

## PDtracker – system monitoringu wyładowań niezupełnych w transformatorze energetycznym

**Streszczenie.** W artykule omówiono problematykę monitoringu wyładowań niezupełnych (wnz) w transformatorze energetycznym przy użyciu systemu PDtracker. Dodatkowo przedstawiono nowe moduły sprzętowe i programowe, które poprawiły skuteczność jego działania (funkcja automatycznej identyfikacji wyładowań niezupełnych, funkcja długookresowej łącznej analizy czasowo-częstotliwościowej, moduł detekcji wnz w paśmie wysokich częstotliwości, moduł bezdotykowego pomiaru wysokiego napięcia).

**Abstract.** The issue of partial discharge monitoring in power transformer using PDtracker system was discussed in the paper. Additionally, the new software and hardware modules, which improved effectiveness of its functioning (e.g. automatic partial discharge recognition, long-term joint time-frequency analysis, partial discharge detection module in high frequency range, non-contact high voltage measurement device) were presented. (PDtracker – on-line partial discharge monitoring system for power transformers)

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezupełne, monitoring transformatora energetycznego

**Keywords:** partial discharge, power transformer monitoring

doi:10.12915/pe.2014.10.11

### Wstęp

Ostatnie lata przyniosły wyraźny zwrot w strategii zarządzania majątkiem sieciowym, w tym transformatorami dużych mocy. Zdarzające się coraz częściej katastrofalne w skutkach awarie, wymusiły wprowadzenie nowych regulacji i zaleceń w zakresie eksploatacji i diagnostyki urządzeń o strategicznym znaczeniu dla zapewnienia ciągłości dostaw energii. Dodatkowo rosnące wymagania firm ubezpieczeniowych stawiane starzejącej się, a przez to obciążonej dużym ryzykiem uszkodzenia, infrastrukturze sieciowej wymogły na operatorze zmianę dotychczasowej polityki. Jednym z przejawów tych zmian jest wprowadzenie bardziej kompleksowej diagnostyki poszczególnych komponentów transformatora oraz skrócenie przerw pomiędzy kolejnymi badaniami okresowymi. Takie podejście sprawia, że znacząco rosną koszty eksploatacji. Alternatywą dla diagnostyki okresowej stanowi obecnie monitoring transformatora prowadzony w trybie krótkookresowym (np. tygodniowy monitoring wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej) lub ciągłym (system pomiarowy jest instalowany na stałe). Przy rosnących cenach eksploatacji oraz dzięki zwiększeniu niezawodności tego typu rozwiązań wydaje się, że zastosowanie systemów on-line jest korzystne zarówno z technicznego jak i ekonomicznego punktu widzenia. Warto również zwrócić uwagę na to, że systemy monitoringu ciągłego wpisują się bardzo dobrze w strategię, która w najbliższej przyszłości zakłada rezygnację ze stacji obsługowych na rzecz w pełni zautomatyzowanych i zdalnie zarządzanych stacji bezobsługowych.

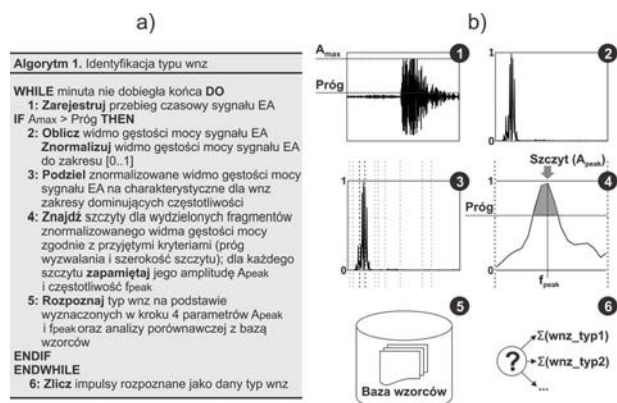
W 2011 roku Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej opracował system PDtracker będący pierwszym w kraju i jednym z pierwszych na świecie urządzeń do monitoringu on-line wyładowań niezupełnych. W styczniu 2012 roku system został wdrożony pilotażowo na jednej ze stacji rozdzielczych należących do PSE S.A.

Pierwsza, prototypowa wersja systemu PDtracker, której doświadczenia eksploatacyjne zostały szczegółowo opisane m.in. w [1, 2, 3], pełniła przede wszystkim funkcję detektora impulsów wyładowań niezupełnych opartego na metodzie emisji akustycznej (EA). W swojej obecnej wersji PDtracker to zaawansowany system ekspercki z rozbudowaną warstwą programową i otwartą, w pełni skalowalną architekturą sprzętową. W niniejszym artykule omówiono wybrane, nowe funkcje systemu, które przyczyniają się do poprawy wiarygodności procedur detekcji i identyfikacji wyładowań niezupełnych.

### Funkcja automatycznej identyfikacji rodzaju wyładowań niezupełnych

Funkcja automatycznej identyfikacji rodzaju wyładowań niezupełnych została dodana do warstwy oprogramowania systemu PDtracker z dwóch zasadniczych powodów. Po pierwsze, pozwala ona odróżnić sygnały emisji akustycznej pochodzące od wyładowań niezupełnych od sygnałów zakłóceń (np. sygnałów EA powstających podczas operacji przełączania zaczepów, wysokoczęstotliwościowego szumu Barkhausena czy wyładowań atmosferycznych itp.). Po drugie i zarazem najważniejsze – funkcja ta pozwala wykryć i z dużym prawdopodobieństwem rozpoznać wyładowania wysokoenergetyczne, np. wnz międzyzwojowe czy wnz ślizgowe na przegrodach preszpanowych. Stanowi to ważną zaletę systemu monitoringu, gdyż tego typu wyładowania stanowią zwykle największe zagrożenie dla kondycji układu izolacyjnego transformatora, gdyż w stosunkowo krótkim czasie mogą doprowadzić do jego uszkodzenia.

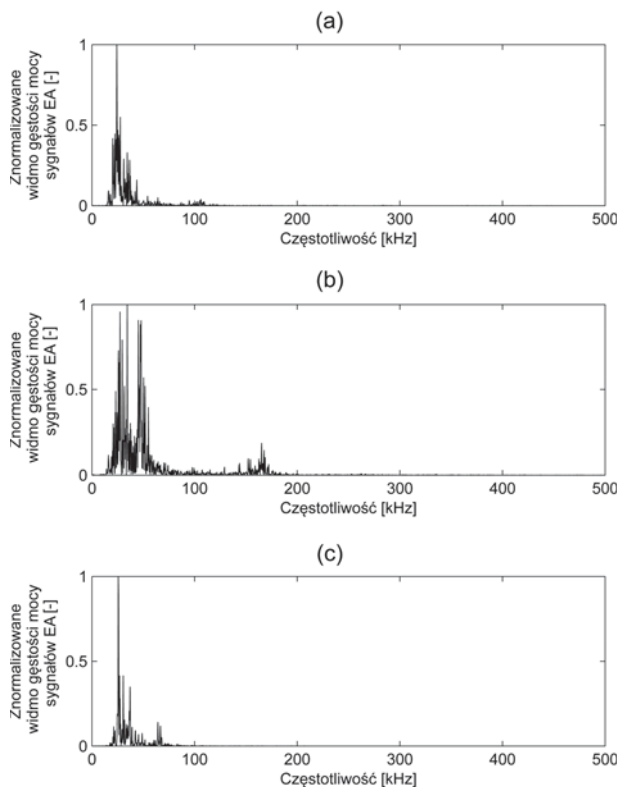
Algorytm funkcji został zoptymalizowany do działania w czasie rzeczywistym (ang. *real-time computing*), dzięki czemu nie powoduje opóźnień w realizacji podstawowego zadania systemu, jakim jest detekcja impulsów wnz i ciągłe śledzenie ich podstawowych parametrów. Działanie algorytmu opiera się na analizie porównawczej parametrów częstotliwościowych rejestrowanych sygnałów EA z wbudowaną bazą parametrów wzorcowych wyładowań (tzw. „odcisku palca”) typowych dla układu izolacyjnego papier-olej [4, 5]. Schemat ideowy algorytmu i jego poszczególne kroki przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Algorytm funkcji automatycznej identyfikacji typu wnz: a) pseudokod, b) schemat ideowy

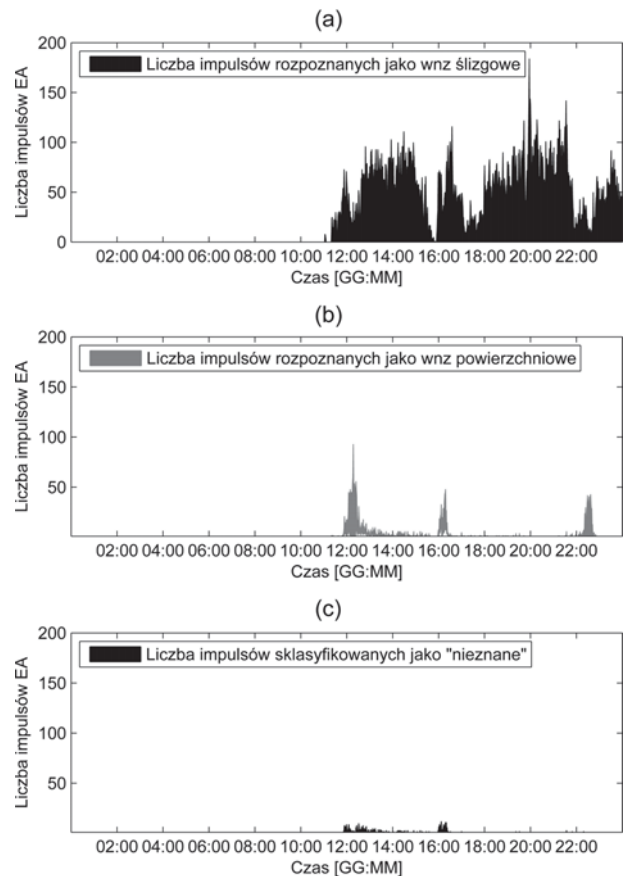
W przypadku metody emisji akustycznej wartości parametrów częstotliwościowych sygnałów wnz w równym stopniu zależą od rodzaju defektu, jak i od elementów składowych układu pomiarowego (tj. rodzaju zastosowanych przetworników piezoelektrycznych, wzmacniaczy i filtrów). Dlatego opracowanie bazy wzorców wnz wymagało w pierwszej kolejności zakończenia etapu budowy warstwy sprzętowej systemu, gdyż każda zmiana w konfiguracji powodowałaby konieczność powtórzenia wykonania czasochłonnych, laboratoryjnych badań modelowych. Projektując system przewidziano możliwość zastosowania różnych, dostępnych na rynku przetworników emisji akustycznej. Obecna wersja systemu pozwala na automatyczną identyfikację rodzaju wylądowań niepełnych dla następujących, najczęściej stosowanych w elektroenergetyce typów przetworników emisji akustycznej: WD, R15D i D9241A.

Na rysunku 2 zestawiono przykładowe, wzorcowe charakterystyki częstotliwościowe opracowane dla sygnałów EA generowanych przez wnz ślizgowe, które rejestrowano wymienionymi wyżej przetwornikami w trakcie modelowych badań laboratoryjnych.



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki wzorcowe (znormalizowane widma gęstości mocy sygnałów EA) wnz ślizgowych uzyskane za pomocą przetwornika piezoelektrycznego typu WD (a), R15D (b) i D9241A (c)

Na rysunku 3 przedstawiono wynik automatycznej identyfikacji rodzajów wylądowań niepełnych zarejestrowanych pierwszego dnia (4.7.2012) działania funkcji w systemie monitoringu *PDtracker* pracującym na badanym transformatorze 330 MVA. Analiza danych z tego dnia wykazała, że do inicjacji wylądowań doszło około godziny jedenastej. Większość spośród zarejestrowanych impulsów EA została sklasyfikowana przez system jako wnz ślizgowe o niskiej intensywności i ciągłym charakterze (niegasnące). Dodatkowo wykryto trzy niezbyt długie, bo około godzinne okresy zapłonu wnz powierzchniowych.



Rys. 3. Wynik automatycznej identyfikacji rodzajów wylądowań niepełnych zarejestrowanych pierwszego dnia (4.7.2012) działania funkcji w systemie monitoringu *PDtracker* pracującym na transformatorze 330 MVA

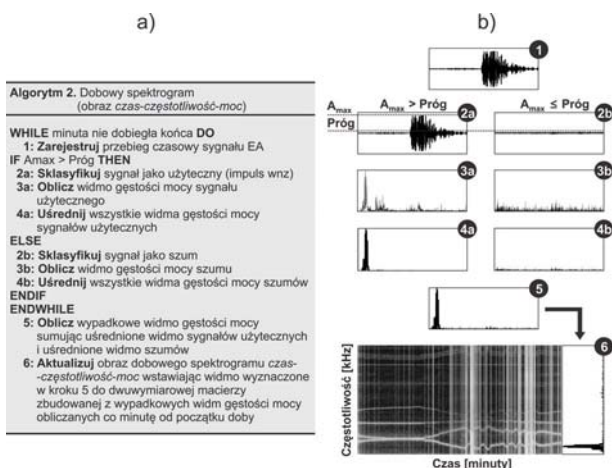
### Funkcja długookresowej, łącznej analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów EA

Wynikiem działania opisanej w poprzednim punkcie funkcji jest wyłączenie informacji o liczbie impulsów sklasyfikowanych jako dany rodzaj wnz oraz liczbie impulsów nieznanego pochodzenia (nierozpoznanych). Dlatego, aby umożliwić obsłudze systemu *PDtracker* wykonanie bardziej zaawansowanej analizy sygnałów (szczególnie w kontekście efektywnego rozpoznawania wylądowań i zakłóceń), dodatkowo opracowano i zaimplementowano algorytm długookresowej, łącznej analizy czasowo-częstotliwościowej (rys. 4).

Efektom działania algorytmu jest wygenerowanie dobowego, pseudo-trójwymiarowego obrazu *czas-częstotliwość-moc sygnału*, na podstawie którego możliwa jest:

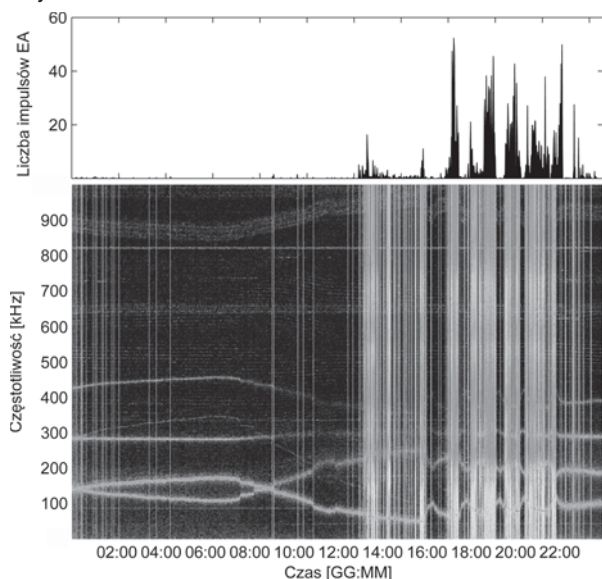
- obserwacja zmian parametrów częstotliwościowych rejestrowanych sygnałów EA i HF,
- identyfikacja wylądowań niepełnych (w tym także wieloźródłowych wnz różnych typów),
- identyfikacja chwilowych, krótkotrwałych zakłóceń szerokopasmowych (wylądowania atmosferyczne, operacje PPZ i inne operacje łączeniowe na stacji GPZ),
- identyfikacja zakłóceń wąskopasmowych (np. sygnałów EA generowanych przez zdefektowane, zacierające się łożyska wentylatora układu chłodzenia transformatora).

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy wynik dobowej, łącznej analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów EA zarejestrowanych na monitorowanym transformatorze. W tym konkretnym, wybranym na potrzeby artykułu przykładzie, analiza spektrogramu potwierdziła, że większość spośród zarejestrowanych tego dnia sygnałów EA posiadała składowe harmoniczne o dominującej częstotliwości typowej dla wnz



Rys. 4. Algorytm funkcji długookresowej łącznej analizy czasowo-częstotliwościowej: a) pseudokod, b) schemat ideowy

powierzchniowych (w tym również ślizgowych), tj. 30 kHz, 110 kHz i 160 kHz. Obraz *czas-częstotliwość-moc* pozwolił również zaobserwować liczne zakłócenia i szumy akustyczne. Część z nich miała wyraźnie wąskopasmowy charakter (np. pasmo 340-345 kHz i 815-820 kHz) i względnie stałą w czasie energię i częstotliwość dominującą. Z kolei inne zakłócenia charakteryzowały się zmienną w czasie częstotliwością (np. pasma 850-950 kHz, 350-450 kHz), a ich kształt pokrywa się częściowo z charakterystyką obciążenia lub napięcia. Niestety, z dotychczas zebranych doświadczeń i analiz trudno jest jednoznacznie określić przyczyny występowania w badanym transformatorze tak licznych i zróżnicowanych zakłóceń.



Rys. 5. Wynik długookresowej (dobowej) łącznej analizy czasowo-częstotliwościowej z pierwszego dnia (16.7.2013) działania funkcji w systemie *PDtracker* pracującym na transformatorze 330 MVA

### Moduł detekcji wyładowań niepełnych w paśmie wysokich częstotliwości (HF)

Konwencjonalna metoda elektryczna (zgodna z PN-EN 60270) jest jedyną metodą umożliwiającą pomiar wyładowań niepełnych, która dodatkowo zapewnia wysoką czułość ich detekcji (nawet  $< 1$  pC). Niestety, ze względu na ograniczoną odporność na zakłócenia elektryczne (głównie ulot z linii przesyłowych), bezpośrednie sprzężenie z obwodem WN oraz konieczność wyłączenia transformatora na czas montażu, nie jest ona przystosowana do monitoringu wzn. Pozo-

stałe metody, klasyfikowane zgodnie z nomenklaturą CIGRE i IEEE jako niekonwencjonalne, służą detekcji lub lokalizacji wyładowań. W porównaniu do metody konwencjonalnej nie umożliwiają pomiaru ładunku pozornego wyładowań niepełnych, zaś czułość ich detekcji jest mniejsza. Niewątpliwie jednak możliwość stosunkowo łatwego przystosowania metod niekonwencjonalnych do pracy w trybie monitoringu długookresowego sprawiła, że stanowią one dziś ważną alternatywę dla klasycznych technik pomiaru wzn.

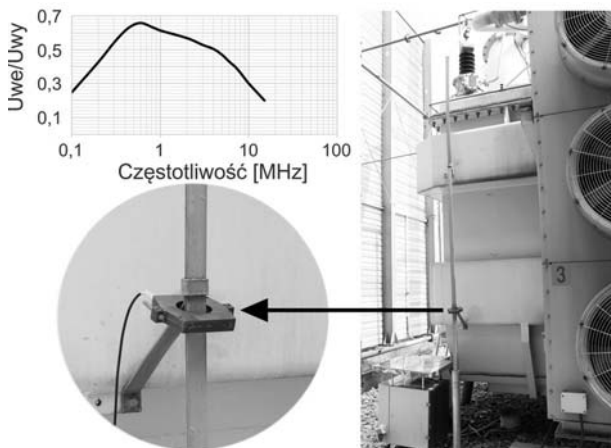
Spśród dostępnych metod niekonwencjonalnych, najbardziej rozpowszechniła się metoda analizy gazów rozpuszczonych w oleju (DGA). Niestety, dotychczasowe doświadczenia krajowej elektroenergetyki z eksploatacji przystosowanych do pracy ciągłej systemów DGA wykazują, że ich wiarygodność i efektywność jest mocno ograniczona. Reprezentatywny przykład tego problemu stanowi także przypadek transformatora, na którym testowano system *PDtracker*. Jednostka ta została wyposażona w popularne na rynku urządzenie do monitorowania gazów rozpuszczonych w oleju, jednak co do poprawności jego działania są bardzo duże wątpliwości. Przez okres ostatnich dwóch lat wykazuje on stałą, przez co mało prawdopodobną, zawartość gazów (ok. 90-110 ppm) i jeszcze bardziej nierealną wartość zawilgocenia oleju wynoszącą 2 ppm (zawilgocenie nowego oleju, w zakresie typowych wartości temperatury pracy transformatora, wynosi ok. 10-12 ppm).

Pozostałe, alternatywne do metody DGA techniki detekcji wyładowań niepełnych, to dopracowana i dobrze poznana metoda emisji akustycznej (EA) oraz stosunkowo nowe metody elektromagnetyczne (HF/VHF/UHF). Wszystkie wymienione metody mogą być przystosowane do pracy w trybie monitoringu ciągłego, zaś kilka firm oferuje już kompletne systemy pomiarowe dedykowane specjalnie dla transformatorów energetycznych i rozdzielnic izolowanych gazem SF<sub>6</sub>.

Zainstalowany na transformatorze prototypowy system monitoringu wzn podczas rocznej eksploatacji zarejestrował kilka okresów o podwyższonym poziomie amplitudy i energii sygnałów emisji akustycznej. Niestety, z powodu niepoprawnej pracy urządzenia do DGA, nie była możliwa weryfikacja wyników uzyskanych przez system monitoringu i jednoznacznego potwierdzenia, że źródłem rejestrowanych impulsów emisji akustycznej było zjawisko wyładowań niepełnych. Dlatego podjęto decyzję o rozpoczęciu prac badawczych mających na celu opracowanie i wykonanie modułu detekcji wzn w paśmie wysokich częstotliwości (HF). W zamierzeniu autorów, jego wdrożenie powinno poprawić wiarygodność detekcji wyładowań niepełnych metodą EA. W warstwie oprogramowania procedurę detekcji wzn rozszerzono o funkcję określającą zależności korelacyjne pomiędzy parametrami sygnałów akustycznych i elektrycznych. Na chwilę obecną, urządzenia do DGA zainstalowane na krajowych transformatorach, takiej możliwości nie są w stanie zagwarantować. Analizując wyłącznie aspekt czułości detekcji wzn, bardziej optymalnym rozwiązaniem byłaby rozbudowa systemu *PDtracker* nie o moduł HF, lecz UHF. Sondy UHF zwykle montuje się w zaworach spustowych oleju lub w specjalnie do tego celu przystosowanych oknach rewizyjnych. Niestety pierwsza technika montażu nie gwarantuje wysokiej czułości detekcji wzn (zbyt duża odległość od części aktywnej transformatora), zaś druga wymaga kilkudniowego wyłączenia jednostki oraz spuszczenia dużej objętości oleju. W tym aspekcie metoda HF wykazuje niewątpliwą przewagę nad metodą UHF, gdyż sonda pomiarowa (przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości) instalowana jest na

przewodzie uziemiającym punkt neutralny bez konieczności wyłączania transformatora. Dodatkową zaletą, oprócz łatwości montażu, jest względnie wysoka czułość detekcji wzn. Dlatego też, już na etapie projektowania systemu monitoringu, autorzy przewidzieli możliwość zainstalowania przekładników prądowych wysokiej częstotliwości ( *HFCT* – ang. *High Frequency Current Transformer* ). Dzięki temu sygnał napięciowy z przekładnika może być rejestrowany przez moduł akwizycji sygnałów EA. Wymaga to jednak zastosowania dodatkowej funkcji cyfrowej filtracji sygnałów (w celu odseparowania sygnałów EA i HF) oraz zwiększenia częstotliwości próbkowania do 20 MS/s. Dlatego lepszym rozwiązaniem, z uwagi na konieczność zapewnienia wysokiej wydajności i efektywności działania systemu, jest jego doposażenie w dodatkowy, dedykowany moduł akwizycji sygnałów HF.

W połowie marca 2013 roku, bezpośrednio po zakończeniu testów laboratoryjnych, system *PDtracker* rozbudowano o przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości zyskując tym samym możliwość detekcji wzn równocześnie metodą akustyczną i elektromagnetyczną. Wybrano przekładnik z dzielonym rdzeniem, co nie tylko ułatwia jego montaż na szynoprzewodzie, ale również zapobiega nasyceniu (producent zaleca, aby szczelina w rdzeniu miała grubość ok. 1 mm i była wypełniona materiałem dielektrycznym). Czujnik zainstalowano na przewodzie uziemiającym punkt gwiazdowy uzwojenia górnego napięcia transformatora (rys. 6). Impulsy wyładowań niepełnych rejestrowane są w paśmie do 10 MHz.

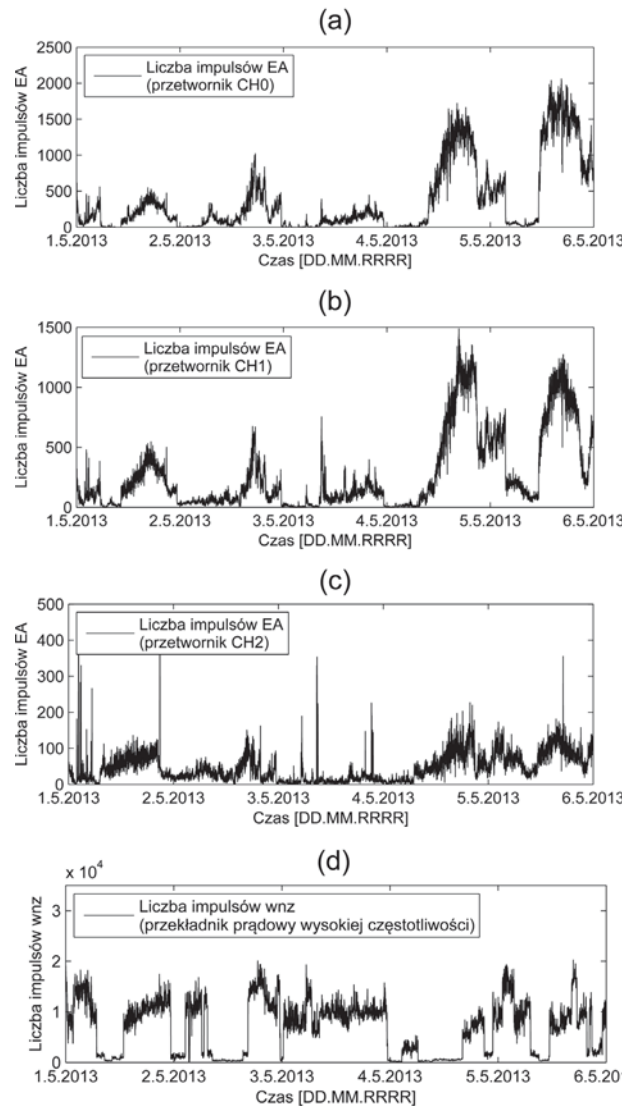


Rys. 6. Miejsce montażu przekładnika prądowego wysokiej częstotliwości oraz jego charakterystyka przenoszenia

Na rysunku 7 zestawiono parametry impulsów wzn zarejestrowanych równolegle metodą emisji akustycznej (kanały CH00-CH02) i metodą wysokich częstotliwości (kanał CH03) w okresie od 1 do 6 maja 2013r. Pomimo tego, że czujnik HFCT rejestruje impulsy wyładowań niepełnych równocześnie ze wszystkich faz, to możliwe jest określenie zależności korelacyjnych pomiędzy parametrami elektrycznymi i akustycznymi.

#### Moduł bezkontaktowego pomiaru wysokiego napięcia

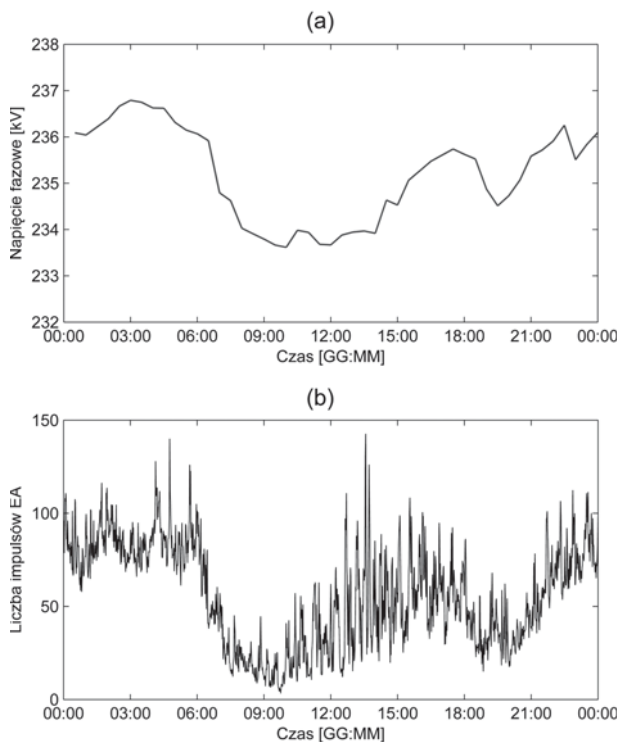
Istotnym parametrem, który znacząco wpływa na aktywność wyładowań niepełnych jest pozycja przełącznika zaczeń, która przekłada się wprost na wartość napięcia na wyjściu transformatora. Potwierdzeniem tej zależności są przykładowe rejestracje wartości skutecznej napięcia i liczby impulsów przedstawione na rysunku 8. Dostępność tego typu informacji w systemie monitoringu wzn pozwoliłaby na korelowanie tego istotnego parametru z aktywnością wzn i mogłaby być wykorzystana w ocenie stanu izo-



Rys. 7. Liczba impulsów wzn zarejestrowana przez system monitoringu w okresie od 1 do 6 maja 2013 roku przez przetworniki EA (a, b, c) oraz przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości (d)

lacji transformatora np. odpowiadać na pytanie, czy wzrost liczby impulsów jest proporcjonalny do wzrostu napięcia, a więc jest efektem poniekąd naturalnym, czy też jest następstwem wzrostu dynamiki rozwoju zjawisk degradacyjnych zachodzących w izolacji, a zatem sygnalizuje potencjalne zagrożenie dla pracy urządzenia. Rejestracja krzywej napięcia mogłaby być również podstawą do tworzenia rozkładów częstościowo-fazowych lub częstościowo-amplitudowych sygnału akustycznego, co dawałoby dodatkowe możliwości w zakresie identyfikacji defektów układu izolacyjnego, a więc poprawiało wiarygodność tego procesu.

Niestety, pomimo współpracy urządzenia *PDtracker* z systemem nadrzędnym monitoringu transformatora, informacja na temat wartości napięcia oraz jego przebiegu w czasie, pozyskiwana z przekładników napięciowych zainstalowanych w polu transformatora, nie jest dla niego dostępna. W związku z powyższym, aby wspomniane wyżej funkcje mogły zostać zrealizowane twórcy systemu monitoringu wzn zdecydowali się na wprowadzenie własnego rozwiązania. Zaproponowany układ pomiarowy pracuje w oparciu o wykorzystanie sondy pojemnościowej o specjalnej konstrukcji. Podstawowe założenia metody wykorzystującej tego typu czujnik w pomiarze wysokiego napięcia przemiennego zostały przedstawione w artykule [6].



Rys. 8. Uśredniony (na podstawie danych z marca 2013 r.), dobowy rozkład wartości napięcia fazowego monitorowanego transformatora 330 MVA (a) oraz liczby zarejestrowanych impulsów EA (b)



Rys. 9. Sonda do bezkontaktowego pomiaru wysokiego napięcia stosowana w systemie monitoringu PDtracker

Sonda (rys. 9) posiada konstrukcję umożliwiającą za instalowanie jej bezpośrednio na kadzi transformatora (mocowania wyposażone w magnesy trwałe) oraz odpowiednią czułość i szczelność, co pozwala zachować stabilne parametry niezależnie od poziomu wilgotności powietrza. Czujnik został jak dotąd bardzo dokładnie przetestowany w warunkach laboratoryjnych oraz poddany krótkotrwałym testom polowym. Obecnie moduł ten został odpowiednio oprogramowany i przygotowany do długotrwałych testów na transformatorze energetycznym, co w niedalekiej przyszłości zostanie zrealizowane.

#### Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane, nowe funkcje sprzętowe i programowe pierwszego w kraju systemu monitoringu wyładowań niepełnych, który opracowano w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. Poprzednia, prototypowa wersja systemu PDtracker pełniła rolę prostego rejestratora wyładowań niepełnych opartego na metodzie emisji akustycznej. Obecnie, dzięki rozbudowie systemu o moduł detekcji wzn w paśmie wysokich częstotliwości, moduł bezkontaktowego pomiaru wysokiego napięcia oraz funkcję automatycznej identyfikacji defektów, wyraźnie poprawiono wiarygodność procedury detekcji wyładowań niepełnych.

#### LITERATURA

- [1] Sikorski W., Walczak K., Andrzejewski M., Gil W., Doświadczenia z rocznej eksploatacji systemu monitoringu wyładowań niepełnych w transformatorze sieciowym dużej mocy, *Międzynarodowa Konferencja Transformator 2013*, 34(5), Gdańsk, 5-7 czerwca 2013.
- [2] Sikorski W., Walczak K., Morańda H., Gil W., Andrzejewski M., System monitoringu wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej – doświadczenia eksploatacyjne, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 11b, 2012.
- [3] Sikorski W., Ziomek W., Siodła K., Morańda H., Location of partial discharge sources in power transformers based on advanced auscultatory technique, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (6), pp. 1948-1956, Dec. 2012.
- [4] Sikorski W. (pod red.), Acoustic Emission, *Intech Publishing*, ISBN 978-9-5333510-056-0, Croatia 2012.
- [5] Sikorski W. (pod red.), Acoustic Emission – Research and Applications, *Intech Publishing*, ISBN 978-953-51-1015-6, Croatia 2013.
- [6] Walczak K., Zdalny pomiar napięcia na stanowisku probierczym w laboratorium wysokich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), nr 10, 24-27, 2008.

**Autorzy:** dr inż. Wojciech Sikorski, dr. inż. Krzysztof Walczak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, email: [wojciech.sikorski@put.poznan.pl](mailto:wojciech.sikorski@put.poznan.pl), [krzysztof.walczak@put.poznan.pl](mailto:krzysztof.walczak@put.poznan.pl)