

Innowacyjna metoda suszenia izolacji celulozowej transformatorów

Streszczenie. W pracy przedstawiono przyczyny i skutki obecności wody w izolacji papierowo-olejowej oraz przytoczono wyniki badań zawilgocenia transformatorów dystrybucyjnych. Omówiono podstawowe metody suszenia izolacji transformatorów w miejscu ich zainstalowania. Przeanalizowano wpływ różnych czynników na dynamikę i efektywność suszenia izolacji celulozowej za pomocą innowacyjnej metody wykorzystującej dużą rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym.

Abstract. In the article the causes and effects of moisture presence in oil-paper insulation were described, moreover the results of moisture investigations in distribution transformers were reported. The most important methods of drying transformer insulation at the place of their installation were discussed. The influence of various factors on the dynamics and efficiency of cellulose insulation drying by means of an innovative method based on high water solubility in a synthetic ester was analyzed. (**An innovative method of drying cellulose insulation of transformers**).

Słowa kluczowe: transformator, suszenie, ester syntetyczny, celuloza.

Keywords: transformer, drying, synthetic ester, cellulose.

Wstęp

Według ankiety opracowanej przez CIGRE [1] w 2010 roku, jest 12 krajów na świecie, które mają pewne doświadczenie w użyciu w transformatorach cieczy alternatywnych. Pod pojęciem cieczy alternatywnych rozumie się ester naturalny, ester syntetyczny oraz olej silikonowy. Estry syntetyczne w opinii wielu mają najwięcej zalet, głównie bezpieczeństwo pożarowe, względy ekologiczne i poprawa warunków pracy układu izolacyjnego [1, 2].

Estry syntetyczne są stosowane do napełniania nowych transformatorów, głównie w Niemczech, Japonii, Austrii, Czechach, Chorwacji i na Węgrzech.

Lansowana też jest ostatnio operacja wymiany oleju mineralnego na ester syntetyczny w transformatorach eksploatowanych 30–40 lat. Zabieg taki powoduje osuszenie izolacji celulozowej, znacznie przedłuża życie transformatora, ale głównie zapewnia bezpieczeństwo pożarowe, co w przypadku starej jednostki jest bardzo istotne. W tym zakresie największe doświadczenie mają Niemcy. Wymienili olej mineralny na ester syntetyczny w setkach transformatorów rozdzielczych SN/nN [1].

Autorzy pracy widzą możliwość wykorzystania estru syntetycznego w innowacyjnej technologii, a mianowicie w procedurze suszenia izolacji celulozowej transformatorów rozdzielczych.

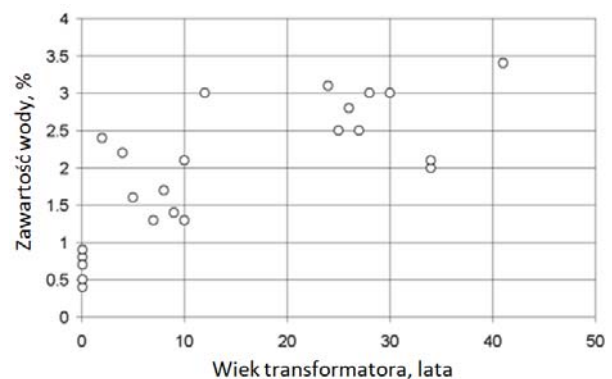
Po licznych badaniach laboratoryjnych modelowych oraz seminariach z udziałem przedstawicieli energetyki oraz zakładów remontowych autorzy niniejszego artykułu opracowali wniosek projektu, który był odpowiedzią na konkurs ogłoszony przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020. Projekt został zakwalifikowany do finansowania.

Zawilgocenie izolacji celulozowej

Zawilgocenie izolacji celulozowej transformatorów jest bardzo ważnym problemem ze względów eksploatacyjnych. Zwiększa ono bardzo podatność układu na wysokoenergetyczne wyładowania niezupełne, przyspiesza procesy degradacji celulozy i zwiększa prawdopodobieństwo przebicia cieplnego izolacji. Bardzo groźnym skutkiem zawilgocenia jest „bubble effect”. Po przekroczeniu krytycznej temperatury, zależnej od poziomu zawilgocenia, następuje gwałtowne uwalnianie wody z celulozy, co prowadzi do wzrostu ciśnienia w kadzi [3], eksplozji i pożarów transformatorów.

W trakcie eksploatacji transformatora woda może przenikać do kadzi, ale główną przyczyną zawilgocenia izolacji jest proces degradacji celulozy, któremu towarzyszy wydzielanie wody. Obecność wody niestety przyspiesza proces degradacji celulozy, dlatego z biegiem lat roczny przyrost zawilgocenia znacznie wzrasta. Oczywiście czynnikiem bardzo przyspieszającym rozkład celulozy jest wysoka temperatura [4, 5].

Transformatory rozdzielcze zwykle mają izolację celulozową bardziej zawilgoconą niż transformatory sieciowe, ponieważ z reguły są obciążane większą mocą w stosunku do znamionowej. Na rysunku 1 przedstawiono zawilgocenie izolacji transformatorów rozdzielczych w zależności od wieku. Badania te zrealizowano w ramach projektu międzynarodowego REDIATool [6].



Rys.1. Zawartość wody w izolacji transformatorów dystrybucyjnych (wolno oddychających – free-breathing) w zależności od czasu ich eksploatacji [7]

Metody suszenia izolacji

Izolację transformatora poddaje się suszeniu na etapie produkcji oraz w trakcie eksploatacji. Stosowane są systemy stacjonarne oraz mobilne. Różnią się one znacznie, ale wykorzystywane zasady fizyczne są takie same [8].

Stacjonarne układy suszące są używane w przypadku nowych transformatorów oraz transformatorów będących w eksploatacji, których stan wymaga remontu generalnego. Suszenie jednostki w systemie stacjonarnym zapewnia wysoki stopień wysuszenia, ale wymaga transportu transformatora do zakładu remontowego, co zwykle wiąże się z dużymi kosztami i niebezpieczeństwem uszkodzenia jednostki.

W mobilnych systemach suszenia wykorzystuje się kilka metod, które skrótowo zostaną niżej przedstawione [8-10].

Suszenie poprzez działanie cyrkulującego gorącego oleju poddawanego ciągłemu suszeniu w próżni

Jest to jedna z najstarszych metod. Metoda oparta jest na dążeniu układu do stanu równowagi zawilgocenia celulozy i oleju. Woda stale przechodzi z celulozy do oleju, a olej jest osuszany próżniowo. Niestety proces jest mało wydajny i wymaga bardzo długiego czasu, liczonego w miesiącach.

Metodę ciągłego suszenia oleju stosują niektórzy producenci w nowych transformatorach. Wówczas w trakcie eksploatacji transformatora olej jest stale suszony, co daje dobre wyniki. Obecnie, zamiast pomp próżniowych niektórzy producenci stosują materiały absorbujące wodę nazywane sitami molekularnymi [11, 12]. Absorber jest okresowo regenerowany lub wymieniony na nowy.

Suszenie z użyciem gorącego powietrza

Jest to jedna z pierwszych metod stosowanych w fabrykach transformatorów. Powietrze nagrzewane do wybranej temperatury, na przykład 105°C, jest odpowiednio ukierunkowane na układ izolacyjny. Następuje odparowywanie wody. W technice tej wykorzystywany jest tylko gradient temperatury, dlatego istnieje silna zależność efektu wysuszenia izolacji od temperatury. Proces jest mało wydajny.

Suszenie w otoczeniu wysokiej próżni w połączeniu z grzaniem uzwojeń gorącym powietrzem lub olejem

W pierwszych systemach suszących wykorzystywano tylko i wyłącznie próżnię w temperaturze otoczenia. Tempo wyprowadzania wody z izolacji zależy od poziomu zastosowanej próżni, a to wymaga odpowiednich pomp oraz szczelności kadzi transformatora. Technika okazała się mało wydajna, natomiast wzbogacając metodę wybraną techniką grzania uzwojeń można uzyskać dobre rezultaty. Izolację można podgrzewać gorącym powietrzem lub gorącym olejem, a następnie należy odpompować układ do poziomu kilku Pa. Niestety proces parowania wody jest mocno endotermiczny, co powoduje gwałtowne obniżanie temperatury uzwojeń i proces staje się coraz mniej wydajny.

Suszenie próżniowe połączone z nagrzewaniem uzwojeń przez przepływ prądu

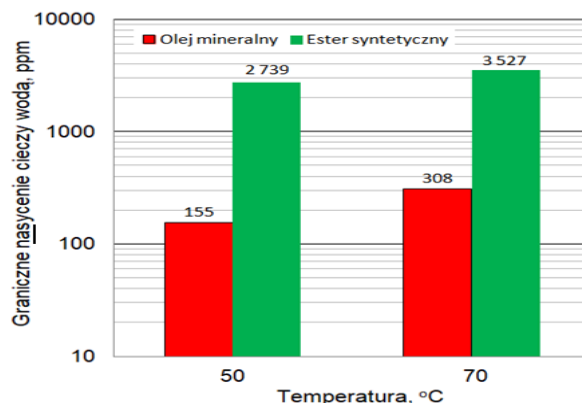
Metoda polegająca na grzaniu obu uzwojeń prądem niskiej częstotliwości (LFH – Low Frequency Heating) w warunkach próżni jest obecnie uznawana za najlepszą [9]. Zasilą się trójfazowo uzwojenie wysokiego napięcia napięciem o obniżonej częstotliwości. Uzwojenie niskiego napięcia jest zwarte. Częstotliwość napięcia obniża się do poziomu, przy którym jeszcze występuje efekt transformacji; jest to zwykle od 0,4 Hz do 2 Hz. Metoda jest bardzo efektywna, ale i droga. Usługa suszenia transformatora sieciowego w terenie kosztuje około 150000 €.

Suszenie izolacji celulozowej z wykorzystaniem estru syntetycznego

Prace prowadzone na modelach dały pozytywne wyniki, co pozwoliło sformułować tezę mówiącą, że ester syntetyczny jest idealnym medium ciekłym nadającym się do suszenia izolacji celulozowej transformatorów.

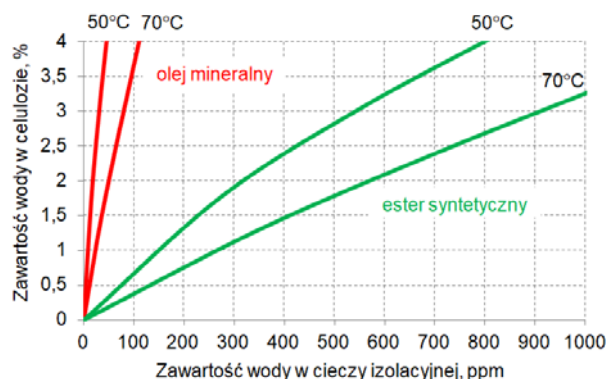
Właściwości suszące estru są efektem zjawisk fizykochemicznych zachodzących w zetknięciu estru z wodą. Jedna cząsteczka estru jest w stanie przyłączyć, na zasadzie wiązań wodorowych, aż cztery cząsteczki wody. To decyduje o ogromnej rozpuszczalności wody w estrze, co wykorzystujemy w procedurze suszenia.

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie granicznego nasycenia wodą oleju mineralnego i estru syntetycznego przy temperaturze 50 i 70°C [13]. Widać, że ester syntetyczny ma graniczne nasycenie wodą o ponad rząd wielkości większe niż olej mineralny.



Rys.2. Porównanie granicznego nasycenia wodą oleju mineralnego i estru syntetycznego dla dwóch wybranych wartości temperatury 50°C i 70°C; na podstawie danych z [13]

W ocenie zjawiska migracji wody z celulozy do cieczy izolacyjnej bardzo istotny jest stan równowagi zawilgocenia celulozy i cieczy izolacyjnej. Na rysunku 3 przedstawiono krzywe równowagi dla oleju mineralnego i estru syntetycznego dla temperatury 50 i 70°C. Pod pojęciem krzywej równowagi należy rozumieć zależność zawartości wody w wyrobie celulozowym wyrażonej w procentach od zawartości wody w cieczy wyrażonej w ppm. Przykładowo, przy temperaturze 70°C, przy zawilgoceniu celulozy równym 3% zawartość wody w oleju w stanie równowagi wynosi 80 ppm, natomiast w estrze syntetycznym aż 910 ppm.

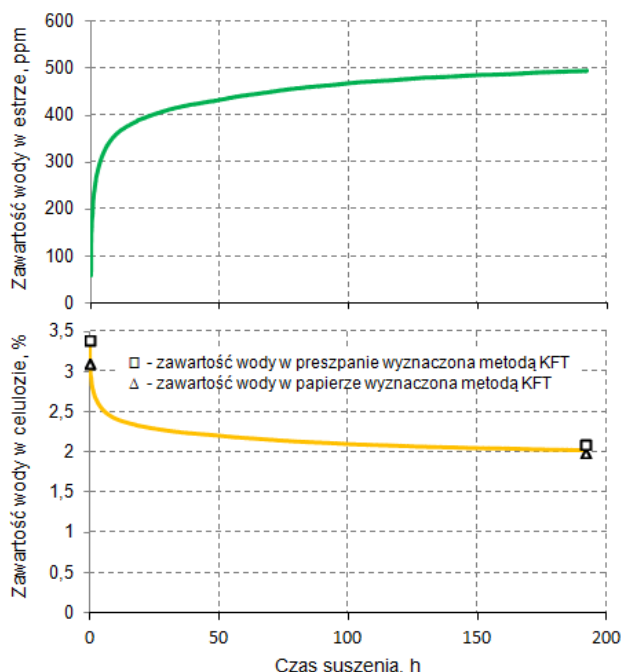


Rys.3. Porównanie krzywych równowagi zawilgocenia dla oleju mineralnego i estru syntetycznego, dla temperatury 50°C i 70°C; na podstawie danych z [13]

W procesie suszenia, po wprowadzeniu suchego estru do zawilgoconej celulozy, układ dąży do stanu równowagi. Im większa graniczna rozpuszczalność wody w estrze, tym więcej wody, na zasadzie desorpcji, przejdzie z celulozy do cieczy, a więc tym efektywniejszy jest proces suszenia. Znając masę celulozy oraz masę estru, na podstawie krzywych równowagi, możliwa jest ocena zawilgocenia celulozy po osiągnięciu stanu równowagi.

Proces suszenia izolacji celulozowej można zrealizować w dwojaki sposób, a mianowicie wprowadzając do kadzi transformatora jednokrotnie lub wielokrotnie suchy ester lub wymuszając ciągłą cyrkulację estru między kadzią a agregatem grzejącym i suszącym. W warunkach

rzeczywistych druga opcja jest korzystniejsza, natomiast we wstępnych badaniach laboratoryjnych zamodelowano wprowadzenie suchego estru. Na rysunku 4 przedstawiono proces suszenia papieru i preszpanu po zalaniu ich suchym estrem. Grubość suszonych materiałów celulozowych była równa 0,05 mm i 2 mm. Natomiast stosunek wagowy materiałów celulozowych do estru był równy 0,037 [14].



Rys.4. Zawartość wody w estrze syntetycznym oraz zawartość wody w materiałach celulozowych w zależności od czasu ich suszenia w temperaturze 70°C, na podstawie danych z [14]

Pierwotnie papier i preszpan były zaimpregnowane olejem, co odpowiada sytuacji suszenia izolacji transformatora. Temperatura wynosiła 70°C. Zawilgocenie papieru i preszpanu zmalało o około 1% z poziomu 3,2% do poziomu 2,2% w czasie około 48 godzin. Stosując ciągłe suszenie estru roboczego wymagany czas suszenia i poziom zawilgocenia izolacji znacznie się zmniejsza.

Dynamika i efektywność suszenia izolacji celulozowej

Na dynamikę suszenia izolacji celulozowej oraz ostateczny efekt ma wpływ wiele czynników. Część z czynników zależy od parametrów układu izolacyjnego transformatora, a część od parametrów systemu suszenia.

Istotne znaczenie ma stosunek masy wyrobów celulozowych do masy cieczy izolacyjnej. Im mniejszy jest ten stosunek tym lepszemu efektowi wysuszenia można się spodziewać.

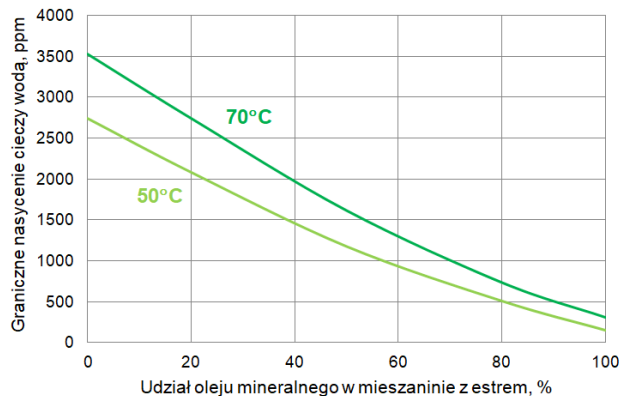
W badaniach modelowych opisanych w pracy [15] stwierdzono, że dynamika suszenia papieru i preszpanu znacznie się różni. Dlatego w szacowaniu czasu suszenia należy uwzględnić stosunek masy papieru do masy preszpanu. W starszych konstrukcjach transformatorów stosowano tuleje zwijane z preszpanu o grubości 0,5 mm. W nowszych konstrukcjach stosuje się tuleje z grubego preszpanu klejone wzdluznie. Na przykładki stosowany jest preszpan o grubości od 4 do 6 mm. Ta sytuacja zostanie zamodelowana laboratoryjnie, co będzie przydatne w ocenie dynamiki suszenia.

Proces suszenia bardzo mocno zależy od temperatury estru roboczego zapewnianej przez agregat suszący. Zwykle możliwości agregatu, to znaczy maksymalna osiągnięta temperatura, mieszczą się w klasie

ciepłoodporności celulozy. Drugim istotnym czynnikiem jest stopień wysuszenia estru roboczego na wyjściu, co zależy od klasy agregatu.

Ester syntetyczny będzie stanowił medium wielokrotnego użycia. Po każdym procesie suszenia izolacji transformatora, do estru przechodzi trochę oleju mineralnego. Po wielokrotnym użyciu estru zawartość oleju mineralnego może być znacząca. Niestety obniża to efektywność suszenia i należy przewidzieć procedurę uzdatniania estru.

Na rysunku 5 przedstawiono graniczne nasycenie wodą mieszaniny estru syntetycznego i oleju mineralnego w zależności od zawartości oleju w mieszaninie oleju z estrem. Widać, że w mieszaninie o zawartości oleju mineralnego około 20% graniczna rozpuszczalność wody przy temperaturze 70°C jest o około 22% mniejsza.



Rys.5. Graniczne nasycenie estru syntetycznego i oleju mineralnego oraz ich mieszanin w zależności od udziału procentowego oleju mineralnego w mieszaninie oleju z estrem; na podstawie danych z [14]

Spośród wielu sposobów rozdziału mieszanin (roztworów) substancji ciekłych wybrano w projekcie destylację frakcyjną z użyciem wyparki cienkowarstwowej. Jest to technologia o dużej wydajności, mająca zastosowanie przemysłowe.

Pomiar i wyznaczanie zawilgocenia izolacji celulozowej

Pomiary i wyznaczanie zawilgocenia izolacji celulozowej w różny sposób są realizowane w warunkach laboratoryjnych oraz na realnym transformatorze.

W warunkach laboratoryjnych najlepiej sprawdza się metoda Karla Fischera, która niestety wymaga pobrania próbki wyrobu celulozowego.

Bardzo wygodna metoda, nie wymagająca pobrania próbki papieru, polega na pomiarze względnego nasycenia cieczy elektroizolacyjnej wodą za pomocą czujnika pojemnościowego [16, 17]. Metoda jest szczególnie przydatna, jeśli monitorowany jest proces suszenia celulozy. Znając masę celulozy, masę estru i zawilgocenie estru można łatwo ocenić ilość wody wyprowadzanej z wyrobu celulozowego.

Ocena zawilgocenia izolacji celulozowej transformatora możliwa jest tylko przy wykorzystaniu metody pośredniej. Należy posłużyć się w tym przypadku metodą odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości FDS (*Frequency Domain Spectroscopy*). Metoda ta wymaga wzorców zawilgocenia (przenikalność elektryczna oraz współczynnik strat w zależności od częstotliwości) dla wybranych poziomów zawilgocenia celulozy oraz wybranych wartości temperatury [18]. Wzorce dla układu celuloza – olej mineralny zostały wykonane w ramach projektu międzynarodowego REDIATool [6], natomiast wzorce dla

układu celuloza – ester syntetyczny opracowano w ramach grantu finansowanego przez NCBR [19].

Niestety, w trakcie suszenia izolacji transformatora estrem, występuje sytuacja przejściowa, w której celuloza jest jeszcze przesycona olejem mineralnym, a w całej objętości kadzi jest już ester. Pojawia się pytanie, po jakim czasie mamy do czynienia z układem celuloza – ester i możliwe jest użycie odpowiednich wzorców. Temat ten jest w trakcie badań.

Mobilny system suszenia izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego

System suszenia izolacji o wyżej podanym tytule jest tematem projektu [20] zatwierdzonego przez NCBR do finansowania. System jest przewidziany jako mobilny, co stanowi jego istotny walor.

Stworzono konsorcjum w składzie: Politechnika Poznańska – lider, Centrum Zaawansowanych Technologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza oraz firma Ad Moto Rafał Zawisz.

Politechnika Poznańska będzie prowadziła badania na modelach, badania na transformatorach w hali laboratoryjnej w warunkach zbliżonych do rzeczywistych oraz badania na transformatorach na stacji transformatorowej.

Centrum Zaawansowanych Technologii przeprowadzi badania laboratoryjne rozdzielania oleju mineralnego i estru syntetycznego oraz ustali założenia projektowe do systemu uzdatniania estru roboczego przy wykorzystaniu technologii wyparki cienkwarstwowej.

Firma Ad Moto Rafał Zawisz jest konsorcjantem przemysłowym. W ramach projektu firma zaprojektuje i wykona mobilny system suszenia izolacji celulozowej oraz system uzdatniania estru roboczego według założeń przygotowanych przez Centrum Zaawansowanych Technologii. Firma Ad Moto Rafał Zawisz wprowadzi wyniki badań do własnej działalności gospodarczej.

Realizacja projektu jest przewidziana na trzy lata od 1 lipca 2018 do 30 czerwca 2021.

Artykuł pt. „Innowacyjna metoda suszenia izolacji celulozowej transformatorów” 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”. Całkowita wartość projektu 7 677 957 zł w tym dofinansowanie z NCBR 6 084 569 zł.



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego



LITERATURA

- [1] CIGRE Brochure 436, Experiences in service with new insulating liquids, 2010
- [2] Przybyłek P., Gielniak J., Concentration analysis of gases formed in mineral oil, natural ester, and synthetic ester by discharges of high energy, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 20 (2018), 435–442
- [3] Oommen T.V., Lindgren S.R., Bubble evolution from transformer overload, w materiałach IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. Exposition, 1 (2001), 137-142
- [4] CIGRE Brochure 323, Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers, 2007
- [5] Lawson W.G., Simmons M.A., Gale P.S., Thermal ageing of cellulose paper insulation, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1 (1977), EI-12
- [6] 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
- [7] Gielniak J., Graczkowski A., Moranda H., Przybyłek P., Walczak K., Nadolny Z., Mosciicka-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
- [8] Walczak K., Metody suszenia izolacji stałej transformatora energetycznego w miejscu zainstalowania, w materiałach międzynarodowej Konferencji Transformatorowej TRANSFORMATOR’13, (2013), C1-C9
- [9] 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
- [10] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A., Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, Polska, 1983
- [11] Fofana I., Wasserberg V., Borsi H., Gockenbach E., Farzaneh M., Drying of Transformer Insulation using zeolite, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 20 (2004), n. 1, 20-30
- [12] Cybulski M., Przybyłek P., Zastosowanie sorbentów o wysokiej higroskopijności do suszenia układu izolacyjnego transformatora energetycznego, *Poznan University of Technology Academic Journals*, (2018), n. 94, 29-40
- [13] 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
- [14] Przybyłek P., Rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym oraz mieszaninie estru z olejem mineralnym w aspekcie suszenia izolacji celulozowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.10/2016, 92-95
- [15] Przybyłek P., Drying transformer cellulose insulation by means of synthetic ester, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24 (2017), n.4, 2643-2648
- [16] Przybyłek P., Siodła K., Application of capacitive sensor for measuring water content in electro-insulating liquids, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 18 (2016), n. 2, 181-185
- [17] Vaisala HUMICAP sensor for measuring relative humidity, Ref. B210781EN-C ©Vaisala 2012
- [18] CIGRE Brochure 414, Dielectric response diagnoses for transformer windings, 2010
- [19] Projekt badawczy rozwojowy nr NR01-0004-10/1010 pt. „Odcisk palca izolacji celulozowej syconej syntetycznymi estrami organicznymi oparty na analizie odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości”, realizacja projektu od 1.11.2010 do 31.10.2013, projekt finansowany przez NCBR
- [20] Projekt nr POIR.04.01.02-00-0045/17 pt. „Mobilny system suszenia izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego”, realizacja projektu od 1.7.2018 do 30.6.2021, konsorcjum: Politechnika Poznańska (lider Projektu), Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu, Ad Moto; projekt dofinansowany przez NCBR

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 Moranda, 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.mosciicka-grzesiak@put.poznan.pl.