



Jerzy SŁOWIKOWSKI

Centrum Promocji Przemysłu Elektrotechnicznego, Warszawa

Czynniki odgrywające rolę w poprawnym określeniu zawilgocenia izolacji celulozowej transformatorów olejowych w drodze pomiaru zawartości wody rozpuszczonej w oleju

Streszczenie. W referacie omówiono procesy migracji wody z otoczenia do wnętrza transformatora i wewnątrz transformatora. Na tym tle przedstawiono założenia dotyczące metody wyznaczania poziomu zawilgocenia izolacji celulozowej w drodze pomiaru zawartości wody rozpuszczonej w oleju.

Abstract. (Factors influencing proper cellulose insulation moisture's level determination based on measurement contents of water dissolved in oil in paper-oil transformer). The paper discusses processes of water migration from the surrounding space to the transformer inside as well as within the transformer itself. Assumptions concerning the method of determining cellulose insulation moisture levels by measuring the contents of water dissolved in oil, were presented against this background.

Słowa kluczowe: transformatory olejowe, migracja wody, diagnostyka.

Keywords: paper-oil transformers, water migration, diagnostic.

Wstęp

Problem utrzymania odpowiedniego poziomu zawilgocenia izolacji transformatorów nabiera ostatnio coraz większego znaczenia w związku z ogólną tendencją do przedłużania okresu eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, a także – spodziewanymi zmianami w polityce ubezpieczeniowej, spowodowanymi wchodzeniem w życie „Prawa Energetycznego”.

Stosunkowo często spotykanymi przypadkami są jednostki niehermetyzowane eksploatowane powyżej 20 lat w sieciach rozdzielczych na napięcia ≤ 110 kV, w których wprawdzie nie występują wolnorozwijające się defekty (bądź intensywność występowania tych defektów mieści się w granicach dopuszczalnych) [1,2] wykazujące natomiast duże zawilgocenie izolacji celulozowej.

Już 50 lat temu stwierdzono, że izolacja celulozowa transformatorów znajdujących się w eksploatacji, ulega stopniowemu zawilgoceniu. Dzieje się to pomimo przesycenia jej olejem i pomimo obecności sorbenta umieszczonego u wylotu rury, przez którą następuje „oddychanie” transformatora.

Fenomenologicznie ustalono, że impregnacja olejem powoduje jedynie spowolnienie procesu dyfuzji wilgoci do izolacji celulozowej i wewnątrz tej izolacji, nie zmienia natomiast końcowego poziomu jej zawilgocenia wynikającego ze stanu równowagi termodynamicznej układu, który w przypadku transformatora pracującego w systemie otwartym, obejmuje izolację celulozową, olej i powietrze atmosferyczne.

Analiza gazów rozpuszczonych w oleju (DGA), pomiary koncentracji związków furanu oraz koncentracji wody rozpuszczonej w oleju umożliwiają postawienie diagnozy co do stanu transformatora, a w szczególności zmiany jego stanu, w drodze odpowiednich badań przeprowadzanych na próbce oleju. Pobór tej próbki, co jest oczywiste, nie wymaga wyłączenia jednostki z ruchu.

W/w sposób diagnozowania nie wyczerpuje wprawdzie możliwości wykrycia wszystkich defektów takich jak np. odkształcenia uzwojeń, a także nie jest w stanie precyzyjnie zlokalizować defektu, tym niemniej potrafi ustalić jego rodzaj i intensywność.

Mechanizmy migracji wilgoci z zewnątrz i wewnątrz transformatora

Budowa chemiczna (łańcuchy celulozy) i struktura fizyczna surowca powodują dużą chłonność wilgoci przez wyroby celulozowe (papier, preszpan).

W niniejszym referacie, określenie: „chłonność wilgoci” odniesiono wyłącznie do procesu sorpcji wody w stanie rozdrobnienia molekularnego, który to stan cechuje parę wodną w powietrzu i wodę rozpuszczoną w oleju. W tym stanie również, odbywa się migracja wody pomiędzy powietrzem, olejem i izolacją celulozową. Charakterystyczne dla tego rodzaju migracji jest tzw. zjawisko nasycenia polegające na tym, że powyżej określonej koncentracji wody (w postaci molekularnej) następuje zmiana jakościowa, w następstwie której tworzy się faza ciekła. To przejście, łatwo dostrzegalne w parze jako rosenie, i w oleju – jako zmętnienie (tj. tworzenie się zawiesiny koloidalnej) a następnie wykroplenie, w przypadku izolacji celulozowej – jest nie tylko trudne do uchwycenia, ale i do zdefiniowania

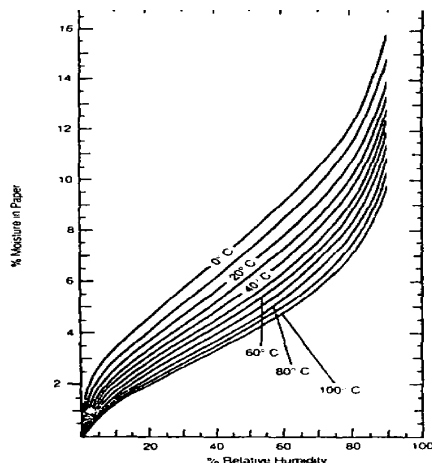
Zależności poziomu nasycenia od temperatury (przy danym ciśnieniu $p = const$), w przypadku pary w powietrzu i wody rozpuszczonej w oleju opisują proste funkcje matematyczne. Zależność stanu nasycenia wody rozpuszczonej w oleju nosi nazwę charakterystyki rozpuszczalności. Sporządzenie tego rodzaju charakterystyki dla izolacji celulozowej okazało się jak dotąd praktycznie niemożliwe (Teoretyczne rozważania (m.in. [3]) prowadzą do fizykalnego uzasadnienia kształtu izoterm chłonności materiałów celulozowych; liczbowe określenie zależności od temperatury pozostaje jednak nadal bliżej nieokreślone, co z praktycznego punktu widzenia, przy rozwiązywaniu rozważanego problemu – nie jest konieczne.).

Poziom nasycenia pary wodnej w powietrzu i poziom rozpuszczalności w oleju rosną ze wzrostem temperatury. W przeciwieństwie do powietrza i oleju, chłonność wilgoci przez izolację celulozową ze wzrostem temperatury maleje. Przyczyną tego jest właściwość makromolekuły celulozy polegająca na tym, że pewne człony jej łańcucha, a mianowicie grupy OH, pomimo wysycenia swych wiązań w strukturze polimeru, zachowują zdolność przyłączania molekuł wody. Wiązanie to, w porównaniu do wiązań

łączących atomy w molekułach, jest znacznie słabsze [4]. Główną rolę w tym wiązaniu odgrywa atom wodoru. Stąd bierze się nazwa – „wiązanie wodorowe”. Jest ono wynikiem oddziaływania międzymolekularnego, co oznacza, że przyłączona tym wiązaniem molekula wody do łańcucha celulozy zachowuje swoją tożsamość tzn. nie przyczynia się do tworzenia nowego związku chemicznego.

Obecnością wiązań wodorowych i ich stopniowym wysycaniem w miarę wzrostu zawilgocenia, można wytłumaczyć przebieg izoterm chłonności wilgoci przez materiały celulozowe, w tym – spadek tej chłonności ze wzrostem temperatury. Powodem tego spadku jest bowiem, wartość energii wiązań wodorowych, porównywalna z energią drgań ciepłych makromolekuł celulozy [4]. Wzrost energii tych drgań powoduje zatem zmniejszenie prawdopodobieństwa przyłączenia molekuł wody, a ponadto – zwiększa prawdopodobieństwo uwolnienia molekuł wody połączonych uprzednio wiązaniami wodorowymi z łańcuchami celulozy. Te dwa zjawiska sprawiają, że ze wzrostem temperatury, efektywność adsorpcji molekuł wody maleje, co w skali makro – objawia się spadkiem chłonności wilgoci. Obrazuje to przykładowo rysunek 1 [5], na którym przedstawiono wykresy izoterm chłonności wilgoci z powietrza przez surowiec służący do wytwarzania papieru jakim jest pulpa celulozowa.

Izotermie te określają stan równowagi pomiędzy zawartością wody w pulpie, wyrażoną w procentach wagowych X_{w1} , a wilgotnością względną RH (relative humidity) powietrza, przy różnych temperaturach.



Rys.1 Wykresy izoterm chłonności wilgoci z powietrza przez pulpę celulozową [5].

Doświadczenia potwierdziły możliwość posługiwania się wilgotnością względną RH do wyznaczania jednoznacznych zależności pomiędzy ilością wody pochłoniętej przez materiał celulozowy, a wilgotnością względną powietrza. Dotyczy to również relacji pomiędzy wodą rozpuszczoną w oleju, liczoną w jednostkach względnych w stosunku do stanu nasycenia (in. rozpuszczalności), a zawilgoceniem izolacji celulozowej.

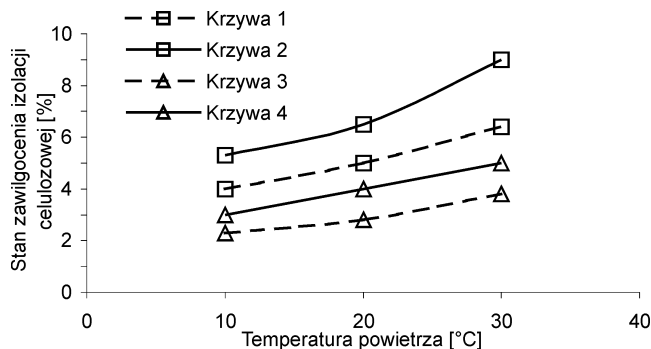
W tym miejscu należy zaznaczyć, że stan równowagi między zawartością wilgoci w powietrzu i w oleju, przy danej temperaturze T , zostaje osiągnięty, kiedy w obu ośrodkach wystąpi ta sama wartość względna zawartości wilgoci liczona w stosunku do stanu nasycenia (tj. – RH w przypadku powietrza, i w jednostkach względnych liczonych w stosunku do rozpuszczalności w oleju).

Dzięki powyżej opisanym zjawiskom, wyznaczenie zależności między zawartością wilgoci w izolacji celulozowej, a wilgotnością względną powietrza jest równoznaczne z wyznaczeniem zależności między zawilgoceniem izolacji celulozowej, a wilgotnością

względnej oleju, przy tej samej temperaturze T . W praktyce, umożliwiło to wyznaczenie charakterystyk (dla stanów równowagi) – zawartości wilgoci w układach: izolacja celulozowa–olej–powietrze atmosferyczne oraz izolacja celulozowa–olej.

Charakterystyki stanu równowagi termodynamicznej układu: izolacja celulozowa–olej–powietrze atmosferyczne, przy różnych temperaturach powietrza atmosferycznego i jego wilgotności RH oraz różnych temperaturach oleju, opublikowali Fabre i Pichon [6] oraz Norris [7].

Na poniżej przytoczonym rysunku (rys.2) przedstawiono zależności zawilgocenia izolacji celulozowej od temperatury powietrza atmosferycznego przy dwóch różnych wartościach RH (50 i 100%) oraz przy dwóch różnych temperaturach oleju (40 i 60°C).



Rys.2 Zależność zawilgocenia izolacji celulozowej od temperatury powietrza atmosferycznego przy różnych wartościach RH (50% – krzywe 1 i 3; 100% – krzywe 2 i 4) oraz różnych temperaturach oleju (40°C – krzywe 1 i 2) (60°C – krzywe 3 i 4).

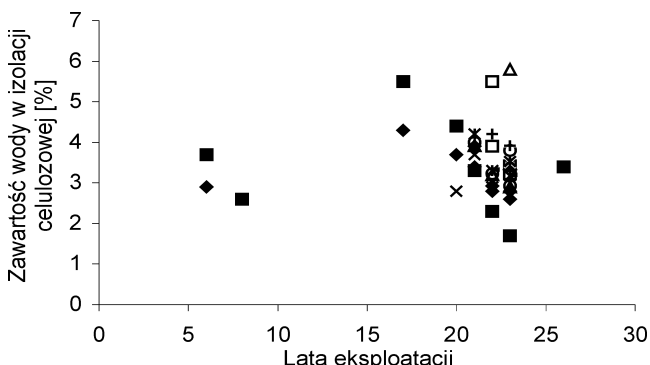
Charakterystyki te zostały sporządzone na podstawie danych Fabre'a i Pichon [6]. Analiza przebiegu tych charakterystyk prowadzi do następujących wniosków praktycznych:

– Poziom zawilgocenia izolacji celulozowej, osiągnąć po długim okresie eksploatacji transformatora, zgodnie z oczekiwaniami, zależy od warunków otoczenia (temperatura, RH) ale istotną rolę odgrywa przy tym temperatura oleju, czyli upraszczając – wykorzystanie mocy znamionowej danej jednostki; im większe obciążenie – tym mniejsza penetracja wilgoci atmosferycznej. Z tego powodu, szczególnie niekorzystnie działa odstawianie transformatora z ruchu. Już bowiem przy obniżeniu temperatury oleju do 40°C przy RH równym 100%, zawilgocenie izolacji celulozowej może dojść do 9%.

– Biorąc pod uwagę warunki klimatyczne panujące w naszym kraju i małe aktualnie wykorzystanie mocy znamionowej transformatorów należy się liczyć z tym, że przeważająca liczba jednostek, po bliżej nieokreślonym czasie osiągnie stan zawilgocenia izolacji celulozowej przy którym nie będą spełnione wymagania na zawartość wody rozpuszczonej w oleju (vide Ramowa Instrukcja Eksploatacji [2]), a w ślad za tym może nastąpić spadek wytrzymałości elektrycznej oleju tj. jego napięcie przebicia będzie niższe od wymagań zawartych w cytowanej Instrukcji.

W związku z powyższym, w zależności od warunków eksploatacyjnych jednostek należących do populacji transformatorów pracujących ok. 20 lat i więcej, można oczekiwać dość dużego rozrzuć stanu zawilgocenia. Potwierdzeniem tego są wyniki badań przedstawione na rysunku 3. Wykazany na rysunku 3, „rozrzuć” zawilgocenia, tłumaczy różnicę zdań występującą w różnych krajach co do celowości hermetyzacji transformatorów. W dyskusji na ten temat, która toczyła się głównie w latach 60-tych ubiegłego wieku, nie brano jednak pod uwagę, że zaistnieje, ekonomicznie uzasadniony trend do

przedłużania długości życia transformatorów, znacznie powyżej uprzednio spodziewanego okresu eksploatacji tj. powyżej 25-30 lat. Wiąże się to m.in. z ogólnie obserwowanym spadkiem wykorzystania mocy znamionowej transformatorów zainstalowanych w latach 70-tych i 80-tych ubiegłego wieku



Rys. 3 Wyniki pomiarów stanu zawilgocenia izolacji celulozowej transformatorów o długim okresie eksploatacji.

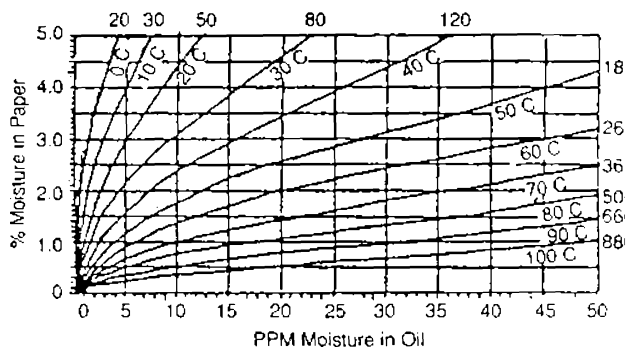
Na zakończenie omawiania problemu zawilgacania się transformatorów niehermetyzowanych wskutek penetracji powietrza atmosferycznego, należy podkreślić, że jest to proces bardzo powolny, rozłożony na lata. Jest on jednakże procesem nieodwracalnym, chociaż jego efektem, jak wynika z rysunku 3, może być różny poziom zawilgocenia izolacji celulozowej. O nieodwracalności tego procesu decydują:

- gradient koncentracji wody skierowany do wnętrza transformatora, decydujący o kierunku dyfuzji wilgoci pochodzenia atmosferycznego, oraz
- chłonność izolacji celulozowej, której cechą m.in. jest to, że na „oddanie” zaabsorbowanej wody potrzebne jest dostarczenie dodatkowego ciepła potrzebnego do pokonania energii wiązań wodorowych; jest to tzw. zjawisko histerezy towarzyszące sorpcji i desorpcji wilgoci z izolacji celulozowej.

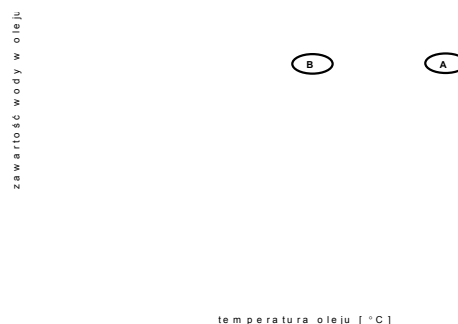
Powolność procesu zawilgocenia wywołanego kontaktem oleju z powietrzem, upoważnia do tego, ażeby migrację wody między izolacją celulozową, a olejem, powodowaną doraźnymi zmianami temperatury roboczej transformatora, traktować jako proces, na który nie wywierają wpływu czynniki atmosferyczne. Założenie takie umożliwia postępowanie się pomiarami zawartości wody rozpuszczonej w oleju do określenia zawilgocenia izolacji celulozowej wychodząc ze stanu równowagi układu: izolacja celulozowa-olej. Trudności natury doświadczalnej przy wyznaczaniu w/w charakterystyk w warunkach laboratoryjnych pokonał Oommen [8] (vide rys.4), a weryfikacji wyników jego pomiarów dokonali Y.Du i in. [5].

Ograniczenie skali zawilgocenia izolacji papierowej objętej charakterystykami Oommen'a w porównaniu do charakterystyk przedstawionych na rysunku 1, wynika z zakresu wartości spotykanych w praktyce eksploatacyjnej transformatorów. Wartości te zawierają się w granicach kilku procent, co przy wziętych pod uwagę temperaturach na wykresie odpowiada zmianom zawartości wody rozpuszczonej w oleju (nie wykazującym objawów starzenia tj. o liczbie kwasowej $N_v \leq 0,02$ mg KOH/g) w granicach od kilku do kilkudziesięciu ppm wagowych.

W przypadku olejów o większej liczbie kwasowej, wskazującej na zaawansowanie procesu starzenia, konieczne jest wzięcie pod uwagę wzrostu rozpuszczalności wody. Wzrost ten obrazują krzywe przedstawione na rysunku 5 [9].



Rys.4.Charakterystyki stanu równowagi pomiędzy zawartością wody rozpuszczonej w oleju i zawartością wody w izolacji papierowej wg. Oommen'a [8].



Rys. 5. Wzrost rozpuszczalności wody w olejach spełniających wymagania IEC 296 z temperaturą; krzywa A – oleju niezestarzonego, krzywa B – oleju o liczbie kwasowej $N_v = 0,3$ mg KOH/g [9].

Cechą tych krzywych, odnoszących się do oleju świeżego i oleju o liczbie kwasowej $N_v = 0,3$ mg KOH/g, jest praktycznie stały stosunek wartości rozpuszczalności przy danej temperaturze. Oznacza to, że tej samej względnej wartości wody rozpuszczonej, liczonej w stosunku do stanu nasycenia, w miarę starzenia się oleju będzie odpowiadać wyższa wartość liczona w ppm.

Praktyczne aspekty prawidłowego określenia zawilgocenia izolacji celulozowej

W praktyce eksploatacyjnej, zawilgocenie izolacji papierowej określa się na podstawie zmierzonej zawartości wody rozpuszczonej w próbce oleju pobranej na ogół z dolnej części kadzi transformatora i tę wartość odnosi się do temperatury górnej warstwy oleju. Jest oczywiste, że temperatura pobieranej próbki jest znacząco niższa od temperatury w górnej części kadzi, co pozornie nie odpowiada parametrom charakterystyk Oommen'a [8].

Wątpliwości może nasuwać również fakt, że pomiar zawartości wody rozpuszczonej w oleju nie jest dokonywany w warunkach ściśle odpowiadającym warunkom równowagi termodynamicznej, tj. przy wyrównanej temperaturze w całym transformatorze, a w konsekwencji – przy zaniku ruchu konwekcyjnego oleju.

Zgodnie z zaleceniami normy IEC 422 [9] próbki oleju do badań powinno się pobierać przy temperaturach oleju w zakresie 40–60°C, co sprowadza się w praktyce do pobierania próbek w warunkach pracy transformatora. W rzeczywistości zatem, stan zawilgocenia izolacji celulozowej jest określamy w stanie równowagi dynamicznej transformatora przy czym przez równowagę należy w tym przypadku rozumieć, ustalony rozkład temperatury w transformatorze oraz ustaloną wartość koncentracji wody rozpuszczonej w oleju. W takim przypadku, temperatura

pobieranej próbki, jak to będzie wykazane poniżej nie wnosi znaczącego błędu.

Posługiwanie się w/w charakterystykami w praktyce eksploatacyjnej można uzasadnić uwzględniając łączny udział dyfuzji i konwekcji w wymianie wody między celulozą i olejem.

Z dostateczną dokładnością bowiem można przyjąć, że w przylegających do siebie warstwach oleju i izolacji celulozowej, w niedużej odległości od powierzchni granicznej, panuje jednakowa temperatura. Wysokość tej temperatury decyduje o koncentracji wody w oleju i w izolacji papierowej w stanie równowagi, a w przypadku braku równowagi – o szybkości wymiany między nimi wilgoci. O wymianie tej decyduje zarówno proces dyfuzji jak i szybkość przepływu oleju znajdującego się w ruchu konwekcyjnym. Im wyższa temperatura, tym większa jest szybkość dyfuzji molekuł wody i tym większa jest szybkość przepływu oleju w ruchu konwekcyjnym. Ruch konwekcyjny powoduje stopniowe wyrównywanie koncentracji wody rozpuszczonej w całej objętości oleju bez względu na temperatury panujące w różnych miejscach transformatora. Zgodnie z krzywymi Oommen'a [8], w miarę wzrostu temperatury, przy stałej wartości zawilgocenia izolacji celulozowej, rośnie ilość wody rozpuszczonej w oleju (vide rys. 4). A zatem, o ilości wody w oleju znajdującym się w ruchu konwekcyjnym, decydują warunki równowagi panujące na granicy olej – izolacja celulozowa w obszarze najwyższej temperatury. Tą najwyższą temperaturą panującą na styku: olej–izolacja celulozowa jest w przybliżeniu temperatura górnej warstwy oleju w kadzi transformatora.

Wyrównanie koncentracji wody rozpuszczonej w całej objętości transformatora po zmianie temperatury jego pracy wymaga określonego czasu. Jeśli przebiegowi tego procesu przypisać funkcję wykładniczą to jest oczywiste, że stała czasowa tej funkcji będzie tym mniejsza im wyższa będzie temperatura pracy. Tym bowiem szybszy będzie obieg oleju i tym szybsza będzie dyfuzja molekuł wody uczestniczących w wymianie wilgoci między izolacją celulozową, a olejem.

Jeśli chodzi o dyfuzję to stała czasowa tego procesu, przykładowo przy 70°C, stanowi ok. 0,02 wartości stałej czasowej przy 20°C [10]. Dyfuzja ta dotyczy bardzo cienkiej warstwy izolacji celulozowej, jeśli wziąć pod uwagę dysproporcję ilości wody liczonej w gramach z ilością wody izolacji celulozowej. Przykładowo, przy temp. 60°C i zawilgoceniu izolacji celulozowej wynoszącym 2%, w 1 cm³ prespanu jest ca 1700 razy więcej wody niż w 1 cm³ oleju. Nie dziwi zatem stosunkowo szybki czas wyrównywania się koncentracji wody rozpuszczonej w oleju przy dobowych zmianach temperatury roboczej transformatora w granicach 40–60°C.

Z dostatecznym przybliżeniem można przyjąć ponadto, że nawet przy dużych wahaniach temperatury roboczej transformatora, stan zawilgocenia izolacji celulozowej nie ulega zmianie.

Uwagi końcowe i wnioski

Główną zaletą opisywanej metody określania zawilgocenia izolacji celulozowej jest jej prostota.

Warunkiem koniecznym do uzyskania poprawnego wyniku jest jednak dokonywanie pomiaru w warunkach równowagi dynamicznej pomiędzy koncentracją wody rozpuszczonej w oleju, a wodą zawartą w izolacji celulozowej, przy ustalonej temperaturze pracy transformatora.

Należy brać przy tym pod uwagę, że ze względu na udział procesów dyfuzji i konwekcji, czas osiągnięcia stanu równowagi jest uzależniony od temperatury. Czas ten będzie krótszy przy wyższej temperaturze.

Do sprawdzania stanu równowagi dynamicznej użyteczne byłoby stosowanie metod czujnikowych. Jak dotąd jednak aparatura taka nie jest przenośna. Instalowanie zaś stałego czujnika do pomiaru wody rozpuszczonej w oleju, proponowane przez niektórych producentów, ze względu na bardzo powolny proces zawilgocenia się układu izolacyjnego w stosunku do czasu eksploatacji transformatora, nie zawsze przez użytkowników jest uważane za niezbędne.

Jak już wspomniano, absorpcję i desorpcję wilgoci z izolacji celulozowej cechuje zjawisko histerezy. Podane na rys. 4 charakterystyki Oommen'a [8] odnoszą się do desorpcji wody z izolacji celulozowej. Wskazane jest zatem, ażeby próbkę oleju do badań pobierać z transformatora o ustabilizowanej temperaturze, wyższej od poprzedniego okresu obciążenia.

Nasuwa się pytanie co do występowania ewentualnych rozbieżności w ocenie zawilgocenia izolacji celulozowej przy zastosowaniu metod elektrycznych i metody fizykochemicznej jaką jest posługiwanie się charakterystykami Oommen'a.

Zasadniczą różnicą w operowaniu tymi metodami są założenia :

- w metodach elektrycznych zakłada się równomierny rozkład wilgoci w całej izolacji celulozowej przy danej temperaturze T ,
- w opisywanej metodzie fizykochemicznej natomiast, pomiar odnosi się do obszaru o najwyższej temperaturze oraz do przypowierzchniowej warstwy izolacji celulozowej pozostającej w styczności z olejem.

Z powyższego względu, wartości stanu zawilgocenia izolacji celulozowej określane w/w metodami mogą się między sobą różnić, zwłaszcza w przypadku nierównomiernego rozkładu wilgoci w izolacji celulozowej. Tym niemniej, za korzystaniem z opisywanej metody przemawia fakt, iż o trwałości układu izolacyjnego transformatora decydują: temperatura i zawilgocenie izolacji papierowej w gorącym punkcie uzwojenia.

LITERATURA

- [1] IEC 60599 Standard: *Mineral oil-impregnated Electrical Equipment in Service Guide to the Interpretation of Dissolved and free gases Analysis*, Second Edition, 1999-03
- [2] *Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów*, wyd. Energopomiar–Elektryka, Gliwice, 2001.
- [3] Słowikowski J.S., Diagnostyka a zarządzanie eksploatacją transformatorów na przykładzie jednostek II grupy charakteryzujących się długim okresem pracy, *Konf. Naukowo-Techniczna „Transformatory w Eksploatacji”*, Sieniowa, 2002
- [4] Atkins P.W., *Chemia Fizyczna*, wyd. PWN, Warszawa, 2001
- [5] Zahn DuY., M., Lesieutre B.C., Mamishev A.V. and Lindgren S.R., Moisture Equilibrium in Transformer Paper – Oil Systems, *DEIS Feature Article*, 1999 – vol 15, No 1.
- [6] Fabre J. and Pichon A., Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers, *Intern. Conf. on Large High Voltage Electric System (CIGRE)*, 1960
- [7] Norris E.T., High Voltage Power Transformer Insulation, *Proc. IEE*, vol.110, No 2, February 1963
- [8] Oommen T.Y., Moisture Equilibrium Charts for Transformer Insulation Drying Practice, *IEEE Trans. On Power App. A. Systems*, vol. PAS – 103, No 10, October 1984
- [9] IEC 422 Standard, *Supervision and Maintenance Guide for Mineral Insulating Oils in Electrical Equipment*, 1989-04.
- [10] Griffin P.J., Water in Transformers – So What, *National Grid Condition, Monitoring Conference*, May 1996.
- [11] Kowalski J., Jak pisać tekst do Przeglądu, *Przegląd Elektrotechniczny*, 78 (2002), nr.5, 125-128
- [12] Johnson B., Pike G.E., Preparation of Papers for Transactions, *IEEE Trans. Magn.*, 50 (2002), n.5, 133-137

Autor: doc. dr inż. Jerzy Słowikowski Centrum Promocji Przemysłu Elektrotechnicznego