

doi:10.15199/48.2022.10.22

Zastosowanie sita molekularnego 3A do poprawy stanu układu izolacyjnego transformatora energetycznego

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z wykorzystaniem sita molekularnego 3A do suszenia układu izolacyjnego transformatora. Zastosowanie sita pozwoliło nie tylko na obniżenie zawartości wody w oleju mineralnym, ale również na poprawę innych jego właściwości istotnych z punktu widzenia eksploatacji transformatora. Ponadto wykazano efektywność suszenia izolacji celulozowej zaimpregnowanej olejem mineralnym przy użyciu sita molekularnego.

Abstract. The article presents selected issues related to the use of a 3A molecular sieve for drying the transformer insulation system. The use of the sieve allowed not only to reduce the water content in mineral oil, but also to improve its other properties important for the operation of the transformer. Moreover, the drying efficiency of cellulose insulation impregnated with mineral oil with the use of a molecular sieve was demonstrated. (**Application of the 3A molecular sieve to improve the condition of the power transformer's insulation system**).

Słowa kluczowe: transformator, układ izolacyjny, suszenie, sito molekularne.

Keywords: transformer, insulation system, drying, molecular sieve.

Wprowadzenie

Transformatory energetyczne są urządzeniami, które pełnią kluczową rolę w funkcjonowaniu systemu przesyłowego oraz dystrybucyjnego energii elektrycznej. Od ich stanu technicznego zależy bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej do odbiorców końcowych. Elementem transformatora szczególnie narażonym na wystąpienie awarii jest jego układ izolacyjny. Układ izolacyjny typowego transformatora energetycznego zbudowany jest z izolacji stałej oraz cieczy elektroizolacyjnej. Podczas eksploatacji transformatora dochodzi do stopniowego pogarszania się stanu jego układu izolacyjnego. Główną przyczyną degradacji układu izolacyjnego jest jego zawilgacanie. Podstawowymi przyczynami obecności wody w układzie izolacyjnym są:

- niecałkowite wysuszenie masywnych elementów izolacji stałej podczas produkcji transformatora,
- przenikanie wilgoci z atmosfery,
- utlenianie materiałów celulozowych oraz oleju [1].

Woda jest jednocześnie produktem oraz katalizatorem w procesie degradacji materiałów elektroizolacyjnych. Jej obecność powoduje hydrolizę celulozy. Skutkuje to jej depolimeryzacją oraz zmniejszeniem wytrzymałości mechanicznej elementów konstrukcyjnych wykonanych na bazie celulozy. Niesie to ze sobą ryzyko odkształcenia osłabionych elementów transformatora pod wpływem sił działających w czasie zwarcia [2]. Zawilgocenie materiałów elektroizolacyjnych skutkuje pogorszeniem właściwości dielektrycznych układu izolacyjnego. Wraz ze wzrostem względnego nasycenia cieczy elektroizolacyjnej wodą, spada wartość napięcia przebicia [3]. Ponadto, wysoki poziom zawilgocenia izolacji celulozowej powoduje wzrost ryzyka wystąpienia zjawiska bąbelkowania (*bubble effect*), które może doprowadzić do nagłej awarii transformatora [4]. Obserwowane jest również obniżenie napięcia zapłonu oraz wzrost aktywności wyładowań niepełnych [5].

Występowanie negatywnych skutków i zagrożeń związanych z obecnością wody w układzie izolacyjnym wymusza stosowanie środków zaradczych, pozwalających na poprawę jego stanu, a tym samym na wydłużenie czasu bezpiecznej eksploatacji transformatora. Metody suszenia układu izolacyjnego transformatora w miejscu jego zainstalowania można podzielić na dwie grupy.

Pierwsza grupa metod oparta jest na suszeniu izolacji stałej przy użyciu próżni. Po wypompowaniu cieczy

elektroizolacyjnej z kadzi transformatora, przykładane jest podciśnienie, które powoduje dyfuzję wody z izolacji celulozowej do otoczenia. Głównym czynnikiem wpływającym na efektywność tej metody jest wartość wytworzonego podciśnienia. W celu zwiększenia szybkości usuwania wody z celulozy, stosuje się podgrzewanie izolacji za pomocą różnych metod [6]. Podgrzewanie układu izolacyjnego podczas jego suszenia metodą próżniową, najczęściej przeprowadza się przy użyciu:

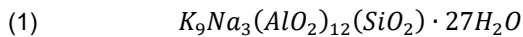
- gorącej cieczy elektroizolacyjnej,
- gorącego powietrza,
- natrysku gorącym olejem,
- przepływu przez uzwojenia prądu o niskiej częstotliwości (metoda LFH),
- specjalnego solwentu (suszenie ewaporacyjne).

Zaletą metod suszenia izolacji stałej przy użyciu próżni jest ich wysoka skuteczność. Metody te posiadają jednak również wady oraz ograniczenia. Działanie podciśnienia stwarza ryzyko deimpregnacji celulozy. Ponadto zastosowanie odpowiedniego poziomu podciśnienia, umożliwiającego skuteczne usunięcie wody z izolacji celulozowej, może być niemożliwe w przypadku transformatorów o niewystarczającej szczelności lub wytrzymałości kadzi. W wielu przypadkach wytrzymałość mechaniczna kadzi na ściskanie nie przekracza 0,5 bar. Jest to podciśnienie, które nie zapewnia efektywnego suszenia.

Druga grupa metod oparta jest na dążeniu układu celuloza – ciecz elektroizolacyjna do stanu równowagi zawilgocenia. Poprzez osuszanie cieczy, możliwe jest pośrednie osuszanie izolacji stałej transformatora. Dzieje się tak w wyniku migracji wody z izolacji stałej o dużej wilgotności względnej do cieczy elektroizolacyjnej o niższym względnym nasyceniu wodą. Do osuszania cieczy elektroizolacyjnej wykorzystywane są agregaty uzdatniające lub kolumny sorpcyjne wypełnione higroskopijnym sorbentem podłączone do kadzi transformatora. Suszenie izolacji stałej transformatora poprzez osuszanie cieczy elektroizolacyjnej stanowi alternatywę dla metod opartych na suszeniu izolacji stałej przy użyciu próżni. Zaletą tej grupy metod jest ich niewielka inwazyjność. Przekłada się to na duże bezpieczeństwo procesu suszenia. Zaletą jest również możliwość realizowania procesu suszenia podczas pracy transformatora.

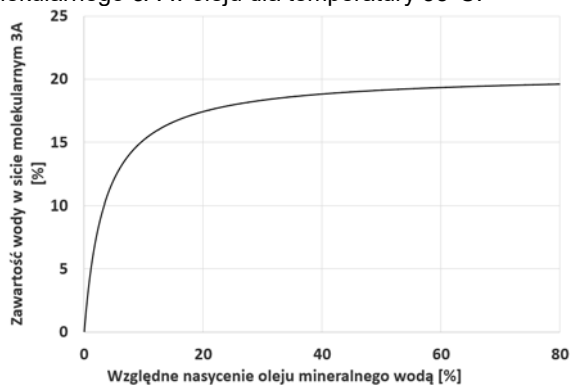
Zastosowanie sita molekularnego do suszenia układu izolacyjnego

Sorbentem, który może być wykorzystywany do osuszania cieczy elektroizolacyjnej jest sito molekularne 3A. Sito molekularne 3A należy do krystalicznych glinokrzemianów nazywanych zeolitami. Komórka elementarna sita molekularnego 3A opisana jest wzorem (1).



Cechą charakterystyczną sita molekularnego jest obecność bardzo rozbudowanej wewnętrznej krystalicznej struktury sorpcyjnej, do której dostęp mają wyłącznie cząsteczki o średnicy mniejszej od średnicy krytycznej charakterystycznej dla danego sita molekularnego. W przypadku sita molekularnego 3A średnica okien prowadzących do wewnętrznej struktury materiału wynosi 3 Å [7,8]. Cząsteczkami znajdującymi się w cieczy elektroizolacyjnej, które potencjalnie mogą zostać zaadsorbowane przez sito molekularne 3A są jedynie woda i wodór, których średnica cząsteczek wynosi odpowiednio 2,64 Å i 2,89 Å [9].

Sito molekularne 3A wykazuje bardzo dużą zdolność do sorpcji wody już przy niewielkich wartościach względnego nasycenia oleju mineralnego wodą. Na rysunku 1 przedstawiona została izoterma sorpcji wody sita molekularnego 3A w oleju dla temperatury 35°C.



Rys.1. Izoterma sorpcji wody sita molekularnego 3A w oleju mineralnym dla temperatury równej 35°C; na podstawie [10]

Przy niewielkich wartościach względnej zawartości wody w oleju następuje bardzo duży wzrost zdolności sita molekularnego 3A do sorpcji wody. Adsorpcja rośnie do momentu zapelnienia wszystkich centrów aktywnych, następnie stabilizuje się. Jest to cecha, która determinuje możliwość wykorzystania sita molekularnego 3A do suszenia układu izolacyjnego transformatora energetycznego.

Przeprowadzone dotychczas eksperymenty potwierdzają wysoką skuteczność osuszania oleju mineralnego za pomocą sita molekularnego 3A [10,11]. Badania opisane w artykule [12] wykazały również, że sito molekularne 3A adsorbując wodę w sposób selektywny, nie adsorbując jednocześnie cząsteczek wodoru znajdujących się w oleju. Zastosowanie tej metody suszenia pozostaje bez wpływu na możliwość diagnostyki transformatora za pomocą analizy gazów rozpuszczonych w oleju (metoda DGA – *Dissolved Gas Analysis*).

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań, których celem była ocena wpływu suszenia oleju mineralnego, nie tylko na jego zawilgocenie, ale również na inne właściwości istotne z punktu widzenia eksploatacji transformatora. Ponadto autorzy pracy sprawdzili efektywność suszenia izolacji celulozowej impregnowanej

olejem mineralnym. W tym celu przeprowadzone zostały badania modelowe.

Wpływ sita molekularnego na właściwości oleju mineralnego

W celu przeprowadzenia oceny wpływu suszenia cieczy elektroizolacyjnej na jej właściwości, przygotowano dwie próbki tego samego eksploatowanego oleju mineralnego. Jedna z próbek poddana została procesowi suszenia przy użyciu sita molekularnego 3A przez 30 dni. Następnie zbadano wybrane właściwości oleju przed i po jego suszeniu. Wykonano pomiary:

- zawartości wody za pomocą metody miareczkowania kulometrycznego Karla Fischera (KFT) [13],
- napięcia przebicia,
- liczby kwasowej,
- napięcia międzyfazowego,
- rezystywności,
- współczynnika strat dielektrycznych,

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie otrzymanych wyników pomiarów.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań właściwości oleju mineralnego przed i po jego suszeniu sitem molekularnym 3A

Próbka oleju mineralnego	przed suszeniem	po suszeniu
Zawartość wody, ppm	18,9	6,7
Napięcie przebicia, kV	45	66
Liczba kwasowa, mgKOH/g	0,055	0,030
Napięcie międzyfazowe, mN/m	19,74	28,66
Rezystywność, dla 50°C	65,15	153,22
Współczynnik strat dielektrycznych, dla 50°C	0,3034	0,3216

Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność zastosowania sita molekularnego 3A do suszenia oleju mineralnego. Zawartość wody w badanym oleju mineralnym została zredukowana z początkowej wartości 18,9 ppm do 6,7 ppm. Uzyskano również wzrost wartości napięcia przebicia o 47% i wzrost rezystywności oleju o 135%. Zmiany te są przede wszystkim spodziewanym skutkiem osuszenia oleju, a także wynikają z obniżenia zawartości polarnych produktów rozkładu izolacji papierowo-olejowej, o czym świadczy spadek liczby kwasowej oleju oraz wzrost napięcia międzyfazowego [14]. Suszenie oleju sitem spowodowało nieznaczny wzrost współczynnika strat dielektrycznych.

Efektywność suszenia izolacji celulozowej zaimpregnowanej olejem mineralnym

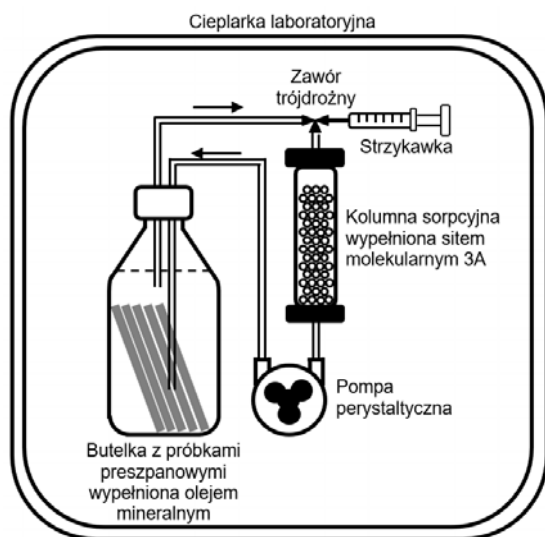
W celu zbadania efektywności suszenia izolacji celulozowej zaimpregnowanej olejem mineralnym przygotowano próbki preszpanu o grubości 0,5 mm (18 arkuszy o wymiarach 235:26:0,5 mm) oraz 6 mm (7 sztuk listew o wymiarach 280:19:6 mm). Stosunek masy cienkich preszpanów do masy grubych preszpanów wynosił 0,2. Próbki zostały wysuszone w komorze próżniowej w temperaturze 90°C±5°C przy podciśnieniu 0,2 mbar. Czas suszenia wynosił 48 godzin. Następnie materiały były kondycjonowane w komorze klimatycznej w temperaturze 40°C przy wilgotności względnej powietrza równej 16% przez czas 264 godzin. Celem tego zabiegu było przygotowanie preszpanu o zawartości wody równej około 3%, co odpowiada zawilgoceniu układowi izolacyjnemu transformatora. Następnie preszpanowe próbki zostały umieszczone w butelce o pojemności 2000 ml wypełnionej olejem mineralnym. W kolejnym kroku preszpan poddano impregnacji olejem w komorze próżniowej przy podciśnieniu równym 10 mbar przez czas 0,5 h. Ostatnim etapem

preparacji próbek było kondycjonowanie i dalsza impregnacja preszpanu w komorze klimatycznej w temperaturze 40°C przy wilgotności względnej powietrza równej 16% przez czas 240 godzin. Przed rozpoczęciem suszenia izolacji przy użyciu sita molekularnego, zmierzono zawartość wody w próbkach preszpanowych oraz w oleju mineralnym przy użyciu metody miareczkowania kulometrycznego Karla Fischera. Pomiary te przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 60814 [13]. W tabeli 2 przedstawione zostały dane dotyczące przygotowanych materiałów.

Tabela 2. Zestawienie danych dotyczących materiałów wykorzystanych w badaniu

Zawartość wody w preszpanie 0,5 mm, %	Zawartość wody w preszpanie 6 mm, %	Zawartość wody w cieczy, ppm	Masa sita 3A, g
3,36	3,04	27	58

Na rysunku 2 przedstawiony został schemat układu wykorzystanego do suszenia materiałów izolacyjnych przy użyciu sita molekularnego.



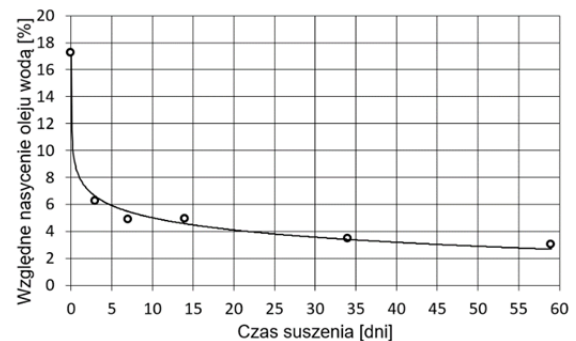
Rys.2. Schemat układu do suszenia materiałów izolacyjnych przy użyciu sita molekularnego

Układ składał się z butelki z próbkami preszpanowymi zaimpregnowanymi olejem mineralnym, pompy perystaltycznej służącej do wymuszania obiegu oleju w układzie oraz zasobnika z sitem molekularnym 3A. Dodatkowo zastosowano zawór trójdrożny umożliwiający pobieranie próbek oleju za pomocą strzykawki. Wszystkie elementy były połączone ze sobą wężykami. Ponieważ warunki suszenia miały odpowiadać warunkom panującym podczas suszenia typowego transformatora energetycznego, układ został umieszczony w ciepłarni laboratoryjnej w celu utrzymania stałej temperatury na poziomie 50°C. W trakcie przeprowadzania eksperymentu olej mineralny cyrkulował pomiędzy butelką a zasobnikiem z sitem molekularnym. W celu oceny dynamiki suszenia w przyjętych odstępach czasu pobierane były próbki materiałów celulozowych oraz oleju. Zawartość wody w próbkach była wyznaczana za pomocą metody KFT.

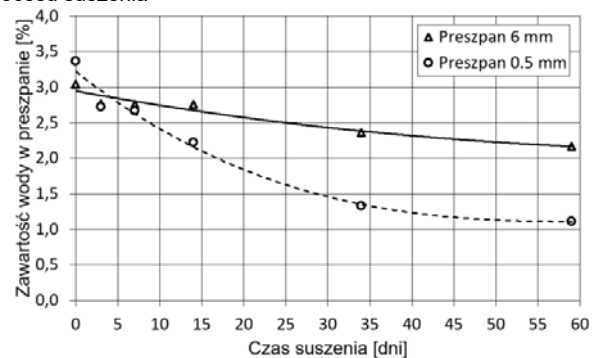
Na rysunku 3 przedstawione zostało względne nasycenie wodą oleju mineralnego podczas procesu suszenia.

Osuszenie oleju mineralnego przy użyciu sita molekularnego umożliwiło utrzymywanie niskiego zawilgocenia cieczy elektroizolacyjnej przez cały czas

trwania suszenia. Utrzymywanie tak niskiego poziomu wilgotności względnej powinno pozwolić na osuszenie izolacji celulozowej do poziomu wynoszącego około 1% zawartości wody. Wynika to z izoterm sorpcji wody dla materiałów celulozowych zamieszczonych w pracy [15]. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany zawartości wody w materiałach celulozowych w trakcie ich suszenia.



Rys.3. Względne nasycenie wodą oleju mineralnego podczas procesu suszenia



Rys.4. Zawartość wody w próbkach preszpanowych na różnych etapach procesu suszenia

W przypadku próbek preszpanu o grubości 0,5 mm spodziewana zawartość wody wynosząca ok. 1% została uzyskana po około 60 dniach trwania eksperymentu, przy czym po 30 dniach zawartość wody wynosiła około 1,5%. Dynamika suszenia jest więc największa na początku trwania procesu. Próbkę preszpanu o grubości 6 mm zostały osuszone do poziomu 2,2% zawartości wody. Znacznie mniejsza efektywność suszenia w przypadku grubych materiałów celulozowych wynika z długiego czasu migracji wody z wewnętrznych warstw materiału do warstw zewnętrznych. Proces suszenia grubych próbek preszpanowych nie został zakończony w trakcie trwania eksperymentu. Jego kontynuowanie pozwoliłoby na dalsze osuszenie próbek, aż do osiągnięcia zawartości wody na poziomie około 1%.

Podsumowanie

Celem przeprowadzonych badań było wykazanie możliwości zastosowania sita molekularnego 3A do poprawy stanu układu izolacyjnego transformatora energetycznego.

Badanie wpływu sita molekularnego na właściwości oleju mineralnego wykazało, że spadek zawartości wody w oleju oraz zmiana parametrów związanych z zawartością wody nie są jedynym efektem osuszania oleju za pomocą sita molekularnego. Zaobserwowano również spadek liczby kwasowej i wzrost napięcia międzyfazowego. Poprawa tych właściwości świadczy o usunięciu z oleju polarnych kwasów będących produktami rozkładu izolacji papierowo-olejowej.

Badanie modelowe efektywności suszenia izolacji celulozowej zaimpregnowanej olejem mineralnym wykazało, że możliwe jest skuteczne osuszanie izolacji celulozowej transformatora energetycznego poprzez osuszanie cieczy elektroizolacyjnej za pomocą sita molekularnego. Czynnikiem, który decyduje o efektywności procesu suszenia jest grubość materiałów celulozowych. Próbkę preszpanu o grubości 0,5 mm zostały osuszone w ciągu 60 dni z początkowej wartości wynoszącej 3,4% do wartości około 1,2%, a więc do poziomu zawilgocenia nowego transformatora. Próbkę preszpanu o grubości 6 mm zostały osuszone podczas trwania eksperymentu z początkowego poziomu zawilgocenia wynoszącego 3% do 2,2%. Zawartość wody w grubych próbkach preszpanowych w dalszym ciągu ulegała zmniejszeniu. Kontynuowanie eksperymentu pozwoliłoby na osuszenie grubych próbek preszpanowych do poziomu około 1%.

Uzyskane wyniki badań wykazały, że możliwe jest efektywne wysuszenie układu izolacyjnego, którego temperatura wynosi 50°C, co odpowiada temperaturze eksploatacji transformatora. Zastosowanie wyższej temperatury suszenia pozwoliłoby na zwiększenie efektywności tego procesu. Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta rozpuszczalność wody w elektroizolacyjnych oleju mineralnym, natomiast maleje higroskopijność celulozy.

Przedstawione w pracy wyniki badań wykazały, że zastosowanie sita molekularnego do suszenia układu izolacyjnego wpływa w sposób zasadniczy na poprawę stanu zarówno oleju mineralnego jak i materiałów preszpanowych.

Praca sfinansowana ze środków MEiN w ramach subwencji badawczej nr 0711/SBAD/4560, nazwa zadania: „Poprawa niezawodności pracy systemu elektroenergetycznego w zakresie przesyłu, rozdziału i użytkowania energii elektrycznej”.

Autorzy: mgr inż. Mateusz Cybulski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: mateusz.e.cybulski@doctorate.put.poznan.pl; dr hab. inż. Piotr Przybyłek, profesor uczelni, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Cigré Brochure 349, Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems, 2008
- [2] Cigré Brochure 323, Aging of Cellulose in mineral-oil insulated transformers, 2007
- [3] Atanasova-Höhlein I. et al., Experience with capacitive on-line sensors for moisture evaluation in transformer insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazin*, 35(2019), No. 2, 18-26
- [4] Przybyłek P., Mościcka-Grzesiak H., Morańda H., Innowacyjna metoda suszenia izolacji celulozowej transformatorów, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95(2019), nr 8, 61-64
- [5] Sikorski W., Walczak K., Przybyłek P., Moisture Migration in an Oil-Paper Insulation System in Relation to Online Partial Discharge Monitoring of Power Transformers, *Energies*, 9(2016), No. 12, 1082
- [6] Walczak K., Metody suszenia izolacji stałej transformatora energetycznego w miejscu zainstalowania, Międzynarodowa Konferencja Transformator '13, Gdańsk, 2013
- [7] Cybulski M., Przybyłek P., Izotermie sorpcji wody sit molekularnych 3A i 13X w aspekcie ich wykorzystania do suszenia układu izolacyjnego transformatora, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86(2018), nr 10, 37-40
- [8] Sarbak Z., Nieorganiczne materiały nanoporowate, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza: Poznań, 2010, 103-138
- [9] Sircar S., Myers A. L., Gas Separation by Zeolites, Handbook of Zeolite Science and Technology, Marcel Dekker Inc.: New York, 2003, 1063-1105
- [10] Cybulski M., Przybyłek P. Application of Molecular Sieves for Drying Transformers Insulated with Mineral Oil, Natural Ester, or Synthetic Ester, *Energies*, 14(2021), No. 6, 1719
- [11] Fofana I., Wasserberg V., Borsi H., Gockenbach E., Farzaneh M., Drying of transformer insulation using zeolite, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 20(2004), No. 1, 20-30
- [12] Cybulski M., Przybyłek P., The application of a molecular sieve for drying the insulation system of a power transformer in terms of improving its operational reliability, *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 24(2022), No. 3 – artykuł zaakceptowany do druku
- [13] PN-EN 60814:2002, Ciecze izolacyjne. Papier i preszpan nasycony olejem. Oznaczanie zawartości wody za pomocą automatycznego miareczkowania kulometrycznego Karla Fischera
- [14] Safiddine L., Hadj-Ziane Zafour A., Fofana I., Skender A., Guerbas F., Boucherit A., Transformer oil reclamation by combining several strategies enhanced by the use of four adsorbents, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 11(2017), No. 11, 2912-2920
- [15] Przybyłek P., Water saturation limit of insulating liquids and hygroscopicity of cellulose in aspect of moisture determination in oil-paper insulation, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 23(2016), No. 3, 1886-1893