

Hubert MORAŃDA, Piotr PRZYBYŁEK, Krzysztof WALCZAK, Hanna MOŚCICKA-GRZESIAK
POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI,
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

Badania modelowe izolatorów przepustowych typu OIP oraz RBP w aspekcie wystąpienia bubble effect

Dr inż. Hubert MORAŃDA

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 100 publikacji z zakresu badań materiałowych oraz diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych. Współwykonawca 2 projektów międzynarodowych oraz 6 badawczych krajowych, w tym kierownik projektu rozwojowego.



e-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl

Dr inż. Krzysztof WALCZAK

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 100 publikacji z zakresu diagnostyki urządzeń wysokonapięciowych oraz ochrony przeciwprzepięciowej. Współwykonawca 2 projektów międzynarodowych oraz 7 badawczych krajowych, w tym kierownik jednego projektu.



e-mail: krzysztof.walczak@put.poznan.pl

Dr inż. Piotr PRZYBYŁEK

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor i współautor ponad 60 publikacji, głównie z zakresu badań właściwości izolacji papier-olej oraz metod związanych z diagnostyką izolacji transformatora. Współwykonawca 2 projektów międzynarodowych oraz 7 badawczych krajowych, w tym kierownik jednego projektu.



e-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl

Prof. dr hab. inż. Hanna MOŚCICKA-GRZESIAK

Profesor zwyczajny na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Wieloletni kierownik Zakładu Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych. Autorka ponad 200 publikacji z zakresu inżynierii materiałowej oraz diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Promotor 19 prac doktorskich. Członek IEEE oraz Komitetu Elektrotechniki PAN. Koordynator 2 projektów międzynarodowych i kierownik 13 krajowych projektów badawczych.



e-mail: hanna.moscicka-grzesiak@put.poznan.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono najważniejsze typy izolatorów przepustowych stosowanych w transformatorach. Omówiono procesy degradacji i zawilgocenia izolacji celulozowej. Badano zjawisko *bubble effect* na modelach izolatorów przepustowych typu OIP i RBP.

Słowa kluczowe: izolatory przepustowe, efekt bąbelkowania, zawilgoce-
nie izolacji.

Investigations on models of OIP and RBP bushing insulators in aspect of bubble effect

Abstract

One among the most dangerous effects that causes failure of a power transformer is the bubble effect (b.e.), i.e. a rapid release of water vapor from cellulose insulation after exceeding a critical temperature and a critical moisture content. The b.e. results in a rapid increase of tank pressure, which may thereafter cause an explosion and fire. The authors put forth the hypothesis that b.e. can possibly take place in the insulation of OIP (Oil Impregnated Paper) and RBP (Resin Bonded Paper) type of bushings. Development of the bubble effect was investigated on the models of OIP and RBP bushing insulators. In both types of models mineral oil and synthetic ester MIDEL 7131 were used. It was stated that b.e. may occur in both types of insulators, creating the possibility of serious failure of the transformer. Metal screens do not restrict the development of b.e., but they change the direction of water vapor migration. In the model, bubbles moved along metallic screens until they reached the edges of paper insulation layers. Also the presence of resin does not limit the development of b.e. It was shown that there existed a correlation between the bubbling initiation temperature and the water content in paper insulation. All the characteristics are presented together in Fig. 7. It can be seen that the model of the RBP bushing insulator has much lower initiation temperature of b.e. than that of the OIP bushing insulator. It is a negative feature of the RBP bushing insulator.

Keywords: bushing insulators, bubble effect, moisture in insulation.

1. Wprowadzenie

Ostatnimi laty bardzo wzrosło zainteresowanie izolatorami przepustowymi stosowanymi w wysokonapięciowych transformatorach energetycznych. Przyczyną tego jest wzrost ich awaryjności. Na stacjach SN/nn, według statystyk opracowanych przez PTPiREE [1], ponad 22% awarii jest powodowanych przez uszkodzenia izolatorów przepustowych. Natomiast w przypadku transformatorów sieciowych dużej mocy, prawie wszystkie awarie, które wystąpiły w ostatnich latach wiąże się z uszkodzeniami izolatorów przepustowych [2].

Najbardziej popularne izolatory przepustowe mają izolację typu papier-olej. Te same materiały stanowią izolację główną transformatora. Niestety procesy degradacyjne zachodzą z pewnością intensywniej w przepuście, co sprawia, że w pierwszej kolejności dochodzi do awarii przepustu, która przenosi się z zasady na całą każdą. Dziś wiemy, że czas życia przepustu jest krótszy niż transformatora i dlatego, w ciągu całego czasu eksploatacji transformatora, co najmniej raz lub dwa razy wymienia się wszystkie komplety izolatorów przepustowych.

Znaczna awaryjność izolatorów przepustowych wymusiła działania w dwóch kierunkach:

- opracowywanie nowych konstrukcji izolatorów przepustowych względnie odpornych na procesy degradacyjne,
- opracowywanie wiarygodnych metod diagnostycznych stanu izolatorów przepustowych będących w eksploatacji.

2. Typy izolatorów przepustowych transformatorowych

Obecnie stosowane są cztery typy wysokonapięciowych izolatorów przepustowych transformatorowych, których symbole literowe przyjęto zgodnie z normą [3]:

- (1) izolator o izolacji papier-olej OIP (*Oil Impregnated Paper*),
- (2) izolator o izolacji papier powlekany żywicą-olej RBP (*Resin Bonded Paper*),
- (3) izolator o izolacji papier impregnowany żywicą-olej RIP (*Resin Impregnated Paper*),

(4) izolator o izolacji z syntetycznego polimeru włóknistego impregnowanego żywicą RIS (*Resin Impregnated Synthetics*).

ad (1) **OIP** Na rurę lub sworzeń miedziany nawija się papier izolacyjny. Między warstwami papieru umieszcza się wkładki z folii aluminiowej sterujące rozkładem natężenia pola elektrycznego. Następnie izolacja papierowa jest starannie suszona w próżni i impregnowana olejem, również przygotowanym próżniowo. Zaizolowany w ten sposób rdzeń przepustu umieszcza się w izolatorze osłonowym ceramicznym lub epoksydowym i zalewa się olejem mineralnym. Izolatory te znane są od kilkudziesięciu lat i stale bardzo chętnie stosowane. Wykonywane dziś są na napięcie do 1100 kV. Według informacji ABB [4], około 70% przepustów produkowanych przez firmę jest typu OIP. Największą zaletą tych izolatorów jest fakt, że zostały bardzo dobrze poznane. Wiemy w jakim tempie celuloza ulega degradacji i można przewidzieć stan izolatora po 20-30 latach eksploatacji.

ad (2) **RBP** Półproduktem wyjściowym jest papier powleczony jednostronnie żywicą. Zwykle wybiera się żywice fenolowo-formaldehadowe lub ich kompozycje z żywicą epoksydową. Żywica, w formie roztworu, nanoszona jest na papier. Schnięcie żywicy na tym etapie polega na odparowaniu rozpuszczalnika. Proces nawijania papieru na sworzeń metalowy i suszenia próżniowego jest taki sam jak w przypadku izolatora typu OIP. Kolejnym etapem jest obróbka termiczna żywicy, którą prowadzi się zwykle w temperaturze podnoszonej od 80°C do 140°C. W początkowej fazie żywica topi się, przesyca i skleja warstwy papieru, a w ostatniej fazie ulega utwardzeniu. Zaizolowany sworzeń umieszczany jest w izolatorze osłonowym i zalewany masą izolacyjną lub olejem mineralnym. Początkowo stosowano gołe izolatory (bez izolatora osłonowego) we wnętrzach, sądząc, że żywica zabezpiecza papier przed wnikaniem wilgoci z powietrza. Potem okazało się to nieprawdą i zaizolowany sworzeń umieszczono w izolatorze osłonowym ceramicznym. Niedowierzając szczelności izolatora, wolne przestrzenie zalano masą izolacyjną. W Polsce od 1946 roku działają zakłady IZO-ERG w Gliwicach, które produkują izolatory typu RBP. Najwyższe napięcie tych przepustów wynosi 145 kV [5]. Odznaczają się one stabilnym w czasie współczynnikiem stratności i były bardzo chętnie stosowane w transformatorach rozdzielczych.

ad (3) **RIP** Na rurę lub sworzeń metalowy nawijany jest papier krepowany. Papier jest suszony próżniowo, a następnie impregnowany żywicą epoksydową. Dobiera się żywice o jak najmniejszej lepkości w temperaturze impregnacji. Izolator osłonowy może być z elastomeru silikonowego lub z ceramiki. Wolne przestrzenie wypełnia się specjalnym żelem izolacyjnym. Jest to jedno z nowszych rozwiązań. Konstrukcja izolatora typu RIP liczy sobie około 10 lat [4]. Izolatory te wykonywane są na napięcie przemienne do 550 kV i napięcie stałe do 800 kV. W firmie ABB, izolatory typu RIP stanowią kilkanaście procent produkcji. Uważa się, że mają dużo zalet, między innymi: małą masę, odporność na warunki transportu i narażenia sejsmiczne, możliwość instalowania pod dowolnym kątem oraz możliwość łatwego dopasowywania gabarytów do potrzeb. Niestety nie dysponujemy jeszcze żadnymi wiarygodnymi danymi statystycznymi dotyczącymi ich awaryjności i procesów degradacji.

ad (4) **RIS** Jest to najmłodszy z izolatorów przepustowych. Został opracowany przez firmę ABB-Micafil [6]. Izolacja jest wykonana z włókna syntetycznego przesyconego żywicą epoksydową. Zaizolowany rdzeń, po utwardzeniu żywicy, jest pokrywany osłoną silikonową szczelnie przylegającą. Izolatory przepustowe typu RIS o napięciu 123 kV zainstalowano na stanowisku testowym na stacji w Południowej Afryce w 2009 roku. Z kolei w ramach długookresowych testów, izolatory przepustowe o napięciu 72,5 kV zainstalowano na transformatorze rozdzielczym w Szwajcarii. Firma ABB zakończyła długookresowe badania izolatorów przepustowych na napięcie od 24 kV do 170 kV i w roku 2012 podjęła

produkcję izolatorów typu RIS na potrzeby rynku. Według producenta izolatory te powinny być odporne na zawilgocenie.

3. Procesy degradacji i zawilgocenia izolacji celulozowej

Najważniejszymi skutkami procesów degradacji układu izolacyjnego przepustu są depolimeryzacja celulozy oraz jej zawilgocenie. Zawilgocenie następuje w wyniku kontaktu z powietrzem przenikającym z zewnątrz przez nieszczelności oraz w wyniku chemicznego rozpadu celulozy. Woda stanowi produkt rozpadu celulozy i jest jednocześnie akceleratorem procesu rozpadu.

Zawilgocenie izolacji powoduje obniżenie rezystywności elektrycznej izolacji, wzrost współczynnika strat dielektrycznych i pojawianie się wyładowań niezupełnych. Najgroźniejszym skutkiem zawilgocenia jest zjawisko gwałtownego uwalniania wody po przekroczeniu krytycznej temperatury. Towarzyszy temu bardzo duży wzrost ciśnienia prowadzący do eksplozji kadzi lub izolatora osłonowego. Zjawisko to nazywane jest z angielska *bubble effect* (b.e.).

Panowała opinia, że żywicowanie celulozy, na drodze powlekania papieru lub jego impregnacji, ogranicza lub wręcz uniemożliwia zawilgocenie celulozy. Niestety, w badaniach rekonesansowych stwierdziliśmy, że izolacja celulozowa żywicowana w procesie odpowiadającym izolatorom RBP, chłonie wilgoć z powietrza lub z oleju ilościowo w sposób porównywalny z czystą celulozą. Analiza mikroskopowa wykazała, że żywica w izolacji typu RBP pokrywa bardzo niewielki procent powierzchni włókiem celulozowych. A więc niestety w izolatorach przepustowych typu RBP należy się spodziewać zjawiska b.e. Liczne eksplozje przepustów mogą być tego skutkiem.

Celem niniejszej pracy jest wyznaczenie charakterystyk temperatury inicjacji zjawiska b.e. w zależności od zawartości wody w izolacji celulozowej modeli izolatorów przepustowych typu OIP oraz RBP.

4. Obiekty badań i stanowisko pomiarowe

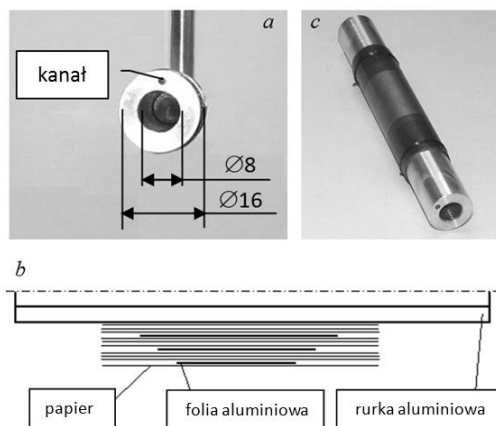
Obiekty badań przygotowano w formie wymiennych patronów nasuwanych na grzałkę. Patron był wykonany z aluminiowej rurki o średnicy zewnętrznej 16 mm, a wewnętrznej 8 mm. Długość patronu wynosiła 120 mm. Na rurkę aluminiową nawijano 12 warstw papieru. Co trzy warstwy papieru umieszczano wkładkę aluminiową imitującą ekran sterujący rozkładem natężenia pola elektrycznego. Wkładki miały stopniowaną szerokość, tak jak to jest w izolatorze przepustowym. W ściance rurki aluminiowej wykonano kanał sięgający połowy jej długości, w którym umieszczono termoparę.

Grzałkę wykonano w formie rurki stalowej o średnicy zewnętrznej 8 mm, w której znajdował się element grzejny o regulowanej mocy.

Modele izolatorów typu RBP wykonano używając papieru powleczonego żywicą fenolowo-formaldehadową, otrzymanego dzięki uprzejmości zakładów IZO-ERG w Gliwicach. Po nawinięciu papieru i skrępowaniu patronu bandażem poddawano model obróbce cieplnej. Patrony wygrzewano w pozycji stojącej w temperaturze 80°C przez 2,5 h, a następnie przez 1,5 h w temperaturze 140°C [7]. Przed wygrzewaniem patronów, suszono je w suszarce próżniowej.

Kolejnym etapem było kontrolowane zawilgocenie patronów do oczekiwanego poziomu. Patrony typu OIP oraz RBP suszono w suszarce próżniowej, po czym ważono na precyzyjnej wadze. Zawilgocano je przez kontakt z powietrzem otoczenia przez określony czas. Planowano uzyskać pięć poziomów zawilgocenia: 2, 3, 4, 5 i 6%. W rezultacie, po procedurach preparacji i kondycjonowania, uzyskiwano nieco inne wartości zawilgocenia. Dodatkowo, w finalnym etapie preparacji, kontrolowano zawilgocenie metodą Karla Fischera na próbce testowej. Dla każdego poziomu zawilgocenia przygotowano po cztery patrony typu OIP oraz RBP.

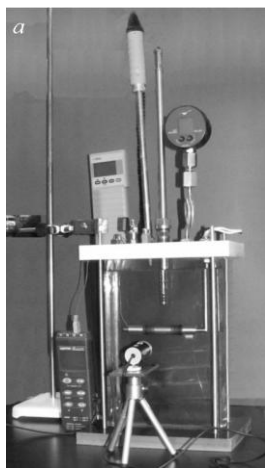
Wszystkie modele badano zanurzone w oleju mineralnym lub w estrze syntetycznym MIDEL 7131. Na rysunku 1 przedstawiono informacje dotyczące patronu.



Rys. 1. Przekrój rurki aluminiowej z kanałem na termoparę (a), przekrój warstw papieru i ekranów – skala wzdłuż osi i promienia jest różna (b), fotografia patronu gotowego do badań (c)

Fig. 1. Cross-section of aluminum tube with thermocouple canal marked (a), sketch of paper and aluminum foil layer arrangement – the scale along axis and radius is different (b), photograph of a patron ready for the investigations (c)

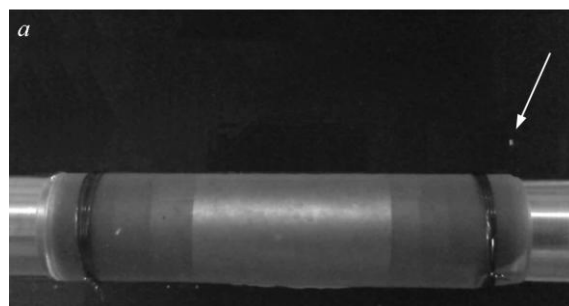
Badania prowadzono w komorze szklanej, co było podyktowane koniecznością obserwacji rozwoju zjawiska b.e. Komorę przedstawiono na rysunku 2. Stanowisko pomiarowe umożliwiło regulację mocy grzałki, pomiar temperatury w patronie oraz w oleju w kilku miejscach, pomiar zawartości wody w oleju i w powietrzu nad powierzchnią oleju oraz pomiar ciśnienia powietrza. Była możliwość wzrokowej obserwacji, ale również kamera rejestrowała rozwój zjawiska.



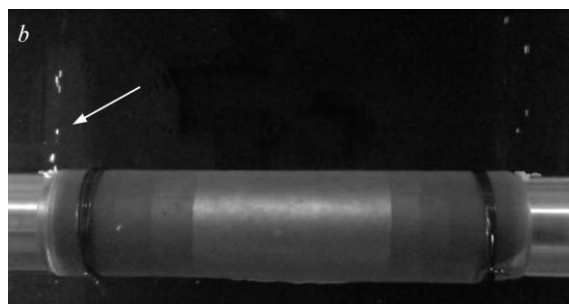
Rys. 2. Komora badawcza
Fig. 2. Research chamber

5. Wyniki badań

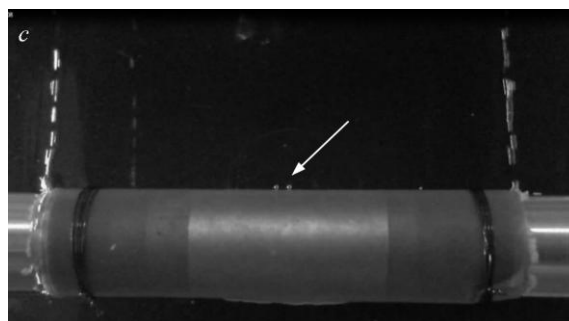
Wykazano, że składniki metalowe umieszczone między warstwami papieru nie mają wpływu na rozwój b.e., jedynie w początkowej fazie zjawiska wymuszają ruch pęcherzy pary wodnej w kierunku poosiowym modelu. Na rysunku 3 ujęto trzy wybrane kadry rozwoju b.e. w modelu izolatora typu OIP. Inicjacja zjawiska rozpoczyna się na skraju modelu przepustu (rys. 3a). W miarę podnoszenia temperatury coraz intensywniejsze jest wydzielanie pęcherzy na skrajach modelu (rys. 3b), ostatecznie pęcherze pojawiają się na jego całej powierzchni (rys. 3c).



116,8°C, 11:41 min



120,6°C, 12:13 min

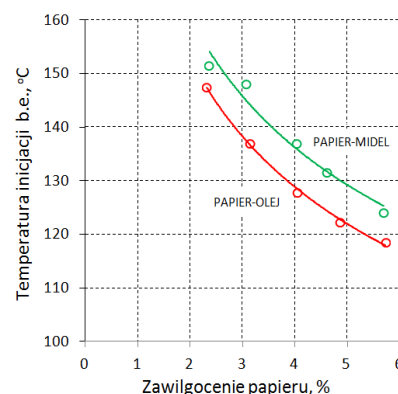


147,0°C, 16:06 min

Rys. 3. Inicjacja i rozwój zjawiska b.e. na skraju modelu (a), intensywne wydzielanie pęcherzy na skrajach modelu (b), uwalnianie pęcherzy na całej powierzchni modelu (c); zawartość wody w papierze 5,73%

Fig. 3. Initiation and development of bubble effect on the paper layer edge (a), intense release of bubbles on the paper layer edge (b), bubble release on the whole surface of the paper layer (c). The water content in paper was 5.73%

Na rysunku 4 przedstawiono charakterystyki temperatury inicjacji zjawiska b.e. w zależności od zawartości wody w izolacji dla modeli typu OIP w dwóch wersjach, a mianowicie papier-olej mineralny oraz papier-MIDEL.



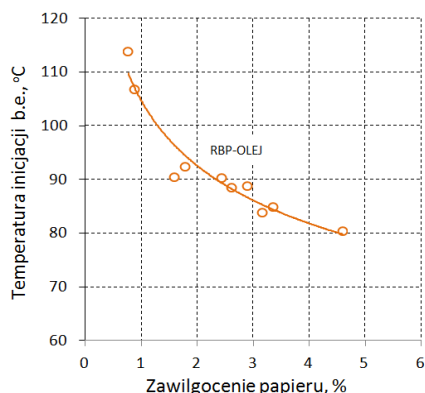
Rys. 4. Temperatura inicjacji zjawiska bubble effect w zależności od zawartości wody w papierze; modele o izolacji papier-olej mineralny oraz papier-ester syntetyczny MIDEL 7131

Fig. 4. The initiation temperature of bubble effect vs. the water content in paper; models consist of paper-mineral oil and paper-synthetic ester MIDEL 7131

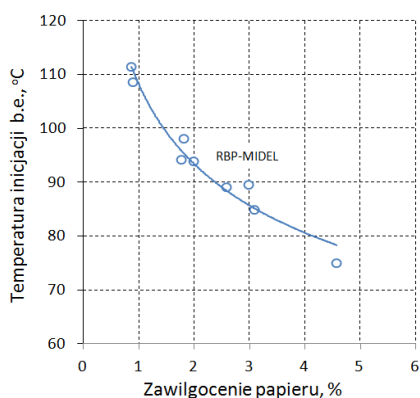
Charakterystyka b.e. zdjęta na modelu izolatora przepustowego jest bardzo zbliżona do charakterystyk podawanych w literaturze dla modeli odtwarzających izolację główną transformatora.

W przypadku estru syntetycznego, w porównaniu z olejem mineralnym, obserwuje się znaczne podniesienie temperatury inicjacji b.e., co należy traktować jako zaletę układu. Zjawisko można wytłumaczyć na gruncie energii desorpcji wody z włókien celulozowych będących w otoczeniu dielektryku ciekiego. Im większa polarność dielektryku ciekiego, tym większa jest energia desorpcji wody z włókien celulozowych. Miarą polarności jest przenikalność elektryczna, która w przypadku użytego estru syntetycznego wynosi 3,2 w porównaniu z przenikalnością elektryczną oleju równą 2,2.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono charakterystyki inicjacji b.e. w zależności od zawartości wody w papierze dla modelu typu RBP w połączeniu z olejem mineralnym oraz z estrem syntetycznym MIDEL 7131. W tym przypadku zawartość wody w izolacji wyrażoną w procentach wyznaczono w odniesieniu do sumarycznej masy fazy stałej, to znaczy celulozy i żywicy.



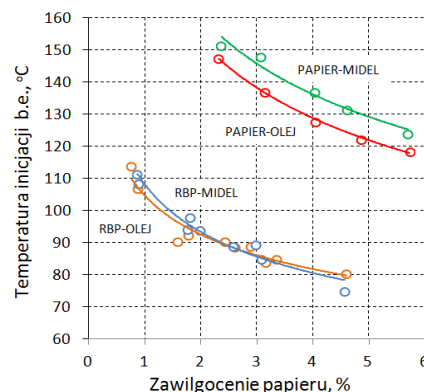
Rys. 5. Temperatura inicjacji zjawiska bubble effect w zależności od zawartości wody w papierze dla modelu typu RBP w połączeniu z olejem mineralnym
Fig. 5. The initiation temperature of bubble effect vs. the water content in paper for the RBP model impregnated with mineral oil



Rys. 6. Temperatura inicjacji zjawiska bubble effect w zależności od zawartości wody w papierze dla modelu typu RBP w połączeniu z estrem syntetycznym MIDEL 7131
Fig. 6. The initiation temperature of bubble effect vs. the water content in paper for the RBP model impregnated with synthetic ester MIDEL 7131

Na rysunku 7 zebrano wszystkie charakterystyki w celu porównania. Zwraca uwagę znaczne obniżenie charakterystyk opisujących zachowanie się modeli typu RBP. Niestety to jest poważna, ujemna cecha tych izolatorów. Wytłumaczyć zjawisko można również w tym przypadku na gruncie energii desorpcji wody. Żywica fenolowo-formaldehydowa ma polarność, której miarą jest przenikalność elektryczna ($\epsilon \approx 4$), mniejszą niż polarność celulozy

($\epsilon \approx 5,8$). To sprawia, że energia wiązania wody do żywicy jest mniejsza niż do celulozy i w rezultacie niższa temperatura wystarcza by spowodować desorpcję wody, co przekłada się na obniżenie całej charakterystyki b.e.



Rys. 7. Temperatura inicjacji zjawiska bubble effect w zależności od zawartości wody w papierze; modele o izolacji papier-olej mineralny, papier-ester syntetyczny, RBP-olej mineralny oraz RBP-olej syntetyczny
Fig. 7. The initiation temperature of bubble effect vs. the water content in paper; models consist of paper-mineral oil, paper-synthetic ester, RBP-mineral oil and RBP-synthetic ester

6. Wnioski

Wykazano, że w izolatorze przepustowym typu OIP należy się spodziewać zjawiska *bubble effect*. Przekładki z folii aluminiowej w żaden sposób nie ograniczają wystąpienia zjawiska b.e., jedynie w pierwszej fazie wymuszają migrację wody wzdłuż osi modelu przepustu. Pęcherze pary wodnej wówczas uwalniane są na skrajach modelu.

Charakterystyka temperatury inicjacji b.e. w zależności od zawartości wody w izolacji celulozowej, w przypadku modelu izolatora OIP, przebiega bardzo podobnie do charakterystyk podawanych w literaturze dotyczących izolacji głównej transformatora.

Badania prowadzone na modelach izolatora RBP wykazały, że w tym typie izolatora również należy się spodziewać *bubble effect*. Obecność żywicy w żaden istotny sposób nie zmienia procesów sorpcyjnych wody. Stwierdzono natomiast, że charakterystyka temperatury inicjacji b.e. w zależności od zawartości wody w izolacji przebiega znacznie niżej niż charakterystyka typowa dla izolatora OIP. Jest to niestety pewna negatywna właściwość izolatorów typu RBP. Zjawisko to można wyjaśnić w oparciu o energię desorpcji wody z powierzchni materiałów o różnej polarności.

7. Literatura

- [1] Analiza awaryjności stacji transformatorowych SN/nn na przykładzie Spółek dystrybucyjnych, Raport PTPiREE, 2.07.2010.
- [2] Służby Eksploatacji PSE; informacja prywatna.
- [3] PN-EN 60137:2008, Izolatory przepustowe na napięcia przemiennie powyżej 1 000 V.
- [4] High Voltage Bushings, Materiały szkoleniowe Micafil, 2003.
- [5] Katalog izolatorów przepustowych, IZO-ERG S.A. 2009.
- [6] Egger D., Krüsi U., Dais A., Zic Z., Rocks J.: New paper-free insulation technology for dry high-voltage condenser bushings, CIGRE 2012; A2-211.
- [7] Materiały elektroizolacyjne; WNT 1965, str. 608.

otrzymano / received: 30.11.2012

przyjęto do druku / accepted: 02.01.2013

artykuł recenzowany / revised paper