

doi:10.15199/48.2016.08.02

Wpływ stopnia zesterzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej na parametry modelu odpowiedzi dielektrycznej typu Cole-Cole

Streszczenie. Autorzy artykułu, na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych, proponują wykorzystanie do szacowania stopnia zesterzenia celulozy parametry modelu odpowiedzi dielektrycznej typu Cole-Cole, wyznaczone metodą spektroskopii częstotliwościowej FDS (Frequency Dielectric Spectroscopy). Wzbogacenie stosowanego dotychczas algorytmu miernika FDS obliczającego poziom zawilgocenia o analizę parametrów modelu odpowiedzi dielektrycznej typu Cole-Cole, pozwoliłoby w przyszłości określać poziom zesterzenia celulozy transformatora.

Abstract. The Authors based on the conducted experiments, proposed to use for estimation of cellulose ageing degree parameters of Cole-Cole dielectric response model determined by the means of Frequency Dielectric Spectroscopy (FDS). The Authors believe that expanding used previously algorithm of FDS measurer calculating moisture level with analysis of Cole-Cole dielectric response model would allow in the future to determine cellulose ageing degree in the transformer. (Influence of aging degree in cellulose-oil insulation samples on the parameters of the dielectric response Cole-Cole model).

Słowa kluczowe: transformatory mocy, izolacja papierowo-olejowa, metoda spektroskopii częstotliwościowej, model Cole-Cole.

Keywords: power transformers, paper-oil insulation, frequency dielectric spectroscopy, Cole-Cole model.

Wstęp

Szacuje się, że w polskim systemie energetycznym blisko 50% jednostek transformatorowych dużej i średniej mocy (tzn. I i II grupy) przekroczyło już połowę długości swojego życia technicznego. Jednym z podstawowych czynników decydujących o dalszej bezawaryjnej pracy transformatorów jest kondycja systemu celulozowo-olejowej izolacji [1, 2, 3]. Czynnikiem, które bezpośrednio wpływają na kondycję systemu izolacji są: temperatura, stopień zawilgocenia (oleju i celulozy) oraz stopień zesterzenia (oleju i celulozy). Obecnie, zarówno monitorowanie prawidłowego rozkładu temperatury w pracującym transformatorze, jak również szacowanie stopnia zawilgocenia oleju i celulozy, nie stanowi już większego problemu. W tej mierze opracowano szereg metod i technik diagnostycznych, przeprowadzanych w laboratorium na uprzednio pobranych próbkach oleju, jak również bezpośrednio na transformatorze w systemie off-line oraz on-line [4, 5].

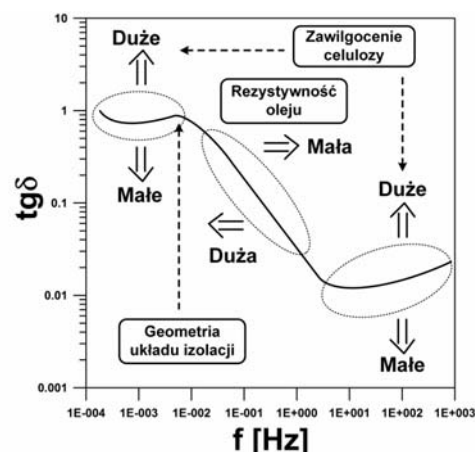
W ostatnim czasie, z uwagi na zwiększającą się populację transformatorów znacznie wyeksploatowanych, coraz większego znaczenia nabiera wypracowanie skutecznej metody oceny stopnia zesterzenia celulozy w transformatorze. Zesterzenie celulozy rozumie się jako postępującą degradację termiczną jej włókien, a co za tym idzie spadek ich wytrzymałości mechanicznej. Autorzy artykułu, na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych, proponują wykorzystanie do szacowania stopnia zesterzenia celulozy parametry modelu odpowiedzi dielektrycznej typu Cole-Cole, wyznaczone metodą spektroskopii częstotliwościowej FDS (Frequency Dielectric Spectroscopy).

Metoda spektroskopii częstotliwościowej FDS oraz model odpowiedzi dielektrycznej Cole-Cole

Metoda FDS polega na analizie zmian pojemności i współczynnika stratności $tg\delta$ (lub części rzeczywistej ϵ' i urojonej ϵ'' zespolonej przenikalności elektrycznej) diagnozowanej izolacji w funkcji częstotliwości sinusoidalnego napięcia pomiarowego. Ze względu na znaczne wartości czasów relaksacji mechanizmów polaryzacji występujących w izolacji celulozowo-olejowej transformatorów energetycznych, w metodzie FDS najbardziej istotne pozostają pomiary przeprowadzone w niskich częstotliwościach (tj. od 10^{-4} Hz), natomiast górną

wartość częstotliwości ustala się na poziomie 10^2 lub 10^3 Hz [3, 6].

Wpływ jednoczesnego oddziaływania procesów przewodnictwa, relaksacji różnych fragmentów izolacji transformatora, stopnia zawilgocenia i zesterzenia oleju oraz celulozy, temperatury pomiaru oraz geometrii diagnozowanych uzwojeń powoduje znaczne różnice w rejestrowanych przebiegach. Jednak w przypadku charakterystyki współczynnika stratności $tg\delta(f)$ (rys. 1) możliwe jest wyznaczenie przedziałów częstotliwości opisujących konkretne właściwości elementów celulozowo-olejowej izolacji transformatora [3, 6, 7].

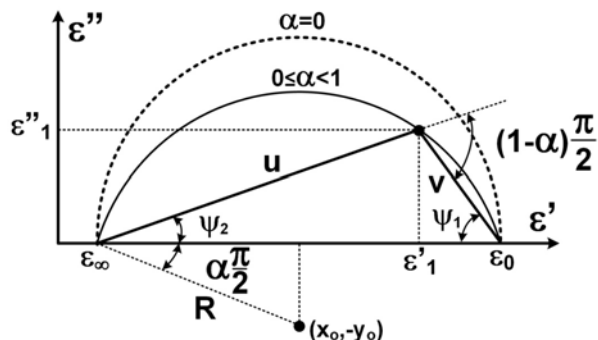


Rys. 1. Wpływ stanu izolacji celulozowo-olejowej transformatora na charakterystykę współczynnika stratności $tg\delta(f)$ wyznaczoną metodą FDS

Dielektryki rzeczywiste rzadko mają tylko jeden dominujący czas relaksacji, a pomijanie oddziaływań międzycząsteczkowych prowadzi do dużych różnic. Stosowanie wówczas równania dyspersyjnego Debye'a może być sporne zwłaszcza dla dielektryków zawierających długołańcuchowe cząstki (np. celuloza), których maksima absorpcyjne mogą być znacznie obniżone niż wynika to z modelu Debye'a. W takim przypadku wykres zespolonej przenikalności elektrycznej typu $(\epsilon' - \epsilon'')$ znajduje się wewnątrz okręgu opisanego równaniem (1) gdy $\alpha = 0$ (rys. 2), a jego postać można zapisać za pomocą empirycznego równania Cole-Cole:

$$(1) \quad \varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}}$$

gdzie: ε_s – przenikalność elektryczna dielektryka przy napięciu stałym, ε_{∞} – przenikalność elektryczna dielektryka dla częstotliwości $f = \infty$, ω – pulsacja, τ – czas relaksacji, α – współczynnik ($0 \leq \alpha < 1$).



Rys. 2. Sposób wyznaczania stałej czasowej τ oraz współczynnika α modelu Cole-Cole z charakterystyki przenikalności $\varepsilon' - \varepsilon''$
 R - promień okręgu, $(x_0, -y_0)$ - współrzędne środka okręgu

Uzyskane dzięki metodzie FDS wartości zespolonej przenikalności ($\varepsilon', \varepsilon''$) izolacji transformatora umożliwiają wyznaczenie stałej czasowej τ oraz współczynnika α w oparciu o charakterystykę z rysunku 2 oraz wzory:

$$(2) \quad u = \varepsilon - \varepsilon_{\infty}, \quad v = \varepsilon_s - \varepsilon = u(j\omega\tau)^{1-\alpha}$$

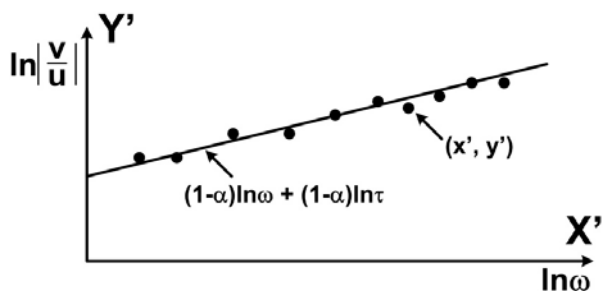
$$(3) \quad \left| \frac{u}{v} \right| = (j\omega\tau)^{1-\alpha}, \quad \text{Arg}(v) - \text{Arg}(u) = (1-\alpha) \frac{\pi}{2}$$

$$(4) \quad \alpha = 1 - \frac{\pi}{2} (\psi_1 - \psi_2) =$$

$$= 1 - \frac{\pi}{2} \left(\text{tg}^{-1} \frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon_s - \varepsilon_1'} + \text{tg}^{-1} \frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon_1' - \varepsilon_{\infty}} \right)$$

$$(5) \quad \tau = \frac{1}{\omega} \left[\frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_1')^2 + \varepsilon_2''^2}{(\varepsilon_1' - \varepsilon_{\infty})^2 + \varepsilon_2''^2} \right]^{\frac{1}{2(1-\alpha)}}$$

Zależność pomiędzy danymi eksperymentalnymi (x', y') wyliczonymi na podstawie wzoru (6) ma charakter liniowy (rys. 3). Wartość stałej czasowej τ określa wówczas punkt przecięcia aproksymowanej prostej z osią Y' , natomiast współczynnik α jest równy współczynnikowi kierunkowemu tej prostej (7).



Rys. 3. Sposób wyznaczania stałej czasowej τ oraz współczynnika α modelu Cole-Cole

$$(6) \quad x' = \ln \omega, \quad y' = \ln \left| \frac{v}{u} \right|$$

$$(7) \quad \ln \left| \frac{v}{u} \right| = (1-\alpha) \ln \omega + (1-\alpha) \ln \tau$$

Sposób przygotowania próbek

Próbki izolacji celulozowo-olejowej wykonano z elektrotechnicznego papieru transformatorowego firmy Tervakoski o oznaczeniu Tertrans N 125 oraz mineralnego oleju transformatorowego firmy Nynas o oznaczeniu Nytro 10 GBN. Ostatecznie badanym próbkom izolacji nadano kształt zwijki kondensatorowej. Pojedynczą próbkę stanowiły 2 paski papieru o rozmiarze 140 × 700 mm nawinięte na elektrodę niskiego potencjału, którą wykonano z miedzianej rurki o średnicy 25,4 mm. Elektrodę wysokiego potencjału stanowiła kondensatorowa folia aluminiowa. W trakcie badań próbki umieszczano w hermetyzowanym naczyniu pomiarowym wypełnionym świeżym mineralnym olejem transformatorowym. Naczynie umożliwiało regulację i stabilizację temperatury kąpeli olejowej z dokładnością $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Celem zróżnicowania próbek pod względem stopnia zawilgocenia celulozy, przed impregnacją próbki poddano wstępnemu suszeniu w temperaturze 120°C pod próżnią. Następnie wyznaczono wagą analityczną ciężar początkowy suchej próbki. Śledzenie przyrostu wagi w wyniku migracji wilgoci z powietrza do nieimpregnowanego papieru umożliwiło wyznaczenie kolejnych stopni zawilgocenia próbek (pomiaru wykonywane były w zakresie zawilgocenia od 0% do 4%, tabela 1). Zawilgacanie próbek odbywało się w pomieszczeniu laboratoryjnym w takich samych warunkach atmosferycznych, kontrolowanych przy pomocy stacji meteo. Ostatnim etapem była impregnacja próbek papieru mineralnym olejem transformatorowym o zawilgoceniu własnym 10 ppm. Dzięki opisanej procedurze uzyskano próbki izolacji celulozowo-olejowej o stopniowej skali poziomemu zawilgocenia.

Tabela 1. Oznaczenie próbek izolacji celulozowo-olejowej

1A	1B	1C	1D	1E
2A	2B	2C	2D	2E
3A	3B	3C	3D	3E

A – zawilgocenie początkowe (po osuszeniu papieru), ok. 0,5%
 B – zawilgocenie początkowe plus wzrost wagi papieru o 1%
 C – zawilgocenie początkowe plus wzrost wagi papieru o 2%
 D – zawilgocenie początkowe plus wzrost wagi papieru o 3%
 E – zawilgocenie początkowe plus wzrost wagi papieru o 4%
 1 – suszenie papieru (120°C pod próżnią), ok. 1000 DP
 2 – termiczne starzenie papieru w 150°C przez 25 h plus suszenie, utrata ok. 50% DP
 3 – termiczne starzenie papieru w 170°C przez 25 h plus suszenie, utrata ok. 70% DP

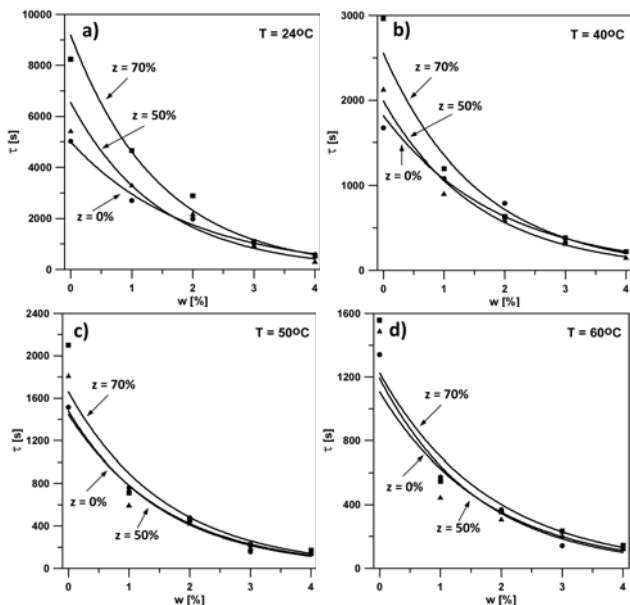
Zróżnicowanie próbek izolacji celulozowo-olejowej pod względem stopnia zestarzenia uzyskano wygrzewając nowy nieimpregnowany papier zgodnie z cyklem przedstawionym w tabeli 1. Stopień polimeryzacji papieru elektrotechnicznego DP użytego w czasie badań oszacowano wykorzystując dane zaczerpnięte z literatury [3, 4, 5]. Starzenie termiczne tego typu papieru elektrotechnicznego dla przyjętych oznaczeń stopnia zestarzenia (tzn. 1, 2, 3 – tabela 1) określono odpowiednio: dla próbki typu 2 to 50% utraty stopnia DP w stosunku do

wartości początkowej, natomiast w przypadku próbki typu 3 to już tylko ok. 30% pierwotnej wartości DP. Po etapie przyspieszonego starzenia termicznego nie-impregnowanego papieru, próbkę suszono pod próżnią w 120°C. Następnie próbki poddawano procesowi zawilgacania ustalając metodą wagową jego stopień, tak samo jak w przypadku próbki nie starzonej. Ostatnim etapem była impregnacja próbek papieru mineralnym olejem transformatorowym o zawilgoceniu własnym 10 ppm. Tym samym uzyskano 15 próbek izolacji celulozowo-olejowej o zróżnicowanym stopniu zesterzenia (rozumianego jako stopień degradacji termicznej włókien celulozy) oraz zawilgocenia.

Wyniki badań analizy stopnia zesterzenia

Ponieważ przebieg starzenia się izolacji celulozowo-olejowej transformatora jest nierozwieszony związany z procesem przyrostu stopnia jej zawilgocenia [1-5, 7, 8], postanowiono poddać analizie próbki izolacji będące w różnym stadium ich życia technicznego (tab. 1). Uwzględniono przy tym również oddziaływanie temperatury. Zakresy analizowanych parametrów, tzn. stopnia zawilgocenia i zesterzenia, odpowiadają wartościom spotykanym w eksploatowanych transformatorach energetycznych, począwszy od jednostki nowo wyprodukowanej, aż do stanu bliskiego końca życia technicznego [1-5]. Zakres temperatur odpowiada natomiast wartościom mogącym występować podczas wykonywania diagnostyki FDS zważywszy, że jest to metoda diagnostyczna przeprowadzana w trybie off-line.

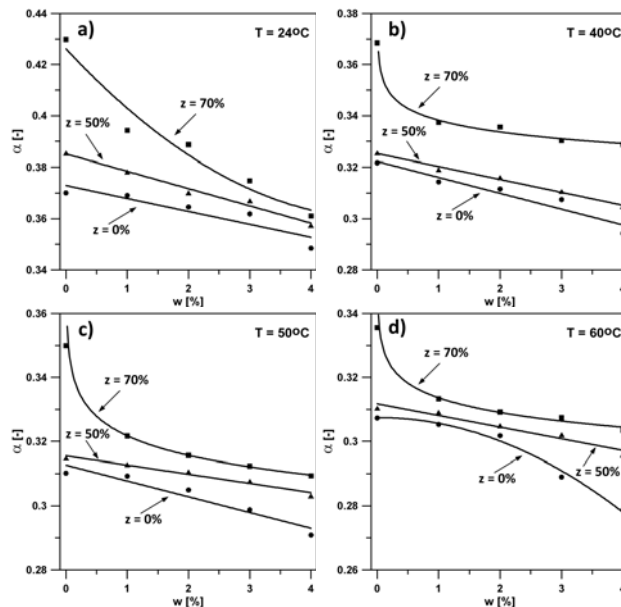
Zgodnie z podstawowym równaniem modelu odpowiedzi dielektrycznej typu Cole-Cole (1), analizie poddano dwa jego parametry, tzn. czas relaksacji τ oraz współczynnik α . W założeniu, czas relaksacji τ powinien być ściśle skorelowany z tymi cząsteczkami dipolowymi dielektryka, które mają największy udział w budowaniu wartości polaryzacji. W przypadku izolacji celulozowo-olejowej są to niewątpliwie cząsteczki wody, cechujące się największą wartością przenikalności elektrycznej (ok. 80 w 20°C).



Rys.4. Wpływ stopnia zawilgocenia (w), stopnia zesterzenia (z) oraz temperatury (T) próbek izolacji celulozowo-olejowej na wartość stałej czasowej τ modelu Cole-Cole

Na rysunku 4 przedstawiono wybrane zbiorcze charakterystyki stałej czasowej τ dla kilku temperatur. Zauważyć należy, że niezależnie od temperatury oraz stopnia zesterzenia izolacji, wzrost stopnia zawilgocenia

generuje znaczący spadek wartości parametru τ . Tym samym dominująca stała czasowa mechanizmów relaksacji przesuwana się w stronę czasów krótszych, co jest w pełni zgodne z założeniami teoretycznymi. Wpływ stopnia zesterzenia na wartość stałej czasowej τ jest zdecydowanie mało istotny, oscylujący wokół błędu pomiarowego. Stwierdzić zatem można, że parametru τ modelu Cole-Cole jest skorelowany ze stopniem zawilgocenia celulozy i może być w tym aspekcie wykorzystywany w przyszłości w diagnostyce izolacji transformatorów.



Rys.5. Wpływ stopnia zawilgocenia (w), stopnia zesterzenia (z) oraz temperatury (T) próbek izolacji celulozowo-olejowej na wartość parametru α modelu Cole-Cole

Zgodnie z założeniami teoretycznymi modelu odpowiedzi dielektrycznej typu Cole-Cole, za wartość parametru α odpowiada dyspersyjny rozkład różnych procesów relaksacji dipolowych. Założyć zatem można, że wzrost stopnia zesterzenia celulozy, którego skutkiem jest skracanie się długości łańcuchów jej makrocząsteczek, a co za tym idzie zwiększenie rozkładu możliwych procesów relaksacji i sukcesywne zmniejszanie rejestrowanych wartości współczynnika α . Na rysunku 5 przedstawiono wybrane zbiorcze charakterystyki parametru α dla kilku temperatur. Zauważyć można, że wzrost stopnia zesterzenia próbek generuje istotne zwiększanie się wartości analizowanego parametru α . Tym samym, wraz ze zwiększającym się stopniem zesterzenia celulozy, odpowiedź dielektryczna badanych próbek izolacji coraz bardziej odbiega od modelu Debye'a. Wniosek ten w pełni potwierdza wcześniejsze założenia teoretyczne. Na wartość parametru α oprócz stopnia zesterzenia, wpływa również stopień zawilgocenia oraz istotnie oddziałuje temperatura. Aby można było praktycznie wykorzystać w przyszłej diagnostyce izolacji transformatorów parametr α do szacowania stopnia jej zesterzenia, należy zatem wcześniej określić poziom jej zawilgocenia (np. metodą FDS lub oceniając wartość stałej czasowej τ) oraz uwzględnić oddziaływanie temperatury.

Wnioski końcowe

Przeprowadzone na próbkach izolacji celulozowo-olejowej badania wykazały, że istnieje korelacja pomiędzy temperaturą, stopniem zawilgocenia oraz zesterzenia (degradacją termiczną włókien celulozy) a podstawowymi parametrami modelu odpowiedzi dielektrycznej typu Cole-Cole, tzn. stałą czasową τ oraz współczynnikiem α .

Dowodzono, że zwiększający się stopień zawilgocenia celulozy powoduje zmniejszanie się wartości stałej czasowej τ modelu. Istotne przy tym jest, że stopień zesterzenia celulozy praktycznie nie wpływa na wartość τ . Aby wykorzystać w przyszłej rozszerzonej diagnostyce FDS szacowanie stopnia zawilgocenia izolacji transformatorów olejowych z wykorzystaniem stałej czasowej τ , nieodzowne jest uwzględnienie oddziaływania temperatury. Jednakże, najistotniejsza obserwacja dotyczy analizy parametru α modelu Cole-Cole. Dowiedzono korelacji ww. parametru ze stopniem zesterzenia celulozy. Rosnąca degradacja termiczna włókien celulozy powoduje wzrost wartości parametru α , niezależnie od stopnia jej zawilgocenia oraz temperatury. Tym samym, odpowiedź dielektryczna izolacji celulozowo-olejowej wraz z rosnącym zesterzeniem coraz bardziej odbiega od modelu Debye'a. Aby wykorzystać w przyszłej rozszerzonej diagnostyce FDS szacowanie stopnia zesterzenia izolacji transformatorów olejowych z wykorzystaniem współczynnika α , nieodzowne jest wcześniejsze określenie poziomu jej zawilgocenia oraz uwzględnienie oddziaływania temperatury. Podsumowując, zdaniem autorów niezbędne jest prowadzenie dalszych badań w warunkach laboratoryjnych (np. na układach izolacji symulujących system izolacji głównej transformatora) oraz na obiektach rzeczywistych, tj. olejowych transformatorach energetycznych.

Autorzy: dr hab. inż. Stefan Wolny, prof. PO, dr inż. Artur Adamowicz, mgr inż. Marek Lepich, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, ul. Prószkowska 76, 45-748 Opole, E-mail: s.wolny@po.opole.pl; adam117@interia.pl; leppich@poczta.fm

LITERATURA

- [1] Linhjell D., Lundgaard L., Gafvert U., Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging, *IEEE Trans. on Dielectr. and Electrical Insul.*, 14 (2007), n.1, 156-169
- [2] Lundgaard L. E., Hansen W., Linhjell D., Painter T. J., Ageing of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers, *IEEE Transaction on Power Delivery*, 19 (2004), n.1, 230-239
- [3] Wolny S., Adamowicz A., Lepich M., Influence of Temperature and Moisture Level in Paper-Oil Insulation on the Parameters of the Cole-Cole Model, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29 (2014), n.1, 246-250
- [4] Wolny S., Kędzia J., The assessment of the influence of temperature of selected parameters of the approximation method of depolarization current analysis of paper-oil insulation, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356 (2010), 809-814
- [5] Wolny S., Zdanowski M., Analysis of recovery voltage parameters of paper-oil insulation obtained from simulation investigations using the Cole-Cole model, *IEEE Trans. on Dielectr. and Electrical Insul.*, 16 (2009), n.6, 1676-1680
- [6] Giselbrecht D., Leibfried T., Modelling of Oil-Paper Insulation Layers in the Frequency Domain with Cole-Cole-Functions, *International Symposium on Electrical Insulation (ISEI)*, Toronto, Canada, 11-14 June (2006), 59-62
- [7] Jurcik J., Gutten M., Korenciak D., Zukowski P., Koltunowicz T. N., Kierczynski K., Subocz J., Szrot M., Analysis of AC conductivity in wet oil impregnated insulating paper, *10th International Conference ELEKTRO 2014*, Rajecké Teplice, Slovak Republic, 19-20 May (2014), 298-302
- [8] Przybyłek P., Nadolny Z., Moscicka-Grzesiak H., Bubble effect as a consequence of dielectric losses in cellulose insulation, *IEEE Trans. on Dielectr. and Electrical Insul.*, 17 (2010), n.3, 913-919