

Czujnik i sposób wyznaczania zawilgocenia w składowej stałej izolacji  
celulozowo-olejowej transformatora elektroenergetycznego

Przedmiotem wynalazku jest czujnik do wyznaczania zawilgocenia  
5 w składowej stałej izolacji celulozowo-olejowej transformatora  
elektroenergetycznego i sposób wyznaczenia zawilgocenia w składowej stałej  
izolacji celulozowo-olejowej transformatora elektroenergetycznego.

Dotychczas z artykułu T.V. Oommen, „Moisture Equilibrium In Paper – Oil  
Systems”, Proceedings of the 16th Electrical/Electronics Insulation Conference,  
10 Chicago, October 3–6, 1983, znany jest sposób oznaczenia zawartości wilgoci w  
izolacji papierowo-olejowej izolatorów przepustowych na podstawie pomiaru  
temperatury oleju oraz oznaczenia zawartości wody w próbce oleju pobranej  
z izolatora przepustowego i oznaczenia zawartości wody w papierze za pomocą  
nomogramu. W tym rozwiązaniu uzyskiwana jest niska dokładność oznaczenia  
15 zawartości wilgoci w składowej celulozowej izolacji, która wynika z długiego  
czasu ustalenia równowagi termodynamicznej pomiędzy zawartością wilgoci  
w papierze i oleju oraz z faktu zmian rozpuszczalności wody w olejach  
zestarzonych.

Znane są również sposoby oznaczania stopnia zawilgocenia składowej  
20 celulozowej izolacji izolatorów przepustowych z izolacją papierowo-olejową  
oparte na analizie procesów polaryzacyjnych, zachodzących w układzie  
szeregowo-równoległym izolacji transformatorów, składającej się z celulozy oraz  
oleju izolacyjnego. Są to metody FDS – Frequency Dielectric Spectroscopy oraz  
RVM – Return Voltage Method. Metoda FDS posługuje się analizą  
25 częstotliwościowych zmian współczynnika strat dielektrycznych  $\tan\delta$  oraz  
pojemności układu izolacyjnego z zastosowaniem modelu X-Y izolacji według  
CIGRE, DIRANA, Dielectric Response Analysis and Moisture in Oil-Paper  
Dielectrics – OMICRON, L204, April 2011. Metoda RVM wykorzystuje pomiar  
napięcia powrotnego podczas wielokrotnego cyklu ładowania i rozładowywania  
30 układu izolacyjnego napięciem stałym. Opisana jest w artykułach: Bogнар A.,

Kalocsai L., Csepes G., Németh E., Schmidt J.: „Diagnostic Tests of High Voltage Oil-Paper Insulating Systems (In Particular Transformer Insulation) using DC Dielectrometrics”, CI-GRE'90, Paris, France, 1990, 15/33–08; Patsch R., Kouzmine O.: „Return Voltage Measurements – a good Tool for the Diagnosis of Paper-Oil-Insulations”, IEEE Power Tech, St. Petersburg, Russia, 27–30 June 2005, p.1–7; Saha T.K., Zheng Tong Yao: „Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service-aged transformer”, IEEE Trans, on Power Delivery, vol. 18, No 1, (2003), p. 128–135.

W małym zakresie stosowana jest ponadto metoda PDC – Polarization, Depolarization Currents polegająca na analizie kształtu czasowych charakterystyk prądów ładowania i rozładowania, która jest opisana w artykułach: Shayegani A.A., Hassan O., Borsi H., Gockenbach E., Mohseni H.: „PDC measurement evaluation on oil-pressboard samples”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, (2004), 5– 9 July 2004, Vol. 1, p. 51–54; PDC-ANALYSER-1MOD, „Determination of the moisture content in the pressboard and of the oil conductivity in power transformers”, ALFF ENGINEERING, Switzerland.

We wszystkich tych metodach zależności uzyskane z pomiarów procesów polaryzacyjnych porównywane są z zależnościami wzorcowymi otrzymanymi laboratoryjnie dla zawilgoconej w różnym stopniu zaimpregnowanej celulozy oraz oleju izolacyjnego dla różnych temperatur izolacji. Na tej podstawie oznaczają się ilość wody w zgromadzonej izolacji. Praktyka stosowania tych sposobów wykazała, że w przypadkach izolacji zestarzonej, o bardzo dużym zawilgoceniu lub wykazującej brak równowagi termodynamicznej stężenia wilgoci w elementach stałych i cieczy izolująco-chłodzącej obserwuje się nadmierne błędy w oznaczeniu ilości wody zgromadzonej w preszpanie. Układ izolacji transformatorów jest szeregowo-równoległy, składający się z celulozy oraz oleju izolacyjnego. Pod wpływem zmian temperatury zachodzi w nim wymiana wilgoci pomiędzy olejem a celulozą, co w sposób niekontrolowany wpływa na zmiany parametrów oleju izolacyjnego. W tym przypadku powstaje różnica pomiędzy

przebiegami wzorcowymi, określonymi metodami laboratoryjnymi a rzeczywistymi parametrami elektrycznymi oleju w badanym transformatorze. Przyczynia się to do powstawania dużych niepewności pomiędzy rzeczywistym a szacowanym poziomem zawilgocenia izolacji celulozowej. Metody wykorzystujące pomiary elektryczne charakteryzują się długim czasem pomiarów niezbędnym do uzyskania parametrów izolacji, na podstawie których określany jest stopień zawilgocenia. Takie wyznaczenie charakterystyki metodą FDS w stosowanym do pomiarów zakresie częstotliwości od 0,0001 Hz do 5000 Hz wymaga czasu ok. 6 h, natomiast metodami RVM oraz PDC również do 6 h.

10 W polskim opisie patentowym nr PL231824 przedstawiono sposób określania zawartości wilgoci w elementach stałych układu izolacji ciekło-stałej izolatorów przepustowych, którego metoda polega na odczytaniu częstotliwości, dla której wartość tangensa kąta strat układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego jest równa 0,1 a następnie na podstawie uzyskanej  
15 wartości częstotliwości oznacza się, z charakterystyki odniesienia dla temperatury izolacji, przy której dokonano pomiaru tangensa kąta strat, procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej.

Tego typu rodzaj izolacji wykorzystywany jest również w transformatorach energetycznych. Znane są metody określania zawartości wilgoci w izolacji ciekło-stałej transformatorów energetycznych według polskich opisów patentowych.

20 W polskim opisie patentowym nr PL231823 wykorzystuje się pomiary konduktancji układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego dla częstotliwości 0,001 Hz, pojemności dla częstotliwości 1000 Hz oraz temperatury izolacji ciekło-stałej transformatora energetycznego i na podstawie  
25 wartości ilorazu uzyskanych konduktancji i pojemności oraz otrzymanej temperatury izolacji, określa się procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej, którą odczytuje się z charakterystyki odniesienia.

30 W polskim opisie patentowym nr PL231825 wykorzystuje się sposób polegający na wyznaczeniu częstotliwości, dla której wartość tangensa kąta strat

układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego jest równa 0,1 a następnie na podstawie uzyskanej wartości częstotliwości oznacza się, z charakterystyki odniesienia dla temperatury izolacji, przy której dokonano pomiaru tangensa kąta strat, procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej.

W polskim opisie patentowym nr PL231826 wykorzystuje się metodę polegającą na odczytaniu przenikalności dielektrycznej względnej układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego dla częstotliwości 1000 Hz, na podstawie której wyznacza się wartość częstotliwości, dla której przenikalność dielektryczna względna jest o 1,4 razy większa, a następnie na podstawie uzyskanej wartości częstotliwości oznacza się z charakterystyki odniesienia dla temperatury izolacji przy której dokonano pomiaru względnej przenikalności dielektrycznej, procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej.

W polskim opisie patentowym nr PL231882 wykorzystuje się metodę polegającą na pomiarze konduktancji przy prądzie stałym oraz pojemności układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego dla częstotliwości 1000 Hz oraz temperatury izolacji ciekło-stałej transformatora energetycznego i na podstawie wartości ilorazu uzyskanych konduktancji i pojemności oraz temperatury izolacji, określa się procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej, którą odczytuje się z charakterystyki odniesienia.

W polskim opisie patentowym nr PL234947B1 wykorzystuje się metodę polegającą na pomiarze temperatury oraz pojemności elektrycznej w funkcji częstotliwości układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego izolacji ciekło-stałej izolatorów przepustowych poprzez odczytanie pojemności elektrycznej dla częstotliwości 1000 Hz, na podstawie której wyznacza się wartość częstotliwości dla której pojemność elektryczna jest o 1,3 razy większa, a następnie na podstawie uzyskanej wartości częstotliwości odczytuje się, z charakterystyki odniesienia wyznaczonych dla izolatora przepustowego dla

temperatury izolacji przy której dokonuje się pomiaru pojemności elektrycznej, procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej.

W polskim opisie patentowym nr PL423879 wykorzystuje się metodę polegającą na pomiarze konduktancji przy prądzie stałym, pojemności dla częstotliwości 1000 Hz oraz temperatury układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego izolacji ciekło-stałej transformatora energetycznego, a następnie na podstawie wartości ilorazu konduktancji i pojemności oraz temperatury izolacji, określa się procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej.

W polskim opisie patentowym nr PL423881 wykorzystuje się metodę polegającą na pomiarze konduktancji przy prądzie przemiennym dla częstotliwości 0,001 Hz, pojemności dla częstotliwości 1000 Hz i temperatury układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego izolacji ciekło-stałej transformatora energetycznego, a następnie na podstawie wartości ilorazu konduktancji i pojemności oraz temperatury izolacji, określa się procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej.

W polskim opisie patentowym nr PL423882 wykorzystuje się metodę polegającą na pomiarze temperatury izolacji ciekło-stałej izolatora przepustowego oraz częstotliwości, dla której wartość tangensa kąta strat układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego jest równa 0,1 a następnie na podstawie uzyskanej wartości częstotliwości, uwzględniając charakterystykę odniesienia dla temperatury izolacji ciekło-stałej izolatora przepustowego, oznacza się procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej.

W polskim opisie patentowym nr PL423883 wykorzystuje się metodę polegającą na pomiarze temperatury izolacji ciekło-stałej transformatora energetycznego oraz częstotliwości, dla której wartość tangensa kąta strat układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego jest równa 0,1

a następnie na podstawie uzyskanej wartości częstotliwości, uwzględniając charakterystykę odniesienia dla temperatury izolacji ciekło-stałej transformatora, oznacza się procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej.

5           W polskim opisie patentowym nr PL423883 wykorzystuje się metodę polegającą na pomiarze temperatury izolacji ciekło-stałej transformatora energetycznego oraz przenikalności dielektrycznej względnej układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego dla częstotliwości 1000 Hz, na podstawie której określa się wartość częstotliwości dla której przenikalność  
10 dielektryczna względna jest o 1,4 razy większa, a następnie na podstawie uzyskanej wartości częstotliwości oznacza się, z charakterystyki odniesienia dla temperatury izolacji przy której dokonano pomiaru względnej przenikalności dielektrycznej, procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej.

15           W polskim opisie patentowym nr PL430337 wykorzystuje się metodę polegającą na pomiarze temperatury izolacji ciekło-stałej izolatora przepustowego oraz pojemności elektrycznej układu szeregowo-równoległego celulozy oraz oleju izolacyjnego dla częstotliwości 1000 Hz, na podstawie której określa się wartość  
20 częstotliwości dla której pojemność elektryczna jest o 1,3 razy większa, a następnie na podstawie uzyskanej wartości częstotliwości wyznacza się z charakterystyki odniesienia wyznaczonych dla izolatora przepustowego dla temperatury izolacji przy której dokonano pomiaru pojemności elektrycznej, procentową zawartość wody zgromadzonej w objętości elementów stałych izolacji ciekło-stałej.

25           Celem wynalazku jest opracowanie szybkiego i dokładnego sposobu wyznaczania zawilgocenia w składowej stałej izolacji celulozowo-olejowej transformatora elektroenergetycznego.

Istotą czujnika do wyznaczania zawilgocenia w składowej stałej izolacji celulozowo-olejowej transformatora elektroenergetycznego posiadającego  
30 przewód napięciowy, przewód pomiarowy i czujnik temperatury, według

wynalazku, jest to, że składa się z obudowy górnej w kształcie walca i obudowy dolnej w kształcie walca, pomiędzy którymi znajduje się izolator. Wewnątrz izolatora znajduje się elektroda napięciowa, pod którą znajduje się płytki preszpanu o grubości 1 mm. Pod płytką preszpanu znajduje się układ składający się z elektrody pomiarowej i elektrody ochronnej. Na zewnętrznej części elektrody ochronnej zamocowany jest stały czujnik temperatury. Do elektrody napięciowej podłączony jest przewód napięciowy, a do elektrody pomiarowej podłączony jest przewód pomiarowy. W czujniku znajdują się cztery pary otworów w kształcie uciętych stożków.

10 Istotą sposobu wyznaczania zawilgocenia w składowej stałej izolacji celulozowo-olejowej transformatora elektroenergetycznego, według wynalazku, jest to, że wykonuje się pomiary temperatury czujnika oraz składowej urojonej zespolonej pojemności dla częstotliwości 0,01 Hz poprzez odczyt z płytki preszpanu umieszczonej w czujniku zamontowanym w kadzi transformatora elektroenergetycznego. Następnie na podstawie uzyskanej wartości składowej urojonej zespolonej pojemności wyznacza się procentową zawartość wody zgromadzoną w objętości elementów stałych izolacji transformatora z charakterystyk odniesienia wyznaczonych dla czujnika dla temperatury, przy której dokonano pomiaru składowej urojonej zespolonej pojemności.

20 Korzystnym skutkiem wynalazku jest znaczące skrócenie czasu potrzebnego do wykonania pomiaru oraz uzyskanie jednoznacznego wyniku zawartości wilgoci w składowej celulozowej izolacji transformatora elektroenergetycznego na podstawie odczytu z charakterystyk odniesienia dla czujnika. Korzystnym skutkiem wynalazku jest wyeliminowanie z układu pomiarowego składowej olejowej oraz wpływu na wynik pomiaru niekontrolowanych zmian składowej urojonej zespolonej pojemności składowej olejowej, co pozwala na zwiększenie dokładności określenia zawilgocenia celulozy.

Wynalazek został przedstawiony w przykładzie wykonania na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia półwidok-półprzekrój czujnika, fig. 2 – widok z góry czujnika a fig. 3 – charakterystyki odniesienia dla zależności składowej urojonej

zespolonej pojemności w funkcji zawartości wilgoci dla temperatur od 20°C do 70°C.

Czujnik do wyznaczania zawilgocenia w składowej stałej izolacji celulozowo-olejowej transformatora elektroenergetycznego w przykładzie wykonania składa się z obudowy górnej 1a w kształcie walca o średnicy 260 mm i wysokości 10 mm i obudowy dolnej 1b w kształcie walca o średnicy 260 mm i wysokości 10 mm. Pomiedzy obudową górną 1a, a obudową dolną 1b znajduje się izolator 2 o średnicy walca 260 mm i wysokości 45 mm. Wewnątrz izolatora 2 znajduje się elektroda napięciowa 3 o średnicy 180 mm i wysokości 15 mm, pod którą umieszczona jest płytką preszpanu 4 o grubości 1 mm i o średnicy 260 mm. Pod płytką preszpanu 4 znajduje się układ składający się z elektrody pomiarowej 5 w kształcie walca o średnicy 160 mm i wysokości 15 mm współosiowej z elektrodą ochronną 6 w postaci pierścienia o średnicy wewnętrznej 230 mm, średnicy zewnętrznej 260 mm i wysokości 15 mm. Na zewnętrznej części elektrody ochronnej 6 wywiercony jest otwór, w którym zamontowany jest na stałe czujnik temperatury 7. Do elektrody napięciowej 3 podłączony jest przewód napięciowy 8, natomiast do elektrody pomiarowej 5 podłączony jest przewód pomiarowy 9. W czujniku znajdują się cztery pary otworów 10 w kształcie uciętych stożków. Większe podstawy stożków znajdują się na zewnętrznych płaszczyznach obudowy górnej 1a i obudowy dolnej 1b, a mniejsze podstawy stożków znajdują się na powierzchni płytki preszpanu 4. Średnice stożków na zewnętrznych powierzchniach czujnika wynoszą po 82,5 mm. Średnice stożków w płaszczyznach stykających się z powierzchnią płytki preszpanu 4 wynoszą po 19 mm. Przez otwory 10 zawilgocony olej izolacyjny dostaje się do płytki preszpanu 4 w celu jej impregnacji i nawilżenia. Czujnik montuje się wewnątrz kadzi transformatora elektroenergetycznego, umieszczając go na jej bocznej ścianie. Przewody napięciowy 8, pomiarowy 9 oraz przewody czujnika temperatury 7 wyprowadza się na zewnątrz przez przepusty prądowe.

Sposób wyznaczania zawilgocenia w składowej stałej izolacji celulozowo-olejowej transformatora elektroenergetycznego z wykorzystaniem czujnika

przedstawionego w przykładzie wykonania polegał na tym, że czujnik do wyznaczania zawilgocenia w składowej stałej izolacji celulozowo-olejowej umieszczono na bocznej ścianie wewnątrz transformatora elektroenergetycznego. Przewody napięciowy 8, pomiarowy 9 oraz przewody czujnika temperatury 7 wyprowadzono na zewnątrz przez przepusty prądowe. Do przewodów napięciowego 8 oraz pomiarowego 9 podłączono miernik FDS – Dirana produkcji firmy Omicron, a do przewodów czujnika temperatury 7 podłączono cyfrowy miernik temperatury. Wykonano pomiary składowej urojonej zespolonej pojemności dla częstotliwości 0,01 Hz, którego wartość wyniosła  $10^{-9}$  F i temperatury czujnika, której wartość wyniosła 50°C. Następnie na podstawie uzyskanej wartości składowej urojonej zespolonej pojemności oraz temperatury czujnika odczytano z charakterystyk odniesienia procentową zawartość wody zgromadzonej w składowej stałej izolacji celulozowo-olejowej transformatora elektroenergetycznego, która wyniosła  $X=1,5$  % wagowych.

**POLITECHNIKA LUBELSKA**  
Biuro Rzecznika Patentowego  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
tel. +48 81 538 46 29, fax +48 81 538 41 70

**RZECZNIK PATENTOWY**  
*Patrycja*  
**mgr Paulina Pater**  
Nr ew. 3571

## Wykaz oznaczeń

- 1a – obudowa górna
- 1b – obudowa dolna
- 2 – izolator
- 3 – elektroda napięciowa
- 4 – płytki preszpanu
- 5 – elektroda pomiarowa
- 6 – elektroda ochronna
- 7 – czujnik temperatury
- 8 – przewód napięciowy
- 9 – przewód pomiarowy
- 10 – otwory