

Suszenie izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego

Streszczenie. Artykuł dotyczy suszenia izolacji celulozowej transformatorów rozdzielczych za pomocą estru syntetycznego. W artykule przedstawiono przyczyny i skutki obecności wody w układzie izolacyjnym transformatora. Opisano również metody wykorzystywane do suszenia transformatorów w miejscu ich zainstalowania. Przedstawiono wyniki badań, które potwierdziły możliwość wykorzystania estru syntetycznego do efektywnego suszenia izolacji celulozowej. Ponadto opisano metodę uzdatniania estru syntetycznego.

Abstract. The article concerns the drying of distribution transformer's insulation using synthetic ester. In the article the causes and effects of water presence in transformer insulation were shown. The main methods used for transformer drying "in situ" were also described. The article presents the research results which confirmed the possibility of using of synthetic ester for effective drying of cellulose insulation. Moreover, the method for treatment of synthetic ester was described. (**Drying distribution transformer's insulation by means of liquid medium**).

Słowa kluczowe: transformator, suszenie, ester syntetyczny, izolacja celulozowa.

Keywords: transformer, drying, synthetic ester, cellulose insulation.

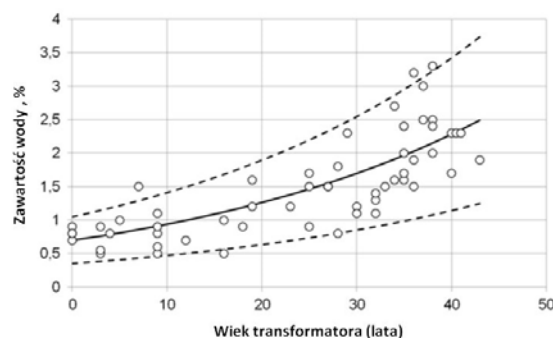
Zawilgocenie izolacji celulozowej – statystyka

Zawilgocenie izolacji celulozowej stanowi jedno z najpoważniejszych zagrożeń transformatora. Są dwie główne przyczyny zawilgocenia izolacji celulozowej, a mianowicie nieszczelność kadzi oraz proces chemicznego rozpadu celulozy. Woda jest produktem rozpadu celulozy, a jednocześnie jest akceleratorem procesu degradacji celulozy. Roczny przyrost zawilgocenia wzrasta więc z czasem. Średni przyrost zawilgocenia celulozy zależy od konstrukcji transformatora oraz jego obciążenia [1].

Do najważniejszych skutków zawilgocenia izolacji transformatora zalicza się: podatność układu na wysokoenergetyczne wyładowania niezupełne, zwiększone prawdopodobieństwo przebiccia cieplnego, przyspieszenie procesu depolimeryzacji celulozy oraz możliwość wystąpienia zjawiska nazywanego z ang. „bubble effect”.

Jednym z najgroźniejszych skutków zawilgocenia izolacji jest „bubble effect”. Polega on na gwałtownym uwalnianiu wody z celulozy po przekroczeniu krytycznego poziomu zawilgocenia i krytycznej temperatury. Towarzyszy temu wzrost ciśnienia wewnątrz kadzi transformatora, prowadzący z reguły do eksplozji i pożaru [2,3]. Przykładowo, przy zawilgoceniu izolacji wynoszącym 3% „bubble effect” wystąpi przy temperaturze 125-130°C, a Instrukcja Eksploatacji Transformatorów [4] dopuszcza przy normalnym obciążaniu transformatorów małej i średniej mocy aż 140°C. A więc widać, jak groźne jest przekroczenie krytycznego poziomu zawilgocenia izolacji. W Polsce w ciągu ostatnich 3 lat miało miejsce kilkanaście pożarów transformatorów. Pożar transformatora to awaria systemowa oraz katastrofa ekologiczna.

Zawilgocenie izolacji celulozowej zależy od grupy transformatora, a co za tym idzie, od warunków jego eksploatacji. Badania zawilgocenia izolacji transformatorów prowadzone są w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej od wielu lat. W latach 2003-2006 realizowano międzynarodowy projekt badawczy REDIATool [5]. Badania prowadzono na terenie Polski, Niemiec i Szwecji. Zbadano łącznie 80 transformatorów, z czego 53 stanowiły transformatory sieciowe należące do I grupy (160, 250, 330, 500 MVA, $U \geq 220kV$), a 27 było transformatorów rozdzielczych należących do II grupy. Na rysunku 1 przedstawiono średnie zawilgocenie izolacji transformatorów sieciowych w zależności od wieku.



R: od jego wieku; transformatory sieciowe wysokiego napięcia o konstrukcji uszczelnionej [6]

Po 40 latach eksploatacji, w przypadku zbadanych transformatorów, zawilgocenie średnie izolacji celulozowej wynosi około 2,1%. Zwraca uwagę znaczny rozrzut wyników.

W podobny sposób postąpiono analizując zawilgocenie izolacji transformatorów rozdzielczych. W tym przypadku, po 40 latach eksploatacji, zawilgocenie średnie wynosiło 2,7%. Większe zawilgocenie izolacji transformatorów rozdzielczych tłumaczy się faktem, że są obciążane dużo większą mocą, w stosunku do mocy znamionowej, niż transformatory sieciowe.

Zawilgocenie wyznaczano metodą nieinwazyjną, nie wymagającą pobrania próbki, opartą na analizie odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości FDS (*Frequency Domain Spectroscopy*). Metoda ta wymaga wzorców zawilgocenia dla wybranych poziomów zawilgocenia oraz wybranych wartości temperatury. Wzorce zostały wykonane, ogromnym nakładem pracy, w ramach międzynarodowego projektu REDIATool.

W tym miejscu należy mocno podkreślić, że wszystkie najpoważniejsze zagrożenia, takie jak przebiccie cieplne czy wysokoenergetyczne wyładowania niezupełne, zależą od zawilgocenia lokalnego, a ono jest znacznie większe od średniego, wyznaczonego metodą FDS. Wartość lokalnego maksymalnego zawilgocenia izolacji można wyznaczyć metodą odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie czasu RVM (*Recovery Voltage Measurement*). W przypadku izolacji o zróżnicowanym zawilgoceniu w przestrzeni, otrzymuje się charakterystykę RVM wieloekstremalną. Każde ekstremum charakteryzuje zawilgocenie innej części izolacji.

Potwierdzono tę zasadę na licznych modelach laboratoryjnych o różnym stopniu zawilgocenia. Badając realne transformatory stwierdzono, że w większości przypadków stosunek zawilgocenia maksymalnego do średniego wynosi 1,2. Tak więc, aby ocenić zagrożenie, należy zawilgocenie uśrednione zmierzone metodą FDS pomnożyć przez współczynnik 1,2.

Suszenie izolacji transformatorów

Suszenie izolacji transformatorów w trakcie procesu produkcyjnego zostało dobrze opanowane. Im wyższe napięcie znamionowe transformatora, tym większe wymagania są stawiane odnośnie do stopnia wysuszenia izolacji.

Suszenie izolacji transformatorów będących w eksploatacji jest stosunkowo nowym problemem. Pojawił się on z chwilą, gdy część transformatorów, głównie w Europie Zachodniej, osiągnęła wiek 30 lat [7]. Systemy suszące dzieli się na stacjonarne i mobilne.

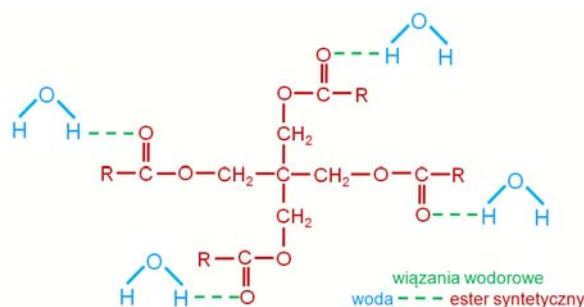
Metody suszenia izolacji celulozowej stosowane obecnie wymagają nagrzania izolacji oraz wytworzenia próżni w kadzi transformatora. Nagrzewanie izolacji może odbywać się za pośrednictwem gorącego powietrza, gorącego oleju, w wyniku przepływu prądu niskiej częstotliwości w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym lub prądu stałego w zwartych obwodach.

Metoda polegająca na grzaniu obu uzwojeń prądem niskiej częstotliwości (LFH – *Low Frequency Heating*) w warunkach próżni jest uznawana obecnie za najlepszą. Zasilana się trójfazowo uzwojenia wysokiego napięcia napięciem o obniżonej częstotliwości. Uzwojenie niskiego napięcia jest w tym czasie zwarte. Częstotliwość napięcia zasilającego obniża się do poziomu, przy którym jeszcze występuje efekt transformacji. Idealnie dobrane parametry zasilacza sprawiają, że uzwojenie pierwotne i wtórne będą miały tę samą temperaturę. Metoda jest stosowana w fabryce jako stacjonarna oraz w terenie jako mobilna. Usługa taka świadczona w terenie, w przypadku transformatorów sieciowych, kosztuje około 150 000 euro. Przy cenie transformatora, wynoszącej kilka milionów złotych, taki koszt jest do zaakceptowania. Najwięcej problemów stwarza uzyskanie odpowiedniej próżni, głównie z powodu nieszczelności kadzi oraz niewystarczającej wytrzymałości mechanicznej kadzi na ściskanie. Z naszego doświadczenia wynika, że w żadnym transformatorze rozdzielczym nie udało się uzyskać odpowiedniej próżni, co niezależnie od ceny, przesądza o niemożności wykorzystania tej metody w odniesieniu do transformatorów rozdzielczych w miejscu ich zainstalowania.

Suszenie izolacji celulozowej z wykorzystaniem estru syntetycznego

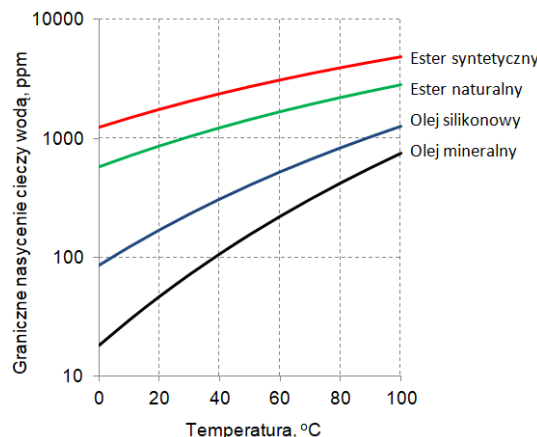
Prace prowadzone na modelach laboratoryjnych, opisane w pracach [8] i [11], dały bardzo pozytywne wyniki i zostaną dalej wykorzystane do stworzenia mobilnego systemu suszenia izolacji celulozowej transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego. Innowacyjność metody polega na wykorzystaniu fizycznej zasady migracji wody z celulozy do estru aż do osiągnięcia stanu równowagi zawilgocenia celulozy i estru. Ogromna rozpuszczalność wody w estrze, około 35-krotnie większa niż w oleju mineralnym, sprawia że duża ilość wody zaadsorbowanej na włóknach celulozowych w stosunkowo krótkim czasie przechodzi do estru. W sensie technicznym proces ten stanowi suszenie celulozy. Właściwości suszące estru są wynikiem fizykochemicznych zjawisk zachodzących w zetknięciu estru z wodą. Ester wykazuje właściwość wiązania cząsteczek wody za pomocą wiązań wodorowych. Są to wiązania typu fizycznego, oparte na

zjawiskach elektrostatyki. Jedna cząsteczka estru jest w stanie związać cztery cząsteczki wody, co pokazano na rysunku 2.



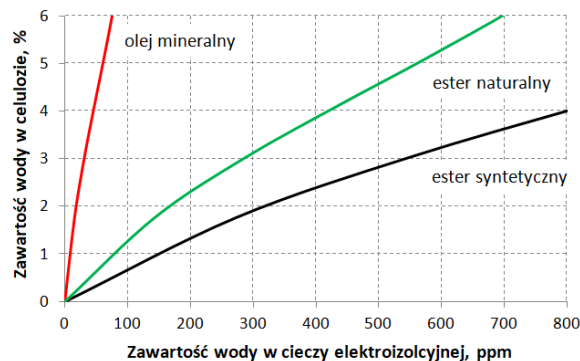
Rys.2. Cząsteczka estru syntetycznego z przyłączonymi za pomocą wiązań wodorowych czterema cząsteczkami wody; R – grupa alkilowa o wzorze sumarycznym od C_5H_{11} do C_9H_{19} [8,9]

Graniczną rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym w porównaniu z rozpuszczalnością w estrze naturalnym, silikonie i oleju mineralnym przedstawiono na rysunku 3. Przykładowo, przy temperaturze $20^\circ C$ w oleju mineralnym graniczna rozpuszczalność wody wynosi około 50 ppm, podczas gdy w estrze syntetycznym aż 1760 ppm.



Rys.3. Porównanie granicznego nasycenia cieczy wodą czterech cieczy elektroizolacyjnych [10]

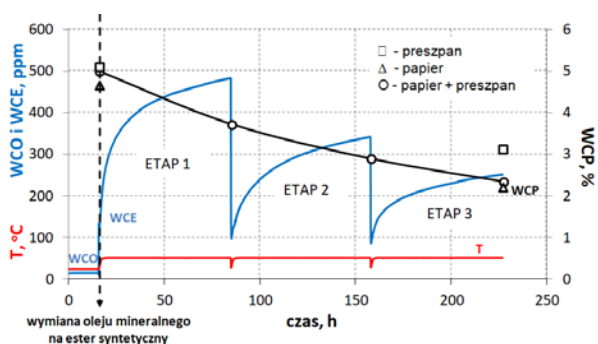
W analizie procesu suszenia izolacji celulozowej przez ester bardzo ważne jest pojęcie równowagi zawilgocenia celulozy i cieczy. Na rysunku 4 przedstawiono krzywe równowagi dla trzech cieczy, będące zależnościami zawartości wody w celulozie wyrażonej w procentach od zawartości wody w cieczy wyrażonej w ppm.



Rys.4. Krzywe równowagi zawilgocenia dla estru syntetycznego, estru naturalnego oraz oleju mineralnego dla temperatury $50^\circ C$; na podstawie danych z [10]

Przykładowo, zawilgoceniu celulozy równemu 3% odpowiada, w stanie równowagi, zawilgocenie oleju mineralnego równe około 35 ppm, a zawilgocenie estru syntetycznego aż 550 ppm.

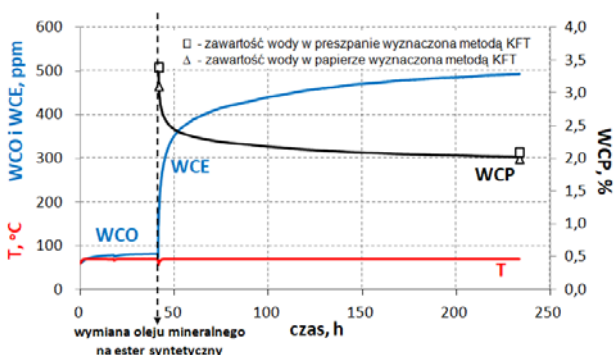
Proces suszenia celulozy na modelu laboratoryjnym przedstawiono na rysunku 5. W odstępach 72-godzinnych wprowadzano trzykrotnie suchy ester. W tym przypadku przyjęto duże wyjściowe zawilgocenie celulozy, równe 5,0%. Jest to zawilgocenie przekraczające wartości w realnych transformatorach, ale chodziło o wykazanie zależności dynamiki suszenia od zawilgocenia celulozy. Temperatura była stosunkowo niska, równa 50°C. Zawilgocenie zmalało o 1 punkt procentowy, z poziomu 5% do 4% w czasie 55 h, natomiast zmniejszenie zawilgocenia o 1 punkt procentowy z poziomu 4 do 3% wymagało już 78 h. Widać wyraźnie, że malejącemu zawilgoceniu celulozy towarzyszy spowalnianie procesu suszenia.



Rys.5. Zawartość wody w oleju mineralnym (WCO), zawartość wody w estrze syntetycznym (WCE), zawartość wody w izolacji celulozowej (WCP) w zależności od czasu jej suszenia; temperatura w trakcie procesu suszenia ($T=50^{\circ}\text{C}$); na podstawie danych z [11]

Bardzo istotny wpływ na proces suszenia ma temperatura. W kolejnym eksperymencie podwyższono temperaturę do 70°C, natomiast zawilgocenie wyjściowe celulozy wynosiło 3,3%, co może odpowiadać realnemu zawilgoceniu izolacji transformatora. Suchy ester wprowadzono tylko jednorazowo. Wyniki przedstawiono na rysunku 6.

W porównaniu z poprzednim eksperymencie, podniesienie temperatury powoduje zwiększenie dynamiki suszenia, natomiast dużo mniejsze zawilgocenie wyjściowe celulozy jest powodem zmniejszenia dynamiki suszenia. W rezultacie zmniejszenie zawilgocenia o jeden punkt procentowy z poziomu 3,2 do 2,2% wymagało 65 h.



Rys.6. Zawartość wody w oleju mineralnym (WCO), zawartość wody w estrze syntetycznym (WCE) i zawartość wody w izolacji celulozowej (WCP) w zależności od czasu jej suszenia; temperatura w trakcie procesu suszenia ($T=70^{\circ}\text{C}$); na podstawie danych z [8]

W obu eksperymentach stosunek masy wyrobów celulozowych do masy dielektryku ciekłego wynosił około 0,03, co odpowiada warunkom rzeczywistym. Stosunek ten ma istotny wpływ na dynamikę procesu suszenia.

Mobilny system suszenia izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego

System suszenia izolacji transformatorów o pełnym tytule wyżej podanym jest tematem projektu zgłoszonego do NCBR i zatwierdzonego do finansowania. Stworzono konsorcjum w składzie: Politechnika Poznańska – lider, Centrum Zaawansowanych Technologii Uniwersytetu Adama Mickiewicza oraz firma AD Moto Rafał Zawisz. Wyniki projektu zostaną wprowadzone do działalności komercyjnej konsorcjanta przemysłowego.

W oparciu o liczne badania laboratoryjne opracowano wstępny projekt. Z założenia system ma być mobilny i adresowany głównie do transformatorów rozdzielczych.

Przewidywanych jest kilka możliwych opcji suszenia, polegających na jednokrotnym lub wielokrotnym wprowadzeniu do kadzi suchego estru lub też stosując ciągle grzanie i suszenie estru cyrkulującego między kadzią transformatora a próżniowym agregatem suszącym. Ta ostatnia opcja zapewnia największy komfort pracy i stosunkowo łatwe dopasowywanie parametrów suszenia do konkretnej sytuacji.

Może też być taki wariant, że właściciel transformatora zażyczy sobie pozostawienie estru w kadzi do dalszej eksploatacji. Ma to kolosalne zalety ze względów bezpieczeństwa pożarowego i ekologicznego. Ester syntetyczny jest niepalny i niewybuchowy. Ponadto nie powoduje skażenia gleby i wody. Ale oczywiście ma to swoją cenę, gdyż koszt estru wynosi około 5 euro za 1 kg.

Uzdatnianie estru roboczego

Ester syntetyczny jako medium suszące będzie wykorzystywany wielokrotnie w procesie suszenia izolacji celulozowej. Jednakże, każdorazowemu użyciu tej samej porcji estru, towarzyszyć będzie wprowadzanie kolejnych porcji oleju mineralnego, który nie został całkowicie usunięty z kadzi transformatora oraz z porowatego, celulozowego materiału izolacyjnego. Konsekwencją podwyższenia zawartości oleju w estrze jest pogorszenie jego właściwości sorpcyjnych względem wody, co w znaczący sposób będzie wpływało na obniżenie efektywności procedury suszenia izolacji transformatora. Z tego względu, w celu przywrócenia dość kosztownemu estrowi początkowych zdolności pochłaniania wody, konieczne jest opracowanie i wdrożenie metody pozwalającej na, możliwie najdokładniejsze, oddzielenie olejowo-wodnej domieszki od medium suszącego.

Spośród szeregu sposobów rozdziału mieszanin substancji ciekłych, powszechnie wykorzystywane w procesach przemysłowych są filtracja membranowa, wymrażanie (winteryzacja), a także destylacja frakcyjna.

Biorąc pod uwagę złożoność aparatury oraz koszty jej budowy, jak również aspekty ekonomiczne związane z samym procesem rozdziału składników ciekłych, należy rozważyć zastosowanie metod destylacyjnych (ewaporacyjnych).

W przypadku naszego układu, stanowiącego trójskładnikowy roztwór estru syntetycznego/oleju mineralnego/ H_2O , głównym kryterium wyboru dogodnej metody uzdatniania zanieczyszczonego estru było wykorzystanie znaczących różnic w wartościach prężności par oraz temperatury wrzenia rozdzielanych składników.

Badania rekonesansowe procesu uzdatniania estru roboczego metodą destylacyjną, przeprowadzone dla modelowej mieszaniny olej mineralny/ester syntetyczny o

stosunku wagowym składników 30/70, potwierdziły trafność doboru wybranej metody rozdzielenia mieszaniny i wykazały możliwość przeprowadzenia procesu regeneracji estru technikami ewaporacyjnymi, w technologicznie akceptowalnych warunkach, czyli przy zastosowaniu obniżonego ciśnienia, którego wartość nie była niższa niż 10^{-2} mbara oraz temperatury, której wartość maksymalna nie przekraczała 170°C . Skuteczność zastosowanej metody uzdatniania estru potwierdzona została przy użyciu techniki GCMS (Gas Chromatography Mass Spectrometry). Wykonana analiza składu rozdzielonych cieczy wykazała śladową zawartość zarówno składnika olejowego w regenerowanym estrze, jak i syntetycznego estru w oddestylowanym oleju.

Zapotrzebowanie na usługę suszenia izolacji transformatorów rozdzielczych

We wszystkich spółkach dystrybucyjnych jest 256.522 transformatorów rozdzielczych, z czego transformatorów WN/SN jest 2.731, SN/SN - 130, natomiast transformatorów SN/nn jest aż 253.661 [12]. Na wybór transformatora do suszenia wpływ mają cztery podstawowe kryteria: wiek transformatora, zagrożenie pożarowe stwarzane przez jednostkę, znaczenie w systemie elektroenergetycznym oraz oczywiście zawilgoconie.

Kryterium wieku transformatora należy do najważniejszych. Transformator kwalifikowany do suszenia ma mieć znacznie zawilgoconą izolację, co idzie w parze z jego wiekiem. Z drugiej strony, transformator ma być w na tyle dobrym stanie technicznym, żeby opłacało się go poddawać procedurze suszenia. Transformatory rozdzielcze są eksploatowane nawet 50 lat, ale w bardzo różnych warunkach, stąd różny może być ich stan techniczny.

W oparciu o analizę struktury wiekowej transformatorów rozdzielczych w jednym z Oddziałów Dystrybucji oszacowano, że transformatorów SN/nn ponad 50 letnich jest 3,7%. Zakłada się, że usługa suszenia będzie kierowana do transformatorów w przedziale wiekowym 30-35 lat. Takich transformatorów jest w Polsce około 11%, co stanowi około 28.000 sztuk.

Wydaje się, że usługa suszenia powinna być adresowana szczególnie do transformatorów WN/SN. Tych transformatorów w przedziale wiekowym 30-35 lat jest około 14% całej populacji, co stanowi około 390 jednostek. Rozszerzając przedział wiekowy transformatorów do 25-35 lat, szacuje się, że takich transformatorów w skali kraju jest około 700.

Przechodząc do kryterium zagrożenia pożarowego, spośród wyżej wymienionych 700 transformatorów, we współpracy z Departamentami Zarządzania Majątkiem Sieciowym należy wytypować transformatory, których pożar stanowi ekstremalne zagrożenie. Przykładowo, będą to jednostki w dużych skupiskach ludzkich – centra handlowe, uczelnie, szpitale, bloki mieszkalne.

Artykuł pt. „Suszenie izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego” finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Poddziałania 4.1.2 „Regionalne agendy naukowo-badawcze” w ramach projektu POIR.04.01.02-00-0045/17-00 pt. „Mobilny system suszenia izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego”.

Autorzy: dr hab. inż. Piotr Przybyłek, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl; dr hab. inż. Hubert Morańda, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl; prof. dr hab. inż. Hanna Mościcka-Grzesiak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: hanna.moscicka-grzesiak@put.poznan.pl; dr hab. Ireneusz Kownacki, Wielkopolskie Centrum Zaawansowanych Technologii, Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu, ul. Umultowska 89C, 61-614 Poznań, E-mail: irekk@o365.amu.edu.pl; Ad Moto Rafał Zawisz, al. Roździeńskiego 188 b, 40-203 Katowice, E-mail: biuro@filtracjaoleju.pl.

LITERATURA

- [1] CIGRE Brochure 349, Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems, 2008
- [2] Oommen T.V., Lindgren S.R., Bubble evolution from transformer overload, w materiałach IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. Exposition, 1 (2001), 137-142
- [3] Przybyłek P., Badania temperatury inicjacji efektu bąbelkowania w izolacji papier-olej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr.11b/2010, 166-169
- [4] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, ZPBE Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o., 2012
- [5] REDIATool Reliable diagnostics of HV transformer insulation for safety assurances of power transmission system, koordynator: Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, członkowie konsorcjum: Chalmers University of Technology, Polskie Sieci Elektroenergetyczne – Zachód, Rwe Net Aktiengesellschaft, Universitaet Stuttgart, Zakłady Produkcyjno-Remontowe Energetyki Poznań “Energetyka Czerwonak”, czas realizacji projektu 2003-2006
- [6] Gielniak J., Graczkowski A., Morańda H., Przybyłek P., Walczak K., Nadolny Z., Mościcka-Grzesiak H., Feser K., Gubanski S.M., Moisture in cellulose insulation of power transformers-statistics, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20 (2013), n.3, 982-987
- [7] Walczak K., Metody suszenia izolacji stałej transformatora energetycznego w miejscu zainstalowania, w materiałach międzynarodowej Konferencji Transformatorowej TRANSFORMATOR’13, (2013), C1-C9
- [8] Przybyłek P., Rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym oraz mieszaniu estru z olejem mineralnym w aspekcie suszenia izolacji celulozowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.10/2016, 92-95
- [9] CIGRE Brochure 436, Experience in service with new insulating liquids, 2010
- [10] Przybyłek P., Water saturation limit of insulating liquids and hygroscopicity of cellulose in aspect of moisture determination in oil-paper insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23 (2016), n.3, 1886-1893
- [11] Przybyłek P., Drying transformer cellulose insulation by means of synthetic ester, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24 (2017), n.4, 2643-2648
- [12] Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdzielenia Energii Elektrycznej, Rok 2016 w dystrybucji i przesyłach



Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju