

Mateusz CYBULSKI*, Piotr PRZYBYŁEK*

ZASTOSOWANIE SORBENTÓW O WYSOKIEJ HIGROSKOPIJNOŚCI DO SUSZENIA UKŁADU IZOLACYJNEGO TRANSFORMATORA ENERGETYCZNEGO

W artykule opisano problematykę zawilgocenia układu izolacyjnego transformatora energetycznego. Przedstawiono przyczyny i skutki obecności wody w materiałach izolacyjnych, a także metody ich suszenia. Problemów związanych ze skutkami wysokiego zawilgocenia układu izolacyjnego oraz ryzyka wynikającego z potrzeby jego doraźnego (szybkiego) suszenia można uniknąć stosując nieinwazyjną metodę ciągłego suszenia izolacji stałej za pomocą sorbentów charakteryzujących się dużą higroskopijnością. W artykule porównano higroskopijność wybranych sorbentów: sit molekularnych 3 A, 5 A i 13X, tlenku glinu i silikażelu. Ponadto przedstawiono wyniki suszenia oleju mineralnego za pomocą sita 13X.

SŁOWA KLUCZOWE: transformator, układ izolacyjny, suszenie, sito molekularne.

1. WPROWADZENIE

Transformatory elektroenergetyczne są jednymi z najważniejszych elementów wchodzących w skład systemu elektroenergetycznego. Od ich niezawodnej pracy zależy stabilność funkcjonowania systemu przesyłowego oraz systemu dystrybucyjnego energii elektrycznej. Czas eksploatacji jednostek transformatorowych jest ściśle powiązany z czasem życia układu izolacyjnego. Czas ten w dużym stopniu zależy od zawilgocenia izolacji transformatora. Wysoki poziom zawilgocenia izolacji skutkuje pogorszeniem jej parametrów elektrycznych, przyspieszoną degradacją układu celuloza-ciecz elektroizolacyjna oraz ryzykiem wystąpienia zjawiska bąbelkowania (ang. *bubble effect*). Aby zapobiec wyżej wymienionym skutkom stosuje się metody pozwalające na zmniejszenie stopnia zawilgocenia układu izolacyjnego.

Aktualnie najczęściej wykorzystywanymi technikami suszenia izolacji transformatorów w miejscu ich zainstalowania są metody polegające na nagraniu izolacji celulozowej i przyłożeniu podciśnienia. Wysoką temperaturę izolacji uzyskuje się najczęściej za pomocą cieczy elektroizolacyjnej cyrkulującej w układzie kadź transformatora – agregat uzdatniający olej lub przy użyciu metody LFH (*Low Frequency Heating*) umożliwiającej nagrzewanie izolacji stałej po-

* Politechnika Poznańska

przez przepływ przez uzwojenia prądu o niskiej częstotliwości. Największymi wadami wyżej opisanych metod jest konieczność wyłączenia transformatora w celu przeprowadzenia procesu suszenia, a także częściowa deimpregnacja izolacji celulozowej wynikająca z działania podciśnienia. Problemów związanych ze skutkami wysokiego zawilgocenia układu izolacyjnego oraz ryzyka wynikającego z potrzeby jego doraźnego (szybkiego) suszenia można uniknąć stosując nieinwazyjną metodę ciągłego suszenia izolacji stałej poprzez ciecz elektroizolacyjną. Suszenie izolacji celulozowej transformatora jest możliwe dzięki dążeniu układu izolacyjnego (ciecz elektroizolacyjna – celuloza) do stanu równowagi zawilgocenia. Woda migruje na drodze celuloza – ciecz elektroizolacyjna – sorbent. Pod pojęciem sorbentów należy rozumieć materiały higroskopijne. Przykładem takich materiałów są między innymi: sita molekularne, tlenek glinu, silikażel, celuloza. Najważniejszą zaletą suszenia układu izolacyjnego metodą pośrednią z zastosowaniem sorbentu jest utrzymywanie zawilgocenia układu izolacyjnego transformatora na niskim poziomie przez cały czas jego eksploatacji. Przyczynia się to do zwiększenia bezpieczeństwa jego użytkowania, a ponadto wpływa na wydłużenie czasu eksploatacji urządzenia.

W artykule porównano higroskopijność wybranych sorbentów: sit molekularnych 3A, 5A i 13X, tlenku glinu i silikażelu. Badane materiały kondycjonowane były w kontakcie z powietrzem, którego wilgotność względna wymuszona była poprzez nasycone roztwory soli. Przeprowadzone badania pozwoliły na wskazanie sorbentów, których wykorzystanie powinno zapewnić efektywny proces suszenia. Ponadto przedstawiono wyniki suszenia oleju mineralnego za pomocą sita 13X.

2. PRZYCZYNY I SKUTKI OBECNOŚCI WODY W UKŁADZIE IZOLACYJNYM

Można wyróżnić trzy podstawowe przyczyny obecności wody w układzie izolacyjnym transformatora.

W pierwszej kolejności należy wymienić wilgoć resztkową, która nie została usunięta w procesie fabrycznego suszenia. Może się ona znajdować się w maszynych elementach izolacji stałej, jednakże w trakcie eksploatacji transformatora, ze względu na dążenie układu do stanu równowagi, wilgoć szczątkowa może migrować do cieczy elektroizolacyjnej oraz za pośrednictwem cieczy elektroizolacyjnej do innych elementów izolacji stałej o mniejszej zawartości wody.

Jedną z przyczyn wzrostu zawartości wody w izolacji transformatora jest przenikanie wilgoci z atmosfery. Wilgoć atmosferyczna może przedostawać się do wnętrza kadzi w oparciu o różne mechanizmy migracji wody, której intensywność jest zależna od konstrukcji danej jednostki. Bardzo duży transfer wilgoci z atmosfery powodowany jest przez gradient pomiędzy ciśnieniem atmosferycznym a ciśnieniem wewnątrz kadzi.

rycznym oraz ciśnieniem wewnątrz kadzi transformatora i następuje poprzez nieszczelne połączenia. Mechanizm ten ma duże znaczenie w przypadku transformatorów o niedostatecznym uszczelnieniu. Ilość wody, jaka może wniknąć w ten sposób do układu izolacyjnego transformatora wypełnionego olejem wynosi od 0,6 kg/rok do 6 kg/rok. Nieszczelne połączenia mogą umożliwić przedostawanie się do wnętrza transformatora również wody w stanie ciekłym. Proces taki może nastąpić w związku z gwałtownym spadkiem ciśnienia atmosferycznego spowodowanego nagłą redukcją temperatury będącą następstwem opadu atmosferycznego. Ryzyko zajścia tego zjawiska jest szczególnie wysokie w przypadku nieodpowiednio magazynowanych transformatorów bez układu konserwatora, przechowywanych z kadzią częściowo wypełnioną olejem. Intensywność przenikania wody w ten sposób wynosi nawet do 0,2 kg/h. Również konserwator może stanowić drogę dla wnikania wody do wnętrza transformatora – szczególnie w przypadku jednostek wolnooddychających, do których tą drogą może przeniknąć do 6 kg wody/rok. Innym sposobem wnikania wilgoci do kadzi może być przepływ molekularny, jednak wpływ tego zjawiska na zawilgocenie układu izolacyjnego transformatora jest nieduży. Ostatnim mechanizmem przenikania wilgoci atmosferycznej jest bezpośrednia ekspozycja układu izolacyjnego na wilgotne powietrze podczas nieprawidłowo przeprowadzanych instalacji i remontów [1].

Drugą przyczyną wzrostu zawartości wody w układzie izolacyjnym transformatora jest starzenie materiałów izolacyjnych, związane głównie z procesami utleniania celulozy. Jednym z produktów ubocznych tego procesu jest woda.

Zawilgocenie układu izolacyjnego transformatora skutkuje pogorszeniem jego parametrów eksploatacyjnych oraz niesie ze sobą szereg zagrożeń, co może przyczynić się do jego awarii.

Wraz ze wzrostem względnego nasycenia cieczy elektroizolacyjnej wodą, następuje spadek napięcia przebicia oraz rezystywności cieczy, wzrasta natomiast wartość współczynnika $\tan\delta$ oraz aktywność wyładowań niezupełnych.

Z kolei wraz ze wzrostem zawilgocenia izolacji celulozowej znacząco wzrasta ryzyko wystąpienia zjawiska bąbelkowania w związku z obniżeniem temperatury jego inicjacji [2]. Bardzo istotnym następstwem zawilgocenia izolacji celulozowej jest również degradacja struktury materiału celulozowego, której miarą jest stopień polimeryzacji (DP – *Degree of Polymerization*). Stopień polimeryzacji nowego materiału celulozowego wynosi 1100 – 1250 i spada w miarę postępowania procesów starzeniowych. Eksploatacja transformatorów z izolacją celulozową o DP < 200 jest ryzykowna, szczególnie w przypadku przepływu prądu zwarciovego, którego skutkiem może być deformacja uzwojeń, zerwanie papieru nawojowego i zwarcie międzyzwojowe. Taki scenariusz awarii może mieć miejsce szczególnie w przypadku eksploatacji układu izolacyjnego z celulozą o bardzo małym stopniu polimeryzacji, która charakteryzuje się mierną wytrzymałością mechaniczną [3].

Woda rozpuszczona w cieczy elektroizolacyjnej stanowi zaledwie niewielką część masy wody znajdującej się w układzie izolacyjnym papier – olej. Nawet do 99% masy wody znajduje się w izolacji stałej transformatora. Zawartość wody w izolacji stałej i ciekłej jest ze sobą ściśle powiązana i w stanie równowagi termodynamicznej występuje pomiędzy nimi zależność opisana krzywymi równowagi zawilgocenia [4]. W przypadku wzrostu temperatury woda migruje z celulozy do cieczy elektroizolacyjnej, natomiast w przypadku spadku temperatury migracja ma kierunek odwrotny. Kierunek migracji należy wiązać z faktem, że wraz ze wzrostem temperatury rośnie rozpuszczalność wody w cieczy i maleje higroskopijność celulozy. Ma to bardzo duże znaczenie w kontekście metod suszenia izolacji celulozowej.

3. METODY SUSZENIA UKŁADU IZOLACYJNEGO

Obecnie na rynku stosowanych jest kilka metod suszenia izolacji stałej transformatora w miejscu jego zainstalowania. W metodach tych stosuje się suszenie próżniowe lub suszenie poprzez ciecz elektroizolacyjną. Obie grupy metod mają zarówno pewne zalety jak i wady.

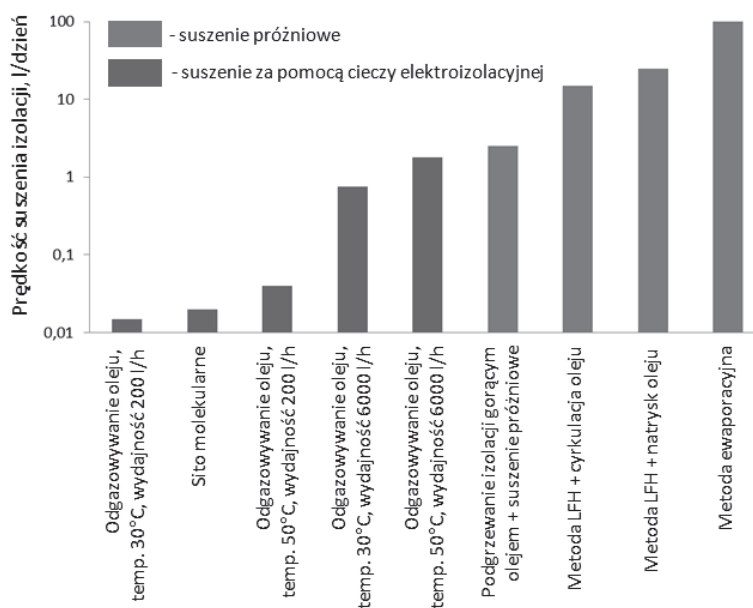
Suszenie próżniowe wymaga wypompowania cieczy elektroizolacyjnej z kadzi transformatora oraz wytworzenia w niej podciśnienia. Metoda ta oparta jest na zjawisku dyfuzji wody z zawilgoconej izolacji do otoczenia. Jej skuteczność jest zależna od wytworzonego podciśnienia. W celu poprawienia wydajności suszenia próżniowego stosuje się podgrzewanie izolacji [5]. Do najczęściej stosowanych technik podnoszenia temperatury izolacji stałej można zaliczyć podgrzewania za pomocą:

- cyrkulującej, gorącej cieczy elektroizolacyjnej,
- gorącego powietrza,
- natrysku gorącym olejem,
- przypiływu przez uzwojenia prądu o niskiej częstotliwości (metoda LFH),
- specjalnego solwentu (suszenie ewaporacyjne).

Suszenie układu izolacyjnego poprzez ciecz elektroizolacyjną polega na wykorzystaniu zjawiska migracji wody z materiału celulozowego o większej wilgotności względnej do cieczy elektroizolacyjnej o mniejszej wilgotności względnej. Migracja wody jest spowodowana dążeniem układu do stanu równowagi zawilgocenia. Suszenie tą metodą jest mało efektywne w przypadku oleju mineralnego. Efektywność ta jest znacznie większa w przypadku zastosowania estru syntetycznego, co należy wiązać ze znacznie większym granicznym nasyceniem (S) estru wodą ($S=3527$ ppm dla $T=70^{\circ}\text{C}$) w stosunku do oleju mineralnego ($S=308$ ppm dla $T=70^{\circ}\text{C}$) [6]. W trakcie suszenia celulozy należy zapewnić niską zawartość wody w cieczy elektroizolacyjnej. Uzyskuje się to poprzez ciągłe osuszanie cieczy elektroizolacyjnej za pomocą wydajnego agre-

gatu lub poprzez zastosowanie sorbentu charakteryzującego się dużą higroskopijnością.

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie prędkości suszenia izolacji stałej transformatora 400 MVA za pomocą różnych metod.



Rys. 1. Szybkość suszenia izolacji stałej transformatora (400 MVA, masa izolacji celulozowej 14 ton) z poziomu zawilgocenia 3% do 1,5% (opracowano w oparciu o [7])

Z przedstawionego na rysunku 1 porównania wynika, że największą wydajnością suszenia charakteryzuje się metoda próżniowa wspomagana różnymi technikami podgrzewania celulozy. Największą wadą tej metody jest potrzeba wyłączenia transformatora z ruchu na czas suszenia. Ograniczeniem w zastosowaniu tej metody jest konieczność wytworzenia próżni w kadzi. W przypadku niektórych jednostek uzyskanie wymaganego podciśnienia jest niemożliwe z uwagi na wytrzymałość mechaniczną kadzi lub szczelność konstrukcji. Ponadto w wyniku zastosowania próżni dochodzi do deimpregnacji celulozy, co może znacząco pogorszyć jej parametry elektryczne.

Metoda suszenia izolacji celulozowej poprzez ciecz elektroizolacyjną jest znacznie mniej wydajna od wyżej opisanej metody próżniowej, niemniej jednak jest znacznie mniej inwazyjna dla układu izolacyjnego, a przez to i bardziej bezpieczna. Wydajny agregat do osuszania cieczy elektroizolacyjnej jest stosowany przy doraźnym suszeniu izolacji. Suszenie cieczy elektroizolacyjnej za pomocą sorbentu nie jest tak wydajne jak suszenie agregatem o dużej mocy, ale może być stosowane do utrzymywania niskiego poziomu zawilgocenia izolacji stałej

transformatora przez cały czas jego eksploatacji. Dzięki temu możliwe jest: wydłużenie żywotności izolacji, poprawa bezpieczeństwa użytkownika transformatora oraz poprawa parametrów jego pracy.

Wyniki prac badawczych związanych z możliwością wykorzystania sorbentów do suszenia układu izolacyjnego transformatora zostały opisane w [8]. Praca ta nie porusza jednak wszystkich istotnych kwestii związanych z wykorzystaniem sorbentów do suszenia izolacji. Na rynku dostępne są komercyjne systemy suszenia izolacji za pomocą higroskopijnych sorbentów, takie jak SITRAM [9] czy TRANSEC [10]. Systemy te nie cieszą się zainteresowaniem przemysłu elektroenergetycznego w Polsce.

Aby zapewnić dużą skuteczność suszenia z wykorzystaniem sorbentów niezbędne są prace badawcze mające na celu m.in. wytypowanie materiałów, które charakteryzują się wysoką higroskopijnością. Konieczne są również badania nad innymi właściwościami tych materiałów, które są kluczowe dla bezpieczeństwa prowadzonego za pomocą tej metody procesu suszenia. Przykładem takiej właściwości jest wytrzymałość mechaniczna sorbentów.

5. BADANIA HIGROSKOPIJNOŚCI WYBRANYCH SORBENTÓW W ASPEKTCIE ICH WYKORZYSTANIA DO SUSZENIA OLEJU MINERALNEGO

Celem przeprowadzonych badań było:

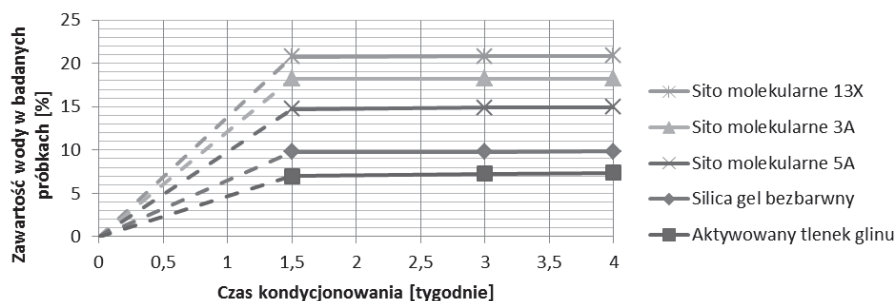
- porównanie higroskopijności wybranych sorbentów,
- wyznaczenie izotermy sorpcji wody dla sorbentu charakteryzującego się najwyższą higroskopijnością,
- sprawdzenie możliwości wykorzystania wybranego sorbentu do suszenia oleju mineralnego.

5.1. Porównanie higroskopijności wybranych sorbentów

Celem badań było porównanie procentowej zawartości wody w sorbentach kondycjonowanych w ściśle określonych warunkach i wytypowanie materiału charakteryzującego się najwyższą higroskopijnością. Do badań wybrano kilka sorbentów, które według literatury wykazują wysoką higroskopijność i mogłyby zostać wykorzystane jako materiał do suszenia cieczy elektroizolacyjnych, a w sposób pośredni również do suszenia izolacji celulozowej transformatora. Wybranymi materiałami były: sita molekularne 3A, 5A i 13X, tlenek glinu oraz silikażel. Przed rozpoczęciem badań materiały te poddano procesowi suszenia na płycie grzejnej w temperaturze 160°C (silikażel), 250°C (sito 3A), 300°C (sita 5A i 13X) oraz 410°C (tlenek glinu). Wyszuszone sorbenty umieszczono w naczyniach wagowych, a następnie wyznaczono ich suchą masę. Następnie sorben-

ty zamknięto w szczelnym naczyniu, w którym umieszczono również roztwór soli oraz rejestrator temperatury (T) i wilgotności powietrza (RH). Tak przygotowane próbki umieszczono w cieplarni laboratoryjnej. Układ pomiarowy umożliwiał kondycjonowanie sorbentów w ściśle określonych warunkach klimatycznych ($RH=15,57\%$, $T=35^{\circ}\text{C}$). Utrzymywanie RH powietrza, na ściśle określonym poziomie, było możliwe dzięki zastosowaniu nasyconego roztworu jodku litu, który w temperaturze 35°C pozwala na uzyskanie, nad jego lustrem, wilgotności względnej powietrza równej właśnie $15,57\pm 0,08\%$ [11]. Stała wartość temperatury powietrza (35°C) była utrzymywana za pomocą cieplarki laboratoryjnej, w której umieszczono próbki. Znajdujący się w naczyniu rejestrator wilgotności i temperatury posłużył do oceny stabilności warunków kondycjonowania sorbentów.

Zawartość wody w badanych sorbentach była wyznaczana metodą grawimetryczną, tj. poprzez porównanie masy kondycjonowanych próbek z masą początkową sorbentów suchych – przed rozpoczęciem ich zawilgacania. Pomiary masy sorbentów wykonywane były w odstępach około jednego tygodnia, aż do ustabilizowania się wyników, tj. do momentu kiedy różnica pomiędzy dwoma kolejnymi pomiarami zawilgocenia wszystkich kondycjonowanych materiałów była mniejsza od 0,2 punktu procentowego. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Zawartość wody w badanych próbkach w funkcji czasu kondycjonowania w powietrzu: $RH = 15,57\%$, $T = 35^{\circ}\text{C}$; linią przerywaną zaznaczono obszar, w którym przebieg charakterystyk zawilgacania jest nieznany

Przeprowadzone doświadczenie pozwoliło na wytypowanie sorbentu charakteryzującego się, dla przyjętych warunków eksperymentu, najwyższą higroskopijnością. Spośród analizowanych materiałów, największą zdolność do pochłaniania wody wykazało sito molekularne 13X, w którym końcowa zawartość wody wynosiła 20,85%. Z tego względu materiał ten został wybrany do dalszych badań.

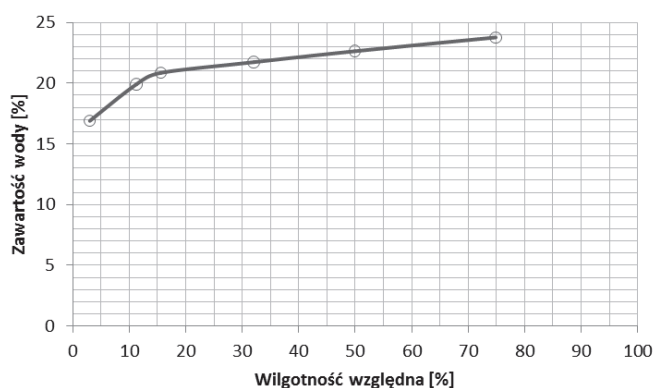
5.2. Wyznaczenie izotermy sorpcji wody dla sita molekularnego 13X

Kolejnym etapem eksperymentu było wyznaczenie izotermy sorpcji wody dla sita molekularnego 13X. Wyznaczono izotermę sorpcji dla temperatury 35°C, z tego względu, że jest to przewidywana temperatura procesu suszenia oleju za pomocą sorbentu, odpowiadająca warunkom panującym w dolnej części kadzi transformatora. Do wyznaczenia kolejnych punktów izotermy sorpcji wody wykorzystano nasycone roztwory różnych soli. W tabeli 1 zestawione zostały wykorzystane w badaniach sole wraz z odpowiadającymi im wartościami wilgotności względnej powietrza nad lustrem roztworu powstałym po ich rozpuszczeniu w wodzie.

Tabela 1. Nasycone roztwory soli oraz odpowiadające im wilgotności względne powietrza, dla T = 35°C [11].

Nazwa soli	Fluorek cezu	Chlorek litu	Jodek litu	Chlorek magnezu	Azotan magnezu	Chlorek sodu
RH, %	2,69±0,63	11,25±0,22	15,57±0,08	32,05±0,13	49,91±0,29	74,87±0,12

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu wykreślona została izoterma sorpcji wody przedstawiona na rysunku 3.



Rys. 3. Izoterma sorpcji wody dla sita molekularnego 13X w powietrzu; T=35°C

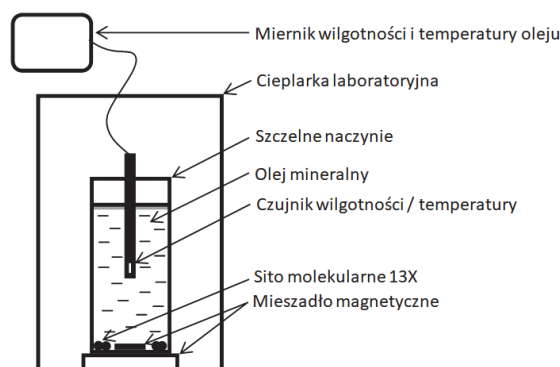
Zgodnie z [12] chłonność wody przez sito 13X można opisać za pomocą izotermy typu I – Langmuira. Cechą charakterystyczną modelu adsorpcji Langmuira jest zmniejszanie się dostępnej powierzchni sorpcyjnej wraz ze wzrostem ilości zaadsorbowanych cząsteczek.

Mając na uwadze planowane zastosowanie sита molekularnego do osuszania oleju transformatorowego, bardzo ważna jest wysoka zdolność do adsorpcji wody już przy bardzo małych wartościach względnego nasycenia oleju wodą.

Należy zauważyć, że izoterma sorpcji wody dla sита molekularnego 13X, której sposób wykreślenia został opisany w niniejszym rozdziale, została wyznaczona w powietrzu. Niezbędne jest sprawdzenie zachowania sorbentu w cieczy, dlatego przeprowadzona została próba osuszenia przy jego użyciu oleju mineralnego. Próba taka pozwoliła na sprawdzenie, czy zdolność sита molekularnego 13X do sorpcji wody jest taka sama w przypadku powietrza jak i oleju.

5.3. Sprawdzenie możliwości wykorzystania sита molekularnego 13X do suszenia oleju mineralnego

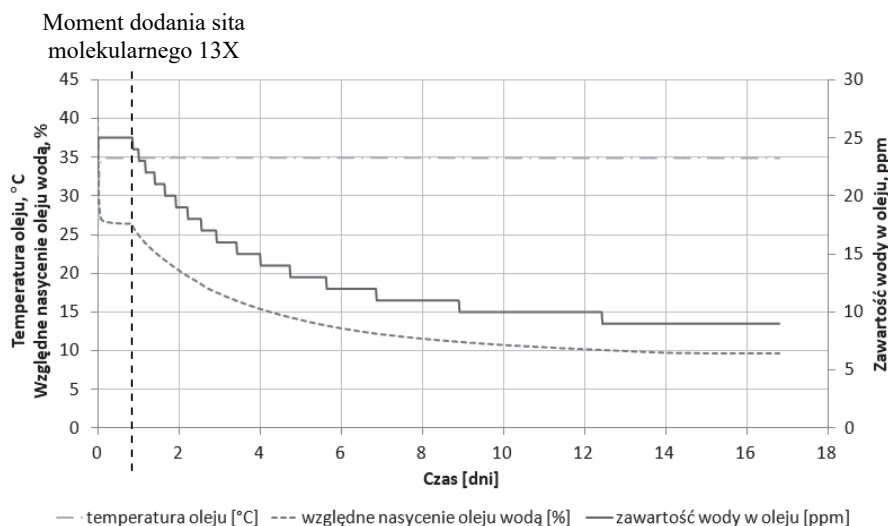
W celu sprawdzenia możliwości wykorzystania sита molekularnego 13X do suszenia oleju mineralnego zastosowano układ pomiarowy, którego schemat przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do badania zawilgocenia oleju mineralnego w trakcie jego suszenia za pomocą sита molekularnego 13X

Suszenie oleju mineralnego prowadzono w szczelnym, szklanym naczyniu o objętości jednego litra. Do naczynia wiano 850 ml oleju. Pomiar względnego nasycenia oleju wodą (RS), zawartości wody (WCL) oraz temperatury oleju (T_o) prowadzony był przy użyciu sondy wyposażonej w czujnik pojemnościowy i czujnik temperatury. Układ pomiarowy umieszczono w cieplarce laboratoryjnej, aby wyeliminować wpływ temperatury na pomiar zawilgocenia oleju. Temperaturę układu pomiarowego utrzymywano na poziomie 35°C . Po ustaleniu się stanu równowagi termodynamicznej ($RS=26,5\%$, $T_o=35^\circ\text{C}$) do oleju dodano wysuszone sito molekularne 13X o masie $0,1077$ g. Masę sита potrzebnego do całkowitego wysuszenia oleju obliczono na podstawie opracowanej izotermy

sorpcji wody (rys. 3) oraz masy wody w oleju przed suszeniem (0,0174 g). Na rysunku 5 przedstawiono wyniki zarejestrowane, za pomocą sondy pomiarowej, w trakcie badania.



Rys. 5. Parametry oleju w trakcie suszenia – względne nasycenie oleju wodą, bezwzględna zawartość wody oraz temperatura

Analizując przedstawione na rysunku 5 wyniki można zauważyć, że uzyskany efekt osuszenia odbiegał od spodziewanego rezultatu wynikającego z opracowanej dla sита molekularnego 13X izotermy sorpcji wody. Względne nasycenie oleju wodą ustabilizowało się na poziomie 9,6%, a zatem nie udało się całkowicie osuszyć oleju. Odważona ilość sorbentu wystarczyła do zaadsorbowania 0,011 g wody z oleju. Uzyskane wyniki są niewystarczające, aby wysunąć tezę, mówiącą że zdolność sита molekularnego 13X do sorpcji wody w cieczy jest inna niż zdolność do sorpcji wody w powietrzu. Rozbieżność, pomiędzy spodziewanym rezultatem suszenia a uzyskanymi efektami, może być związana z obecnością rozpuszczonych gazów w oleju. Jeżeli średnica cząsteczki gazu będzie mniejsza od średnicy porów sита molekularnego, które w przypadku sита 13X wynosi 9Å, wówczas cząsteczki te również będą mogły wnikać do przestrzeni wewnątrzkrystalicznej sита, co spowoduje spadek jego higroskopijności. Potrzebne są zatem dalsze badania związane z selektywnością sorpcji różnego rodzaju sít. Niemniej jednak, należy zwrócić uwagę, że zdolność sита 13X do osuszania oleju jest bardzo duża.

7. PODSUMOWANIE

W artykule poruszona została problematyka zawilgocenia układu izolacyjnego transformatora. Zostały opisane najważniejsze przyczyny i skutki obecności wody w układzie izolacyjnym oraz przedstawiono najczęściej stosowane metody suszenia. Szczególny nacisk położono na metodę polegającą na suszeniu izolacji przy pomocy sorbentów charakteryzujących się wysoką higroskopijnością.

W części eksperymentalnej wskazane zostały sorbenty, które wykazują wysoką higroskopijność i mogłyby zostać wykorzystane jako materiał do suszenia cieczy elektroizolacyjnych, a pośrednio również do suszenia izolacji celulozowej. Wykorzystując nasycone roztwory soli porównano higroskopijność sit molekularnych 3A, 5A i 13X, tlenku glinu oraz silikażelu. Na podstawie przeprowadzonych badań wskazano materiał o największej zdolności do sorpcji wody. Materiałem tym jest sito molekularne 13X.

W kolejnych etapach badań wyznaczona została izoterma sorpcji wody dla sita 13X oraz przeprowadzona została próba wykorzystania tego materiału do suszenia oleju mineralnego. Uzyskany efekt osuszenia oleju odbiegał od spodziewanego rezultatu wynikającego z opracowanej dla sita molekularnego 13X izotermy sorpcji wody w powietrzu. Może być to związane ze spadkiem higroskopijności tego materiału spowodowanym wnikaniem gazów rozpuszczonych w oleju do komór sorpcyjnych sita. Zjawisko to można zniwelować poprzez dobór sita molekularnego o wielkości porów mniejszej od średnicy cząsteczek gazów rozpuszczonych w oleju. Wymóg selektywnej sorpcji spełnia sito o wielkości porów 3Å.

Przeprowadzone pomiary potwierdziły duży potencjał sit molekularnych do zastosowania ich w procesach osuszania układów izolacyjnych transformatorów energetycznych. Jednocześnie należy zauważyć, że konieczne jest prowadzenie dalszych badań, które dostarczą szerszej wiedzy na temat właściwości sit molekularnych w kontekście efektywności suszenia układu izolacyjnego oraz bezpieczeństwa eksploatacyjnego tak suszonych jednostek.

LITERATURA

- [1] Broszura Nr 349 CIGRE, Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems, June 2008.
- [2] Dombek G., Nadolny Z., Przybyłek P., Wpływ zawilgocenia cieczy elektroizolacyjnej na sprawność układu chłodzenia transformatora, Poznan University of Technology Academic Journals, No 85, pp. 313-322, 2016.
- [3] Broszura Nr 323 CIGRE, Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers, October 2007.
- [4] Oommen T. V., Moisture Equilibrium in Paper-Oil Insulation Systems, Electrical/ Electronics Insulation Conference, Chicago, pp. 162-166, 1983.

- [5] Walczak K., Metody suszenia izolacji stałej transformatora energetycznego w miejscu zainstalowania, Międzynarodowa Konferencja Transformator '13, Gdańsk, 2013 r.
- [6] Przybyłek P., Rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym oraz mieszaninie estru z olejem mineralnym w aspekcie suszenia izolacji celulozowej, Przegląd Elektrotechniczny, R. 92 Nr 10/2016, ISSN 0033-2097.
- [7] Koestinger P., Aronsen E., Boss P., Rindlisbacher G., Practical experience with the drying of power transformers in the field, applying the LFH technology, CIGRE, A2-205, Session 2004.
- [8] Fofana I., Wasserberg V., Borsi H., Gockenbach E., Farzaneh M., Drying of Transformer Insulation using zeolite, IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume: 20, Issue: 1, pp. 20-30, 2004.
- [9] SIEMENS SITRAM[®] DRY Technical Brochure, SIEMENS 2010.
- [10] Shimwell J. B., Moisture Management in Power Transformers, Vaisala News 185/2011.
- [11] Greenspan L., Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions, Journal of Research of the National Bureau of Standards – A, Physics and Chemistry, Vol. 81A, No. 1, 1977.
- [12] Christmann K., Thermodynamics and Kinetics of Adsorption, IMPRS-Lecture Series 2012: Experimental and Theoretical Methods in Surface Science.

THE APPLICATION OF DESICCANTS FOR DRYING OF POWER TRANSFORMER INSULATION

The article describes the problems of moisture in the insulation system of the power transformer. The causes and effects of moisture presence in insulating materials are characterized. The methods of drying transformer insulation are also presented. The problems related to the effects of high moisture in the insulation system and the risk resulting from the need for its ad hoc (quick) drying can be avoided by using a non-invasive method of continuous drying of the solid insulation with high hygroscopic sorbents. The article compared the hygroscopicity of selected sorbents: molecular sieves 3A, 5A and 13X, alumina and silica gel. Moreover, the results of drying mineral oil by means of 13X molecular sieve are presented.

(Received: 31.01.2018, revised: 10.03.2018)