

## Monitoring on-line wysokonapięciowych izolatorów przepustowych w systemach stacyjnych

**Streszczenie.** Monitoring on-line wysokonapięciowych izolatorów przepustowych nie znalazł dotychczas powszechnej akceptacji z powodu niepewności mierzonych wskaźników izolacji. Integracja monitoringu z systemami stacyjnymi znacznie poprawia uzyskiwane rezultaty. W systemach zintegrowanych możliwe jest wdrażanie rozbudowanych algorytmów monitorowania, uwzględniających zdarzenia stacyjne. Dokładniejsze pomiary umożliwiają wnioskowanie o stanie izolatorów przepustowych, wykorzystujące korelacje zmian współczynnika strat dielektrycznych  $\tan\delta$  oraz temperatury.

**Abstract.** The high voltage bushing on-line monitoring has not found universal acceptance so far, because of high uncertainty of measured insulation parameters. The monitoring integration in station systems greatly improves the obtained results. It is possible to implement complex monitoring algorithms in integrated systems, taking into account the substation events. The new conclusion rules can be also elaborated basing on the power dissipation factor and temperature correlation. (**The high voltage bushing on-line monitoring in station systems**).

**Słowa kluczowe:** monitoring on-line, wysokonapięciowe izolatory przepustowe, współczynnik strat dielektrycznych, wpływ temperatury  
**Keywords:** on-line monitoring, high voltage bushings, dielectric dissipation factor, temperature influence

doi:10.12915/pe.2014.10.10

### Wstęp

Każde uszkodzenie izolatora przepustowego wymaga wyłączenia transformatora, najczęściej z powodu niezbędnej wymiany tego podzespołu. Wywołuje to perturbacje w systemie energetycznym i może również prowadzić do strat wynikających z niedostarczonej energii. Problematyce monitorowania stanu wysokonapięciowych izolatorów przepustowych poświęca się zatem wiele uwagi. Wpływa na to realny rachunek ekonomiczny, a nie tylko częstokroć wręcz spektakularny przebieg ich awarii, często kończących się eksplozją, pożarem i całkowitym zniszczeniem transformatora.

Tradycyjnie metody monitorowania są ukierunkowane na wykrywanie wolno rozwijających się uszkodzeń. Badania off-line nie dają pełnego obrazu zachodzących zjawisk, gdyż są wykonywane sporadycznie lub okresowo, przy wielokrotnie niższym napięciu oraz w innej temperaturze niż w normalnych warunkach pracy [1].

Zważywszy na powyższe przesłanki, od wielu lat pracuje się nad metodami monitorowania izolatorów przepustowych w trybie on-line czyli przez cały czas, w rzeczywistych warunkach pracy.

### Stosowane metody

W latach 70. ubiegłego stulecia wdrożono koncepcję ciągłego monitorowania pracy wysokonapięciowych transformatorowych izolatorów przepustowych, bazującą na sumowaniu prądów upływu, wpływających do ich zacisków pomiarowych. Wykorzystywano do tego celu analogowe układy sumujące. W przypadku zmiany wektora prądu upływu w jednym lub w dwóch przepustach, powstawał wektor niezrównoważenia. Kierunek i wartość tego wektora wskazywały na przepust, w którym rozwija się defekt. Cały czas rozwija się tą metodę, budując coraz bardziej zaawansowane urządzenia. Obecnie, w jednym z rozwiązań, wyznacza się zmiany pojedynczych wektorów prądów upływu względem wektora odniesienia [2]. Wielkość zmiany prądu upływu w przepuście pozwala na określenie przyrostu wartości jego pojemności. Wielkość zmiany kąta fazowego prądu upływu względem przepustu odniesienia, pozwala wyznaczyć zmianę współczynnika  $\tan\delta$  izolatora przepustowego, odniesioną do wartości początkowej tego parametru.

Metody prądowe są wrażliwe na zakłócenia powstające w trakcie przesyłania małych prądów upływu, niekiedy na duże odległości. Niebezpieczne jest przerwanie połączenia doprowadzającego prąd upływu do układu pomiarowego,

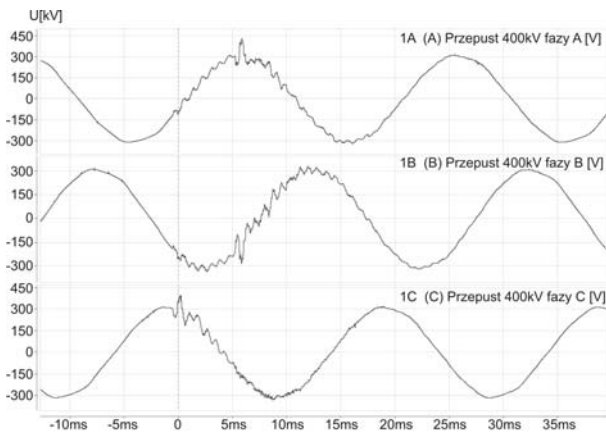
gdyż napięcie pojawiające się wtedy na zacisku pomiarowym może doprowadzić do awarii przepustu. Asymetria napięć w liniach doprowadzanych do izolatorów przepustowych powoduje duże fluktuacje wyznaczanych parametrów. Aby ustabilizować wyniki pomiarów, niezbędne jest na ogół ich długotrwałe uśrednianie.

Druga stosowana metoda monitoringu on-line izolatorów przepustowych, polega na pomiarze wektorów napięć za pomocą sond pojemnościowych, umieszczonych w ich gniazdach pomiarowych. Przyjmuje się jeden z wektorów napięciowych jako wektor odniesienia i względem niego mierzy się przesunięcia kątowe pozostałych. Znajomość przesunięć kątowych i wartości skutecznej napięcia pozwala na wyznaczenie względnych zmian  $\tan\delta$  oraz pojemności izolatora przepustowego [3].

Metoda napięciowa umożliwia monitorowanie przepięć łączeniowych, a także w niektórych rozwiązaniach, przepięć atmosferycznych. Jest to istotna zaleta metody napięciowej w stosunku do metody prądowej. Przykład rejestracji zaburzenia łączeniowego jest pokazany na rysunku 1. W tej metodzie niebezpieczne jest uszkodzenie kondensatora referencyjnego, zainstalowanego w sondzie pomiarowej i utrata połączenia do ziemi. Na zacisku pomiarowym pojawi się wtedy wysokie napięcie, które może doprowadzić do awarii przepustu. Asymetria napięć fazowych, podobnie jak w przypadku metody prądowej, ma negatywny wpływ na dokładność pomiarów [3].

Metody on-line, mimo wieloletniego rozwoju i celowości stosowania, nadal nie uzyskały szerokiej akceptacji. Obie metody, implementowane w specjalizowanych urządzeniach lub modułach monitoringu, dają niestabilne wskazania, głównie z powodu braku kompensacji wpływu asymetrii napięcia w sieci energetycznej i oddziaływania warunków atmosferycznych.

W związku z powyższym, implementuje się algorytmy uśredniające pomiary oraz metody „uczenia” się urządzeń pomiarowych, po to aby eliminować chwilowe fluktuacje wskazań. Uzyskiwane rezultaty nie są zadowalające, głównie z powodu długiego czasu uśredniania i filtracji pomiarów, dochodzącego nawet do 24 godzin. Kontestowane są zatem rozwiązania oparte tylko o obserwację zachowania wektora sumy prądu upływu lub napięcia sumacyjnego, gdyż nie pozwalają na wykrycie szybko narastających objawów degradacji izolatora przepustowego.



Rys.1. Przepięcia łączeniowe, zarejestrowane za pomocą sond pomiarowych, umieszczonych w gniazdach pomiarowych izolatorów przepustowych autotransformatora 400/110kV

### Systemy zintegrowane

Coraz częściej instalowane są systemy monitoringu online transformatorów, w których z reguły monitorowana jest część aktywna transformatora, zawilgocenie i zawartość gazów w oleju, praca przełącznika zaczeów, układ chłodzenia. W Polsce pracuje ponad 70 tego rodzaju systemów. Posiadają one zaimplementowany moduł ekspercki, który w oparciu o analizę gromadzonych danych generuje ostrzeżenia, alarmy oraz podpowiedzi dla obsługi [4]. Integracja w tych systemach podsystemu lub modułu monitoringu przepustów może znacząco poprawić pewność wnioskowania o stanie monitorowanych izolatorów przepustowych, dzięki poprawie jakości wskazań i kompleksowej ocenie zachodzących zjawisk.

Systemy monitoringu posiadają niezbędne zasoby do długookresowego, wieloletniego gromadzenia zmierzonych wartości, w tym także wskaźników jakości izolacji przepustów. Pozwala to na obserwację i porównanie zmian

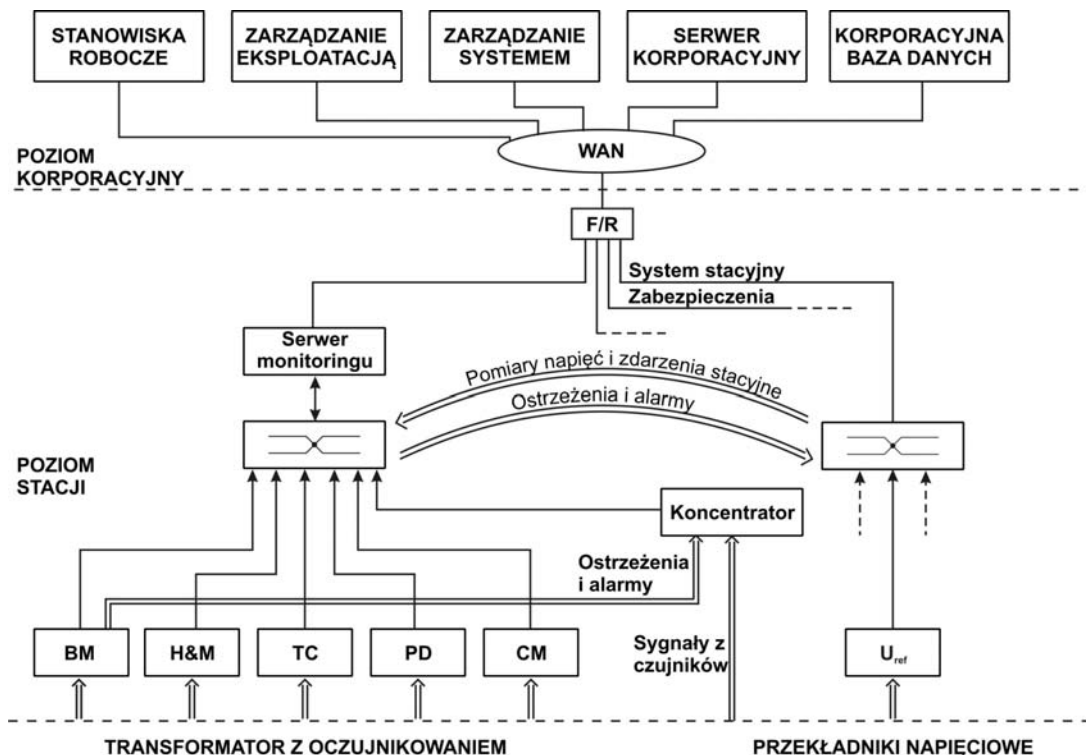
tych wartości w krótszych jak i w dłuższych okresach. Rezultaty obliczeń i analiz, wykonywanych przez system, mogą być dostępne w postaci raportów, a także mogą być prezentowane lokalnie lub zdalnie w technologii strony internetowej.

Podsystem lub moduł monitoringu przepustów powinien być zintegrowany nie tylko ze specjalizowanym systemem monitoringu transformatorów, ale także z systemem dyspozytorskim zarządzania siecią elektroenergetyczną. To założenie niejednokrotnie budzi opór projektantów, zakładających pełne rozdzielanie systemów monitoringu i systemów sterowania. Ta zasada powinna ulec zmianie, gdyż systemy zintegrowane posiadają szereg niezaprzeczalnych zalet i właściwości, otwierających nowe możliwości tworzenia oraz doskonalenia algorytmów monitorowania.

Systemy monitoringu umożliwiają wdrożenie algorytmów porównawczych oceny stopnia degradacji izolatora. W tego rodzaju systemach, gromadzących dane z kilku lub kilkunastu transformatorów, mogą być wdrożone algorytmy wprost oparte o porównanie zmian współczynnika strat dielektrycznych lub wartości pojemności.

Jeszcze większe możliwości dają systemy korporacyjne, gromadzące dane z wielu setek transformatorów. Mogą one, w oparciu o wskaźniki indeksowe typu „health index”, zapewnić efektywne monitorowanie dużych populacji izolatorów przepustowych określonego typu, pracujących w różnych transformatorach. Strukturę takiego systemu pokazano na rysunku 2. W otoczeniu transformatora, wyposażonego w niezbędne czujniki temperatury, ciśnienia, przepływu są zainstalowane następujące urządzenia monitorujące:

- moduł monitoringu izolatorów przepustowych (BM),
- czujnik zawartości gazów i zawilgocenia (H&M),
- układ monitorowania przełącznika zaczeów (TC),
- moduł monitorowania wyładowań niezupełnych (PD),
- moduł monitorowania układu chłodzenia (CM).



Rys.2. Zintegrowany system monitoringu izolatorów przepustowych z monitoringiem transformatora oraz z połączeniem do serwera korporacyjnego

Urządzenia monitorujące są połączone do serwera systemu monitoringu, realizującego niezbędne agregacje pomiarów i algorytmy wnioskowania o stanie poszczególnych, monitorowanych podzespołów.

Serwer korzysta ze zdarzeń stacyjnych i pomiarów napięć, przekazywanych poprzez lokalne połączenia sieciowe. Wszystkie dane oraz ostrzeżenia i alarmy, wypracowywane przez serwer monitoringu, są przekazywane poprzez strukturę sieciową WAN do bazy serwera korporacyjnego.

Tworzenie takich systemów ułatwia standard PN-EN 61850 [5], systematyzujący opis logiczny oraz struktury danych wyposażenia instalowanego na stacjach. Dotyczy to również monitorowania izolatorów przepustowych, dla którego zaprojektowano niezależny węzeł logiczny ZBSH [5].

Powiązanie systemu monitoringu z systemem sterowania i nadzoru, a także tworzenie systemów korporacyjnych, nie jest jeszcze szeroko akceptowane. Niekiedy zakłada się wręcz, że te systemy powinny składać się z niezależnych urządzeń i dróg komunikacyjnych, oddzielonych nie tylko logicznie, ale także fizycznie. Jest to związane z obawami naruszenia zasad bezpieczeństwa informatycznego, skutkującym zaburzeniami pracy systemu sterowania i nadzoru. Aby doszło do zmiany takiego podejścia wymagane jest przeprowadzenie analizy zagrożeń i przyjęcie odpowiednich rozwiązań już na etapie projektu systemu oraz przestrzeganie zasad bezpieczeństwa informatycznego w trakcie eksploatacji [6].

#### Zalety rozwiązań zintegrowanych

Układ monitoringu przepustów może korzystać z pomiarów napięć z przekładników napięciowych w celu kompensacji asymetrii sieci zasilającej. Dzięki temu można znacząco poprawić dokładność pomiarów w monitoringu izolatorów przepustowych, szczególnie w przypadku monitorowania transformatorów sieciowych. Przykład takiego rozwiązania, opartego o metodę względną napięciową jest pokazany na rysunku 2. Napięcia fazowe z przekładników napięciowych są mierzone przetwornikiem pomiarowym  $U_{ref}$  i przekazywane w standardzie PN-EN 61850 [5] do urządzenia BM monitorującego przepustę. W oparciu o te wartości realizowana jest kompensacja wpływu asymetrii napięć liniowych. Błędy wynikające z przesunięć kątów fazowych napięć w przekładnikach napięciowych są kompensowane w trakcie kalibracji układu pomiarowego. Dokładniej tą zasadę pomiaru omówiono w artykule [7]. W rezultacie, możliwe jest oszacowanie zmiany  $tg\delta$  z dokładnością lepszą niż 0,1%. Zmiana pojemności jest szacowana z dokładnością 3pF.

Zaawansowany monitoring przepustów powinien uwzględniać te zdarzenia stacyjne, które mają wpływ na pomiary współczynników izolacji. Dotyczy to zmian napięcia wywołanego przełączeniami przełącznika zaczeptów, które mogą być błędnie interpretowane jako skokowe zmiany pojemności przepustów, o ile w algorytmie wyznaczania tego parametru nie będzie brane pod uwagę napięcie linii lub zmiana pozycji przełącznika zaczeptów. Podobne sytuacje mogą wystąpić podczas zwarć, załączania dławików kompensacyjnych, działania wyłączników.

Jeżeli system wykryje nagłą zmianę pojemności przepustu, odpowiadającą uszkodzeniu jednej lub kilku warstw ekranów rdzenia, to należy sprawdzić czy było to bezpośrednim następstwem załączenia transformatora, innego gwałtownego wzrostu napięcia, przepięcia łączeniowego lub wyładowania atmosferycznego. Koincydencja tych faktów może dodatkowo potwierdzać wystąpienie defektu izolatora przepustowego.

Integracja modułu monitoringu przepustów z systemem dyspozytorskim umożliwi właściwe reagowanie przez obsługę na przekazywane ostrzeżenia i alarmy, które zostały wypracowane przez moduł monitoringu. Operator Krajowego Systemu Przesyłowego zestandaryzował listę ostrzeżeń i alarmów, które muszą być przekazywane do systemu stacyjnego z modułu lub urządzenia monitorującego on-line izolatory przepustowe [8]. Przyjęcie standardowej listy we wszystkich instalacjach, daje podstawy do ujednoczenia zasad reagowania na pojawiające się ostrzeżenia, sygnalizujące rozwój defektów.

#### Nowe możliwości wnioskowania

Poprawienie dokładności oszacowania wartości  $tg\delta$ , a także integracja modułu monitorowania izolatorów przepustowych z systemem monitoringu transformatora, umożliwia zaobserwowanie wpływu temperatury na pomiar tego parametru. W dotychczasowych metodach, drobne fluktuacje wartości  $tg\delta$  były uśredniane. Podczas wykonywania pomiarów  $tg\delta$  metodami tradycyjnymi, kompensuje się wpływ temperatury zewnętrznej, korzystając z tabel przeliczeniowych, podawanych przez producentów przepustów. Taką kompensację w systemach on-line umożliwia analiza zgromadzonych w systemie pomiarów współczynnika stratności przepustu oraz danych o obciążeniu i temperaturze pracy transformatora. W tym celu można skorzystać z zależności (1), wynikającej z prawa Arrheniusa [9].

Pozwala ona określić zmianę wartości współczynnika  $tg\delta$ , gdy zmieni się temperatura pracy przepustu, o ile znany jest współczynnik  $\lambda$  [9]. Współczynnik ten zależy od właściwości konstrukcyjnych przepustu oraz od stopnia jego degradacji [9].

$$(1) \quad tg\delta(\theta) = tg\delta(\theta_0) e^{-\lambda(\theta-\theta_0)},$$

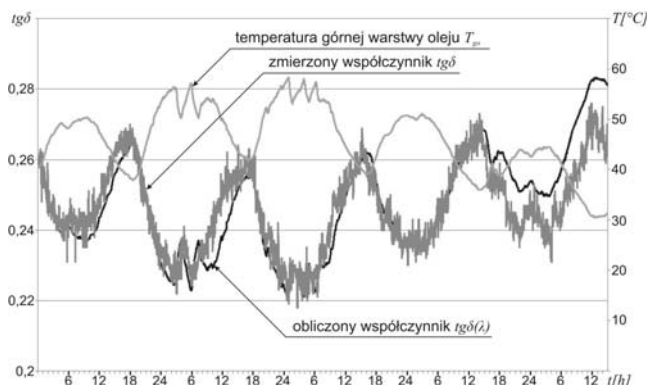
gdzie:  $tg\delta(\theta)$  – wartość współczynnika  $tg\delta$  w aktualnej temperaturze ( $\theta$ ),  $tg\delta(\theta_0)$  – wartość współczynnika  $tg\delta$  w temperaturze odniesienia ( $\theta_0$ ),  $\lambda$  – współczynnik określający właściwości dielektryczne izolacji [9].

Dysponując przebiegami  $tg\delta$  oraz przebiegami temperatury, zarejestrowanymi w systemie monitoringu, można wyznaczyć przybliżoną wartość współczynnika  $\lambda$ . Jeśli wartość tą wyznaczymy dla przepustu niezdegradowanego, o znanym współczynniku  $tg\delta_p$ , to uzyskamy wartość  $\lambda_p$ , którą możemy uznać jako zbiorczy wskaźnik, określający zależność  $tg\delta$  od temperatury.

Na podstawie rzeczywistych pomiarów, wykonano obliczenia  $tg\delta(\lambda)$  w funkcji zmian temperatury górnej warstwy oleju dla przepustu impregnowanego olejowo OIP (ang. Oil Impregnated Paper), typu COT1425-1000. Otrzymane wyniki ilustruje rysunek 3.

Krzywa  $tg\delta$  pokazuje rzeczywiste wartości współczynnika  $tg\delta$ , a krzywa  $T_{go}$  pokazuje przebieg temperatury górnej warstwy oleju. Przebieg  $tg\delta(\lambda)$  obrazuje wyznaczone wartości  $tg\delta$  względem przyrostów temperatury  $T_{go}$  oraz wyznaczonego współczynnika  $\lambda_p = 0,015$ .

Zaobserwowano bardzo dobrą zbieżność przebiegu zmierzonych wartości  $tg\delta$  z przebiegiem wyznaczonym na podstawie wartości  $\lambda$  oraz zmian temperatury  $T_{go}$ . Należy podkreślić, że obserwowane zmiany wartości współczynnika strat dielektrycznych nie przekraczają wartości 0,03. Jest to więcej niż 4% wartości kryterialnej  $tg\delta = 0,7$  – przyjmowanej dla przepustów OIP, powyżej której przepust tego rodzaju powinien być wymieniony [8].



Rys.3. Korelacja temperatury i współczynnika  $tg\delta$

W analizowanym przykładzie wartość  $tg\delta$  maleje ze wzrostem temperatury izolatora przepustowego, a wzrasta gdy temperatura spada. Takie zachowanie nie wskazuje na występowanie defektu. Niepokojący byłby wzrost wartości  $tg\delta$ , towarzyszący wzrostowi temperatury. W przepustach OIP takie tendencje występują w przepustach zawilgoconych i mogą z czasem doprowadzić do uruchomienia lawinowych zjawisk termicznych, które w krótkim czasie doprowadzą do awarii [10]. W oparciu o powyższe zależności jest możliwe wprowadzenie następującego wnioskowania:

- jeśli zmiany  $tg\delta$  odpowiadają zmianom temperatury  $T_{go}$ , w taki sposób, że wzrost temperatury powoduje spadek  $tg\delta$ , to nie ma przesłanek rozwoju defektu w izolatorze przepustowym,
- jeśli zmiany  $tg\delta$  odpowiadają zmianom temperatury  $T_{go}$ , w taki sposób, że wzrost temperatury powoduje wzrost  $tg\delta$ , to może to świadczyć o rozwoju defektu w izolatorze przepustowym,
- jeśli rzeczywiste przyrosty wartości  $tg\delta$  są większe niż wynikałyby ze zmian  $T_{go}$ , to przepust należy poddać obserwacji i wykonać pomiary off-line.

### Wnioski

W zintegrowanych systemach monitorowania on-line izolatorów przepustowych jest możliwa poprawa dokładności oszacowania monitorowanych wskaźników izolacji poprzez korektę asymetrii napięć liniowych. Uwzględnianie zdarzeń stacyjnych w algorytmach wnioskowania i łatwiejsze przekazywanie ostrzeżeń oraz alarmów o rozwijających się defektach dodatkowo zwiększy akceptację dla szerokiego wdrażania takich rozwiązań.

Systemy korporacyjne umożliwiają opracowanie i wdrażanie algorytmów porównawczych i metod indeksowych do monitorowania populacji izolatorów przepustowych.

Już w fazie projektowania zintegrowanych systemów monitorowania izolatorów przepustowych i systemów korporacyjnych należy przeanalizować potencjalne

zagrożenia bezpieczeństwa systemów i przewidzieć środki zaradcze. Przede wszystkim należy wykluczyć możliwość zaburzenia funkcji realizowanych przez system nadzoru i sterowania.

Jest możliwe tworzenie nowych algorytmów monitorowania i rozbudowa wnioskowania o stanie przepustów, na podstawie analizy uwzględniającej zależność drobnych fluktuacji  $tg\delta$  od temperatury. Tematyka ta wymaga dalszych prac odnośnie sposobu określenia temperatur odniesienia dla obliczeń, a także zachowania przepustów wykonanych w nowszych technologiach.

### LITERATURA

- [1] R. Sobocki "Elementy diagnostyki off-oraz on-line w transformatorowych izolatorach przepustowych", *Przegląd Elektrotechniczny*, 1/2014, 248-250
- [2] R. C. Brusetti, S. W. Harpham "Prevention of HV bushing failures through reliable on-line condition assessment", "TRANSFORMATOR 2011", 1-3 czerwca 2011, 3.3/1-12
- [3] T. Stirl, R. Skrzypek, S. Tenbohlen „On Line condition Monitoring and Diagnosis for Power Transformers their Bushings, Tap Changer, and Insulation System”, CMD 2006, Changwong, Korea
- [4] W. Gil, W. Grzybowski, P. Wronek, "The Expert Transformer Monitoring System in Substation Structure" , *International Conference on High Voltage Engineering, ICHVE 2010*, New Orleans, 11-14 Oct.2010, publ. IEEE Xplore, ISBN 978-1-4244-8283-2
- [5] IEC 61850-7-4:2010(E), „Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-4: Basic communication structure. Logical node classes and data object classes”
- [6] IEC Technical Standard (IEC TS), "62351- Power system management and associated information exchange. Data Communications Security", (parts 1-8, 2007 - 2013)
- [7] M. Andrzejewski, W. Gil, W. Masłowski „Doświadczenia aplikacyjne w monitoringu on-line stanu izolatorów przepustowych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11b'2010, 150-153
- [8] Praca Zbiorowa, "Instrukcja Eksploatacji Transformatorów", Energopomiar, Gliwice 2012
- [9] Diego M. Robalino „Accurate Temperature Correction of Dissipation Factor Data for Oil-Impregnated Paper Insulation Bushings: Field Experience”, ISBN 978-1-4577-0986-9/11, IEEE 2011
- [10] P. Przybyłek, H. Morańda, H. Mościcka-Grzesiak, „Bubble effect w izolatorach przepustowych o izolacji wykonanej z różnych materiałów”, *PAK*, nr 4/2011, 406-408

**Autorzy:** Marek Andrzejewski, *Badawczo-Rozwojowa Spółdzielnia Pracy Mikroprocesorowych Systemów Automatyki MIKRONIKA*, ul. Wykopy 2/4, 60-001 Poznań, E-mail: [marek.andrzejewski@mikronika.pl](mailto:marek.andrzejewski@mikronika.pl); Wiesław Gil, *Badawczo-Rozwojowa Spółdzielnia Pracy Mikroprocesorowych Systemów Automatyki MIKRONIKA*, ul. Wykopy 2/4, 60-001 Poznań, E-mail: [wieslaw@mikronika.pl](mailto:wieslaw@mikronika.pl); Przemysław Wronek, *Badawczo-Rozwojowa Spółdzielnia Pracy Mikroprocesorowych Systemów Automatyki MIKRONIKA*, ul. Wykopy 2/4, 60-001 Poznań, E-mail: [wronek@mikronika.pl](mailto:wronek@mikronika.pl).