w wysokonapięciowych układach modelowych izolacji papierowo-olejowej wykazały, że opracowane konstrukcje przetworników charakteryzują się wyższą czulością detekcji wnz, aniżeli ich komercyjne odpowiedniki. Przetworniki te zostaną wykorzystane w systemie PDtracker (zastępują używane dotychczas przetworniki typu PAC WD) oraz w nowym, opracowywanym obecnie przez Politechnikę Poznańską i firmę Mikronika (w ramach projektu finansowanego przez NCBiR) wielomodułowym systemie monitoringu transformatorów energetycznych.

Prace zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Programu Badań Stosowanych w ramach projektu PBS3/A4/12/2015 pt. "System monitoringu wyladowań niezupełnych w transformatorze energetycznym oparty na wykorzystaniu metod EA, HF i UHF".

Autorzy: dr inż. Wojciech Sikorski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: wojciech.sikorski@put.poznan.pl

LITERATURA

[1] Tenbohlen S., Jagers J., Vahidi F., Bastos G., Desai B., Diggin B., Fuhr J., Gebauer J., Krüger M., Lapworth J., et al. *Transformer Reliability Survey*, Technical Brochure 642 CIGRE: Paris, France, 2015

[2] Höhle I., Kachler A. J., Tenbohlen S., Stach M., Leibfried T., *Transformer Life Management, German Experience With Condition Assessment*, Cigre SC12/A2 Kolloquium, June 2-4, 2003

[3] Lundgaard L.E., *Partial discharges in transformer insulation, CIGRE Task Force 15.01.04*, Paper 15-302, Paris, France, 2000

[4] Sikorski W., Walczak K., PDtracker – system monitoringu wyladowań niezupełnych w transformatorze energetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.10, 46-49

[5] Sikorski W., Walczak K., Analiza trendu parametrów wyladowań niezupełnych realizowana przez system monitoringu transformatorów energetycznych PDtracker, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.10, 168-171

[6] IEEE Guide for the Detection of Acoustic Emissions From Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers, in *IEEE Std C57.127-2000*, 2000

[7] IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions From Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors, in *IEEE Std C57.127-2007 (Revision of IEEE Std C57.127-2000)*, 2007

[8] CIGRE WG D1.33, *Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements*, 2010

[9] CIGRE WG D1.47, *Guidelines for basic and practical aspects of partial discharge detection using conventional (IEC60270) and unconventional methods*, 2015

[10] Li F., Liu Y., Wang L. and Chen Y., Analysis of the coupling optical fiber ultrasonic sensor for partial discharges detection, *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, Sydney, NSW, 2015, 991-994.

[11] Woon W. L., El-Hag A. and Harbaji M., Machine learning techniques for robust classification of partial discharges in oil-paper insulation systems, in *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 10, No. 3, 2016, 221-227

[12] Antony D., G. Puneekar S., Improvements in AEPD location identification by removing outliers and post processing, *2015 International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, Bangalore, 2015, 66-69

[13] Harbaji M., Shaban K., El-Hag A., Classification of common partial discharge types in oil-paper insulation system using acoustic signals, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, No. 3, June 2015, 1674-1683

[14] Boczar T., Zmarzły D., P. Frącz, Comparative studies of partial discharge using acoustic emission method and optical spectroscopy, *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, Sydney, NSW, 2015, 740-743

[15] Nik Ali N. H., Hunter J. A., Rapisarda P., Lewin P. L., Identification of multiple partial discharge sources in high voltage transformer windings, *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Des Moines, IA, 2014, 188-191

[16] Hooshmand R. A., Parastegari M., Yazdanpanah M., Simultaneous location of two partial discharge sources in power transformers based on acoustic emission using the modified binary partial swarm optimisation algorithm, in *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 7, No. 2, March 2013, 112-118

[17] Kundu P., N. Kishore K., Sinha A. K., Frequency dependent propagation characteristics of partial discharge acoustic emission signal, *Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), 2013 IEEE 1st International Conference on*, Kolkata, 2013, 227-230

[18] Li Y. et al., Classification of partial discharge under different voltages using acoustic emission techniques, *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, Bologna, 2013, 121-124

[19] Mahmood Najafi S. A., Peimankar A., Saadati H., Gockenbach E., Borsi H., The influence of corona near to the bushing of a transformer on partial discharge measurement with an acoustic emission sensor, *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Ottawa, ON, 2013, 295-298

[20] Sikorski W., Siodla K., Moranda H., Ziomek W., Location of partial discharge sources in power transformers based on advanced auscultatory technique, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, No. 6, December 2012, 1948-1956

[21] Cichoń A., Borucki S., Diagnostics of technical condition on load tap changers by acoustic emission method using different types of measuring transducers, *International Conference on*

- High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Shanghai, 2012, 621-624
- [22] Bhavani Shanker T., Nagamani H. N., Puneekar G. S., Thermal effects on acoustic emission based PD in transformer oil: A study, *Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 2012 IEEE 10th International Conference on the, Bangalore, 2012, 1-4
- [23] Salom I., Laboratory model for partial discharge diagnostics using acoustic emission measurement, *Telecommunications Forum (TELFOR)*, 2012 20th, Belgrade, 2012, 1220-1223
- [24] Cavallini A., C. Ramos G. A., G. C. Montanari, J. Rubio-Serrano and J. A. Garcia-Souto, Comparison of ultrasonic, electrical and UHF characteristics of partial discharge emission in oil/paper insulation systems, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2011 Annual Report Conference on, Cancun, 2011, 440-443
- [25] Venkatesh A., Danikas M. G., R. Sarathi, Understanding of partial discharge activity in transformer oil under transient voltages adopting acoustic emission technique, 2011 6th International Conference on Industrial and Information Systems, Kandy, 2011, 98-101
- [26] Md Thayoob Y. H., Nur Faizah Abidin, Zakaria Z., Ramli A. Q., Lee C. M., Detection of acoustic emission signals from partial discharge sources in oil-pressboard insulation system, *Research and Development (SCORED)*, 2010 IEEE Student Conference on, Putrajaya, 2010, 381-386
- [27] Koperundeivi G., Goyal M. K., Das S., Roy N. K., Sarathi R., Classification of incipient discharges in transformer insulation using Acoustic Emission signatures, 2010 Annual IEEE India Conference (INDICON), Kolkata, 2010, 1-5
- [28] Kundu P., Kishore N. K., Sinha A. K., Classification of acoustic emission based partial discharge in oil pressboard insulation system using Fractal Features, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2010 Annual Report Conference on, West Lafayette, IN, 2010, 1-4
- [29] Thayoob Y. H. M., Zakaria Z., Samsudin M. R., Ghosh P. S. and Chai M. L., Preprocessing of acoustic emission signals from partial discharge in oil-pressboard insulation system, *Power and Energy (PECon)*, 2010 IEEE International Conference on, Kuala Lumpur, 2010, 29-34
- [30] Fan Ju, Liang Xidong, Yin Yu, Wang Chengsheng, Chen Ling, Application of acoustic emission technology on structure design and quality control of composite insulators, *Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on, Xi'an, 2000, vol.1., 358-361
- [31] Azevedo C. H. B., Marques A. P., C. J. Ribeiro, Methodology for the detection of partial discharges in power transformers using the acoustic method, *EUROCON 2009, EUROCON '09. IEEE*, St.-Petersburg, 2009, 618-621
- [32] Boczar T., Borucki S., Cichon A., D. Zmarzly, Application possibilities of artificial neural networks for recognizing partial discharges measured by the acoustic emission method, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, No. 1, February 2009, 214-223
- [33] Kundu P., Kishore N. K., Sinha A. K., Behavior of Acoustic Partial Discharge Signal in Oil-Pressboard Insulation System, 2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems, Kharagpur, 2008, 1-6
- [34] Su-Yeon Choi, Dae-Won Park, Il-Kwon Kim, Chan-Yong Park and Gyung-Suk Kil, Analysis of acoustic signals generated by partial discharges in insulation oil, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2008*, Beijing, 2008, 525-528
- [35] Chai M. L., Thayoob Y. H. M., Ghosh P. S., Sha'ameri A. Z., Talib M. A., Identification of Different Types of Partial Discharge Sources from Acoustic Emission Signals in the Time-Frequency Representation, 2006 IEEE International Power and Energy Conference, Putra Jaya, 2006, 581-586.
- [36] Kuppuswamy R., Coquelin P., Power transformer asset management on-line partial discharge measurement-a new approach, *CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2005, 445-448
- [37] Nagamani H. N., Bhavani Shanker T., Vaidhyathan V., Neelakantan S., Acoustic emission technique for detection and location of simulated defects in power transformers, *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, St. Petersburg, 2005, 1-7
- [38] Boczar T., Zmarzly D., Application of wavelet analysis to acoustic emission pulses generated by partial discharges, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 11, No. 3, Jun 2004, 433-449
- [39] Tian Y., Lewin P. L., Davies A. E., Sutton S. J., Swingler S. G., Application of acoustic emission techniques and artificial neural networks to partial discharge classification, *Electrical Insulation, 2002, Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on*, Boston, MA, 2002, 119-123
- [40] Akumu A. O., Kawaguchi N., Ozaki R., Ihori H., Fujii M., Arii K., A study of partial discharge acoustic signal propagation in a model transformer, *Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001)*, Himeji, 583-586
- [41] Boczar T., Identification of a specific type of PD from acoustic emission frequency spectra, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 8, No. 4, Aug 2001, 598-606
- [42] Menon R., Kolambekar S., Buch N. J., Ramamoorthy M., Correlation of acoustic emission method and electrical method for detection of partial discharges in transformers, *Solid Dielectrics, 2001. ICSD '01. Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference on*, Eindhoven, 2001, 299-302
- [43] Olivieri M. M., Mannheimer W. A., Ripper-Neto A. P., On the use of acoustic signals for detection and location of partial discharges in power transformers, *Electrical Insulation, 2000, Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on*, Anaheim, CA, 2000, 259-262
- [44] Witos F., Gacek Z., Properties of AE signals coming from PD caused by modeled sources immersed in transformer oil, *Acta Physica Polonica A*, 116 (2009), No. 3, 422-427
- [45] Ziomek W., Sikorski W., Siodła K., Staniek P., Kuffel E., Location and recognition of partial discharge sources in a power transformer using advanced acoustic emission method, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), nr.10, 20-23
- [46] Sikorski W., Morañda H., Bródka B., Neumann R., Detekcja, identyfikacja i lokalizacja źródeł wyladowań niezupelnych w transformatorze energetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr.11b, 142-145
- [47] Sokolov V., Mayakov V., Kuchinsky G., Golubev A., On-site Partial Discharge Measurement of Transformers, *es.eaton.com*, 1-19
- [48] Sokolov V., Power Transformer: Post Failure and Post Mortem Analysis, *My Transfo 2007*, Rio de Janeiro, March 7-9, 2007