

Wybrane problemy zawilgocenia izolacji celulozowej wysokonapięciowych izolatorów przepustowych

Streszczenie. Przedstawiono kompleksowo problem zawilgocenia izolacji celulozowej wysokonapięciowych izolatorów przepustowych. Omówiono skrótnie budowę izolatorów typu OIP, RBP i RIP. Wykazano, że w izolatorach typu OIP oraz RBP, w wyniku zawilgocenia izolacji, należy się spodziewać zjawiska bubble effect. Przedstawiono procedurę wyznaczania zawilgocenia izolacji celulozowej w oparciu o wykorzystanie wzorców zwilgocenia oraz odpowiednie modelowanie odpowiedzi dielektrycznej izolatorów, uwzględniające rozkład wzdluzny temperatury oraz specyfikę konstrukcji przepustu.

Abstract. The paper presents a complex problem of moistening of cellulose insulation of high voltage bushing insulators. The construction of OIP, RBP and RIP type insulators was briefly discussed. It has been shown that in the OIP and RBP insulators, as a result of moistening insulation, bubble effect should be expected. The paper presents a procedure for determining the moisture of cellulose insulation based on the use of moisture standards and appropriate modeling of the dielectric response of insulators, taking into account the longitudinal temperature distribution and the specificity of the bushing structure. (*Selected problems of moistening cellulose insulation of HV bushing*).

Słowa kluczowe: przepust wysokiego napięcia, izolacja papier-olej, metoda FDS.

Keywords: HV bushing, paper-oil insulation, FDS method.

Wprowadzenie

Izolatory przepustowe stanowią bardzo ważny element zarówno w transformatorach sieciowych jak i rozdzielczych. Awaryjność przepustów według różnych źródeł jest różna. W raporcie CIGRE z 2011 roku [1] awaryjność przepustów oceniono na 17,1%, podczas gdy awaryjność przełącznika zaczepów wynosiła 31%, a uzwojeń WN aż 37,7%. O dosyć małej awaryjności przepustów może decydować fakt, że w wielu krajach wszystkie przepusty wymienia się na nowe dwu, lub trzykrotnie w ciągu życia transformatora. Uznano, że degradacja izolacji przepustów postępuje szybciej niż izolacji głównej transformatora. W Polsce, według informacji uzyskanych z Polskich Sieci Elektroenergetycznych S.A., wszystkie najpoważniejsze awarie transformatorów sieciowych rozpoczynały się od przepustów. Dlatego okazuje się bardzo istotna wiarygodna diagnostyka wysokonapięciowych izolatorów przepustowych.

Wspólną cechą układu izolacyjnego transformatora oraz najważniejszych typów przepustów jest obecność wyrobów celulozowych. Procesy degradacji izolacji, w obu przypadkach, dotyczą w największej mierze celulozy.

Degradacja izolacji celulozowej

Najważniejszymi kryteriami degradacji celulozy są: stopień polimeryzacji DP, liczba kwasowa i zawilgocenie. Malejący stopień polimeryzacji celulozy DP, jak wykazały badania [2], nie wpływa na pogorszenie właściwości dielektrycznych celulozy, natomiast produkty kwaśne procesów starzenia mają istotny wpływ na własności dielektryczne. Największym problemem jest zawilgocenie izolacji celulozowej. Na etapach konstruowania przepustów sądzono, że powleczenie papieru żywicą, zalanie olejem lub masą bitumiczną, umieszczenie izolatora w osłonie ceramicznej zabezpieczą izolator przed penetracją wody z zewnątrz. Okazało się to nieprawdą.

Po latach stwierdzono, że najpoważniejszą przyczyną zawilgocenia izolacji celulozowej nie są nieszczelności, ale proces chemicznego rozpadu celulozy, któremu towarzyszy wydzielanie wody. Stwierdzono też, że obecność wody działa jak akcelerator procesów starzeniowych celulozy. Dlatego wraz z upływem lat eksploatacji jednostki obserwuje się większy roczny przyrost zawilgocenia celulozy.

Typy izolatorów przepustowych

Obecnie stosowane są trzy typy izolatorów przepustowych, w których wykorzystuje się materiały

celulozowe. Nazewnictwo i symbole przepustów przyjęto zgodnie z normą [3]. Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę wybranych przepustów [4].

Izolator typu OIP o izolacji papier-olej (Oil Impregnated Paper)

Na rurę lub sworzeń miedziany nawija się papier izolacyjny umieszczając między warstwami papieru wkładki z folii aluminiowej stanowiące ekrany sterujące rozkładem natężenia pola elektrycznego. Następnie izolacja papierowa jest suszona w próżni i impregnowana olejem, również przygotowanym próżniowo. Zaizolowany w ten sposób rdzeń przepustu umieszcza się w izolatorze osłonowym i zalewa olejem mineralnym.

Izolator typu RIP o izolacji papier impregnowany żywicą-olej (Resin Impregnated Paper)

Papier i wkładki metalowe nawija się na sworzeń miedziany. Następnie papier jest impregnowany próżniowo żywicą epoksydową. Dobiera się żywicę o jak najmniejszej lepkości w temperaturze impregnacji. Izolator osłonowy może być z elastomeru silikonowego lub z ceramiki. Wolne przestrzenie wypełnia się olejem mineralnym lub specjalnym żelem izolacyjnym. Jest to jedno z nowszych rozwiązań.

Izolator typu RBP o izolacji papier powlekany żywicą-olej (Resin Bonded Paper)

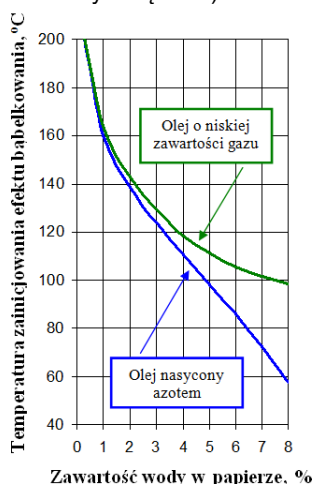
Półproduktem wyjściowy jest papier powleczony jednostronnie żywicą fenolowo-formaldehydową lub kompozycją z żywicą epoksydową. Żywica, w formie roztworu, jest nanoszona na papier. Schnięcie żywicy na tym etapie polega na odparowaniu rozpuszczalnika. Po nawinięciu papieru i wkładek aluminiowych, rdzeń jest suszony, a następnie poddawany obróbce termicznej w temperaturze około 130°C. Początkowo żywica topi się, przesyca i skleja warstwy papieru, a ostatecznie utwardza się. Zaizolowany sworzeń umieszczany jest w izolatorze osłonowym ceramicznym i zalewany masą izolacyjną lub olejem mineralnym.

W Polsce izolatory typu OIP oraz RIP są głównie produkcy ABB. Najwyższe napięcie izolatorów typu RIP produkowanych przez ABB wynosi 550 kV. Producentem izolatorów typu RBP w Polsce są zakłady IZO-ERG w Gliwicach. Najwyższe napięcie tych przepustów wynosi 145 kV [5].

Konsekwencje zawilgocenia izolacji celulozowej

Wraz z postępującym zawilgoceniem izolacji celulozowej wzrasta intensywność wyładowań niezupełnych, głównie typu ślizgowego oraz wzrasta prawdopodobieństwo przebiecia cieplnego. Najpoważniejszym jednak zagrożeniem jest *bubble effect* (b.e.). Polega on na gwałtownym wydzielaniu pary wodnej po przekroczeniu krytycznego zawilgocenia celulozy oraz krytycznej temperatury. Zjawisko to zostało opisane po raz pierwszy przez Oommenna [7]. Na rysunku 1 przedstawiono zależność temperatury zainicjowania zjawiska *bubble effect* od zawartości wody w papierze.

Gwałtownie wydzielająca się para wodna powoduje wzrost ciśnienia w kadzi transformatora, co często prowadzi do eksplozji oraz pożaru jednostki. Dane statystyczne opracowane przez ubezpieczycieli transformatorów w Stanach Zjednoczonych są niepokojące. W 2004 roku oceniono, że w ciągu poprzedzających pięciu lat, każdego roku występowało około 1000 pożarów transformatorów (rozdzielczych i sieciowych łącznie).



Rys. 1. Temperatura zainicjowania zjawiska *bubble effect* w zależności od zawartości wody w papierze w przypadku oleju o niskiej zawartości gazów i oleju nasyconego azotem [7]

Badania modelowe zjawiska *bubble effect* w izolatorach przepustowych

Podjętą decyzję dotyczącą badań modelowych postawiono trzy poniższe pytania.

- Czy w izolatorze przepustowym typu OIP o izolacji papier-olej mineralny występuje *bubble effect*?
- Czy w izolatorze o izolacji typu RBP papier żywiczny-olej mineralny można spodziewać się tego zjawiska?
- Czy zamiana oleju mineralnego na ester syntetyczny w izolatorze typu OIP zmienia relacje ilościowe opisujące *bubble effect*?

Izolacja papier-olej w izolatorze przepustowym jest jakościowo taka sama jak izolacja główna transformatora. Natomiast jest dużo większy stosunek masy celulozy do masy oleju. Szczególnie istotna może być rola ekranów sterujących rozkładem pola. Mogą one utrudniać migrację wody w kierunku promieniowym, a wymuszać ruch wody poosiowo.

Powleczenie papieru żywicą lub impregnacja żywicą zmieniają warunki adsorpcji i desorpcji wody, a więc można było się spodziewać wpływu obecności żywicy na rozwój zjawiska *bubble effect*.

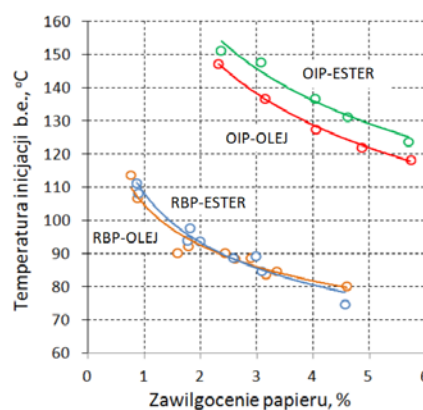
Z kolei zamiana oleju mineralnego na ester syntetyczny, charakteryzujący się bardzo dużą rozpuszczalnością wody, sugerowała zmianę temperatury inicjacji zjawiska *bubble effect*.

W celu uzyskania odpowiedzi na wcześniej postawione pytania, zamodelowano trzy układy izolacyjne:

- układ papier-olej mineralny,
- układ papier powleczony żywicą-olej mineralny,
- układ papier-ester syntetyczny.

Modele laboratoryjne były wykonane w skali 1:10. Między warstwami papieru lub papieru powlekanego żywicą umieszczono wkładki z folii aluminiowej. Papier powleczony żywicą otrzymano dzięki uprzejmości zakładu IZO-ERG. Po nawinięciu na metalowy sworzeń papieru powleczonego żywicą oraz ekranów zastosowano obróbkę cieplną zgodnie ze wskazaniem głównego technologa zakładu. Modele poddawano odpowiedniej preparacji w celu uzyskania pożądanego zawilgocenia celulozy.

Uzyskano odpowiedzi na wszystkie wcześniej postawione pytania. Na rysunku 2 przedstawiono temperaturę inicjacji zjawiska *bubble effect* w zależności od zawilgocenia papieru. Charakterystyki dotyczą układów izolacyjnych izolatorów typu OIP i RBP. W obu przypadkach przeprowadzono badania przy wykorzystaniu oleju mineralnego oraz estru syntetycznego.



Rys. 2. Temperatura inicjacji zjawiska *bubble effect* w zależności od zawilgocenia papieru; w badaniach wykorzystano modele: OIP o izolacji papier-olej mineralny i papier-ester syntetyczny oraz RBP o izolacji papier żywiczny-olej mineralny i papier żywiczny-ester syntetyczny [6]

Wykazano, że w izolatorze przepustowym typu OIP należy się spodziewać zjawiska *bubble effect*. Ekran aluminiowy nie ograniczają zjawiska, jedynie wymuszają migrację wody wzdłuż osi modelu. Pęcherze pary wodnej są wówczas uwalniane na skraju modelu. Charakterystyka temperatury inicjacji *b.e.* w zależności od zawartości wody w izolacji celulozowej przebiega bardzo podobnie do charakterystyk podawanych w literaturze, dotyczących izolacji głównej transformatora [7].

W izolatorze typu RBP również należy się spodziewać zjawiska *bubble effect*. Charakterystyka temperatury inicjacji zjawiska *b.e.* przebiega znacznie niżej niż w modelu izolatora OIP, co stanowi niestety negatywną właściwość. Na przykład przy zawilgoceniu celulozy równym 3% temperatura inicjacji obniża się z wartości około 137°C do 85°C, co staje się bardzo groźne.

Zastąpienie oleju mineralnego estrem syntetycznym MIDEL 7131 spowodowało podniesienie temperatury inicjacji *b.e.* w modelu OIP o około 10°C dla zawilgocenia celulozy od około 2 do około 6%. Natomiast w modelu RBP zastąpienie oleju estrem nie spowodowało istotnej poprawy.

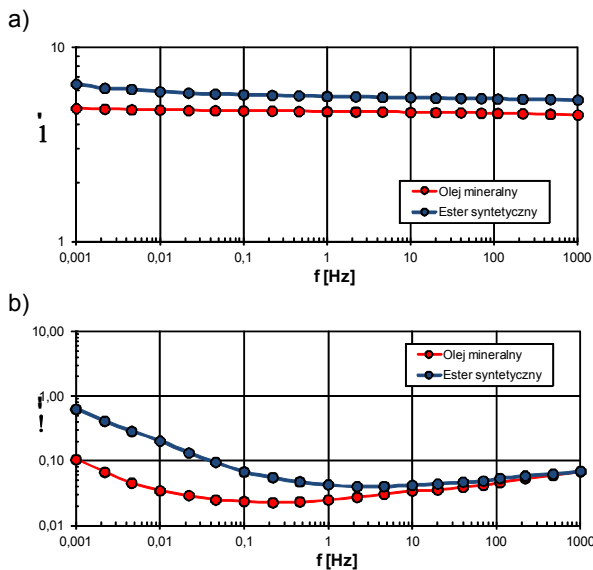
Ocena zawilgocenia izolacji celulozowej izolatorów przepustowych

Skoro skutki zawilgocenia izolacji celulozowej przepustów są równie groźne jak zawilgocenie izolacji głównej transformatora, to nabiera również znaczenia wiarygodna jego ocena.

W odniesieniu do izolacji głównej transformatora, w celu

wyznaczenia zawilgocenia celulozy, posługujemy się nieinwazyjną metodą pośrednią opartą na odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości FDS (*Frequency Domain Spectroscopy*). Metoda wymaga wzorców zawilgocenia, które zostały skompletowane w ramach realizacji projektu międzynarodowego REDIATool [8].

Przewidując zastępowanie w przyszłości oleju mineralnego w transformatorze estrem syntetycznym, opracowano w ramach projektu finansowanego przez NCBiR [9] wzorce zawilgocenia układu papier-ester syntetyczny. Wzorce te w istotny sposób różnią się od wzorców dotyczących układu papier-olej mineralny. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie odpowiedzi dielektrycznej próbki przeszpanowej o zawilgoceniu 1% impregnowanej olejem mineralnym oraz estrem syntetycznym MIDEL 7131. Temperatura wynosiła 10°C.



Rys. 3. Porównanie odpowiedzi dielektrycznej (część rzeczywista (a) i urojona (b) przenikalności elektrycznej) próbki przeszpanowej impregnowanej olejem mineralnym oraz estrem syntetycznym; próbki o zawilgoceniu 1% i temperaturze 10°C

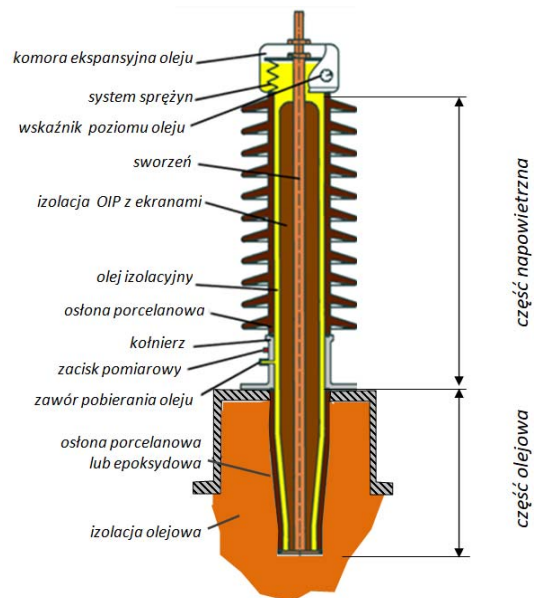
W ramach projektu finansowanego przez NCN [10] zostały opracowane wzorce zawilgocenia izolacji papier żywcowany-olej, co pozwala obecnie na ocenę stopnia zawilgocenia również izolatorów typu RBP.

Metodę FDS oraz wzorce zawilgocenia i sposób interpretacji wykorzystywane w odniesieniu do izolacji głównej transformatora, można zastosować także do oceny stopnia zawilgocenia przepustów. Ze względu jednak na specyfikę tego obiektu, wykorzystanie spektroskopii dielektrycznej napotyka na pewne trudności natury metrologicznej, a interpretacja otrzymanych wyników wymaga sporego doświadczenia oraz często indywidualnego podejścia, ze względu na mnogość stosowanych konstrukcji przepustów oraz typów izolacji.

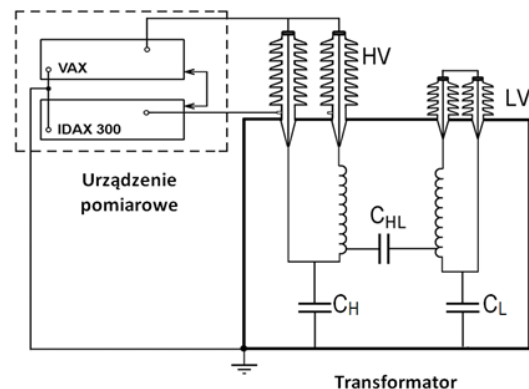
Specyfika pomiaru odpowiedzi dielektrycznej izolatora przepustowego

Jak opisano wcześniej, wysokonapięciowy izolator przepustowy stosowany w transformatorze energetycznym ma specjalną konstrukcję, w której za pośrednictwem starannie zaprojektowanych ekranów steruje się rozkładem pola elektrycznego. Układ ten nie jest jednak układem osiowo symetrycznym, ponieważ około 2/3 długości izolatora znajduje się na zewnątrz kadzi transformatora a pozostała 1/3 część długości jest zanurzona w oleju. Ma to oczywiście związek z koniecznością zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości elektrycznej układu poprzez wymuszenie właściwej drogi upływu, dłuższej w części

napowietrznej oraz krótszej w części olejowej (rys. 4). Znaczące różnice w zakresie geometrii oraz praca urządzenia na styku dwóch środowisk generują szereg problemów metrologicznych oraz interpretacyjnych.



Rys. 4. Przekrój izolatora typu OIP

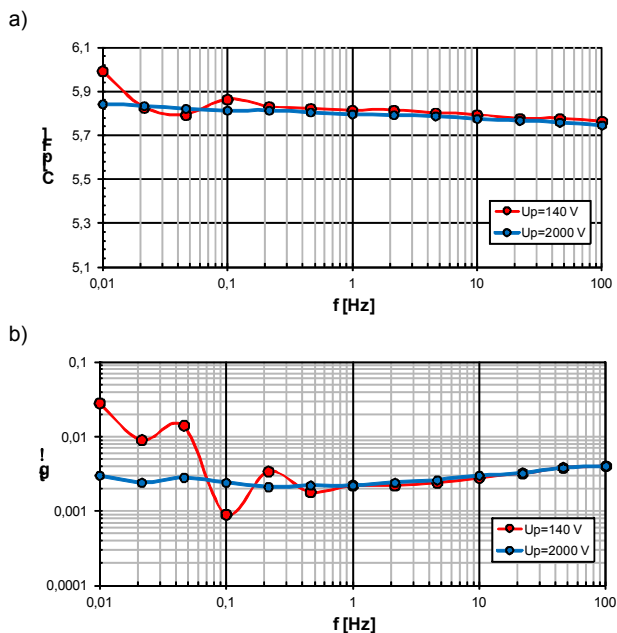


Rys. 5. Układ pomiarowy do wyznaczania odpowiedzi dielektrycznej przepustów; w układzie zastosowano przyrząd IDAX 300 firmy Megger wraz ze wzmacniaczem typu VAX

Trudności w pomiarach odpowiedzi dielektrycznej przepustów z użyciem metody FDS

W metodzie FDS, podobnie jak przy standardowych pomiarach współczynnika strat dielektrycznych czy rezystancji, wykorzystuje się specjalny zacisk, podłączony do jednego z ekranów sterujących. Samo badanie, jak pokazano na rysunku 5, wykonuje się w układzie trójprzewodowym, co ma na celu poprawę dokładności wyznaczanych parametrów, poprzez odseparowanie prądów upływu płynących przez pozostałe elementy układu izolacyjnego transformatora. Niestety nie oznacza to, że układ jest całkowicie odporny na zakłócenia i wpływ czynników zewnętrznych. Izolator przepustowy jest urządzeniem, które cechuje się wysoką impedancją (małą pojemnością oraz dużą rezystancją), a tym samym prąd jaki wymusza urządzenie pomiarowe jest niewielki i stosunkowo łatwo go zaburzyć. Dlatego istotne jest, aby napięcie podczas pomiarów było jak najwyższe. W układzie badawczym, przedstawionym na rysunku 5, oprócz urządzenia pomiarowego IDAX 300 wykorzystano wzmacniacz wysokiego napięcia VAX o zakresie napięciowym do 2000 V. Przykład odpowiedzi dielektrycznej uzyskanej przy dwóch znacząco różnych poziomach napięcia pomiarowego pokazano na rysunku 6.

Użycie zbyt niskiego napięcia pomiarowego sprawia, że mierzony prąd ma zbyt małą wartość, przy jednocześnie dużym błędzie pomiarowym względnym. W tej sytuacji wyznaczone wartości C i $\text{tg}\delta$ są obciążone dużą niepewnością.



Rys. 6. Pojemność elektryczna (a) i tangens kąta strat (b) izolatora przepustowego zmierzone przy różnych wartościach napięcia w warunkach eksploatacyjnych [11]

Równie istotny wpływ na wyniki pomiarów mają czynniki atmosferyczne. Zmiany w rozkładzie pola elektrycznego powodowane zabrudzeniem i zawilgoceniem osłony izolatora mogą wpływać na wartość rejestrowanego prądu, a tym samym powodować zawyżenie wyników analizy zawilgocenia [12]. Zaleca się unikania pomiarów w trakcie trwania opadów deszczu czy śniegu [13].

Problemy interpretacji wyników uzyskanych z użyciem metody FDS

Podstawą interpretacji wyników w metodzie FDS jest porównanie uzyskanej z pomiarów odpowiedzi dielektrycznej (np. zależności $\text{tg}\delta=f(f)$) z odpowiedzią modelu opartego na wyznaczonych wcześniej wiarygodnych wzorcach zawilgocenia. Tak zwany model XY, gdzie parametry X i Y określają procentową zawartość izolacji celulozowej w układzie izolacyjnym celuloza-olej, to powszechnie stosowane narzędzie analizy, opisane w wielu publikacjach, np. w [14, 15]. W modelu tym, oprócz konieczności wprowadzenia informacji o geometrii układu izolacyjnego, wymagana jest również informacja o konduktywności i przenikalności elektrycznej cieczy izolacyjnej i temperaturze obiektu. Wiarygodność uzyskanego wyniku zależy zatem w dużej mierze od tego, czy przyjmie się prawidłowe parametry dla modelu. Większość parametrów geometrycznych i materiałowych można określić dosyć precyzyjnie w procesie dopasowywania krzywej pomiarowej do modelowej, ale warunkiem jest zastosowanie odpowiednich wzorców zawilgocenia oraz przyjęcie prawidłowej temperatury.

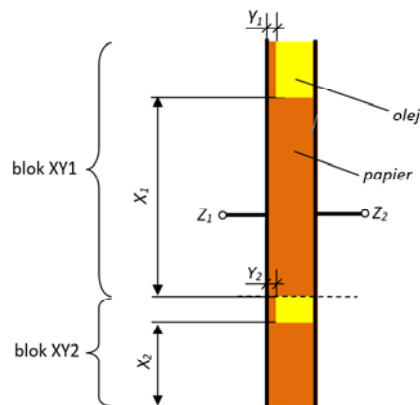
Wzorce zawilgocenia są przedstawiane w postaci składowych rzeczywistej i urojonej przenikalności elektrycznej w zależności od częstotliwości napięcia dla wybranego poziomu zawilgocenia izolacji celulozowej i wybranej temperatury. Jeśli chodzi o wybór właściwego zestawu wzorców zawilgocenia, to w przypadku gdy badany jest izolator przepustowy typu OIP można skorzystać z

wzorców skompletowanych w ramach projektu REDIATool [8]. Wzorce te zostały wykonane dla papieru i preszpanu w połączeniu z olejem mineralnym. Należy pamiętać, że wyznaczając zawilgocenie izolacji przepustów trzeba korzystać z wzorców sporządzonych dla papieru, a nie preszpanu, gdyż znacząco się one od siebie różnią.

Dużo trudniejsza sytuacja ma miejsce, gdy badany jest inny typ izolacji niż OIP, np. papier żywiczny, lub gdy cieczą impregnacijną nie jest olej mineralny. Tego typu układy wymagają użycia wzorców, które nie są powszechnie dostępne. Zastosowanie w tej sytuacji niewłaściwych wzorców będzie skutkowało uzyskaniem wyniku obarczonego dużym błędem. Aktualnie Instytut Elektroenergetyki PP dysponuje wzorcami izolacji typu RBP, natomiast nie posiada wzorców izolacji celulozowej impregnowanej żywicą epoksydową w połączeniu z żelazem izolacyjnym używanym w izolatorach typu RIP.

Określenie właściwej temperatury obiektu, pomimo jego stosunkowo niedużych gabarytów w porównaniu do wymiarów transformatora, także może nastręczyć pewnych trudności. Jak opisano wyżej, izolator przepustowy pracując w dwóch środowiskach bardzo często cechuje się znacznym rozkładem temperatury wzdłuż swojej osi; w części napowietrznej temperatura może być znacznie niższa, niż w części olejowej. W tym przypadku, aby móc zamodelować taki układ izolacyjny można obliczyć temperaturę wypadkową. Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów [16] sugeruje, aby przyjąć temperaturę, która będzie w 2/3 temperaturą otoczenia a w 1/3 temperaturą górnej warstwy oleju. Takie przybliżenie daje dosyć dobre wyniki.

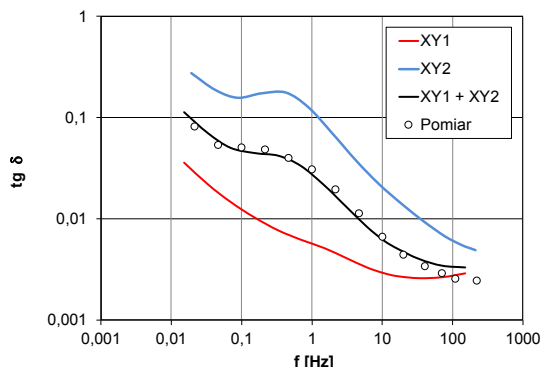
Dużo lepsze odwzorowanie można uzyskać, jeżeli zmodyfikuje się model matematyczny, traktując części napowietrzną oraz olejową przepustu jako dwa układy izolacyjne połączone równolegle (rys. 7). Proponowany model 2XY reprezentuje wtedy współczynnik strat dielektrycznych mierzony między zaciskami liniowym Z_1 i pomiarowym Z_2 izolatora. W tak zdefiniowanym modelu blokowi XY1 (część napowietrzna) i blokowi XY2 (część olejowa) można przypisać rzeczywistą temperaturę, a także odrębne parametry geometryczne i materiałowe zgodne z konstrukcją izolatora przepustowego.



Rys. 7. Model 2XY reprezentujący izolator przepustowy, którego część napowietrzna (blok XY1) ma temperaturę T_1 , a część olejowa (blok XY2) temperaturę T_2

Na rysunku 8 pokazano krzywe uzyskane w wyniku modelowania matematycznego dla bloków XY1 i XY2 oraz krzywą wypadkową dla połączonych bloków XY1+XY2. Na krzywą wypadkową naniesiono punkty pomiarowe. Jak widać, dobre dopasowanie krzywej modelowej XY1+XY2 i punktów pomiarowych świadczy o poprawności metodyki. Stosując opisane podejście można z zadowalającą

dokładnością wyznaczyć zawilgocenie izolacji celulozowej przepustu.



Rys. 8. Tangens kąta strat izolatora 220 kV, typu OS firmy Hitachi zmierzony i odwzorowany z użyciem modelu 2XY uwzględniającego poosiowy rozkład temperatury – temperatura powietrza 8 °C, temperatura oleju w górnej warstwie 29 °C

Podsumowanie

W izolatorach przepustowych typu OIP oraz RBP należy się spodziewać zawilgocenia izolacji celulozowej, znacznie wzrastającego w miarę upływu lat eksploatacji izolatorów.

Jak wykazały badania modelowe, zawilgocenie izolacji celulozowej izolatorów typu OIP oraz RBP, podobnie jak w przypadku izolacji głównej transformatora, prowadzi do zjawiska *bubble effect*. Występujące eksplozje izolatorów przepustowych mogą być skutkiem tego zjawiska.

Istnieje zapotrzebowanie na wiarygodną diagnostykę zawilgocenia izolacji celulozowej izolatorów przepustowych.

Instytut Elektroenergetyki PP dysponuje kompletem wzorców zawilgocenia izolacji izolatorów typu OIP (preszpan, papier-olej mineralny) oraz typu RBP (papier żywcowany-olej mineralny).

Wykorzystując posiadane wzorce zawilgocenia oraz stosując odpowiednie modelowanie matematyczne odpowiedzi dielektrycznej, jesteśmy w stanie wyznaczyć z zadowalającą dokładnością, zawilgocenie izolacji przepustów typu OIP oraz RBP.

Aktualnie Instytut Elektroenergetyki PP nie posiada wzorców zawilgocenia izolacji typu RIP (papier impregnowany żywicą epoksydową-olej mineralny). Zważywszy na fakt, że w przypadku transformatorów sieciowych, ten typ przepustów wybrano w Polsce na wymianę starych przepustów typu OIP, opracowanie wzorców staje się ważne i pilne.

Badania laboratoryjne modelowe wykazały, że zamiana oleju mineralnego w izolatorze typu OIP na ester syntetyczny jest bardzo korzystna. Następuje wzrost temperatury inicjacji zjawiska *bubble effect* o około 10°C, przy zawilgoceniu celulozy od 2 do 6%.

Artykuł został sfinansowany ze środków na działalność statutową nr 04/41/DSPB/4345.

Autorzy: dr inż. Krzysztof Walczak, E-mail: krzysztof.walczak@put.poznan.pl; prof. dr hab. inż. Hanna Mościcka-Grzesiak, E-mail: hanna.moscicka-grzesiak@put.poznan.pl; dr hab. inż. Piotr Przybyłek, E-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl; dr hab. inż. Hubert Morańda, E-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl; Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań.

LITERATURA

- [1] Transformer Reliability Survey, *Tutorial of CIGRE WG A2.37*, 05.04.2011
- [2] Gielniak J., Graczkowski A., Mościcka-Grzesiak H., Does the Degree of Cellulose Polymerization Affect the Dielectric Response, *IEEE Transactions on Dielectrics and Insulation*, Volume: 18, Issue: 5, October 2011
- [3] *PN-EN 60137:2008*, Izolatory przepustowe na napięcie przemienne powyżej 1000 V
- [4] Przybyłek P., Morańda H., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., 2012 r., Can the bubble effect occur in an OIP bushing insulator?, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 19, Issue 6, 1879-1883.
- [5] Katalog izolatorów przepustowych IZO-ERG S.A. 2018
- [6] Przybyłek P., Morańda H., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., 2015 r., The bubble effect in bushings – investigations on models, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 22, Issue 6, 3405-3412.
- [7] Oommen T.V., Lindgren S.R., Bubble evolution from transformer overload, *Transmission and Distribution Conf. Exposition*, IEEE/PES, 1 (2001), 137-142
- [8] *Projekt badawczy międzynarodowy realizowany w ramach 5 PR UE*, Reliable diagnostics of HV transformer insulation for safety assurances of power transmission system, akronim REDIATool, NNE5-2001-472; realizacja od 2003 do 2006r.
- [9] *Projekt badawczy rozwojowy nr 0862/RT02/2010/10*, Odcisk palca izolacji celulozowej syconej syntetycznymi estrami organicznymi oparty na analizie odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości, realizacja od 2010 do 2013r.
- [10] *Projekt badawczy własny NCN nr N N511 312140*, Bubble effect w izolatorach przepustowych transformatorów energetycznych wysokiego napięcia, realizacja od 2011 do 2013r.
- [11] Gielniak J., Graczkowski A., Walczak K., Morańda H., Przybyłek P., Polak F., Gronko W., Doświadczenia z badań izolatorów przepustowych wysokiego napięcia z użyciem metody spektroskopii dielektrycznej, *Międzynarodowa Konferencja Transformatorowa „Transformator 2013”*, Gdańsk, 5-7 czerwca, 2013, l. 14
- [12] Gielniak J., Wpływ stanu powierzchni izolatora przepustowego na wyniki pomiarów metodą FDS, *Międzynarodowa Konferencja Transformatorowa „Transformator 2015”*, Gdańsk, 12-15 maja, 2015, 73-79
- [13] Kaźmierski M., Szymański Z., Przyczynek do diagnostyki stanu technicznego izolatorów przepustowych transformatorów, *Międzynarodowa Konferencja transformatorowa „Transformator 2009”*, 2-4 czerwca 2009 r., Toruń, 99-111
- [14] Gafvert U., Frimpong G. and Fuhr J., Modelling of Dielectric Measurements on Power Transformers, Paper 15-103, *CIGRE Session Paris 1998*
- [15] Ekanayake C., Gubański S., Graczkowski A., Walczak K., Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, Volume 21, Issue 3, 1309–1317
- [16] Ramowa instrukcja Eksploatacji Transformatorów, *Wydawnictwo Energopomiar – Elektryka*, Gliwice 2012