

Artur ADAMOWICZ\*

## WYKORZYSTANIE ELEKTRYCZNYCH SCHEMATÓW ZASTĘPCZYCH PRÓBEK IZOLACJI CELULOZOWO- OLEJOWEJ DO SYMULACJI CHARAKTERYSTYK NAPIĘCIA POWROTNEGO

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania programu PSpice Schematics pod kątem zastosowania schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej do analizy napięcia powrotnego. Opisano również główne przyczyny awarii transformatorów energetycznych oraz jedną z nowoczesnych metod używanych do diagnostyki transformatorów, tzn. spektroskopię częstotliwościową dielektryków (FDS).

SŁOWA KLUCZOWE: spektroskopia częstotliwościowa, izolacja celulozowo-olejowa, transformatory energetyczne, napięcie powrotne

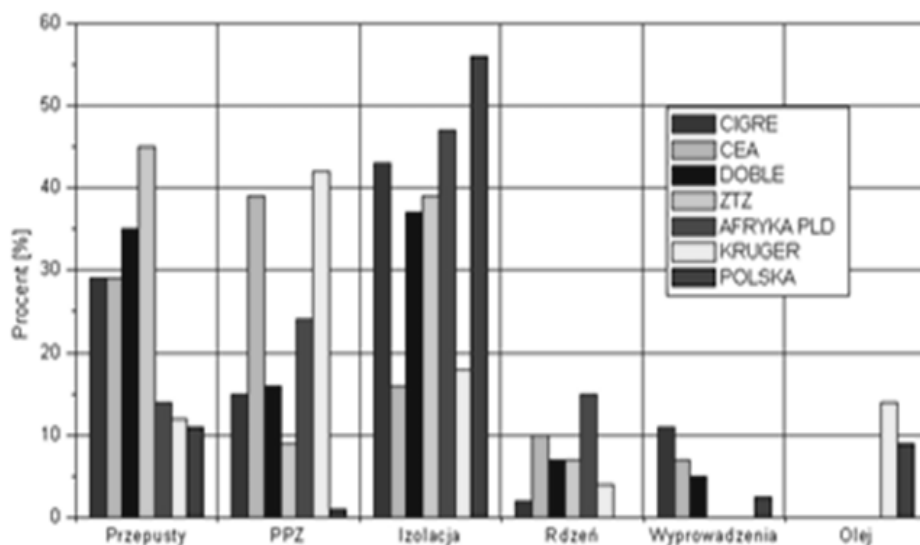
### 1. WSTĘP

Na całym świecie przedsiębiorstwa energetyczne poszukują rozwiązań nie tylko niezawodnych i bezpiecznych podczas eksploatacji transformatorów, ale także przyjaznych środowisku. Próby wykorzystania nowych materiałów elektroizolacyjnych np. papierów syntetycznych do produkcji transformatorów nie przynoszą oczekiwanego rezultatu. Z tego powodu nadal podstawowym elementem izolacyjnym jest celuloza-olej mineralny [1]. Od stanu technicznego w jakim znajduje się izolacja celulozowo-olejowa zależy bezpieczeństwo oraz opłacalność dalszej eksploatacji transformatorów energetycznych. Na rysunku 1 pokazano wyniki analizy najczęstszych przyczyn uszkodzeń transformatorów [2], które potwierdzają, że elementem najczęściej ulegającym uszkodzeniu jest układ izolacyjny.

Wzrost zawilgocenia celulozy oraz starzenie celulozy przyczynia się głównie do uszkodzenia transformatora. Jedną z metod używanych w diagnostyce izolacji celulozowo-olejowej jest częstotliwościowa spektroskopia dielektryczna (FDS; Frequency Dielectric Spectroscopy). Metoda ta polega na pomiarze i analizie zmian pojemności izolacji ( $C_{iz}$ ), współczynnika strat dielektrycznych ( $tg\delta$ ) oraz zespolonej przenikalności elektrycznej w funkcji częstotliwości napięcia pomiarowego w zakresie od  $10^{-4}$  do  $10^3$  Hz [3, 4].

---

\* Politechnika Opolska.



Rys. 1. Główne przyczyny awarii transformatorów

## 2. PROGRAM PSpice SCHEMATICS

Program PSpices Schematics pozwala przeprowadzić symulację komputerową badanych układów elektronicznych bez potrzeby stosowania w laboratorium urządzeń pomiarowych oraz podzespołów laboratoryjnych. Skomplikowane pomiary i analizy pozwalają wyszukać oraz poprawić ewentualne błędy. Dzięki zastosowaniu programu PSpices Schematics czas wykonywania symulacji ulega znacznemu skróceniu, a popełnione błędy podczas projektowania układu elektrycznego w łatwy sposób można zdiagnozować i poprawić. Przeprowadzając symulację komputerowe należy pamiętać, że działanie układu symulowanego na komputerze jest zbliżone do działania układu rzeczywistego. Możliwości PSpice Schematics pozwalają bardzo dokładnie odzwierciedlić działanie rzeczywistego układu dzięki zastosowanym w programie modelom elementów, które są bardzo zbliżone do rzeczywistych odpowiedników [5]. Dodatkowym atutem programu jest wersja PSpice Student, która jest darmowa i pozwala w warunkach domowych przeprowadzać symulację.

Po zaprojektowaniu schematu elektrycznego w PSpice Schematics można zdefiniować parametry poszczególnych elementów oraz źródeł sygnałów potrzebnych do przeprowadzenia symulacji. Każdemu z elementów można przypisać odpowiedni symbol, dzięki czemu łatwo zdiagnozować źle dobrany element lub nie odpowiednio przyłączony. Program PSpice jest jednym z najpopularniejszych symulatorów działania układów elektronicznych.

### 3. UKŁAD POMIAROWY

W laboratoryjnym układzie pomiarowym służącym do diagnostyki próbek izolacji celulozowo-olejowej metodą FDS wykorzystano miernik LCR HiTESTER 3255-50 firmy Hiok. Miernik ten pozwala na wykonywanie pomiarów w zakresie częstotliwości od  $10^{-3}$  Hz do  $10^5$  Hz przy stałym napięciu odniesienia. Dokładne cyfrowe ustawienie częstotliwości oraz stałe napięcie odniesienia pozwoliło na analizę zmian wartości współczynnika stratności ( $tg\delta$ ), pojemności ( $C_x$ ) oraz zespolonej przenikalności elektrycznej ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) próbek izolacji celulozowo-olejowej.

Próbki izolacji celulozowo-olejowej były umieszczane w metalowym naczyniu wykonanym ze stali nierdzewnej wypełnionym olejem izolacyjnym. Do pomiarów wykorzystano papier elektrotechniczny transformatorowy firmy Tervakoski. Pojedynczą próbkę stanowiły 2 paski papieru o rozmiarze 140 x 700 mm nawinięte na elektrodę niskiego potencjału. Celem zróżnicowania próbek pod względem stopnia zawilgocenia papieru, poddano je wstępnemu suszeniu w temperaturze  $120^\circ\text{C}$  w warunkach próżni. W kolejnym etapie określano masę początkową badanej próbki oraz śledzono przyrost jej wagi w wyniku migracji wilgoci z powietrza. Dzięki temu otrzymano próbki o zawilgoceniu od wartości początkowej poniżej 1%, aż do wartości 4%. Kolejnym etapem był proces impregnacji próbek olejem, w tym ustalenie równowagi hydrodynamicznej celuloza-olej oraz wytrącenie ewentualnych pęcherzyków powietrza. Ostatecznie wszystkie próbki poddawano kilkudniowemu sezonowaniu w oleju w podwyższonej temperaturze. Badania eksperymentalne zostały natomiast przeprowadzone w temperaturze od  $24^\circ\text{C}$  do  $60^\circ\text{C}$ .

Tabela 1 przedstawia dokładne oznaczenie próbek izolacji celulozowo-olejowej.

Tabela 1. Cykl przygotowania i 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) 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 ( $120^\circ\text{C}$ pod próżnią) 2 – termiczne starzenie papieru w $150^\circ\text{C}$ przez 25 h plus suszenie 3 – termiczne starzenie papieru w $170^\circ\text{C}$ przez 25 h plus suszenie				

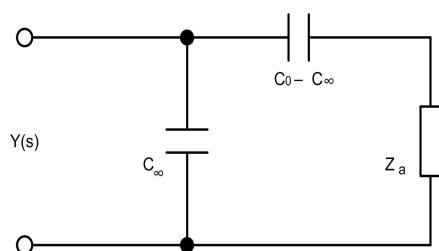
#### 4. SCHEMAT ZASTĘPCZY PRÓBEK IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ

Zastępczy schemat próbek izolacji celulozowo-olejowej można przedstawić w oparciu o model Cole-Cole, którego empiryczne równanie można zapisać w postaci [6]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (1)$$

gdzie:  $\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna,  $\varepsilon_{\infty}$  – przenikalność elektryczna materiału dla częstotliwości  $f = \infty$ ,  $\omega$  – pulsacja,  $\tau$  – czas relaksacji,  $\alpha$  – współczynnik ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ).

Analiza parametrów Cole-Cole ( $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_{\infty}$ ,  $\alpha$ ,  $\tau$ ), w postaci elektrycznego zastępczego schematu dielektryka przedstawia rysunek 2. Relaksacyjne właściwości materiału przedstawia się w postaci impedancji  $Z_a$  (2), której wartość zależy od współczynnika  $\alpha$  oraz czasu relaksacji  $\tau$ .



Rys. 2. Elektryczny schemat zastępczy dielektryka

Wzór na impedancję charakterystyczną  $Z_a$  ma postać:

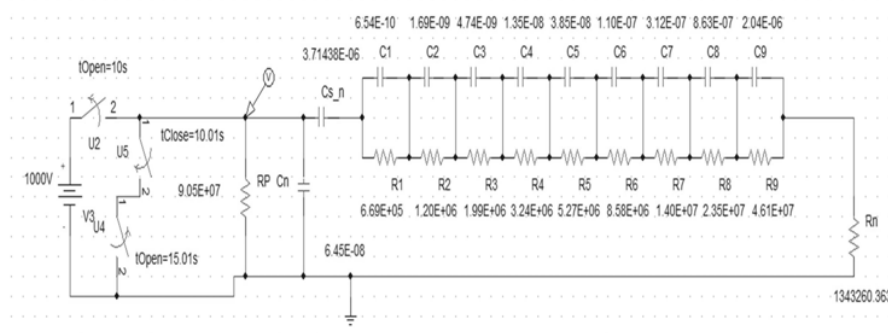
$$Z_a(s) = \frac{\tau}{(C_0 + C_{\infty})(s\tau)^{\alpha}} \quad (2)$$

Do określenia wartości stałej czasowej  $\tau$  oraz parametru  $\alpha$  wykorzystuje się charakterystykę Cole-Cole zespolonej przenikalności ( $\varepsilon' - \varepsilon''$ , metoda FDS) [3]. Dokładny sposób wyznaczenia wartości poszczególnych elementów schematu zastępczego impedancji  $Z_a$  został opisany w artykule [7].

#### 5. SYMULACJA KOMPUTEROWA

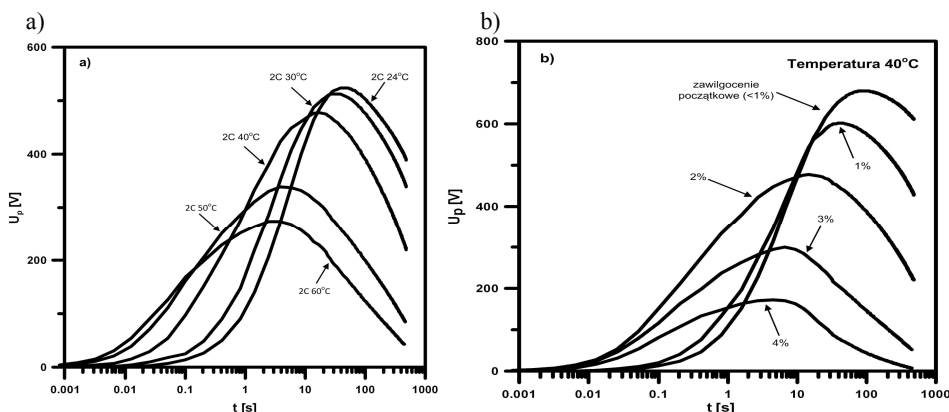
Celem przeprowadzenia symulacji komputerowej w programie PSpices Schematics było określenie stopnia oddziaływania zawilgocenia i temperatury na parametry schematu zastępczego izolacji celulozowo-olejowej. Analiza została przeprowadzona wykorzystując metodę napięcia powrotnego [8] dla przykładowo dobranego czasu ładowania 10 s oraz czasu zwarcia 5s.

Na rysunku 3 przedstawiono zaprojektowany w programie szeregowo-równoległy schemat zastępczy izolacji celulozowo-olejowej.



Rys. 3. Zaprojektowany w programie szeregowo-równoległy schemat zastępczy izolacji celulozowo-olejowej

Rysunek 4 przedstawia przykładowe charakterystyki napięcia powrotnego, otrzymane na drodze symulacji komputerowej przy wykorzystaniu schematów zastępczych.



Rys. 4. Przykładowe charakterystyki napięcia powrotnego  $U_p$  w funkcji temperatury (a) oraz zawilgocenia (b)

Analizując przedstawione na rysunkach 4a oraz 4b charakterystyki napięcia powrotnego zauważono przesuwanie się maksimum i czoła poszczególnych charakterystyk w stronę krótszych czasów w miarę wzrostu temperatury (4a) oraz maksimum w miarę wzrostu zawilgocenia (4b). Powodem przesuwania się charakterystyk w miarę wzrostu temperatury jest wzrost przewodności skrośnej badanej próbki celulozowo-olejowej, natomiast w przypadku wzrostu zawilgocenia przyczyną jest skracanie się czasów relaksacji.

## 6. WNIOSKI

Przeprowadzone symulacje komputerowe oraz badania eksperymentalne potwierdzają możliwość wykorzystania elektrycznych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej do symulacji charakterystyk napięcia powrotnego. Analiza otrzymanych charakterystyk próbek izolacji celulozowo-olejowej pozwala ocenić stan izolacji pod kątem wpływu na nią temperatury oraz zawilgocenia. Zdaniem autora, zaprojektowany na podstawie modelu Cole-Cole szeregowo-równoległy schemat zastępczy próbki izolacji celulozowo-olejowej można wykorzystać do diagnostyki transformatorów energetycznych. Oceniając stan izolacji urządzeń energetyki zawodowej należy również uwzględnić polaryzację ładunku przestrzennego na granicy faz celuloza-olej, która opisuje mechanizm Maxwella-Wagnera.

## LITERATURA

- [1] Saha T. K.: Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, V.10 No 5, 903-917, October 2003
- [2] Szrot M., Płowucha J., Subocz J.: Planowanie eksploatacji transformatorów z wykorzystaniem systemu TrafoGrade. PAK 2008 nr 11, s. 780-782.
- [3] Wolny S.: Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych. OW Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, z. 222, Opole, 2008.
- [4] Gafvert U., Adeen L., Tapper M., Ghasemi P., Jonsson B.: Dielectric spectroscopy in time and frequency domain applied to diagnostic of power transformers. 6th International Conference Properties and Applications of Dielectric Materials, vol. 2, 2000.
- [5] Porębski J., Korohoda P.: SPICE program analizy nieliniowej układów elektronicznych. WNT, 1996r.
- [6] S.T. Bishay, Numerical methods for the Calculation of Cole-Cole parameters. Egyptian Journal of Solids, vol. 23, no. 2, 2000, pp. 179-188.
- [7] Wolny S., Adamowicz A.: Analiza oddziaływania stopnia zawilgocenia oraz temperatury na parametry schematu zastępczego izolacji papierowo-olejowej wyznaczonych w oparciu o model Cole-Cole, Przegląd Elektrotechniczny, 7, 315-317, (2013).
- [8] Wolny S., Zdanowski M.: Analysis of Recovery Voltages Parameters of Paper-Oil Insulation Obtained from Simulation Investigations Using the Cole-Cole Model. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 6, 1676-1680, December 2009.

### THE USE OF THE EQUIVALENT CIRCUITS OF THE SAMPLES OF CELLULOSE-OIL INSULATION FOR THE SIMULATION OF RETURN VOLTAGE DOMAINS

The article describes one of the methods used for the diagnosis of power transformers frequency dielectric spectroscopy FDS. With the obtained measurements can determine model parameters Cole-Cole ( $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_\infty$ ,  $\alpha$ ,  $\tau$ ), which will enable the appointment of the

substitute schem elements cellulose insulation oil. Designated RC elements designed the substitute schema in PSpice Schematics program allows to carry out computer simulation. The time constants specifying the polarization relaxation mechanisms are simulated as a combination of RC elements. Relaxation mechanisms occurring in isolation diagnosed determines the number of serial RC branch connected to the scheme. The analysis of the characteristics through computer simulations allow recovery voltage assess the impact of the degree of moisture and temperature insulation cellulose-oil.

The article also presents the possibility of using a PSpice Schematics under an angle suitability characteristics obtained to analysis the voltage a return.